

19CTAP
-C1518
93-01

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 19CTAP-C151893-01

건설현장
용접
불티의
화재확산
방지를
위한
포집기술
개발

건설현장 용접 불티의 화재확산 방지를 위한 포집 기술 개발 최종보고서

최
종
보
고
서

2021.02.16.

주관연구기관 / 동양대학교 산학협력단
협동연구기관 / 송현엘앤씨(주)

2020

소 전
관 문
부 기
처 관
명 명

국 토 교 통 부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

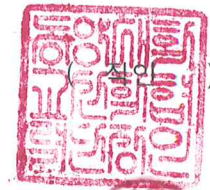
제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘건설현장 용접 불티의 화재확산 방지를 위한 포집 기술 개발’(연구개발 기간 : 2019. 04. 15 ~ 2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 보완본 2부를 제출합니다.

2021 . 02 . 16 .

주관연구기관명 : 동양대학교 산학협력단 (노경철)



참여기관명 : 송현엘앤씨(주)

(권영선)



주관연구기관책임자: 유우준

협동연구기관책임자: 권영선

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	KAIA20CTAP-C152913-02	해당 단계 연구 기간	2020. 01. 01 2020. 12. 31	단계구분	최종
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	건설현장 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 포집기술 개발			
연구책임자	유 우 준	해당단계 참여연구원 수	총:16 명 내부:11 명 외부: 5 명	해당단계 연구비	정부:206,000 천원 민간: 68,667 천원 정부외: 0 천원 상대국: 0 천원 계:274,667 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총:16 명 내부:11 명 외부: 5 명	총 연구비	정부:370,000 천원 민간:123,334 천원 정부외: 0 천원 상대국: 0 천원 계:493,334 천원
연구기관명 및 소속 부서명	동양대학교 산학협력단			참여기업명 송현엘앤씨(주)	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	Y	Y	Y	N	Y	N	N	N	N	N	Y

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

본 연구개발은 용접 시 발생하는 불티의 입자 특성을 분석하여 건설현장에서 화재 확산의 위험성을 방지하기 위한 불티의 포집 기술을 개발하는데 주요 목적이 있음. 따라서 1차 년도에는 용접 조건(정격 용량, 용접시간, 용접 각도)을 고려한 불티 발생 장치를 제작하여 불티 입자의 크기분포와 비산 속도가 불티의 온도변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 2차 년도에는 불티의 입자 특성을 고려한 포집 장치의 원천 설계 기술을 개발하기 위해서 포집기의 구조, 필터의 압력 강하량과 흡입 유량의 상관관계 및 노즐 흡입부 자성의 특성에 관한 실험 연구를 수행하였음. 본 연구 결과를 통해서 제시한 불티 온도 예측 모델과 불티 흡입률 상승을 고려한 설계 자료는 포집기 제품을 개발하는데 유용할 것으로 판단됨.

요약문

연구의 목적 및 내용	<연구의 필요성 및 목적> ○ 최근 국내외 대형 건축물 공사 현장에서 발생하는 주요 화재 사고 중 19% 이상은 용접 작업 중 발생하는 불티에 의한 화재사고임. ○ 용접은 작업 특성상 유해가스와 불티가 발생되며, 현재 유해가스를 포집하는 기술은 국내외에서 상용화 단계에 있으나, 불티를 포집하는 기술은 없는 상태임. ○ 본 연구과제는 건설 현장에서 근로자의 용접 작업 시 화재 확산을 방지할 수 있는 불티 포집기의 핵심 기술을 개발하는데 최종 목적이 있으며, 세부 목표는 다음과 같음. ▪ 건설현장 불티 특성과 가연성 물질의 화재 확산 조건 분석 ▪ 용접기 종류에 따른 불티의 비산 현상 주요 메커니즘 분석 ▪ Lab-scale 테스트 베드 구축 및 시뮬레이션을 적용한 불티 포집 방안 연구 ▪ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 및 실증실험에 의한 성능 평가 <연구내용> (1차 년도) ○ 건설현장 불티 특성과 가연성 물질의 화재 확산 조건 분석 ▪ 용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구사례 조사 ▪ 건설현장 공종별 용접기 및 가연성 물질 종류 조사 ▪ 가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석 ○ 용접기 불티 발생 주요 메커니즘 분석 ▪ 용접기 종류 및 불티 입자의 비산 조건을 고려한 주요 매개변수 이론정리 ▪ 불티 입자의 비산 특성(분포, 크기, 열원, 착화시간 등) 기초 실험 (2차 년도) ○ Lab-scale 테스트 베드 구축 및 시뮬레이션을 적용한 불티 포집 방안 연구 ▪ 불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축 ▪ 포집기 내부 유동 현상 전산 해석 및 불티 흡입 조건 분석 ▪ 불티 포집기 노즐 형상 제작 및 흡입 효율 기초 실험 ○ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 및 실증실험에 의한 성능 평가 ▪ 불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 ▪ 건설현장 조건을 고려한 포집기 설계 방안 분석 및 성능 평가																																								
	연구개발성과	<table><tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구 시설·장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트 웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr><tr><th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr><tr><td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>Y</td></tr></table>												구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	Y	N	N	N	N	N	Y
	구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종																														
생명 정보									생물 자원	정보	실물																														
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	N	Y	N	N	N	N	N	Y																														
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<활용 계획> ○ 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 건설 현장 작업 환경 개선 ○ 건설 현장 용접작업 특성에 따른 불티 포집 기술 적용 ○ 공공 안전을 위한 화재예방 분야 전문 기술자료 제공 <기술적 기대 효과> ○ 용접 불티 기초 분석에 의한 미립자 특성 자료 제공 ○ 불티 포집장치 신제품 적용에 따른 건설현장 작업 근로자 화재안전 가이드라인 제시 <산업 경제적 기대 효과> ○ 용접 불티 포집 기술의 상용화에 따른 신규 시장 및 인프라 구축 ○ 건설현장 화재피해 저감을 통한 인적·물적 피해 감소로 국가경쟁력 제고																																								
핵심어 (5개 이내)	용접 가스		불티포집기술		화재 확산		열화학특성		유해가스																																

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
1-1. 연구개발의 필요성	01
1-2. 연구개발 범위	05
1-3. 연구목표	06
2. 연구수행내용 및 성과	08
2-1. 건설현장 분류별 용접기 종류와 가연성 물질의 환경 조건 분석	09
2-2. 용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구사례 조사	26
2-3. 가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석	35
2-4. 용접기 종류 및 불티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리	42
2-5. 불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축	52
2-6. 용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험	54
2-7. 건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 향상 방안 분석	75
2-8. 포집기 내부 유동 현상 해석 및 불티 흡입 조건 분석	96
2-9. 불티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험	106
2-10. 불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가	112
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	119
3-1. 목표 달성도	119
3-2. 관련 분야 기여도	121
4. 연구개발성과의 활용 계획	123
5. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	128
6. 연구개발성과의 보안등급	133
7. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	133
8. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	134
9. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	135
붙임. 참고 문헌	136

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발의 필요성

(1) 용접의 종류 및 불티의 특성

- 용접은 같은 종류나 다른 종류의 금속 재료에 열과 압력을 가하여 고체가 서로 결합이 되도록 접합하는 방식으로 용접과 압접 그리고 납땜으로 구분할 수 있음[1.1-1.4]. 이 중에서도 용접에는 아크(Arc), 가스(Gas), 저항, 특수 방식이 있으며, 표 1-1의 아크 용접 방식을 가장 많이 사용하고 있음[1.5-1.8].

표 1-1. 아크 용접의 구분 및 특징

구 분	알곤용접 (GTAW)	아크용접 (SMAW)	마그용접 (GMAW)	CO2용접 (FCAW)
전 극	비소모성	소모성	소모성	소모성
차폐가스	별도주입가스	-	-	-
슬 래 그	없음	있음	-	-
작업속도	느림	빠름	-	-
용접품질	높음	-	-	-
비 용	높음	낮음	-	-
화재위험성	낮음	높음-	-	-

관련출처 : 산업안전 보건공단 용접안전 관련 자료

- 아크 용접 중에서도 그림 1-1의 SMAW(Shield Metal Arc Welding) 용접은 경제성이 우수하고 외부 차폐가스를 사용하지 않아서 편의성이 좋기 때문에 건설 산업 현장에서 가장 많이 사용하는 방식임 [1.9-1.10].
- 하지만, 그림 1-1과 같이 용접 또는 용단 시 모재의 온도는 최소 1,600 ℃ 이상으로 고온의 미립화된 입자가 수 천 개 발생하며, 작업 지점으로부터 수평방향으로 최대 (11~15) m 정도까지 비산될 수 있음[1.11-1.13].
- 특히, 발화원이 될 수 있는 불티 입자의 크기는 (0.2 ~ 3) mm 정도로 산소의 압력, 절단속도, 절단기의 종류 및 방향 그리고 풍속에 따라서 불티의 양과 비산거리가 달라지는 특징을 갖고 있음 [1.14-1.16].

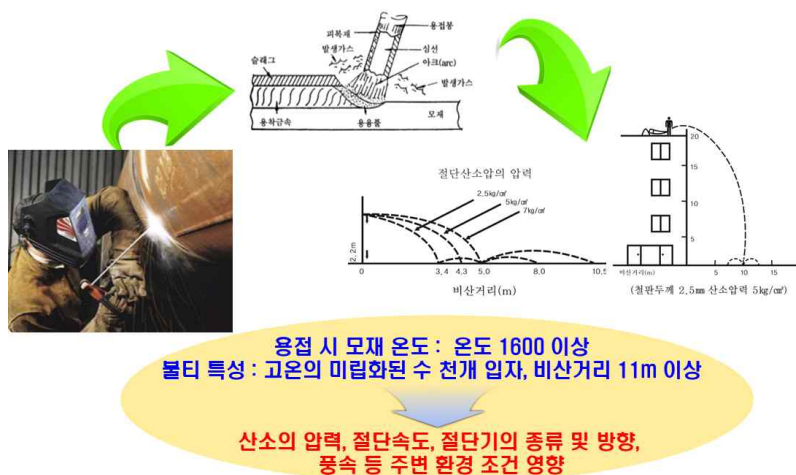


그림 1-1. 용접 시 발생하는 불티의 특성

(2) 건설현장 작업 공간 용접 불티의 화재위험성

- 국내에서 용접 작업 중 발생한 대표적인 화재사고 사례로 2014년 5월 26일 고양시 일산동구 백석동 소재 종합터미널 지하1층 설비공사현장에서 가스배관 용접 작업 중 용접불티 등에 의한 화재로 사망 8명, 중상 5명, 경상 52명 등 65명이 질식 등의 재해가 발생하였음.

- 건설현장 용접 불티의 화재 위험성은 인화성 유증기나 액체가 체류할 수 있는 배관 또는 밀폐 공간으로 불티가 비산하여 유증기에 착화되는 경우와 발포 우레탄이나 샌드위치 패널 등 가연성 소재가 위치한 곳으로 불티가 비산한 후 축열에 의해서 나타날 수 있음[1.17~1.22]. 아래의 표는 최근 5년간 용접 작업으로 인한 국내 주요 화재 사고 사례를 정리하여 나타낸 결과임.

표 1-2. 최근 국내 용접 불티에 의한 주요 화재 사고사례 현황 조사 자료

건축물	발생 년 도	인명피해	주요 발화원인 추정	관련자료
제천 노블 휘트니스 앤스파	2017. 12. 21	사망자 29명 부상자 37명	필로티 구조 1층 주차장의 배관 열선 및 용접 작업 등에 의한 보온재 발화	
화성 메타폴리스 상가동	2017. 2. 4.	사망자 4명 부상자 47명	용접에 의한 절단 작업 중 스티로폼 등 가연성 소재 발화에 의한 화재 확산 추측	
고양종합 터미널	2014. 5. 26.	사망자 8명 부상자 42 (7명 중상)	용접작업에 의한 보온재 발화	
경기 고양	12.3.16	6명 사상	메탄가스 누출 인근에서 용접 중 폭발	
경기 시흥	‘11.7.10,	사망자 2명	구 톨루엔 저장탱크 이전 설치 용접 중 폭발	

- 또한, 그림1-2에서 보듯이 소방청에서 집계한 최근 5년간 주요 화재사고 중 용접에 의한 발화 건수는 매년 평균 562건에 달하고 있으며, 산업현장 및 대형 건축물 시공과정에서 용접 작업으로 인해서 발생된 불꽃이나 불티 등에 의한 사고 사례는 19 %로 높은 비율을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있음[1.23-1.25].

