

연구보고서

수중 용접·용단 시 가연성 가스 폭발재해 예방을 위한 안전방안 연구

강준혁·박해동·최재욱

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요 약 문

- 연구 기간 2021년 2월 ~ 2021년 11월
- 핵심 단어 잠수, 수중 용접, 수중 용단, 수중 폭발
- 연구과제명 수중 용접·용단 시 가연성 가스 폭발재해 예방을 위한 안전방안 연구

1. 연구배경

2012년 동일본대지진으로 인한 피해복구 중 수중폭발로 인한 잠수작업자 사망, 2014년 5월 세월호 수색 중 수중 용단 폭발사고로 잠수작업자 사망, 2020년 6월 부산-마산 복선전철 공사 수중 용단 작업 중 수중폭발로 인한 잠수작업자 사망 등 유사한 재해가 반복되므로 관련 재해 예방을 위한 안전대책이 필요함

수중 용단 작업 시 초고온 절단봉이 가장 많이 사용되는 해외와 달리 국내에서는 수중용 탄소 가우징봉을 주로 사용함에 따라 가연성 가스의 조성이 다를 것으로 추정되어 실험으로 규명하고자 하였음

본 연구에서는 수중 용접·용단 용 전극봉을 사용함에 있어 수중 폭발의 원인이 되는 가연성 가스의 조성 비율을 규명하고, 수중 폭발재해 예방을 위한 안전작업절차 제안을 목적으로 하였음

2. 주요 연구내용

한국폴리텍Ⅲ대학 강릉캠퍼스의 용접용 수조에 담수를 받아 소금을 녹여 35 ± 1 ppt의 염수를 제조한 뒤 잠수헬멧(SL-27), 밴드마스크(KMB-18), Amron 8330iC-01 잠수조정반, Amcom II 통화 장치, 생명줄과 Miller사의 직류 용접·용단기를 사용하였음

국내 수중 용접·용단에 사용되는 피복아크용접봉, 초고온 절단봉, 탄소 가우징봉을 용접·용단용 직류발전기를 이용하여 통전시켜 전극봉(음극)에서 발생하는 수소의 양과 용단 작업 시 발생하는 가연성 가스를 포집한 후 GC-2010plus(Shimadzu)를 이용하여 분석하였음

○ 피복아크 용접봉의 가연성 가스 발생량

DC 60V, 200A의 전류를 30초간 통전하였을 때 가연성 가스의 발생량은 평균 27.8 mL이었고, 연소시간은 1개당 평균 93초였으며 전극봉 1개 연소 시 가연성 가스의 발생량은 86.2 mL, 분당 55.6 mL이었음

수중 용단 후 발생한 수소는 평균 53.12 vol%, 일산화탄소 40.16 vol%, 메탄 0.685 vol%이었음. 연소가스가 잠수작업자의 호흡기체(분당 9L)와 혼합될 경우 수소의 비율은 0.33%로 폭발하한계 미만으로 감소하였음.

○ 탄소 가우징봉의 가연성 가스 발생량

DC 60V, 300A의 전류를 20초간 통전하였을 때 가연성 가스의 발생량은 평균 27.8 mL 이었고, 연소시간은 1개당 약 179.6초였으며 전극봉 1개 연소 시 가연성 가스의 발생량은 861 mL, 분당 287 mL이었음

수중 용단 후 발생한 수소는 평균 0.17 vol%, 메탄 0.003 vol%, 일산화탄소 0.29 vol% 로 세 가스 모두 폭발하한계 미만이었음

○ 초고온 절단봉의 가연성 가스 발생량

DC 60V, 300A의 전류를 30초간 통전하였을 때 가연성 가스의 발생량은 평균 133.9 ml 이었고, 연소시간은 1개당 평균 44.6초였으며 전극봉 1개 연소 시 가연성 가스의 발생량은 200.9 ml, 분당 267.8 ml이었음

수중 용단 후 발생한 수소는 평균 0.51 vol%, 메탄 0.007 vol%, 일산화탄소 0.20 vol% 로 세 가스 모두 폭발하한계 미만이었음

탄소 가우징봉은 초고온 절단봉과 달리 수소보다 일산화탄소의 비율이 높았으나 수소, 일산화탄소, 메탄 모두 폭발하한계 미만이었고, 피복아크용접봉보다 가스 발생량이 많음에도 불구하고 조성비에서 폭발하한계 미만인 이유는 산소 아크 용단 시 분당 1.98m³ 이상의 고순도 산소를 사용하기 때문임

○ 급·배기를 통한 환기 검토 및 대안

수중 폭발 예방을 위해 용접·용단 중 발생한 연소가스가 적체될 공간을 미리 조사하여 구멍을 뚫고 자연 배기하거나 에어 리프트를 가스 이동 경로에 설치하여 강제 배기할 수 있으나, 가스 적체 지역 또는 모재의 반대편과 같이 가스 이동 경로를 파악할 수 없을 때는 적용할 수 없는 단점이 있음. 불활성 기체를 급기하여 가연성 가스를 폭발하한계 미만으로 유지하는 방법도 사용됨을 확인하였으나, 가연성 가스를 제외한 기타의 가스가 선택적으로 불완전하게 배출되어 폭발할 수 있는 가능성이 있으므로 가스의 배출이 불확실한 때는 수중용 워터제트, 그라인더, 전단기 등 기계식 절단 방법으로 대체할 필요가 있었음.

3. 연구 활용방안

수중 용단 작업에 관한 안전조치 관련 기술지침 개발 및 후속 연구에 활용

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 차장 강준혁
 - ☎ 052) 7030. 849
 - E-mail cronbach@kosha.or.kr

목 차

I. 연구배경과 목적	3
1. 연구배경	3
2. 연구목적	4
II. 연구방법	7
1. 선행연구 분석	7
1) 이론적 배경	7
2) 수소 폭발	8
3) 미 해군 수중 용접·용단 연구	10
4) 일본 사고사례 연구	11
5) 초고온 절단봉 가연성 가스 발생 연구	12
2. 실증실험	13
1) 인원구성 및 잠수설비	13
2) 작업절차 및 안전조치	15
3) 염수제조	15
4) 실험설비 및 자재	17
5) 포집설비	22
6) 전기분해 및 가스 포집	22

목 차

7) 용접·용단 시 가스 포집	23
8) 가스 분석방법	25
Ⅲ. 연구결과	29
1. 연소시간	29
2. 수소 발생량 및 조성 비율	29
1) 전기분해 시 발생량	29
2) 용접·용단 시 가스 조성	32
3) 폭발 가능성 검토	34
3. 가연성 가스 제거	37
1) 배기	37
2) 급기	39
V. 고찰	43
1. 안전조치	44
2. 제한점	52

IV. 결론	57
참고문헌	59
Abstract	61
부 록	63
1. 분석 조건 및 방법	63
2. 크로마토그램	64
3. 검량선	65
3. 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안)	66

표 목차

〈표 II-1〉 상온(20 ℃)에서 수소 폭발범위(mol%)	10
〈표 II-2〉 수중 용단 방법별 가스 발생 비율(%)	11
〈표 II-3〉 재해지역 강관파일 내부 가스 비율(%)	12
〈표 II-4〉 Hydroweld FS의 기계적 성능 및 중량조성비	19
〈표 II-5〉 철과 고순도 산소의 반응	20
〈표 II-6〉 전기분해 시 용접기의 전압 및 전류	23
〈표 III-1〉 전극봉 한 개당 연소시간	29
〈표 III-2〉 용접봉 가스발생량(60VDC, 200A, 30초)	30
〈표 III-3〉 수중 가우징봉 가스발생량(60VDC, 300A, 20초)	31
〈표 III-4〉 초고온 절단봉 가스발생량(60VDC, 300A, 30초)	32
〈표 III-5〉 용접봉 수중 용접 후 발생 가스 조성비	32
〈표 III-6〉 가우징봉 수중 용단 후 발생 가스 조성비	33
〈표 III-7〉 초고온 절단봉 수중 용단 후 발생 가스 조성비	34
〈표 III-8〉 호흡기체-가연성 가스 혼합 시 수소 비율	36
〈표 IV-1〉 피복아크용접(SMAW) 전류별 차광유리 번호	45
〈표 IV-2〉 탄소 아크 에어 가우징(CAC-A) 전류별 차광유리 번호	45
〈표 IV-3〉 산소절단 전류별 차광유리 번호	45
〈표 IV-4〉 차광유리 2매 조합 시 환산식	46
〈표 IV-5〉 용접·용단기 전극 확인 방법 및 절차	47
〈표 IV-6〉 수중 용단용 전극봉 요구 전류	48
〈표 IV-7〉 호스 길이와 산소 공급 압력	48
〈표 V-8〉 용접·용단 케이블 규격별 상호 참조	49

그림목차

[그림 I -1] 탄소 가우징봉	3
[그림 II-1] 폭발하한계(LEL) 및 폭발상한계(UEL)	9
[그림 II-2] 잠수조정반(왼쪽), 통화 장치(오른쪽)	14
[그림 II-3] KMB 밴드마스크(왼쪽), 전용 용접보안경(오른쪽)	14
[그림 II-4] 실험용 수조	15
[그림 II-5] 국내 연평균 표준염도 변동 경향	16
[그림 II-6] 염분측정기(H198319)	16
[그림 II-7] 용접기(왼쪽), 용접토치(가운데), 클램프(오른쪽)	18
[그림 II-8] 발전기(왼쪽), 용단토치(가운데), 클램프(오른쪽)	20
[그림 II-9] 수중용 탄소 가우징봉	21
[그림 II-10] 초고온 절단봉	21
[그림 II-11] 전기분해 시 포집장치(왼쪽), 용접·용단 시 포집상자(오른쪽)	22
[그림 II-12] 전기분해 시 수소가스 발생 위치	23
[그림 II-13] 수중 용접·용단 설비 및 가스 포집	24
[그림 II-14] GC-2010 plus	25
[그림 III-1] 분당 호흡량과 산소 소비량	35
[그림 IV-1] 배관 수중 용접 방향 및 순서	46
[그림 IV-2] 수중 절단용 기계식 장치의 예	50
[그림 IV-3] 수중 워터제트 절단기의 예	51

I. 서론

.....

I. 서론

1. 연구배경

2020년 6월 부전-마산 복선 전철공사 현장에서 폭발로 인하여 작업 중이던 잠수사가 사망하였다. 수중에서 전기와 산소를 이용하여 H형강을 절단하는 작업이었고 전극봉으로 수중용 탄소 가우징봉이 사용되었다.



[그림 I-1] 탄소 가우징봉

사고 조사에서 전기와 산소를 이용한 절단작업 중 발생한 수소가 수중폭발의 원인물질로 추정되었다. 수중 용단 중 폭발사고는 2014년 5월 세월호 선체 절개 작업 중 발생한 바 있고 2015년 10월 세월호 인양작업 중 스크루 절단 과정에서 한 차례 더 발생하였다.

2012년 일본에서 동일본 대지진 피해복구 공사에서 강관파일을 절단 중 발생한 사망사고에 대하여 일본노동안전위생총합연구소(JNIOOSH)는 수소와 메탄의 폭발로 형성된 압력이 절단된 구멍을 통하여 제트수류를 만들었고, 제트수류가 피해자의 복부를 충격하여 사망에 이르게 하였음을 실증실험을 통하여 밝혔다.

국제해양공사협회(International Marine Contractors Associations, IMCA)에 따르면, 산소-아크 절단법은 용단 시 다량의 산소를 사용하고 용단

중 수소가 발생하는 수중 절단법으로 산소와 수소가 특정 비율에 도달할 때 아크나 비산 불꽃과 만나면 폭발할 수 있는 기체가 형성될 수 있다.¹⁾

수중 용접·용단에서 발생하는 가연성 가스는 수소, 일산화탄소, 메탄 등이며 각 물질의 폭발범위는 수소 4.0 ~ 74.0 vol%, 일산화탄소 12.5 ~ 74.0 vol%, 메탄 5.0 ~ 15.0 vol%로 알려져 있다.

수중 폭발의 위험성과 관련하여 해외에서는 수중 용단 시 발생하는 가스의 배출을 위해 가스가 모일 수 있는 곳을 추정하여 유압드릴로 배출구를 뚫는 안전조치를 권장하고 있으나, 위의 재해사례에 따르면 해당 조치를 취했음에도 불구하고 사고는 지속되고 있으므로 안전조치에 대한 연구가 필요하다.

2. 연구목적

본 연구는 국내 수중 용접·용단 시 사용되는 수중용 탄소 가우징봉에 의해 생성되는 가연성 가스의 조성비를 규명하고 발생한 가스의 효과적인 배출 방안을 모색하여 안전보건기술지침을 제정·배포함으로써 수중 용접·용단 중 수중 폭발사고 예방에 그 목적이 있다.

1) <https://www.imca-int.com/safety-events/underwater-explosions/>

Ⅱ. 연구방법

.....

II. 연구방법

1. 선행연구 분석

1) 이론적 배경

(1) 전기분해

물은 전기분해를 거쳐 수소와 산소로 분해되며 양극에서 산소, 음극에서 수소가 발생한다고 알려져 있다. 피복아크용접(shield metal arc welding, SMAW)을 이용하는 수중 용접과 초고온 절단봉 또는 수중용 탄소 가우징봉을 사용하는 수중 용단에서 직류 전원을 사용하고 전류는 용접 시 약 200 암페어, 용단 시 300 ~ 400 암페어를 사용한다.

해수 또는 염분수를 전기분해하면 음극에서 수소가 생성되고 양극에서 염소가스(Cl_2), 수산화나트륨(NaOH), 차아염소산나트륨(NaClO), 산소 등이 발생하는 것으로 알려져 있다. 해수의 전기분해로 생성된 차아염소산나트륨은 황어패류 살균효과 등에 대하여 연구(이희정 외, 2013)된 바 있으며, 미량으로 발생하는 염소가스의 독성은 이미 알려진 바 있으나 잠수작업자는 호흡용 마스크를 착용하고 있으므로 이번 연구에서 제외하였다.

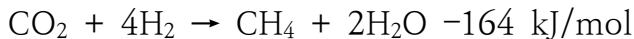
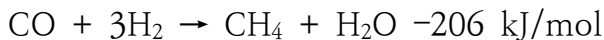
(2) 열분해

물 분자는 고온에서 수소와 산소로 분리되는 것으로 알려져 있다. 2,200℃에서 약 3%의 물 분자가 수소와 산소로 분리되며, 3,000℃의 고온에서 50%의 물 분자가 분리된다. 그러나 상온에서 열에 의해 분리되는 물 분자는 0.01 ppt에 불과하다(Funk, 2001). 초고온 절단봉과 모재 사이에서 발생하는 아크의 온도는 약 5,530℃²⁾ 이상으로 물의 열분해를 예상할 수 있다. 다만,

2,200℃ 이상의 고온은 아크를 중심으로 극히 제한적인 범위에서만 유지될 뿐 해당 범위를 벗어나서 급격히 냉각되므로 수소발생에 대한 열분해의 영향은 배제할 수 없으나 크지 않을 것으로 추정된다.

(3) 메탄화

고온에서 일산화탄소 또는 이산화탄소가 수소와 반응하여 메탄과 물이 형성되는 화학반응이다. 메탄화 과정에서 400℃ 이상의 고온과 약 30 bar의 압력 및 촉매제가 필요하며, 가장 효율적인 촉매는 니켈로 알려져 있다 (Fujita 외, 1993).



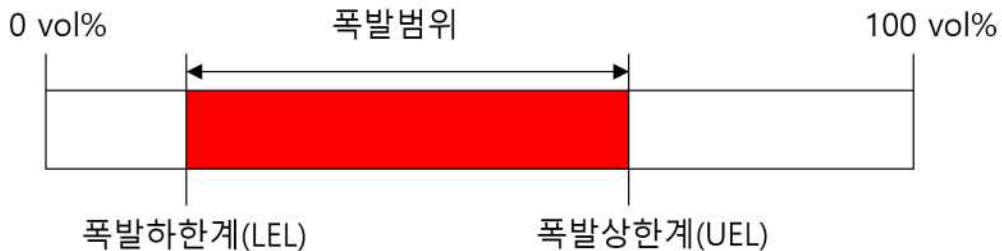
그러나 이번 연구는 수심이 1.5 m인 수조에서 진행하여 압력이 크지 않고, 전기 에너지로 발생한 아크의 온도가 용접 또는 용단 후 400 ℃ 이상으로 유지되는 시간이 극히 짧아 메탄 생성은 많지 않을 것으로 추정된다.

