



화학사고 사례연구

카본블랙 제조공정

반응기 화재사고



목 차 Contents

화학사고 사례연구 

I. 사고개요	4
II. 사업장 현황	5
III. 사고분석	11
IV. 사고발생 원인	16
V. 동종사고 예방대책	17
VI. 사고로부터 얻은 교훈	19
VII. 유사 사고사례	20
VIII. 참고자료	21

용어설명



01 카본블랙(Carbon Black)

- 탄화수소를 불완전 연소 또는 열분해 시켜 얻는 미세한 분말형태의 물질로써 90 ~ 99 %의 탄소로 구성되어 있으며, 나머지는 수소와 산소 등으로 이루어져 있다. 타이어 등 고무의 탄성을 강화하는 강화제와 착색제로 사용된다. 이외에도 잉크, 페인트 전도성 물체 등 다양한 용도로 사용되는 물질이다.

02 FCC(Fluid Catalytic Cracking) Oil

- 정유공장의 고도화 공정에서 남은 고점도 잔사유에 해당되는 물질이다.

03 반응공정

- 반응로에 원료와 공기 및 산소를 공급하여 연소시키는 공정으로, 원료는 불완전 연소, 열분해 또는 탈수소 반응을 일으켜 카본블랙을 포함한 혼합가스를 생성한다.



04 포집공정

- 카본블랙과 혼합가스가 혼재된 상태의 스모크(Smoke)는 여러 원통형 격실 내의 유리섬유 여과 포를 통해 카본블랙과 저발열량 폐가스로 분리되며, 분리된 폐가스는 열병합 발전소와 건조공정에서 연료 가스로 이용된다.

05 분쇄 및 펠릿(Pellet)공정

- 분말형태 카본블랙은 로터리 밸브(Rotary Valve) 및 공기 이송장치를 통해 분쇄기로 이송되어 원하는 크기로 분쇄된다. 분쇄된 카본블랙은 밀도화 작업을 위해 물과 함께 일정 비율로 펠릿(Pellet) 제조기로 공급되어 펠릿형태로 제조된다.

06 건조 및 분리공정

- 40 ~ 55 % 정도의 수분을 함유한 펠릿의 수분을 1 % 이하로 감소시키기 위하여 회전식 드럼 건조기 내에서 연료유와 폐가스를 연소시켜 가열 및 건조한다. 건조기를 통과한 펠릿은 스크류 컨베이어(Screw Conveyor), 버킷 엘리베이터(Bucket Elevator) 등에 의해 입자분리장치로 이송된다.

07 저장 및 포장공정

- 입자분리장치를 통과한 펠릿은 스크류 컨베이어, 버킷 엘리베이터 등에 의해 제품 저장조로 이송된다.

I. 사고개요



2018년 1월 17일(수) ○○사의 카본블랙 제조공정에서 공정 Trouble이 발생하여 비상가동 정지 절차 수행 중, 공기에열기로부터 발생하는 고온 공기(Hot Air)를 반응기로 공급하는 배관(700 mm)에서 반응기 내 미반응 원료(FCC Oil)의 유증기로 인한 화재가 발생하였다.



[사진 1] 화재 발생 카본블랙 제조공정 전경

1) 인명피해

- 없음

2) 물적피해

- 고온 공기(Hot Air) 공급 배관(700 mm, 재질-SUS310S) 및 주변 설비의 화재로 인한 소손(소방서 추산 약 1천 만원)

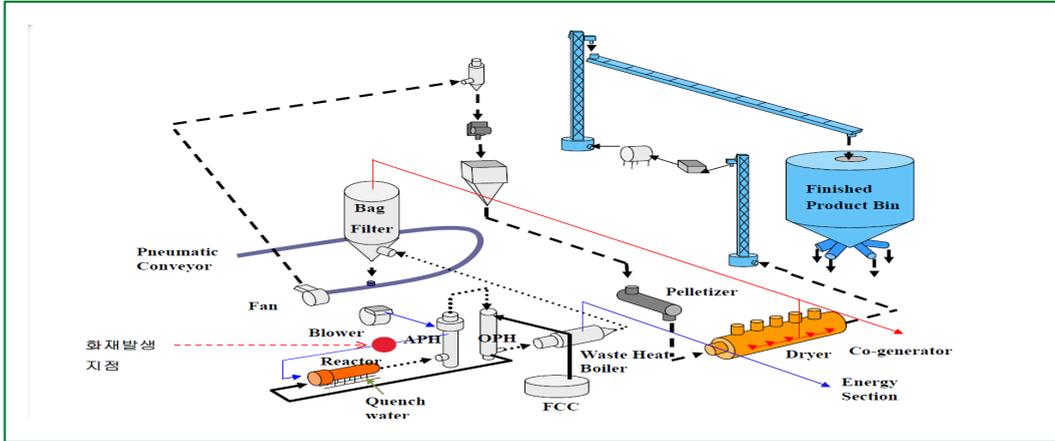
II. 사업장 현황

1976년 콜타르 공정 가동을 시작으로 현재 피치, 나프탈렌, 카본블랙, 무수프탈산, 가소제 및 폴리에틸렌 제품을 생산하고 있으며, 본 사고 공정인 카본블랙 제조공정은 1981년 상업운전을 시작하여 현재 연 생산 17만 톤(ton) 규모로 가동되고 있다.