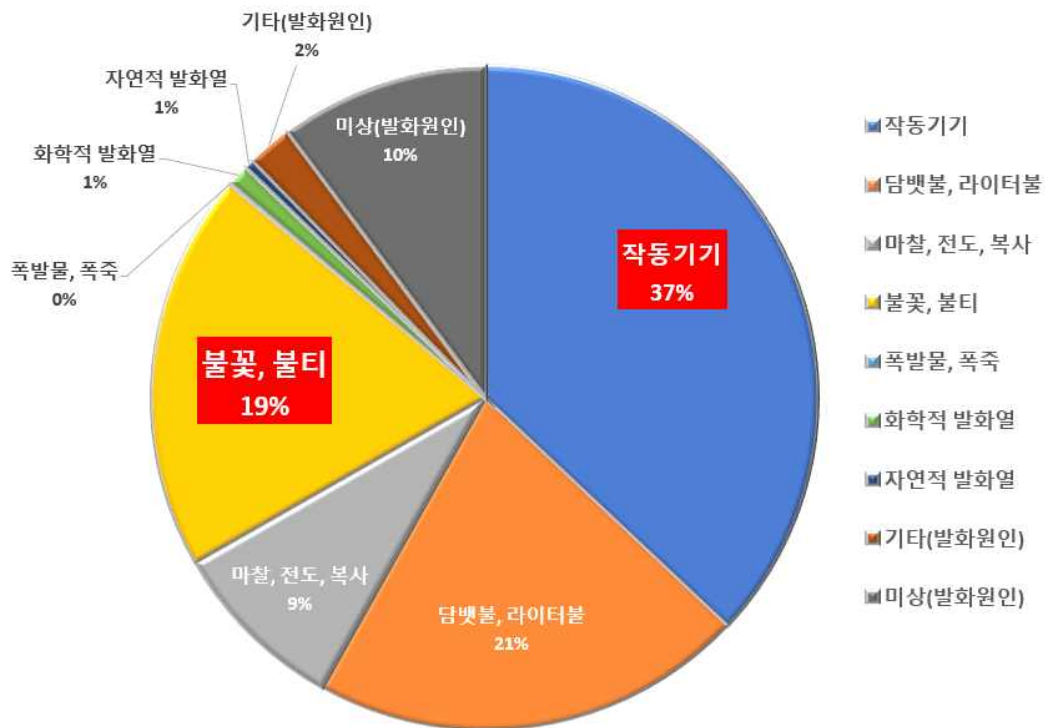


그림 1-2. 최근 5년간 발화 열원별 주요 화재 사고 통계자료

- 특히, 용접 작업 과정에서 발생하는 불티 입자는 표 1-3와 같이 작업 조건에 따라서 비산거리가 최대 (11 ~ 15) m 이기 때문에 주변 가연물을 발화하여 대형 화재로 확산될 가능성이 매우 높으며, 건설현장 근로자의 용접 작업 시 화재 위험성을 원천적으로 해결하기 위해서는 불티 자체를 포집하는 기술 개발이 필요함.

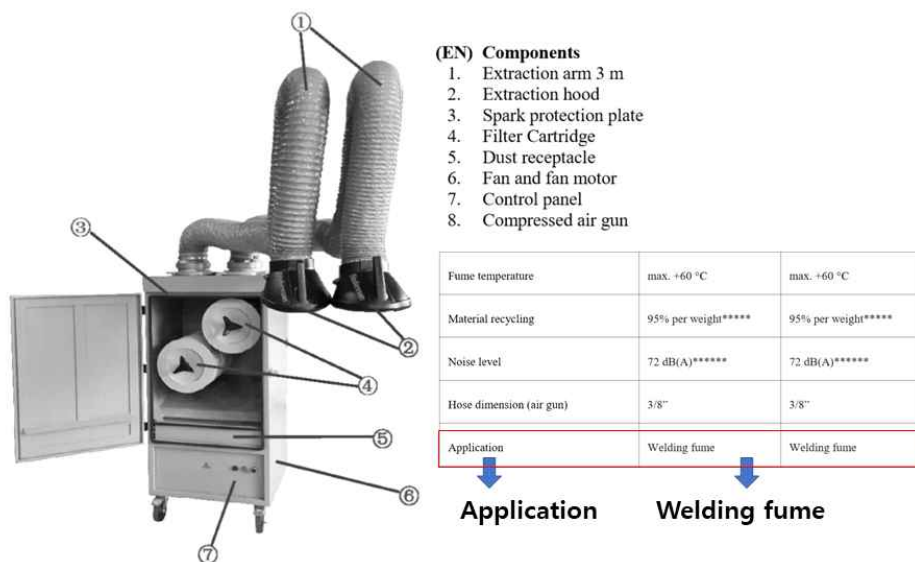


그림 1-3. 현재 상용화 단계에 있는 용접 가스(Welding Fume) 포집 장치

표 1-3. 최근 국내 용접 불티에 의한 주요 화재 사고사례 현황

높이 (m)	판두께 (mm)	기압의 방 향	비 산 거 리(m)				풍 속 m/sec
			바람을 향할 때		바람을 등질 때		
			1차불티	2차불티	1차불티	2차불티	
8.25	4.5	측방	4.5	6.5	7.0	9.0	1-2
		하방	3.5	6.0	-	-	
11.25	4.5	측방	5.5	7.0	6.0	9.5	1-2
		하방	3.5	6.0	-	-	
15.00	4.5	측방	4.5	6.0	8.0	11.0	2-3
	9.0		6.0	12.0	8.5	12.0	
	16.0		5.5	7.0	9.0	12.0	
	25.0		6.0	8.0	9.0	12.0	
	4.5	하방	3.0	6.0	-	-	
	9.0		-	7.0	-	-	
	16.0		5.0	8.0	-	-	
	25.0		6.0	9.0	-	-	
20.00	4.5	측방	4.0	6.0	8.0	12.0	4-5
	9.0		4.5	6.0	9.0	15.0	
	16.0		4.5	6.0	10.0	15.0	
	4.5	하방	6.5	14.0	-	-	
	9.0		7.0	10.0	-	-	
	15.0		8.0	10.0	-	-	

(3) 용접 불티 화재 확산 방지를 위한 포집기술 개발의 필요성

- 그림 1-3은 현재 상용화 되어 있는 용접 가스(Welding fume)를 포집하는 장치를 나타낸 것으로 현재까지 용접 과정에서 발생하는 가스(fume)의 포집 기술은 이미 상용화 단계이지만, 화재 확산의 주요 인자인 불티의 포집 기술은 국내외 모두 기초 단계의 수준임. 즉, 용접 불티의 특성(크기, 비산거리 그리고 표면의 온도)에 관한 연구는 선행되어 있으나, 본 연구과제에서 제시하고 있는 불티 포집 기술은 국내외 모두 매우 취약한 상태임.
- 이에 더해서 용접 불티가 화재로 확산될 수 있는 정도의 크기는 (0.2 ~ 3) mm 정도로 용접 조건에 따라서 비산되는 방향이 모두 다르기 때문에 용접 불티의 포집 기술을 개발하기 위해서는 미립화된 입자의 열유동 특성에 관한 기초 연구가 매우 중요함.
- 특히, 최근 국내 주요 화재 사고사례에서 보듯이 건설현장 용접 불티의 화재 사고 위험성은 현재 진행형이며, 본 연구 과제를 통해서 불티 포집의 기초 기술을 개발하여 용접 작업으로 인한 원천적인 화재 위험성을 차단하는데 목표가 있음.

1-2. 연구개발 범위

(1) 연구 개발의 최종 목표 및 최종성과물

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	건설현장 용접 불티의 화재확산 방지를 위한 포집 기술 개발
세부 목표	▪ 건설현장 불티 특성과 가연성 물질의 화재 확산 조건 분석 ▪ 용접기 종류에 따른 불티의 비산 현상 주요 메커니즘 분석 ▪ Lab-scale 테스트 베드 구축 및 시뮬레이션을 적용한 불티 포집 방안 연구 ▪ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 및 실증실험에 의한 성능 평가

가. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

구분	연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	■	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	TRL 6 유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
건설현장 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 포집 기술 개발	1단계	4단계	-(연구시작시) 현재 국내외 기술수준을 고려하였을 때 용접 과정에서 불티가 생성되는 원리 또는 전처리 장치의 연구는 있으나 불티 확산 방지를 위한 포집기술이 없는 상태로 본 연구과제의 시작은 이론적 연구가 선행되어야 하며 TRL 1단계에 해당함. -(연구종료시) 본 연구팀은 발화원의 화재 확산 및 건설현장 용접 특성에 관한 전문적 지식을 확보하고 있으며, 본 연구 과제를 수행하기 위한 실험 및 분석 기간을 고려하여 실험실 성능평가에 해당하는 TRL 4단계로 설정함.

1-3 연구 목표

(1) 개발 목표 (1차년도)

가. 주관연구기관(동양대학교 산학협력단):

연구개발 목표		연구개발 내용
총괄과제	세부과제	
용접 불티 포집 기초 실험 및 성능 평가 연구	가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석	■ 건설현장 주요 가연 물질 열화학적 물성 조사 ■ 가연성 물질의 종류에 따른 불티 점화 조건 분석 ※ 점화조건 : 바람의 방향, 세기 등 환경 조건 연구내용 포함
	용접기 종류 및 불티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리	■ 아크 용접에서 불티 발생과 관련된 주요 인자 정리 ■ 차원 해석 기법에 의한 용접기 불티 특성 분석
	용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험	■ 이미지 분석에 의한 불티 입자의 크기 분포 측정 ■ 용접 조건에 따른 불티 입자의 평균 온도 및 가연물 착화시간 측정 ■ 불티 입자 특성(평균크기, 비산거리)을 고려한 운동량 해석

나. 공동연구기관(송현앨앤씨):

연구개발 목표		연구개발 내용
총괄과제	세부과제	
불티 포집기 적용성 향상 방안 연구	용접기 종류에 따른 불 티 특성 기존 연구사례 조사	■ 용접기 종류에 따른 불티 입자크기, 비산거리, 열원의 온도 관련 자료 구축 ■ 기존 용접 가스 포집기의 불티 포집 시 필요한 성능 분석
	건설현장 분류별 용접 기 종류와 가연성 물질 의 환경 조건 분석	■ 현장 공종별 주요 용접 작업과 주변 가연물 현장 조사 ■ 현장 공종별 용접 지점과 가연물의 배치 조건을 고려한 화재 시나리오 제시

(2) 개발 목표 (2차년도)

가. 주관연구기관(동양대학교 산학협력단):

연구개발 목표		연구개발 내용
총괄과제	세부과제	
용접 불티 포집 기초실험 및 성능 평가 연구	불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축	■ 불티의 비산 조건을 고려한 실험실 규모의 용접기 제작 (작업장 높이, 시편 두께, 풍속 방향, 용접기압 조건 등) ■ 불티 특성의 정량적 측정 방안을 고려한 테스트 베드 구축 (불티 입자의 온도, 크기 분포, 비산거리, 가연물 착화시간 등)
	포집기 내부 유동 현상 해석 및 불티 흡입 조건 분석	■ 불티 포집기 격자망 및 필터의 규격에 따른 내부 유동 해석 ■ 불티 입자 특성을 고려한 흡입 유량 설계값 산출 ■ 불티 비산 거리에 따른 포집기 유동해석 및 흡입 조건 분석
	불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가	■ 불티 발생 조건을 고려한 포집기 효율 기초 실험 ■ 불티 포집기 유무에 따른 가연물 화재 확산 실증 실험 및 성능 평가 ※ 건설자재의 적치상황, 주변 시설 유무, 시공조건 등을 고려한 포집기 성능 실험

나. 공동연구기관(송현엘앤씨(주)):

연구개발 목표		연구개발 내용
총괄과제	세부과제	
불티 포집기 적용성 향상 방안 연구	불티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험	■ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 ■ 포집기 외부 유동 현상을 고려한 노즐 형상 설계 ■ 불티의 정적 상태를 가정한 포집기 효율 기초 실험
	건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 향상 방안 분석	■ 불티 포집기 현장 적용성 강화를 위한 설계 변수 분석 ■ 설계 변수를 적용한 불티 포집기 제작 및 기초 실험 결과 분석 ※ 다양한 건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 실험

2. 연구수행내용 및 성과

연구개발 목표 세부과제	연구개발 내용
2-1. 건설현장 분류별 용접기 종류와 가연성 물질의 환경 조건 분석	■ 현장 공종별 주요 용접 작업과 주변 가연물 현장 조사 ■ 현장 공종별 용접 지점과 가연물의 배치 조건을 고려한 화재 시나리오 제시
2-2. 용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구사례 조사	■ 용접기 종류에 따른 불티 입자크기, 비산거리, 열원의 온도 관련 자료 구축 ■ 기존 용접 가스 포집기의 불티 포집 시 필요한 성능 분석
2-3. 가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석	■ 건설현장 주요 가연 물질 열화학적 물성 조사 ■ 가연성 물질의 종류에 따른 불티 점화 조건 분석 ※ 점화조건 : 바람의 방향, 세기 등 환경 조건 연구내용 포함
2-4. 용접기 종류 및 불티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리	■ 아크 용접에서 불티 발생과 관련된 주요 인자 정리 ■ 차원 해석 기법에 의한 용접기 불티 특성 분석
2-5. 불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축	■ 불티의 비산 조건을 고려한 실험실 규모의 용접기 제작 (작업장 높이, 시편 두께, 풍속 방향, 용접기압 조건 등) ■ 불티 특성의 정량적 측정 방안을 고려한 테스트 베드 구축 (불티 입자의 온도, 크기 분포, 비산거리, 가연물 착화시간 등)
2-6. 용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험	■ 이미지 분석에 의한 불티 입자의 크기 분포 측정 ■ 용접 조건에 따른 불티 입자의 평균 온도 및 가연물 착화시간 측정 ■ 불티 입자 특성(평균크기, 비산거리)을 고려한 운동량 해석
2-7. 건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 향상 방안 분석	■ 불티 포집기 현장 적용성 강화를 위한 설계 변수 분석 ■ 설계 변수를 적용한 불티 포집기 제작 및 기초 실험 결과 분석 ※ 다양한 건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 실험
2-8. 포집기 내부 유동 현상 해석 및 불티 흡입 조건 분석	■ 불티 포집기 격자망 및 필터의 규격에 따른 내부 유동 해석 ■ 불티 입자 특성을 고려한 흡입 유량 설계값 산출 ■ 불티 비산 거리에 따른 포집기 유동해석 및 흡입 조건 분석
2-9. 불티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험	■ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 ■ 포집기 외부 유동 현상을 고려한 노즐 형상 설계 ■ 불티의 정적 상태를 가정한 포집기 효율 기초 실험
2-10. 불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가	■ 불티 발생 조건을 고려한 포집기 효율 기초 실험 ■ 불티 포집기 유무에 따른 가연물 화재 확산 실증 실험 및 성능 평가 ※ 건설자재의 적치상황, 주변 시설 유무, 시공조건 등을 고려한 포집기 성능 실험