2) 수소 폭발

(1) 폭발범위

공기 중에서 가연성 가스가 연소될 수 있는 가장 낮은 농도를 폭발하한계 (lower explosive limit, LEL)라 하고, 가장 높은 농도를 폭발상한계(upper explosive limit, UEL)라 하며, 폭발하한계와 폭발상한계 사이를 폭발범위라고 한다. 대다수의 가스는 5 vol% 미만에서 폭발하므로 가스의 농도가 상대적으로 매우 낮아도 폭발의 위험은 높다.

2) <https://www.broco-rankin.com/underwater1/underwater-cutting/broco-underwater-cutting-system/>



[그림 II-1] 폭발하한계(LEL) 및 폭발상한계(UEL)

대체 연료의 가능성이 제기된 수소는 낮은 에너지 밀도로 인해 높은 압력으로 압축하여 저장하는 방법이 고려되었다. 일반적으로 수소는 공기 중에서 4.0 ~ 74.0 vol%에 폭발하는 것으로 알려져 있으나, 측정 장치와 방법에 따라 수소 폭발상한계에서 기존 기준과 다른 값을 보임에 따라 폭발상한계를 77.0 vol%로 상향할 것을 제안한 연구도 있었다(하동명, 2008).

(2) 산소의 조성과 압력의 영향

서로 다른 실험규격들³⁾을 이용한 수소의 폭발실험에서 수소-공기와 수소-산소 폭발실험에서 온도가 상승할수록 폭발범위는 넓어지는 경향을 보였다(Schroeder 외, 2005). 온도가 증가할수록 폭발범위가 확대되는 것은 분자운동 촉진의 결과로 추정된다(하동명, 2008).

3) ① EN 1839:2017 Determination of the explosion limits and the limiting oxygen concentration(LOC) for flammable gases and vapour, ② ASTM E 681-01 Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals(Vapors and Gases), ③ DIN 51649-1 Determination of explosion limits of gases and gas/air mixtures

〈표 II-1〉 상온(20 ℃)에서 수소 폭발범위(mol%)

압력(bar)	수소 폭발하한계(LEL) mol%		폭발상한계(UEL) mol%	
	수소-공기	수소-산소	수소-공기	수소-산소
1	4.3	4.0	76.5	95.2
5	4.4	4.6	73.1	94.6
10	4.7	5.0	72.1	94.2
20	4.9	5.4	71.1	94.2
50	5.6	5.5	73.8	94.6
100	5.6	5.7	73.4	94.6
150	5.6	5.7	72.9	95.1

*출처: Schroeder V. Holtappels, K. 2005

같은 압력에서 수소-공기 보다 수소-산소의 폭발하한계는 0.1~0.3 mol% 차이를 보였으며 높낮음은 압력별로 다르게 나타난 반면, 폭발상한계는 모든 압력에서 높게 나타났다. 압력이 상승할수록 폭발하한계는 20 bar까지 감소하다가 20 bar 이후에 다시 증가하는 경향을 보였다(Schroeder 외, 2005).

산소-아크 절단법은 다량의 산소를 사용하므로 수소의 농도가 수소-산소 폭발하한계를 초과할 경우 폭발할 가능성이 있음을 추정할 수 있다.

3) 미 해군 수중 용접·용단 연구

2003년 미국 해군은 플라즈마 절단, 초고온 절단, 영국 수중 절단시스템을 실험하여 발생하여 분석하였다. 수심 1.5 미터 수조에서 16 mm 강판을 절단한 실험에서 렉산 재질의 후드를 이용하여 발생가스를 포집한 뒤 이를 포집 실린더로 옮겼다. 후드는 포집 전 물로 채워 공기에 의한 오염을 최소화하였다. 실험에서 가스 크로마토그래피를 이용하여 산소, 이산화탄소, 일산화탄소, 수소, 메탄, 휘발성 유기화합물(VOC)을 측정하였고 그 결과는 〈표 II-2〉와 같다. 플라즈마 절단 시 발생한 수소는 폭발하한계를 초과하였고 일산화탄소와

메탄은 폭발하한계 미만이었다. UK 절단 시스템 사용 중 발생한 수소는 공기 중 폭발상한계를 초과하였고, 일산화탄소와 메탄은 폭발하한계 미만이었다. 현재 해외 산업잠수업체에서 가장 많이 사용되는 Broco사의 초고온 절단봉에 의한 가연성 가스는 폭발하한계 미만이었다.

〈표 II-2〉 수중 용단 방법별 가스 발생 비율(%)

생성 가스	플라즈마 절단	Broco 초고온 절단	UK 절단
산소	0.1%	88 ~ 93%	0.5%
이산화탄소	1.5%	1.2%	2.8%
일산화탄소	3.9%	0.2%	5.1%
수소	5 ~ 6%	0.5%	75 ~ 95%
메탄	3ppm	15ppm	0.1%
휘발성 유기화합물	~25ppm	~30ppm	~0.2%

*출처: Analysis of gases produced by three underwater cutting device. 2003

4) 일본 사고사례 연구

2011년 동일본대지진으로 발생한 쓰나미로 일본 동해안 소규모 어항은 심각한 피해를 입었다. 2012년 일본의 한 잠수업체가 상부가 콘크리트 캡으로 막힌 손상된 62개의 강관파일을 수중 용단하여 제거하던 중 물속에서 폭발이 일어나 잠수작업자 1명이 사망하였다. 작업 전 강관 내부에 가연성 가스를 배출하기 위하여 콘크리트 캡 아래 구멍을 뚫고 난 후 일본 국내에서 생산된 초고온 절단봉을 사용하여 용단하였다. 12개의 강관을 용단한 후 13번째 용단 작업 중 폭발사고가 발생하여 일본의 노동안전위생총합연구소(JNIOOSH)는 해당 사고조사를 위하여 가스 포집, 분석 및 폭발실험을 진행하였다. 폭발의 원인물질은 용단 시 발생한 수소와 저질에서 생물작용에 의해 생성된 메탄 이었고, 해당 물질이 강관파일 내에 쌓여있던 중 아크와 만나 폭발하여 폭발 압력으로 형성된 제트수류가 재해자의 복부를 강타하여 사망에 이른 것으로

조사되었다. JNIOOSH가 분석한 강관파일 내 기체의 조성은 <표 II-3>과 같다. 용단 시 수소, 일산화탄소, 메탄과 같은 가연성 가스는 폭발하한계 미만이었으며, 일부 강관에서 메탄은 폭발상한계를 초과하여 적체된 상태로 확인되었다.

〈표 II-3〉 재해지역 강관파일 내부 가스 비율(%)

시료명	수소	산소	질소	일산화탄소	메탄	이산화탄소
No.13	0.00253	64	30.8	0.317	4.91	0
No.13	0	64.4	30.5	0.283	4.83	0
No.15	0	1.41	61.7	0	36.9	0
No.15	0	1.3	61.6	0	37.1	0
No.17	0	1.4	57.6	0	41.1	0
No.17	0	1.4	57.6	0	41	0
용단	0.0557	91.73	6.28	0.432	0	1.51

*출처: JNIOOSH 재해조사보고서, 2016.

5) 초고온 절단봉 가연성 가스 발생 연구

에르망(Hermans)은 민물과 바닷물에서 초고온 절단봉으로 실험하여 용단 중 발생하는 수소의 체적비율(vol%)로 수소 폭발의 가능성을 검토하였다. 민물에서 전류는 150~200 암페어를 사용했으며, 산소공급 압력은 7 bar(약 7.14 kg/cm²) 이었다. 7가지 종류의 실험세트에서 수소의 체적비율은 0.5~0.86 vol%로 수소의 폭발하한계 미만이었다.

바닷물에서 초고온 절단봉으로 강관 파일을 용단한 실험에서 파일 내부에 쌓인 수소의 체적비율은 0.1%였고, 강관 파일 외부의 수소 체적비율은 0.6%로 측정되어 폭발하한계 미만이었다. 그러나 고농도 산소를 사용하지 않고 아크의 열만으로 절단하거나 용접을 하는 경우, 잠수작업자가 호흡하는 가스와 용접 중 분해된 수소가 혼합된 기체에서 9%의 수소가 관찰되었다.

에르망은 초고온 절단봉으로 용단한 후 측정된 가스에서 수소의 체적비율이 낮은 이유는 용단 중 사용되는 산소의 공급량 때문으로 추정하였고, 수중 폭발 사고에는 수소 이외의 다른 가연성 기체가 개입될 수 있음을 주장하였다 (Hermans, 2019).

2. 실증실험

1) 인원구성 및 잠수설비

(1) 인원구성

수중 용접·용단 실험을 위해 수중 작업을 하는 잠수작업자 1명과 감시인 1명 총 2명으로 실험하였다. 작업 인원은 한국산업인력공단의 잠수기능사 및 잠수산업기사, 미국산업잠수협회(ADCI)의 혼합기체 산업잠수사, 영국 선급(Lloyd Registers)의 수중 용접사 자격 취득자로 구성하였다.

잠수작업자는 수중 용접기 홀더의 접지, 용접·용단을 위한 전기 인가 및 차단 요구, 용접 및 용단, 수중 기체 포집을 담당하였고, 감시인은 압축공기 공급, 실험자 요구에 따른 전기의 통전 및 차단, 기체 포집량 기록, 가스크로마토그래피 분석용 가스 포집, 잠수장비 및 수중 용접기의 설치, 실험 후 장비 세척 등의 업무를 담당하였다.

(2) 잠수설비

물 밖에서 잠수작업자에게 기체를 공급하는 표면공급식 잠수장비를 사용하였다. 내용적 11.1리터 인 80 ft³ 스쿠버 실린더 2개를 압력조절이 가능한 잠수조정반에 연결하고, 실린더 하나의 공기가 부족할 때 다른 실린더의 공기를 교대로 사용하였다. 잠수조정반은 추가적인 장치 없이 고압 실린더 사용이 가능한 Amron International사의 8330iC-01을 사용하였다. 잠수조정반

8330iC-01에는 통화 장치가 내장되어 있으나 통화 품질이 좋지 않아 별개의 통화 장치를 사용하였다. Amcom II 통화 장치는 잠수사와 감시인의 양방향 통신이 가능하고 AC 전원 또는 AC 전원 사용이 불가능한 경우 내장된 배터리를 이용하여 작동한다.



[그림 II-2] 잠수조정반(왼쪽), 통화 장치(오른쪽)

실험자는 KMB-18 밴드마스크와 SL-27 잠수헬멧 중 당일 사용이 가능한 호흡보호구를 선택적으로 사용하였다. 용접·용단 중 눈을 보호하기 위하여 밴드 마스크와 잠수헬멧의 안면 테두리에 용접·용단용 차광렌즈를 장착할 수 있는 프레임을 부착하여 사용하였다.



[그림 II-3] KMB 밴드마스크(왼쪽), 전용 용접보안경(오른쪽)

2) 작업절차 및 안전조치

안전한 작업을 위하여 실내 수조 대신 실외의 이동식 수조를 사용하여 수중 용접·용단 시 발생한 가스가 자연 희석되도록 조치하였다. 수조의 3면은 아크릴로 제작되어 외부의 감시인이 잠수작업자의 작업 상황을 맨눈으로 관찰할 수 있도록 하였다.

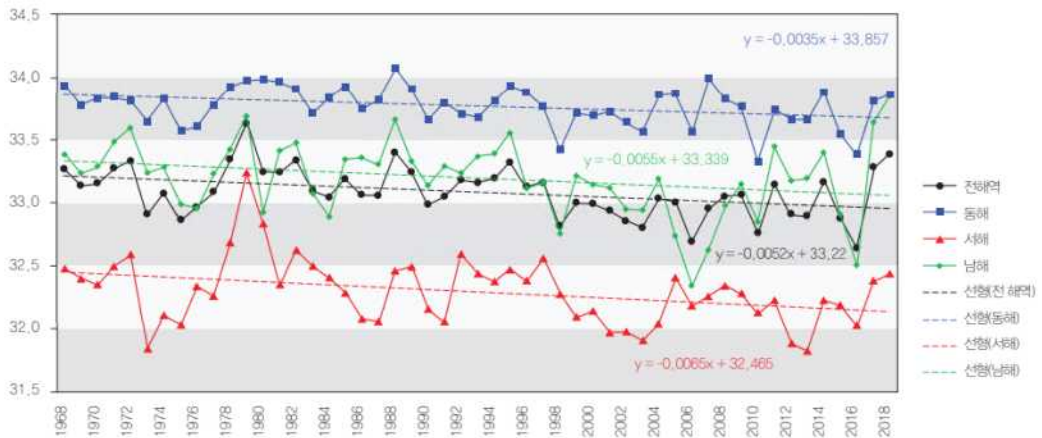
직류용접기에 원격 제어장치를 이용하여 실험자가 감시인에게 전기의 통전을 요구할 때만 전기를 인가하도록 하여 용접·용단 전후로 불필요한 전원을 차단하여 전격을 예방하였다.



[그림 II-4] 실험용 수조

3) 염수 제조

국립수산과학원에 따르면 각 해역의 최저·최대 평균 표층염분은 서해 31.84~33.25 psu, 남해 32.31~33.66 psu, 동해 33.39~34.04 psu, 전 해역 32.61~33.63 psu 이었다. 최근 51년간(1968~2018) 우리나라 해역의 염분은 동해 약 0.18 psu, 서해 약 0.33 psu, 남해 약 0.28 psu, 전 해역에서 약 0.27 psu 감소하였다.⁴⁾



[그림 II-5] 국내 연평균 표층염도 변동 경향

강의 하구와 같이 담수와 해수가 만나는 지역은 염분농도가 낮다. 0.5~30 psu의 농도를 지닌 자연 상태의 물을 기수(brackish water)라 하며, 0.5 psu 미만의 염분 농도를 지닌 물을 민물 또는 담수라 분류한다.



[그림 II-6] 염분측정기(H198319)

물은 수도를 이용하여 먹는 물을 사용하였고 2.4 m × 1.5 m × 1.8 m 크기의 수조에 물을 채운 다음 소금을 넣어 염분수를 만들었다. 염분 측정은 HANNA Instruments사의 Salinity Tester(HI98319)를 사용하였고, 동봉된 35 ppt의 표본으로 교정한 후 염분을 측정하였다. 염분측정은 실험 전, 실험 중, 실험 후로 나누어 실시하였고, 측정된 염분의 농도는 34~36 ppt였다.

4) 실험설비 및 자재

(1) 수중 용접

피복아크용접의 용접아크는 적은 면적에 약 4,000~5,000 ℃의 열을 집중시켜 금속을 녹이고 연소된 피복재는 아크 주변에 환원가스를 형성하여 금속의 산화를 방지한다. 용접봉은 고열의 아크에 의해 용융된 후 모재로 운반되어 용융된 모재와 결합하여 비드(bead)를 형성한다.

피복아크용접을 수면 아래에서 수행할 때 수중 용접이라 한다. 직류전기를 사용하며 모재에 양극(+)을 접지하고 용접봉에 음극(-)을 연결하는 직류정극성(direct current electrode negative, DCEN 또는 direct current straight polarity, DCSP)으로 극성을 배열하면 모재에 70%, 전극봉에 30% 열이 배분되어 용입이 깊고 좁은 특성을 갖는다. 전자(electron)가 모재에서 전극봉으로 이동하는 직류역극성(direct current electrode positive, DCEP 또는 direct current reverse polarity, DCRP)과 달리 모재의 산화막을 제거하는 청정작용이 약하므로 용접 전 모재표면의 산화막을 제거하여야 한다.

수중 용접은 용접물과 작업자가 물에 노출되는 습식 용접(wet welding)과 차수시설을 설치하여 용접작업을 물과 분리하는 건식 용접(dry welding)으로 나뉜다. 국내에서 추가 설비가 필요한 건식 용접보다 적은 비용으로 작업할 수 있는 습식 용접이 주로 사용되는 실정이므로 이 실험에서 가스 포집을 위해 습식 용접을 수행하였다.