01 시설현황

1) 카본블랙 제조공정

- 카본블랙은 FCC O일 주원료로 하여 반응공정의 반응로에 원료와 공기를 공급하여 연소반응을 거치는데, 원료는 불완전 연소, 열분해 또는 탈수소 반응을 일으켜 카본블랙을 포함한 혼합가스(이하 '스모크')를 생성한다. 생성된 스모크는 포집공정으로 투입되어 여러 격실 내의 유리섬유 여과포를 통해 카본블랙과 저발열량 폐가스로 분리된다.
- 이 과정에서 분리된 폐가스는 열병합 발전소와 건조공정에서 연료 가스로 이용되고, 분말형태 카본블랙(이하 '루스블랙')은 로터리 밸브(Rotary Valve) 및 공기 이송장치를 통해 분쇄기로 이송되어 원하는 크기로 분쇄된다.
- 루스블랙은 밀도화 작업을 위해 물과 일정 비율로 펠릿 제조기로 공급되어 펠릿 형태로 제조되고, 40 ~ 55 % 정도인 펠릿의 수분함유량을 1 % 이하로 감소시키기 위해 폐가스 등을 연소시켜 회전식 드럼 건조기 내에서 가열 및 건조시킨다. 이후, 건조기를 통과한 펠릿을 입자분리장치를 거쳐 스크류 컨베이어, 버킷 엘리베이터 등을 통해 제품 저장조로 옮긴 후 출하한다.



[그림 1] 카본블랙 제조공정 개략도

※ APH : Air Pre-heater(공기 예열기), OPH : Oil Pre-heater(연료 예열기)

02 사고 발생 물질

1) FCC(Fluid Catalytic Cracking) Oil

구성 성분	CAS No.	함유량	인화점	증기압	발화점
Catalytic Cracked Oil	64741-62-4	>90 %	76 °C 이상 (개방컵)	>5 hPa (at 20 °C)	260 °C 이상
방향족 탄화수소	70955-17-8	>3 %			
Sulfur	7704-34-9	<2.8 %			

※ 경고표지 그림문자 ※



발암성 물질



피부·눈·호흡기계 자극성
경고



부식성 물질 경고



수생환경유해성

03 사고 발생 설비

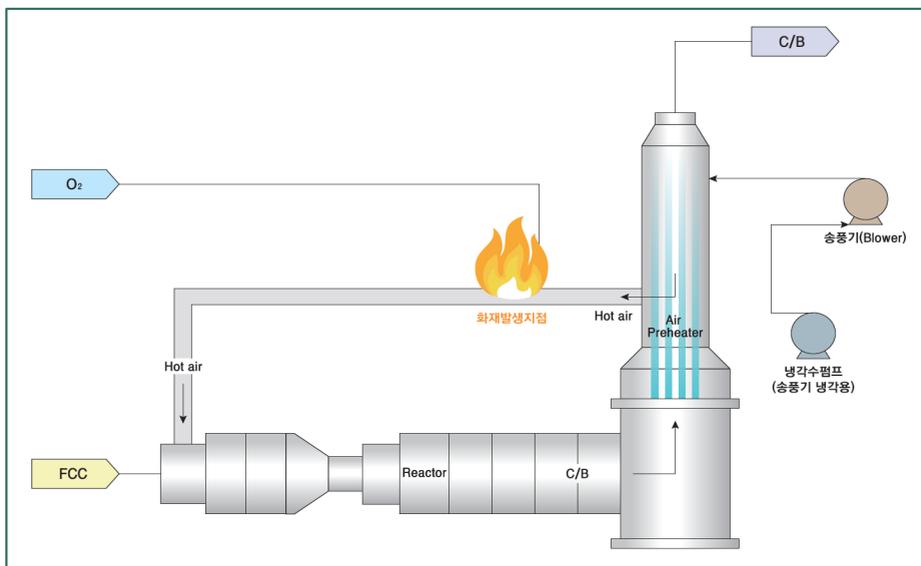
1) 반응기 내 고온 공기(Hot Air) 투입 배관

설비명	재 질	제작/설치	직경(Diameter)	두께(Thickness)
고온 공기 (Hot Air) 배관	SUS 310S*	2011년	700 mm	10 mm
공기에열기	SS 400	2011년	비공개	
반응기	SUS 304S(Top) SUS 310S (Middle, Bottom)	2011년		

* SUS 310S 물리적 성질

- 밀도 : 7.89 g/cm³
- 열전도도 : 10.8 W/m·K[at 100 °C]
- 용융점 : 1,354 ~ 1,402 °C

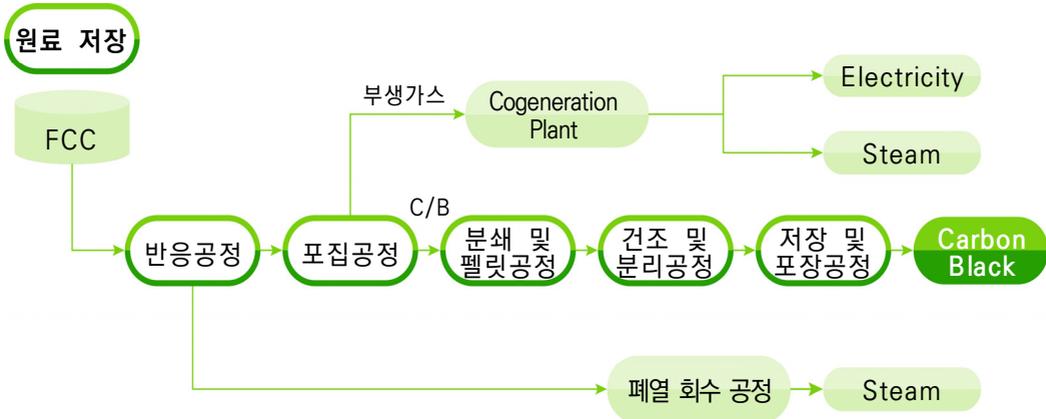
※ 출처: 샌드마이어서 자료(미국 스테인레스 스틸 전문 생산업체, www.sandmeyersteel.com)