2-1. 건설현장 분류별 용접기 종류와 가연성 물질의 환경 조건 분석

(1) 주요 내용

- 건설현장 공정 및 공정 별 용접기 종류
- 가연성 물질 환경조건 분석

(2) 건설현장의 종류 및 공종 (건설업 산업안전보건관리비 계상 및 사용기준 별표 5)

표 2-1. 건설공사의 종류 예시표

공사종류	내 용 예 시
1. 일반건설 공사(갑)	□ 중건설공사, 철도 또는 궤도건설공사, 기계장치공사 이외의 건축건설, 도로신설 등 공사와 이에 부대하여 해당 공사를 현장 내에서 행하는 공사 가. 건축물 등의 건설공사 (1) 건축건설공사와 이에 부대하여 해당 공사현장 내에서 행하여지는 공사 (2) 목조, 연와조, 블록조, 석조, 철근콘크리트조 등의 건물 건설공사 - 건축물의 신설공사와 그의 보수 및 파괴공사 또는 이에 부대하여 행하여지는 건설공사 (3) 주택, 축사, 가건물, 창고, 학교, 강당, 체육관, 사무소, 백화점, 점포, 공장, 발전소, 특수공장, 연구소, 병원, 기념탑, 기념건물, 역사 등을 신축, 개축, 보수, 파괴, 해체하는 건설공사 (4) 철골, 철근 및 철근콘크리트조 가옥을 이축(移築)하는 공사 (5) 구입한 철파이프를 절단, 벤딩(구부림), 조립하여 축사 등을 건설하는 공사 (6) 건축물 설비공사 (가) 해당 건축물 내외에서 행하는 설비 또는 부대공사 1) 해당 건축물 내외의 전기, 전등, 전신기 등의 설비공사 2) 해당 건축물 내외의 송배전선로, 전기배선, 전화선로, 네온장치 등의 부설공사 3) 해당 건축물 내외의 급수 및 급탕 등의 설비공사 4) 해당 건축물 내외의 안전 및 소화 등의 설비공사 5) 해당 건축물 내외의 난방, 냉방, 환기, 건조, 온도습도 조절 등의 설비공사 6) 해당 건축물의 도장공사 및 시멘트 취부 방수 공사 7) 해당 건축물의 설비를 위한 석축, 타일, 기와, 슬레이트 등을 부설하는 건설공사 8) 해당 건축물 내의 냉동기의 부설에 일관하여 행하여지는 난방 및 냉동 등의 시설에 관한 공사 9) 건축물 내의 아이스크레이팅 설비에 관한 공사 10) 그 밖의 건축물의 설비공사 (나) 내장, 유리 등의 기타 전문 제공사 (7) 교량건설공사 (가) 일반교량의 신설공사와 이에 부대하여 해당 공사장 내에서 행하는 건설공사 (나) 기설교량의 보수와 개수에 관한 공사, 교량에 교각, 교대 등의 기초건설공사, 기타 교량의 보수 공사 (다) 선창의 건설공사

공사종류	내 용 예 시
	나. 도로신설공사 (1) 도로신설에 관한 공사와 이에 부대하여 행하여지는 공사 (가) 도로 또는 광장의 신설공사 (나) 기설도로의 변경, 굴곡의 제거 및 확장공사 (다) 도로 및 광장의 포장공사(사리살포공사 포함한다) 다. 기타 건설공사 (1) 중건설공사, 철도 또는 궤도신설공사 (다만, 철도 또는 궤도의 신설공사에 단순히 노무용역과 건설기술만을 제공하는 사업은 제외한다), 건축건설공사, 도로신설공사, 기계장치공사 이외의 기타 건설공사와 이에 부대하여 해당 공사현장 내에서 행하는 건설공사 (가) 수력발전시설 및 댐시설 이외의 제방건설공사 (나) 기설터널의 보수 및 복구공사 (다) 기설의 도로 등의 개수, 복구 또는 유지관리의 공사 (라) 구내에서 인입선공사, 증선공사 등 (마) 옹벽축조의 건설공사 (바) 기설도로 또는 플랫폼 등의 포장공사(사리살포, 잔디붙이기 공사 등은 포함한다) (사) 공작물의 해체, 이동, 제거 또는 철거의 공사 (아) 철골조, 철근조, 철근콘크리트조 등의 고가철도의 신설공사와 이에 부대하여 해당 공사 현장 내에서 행하는 건설공사

공사종류	내 용 예 시
	(자) 지반으로부터 10m 이내의 지하에 복개식으로 시공하는 지하도, 지하철도, 지하상가 또는 통신선로 등의 인입통신구의 신설공사와 이에 부대하여 해당 공사현장 내에서 행하는 건설공사 (차) 하천의 연제(연제: 제방도로), 제방수문, 통문, 갑문 등의 신설개수에 관한 공사 (카) 관개용수로, 그 밖의 각종 수로의 신설개수, 유지에 관한 공사 (타) 운하 및 수로 또는 이의 부속건물의 건설공사 (파) 저수지, 광독침전지 수영장 등의 건설공사 (하) 사방설비의 건설공사 (거) 해안 또는 항만의 방파제, 안벽 등의 건설공사(중건설공사의 고제방(댐) 등 신설공사 이외의 공사를 말한다) (너) 호반, 하천 또는 해면의 준설, 간척 또는 매립 등의 공사 (더) 비행장, 골프장, 경마장 또는 경기장의 조성에 관한 공사 (러) 개간, 경지정리, 부지 또는 광장의 조성공사 (머) 지하에 구축하는 각종 물탱크의 건설공사(기초공사를 포함한다) (버) 철관, 콘크리트관, 케이블류, 가스관, 휴관, 지중선, 동재 등의 매설공사 (서) 침몰된 공작물의 인양공사 (어) 수중오물 수거작업공사 (저) 그 밖의 각종 건설공사(건설공사를 위한 시추공사를 포함하나 광업시추 및 시굴공사는 제외한다) (처) 각종 운동장 스탠드 건설공사

공사종류	내 용 예 시
	(커) 체토사(쌓여서 막힌 흙과 모래)의 붕괴 및 낙석 등의 방지벽 건설공사와 이와 부대하여 해당 공사장 내에서 행하는 각종 공사 (터) 과선교(구름다리)의 건설공사 (퍼) 철탑, 연돌(굴뚝), 풍동 등의 건설공사 (허) 광고탑, 탱크 등의 건설공사 (고) 문, 담장, 축대, 정원 등의 건설공사 (노) 용광로의 건설공사 (도) 전차궤도의 송전가선의 건설공사와 그 보수공사 (로) 송전선로, 통신선로 또는 철관의 건설공사 및 기계장치의 산세정 공사 (모) 신호기의 건설공사 (보) 하수도관 세척공사 (소) 무대셋트 제작, 조립, 도색, 도배, 철거공사 (오) 그 밖의 각종 건설공사 (조) 일반 경상보수의 용역사업은 이에 분류 (2) 일반건설공사(을), 중건설공사, 철도·궤도신설공사, 특수 및 기타 건설공사의 사업에 직접적으로 관련하여 행하지 않는다고 인정되는 건설공사로서 다른 것에 분류하지 아니한 건설공사

공사종류	내 용 예 시
2. 일반건설 공사(을)	□ 각종의 기계·기구장치 등을 설치하는 공사 가. 기계장치공사 (1) 각종 기계·기구장치를 위한 조립 및 부설공사와 이에 부대하여 행하여지는 건설공사 (가) 각종의 기계 및 기구장치를 위한 기초처리 공사 (나) 기계 및 기구장치를 위한 기계대 건설공사 (다) 보일러, 기중기, 양중기 등의 조립 및 부설공사 (라) 전기수진기, 공기압축기, 건조기, 각종 운반기 등의 조립 및 부설공사 (마) 석유정제장치, 펌프제조장치 등과 같은 기계·기구의 조립 또는 부설공사 (바) 삭도 건설공사 (사) 화력 및 원자력발전시설의 설치공사 (아) 변전소 설치 및 수리공사 (자) 그 밖의 각종 기계 및 기구의 설치공사 또는 해체공사 (차) 기계장치의 수리공사 (카) 승강기 및 에스컬레이터의 설치공사 (타) 화력, 원자력 및 수력발전소의 수리공사(다만 산세정공사는 제외한다) (파) 공해방지시설 및 폐수처리시설 공사 (하) 도시가스제조 및 공급설비공사 (거) 통신장비(컴퓨터 통신장비를 포함한다)의 설치, 이전, 철거공사

공사종류	내 용 예 시
3. 중건설공사	□ 고제방(댐), 수력발전시설, 터널 등을 신설하는 공사 가. 고제방(댐) 등 신설공사 (1) 제방의 기초지반(터파기 밑나비가 10m 이상인 경우에는 그 최심부: 기초지반의 최심부는 말뚝선단의 위치임. 다만, 잔교식공법의 경우는 제외한다)에서 그 정상까지의 높이가 20m 이상되는 제방 및 해안 또는 항만의 방파제, 안벽 등의 신설에 관한 공사와 이에 부대하여 해당 공사장 내에서 행하여지는 건설공사 (가) 제방의 신설에 관한 가설공사 또는 기초공사 (나) 제방의 신설 공사장 내에서 시공하는 제방체, 배사구(쌓인 모래를 내보내는 출구를 말한다), 가제방, 골재채취, 송전선로, 철탑, 발전소, 변전소 등의 시설공사 (다) 제방공사용 자재의 운반을 하기 위한 도로, 철도 또는 궤도의 건설공사 (라) 제방의 신설에 따른 취수구, 배수로, 가배수로, 여수로, 하수구의 복개, 물탱크 등의 취수시설에 관한 공사 (마) 제방의 신설에 따른 수력발전시설용의 터널 또는 토석제방 등의 신설에 관한 공사 (바) 제방의 신설에 따른 시설의 수력발전소의 수로를 이용하여 유수량의 조절 등을 목적으로 시공하는 저수지의 신설공사 (사) 제방의 신설에 따른 수력발전시설의 신설공사용의 각종 기계의 철관의 조립 또는 그 부설공사

공사종류	내 용 예 시
	(아) 제방의 신설에 따른 홍수조절 관계용수로 또는 발전 등의 사업에 이용하기 위한 다목적댐 건설공사 (자) 제방의 신설공사를 건설하기 위하여 해당 건설업자의 사무소, 종업원의 숙소, 취사장 등을 건설하는 공사 (차) 해안 또는 항만의 방파제, 안벽 등의 건설공사와 이에 부대하여 해당 공사장에서 시행하는 건설공사 나. 수력발전시설 설비공사 (1) 이 분야에서 수력발전시설 신설공사, 고제방(댐) 신설공사 및 터널신설공사 등과 이 공사에 부대하여 해당 공사 현장에서 행하여지는 공사 (가) 수력발전시설의 신설공사에 관한 가설공사 또는 기초공사 (나) 수력발전시설의 신설공사장에서 시공하는 제방체, 배사구, 가제방, 골재채취, 송전선로, 철탑, 발전소, 변전소 등의 건설공사 (다) 수력발전시설의 신설공사용 자재의 운반을 하기 위한 도로, 철도 또는 궤도의 건설공사 (라) 수력발전시설의 신설에 따른 취수구, 배수로, 가배수로, 여수로, 하수구의 복개, 물탱크 등의 취수시설에 관한 공사 (마) 수력발전시설용의 터널 또는 토목제방 등의 신설에 관한 공사 (바) 기설의 수력발전소의 수로를 이용하여 유출량의 조절 등을 목적으로 시공되는 수력발전조절지(저수지)의 신설공사