가) 수중 용접 설비

용접용 발전기는 Miller사의 XMT 350CC/CV와 Dimension 452를 사용하였다. 용접봉 홀더는 Broco사의 BR-20을 사용하였고, 그라운드는 C형(또는 G형) 클램프를 직경 50mm² 용접선에 연결하여 사용하였다.



[그림 II-7] 용접기(왼쪽), 용접토치(가운데), 클램프(오른쪽)

용접기(XMT 350CC/CV)에 사용된 전원은 300VAC 3상 전원이며, 출력은 34VDC, 350A, 사용률(duty cycle)은 60%였다.

용접회로에서 용접봉을 연결하는 홀더는 음극에 연결하였고, 클램프는 양극에 연결하였다. 전극에 용접선을 연결한 후 양동이에 염분수를 넣어 홀더에 용접봉을 연결한 후 클램프와 함께 물에 넣어 용접봉 끝에 기포가 발생여부를 파악하여 용접회로가 직류정극성인지 확인하였다.

나) 수중 용접봉

수중 용접봉은 Hydroweld사의 Hydroweld FS를 사용하였다. Hydroweld FS는 직경은 3.2mm, 길이 350mm이며 연강용접에 사용된다.

〈표 II-4〉 Hydroweld FS의 기계적 성능 및 중량조성비

 Hydroweld FS	기계적 성질		중량 조성비(%)	
	최대인장강도	510 N/mm ²	탄소	0.1
	항복강도	460 N/mm ²	망간	0.5
	평균연신율	17%	규소	0.43
	평균경도	32%	인	0.43
		175 Hv10	몰리브덴	0.01
	샤르피 충격시험	@-20℃, 45J	황	0.008
		@-30℃, 32J		

(2) 수중 용단

수중에서 구조물의 절단하는 방법은 전기나 유압 에너지를 이용하는 기계적 절단과 직류전기와 전극봉을 이용한 전기화학적 절단으로 나눌 수 있다. 전자는 폭발의 위험성이 없거나 매우 낮은 것으로 알려져 있으나 설비의 규모가 크고 고비용으로 인하여 전기화학적 방법이 주로 사용된다. 이 보고서에서 기계적 절단과 구분하기 위하여 전기화학적 절단을 수중 용단(underwater burning)이라고 하였다.

수중 용단은 발전기의 음극에 토치(torch)를 연결하고 양극에 클램프를 연결한 후 잠수작업자의 요청에 따라 수면위의 관리자가 전기를 통전하고 잠수사가 토치의 스위치를 눌러 산소를 공급함과 동시에 아크를 발생시켜 발열반응을 이용하여 금속 등의 모재를 자르는 절단 방법이다.

수중 용단에 산소가 사용되는 이유는 아크로 인해 발생한 870℃ 이상의 고온에서 산소와 철이 결합하면 더 높은 열이 발생하기 때문이다. 미국용접협회(American Welding Society, AWS)에 따르면 철과 산소의 결합 성질에 따라 발생하는 열은 〈표 II-5〉와 같다. 세 번째 반응은 200 mm이상의 후판에 적용된다.

〈표 II-5〉 철과 고순도 산소의 반응

연번	반응 결과
1	$\text{Fe} + \text{O} \rightarrow \text{FeO} + \text{heat}(267\text{kJ})$
2	$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{heat}(1120\text{kJ})$
3	$2\text{Fe} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{heat}(825\text{kJ})$

*출처: AWS Welding Handbook 9th Edition, Vol 2. Welding process Part 1. p.598

가) 수중 용단 설비

수중 용단용 직류 발전기는 Miller사의 Dimension 452를 사용하였고, 용단용 토치는 Broco BR-22에 산소를 연결하고, 50 스퀘어(SQ, mm²)용접선에 C형 클램프⁵⁾를 그라운드로 사용하였다.



[그림 II-8] 발전기(왼쪽), 용단토치(가운데), 클램프(오른쪽)

나) 수중용 탄소 가우징봉

수중 용단용 가우징봉은 가운데 직경 2 mm 가량의 구멍이 나 있고 가우징봉 표면은 구리로 도금되어 있으며, 도금된 구리는 주황색의 코팅 막으로 방수처리되어 있다. 수중 가우징봉은 직경 8 mm이고, 길이는 약 305 mm이다. 국내 제조품이기 때문에 발주 후 입고 시간이 짧고 초고온 절단봉에 비해 가격이

5) 국제해양공사협회(IMCA)는 G형 클램프라고 함

저렴하며, 용접봉이나 초고온 절단봉에 비해 연소시간이 길어 국내 산업잠수 현장에서 사용빈도가 가장 높다. 흑연을 압착하여 제조되었기 때문에 강한 힘을 가하면 부러지기 쉽고 두께 10 mm 이상의 강재를 절단할 때에는 운봉해야 양호한 절단성능을 기대할 수 있다.



[그림 II-9] 수중용 탄소 가우징봉

다) 초고온 절단봉

초고온 절단봉은 Broco사의 UW/3818-50을 사용하였다. 초고온 절단봉은 구리로 도금된 관내에 7개의 연강봉이 배열되어 있고, 절연테이프가 외부로 나선형으로 감싸고 있다. 수중용 탄소 가우징봉과 달리 전원을 인가하여 아크를 발생시킨 후 전원을 차단하여도 산소가 계속 공급되면 아크를 유지할 수 있으나 절단성능은 다소 저하되는 것으로 알려져 있다.



[그림 II-10] 초고온 절단봉

5) 포집 설비

용단하지 않고 전기를 인가한 상태에서 발생하는 가스는 100 ml 매스실린더에 깔때기를 절연테이프로 접착하여 포집하였고, 용접·용단 시 가스 포집은 포집 챔버를 사용하고자 하였다. 렉산 재질의 포집 챔버를 제작하여 상부에 가스를 포집할 수 있게 직경 9mm의 피팅을 설치하였으나 수조 안 작업공간이 협소하여 120 리터 플라스틱 백으로 대체하여 포집하였다.



[그림 II-11] 전기분해 시 포집장치(왼쪽), 용접·용단 시 포집상자(오른쪽)

6) 전기분해 및 가스 포집

염수를 전기분해하여 발생하는 가스의 양을 파악하기 위하여 전기인가 후 용접이나 용단을 하지 않고 발생하는 기포를 깔때기와 100 ml 매스실린더를 포집하였다. 기포가 발생하는 지점은 전극봉의 끝과 홀더가 연결된 부분으로 금속이 염수와 접촉하는 부분이었다. 두 발생 지점의 차이는 305 mm 이상이었으므로 전극봉 한 개당 두 지점을 측정하여 합산하였다.



[그림 II-12] 전기분해 시 수소가스 발생 위치

전기분해에 사용한 전압과 전류는 제조사의 권장사항에 따라 <표 II-4>와 같이 하였다. 통전시험 시 사용한 수중 용접봉, 수중 가우징봉, 초고온 절단봉의 표본은 각 10개였고, 통전 시험한 용접봉과 수중 가우징봉은 전기 누설의 위험이 높아 재사용하지 않고 폐기하였다.

<표 II-6> 전기분해 시 용접기의 전압 및 전류

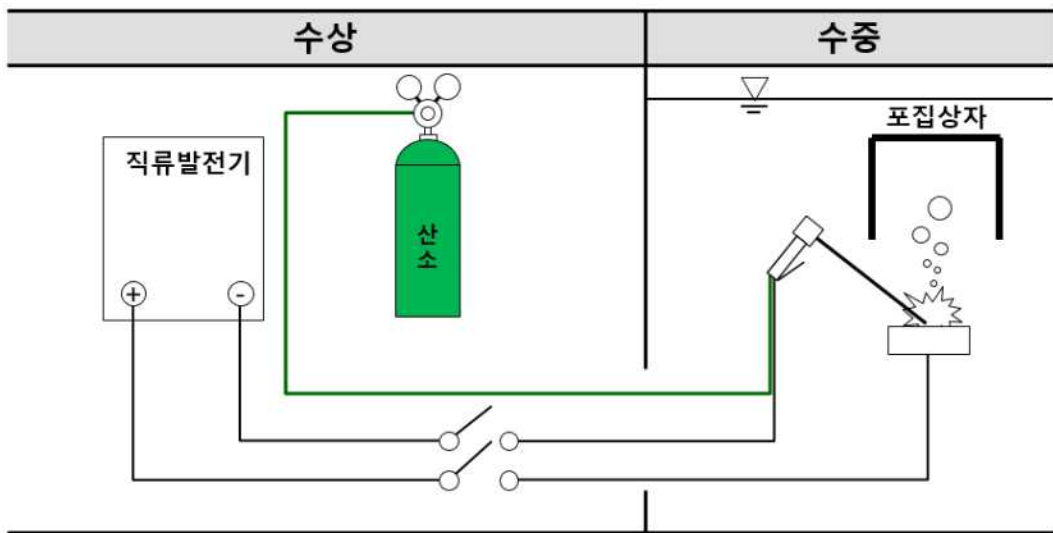
구분	전압	전류
수중 용접봉	DC 60V	200A
수중 가우징봉	DC 60V	300A
수중절단봉	DC 60V	300A

*출처: 제조사 사양서

7) 용접·용단 시 가스 포집

포집 전 포집낭 위쪽 두 곳에 구멍을 뚫어 한 쪽은 타이콘 튜브와 밸브를 연결하고 다른 한쪽은 개방된 상태로 두었다. 포집낭을 프레임에 닥트 테이프로 고정된 후 프레임을 침전시켜 포집낭을 물로 채운 후 플라스틱 집게로 개방된 곳을 막아서 가스가 누기 되지 않도록 조치하였다.

잠수작업자는 모재를 클램프에 고정하고 용접봉 끝의 방수코팅을 제거한 후 잠수헬멧 및 밴드마스크의 통화 장치로 감시인에게 전원인가를 요청하였다. 요청신호는 산업잠수에서 사용하는 “make it hot”을 사용하였다. 감시인은 “hot”을 듣는 순간 용접기 전원을 인가한 뒤 “it’s hot” 또는 “hot”이라고 통화 장치의 마이크를 통해 잠수작업자에게 전기가 인가되었음을 알렸다. 가스 포집 또는 전극봉이 소모되어 전원을 차단할 때는 잠수작업자가 “make it cold”라고 하고 감시인은 “cold”를 듣는 순간 용접기의 전원을 원격스위치로 차단한 후 “it’s cold” 또는 “cold”라고 하여 잠수작업자에게 전기가 차단되었음을 알렸다.



[그림 II-13] 수중 용접·용단 설비 및 가스 포집

수중 피복아크용접(SMAW) 중 발생하는 가스 이외에 별도의 가스가 공급되지 않기 때문에 가스 분석을 위해 준비한 포집낭(1리터 테들러 백)에 포집할 수 있도록 충분한 가스 형성을 위해 다수의 용접봉을 소비하였다. 용단 후 120리터 포집낭에 모인 가스를 실험실로 이동하기 위하여 1리터 포집낭으로 옮겨 담았다. 운반용 포집낭으로 가스를 옮겨 담은 후 120리터 포집낭의

집게로 밀봉한 끝을 개방하여 가스를 제거한 후 물을 채워 다음 시료의 포집을 준비하였다.

수중 용단 시 사용하는 다량의 산소로 인하여 약 5초 동안 용단할 경우 120리터 포집량이 만충되어 5초 이상의 용단은 불가능하였다. 120리터에 포집된 가스를 운반용 포집낭으로 옮겨 담아 실험실로 운반하였다.

8) 가스 분석방법

가스 분석은 산업안전보건연구원 직업환경연구실의 실험실에 의뢰하였다. 분석 조건과 방법 등은 〈부록 1〉과 같다. 일산화탄소와 이산화탄소는 TSI사의 IAQ-Calc 7545를 이용하여 실시간 측정코자 하였으나, 기기의 측정한계를 모두 초과하여 가스크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. 가스 분석을 위하여 사용된 주요기기는 시마즈(Shimadzu) GC-2010plus, HP-Molseive Column, BID-2010plus detector를 사용하였다.



[그림 II-14] GC-2010 plus

Ⅲ. 연구결과

.....

Ⅲ. 연구결과

1. 연소시간

전극봉 한 개에서 발생하는 가스의 양을 추정하기 위하여 임의로 봉 다섯 개를 골라 10 mm 강재에 아크를 일으켜 연소시켰다. 연소 중 전압은 DC 60V였고 수중 용접봉 연소 시 전류는 200 암페어, 수중용 탄소 가우징봉과 초고온 절단봉의 전류는 300 암페어였다. 각 시료의 연소시간 차이는 연소 후 남은 봉의 길이 차이에서 비롯되었다.

〈표 Ⅲ-1〉 전극봉 한 개당 연소시간

[단위: 초]

구 분	평균	1	2	3	4	5
수중 용접봉	93.0	91	90	100	92	92
수중 가우징봉	179.6	181	172	182	181	182
초고온 절단봉	44.6	45	42	47	45	44

2. 수소발생량 및 조성 비율

1) 전기분해 시 발생량

(1) 수중 용접봉

용접봉의 전기를 인가한 후 용접 홀더 쪽을 먼저 측정하고 용접봉 앞 끝을 측정하였다. 측정 시간은 30초였다. 홀더 쪽에서 평균 20.6 ml, 용접봉 앞에서

평균 7.2 ml의 가스가 발생하여 가스발생량은 평균 27.8 ml 이었다. 수중 용접봉은 90~100초간 연소되었고 용접봉 한 개당 83.4 ~ 92.7 ml, 평균 86.2 ml 및 분당 약 55.6 ml의 가스가 생성되었다. 가스 최소발생량은 21 ml 이었고 최대발생량은 34 ml이었다. 그라운드(+) 클램프에서는 기포 형성은 관찰되지 않았다.

〈표 III-2〉 용접봉 가스발생량(60VDC, 200A, 30초)

시료	홀더 쪽(ml)	봉의 앞 끝(ml)	합계(ml)
평균	20.6	7.2	27.8
용접봉 1	26	8	34
용접봉 2	19	7	26
용접봉 3	24	8	32
용접봉 4	21	6	27
용접봉 5	20	7	27
용접봉 6	23	6	29
용접봉 7	21	9	30
용접봉 8	18	8	26
용접봉 9	15	6	21
용접봉 10	19	7	26

(2) 수중 가우징봉

가우징봉을 음극(-)에 연결하고 물을 전기분해하여 가스의 발생량을 측정한 위치와 순서는 수중 용접봉을 측정할 때와 같이 하였다. 30초간 가우징봉에서 발생하는 가스의 양을 측정하였을 때 매스실린더의 최대 측정량인 100 ml를 초과하여 측정시간을 20초로 단축하였다. 20초간 포집한 결과, 홀더 쪽에서

약 75.8 ml의 가스가 생성된 한편 전극봉의 끝에서는 19.9 ml의 가스가 발생하였다. 그라운드(+) 클램프에서는 기포 형성은 관찰되지 않았다.

〈표 III-3〉 수중 가우징봉 가스발생량(60VDC, 300A, 20초)

시료	홀더 쪽(ml)	봉의 앞 끝(ml)	합계(ml)
평균	75.8	19.9	95.7
가우징 1	75	31	106
가우징 2	90	20	110
가우징 3	62	16	78
가우징 4	73	22	95
가우징 5	64	19	83
가우징 6	83	24	107
가우징 7	75	15	90
가우징 8	82	20	102
가우징 9	77	14	91
가우징 10	77	18	95

가우징봉 한 개의 연소시간은 약 180초이므로 수중용 탄소 가우징봉 하나당 약 861 ml, 분당 약 287 ml의 가스가 발생하였다.

(3) 초고온 절단봉

초고온 절단봉으로 전기분해 시 홀더 쪽에서 평균 78.7 ml, 절단봉의 끝에서 55.7 ml의 가스가 발생하였다. 초고온 절단봉의 연소시간이 약 45초이므로 봉 한 개당 가스의 발생량은 약 200.9 ml, 분당 약 267.8 ml의 가스가 발생하였다. 그라운드(+) 클램프에서는 기포 형성은 관찰되지 않았다.