[그림 2] 카본블랙 사고 발생 반응기 Section 개략도

04 공정

1) 카본블랙 제조공정 블록 다이어그램(Block Diagram)



[그림 3] 카본블랙 제조공정 블록 다이어그램

2) 카본블랙 제조공정 설명

• 반응공정

반응로는 산화알루미늄이 주성분인 내화물로 내장되어 있는 철제 원통형 용기로서, 원료와 과량의 공기를 공급하여 내부 연소구간에서 원료를 연소시킨다. 원료가 완전히 연소되어 희망온도까지 도달하는 시점에서 원료유(FCC Oil)를 주입하면, 원료의 일부는 불완전 연소, 일부는 열분해 또는 탈수소 반응을 일으켜 카본블랙이 생성된다.



이 때, 카본블랙 생산량 및 품질 증대를 위하여 일정량의 고농도 산소를 공기와 함께 투입하게 된다. 반응로 내의 불완전 연소반응에 의해, 카본블랙과 혼합가스 등이 생성된다. 카본블랙을 포함한 혼합가스, 즉 스모크는 반응로 후미에서 물을 분사하여 냉각되면서 카본블랙 생성반응은 여기서 완전히 종료된다.

냉각된 스모크는 반응로를 벗어난 후 열교환기(APH, OPH)를 통과하면서 공정용 공기와 원료유에 다량의 열을 전달하고 600 °C 이하로 온도가 낮아진다. 이 후, 스모크 헤더(Smoke Header)를 거쳐 스모크가 갖고 있는 열량(폐열)을 이용해서 스팀을 만들어 내는 장치(스팀 발생기)를 통과 후 포집공정으로 이동된다.



● 포집공정

스모크로부터 카본블랙을 분리하는 공정이다. 이 공정은 '1차 포집기'라고 하는 여러 개의 원통형 격실로 구성된 장치 내에서 수행된다. 격실엔 유리섬유로 제작된 여과포가 플레이트 상단에 수직으로 설치되어 있으며, 격실 바로 밑에는 원추형의 호퍼(Hopper) 부분이 있어 분리된 카본블랙을 수용한다. 사이클론(Cyclone) 응집기에서 스모크 헤더를 통해 호퍼 상단으로 들어온 스모크는 셀 플레이트의 틈블에 끼워진 필터 백(Filter Bag)의 안쪽으로 들어가서 카본블랙을 남겨 놓고, 혼합 가스는 유리섬유 조직 사이를 빠져 나온다.

혼합 가스는 스팀(30 ~ 50 %), 질소(33 ~ 45 %), 이산화탄소(2 %), 수소(8 ~ 12 %), 일산화탄소(8 ~ 12 %) 등을 포함한 저발열량 폐가스로 팬(Fan)에 의해 열병합 설비로 이송되어 자가 발전소의 보일러 연료 등으로 이용된다. 필터 백에 부착된 카본블랙은 호퍼로 떨어뜨려 포집한다.

● 분쇄 및 펠릿공정

호퍼 속의 카본블랙은 로터리 밸브, 공기 이송장치를 통해 분쇄공정으로 이송되어 원하는 크기로 분쇄된다. 분쇄기를 통과한 카본블랙은 백필터로 이송되어 카본블랙과 혼합 가스가 분리된다.

백필터에서 분리된 카본블랙은 백필터 하부 스크류 컨베이어 및 공기 이송장치에 의해 조립 건물 상부에 설치된 사이클론으로 이송된다. 서지빈(Surge Bin) 사이클론에서 분리된 분말 형태의 카본블랙인 '루스블랙'은 사이클론 하단의 로터리 밸브를 통해 바로 밑에 위치한 서지빈에 임시 저장된다.

루스블랙 자체를 수요자에게 공급할 경우 고무와의 혼합효율 저하, 분진발생에 의한 작업 환경 오염 및 제품손실, 낮은 가비중(假比重)으로 인한 수송 용기의 대형화 등 비경제적인 요소가 발생하기 때문에 밀도화시키는 작업, 즉 펠릿공정을 거친다.

서지빈의 루스블랙을 스크류 컨베이어를 통해 이송하면서 물과 일정한 비율로 혼합한 상태로 펠릿 제조기로 공급하여 펠릿을 제조한다. 펠릿 제조기는 수평원통형의 철제용기로 내부에는 스테인레스강으로 제조된 핀이 나선형을 이루며 수직으로 부착되어 있는 회전축이 들어 있다.

● 건조 및 분리공정

제조된 펠릿은 수분함유량이 40 ~ 55 % 정도이며, 고무공업에서 원부 재료로 사용되기 위해선 1 % 이하로 수분을 감소시켜야 한다. 이 작업은 연료유와 폐가스를 연소시켜 가열하는 회전식 드럼 건조기 내에서 수행되며, 드럼 내부로 펠릿이 주입되어 나선형으로 배열된 전열핀에 의해 통과하는 형태의 건조 시설이다.

