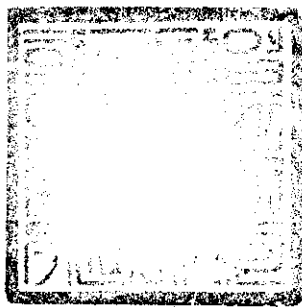


연구보고서

화학 91-081-14



폭발압력방산구에 의한 폭발·화재 방호대책에 관한 연구

1991. 12. 31



한국산업안전공단
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION
산업안전보건연구원
INDUSTRIAL SAFETY AND HEALTH RESEARCH INSTITUTE

제 출 문

한국산업안전공단 이사장 귀하

본 보고서를 “산업재해예방 연구개발”사업의 일환
으로 수행한 “폭발압력방산구에 의한 폭발·화재 방
호대책에 관한 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

1991. 12. 31

주관연구부서 : 산업안전보건연구원
화 학 연 구 실
연 구 자 : 책임연구원 정판석

목 차

제 1 장 서 론	5
I. 연구목적	5
II. 연구기간	6
III. 연구범위 및 내용	6
제 2 장 방호대책 및 폭발압력방산구 (爆發壓力放散口) 의 개요	7
I. 방호대책	7
II. 폭발압력방산구	19
제 3 장 설비의 폭발과 그 위험성	25
I. 폭 발	25
II. 기상폭발 (氣相爆發) 의 과정	26
III. 자연조건의 형성	28
IV. 발 화	34
V. 폭발에 의한 피해	35
제 4 장 폭발압력방산구의 설치를 위한 폭발강도특성 (爆發強度特性)	45
I. 폭발압력과 폭발압력상승속도	45
II. 가연성물질별 특성	48
III. 폭발강도에 영향을 미치는 요인	58
제 5 장 폭발압력방산구조의 설치 실태조사	68
I. 폭발압력방산구조의 실태조사 개요	68
II. 설비별 폭발압력방산구 설치실태	69
III. 건조 및 집전설비의 폭발·화재로 인한 중대재해 사례	72
IV. 실태조사 결과에 의한 문제점 분석	76

제 6 장 폭발압력방산구 관련 제도상의 문제점 및 대책	85
제 7 장 폭발압력방산구의 일반적인 설치기준	89
I. 폭발압력방산구의 구조	89
II. 폭발압력방산구의 설치위치	95
III. 방산유도관의 설치	97
IV. 폭발압력방산구의 면적	101
제 8 장 저강도설비 (低強度設備)에서의 폭발압력방산구 설치기준	106
I. 적용범위	106
II. 폭발압력방산구의 면적계산	106
III. 적용방법	106
IV. 방산식 상수	107
V. 설비내부 표면적 계산	108
VI. 설비의 강도	109
VII. 폭발압력방산구 면적계산 사례	110
제 9 장 고강도설비 (高強度設備)에서의 폭발압력방산구 설치기준	113
I. 적용범위	113
II. 설비 지지구조물 (Supporting Structure) 설계	113
III. 폭발압력방산구의 상관관계 파라미터	114
IV. 가스 및 용매 미스트 (Mists) 폭발의 방산	115
V. 분진 (Dusts) 폭발의 방산	128

제 10 장 길이대 직경 (L/D) 비가 큰 설비에서의 폭발압력방산구 설치기준	
.....	141
Ⅰ. 적용범위	141
Ⅱ. 적용시의 변수	141
Ⅲ. 설계지침	142
Ⅳ. 한쪽 끝에서 방산시 방산최대압력 (P_{red}) 결정	143
Ⅴ. 두개 이상의 방산구 설치기준	146
Ⅵ. 폭발압력방산구의 설치사례	148
제 11 장 결 론	152
참고문헌	155

여 백

제 1 장 서 론

I. 연구목적

건조, 집진분리, 분체수송 및 저장설비를 취급하고 있는 각종 사업장에서 가연성가스, 증기 또는 분진등으로 인한 폭발·화재가 빈번하게 발생되고 있으며, 이로 인하여 화염(火炎)으로 인한 재해는 물론 설비가 전파(全破)되면서 건물이 파괴되고 이때 발생하는 비산물(飛散物)로 인하여 중대재해는 물론 막대한 경제적 손실이 야기되고 있다.

당 연구실에서 조사한 '88년, '89년, '91년도에 발생한 폭발·화재로 인한 중대재해 자료에 의하여 건조설비로 인한 중대재해가 9건(사망자 10명, 중상자 10명), 집진설비로 인한 중대재해가 2건(사망자 3명, 중상자 8명)이었으며, 중대재해 이외의 재해와 폭발·화재로 인한 경제적 손실은 더욱 많을 것으로 추정된다. 특히 백필터(Bag Filter)등 집진설비, 버킷엘리베이터(Bucket Elevator)등 분체수송설비 그리고 사일로(Silo)등 저장설비에 있어서의 분진폭발은 목재, 곡물(穀物), 합성수지 등을 취급하는 업체에서 흔히 발생되고 있으며 옥외에 설치된 경우가 많아 인명피해는 적으나 막대한 경제적 손실이 야기되고 있으며 중대재해 발생 위험성이 아주 높은 실정이다.

이들 가연성 가스, 증기, 분진 또는 가연성물질을 취급하는 설비는 폭발·화재방지를 위한 예방대책을 강구한다 할지라도 설비의 종류, 취급물질의 종류, 작업조건 등에 따라서 완전하게 예방할 수 없는 경우가 많으며 예상하지 못한 폭발·화재는 언제나 일어날 수 있다고 보아야 한다. 따라서 폭발·화재의 위험성이 있는 설비에는 반드시 방호대책 즉 피해 억제대책이 충분히 강구되어야 한다.

실제 이들 설비의 폭발·화재로 인한 중대재해 조사결과에 의하면 대부분

재해가 폭발시의 화염과 설비의 파괴시 발생하는 비산물에 의해 발생한 재해로서 폭발압력방산구(爆發壓力放散口) 등의 방호장치가 완벽하게 설치되어 있었다면 중대재해는 물론 설비의 파손등으로 인한 막대한 경제적 손실등을 충분히 방지할 수 있었을 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 방호장치 중 가장 경제적으로 설치가 가능한 폭발압력방산구에 관한 연구를 수행하여 재해방지에 기여하고자 한다.

Ⅱ. 연구기간

1991년 1월~1991년 12월

Ⅲ. 연구범위 및 내용

본 연구에서는 가연성가스, 증기 또는 분진등이 발생하는 각종·건조설비, 가연성 분진을 취급하거나 취급시 분진이 발생하는 백필타, 사이클론등 집진분리설비, 버킷엘리베이터등 분체수송설비, 호퍼(Hopper), 사일로, 빈(Bin)등 저장 및 계량설비 그리고 이들 설비에 부착된 파이프, 닥트류등은 특히 폭발·화재의 위험이 높은 바 이들 설비를 취급하는 사업장을 중심으로 폭발압력방산구의 설치현황과 문제점을 조사 분석하였으며, 폭발압력방산구에 대한 외국의 각종 실험결과와 논문등 자료, 설계에 필요한 각종 폭발특성 자료등을 수집조사하여 국내 사업장 실정에 적절하게 적용할 수 있는 설치기준등 기술적인 지침을 마련하고 또한 폭발압력방산구의 설치에 관한 제도상의 문제점을 지적하여 보완할 수 있도록 제시하고자 하였다. 이 연구결과를 근거로 하여 설비 제작업체에서 폭발압력방산구를 완벽하게 설계할 수 있도록 함은 물론 당 공단에서 실시하는 사전안전성심사나 사업장에 대한 기술지도시에 이 연구결과를 활용 할 수 있도록 하고자 한다.

제 2 장 방호대책 및 폭발압력방산구(爆發壓力放散口)의 개요

I. 방호대책(防護對策)

1. 방호대책의 필요성

건조, 집진분리, 분체수송 및 저장설비등에서 가연성가스, 증기 또는 분진등으로 인한 폭발·화재를 방지하기 위하여 예방대책(豫防對策)을 강구한다 할지라도 설비의 종류, 취급 물질의 종류, 작업조건등에 따라서는 완전하게 예방할 수 없는 경우가 많이 있다. 특히 위험물건조설비나 가연성분진이 발생되는 건조, 집진, 분체수송 및 저장설비 등에서 내부의 농도를 폭발하한계 이하로 완전하게 억제할 수 없으며, 또한 점화원(點火源)을 배제한다고 하여도 예기치 않은 점화원의 발생등으로 폭발·화재는 언제나 야기될 수 있다고 보아야 한다.

건조설비에 있어서의 폭발·화재에 대한 방호조치로서 산업안전기준에 관한 규칙 제 301 조에 “위험물건조설비중 건조실(乾燥室)을 설치하는 건축물의 구조는 독립된 단층 건물로 하여야 한다. 다만 당해 건조실을 건축물의 최상층에 설치하거나 건축물이 내화구조인 때에는 그러하지 아니하다”로 규정되어 있고 제 302 조 3, 4 항에 “위험물건조설비의 측벽이나 바닥은 견고한 구조로 하여야 하고 그 상부를 가벼운 재료로 만들고 주위사항을 고려하여 폭발구(爆發口)를 설치할 것” 그리고 8 항에 “건조설비의 감시창, 출입구 및 배기구등과 같은 개구부는 발화시에 불이 다른 곳으로 번지지 아니하는 위치에 설치하고 필요한 때에는 즉시 밀폐할 수 있는 구조로 할 것”으로 규정되어 있다.

또한 화학설비에 있어서는 안전기준에 관한 규칙 제 288 조에 대기압 이상

으로 운전되거나 이상화학반응 기타의 이상사태로 인하여 내부의 기체압력이 대기압을 초과할 우려가 있는 화학설비에는 안전밸브 또는 이에 대처할 수 있는 방호장치를 설치하도록 규정하고 있는 바 분체화학물질을 취급 및 분리하는 장치에는 기타의 이상사태 즉 폭발등에 대비하여 폭발압력방산구가 설치되어야 한다.

방호대책은 만일의 경우 폭발·화재가 발생하였을 때 근로자 뿐만 아니라 설비의 파괴를 방지함으로서 물적(物的)손실을 억제시킬 수 있다. 대부분의 폭발사고는 설비가 전파(全破)되면서 건물을 파괴시키고 이들 파편이 피해를 확대시키고 있다. 따라서 설비에 방호장치 즉, 폭발압력방산구등을 설치함으로서 인명을 보호하고 설비의 파괴를 방지할 수 있는 바 예방대책은 물론 방호대책 수립에도 각별한 관심을 가져야 할 것이다.

2. 설비에 대한 방호대책

설비내부에서 폭발을 방지할 수 없는 경우에는 폭발로 인한 영향을 최소화하기 위한 대책수립이 반드시 고려되어야 한다. 흔히 설비내부에서의 폭발은 폭발에 의한 압력상승으로 설비를 전파시키거나 내용물이 분출되면서 흔히 2차적인 폭발을 야기시키는 경우가 있다. 설비의 구조적 방호수단은 폭발을 사전에 예방하는 것이 아니라 만일의 경우 폭발이 발생될 것에 대비하여 설비가 예상되는 폭발압력에 충분히 견딜 수 있게 설계제작하는 방법, 이상압력이 발생할 경우 내압강도(耐壓強度) 이하에서 이 압력을 안전하게 방출하는 방법, 압력상승을 초기에 억제하는 방법 그리고 폭발압력 또는 화염전파를 방지하는 방법등을 적용하여 폭발로 인한 피해확대를 방지하는 방법이다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 내폭설계(耐爆設計, Explosion-Proof Design)

폭발압력효과에 대한 안전조치로서 예상되는 폭발압력에 견딜 수 있도록

설비를 설계하는 것으로서 이 경우는 설비에 연결된 각종 부속설비로 동일한 내압강도를 가져야 한다. 이와 같이 설비를 내부에서 발생한 폭발압력에 견딜 수 있도록 강고하게 제작하면 제작비용은 높으나 피해를 설비내부로 제한할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 이러한 강고한 설비가 파괴된다면 주위에 미치는 피해도 크게 되므로 충분한 안전율을 갖도록 해야 한다. 일반적인 경우 그 설계강도는 예상되는 최대폭발압력(Maximum Explosion Pressure)에 안전계수로서 50%를 더 가산한 값을 근거로 한다.

내폭설계(耐爆設計)를 위해서는 장치내에 발생하는 압력데이터가 필요하며, 각종 가연성가스, 증기 및 분진에 대한 최대폭발압력은 밀폐된 용기에서 실험된 데이터를 이용한다. 공기와의 혼합물에서 최소압력이 대기압인 경우 최대폭발압력은 대부분 $6 - 8 \text{ Kg/cm}^2$ 정도로서 10 Kg/cm^2 를 초과하는 경우는 적다.

(2) 폭발압력방산(爆發壓力放散, Explosion Pressure Relief)

일반적으로 밀폐된 용기, 장치류, 배관등에서 이상압력을 방출하기 위한 안전장치로서 안전밸브(Safety Valve), 파열판(Rupture Disk)등을 설치한다. 그러나 폭발압력을 방출하기 위해서는 폭발압력방산구를 설치하여야 한다. 즉 안전밸브는 설비가 운전압력보다 높아지는 경우에 이상 압력을 제거하기 위하여 자동으로 압력을 방출시키는 밸브로서 폭발이나 단시간에 큰 압력이 발생하는 경우에는 적용할 수 없다. 그리고 파열판은 고압용기등에 설치하는 안전장치로서 용기내에서 이상압력이 발생한 경우 용기의 내압력(耐壓力)보다 낮은 압력에서 파열판이 파열되면서 내압력을 급격하게 방출하는 장치로서 안전밸브와 달리 한번 파열시 내용물을 방출, 대기압까지 내압을 방출시키는 장치이다. 그러나 폭발압력방산구는 폭발위험이 있는 장치나 설비 그리고 이들이 설치된 건물등에 설치함으로서 내부에서 폭발이 발생된 경우 그 압력과 화염을 외부 안전한 곳으로 방출시킴으로서 설비나

설비를 설계하는 것으로서 이 경우는 설비에 연결된 각종 부속설비로 동일한 내압강도를 가져야 한다. 이와 같이 설비를 내부에서 발생한 폭발압력에 견딜 수 있도록 강고하게 제작하면 제작비용은 높으나 피해를 설비내부로 제한할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 이러한 강고한 설비가 파괴된다면 주위에 미치는 피해도 크게 되므로 충분한 안전율을 갖도록 해야 한다. 일반적인 경우 그 설계강도는 예상되는 최대폭발압력(Maximum Explosion Pressure)에 안전계수로서 50%를 더 가산한 값을 근거로 한다.

내폭설계(耐爆設計)를 위해서는 장치내에 발생하는 압력데이터가 필요하며, 각종 가연성가스, 증기 및 분진에 대한 최대폭발압력은 밀폐된 용기에서 실험된 데이터를 이용한다. 공기와 혼합물에서 최소압력이 대기압인 경우 최대폭발압력은 대부분 $6 - 8 \text{ Kg}f/cm^2$ 정도로서 $10 \text{ Kg}f/cm^2$ 를 초과하는 경우는 적다.

(2) 폭발압력방산(爆發壓力放散, Explosion Pressure Relief)

일반적으로 밀폐된 용기, 장치류, 배관등에서 이상압력을 방출하기 위한 안전장치로서 안전밸브(Safety Valve), 파열판(Rupture Disk)등을 설치한다. 그러나 폭발압력을 방출하기 위해서는 폭발압력방산구를 설치하여야 한다. 즉 안전밸브는 설비가 운전압력보다 높아지는 경우에 이상압력을 제거하기 위하여 자동으로 압력을 방출시키는 밸브로서 폭발이나 단시간에 큰 압력이 발생하는 경우에는 적용할 수 없다. 그리고 파열판은 고압용기등에 설치하는 안전장치로서 용기내에서 이상압력이 발생한 경우 용기의 내압력(耐壓力)보다 낮은 압력에서 파열판이 파열되면서 내압력을 급격하게 방출하는 장치로서 안전밸브와 달리 한번 파열시 내용물을 방출, 대기압까지 내압을 방출시키는 장치이다. 그러나 폭발압력방산구는 폭발위험이 있는 장치나 설비 그리고 이들이 설치된 건물등에 설치함으로써 내부에서 폭발이 발생한 경우 그 압력과 화염을 외부 안전한 곳으로 방출시킴으로서 설비나

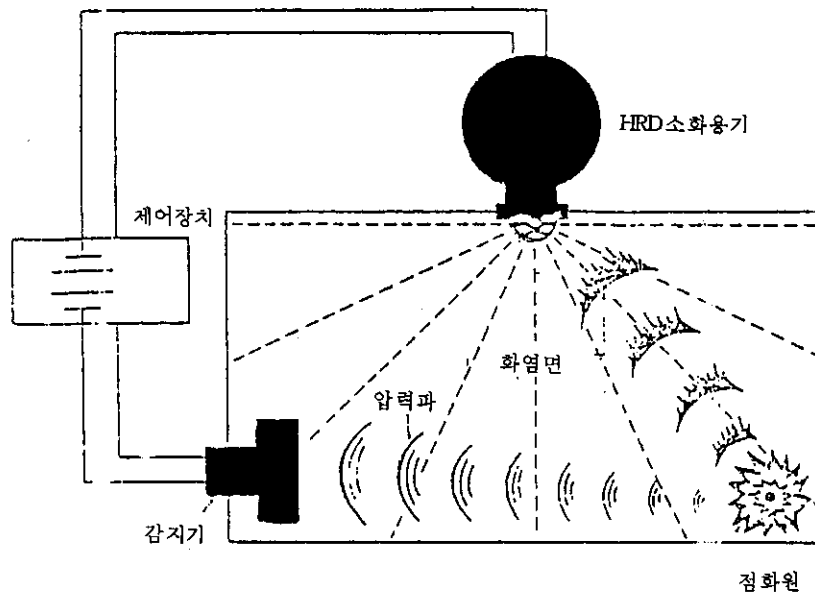
건물의 파괴를 방지하고 압력과나 비산물, 화염등으로 인한 피해를 억제하는데 이용되는 장치로서 원리는 파열판식 안전장치와 같으나 구조, 기능, 응용범위등에 있어서 차이가 있으며 다른 압력방출장치에 비하여 방출량이 크기 때문에 특히 폭발방호에 적절하다. 폭발압력방산구는 내폭구조설계나 폭발억제장치에 비하여 설치가 용이하고 설치비용이 적기 때문에 적절하게 설치 이용함으로써 피해확대를 방지할 수 있는 방호수단이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서도 이를 중심으로 연구하고자 한다.

(3) 폭발억제 (爆發抑制, Explosion Suppression)

폭발압력방산구는 설비나 건물등의 파괴를 방지할 수 있으며 설치비용도 저렴하나 파열음 (破裂音)이 발생되며 화염 (火炎)이나 미연소물질 (未燃燒物質) 등이 대기중에 방출되는 결점이 있다. 이에 비하여 폭발억제장치 (Explosion Suppression System)는 폭발에 의한 압력상승 그 자체를 정지시키는 이점이 있으나 설치비용이 고가이다. 폭발억제장치는 설비내부에서 발생한 가연성물질의 연소 또는 폭발을 감지하여 파괴적인 압력이 발생하기 이전에 억제제 (抑制劑)를 방출하여 화염을 소화억제함으로써 폭발의 확대를 저지, 설비의 파괴를 방지하는 자동소화 (自動消火) 시스템이다. 이 시스템은 [그림 1-1]과 같이 감지기 (感知器), 억제제와 용기 그리고 제어장치 (制御裝置)로 구성되어 있다. 미국에서는 미방화협회 (NFPA)가 1970년 National Fire Code No 69 "Explosion Prevention System"으로 규정하고 있으며 최근 외국에서는 많이 사용되고 있다.

(4) 화염과 폭발 전파방지 (Prevention of Flame and Explosion Propagation)

일반적으로 장치나 설비는 배관 또는 덕트등으로 연결되어 있으며, 특히 분진이 발생하는 설비에는 집진설비등이 부속되어 있는 경우가 많다. 이 경우에 설비의 어느 부분에서 폭발이 발생되면 폭압과 화염이 다른 부속설비



〔 그림 1 - 1 〕 폭발억제장치의 작동원리

등으로 배관이나 덕트등을 통하여 전파되면서 대형폭발사고가 발생 될 우려가 높다. 배관내에서 발화하면 일반적으로 시간의 경과에 따라 그 전파속도는 증가하고 조건에 따라서는 폭굉 (Detonation)으로 전이하는 경우도 있다. 이 결과로 배관계가 파괴되고 대부분의 경우 배관에 접속된 장치등의 약한 부분이 파괴되어 큰 피해를 발생시킨다.

특히 다음과 같은 경우에는 이와 같은 격리장치 (Isolation Devices)의 설치를 고려하여야 한다.

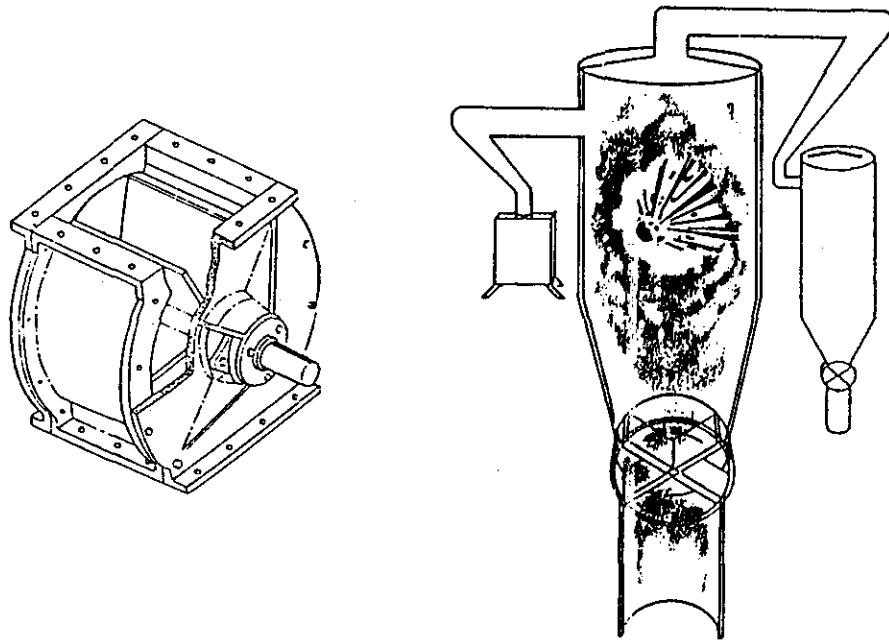
① 내폭구조 등으로 설계되지 않은 즉 방호되지 않은 설비의 각부는 폭발위험이 있는 설비 즉 방호된 설비로 부터 격리되어야 한다.

② 설비가 긴 배관 또는 덕트로 연결된 경우 화염분출점화 가능성이 나 고압으로 인한 위험을 고려하여 큰 설비에서 작은 설비로 충전시 혹은 비교적 고강도 설비가 저강도 설비에 연결된 때에 격리되어야 한다.

전파방지는 회전밸브(Rotary Valve), 소화차단기(Extinguishing Barrier), 고속작동밸브(Rapid-Action Valve) 혹은 릴리프 파이프(Relief Pipe) 등이 주로 사용되고 있다.

1) 회전밸브(Rotary Valve)

폭발방호된 설비에 회전밸브를 설치하면 폭발로 인한 폭발화염이나 미연소 물질이 방출되어 전파되는 것을 기계적으로 차단함으로써 피해확대를 방지하는 장치이다. 일반적으로 [그림 1-2]와 같이 양측면에 각기 2개의 날개깃(Blades)을 갖고 날개깃 혹은 스트리퍼(Strippers)는 금속으로 만들어지며 날개깃과 하우징(Housing)사이의 간격은 0.2 mm로 한다. 특별한 경우에는 양측면에 각기 한개의 날개깃을 설치하는 경우도 있다. 날개깃과 하우징사이의 간격은 가연성가스에도 동일하다.

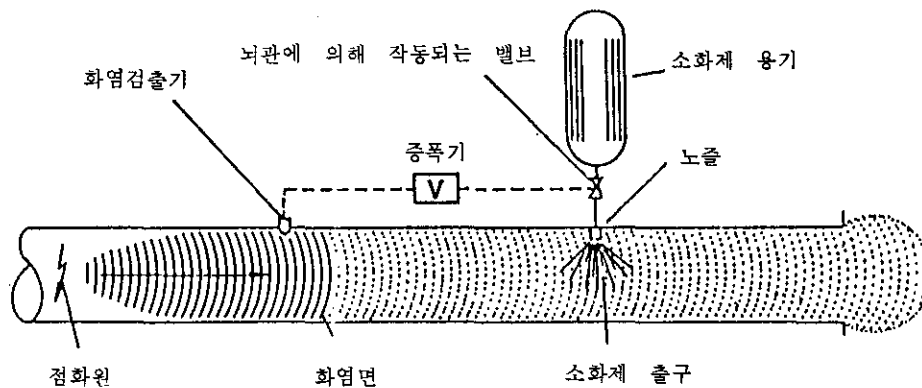


[그림 1-2] 회전밸브(Rotary Valve)와 그 설치 예

2) 소화차단기 (Extinguishing Barrier)

소화차단기는 [그림 1 - 3] 과 같이 폭발로 인한 화염을 검출기가 검출하여 증폭기 (Amplifier) 를 경유 뇌관을 작동함으로서 소화제용기의 밸브를 열어 화염전파를 억제한다. 질소등 분사체가스에 의해 소화제가 배관이나 덕트에서 msec이내에 확산되게함으로서 화염을 소화 차단시킨다.

화염전파속도에 따라 다르나 검출기와 소화제용기의 거리는 대개 5-10m 정도로서 폭발이 발생한 후 즉시 이를 검출하여 소화가 가능한 거리여야 한다. 소화제의 양은 가연성분진의 종류와 형태, 예상되는 화염전파속도에 따라 방호되어야 하는 배관이나 덕트의 직경등에 따라 달라질 수 있다.



[그림 1 - 3] 자동소화차단기의 작동원리

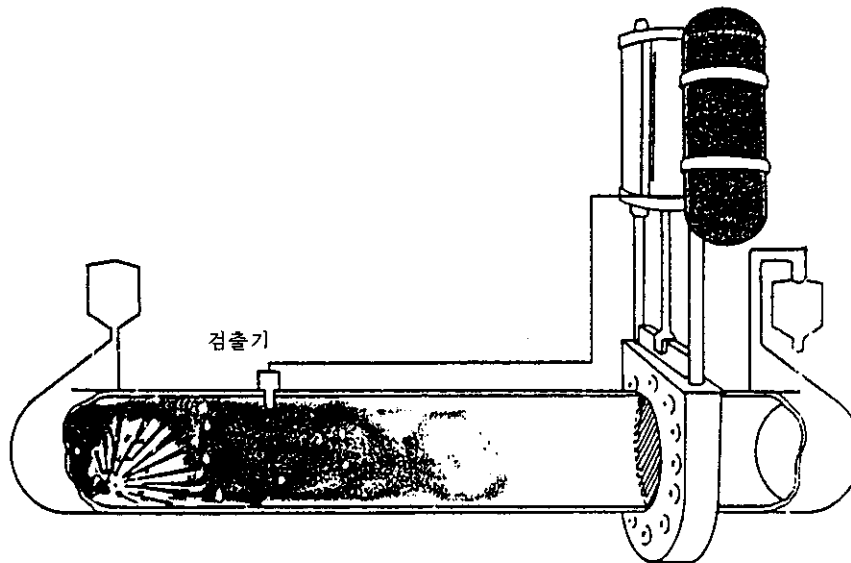
3) 고속작동밸브 (Rapid - Action Valve)

고속작동밸브에는 고속작동슬라이드밸브 (Rapid - Action Slide Valve), 고속작동플랩 (Rapid - Action Flaps), 고속작동배리어밸브 (Rapid - Action Barrier Valve) 등이 있다. 고속작동슬라이드밸브는 [그림 1 - 4] 와 같이 파이프 단면의 외부에 설치된다. 이는 운전상 어떠한 장애

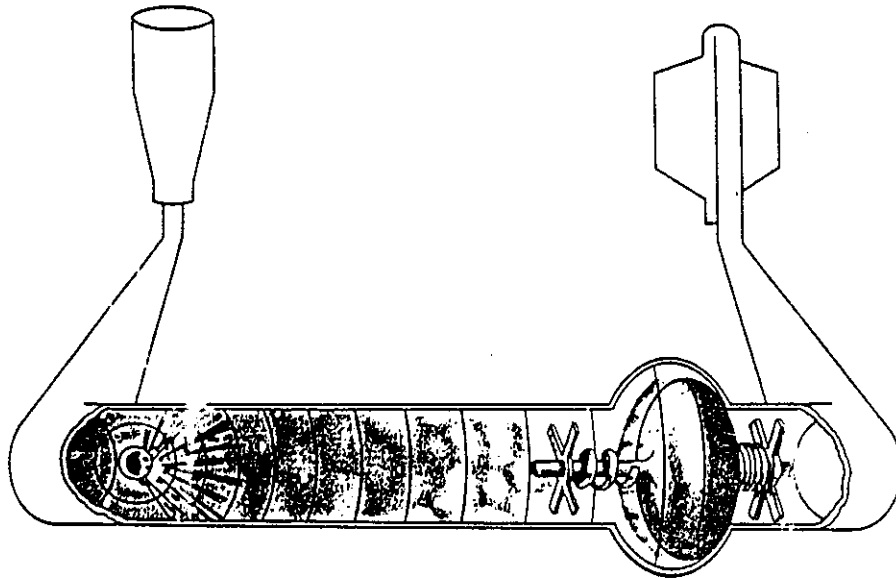
도 주지 않으며 포켓(Pockets)등이 없이 설치가 가능하여 분진등의 누적이 없다. 이들 밸브의 하우징(Housing)은 철, 주철 혹은 알루미늄 다이캐스팅으로 만들어지며 슬라이드 플레이트는 짧은 순간적인 작동을 위하여 가벼운 고인장력물질로서 제조한다.

중요한 것은 폭발발생 검출기와 고속작동장치의 설치위치 사이에는 일정한 거리가 유지되게 하여야 하는데 이것은 폭발속도와 차단시간에 준하여 결정된다. 가능한 차단시간은 짧아야 하며 보통 50 msec이하이다.

고속작동베리어밸브는 [그림 1 - 5]와 같이 배관등의 내부유속이 일정 한계 이상을 초과할 때 작동되는 것으로 밸브를 차단시키는 데 필요한 유속은 폭발이 일어난 경우에 한한다. 이 밸브는 폭발의 물리적인 부하를 견딜 수 있을 때 사용가능하며 폭발로 인한 화염전파를 방지하기 위하여 사용된다.



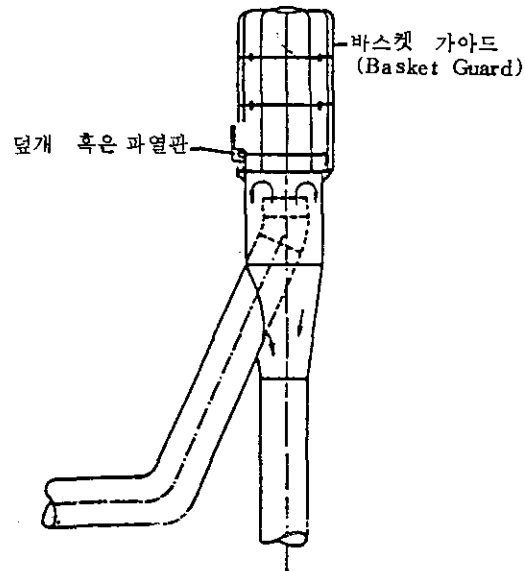
[그림 1 - 4] 고속작동슬라이드밸브 설치 예



[그림 1 - 5] 고속작동베리어밸브 설치 예

4) 릴리프 파이프 (Relief Pipe)

릴리프 파이프는 [그림 1 - 6]과 같이 파이프라인의 한 부분으로 구성되며, 덮개와 파열판이 대기로 부터 파이프를 차단하기 위하여 사용된다. 흔히 폭발전환기 (Explosion Diverter)라고도 한다. 방출장치가 개방되면서 동시에 폭발압력이 방출되어 180°로 흐름방향을 변화시킴으로서 폭발의 전이를 방지한다. 근본적으로 방출은 비위험지역 즉 작업장이나 통로가 아닌 곳으로 행해져야 하며, 특히 취급물질이 독성이거나 부식성인 물질의 경우에는 더욱 유의해야 한다.



[그림 1 - 6] 릴리프 파이프 (Relief Pipe) 구성도

3. 설비의 주위환경에 대한 방호대책

폭발이 야기된 경우 폭발의 피해를 장치내로 국한하거나 근접장소로 제한함으로써 예상외의 폭발로 인한 최악의 사태를 방지하기 위하여서는 피해확대 방지에 대한 대책이 요망된다. 이를 위하여 고려되어야 할 사항은 다음과 같다.

(1) 입지조건(立地條件)

폭발이 발생된 때 피해를 최소로 억제하기 위해서는 입지조건에 대한 고려도 요망되는 바 주요한 관점은 지형, 지반(풍향, 지반침하등), 자연현상(지진, 홍수, 태풍, 벼락등) 및 주위환경등을 고려하는 것이다. 예로서 지진에 의하여 위험한 장치등이 파괴됨으로서 가연물이 누출되어 폭발, 화재가 발생할 수도 있으며, 주변환경에 대해서는 주택지역과 학교등 공공시설이나 주요도로등으로 부터의 거리등도 충분히 고려되어야 한다. 국내의 경우

소방법에서 부분적으로 공공시설과의 이격거리를 규정해 두고 있다.

(2) 플랜트(Plant)의 배치

위험성 조사결과를 충분히 검토하여 설비, 장치, 건물등의 배치를 적절하게 하여야 한다. 설계시는 다음 사항이 고려되어야 한다.

1) 폭발·화재 위험성이 높은 설비는 옥외에 설치하고 옥내에 설치하는 경우에는 옥외에 접한 곳에 배치하여 폭발압력방산구를 설치하여야 한다. 작업공정상 옥외에 접한 곳에 설치가 불가능한 경우는 폭발압력방산용 유도덕트(방산유도관)을 설치하여 외부 안전한 곳으로 방출할 수 있는 구조로 하여야 한다.

2) 폭발을 일으키는 발화원의 양과 방출에너지 양을 제한함으로써 폭발이 플랜트 전체에 확대되는 것을 방지하기 위하여 플랜트의 유니트를 분리한다.

3) 가능한 한 설비를 독자적인 건물내에 설치하여 상호간에 충분한 거리를 확보하고 위험성이 큰 조작을 행하는 경우는 방호벽(防護壁)등으로 격리한다.

4) 공장 주위의 도로나 민가에 대한 폭발시의 위험도를 고려하여 설계 배치하여야 한다.

국내법규중 공장의 배치 계획과 시설간의 이격거리를 규정하고 있는 법규는 소방법의 소방시설에 관한 규칙과 고압가스안전관리법이 있으며 부분적으로 이에 관하여 규정하고 있으나 최근 산업안전보건법의 개정에 따라 화학설비 및 시설의 안전거리 기준에 관한 기준이 제정(1991.1.3 고시 제 90-89호)되어 적용되고 있다.

(3) 위험한 작업, 공정 및 장치의 무인화(無人化)

폭발에 의한 인적손실을 피하기 위해서는 위험한 장치 주변에 작업자를 가능한 배치하지 않아야 한다. 특히 위험한 장치류는 방호벽에 의하여 격리하거나 장치를 자동화하여 원격조작(遠隔操作)에 의한 무인화와 장치의 내부 및 주위에 위험한 상태가 확인되지 않는 한 작업자가 장치에 접근할

수 없도록 인터록장치를 설치하는 것이 바람직하다.

(4) 방호벽 (防護壁)

방호벽은 폭발, 비산물 및 고온분출물에 의한 피해를 방지할 수 있으나 무엇보다도 비산물에 대한 방호가 가장 중요한 것으로 폭발에 의해 파괴된 장치류의 부품, 부속물 및 파편등에 의한 위험을 방지할 수 있어야 한다. 방호벽의 구조, 재질, 길이 및 폭발이 있는 장치로부터의 거리는 폭발의 위력과 비산물의 유무에 따라서 달라질 수 있으며 각각의 장치에 따라서 문헌을 참고하여 선택하여야 한다. 흔히 철근 콘크리트벽이 방호벽으로 광범위하게 사용되고 있으며 충격에 대한 항력(抗力)은 벽 두께의 2승에 비례하는 것으로 되어 있지만 철근의 길이나 양등에 따라 달라지고 두께가 15~30 cm 정도이면 가스폭발에 대한 방호벽으로 사용가능하다. 방호벽은 폭발에 의해 전체적으로 도괴(倒壞)되지 않도록 하여야 하며 만일의 경우에 대비하여 벽의 도괴에 의한 영향을 받을 수 있는 범위내에는 작업자나 장치를 배치하지 않도록 하여야 한다.

(5) 설비의 내화(耐火)

위험물을 취급하는 지역의 구조물과 장치등은 화재가 발생시 일정 시간동안 변형을 일으키지 않도록 함으로서 대형사고로 확산되는 것을 방지할 수 있다. 특히 화학공장에서는 주요부분(구조물, 장치등의 지지물)에는 내화구조로 하여야 한다. 철재류등 금속성인 구조는 열을 받게 되면 강도가 급격히 떨어지게 됨으로 철재표면의 온도가 450℃까지 상승되지 않도록 처리하여야 한다. 국내의 경우 건축법에서 건축물에 대하여는 규정이 있으나 사업장내의 구조물이나 위험설비에 대해서는 규정이 없었기에 산업안전보건법의 개정과 관련하여 위험물 취급설비에 대한 내화기준이 제정될 예정이다.

주위환경에 대한 방호대책으로서는 이 외에 블로우다운(Blow Down) 시스템, 가연물의 양을 감소하는 방법, 긴급시 대책등이 마련되어야 한다.

Ⅱ. 폭발압력방산구 (爆發壓力放散口)

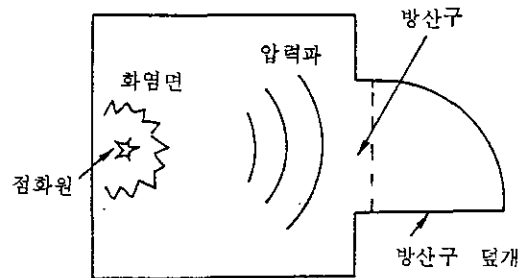
1. 폭발압력방산구의 정의

폭발압력방산구는 폭발압력방출장치로서 Explosion Relief Vents, Deflagration Vents 등으로 표기되고 흔히 폭압방산구, 폭발구등으로 불리어 지고 있으며, 각종 설비나 건물등에 설치함으로서 내부에서 폭발이 발생된 경우 그 압력과 화염을 외부 안전한 곳으로 방산시켜 설비나 건물등의 파괴를 방지하고 압력과 (壓力波)나 비산물 (飛散物) 등에 의한 피해를 억제할 수 있는 방호장치의 일종이다.

원리는 파열판 (破裂板, Rupture Disk) 식 안전장치와 같으나 구조, 기능, 응용범위등에서 차가 있어 일반적으로 구분되며, 폭발압력방산구는 다른 압력방출장치에 비하여 방출량이 크기 때문에 특히 폭발에 대한 방호에 적절하다.

2. 폭발압력방산구의 원리

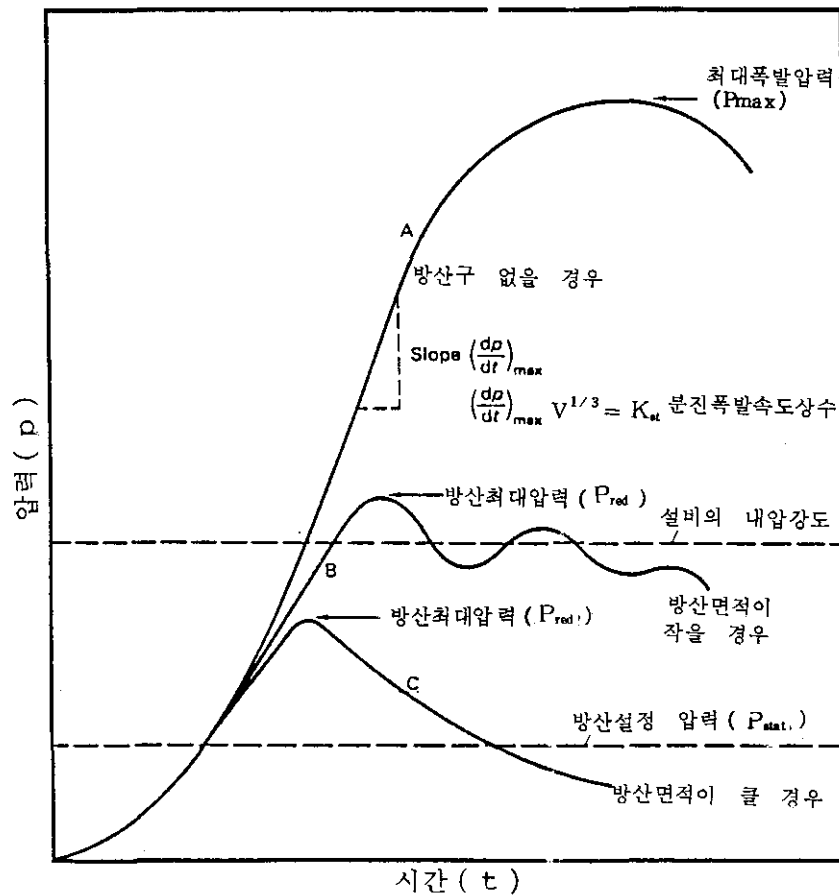
설비의 한 면에 하부를 경첩등으로 고정한 방산구 덮개로서 방산구를 덮은 경우 (그림 1-7)를 예로서 설명한다.



[그림 1 - 7] 방산구의 모델

먼저 방산구 덮개가 열릴 때의 정압 (靜壓 : 설정압력) P_{stat} 와 장치의 내압 (耐壓) 관계를 보면 장치내의 혼합가스 폭발로 내압 (內壓)이 상승하면 방산구 덮개는 작동하고 동압 (動壓 : 폭발압력)을 받을 때의 작동압은 방산구 덮개의 관성으로 P_{stat} 보다 크게된다. 그리고 내부압력이 P_{stat} 에 달한 시점에서 방산은 되지만 압력은 다시 상승한다. 이것은 [그림 1 - 8] 과 같이 장치가 P_{stat} 보다 높은 압력에 견딜 수 있어야 한다는 것을 의미한다.