〈표 III-4〉 초고온 절단용 가스발생량(60VDC, 300A, 30초)

시료	홀더 쪽(ml)	봉의 앞 끝(ml)	합계(ml)
평균	78.7	55.2	133.9
초고온 1	67	48	115
초고온 2	71	51	122
초고온 3	81	54	135
초고온 4	70	62	132
초고온 5	80	60	140
초고온 6	82	55	137
초고온 7	80	51	131
초고온 8	83	57	140
초고온 9	83	59	142
초고온 10	90	55	145

2) 용접·용단 시 가스 조성

사용 전원은 용접 DC 60V, 200 암페어, 용단 DC 60V, 300 암페어를 사용하였다. 용단에 사용된 산소의 공급압력은 9 kg/cm² 이었다. 포집낭을 물로 채워 공기를 제거한 후 용접·용단함으로써 공기와 섞이지 않도록 하였다. 포집된 가스는 실험실의 가스크로마토그래피로 분석하기 위하여 밸브와 튜브를 이용하여 1 리터 포집낭(tedlar bag)에 옮겨 담았다.

실험 중 용접기가 고장 나서 Miller Dimension 452와 BR-22를 사용하였고 전극봉을 연결하는 부품(collet)에 적용 가능한 용접봉(직경 4.0 mm)을 사용하였다.

수중 용접 후 발생한 수소는 평균 약 53.12 vol%, 일산화탄소 40.16 vol%, 메탄은 0.685 vol%로 측정되었다. 절단용 전극봉의 실험과 같이 그라운드(+)

클램프에서 기포는 관찰되지 않았다.

〈표 III-5〉 용접봉 수중 용접 후 발생 가스 조성비

[단위: %]

가스 종류	평균	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4
수소	53.12	49.69	48.43	59.89	54.47
산소	2.35	1.67	3.76	1.26	2.70
질소	5.26	3.60	10.48	2.30	4.65
메탄	0.685	0.641	0.709	0.643	0.747
일산화탄소	40.16	41.41	38.81	38.21	42.20

국내에서 가장 자주 사용되는 수중 가우징봉으로 용단한 후 발생한 수소는 평균 0.17 vol%였고, 메탄은 0.003 vol%, 일산화탄소는 0.29 vol% 이었다. 세 가스 모두 폭발하한계 미만으로 측정되었는데, 이는 용단 중 사용한 고순도 산소 때문이었다.

〈표 III-6〉 가우징봉 수중 용단 후 발생 가스 조성비

[단위: %]

가스 종류	평균	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4
수소	0.17	0.16	0.15	0.18	0.18
산소	94.82	96.72	95.31	90.95	96.29
질소	2.69	2.42	2.65	2.53	3.14
메탄	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003
일산화탄소	0.29	0.30	0.29	0.28	0.29

초고온 절단봉으로 용단 한 후 발생한 수소는 평균 0.51 vol%였고, 메탄은 0.007 vol%, 일산화탄소는 0.20 vol% 이었다. 탄소 가우징봉에 비하여 수소와 메탄은 높게 측정되었고 일산화탄소는 낮게 측정되었다. 고농도 산소를 사용하는 산소 절단법의 특성으로 인하여 세 가연성 가스 모두 폭발하한계 미만으로 측정되었다.

〈표 III-7〉 초고온 절단봉 수중 용단 후 발생 가스 조성비

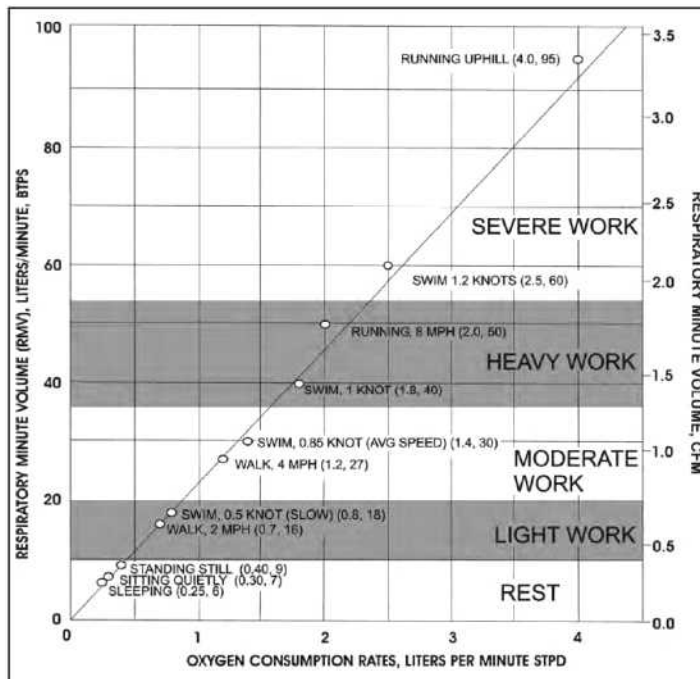
[단위: %]

가스 종류	평균	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4	시료5
수소	0.51	0.42	0.51	0.53	0.56	0.51
산소	95.48	88.23	93.98	98.63	98.37	98.21
질소	4.49	11.22	3.39	2.45	2.79	2.62
메탄	0.007	0.008	0.007	0.006	0.007	0.006
일산화탄소	0.20	0.20	0.22	0.22	0.15	0.21

2) 폭발 가능성

실험 결과 용접 또는 용단 시 산소가 공급되지 않는 피복아크용접봉을 이용할 때 가연성 가스의 발생량은 평균 분당 55.6 ㎖이었고, 수소와 일산화탄소의 조성비가 각 각 53.12 vol%, 40.16 vol%이었으므로 수소발생량은 분당 평균 29.53 ㎖, 일산화탄소의 발생량은 분당 평균 22.33 ㎖로 추정할 수 있었다. 에르망의 실험에서 관찰된 바와 같이 발생한 가연성 가스는 잠수 잠수작업자가 내쉬는 공기의 일부 또는 전부와 혼합될 수 있고, 잠수작업자 날숨의 일부가 연소가스와 혼합될 경우 가연성 가스의 비율이 폭발하한계를 초과하여 유지될 수 있으므로, 용접·용단 시 아크와 만나 폭발을 일으킬 위험이 존재하게 된다.

수중 용접 시 모재를 이동시키고 맞출 때 모재의 중량에 따라 고강도 작업으로 분류될 수 있으나, 취부를 완료한 후 용접을 할 때는 고도의 집중력이 요구되지만 고강도 신체활동이 필요하지 않으므로 쉬운 작업(light work) 또는 보통 작업(moderate work)의 호흡량과 유사하다. 개인별로 차이는 있으나 해당 작업으로 인한 호흡량은 [그림 III-1]에서 보는 바와 같다.



[그림 III-1] 분당 호흡량과 산소 소비량

잠수작업자의 호흡량을 분당 9~23 리터로 가정하여 잠수작업자가 호흡한 모든 공기가 용접 중 발생한 연소 가스와 혼합되었을 때 수소의 비율은 0.13~0.33 vol%로 폭발하한계 이하였다. 폭발하한계 4%를 초과하기 위해서는 분당 0.68리터 이하의 압축공기와 혼합되어야 하는데 이는 잠수작업자가 사용하는 분당 압축공기의 약 2.97~7.59 vol% 미만이었다.

〈표 III-8〉 호흡기체-가연성 가스 혼합 시 수소 비율

활동 형태*	분당 호흡량* (l/min)	작업 강도*	수소 비율(%)
가만히 서 있을 때	9	휴식	0.33
천천히 걸을 때	13	쉬운 작업	0.23
시속 3.2km	16	쉬운 작업	0.18
0.5노트 속도로 수영	18	쉬운 작업	0.16
진흙 위를 걸을 때	23	보통 작업	0.13

* 출처: 미국해양기상청 잠수매뉴얼 6th Edition, 2017

국내에서 사용되는 탄소 가우징봉의 가연성 가스 발생 실험에서 전기분해 시 가연성 가스의 발생량은 전극봉 1개당 861 ml이나, 다량의 산소를 사용하는 용단 시 수소, 메탄, 일산화탄소 등 가연성 가스의 조성비는 모두 폭발하한계 미만이었다. 그럼에도 불구하고 간간히 발생하는 수중 폭발사고에 대하여 수소 외의 다른 가연성 물질의 개입여부를 따져 보아야 한다고 주장이 있었고 (Hermans, 2019), 일본의 동일본 대지진 피해복구 작업 중 발생한 폭발재해는 생물 작용에 의한 메탄가스가 재해의 원인으로 거론된 바 있었다(JNIOH, 2016).

실험결과 다량의 고순도 산소를 사용하는 산소 아크 절단에서 발생량으로 추정한 수중 폭발의 가능성은 매우 낮았다. 피복아크용접봉을 이용한 절단에서 가연성 가스의 발생비율은 높았으나, 잠수사의 날숨과 혼합될 때 폭발하한계 미만을 확인할 수 있었다.

선행연구에서 밝혀진 바와 같이 압력증가 및 고순도 산소가 폭발하한계를 현저히 낮추지 않는다는 점과 수중 용단·용단 시 가연성 가스의 조성비가 폭발하한계 이하임에도 불구하고 작업 중 발생하는 수중 폭발은 산소와 수소의 선택적 불균등한 배출을 원인으로 추정할 수 있겠으나, 실험적으로나 실증적으로 아직 밝혀진 바 없다.

3. 가연성 가스 제거

1) 배기

(1) 불어내기 및 채우기(purging & flooding)

수중 용접·용단 대상물의 빈 공간이 있는 경우 공간의 발생 시기, 화학물질에 의한 오염 가능성, 생물작용 등에 따라 가연성 가스로 채워질 가능성이 있고 잠수작업자 신체의 일부를 물밖에 노출시켜 용접·용단할 경우 전격의 위험이 크므로 해당 공간을 메운 가스를 배출시키고 물로 채운다.

가스를 배출하여 빈 공간을 침수시켜 물로 대체하는 경우와 가스를 배출 하였음에도 불구하고 공기 공간이 물로 채워지지 않을 때는 펌프로 물을 주입 하여 공간 내·외부의 압력 차이를 해소함으로써 용단 시 절단면을 따라 발생할 압력에 의한 사고 위험을 제거할 수 있다.

빈 공간을 물로 완전히 채운 뒤 수심계측호스를 이용하여 공기를 분사한 후 기포의 이동경로 및 적체지역을 찾아 배기구 또는 강제 배출 등의 후속 조치를 구상한다. 다만, 빈 공간에 물을 채우면 구조물의 부력에 변화가 생길 수 있으므로 주의한다.

물 대신 불활성 기체로 치환할 수 있다. 사용 가능한 불활성 기체는 질소, 이산화탄소, 아르곤 등이며 단순 치환 시 현재 부력을 유지할 수 있으나, 불활성 기체의 공급량이 치환량을 초과하여 부력이 증가하면 구조물이 수면 위로 부상하여 잠수작업자는 동맥혈 공기색전증의 위험에 노출될 수 있고, 작업에 동원된 선박은 구조물과 충돌하여 침몰될 위험이 있으므로 주의해야 한다.

(2) 자연배기

수중 용접·용단 중 발생한 기체를 수면으로 배출하기 위한 방법으로 가스가

이동하여 적체될 장소의 가장 높은 위치에 다수의 구멍을 뚫어 가스를 배출함으로써 가스 적체로 낮아질 수 있는 수위를 유지하여 전극봉 아크 및 불꽃의 비산을 막아 가연성 가스의 착화를 예방할 수 있다. 자연배기를 위한 배기구 청공은 가장 일반적이고 검증된 수중 폭발 예방법이지만 배기구를 뚫었음에도 불구하고 폭발재해가 발생한 사례도 있었다. 해당 사례는 배기구를 뚫는 방법 및 위치, 구조물에 형상(예) H-형강)에 따라 배기가 불량하여 발생한 사고로 볼 수 있다. 따라서 안전한 배기를 위하여 뚫는 방법과 위치 및 구조물이나 모재의 형상을 검토하여야 한다.

배기구를 뚫는 곳은 절단 대상인 모재의 반대편에서 움직이는 가스의 이동 경로가 예측 가능한 구조물에 한하여 적용가능하다. 수중의 배관을 자를 때는 가장 높은 곳에 배기구를 뚫고 강재를 수직으로 자를 때는 절단부의 가장 높은 곳에 배기구를 뚫는다. 배기구를 뚫고 난 후에는 반드시 잠수사가 지닌 수심 계측 호스로 기포를 분사하여 기포의 이동경로와 의도한 만큼 충분히 기체가 배출되는지 확인해야 한다.

절단면 반대편의 가스 경로를 예측할 수 없는 수평재는 배기가 충분하지 않을 수 있으므로 배기구를 뚫고 난 뒤에 반드시 기포를 배기구 반대편으로 넣고 배출여부를 확인한다. 배출효과가 충분하지 않거나, 확인이 불가하여 배출효과가 의심스러운 때는 기계적인 절단방법으로 변경한다.

(3) 강제 배기

흡입법(suction method)은 에어 리프트(air lift)를 이용하여 용단 시 발생하는 기포를 끌어당겨 흡인한 뒤 발생원 외벽으로 배출하여 작업 중 발생하는 가스가 적체되기 전에 강제로 배기함으로써 폭발의 원인이 되는 가연물을 사전에 제거하는 방법이다.

에어 리프트는 고압의 공기를 배관 안으로 분사하여 배관 내 유체의 속도를 높이고 유속의 증가에 따른 압력저하로 발생한 흡입효과로 비교적 가벼운 물체를 제거하기 위한 수단으로 사용되는 수중 공사용 장비이다. 이 같은

원리는 기체를 포획하여 수면으로 배출하고 공급되는 기체로 인한 시야방해가 없어 작업에 방해되지 않고 경제적으로 매우 저렴하다. 그러나 포집범위가 매우 짧고, 효과를 높이기 위해 포집배관의 직경이 커야 하며 가스의 적체 위치 또는 가스 이동경로를 사전에 파악하여 설치해야 하고 포집구의 위치가 적합하지 못한 경우 가스 배출의 효과를 기대하기 어려운 단점이 있다.

2) 급기

가연성 가스에 질소, 이산화탄소, 아르곤 같은 불활성 기체를 공급하여 불활성 기체의 비율을 폭발하한계 아래로 유지하기 위한 방법이다.

앞서 검토한 바와 같이 용접 시 잠수작업자의 날숨과 혼합되었을 때 수소는 폭발하한계 이하가 된다. 불활성기체는 산소를 차단하여 화재의 위험을 줄일 수는 있으나, 용단을 위해 고순도 산소를 사용하므로 산소를 완전히 차단하는 수단이 될 수 없고, 비용 상승으로 인하여 국내 산업현장에서 급기를 통해 수중 폭발 위험을 낮추고자 할 때는 압축공기를 이용하여 충분한 양의 공기를 공급 하되 반드시 잠수작업자의 호흡기가 아닌 다른 압축기를 공급원으로 사용한다. 잠수작업자가 사용하는 호흡용 기체를 동시에 사용할 경우 급기용 호스로 공급되는 양이 증가하면 잠수작업자에게 공급되는 공기량은 순간적으로 줄어들어 질식과 익사의 위험이 증가하므로 주의한다.

급기에 적용할 압축공기의 양은 용단 시 국제해양공사협회에서 제시하는 산소의 공급량과 동일한 $1.98 \text{ m}^3(70 \text{ ft}^3)$ 이상으로 한다. 급기는 가스의 정확한 체적 위치를 알지 못할 때 사용되고 잠수작업자의 반대편에도 적용할 수 있으나, 기포가 작업자에게 향할 경우 작업에 어려움이 있고 가연성 기체를 제외한 기체가 선택적으로 불완전하게 배기될 경우 폭발의 위험이 있다. 가연성 가스의 발생 비율이 폭발하한계보다 매우 낮음에도 불구하고 수중 폭발로 인한 사망 사례는 단순히 발생량의 비율만으로 수중 폭발재해를 예방할 수 없다는 사실을 예시하므로 적용에 주의가 필요하다.

IV. 고찰

.....