공사종류	내 용 예 시
	(사) 수력발전시설의 신설공사용 배치플랜트, 시멘트 사이로, 골재 운반용의 벨트, 컨베이어 등의 기계와 철관의 조립 또는 부설공사 (아) 수력발전시설에 따른 홍수조절관개용수 보급 또는 발전 등의 사업에 이용하기 위한 다목적댐 시설 공사 (자) 수력발전의 신설공사를 위하여 해당 건설업자의 사무소, 종업원의 숙소, 취사장 등을 건설하는 공사 (차) 그 밖의 석도건설공사 다. 터널신설공사 (1) 터널 신설에 관한 건설공사와 이에 부대하여 행하는 내면설비공사 (가) 터널신설공사 현장에서 시공하는 가설공사, 갱도굴착공사, 토사 및 암괴지(바위지역을 말한다)의 운반처리공사, 배수시설공사 또는 터널내면설비공사 (나) 터널신설공사 현장에서 시공하는 노면포장, 사리의 살포, 궤도의 신설, 건축물의 건설, 전선의 가설, 전등 및 전화의 가설 등의 건설공사 (2) 지반에서 10m 이상의 지하까지 복개식으로 시공하는 지하철도, 지하도, 지하상가 및 통신선로 등의 인입통신구 신설공사와 이에 부대하여 해당 사업장에서 행하는 건설공사 (3) 굴착식으로 시공하는 지하철도 및 지하도신설 공사와 이에 부대하여 해당 공사장에서 행하는 건설공사

공사종류	내 용 예 시
4. 철도 또는 궤도신설공사	□ 철도 또는 궤도 등을 신설하는 공사 가. 철도 또는 궤도 신설공사 (1) 철도 또는 궤도 신설에 관한 공사와 이에 부대하여 행하는 공사(기설 노반 또는 구조물에서 행하는 철도·궤도 신설공사에 한정한다) (가) 철도 및 궤도의 건설용 기계의 조립 또는 부설공사 (나) 철도 및 궤도 신설공사에 따른 역사·과선교, 송전선로 등의 건설공사 ※ 이 공사에서 신설이란 신설선의 건설, 단선을 복선으로 하는 경우 등 신설형태로 시공되는 것을 말한다.
5. 특수 및 기타건설 공사	□ 다른 공사와 분리 발주되어 시간·장소적으로 독립하여 행하는 다음의 공사(다른 공사와 병행하여 행하는 경우에는 일반건설공사(갑)으로 분류한다) (1) 건설산업기본법에 의한 준설공사, 조경공사, 택지조성공사(경지정리공사를 포함한다), 포장공사 (2) 전기공사업법에 의한 전기공사 (3) 정보통신공사업법에 의한 정보통신공사

1) 건축공사 종류에 따른 공정분류

- 건설공사의 종류 예시표의 항목 중 가장 일반적인 일반건설공사(갑)의 건축물등의 건설공사를 기본 건설공사로 함

표 2-2. 공통가설공사 및 토공사 공정표

공통가설공사	674 d	18-02-03 (토)	19-12-25 (수)		
가설월스 설치	8 d	18-02-05 (월)	18-02-12 (월)	5FS+2 d	57
작공식	1 d	18-02-13 (화)	18-02-13 (화)	56	66FS+1 d, 68FS+4 d
녹지점용 및 게이트 설치공사	25 d	18-02-03 (토)	18-03-03 (토)	5	71
가설전기인입(한전)	125 d	18-03-09 (금)	18-07-11 (수)	5FS+30 d	
타워크레인 설치(1차공사)	3 d	19-05-08 (수)	19-05-10 (금)	142	10FF
타워크레인 해체(1차공사)	3 d	19-11-20 (수)	19-11-22 (금)	408	11FF
호이스트 설치(1차공사)	3 d	19-06-07 (금)	19-06-09 (일)	182	12FF
호이스트 해체(1차공사)	3 d	19-12-23 (월)	19-12-25 (수)	280	228, 14FF
토공사	297 d	18-02-19 (월)	19-02-07 (목)		
철거공사(홍막이 이전 사전철거)	69 d	18-02-19 (월)	18-05-09 (수)		
대공천공(SIDE&CENTER)	136 d	18-03-13 (화)	18-08-17 (금)		75S
CIP공사	16 d	18-07-19 (목)	18-08-06 (월)		
LW공사	73 d	18-06-01 (금)	18-08-24 (금)		
터파기 및 G/A공사	170 d	18-07-16 (월)	19-02-02 (토)		
기타공사	151 d	18-08-08 (수)	19-02-07 (목)		

표 2-3. 골조공사 공정표

골조공사	117 d	19-07-12 (금)	19-11-19 (화)		28FF
지하층 골조공사	95 d	19-07-12 (금)	19-10-26 (토)		
C구간 골조공사(기초)	8 d	19-07-12 (금)	19-07-20 (토)	384	398, 26SS, 599FS-88 d, 6
C구간 골조공사(B1바닥)	14 d	19-07-21 (일)	19-08-04 (일)	397	399
C구간 골조공사(B1 상부바닥)	14 d	19-08-05 (월)	19-08-19 (월)	398	400, 421FS+10 d
C구간 골조공사(1F바닥)	17 d	19-08-20 (화)	19-09-06 (금)	399	
D구간 골조공사(기초)	8 d	19-08-27 (화)	19-09-03 (화)	394	402, 26SS, 599FS-88 d, 6
D구간 골조공사(B2바닥)	14 d	19-09-04 (수)	19-09-23 (월)	401	403
D구간 골조공사(B1바닥)	14 d	19-09-24 (화)	19-10-08 (화)	402	404, 421FS+10 d
D구간 골조공사(1F바닥)	17 d	19-10-09 (수)	19-10-26 (토)	403	406, 442, 443, 444
지상층 골조공사	22 d	19-10-27 (일)	19-11-19 (화)		27SS
D구간 골조공사(2F 기둥 및 외벽)	10 d	19-10-27 (일)	19-11-06 (수)	404	407
D구간 연결통로 골조공사(3F바닥)	2 d	19-11-07 (목)	19-11-08 (금)	406	408
D구간 골조공사(4F바닥)	10 d	19-11-09 (토)	19-11-19 (화)	407	411, 458FS+7 d, 469, 47
외장공사	40 d	19-11-20 (수)	19-12-29 (일)		29FF
창호공사	30 d	19-11-20 (수)	19-12-19 (목)		
창호공사(B1-2F)	15 d	19-11-20 (수)	19-12-04 (수)	408	412, 417, 414
창호공사(3F-4F)	15 d	19-12-05 (목)	19-12-19 (목)	411	418
석공사 및 외장판넬공사	15 d	19-12-05 (목)	19-12-19 (목)		
석재 및 시트판넬공사(B1-2F)	5 d	19-12-05 (목)	19-12-09 (월)	411	415
석재 및 시트판넬공사(3F-4F, 옥상)	10 d	19-12-10 (화)	19-12-19 (목)	414	476

표 2-4. 마감공사 공정표

수장공사	101 d	19-10-26 (토)	20-02-06 (목)		
내부단열공사	15 d	19-11-11 (월)	19-11-25 (월)	226	286
경량벽체공사	35 d	19-11-11 (월)	19-12-15 (일)	226	286, 288, 289, 292SS+15
금속공사	20 d	19-10-26 (토)	19-11-14 (목)	177	287
내부마감공사	374 d	19-01-18 (금)	20-02-06 (목)		
습식공사	180 d	19-07-06 (토)	20-01-05 (일)		
방수공사	140 d	19-07-06 (토)	19-11-26 (화)	134	236SS+40 d
조적공사	90 d	19-08-15 (목)	19-11-16 (토)	235SS+40 d	237SS+60 d, 238SS+30
타일공사	80 d	19-10-18 (금)	20-01-05 (일)	236SS+60 d	
미장공사	80 d	19-09-18 (수)	19-12-06 (금)	236SS+30 d	

표 2-5. 전기·설비공사 공정표

전기공사	230 d	20-07-31 (금)	21-03-26 (금)		
접지공사	20 d	20-07-31 (금)	20-08-19 (수)	520	
케이블 트레이 설치	60 d	20-12-03 (목)	21-01-31 (일)	529FS+10 d	555,556,557,558FS+20
분전반 설치	30 d	20-11-23 (일)	20-12-22 (화)	529	
전력케이블 포설	25 d	21-02-01 (일)	21-03-01 (일)	553	
장비전원 동력배관/배선	35 d	21-02-01 (일)	21-03-11 (목)	553	
전기,소방,통신 노출배관/배선	50 d	21-02-01 (일)	21-03-26 (금)	553	
조명기구/배선기구 설치	30 d	21-02-25 (목)	21-03-26 (금)	553FS+20 d	
조명제어 공사	30 d	21-02-01 (일)	21-03-06 (토)	553	
통합배선공사	40 d	21-02-01 (일)	21-03-16 (화)	553	
CATV공사	40 d	21-02-01 (일)	21-03-16 (화)	553	
방송공사	50 d	21-02-01 (일)	21-03-26 (금)	553	
출입통제공사	25 d	21-03-02 (화)	21-03-26 (금)	553FS+25 d	
CCTV공사	25 d	21-03-02 (화)	21-03-26 (금)	553FS+25 d	
무선통신 보조설비공사	25 d	21-03-02 (화)	21-03-26 (금)	553FS+25 d	
승강설비공사	106 d	19-09-04 (수)	19-12-22 (일)		
엘리베이터 설치공사(비상용)	55 d	19-10-29 (화)	19-12-22 (일)	177SS+14 d	13FF,228,63
엘리베이터 설치공사(승강용 2개소)	70 d	19-09-04 (수)	19-11-16 (토)	167SS+14 d	19FF
설비공사	174 d	20-10-05 (일)	21-03-31 (수)		
주차장 환기설비공사	50 d	21-02-01 (일)	21-03-26 (금)	553	
EHP설치공사	25 d	21-03-07 (일)	21-03-31 (수)	553FS+30 d	
위생배관공사	40 d	21-02-01 (일)	21-03-16 (화)	553	
가스배관 이설공사	30 d	20-10-05 (일)	20-11-03 (화)	526	
자동제어공사	55 d	21-02-01 (일)	21-03-31 (수)	553	
소방배관공사	70 d	20-11-23 (일)	21-01-31 (일)	529	574
내진설비공사	70 d	20-11-23 (일)	21-01-31 (일)	529	574

(2) 건설현장에서 사용하는 용접의 종류

가. 피복아크용접(Shielded Metal Arc welding)

- 피복된 용접봉과 모재사이에 발생하는 전기아크에 의해 모재와 용접봉을 용융시켜 모재를 접합하는 용접법으로 가장 오래전부터 발달한 방법으로 설비비가 저렴하고 양호한 용접을 쉽게 얻을 수 있음. 용접봉집게로 지지된 피복용접봉과 피용접물 사이에 교류또는 직류의 전압을 걸어 아크를 발생.
- 아크의 강한열 (6000℃)에 의해 용접봉이 녹고, 금속은 증기 또는 용적이 되어 용융지에 용착되고, 모재와 일부 융합하여 용접금속을 만듦. 부재를 용접할 때는 groove를 만들어 두고 거기에 용착 금속으로 매워서 접합. 용접봉은 금속심선 주변에 유기물과 무기물 혼합물로 만들어진 피복제를 이용.
- 피복제가 아크열로 분해해서 아크를 안정시키게 되며, 용융금속은 발생한 가스와 슬래그에 의해 외부의 기체로부터 보호되어 산화, 질화를 방지. 용접봉은 금속심선 주변에 유기물, 무기물 혼합물로 만들어진 피복제를 이용. 피복제가 아크열로 분해해서 아크를 안정시키게 되고 용융금속은 발생한 가스와 슬래그에 의해서 외부의 기체로부터 보호되어 산화, 질화를 방지.
- 용접봉과 모재사이의 아크전압은 아크의 길이와 전류에 따라 증가. 용접봉의 용접속도는 아크전류에 정비례 하지만 아크전압에는 무관해서, 고능률을 얻기 위해서는 대전류를 사용. 모재표면에서 측정된 용접금속의 깊이를 용입이라고 하며, 전류 I가 클수록 깊어지고 용접속도가 빠를수록 감소함.

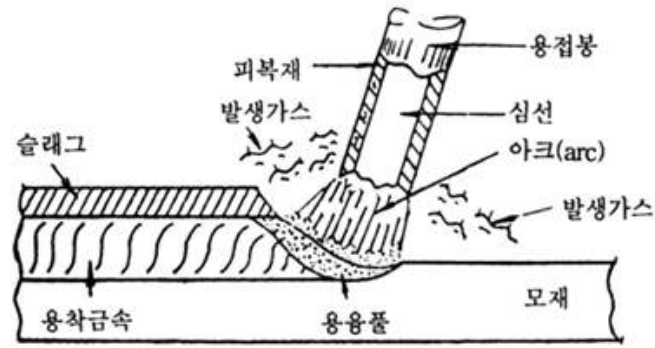


그림 2-1. 용접봉과 모재 사이의 아크 발생

$H = \frac{60EI}{V} \text{ (Joule/cm)}$	
단위길이당 전기적 에너지 (H)	
E : 아크전압 / I : 아크전류 / V : 용접속도	

- 용접 입열은 용접부에서 외부로 부터 부여되는 열량을 의미하고 대략 아크가 200A이고 아크전압이 25V, 속도가 15cm/min일때 용접 입열은 20,000 Joule의 값을 갖음.