또 개구부가 열렸다고 하여도 장치내에서는 폭발이 계속되므로 방산면적이 작아서 내부압력의 상승속도가 압력의 방출속도를 상회하게 되면 장치의 전체적인 파괴가 야기될 수 있다. 따라서 방산구 덮개는 동압에 의해서 용이



[그림 1 - 8] 방산구의 설치유무에 따른 폭발압력-시간특성곡선

하게 열리고 방산면적도 충분히 큰것이 중요한 조건으로 된다.

즉 [그림 1 - 8]에서 P_{stat} 에 달한 시점에서 방산은 되지만 압력은 상승하게 되는 데 방산구의 면적이 작은 경우에는 이 압력이 설비의 내압강도 (耐壓強度) 를 초과하게 되어 설비가 파괴되며, 방산구의 면적이 큰 경우에는 이 상승압력이 설비의 강도 보다도 낮기 때문에 설비가 보호될 수 있다.

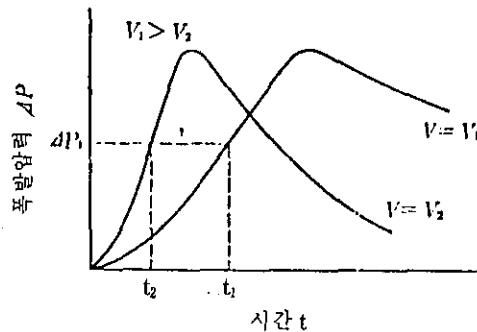
다음은 주변의 방호라는 관점에서 방산구의 작동시 기체의 거동을 살펴보면, [그림 1 - 7]에서 점화원의 위치가 방산구로부터 멀면 화염이 장치내 전체에 확대되기 이전에 화염전방의 미연소가스는 대기중에 유출하고 장치내부의 폭발이라는 관점에서는 가연물의 양적인 감소를 가져오기 때문에 안전하나 방산구 주위의 대기중에서 폭발이 일어날 수 있는 위험성이 있다. 점화원의 위치가 방산구에 가까우면 연소생성 가스가 대기중으로 분출하게 되고, 방산면적이 크면 압력상승은 크지 않다. 그리고 연소생성 가스가 분출되기 때문에 미연소가스로 인한 방산구 주위에서의 폭발은 야기되지 않는다. 그러나 장치내외부의 기체 거동은 실제 장치내부로의 대기 유입도 병행하여 일어남으로 장치의 모양, 크기, 내부구조, 혼합가스의 종류, 점화원의 위치 등에 따라서 아주 복잡하다. 이것을 고려한 이론적해석도 시도되고 있으나 여기서는 단순한 모델로서 압력방산구에 영향을 주는 주요한 요인만을 설명한다.

방산구를 설치한 밀폐장치내에서 초압이 대기압으로 혼합된 가스가 폭발한 경우의 압력상승은 방산구가 작동하기 까지 다음식으로 나타낸다.

$$\Delta P = K_0 s^3 t^3 P_{max} / V \quad (단, \Delta P \leq P_{max}) \dots\dots\dots (1-1)$$

이 식은 구상 (球狀) 용기의 중심에서 정지된 혼합가스가 폭발하는 조건하에 유도된 식으로서 길이대 직경 (L/D) 비가 1 에 가까운 원동상장치나 입방체에 가까운 장치에 있어서도 근사적으로 성립할 수 있다. 이 식에서 ΔP 는 발화후의 시간 t 에 있어서의 압력, K_0 는 정수, s 는 반경방향의 화염속도 (火炎速度), V 는 장치의 내용적, P_{max} 는 밀폐하에서의 최대폭발압력을 나

타낸 것이다. s 가 폭발중에 일정하다고 가정하면 어떤 장치에 있어서는 $\Delta P = K_1 t^3$ (K_1 은 정수)가 된다. 방산구가 열리기까지의 시간이 짧으면 ΔP 는 작은 값으로 억제될 수 있으며, 특히 P_{max} 가 V 에 영향을 받지 않는다고 하면 어떤 압력에 달하기까지의 시간 t 는 $t = K_2 V^{1/3}$ (K_2 는 정수)로 나타낸다. 내용적이 V_1 과 V_2 인 장치에 있어서 각기 어떤 일정 압력에 달하기까지의 시간을 t_1, t_2 라 하면 $t_1/t_2 = (V_1/V_2)^{1/3}$ 이 된다. 이 식은 같은 압력에서 작동하는 압력방산구를 설치한 때 작동까지의 시간은 V 가 작을수록 짧아지지 않으면 안된다는 것을 의미한다. 이와 같은 관계를 [그림 1-9]에 나타내었다. 그림은 또한 s 가 일정하면 V 가 클수록 승압속도($\Delta P/t$)가 감소하는 것을 나타낸다. 그리고 장치의 내용적이 같으며 혼합가스의 종류가 다른 경우에 s 가 ΔP 미치는 영향은 P_{max} 가 같다면 $\Delta P = K_3 s^3 t^3$ (K_3 는 정수)로 나타낸다. 화염속도가 클수록 폭발압력은 크게 된다. 방산구덮개의 관성을 고려할 경우 동일 구조의 방산구라하면 승압속도가 작은 쪽이 작동이 쉬운 것으로 화염속도가 큰 가스에 적용하는 방산구를 화염속도가 작은 가스에 대해 적용하여도 위험은 없다.



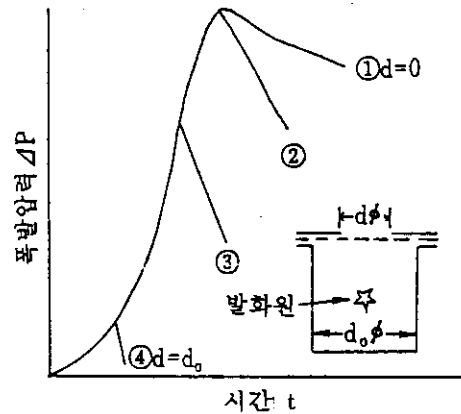
[그림 1-9] 장치의 내용적과 폭발압력파형
(爆發壓力波形)-방산구의 응답성

3. 방산구의 면적 (面積)에 대한 폭발압력

방산구의 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 방산구의 면적으로서 이는 주로 다음과 같은 여러 인자에 영향을 받는다.

- ① 설비의 강도 (Strength)
- ② 폭발의 격렬성 (Severity)
- ③ 방산구의 작동압력 (설정압력)
- ④ 방산구의 형식
- ⑤ 설비의 부피와 모양
- ⑥ 방산유도관 (Relief Ducts)의 길이 (설치시에 한함)
- ⑦ 설비내부의 난류 (Turbulence) 상태 등

여기서는 먼저 방산구 면적에 대한 폭발압력과 시간과의 관계만을 설명하고자 한다. [그림 1-10]에서 $d_o\phi$ 는 장치의 단면적이고 $d\phi$ 는 방산면적을 나타내며, 곡선 ①은 $d\phi = 0$, 곡선 ②는 $d\phi \ll d_o\phi$, 곡선 ③은 $d\phi < d_o\phi$ 그리고 곡선 ④는 $d\phi = d_o\phi$ 일 때를 나타낸 경우로서 최대 도달압력 (최대압력)

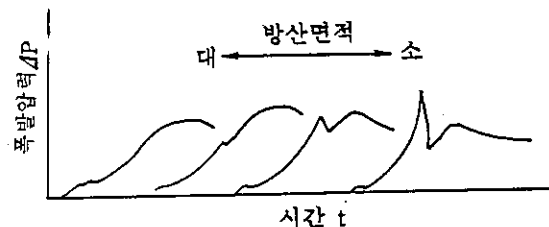


[그림 1-10] 방산면적 크기에 따른 폭발압력과 시간과의 관계

은 방산면적이 클수록 감소하지만 최대압력에 달한 후의 압력감소 속도는

반대로 증가함을 알 수 있다. 방산면적이 아주작은 경우(곡선②)는 화염이 장치 전체에 확산된 후에 압력방출이 개시되므로 최대압력은 방산구가 없을 때의 폭발압력과 대체로 같지만 장치에 압력이 가해지는 시간은 감소한다. 장치등의 파괴가 단지 압력에만 의존하는 것이 아니라 압력과 시간의 곱에 의하는 것으로 방산면적의 증가는 압력이 가해지는 시간을 단축시킬 수 있어 장치의 파손 정도는 방산구가 없을 때 보다는 작다고 할 수 있다. 또한 방산면적이 아주 큰 경우(곡선④)에도 발생압력은 0이 되지 않으며 방산면적이 클수록 발생압력은 작아 지지만 실용상 방산면적을 함부로 크게 할 수 없고 장치의 강도, 주위의 조건, 경제성등을 고려하여 최소의 방산구를 설치하여야 한다.

[그림 1-10]은 단순한 모델로서 실제 큰 장치에서의 압력방출 과정은 이보다 훨씬 복잡하여 조건에 따라 다르지만 흔히 [그림 1-11]과 같이 2개의 피크가 생긴다.



[그림 1-11] 큰 장치에서의 폭발압력과 시간과의 관계

어느 압력이 큰가는 조건에 따라 다르나 일반적으로 P_{stat} 가 클 경우는 제 1의 피크 압력쪽이 크게 되고 화염전파 속도도 크며, 반면에 방산면적이 작을 때, 점화원의 위치가 방산구에 가까울 때등의 경우는 제 2의 피크 압력쪽이 크게 된다. 또한 방산면적이 클 때나 화염전파 속도가 작은 혼합가스의 경우에는 제 1의 피크 만이 생기고 방산면적이 작고 화염전파 속도가 클 때는 제 2의 피크 만이 생긴다. 그러나 장치는 이들 피크 중 큰쪽의 압력에 견딜 수 있어야 한다.

제 3 장 설비의 폭발과 그 위험성

I. 폭발 (Explosion)

폭발이란 “ 급격한 화학반응에 의하여 본래의 물질이 고온고압의 기체로 변하는 것 ” 또는 “ 어떤 시스템이 화학적 또는 물리적변화를 일으켜 그로 인하여 발생하는 에너지가 외부에 기계적 일로 전환되는 과정 ” 으로 정의될 수 있으며, 폭발현상의 종류를 분류한 예를 < 표 1 - 1 > 에 나타내었다.

〈 표 1 - 1 〉 폭발현상의 종별

종별 기준	압력상승 요 인	변화 또는 반응이 일 어나는 상 또는 면	변화 또는 반응에 관 여하는 물 질의 상태	압력상승이 일어나는 공간의 상태	변화 또는 반응이 일 어나는 부 분의 성질	재해의 형
폭발 현상 의 종류	(1) 기상에 대 한 엔탈피 증 가 <u>①발열화학 반응</u> <u>②급속가열</u>	(1) 기 상 (2) 액 상 (3) 고 상 (4) 기·액 계 면 (5) 고 액 계 면 (6) 액·고 계 면	(1) 기 체 <u>①혼합기체</u> <u>②분 무 성 기 체</u> (2) 기 체 액 체 <u>①지 연 성 기체·분무</u> (3) 기 체 고 체 <u>①지 연 성 기체·분진</u> (4) 액 체 (5) 고 체	(1) 개 방 (2) 밀 폐 <u>①가로세로 높이 가운 데 임의 두방향의 비가 1 에 가까운 경우</u> <u>②가느다란 공 간</u> (3) 일부개방	(1) 발열화학 반응을 수 반하지 않 는 경우 <u>①증발면</u> <u>②승화면</u> <u>③가열면</u> (2) 발열화학 반응을 수 반하는 경 우 <u>①연소파</u> <u>②폭굉파</u> <u>③확산열</u>	(1) 착화원을 요하는 경우 <u>①착화파괴 형</u> <u>②누설착화 형</u> (2) 화학반응 열의 축적 에 의하는 경우 <u>①자연발화 형</u> <u>②반응폭주 형</u> (3) 과열액체 의 증발에 의한 경우 <u>①열이동형</u> <u>②평형과정 형</u>

본 연구에서 취급되는 건조설비, 백필터(Bag Filter) 등 집진설비 그리고 호퍼(Hopper), 사일로(Silo), 비킷 엘리베이터(Bucket Elevator) 등 분체수송 및 저장설비 등에서 발생하는 폭발은 기상폭발(氣相爆發)로서 가스폭발, 분무(미스트) 폭발, 분진폭발 및 가스의 분해폭발 등이 여기에 속한다. 이에대한 폭발현상과 재해의 유형은 < 표 1 - 1 >의 밑줄친 부분에 해당한다고 볼 수 있다.

그리고 폭발(Explosion)을 일으키는 에너지의 종류에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 화학적 에너지에 의한 폭발 — $\left[\begin{array}{l} \text{폭연 (爆燃, Deflagration)} \\ \text{폭굉 (爆轟, Detonation)} \end{array} \right.$
- ② 물리적 에너지에 의한 폭발 — 파열(破裂, Bursting)

여기서 폭연은 폭속(爆速)이 음속(音速) 이하로서 일반적으로 $30\text{cm} \sim 10\text{m/sec}$ 인 반면에 폭굉은 폭발범위내 어떤 농도에서 반응속도가 급격히 증대하여 음속을 초과하는 경우를 말하며, 이 과정에서 발생하는 충격파(衝擊波)의 압력으로 파괴력이 아주 크다. 대체로 폭굉은 음속의 $4 \sim 8$ 배 ($1,000\text{m/sec} \sim 2,700\text{m/sec}$) 정도의 고속 충격파가 형성된다. 이 폭굉범위는 연소범위보다도 좁은데, 예를들면 수소(水素)의 경우 그 연소범위는 $4 \sim 75\%$ 인 반면에 폭굉범위는 $18 \sim 59\%$ 정도이다. 폭굉은 대기압하에서 가연성 가스와 공기가 혼합된 경우에 넓은 공간에서는 발생되기 어려우나 파이프 또는 용기의 직경에 대한 길이의 비가 10 이상일 경우에 발생하기 쉽다.

II. 기상폭발(氣相爆發)의 과정

각종 기상폭발에 있어서 공통되는 주요과정을 요약하면 다음과 같다.

1. 어떤 범위의 기상에 있어서 가연조건이 형성
2. 어떤 점화원에 의해 발화 또는 열의 축적등에 의해 발화

3. 화염(연소파) 또는 폭굉파가 전파하여 압력상승등에 기인한 파괴나 충격에 의한 피해발생

4. 폭발이 일어난 곳에서 발생한 압력파(壓力波)가 전파하여 그 충격에 의한 피해발생

5. 폭발에 기인하는 파괴에 의해 발생된 비산물(飛散物)의 충돌에 의한 피해발생

6. 파이어 보울(Fire ball)이 발생하여 그 복사에 의한 피해발생

7. 폭발후 화재로 이행하여 이로인한 소손(燒損)이 발생

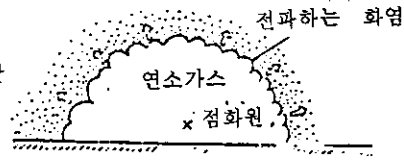
8. 폭발에 의해 유해물질이 발생하고 그 오염에 의한 피해발생

기상폭발은 다종다양하고 발생조건에 의해 각 과정에 있어서의 현상이 달라질 수 있으며 과정중 4~8은 경우에 따라 발생하는 피해과정을 나타낸 것이다.

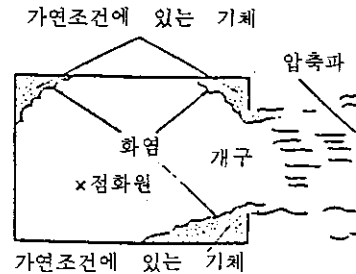
기상폭발은 일어나는 공간상태에 따라 [그림 2-1]과 같이 많은 차이가 있다. [그림 2-1] (a)와 같이 공간이 개방되어 있는 경우 반경 수미터에 걸쳐 가연조건이 형성되었다 하더라도 분위기에 의한 과확산(過擴散) 등을 고려하면 비교적 단시간으로 가연조건이 형성되기 어려우며 여기에 착화되었다 할지라도 압력파의 강도는 그다지 강하지 않을 것이다. 그러나 반경 수십 미터에 걸쳐 가연조건이 형성되는 경우에는 피해가 야기될 수 있으며 특히 상기 4와 6의 피해발생 우려가 높다. [그림 2-1] (b)와 같이 가로, 세로, 높이중 임의의 두방향 길이비가 1에 가까운 설비등의 밀폐공간에서의 폭발은 내부의 가연성혼합기 농도분포, 점화원의 위치, 설비등을 구성하는 부분중 약한 부위의 강도(強度)와 넓이, 개구부 넓이등의 상태에 따라 달라진다. 그리고 [그림 2-1] (c)와 같이 설비등의 밀폐공간의 두방향 길이가 다른 방향에 비해 대단히 크거나 파이프, 덕트등에서의 폭발은 조건에 따라서 폭굉으로 전이할 수 있으므로 설비의 모양이나 내부구조 및 내면상태, 가연물의 상태, 농도등에 의해 폭발현상을 예측하여야 한다.

가연조건에 있는 기체 (안개, 분진을 포함한다)

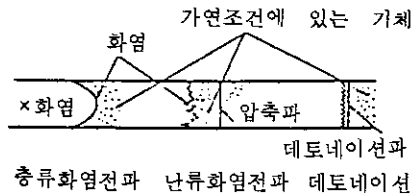
(a) 개방공간에 있어서 기상폭발



(b) 가로, 세로, 높이치수비가 1에 가까운 밀폐공간에서의 기상폭발



(c) 판로나 닥트내에서의 기상폭발



[그림 2 - 1] 공간상황에 있는 기상폭발현상의 상위

Ⅲ. 가연조건의 형성

설비 내부에서의 가연조건 (可燃條件) 의 형성은 취급하는 물질의 성질, 설비의 모양이나 구조, 설비 내외부의 온도, 압력, 기류의 상태 등에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로 이들 설비에서 취급되는 가연물질은 가연성가스 (혹은 증기), 가연성 액체 미스트 (Mist), 가연성분진 혹은 가연성가스와 분진의 혼합물인 하이브리드 혼합물 (Hybride Mixture) 등이며, 이들이 지연성가스와 혼합되어 연소범위 (폭발범위) 를 형성하게 된다.

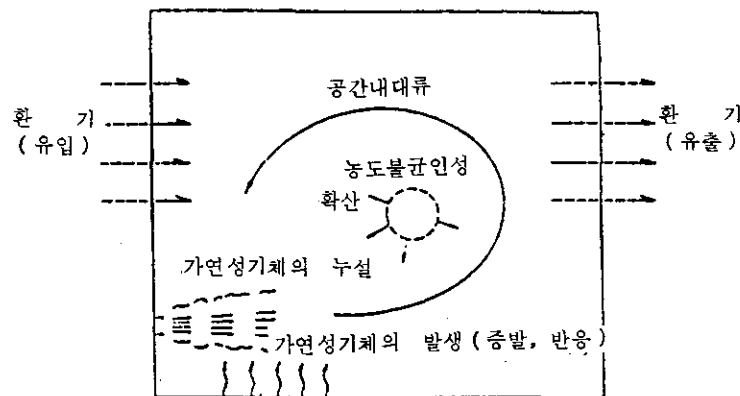
1. 가연성가스 (혹은 증기)

건조설비나 집진설비등에서 건조물질이나 분체 (粉體) 자체에서는 일반적으로

가연성가스가 발생되지 않으며, 가연성증기는 건조물질이나 분체에 흡착되어 있는 가연성액체가 증발하여 폭발범위내에서 폭발하는 경우가 있다. 그러나 건조설비등에서 열원으로서 기체연료를 사용할 때 배관등에서의 누출이나 버너의 재점화시, 또는 건조시 과열등으로 건조물이 열분해(熱分解)되면서 가연성가스가 발생, 점화원에 의해 폭발하는 경우가 있다.

설비내부에서 가연성가스가 누설되거나 또는 발생하는 경우 가연성혼합기(可燃性混合氣)의 상태는 공간의 부피, 환기위치 또는 비율, 가연성혼합기의 종류 및 발생상황 등에 따라 달라진다(그림 2-2 참조). 설비내의 가연성가스의 농도는 일반적으로 불균일하다고 생각되나 공간내 혼합기 형성상황의 대체적인 상태를 검토하기 위해서는 가연성가스의 평균농도 $\bar{X}_f$ 의 시간변화에 대해 고려하여야 한다.

밀폐공간내에서 누설 또는 발생하는 가연성기체를 포함한 기체단위시간 마다의 부피를 Q , 밀폐공간의 부피를 V , 누설 또는 발생하는 기체속의 가연성기체농도를 X_{f0} , 외부의 유출량을 기준으로 한 환기율을 n (외부로 부터



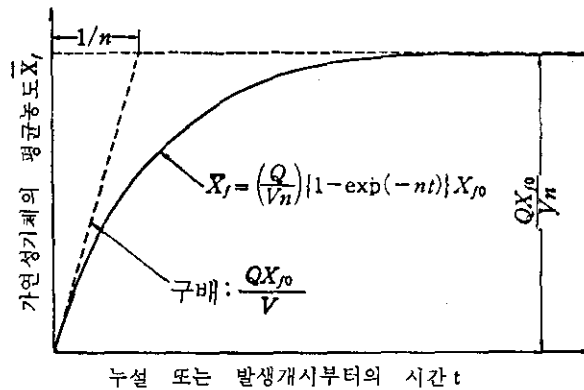
[그림 2 - 2] 밀폐공간내의 가연성 혼합기 형성상황

의 유입량을 기준으로 한 환기율 $n_i = n - Q/V$ 로 한다. 또 유출하는 기체 중의 가연성기체 농도가 $\bar{X}_f$ 와 같다고 하면, 단위시간에 밀폐공간에서 누설 또는 발생하는 가연성기체의 몰수 $X_{f0} \cdot Q$ 와 거기서 유출하는 가연성기체의 몰수 $\bar{X}_f V n$ 의 차는 단위시간에 밀폐공간내에서 증가하는 가연성기체의 몰수 $d(\bar{X}_f V)/dt$ 와 같으므로, 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{d(\bar{X}_f V)}{dt} = X_{f0} Q - \bar{X}_f V n \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

초기에 있어서의 밀폐공간에 가연성기체가 존재하지 않고, 즉 $t=0$ 에서 $Q=0$ 이고, Q 가 시간적으로 변화하지 않고 일정하다고 가정하여 식 (2-1)을 풀면, 다음 식이 얻어진다.

$$\bar{X}_f = \left(\frac{Q}{Vn} \right) \{ 1 - \exp(-nt) \} X_{f0} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$



[그림 2-3] 밀폐공간내에서 누설 또는 발생한 가연성기체의 평균농도 시간변화

이 식으로 예측되는 밀폐공간내의 혼합기 중의 가연성기체 농도변화를 도시하면 [그림 2-3]과 같이 된다. 밀폐공간부피에 비해 누설 또는 발생속도가 작고, 또 환기율이 크면 평균농도가 높아지는등, Q , V , X_{f0} , n 등에 의해 개방공간내의 혼합기의 상황이 변화하는 상태를 알 수 있다. 식 (2-2)에서 유도되는 Q , V , X_{f0} , n 과 밀폐공간내의 혼합기 상황관계에서 주요한 것으로

서, 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{최종도달농도} = QX_{f0}/(Vn)$$

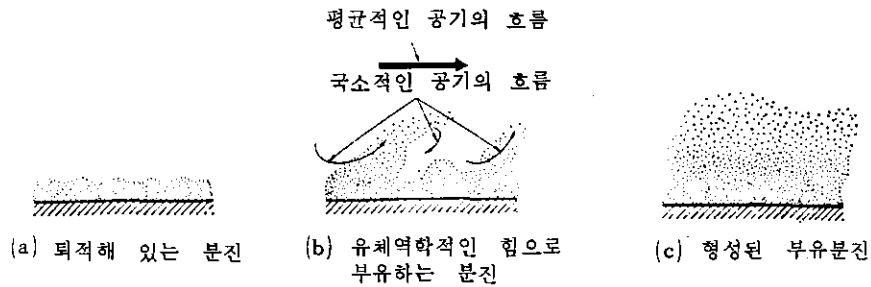
$$\text{농도증가소요시간} \propto 1/n$$

$$\text{초기에 있어서의 농도증가속도} = QX_{f0}/V$$

2. 가연성분체

집진설비, 분체수송 및 저장설비 그리고 건조설비중 유동층건조기 (Fluidized Bed Dryer), 기류건조기 (Pneumatic Dryer) 분무건조기 (Spray Dryer) 등은 분진이 다량 발생될 수 있는 설비로서 분진폭발 위험성이 아주 높은 설비이다. 분진폭발은 알루미늄, 마그네슘 등의 금속, 합성수지, 농산물, 석탄, 목재, 섬유 등의 가연성고체가 미세한 분말상으로 공기중에 부유되어 폭발하한계 농도이상으로 되는 경우 점화원에 의해 가연성가스와 유사하게 폭발할 수 있다. 가연성분진은 가연성고체의 분쇄, 가공, 건조, 또는 수송시에 발생될 수 있기 때문에 이들 설비에는 흔히 백필타 (Bag Filter) 등의 집진기를 반드시 설치하고 있는데, 특히 이 백필타로 인한 폭발사고가 많이 발생되고 있다.

고체미립자인 분진은 장시간에 걸쳐서 아무런 힘이 가해지지 않으면 퇴적되어 있지만, 여기에 기체역학적인 힘이 가해지면 [그림 2 - 4]와 같이 쉽게 부유분진이 된다. 공기중 지연성기체 (支燃性氣體) 중에 이와 발열반응 (發熱反應)을 일으킬 수 있는 부유분진 (浮遊粉塵)이 적당한 농도로 존재하면 연소가 가능하다. 이와같이 연소 가능한 부유분진이 될 수 있는 고체의 미립자에는 황분, 탄진, 목분등과 같이 부유분진이 되지 않더라도 연소가 가능한 것과 철분, 알루미늄분등 보통은 가연성물질로 생각할 수 없는 것까지도 포함된다.



[그림 2-4] 부유분진 형성과정의 예

부유분진의 폭발 즉 분진폭발에 의한 피해가 문제로 되는 것은, 가연성분체가 발생한다든지 혹은 그것을 취급하는 밀폐공간 또는 닥트나 파이프등이다. 가연성 부유분진의 발생량은 공기수송중의 분체와 같이 공업적으로 명확한 것 외에는 그 발생상황이 다양하여 현시점에서는 실제로 측정하는 방법 외에는 그 양을 알수 없다.

3. 가연성액체 미스트(Mists)

분무건조기 취급시 또는 가연성액체의 용기나 배관이 파손되어 분출될 경우에 다량의 액체미립자가 발생될 수 있으며, 이 액체미스트가 공기등 지연성기체(支燃性氣體)중에 부유하여 연소범위에 들때 점화원에 의해 폭발하게 된다. 즉 결빙된 액체미스트는 분진과 같이 폭발할 수 있으며, 비점(沸點)이나 인화점(引火點)이 높은 작동유나 윤활유등에 있어서도 폭발이 야기될 수 있다. 일반적으로 액체미스트의 발화 용이성은 그 미스트의 직경(直徑)에 관계되며, 일반적으로 최소발화에너지(Minimum Ignition Energy)는 그 직경의 세제곱에 비례하여 증가한다.

가연성액체 미스트의량은 분무기(噴霧器)의 특성에 따라 달라질 수 있다. 분무기에 의해 발생한 가연성액체의 미립자(微粒子)중에서 벽에 부착되었든지 바닥으로 떨어진 것을 제외한 것이 공간에 부유해 있는 미스트의 농도라 할 수 있다.

속도 v_p 로 움직이고 있는 지름 d_i 의 액체미립자가 받는 힘 F 는, 대개 다음 식으로 표시된다.

$$F = 3\pi\mu d_i v_p \dots\dots\dots (2-3)$$

여기서, μ 는 액체미립자 주위의 액체점성계수이다.

이 관계식에서 액체미립자의 움직임을 예측할 수 있는 바 예를 들면, 초기속도 v_{p0} 로 수평방향으로 분출시킨 액체미립자가 수평방향으로 l 만큼 떨어진 곳에 달할 때까지의 시간 t_a 는 다음 식을 이용 함으로써 얻어진다.

$$t_a = C_1 \ln \left(1 + \frac{1}{C_1 v_{p0}} \right) \dots\dots\dots (2-4)$$

여기서, $C_1 = -\frac{\rho_i d_i^2}{18\mu}$, ρ_i 는 액체밀도이다.

또, 액체미립자의 자연강하속도(自然降下速度) v_{pf} 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{pf} = -C_1 g = -\frac{\rho_i d_i^2}{18\mu} \cdot g \dots\dots\dots (2-5)$$

여기서, g 은 중력가속도(重力加速度)이다.

이와 같이, 분무기특성에 따라서 액체미립자의 움직임을 예측할 수 있으므로 부유하고 있는 미립자상태에 있는 가연성액체 미스트 량을 추정할 수 있다.

또한 비교적 고온의 가연성기체가 그 보다 저온의 지연성기체속에 누설된 경우 가연성기체가 지연성기체에 열을 방출하여 무상(霧相)이 될 때가 있다. 이 경우 가연조건의 발생상태는 가연성증기가 응축(凝縮)되어 안개가 만들어지는 영향을 제외하면 가연성혼합기의 그것과 같다. 그리고 가연성증기가 응축하여 지연성기체속에 무화되면 기상에 있어서의 가연성기체 농도가 감소되고 연소범위가 달라지게 된다.

4. 하이브리드 혼합물 (Hybride Mixture)

하이브리드 혼합물은 공기(산화제)중에 가연성가스와 분진이 혼합된 것

으로서 가스와 분진의 연소특성에 큰 영향을 주게 된다. 즉 가스의 농도가 연소하한계 이하인 경우에도 폭발할 수 있으며, 분진 또한 연소하한계 이하에서도 폭발할 수 있기 때문에 그 위험성은 더 높다. 하이브리드 혼합물은 분진의 최소발화에너지를 낮추어 주게 되며, 또한 최대폭발압력과 (最大爆發壓力) 과 최대압력상승속도를 증가시킨다.

하이브리드 혼합물은 용매 (Solvent)를 건조제거하는 유동층 건조기 (Fluidized Dryer) 및 기류건조기 (Pneumatic Dryer) 운전시에 발생될 수 있으며, 가구제조업체 등에서 도장물 (塗裝物) 건조기 배출덕트와 목분진 배출덕트를 연결사용하는 경우에 발생될 수 있다.

IV. 발 화

자연조건이 형성된 경우에 충분한 에너지를 갖는 점화원이 주어진거나 자연발화 (自然發火) 등에 의해 폭발·화재가 발생된다. 집진, 분체수송 및 저장, 건조설비 등에서의 점화원은 주로 전기스파크, 그라인다의 불꽃이나 마찰에 의한 스파크, 화염, 가열장치 등의 고온표면, 복사열 (輻射熱), 정전기 (靜電氣), 아아크 용접기의 불꽃 등을 들 수 있다. 특히 그라인다의 불꽃 등은 덕트를 통하여 집진기 등으로 이동될 수 있기 때문에 주의하여야 할 점화원이다.

밀폐된 설비에서 기하학적으로 중심부위에서 점화될 때 가장 큰 파괴적인 압력이 발생되며, 점화원의 에너지는 최소발화에너지 이상이어야 한다. 가스와 분진에 대한 최소발화에너지는 많이 보고되고 있으며 일반적으로 가스의 최소발화에너지는 분진보다도 훨씬 더 낮은 편이다.

V. 폭발에 의한 피해

설비가 폭발하는 경우에 그 피해범위를 산정하는 것은 방호대책 수립에 반드시 필요한 사항으로서 일반적으로 폭발에 의한 피해는 폭발시 발생하는 압력과 즉 폭풍(Blast Wave)에 의한 피해, 폭발시 발생하는 비산물에 의한 피해 그리고 화염의 복사열에 의한 피해를 들 수 있다.

1. 폭풍(爆風)에 의한 피해

기상폭발의 경우는 대개 압력과(壓力波)가 발생하며, 이로 인하여 설비나 건축물이 완전히 파괴될 때가 있다. 폭발이 일어난 공간을 구성하는 구조물과 내용물 등의 피해 그리고 외부에 있어서의 피해를 예측하기 위해서는 기상 폭발시의 압력과 발생, 전파와 감쇠, 그 위력등에 대한 검토가 필요하다.

압력과 즉 폭풍은 기상폭발이 발생하는 공간상황에 의해 발생하며 폭발시 일어나는 압력상승에 기인한다. 밀폐공간에서 압력상승에 의해 파구(破口)가 발생할 때까지는 폭발이전부터 존재하는 개구부로 부터의 압력파가 외부로 전파할 뿐이고 그 강도는 개구부에 있어서의 압력변동에 의존한다. 파구가 발생하면 그때까지 내부에서 상승을 계속한 압력이 개방되어 압력파로서 외부로 전파하게 된다. 이 경우 압력과 배후의 압력 P_{s+} 는 파구발생시의 내압(內壓)을 P_o , 내부기체의 비열비(比熱比)를 r_o , 대기압을 p_a , 내부기체와 공기의 음속(音速)을 각각 a_o 및 a_a 로 하면 다음과 같다.

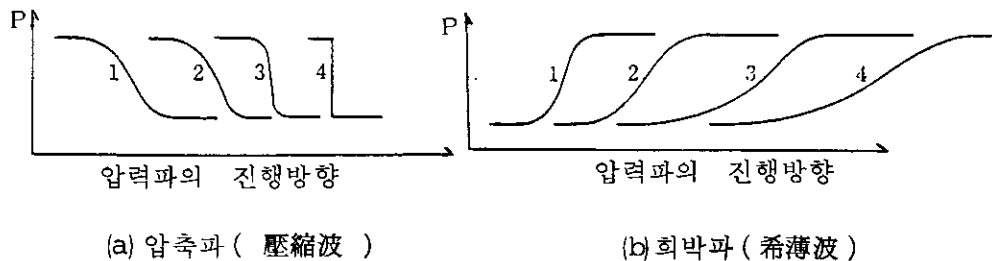
$$P_{s+} = p_o \left[1 - \frac{(r_o - 1)(a_a/a_o)(P_{s+}/p_a + 1)}{[2r_a \{2r_a + (r_a + 1)(P_{s+}/p_a - 1)\}]^{0.5}} \right]^{2r_o/(r_o - 1)} \dots\dots\dots (2-6)$$

압력변동이 전파할 경우는 압력이 높은 부분의 전파속도가 낮은 부분의 전파속도보다 크다. 따라서 압력과 가운데 압력이 상승하는 부분(압축파, 壓

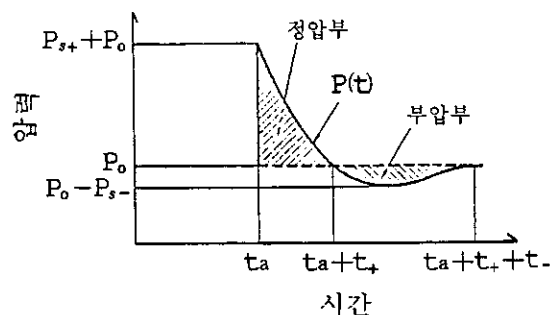
縮波)의 전파는 [그림 2-5]와 같이 전파와 동시에 압력변동이 급변해 지고 후방의 압축파가 전방으로 추격되어 파형이 우뚝 솟아 오르고 불연속 파두를 갖는 이른바 충격파(衝擊波)를 형성한다. 반면에 압력이 내려가는 부분(희박파, 希薄波)에 있어서는 전파와 같이 압력변동이 느슨해진다. 그리고 [그림 2-6]은 폭발의 중심부에서 어떤 거리에 있는 지점에 있어서 폭풍의 이상적인 압력파형을 나타낸 것으로 압력파형에는 정압부(正壓部)와 부압부(負壓部) 2종류가 있는 것이 특징이다. 그리고 폭발압력은 폭발중심에서 거리가 멀어질 수록 감소된다. TNT 폭발실험 결과에 의하면 폭풍의 피크압력을 p , 폭발중심으로 부터의 거리를 ℓ 로 할 경우 대략 다음 관계가 성립된다.

$$p \propto \ell^{-1.5}$$

그러나 폭발중심에서 가까운 부분에서는 p 는 ℓ 의 -2 승에 비례하여 감소한다. 실제로 전파하는 압력파는 압력파가 발생하는 과정, 전파하는 공간상 태 등의 영향을 받아 복잡한 압력변동을 나타낸다고 볼 수 있다.



[그림 2-5] 압력파에 있어서 압력분포의 시간적 변화



[그림 2-6] 폭풍(爆風)에 있어서 이상적인 압력파형

폭풍에 의한 피해는 과압(過壓)의 크기와 지속시간에 의존한다. 즉, 압력파의 위력은 보통 그 임펄프(Impulse), 특히 그 정압부(그림 2-6참조)를 시간으로 적분(積分)한 값(I)로 표현된다. 즉,

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_s} \{p(t) - p_0\} dt \dots\dots\dots (2-7)$$

여기서 t_a 는 압력변동이 개시되는 순간의 시간, t_s 는 정압의 지속시간이다.

참고로 폭풍의 최대압력(P_{max})에 따른 피해정도의 단계를 <표 1-2>에 나타내었다.

<표 1-2> 폭풍의 최대압력(P_{max})과 피해 관계

$P_{max}, \text{kg/cm}^2$	피 해 정 도
14	지면에 큰 구멍이 발생
4~7	인간 사망
4	개, 고양이 사망
2.6	LPG탱크 파괴
1.5	목조가옥 파괴
0.5~1	인간 상해 가능
0.6	목조가옥 반파, 철골탑 붕괴, LPG탱크 소파
0.37	석유탱크 대파
0.25	목조가옥 소파
0.21	고막 파열
0.15~0.3	창틀 파손
0.08	모든 창유리 파손
0.021	비산파편의 피해
0.0034	50% 창유리 파손
0.0004	창유리가 파손되는 경우 있음.

2. 비산물(飛散物)에 의한 피해

설비내부에서 기상폭발이 발생되면 압력상승에 의해 공간을 구성하는 벽면(壁面)의 일부가 파괴되어 비산되고 이 비산물은 주위의 건물, 설비, 작업자 등에게 충돌하여 더 많은 피해를 야기시킨다. 이때 발생하는 비산물의 크기는 폭발상태나 파괴되는 물질에 따라 달라진다. 폭탄(爆彈)의 파열실험(破裂實驗)에서는 약 1g이라는 값이 얻어지고 있으나 기상폭발시 용기의 경우는 벽면이 금속등으로 구성되어 있고 강도(強度)가 일정하다면 전체가 2~3대로 파괴되고, 벽면 일부에 강도가 낮은 곳이 있다면 그곳이 파괴되어 비산물로 된다. 일반적으로 비산물의 크기 및 비산의 특성은 폭발시의 압력상승속도에 의존하는바 폭발에 관여하는 가연성가스, 분진의 종류 및 혼합상태 등에 따라서 달라진다. 또한 비산물이 되는 고체의 성질에 따라 큰 차이가 있다.

비산물이 충돌한 경우에 충돌된 것의 피해상태는 비산물이나 피충돌물(被衝突物)의 성질에 의존한다. [그림 2-7]은 금속과녁에 여러가지 모양의 빙편(氷片)을 날려서 그 영구변형(永久變形) δ 를 조사하여 무차원변형(無次元變形)과 무차원속도(無次元速度)의 관계로서 표시한 것을 나타낸 것이다. 무차원변형과 무차원속도는 각각 다음과 같이 정의되고 있다.

$$\text{무차원변형} = \frac{\delta h}{a^2} \dots\dots\dots (2-8)$$

$$\text{무차원속도} = \frac{\rho_p u}{\sigma_t \rho_t} \dots\dots\dots (2-9)$$

여기서 a : 비산물의 반지름

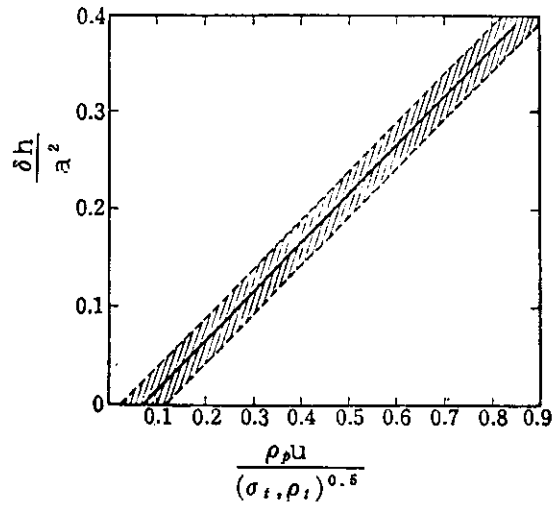
h : 피충돌물의 두께

u : 비산물의 속도

δ : 피충돌물상의 충돌점에 있어서의 영구변형

ρ_p, ρ_t : 비산물 및 피충돌물의 밀도

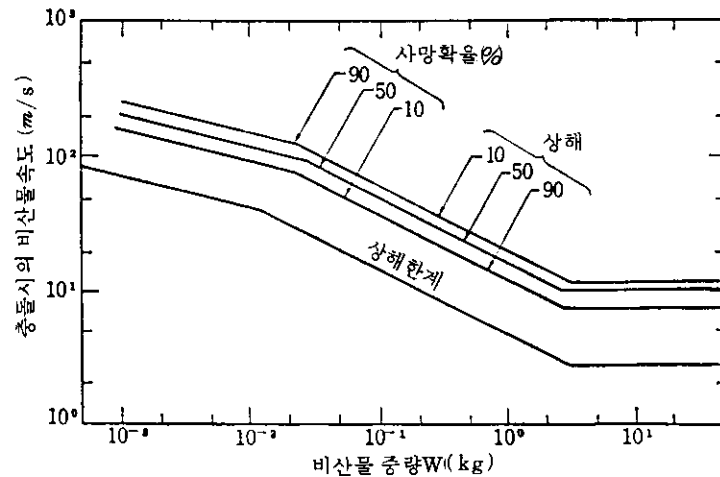
σ_t : 피충돌물의 항복점 (응력)



[그림 2-7] 구형에 가깝고 취약(脆弱)한 비산물이 충돌한 경우의 무차원변형과 무원속도의 관계

지지되지 않거나 한끝이 지지된 판의 끝부근에 비산물이 충돌한 경우에는 그 변형이 2배 정도가 된다.

비산물의 충돌에 의한 피해는 비산물 및 피충돌물의 재료성질이나 비산물의 운동량 등에 의존하며 이는 사람에게 대한 상해에도 적용할 수 있다. 참고로 비산물에 의해 사람이 피해를 받는 정도를 비산물 충돌속도와 무게를 좌표로 [그림 2-8]에 나타낸 것이다.