건조기를 통과한 펠릿은 2차 포집기를 통해 스크류 컨베이어, 버킷 엘리베이터 등에 의해 입자분리 장치로 이송되어 분리된다. 2차 포집기는 크기는 작지만 포집공정의 1차 포집기와 같은 구조이다.

- **저장 및 포장공정**

입자분리장치를 통과한 펠릿은 버킷 엘리베이터, 스크류 컨베이어 등에 의해 제품 저장조로 운송 된다. 제품은 20 kg씩 지대에 포장하여 출하하거나, Bulk트럭에 적재하여 수요자에게 공급하고, 일부는 Semi-Bulk로 포장 출하한다.

제품 저장조 하부에는 Bulk트럭이 출입할 수 있으며, 제품을 Bulk트럭에 직접 적재 가능하도록 밸브 및 노즐(Nozzle)이 설치되어 있다.



III. 사고분석



01 사고 발생 과정

1) 발생 경과

일 시	작업 현황
1/17(수) 13:21	• 송풍기 냉각용 냉각수 펌프가 정지되면서 연료유 펌프가 정지되어 제조 공정 진행중단
13:26	• 송풍기 온도 상승으로 가동중지와 동시에 카본블랙 공정 비상가동정지 작업 시작
13:29	• 산소 공급 유량조절밸브(Flow Control Valve) 차단(조정실에서 원격 차단)
13:40	• 현장 근무자가 공기에열기 고온 공기 공급 배관 화재 발생 목격 및 보고 후, 공장 비상 방송 및 자체 소방대 출동
13:42	• 관할 소방서 신고
13:43	• 산소생산설비 가동중단(완벽한 산소 차단을 위한 추가 조치)
13:50	• 관할 소방서 도착
14:10	• 1차 진화 완료
14:30	• 최종 진화 완료

02 사고 원인 분석

1) 가연성 물질

✓ 반응기 내부에 잔존해 있던 미반응 가연성 물질(FCC Oil)의 유증기 발생에 따른 역류

- 공정 비상가동 정지에 따라 반응기 내 원료유(FCC Oil) 차단은 완료하였지만 송풍기 가동중지에 따라 반응기 내 미반응 가연성물질인 FCC Oil 및 증기 일부가 잔류하였다.

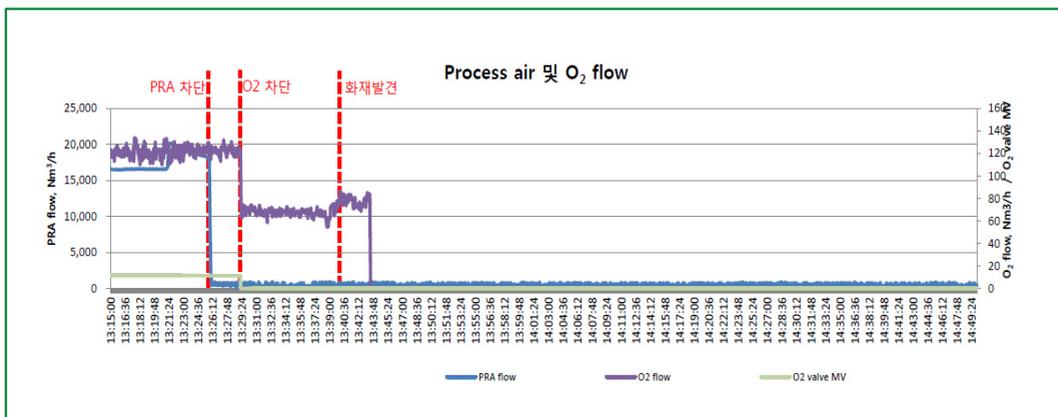
이 중 탄화수소(Hydrocarbon)류의 유증기가 높은 온도 분위기(반응기 정상운전 시 온도는 약 1,200 °C 이상)의 공기에열기 출구라인(Outlet)으로 역류하였을 것으로 추정된다.

2) 산소 공급원

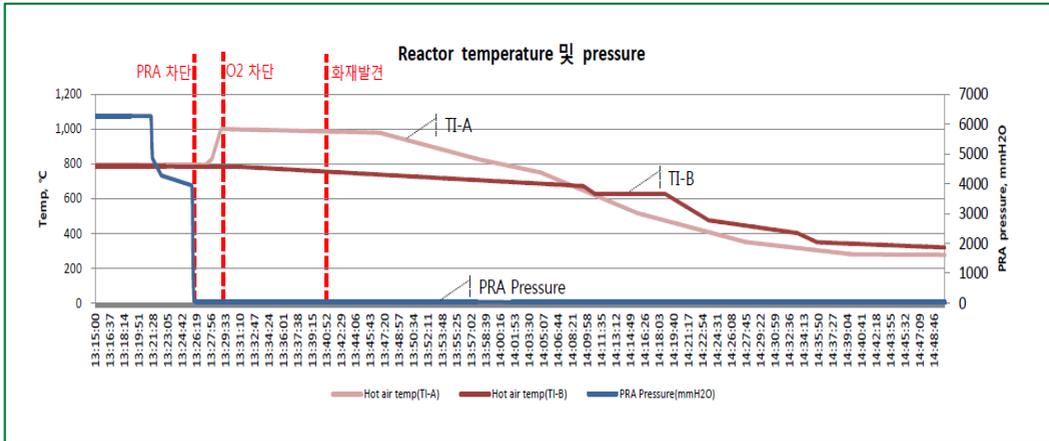
✓ 유량조절밸브(Flow Control Valve)의 작동 불량(Passing)에 따른 고농도산소 공급

- 카본블랙 생산량 및 품질 증대를 위하여 정상 운전 시 연소용 공기에 일정량(약 120 Nm³/hr)의 고농도 산소(순도 약 98 %)를 연속적으로 공급하여 적정 산소농도를 제어하며 운전 하던 중, 연소용 공기 송풍기 가동중지에 따른 공정 비상가동정지 절차로 산소 공급 유량조절밸브(Flow Control Valve)를 제어실 운전원(Board man)이 원격(수동) 차단하였다.