나. TIG 용접(Tungsten Inert Gas welding & gas tungsten arc welding)

- 불활성가스 텅스텐 아크용접은 전극이 소모되지 않는 비용극식 불활성 가스 아크 용접으로 알루미늄, 구리, 구리합금, 스테인리스강, 등의 용접에 이용.

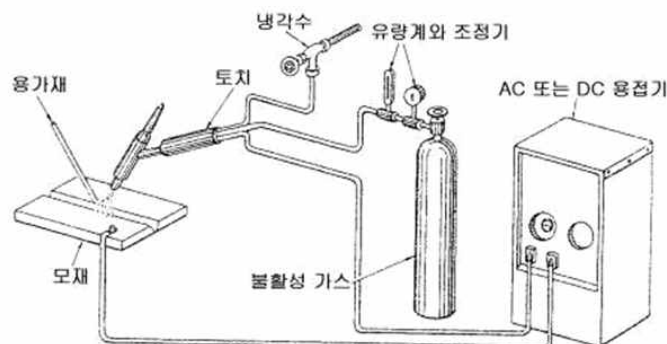
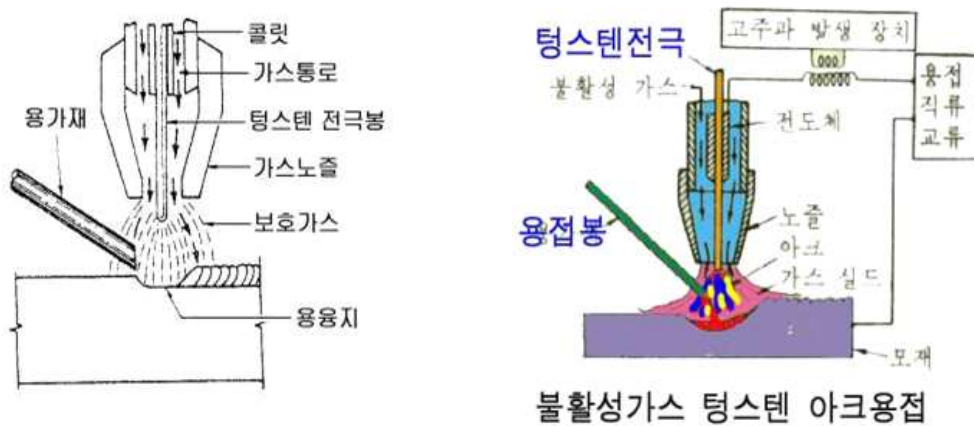


그림 2-2. TIG용접 약도

<특징>

- 피복제 및 용제가 불필요
- 전 자세 용접, 고능률적
- 용접 품질의 우수성

전원으로 직류, 교류가 쓰이고 용접결과에 극성이 미치는 영향이 크고, 수하특성이 적용.

직류전원사용
정극성으로 접속하면 전극이 (-) 모재가 (+) 가 됨. 역극성을 때는 반대로 전극이 (+) 모제가 (-)가 됨. 정극성 일때는 전자가 전극에서 모제로 흐르고 역극성 일때는 모제에서 전극으로 전자가 흐름. 정극성으로 접속하면 비드의 폭이 좁고 용입이 깊어짐.
교류전원사용
정극성과 역극성의 중간상태가 되어 각각의 특징을 이용할 수 있다. 전극의 지름이 비교적 작아도 되며 아르곤가스를 사용하면 경금속, 등의 산화피막의 크리닝 작용이 있고, 아크가 끊어지기 쉬우므로 전류가 낮은 고주파를 용접전류에 겹쳐서 가스이온을 항상 발생시키면서 아크를 안정시켜주어야 함. TIG용접에서는 직류 역극성을 사용하며, 정극성은 산화막 청정작용이 없으므로 경합금에는 적당하지 않음. TIG용접의 역극성은 아르곤가스 이온이 모재표면에 충돌하여 산화막을 제거하는 작용이 있고 이 때문에 용제를 사용하지 않아도 용접이 가능.

다. MIG 용접(Metal Inert Gas welding & gas metal arc welding)

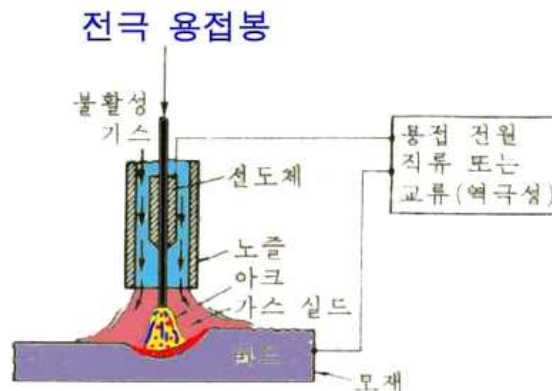
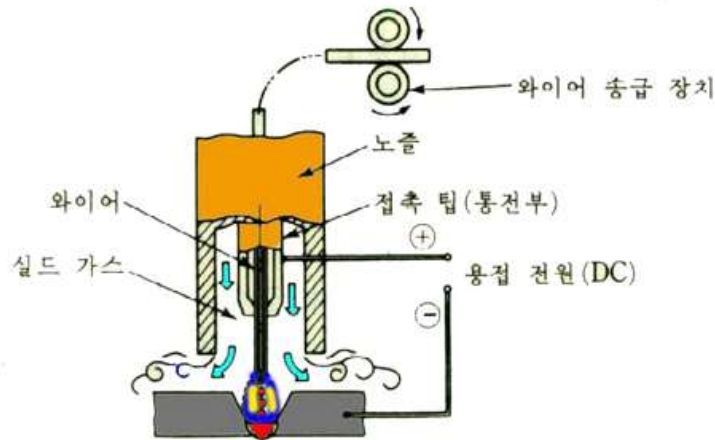


그림 2-3. 불활성가스 금속 아크용접

- 불활성 금속 아크용접은 전극선을 계속 소모하여 용극식 불활성 아크 용접이라 부름. 직류역극성으로, 전극와이어는 미립자가 되어 모재에 이행하여 매우 아름다운 비드 외관이 얻어짐.
- 아르곤가스중의 MIG아크는 중심부에 백열의 원추부가 있으며, 종모양의 미광부가 있고 다시 외부를 차가운 불활성 가스류가 에워싸고 있음. 아크는 매우 안정되고 그 속을 와이어의 용적이 고속도로 용융지에 투사되고 있음.
- MIG용접은 전류밀도가 매우 높음. (피복아크용접의 6배, TIG에 2배) 비드의 표면은 매끄럽게 얻어지며 모든 자세에서 용접이 가능. 직류의 정전압 특성과 상승특성의 이점을 이용하여 지향성을 가짐.

라. CO2 용접

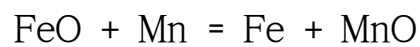
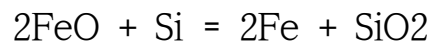


이산화탄소 아크 용접의 원리
그림 2-4. CO2 용접 약도

표 2-6. CO2 용접의 장점

1	산화, 질화가 없고 우수한 용착금속을 얻음.
2	완전한 용입, 기계적 성질이 양호.
3	저렴한 가격, 용제가 없으므로 슬래그 석임이 없음.
4	모두 자세에서 용접 가능, 전류밀도가 커서 용입이 깊고 용접속도가 빠름.
5	CO2 아크용접은 값이 싼 탄산가스를 사용하므로 용접의 경비가 절감되어 매우 경제적이다.

- 와이어와 모재사이에 아크를 살생시키고 토치선단의 노즐에서 순수한 탄산가스나, 다른 가스를 혼합한 혼합가스를 내보내어 아크와 용융금속을 대기로부터 보호하고 있음
- 용접에 사용되는 CO2 는 아크열에 의해 해리되어 $CO_2 = CO + O$ 같이 반응하고 강한 산화성을 나타내게 되어 금속의 주위를 산성분위기로 만들기 때문에 용융금속에 탈산제가 없으면 금속은 산화. 응고점 부근에서 심하게 일어나기 때문에 빠져나가려던 CO가 빠져나가지 못하여 용착금속에 산화된 기포가 많이 됨



- 이것을 없애기 위해 망간(Mn) 규소(Si)들을 첨가하여 이와 같은 반응을 하여 용융금속의 산화철을 적당히 감소시켜 기공의 발생을 방지. 이 반응에 의하여 용융 금속중에 산화철을 적당히 감소시켜 기공의 발생을 방지할 수 있음. 이때, 산화철은 대부분 없어지고 동시에 일산화탄소도 발생하지 않으므로 양호한 용접부를 얻을 수 있고, 일산화탄소에 의한 피해를 방지 할 수 있음.
- 생성된 MnO와 SiO2 등은 용착금속과의 비중차에 의해 슬래그가 되어 비드 표면에 분리되어 가열됨.

(3) 건설현장 용접기 사용시 RISK 분석

1) 건설공사 공정진행에 따른 환경조건 분석

가. 건설현장 자재보관 실태

<건설현장 자재보관 특성>

- 일반적으로 건설공사 초기단계는 자재 반입량이 적고 여유 공간이 충분하여 별도 자재 저장소 설치 등에 의한 자재보관이 용이하나, 지상층 골조공사가 진행되면서 지상 공간 부족, 마감재 품질 문제 등으로 지상층에 설치한 자재저장소 및 신규 반입되는 마감재 등이 대부분 실내공간으로 옮겨져 보관되어짐.
- LPG 등 가연성 가스, 유류 등 인화성 액체의 경우 기성품의 위험물 저장소 설치가 비교적 용이하나, 스티로폼, 우레탄, 부직포 등 부피가 큰 자재의 경우 여유공간이 부족하고 우천 등으로 인한 품질 문제로 대부분 지하층 등 실내 공간에 보관하여 화재위험이 높아짐.



2) 공종별 가연성 자재 현황

<주요 공종별 사용 물질 종류>

공 종	가연성 자재	비고
가설공사	스티로폼, 기타 단열재 신나, 페인트, 등유 부탄가스, LPG 등	고체 액체 기체
골조공사	스티로폼, 기타 단열재 경유, 락카, 박리제 등 아세틸렌, LPG	고체 액체 기체
방수공사	우레탄(*) 프라이머 등	고체 액체
내장공사	우레탄폼, 단열재, 내장제 접착제 등	고체 액체
도장공사	신나, 에폭시, 유성페인트 등	액체
전기·기계 설비공사	우레탄폼, 기타 단열재 등 LPG, 부탄가스	고체 기체
기 타	부직포, 목재 등유, 경유, 락카, 박리제, 윤활유 LPG, 알콘가스 등	고체 액체 기체

- 우레탄은 난연재로 분류되어 건축물의 내부 마감재로 사용하고 있으나, 고열의 용접 불티가 우레탄에 떨어지면 그 속으로 파고 들어가 서서히 연소하다가 급속히 발화되는 성질이 있어 화재에 매우 취약하므로 가연성 자재로 분류하여 보관 및 관리 필요
- 건설현장에서 작업공종별 사용하는 주요 가연성 자재는 신나, 페인트, 경유, LPG 등 인화성 물질과 스티로폼·우레탄 폼 등 가연성 물질이 주로 사용되고 있어 화재 발생 시 대형재해로 확산될 위험이 상존함. 따라서 가연성 자재(합성수지 등)는 화기 위험이 없는 장소 또는 별도의 안전한 장소에 보관하여야 함

표 2-7. 가연성 자재 종류별 보관 기준

가연물 종류		저장, 보관
액체	신나, 페인트, 등유, 경유, 박리제, 접착제 등	옥외 저장소 환기, 시건장치, 소화기 비치
가스	LPG, 부탄가스, 아세틸렌, 알콘가스, 락카 등	옥외 저장소, 환기, 시건장치, 소화기 비치, 용기의 온도를 섭씨 40℃ 이하로 유지
고체	내장제, 스티로폼, 우레탄폼, 부직포	옥외 보관소, 방화벽, 소화기 비치 ※ 실내 지하 보관시 불연재질 방호벽, 자동확산소화장치 설치

3) 건설현장 가연성 자재 및 용접불티의 위험성

- 건설현장에는 스티로폼 단열재 등 화재 시 다량의 유독가스를 발생 시키는 가연성 자재가 많이 사용되고 있음. 특히 대형건설 현장의 경우 자재를 지하주차장 등 내부공간에 보관하는 경우가 많아 불이 나면 연소 확대 위험성이 매우 높음.
- 건설현장에서 사용되는 주요 가연성 자재는 신나·페인트·경유·LPG 등 위험물과 스티로폼·우레탄 폼 등 가연성 물질임. 이들 제품은 용접작업 불티에 의해 쉽게 착화되고 큰 화재로 번질 위험성이 높음.
- 공사장 용접작업에 의한 불티 화재의 최초 착화물을 분석한 결과, 스티로폼 등 단열재가 35%(632건), 피브시(PVC) 등 합성수지류 19%(350건), 종이류 11%(205건), 직물류 10%(184건) 순으로 나타남.