[그림 2-8] 비산물에 의해 사람이 받는 피해

3. 화염의 복사열 (輻射熱) 에 의한 피해

개방공간에 다량의 가연물질이 방출될 경우 이것이 발화됨으로써 급속히 화염이 전파되는 구상 (球狀) 의 대규모 화염 즉 파이어볼 (Fireball) 이 발생하게 되며 이로 인하여 복사열에 의한 피해를 받게된다. 파이어볼의 크기는 많은 요인에 의존되며 분진폭발의 한 실험결과에 의하면 방산구의 하부쪽으로 4 m, 수평으로 약 15 m로 확산된 예가 보고되고 있다. 흔히 설비나 건설내부에서 폭발이 발생하는 경우 개구부나 창문등을 통하여 대규모 화염이 분출함으로서 복사열로 인한 재해가 발생하고 있다. 따라서 특히 폭발압력방산구를 설치시 그 위치를 안전한 곳으로 설정하는 것이 중요하다. [사진 1-1] 은 방산구가 설치된 챔버 (Chamber) 외부로 화염이 분출하는 것을 촬영한 사진이며, [그림 2-9] 는 화염전파과정을 나타낸 것이다.

파이어볼 발생시에 1 kg의 가연성물질에서 αm^3 의 연소생성물이 생성될 경우 파이어볼의 크기를 추정할 수 있다. W_f kg의 가연성물질이 연소한 경우의 부피 V_f 는

$$V_f = \alpha W_f \dots\dots\dots (2-10)$$

가 되고 그 최대지름 d_f 는

$$d_f = \beta W_f^{1/3} \dots\dots\dots (2-11)$$

가 된다. 여기서 $\beta = (6\alpha/\pi)^{1/3}$ 이다.

가연성기체가 탄화수소인 경우 완전연소 (完全燃燒) 한다고 가정하면, α 는 약 100이 되고 β 는 약 5.75가 된다. 각종 실험결과를 정리하면 다음 관계식이 유도된다.

$$d_f = 3.86 W_f^{0.32} \dots\dots\dots (2-12)$$

또한 연소에 요하는 시간 t_b 도 가연물질의 양 W_f 에 의존한다. t_b 와 W_f 의 관계를 다음식과 같이 나타내면

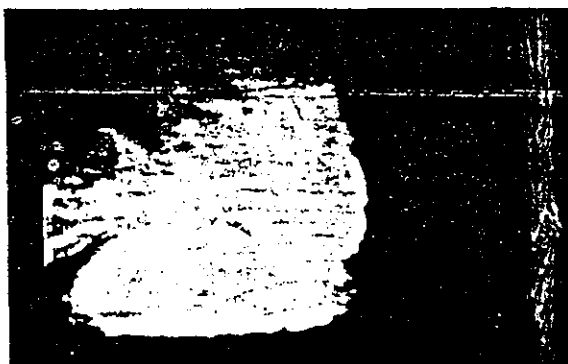
$$t_b = C_1 W_f' \dots\dots\dots (2-13)$$



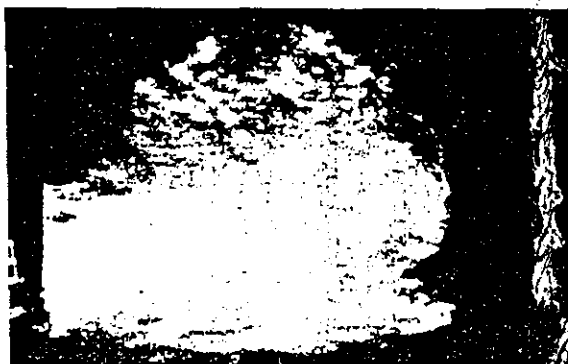
(i) 방산구를 통하여 화염이
분출 시작



(ii) 화염이 버섯모양 (mushroom
-shape) 으로 발달

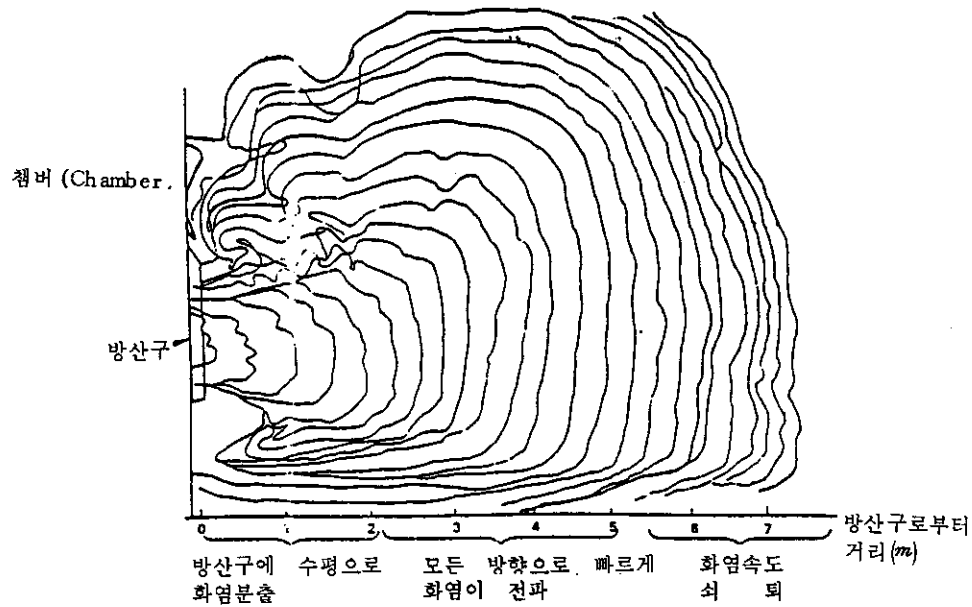


(iii) 거의 구상으로 연소



(iv) 구상단계의 연소가 끝남

[사진 1 - 1] 방산구 외부에서의 연소과정을 나타낸 연속사진



[그림 2-9] 방산구로 부터 방산된 가스의 화염전파모양 (화염은 2.33 msec간격으로 촬영, 프로판 / 공기혼합기)

여기서 C_1 은 0.5~3, r 는 0.16~0.35가 된다. 이들의 값은 형성된 가연성혼합기의 상태에 따라 다르고 t_b 는 혼합상태가 양호할수록 작아진다고 볼 수 있다.

그리고 파이어볼로 부터 복사강도(輻射強度) E 는 화염온도 T_f , 복사율 ϵ , 화염모양등의 함수로서 다음식과 같다.

$$E = \phi \epsilon \sigma T_f^4 \dots\dots\dots (2-14)$$

여기서 d_f : 파이어볼의 지름

L : 파이어볼 중심에서 수열면(受熱面)까지의 거리

θ : 파이어볼의 방향으로 수직면에 대한 수열면의 경사

σ : 스테판-볼츠만 (Stefan-Boltzman) 상수

ϕ : 형태계수 $[= (d_f/L)^2 \cos \theta]$

식 (2-14)에 식 (2-11)을 대입하여 d_f 를 소거하면 다음 식이 얻어진다.

$$E = \left(\frac{\beta}{2L} \right)^2 W_f^{2/3} (\cos \theta) \varepsilon \sigma T_f^4 \dots\dots\dots (2-15)$$

다시 $\beta \cong 5.75$, 수열면이 파이어볼 방향과 수직이라고 가정하고 $\theta = 0$ 를 대입하면

$$E = 4.68 \times 10^{-7} \frac{W_f^{2/3} T_f^4}{L^2} \dots\dots\dots (2-16)$$

참고로 가연물질에 따른 복사발산도와 인간의 피부에 미치는 방사열의 영향을 각각 〈표1-3〉, 〈표1-4〉에 나타내었다.

〈 표 1 - 3 〉 가연물질별 복사발산도

가 연 물 질	복 사 발 산 도 (Kcal/m ² · hr)	가 연 물 질	복 사 발 산 도 (Kcal/m ² · hr)
원 유	35 × 10 ³	매 탄 올	8.3 × 10 ³
가솔린, 납사	50 × 10 ³	L P G	65 × 10 ³
등 유	43 × 10 ³	에 틸 렌	115 × 10 ³
경 유	36 × 10 ³	프 로 판	64 × 10 ³
중 유	20 × 10 ³	프 로 필 렌	63 × 10 ³
벤젠	53 × 10 ³	n-부 탄	71 × 10 ³
n-헥산	73 × 10 ³		

〈 표 1 - 4 〉 인간의 피부에 미치는 방사열의 방향

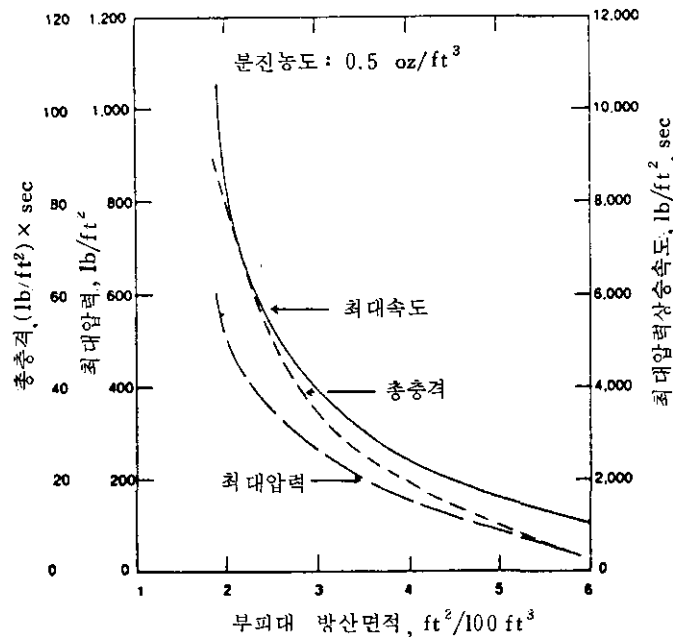
시 간 (초)	강한 고통을 일으키는 한계 (Kcal/m ² ·hr)
2	13,200
3	9,600
4	8,400
5	7,200
10	4,200
100	2,400
200	2,400

제 4 장 폭발압력방산구의 설치를 위한 폭발강도 특성 (爆發強度特性)

I. 폭발압력 (爆發壓力) 과 압력상승속도 (壓力上昇速度)

폭발압력상승속도 (爆發壓力上昇速度) 는 폭발방산에 있어서 중요한 파라메타로서 이것으로 설비로부터 연소생성물과 압력을 방산하는데 필요한 시간을 결정한다. 압력상승속도가 빠르다는 것은 짧은 시간에 폭발을 방산시켜야 한다는 것을 의미한다. 따라서 폭발압력상승속도가 빠르면 빠를수록 폭발압력방산구의 면적이 더 큰것이 효과적이다.

폭발의 효과는 얻어진 최대압력, 최대압력상승속도 그리고 초과압력 피크의 지속시간에 따라 달라지게 된다. 밀폐용기에 주어지는 총충격 (Total Impulse, 즉 압력대 시간곡선의 적분) 은 [그림 3-1] 과 같이 설비의 부피에 대한 방산면적의 비가 증가할수록 감소하게 된다.



[그림 3-1] 방산비와 압력, 속도 및 충격과의 관계
방산구가 설치된 용기에서의 마그네슘 폭발

1. 최대폭발압력 (最大爆發壓力)

보통 폭발이 발생할 때 밀폐용기에서 발생하는 최대폭발압력 (P_{max}) 은 초기압력 (P_i), 몰 (mole) 비, 온도변화 등에 의해 결정된다. 즉

$$P_{max} = \frac{P_i n_f T_f}{n_i T_i} \dots\dots\dots (3-1)$$

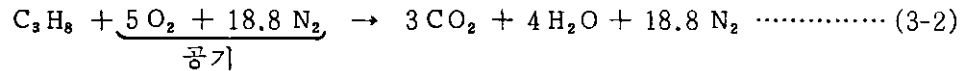
여기서 n_f : 연소 또는 분해 혼합물중의 기체몰수

n_i : 초기 혼합물중의 기체몰수

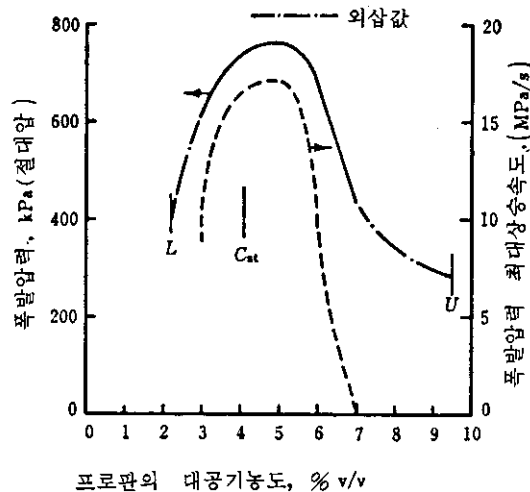
T_f : 최종온도

T_i : 최초온도

그러나 공기중에서 프로판 (Propane) 의 완전연소 (完全燃燒) 를 예들들면 가스의 몰 (mole) 변화는 무시된다.



즉 $n_i = 24.8$, $n_f = 25.8$ 로서 이 경우 폭발압력은 주로 연소과정에서의 온도상승으로 초래된다. 보통 공기중에서 측정되는 최대압력 (절대압력) 은 초기압력 (절대압력) 의 약 8배 정도이다. 그리고 [그림 3-2]에서 나타낸 바와



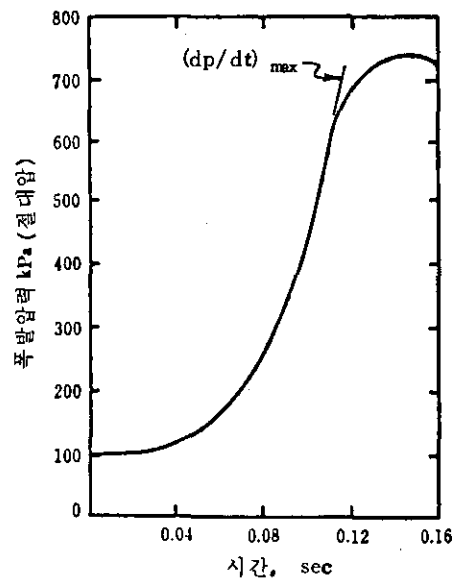
[그림 3-2] 프로판-공기 혼합기의 폭발압력과 폭발압력상승속도
- 초기압력 약 100 Kpa (절대압), 온도 65.5 °C, 10 ℓ 용기

같이 프로판과 헥산 (Hexane)에 있어서 최대압력은 공기에 대한 혼합기의 조성이 화학양론농도 ($C_{st} = 4.02\%$)보다도 약간 큰 경우에 형성되는 바 폭발압력의 피크는 대공기혼합기의 화학양론농도 부근에서 현저하다고 할 수 있다.

2. 폭발압력 최대상승속도 (爆發壓力 最大上昇速度)

폭발압력상승속도는 dp/dt 로 표시하며 9.4% 메탄 (Mathane) 혼합기에 대한 예를 [그림 3-3]에 나타내었다. 폭발의 초기단계에서는 압력상승은 약간으로서 [그림 3-3]에 의하면 압력은 70 msec에서 101 Kpa정도 상승하였으나 그후 같은 시간후에는 517 Kpa상승하며 최대폭발압력에 달하게 된다. 실험에 의하면 최대값 $(dp/dt)_{max}$ 은 폭발의 종료직전 그리고 화염이 용기벽에 도달하는 시점에 나타난다.

가연물의 농도는 폭발압력상승속도에 영향을 미친다. $(dp/dt)_{max}$ 은 [그림 3-2]에 나타난 바와같이 대공기화학양론 조성보다도 약간 높은 때에 일어난다.



[그림 3-3] 9.4% v/v 메탄 - 90.6% v/v 공기혼합기의 폭발압력 (실험치)
- 28 ℓ 입방체 밀폐용기, 혼합기에 난류를 부여하지 않은 경우

II. 가연성물질별 특성

건조설비, 집진설비 그리고 분체수송 및 저장설비에서 취급되는 가연성물질은 가연성가스(혹은 증기), 가연성액체 미스트, 가연성분진 및 하이브리드 혼합물등이며 이들의 종류, 혼합비, 입자의 크기 등에 따라서 폭발위험이나 그 피해정도가 달라진다.

(1) 가연성가스 및 증기

가연성가스 및 증기는 폭발범위 즉, 폭발하한계(Lower Explosive Limit)와 폭발상한계(Upper Explosive Limit)를 가지며, 이들 범위내에서 착화가 가능하고 연소가 지속된다. 앞의 [그림3-2]에서 설명한 바와 같이 최대폭발압력은 이들 혼합기의 조성이 화학양론농도(C_{st})보다 약간 높을때가 가장 높다. 대부분 탄화수소화합물은 최대폭발압력이 헥산(Hexane)의 $\pm 10\%$ 이내이며, 압력상승속도 또한 유사한 범위 이내이다. 참고로 <표 2-1>에 가연성가스 및 증기에 대한 최대폭발압력과 압력상승속도를 나타내었다.

(2) 가연성액체 미스트(Mist)

가연성액체 미스트도 역시 폭발을 일으킨다. 폭발은 인화점(引火點) 이상의 온도에서 뿐만아니라 인화점 이하의 온도에서도 일어날 수 있다. 극단적인 경우 동결된 방울입자운은 분진운과 같이 폭발할 수 있다. 분산된 탄화수소 미스트에 대한 폭발하한계는 방울입자의 직경이 약 10μ 에서 100μ 으로 증가함에 따라서 약 $50\text{ mg}/\ell$ 에서 $10\text{ mg}/\ell$ 로 변한다. $50\text{ mg}/\ell$ 의 폭발하한계는 실온에서 공기에 대한 가연성탄화수소가스의 폭발하한계 값과 대략 일치한다.

액체 미스트의 착화용이성은 방울입자의 직경에 따라 달라진다. 최소착화에너지(Minimum Ignition Energy)는 방울입자 직경의 3승에 비례하여

증가한다. 즉 최소착화에너지는 입자의 직경이 감소됨에 따라 현저하게 감소된다.

또한 가연성액체 폼(Foam)은 쉽게 연소하고, 그리고 미세하게 분산된 미스트 처럼 최소착화에너지가 낮다. 또한 액체속에 공기를 통과시킴(Bubbling)으로서 생성되는 폼은 연소에 필요한 공기를 포함하게 된다. 특히 폭발위험성이 높은 경우로서 만일 가연성액체가 일정 압력하에서 공기와 포화된 상태로 액체상의 폼을 형성하며 압력을 분출한다면 기포상태의 가스상은 산소를 많이 함유하게 된다. 이것은 가연성액체에 질소보다는 산소의 용해도(溶解度)가 더 높기 때문이다. 폼의 연소특성은 액체종류, 기포의 크기 그리고 기포막의 두께와 같은 특성에 따라 차이가 있다.

(3) 가연성분진

가연성가스와 같이 분진폭발에 있어서도 일정한 농도한계를 벗어나면 화염이 전파되지 않는다. 따라서 분진의 종류에 따라 각각 고유의 폭발한계 농도가 있으며 가스와는 달리 상한계에 관해서는 일반적으로 널리 알려져 있지 않다.

일반적으로 분진의 폭발하한농도 즉 최소폭발농도는 대략 $20 \sim 60 \text{ g/m}^3$, 폭발상한농도는 대략 $2,000 \sim 6,000 \text{ g/m}^3$ 의 범위내에 든다고 한다. 비록 이 농도가 실험적으로 구하여 진다고 하나 그것의 실제값은 입자의 크기나 입자의 분포, 운상 또는 층상등 각종 요인에 따라 그 변동이 상당히 크다. 층상의 분진도 부유(浮遊)됨으로서 폭발농도를 갖는 분진운(粉塵雲)을 형성할 수 있다. 따라서 최소폭발농도는 안전하게 누적될 수 있는 것이 허용되는 이 같은 정적(Static)분진량을 결정하는데 이용될 수 있다. 분진에 대한 폭발상한농도는 실험중에 분진을 적당하게 부유시키는 문제때문에 측정하기가 어려우며, 가스와 같이 연소시의 최대압력상승속도를 갖는 이상적인

〈표 2-1〉 가스 및 증기에 대한 폭발특성

	가스 및 증기의 용적비 (%)														
	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18
아세톤															
최대압력	-	-	48	62	79	83	80	76	61	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	0.44	0.20	0.08	0.07	0.08	0.16	0.52	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	134	500	1538	2000	1500	900	158	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	110	300	1000	1200	1000	475	110	-	-	-	-	-	-
아크릴로니트릴															
최대압력	-	-	-	62	80	98	104	109	-	106	104	97	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	-	0.132	0.104	0.049	0.044	0.042	-	0.068	0.13	0.23	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	-	500	925	2275	2500	2800	-	2500	2000	890	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	-	300	775	2000	2400	2600	-	1600	800	400	-	-	-
부탄															
최대압력	-	-	72	97	97	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	0.132	0.057	0.0567	0.407	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	715	2100	2300	256	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	550	1700	1700	170	-	-	-	-	-	-	-	-	-
벤젠															
최대압력	72	-	93	97	77	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	0.14	-	0.05	0.06	0.14	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	850	-	2300	2300	1000	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	500	-	1850	1600	550	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
부틸알콜															
최대압력	-	-	70	95	94	104	-	97	-	96	81	70	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	0.26	0.088	0.08	0.064	-	0.11	-	0.11	0.36	0.56	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	425	1920	2000	2700	-	1600	-	1550	375	250	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	275	1100	1200	1600	-	975	-	950	225	125	-	-	-
디에틸에테르															
최대압력	47	-	77	75	104	100	80	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	0.36	-	0.107	0.101	0.051	0.056	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	366	-	925	1250	3000	2100	370	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	125	-	725	750	2000	1800	200	-	-	-	-	-	-	-	-

	가스와 증기에 대한 폭발특성														
	5	7	8	10	12	13	14	15	16	18	20	25	30	35	40
아세트알데이드															
최대압력	-	76	32	94	94	-	90	-	78	65	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	0.088	0.070	0.049	0.051	-	0.068	-	0.192	0.42	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	1025	1250	2100	2000	-	1400	-	510	200	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	800	1150	1900	1800	-	1300	-	400	150	-	-	-	-	-
아세틸렌															
최대압력	79	121	134	144	148	150	146	144	138	-	112	100	-	-	-
최대압력 도달시간	0.0336	0.0192	0.0185	0.012	0.015	0.017	0.02	0.024	0.025	-	0.048	0.175	-	-	-
최대압력 상승속도	2500	6000	10000	11000	12000	12000	11000	8000	6500	-	4500	1400	-	-	-
평균압력 상승속도	2300	6000	7250	12000	10000	8800	7300	6000	5500	-	2400	575	-	-	-
에틸알콜															
최대압력	49	-	92	97	99	-	96	-	89	80	73	-	-	-	-
최대압력 도달시간	0.94	-	0.06	0.056	0.064	-	0.084	-	0.23	0.33	0.72	-	-	-	-
최대압력 상승속도	75	-	2050	2500	2300	-	2075	-	1200	325	238	-	-	-	-
평균압력 상승속도	50	-	1500	1700	1550	-	1150	-	400	240	100	-	-	-	-
수소															
최대압력	-	-	-	-	-	-	-	61	-	-	65	68	99	101	99
최대압력 도달시간	-	-	-	-	-	-	-	0.029	-	-	0.028	0.025	0.011	0.010	0.0112
최대압력 상승속도	-	-	-	-	-	-	-	2750	-	-	3000	3100	9900	11000	10000
평균압력 상승속도	-	-	-	-	-	-	-	2100	-	-	2300	2700	9000	10000	8800
메틸알콜															
최대압력	-	-	65	79	85	-	-	90	-	84	76	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	0.22	0.08	0.08	-	-	0.06	-	0.10	0.18	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	475	1818	2000	-	-	3030	-	1750	1000	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	300	1000	1050	-	-	1500	-	840	400	-	-	-	-
메틸렌클로라이드 89%															
메틸알콜 11%															
최대압력	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	70	44	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.72	0.48	0.72	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	238	75	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85	150	60	-	-	-

[illegible]

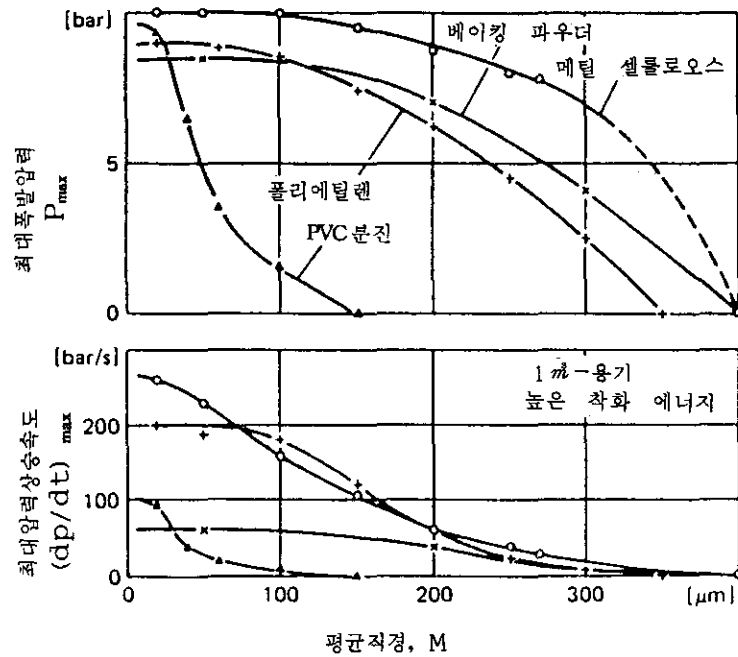
	가스 및 증기의 용적비 (%)														
	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
이소프로필 알콜															
최대압력	-	-	-	-	66	85	92	-	89	-	69	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	-	-	0.23	0.08	0.072	-	0.12	-	0.70	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	-	-	475	1560	1925	-	1325	-	145	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	-	-	280	1050	1300	-	750	-	100	-	-	-	-
이소프로필 에테르															
최대압력	-	65	90	102	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	0.22	0.088	0.061	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	640	1825	1675	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	300	7000	1650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
나프타															
최대압력	80	89	94	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	0.11	0.07	0.06	-	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	1000	2500	2500	-	303	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	725	1250	550	-	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
프로판															
최대압력	-	-	-	74	92	96	84	48	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	-	0.098	0.057	0.056	0.129	1.36	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	-	1250	2400	2500	1375	35	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	-	760	1600	1700	650	35	-	-	-	-	-	-	-
프로필렌디클로라이드															
최대압력	-	-	-	-	-	83	88	-	56	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	-	-	-	-	-	0.020	0.174	-	0.22	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	-	-	-	-	-	675	1100	-	775	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	-	-	-	-	-	410	500	-	250	-	-	-	-	-	-
톨루엔															
최대압력	40	78	-	88	92	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 도달시간	1.28	0.16	-	0.08	0.10	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
최대압력 상승속도	43	850	-	2200	2400	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평균압력 상승속도	30	500	-	1100	920	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* 최대압력 (psig), 시간 (sec), 압력상승속도 (psig/sec)

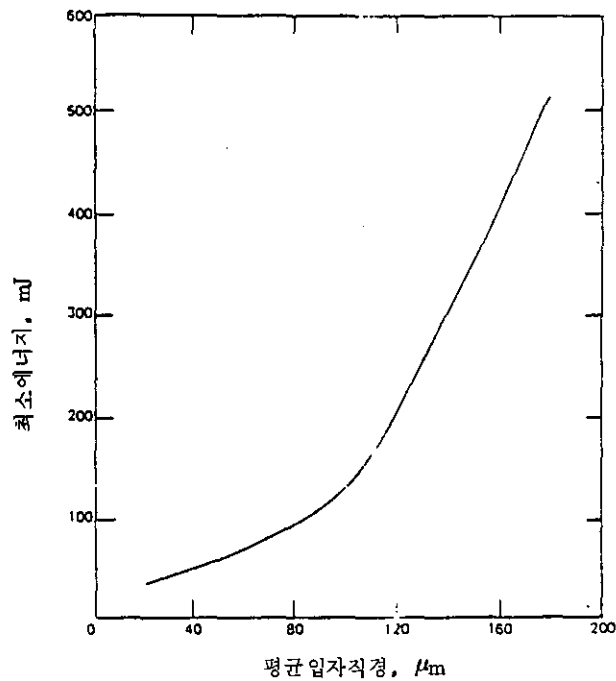
* 밀폐된 10 ℓ 크기의 용기에서의 실험결과

농도는 측정이 가능하다.

최대폭발압력과 최대압력 상승속도는 일반적으로 [그림 3-4]와 같이 분진의 입자크기가 감소할수록 증가하며, 최대압력상승속도는 입자크기에 더욱 민감하며 이 민감성은 대략 $50\ \mu\text{m}$ 이하의 입자에 대하여 가장 현저하다. 그리고 최대폭발압력의 민감성은 입자크기가 $200 \sim 420\ \mu\text{m}$ 범위내에서 입자가 더 클수록 현저하다. 또한 최소착화에너지는 [그림 3-5]와 같이 입자의 크기가 작을수록 낮아진다.



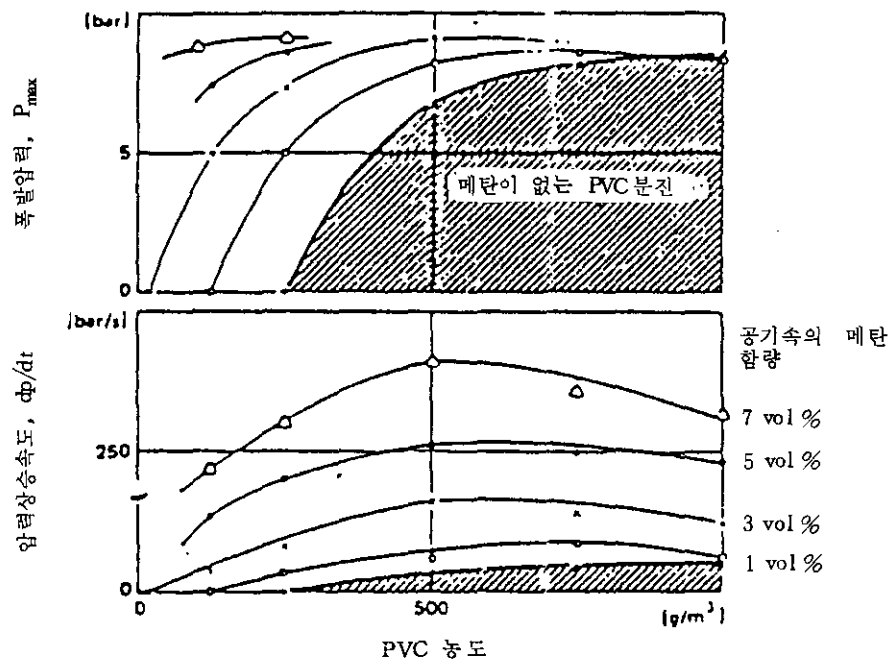
[그림 3-4] 분진입자의 평균입자 직경에 따른 최대압력 및 압력상승속도 효과 ($1\ \text{m}^3$ 용기)



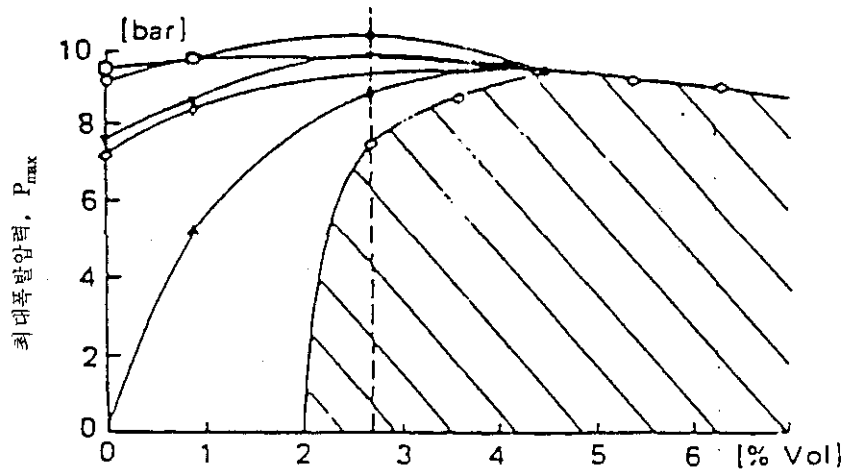
[그림 3 - 5] 곡물분진의 평균입자 직경에 따른 최소착화에너지 효과

(4) 하이브리드 혼합물 (Hybrid mixture)

하이브리드 혼합물은 공기 (산화제) 중에 가연성가스와 분진이 혼합된 것으로서 흔히 유동층, 기류건조기등에서 형성될 수 있으며, 이들 물질은 혼합비율에 따라 연소특성에 많은 차이가 있다. 즉 일반적으로 폭발하한계 농도와 최소착화에너지가 낮아지며 또한 폭발시 최대폭발압력이나 폭발압력 최대상승속도가 상당히 증가하기 때문에 폭발에 대한 위험성이 훨씬 높다. 예로서 PVC분진과 메탄가스 혼합비율별 그리고 프로판가스와 각종 분진의 혼합비율별 폭발압력과 최대압력상승속도와의 관계를 각각 [그림 3 - 6]과 [그림 3 - 7]에 나타내었다. 또한 참고로 [그림 3 - 8]에 하이브리드 혼합물에 대한 최소착화에너지 관계를 나타내었다.



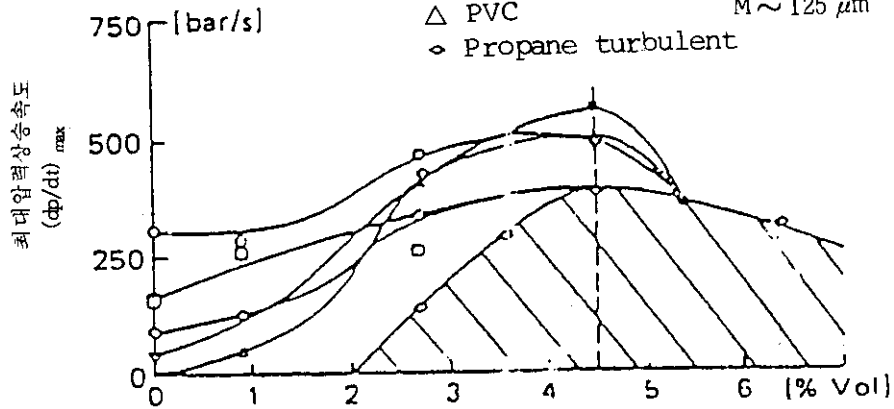
[그림 3 - 6] PVC / 메탄 / 공기 / 혼합물의 연속특성
(m 용기, 착화에너지 10,000 J)



공기속의 프로판함량

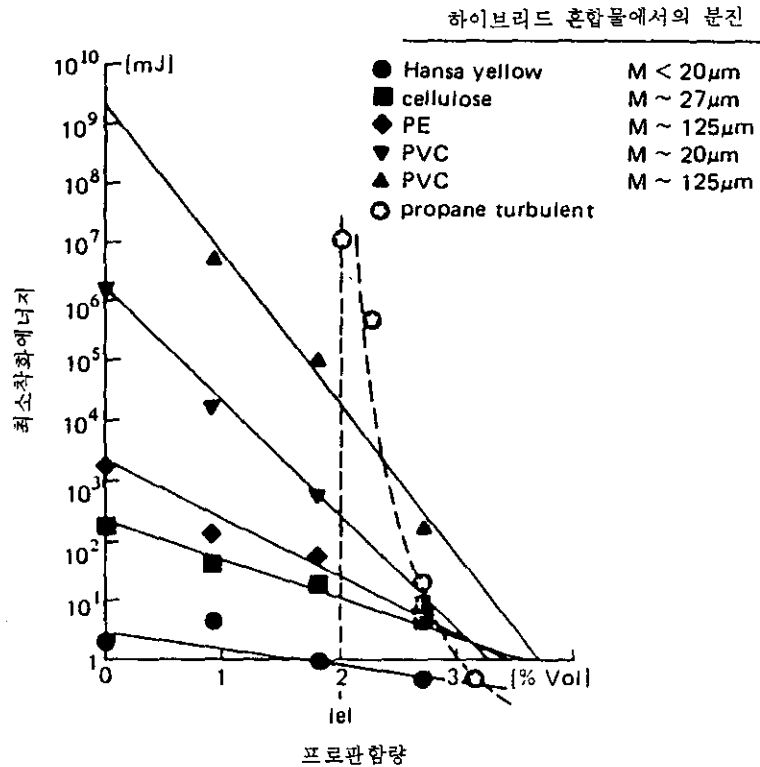
하이브리드 혼합물에서의 분진

- Hansa yellow $M < 20 \mu m$
- Cellulose $M \sim 23 \mu m$
- ◇ PE $M \sim 80 \mu m$
- ▽ PVC $M \sim 20 \mu m$
- △ PVC $M \sim 125 \mu m$
- ◊ Propane turbulent



공기속의 프로판함량

[그림 3 - 7] 분진 / 프로판 / 공기 혼합물의 연소특성 (1 m³ 용기, 착화에너지 10,000 J)



[그림 3-8] 프로판 함량에 따른 하이브리드 혼합물의 최소착화에너지

Ⅲ. 폭발강도에 영향을 미치는 요인

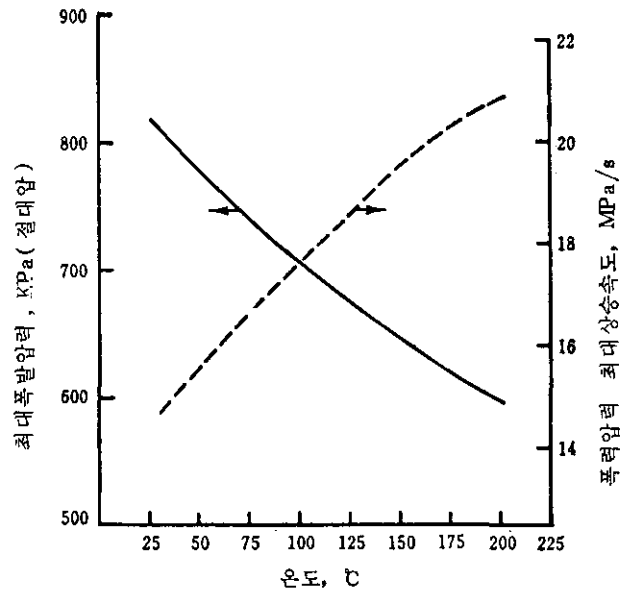
위에서 언급한 최대폭발압력 P_{max} 와 폭발압력 최대상승속도 $(dp/dt)_{max}$ 는 절대압 101.325KPa, 표준대기온도를 기준으로 한 것이며, 데이터도 실재 설비보다도 아주 작은 용기에 의해 실험된 결과이다. 따라서 이들에 따른 영향을 검토하여야 할 것이다.

1. 초기온도 (Initial Temperature)

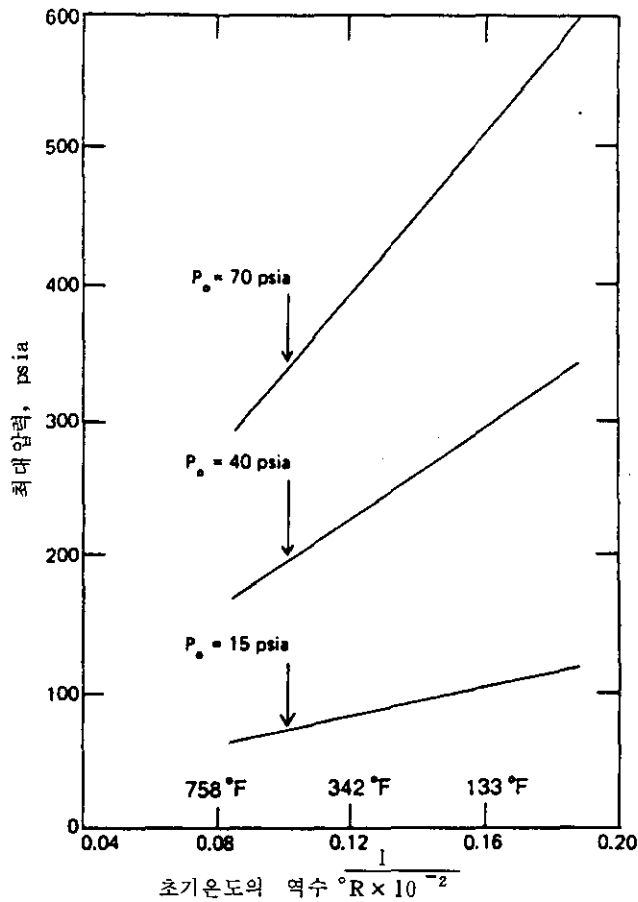
온도가 상승하면 최대폭발압력은 감소하게 된다. 이는 온도가 높으면 용기 중에 존재하는 물질의 양이 감소하는데 있다. [그림 3-9]에 의하면 프로판

의 최대폭발압력 (대 공기농도 5 % v/v) 은 27 ℃에서 818.4 KPa (절대압) 로 부터 204 ℃에서는 597.8 KPa (절대압) 으로 감소한다.

반면에 폭발압력 최대상승속도는 연소속도가 초기온도 상승에 비례하여 증대 하기 때문에 온도상승과 함께 증가하게 된다. [그림 3-10] 은 9.9 % v/v 메 탄의 대공기혼합기에 대한 초기압력별 초기온도변화에 대한 최대압력을 나타 낸 것이다.



[그림 3-9] 최대폭발압력과 폭발압력 최대상승속도에 미치는 온도의 영향 - 초기압력 100 KPa (절대압), 10 ℓ 밀폐용기, 대공기농도 5 % 프로판



[그림 3-10] 밀폐용기에서의 최대압력에 미치는 초기온도초과
- 9.9 % 메탄 / 공기

2. 초기압력 (Initial Pressure)

식 3-1에 의하면 최대폭발압력 (P_{max})은 초기압력 (P_i)에 영향을 받는다. 따라서 폭발압력의 피크가 그 초기압력의 약 8배라는 관계는 압력이 높은 경우에도 성립된다. 그 예로서 〈표 2-2〉에 대공기농도 5% (v/v) 프로판에 대한 초기압력과 최대폭발압력의 관계를 나타내었다.

〈 표 2 - 2 〉 최대 폭발압력에 미치는 초기압력의 영향 *

초기압력, P_i KPa(절대압)	최대폭발압력, P_{max} KPa(절대압)	P_{max} / P_i
200	1,620	8.10
400	3,309	8.27
600	4,895	8.16

* 대 공기농도 5 % 프로판

3. 용기의 형상 (形狀)

(1) 부피와 형상

용기의 부피 또는 형상은 최대폭발압력 P_{max} 에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 길이 / 직경의 비가 큰 장치에서와 같이 열손실이 큰 경우에는 최대폭발압력은 낮아지게 된다. 한편 폭발압력 최대상승속도 $(dp/dt)_{max}$ 는 용기의 용적 V 에 큰 영향을 미친다. 용기의 형상, 난류 (亂流) 의 세기 및 발화점이 동일한 조건일 경우는 임의의 화합물에 대하여 다음식이 성립한다.

$$(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = \text{Const.} = \frac{K_{st}}{10} \quad \text{또는} \quad \frac{K_G}{10} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

예를들면 용적 64 m^3 의 구형용기의 $(dp/dt)_{max}$ 는 1 m^3 의 구형용기의 $(dp/dt)_{max}$ 값의 $1 / 4$ 이 된다.