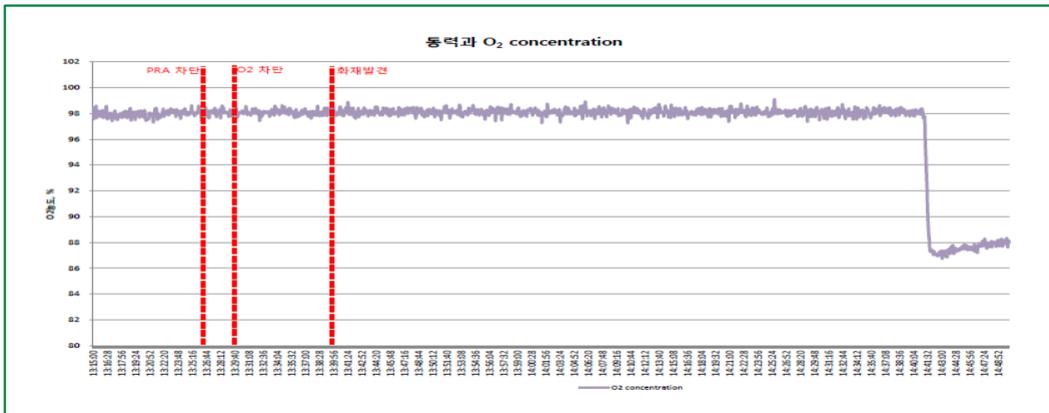
그러나 사고 조사 시 현장 확인 결과 유량조절밸브가 완전히 닫히지 못하고 작동 불량(Passing)으로 인하여 공정 내부로 고농도 산소가 계속해서 공급(약 60 Nm³/hr) 되고 있었다.



[그림 4] 연소용 공기 및 산소 유량 추세(Trend)



[그림 5] 연소용 공기 온도 및 압력 추세(Trend)



[그림 6] 산소 농도 추세(Trend) - 정상운전(Normal Operation, 약 98%)

3) 점화원

✓ 발화점 이상의 운전 조건

- FCC O₂의 발화점은 260 °C로써, 화재 발생 당시 고온 공기 공급 배관 내 공정운전 온도는 약 800 °C로 고온의 열에 의한 발화로 추정된다.
- ※ 산소공급이 차단될 경우 공정내부는 최소산소요구량(MIC) 이하에 해당되는 산소 부족상태가 되어 연소되지 않음

4) 결론

연소용 공기 송풍기 작동 중지에 따른 비상기동정지 절차 수행 중 산소 차단 실패로 발화점 이상의 운전조건에서 원료유(FCC Oil)의 유증기가 고온의 열에 의하여 발화되면서 국부 화재가 발생하였고, 이 화재로 인하여 국부가열된 고온 공기 공급 배관의 용융점(Melting Point, 1,354 ~ 1,402℃)을 상회하면서 배관이 파손되었다.

※ 사고 현장 확인결과 배관 용융절단 지점은 산소 공급배관이 연결된 분기점(Tie Point)에 인접한 위치임

※ 학계의 연구결과에 따르면 고점도의 탄화수소류가 완전연소 할 경우 단열화염 온도는 2,200 ℃ 이상 상승할 수 있음

• 탄화수소류의 단열불꽃 온도 관련 참고자료

탄화수소류의 단열불꽃온도에 대한 열역학적 연구에 의하면 벙커-C유에 이론양론비 대비 10% 과량의 공기로 연소시켰을 경우 단열불꽃 온도는 2,500 K(2,227 ℃)까지 상승할 수 있다.

따라서 벙커-C유와 유사한 성질을 가진 FCC 잔사유의 단열불꽃 온도도 2,000 ℃ 이상 상승했을 것으로 추정되며, 이는 배관(STS310S)의 용융온도 약 1,400 ℃를 상당히 상회하는 온도이다.

※ 출처 : Thermodynamical Analysis of Composition and Adiabatic Flame Temperature of Combustion Gas of Bunker-C Fuel(J.of Kor.Soc.Env.Engs. Vol.8.No.2.1986)



■ 사고근본원인분석(RCA : Root Cause Analysis)

- 사고 발생에 대한 직·간접 원인 등을 종합하면 FCC Oil의 물질 특성에 대한 검토 불충분, 주요 컨트롤 밸브(Control Valve) 건전성 미유지, 공정 위험성평가 시 송풍기 작동 중지예 따른 역류 및 송풍기 작동 중지 인터록(Interlock) 설정 범위 검토 부적정 등으로 인하여 사고가 발생한 것으로 추정된다.