2-2. 용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구사례 조사

(1) 용접불티의 특성

- 용접·용단 시 발생하는 불티의 특성은 다음과 같이 6가지로 나뉘볼 수 있음.

표 2-8. 용접시 발생하는 불티의 특성

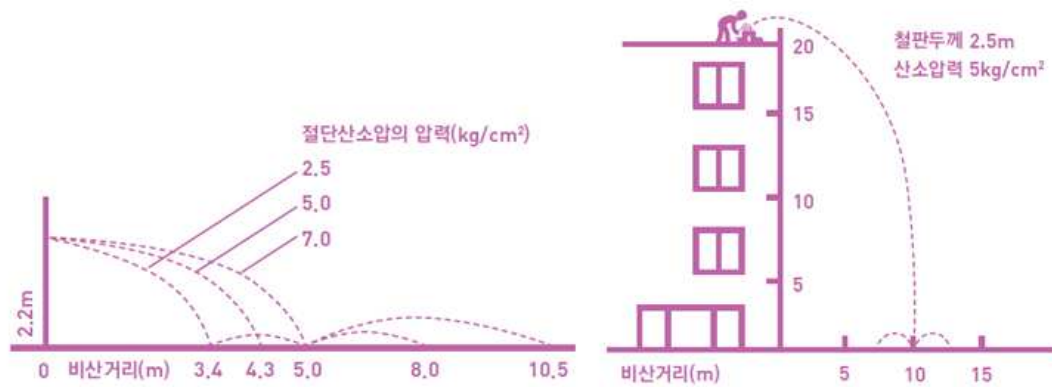
1	작업 시 수천개가 발생·비산
2	절단부에서 비산되는 용융금속의 점적은 작업장소의 높이에 따라서 수평 방향으로 최대 11m정도까지 흩어짐
3	축열에 의하여 상당 시간 경과 후, 불꽃이 발생되어 화재를 일으키는 경향이 있음
4	절단작업 시 비산되는 불티는 3000℃ 이상의 고온체
5	산소의 압력, 절단속도, 절단기의 종류 및 방향, 풍속 등에 따라 불티의 양과 크기가 달라짐
6	발화원이 될 수 있는 불티의 크기는 직경이 0.2 ~ 3mm



그림 2-6. 용접 용단 작업시 발생하는 비산불티의 특성

표 2-9. 용접 종류에 따른 불티의 최고 온도

종류	최고온도(℃)	종류	최고온도(℃)
산소-아세틸렌불꽃	3,200	테르밋	2,300
철 아크	6,000	원자소수	4,000
탄소 아크	5,300	용해금속	2,000



1. 용단작업 시작



2. 용단볼티 가연물(단열재 등)에 비산



3. 가연물에서 연기 발생 (훈소 진행)



4. 유염연소로 전환→ 화재발생

그림 2-7. 용접 볼티에 의한 착화 실험

- (볼티 특성) 용접·용단 작업 시 다량의 볼티가 발생하면서 비산되고, 볼티는 현장조건(풍속, 풍향, 높이)에 따라서 비산거리가 늘어남.
- 특히, 용접·용단 볼티는 약 1600℃~3000℃ 정도의 고온체로서, 비산되고 상당시간 경과 후에도 볼티가 가진 축열에 의해 화재가 발생할 수 있음
- (화재발생 메카니즘) 용접·용단 볼티가 단열재 내부에 들어가면, 일정부분 훈소의 형태(연기발생)로 진행되다가, 충분한 산소의 공급과 축열 등으로 온도가 상승되는 경우 화재로 확산될 수 있음.
- ** 훈소 : 화재가 발생하기에는 온도가 낮거나 산소가 부족한 상황 때문에 화염이 없이 가연물의 표면에서 열이 발생하면서 서서히 연소되는 현상

(2) 건설현장용접불티로 인한 사고사례 및 특징

1) 최근 화재발생 현황

- 소방청이 공사장 용접작업 중 불티로 인한 화재를 분석한 결과 최근 5년간 (2014~2018) 1,823건이 발생했고, 인명피해는 사망 20명, 부상 268명으로 총 288명임.

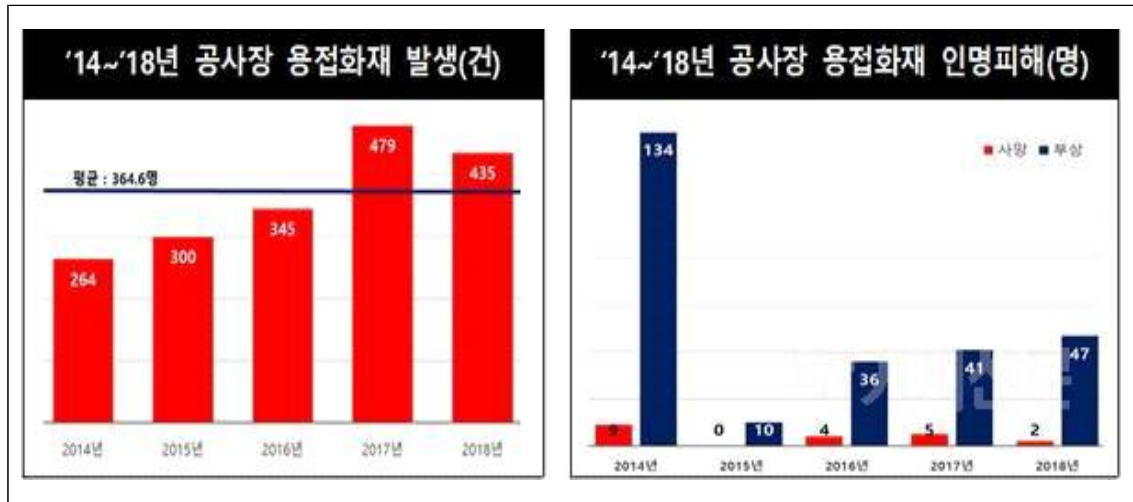


그림 2-8. 5년간 공사장 용접작업중 불티로 인한 화재 분석 결과

2) 건축공사 화재발생 현황 (2001년 ~ 2019년)

- 건설현장에는 수많은 가시설물과 건축자재가 사용되어지고 있으며 건축자재 중에는 스티로폼 단열재 등 부피가 크고 가연성이 있는 자재가 다수 사용되고 있음
- 건물의 고층화, 조경공사 선 시공 등으로 지상 자재보관 장소가 부족하여 가연성 자재를 지하주차장에 보관 또는 저장함으로써 인근에서 각종 화기 작업시 대형사고*로 발전될 위험이 높음 (세종시 주상복합 신축공사 화재사고(3명 사망, 37명 부상)는 대량의 스티로폼, 우레탄 폼 등 가연성 자재들을 지하주차장에 보관함으로써 대형사고로 이어짐)

(단위 : 명)

구분	계	`11	`12	`13	`14	`15	`16	`17
계	575	136	188	138	162	148	170	108
사망자	47	14	14	15	7	11	15	14
부상자	528	122	174	123	155	137	155	94

※ 최근 7년간 화재·폭발로 인한 사망자는 47명이 발생

(3) 건설현장 화재폭발사고 발생 현황

- 화재·폭발사고 : 화재·폭발로 인한 재해는 전체 건설업 재해의 0.6%~0.7% 수준으로 낮은 편이나, 사고 발생시 다수의 사상자가 발생하므로 국민들이 느끼는 체감도는 매우 높음
- 기인물 : 건설현장에서는 「설비·기계(주로 용접관련)」, 「용기·용품·기구」에 기인하여 매년 62.3% 이상의 화재·폭발사고가 발생
- 가연물·점화원 : 건축물 내장재인 스티로폼, 우레탄 폼이 주요 가연물로서 용접·용단 등 화기작업시 용접불티에 의한 화재사고 등이 62.5%를 차지
- 행정안전부 '건설현장 용접작업 원인조사 결과보고(2018.07)'를 살펴보면 용접·용단작업 중 불티에 의한 화재사고 가 매년 지속적으로 발생
 - * 975 건 ('13) → 1,020 건 ('14) → 1,074 건 ('15) → 1,024 건 ('16) → 1,168 건 ('17)
 - 707 건 ('18.7)
- 국립재난안전연구원 사고원인분류체계(대분류 7, 중분류 17, 소분류 38)에 따른 원인분류 결과
 - ⇒ 작업자의 부주의 및 안전의식 미흡(26건), 법제도 부재/미흡(23건), 안전장치 미설치(20건), 관리/감독의 미흡(17건) 등이 사고발생에 주요한 요인으로 분류
- 행정안전부의 개선과제로 추진하는 사항
 - 특정소방대상물 · 위험물시설 내 용접작업 시 사전 신고절차 도입 안전관리자 등은 작업 시 체크리스트 에 따라 작업자 안전교육 및 화재예방 조치를 실시 하고 소방서 에 사전 신고
 - 화재감시자의 배치대상 확대 및 교육 강화
 - 화재감시자의 지정 의무 공사 현장 확대
 - 임시소방시설 설치·유지·관리 의무 위반 시 벌칙 부과절차 개선
 - : 임시소방시설 설치 및 유지·의무 위반 적발 즉시 과태료 (벌금)부과
 - 용접작업 시 화재예방조치 이행에 대한 관계 부처 합동점검 강화
 - : 용접 작업 시 화재예방을 위한 관계부처 (고용노동부 ,소방청)합동 점검 을 주기적으로 실시
 - 안전관리자의 화재예방교육 의무 강화
 - : 소방안전관리자 ,안전관리자 등 대상 화기작업 관련 교육과정 개설
 - 현장 작업자 대상 체크리스트 및 교육 자료 (OPL :One Point lesson)

표 2-10. 대형 화재·폭발사고 현황

사고현장	피해상황	인프라 안정성
이천 물류 냉동창고	사망40명, 부상10명	용접불티, 우레탄폼 착화
서울 종로미술관	사망4명, 부상9명	전기화재, 우레탄폼 착화
김포 주상복합	사망4명, 부상2명	용접불티, 보온재 착화
동탄 상가매장 복구	사망2명, 부상8명	용접불티, 가연성 자재 착화
부평 주상복합	사망3명	용접작업, 단열재 착화
세종 주상복합	사망3명, 부상37명	전기화재, 단열재 착화

구 분	내 용
사고명	- 이천 물류 냉동창고 신축공사 화재
재해사진	
재해일자	- 2008년 1월 07일
재해개요	- 냉동설비 마무리 공사중 원인 미상의 점화원에 의하여 화재발생
피해상황	- 사망 40명, 부상 10명
재해원인	- 인화성 물질, 가연성 가스과 점화원으로 가능한 화기 등을 동시에 취급·사용
예방대책	- 폭발 또는 화재 등의 예방 조치 철저 - 인화성물질과 화기(점화원) 등을 동시에 취급·사용하는 경우, 인화성 물질의 증기에 의한 화재·폭발의 우려가 높으므로 이를 예방하기 위한 충분한 통풍·환기 및 제진 등 조치 - 화재 예방을 위한 소화설비 설치·운용 철저

구 분	내 용
사고명	- 서울 종로미술관 신축공사 화재
재해사진	
재해일자	- 2012년 8월 13일
재해개요	- 가설전선 등에서 발생한 스파크가 마감재(폴리우레탄폼)에 착화되어 화재 발생
피해상황	- 사망 4명, 부상 9명
재해원인	- 단락, 반단선 등에 의한 전기스파크가 우레탄폼에 착화
예방대책	- 성형된 폴리우레탄폼 등 가연성 물질과 점화원의 차단조치 - 가설전등 전선연결부 절연처리 철저

구 분	내 용
사고명	- 김포 근린생활시설 신축공사 화재
재해사진	
재해일자	- 2016년 09월 10일
재해개요	- 스프링클러 배관작업 중 고속절단기 에서 발생한 불티로 인하여 화재 발생
피해상황	- 사망 4명, 부상 2명
재해원인	- 위험물질 등 취급작업 시 화재예방 조치 미 실시
예방대책	- 위험물질 등 취급 작업 시 화재예방 조치 철저 - 지하작업장 통풍·환기조치 철저

구 분	내 용
사고명	- 동탄 상가매장 복구공사 중 화재
재해사진	
재해일자	- 2017년 2월 4일
재해개요	- 인테리어 시설 철거 작업 중 불티가 가연성 자재에 옮겨 붙으면서 화재 발생
피해상황	- 사망 2명, 부상 8명
재해원인	- 화기작업 중 화재예방조치 미실시
예방대책	- 통풍 등이 충분하지 않은 장소에서 용단 작업시 화재예방 조치 실시 - 가연물 주변 화기작업 금지 - 소화설비 적정상태 설치 및 유지관리

구 분	내 용
사고명	- 광고 주상복합 신축공사 중 화재
재해사진	
재해일자	- 2017년 12월 25일
재해개요	- H-beam을 산소절단기로 용단 작업 중 불티가 야적된 단열재에 옮겨 붙어 화재발생
피해상황	- 사망 1명, 부상 13명
재해원인	- 가연물 주변 화기작업, 화재감시자 미배치
예방대책	- 가연물 주변 화기작업 금지 - 화재감시자 배치