(2) 압력의 중첩 (重疊)

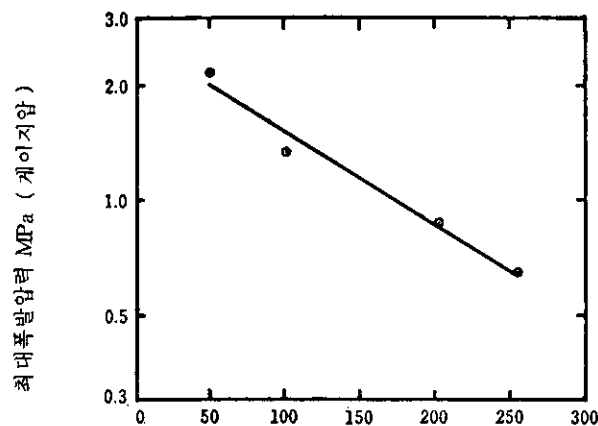
내부가 간막이로 구분된 장치에서는 압력이 서로 다른 결과를 초래하기 때문에 전술한 압력보다도 폭발압력이 크게 된다. 간막이로 차단된 실(室) 중 한 곳에서 발화가 되면 화염전방에 있는 가스혼합물의 일부는 간막이로 차단된 두실의 연결부위를 통하여 제 2 의 실로 유입되어 제 2 실내 가연성혼합기의 압력이 증대하게 되고 이때 압축된 혼합기는 제 1 실에서 발생된 화염(火炎)에 의해 발화된다. 최종적인 폭발압력은 2 간막이 실의 연결부의 크기와 밀접한 관계가 있다. 미국 내부성광산국이 단면적 $0.3 \times 0.3 \text{ m}$, 높이 1.27 m 의 밀폐용기 (0.11 m^3) 를 이용한 실험결과 의하면 내부에 직경을 점차 변화시킬 수

있는 구멍 1개를 설치한 $0.3 \times 0.3 \times 0.13 \text{ m}$ 의 간막이를 움직여서 1 : 1, 3 : 1, 7 : 1의 차단비를 두고 양쪽 공간에는 9.5 % v/v의 천연가스를 봉입 ($C_{st} \approx 9.5 \text{ \% v/v}$) 하여 실험한 결과 [그림 3 - 11] 과 같이 최대폭발압력의 변화는 압력의 중첩 (重疊) 효과를 잘 나타내고 있다. 최대폭발압력과 구멍의 직경크기 사이에는 반로그 (Semilogarithmic) 관계가 성립한다.

$$\log P_{max} = -0.002416 D_h + 0.424208 \dots\dots\dots (3-4)$$

$$D_h = 50.8 \sim 254$$

최대폭발압력을 나타낸 차단비는 1 : 1이었으나 구멍의 외경이 203 mm일 경우는 차단비가 3 : 1이었으며 넓은 차단실에서 발화하였다. 최대압력은 구멍의 외경이 203 mm 이하에서는 발화공간에 인접한 공간에서 얻어졌다.



0.3 × 0.3 m 격벽에 설치한 구멍직경, mm

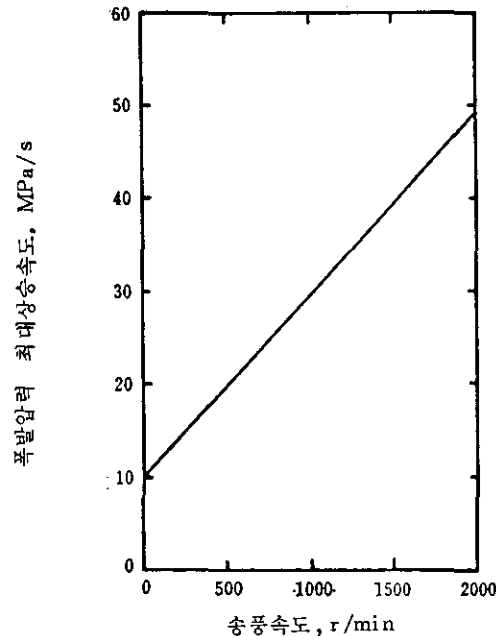
[그림 3-11] 최대폭발압력에 미치는 압력의 중첩효과 - 0.3 × 0.3 m의 간막이로 2분된 용적 0.11 m³의 차단실내의 대공기농도 9.5 %천연가스

4. 난류 (Turbulence)

최대폭발압력 P_{max} 는 공기하의 화학양론농도에서 초기난류 (Initial Tur-

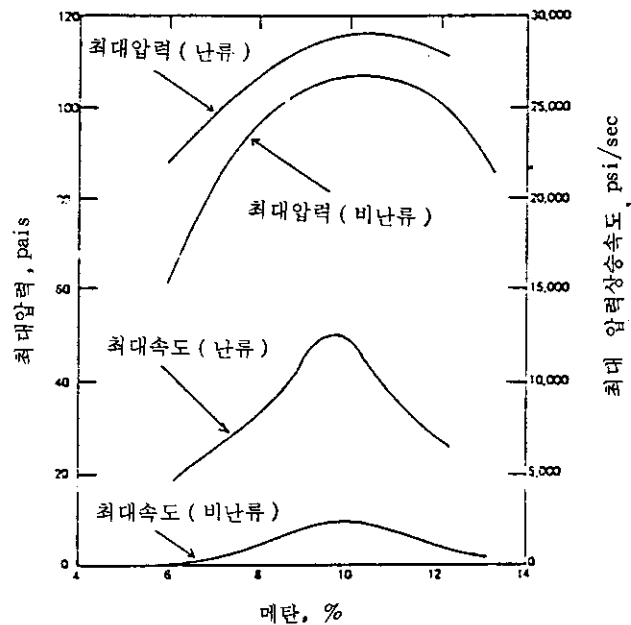
bulence)에 의해 약간(약 6%) 증가된다. 초기난류가 P_{max} 에 미치는 영향은 연소하한과 상한에서는 현저하다. 거의 연소하한에 있는 메탄-공기 혼합기에 의한 실험에서 초기난류가 가해진 경우 P_{max} 는 난류를 부여하지 않은 경우보다도 30% 더 높았다.

초기난류는 폭발압력상승속도를 현저하게 증가시킨다. [그림 3-12]는 대공기농도 3% 펜탄의 P_{max} 에 미치는 난류의 효과를 나타낸 것으로 실험에 사용한 용기는 1.7 m이며 난류를 일으키기 위하여 직경 460 mm의 송풍기를 설치($C_{sr} = 2.56\% \text{ v/v}$)하였다. 결과에 의하면 폭발압력상승속도는 송풍기(Fan)의 회전속도(回轉速度)에 비례하여 직선적으로 증가하여 회전수 2000 rpm에서는 난류가 가해지지 않은 경우보다 약 5 배에 달하고 있다. 같은 현상이 대공기농도 9.4% v/v 메탄에서도 찾아볼 수 있다. 따라서 폭발압력상승속도는 초기난류가 있는 경우에는 없는 경우 보다도 약 5 배이상 높다고 할 수 있다.



[그림 3-12] 폭발압력 최대상승속도에 미치는 난류의 영향 - 1.7 m 밀폐용기, 대공기농도 3.0% v/v 펜탄

각종 설비에서 취급하는 가스상은 대체로 난류상태로 운전되고 있다. 파이프나 덕트를 통하여 흐르는 가스상은 단면적의 확대 등으로 난류화된다. 따라서 이 경우에는 폭발압력방산구의 면적을 구하는 노모그래프(Nomographs)를 그대로 사용할 수 없다. 실험결과에 의하면 초기난류 상태의 메탄이나 프로판의 폭발압력상승속도는 흐름이 없는 정지상태 수소의 폭발압력상승속도와 유사하다. 따라서 설계시에는 이와같은 초기 난류효과를 충분히 고려하여야 한다. 참고로 [그림 3-13]에 대공기 메탄혼합기의 난류효과를 실험한 결과를 나타내었다.



[그림 3-13] 난류 및 비난류 메탄/공기 혼합기의 최대압력과 최대 압력상승속도 (1 ft³의 밀폐된 용기)

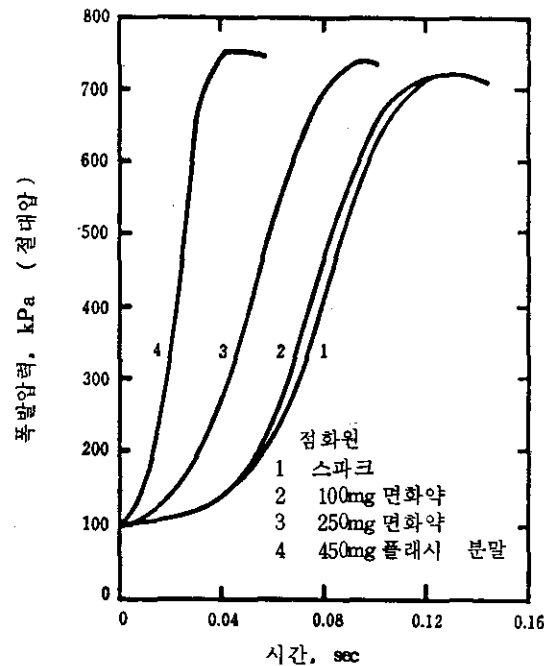
5. 착화에너지 (Ignition Energy)

최대폭발압력과 폭발압력 최대상승속도는 1 m³이하의 용기에서 폭발이 발생하는 경우 일반적으로 점화원의 에너지가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 큰

용기에서는 이들이 분출화염과 같은 강력한 점화원인 경우에 한하여 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 비교적 큰 용기에서는 점화원 지점에서 방출되는 에너지가 폭연의 과정에 있어서는 거의 영향이 없기 때문이다. 이것은 난류가 폭연에 의해 화염전방에서 유도되고 이 난류는 점화원의 어떤 효과를 보다 배가시키기 때문이라 할 수 있다.

그리고 용기나 설비의 중앙에서 발화하게 될 경우 폭발압력 최대상승속도가 가장 높은데 이것은 발화가 중앙에서 벗어나게 되면 연소가 충분하게 이루어지기 전에 화염이 용기의 벽에 접하게 되기 때문이다. 뿐만아니라 점화원이 여러개인 경우에는 압력상승속도가 증가하게 된다. 하지만 설비내에서의 착화에너지의 크기나 형태를 정확하게는 예측할 수 없으나 산업현장에서 취급하는 성비의 경우는 착화에너지가 상당히 큰것으로 추정된다. 예를 들면 파이프나 덕트 등으로 연결된 설비의 경우 한쪽 설비가 점화에 의해 폭발되면 이때 발생된 압력은 파이프나 덕트를 통하여 다른 설비로 전파되면서 압력과 난류현상을 증가시키고, 이때 화염은 아주 큰 착화원으로 작용하게 된다.

참고로 28ℓ 용기내에 대공기농도 9.4~9.5 %v/v의 메탄을 봉입(封入)하여 4종의 점화원으로 폭발실험을 실시한 결과를 [그림 3-14]에 나타내었다. 여기서 점화원의 강도에 따라서 최대폭발압력은 단지 약간 증가한다. 그리고 폭발압력 최대상승속도는 처음 3종의 점화원에 있어서는 거의 같은 정도이나 400mg의 플래시 분말(마그네슘과 과염소산나트륨)과 같은 강한 점화원의 경우는 그 속도가 아주 높고 또한 폭발개시 시간도 상당히 단축되는 것을 알 수 있다. 이는 강한 점화원을 사용할 경우 화염면적(火炎面積)이 확대되기 때문으로 추정할 수 있으며 점화원이 여러개인 경우에도 유사한 현상을 보인다.

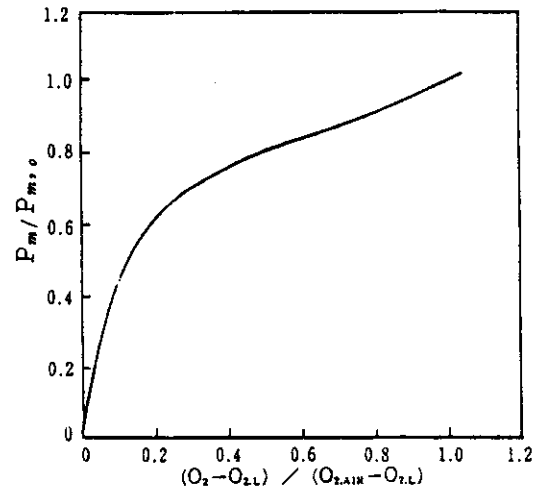


[그림 3-14] 폭발압력상승속도에 미치는 점화원의 영향 - 28ℓ입 방형 밀폐용기, 대공기농도 9.4 % v/v 메탄

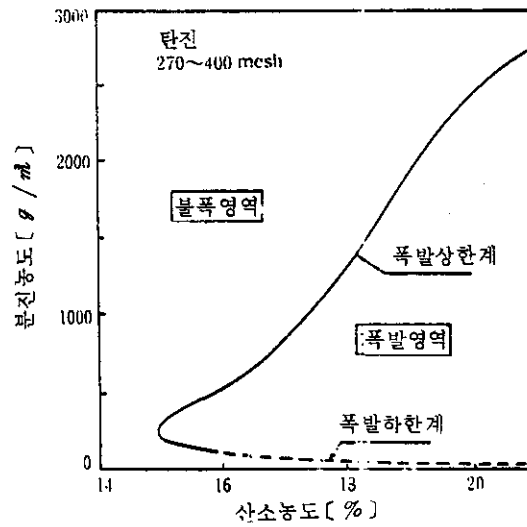
6. 산소농도 (酸素濃度)

폭발에 있어서 산화제 (Oxidant)는 공기중의 산소가 대부분이며 21 % 이상의 산소농도는 연소반응을 격렬하게 하고 폭굉 (Detonation)으로 전이할 가능성이 증가하게 된다.

최대폭발압력에 미치는 산소 농도의 영향을 [그림 3-15]에 나타내었다. 여기서 가로축은 산소농도로서 폭발한계 산소농도를 0, 공기를 1로 나타내고 세로축의 최대폭발압력은 공기중에서 초기압력이 대기압인 경우의 최대폭발압력 $P_{m,0}$ 에 대한 비로서 표시한 것이다. 이 그림에 의하면 무차원 (無次元) 산소농도가 0.3 이하로 되지 않으면 폭발압력의 감소는 적다. [그림 3-16]은 탄진 (炭塵)의 폭발에 대한 산소농도를 나타낸 것으로 산소농도가 감소되면 폭발범위가 좁아지는 것을 나타낸다.



[그림 3-15] 최대 폭발압력에 미치는 산소농도의 영향



[그림 3-16] 폭발상·하한계에 미치는 산소농도의 영향

제5장 폭발압력방산구의 설치 실태조사

I. 폭발압력방산구의 설치 실태조사 개요

1. 조사목적

본 조사의 목적은 건조, 집진분리, 분체수송 및 저장설비 등에서의 가연성 가스, 증기 또는 분진폭발등으로 인한 인적 및 경제적손실과 피해확대를 방지하기 위하여 이들 설비에 대한 폭발압력방산구(爆發壓力放散口)의 설치실태 조사를 통하여 다음 사항을 파악함으로써 문제점을 분석하고 대책연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

- (1) 건조설비에서의 폭발압력방산구 설치실태
- (2) 집진설비에서의 폭발압력방산구 설치실태
- (3) 사일로 및 비킷엘리베이터의 폭발압력방산구 설치실태
- (4) 폭발압력방산구의 설치상의 문제점

2. 조사대상

조사대상은 당 공단 산업안전기술지도원(8개소)에서 진단 또는 기술지도를 실시한 사업장중 건조설비는 각종 사업장, 집진분리, 분체수송 및 저장설비는 목재, 곡물(穀物), 합성수지(合成樹脂) 등을 취급하는 분진폭발위험이 높은 사업장을 대상으로 하였다.

대상업체수는 건조설비의 경우 '91년기 조사된 123개 사업장 635대를 포함하여 11개 사업장 55대, 그리고 분체집진, 수송, 저장설비의 경우 22개 사업장 219대에 대하여 조사하였다.

3. 조사방법 및 내용

건조설비의 경우 123개 사업장 635대에 대해서는 '91년 설문조사 결과를 근거로 하였으며, 11개 사업장 55대에 대해서는 현장 실태조사를 실시하

였다. 그리고 분체집진, 수송, 저장설비의 경우 역시 현장실태 조사를 실시하였다. 본 조사에서는 분체집진, 수송·저장설비의 경우 가연성물질 또는 폭발 위험이 있는 물질 등을 취급하는 설비에 한하여 조사하였으며, 구체적인 자료는 현장에서 구할 수 없는 어려움이 있었기에 주로 폭발압력방산구의 설치 여부등을 조사하였다.

II. 설비별 폭발압력방산구 설치실태

1. 건조설비

건조설비를 취급하고 있는 134개 사업장, 690대의 건조설비〈표3-1〉에 대한 '91년, '92년 실태조사 결과에 의하면 〈표3-2〉 건조기종류별 안전장치 설치현황에 나타난 바와 같이 폭발압력방산구가 설치되어 있는 건조설비는 기류건조기 3대, 유동층건조기 6대로서 총 9대(1.3%)뿐이며, 또한 〈표3-3〉 건조제거물질별 안전장치 설치현황에 나타난 바와 같이 신나, 톨루엔, 벤젠, 알콜류 등을 건조제거하는 위험물 건조설비 281대에 폭발압력방산구가 설치되어 있는 설비는 1대(0.4%)로서 건조설비의 폭발압력방산구 설치상태는 극히 미흡한 상태로 폭발에 대한 방호측면에서 많은 문제점이 있는 것으로 나타났다.

폭발압력방산구는 제정 산업안전기준에 관한 규칙(1990. 7.23, 노동부령 제 61호) 제 302조 4항에 위험물건조설비는 그 상부를 가벼운 재료로 만들고 주위상황을 고려하여 폭발구 즉 폭발압력방산구를 설치하도록 규정하고 있으나 기설치, 제작되어 사용되고 있는 설비에는 설치상태가 아주 미흡하기 때문에 이에대한 보완대책이 시급하다고 하겠다.

〈 표 3 - 1 〉 업종별 업체수 및 건조기 보유현황

업종		화학 제품	섬유 제품	식료 품	펄프 지류	목재 품	인쇄 물	금속· 기계 제품	전기· 전자 제품	요업· 도자기 제품	고무· 가죽 제품	계
업체	수	36	9	5	10	9	3	26	19	6	11	134
	구성비 (%)	26.9	6.7	3.7	7.5	6.7	2.2	19.4	14.2	4.5	8.2	100
보유량	수	133	25	12	93	90	18	93	94	40	92	690
	구성비 (%)	19.3	3.6	1.7	13.6	13.0	2.6	13.5	13.6	5.8	13.3	100

〈 표 3 - 2 〉 건조기종류별 안전장치 설치현황

(단위 : 대)

건조기 \ 안전장치	폭발압력 방산구	경보장치*(온 도과열·가연 성가스 누출)	연소안전 장치	폭발억제 장치	건조기 수 (대)
상자형		61	10		149
터널형		60	50		110
드럼·실린더형		20			116
밴드형		38	1		113
진동동					3
다단원반					1
분무		2	1		7
회전		7			21
기류	3	15		1	19
시이트		18	17		36
적외선		13			37
유동층	6	13		1	25
진공		5			6
자외선		1			44
기타			2		3
계	9	253	81	2	690

* 공기혼입경보장치 : 3대 포함.

〈 표 3 - 3 〉 건조제거물질별 안전장치 설치현황

(단위 : 대)

안전장치 건조제거물질	폭압방산구	경 보 장 치	안전연소장치	폭발억제장치	건 조 기 수
물	7	95	41	2	279
신 나		74	20		166
톨루엔·벤젠	1	21	2		96
알 콴		6			19
기 타 용 제	1	16	4		90
유 분		41			40
계	9	211	67	2	690

2. 집진설비

업종별 업체수 및 분체집진·수송·저장설비 보유현황을 조사한 결과는 〈표 3-4〉와 같다. 이중 집진설비를 취급하고 있는 22개 사업장 112대의 백필터(Bag Filter) 집진기에 대하여 취급실태를 조사한 결과에 의하면 〈표 3-5〉와 같이 폭발압력방산구가 설치되어 있는 집진기는 64대(57.1%)로서 주로 가구·합판등 목제품제조업과 곡물을 하역 저장하는 업체에서 주로 설치하여 사용하고 있으며, 합성수지등 화학제품이나 금속기계제품을 제조하는 업체에서는 대부분 설치되어 있지않은 실정이다.

〈 표 3 - 4 〉 업종별 업체수 및 분체집진·수송·저장설비 보유현황

	업 체 수			보 유 량		
	집진설비	사일로·빈비킷엘리베이터	사일로·빈비킷엘리베이터	집진설비	사일로·빈비킷엘리베이터	사일로·빈비킷엘리베이터
화 학 제 품	7			22		
식 료 품	4	1	1	6	15	1
목 제 품	6	1	1	38	2	1
금속·기계제품	3			5		
하 역	2	2	2	41	82	6
계	22	4	4	112	99	8

〈 표 3 - 5 〉 분체집진, 수송, 저장설비별 폭발압력방산구 설치현황

	집진설비	사일로·빈	버킷엘리베이터
보유량	112	99	8
폭발압력방산구설치	64	5	3
설치비 (%)	57.1	5.1	37.5

3. 분체수송 및 저장설비

집진설비를 취급하고 있는 22개 사업장중 목분이나 곡물을 저장 또는 수송하는 설비 즉, 사일로 (Silo), 빈 (Bin) 및 버킷엘리베이터 (Bucket elevator)를 설치사용하는 업체는 4개 사업장으로서 사일로 99대, 버킷엘리베이터 8대를 보유하고 있으며 이들 설비중 폭발압력방산구가 설치되어 있는 설비는 사일로가 5대, (5.1%) 버킷엘리베이터가 3대 (37.5%) 이었다.

사일로의 경우 폭발압력방산구가 설치되지 않은 것은 대부분 곡물을 저장하는 철근콘크리트 사일로로서 분진이 많이 발생되지 않는 설비이나 방호측면에서 설치가 바람직할 것이며, 버킷엘리베이터의 경우는 1개 업체에서 폭발이 발생한 사례가 있으며 이를 보완하기 위하여 설치, 사용하고 있는 실정으로서 대부분 미설치 상태에서 사용하고 있다.

Ⅲ. 건조 및 집진설비의 폭발·화재로 인한 중대재해 사례

건조설비와 집진설비로 인한 폭발·화재사고는 각종 사업장에서 흔히 발생되고 있으며, 이들 재해는 중대재해 (重大災害) 뿐만 아니라 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다. 참고로 '88, '89, '91년도 중대재해중 이들 설비의 폭발, 화재로 인한 재해를 요약하면 〈표3-6〉 및 〈표3-7〉과 같다.

〈 표 3 - 6 〉 건조설비취급시 발생한 폭발, 화재로 인한 중대재해 사례 ('88, '89, '91 년도)

번호	회 사 명	종업원 수	주 요 생 산 품	건 조 물	건조기종류	건조제거질 물	가열 온도	열 원	원 인	재해자수
1	○○전기(주)	40 명	트랜스	트랜스(안정기 반제품)	상자형건조기	신 나	125℃	전 기 (전 열 열 장 치)	온도조절장치 고장, 과 열 폭발	사망 1 명
2	○ ○ (주)	40 명	전 자 부 품	스테이타(코아가 들어있는 모 타고정자)	상자형건조기	신 나	90℃	전 기 (전 열 열 장 치)	건조물 과다공급으로 환기 불충분 건조기 과열 폭발	사망 1 명 부상 2 명
3	○○산업사	25 명	착화탄 제 조	착화탄	상자형건조기	기타용제 물	70-80℃	고체연료	열원으로 직화(直火), 불티 비산 화재발생	사망 1 명
4	○○산업사	25 명	착화탄 제 조	착화탄	상자형건조기	기타용제 물	70-80℃	고체연료 (연 탄 화 덕)	착화탄이 연탄화덕에 떨어져 화재발생	사망 1 명
5	(주) ○ ○	650 명	신발류	운동화부품	선반건조대 (자연건조)	신 나	상온	—	라이타 점화시 인화 화재	사망 1 명
6	○○기업주	160 명	섬 유 제 품	섬유수지가공 (폴리우레탄 수지)	사이트건조기	트리클로로에틸렌	120℃	전 기 (전 열 열 장 치)	수지코팅기의 정전기로 화재발생, 건조기 폭 발	사망 2 명

번호	회 사 명	종업원 수	주 요 생 산 품	건 조 물	건조기종류	건조제거 물 질	가열 온도	열 원	원 인	재해자수
7	○○코팅 공 업 사	8명	섬유코 팅제품	섬유수지가공 (폴리우레탄및 아크릴수지)	사이트건조기	톨루엔및 아세톤	80— 100℃	액체연료 (경유 버너)	용제증기발생 환기불 충분, 배풍기 마모에 의한 불균형으로 스 파크 발생, 폭발	사망 2명 부상 1명
8	○○(주)	100명	테니스 공	섬유수지가공	사이트건조기	톨루엔	90℃	액체연료 (경유 버너)	용제증기발생 환기불 충분, 정전기 발생에 의한 폭발	부상 3명
9	○○산업	23명	신발류	신발밀창	밴드형건조기	톨루엔 사이클로 헥산	70— 80℃	전기 (전열 장치)	건조기 전방 후드의 송풍기 모타등 전기 기구 스파크로 폭발	사망 1명 부상 4명

(표 3 - 7) 집진설비의 폭발, 화재로 인한 중대재해 ('89 년, '91 년도)

번호	회 사 명	종업원 수	주 요 생산품	집진기 종 류	집 진 물 질	원 인	재해자수
1	○○공업(주)	—	합 판	백필타	목분진	목분진의 마찰 또는 정전기로 인한 1차 폭발, 진화작업중 2차 폭발.	사망 2명
2	○○공업(주)	397명	수 송 용 기계기구	백필타	알루미늄 (A1)분 진	용접불꽃이 분진 배출구(마대)에 점화, 내부로 전파. 진화작업중 집진기 폭발	사망 1명 부상 2명

이들 재해중 폭발로 인한 재해는 건조설비에서 8건중 5건, 집진설비에서 2건으로서 가연성가스와 증기 또는 분진으로 인한 폭발이 대부분을 차지하고 있으며, 현장조사를 직접 수행하지 않아 정확하게는 알 수 없으나 이들 재해의 대부분이 폭발시 폭압에 의해 설비의 구조상 약한 부위가 파괴, 비산되면서 발생되거나 또는 개구부(開口部)로 화염과 폭압이 방출되면서 발생한 재해가 대부분이라고 추정할 수 있다. 특히 상기 재해중 ○○공업(주)에서 발생한 중대재해의 경우는 백필타 집진기에 폭발압력방산구가 약측에 4개씩 설치되어 있었으나 설치위치가 부적당하여 폭발시 폭압과 화염이 공장 건물의 창문을 파괴시키고 건물내부로 전파되면서 피해가 확대된 예로서 방산구는 설치시에 폭발시 발생할 수 있는 문제점을 충분히 고려하여 적절한 위치에 설치하여야 한다.

Ⅳ. 실태조사 결과에 의한 문제점 분석

건조, 집진분리, 분체수송 및 저장설비에 대한 실태조사 결과 그 문제점을 요약하면 다음과 같다.

1. 위험물건조설비에 폭발압력방산구가 설치된 것은 0.4 %로서 설치상태가 거의 전무한 실정이므로 폭발시 피해확대 우려가 극히 높다.

2. 비위험물건조설비(409대)의 경우에도 분진폭발 등의 위험을 고려하여 폭발압력방산구가 2.0 % 설치되어 있으나 위험성을 고려할때 그 설치상태는 아주 미흡한 실정이다.

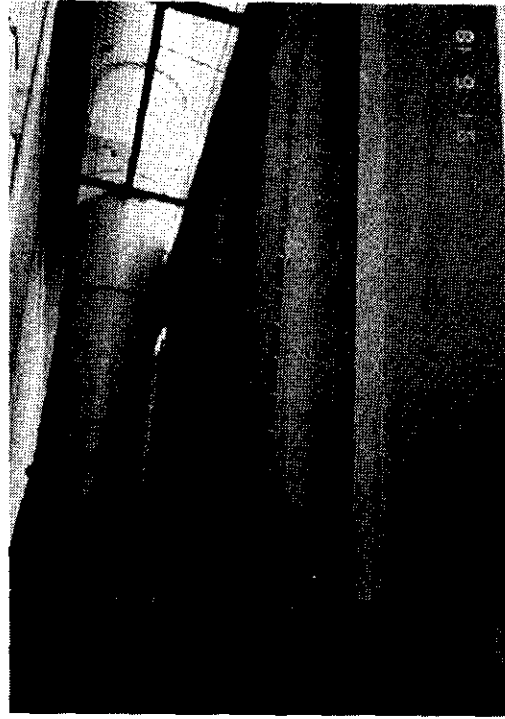
3. 집진설비에 57.1 %, 사일로에 5.1 % 그리고 비킷엘리베이트에 37.5 %의 폭발압력방산구가 설치되어 있는바 미설치된 설비가 총 67.1 %로서 설치상태가 저조하다.

4. 집진설비, 사일로 및 비킷엘리베이트 등에 설치, 사용되고 있는 폭발압력방산구도 그 구조, 개구면적, 설치위치, 재질등 설계상 부적절한 설비가 많다. 그 예는 다음과 같다.

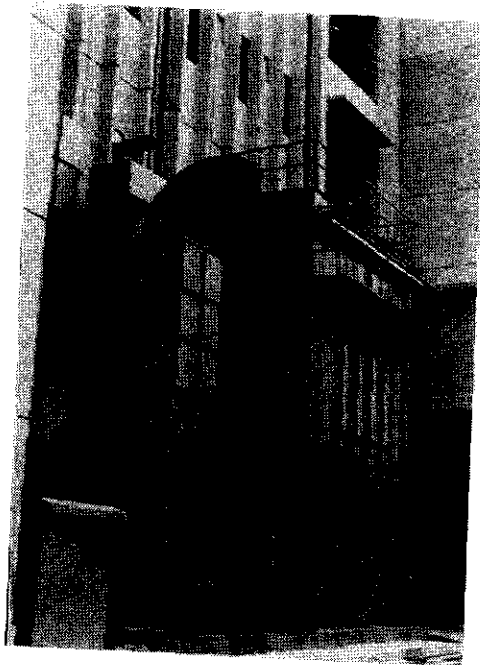
(1) 옥외에 설치된 집진기의 방산구가 건물벽면 또는 부속설비 등의 방향으로 설치된 것이 많다. 이같은 설비는 폭압방산시 건물이나 인접 부속설비 등의 파괴를 초래함으로서 피해를 확대할 위험이 높다.(사진 2-1 참조)

(2) 집진기의 방산구(좌우 8개중 4개)가 건물의 창문방향으로 설치된 설비가 있다. 이같은 설비는 폭압방산시 화염이 건물내부로 전파할 우려가 높는데 실제 '90년 월 발생한 ○○공업(주)에서의 집진기 폭발사고시 이와 같은 화염전파로 피해가 오히려 확대된 사례가 있었다.(사진 2-2 참조)

(3) 사일로의 방산구가 공장 사무실의 통로(계단)방향으로 설치된 설비가 많다. 이 경우 폭발시 폭압과 화염이 통로쪽으로 방출됨으로서 중대재해 발생위험이 높다.(사진 2-3 참조)



[사진 2-1] 방산구가 건물과 닥트방향으로 잘못 설치된 예 (집진기)



[사진 2-2] 방산구가 건물의 창문방향으로 잘못 설치된 예 (집진기)

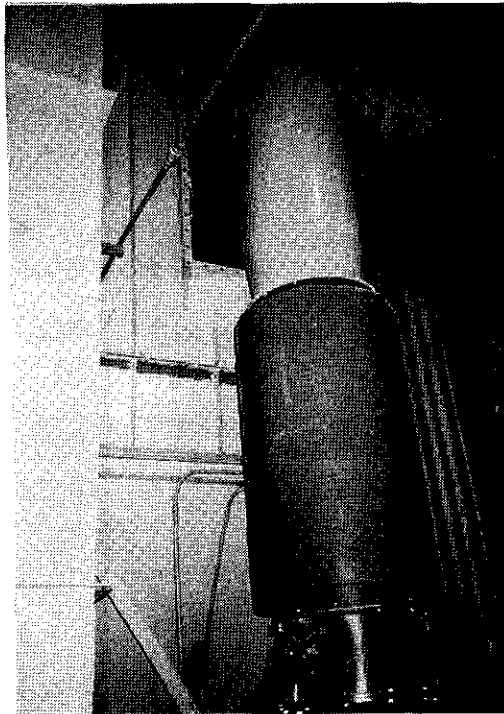


[사진 2-3] 방산구가 통로방향으로 잘못 설치된 예 (사일로)

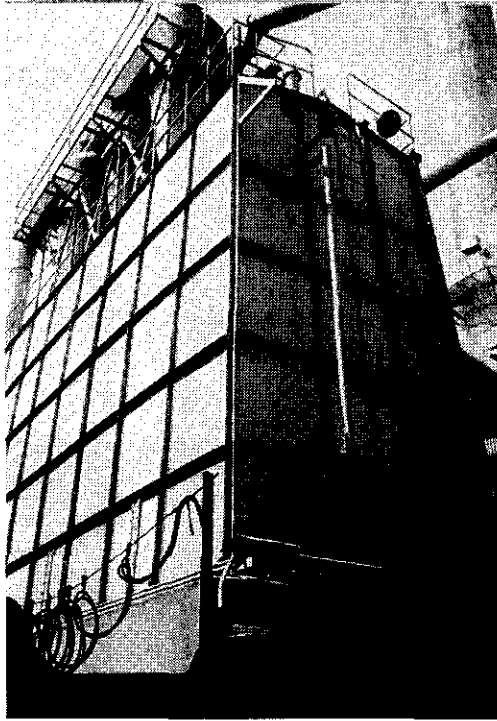
(4) 건물내부에 설치된 집진기의 폭압방산구에 방산유도관이 없는 설비가 많다. 방산유도관이 없는 경우 주위 설비와 건물의 파괴 우려가 높다.

(사진 2-4 참조)

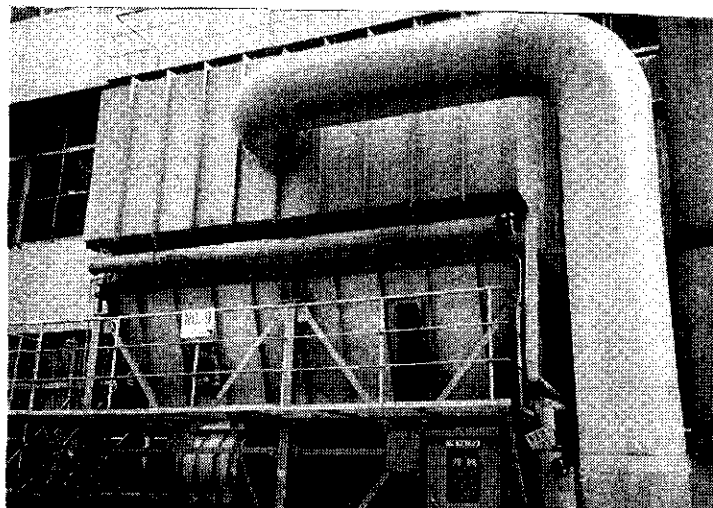
(5) 저장물질 높이 이하에 감시창(폭압방산구)가 설치된 사일로나 집진기가 많다. 이와같이 설치위치가 잘못된 경우 파이어볼(Fireball)의 발생 우려가 높다.(사진 2-5.6 참조)



[사진 2-4] 방산유도관이 미설치된 폭압방산구 예 (집진기)

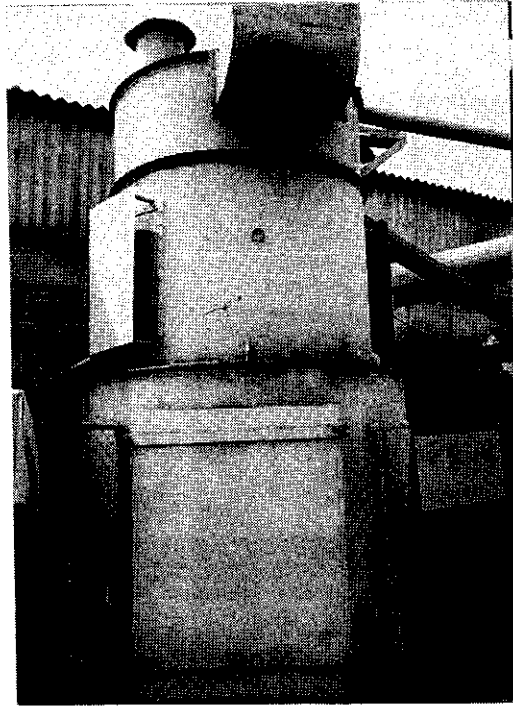


[사진 2-5] 저장물질 높이 이하에 방산구가 설치된 예 (사일로)



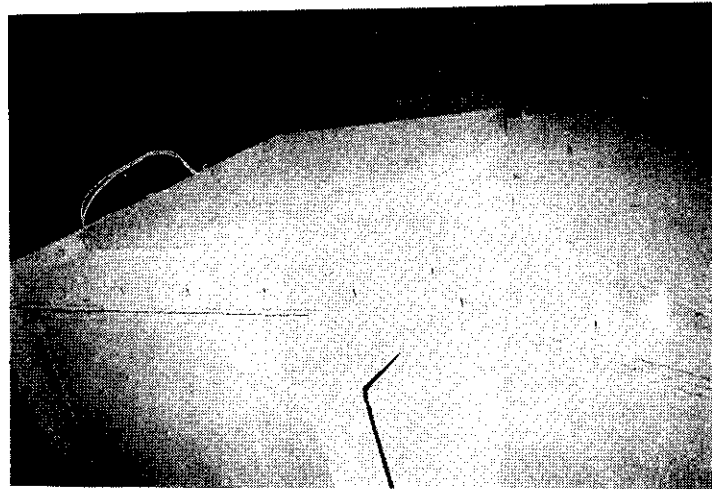
[사진 2-6] 방산구 역할을 할 수 있는 감시창이 하부에 설치된 예 (집진기)

(6) 방산구의 구조가 잘못 설계된 설비 즉, 폭압방산시 파열판과 그 보호판이 비산될 우려가 높은 설비가 많다.(사진 2-7 참조)



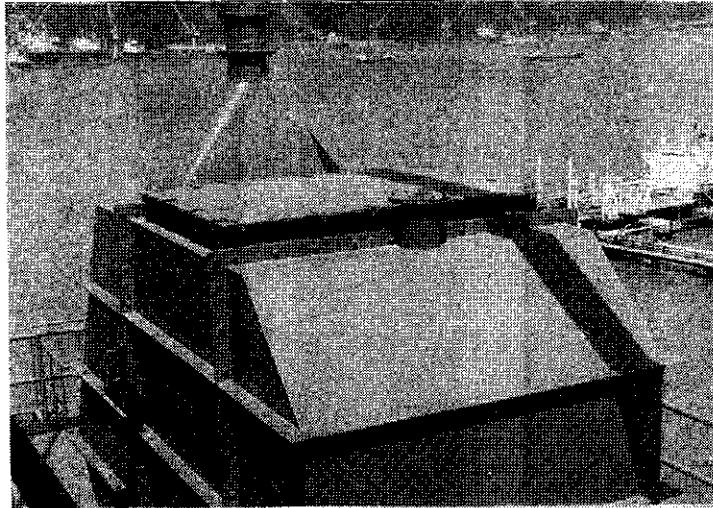
[사진 2-7] 방산구의 구조가 잘못 설계된 예(집진기)

(7) 이탈식방산구에 비산방지 고리(Retaining chain)가 불량한 경우가 있다. 비산방지 고리는 튼튼한 쇠줄을 사용해야 한다.(사진 2-8 참조)



[사진 2-8] 비산방지 고리가 불량한 예 (컨베이어)

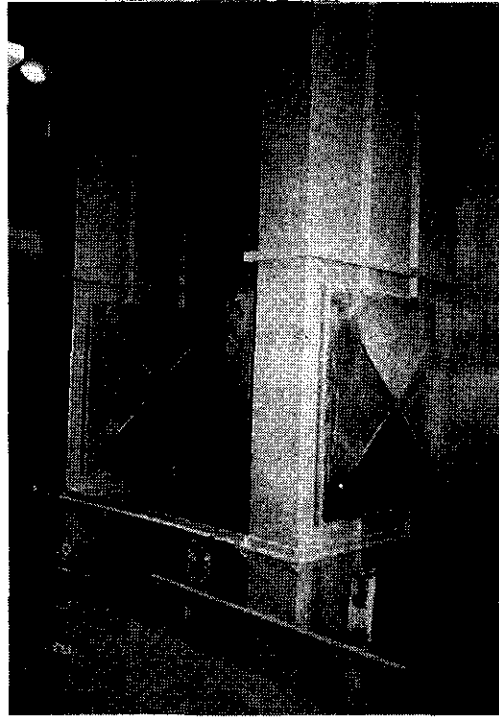
(8) 방산구는 설비내압강도의 $2/3$ 이하에서 용이하게 개방되게 설치하여야 하나 방산이 어렵고 방산시 비산될 수 있는 구조의 방산구가 있다.(사진 2-9 참조)



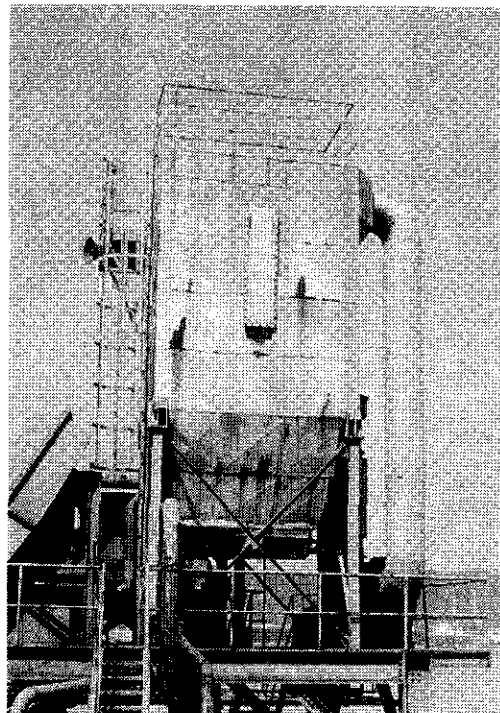
[사진 2-9] 방산구의 구조가 잘못 설계된 예 (비킷엘리베이터)

(9) 비킷엘리베이터등 내압강도 (耐壓強度) 가 있는 설비에 방산구를 임의로 설치하여 폭발시 건물내부에 화염이 전파될 우려가 높은 설비가 있다. 방산유도관을 설치할 수 없는 설비의 경우는 가능한 내압강도 (耐壓強度) 를 크게 하고 비킷엘리베이터의 경우는 상부에 설치하여야 한다.(사진 2-10 참조)

(10) 방산구의 개구면적이 잘못 설계된 설비가 많다. 개구면적은 설비의 내압강도를 감안하여 충분한 크기여야 한다.(사진 2-11 참조)



[사진 2-10] 내압강도를 감안하지 않고 임의로 설치된 폭압방산구 (버킷엘리베이터)



[사진 2-11] 방산구의 개구면적이 잘못 설계된 예 (집진기)

5. 알루미늄등 분진폭발 위험이 있는 금속분진을 집진하는 집진설비에는 폭발방산구가 대부분 설치되어 있지 않다.