IV. 고찰

수중 용접·용단 중 모재와 잠수작업자가 물에 잠기는 습식 용접·용단은 물속의 금속 구조물을 제거하거나 유지보수하기 위한 가장 경제적인 방법 중 하나이나 전류가 높고 전기로 분해된 수소 등의 폭발 위험으로 인하여 높은 수준의 안전대책을 필요로 한다.

수중 용접·용단 중 발생하는 수소는 폭발위험이 큰 가연성 기체로 알려져 있다. 비록 선행연구와 이번 실험을 통하여 용단 중 발생하는 수소의 발생량은 용단 중 사용되는 고순도 산소에 의해 폭발하한계 미만으로 측정되었으나, 작업 중 수중 폭발 사고는 발생하고 있다. 가연성 가스의 배출을 위해 배출구를 뚫고 작업하던 중 폭발사고가 발생하는 경우 작업 중 발생한 가연성 가스 외 이미 생성되어 적체된 가연성 가스도 원인으로 지목되기도 하였으나, 불충분한 가스의 배출이 폭발의 원인으로 추정되기도 한다.

가연성 가스의 효율적 배출을 위하여 배출구를 확보한 자연 배기 또는 확보한 배출구와 가스의 이동 경로에 에어 리프트를 설치하여 강제 배기하는 등의 방법이 적용되기도 하며, 가스의 이동 또는 적체 경로를 알지 못할 때 급기하여 가연성 가스의 농도를 폭발하한계 이하로 유지하는 방법도 있었다. 다만, 급기에 의한 방법은 선택적 불완전 배출로 인하여 가연성 가스의 농도가 폭발하한계 이상이 될 가능성이 있으므로 완전한 안전대책으로 볼 수 없었다.

특히 아래보기 절단과 같은 작업에서 절단면 반대편을 확인할 수 없을 때에는 수중 용단이 아닌 기계·기구를 이용한 절단법을 적용하여 잠수작업자 안전을 도모하고 재해발생으로 인한 손실비용을 절감할 수 있는 방안을 도입할 필요가 있다.

수중 용접·용단 작업 시 필요한 안전조치와 시트 파일, 침몰선박의 내장재 등 용단 작업 중 폭발 위험이 큰 작업에 대한 조치는 아래와 같다. 해당 안전 조치는 일반적인 사항이며, 작업 환경과 조건에 따라 적용할 안전조치가 다름에

따라 수중 용접·용단 작업 전 반드시 위험성평가를 수행해야 한다.

1. 안전조치

1) 일반사항

(1) 개인보호구

잠수작업자는 전격방지를 위한 보호구를 착용하여야 한다. 잠수복은 고무로 된 것이거나 수밀성이 우수한 건식 잠수복을 권장한다. 장갑은 절연성이 우수한 장갑을 착용하되 날카롭거나 거친 물체와 접촉하여 손상될 수 있으므로 절연 장갑만으로 손상을 방지할 수 없을 때에는 보호 장갑을 다시 착용한다. 전격에 대비하여 머리가 젖지 않도록 잠수헬멧을 착용해야 한다.

(2) 비말대(splash zone)

잠수작업자의 몸이 물속에 완전히 잠기지 않는 곳에서 전기를 이용하여 용접·용단을 할 경우 전격의 위험이 매우 크다. 파도가 구조물에 부딪혀 물방울이 튀어 오르는 비말대는 전기가 통하는 최단거리에 잠수작업자의 신체 일부가 노출될 수 있으므로 반드시 절연성이 우수한 보호구를 전신에 착용해야 한다.

(3) 차광 유리

잠수작업자는 용접·용단 아크에서 발생하는 빛으로부터 눈을 보호하기 위하여 적절한 차광도를 가진 차광유리(filter shade)를 사용해야 한다. 차광도가 적정 범위 미만이거나 초과하는 경우 용접부나 절단부의 용융지(molten pool) 확인이 불가하여 작업수행에 어려움이 있으며, 잠수작업자의 눈에 손상을 유발하므로 아래의 표를 참조하여 적절한 차광유리를 선정한다.

〈표 IV-1〉 피복아크용접(SMAW) 전류별 차광유리 번호

전류(A) 규격	30	60	75	160	200	250	400	550
KS P 8142	5,6	7,8	9,10,11	12,13	14			
ANSI Z49.1			10	12	14			

〈표 IV-2〉 탄소 아크 에어 가우징(CAC-A) 전류별 차광유리 번호

전류(A) 규격	125	175	225	280	350	500	1000
KS P 8142		10, 11	12, 13	14, 15, 16			
ANSI Z49.1			12			14	

〈표 IV-3〉 산소절단 전류별 차광유리 번호

전류(A) 규격	25	150
KS P 8142	-	-
ANSI Z49.1	3, 4	4, 5

공기 중 작업과는 달리 수중 작업을 할 때는 물에 투과된 자연광, 잠수작업자의 수중 조명, 물의 탁도 등에 영향을 받으므로 위의 규격에서 권장하는 차광유리가 반드시 적합하다고 볼 수는 없다. 따라서 적절한 차광도를 지닌 유리를 선정할 때는 가장 어두운 것을 먼저 사용하고 밝은 것으로 교체하면서 적절한 차광유리를 고른다(미국용접협회, 2021).

만약 차광도가 큰 값의 유리가 없을 때는 아래의 산식을 참고하여 두 개의 차광유리를 조합해서 사용할 수 있다(한국산업표준협회, 2012).

〈표 IV-4〉 차광유리 2매 조합 시 환산식

$$N = (n1 + n2) - 1$$

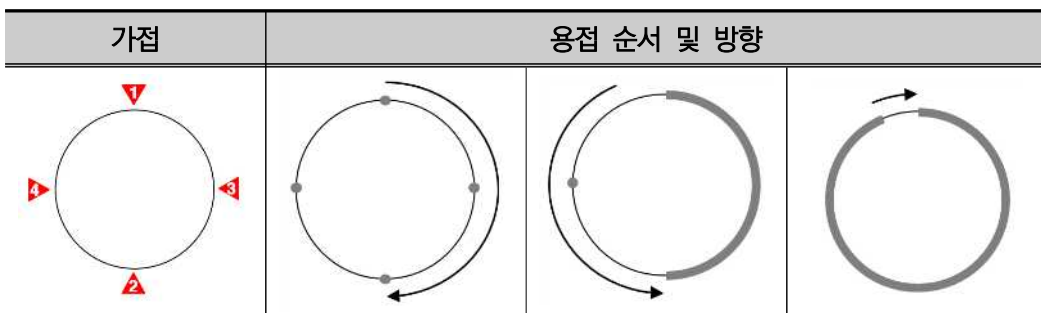
이 때, N: 차광유리 1매를 사용할 때 필요한 차광도 번호
 n1, n2: 2매 각각의 차광도 번호

*출처: KS P 8142 , p.12, 2012

(3) 작업 순서

수직면을 용단할 때에는 위에서 아래로 자른다. 아래쪽으로 자르면 용융부 주위에서 발생하는 가연성 가스가 용단된 공간으로 배출될 수 있기 때문이다.

수평으로 놓인 배관을 용접할 때는 배관 단면에서 수면에서 가까운 쪽을 12시 방향이라 하면, 12시, 6시, 3시, 9시 지점을 가접한 후 12시 방향에서 6시 방향으로 절반을 용접하고 가스 배출을 위해 11시 방향에서 6시 방향으로 용접한 다음 11시에서 12시 방향으로 용접한다.



[그림 IV-1] 배관 수중 용접 방향 및 순서

(4) 절단물 낙하 방지

절단물이 크고 무거운 때는 용단 후 낙하하여 잠수작업자가 다칠 수 있고 잠수작업자나 생명줄이 절단물에 깔려 더 깊은 수심으로 추락하거나 상승하지

못할 수 있기 때문에 절단 후 낙하 방지를 위한 조치를 취해야 한다. 낙하 방지를 위하여 선박의 크레인 등에 고정할 수 있으나 파도, 너울 등으로 선박의 상하 거동(heave)이 있을 때는 위험이 오히려 증가할 수 있으므로 수중 구조물을 이용한다.

2) 전기 안전

수중 용접·용단을 할 때는 전격의 위험이 교류 전기에 비해 상대적으로 적은 직류 전기를 사용한다. 직류 전기를 이용할 때에는 모재에 양극(+)을 전극봉에 음극(-)을 연결하여 모재에 열 배분율을 높게 하여 용접이나 용단을 효율적이게 한다. 용접·용단을 위한 발전기의 전극은 음극과 양극이 표시되어 있으나 산업현장에서 표시가 불분명한 경우 수중 작업 전 반드시 극성을 확인해야 하며 그 방법은 다음과 같다.

〈표 IV-5〉 용접·용단기 전극 확인 방법 및 절차

-
- 전원을 차단하고 용접 케이블과 그라운드 케이블을 전극에 연결한다.
 - 그라운드 클램프에 금속편을 연결하고 토치에 전극봉을 끼운다.
 - 금속편과 전극봉을 소금물을 담은 물통에 넣고 약 50 mm 거리를 둔다.
 - 통전 후 전극봉의 끝에서 기포가 발생하면 음극(-)에 연결된 상태이다.
 - 통전 후 금속편에서 기포가 발생하면 전원을 끄고 케이블 전극을 바꾼다.
 - 케이블을 전극에 단단히 고정한다.
-

* 출처: IMCA D003 Guidelines for Oxy-Arc Cutting Rev 1. 2011.

직류 전기를 사용함에도 불구하고 150 암페어 이상의 높은 전류를 사용함에 따라 전격의 위험은 항상 있으므로, 잠수작업자는 모재에 접지한 그라운드(+)와 전극봉(-) 사이에서 작업하지 않도록 그라운드의 위치를 조정한다.

수중 용접·용단 용 전극봉은 그 종류에 따라 전류 요구사항이 다르므로 용접·용단기의 사양은 사용할 전극봉의 사용 전류와 사용률에 따라 적절한

것을 선정해야 한다. 이 때, 전극봉 종류에 따른 전류는 사용률 100%에 해당하는 사항이므로 사용률이 60%인 용접·용단기를 사용할 때에는 사용 중 전류강화로 인하여 작업효율성이 현저히 저하되므로 주의한다.

〈표 IV-6〉 수중 용단용 전극봉 요구 전류

	초고온 절단봉	강철관 절단봉	탄소 가우징봉
전류(A)	150	400	600

* 출처: 제조사 및 USN Underwater Welding and Cutting Manual. 2002

3) 산소 공급

국제해양공사협회(IMCA)는 수중 용단에 사용되는 산소의 순도는 99.5% 이상일 것을 요구한다. 국내 의료용 산소의 순도와 동일한 기준을 요구하는 이유는 산소의 순도가 낮아질수록 발열반응에 의해 생성되는 열에너지가 감소하여 모재가 상대적으로 덜 녹아서 용단의 효율성이 저하되기 때문이다. 미 해군이 권장하는 산소의 압력은 아래의 표와 같으며, 유량은 분당 약 1.98 m³ 이상을 권장하며 작업자 개인별 특성에 따라 증감될 수 있다.

〈표 IV-7〉 호스 길이와 산소 공급압력

압력	용단용 산소공급압력
bar	호스길이(m) ÷ 44.7 + (0.1 × 수심(m)) + 6.21 bar
psi	호스길이(ft) ÷ 10 + (0.445 × 수심(ft)) + 90 psi

* 출처: USN Underwater Welding and Cutting Manual. 2002

4) 용접·용단 케이블

일반적으로 용접·용단 케이블은 연선을 사용한다. 국내에서는 국제전기기술

위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)의 국제표준을 수용하여 「KS C IEC 60974-1 아크 용접 설비 - 제1부: 용접전원」에서 정한 기준에 따른다. 해당 규격에 따라 국내에서 생산되는 케이블의 규격은 단면적(SQ, mm²)으로 표기되는 한편, 미국에서 생산된 케이블은 AWG⁶⁾나 NEC⁷⁾ 규격에 따른다. 미 해군 수중 용접·용단 매뉴얼에 따르면, 수심 약 30미터에서 AWG 2/0 케이블을 사용하며 30미터 증가할 때마다 한 단계 상위의 케이블을 사용한다. AWG 4/0 보다 굵은 케이블은 별도의 표기가 없어 NEC 규격인 MCM⁸⁾로 표시한다.

〈표 IV-8〉 용접·용단 케이블 규격별 상호 참조

수심(m)	국내(SQ)	AWG	수심	국내(SQ)	NEC
30	70	2/0	90	120	250 MCM
60	95	3/0	120	150	350 MCM

* 출처: KS C IEC 60974-1:2014 아크 용접 설비 - 제1부: 용접전원

KS C IEC 60974-1에서 미국 규격에 따른 케이블의 상호 참조를 〈표 IV-8〉과 같이 제시하였다. 다만, 규격의 차이로 인하여 단위 간 환산수치는 서로 맞지 않음에 유의한다. 미국 해군 매뉴얼에 따르면 수심 90 미터에서 작업할 때에는 AWG 4/0 케이블을 사용할 수 있으나, 한국산업표준에 따르면 그에 대응하는 107 mm²와 보다 같거나 큰 단면적을 지닌 케이블 중 가장 유사한 단면적을 지닌 케이블은 120 SQ 뿐이다. 250 MCM의 단면적은 126 mm²로 120 SQ 케이블의 단면적보다 크다. 따라서 〈표 IV-8〉은 각 표준이 채택한 단위 간 환산이 아닌 기준 케이블을 대체하여 사용할 수 있는 성능이 같거나 우수한 케이블을 “참조”하기 위한 수단임에 유의한다.

6) American Wire Gauge

7) National Electric Code

8) 지름이 천분의 1인치 약 0.0254mm인 원에 해당하는 면적을 1CM(circular mil)이라 하고, MCM은 1CM의 1,000배에 해당한다.

5) 대체 절단법

(1) 기계식 절단

폭발 재해를 방지하기 위한 방법으로 가장 우선적으로 고려할 사항은 가연성 가스를 생성하지 않는 절단방법의 적용 가능성 유무이다. 기계식 절단장치는 유압 또는 직류전기를 이용한 드릴, 그라인더, 다이아몬드 와이어 톱, 유압 전단기, 고압 워터 제트 등이 있다.

드릴(전기)	그라인더(유압)	전단기(유압)	다이아몬드 와이어 톱
			

* 출처: 제조사

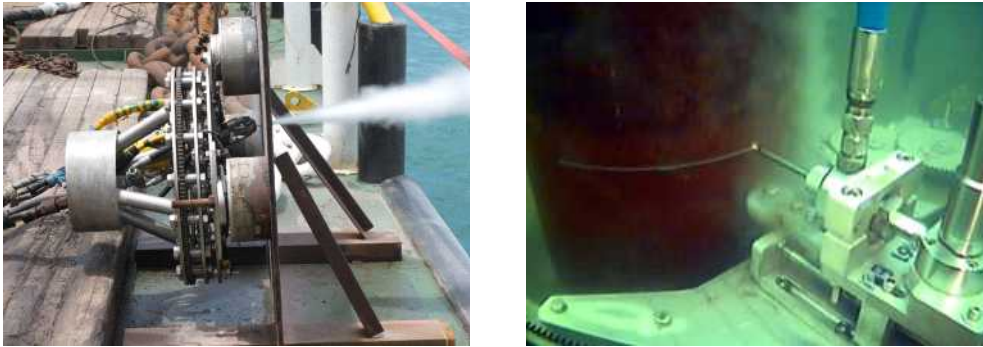
[그림 IV-2] 수중 절단용 기계식 장치의 예

다이아몬드 와이어 톱이나 유압 전단기 등은 해저 배관, 강관 파일, 해상 재킷과 같이 관형 구조물에 적용되며 평면 구조물 등에 적합하지 않는 등 절단물의 형상에 따른 제약이 있다.

유압 드릴과 그라인더는 비교적 소형으로 잠수작업자가 직접 사용할 수 있다. 다만, 유압을 구동하기 위한 설비가 별도로 필요하고 기기에 유압 호스가 연결되므로 조류에 영향을 받는다. 따라서 작업 전 조류의 영향을 상쇄할 조치가 우선되어야 한다.