구 분	내 용
사고명	- 부평 주상복합 신축공사 중 화재
재해사진	
재해일자	- 2018년 3월 30일
재해개요	- 외벽 석공사용 철물 설치를 위한 용접작업 중 불티가 단열재에 옮겨 붙어 화재발생
피해상황	- 사망 3명
재해원인	- 가연물 주변 화기작업, 소화설비 미설치
예방대책	- 통풍 등이 충분하지 않은 장소에서의 화기작업 시 안전조치 실시 - 작업 준비 및 작업절차 수립 - 작업장 내 위험물의 사용·보관 현황 파악 - 화기작업에 따른 인근 인화성 액체에 대한 방호조치 및 소화기구 비치 - 불꽃, 불티 비산방지 조치 / 환기 등의 조치 - 가연물 주변 화기작업 금지

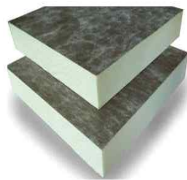
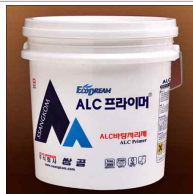
구 분	내 용
사고명	- 세종 주상복합 신축공사 중 화재
재해사진	
재해일자	- 2018년 6월 26일
재해개요	- 가설 조명등 연결전선의 접속부 과열 등으로 인한 단락 불꽃이 단열재에 착화되면서 화재발생
피해상황	- 사망 3명, 부상 37명
재해원인	가설전선 등 전선 접속방법 부적합에 따른 단락으로 스파크 발생
예방대책	- 가설전등 설치시 전선 접속부의 전기적·기계적 방호조치 철저 - 화재 등 비상 시 경보운영체계 확보

2-3. 가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석

(1) 주요 공정별 주요 가연성 자재

표 2-11. 주요 공정별 주요 가연성 자재

공종	상태	가연성 자재	비고	공종	상태	가연성 자재	비고
가설 공사	고체	스티로폼		골조 공사	고체	스티로폼	
		단열재				단열재	
	액체	신나			액체	경유	
		페인트				락카	
		등 유 (Kerosine)				박리제	
	기체	부탄가스			기체	아세틸렌	
		LPG				LPG	

공종	상태	가연성 자재	비고	공종	상태	가연성 자재	비고
방수 공사	고체	우레탄		도장 공사	액체	신나	
	액체	프라이머				에폭시	
내장 공사	고체	우레탄폼		전기/ 기계 설비 공사	고체	유성페인트	
		단열재				우레탄폼	
		내장재				단열재	
	액체	접착제		액체	LPG		
					부탄가스		

공종	상태	가연성 자재	비고	공종	상태	가연성 자재	비고
기타	고체	부직포			액체	박리제	
		목재				윤활유	
	액체	등유		기타	기체	LPG	
		경유				아르곤가스	
		락카					

- 가설공사 : 스티로폼, 단열재, 신나, 페인트, 등유, 부탄가스, LPG 등
- 골조공사 : 스티로폼, 단열재, 경유, 락카, 아세틸렌, LPG
- 방수공사 : 우레탄, 프라이머 등
- 내장공사 : 우레탄폼, 단열재, 내장재, 접착제 등
- 도장공사 : 신나, 에폭시, 유성페인트 등
- 전기/기계설비 공사 : 우레탄폼, 단열재, LPG 부탄가스 등

(2) 주요 공정별 가연성 자재

- 2.3.1절의 주요 공정별 가연성 자재를 조사한 결과 전체 공정 과정에서 고체류의 가연물은 아래의 표와 같이 정리할 수 있음.

표 2-12. 주요 공정별 고체류 가연성 자재

고체가연물	구분	분자구조
단열재	스티로폼	(C ₈ H ₈) _n
	우레탄폼	C _{6.3} H _{7.1} NO _{2.1}
	폴리에틸렌폼	(C ₂ H ₄) _n
	고무발포보온재	C ₅ H ₈
	부직포	C ₁₀ H ₂₀ (CO) ₂ (NH) ₂
내장재	합판	CH ₂ O
우레탄	우레탄	NH ₂ COOC ₂ H ₅
목재	합판	CH ₂ O
	소나무	C ₂₀ H ₃₀ O ₂

- 이 중에서도 보온재의 경우 본 연구팀에서 기존 연구과제 수행 결과에 따라서 시험한 결과 다음과 같은 화재 특성을 분석하였음.

(3) 보온재의 화재 특성

표 2-13. 국내에서 사용되는 배관보온재의 난연성능 비교

구분		은박PE	무은박PE	고무발포보온재	글라스울	비고
국내기준	한계산소지수 (28 이상)	22.4	-	35	-	
	수평연소성 (HF-1)	HF-1	HFB	HF-1	-	
국외기준	Peak HRR <300	609	585	178	81	NFPA 274
	Total HRR <83	62.29	45.52	44.67	34.33	
	Total Smoke <500	421	751	213	0	
	Flame Height <0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<0.3	
	Max. Temp. <538	922	907	517	194	
난연등급	EN 13501-1	Class E	Class E	Class C	Class A2	
	ASTM E84	Class C	-	Class A		

(4) 액체와 기체 가연물

- 액체와 기체 가연물은 아래의 표와 같이 정리할 수 있음

표 2-14. 주요 공정별 액체류 가연성 자재

액체 가연물	분자구조
신나 (Thinner)	C7H8
페인트	
등유 (Kerosine)	CH4
경유	CH4
락카	C16H22O4
박리제	(C2H4O) _n RO
접착제	
에폭시	C15H16O2
유성페인트	C5H11NO2S
윤활유	

(5) 열화학적 물성 자료 구축

표 2-15. 가설공사 주요 가연물 및 열화학적 물성(점화조건 포함) 관련 자료

Thermo-Chemical Properties	[Unit]	styrofoam [5.1-5.2]	diesel [5.1, 5.5]	acetylene [5.1-5.2]	Steel [5.1-5.2]
Absorp.Coefficient	m-1	(C8H8) n	C4H10	C3H8	CH4
Activation Energy, E	(10-5 cal.)	N/A	N/A	N/A	N/A
Auto ignition Temp.	℃	N/A	405-761	504-557	210
Boiling Temp.	℃	N/A	-0.5	-42.1	304 - 574
Che. Structure	[-]	(C8H8) _n (5.1)	C4H10	C3H8	N/A
Conductivity	W/m/K	0.033	N/A	0.02	0.15
Density	kg/m3	1050	578.8	500.5	780-810
Emissivity	[-]	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Comb.	kJ/kg	39200	49501	46300	43100
Heat of Reac.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Vapor.	kJ/kg	N/A	N/A	425.5	290.8
Melting Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Molecular Weight	kg/kmole	104.1	58.124	44.094	154.0
Ref. Rate	s-1	N/A	N/A	N/A	N/A
Reference Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Specific Heat	kJ/kg/K	1.11	1.67	1.67	2.01
Yield_CO	g/g	0.06	0.007	0.005	0.012
Yield_Soot	g/g	0.20	0.029	0.024	0.042

표 2-16. 골조공사 주요 가연물 및 열화학적 물성(점화조건 포함) 관련 자료

Thermo-Chemical Properties	[Unit]	styrofoam [5.1-5.2]	diesel [5.1, 5.5]	acetylene [5.1-5.2]	Steel [5.1-5.2]
Absorp.Coefficient	m-1	(C8H8) n	CH4	C2H2	Fe
Activation Energy, E	(10-5 cal.)	N/A	N/A	N/A	N/A
Auto ignition Temp.	℃	N/A	210℃	305-581	N/A
Boiling Temp.	℃	N/A	250~350	-84	N/A
Che. Structure	[-]	(C8H8)n (5.1)	N/A	C2H2	N/A
Conductivity	W/m/K	0.033	0.13	0.02	45.8
Density	kg/m3	1050	820-845	1.092	7850
Emissivity	[-]	N/A	N/A	N/A	0.85
Heat of Comb.	kJ/kg	39200	N/A	49923	N/A
Heat of Reac.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Vapor.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Melting Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	1510
Molecular Weight	kg/kmole	104.1	N/A	26.04	N/A
Ref. Rate	s-1	N/A	N/A	N/A	N/A
Reference Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Specific Heat	kJ/kg/K	1.11	1.55	1.674	0.49
Yield_CO	g/g	0.06	0.05	0.042	N/A
Yield_Soot	g/g	0.20	N/A	0.096	N/A

표 2-17. 설비 및 내장공사 주요 가연물 및 열화학적 물성(점화조건 포함) 관련 자료

Thermo-Chemical Properties	[Unit]	LPG [5.1-5.2]	Butane gas [5.1-5.3]	epoxy [5.1-5.2]	Urethane foam [5.1-5.2, 5.6]
Absorp.Coefficient	m-1	C3H8	C4H10	C15H16O2	CH1.8O0.30N0.05
Activation Energy, E	(10-5 cal.)	N/A	N/A	2.564	24.5
Auto ignition Temp.	℃	455-851	218	429.3	N/A
Boiling Temp.	℃	-42.1	-0.5	N/A	N/A
Che. Structure	[-]	C3H8	C4H10	CH1.3O0.20	CH1.74O0.323 N0.0698
Conductivity	W/m/K	0.02	0.017	0.35	0.02
Density	kg/m3	500.5	2.4	2137	N/A
Emissivity	[-]	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Comb.	kJ/kg	50329	49501	28800	26200
Heat of Reac.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Vapor.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Melting Temp.		N/A	N/A	N/A	N/A
Molecular Weight	kg/kmole	44094	N/A	N/A	N/A
Ref. Rate	s-1	N/A	N/A	N/A	N/A
Reference Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Specific Heat	kJ/kg/K	1.67	1.67	1N/A	0.021
Yield_CO	g/g	0.005	0.007	0.086	N/A
Yield_Soot	g/g	0.024	0.029	0.098	N/A

표 2-18. 마감공사 및 기타 주요 가연물 및 열화학적 물성(점화조건 포함) 관련 자료

Thermo-Chemical Properties	[Unit]	Felt [5.1-5.2]	wood [5.1-5.7]	polyethylene foam [5.1-5.7]	PVC [5.1-5.2, 5.7]
Absorp.Coefficient	m-1	N/A	N/A	N/A	2145
Activation Energy, E	(10-5 cal.)	385	10.09	N/A	3.292
Auto ignition Temp.	℃	N/A	280	N/A	468.6
Boiling Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Che. Structure	[-]	N/A	CH1.74O0.323 N0.07	CH1.5Cl0.5	C2H3Cl
Conductivity	W/m/K	0.07	0.25	0.04	0.19
Density	kg/m3	130-200	420-540	20	1360
Emissivity	[-]	N/A	N/A	N/A	0.93
Heat of Comb.	kJ/kg	N/A	24600	42000	25100
Heat of Reac.	kJ/kg	N/A	600	920	170
Heat of Vaporiz.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Melting Temp.	℃	N/A	N/A	105-125	N/A
Molecular Weight	kg/kmole	N/A	N/A	N/A	N/A
Ref. Rate	s-1	N/A	0.0055	0.005	0.005
Reference Temp.	℃	N/A	250	225	250
Specific Heat	kJ/kg/K	1.38	1.75-1.84	0.33	0.84~1.17
Vaporization Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	1.5
Yield_CO	g/g	N/A	0.028	N/A	0.063
Yield_Soot	g/g	N/A	0.194	N/A	0.172

표 2-19. 기타공사(전기/기계설비 등) 주요 가연물 및 열화학적 물성(점화조건 포함) 관련 자료

Thermo-Chemical Properties	[Unit]	PE [5.1-5.2, 5.7]	PP [5.1-5.2, 5.7]	PMMA [5.1-5.2, 5.7]	PUR (rigid) [5.1-5.3]
Absorp.Coefficient	m-1	N/A	N/A	N/A	N/A
Activation Energy, E	(10-5 cal.)	N/A	42.914	N/A	24.339
Auto ignition Temp.	℃	330-410	433.4	N/A	396.5
Boiling Temp.	℃	N/A	N/A	200	N/A
Che. Structure	[-]	(C2H4)n	(C3H6)n	[CH2C(CH3)(CO2CH3)]n	C25H42O6N2
Conductivity	W/m/K	0.4	0.1-0.22	0.17-0.25	0.05
Density	kg/m3	900~1400	946	1180	1253
Emissivity	[-]	N/A	N/A	N/A	N/A
Heat of Comb.	kJ/kg	43280	43310	25200	26200
Heat of Reac.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	600
Heat of Vaporiz.	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	N/A
Melting Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Molecular Weight	kg/kmole	N/A	N/A	N/A	N/A
Ref. Rate	s-1	N/A	N/A	N/A	0.0055
Reference Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	312
Specific Heat	kJ/kg/K	N/A	1.92	N/A	1.8
Vaporization Temp.	℃	N/A	N/A	N/A	N/A
Yield_CO	g/g	0.027	0.025	0.19	0.031
Yield_Soot	g/g	N/A	N/A	N/A	0.13

2-4. 용접기 종류 및 볼티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리

(1) 이론적 고찰

- 용접에서 발생하는 볼티 입자의 특성은 전력의 크기와 모재의 종류 그리고 용접봉의 두께와 재료에 따라서 달라질 수 있으며, 그림 2-9과 같은 관계에 의해서 식 (2.1)과 같은 에너지 평형 관계가 성립되어야 함.