6. 수분을 건조제거하는 기류건조기와 유동층건조기 등은 산업안전보건법에 서 규정하는 위험물건조설비가 아닌 화학설비에 속하는 설비로서 폭발압력방산구를 일부 설치사용하고 있으나 법적인 설치 규정이 명확하지 않다.

7. 집진설비, 사일로 및 버킷엘리베이터 등은 화학물질을 저장 또는 계량하는 설비 그리고 분체화학물질을 취급하는 화학설비로서 폭발, 화재위험이 높으나 폭발압력방산구의 법적인 설치규정이 명확하지 않다.

8. 건조설비, 특히 위험물건조설비를 자체제작 또는 외주제작하여 임의로 설치 사용하는 경우가 많다.

9. 위험물건조설비가 작업장 내부에 설치된 경우가 대부분으로서 폭발시 피해확대 우려가 높다.

제 6 장 폭발압력방산구 관련 제도상의 문제점 및 대책

1. 폭발압력방산구 설치관련 법적규정의 적용문제

(1) 건조설비

폭발압력방산구 즉 폭발구는 산업안전기준에 관한 규칙 제 302 조 (건조설비의 구조등) 4 항에 “ 위험물건조설비는 그 상부를 가벼운 재료로 만들고 주위상황을 고려하여 폭발구를 설치할 것 ” 으로 규정하고 있다. 그러나 위험물건조설비 이외의 가연성분진 등이 발생하는 건조설비의 경우는 비위험물건조설비이나 폭발, 화재의 위험의 높은 바 확대적용할 수 있는 법적규정을 개정하는 것이 고려되어야 한다.

(2) 화학설비 및 그 부속설비

화학설비와 관련하여 산업안전기준에 관한 규칙 제 288 조 (안전밸브등) 1 항에 “ 사업주는 대기압 이상으로 운전되거나 이상화학반응 기타의 이상 사태로 인하여 내부 기체의 압력이 대기압을 초과할 우려가 있는 화학설비에는 안전밸브 또는 이에 대처할 수 있는 방호장치 (이하 “ 안전밸브등 ” 이라 한다) 를 설치하여야 한다 ” 로 규정하고 있다. 그러나 폭발압력방산구 즉 폭발구의 설치 규정이 명확하지 않다. 따라서 특히 화학설비중 분진폭발의 위험이 높은 다음 화학설비와 그 부속설비 등에는 이에대한 설치규정을 명확하게 명시하여 주는 것이 바람직할 것이다.

- 1) 호퍼 (Hopper), 사일로 (Silo) 등 화학물질 저장 또는 계량설비
- 2) 가연성분진이나 가스가 발생하는 혼합기, 발포기등 화학제품 가공설비
- 3) 분쇄기, 분체분리기등 분체화학물질 취급장치
- 4) 건조기등 분체화학물질 분리장치
- 5) 사이클론 (Cyclone), 백필터 (Bag Filter) 등 분진처리설비

산업안전기준에 관한 규칙 별표 3의 화학설비 및 그 부속설비의 종류는 다음과 같다.

① 화학설비

- 가. 반응기·혼합조등 화학물질 반응 또는 혼합장치
- 나. 증류탑·흡수탑·추출탑·감압탑등 화학물질 분리장치
- 다. 저장탱크·계량탱크·호퍼·사일로등 화학물질 저장 또는 계량설비
- 라. 응축기·냉각기·가열기·증발기등 열교환기류
- 마. 고로등 집화기를 직접 사용하는 열교환기류
- 바. 카렌다·혼합기·발포기·인쇄기·압출기등 화학제품 가공설비
- 사. 분쇄기·분체분리기·용융기등 분체화학물질 취급장치
- 아. 결정조·유동탑·탈습기·건조기 등 분체화학물질 분리장치
- 자. 펌프류·압축기·이젝타등의 화학물질 이송 또는 압축설비

② 화학설비의 부속설비

- 가. 배관·밸브·관·부속류등 화학물질 이송관련 설비
- 나. 온도·압력·유량 등을 지시·기록 등을 하는 자동제어 관련설비
- 다. 안전밸브·안전판·긴급차단 또는 방출밸브등 비상조치 관련설비
- 라. 가스누출감지 및 경보관련 설비
- 마. 세정기·응축기·벤트스택·플래어스택등 폐가스 처리설비
- 바. 사이클론·백필터·전기집진기등 분진 처리설비
- 사. 가목 내지 바목의 설비를 운전하기 위하여 부속된 전기 관련 설비
- 아. 정전기 제거장치·긴급 샤워설비등 안전관련 설비

(3) 기타 설비

상기 (2)의 화학설비와 그 부속설비는 각종 화학물질과 관련된 설비로서 목재(木材)나 곡물(穀物)류 등의 분체(粉體)물질을 저장, 취급, 분리 또

는 처리하는 등의 설비는 화학설비라고 규정할 수 없다. 그러나 이들 물질을 저장, 취급, 분리 또는 처리하는 상기 (2)의 1),3),4),5)등의 설비와 버킷엘리베이터등 분체이송 설비는 폭발·화재의 위험이 아주 높은 바 폭발 압력방산구의 설치를 의무화 할 수 있는 법정규정의 제·개정을 고려하여야 한다.

산업안전보건법에서 규정하는 화학물질에 대한 정의는 없으나 노동부 고시 제 91 - 15 호 유해·위험방지계획서 심사제도 시행규정 별표 1 의 계획서 제출 대상 업종세분류중 화합물, 석유, 석탄, 고무 및 플라스틱제품 제조업은 다음과 같이 분류하고 있다.

중분류	소분류	세분류
1. 화합물, 석유, 석탄, 고무 및 플라스틱제품제조업	가. 산업용 화합물 제조업	— 유기화학제품 제조업 — 무기화학제품 제조업 — 염료, 안료 및 유연제 제조업 — 화학섬유 제조업 — 화학비료 제조업 — 농약 제조업
	나. 기타 화학제품 제조업	— 도료 제조업 — 의약품 제조업 — 비누, 세정제, 계면 활성제 및 화장품 제조업 — 달리 분류되지 않은 화학제품 제조업
	다. 석유정제업	— 석유 정제업
	라. 기타 석유 및 석탄제품제조업	— 기타 석유 및 석탄제품 제조업
	마. 고무제품제조업	— 타이어 및 튜브 산업 — 달리 분류되지 않은 고무제품 제조업
	바. 달리 분류되지 않은 플라스틱 제품 제조업	— 달리 분류되지 않은 플라스틱제품 제조업

2. 유해·위험방지사항에 관한 계획서의 제출규정 적용문제

(1) 유해·위험방지사항에 관한 계획서 등에 관련하여 업종에 관계없이 제출하여야 할 기계·기구 및 설비는 산업안전보건법 시행규칙 제 120 조 (대상 사업장의 종류) 2항에 노동부령이 정하는 기계·기구 및 설비는 다음과 같다.

- 1) 금속 기타 광물의 용해로 (용량이 1톤 이상인 것에 한한다)
- 2) 화학설비 (노동부장관이 정하는 것에 한한다)
- 3) 건조설비 (노동부장관이 정하는 것에 한한다)
- 4) 가스집합용접장치 (이동식을 제외한다.)

따라서 상기 1. (3)의 기타 설비는 폭발위험이 높아 법정규정이 없음에도 현재 각종 사업장에서 폭발압력방산구를 설치사용하고 있는 실정으로서 이들 설비도 계획서를 제출하여야 할 기계·기구 및 설비에 포함시키는 것이 고려되어야 한다.

제 7 장 폭발압력방산구의 일반적인 설치기준

I. 폭발압력방산구의 구조

방산구는 설비의 내압강도(耐壓強度) 이하에서 폭발압력을 안전하게 방산 시킴으로서 설비의 파괴를 방지하기 위하여 설치하는 바 가능한 낮은 압력에서 열릴 수 있고 압력의 방출을 용이하게 할 수 있는 형상으로 하는 것이 바람직하지만 작업조건이나 풍압에 의한 오작동 등을 충분히 고려하여야 하며, 파열시 비산물(飛散物)이 발생되지 않는 재료나 구조를 선택하여야 한다.

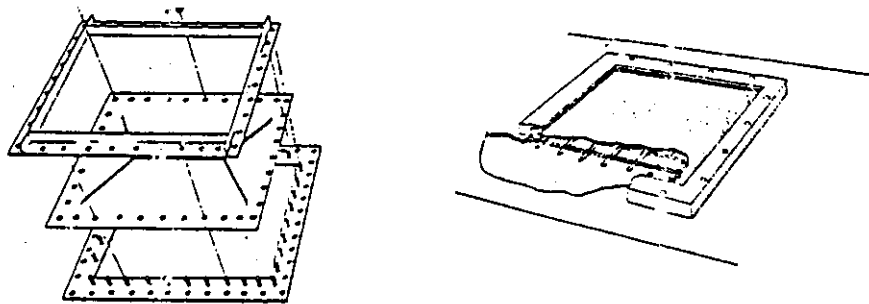
1. 방산구의 형식

방산구에는 구조적으로 비교적 견고한 장치에 설치하는 방산문(放散閥)과 비교적 약한장치에 설치하는 방산공(放散孔)으로 분류하기도 하다. 고정 방식에 따라 구체적으로 분류하면 격막식(Diaphragms), 버스팅 판넬식(Bursting Pannels), 리지드 판넬식(Rigid Pannels) 그리고 폭발문(Explosion Doors) 등으로 분류되고 있다. 따라서 설비나 작업조건 등을 충분히 고려하여 선택하여야 한다.

(1) 격막식(Diaphragms)

격막식 방산구는 방산구의 덮개로서 시이트(Sheet)나 막(Membrane)형태의 재료를 이용하고 이들 격막 주위를 단단하게 고정시킴으로서 비교적 저렴하게 쉽게 제작, 설치할 수 있다. 설비가 대기압 이하에서 운전되거나 혹은 외부의 바람등에 대한 보호를 위하여 [그림 4-1]과 같이 방산구 덮개 내부에 흔히 넓은 메시(mesh)의 금속망 등을 이용 지지하는 경우가 있다. 이 경우에는 방산구의 개구면적 계산시 설치된 보호망에 의해 야기되는 방해도 충분히 고려하여야 한다. 막의 재질은 신장되지 않고 찢어지거나 조각나는 것이 이상적이며, 파열압력(Bursting Pressure)은 대부분 재질의

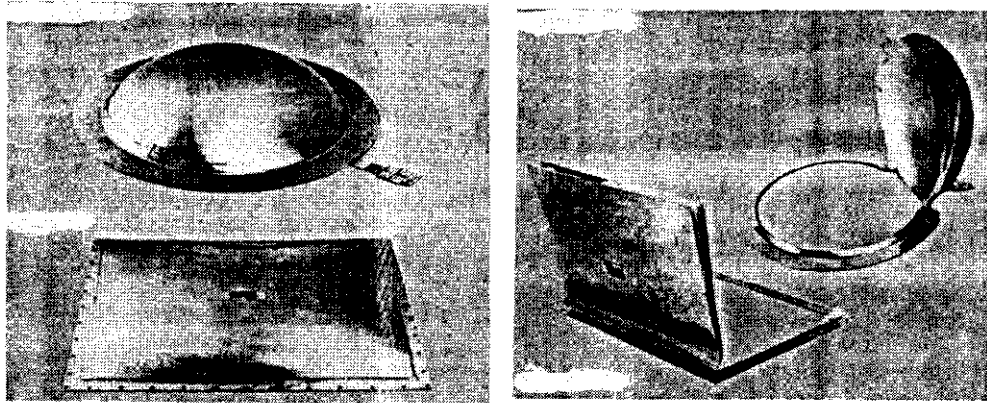
파열설정압력 (P_{stat}) 이 개구면적이 작아짐 (직경 0.15 m 이하) 에 따라 대체로 증가하기 때문에 실제 사용시는 이를 충분히 감안하여야 한다. 그리고 설비의 운전온도 상승이나 추운 날씨등도 충분히 감안하여 재질을 선정 하여야 한다. 흔히 방수지 (防水紙), 얇은 플라스틱수지류 그리고 얇은 금속박판등이 많이 사용된다.



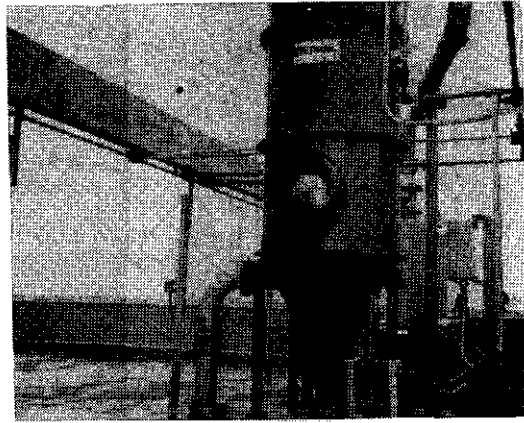
[그림 4-1] 격막식 (Diaphragms) 방산구 예

(2) 버스팅 판넬식 (Bursting Pannels)

제작되어 판매되고 있는 버스팅 판넬은 미리 설정된 압력 즉 파열설정압력 (P_{stat}) 하에서 파열되게 설계되어 있다. 흔히 버스팅 판넬은 [사진 3-1]과 같이 폴리테트라 플루오르에틸렌 (PTFE) 막을 사이에 끼워 넣거나 혹은 등에 대어 부착시킨 금속 시이트에 굽어 자국을 남으로서 설정압력에서 쉽게 파열되게 한다. 재질은 취급물질에 따라 부식등을 고려하여 알루미늄, 스테인레스 스틸, 니켈, 알루미늄합금등 내부식성 재질을 사용하거나 PTFE, FEP 등과 같은 비부식성 플라스틱과 병행하여 제작되기도 한다. 모양 또한 원형, 정사각형, 직사각형등 각종 형태의 것이 사용되고 있으며, [사진 3-2]는 원형 버스팅 판넬을 설치한 예이다.



[사진 3-1] PTFE막을 이용한 삼중 버스팅 판넬



[사진 3-2] 원형 버스팅 판넬 설치 예

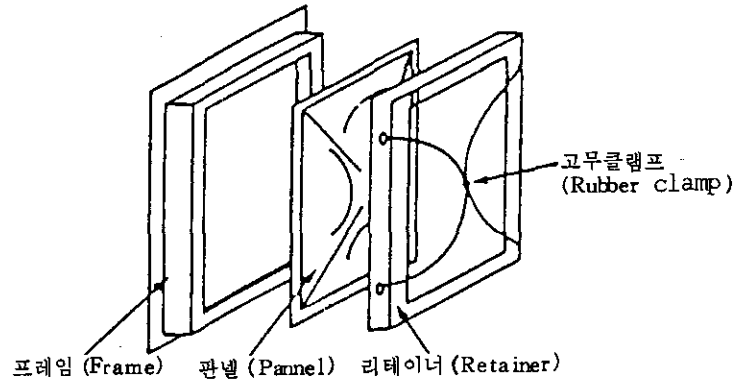
이들 판넬은 보통 파열설정압력 (P_{stat})의 $\pm 10\%$ 이내에서 작동되어야 한다. 판넬의 진동이나 펄럭임은 버스팅 판넬의 작동 수명을 감소시킬 우려가 있으며 특히 방산구의 개구면적이 크고 파열설정압력이 낮은 경우에 그 손상은 심하다. 따라서 점검정비 및 교체등에 유의하여야 한다.

(3) 리지드 판넬식(Rigid Pannels)

방산구 덮개가 판넬 재질보다도 약하게 설비에 고정 설치됨으로서 폭발이 일어날 때에 폭압에 의해 판넬 전체가 설비의 방산구로 부터 이탈되면서 폭

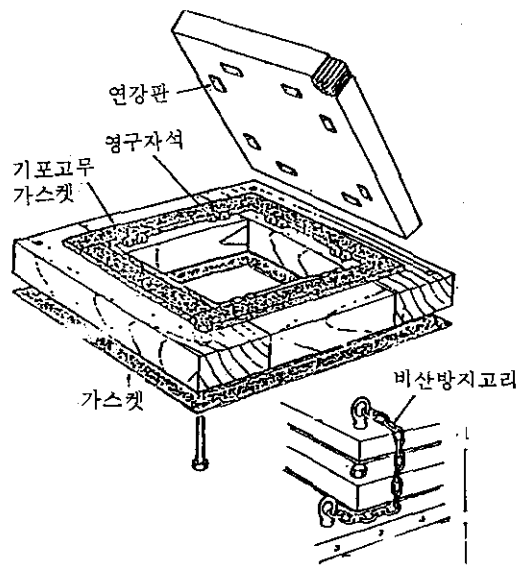
압을 방산시키는 형식이다. 이와 같은 방산구 덮개를 리지드 판넬 혹은 갑자기 튀어오른다는 의미로서 “팝 아울”(Pop-out) 판넬이라고도 한다.

방산구 덮개에 단열효과가 필요한 경우에 유리한 형식으로서 폭압방산을 용이하게 하기 위하여 판넬은 무게가 가볍고 (2.5 lb/ft^2 이내) 쉽게 이탈될 수 있어야 하며 낮은 과압 ($0.06 \sim 0.1 \text{ bar g}$) 하에서도 작동되어야 한다. 큰 판넬을 수직 표면위에 설치할 경우 그 안전성에 특히 유의하여야 한다. 흔히 금속판넬의 경우 [사진 4-2]와 같이 판넬의 바깥둘레에 적절한 고무클램프(Rubber Clamps)로 고정시키는 방법이 있다.

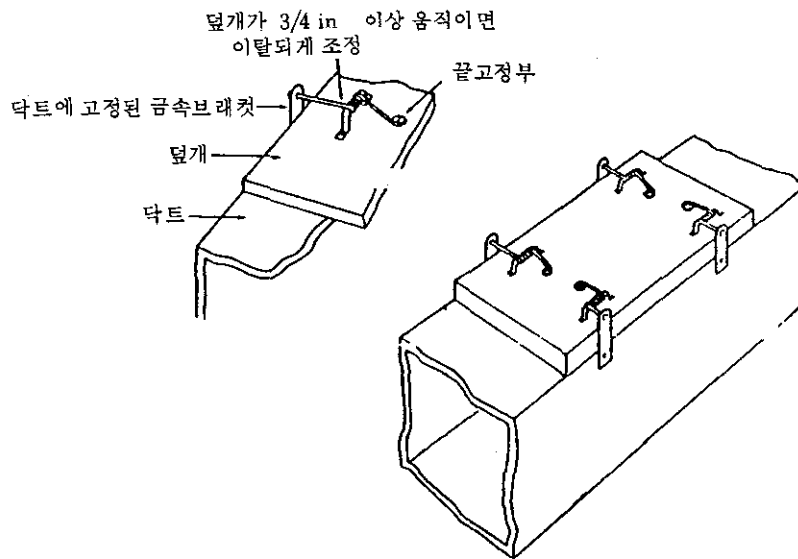


[그림 4-2] 고무클램프로 고정된 판넬 예

또한 설비의 수평 표면위에 가벼운 판넬을 설치할 경우에는 [그림 4-3]과 같이 자석(Magnets)에 의해 고정시키거나 적당하게 압착된 기포고무(Foam Rubber) 스트립에 의해 봉인하는 방법, 그리고 [그림 4-4]와 같이 스프링으로 눌러진 걸쇠(Latches)에 의해 고정시키는 방법등이 있다. 이 경우 부식, 윤활의 결여 그리고 눈이나 얼음등에 의한 작동에 문제가 없어야 한다. 설치시 반드시 고려하여야 할 사항으로서 판넬이 이탈에 의해 비산되지 않게 강고한 체인이나 로프 등으로 연결하여야 한다.



〔그림 4-3〕 자석으로 고정된 리지드 판넬 예



〔그림 4-4〕 스프링으로 고정된 리지드 판넬의 예

(4) 폭발문 (Explosion Doors)

폭발문은 파괴되거나 변형되지 않는 충분한 강도를 갖는 패널이 경첩(Hinge) 등으로 연결된 것으로 방호하고자 하는 설비의 강도에 따라 다르겠으나 가능한 그 무게는 가벼워야 한다. 폭발문은 상부가 경첩으로 연결되어 있어 폭발시 폭압에 의해 열렸다가 다시 닫히게 된다. 따라서 설비내에 공기나 화염의 진입을 방지할 수 있다. 폭발문의 효율은 단지 같은 면적의 패널의 60 ~ 80 % 정도로서 방산면적을 계산할 때 이를 충분히 감안하여야 한다. 폭발문은 수평이거나 경사진 표면위에 기포고무로 봉인되어질 수도 있다.

2. 방산구의 설계기준

방산구는 가능한 낮은 압력에서 열릴 수 있고 폭압을 용이하게 방산시키도록 하기 위하여 설계시 다음 기준을 고려하여야 한다.

(1) 방산구는 방산설정압력 (P_{stat})에 따라 방산면적이 달라지게 된다. 따라서 방산설정압력은 설비의 가장 약한 부위의 강도를 기준으로 그 강도의 2/3에서 개방되게 하여야 한다.

(2) 방산구 덮개의 개방 가속도 (加速度)는 덮개의 질량에 반비례 하기 때문에 질량이 크면 클수록 주어진 개방압력에서 개방시간이 더 길게 소요 되게 된다. 따라서 방산구 덮개의 면적당 무게는 2.5 lb/ft^2 이내로 하여야 한다.

(3) 방산구는 외부 덮개에 눈이나 얼음등이 누적되지 않는 구조 (비단열 등) 그리고 내부 표면에 분진 등이 쌓여 작동에 방해되지 않는 구조로 하여야 한다.

(4) 방산구 덮개에 사람이 떨어지거나 힘을 가함으로서 열리거나 파열될 우려가 있는 경우에는 방호울을 주위에 설치하여야 한다. 필요시에는 경고표시를 부착한다.

(5) 방산구의 방산설정압력 (P_{stat})은 외부의 풍압(Wind Pressure)과 설비의 운전압력을 고려하여 설정하여야 한다. 예로서 심한 폭풍의 경우 풍압은 30 lb/ft^2 (1.44 kPa)를 초과한다. 따라서 옥외 설치시는 설치지역의 기후 조건을 고려하여야 한다.

II. 폭발압력방산구의 설치위치

방산구는 폭발위험성 및 장치의 상황에 따라서 안전한 공간, 안전한 방향으로 폭발을 방출할 수 있도록 적당한 위치에 설치하여야 하는바 설계시에는 다음 기준을 충분히 고려하여야 한다.

(1) 폭발위험이 있는 설비는 가능한 건물의 외부에 설치하고 또한 방산구를 설치하여야 한다.

(2) 설비를 건물내부에 설치할 경우는 가능한 건물의 측면에 설치하고 방산구에 방산유도관(Vent Ducts)을 연결 폭발과 화염을 외부 안전한 곳으로 방산되게 하여야 한다.(그림 4-5, 6 참조)

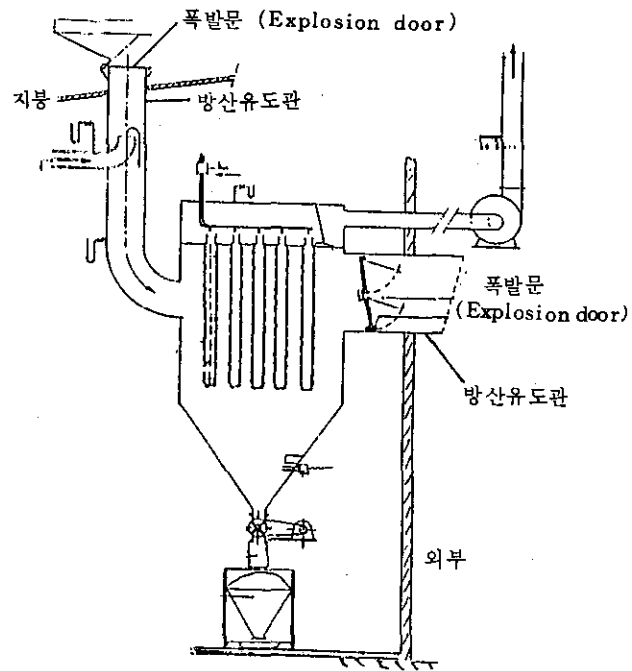
(3) 공정상 측면에 설치가 불가능할 경우는 설비의 상부측으로 방산유도관을 설치하여야 한다.(그림 4-5 참조)

(4) 방산구는 방산유도관 없이 천정, 배관, 건물의 벽, 기타 설비 등에 인접한 곳에 설치하여서는 안된다.

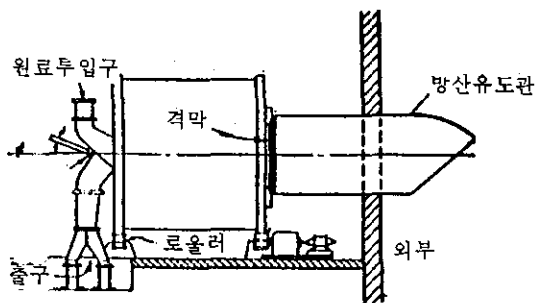
(5) 방산구는 작업실 및 통로등으로 향하는 곳에 설치하여서는 안된다.

(6) 건물의 외부에 설비를 설치할 경우도 방산구는 인도(人道)나 가연물질이 인접하지 않은 방향에 설치하여야 한다. 가능한 상부에 설치한다.(그림 4-7 참조)

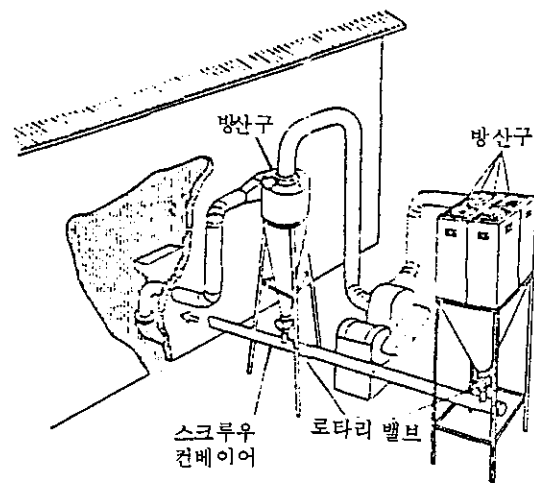
(7) 방산구는 설비내에서 가능한 점화원에 가까운 곳, 일정하지 않는 경우는 중앙에 설치하여야 한다.



[그림 4-5] 집진설비의 방산유도관 설치 모델(폭발문)

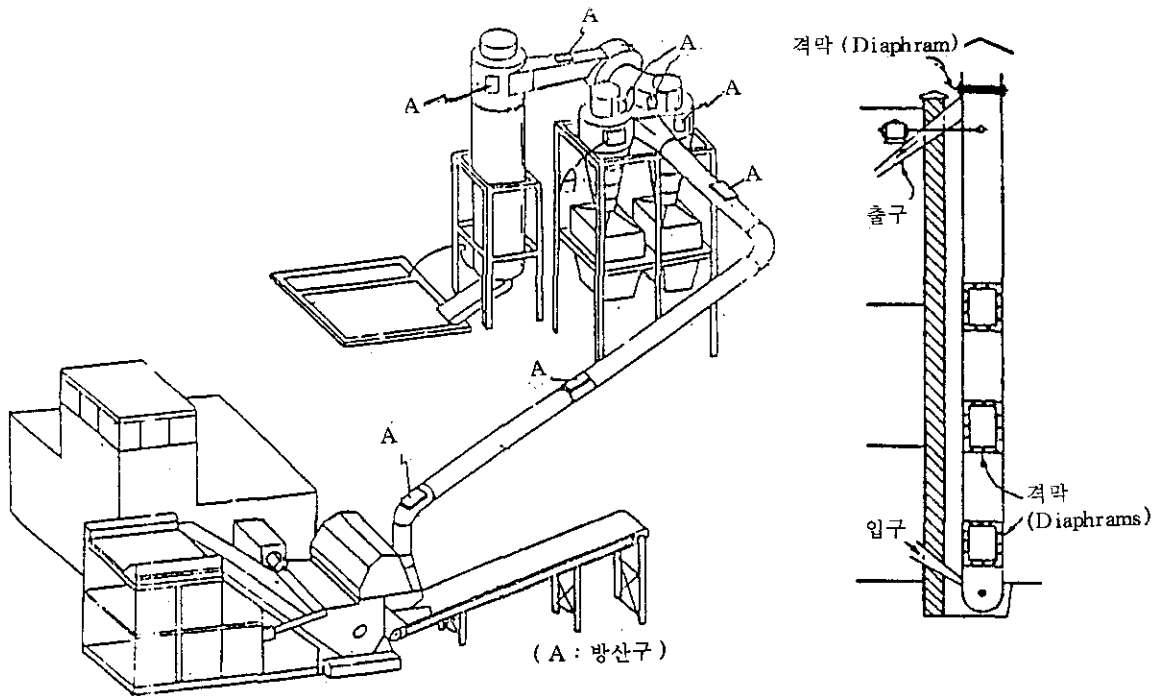


[그림 4-6] 드럼분쇄기 (Drum Blender) 의 방산유도관 설치 모델(격막식)



[그림 4-7] 건물외부에 설치된 집진 설비의 방산구 모델

(8) 연결된 설비에 있어서 또는 한 곳에 방산구의 설치 불가능한 경우에는 산정된 방산면적을 분할하여 분산(分散) 설치하여야 한다.(그림 4-8, 9 참조) 물론 연결된 설비에는 화염전파를 방지하기 위한 방호장치를 설치하여야 한다.



[그림 4-8] 분쇄공정의 방산구설치 모델

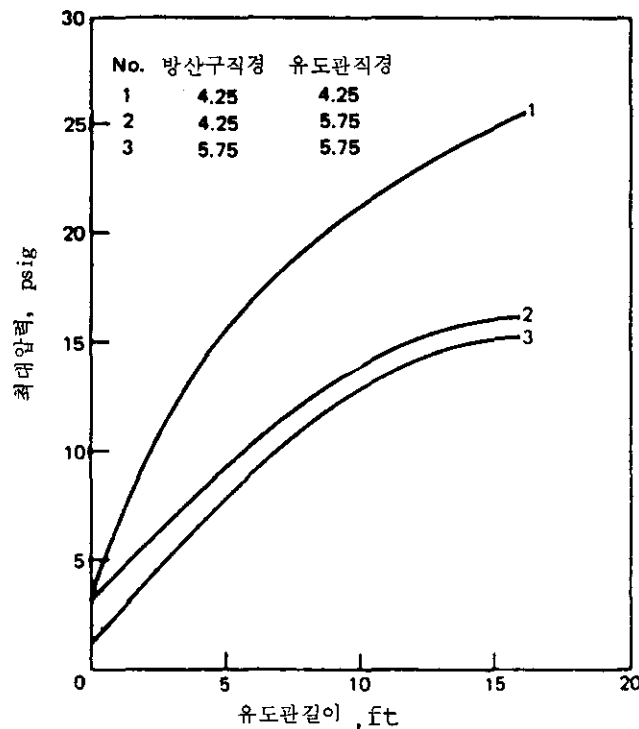
[그림 4-9] 비킷 엘리베이터 (Bucket Elevator)의 방산구설치모델 (옥외)

Ⅲ. 방산유도관의 설치

폭발 우려가 있는 설비는 가능한 안전한 외부 장소에 설치하는 것이 좋으나 작업 공정상 건물내부에 설치하는 경우가 많으며, 건물내부에 설치시는 방산과정중에 발생하는 폭압이나 화염으로 중대재해는 물론 주위의 다른 장치, 배관 혹은 건물 등을 파괴시킬 우려가 있다. 따라서 이 경우에는 반드시 방산유도관 (Vent Ducts) 을 설치하여 폭압이나 화염을 건물 외부 안

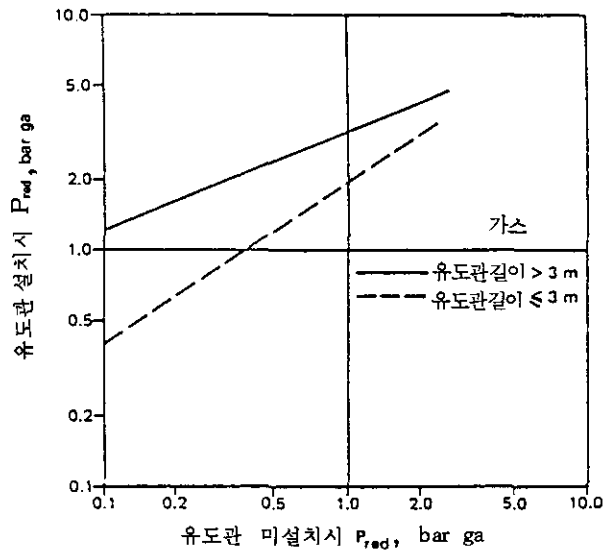
전한 곳으로 방산하도록 하여야 한다. 뿐만아니라 외부에 설치할 경우에도 폭압이나 화염으로 재해발생 위험이 있거나 피해가 확대될 우려가 있을 때는 반드시 방산유도관을 설치하여야 한다. 설치시는 다음 기준에 준하여 설계하여야 한다.

(1) 방산유도관은 폭압방산중에 설비내에 발생하는 압력을 현저하게 증가시키게 된다. 따라서 방산유도관의 단면적은 최소한 방산구의 단면적 보다 더 크게 하여야 하며, 방산면적 또한 최대압력증가를 충분히 감안하여야 한다. 방산유도관의 단면적이 방산구의 단면적보다 크면 클수록 방산중에 설비내에서 발생하는 최대압력은 더 적게 증가하게 된다. 참고로 [그림 4-10]에 방산구와 방산유도관의 단면적에 대한 최대압력을 나타내었다. 그러나 이는 1 ft^3 의 용기에서의 실험결과로서 설계에 이용할 수는 없다.

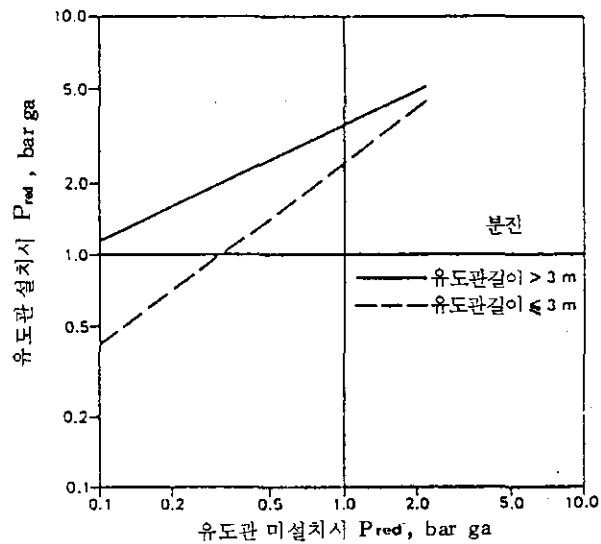


[그림 4-10] 방산구와 방산유도관의 단면적에 대한 방산중의 최대압력
(1 ft^3 용기에서 옥수수전분의 폭발실험)

(2) 방산유도관의 길이가 길면 길수록 폭압방산중에 설비내에서 발생하는 압력은 증가하게 된다. 따라서 설비를 건물내부에 설치시는 외부벽에 근접시켜 방산유도관의 길이를 3 m 이내로 하여 가능한 짧게 설치하여야 한다. [그림 4-11]과 [그림 4-12]는 각각 방산유도관의 사용 유무와 그 길이에 따라 가스와 분진폭발시 발생하는 초과압력의 증가를 나타낸 것이다.

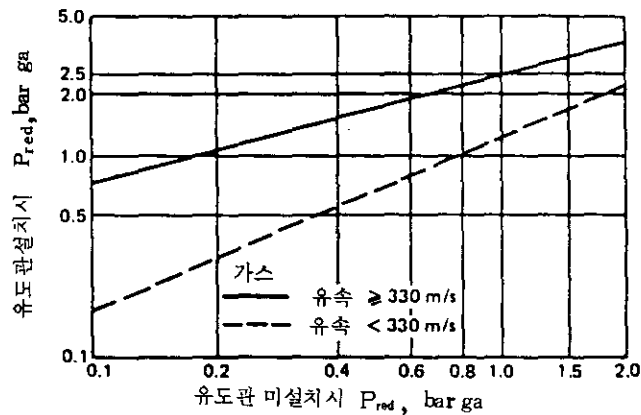


[그림 4-11] 방산유도관의 유무에 따른 가스폭발시 발생하는 최대압력

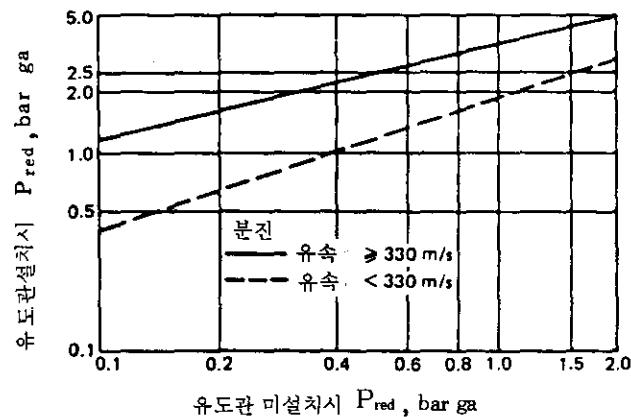


[그림 4-12] 방산유도관의 유무에 따른 분진폭발 방산시 발생하는 최대압력

그리고 방산유도관을 통과하는 유속 (flow velocity) 에 따라서도 같은 현상이 야기 된다. 가스와 분진에 대하여 각각 [그림 4-13] 과 [그림 4-14] 에 나타내었다.



[그림 4-13] 방산유도관의 유무에 따른 가스폭발 방산시 발생되는 최대압력



[그림 4-14] 방산유도관의 유무에 따른 분진폭발 방산시 발생되는 최대압력

(3) 방산유도관은 가능한 곡관부 (曲管部) 가 없게 직선이 되게 설치하여야 한다. 유도관이 굽은 경우에는 역시 폭발방산시 발생되는 초과압력의 증가를 야기하게 된다. 부득이한 경우에는 그 각도 (角度) 를 적게하여야 한다.

(4) 방산유도관은 폭발압력과 온도에 견딜 수 있는 강도로 하여야 한다. 최소한 설비본체 강도 이상이어야 한다.

IV. 폭발압력방산구의 면적

방산구의 면적은 폭발시 압력을 용기의 설계강도(設計強度) 이하로 급격히 방산할 수 있는 충분한 크기로 하여야 한다. 그러나 방산구가 작동할 때의 폭발압력은 혼합가스나 증기 또는 분진의 종류·조성·초기온도 및 압력, 설비의 모양과 길이, 방산구 덮개의 구조와 면적, 발화원의 위치 그리고 유도관등에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 이러한 인자를 모두 고려하여 결정한다는 것은 어려운 문제이다.

따라서 방산구의 이론적 해석 및 이론과 실험결과의 비교등이 연구 수행되고 있으나 실험결과는 실제 재해사례를 참고하여 도입된 경험식을 기본으로 하여 방산구의 면적과 덮개의 구조등을 결정하는 경우가 많다. 또한 실제 규모보다 작은 장치를 이용한 실험결과를 응용하여 적용할 수 있는 방법도 연구되어 왔으나 이와 같은 식이 도입된 실험조건(변수값의 범위)에 유의하여 적용하여야 한다.

방산면적을 구하는 방법으로서 과거에는 주로 방산비(Vent Ratio Method) 방법이 주로 사용되어 왔으나 최근에는 상승근법과 노모그래프방법(Cubic Root Law and Nomograph Method)에 의해서 구하는 것이 일반화 되어 있다.

대략적인 방법만을 참고로 서술하고자 한다.

1. 방산비 방법(Vent Ratio Method)

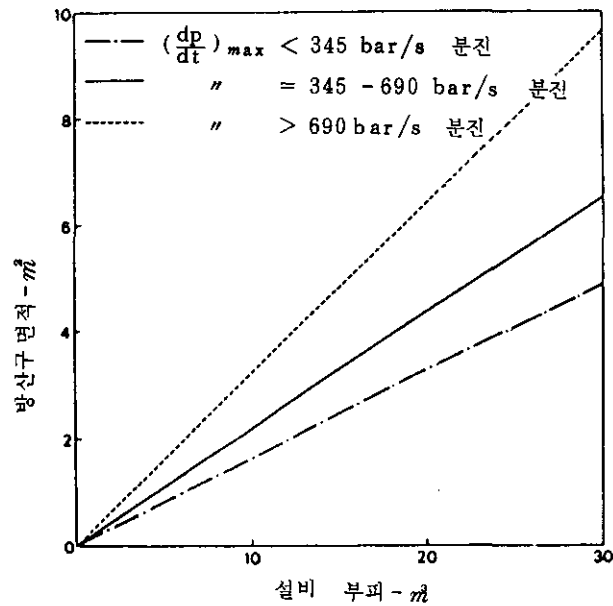
방산구의 면적을 결정하는데 기본적으로 고려되는 것이 설비의 크기로서 방산비는 밀폐된 설비의 부피당 방산면적을 나타낸 것이다. 방산비 방법의 중요한 기본접근 개념은 방호되는 설비내의 최대압력이 $0.07 \sim 0.14 \text{ bar}$ ($1 \sim 2 \text{ lbf/in}^2$) 이고 방산구 덮개가 매우 낮은 판성을 갖고 있으며 방산유도관이 3 m 이내라는 것을 전제로 한 것이다. 방산비에 대한 많은 자료들은

Hartmann bomb 실험장치에서 결정된 폭발압력 최대상승속도와 직접 관계된다. 예로서 영국의 HSE(Health and Safty Executive)는 탄소계열 물질의 경우 345 bar/s의 최대압력상승속도를 갖고 있으면 6.1 m 당 1 m의 방산비를 권장하고 있으며 Palmer는 플라스틱분진의 경우 345 ~ 690 bar/s의 최대 압력상승속도 범위에서 4.6 m 당 1 m 그리고 폭발위험성이 높은 알루미늄 (Al) 분진의 경우 690 bar/s의 최대압력상승속도 하에서 3.1 m 당 1 m의 방산비를 제시하였다. 이와같은 실험결과에 의하여 일반적으로 알려진 최대압력 상승속도의 분진에 대한 방산비는 〈표 4-1〉 및 [그림 4-15]와 같다.