전기충전식 드릴 또는 그라인더는 충전식 배터리로 구동되므로 유압 호스와 같이 조류의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 다만, 배터리 용량에 따라 출력과 사용시간 및 수심에 제약이 있다.

아래의 그림은 연마제를 고압의 워터제트로 분사하여 배관을 절단하는 장치의 예이다.



* 출처: <http://www.deco-diving.com>(왼쪽), <http://www.oedigital.com>(오른쪽)

[그림 IV-3] 수중 워터제트 절단기의 예

시트 파일, 침몰선박의 강재 출입문이나 샌드위치 패널 등을 절단할 때와 같이 작업 면이 수직이고 절단면 반대편에 공극이 있어 가스가 적체될 위험이 있을 때는 수중 용단보다 기계식 절단을 고려해야 한다. 다만, 기계식 절단이 수중 용단에 비해 폭발의 위험이 매우 낮을 뿐 폭발가능성이 전무한 것은 아니므로 주의한다.

배출구는 용접·용단 중 생성된 가연성 가스와 산소가 수면으로 배출되지 않고 적체되는 현상을 방지하기 위한 수단이다. 배출구는 가스가 모이는 장소의 가장 위쪽에 다수의 구멍을 뚫어 가연성 가스를 배출하고 가스 적체의 위험성이 있는 공간의 수위를 일정하게 유지하여 용접·용단 시 발생하는 불꽃을 수면 아래에 유지시킴으로써 착화를 차단한다.

배출구의 위치가 적당하지 않거나 직경이 작거나 수량이 부족할 때는 불완전한 배출로 인하여 폭발재해의 기여 원인으로 작용할 수 있다. 특히, 절단면이 수평면이고 아래보기인 경우 배출구를 뚫어도 가스의 움직임을 파악할 수

없으므로 선택적 불완전 배출이 되기 쉽다.

배출구를 뚫을 때는 용단용 전극봉보다 기계식 장비의 활용을 고려해야 한다. 물속에 장시간 있었던 구조물은 생물작용에 의한 메탄 등의 가연성 가스가 적체될 위험이 있고, 시트파일, 이중 격벽 등은 작업 면 반대편이 공극인 상태일 수 있다. 공극인 경우 작업자의 현재 위치와 작업물 반대편의 압력차이가 있으면 위험은 더욱 커진다. 국제공사업협의회(IMCA)는 용단 장비로 배출구를 뚫을지에 대하여 전문가의 의견을 듣도록 하고 있다.

배출구를 뚫은 후에는 잠수작업자의 작업수심을 측정하기 위한 측심호스(pneumo hose)를 이용하여 압축공기를 분사하여 기포의 이동경로와 배출 효과를 확인해야 한다.

2. 제한점

수중 용접·용단 선행연구와 달리 국내에서 자주 사용되는 탄소 가우징봉의 가연성 가스 발생량을 실험적으로 규명한 이번 연구의 제한점은 다음과 같다.

- 용접·용단은 수행자의 특성이 반영되는 작업인데 용접·용단 실험자가 연구자 1인이었으므로 다양한 작업자로 구성된 현실적인 데이터를 얻지 못한 점
- 용단용 토치의 노후화로 인하여 토치와 전극봉의 접촉면에서 가연성 가스가 발생한 점
- 지구 온난화의 영향으로 해수의 염도가 매년 감소하고 있으며, 해수와 담수가 섞이는 기수역은 염도가 현저히 낮으나 염도별 가스의 발생량을 측정하지 못한 점
- 용접봉 실험에서 폭발한계내의 가연성 가스는 수소와 일산화탄소였으나, 실험시설 부족과 안전상의 이유로 두 기체의 조성에 따른 폭발실험을 하지 못한 점

- 에어 리프트를 이용하여 작동압력별, 직경별 가스 제거 용량 등을 실험적으로 파악하지 못한 점

선행연구와 이번 실험에서 용단용 전극봉의 가연성 가스 발생량은 고순도 산소의 공급량으로 인해 폭발하한계보다 매우 낮았다. 그럼에도 불구하고 수중 용접·용단 작업 중 폭발사고는 여전히 발생하고 있으므로 이번 실험으로 확인된 가연성 기체 발생량이 폭발하한계 이하인 점이 수중 폭발재해와 무관함을 증명하는 것으로 오해되지 않아야 한다.

오히려 가스 배출이 충분하지 못한 상황에서 조성비가 높은 산소가 선택적으로 배출됨에 따라 가연성 가스가 폭발하한계를 상회할 가능성을 의심해 볼 수 있으나, 이번 연구에서 가스의 선택적 배출에 대하여 확인하지 못한 한계가 있어 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

V. 결론

.....

V. 결론

국내에서 사용하는 수중 절단봉은 수중용 탄소 가우징봉이다. 수중용 탄소 가우징봉은 해외에서 사용되는 초고온 절단봉에 비해 가격이 저렴하고, 전극봉 한 개당 연소시간이 약 4배 길어 전극봉의 교체 주기가 상대적으로 길다. 이러한 점은 교체 시 가연성 가스의 적체를 확인할 수 있는 기회 빈도가 감소하여 수중폭발 위험의 증가를 뜻하나, 수중용 탄소 가우징봉에 대한 숙련도가 높은 잠수작업자들은 장시간 교체 없이 사용할 수 있다는 점을 탄소 가우징봉의 장점으로 인식함에 따라 수중 폭발 위험 요인의 하나로 작용한다.

산업잠수업체는 수중 용접·용단 시 사고의 원인을 물의 전기분해로 생성된 수소나 수중에 생성된 빈 공간에 갇힌 메탄과 같은 탄화수소 가스가 아크 또는 비산 불꽃에 의해 점화되어 발생하는 것으로 보고 있다. 수중 용접·용단 시 발생하는 가연성 가스의 종류는 수소, 메탄, 일산화탄소였다. 수소는 전기분해에 의해 발생하고, 메탄은 수중 미생물 작용이나 용단 중 발생한 이산화탄소의 메탄화에 의해 발생하며, 일산화탄소는 불완전연소에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 이산화탄소 또는 일산화탄소의 탄소는 용접·용단의 모재인 탄소강에서 비롯되나, 수중용 가우징봉은 탄소로 만들어져 초고온 절단봉에 비해 상대적으로 많은 이산화탄소 또는 일산화탄소가 생성될 것으로 추정되었다.

수소가 공기와 혼합되었을 때 폭발범위는 4.0~74.0 vol% 로 알려져 있으나 77.0 vol%로 상향해야 하는 증거를 제시한 연구도 있었다(하동명, 2008). 수소가 산소와 혼합되었을 때는 폭발상한계는 4.0~95.2 mol%이었고 20 bar 까지 압력이 상승할 때 폭발하한계는 상승하고 폭발상한계는 감소하였다가, 20 bar를 초과하면 폭발상한계가 다시 증가하였다(Schroeder, 2005). 일산화탄소의 폭발범위는 12.5~74.0 vol%, 메탄의 폭발범위는 5.0~15.0 vol%로 알려져 있다.

전기분해 실험에서 음극에서 대량의 기포가 발생하였으나 양극에서 발생하는 기포는 발견하지 못했다. 용접 후 포집한 연소가스에서 53 vol% 이상의 수소와 40 vol% 이상의 일산화탄소를 확인하였으나 가만히 서 있는 잠수작업자의 호흡량 분당 9ℓ의 공기와 혼합될 경우 수소의 비율은 0.33 vol%로 수소의 폭발하한계 미만이었다. 초고온 절단봉과 수중용 탄소 가우징봉을 이용한 용단에서 수소의 비율은 0.56 vol% 이하였으며, 일산화탄소 비율은 0.30 vol% 이하로 측정되어 폭발하한계 미만이었다. 용접·용단 이전에 적체된 가연성 가스의 착화에 의한 폭발을 제외하면 수중 폭발은 용접·용단 시 다량의 산소가 수면으로 배출되고 가연성 가스가 축적되는 선택적 불균등 배기로 인하여 발생하는 것으로 추정된다.

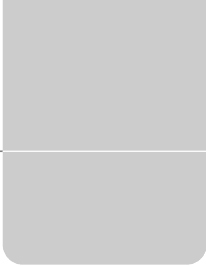
가연성 가스 배출을 위한 구멍을 뚫을 때는 천공을 위한 공간이 물로 채워지지 않은 빈 공간인 경우 가연성 가스 적체 가능성을 고려하여 전극봉이 아닌 드릴을 이용하여 천공한다. H 형강과 같이 절단 중 가연성 기체가 배출되지 않고 형강의 형상에 따라 수평면으로 널리 분포할 위험이 있는 곳은 측심 호스(pneumo hose)를 이용하여 가스의 이동경로나 적체 상황을 파악한 후 에어 리프트를 설치하여 강제 배기할 필요가 있다. 아래보기 용단과 같이 가스의 적체 지역이나 이동 경로를 파악할 수 없을 때는 급기를 통한 희석을 고려할 수 있으나, 선택적 불균등 배기로 인한 폭발의 가능성은 여전히 남아 있으므로 기계식 절단(cold cut)으로 대체한다.

용접·용단 시 잠수작업자의 호흡량, 용단 중 사용되는 산소에 의해 가연성 가스의 발생량은 폭발하한계 미만임을 확인하였으나, 수중 폭발 재해는 반복적으로 발생하므로 수중 폭발의 원인을 추정할 때는 발생한 가스 중 가연성 가스의 비율이 아니라 적체된 가스 중 가연성 가스의 비율로 확인해야 할 필요가 있다.

참고문헌

- 산업표준심의회. KS P 8141:2012 ⊗ 차광 보호구. 산업표준심의회. 2012.
- 하동명. 안전한 수소 이용을 위한 연소특성치 고찰. 한국가스학회지. 2008.
- American Welding Society. ANSI Z49.1:2021 Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes. AWS. 2021.
- American Welding Society. Welding Handbook, Welding Process Part 1, 9th Edition. AWS. 2003.
- Fujita S, Nakamura M, Doi, T, Takezawa N, Mechanisms of methanation of carbon monoxide over nickel/alumina catalysts, Applied Catalysis A: General, 104(1), October 1993, Page 87-100. doi: 10.1016/0926-860X(93) 80212-9
- Funk JK, Thermochemical hydrogen production: past and present, International Journal of Hydrogen Energy 26(3) 185-190, doi:10.1016/50360-3199(00)00062-8, 2001.
- Guerra L. Rossi S, Rodrigues J, et al, Methane production by a combined Sabatier reaction/water electrolysis process, Journal of Environmental Chemical Engineering 6, 671-676, 2018.
- Hermans F. Explosiveness of the underwater residual cutting gasses Part 1 Fresh water. 2019.
- Hermans F. Hydrogen production in underwater cutting and welding. 2019.
- Hermans F. Survey and Analysis of the Hazards and Risks Knowledge from the Underwater Electrical Cutting. 2015.

- International Marine Contractors Association. D003 Guideline for Oxy-Arc Cutting Rev 1. International Marine Contractors Association. 2011.
- Lillo RS, Caldwell JM. Analysis of gases produced by three underwater cutting devices, Navy Experimental Diving Unit. 2003.
- Schroeder V, Holtappels K. Explosion Characteristics of Hydrogen-Air and Hydrogen-Oxygen Mixtures at Elevated Pressure. 2005.
- United States Navy. U.S. Navy Underwater Cutting & Welding Manual. 1989.
- Zavetakis M. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, Bureau of Mines. 1924.
- 労働安全衛生総合研究所(JNIOH), 防波堤の東日本震災復旧工事中に発生した水中暴発災害, 2016. Available at http://www.jniosh.johas.go.jp/publication/pdf/saigai_houkoku_2016_06.pdf#zoom=100



Abstract

A study on the prevention of underwater explosion caused by flammable gases produced during wet welding and burning

Objectives: The study was intended to identify concentration of flammable gases produced by electrolysis during wet welding and burning.

Method: Underwater welding and burning electrodes were connected to a DC generator. The gases from electrodes during wet welding and underwater burning were collected and analysed with the gas chromatography, GC-2010 plus.

Results: Hydrogen, carbon monoxide, methane were detected. Analysis showed that 53.12% hydrogen, 40.16% carbon monoxide, and 0.69% methane were generated during wet welding. However, the concentration of flammable gases produced during underwater burning were far below lower explosion limit of each gas due to a large amount of oxygen supplied for exothermic effect.

Conclusion: Although the test results shows lower concentration of flammable gases below LEL, underwater explosion of the flammable gases has been reported and shall not be underestimated. Explosion

could be caused by insufficient ventilation of the gases or flammable gases that trapped before burning. Extra caution must be taken before wet welding or burning is executed.

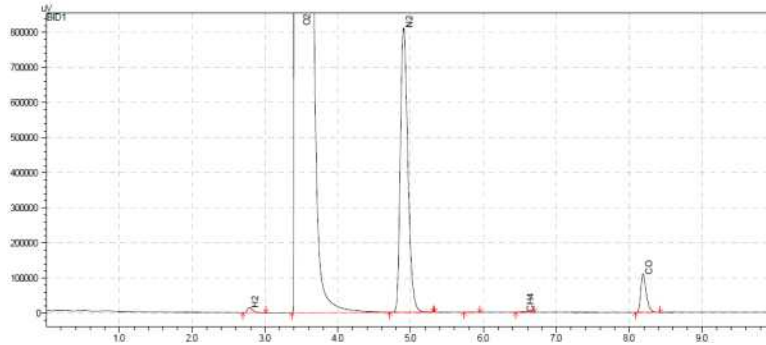
Key words: underwater explosion, wet welding, burning

부 록

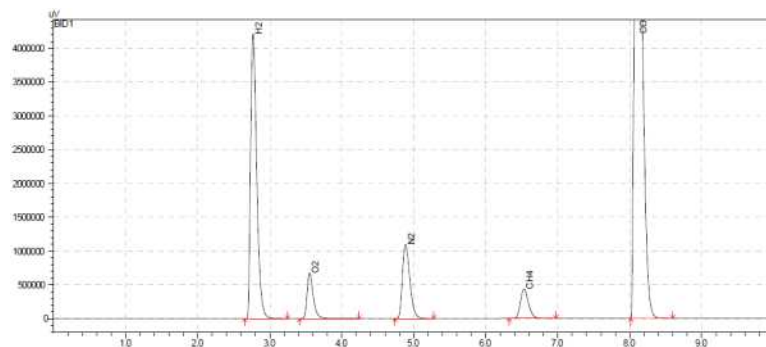
부록 1: 분석 조건 및 방법

구 분	주 요 내 용
주요 기기	GC : GC-2010plus (Shimadzu) Column : HP-Molsieve (30m, 0.32mm, 25um, Agilent Tech.) Detector : BID-2010plus (Shimadzu) ※ BID : Barrier Discharge Ionization Detector
분석조건	Injector : 150°C, Split ratio : 20 Injection volume : 5~200 uL Carrier gas : He, Column flow : 1.06 mL/min Oven : 40°C(5min)-20°C/min-120°C(1min) BID : 260°C, Detector gas : 50 mL/min
머무름 시간	수소 : - 산소 : - 질소 : - 메탄 : - 일산화탄소 : -
시료희석 및 주입방법	- 테들러 백 시료에서 gas tight syringe를 이용하여 직접주입 - 고농도 시료의 경우 10~20배 희석하여 분석함(1리터 실린지로 고농도 시료 일정량(50~100 mL)을 취한 후, 실내공기로 1리터를 채운 후 새로운 테들러 백에 주입하여 분석용 시료로 사용함)
사용기구	Gas tight syringe #1001 (1000 uL, Hamilton Co.) Gas tight syringe #1810 (100 uL, Hamilton Co.) Gas tight syringe #1805 (50 uL, Hamilton Co.) Gas tight syringe Model S-1000 (1 L, Hamilton Co.) SKC Tedlar sample bag (CN 232-01, 1L, SKCinc.com)
표준가스 등	수소 50% LEL (N2 base, Uncertainty $\pm 2\%$, Gastron co.) 메탄 50% LEL (N2 base, Uncertainty $\pm 2\%$, Gastron co.) 일산화탄소 75 ppm (N2 base, Uncertainty $\pm 2\%$, Gastron co.) 산소 5% (N2 base, Uncertainty $\pm 2\%$, Gastron co.) 산소 및 질소 : 실내공기(산소 20.9%, 질소 78%)