단계	사고원인 1	사고원인 2	사고원인 3
1. 결함내용 분류	물질결함	기능유지결함	기술결함
2. 관련 조직	생산팀	정비팀	생산팀 및 정비팀
3. 결함 종류	설계	정비계획	설계
4. 결함 대분류	설계검토	작업절차서	위험성평가
5. 결함 중분류	설계검토 부적절	작업절차서 부적절	인터록 설정 부적절
6. 결함 소분류	<ul style="list-style-type: none"> • FCC Oil 발화에 대한 충분한 검토 미실시 • 고농도 산소 투입에 따른 FCC Oil 위험성 증대 미검토 	<ul style="list-style-type: none"> • 산소 공급 유량조절밸브(Control Valve) 주기적인 예방정비 미실시로 건전성 유지 실패 • 주요 밸브 건전성 유지 실패 시 수동밸브의 비상차단 절차 미준수 	<ul style="list-style-type: none"> • 송풍기 냉각설비의 냉각수 Stand-By Pump의 자동 기동 운전 실패 • 송풍기 정지 관련 인터록 설정 부적절 • 송풍기 정지관련 인터록 설비의 다중화 미실시

IV. 사고발생 원인

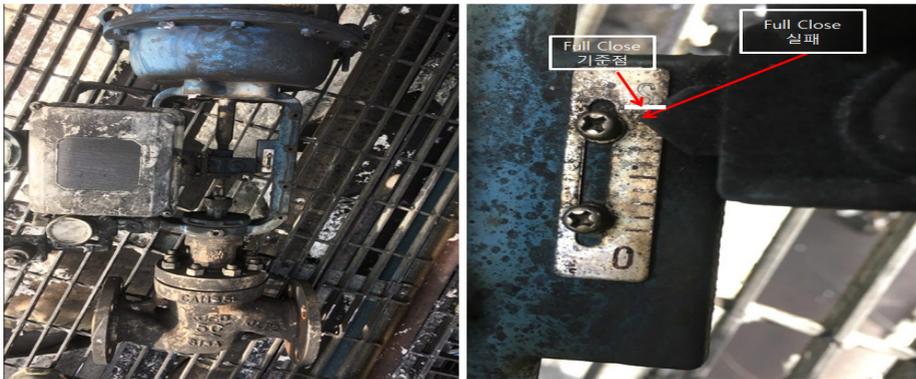


원인 1 / 산소 공급 자동차단밸브(Shut Off Valve) 미작동

- 연소용 공기 송풍기 유량계와 연동된 산소 공급 자동차단밸브(Shut Off Valve)의 인터록 설정치가 정상운전(약 15,000 Nm³/hr) 조건 대비 과도하게 낮게 설정(약 50 Nm³/hr)되어 있어 비정상조건의 감지에 실패하여 공기 유량계와 산소 공급 자동차단밸브의 인터록이 작동되지 않았다.

원인 2 / 산소 공급 유량조절밸브(Flow Control Valve) 작동 불량

- 비상운전절차에 따라 산소 공급 유량조절밸브를 원격(수동) 차단하였으나, 밸브 작동 불량(Passing)으로 인해 완벽한 차단에 실패하여 약 14분 동안 일정량의 산소가 공급(약 60 Nm³/hr)되었다.



[사진 2] 산소 공급 유량조절밸브 작동 불량 상태를 확인할 수 있는 Stroke Gauge 상태

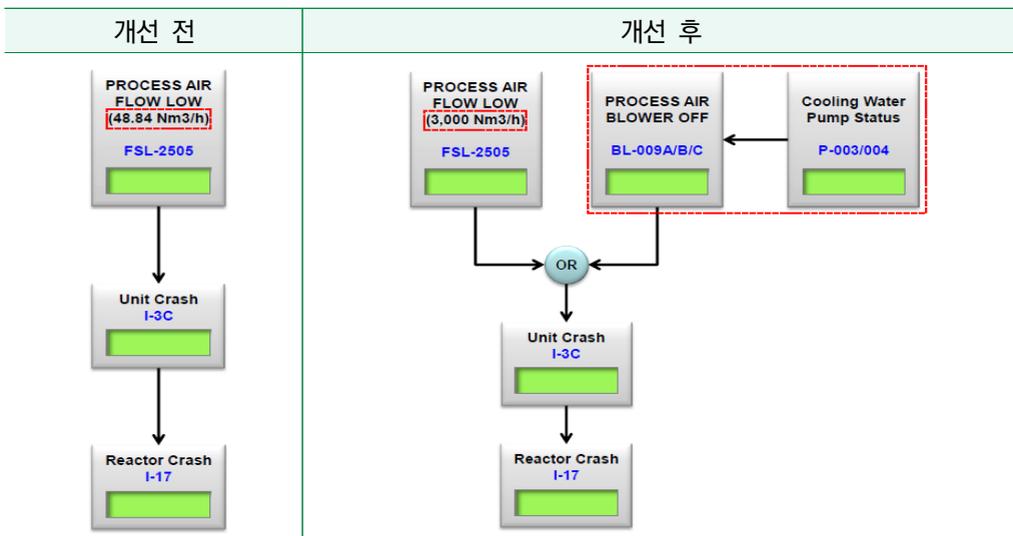
원인 3 / 산소 공급 배관 비상 차단 미실시

- 산소 공급 자동차단밸브 및 유량조절밸브의 작동 불량 또는 인터록 미작동 시 즉시 비상차단밸브를 제어실에서 수동 차단할 수 있도록 비상운전절차를 규정하는 것이 바람직하나, 사고 당시 규정되어있지 않아 수동 차단에 실패함으로써 화재가 발생하였다.