〈표 4-1〉 폭발성 분진의 방산비

압력상승 최대속도 $(dp/dt)_{max}$		방 산 비	
(bar/s)	(lbf/in ² ·s)	(m/m)	(ft ² /ft ³)
< 345	< 5,000	1/6.1	1/20
345 ~ 690	5,000 ~ 10,000	1/4.6	1/15
> 690	> 10,000	1/3.1	1/10

〈표 4-1〉에 나타낸 방산비는 관례적으로 30 m에 달하는 밀폐된 설비에 적용된다. 한편 설비의 부피가 30 ~ 300 m³일 경우 방산비는 1/6.1 m⁻¹ 까지 직선적으로 감소된다. 그리고 300 ~ 700 m³의 부피를 갖는 설비로서 특히 길이대 직경의 비가 클 경우 방산면적은 최대압력 상승속도가 345 bar/s 이하인 분진에 대하여 설비 단면적의 1/2 과 같으며, 대략 700 m³를 초과하는 큰 설비에서의 폭발성분진의 경우는 단면적과 같다.



〔그림 4-15〕 방산비에 의해 결정한 방산면적의 크기

2. 상승근법과 노모그래프방법 (Cubic Root Law and Nomograph Method)

이 방법은 최근 방산구의 면적을 계산하는데 가장 많이 사용되고 있는 방법의 하나로서 Bartknecht에 의해 제시되었으며, VDI Richtlinien 3673 과 NFPA 68 등에서 이방법을 포괄적으로 적용하고 있다.

Bartknecht에 의하면 용기의 부피변화에 따라 최대 압력상승속도 $(dp/dt)_{max}$ 가 다음과 같이 변한다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \cdot V^{1/3} = K_{st} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

여기서 $(dp/dt)_{max}$ 는 최대압력 상승속도, V 는 설비의 부피 그리고 K_{st} 는 상승근법 상수로서 폭발의 특성을 가리키는 물질의 성질로서 착화에너지의 세기, 설비의 모양과 부피 및 난류(Turbulence)의 정도 등에 의존된다.

〈표4-2〉는 분진폭발의 위험성등급을 나타낸 것이다. 주요한 열가소성수지 (Thermoplastics)를 포함하는 대부분의 플라스틱은 S_{f-1} 등급에 속하며 일부 페놀수지는 S_{f-2} 에 속한다.

〈표 4 - 2〉 분진폭발 위험성 등급

분진 폭발 등급	$K_{st} (\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		폭 발 특 성
	약한 발화원 (대략 $10 \text{ W} \cdot \text{s}$)	강한 발화원 (대략 $10,000 \text{ W} \cdot \text{s}$)	
S_{f-0}	0	0	비 폭 발
S_{f-1}	≤ 100	≤ 200	약 함
S_{f-2}	100 - 200	$\leq 201 - 300$	강 함
S_{f-3}	> 200	> 300	아 주 강 함

노모그래프에 의한 방산면적은 설비의 부피, 그것의 설계강도, 방산구의 방산설정압력 (P_{set}) 그리고 S_f 등급등에 의해 결정된다. 노모그래프는 설계강도가 적어도 0.2 bar ga인 설비에 적용되며, 설비의 부피가 1~1000 m^3 일 때에 적용할 수 있다.

3. K-인자 방법 (K-Factor Method)

Simmonds 는 가스폭발에서 직경과 길이가 거의 같은 용기의 경우 최대폭발압력이 용기의 단면적 (A) 과 방산구 단면적 (A_v) 의 비에 비례한다고 제안하였다. 즉

$$P_{max} \propto A/A_v \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

이 비를 K 라 하면

$$K = A/A_v \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

이 비를 K - Factor 라고 한다.

K-Factor를 널리 활용하면 분진폭발이 얼마나 가스상태로 진행되어 분진폭발에 일치하느냐를 적용시킬 수 있다. 이것에 대한 확실한 답은 없지만 많은 연구자들은 방산목적을 위해 가스-분진 폭발의 관계를 추정해 왔으며 실제로 분진이 작은 입자로 되어 있고 부유의 난류성(亂流性)을 고려한다면 이러한 가정은 합리적이라 할 수 있다. 이러한 가정이 받아들여 진다면 “K-Factor”는 폭발성 분진의 방산구 면적 결정에 직접 사용이 가능하고 가스폭발 중에 여러 가지의 실험조건으로부터 유도된 경험식을 사용하는 방법이 되기도 한다.

4. 러스트 방법 (Rust method)

Rust는 비누와 계면활성제 분진을 취급하는 설비에 대한 방산구 면적을 구할 수 있는 근거를 마련하고자 폭발압력방산구의 면적을 계산하는 이론적인 접근방법을 제안하였다. 이 방법은 고압과 저압강도설비에 모두 적용될 수 있기 때문에 유리한 이점이 있다.

Rust식은

$$A_v = \frac{8.35 \times 10^{-5} F(PV)^{2/3} K^{1/3}}{(Pa)^{1/2}} \dots\dots\dots (4-4)$$

여기서 A_v 는 방산면적 (ft^2), F 는 변의 길이가 a, b, c (단 $a > b, a > c$)인 4면체 용기에 대한 모양인자로서 $F = 0.65(bc/a^2)^{1/3}$, P 는 Hartmann 실험에 의한 최대압력 (lb_f/ft^2), V 는 용기의 부피 (ft^3), K 는 분진에 대한 러스트상수로서 $K = [(dp/dt)/lb]^3$, 단 $(dp/dt) =$ 최대압력상승속도 ($lb_f/in^2 s$), Pa 는 최대허용압력 (lb_f/ft^2)을 의미한다.

제 8 장 저강도설비 (低强度設備)에서의 폭발압력방산구 설치기준

I. 적용범위

저강도 (Low - Strength) 설비의 설치기준은 1.5psig (0.1 bar ga) 이하의 압력에 견딜 수 있는 건물, 방, 설비등의 구조물에 대한 폭발압력방산구의 설계에 적용한다. 방산구에 대한 올바른 설계를 위해서는 앞에서 언급된 각종 변수를 충분히 감안하여야 하는데 가능한 지금까지 연구된 각종 데이터 즉 실제 폭발사고나 실험적인 테스트의 분석결과등을 적절하게 적용하여야 한다.

II. 폭발압력방산구의 면적 계산

방산구의 면적을 계산하는 많은 방법중 가장 권장할 수 있는 식은 다음과 같다.

$$A_v = C \cdot A_s / (P_{red})^{1/2} \dots\dots\dots (5-1)$$

여기서 A_v : 방산구의 면적 (ft² 혹은 m²)

C : 방산식 상수 (연소물의 특성에 따르는 상수)

A_s : 설비의 내부표면적

P_{red} : 방산최대압력 (psi 혹은 kPa)

III. 적용방법

1. 길이가 긴 설비나 건물등의 한쪽 끝 예로서 사일로 (Silo)의 상부나 건물의 끝벽면에 방산구를 설치할 경우 즉 길이 / 직경 (L/D)의 비가 3을 초과할 경우에는 방산효과가 없다. 따라서 3을 초과해서는 안되며 가능한

그 면적을 분할하여 설치하여야 한다.

2. 원형 혹은 사각형 이외의 단면적에 대한 직경은 수력학적 직경 (Hydraulic Diameter) 즉 $4A/P$ 에 의해서 구하여야 한다. 여기서 A 는 단면적, P 는 단면의 주변길이이다.

3. 만일 방산구의 면적이 긴 설비나 건물의 한쪽 끝에 설치된다면 다음 조건에 맞아야 한다.

$$L_s \leq 12A/P \text{ (ft 혹은 } m \text{)} \dots\dots\dots (5-2)$$

여기서 L_s : 설비의 가장 긴 직경 (ft 혹은 m)

A : 단면적 (ft² 혹은 m²)

P : 단면의 주변길이 (ft 혹은 m)

4. 또한 아주 난류 (Turbulent)인 기체혼합물을 취급하는 긴 설비의 한쪽 끝에 방산구를 설치할 경우는 길이/직경 (L/D) 비가 2를 초과하여서는 안된다. 즉 다음 조건에 맞아야 한다.

$$L_s \leq 8A/P \text{ (ft 혹은 } m \text{)} \dots\dots\dots (5-3)$$

IV. 방산식 상수

식 5-1에서 방산식의 상수 C 값은 연소물질의 특성에 따르는 상수로서 권장할 수 있는 값을 〈표 5-1〉과 같이 2종의 단위로 나타내었다.

1. 〈표 5-1〉의 C 값은 이용할 수 있는 데이터를 모두 수용하여 결정된 것이다. 만일 특별한 적용을 위하여 적절한 큰 스케일 실험이 수행된다면 C 값은 변경되어 사용될 수도 있다.

〈 표 5 - 1 〉 연소물질의 특성에 따른 상수값

연 소 물 질	$C(\text{psi})^{1/2}$	$C(\text{KPa})^{1/2}$
무수암모니아	0.05	0.13
메 탄	0.14	0.37
프로판 연소속도의 1.3 배	0.17	0.45
이하인 가스 및 증기		
S ₁ -1 분진	0.10	0.26
S ₁ -2 분진	0.12	0.36
S ₁ -3 분진	0.20	0.51

2. 대부분 데이터는 지방족 기체 (Aliphatic Gas)에 대한 것으로서 액체 미스트 (Mist)는 그 증기의 기본적인 연소속도 (Burning Velocity)가 프로판 (Propane) 연소속도의 1.3 배 이하일 경우 지방족기체로 취급될 수 있다.

3. 수소, 일부의 알켄 (Alkens), 알킨 (Alkynes), 디엔 (Diens) 그리고 에폭사이드 (Epoxide) 등과 같이 연소속도가 빠른 가스에 대해서는 현재로서 추천될 수 있는 데이터가 없다. 이것은 추천되는 방법이 초기난류 (Initial Turbulence)를 허용하기 때문으로서 연소속도가 빠른 이같은 조건을 수용할 수 있는 데이터가 없기 때문이다.

V. 설비내부 표면적 계산

1. 설비는 예상되는 초과압력에 견딜 수 있는 구조적요소에 의해 한정되는 바 설비내부의 장치류등의 표면적은 제외된다. 그리고 예상되는 초과압력에 견딜 수 없는 비구조적인 부분은 설비의 내부표면적 (A_s)으로 취급하여서는 안된다.

2. 방산식에 있어서 내부표면적 (A_s)는 지붕, 혹은 천정 (Ceiling), 벽 그리고 바닥을 포함한다. 그리고 가장 간단한 기하학적 모양 즉 주름진 표면적은 무시될 수 있다.

3. 내부의 장치나 구조물의 표면적이 무시될 수 있는 반면에 일부 인접된 방이나 설비의 표면적은 포함되어야 하며 방산면적은 내부표면적에 의한 각 부피 크기에 비례하여 가능한 대칭적으로 고르게 분할하여 설치하여야 한다.

VI. 설비의 강도

1. 식 5-1에서 방산최대압력 P_{rad} 는 설비중 가장 약한 구조부분이 견딜 수 있는 최대내부 초과압력으로 정의되며, 방산구의 한 면이 언제나 대기압 상태이므로 설비의 내부는 게이지 (Gauge) 압력을 사용한다.

2. 폭발에 의해 설비의 구성부분이 영구적으로 손상되거나 변형되지 않아야 하는 바 최대내부 초과압력에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

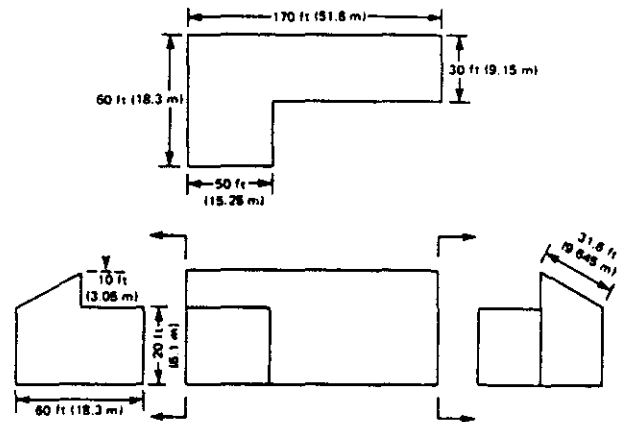
3. 모든 경우에 있어서 최대허용 설계응력은 극한강도 (Ultimate Strength)의 $2/3$ 을 초과하여서는 안된다.

4. 주철 (Cast Iron) 과 같이 파괴되어 부서지기 쉬운 물질에 대해서는 특별히 보강을 고려하여야 한다. 만일 이와 같이 보강되지 않으면 최대허용 설계응력은 극한강도의 25% 를 초과하여서는 안된다.

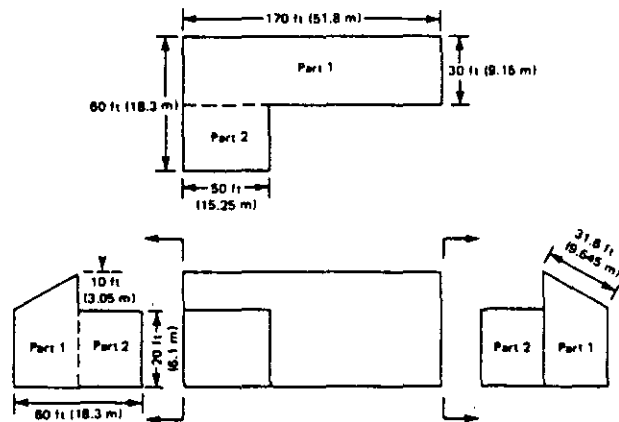
5. 모든 경우에 있어서 설비의 강도는 적어도 방산배출압력을 0.35 psi (50 psf 혹은 2.4 kpa) 이상되게 하여야 한다.

VII. 방산구면적 계산 실례

프로판 (Propane) 의 연소특성을 갖는 탄화수소 증기로 인한 폭발위험이 있는 그림과 같은 모양의 건물이나 설비등의 구조물에 대한 폭발압력방산구의 적절한 면적을 계산하는 예를 들면 다음과 같다. 구조강도계산에 의한 최대내부 초과압력은 0.5 psi (3.45 kpa) 이다.



1. 먼저 구조물을 다음 그림과 같이 기하학적 Parts(Parts 1과 2)로 분할한다.



2. 각 Part의 전체 내부표면적을 계산한다.

Part 1 표면적

$$\text{바닥} = 170 \times 30 = 5,100 \text{ ft}^2$$

$$\text{지붕} = 170 \times 31.6 = 5,372 \text{ ft}^2$$

$$\text{후면벽} = 170 \times 20 = 3,400 \text{ ft}^2$$

$$\text{전면벽} = 120 \times 30 + 50 \times 10 = 4,100 \text{ ft}^2$$

$$\text{측면벽} = 2 \times 30 \times 20 = 1,200 \text{ ft}^2$$

(직사각형 Part)

$$\text{측면벽} = 30 \times 10 = 300 \text{ ft}^2$$

(삼각형 Part)

$$\text{Part 1 (A}_{s1}\text{)의 전체내부표면적} = 19,472 \text{ ft}^2$$

Part 2 표면적

$$\text{바닥} = 50 \times 30 = 1,500 \text{ ft}^2$$

$$\text{지붕} = 50 \times 30 = 1,500 \text{ ft}^2$$

$$\text{전면벽} = 50 \times 20 = 1,000 \text{ ft}^2$$

$$\text{측면벽} = 2 \times 30 \times 20 = 1,200 \text{ ft}^2$$

$$\text{Part 2 (A}_{s2}\text{)의 전체내부표면적} = 5,200 \text{ ft}^2$$

따라서 구조물에 대한 전체내부표면적 (A_s)는 다음과 같다.

$$A_s = 19,472 + 5,200 = 24,672 \text{ ft}^2$$

3. 식 5-1을 이용하여 방산면적을 계산한다.

$$A_v = \frac{C \cdot A_s}{(P_{red})^{1/2}}$$

여기서 A_s : $24,672 \text{ ft}^2$

P_{red} : 0.5 psi

C : $0.17 (\text{psig})^{1/2}$

대입하면

$$A_v = \frac{(0.17)(24,672)}{(0.5)^{1/2}} = 5,932 \text{ ft}^2$$

4. 구조물에 필요한 전체 방산구의 면적은 $5,932 \text{ ft}^2$ 이며, 해당 면적을 구조물의 표면에 고르게 분산 설치하여야 한다. 따라서 표면적비에 의하여 Part 별로 배분하면 다음과 같다.

$$A_{v1} = A_v \frac{A_{s1}}{A_s} = 5,932 \cdot \frac{19,472}{24,672} = 4,682 \text{ ft}^2$$

$$A_{v2} = A_v \frac{A_{s2}}{A_s} = 5,932 \cdot \frac{5,200}{24,672} = 1,250 \text{ ft}^2$$

5. 주어진 방산구면적을 적절하게 배분하여 설치한다. 즉 Part 1에서는 요구되는 방산면적 ($4,682 \text{ ft}^2$) 이 전면벽, 후면벽 그리고 측면벽 혹은 지붕등에 part 2에서는 요구되는 방산면적 ($1,250 \text{ ft}^2$) 이 전면적과 측면벽 혹은 지붕등에 분할설치 되어야 한다. 그러나 장비의 설치, 타 건물에의 폭로, 작업실이 나 통행로등으로의 폭로등의 원인 때문에 방산구를 적절하게 설치할 수 없는 경우에는 구조물의 내압강도를 강화시켜 요구되는 방산구의 면적을 감소시켜야 한다.

제 9 장 고강도설비 (高强度設備)에서의 폭발압력방산구 설치기준

I. 적용범위

고강도 (High - Strength)설비의 설치기준은 1.5 psig(0.1 bar ga) 이상의 압력에 견딜 수 있는 용기, 장치, 설비등에 대한 폭발압력방산구의 설계에 적용한다. 역시 설계에는 많은 변수가 관계되며 이 변수를 감안하기 위한 데이터는 한정된 실험과 실재 폭발사고의 분석결과가 이용되어야 한다. 따라서 여기서 제시되는 계산방법은 가장 일반화된 자료를 근거로 하였다. 그러나 폭굉 (Detonation)에 대한 방산에는 적용할 수 없다.

II. 설비 지지구조물 (Supporting Structure)설계

집진설비등 방산구를 설치하는 각종 설비에 있어서 설비를 지지하는 지지물 (支持物)은 폭발압력방산구의 작동으로 초래되는 어떠한 반동력 (Reaction Force)에도 견딜 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. 이때 발생하는 반동력은 다음과 같다.

$$F_r = 1.2 (A_v) (P_{red}) \dots\dots\dots (6-1)$$

여기서 F_r : 폭발압력방산으로 초래되는 반동력 (lb)

A_v : 방산구의 면적

P_{red} : 방산중에 발생하는 최대압력 (psig)

전체추력 (Total Thrust Force)은 방산구의 기하학적 중심에 적용되는 힘과 같다고 할 수 있다. 설비의 반대편에 동일한 면적의 방산구를 설치할 경우에도 동시에 방산구가 작동한다는 것이 어렵고 즉 한 방산구가 다른

방산구가 작동하기 전에 열릴 수 있기 때문에 단지 한 방향에서의 추력을 예상할 수 없다는 점을 설계시에 충분히 고려하여야 한다. 또한 추력이 작용되는 지속시간을 지지구조물의 설계에 반영하여야 하는 데 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$T_F = \frac{(10^{-2})(K_{st})(V^{1/3})}{(P_{red})(Av)} \dots\dots\dots (6-2)$$

여기서 T_F : 압력 펄스 (Pulse) 지속시간, sec

K_{st} : 분진에 대한 폭발지수

V : 설비의 부피, m^3

P_{red} : 방산중에 발생하는 최대압력, bar ga

Av : 방산유도관이 없을 때의 방산구 면적, m^2

Ⅲ. 방산구에 대한 상관관계 파라미터

설비의 부피가 100 m^3 에 달하는 폭발압력방산에 대한 폭넓은 실험결과가 많이 보고되어 왔으며, 이들 각종 실험결과를 토대로하여 Bartknecht와 Donat가 일련의 노모그래프 (Nomographs) 들을 개발하였다. 본 연구에서는 방산구의 면적을 결정하는 방법으로서 최근에 가장 보편적으로 사용되고 있는 이들 노모그래프에 의한 방산면적 결정방법을 제시, 적용하고자 한다.

노모그래프는 설비의 부피에 대한 방산면적의 선형관계에 근거를 둔 초기의 기술, 즉 방산비 방법과는 다르며, 노모그래프는 설비의 부피에 차이가 있을 경우 방산구의 면적을 정확하게 예측할 수 없다. 그렇지만 노모그래프의 사용은 최근에 산업현장에서의 성공적인 경험을 토대로 가장 권장되고 있는 방법이다.

1. 노모그래프는 길이 / 직경 (L/D) 비가 5 이하인 설비에 적용가능하다.

2. 가스에 대한 방산과 분진에 대한 방산 노모그래프는 각기 실험데이터에 근거된다. 따라서 가스에 대한 노모그래프는 분진에 대하여 적용될 수 없다.

IV. 가스 및 용매 미스트(Mists) 폭발의 방산

1. 방산구 면적을 구하기 위한 노모그래프(Nomographs)

(1) 고강도 설비에 있어서 연소물질이 메탄(Mathane), 프로판(Propane), 코우크스(Coke) 가스 및 수소(Hydrogen)의 경우에 방산구면적을 구할 수 있는 노모그래프는 각각 [그림 5 - 1] ~ [그림 5 - 4]와 같다.

(2) 이들 노모그래프는 다음과 같은 초기 조건하에서 구하여진 결과이다.

- 발화시 설비내에서 초기난류(Initial Turbulence)가 없다.
- 난류를 생성하는 내부 부속장치가 없다.
- 착화에너지가 10J 이하이다.
- 대기압

따라서 이들 변수의 변화를 감안하여 설계하여야 한다.

(3) 적용에 있어 이해와 편리를 위하여 이들 4종의 노모그래프로 부터 유도된 식을 제시하면 다음과 같다.

$$A_v = a(v)^b \cdot e^{c(P_{stat})} \cdot (P_{red})^d \dots\dots\dots (6-3)$$

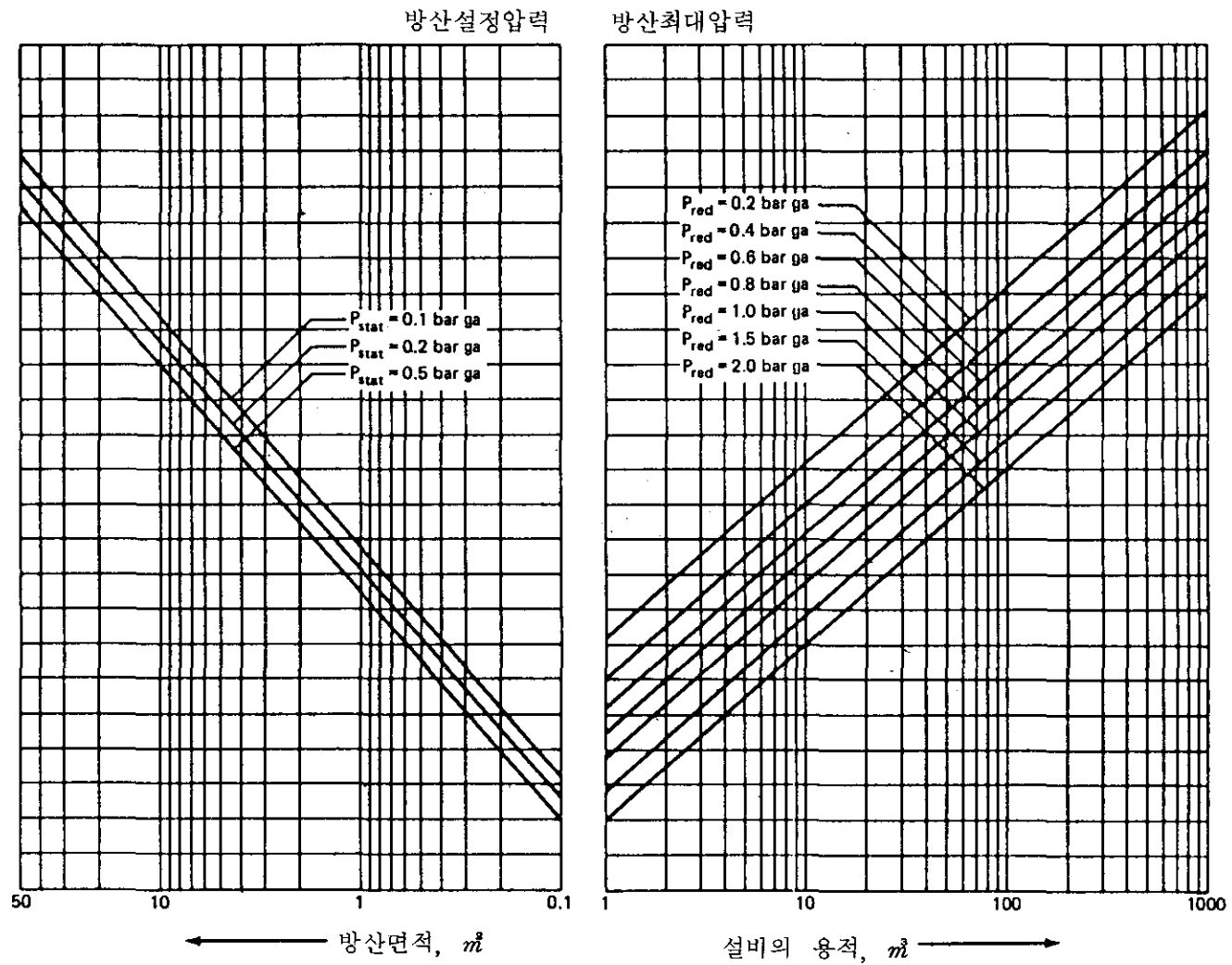
여기서 A_v : 방산면적 (m^2)

V : 설비의 부피 (m^3)

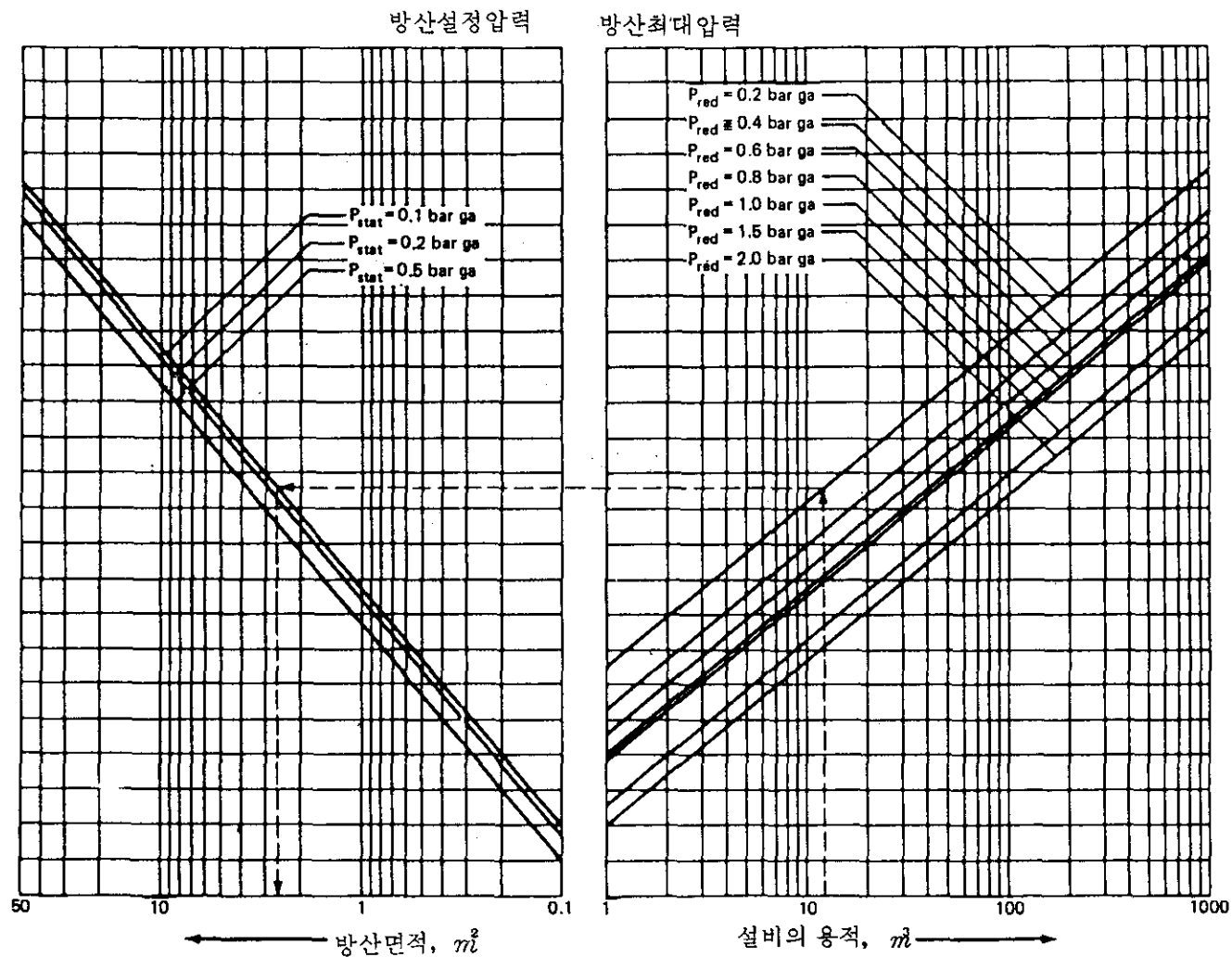
e : 2.718

P_{red} : 방산최대압력 (bar ga)

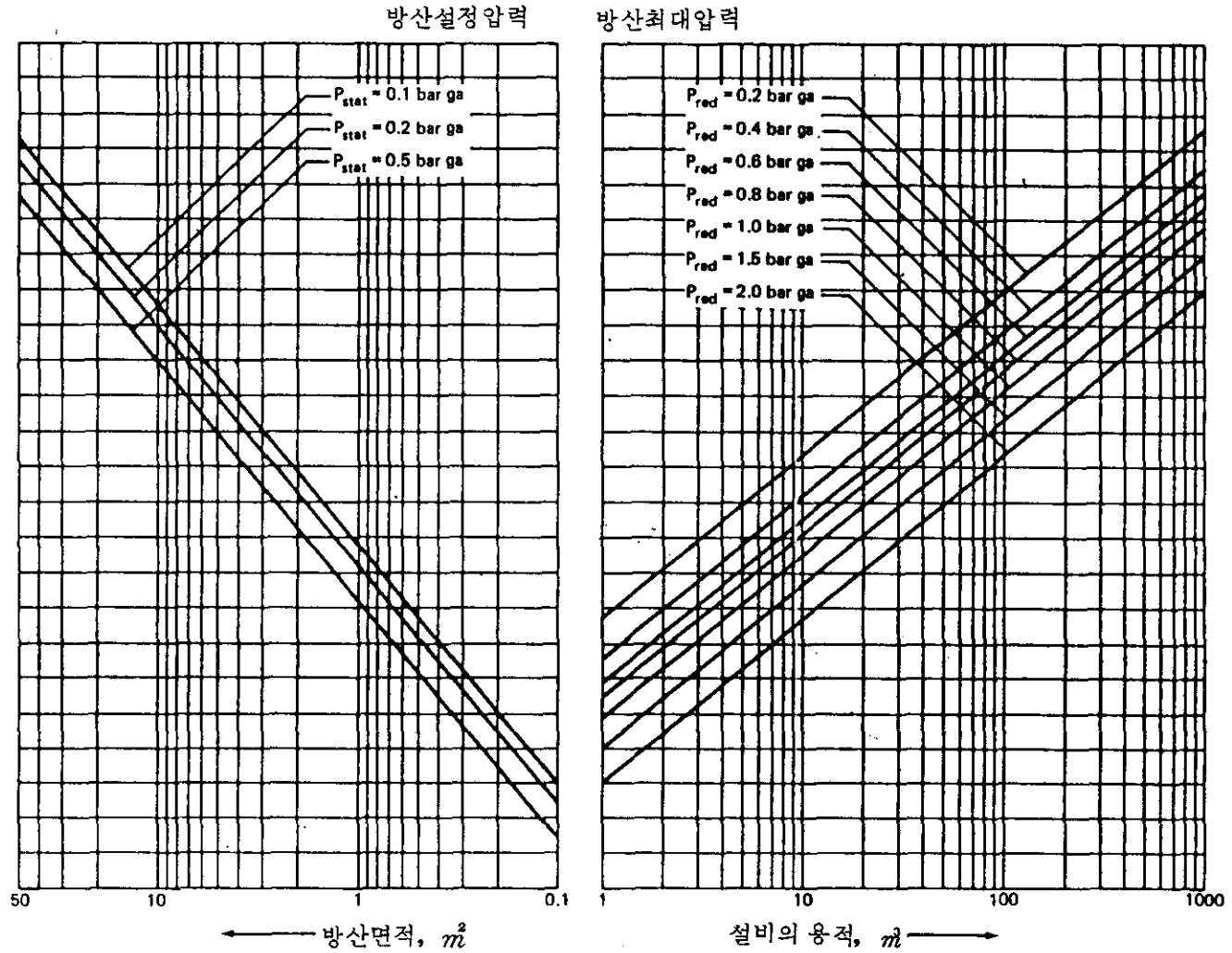
P_{stat} : 방산구의 방산설정압력 (bar ga)



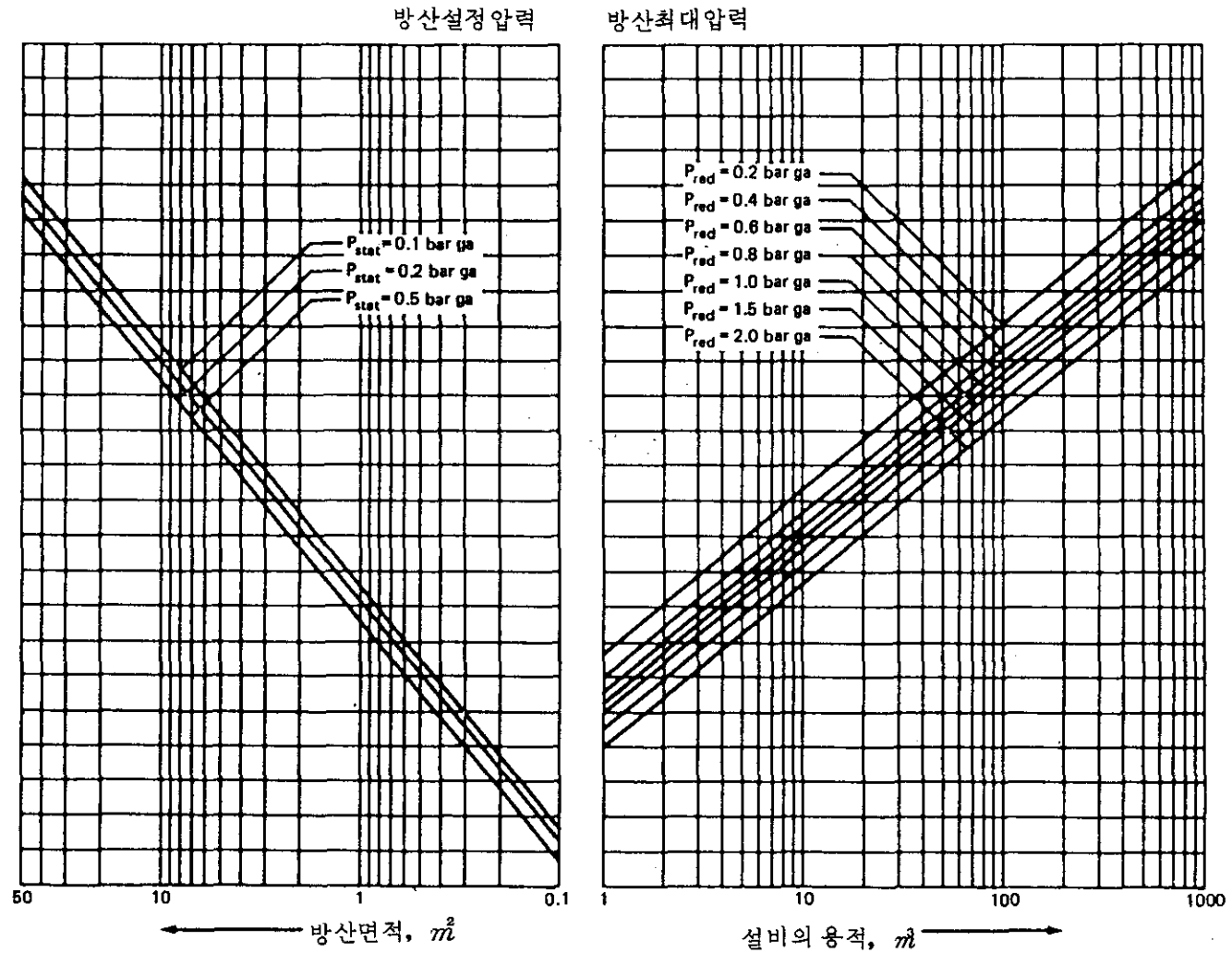
[그림 5-1] 메탄 (Methane) 에 대한 방산면적을 구하는 노모그래프



[그림 5-2] 프로판 (Propane) 에 대한 방산면적을 구하는 노모그래프



[그림 5-3] 코오크스 가스에 대한 방산면적을 구하는 노모그래프



[그림 5-4] 수소 (Hydrogen)에 대한 방산면적을 구하는 노모그래프

그리고 위 식에서 상수는 다음과 같다.

	a	b	c	d
메 탄	0.105	0.770	1.230	- 0.823
프 로 판	0.148	0.703	0.942	- 0.671
코 우 크 스	0.150	0.695	1.380	- 0.707
수 소	0.279	0.680	0.755	- 0.393

위 식은 노모그래프로 부터 유도된 식이기 때문에 노모그래프 보다 정확하다고는 할 수 없으며, 노모그래프와 같은 제한이 따른다. 따라서 임의로 외삽하여 사용해서는 안된다.

2. 해당 노모그래프 이외의 가스 및 액체 미스트(Mist)의 방산면적
상기 노모그래프로 메탄, 프로판, 코우크스가스 및 수소 이외의 가스와 액체미스트(Mist)에 대하여 방산구 면적을 적용하기 위한 접근 방법을 제시하면 다음과 같다.

(1) 폭발실험을 이용한 노모그래프의 내삽방법

동일 밀폐 실험용기에서 2종의 가스에 대한 폭발실험 결과 최대압력상승속도, $(dp/dt)_{max}$ 가 같다면 일정 설비크기에 대한 방산면적은 같다고 추정되어 질 수 있다. 가스의 최대압력상승속도는 실험용기의 부피와 모양 그리고 착화에너지에 따라서 변화된다. 따라서 해당 노모그래프에 사용된 가스들과 방산면적을 구하고자 하는 특정가스에 대한 최대압력상승속도는 같은 실험용기에서 동일 착화에너지를 사용하여 실험되어야 한다.

실험결과 최대압력상승속도가 해당 노모그래프에 사용된 가스들 보다 높거나 낮은 압력상승속도를 갖는 특정가스의 방산면적을 구하는 예를 들면 다음과 같다.

(예) 특정가스의 노모그래프 적용

노모그래프가 없는 특정가스에 대하여 10 m^3 용기에서의 다음 조건에 알맞는 방산면적을 구하고자 한다.

방산최대압력 (P_{red}) : 0.8 bar ga

방산구의 방산설정압력 : 0.2 bar ga

특정가스의 최대압력상승속도 : 730 bar/sec

동일용기 실험에서의 프로판과 수소에 대한 최대압력상승속도는 각각 369 와 2029 bar/sec

프로판과 수소의 노모그래프를 이용한 방산면적은 각각 10.1 m^2 와 11.0 m^2 이다. 따라서 특정가스에 대한 방산면적은 다음과 같다.

$$10.1 + \frac{730 - 369}{2029 - 369} \times (11.0 - 10.1) = 10.3 m^2$$

(2) 연소속도 (Burning Velocity) 분류에 의한 노모그래프 적용방법

어떤 특정가스의 방산구 면적은 그들의 연소속도를 프로판의 연소속도와 비교함으로써 구할 수 있다. 참고로 〈표 6 - 1〉은 각종 물질에 대한 연소속도의 값을 나타낸 것이다. 만일 어떤 특정가스의 연소속도가 60cm/sec, 즉 프로판 연소속도의 대략 1.3 배 이하일 경우는 프로판의 노모그래프 [그림 5 - 2]가 사용될 수 있다. 반면에 연소속도가 60cm/sec 이상 일 경우는 수소의 노모그래프 [그림 5 - 4]가 사용될 수 있다.