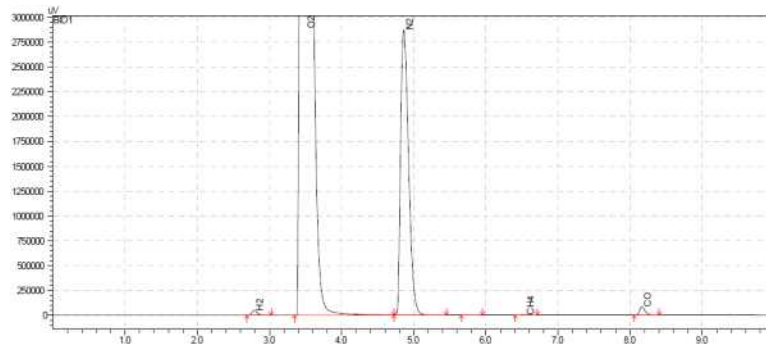
부록 2: 크로마토그램



가우징 시료 1

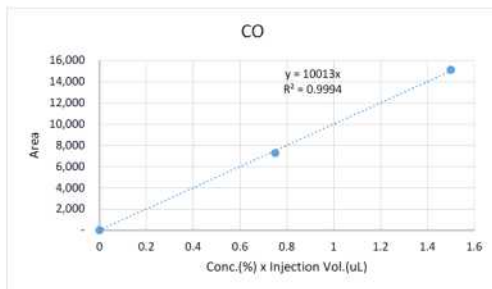
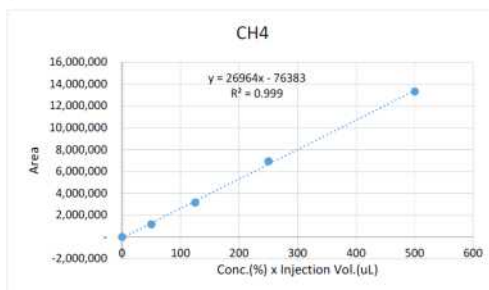
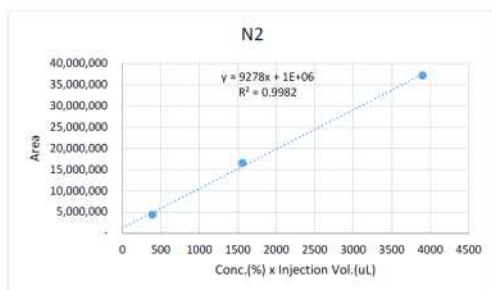
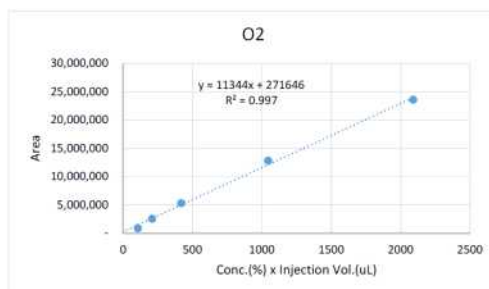
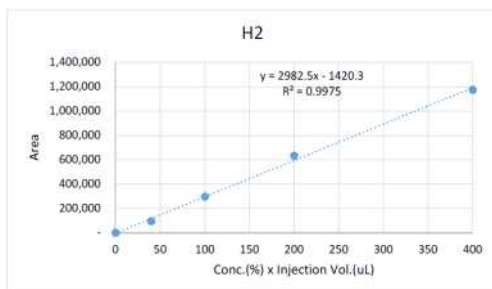


용접봉 시료 1



초고온 절단봉 시료 1

부록 3: 검량선



부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안)

KOSHA GUIDE

B - 000 - 2021

수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안)

2021. 00.

한국산업안전보건공단

부록 4: 수중 용단 안전작업 기술지침(안) (계속)

안전보건기술지침의 개요

- 작성자: 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 강준혁
- 제·개정 경과
 - 2021년 11월 산업안전일반분야 제정위원회 심의(제정)
- 관련규격 및 자료
 - 스쿠버용 압축공기 기준(SPS-KCLG7009-5353), 2014
 - DIN EN 15333-1:2008 Respiratory equipment - Open circuit umbilical supplied compressed gas diving apparatus - Part 1: Demand apparatus
 - Oxy-arc underwater cutting recommended practice, International Association of Oil & Gas Producers, 2012
 - IMCA D003 Guidelines for Oxy-Arc Cutting Rev 1, International Marine Contractor Association, 2011
 - Welding handbook - Welding Process Part 1, 9th Edition, American Welding Society, 2004
 - 수중 용단 시 가연성 가스 폭발재해 예방을 위한 안전방안 연구, 산업안전보건연구원, 2021
 - 용단 작업 시 화재예방에 관한 기술지침(F-1-2020), 산업안전보건공단, 2020
 - Hydrogen production in underwater cutting and welding, 2019
 - Explosiveness of the underwater residual cutting gasses Part 1 Fresh water, 2019
 - Influence of oxygen purity in underwater cutting, 2019
 - 재해조사보고서 - 동일본대지진 복구공사 중 발생한 수중폭발재해, JNIOOSH, 2016
 - Analysis of gases produced by three underwater cutting devices, Navy Experimental Diving Unit, 2003
 - U.S. Navy Underwater Cutting & Welding Manual, 2002
- 관련법규·규칙·고시 등
 - 산업안전보건법 시행규칙 제107조(안전인증대상기계등)
 - 산업안전보건기준에 관한 규칙 제5장 이상기압에 의한 건강장해의 예방
 - 위험기계·기구 안전인증 고시 제5장 압력용기
 - 고기압 작업에 관한 기준
- 기술지침의 적용 및 문의
 - 이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지(www.kosha.or.kr)의 안전보건기술지침 소관분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
 - 이 지침 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2021년 11월

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

부록 4: 수중 용단 안전작업 기술지침(안) (계속)

수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안)

1. 목 적

이 지침은 직류전기를 이용하여 물속에서 용단 작업을 수행하는 잠수사의 안전보건을 위한 기술적인 사항을 정함을 목적으로 한다.

2. 적용범위

이 지침은 물속에서 피복아크용접봉, 수중 가우징봉, 초고온 절단봉 등을 이용하여 물속에서 금속을 자르는 수중 용단 작업에 적용한다.

3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용하는 용어는 다음과 같다.

- (가) “용단”이라 함은 열에너지를 이용하여 금속을 용융·절단하는 것을 말한다.
- (나) “산소아크절단”이라 함은 전극봉과 모재 사이에 발생한 아크에 고순도 산소를 공급하여 금속을 용융·절단하는 것을 말한다.
- (다) “피복아크절단”이라 함은 전극봉과 모재 사이에 발생한 아크의 열에너지를 이용하여 금속을 용융·절단하는 것을 말한다.
- (라) “수중 가우징 봉”이라 함은 가우징용 탄소 전극봉 가운데 산소를 공급할 수 있는 관로가 있고 외부를 방수처리한 전극봉을 말한다.
- (마) “초고온 절단봉”이라 함은 하나의 전극관 속에 다수의 심선 또는 전극관이 있고 관내 산소 이동이 가능한 관로가 있으며, 플라스틱 튜브나 절연 테이프 등으로 방수처리된 전극봉을 말한다.
- (바) “직류정극성”이라 함은 전극봉을 음극(-)에, 그라운드 클램프를 양극(+)에 연결한 회로의 구성을 말한다.

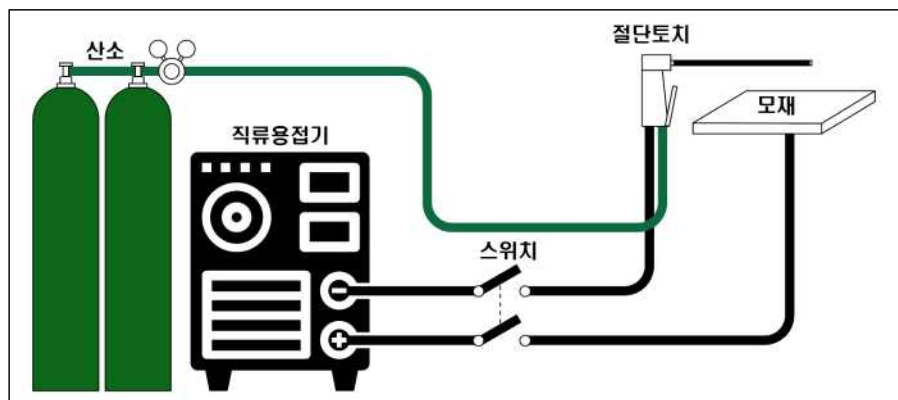
부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- (2) 이 지침에서 사용하는 그 밖의 용어의 정의는 이 기준에서 특별히 규정하는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 산업안전보건기준에 관한 규칙 및 고기압 작업에 관한 기준 및 관련 산업표준에서 정하는 바에 따른다.

4. 수중 용단 설비의 구성

4.1 설비의 구성

수중 용단 설비의 구성은 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 수중용 용단 설비의 구성

4.1.1 전원공급 장치

- (1) 용접 또는 용단용으로 설계·제조된 직류발전기를 사용하고 감전의 위험이 있는 교류발전기는 사용하지 않는다.
- (2) 제조사의 동의없이 무단으로 개조된 기계를 사용하지 않는다.
- (3) 전극봉을 음극(-)에 연결하고 그라운드를 양극(+)에 연결한다. 직류발전기의 극성 표시가 불량하여 극성을 시험할 필요가 있을 때는 아래와 같이 한다.
 - 전원을 차단하고 용접 케이블과 그라운드 케이블을 전극에 연결한다.
 - 그라운드 클램프에 금속편을 연결하고, 토치에 전극봉을 끼운다.
 - 위의 금속편과 전극봉을 소금물을 담은 물통에 넣고 약 50mm 거리를 둔다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- 통전 후 전극봉의 끝에서 기포가 발생하면 음극(-)에 연결된 상태이다.
 - 통전 후 금속편에서 기포가 발생하면 전원을 끄고 케이블의 전극을 바꾼다.
 - 케이블을 전극에 단단히 고정한다.
- (4) 고장 또는 오작동 시 출력단자의 전기가 차단되도록 설계·제조되어야 한다.
 - (5) 직류발전기의 접지는 선박 위의 타 용접기와 분리하여야 한다.
 - (6) 초고온 절단봉은 150 암페어(amp) 이상, 강철관 절단봉은 400 암페어 이상, 가우징 봉은 600 암페어 이상의 직류발전기를 필요로 한다.
 - (7) 위의 전류는 사용률(duty cycle)이 100%일 때 전류이다. 사용율이 60%인 직류 발전기인 경우 사용 중 최대 전류가 저하될 수 있으므로 주의한다.
 - (8) 초고온 절단봉은 강철관 절단봉 또는 수중 가우징 전극봉보다 낮은 전류에서 작업이 가능하므로 두 종류 이상의 전극봉을 사용할 때는 높은 전류를 요구하는 전극봉에 적합한 발전기를 준비한다.
 - (9) 전류 조정은 잠수작업자가 요청하고 잠수감독관이 조정한다. 전류를 조정할 때 감독관은 전원을 차단하여야 한다.

4.1.2 토치 및 용단 케이블

수중 용단에 사용되는 토치와 케이블은 <그림 2>와 같다.

피복아크용접용 토치	절단용 토치	용단 케이블
		

<그림 2> 수중 용단 토치

- (1) 일반적으로 수심 30 미터에서 용단 케이블은 단면적이 70 mm²를 사용하며, 수심이 30 미터 증가할 때마다 한 단계 큰 단면적의 전선을 사용한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

〈표 1〉 비(非) SI 규격에 대한 상호 참조

수심(m)	KS 규격*	AWG*	수심(m)	KS 규격	NEC**
30	70	2/0	90	120	250MCM
60	95	3/0	120	150	350MCM

* KS C IEC 60974-1:2014 아크 용접 설비 - 1부: 용접 전원

* American Wire Gauge,

** National Electric Code

- (2) 용단 케이블은 구리로 된 제품을 사용한다.
- (3) 용단 케이블을 코일처럼 말아서 사용할 경우, 전압강하로 인한 효율저하 및 열이 발생하므로 코일처럼 말아서 사용하지 않는다.
- (4) 용단 케이블이 15 미터를 초과할 때에는 전도성이 없는 합성 로프를 질긴 덕트 테이프로 케이블에 붙여 용접 케이블에 작용하는 하중을 줄인다.

4.1.3 스위치

수중 용단설비에 사용되는 스위치는 〈그림 3〉과 같다.

원격 스위치	양극단투 스위치	단극단투 스위치
		

〈그림 3〉 수중용 용단 설비의 구성

- (1) 양극단투(Double Pole Single Throw)형 원격조정 스위치를 권장한다.
- (2) 스위치의 전류용량은 600 암페어 이상으로 용접기 최대용량보다 높아야 한다.
- (3) 스위치는 부도체(nonconducting material) 위에서 사용한다.
- (4) 산소의 농도가 높은 곳에 스위치를 설치하지 않는다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

(5) 스위치는 사용자가 감전되지 않도록 부도체로 방호하여 사용한다.

※ 주의: 수동 스위치는 개폐 시 아크 발생의 위험이 있으므로, 반드시 (4)와 (5)의 조치를 한 후에 사용하도록 한다.

4.1.4 클램프 및 그라운드 케이블

수중 용단설비에 사용되는 그라운드용 클램프는 <그림 4>와 같다.

C형 클램프	집게형 클램프	자석 클램프
		

<그림 4> 수중용 그라운드 클램프

- (1) 그라운드 케이블의 단면적과 길이는 용단 케이블의 단면적 및 길이와 같다.
- (2) 그라운드 케이블은 반드시 모재에 연결한다. 물을 통한 그라운드는 감전의 위험이 있으므로 사용하지 않는다.
- (3) 그라운드 클램프는 황동 또는 구리의 함량이 높은 구리합금으로 한다.
- (4) 그라운드와 연결된 모재의 표면은 이물질이 없는 상태여야 한다.
- (5) 작업 중 전극봉과 그라운드 사이에 잠수작업자가 위치하지 않도록 그라운드를 이동 설치하여 잠수작업자의 감전을 예방한다.

4.1.6 용단용 산소 및 산소 호스

- (1) 순도 99.5% 이상의 산소를 사용한다. 순도가 낮으면 철의 산화과정에서 발생하는 열량이 감소하여 용단속도가 감소하여 작업효율이 저하된다.
- (2) 압력조절기의 저압 출력부에 역화방지기와 초과압력 방지를 위한 안전밸브를 사용한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- (3) 산소의 공급압력과 유량은 모재의 두께와 관련하여 제조사의 권고에 따른다. 다만, 제조사의 권고가 없을 때는 <표 2>의 수식을 이용하여 압력을 구하고, 유량은 1.98 m³/min(70 ft³/min) 이상으로 한다.

<표 2> 용단용 산소 공급 압력

산소 공급압력 환산 공식
산소공급압력(psi) = 호스길이(ft) ÷ 10 + (0.445 × 수심(ft)) + 90 psi
산소공급압력(bar) = 호스길이(m) ÷ 44.7 + (0.1 × 수심(m)) + 6.21 bar

- (4) 산소의 압력과 유량이 적정한 때는 전극봉의 끝에서 약 300 mm 길이의 산소 제트를 볼 수 있다.
- (5) 산소 호스의 내경은 9.5 mm 이상의 것을 사용하고, 수심이 60 미터를 초과하는 경우 내경이 12.7 mm 이상인 호스를 사용한다.

4.2 전극봉과 가스 발생량

4.2.1 전극봉

국내에 사용되는 수중 용접봉 및 절단봉의 예시는 <그림 5>과 같다.