V. 동종사고 예방대책

대책 1 / 비상가동 정지 시 완벽한 산소 차단 이행

- 산소 공급 차단밸브 인터록 조건 변경
 - 연소용 공기 공급 송풍기 인터록 설정값인 최소 유량 감지 설정값을 약 50 Nm³/hr에서 3,000 Nm³/hr 이상으로 변경하는 등 송풍기의 정상운전 범위 이탈 시 조기 공정 비상정지 절차 등을 수행할 수 있도록 조치하여야 한다.
 - 또한, 송풍기 유량 경보(Alarm)를 설정하여 경보 발령 시 신속한 조치를 취할 수 있는 운전절차를 마련하여야 한다.
- 확실한 산소 공급 차단밸브 작동을 위한 인터록 추가
 - 산소 공급을 확실하게 차단하기 위하여 송풍기 인터록 설정치를 유량뿐만 아니라 송풍기 전원 차단 및 송풍기 냉각용 냉각수 순환펌프 전원 차단 등 비정상 조건에도 산소 공급 차단밸브가 작동할 수 있도록 인터록을 추가로 구성하여야 한다.



[그림 7] 개선 전/후 인터록 시스템



대책 2 / 산소 공급 유량조절밸브작동 건전성 유지

- 본 사고에서와 같이 중대산업사고로 이어질 수 있는 주요 컨트롤 밸브에 대해서는 설비 중요도 등급을 보다 상향 조정하여 점검 및 정비 주기를 단축하고, 주기적인 공정 대정비(Turn Around) 시 주요 조절밸브(Control Valve)에 대한 인터록 테스트 및 스트로크(Stroke) 테스트를 실시하여 작동 건전성을 상시 유지할 수 있도록 하여야 한다.



대책 3 / 비상운전절차 보완 및 교육 실시

- 안전운전계획 지침 내 비상운전절차에 산소 비상차단밸브를 비상 시 제어실에서 긴급 수동 정지할 수 있도록 관련 절차를 추가하고, 규정 개정에 따른 관련 근로자들의 교육 및 훈련을 실시하여야 한다.

Ⅵ. 사고로부터 얻은 교훈



카본블랙 제조공정 반응기 화재사고로부터 얻은 교훈은 다음과 같다.

교훈 1 / 밸브는 썰 수 있다. 철저한 차단이 필요하다.

- 장치산업에서는 수많은 종류의 밸브들이 존재하고 모든 밸브들에 대해서는 ‘썰 수 있다’는 전제하에 주기적인 예방점검 및 예방정비를 통하여 건전성을 유지하여야 한다.

교훈 2 / 사고사례를 바탕으로 인터록의 다중화가 필요하다.

- 철저한 공정 위험성을 토대로 하여 기존 인터록 작동 중지 조건 및 범위에 대한 재검토가 필요하며, 중대산업사고를 야기할 우려가 있는 경우 인터록의 다중화(Redundancy)를 통하여 공정 위험성의 사고 빈도를 보다 낮추는 등 근원적인 안전설계를 하여야 한다.

교훈 3 / 공정 비상정지절차 준수를 위한 주기적인 교육 및 훈련이 필요하다.

- 공정 비상정지절차 준수를 위한 제어실 근무자 및 현장 근무자를 상대로 한 주기적인 교육 및 훈련을 통하여 비상 시 완벽한 공정 비상정지절차를 수행할 수 있도록 노력하여야 한다.

Ⅶ. 유사 사고사례



01

레벨 컨트롤 밸브(Level Control Valve) 작동 불량에 의한 아세토니트릴(Acetonitrile) 누출

발생일시	2014년 11월
사고장소	울산 소재 공장
피해내용	부상 3명
사고내용	<ul style="list-style-type: none">아세토니트릴 회수공정 지역에서 레벨 컨트롤 밸브(Level Control Valve) 작동 불량으로 현장 점검 중, '펌프 출구밸브 플랜지'의 누설(Leak)로 인한 아세토니트릴(Acetonitrile, 인화성 액체, 인화점 : 2 °C) 누출 발생



VIII. 참고자료



1. 산업안전보건법, 고용노동부; 2018
2. 산업안전보건용어사전, 한국산업안전보건공단; 2006
3. 중대산업사고 조사의견서, 한국산업안전보건공단; 2010~2017
4. KOSHA Guide P-151-2016 사고의 근본원인 분석기법에 관한 기술지침
5. Thermodynamical Analysis of Composition and Adiabatic Flame Temperature of Combustion Gas of Bunker-C Fuel(J.of Kor.Soc.Env.Eng. Vol.8.No.2.1986)

작 성

권 영 재 (안전보건공단 경북지역본부 화학사고예방센터(구미))
권 남 호 (안전보건공단 경북지역본부 화학사고예방센터(구미))
이 수 희 (안전보건공단 경북지역본부 화학사고예방센터(구미))
김 재 범 (안전보건공단 경북지역본부 화학사고예방센터(구미))

검 토

권 혁 면 (연세대학교 산학협력단)
윤 동 현 (윤테크)
주 종 대 (산업안전환경기술원)
권 현 길 (안전보건공단 교육원)

안전보건공단 전문기술실 전문기술부

2019-전문기술-305

『카본블랙 제조공정 반응기 화재사고』 사례 연구

발 행 일 2019년 7월 1일
발 행 인 한국산업안전보건공단 이사장 박두용
발 행 처 한국산업안전보건공단 전문기술실
주 소 울산광역시 중구 종가로 400
전 화 (052) 703-0600
F A X (052) 703-0312
Homepage <http://www.kosha.or.kr>
디 자 인 · 인 쇄 (사)한국신체장애인복지회 ☎ 02.6401.8891

※ 무단 복사 및 복제하여 사용하는 것을 금지함

카본블랙 제조공정 반응기 화재 사고 사례(2018.1.17.)