-

〈표 6-1〉 가스 및 증기의 연소속도

가스 및 증기	연소속도	가스 및 증기	연소속도
Acetone	54	, 2-cyclopropyl-	50
Acetylene	166	, 2, 3-dimethyl-	46
Acrolein	66	, 2-ethyl-	46
Acrylonitrile	50	, 2-methyl-	46
Allene(propadiene)	87	, 3-methyl-	49
Benzene	48	, 2, 3-dimethyl-2-butene	44
, n-butyl-	37	2-Buten-1-yne(vinylacetylene)	89
, tert-butyl-	39	1-Butyne	68
, 1, 2-dimethyl-	37	, 3, 3-dimethyl-	56
, 1, 2, 4-trimethyl-	39	2-Butyne	61
1, 2-Butadiene(methylallene)	68	Carbon disulfide	58
1, 3-Butadiene	64	Carbon monoxide	46
, 2, 3-dimethyl-	52	Cyclobutane	67
, 2-methyl-	55	, ethyl-	53
n-Butane	45	, isopropyl-	46
, 2-cyclopropyl-	47	, methyl-	52
, 2, 2-dimethyl-	42	, methylene-	61
, 2, 3-dimethyl-	43	Cyclohexane	46
, 2-methyl-	43	, methyl-	44
, 2, 2, 3-trimethyl-	42	Cyclopentadiene	46
Butanone	42	Cyclopentane	44
1-Butene	51	, methyl-	42

가스 및 증기	연소속도	가스 및 증기	연소속도
Cyclopentene	48	3-Hexyne	53
Cyclopropane	56	Hydrogen	312
, cis-1, 2-dimethyl-	55	Isopropyl alcohol	41
, trans-1, 2-dimethyl-	55	Isopropylamine	31
, ethyl-	56	Methane	40
, methyl-	58	, diphenyl-	35
, 1, 1, 2-trimethyl-	52	Methyl alcohol	56
trans-Decalin(decahydronaphthalene)	36	1, 2-Pentadiene(ethylallene)	61
n-Decane	43	cis-1, 3-Pentadiene	55
1-Decene	44	trans-1, 3-Pentadiene(piperylene)	54
Diethyl ether	47	, 2-methyl-(cis or trans)	46
Dimethyl ether	54	1, 4-Pentadiene	55
Ethane	47	2, 3-Pentadiene	60
Ethene(ethylene)	80	n-Pentane	46
Ethyl acetate	38	, 2, 2-dimethyl-	41
Ethylene oxide	108	, 2, 3-dimethyl-	43
Ethylenimine	46	, 2, 4-dimethyl-	42
n-Heptane	46	, 2-methyl-	43
Hexadecane	44	, 3-methyl-	43
1, 5-Hexadiene	52	, 2, 2, 4-trimethyl-	41
n-Hexane	46	1-Pentene	50
1-Hexene	50	, 2-methyl-	47
1-Hexyne	57	, 4-methyl-	48

가스 및 증기	연소속도	가스 및 증기	연소속도
cis-2-Pentene	51	, 2-cyclopropyl	53
1-Pentyne	63	, 2-methyl-	44
, 4-methyl-	53	Propionaldehyde	58
2-Pentyne	61	Propylene oxide(1, 2-epoxypropane)	82
, 4-methyl-	54	1-Propyne	82
Propane	46	Spiropentane	71
, 2-cyclopropyl-	50	Tetrahydropyran	48
, 1-deutero-	40	Tetralin(tetrahydronaphthalene)	39
, 1-deutero-2-methyl-	40	Toluene(methylbenzene)	41
, 2-deutero-2-methyl-	40	Gasoline(100-octane)	40
, 2, 2-dimethyl-	39	Jet fuel, grade JP-1(average)	40
, 2-methyl-	41	Jet fuel, grade JP-4(average)	41
Propene(propylene)	52		

(3) 실험없이 노모그래프를 사용할 경우

상기 2.(1)의 실험데이터를 얻을 수 없는 경우에는 수소의 노모그래프〔그림 5-4〕를 사용하여 방산구 면적을 추정할 수 있다. 비록 이와 같은 방법이 대부분의 경우 보수적이기는 하나 수소의 노모그래프를 사용할 경우 방산구의 면적이 대체로 더 부가될 수 있기 때문이다.

(4) 가연성액체 미스트(Mist)의 적용방법

가연성액체 미스트는 앞의 4장에서 언급한 것과 같이 인화점 이상의 온도에서 뿐만 아니라 그 이하의 온도에서도 연소가 되며, 분산된 분진(Dust)과 유사하게 폭발할 수 있다. 많은 가연성액체 미스트에 관한 방산구의 면적은 프로판의 방산 노모그래프를 적용할 수 있다.

(5) 하이브리드 혼합물(Hybrid Mixture)의 적용방법

하이브리드 혼합물은 앞의 4장에서 언급한 것과 같이 최대폭발압력이나 폭발압력 최대상승속도가 상당히 증가하게 된다. 따라서 하이브리드 혼합물은 보통 가스에 비하여 더 큰 방산면적을 얻을 수 있는 노모그래프를 사용해야 한다.

3. 노모그래프 적용시 고려하여야 할 변수

(1) 대기압 정도의 초기압력을 갖는 설비에 대한 내부 부속물과 초기난류의 영향

1) 앞의 4장에서 언급한 바와 같이 초기난류는 정지상태 보다도 폭발압력 상승속도등의 현저한 증가를 가져온다. 경우에 따라서 폭굉으로 전이할 수도 있으며 이 경우에는 노모그래프를 적용할 수 없다.

2) 초기난류 상태의 매탄과 프로판은 초기에 정지한 수소의 최대압력 상승속도 $(dp/dt)_{max}$ 와 유사한 값을 갖는다. 따라서 수소의 노모그래프는 정지상태에서 프로판과 유사하거나 적은 $(dp/dt)_{max}$ 를 갖는 초기난류 상태의

가스에 대하여 사용가능하다.

정상상태에서 수소의 $(dp/dt)_{max}$ 와 유사한 값을 갖는 화합물은 난류조건 하에서 착화될 때 폭굉으로 전이할 수 있다.

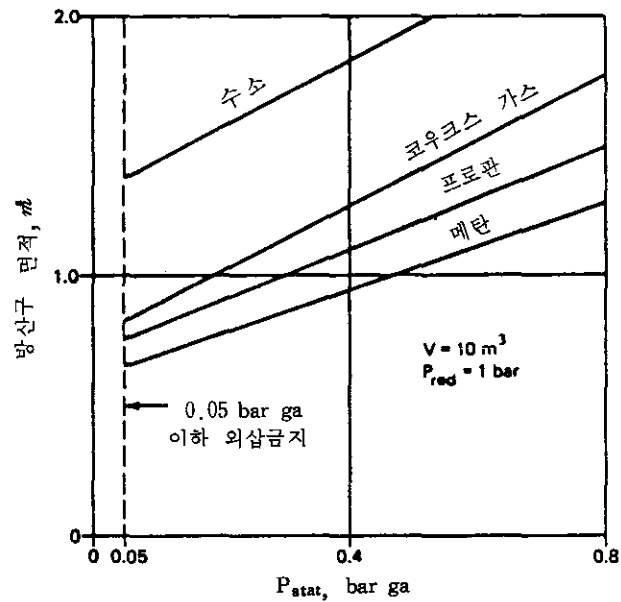
3) 설비내부에 부속물이 존재할 경우 난류를 일으키기 쉽고 폭굉으로 전이할 우려가 높다. 따라서 이에 대한 가능성 여부를 충분히 검토하여야 한다.

(2) 높은 착화에너지의 영향

앞의 장에서 언급한 바와 같이 착화에너지의 양과 형태는 화염전파속도와 방산에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 설비내부에서의 착화에너지의 크기는 정확하게 예측하는 것이 어려운 실정이다. 그렇지만 대부분의 산업현장에 있어서 착화에너지는 아주 크다고 보아야 한다. 특히 설비들이 배관이나 덕트 등에 의해 연결된 경우는 이곳으로 통하는 압력과 난류의 증가로 큰 점화원의 발생우려가 높다. 따라서 설계시에 설비와 배관의 상대적인 크기 및 배관의 길이 등을 충분히 검토하여야 한다.

(3) 노모그래프의 외삽 (Extrapolation)

노모그래프에 있어서 가장 낮은 P_{rel} 값은 0.1 bar ga이고 가장 낮은 P_{rel} 값은 0.2 bar ga이다. 방산중에 발생하는 최대압력 (P_{rel})를 낮추기 위하여 필요에 따라 더 낮은 압력에서 설비의 방산이 요구된다. 이 경우 필요한 방산구의 면적을 구하기 위하여 노모그래프를 외삽한다. 그 예를 [그림 5 - 5]에 나타내었으며, 이와 같은 그래프는 각 설비의 크기에 따라 작도되어야 한다. 이 데이터는 10㎏의 설비에 대한 방산면적을 일정한 P_{rel} 하에 4종의 가스에 대한 노모그래프로 얻어진 것이다. 따라서 유사한 그래프가 P_{rel} 의 값에 따라 구하여 질 수 있으며 기본 노모그래프의 성능을 확장 이 그래프는 외삽과 내삽을 허용한다.



[그림 5 - 5] 노모그래프의 외삽

(4) 초기의 높은 압력 영향

1) 초기압력의 효과는 절대압력에 근거하여 서로 관련시켜야 한다. 만일 방산구의 파열압력에 대한 초기가스의 압력 비가 일정하고 또한 설비의 크기와 방산구의 크기가 일정하게 유지되면 프로판에 있어서 방산중에 발생하는 압력은 그 초기압력의 1.5승 만큼 대략 변하게 된다. 프로판에 대한 제곱지수는 더 큰 방산비 ($A/V^{2/3} = 0.3$)에 대하여 약 1.2로 부터 더 작은 방산비 ($A/V^{2/3} = 0.1$)에 대하여 약 1.5까지 변한다. 그리고 수소에 대하여는 지수범위가 1.1부터 1.2이다.

2) Bartknecht는 실험결과를 토대로 노모그래프는 1 bar (절대)의 운전압력에 근거된 것이나 1.2 bar (절대)에 달하는 운전압력에 대해서는 보정없이 사용될 수 있다고 제안하고 있다.

(5) 초기온도의 영향

초기온도의 효과는 앞의 4장에서 언급한 바와 같이 초기온도가 증가함에

따라 폭발압력 최대상승속도는 증가하나 방산되지 않는 설비에서 연소로 발생하는 압력은 감소하게 된다. 따라서 초기온도의 증가에 대한 방산시에 발생하는 추정압력의 조절은 고려하지 않아도 된다.

(6) 변수의 조합 영향

각종 변수가 동시에 작용할 경우 방산중에 발생하는 최대압력을 정확하게 추정할 수 있는 실험결과가 현재로서는 거의 없다. 최근 Chippett는 실험결과를 근거로 초기난류의 영향은 초기압력이 1.0 bar ga 이상일 경우에는 큰 영향을 주지 않는다고 제시하였다. 즉 초기압력이 대기압 이상일 경우에 허용될 수 있다.

V. 분진 (Dusts) 폭발의 방산

1. 방산구 면적을 구하기 위한 노모그래프

(1) 분진폭발에 대한 방산면적은 도이치 기술자 협회에서 규정한 VDI 3673 이 가장 포괄적으로 적용되고 있다.

이 규정은 4종의 분진과 4종의 용기 (1, 10, 30, 60 m³)에 의해서 실험한 데이타로부터 근거된 것으로 이들 노모그래프는 K_{st} 값을 기준으로 한 것이 3종, S_{t-1}, S_{t-2} 그리고 S_{t-3}을 기준으로 한 것이 3종으로서 [그림 5 - 6] ~ [그림 5 - 11] 과 같다.

(2) 적용에 있어 이해와 편의를 위하여 이들 노모그래프로 부터 유도된 식을 제시하면 다음과 같다.

1) [그림 5 - 6, 5 - 7, 5 - 8] 의 노모그래프에서 유도된 식

$$A_v = (a) [V^{2/3}] [K_{st}]^b [P_{red}]^c \dots\dots\dots (6-4)$$

$$\text{여기서 } a = 0.000571 e^{(2)} (P_{stat})$$

$$b = 0.978 e^{(-0.105)} (P_{stat})$$

$$c = -0.687 e^{(0.226)} (P_{stat})$$

그리고 $A_v = \text{방산면적 (m}^2\text{)}$

$V = \text{설비의 용적 (m}^3\text{)}$

$e = 2.718$

2) [그림 5 - 9] 의 노모그래프에서 유도된 식 ($P_{stat} = 0.1 \text{ bar ga}$)

$$\text{Log } A_v + C = 0.67005 (\text{Log } V) + \frac{0.96027}{(P_{red})^{0.2116}} \dots\dots\dots (6-5)$$

여기서 $C = 1.88854 : S_t - 1 \text{ 분진}$

$= 1.69846 : S_t - 2 \text{ 분진}$

$= 1.50821 : S_t - 3 \text{ 분진}$

3) [그림 5 - 10] 의 노모그래프에서 유도된 식 ($P_{stat} = 0.2 \text{ bar ga}$)

$$\text{Log } A_v + C = 0.67191 (\text{Log } V) + \frac{1.03112}{(P_{red})^{0.3}} \dots\dots\dots (6-6)$$

여기서 $C = 1.93133 : S_t - 1 \text{ 분진}$

$= 1.71583 : S_t - 2 \text{ 분진}$

$= 1.50115 : S_t - 3 \text{ 분진}$

4) [그림 5 - 11] 의 노모그래프에서 유도된 식 ($P_{stat} = 0.5 \text{ bar ga}$)

$$\text{Log } A_v + C = 0.65925 (\text{Log } V) + \frac{1.20083}{(P_{red})^{0.3912}} \dots\dots\dots (6-7)$$

여기서 $C = 1.94357 : S_t - 1 \text{ 분진}$

$= 1.69627 : S_t - 2 \text{ 분진}$

$= 1.50473 : S_t - 3 \text{ 분진}$

위 식들은 노모그래프로부터 유도된 식이기 때문에 노모그래프 보다 정확하다고 할 수 없으며, 노모그래프와 같은 제한이 따른다. 따라서 임의로 외

삼하여 사용해서는 안된다.

(3) 폭발의 위험성등급이 같은 분진에 있어서도 최대폭발압력 (P_{max}) 이 9 bar ga보다 더 적은 경우는 그 이상인 경우 보다도 더 적은 방산면적이 요구된다. 밀폐된 용기실험에서 최대폭발압력이 9 bar ga 이하인 분진 그리고 방산구의 파열압력이 0.1 bar ga를 초과하지 않는 경우에 적용할 수 있는 노모그래프는 [그림 5-12] 및 [그림 5-13]과 같다.

(4) 분진폭발은 특히 화학조성이 같은 물질이라 할 지라도 입자의 크기와 모양, 함수율등 물리적 특성에 따라 그 폭발특성이 달라짐으로 각종 자료를 종합하여 적절하게 적용하여야 한다.

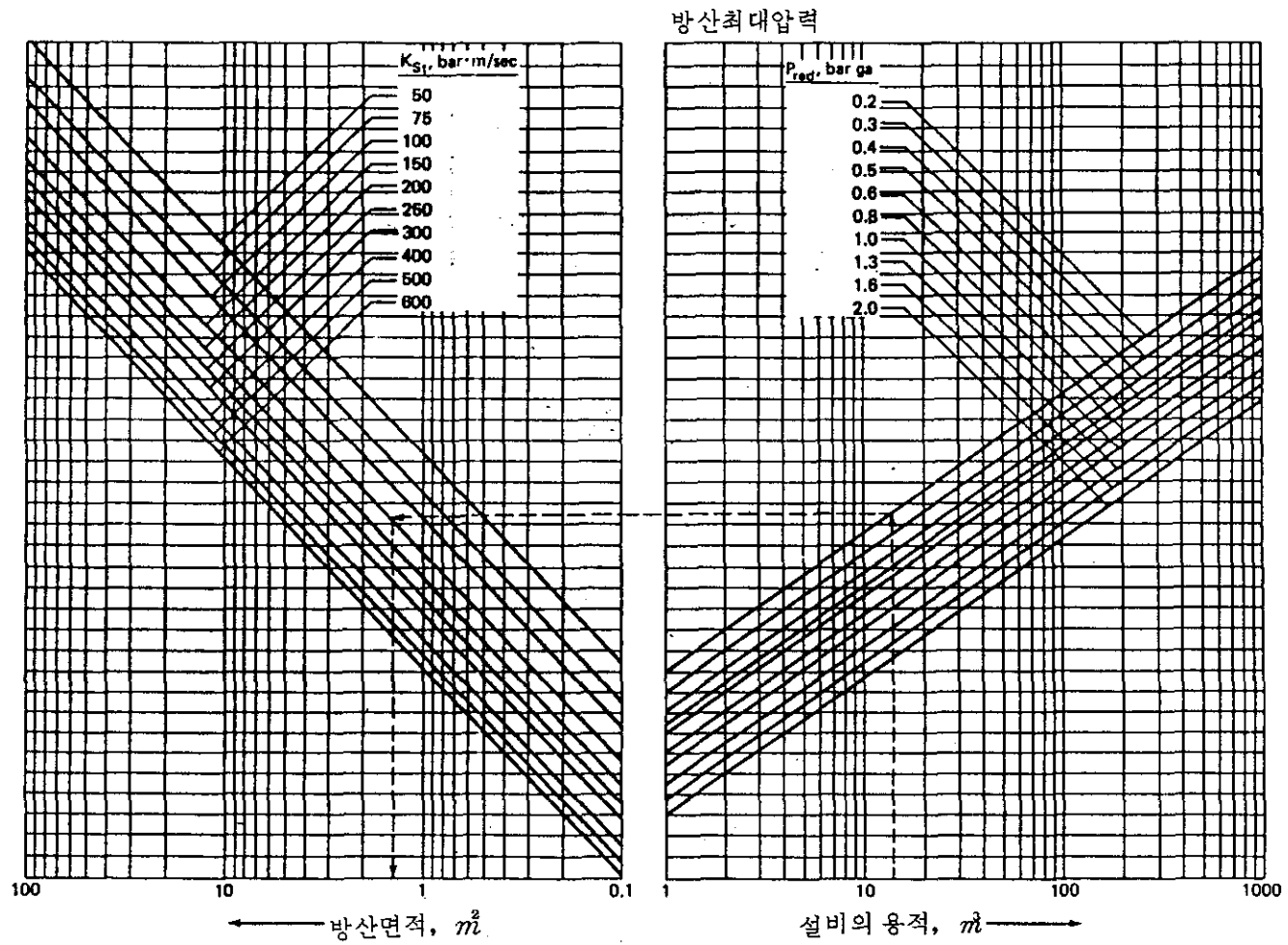
(5) 노모그래프에 의한 방산면적은 K_{st} 값 혹은 분진의 위험등급, 설비의 부피와 강도, 방산설정압력 등에 따라 결정된다.

2. 노모그래프의 외삽과 내삽

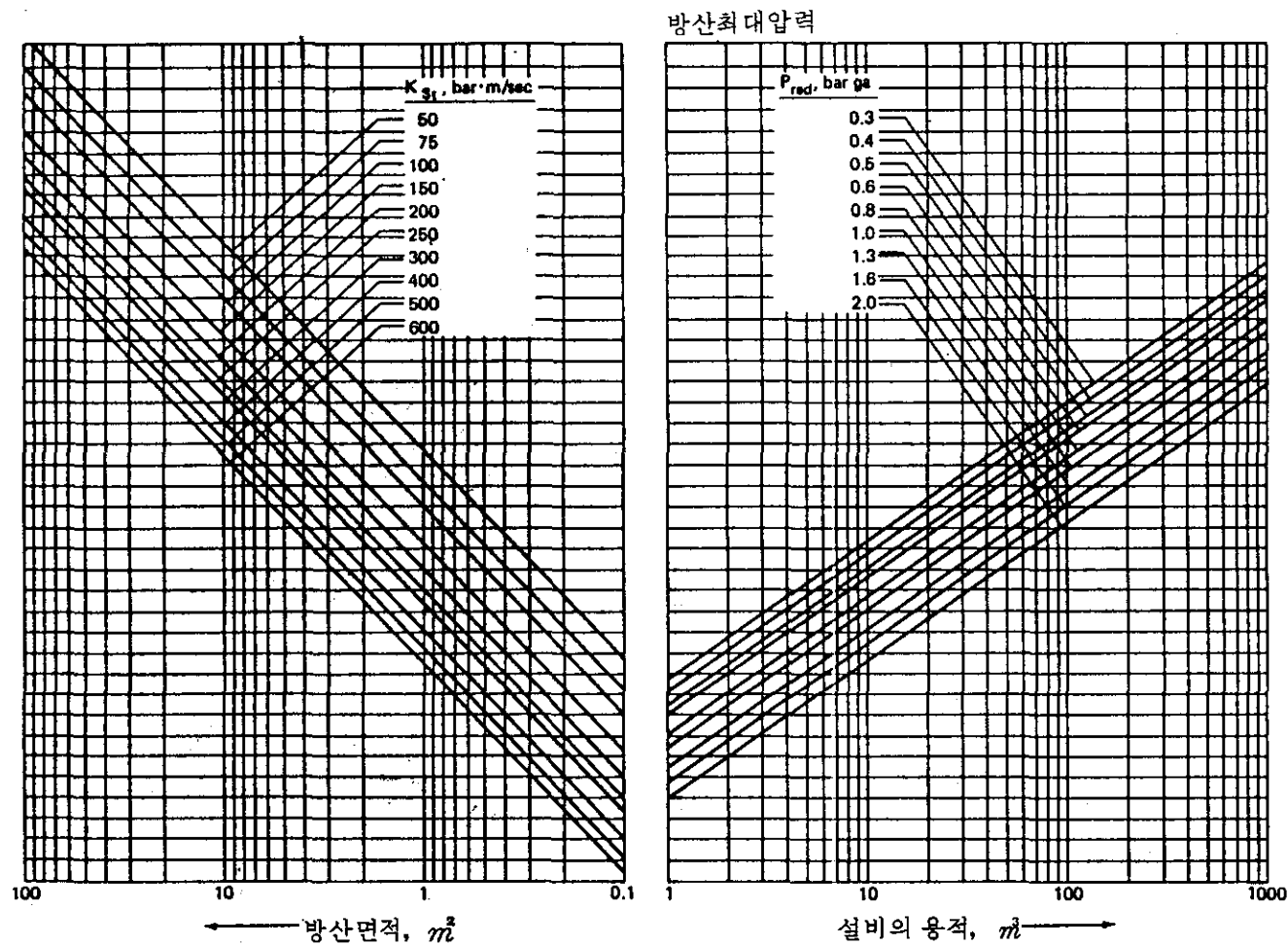
(1) 분진에 대한 노모그래프는 앞의 가스에 대한 노모그래프에서와 같은 방법을 이용 외삽 또는 내삽하여 사용할 수 있다.

(2) 그러나 P_{stat} 에 대하여 0.05 bar ga이하 혹은 P_{red} 에 대하여 0.1 bar ga이하로 외삽하지 않도록 주의하여야 한다. 이들 값 이하에 대해서는 저장도설비에 대한 방산구면적 계산방법을 이용하여야 한다. 더구나 P_{red} 는 노모그래프의 최상한계인 2.0 bar ga이상으로 외삽하여서는 안된다. 비록 P_{stat} 는 위쪽으로 외삽할 수 있을 지라도 그것은 적어도 0.05 bar 만큼 P_{red} 보다도 언제나 적어야 한다.

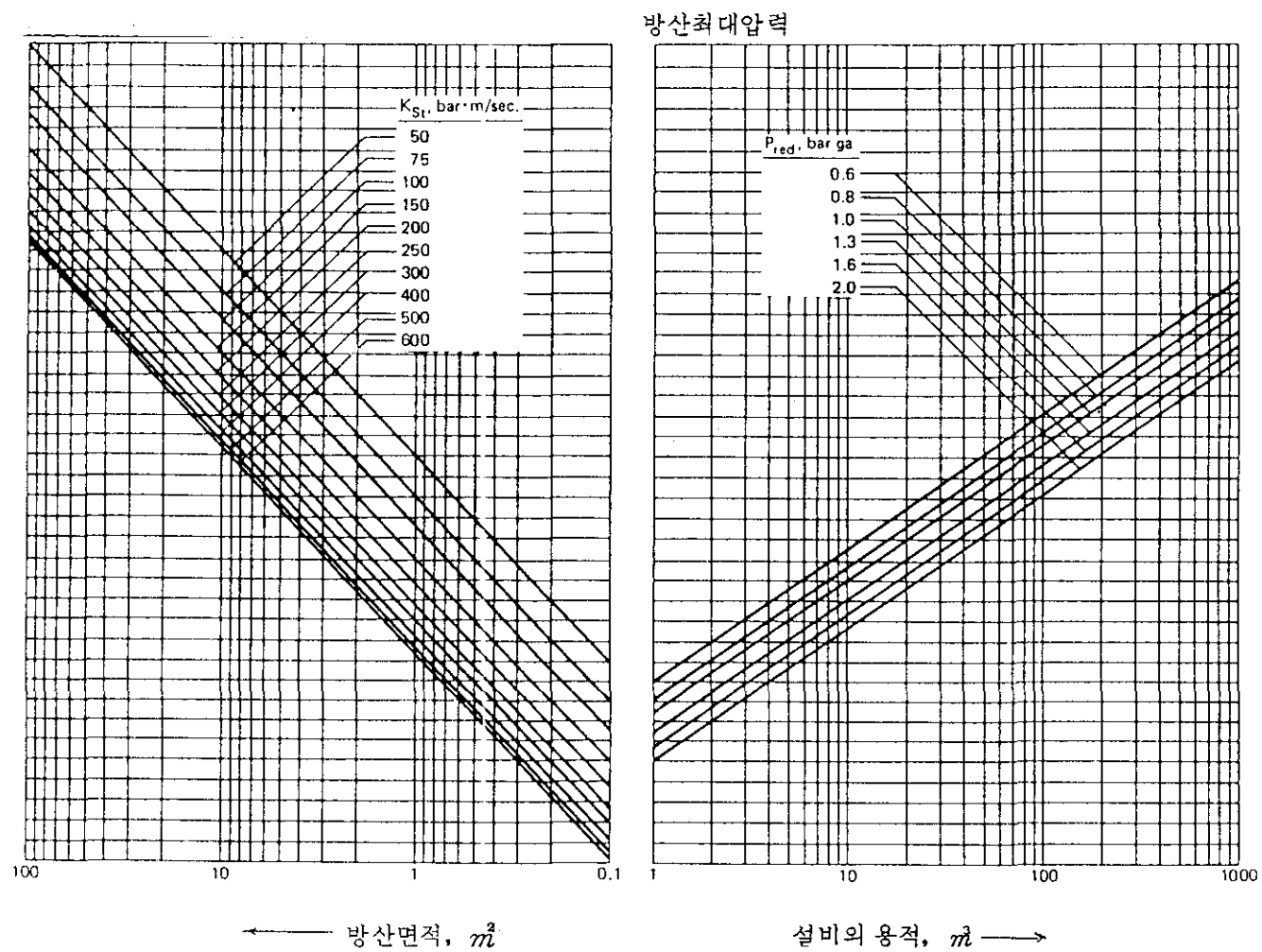
(3) 분진의 노모그래프는 발화전의 초기압력이 대기압 상태에서 개발되었으며, 그들은 0.2 bar ga에 달하는 초기압력에서 적용될 수 있다. 더 높은 초기압력하에서 운전되는 시스템에 대해서는 현재로서 적용가능한 지침이 없다.



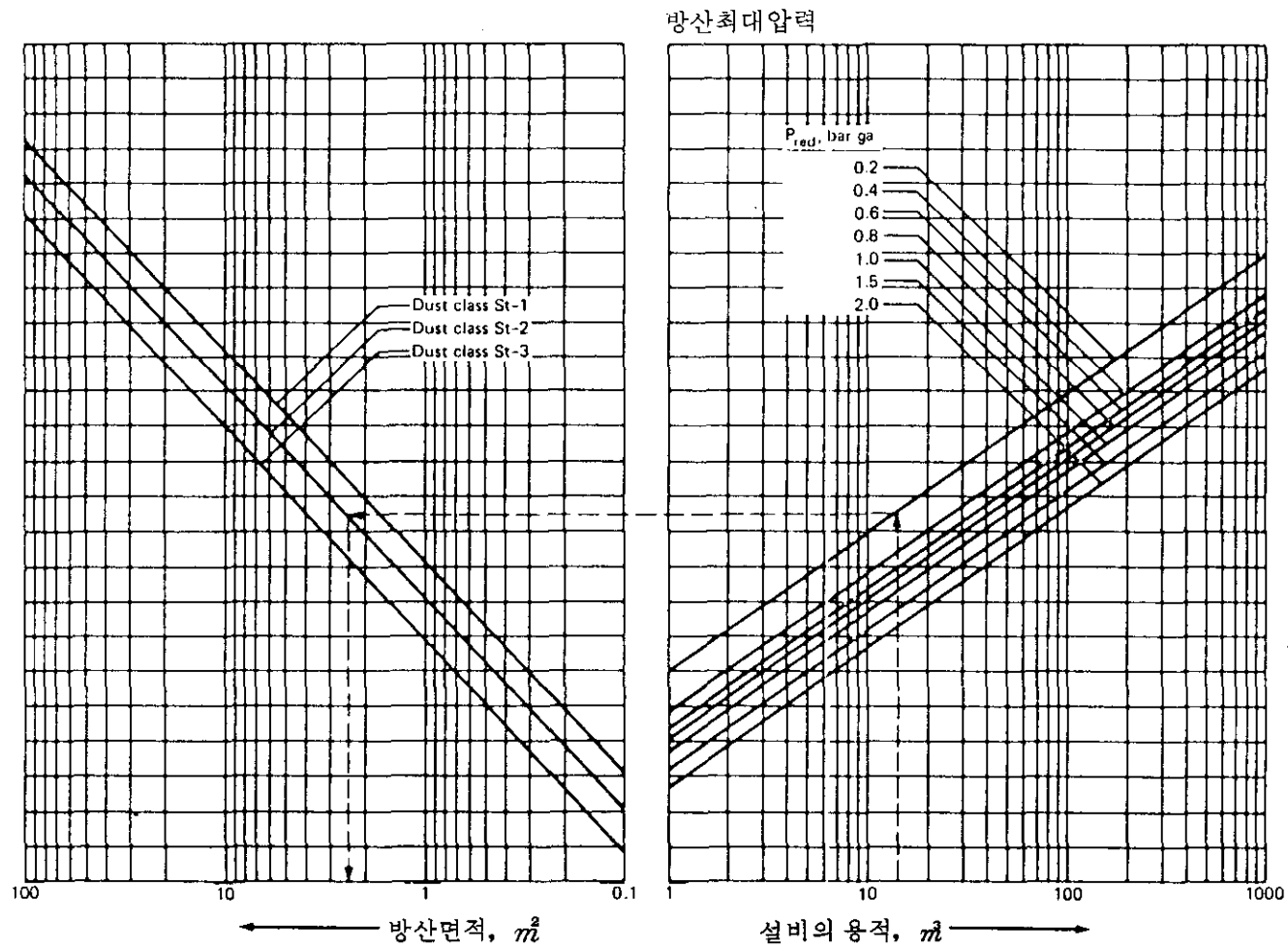
[그림 5-6] 분진 ($P_{stat} = 0.1$ bar ga) 에 대한 방산 노모그래프 - K_{st} 기준



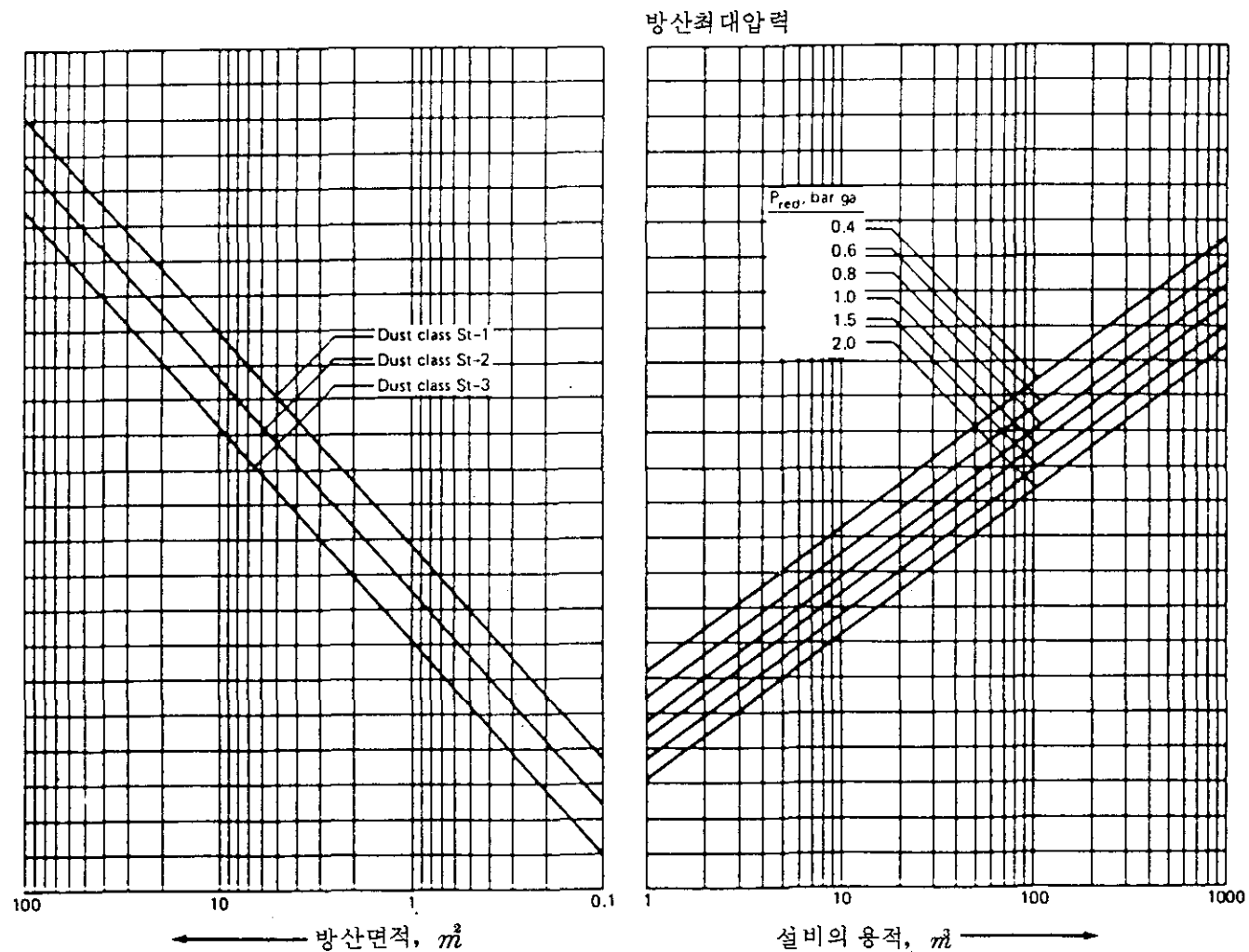
[그림 5 - 7] 분진 ($P_{stat} = 0.2 \text{ bar ga}$) 에 대한 방산 노모그래프 - K_{st} 기준



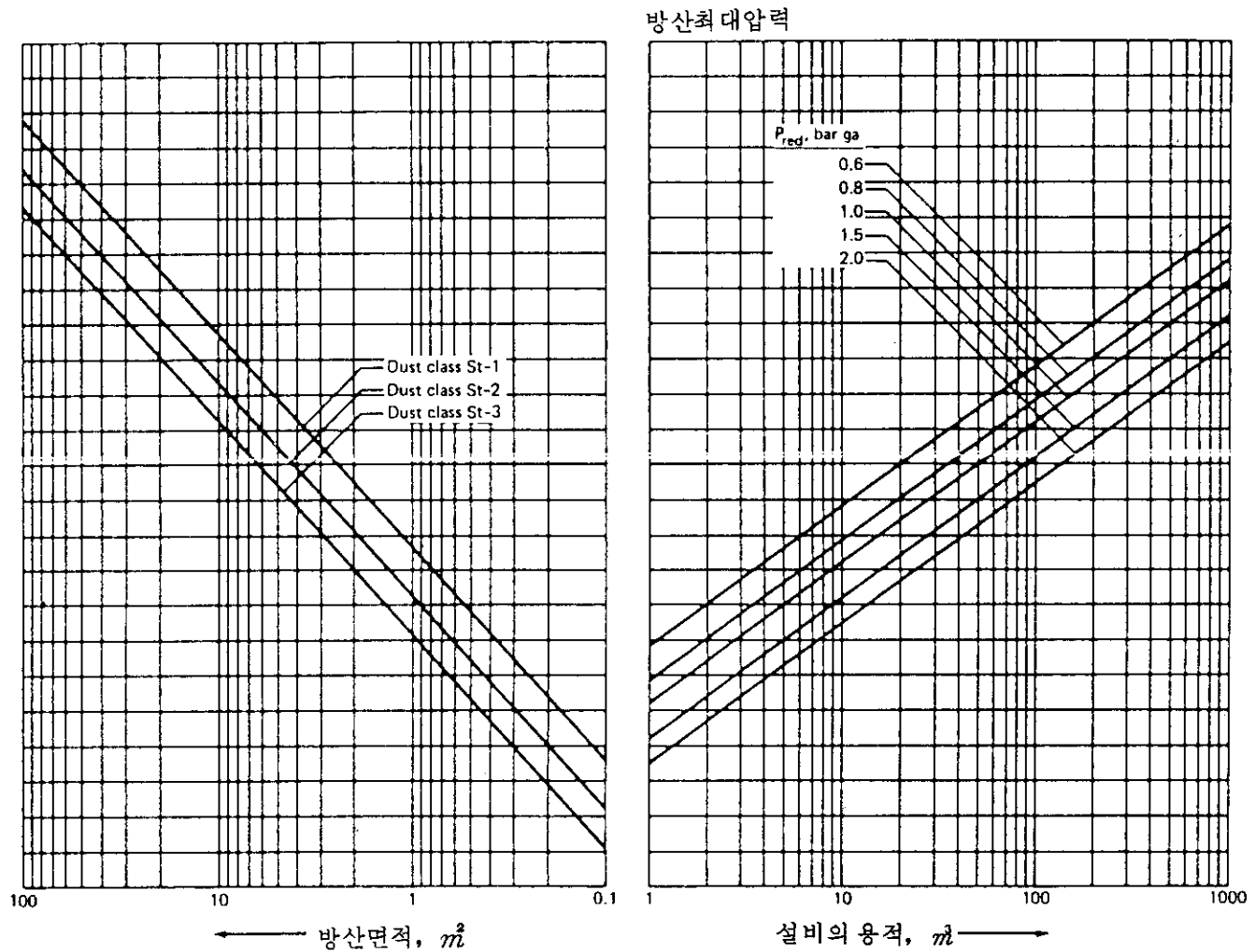
[그림 5 - 8] 분진 ($P_{stat} = 0.5$ bar ga) 에 대한 방산 노모그래프 - K_{st} 기준



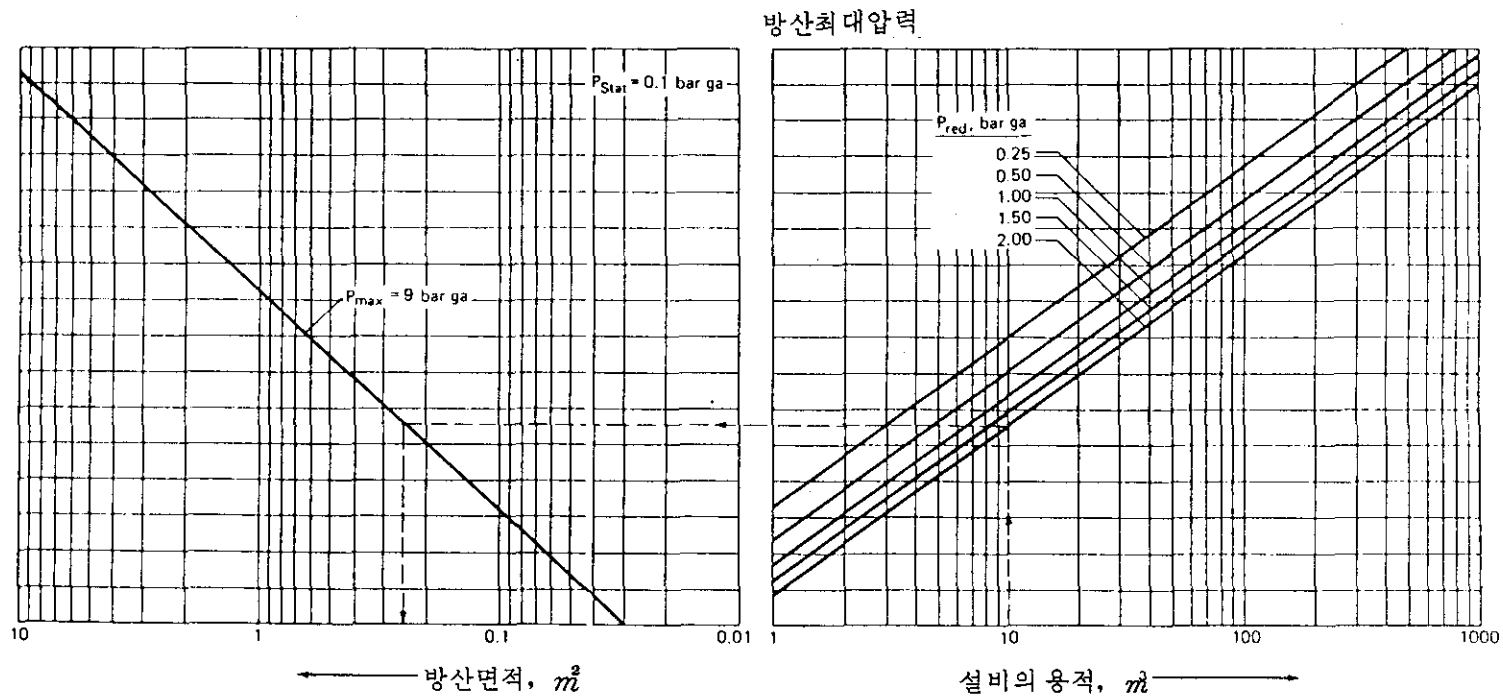
[그림 5-9] 분진 ($P_{stat}=0.1$ bar ga) 에 대한 방산 노모그래프-분진등급기준



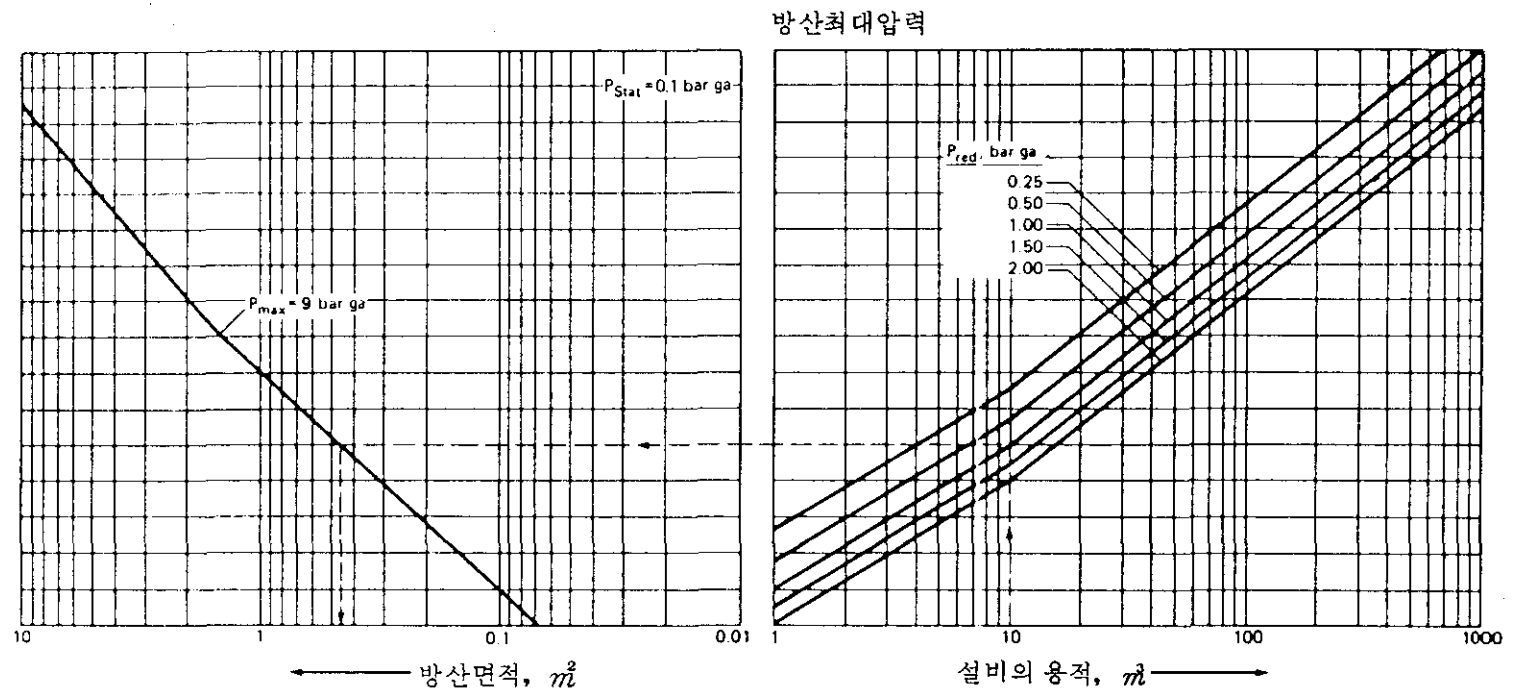
[그림 5 - 10] 분진 ($P_{stat} = 0.2 \text{ bar ga}$) 에 대한 방산 노모그래프-분진등급기준



[그림 5 - 11] 분진 ($P_{stat} = 0.5 \text{ bar ga}$) 에 대한 방산 노모그래프-분진등급기준



[그림 5-12] 최대폭발압력 (P_{max}) 이 9 bar ga 이하인 S_t-1 분진에 대한 방산노모그래프



[그림 5-13] 최대폭발압력 (P_{max}) 이 9 bar ga 이하인 S_t-2 분진에 대한 방산노모그래프

3. 설비에 따른 설치기준

(1) 집진기 (Dust Collectors)

1) 집진기에서의 폭압방산을 위하여 방산구는 백 (Bags) 과 케이지 (Cage) 가 방산과정을 방해할 수 있는 가능성을 최소화할 수 있는 방법으로 반드시 설치되어야 한다.