<그림 5> 용접봉 및 절단봉

- (1) 수중 용접봉은 직경 3.2 mm 이상, 길이 350 mm로 피복제와 아크가 발생하는 전극봉의 끝이 방수코팅되어 있어 전극봉 끝의 코팅을 제거한 후 사용한다.
- (2) 초고온 절단봉 직경 6.4 mm 이상, 길이 457 mm인 외벽이 구리로 도금된 관 안에 여섯 개의 강선과 한 개의 마그네슘 합금강으로 구성되어 아크 생성 후 전류를 차단하여도 산소가 공급되는 동안 아크가 유지되므로 전극봉 길이가 75 mm 정도가 되면 용단 작업을 중단하여 토치가 연소되지 않도록 한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- (3) 수중 가우징 봉은 직경 10 mm, 길이 305 mm로 중심부에 산소관로가 있다. 외부는 구리로 도금되어 있고 방수와 절연을 위해 절연테이프나 플라스틱으로 코팅되어 있다. 방수코팅의 길이가 균일하지 않아 코팅이 덜 된 부분에는 절연 테이프 등으로 감아서 금속의 노출 면적을 줄여 수소발생량을 줄인다.

4.2.2 가스 발생량

- (1) 35~37 ppt 염수에서 DC 60V, 200~300 암페어의 전류를 통전하여 전극봉에서 발생하는 평균 가스량과 전극봉 1개당 평균 연소시간은 <표 3>과 같다.

<표 3> 전극봉당 연소시간 및 총 가스발생량

	수중 용접봉	초고온 절단봉	수중 가우징 봉
평균 가스발생량(ml/ea)	86	200	861
평균 연소시간(sec/ea)	93	45	180

- (2) 초고온 절단봉과 수중 가우징 봉은 사용 중 다량의 산소를 사용하므로 가스의 용단 후 수소가스의 조성비율(약 0.5%)은 낮으나, 불완전한 배기로 인한 폭발 위험을 배제할 수 없다.
- (3) 수중 용접 중 산소를 사용하지 않고 전극이 물에 노출되는 단면적이 적어 수소 가스 발생량이 상대적으로 적으나, 생성된 가스의 수소비율(약 53%)이 매우 높아 폭발 위험성이 매우 높다.

4.3 개인보호장비

- (1) 개인보호장비는 산업잠수와 동일하며, 수중 용단을 위한 추가적인 보호 장비는 <그림 6>과 같다.

차광 유리(부분 차광)	차광 유리(완전 차광)	고무장갑
		

<그림 6> 수중 용단용 개인 보호장비

- (2) 고무장갑 안에 수술용 장갑을 착용하여 감전의 위험을 줄일 수 있다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

5. 주요 위험

(1) 수중 용단 관련 위험

(가) 감전

(나) 증기 또는 가연성 가스 폭발

(다) 손상 또는 약화된 구조물의 붕괴로 인한 깔림 및 갇힘

(라) 절단물 추락에 의한 부상 및 구조물의 부상

(2) 잠수작업 관련 위험

(가) 움직이는 장비에 의한 부딪힘

(나) 화재 및 화재로 인한 감압 중단

(다) 낙하물에 의한 충격 또는 움직이는 기계장비에 끼임

(라) 호흡기체 공급 중단 및 호흡기체 공급설비 손상

(마) 수중에 설치한 공기 공간의 침수

(바) 차압(differential pressure)에 의한 압착

(사) 감압시간 부족에 따른 감압병

5. 위험성평가

용단 작업 위험성평가 시 <표 4>의 위험 요인을 고려하여 안전보건기술지침 (P-140-2020) 「작업위험성평가에 관한 기술지침」에 따른 위험성평가를 실시하여야 한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

〈표 4〉 수중 용단 작업 위험성 평가 위험 요인

위험 요인	고려사항
수중 공극	작업 중 발생한 가스가 수면 위로 배출되지 않고 수중 공간에 쌓일 위험성을 고려한다.
아크 방전	통전 시 전극봉 끝이 아닌 회로에서 아크가 발생할 가능성을 고려한다. 작업 전 케이블 외피의 손상여부 등을 검사한다.
블로우백 (blow back)	전극봉 끝 용단이 발생하는 지점에서 발생하는 작은 폭발로 용융점 주변에 갇힌 수소가 폭발한다.
역화	절단토치의 산소공급 호스에 역화방지기를 설치한다.
밀폐공간	가스가 배출될 수 있도록 배출구를 가장 먼저 뚫는다.
가연성 가스	밀폐공간 등에 축적된 가연성 가스의 잔존 여부를 확인한다. 메탄은 해저에서 발생하여 구조물 내에 축적될 수 있다.
차압	해저배관이나 밀폐공간을 절단할 때 공간 내부와 외부의 압력차이에 의한 압착에 주의한다.
보호수단	주변 금속구조물에 접촉하여 의도하지 않는 아크가 발생하거나 용융 슬래그가 떨어져 손상시키는 것을 방지하는 자재를 도포한다.
절단물 추락방지	절단물이 아래로 추락하여 구조물을 손상시키거나 잠수작업자를 다치게 할 위험에 대비한다.
가스 배출구	가스 배출구를 뚫을 때는 기계식 절단법을 적용한다. 배출구는 절단부보다 높은 곳에 뚫어 가스 배출을 쉽게 한다.

- (1) 직무를 세분화하고 위험을 식별한다.
- (2) 위험을 분석하고 저감 대책을 마련한다.
- (3) 작업 전 안전회의(toolbox meeting)를 열어 작업 절차, 위험 요인, 안전대책을 작업자와 공유한다.
- (4) 폐쇄된 공간의 아래보기 절단과 같이 가스포켓의 존재여부와 가스 이동 방향을 식별할 수 없을 때는 기계식 절단법을 적용할 수 있도록 대응방안을 마련한다.
- (5) 잠수작업자 신체의 일부가 수면 위로 드러나는 비말대(splash zone)는 감전의 위험이 매우 높으므로 수중 용단을 하지 않는다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

6. 안전작업절차

6.1 용단 작업

- (1) 용단작업 전 5.에서 실시한 위험성평가 결과를 포함한 위험성에 대하여 작업자 등에게 안전교육을 실시한다.
- (2) 잠수작업 지원부서는 선상 작업 체크리스트를 작성한다.(〈별지 1〉 참조)
- (3) 잠수작업부서는 수중 작업 체크리스트를 작성한다.(〈별지 2〉 참조)
- (4) 잠수작업자를 입수시켜 작업 위치와 작업량을 파악한다.
- (5) 작업 대상 구조물을 표시한 후, 두 번째 잠수작업자로 확인한다.
- (6) 잠수작업자는 해저에서 발생하였거나 작업 중 발생할 가연성 가스가 배출되지 못하고 쌓일 만한 곳을 가늠한다. 잠수종을 사용할 때에는 배출되는 가스가 잠수종으로 향하는지 확인한다. 수심 측정용 호스를 이용하여 기포를 분사한 후 기포의 이동방향을 확인할 수 있다.
- (7) 가스 배출구의 위치, 크기, 수량을 확인하고 표시한다. 두 번째 잠수작업자는 위치의 적정성을 확인하고 잠수감독 및 발주사 측은 이를 승인한다.
- (8) 잠수감독과 잠수작업자는 가스 배출구를 수중 용단으로 만들 수 있는지 유압 드릴 등을 사용할 것인지 협의한다.
- (9) 필요 시 잠수작업자는 주변 구조물 등에 작업물을 매달아서 작업 후 작업물의 추락에 의한 부상 또는 구조물 파손을 예방한다.
- (10) 잠수감독은 용단 장비를 물속에 넣기 전 전원이 차단되고 누설전류가 없음을 확인한다.
- (11) 잠수감독은 장비를 물속에 넣기 전 산소차단을 확인한다. 물속에 넣기 전 산소 호스 내부 침수를 방지하기 위하여 최소공급압력 만큼 산소를 채워 둔다.
- (12) 용단 장비를 물속에 넣는다. 장비를 정확한 작업위치에 보내기 위하여 작업줄과 D링 또는 샤클 등을 사용할 수 있다.
- (13) 케이블은 충분한 길이를 준비하여 잠수작업자가 작업하기 편리하도록 한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- (14) 잠수작업자는 케이블을 작업 위치로 이동시키고 작업하기 편리한 여유 길이를 확보한다.
- (15) 선상에서 잠수작업을 지원하는 자는 케이블과 산소 호스가 눌리거나 꺾이지 않도록 한다.
- (16) 잠수작업자는 그라운드 케이블을 연결할 모재의 접합부위를 찾아 페인트를 제거한다.
- (17) 잠수감독 및 잠수작업자는 토치와 그라운드 사이에서 작업하지 않도록 고려하여 그라운드를 연결한다.
- (18) 필요시 용단작업 대상이 아닌 부분에 대하여 보호 조치한다.
- (19) 필요시 효율적인 작업을 위해 용단부 가이드를 설치한다.
- (20) 잠수작업자의 작업준비가 완료되면 잠수감독의 지시에 따라 잠수업무를 지원하는 자는 산소밸브를 열어 산소를 공급한다. 산소 압력은 잠수작업 지점의 수압에 6.21 bar를 더한 값과 같다.
- (21) 잠수작업자는 토치에 전극봉을 끼워 밀착시킨 후 토치 앞부분을 돌려 단단히 고정한다.
- (22) 산소의 유량을 점검한다. 산소 제트가 약 300 mm 정도이면 양호한 것으로 간주한다.
- (23) 잠수작업자는 이동하지 않고 절단할 수 있을 길이를 확보하여 자리를 잡는다.
- (24) 잠수작업자는 잠수감독에게 전극봉의 끝을 모재에 대고 레버를 눌러 산소를 분사하면서 전원인가를 요청한다. 전원인가를 요청할 때는 “스위치 온 (switch ON)” 또는 “메이크 잇 핫(make it HOT)” 중 잠수감독과 약속한 대로 요청한다. 이 때 “스위치” 또는 “메이크 잇” 한 후 약간의 틈을 두고 “온” 또는 “핫”을 말하여 잠수감독관이 요청 신호와 듣는 동시에 전기를 통전하고, 신호어를 다시 말함으로써 전기를 통전하였음을 잠수작업자에게 알린다.
- (25) 전원 차단을 요청할 때는 “스위치 오프 (switch OFF)” 또는 “메이크 잇 콜드 (make it COLD)”라고 한다. 잠수작업자가 “스위치” 또는 “메이크 잇”을 명령으로 하고 “오프” 또는 “콜드”라고 할 때 잠수감독은 전원을 차단한다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

- (26) 전극봉을 연소시켜 용단작업을 수행한다. 초고온 절단봉의 경우 75 mm 정도 남으면 전기와 산소를 차단하여 더 이상 연소되지 않게 한다.
- (27) 전극봉의 끝으로 모재를 살짝 두드려 아크가 발생하지 않는지 확인한 후 토치의 앞부분을 열어 남은 전극봉을 제거한다.
- (28) 쇠파이프나 직경 6 mm 이하의 용접봉으로 절단 후 용융 금속의 재용착이 없는지 확인한다.
- (29) 작업 중 발생한 가연성 가스가 누적된 곳이 없는지 확인한 후 새 전극봉을 끼워 작업을 계속한다. 가스가 쌓인 곳이 있을 때는 기계적인 방법을 동원하여 배출구를 뚫거나 에어리프트 등을 이용하여 가스를 제거한다.
- (30) 용단 작업이 완료되면 잠수감독은 잠수작업을 지원하는 자에게 용접기 작동 중지 및 산소밸브를 잠그도록 한다.
- (31) 잠수작업자는 그라운드 클램프를 모재에서 분리하고, 잠수작업을 지원하는 자는 용단 장비를 선상으로 회수한다.
- (32) 장비 회수 후 산소 호스 내 산소를 배출시킨다.

6.2 작업 후 관리

- (1) 토치를 분리하고 산소 호스 양쪽 끝을 캡으로 막는다.
- (2) 토치를 민물에 행구어 말린다.
- (3) 토치를 분해하여 연소, 파손, 부식, 막힘 등을 검사하고 필요시 부품을 교체한 후 재조립한다.
- (4) 토치 보관은 항상 건조한 상태로 하며, 오일은 사용하지 않는다.

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

〈별지 1〉

선상 작업 체크리스트

연번	점검 항목	예	아니오	비고
1	잠수감독은 잠수공사업체의 위험성평가 결과를 검토하고 직무별 위험분석을 하였다.			
2	잠수감독은 발주사가 수중 용단을 승인한 문서 및 작업허가서를 확인하였다.			
3	작업지역에 산소나 아크로 연소될 수 있는 탄화수소 또는 인화성 물질의 잔존여부를 확인하였다.			
4	적절한 소화설비가 산소저장용기 인근에 배치되어 있다.			
5	수중 용단 중 잠수작업 지원 선박에 화재감시자를 배치하였다.			
6	필수인력을 제외한 인원에게 작업지역 접근 제한을 시행하였다.			
7	수중 용단을 위한 케이블, 토치, 그라운드 클램프, 산소호스, 고유량 산소용 감압기 등을 용도에 맞게 조립하고 검사하였다.			
8	고유량 산소용 감압기의 저압 출력부에 역화 방지기와 안전밸브를 확인하였다.			
9	직류발전기의 출력전류를 작업에 적합하고 토치는 발전기의 음극(-)에 연결되어 있다.			
10	선박위에서 수중 용단 장비의 작동여부를 확인하였다.			
11	수중 용단 장비를 물에 넣기 전 발전기의 전원을 차단하고 누설전류가 없음을 확인하였다.			
12	물에 넣기 전 산소 호스에 최소공급압력으로 산소를 공급하고 산소 공급을 차단하였다.			
13	물에 넣기 전 케이블 및 산소 호스의 길이와 케이블에 작용하는 하중에 저항할 수 있는 조치를 마련하였다.			
14	토치 손상 시 교체할 수 있도록 여분의 부품을 토치에 부착하였다.			
15	작업물의 두께와 면적 대비 충분한 양의 전극봉을 준비하여 잠수작업자에게 지급하였다.			
16	잠수작업자의 헬멧에 절단용 보안경 부착하고 절연용 고무장갑, 작업용 장갑 등을 지급 및 착용을 확인하였다.			

잠수감독: _____

날짜/시간: _____

부록 4: 수중 용단 안전작업에 관한 기술지침(안) (계속)

〈별지 2〉

수중 작업 체크리스트

연번	항목	예	아니오	비고
1	잠수작업자가 절단 예정부의 위치를 확인하고 표시하고, 두 번째 잠수작업자가 절단 예정부가 맞는지 확인하였다.			
2	잠수작업자는 가스가 쌓일 만한 공간을 확인하였다.			
3	잠수작업자는 가스 배출구의 위치를 표시하고, 두 번째 잠수작업자, 잠수감독, 발주하는 가스 배출구의 적정성을 확인하였다.			
4	잠수작업자와 잠수감독은 수중 용단으로 가스 배출구를 절단할 것에 동의하였다.			
5	배출된 가스가 잠수중에 유입될 위험을 예방하기 위해 잠수작업자는 생명줄의 수심계측용 호스를 이용하여 기체를 분사한 후 기체의 이동 경로를 확인하였다.			
6	잠수작업자는 절단 후 절단물이 떨어져 부상을 당하거나 구조물을 손상시킬 우려가 있을 경우 추락방지 조치를 하였다.			
7	그라운드 클램프의 위치를 파악하고 작업 중 잠수작업자가 토치와 그라운드 클램프 사이에 위치하지 않도록 하였다.			
8	그라운드 클램프는 모재의 페인트나 기타 이물질이 제거된 금속표면의 여분의 금속에 부착되었음을 확인하였다.			
9	절단부 이외의 구조물을 보호하기 위한 보호자재의 필요성을 확인하고 설치하였다.			
10	절단부나 금속 용융물이 잠수작업자 또는 잠수작업자의 생명줄에 떨어지지 않도록 작업위치와 자세를 확인하였다.			
11	잠수작업자는 용단작업에 필요한 통신 용어를 숙지하였다.			

잠수감독: _____

날짜/시간: _____

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 강준혁 (연구위원, 산업안전연구부)

연구원 : 박해동 (연구위원, 직업환경연구실)

최재욱 (산업잠수사)

연구기간

2021. 02. 01. ~ 2021. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

**수중 용접용단 시 가연성 가스 폭발재해 예방을 위한 연구
(2021-산업안전보건연구원-725)**

발 행 일 : 2021년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 산업안전보건연구부 연구위원 강준혁

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전 화 : 052-703-0849

팩 스 : 052-703-0334

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-92138-50-3