본 사례는 국내에서 발생한 화학사고에 대하여 안전보건공단에서 동종사고의 재발방지를 위하여 관련 사업장에 무료로 배포하오니 근로자에게 충분히 교육하여 동종사고가 발생하지 않도록 만전을 기하여 주시기 바랍니다.

카본블랙(Carbon Black) 제조공정 반응기 화재사고

사고개요

2018년 1월 17일(수) 카본블랙 제조공정에서 공정 Trouble이 발생하여 비상가동정지 절차 수행 중, 공기에열기로부터 발생하는 고온 공기(Hot Air)를 반응기로 공급하는 배관(700 mm)에서 미반응 원료(FCC Oil*)의 유증기로 인한 화재가 발생하였다.

* FCC(Fluid Catalytic Cracking) Oil : 정유공장의 고도화 공정에서 남은 고점도 잔사유



[그림 1] 화재 발생 카본블랙 제조공정 전경



[그림 2] 화재로 인해 용융되어 파손된 배관

01 사고 발생 공정 및 물질

- 카본블랙 제조공정 반응로에 원료(FCC Oil)와 과량의 공기를 공급하여 원료를 연소시키는 과정에서 공기 공급용 송풍기 작동 Trouble에 따른 비상가동정지 절차 수행 중 산소 차단 실패로 미반응 FCC Oil의 유증기가 발화 하면서 화재가 발생함.



• 사고 발생 물질 (사고 발생 물질 정보)

물질명	구성 성분	CAS No.	함유량	증기압	인화점	발화점
FCC Oil	Catalytic Cracked Oil	64741-62-4	> 90 %	> 5hPa (at 20 °C)	≥ 76 °C (개방컵)	≥ 260 °C
	방향족 탄화수소	70955-17-8	> 3 %			
	Sulfur	7704-34-9	< 2.8 %			

02 사고발생원인

- 산소 공급 자동차단밸브(Shut Off Valve) 미작동
 - 연소용 공기 송풍기 유량계와 연동된 산소 공급 자동차단밸브의 인터록 설정치가 정상운전 조건 대비 과도하게 낮게 설정되어 있어 비정상조건의 감지에 실패하여 공기유량계와 산소 공급 자동차단밸브의 인터록(Interlock)이 작동되지 않음.
- 산소 공급 유량조절밸브(Flow Control Valve) 작동 불량
 - 비상운전절차에 따라 산소 공급 유량조절밸브를 원격(수동) 차단하였으나, 밸브 작동불량(Passing)으로 인해 완벽한 차단에 실패하여 일정 시간 동안 산소가 계속적으로 공급됨.
- 산소 공급 배관 비상 차단 미실시
 - 산소 공급 자동차단밸브 및 유량조절밸브의 작동 불량 또는 불능 시 즉시 비상차단밸브를 제어실에서 수동 차단 할 수 있도록 비상운전절차를 규정하지 않아 수동 차단에 실패함.

03 동종사고 예방대책

- 비상가동 정지 시 완벽한 산소 차단 이행
 - 산소 공급 차단밸브 인터록(Interlock) 조건 변경
연소용 공기 공급 송풍기 인터록 설정값인 최소 유량 감지 설정값을 높게 변경하는 등 송풍기의 정상운전 범위 이탈 시 조기 공정 비상정지 절차 등을 수행할 수 있도록 하고, 송풍기 유량 경보(Alarm)를 설정하여 경보 발령 시 신속한 조치를 취할 수 있는 운전절차를 마련하여야 한다.
 - 확실한 산소 공급 차단밸브 작동을 위한 인터록(Interlock) 추가
산소 공급을 확실하게 차단하기 위하여 송풍기 인터록 설정치를 유량뿐만 아니라 송풍기 전원 차단 및 송풍기 냉각용 냉각수 순환펌프 전원 차단 등 비정상 조건에도 산소 공급 차단밸브가 작동될 수 있도록 인터록을 추가로 구성하여야 한다.
- 산소 공급 유량조절밸브(Flow Control Valve) 작동 건전성 유지
 - 중대산업사고로 이어질 수 있는 주요 컨트롤 밸브에 대해서는 설비 중요도 등급을 보다 상향 조정하여 점검 및 정비 주기를 단축하고, 주기적인 공정 대정비(Turn Around) 시 주요 조절밸브(Control Valve)에 대한 인터록 테스트 및 스트로크(Stroke) 테스트를 실시하여 작동 건전성을 상시 유지할 수 있도록 하여야 한다.
- 비상운전절차 보완 및 교육 실시
 - 안전운전계획 지침 내 비상운전절차에 비상차단밸브를 비상 시 제어실에서 긴급 수동 정지할 수 있도록 관련 절차를 추가 규정하고, 규정 개정에 따른 관련 근로자들의 교육 및 훈련을 실시하여야 한다.