2) 집진기는 필터 매체를 기준으로 더스트 사이드 (Dust Side) 와 클린 사이드 (Clean Side) 로 분리될 수 있으나 방산구의 면적 계산시에는 각 사이드를 합한 것을 전체부피로 한다.

3) 가능한 방산구의 설치위치는 예상되는 착화원에 근접한 곳에 설치하여야 한다. Lunn의 실험결과에 의하면 착화원에 근접한 위치에 방산구가 설치된 경우 발생하는 압력이 2kPa인 반면에 착화원에서 방산구의 위치가 멀고 방산되기 전에 난류가 형성되는 경우는 그 압력이 14kPa로 높아지게 된다.

(2) 사일로 (Silos), 빈 (Bins) 및 호퍼 (Hoppers)

1) 사일로, 빈 및 호퍼의 경우 방산구는 상부 (Top) 또는 취급물질이 쌓이는 레벨 위쪽의 측면에 설치하여야 한다. 아래쪽에 설치시는 파이어볼의 발생 또는 방산의 곤란을 초래할 수 있다.

2) 이들 설비에서의 방산면적은 설비의 단면적 만큼 큰 경우가 있으며, 이 경우는 설비의 상부전체가 개방되는 구조의 방산구를 설치할 수도 있다. 이 경우 덮개는 가능한 가벼워야 하고 $2.5 \text{ lb/ft}^2 (12.5 \text{ kg/m}^2)$ 를 초과해서는 안된다. 따라서 그 직경이 큰 경우에도 자체지지 (Self - Supporting) 되어서는 안되며 내부에서 지지되게 설계하여야 한다. 또한 방산구 덮개는 용접되거나 혹은 기타방법으로 단단하게 지지물에 부착시켜서는 안된다.

3) 안전한 방산을 위하여 설비의 측면이나 상부에 설치할 수 있으며 필요시는 계산된 방산면적을 분할하여 설치하여야 한다.

4) 요구되는 방산면적은 설비의 강도에 의해 결정된다. 따라서 방산면적이 설비의 단면적 보다 더 크거나 설비의 구조상 설치가 불가능한 경우에는 유효한 방산면적에 일치하여 폭압을 수용할 수 있는 강도로 설비를 보강하여야 한다.

제 10 장 길이대 직경 (L/D) 비가 큰 설비에서의 폭발압력방산구 설치기준

I. 적용범위

파이프, 덕트 혹은 긴 설비로서 운전압력이 1.2 bar (절대)에 달하는 시스템에 적용된다. 이들은 길이대 직경 (L/D) 비가 5 이상으로서 설계시 많은 인자가 고려되어야 한다.

II. 적용시의 변수

(1) 기하학적으로 길이대 직경 (L/D) 비가 크면 화염의 가속도를 빠르게 증가시키게 되며, 매우 빠른 화염속도의 가속은 폭굉 (Detonation) 을 야기시킬 수 있다.

(2) 방산구가 한개인 경우 파이프, 덕트 혹은 긴 설비에서 단면적을 초과하는 어떤 방산면적은 폭발압력을 감소시키는 데 효과적이지 못하다. 즉 단면적이 얻어질 수 있는 최대유효 방산면적이다.

(3) 밸브, 엘보우 (Elbows) 그리고 기타 피팅류 (Fittings) 와 같은 난류를 생성시키는 부속물이 흔히 사용되며, 생성된 난류는 갑작스런 화염의 가속은 물론 압력에 있어 빠른 증가를 야기시킨다.

(4) 파이프나 덕트가 연결된 설비내에서 가연성혼합물의 점화는 화염면을 만들고 그 전방에 상당한 난류를 일으키며, 파이프나 덕트내의 가스를 압축한다. 화염면이 덕트나 파이프의 입구에 도달하면 더욱 난류화되며 파이프나 덕트 그 자체에서의 스파크에 의해 착화시 초래되는 초기 격렬함 보다 훨씬 더 크게 화염면이 전파된다.

(5) 반대로 화염면이 부적당하게 방산되는 파이프나 덕트를 통하여 전파할

때 그리고 연소한계의 혼합기를 함유하는 설비내부로 분출되면 이것이 엄청난 착화원으로 작용, 설비내의 최대폭발압력과 최대압력상승속도를 증가시키는 결과를 초래한다.

Ⅲ. 설계지침

(1) 원형 이외의 단면적을 갖는 파이프, 닥트 혹은 긴 설비에 대해서는 수력학적 직경 (Hydraulic Diameter)이 사용되어야 한다. 수력학적 직경은 $4A/P$ 이며, 여기서 A 는 단면적이며 P 는 단면의 둘레이다.

(2) 각 방산구위치에서 전체면적은 적어도 닥트나 파이프의 단면적과 같아야 한다. 요구되는 방산면적은 각 위치에서 한 방산구에 하나 혹은 그 이상을 사용할 수 있다.

(3) 폭발위험이 있는 설비에 연결된 파이프나 닥트도 역시 방산구가 설치될 수 있다. 가스와 등급 $St-3$ 분진에 대하여 파이프나 닥트의 단면적과 일치하는 방산구는 설비에 연결된 지점으로 부터 2직경 (2D) 거리 이내인 파이프나 닥트상에 설치되어야 한다. 등급 $St-2$ 와 $St-1$ 분진에 대해서는 그때 그때의 경우에 따라 어느정도 부가적인 방산의 필요성을 결정하기 위하여 평가가 실시되어야 한다.

(4) 방산구는 점화원이 알려질 수 있을 때는 가능한 점화원에서 근접한 위치에 설치되어야 한다.

(5) 가스를 취급하는 시스템에 있어서 방해물을 갖는 파이프나 닥트는 방해물의 각 측면에 방산구를 설치하여야 한다. P_{red} 가 0.2bar ga 혹은 그 이하인 두 방산구를 설계할 때 파이프나 닥트의 단면적과 같은 면적을 갖는 각 방산구를 각각 3 직경 (3D) 과 6 직경 (6D) 거리로 방해물로 부터 떨어져서 방해물의 각 측면에 설치하여야 한다. P_{red} 가 0.2 bar ga를 초과할 경우 설계는 3 직경 (3D) 의 거리로 방해물의 각 측면에 1 개의 방산구면 충분하다.

현재로서는 분진의 방산에 사용할 수 있는 충분한 자료는 알려져 있지 않다. 여기서 방해물이란 엘보우(Elbow), 티(Tee), 오리피스(Orifice), 밸브(Valve) 혹은 파이프나 덕트단면적의 5% 이상을 차단하는 기타 부속설비를 의미한다.

(6) 방산구덮개의 무게는 방산면적에 대하여 $2.51b/ft^2$ 를 초과해서는 안 된다.

(7) 방산구의 방산설정압력은 운전조건을 감안하고 가능한 P_{red} 의 설계값보다 훨씬 낮아야 하나 P_{red} 의 설계값의 1/2을 초과되게 하여서는 안 된다.

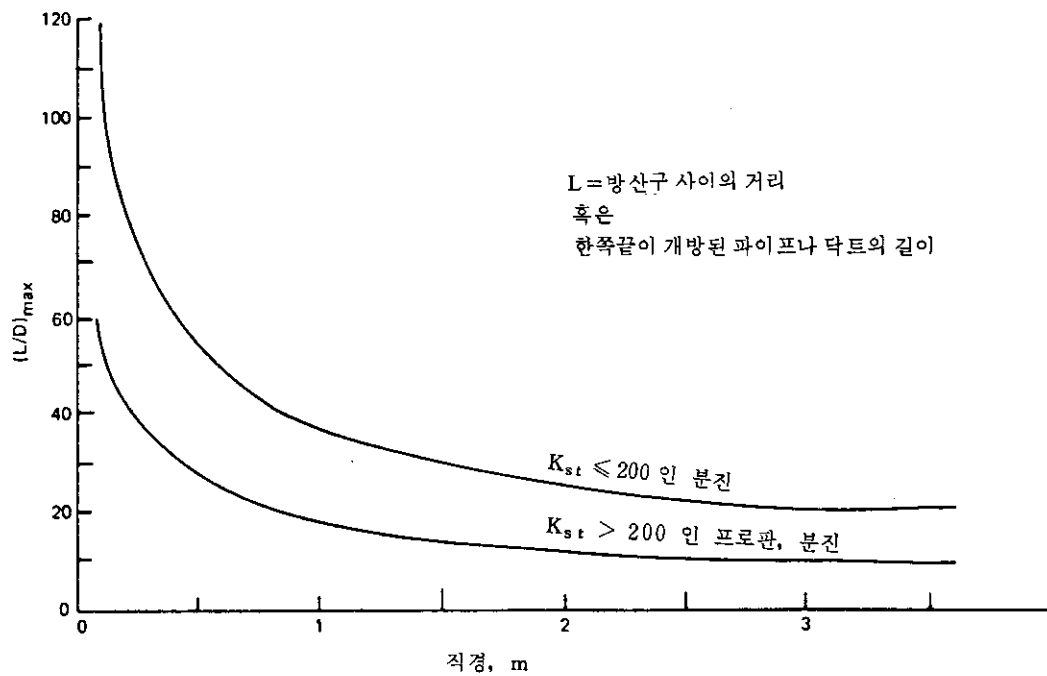
(8) 방산구는 방산시 작업자에게 피해를 주지않는 위치에 설치하여야 한다.

IV. 한쪽 끝에서 방산시 방산최대압력(P_{red}) 결정

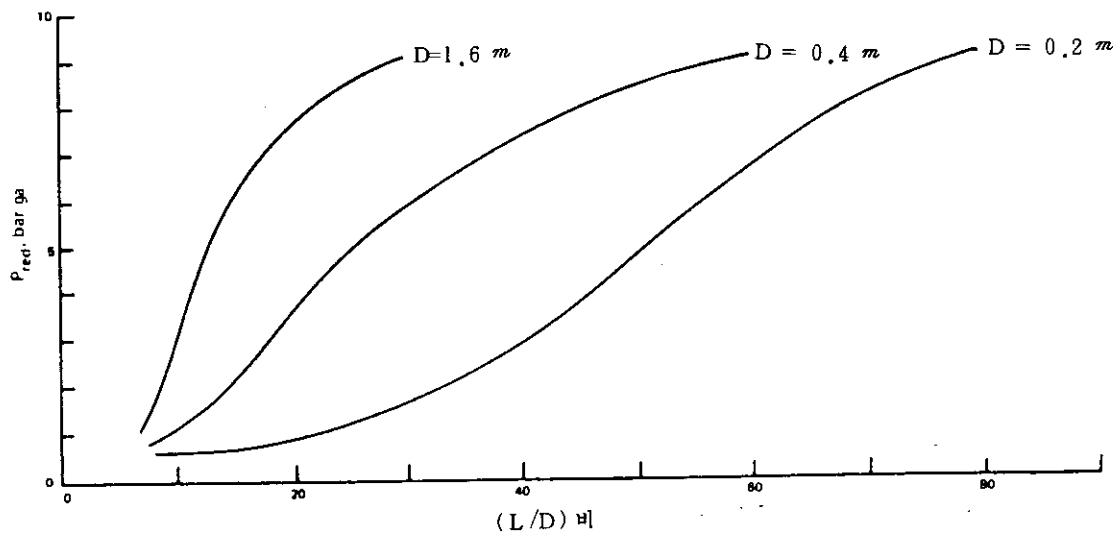
한쪽 끝이 밀폐되고 다른 끝에서 방산되는 굵지 않은 직선 파이프, 덕트 혹은 설비의 최대허용길이를 결정하는 데는 그림의 곡선을 이용할 수 있다. 만일 [그림 6-1]에서 나타난 것 보다 L/D 비가 더 크면 폭굉이 발생할 위험이 있다. 이 경우는 설비를 폭굉압에 견딜 수 있도록 설계하거나 방산구나 부가적으로 더 설치되어야 하며 또는 폭발억제장치등과 같은 장치를 설치하여야 한다. 그러나 등급 S_{1-1} 과 같은 분진은 L/D 의 비가 클지라도 폭굉을 일으킬 우려가 없어 예외로 한다.

(1) 초기속도(Initial Velocity)가 $2m/sec$ 이하가스

초기속도가 $2m/sec$ 이하인 가스/공기 혼합기가 폭발할 때 단지 한쪽 끝에서 방산되는 파이프, 덕트 혹은 설비에서 발생하는 압력을 추산하기 위하여 [그림 6-2]의 곡선이 이용된다. 이것은 프로판과 유사한 성질을 갖는 가스혼합기에 적용할 수 있으며, 여기서 나타난것 이외의 직경에 대해서는 내삽할 수 있다. 만일 발생된 압력이 용기의 내압강도를 초과할 경우에는 방산구를 부가하여 설치하여야 한다.



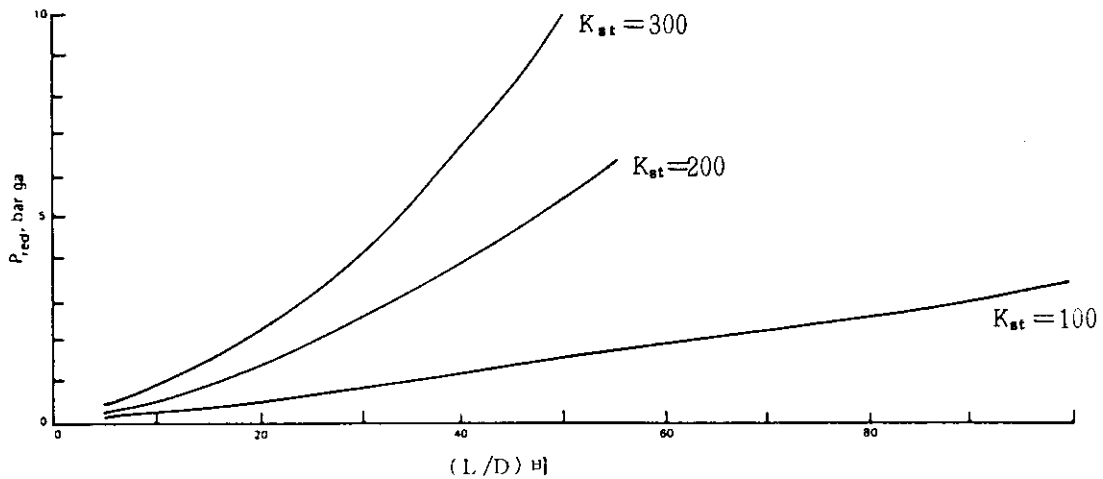
[그림 6 - 1] 길이대 직경 (L/D) 비에 따른 최대허용거리-직선인 파이프나 덕트



[그림 6 - 2] 프로판 / 공기 혼합기의 방산최대압력-한쪽 끝이 밀폐된 직선인 파이프나 덕트, 흐름속도 ; 2 m / sec 이하

(2) 초기속도 (Initial Velocity)가 $2m/sec$ 이하 - 분진

초기속도가 $2m/sec$ 이하인 분진 / 공기 혼합물이 착화되어 폭발할 때 단지 한쪽 끝에서 방산되는 파이프, 덕트 혹은 설비에서 발생하는 폭발압력을 추산하기 위하여 [그림 6 - 3]의 곡선이 이용된다. 만일 압력이 설비의 내압 강도를 초과할 경우에는 방산구를 부가하여 설치하여야 한다.



[그림 6 - 3] 분진 / 공기 혼합기 방산최대압력 - 한쪽 끝이 밀폐된 직선인 파이프나 덕트, 흐름속도 : $2 m / sec$ 이하

(3) 초기속도 (Initial Velocity)가 $2m/sec$ 초과

가연성혼합물이 초기에 $2m/sec$ 보다 더 빠른 속도로 흐를 경우 화염전파속도와 최대폭발압력이 크게 증가하게 된다. 결과적으로 단지 한쪽 끝에서 방산되는 파이프, 덕트 혹은 긴 설비는 폭풍에 견딜 수 있는 강도로 설계되거나 방산구를 부가적으로 더 설치하여야 하며 혹은 폭발억제장치등과 같은 장치를 설치하여야 한다. 등급 St - 1 분진에 대해서는 $10bar$ 에 견딜 수 있도록 설계된 시스템에서는 취급가능하다.

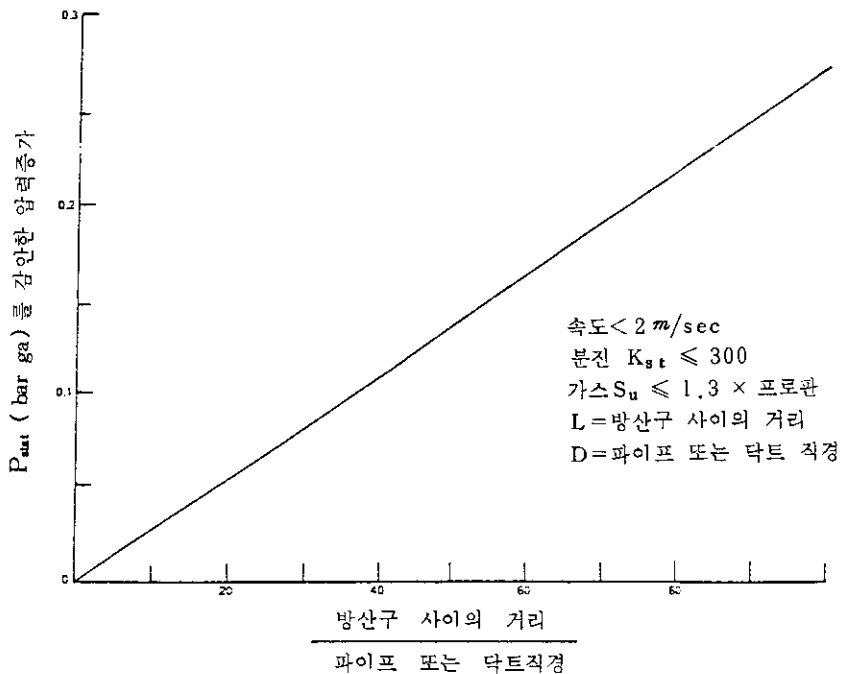
V. 두개 이상의 방산구 설치기준

(1) 방산구 사이의 최대거리

상기 [그림 6-1]은 방산구 사이의 최대허용거리를 결정하는 데 이용될 수 있다. 만일 이 거리를 초과할 경우에는 파이프, 닥트 혹은 긴설비는 폭굉에 견딜 수 있도록 설계되거나 폭발억제장치등과 같은 장치를 설치하여야 한다.

(2) 초기속도가 $2m/sec$ 이하

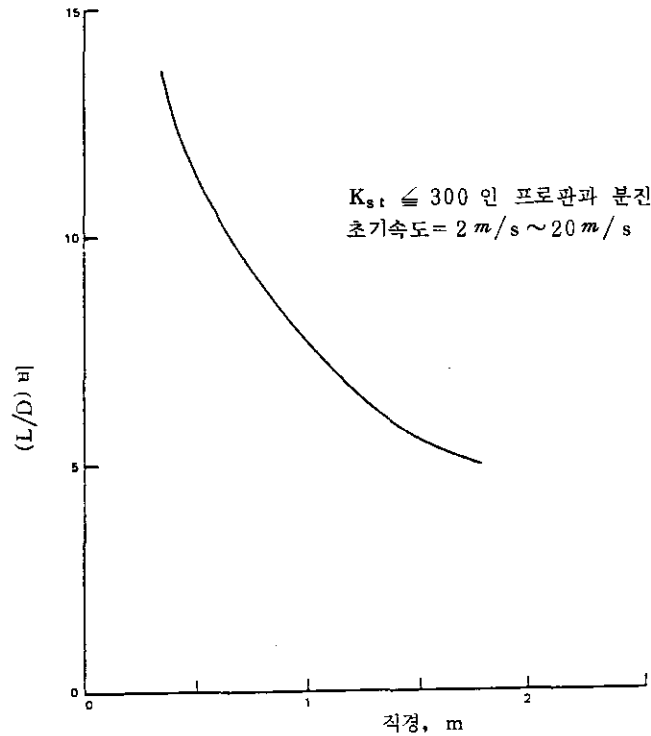
[그림 6-4]는 방산구가 한개 이상 설치될 때 파이프, 닥트 혹은 긴설비에서의 폭발에 의해 야기되는 압력의 증가를 추정하는데 이용될 수 있다. 이 그림은 $K_{st} \leq 300$ 인 분진과 프로판 연소속도의 1.3배 이하인 가스에 적용할 수 있다.



[그림 6-4] 두개 이상의 방산구 설치시 파이프 또는 닥트에서의 가스 혹은 분진의 방산최대압력

(3) 초기속도가 $2\text{ m/sec} \sim 20\text{ m/sec}$

방산최대압력 (P_{red}) 을 2.5 psig 이하로 제한하기 위하여 방산구 사이의 간격은 [그림 6-5]에 의해서 구할 수 있다. 이 그림은 $K_{st} \leq 300$ 인 분진과 프로판 연소속도의 1.3 배인 가스에 적용된다.



[그림 6-5] P_{red} 를 0.2 bar ga 이하로 제한시 요구되는 방산구 간격

(4) 기타 가스

상기 (2), (3) 은 프로판과 프로판 연소속도의 1.3 배 이하의 연소속도를 갖는 가스에 한하여 적용된다. 다음 식중 하나를 사용함으로써 데이터를 변환시킬 수 있다.

$$P_x = \left(\frac{S_u}{S_p} \right)^2 \cdot P_p \dots\dots\dots (7-1)$$

여기서 P_x : 가스에 대한 예측 압력

P_p : 프로판에 대한 예측 압력

S_u : 가스의 연소속도

S_p : 프로판의 연소속도

$$L_x = \frac{(S_u)^2}{(S_p)^2} L_p \dots\dots\dots (7-2)$$

여기서 L_x : 가스에 대한 방산구 사이의 거리

L_p : 프로판에 대한 방산구 사이의 거리

(5) 초기속도가 20 m/sec 초과하거나 $K_{st} > 300$ 인 분진 또는 프로판 연소속도의 1.3 배 이상인 연소속도를 갖는 가스

상기 조건이나 가스 및 분진에 대해서는 방산구를 1~2 m 마다 설치하거나 설비를 폭굉에 견딜 수 있는 강도로 설계하여야 하며 또는 폭발억제장치등과 같은 장치를 설치하여야 한다.

VII. 폭발압력방산구의 설치사례

1. 길이 20 m, 직경 2 m인 건조기(Dryer)에서 $K_{st} = 190$ 인 분진을 취급하고 있다. 이 건조기에서 한쪽 끝부위에 폭발압력방산구가 설치되어 있다면 폭발시 방산중에 발생하는 압력은 얼마인가?

(1) 최대허용길이를 검토한다.

[그림 6 - 1]에 의하면 길이대 직경(L/D)비가 약 25로서 이를 초과하면 폭굉이 일어날 수 있다. 그러나 이 건조기의 실제 L/D는 $20/2 = 10$ 이다. 따라서 한쪽 끝에서의 방산구 설치가 가능하다.

(2) 최대압력(Maximum Pressure)을 구한다.

[그림 6 - 3]에 의하면 이 분진폭발에 의해서 건조기내에 발생될 수 있는 최대압력은 약 0.5 bar ga이다.

2. 높이 40 m, 직경 0.4 m인 플레아 스택(Flare Stack)이 있다. 이 내부에서 프로판과 유사한 성질을 갖는 연료 / 공기 혼합물이 착화되어 발생되는 압력으로 부터 플레아 스택을 방호하기 위하여 설계압력을 얼마로 하여야겠는가?

(1) 최대허용길이를 검토한다.

[그림 6 - 1]로 부터 허용되는 길이대 직경 (L/D) 비는 28이다. 이 스택은 실제 L/D가 100으로서 폭굉에 견딜 수 있게 설계하거나 어떤 다른 방호수단에 의하여 방호되어야 한다.

3. 길이 100 m, 직경 1 m인 직선인 닥트(Duct)에 폭발압력방산구를 설치하여 방호하고자 한다. 닥트 내부에는 프로판과 유사한 성질을 갖는 탄화수소 / 공기 혼합기가 폭발범위를 형성하고 있다. 만일 (1) 내부 유속이 2m/sec 이하, 혹은 (2) 20 m/sec 이하일 때 폭발압력은 2.5psig(0.17 bar ga)로 제한하기 위해서는 방산구 간격을 얼마로 하여야 하는가? 양 경우에 방산구의 방산설정압력 (P_{stat})은 0.05 bar ga로 설계하고자 한다.

(1) [그림 6 - 4]로 부터 P_{stat} 를 감안 0.12 bar (0.17 - 0.05)로 폭발압력을 제한하기 위해서 방산구 간격은 대략 45 직경 (45 m) 이어야 한다. 그렇지만 [그림 6 - 1]에 의하면 이것은 최대허용길이가 대략 18 직경 (18 m) 이어야 한다. 따라서 이 경우에는 방산구의 거리가 18 m를 초과하여서는 안된다. 따라서 각 끝에 한개를 포함하여 7개의 방산구가 설치되어야 한다.

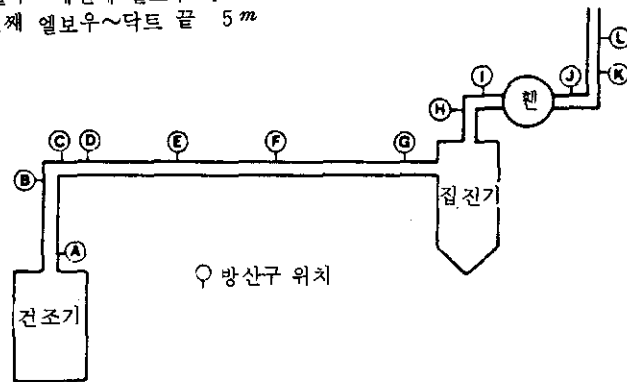
(2) [그림 6 - 5]로 부터 방산구는 7.6 m 이내 간격으로 설치되어야 한다. 이 요구에 일치되기 위하여 방산구가 각 끝에 한개씩 그리고 전 닥트에 13개의 방산구를 추가 설치하여야 한다.

4. 다음 [그림 6 - 6]과 같은 시스템에서 닥트에 대하여 폭발압력방산구를 설계하라. 시스템을 흐르는 가스량은 100 m³ / min이며, 모든 닥트의 직경

은 0.6 m 이다. 닥트와 장치에 있어서 최대허용압력은 0.2 bar ga 이며 시스템의 최대운전압력은 0.05 bar ga 이다. 시스템은 등급 S_1-2 분진을 취급하고 있다. 이 시스템에서 건조기와 집진기는 별도로 방산구가 설치된 것으로 가정한다.

닥트길이

건조기 출구~첫 엘보우 5 m
 첫 엘보우~집진기 20 m
 집진기~두번째 엘보우 1.5 m
 두번째 엘보우~팬 입구 1.5 m
 팬 출구~세번째 엘보우 1.5 m
 세번째 엘보우~닥트 끝 5 m



[그림 6 - 6] 건조 및 집진시스템의 방산구 설치모델

(1) 상기 Ⅲ, (3)과 Ⅲ, (5)에 제시된 바와 같이 다음 방산구가 요구된다.

1) A와 B는 상기 Ⅲ, (5)에서 요구되는 바와 같이 첫 엘보우의 윗스트림 (Upstream)에 각각 6과 3직경 위치에 설치되어야 한다. Ⅲ, (3)에 의하면 건조기를 나가는 닥트에서 한개의 방산구가 설치되어야 한다. 그러나 그것은 경우에 따라 설치되어야 한다. 닥트에서의 “A”는 첫 방해물의 윗스트림에서 6 직경 즉 건조기의 다운스트림 (Downstream) 에서 2.3 직경 위치이다.

2) C와 D는 첫 엘보우로부터 다운스트림에 각각 3과 6 직경의 거리에 설치된다.

3) G는 Ⅲ, (3)에서의 경우에 따른 것으로 집진기 입구의 윗스트림의 대

략 2 직경 위치에 설치된다.

4) H, I 그리고 J는 세개의 1.5 m 구간 중앙지점에 각기 설치된다. 이들 구간의 길이가 3 직경 보다 적기 때문이며 Ⅲ, (5)에 규정된 두 번째 방산구는 필요하지 않다.

5) 마지막 엘보 다음의 K와 L은 각각 3과 6 직경의 거리에 설치된다.

(2) 20 m 구간의 닥트에는 부가적인 방산이 요구된다. 유량 $100 \text{ m}^3 / \text{min}$ 은 유속으로 $6 \text{ m} / \text{sec}$ 이다. 따라서 [그림 6-5]가 이용되어야 한다. 이 그림에 의하면 방산구는 11 직경 혹은 대략 6.5 m 거리를 넘지 않는 간격으로 설치되어야 한다. 방산구 D와 G사이의 거리는 15.2 m이다. 따라서 두개의 부가되는 방산구 (E와 F)는 대략 같은 간격으로 설치되면 된다.

(3) 각 방산구 위치에서 방산구 면적은 적어도 닥트의 단면적과 같아야 한다. 이것은 P_{red} 에 대하여 0.2 bar ga의 값을 초래한 것이다. Ⅲ, (7)에 의해서 방산구의 방산설정압력 (P_{stat})는 P_{red} 의 1/2을 초과해서는 안된다. 따라서 0.1 bar ga를 초과해서는 안된다.

제 11 장 결 론

건조, 집진분리, 분체수송 및 저장설비는 화학공장 뿐만 아니라 각종 사업장에서 많이 사용되고 있는 설비로서 실태조사 결과에 의하면 건조설비의 경우 134개 사업장에서 690대, 이 중 위험물건조설비는 281대이며, 집진분리, 분체수송 및 저장 설비의 경우 22개 사업장에서 집진설비 112대, 사일로·빈 99대, 그리고 버킷엘리베이터 8대 등으로 많은 설비가 제작·설치 및 사용되고 있다. 그러나 이들 설비는 폭발·화재에 대한 위험성이 아주 높음에도 불구하고 폭발에 대한 방호측면에서의 대책이 아주 미흡한 실정이다.

건조설비의 경우 제정 산업안전기준에 관한 규칙 (1990.7.23 노동부령 제 61호) 제 304조에 위험물건조설비는 폭발구 즉, 폭발압력방산구를 설치하도록 규정되어 있으나 기 설치된 위험물건조설비에 방산구가 설치된 것은 0.4%로서 설치가 거의 전무한 실정이며, 오히려 법적 설치규정이 없는 집진분리, 분체수송 및 저장설비등 분진폭발의 위험이 있는 설비에는 각각 57.1%, 5.1% 및 37.5%가 설치되어 있다. 그러나 이들 설치된 설비의 경우에도 방산구의 설치상태가 적합하지 않아 오히려 피해를 확대시킬 우려가 높은 실정이다. 따라서 본 연구결과를 토대로 하여 다음과 같은 종합적대책을 수립하는것이 바람직할 것이다.

1. 산업안전기준에 관한 규칙에서 규정한 화학설비와 그 부속설비 중 다음 설비에는 폭발압력방산구의 설치규정을 규칙에 명시하여 의무화하는 것이 검토되어야 한다.

- (1) 호퍼, 사일로등 화학물질 저장 또는 계량설비
- (2) 가연성분진이나 가스가 발생되는 혼합기, 발포기등 화학제품 가공설비

- (3) 분쇄기, 분체분리기등 화학물질 취급장치
- (4) 건조기등 분체화학물질 분리장치
- (5) 사이클론, 백필터등 분진 처리설비

2. 화학설비와 그 부속설비에 속하지 않는 즉, 목재(木材), 곡물(穀物)류 등의 분체물질을 저장, 취급, 분리 또는 처리하는 상기 (1),(3),(4),(5) 및 버킷엘리베이터등 분체이송 설비에는 폭발압력방산구의 설치를 확대적용할 수 있는 법적규정의 개정을 검토하여야 한다.

3. 아울러 위험물건조설비가 아닌 비위험물건조설비라 할지라도 가연성분진등이 발생하는 건조설비는 폭발·화재의 위험이 높은 바 폭발압력방산구의 설치를 확대적용할 수 있는 법적규정등의 개정을 검토하여야 한다.

4. 상기 2의 설비는 폭발·화재에 대한 방호측면 외에 예방측면에서도 설계 및 설치단계에서 사전에 검토가 되어야 할 설비로서 가능한 유해·위험방지 사항에 관한 계획서 제출대상에 포함시켜 심사할 수 있는 법적규정의 개정을 검토하여야 한다.

5. 폭발압력방산구가 설치되어 있지 않거나 잘못 설치된 기존 설비에 대해서는 본 보고서의 설치기준을 근거로 하여 집중적인 기술지도를 실시하여 설비의 개선을 유도해 나가야 한다.

6. 또한 폭발압력방산구의 설치가 필요한 각종 설비에 대하여 이를 제작하는 제작업체에 대해서도 기술지도를 실시하여야 한다.

7. 버스팅 판넬(Bursting Pannels)등 국산화 개발 및 보급이 검토되어야 한다.

8. 집진분리, 분쇄, 분체수송 및 저장설비등 분진의 발생으로 인한 폭발·화재위험이 높은 설비등에 대해서는 예방대책 수립을 위한 종합적인 연구가 수행되어야 한다.

9. 분진폭발은 정전기(靜電氣)에 의한 폭발사고가 많은 바 집진설비의 백필타(Bag Filter) 및 버킷엘리베이터의 벨트(Belts)나 버킷(Buckets)등의 재질에 대한 점정실시 여부등을 검토하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 平野敏右, 가스爆發豫防技術, 海文堂, 東京, pp.73~144(1983)
2. 安全工學協會, 爆發, 海文堂, 東京, pp.290~300(1983)
3. 總合安全工學研究所, 火災・爆發危險性の測定法, 東京, pp.137~153(1977)
4. 榎本兵治, “粉じん爆發と爆發危險性評價について”, 粉體と工業, 20, 2(1988)
5. 日本化學會, 粉じん爆發と火災, 東京, pp.182~202(1981)
6. 中央勞働災害防止協會, 局所排氣・空氣清淨裝置の標準設計と保守管理(下), 東京, pp.41~43(1988)
7. 那須貴司, “爆發抑制裝置” 高壓ガス, 22, pp.16~34(1985)
8. I. Swift, “Protection Methods Against Dust Explosion” *Powd. & Bulk Engng.*, 1, pp.22~29(1987)
9. W. Bartknecht, “Preventive and Design Measures for Protection Against Dust Explosions”, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 958, pp.158~190(1987)
10. R. K. Eckhoff, “A Differentiated Approach to Sizing of Dust Explosion Vents” *ASTM Spec. Tech. Publ.* 958, pp.265~280(1987)
11. R. K. Eckhoff and K. Fuhre, “Dust Explosion Experiments in a Vented 236m³ Silo Cell”, *J. of Occup. Accid.*, 9, pp.161~175(1987)
12. A. Vogel, “Handling Explosion Dust—Part II”. *Powd. & Balle Engng.*, 1, 2, pp.8~12(1987)
13. R. K. Echhoff and K. Fuhre “Dust Explosion Experiment in a 500m³ Silo Cell”, *J. of Occup. Accid.* 6, pp.229~240(1984)
14. 中央勞働災害防止協會, 粉じん爆發の防止對策, pp.66~79(1989)
15. 北川徹三, 爆發災害の解析, 日刊工業新聞社, pp.23~48(1971)
16. 田口昇, 松井英憲, “爆壓放散孔に關ず研究(第一報)—熱風流動式箱型乾燥機に對

する應用について” 産業安全研究所報告書(1970)

17. 青木隆一, “粉粒體貯槽の安全”, 化學工學, 49, pp.540-549(1985)
18. 田口昇, 鶴見平三郎, “爆壓放散孔に關する研究(第二報)―箱型集じん機に對する應用について”. 産業安全研究所報告書(1970)
19. National Fire Protection Association, “NFPA 68 Guide for Venting Deflagrations” National Fire Code Vol. 9, (1990)
20. K. L. Cashdollar and M. Mertzberg, Industrial Dust Explosion, pp.276-284(1986)
21. Machine Safety Section of The ISSA, “Rules for Dust Explosion Protection for Machines & Equipment”, pp.17-25(1987)
22. K. N. Palmer, “Dust Explosions : Initiation, Characteristics and Protection” 86, pp.24-32(1990)
23. H. R. Maiser, “Gaseous and Dust Explosion Venting, Part 1” Chem. & Process Engng., 46, pp.527-535(1965)
24. H. R. Maiser, “Gaseous and Dust Explosion Venting, Part 2” Chem. & Process Engng., 46, pp.662-678(1965)
25. B. T. Harrison, “Preventing Dust Explosions—A Case History”, Chem. in Brit., 22, pp.647-50(1986)
26. R. Siwek, “Dust Explosion Venting for Dusts Pneumatically Conveyed into Vessels”, Plant / Oper. Prog., 8, pp.129-140(1989)
27. A. G. Alekseev, “The Explosion Risk of Metal Powders”, Staub. Reianhad Luft., 50, pp.245-250(1990)
28. R. E. Bruderer, “Design Example ; Explosion Protection Selected for A Spray Drying Installation”, Plant Oper. Prog., 6, pp.141-146(1989)
29. I. Swiff, “Designing Explosion Vents” Chem. Eng.(N, Y), 95, pp.65-68(1988)
30. G. Lunn, “Venting Requirements for Weak Dust-Handling Equipment” Chem.

- Eng. 456, pp.18~21(1989)
31. G. Butters, "Dust Explosion Prevention and Protection in the Plastic Industry"
Plast. Rubber Process, 5, pp.27~33(1985)
 32. P. Field, "Dust Explosion Protection", J. of Hazard. Mater., 8, pp.223~238(1984)
 33. R. K. Eckhoff and K. Fuhre, "Venting of Turbulent Gas Explosion in a 50m³
Chamber" Fire Safty J., 2, pp.191~197(1984)
 34. I. Swift, "Venting Deflagrations—Theory and Practice", Plant / Oper. Prog., 3,
pp.89~93(1984)
 35. S. Crescitelli, "Analysis and Design of Venting Systems", J. of Occup. Accid., 2,
pp.125~133(1979)
 36. V. Tafano, "The Design of Venting Systems Against Gaseous Explosion", J. of
Occup. Accid., 3, pp.143~152(1981)
 37. D. J. Rasbash and Z. W. Rogowski, "Gaseous Explosion in Vented Ducts",
Combust. Flame, 4, pp.301~312(1960)
 38. S. I. Nomura, "Theretical Study of Relief Venting of Dust Explosion", J. Chem.
Engng., 13, pp.309~413(1980)
 39. P. Canu, "Vented Gas Deflagration", Comb. & Flame, 80, pp.49~64(1990)
 40. M. G. Cooper, "On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosion",
Comb. & Flame, 65, pp.1~14(1986)
 41. R. K. Eckhoff, "Sizing Dust Explosion Vents", Bulk Solids Mand., 6, pp.913~919
(1986)
 42. L. L. Simpson, "Equations for the VDI and Bartknecht Nomograms" Bulk Solids
Hand., 8, pp.634~642(1988)
 43. G. A. Lunn, "Safty of Powder Handling Systems ; Review and Detailed Discus-
sion of Venting", Inst, Chem. Eng. Symp. Ser., 1, pp.233~256(1989)

44. A. J. Harrison and J. A. Eyre, "External Explosions as a Result of Explosion Venting", Comb. Sci. Technol., 25, pp.91~106(1987)
45. G. A. Lunn, "The Venting of Dust Explosions in a Dust Collector" J. of Hazard. Mater., 12, pp.87~107(1985)
46. J. F. Naporano, "Shredding System Improvement to Suppress Explosions", U.S. Pat. 3972481(1976)

폭발압력방산구에 의한 폭발·화재방호대책에 관한 연구
(화 학 91 - 081 - 14)

발행일 : 1991. 12

발행인 : 원 장 金 元 甲

연구자 : 책임연구원 鄭 板 石

발행처 : 한국산업안전공단
산업안전보건연구원
화학연구실

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34-4

전 화 : (032) 518-6484/6

(인쇄) 학림사 267-3676, 273-4175 (비매품)