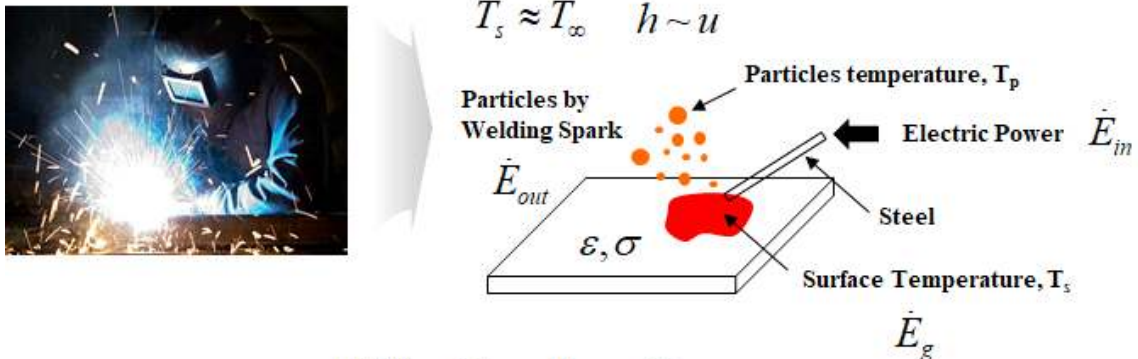


그림 2-9. The Schematic Diagram of Energy Balance of the Welding Sparks.

$$\Delta \dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} \quad (2.1)$$

- 여기서, $\Delta \dot{E}_{st}$, $\dot{E}_{in}$, $\dot{E}_g$, $\dot{E}_{out}$ 는 각각 검사체적 내에서의 에너지 변화량, 용접봉에 전달되는 전력에 의한 에너지, 모재의 내부 열발생량 그리고 볼티 입자에 의해서 검사체적을 빠져 나가는 에너지량을 의미함. 따라서 용접이 발생하는 동안 에너지 유입에 의한 모재의 온도가 일정한 경우 정상상태에서 입자의 온도가 균일한 상태를 가정 하였을 때 볼티에 의해서 빠져나가는 에너지량은 식 (2.2)와 같이 표현할 수 있음.

$$\sum_{i=1}^{\infty} E_{p,i} = \sum_{i=1}^{\infty} n_i q_{p,i} V_i \quad (2.2)$$

- 여기서 하첨자 i 는 볼티 입자 분포 중 하나의 크기를 의미하며 n_i , q_p 그리고 V_i 는 각각 볼티 입자 하나의 열량, 1번째 볼티 입자의 개수와 체적을 의미함. 따라서 V_{total} 은 V_i 로부터 식 (2.3)과 같은 관계를 갖게 됨.

$$V_{total} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\pi}{6} d_{p,i}^3 \times n_i = \frac{\pi}{6} \bar{N} d_m^3 \quad (2.3)$$

- 여기서 $d_{p,i}$, d_m , 그리고 $\bar{N}$ 는 각각 볼티 입자 하나의 크기, 평균 볼티입자의 크기와 개수를 각각 의미하며, 볼티입자의 평균 크기가 결정되면 아래와 같은 관계에 평균 볼티입자의 개수를 구할 수 있음.

$$\bar{N} = \frac{8 V_{total}}{\pi d_m^3} \quad (2.4)$$

- 또한, 식 (3.2)에서 복사 열전달을 고려하지 않는 경우 볼티 입자는 비산되면서 대류에 의한 열전달을 받기 때문에 에너지 평형 관계에 의해서 식 (2.5)와 같이 정리할 수 있음.

$$\sum_{i=1}^{\infty} n_i q_{p,i} V_i = \bar{N} \bar{q}_p = \bar{N} h A_{p,s} (T_{p,s} - T_{\infty}) \quad (2.5)$$

- 여기서 $A_{p,s}$, h , $T_{p,s}$ 그리고 T_{∞} 는 각각 평균 볼티 입자의 표면적, 대류열전달계수, 볼티 입자의 온도, 그리고 외기의 온도를 각각 의미하며, 식 (2.1)에서 열발생이 없고 열 에너지가 빠져나가는

양은 모재의 표면에서 전도와 불티 입자로 전달된 열원에 해당하기 때문에 식 (2.6)과 같은 관계에 의해서 식을 정리할 수 있음.

$$\dot{E}_{out} = \sum_{i=1}^{\infty} E_{p,i} + E_{cond} \quad (2.6)$$

- 여기서 E_{cond} 는 모재에 전도되는 열에너지의 크기를 의미하며, 아래와 같은 식에 의해서 산출할 수 있음.

$$E_{cond} = q''_{cond} A_s \equiv k \frac{\Delta T}{L} A_s \quad (2.7)$$

- 여기서 q''_{cond} , k , L , ΔT 그리고 A_s 는 각각 모재에 전도되는 열유속, 모재의 열전도계수와 두께, 모재 표면과 내부의 온도차 그리고 가열된 부분의 면적을 의미하며, 고온의 온도가 형성된 부분의 면적은 이미지 분석법에 의해서 실험적으로 구할 수 있다. 따라서 식 (2.1)의 관계식은 정상상태 조건을 가정하였을 때 식 (2.8)과 같은 관계가 성립함.

$$P_e = \bar{N}hA_{p,s}(T_{p,s} - T_{\infty}) + q''_{cond}A_s \quad (2.8)$$

- 여기서 P_e 는 용접봉과 모재에 전달되는 전기에너지를 의미하며, 대기의 온도(T_{∞})가 일정하고 주위 온도(T_{sur})와 초기온도가 같은 조건($T_0 = T_{s,i} = T_{\infty} = T_{sur}$)을 적용하면 최종 불티 입자의 표면 온도는 식 (2.9)과 같이 정리될 수 있음.

$$T_{p,s} = T_{\infty} + \frac{P_e - q''_{cond}A_s}{\bar{N}hA_{p,s}} \quad (2.9)$$

(2) 복사열전달을 고려한 경우

- 식 (2.2)에서 불티는 비산되면서 대류와 복사에 의한 열전달을 받기 때문에 에너지 평형 관계에 의해서 식 (2.10)와 같이 정리할 수 있음.

$$\bar{N}\bar{q}_p = \bar{N}hA_{p,s}(T_{p,s} - T_{\infty}) + h_r(T_{p,s}^4 - T_{sur}^4) \quad (2.10)$$

- 여기서 h_r 은 조사와 방사를 포함한 복사열전달 계수를 의미하며, 식 (2.6)이 동일하므로 정상상태 조건을 가정하였을 때 식 (2.11)과 같은 관계가 성립함.

$$P_e = \bar{N}hA_{p,s}(T_{p,s} - T_{\infty}) + h_r(T_{p,s}^4 - T_{sur}^4) - m_s c_p (T_{s,f} - T_{s,i}) \quad (2.11)$$

(3) 대류열전달계수의 고찰

- 입자의 표면온도에 대한 관계식 (2.9)와 (2.11)을 계산하기 위해서는 대류열전달계수가 종결되어야 하며, 본 연구에서는 원형 구에 대해서 Whitaker 가 제시한 식 (2.12)의 값을 적용하였음.

$$Nu_D = \frac{hd_m}{k} = 2 + (0.4Re_D^{0.5} + 0.06Re_D^{2/3})Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{for } & 0.71 \leq Pr \leq 380 \\ & 3.5 \leq Re_D \leq 7.6 \times 10^4 \\ & 1.0 \leq (\mu/\mu_s) \leq 3.2 \end{aligned}$$

- 여기서 Nu_D , k , μ , μ_s , Pr , 그리고 Re_D 는 각각 총괄 누셀 수(Overall Nusselt Number), 열전도 계수, 기체와 고체의 점성계수, 프란틀 수(Prandtl Number), 그리고 레이놀즈 수(Reynolds Number)를 각각 의미 함.

(4) 분포함수 모델

- 액적의 분포 상태를 의미하는 $n(r)$ 은 Log-normal, Rosin-rammler, Log-hyperbolic 및 수정된 감마 함수(modified gamma distribution) 등으로 표현할 수 있으며, 본 연구에서는 연소 및 화재 공학 분야에서 가장 범용적으로 사용할 수 있는 식 (2.13)와 같이 수정된 감마 함수를 사용

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.13)$$

- 여기서 a , α , b 그리고 γ 는 모두 분포상수(distribution constant)를 의미 함. 특히, 식 (2.13)은 3개의 경계 조건($f(r \rightarrow 0) = 0$, $f(r)/dr = 0$, $f(r \rightarrow \infty) = 0$)을 갖고 있어야 하기 때문에 분포 상수는 식 (2.14)과 같은 관계에 의해서 서로 종속적인 관계를 갖고 있으며, $f(r)$ 은 식 (2.15)과 같이 정리 됨

$$\frac{d}{dr}n(r) = ar^{\alpha-1}(\alpha - \gamma br^{\gamma}) \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.14)$$

$$f(r) = \frac{\gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right)} r^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.15)$$

- 따라서 분포상수 b 와 a 는 식 (2.16)과 식 (2.17)의 관계를 만족해야 하며, 액적의 분포 특성과 광학 두께의 상관관계를 분석하기 위해서는 분포상수인 α 와 γ 가 실험에 의해서 결정되어야 하는 것을 알 수 있음

$$b = \frac{\alpha}{\gamma r_m^{\gamma}} \quad (2.16)$$

$$a = \frac{N \gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma((\alpha+1)/\gamma)} \quad (2.17)$$

- 여기서 Γ 와 N 는 각각 감마함수와 단위 체적에 대해서 입자의 개수를 의미하는 밀도 수(Number of particles per Unit Volume, m⁻³)이며, 식 (2.18)과 같은 관계를 갖고 있음[10-11]

$$N = \int_0^{\infty} n(a) da = \int_0^{\infty} f(a) N da = A \Gamma\left(\frac{\gamma+1}{\delta}\right) / \delta B^{(\gamma+1)/\delta} \quad (2.18)$$

- 식 (2.18)에서 A 는 입자의 밀도 수에 의해서 결정되는 값이며, 단위 체적당 입자의 총 체적(f_v)의 크기는 식 (2.19)와 같음

$$f_v = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi a^3 n(a) da = 4\pi A \Gamma\left(\frac{\gamma+4}{\delta}\right) / 3\delta B^{(\gamma+1)/\delta} \quad (2.19)$$

- 특히, 불티입자의 평균 크기는 본 연구의 경우 표면적에 대한 부피의 비를 의미하는 식(2.3)과 같은 SMD(Sauter Mean Diameter)에 의해서 산출

$$d_m (= SMD) = \frac{1}{3} \frac{\int_{r=0}^{\infty} f(r) \times r^3 dr}{\int_{r=0}^{\infty} f(r) \times r^2 dr} \quad (2.20)$$

- 여기서, $f(r)$ 과 r 은 분포함수(Distribution function)와 측정 체적 내에서 분포하고 있는 액적의 직경을 각각 의미 함

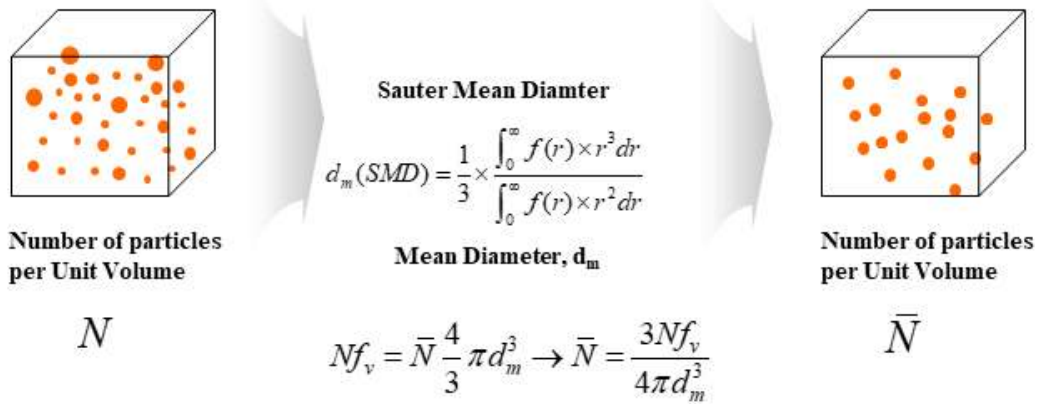


그림 3-10. The Schematic Diagram of the Averaged Particles Number

(5) 관계식 고찰

- 불티입자의 열전달 관계와 분포함수 모델의 결과로부터 최종 다음과 같은 계산과정을 제시할 수 있음. 아래의 그림은 전기에너지(P_e)가 결정된 경우 관계식 (2.1) ~ (2.20)까지를 사용하여 입자의 크기분포와 유속 그리고 온도를 산출하는 과정에 대해서 보여준 것으로 본 연구에서는 다양한 조건에 대해서 입자의 특성을 분석해 보고자 함.

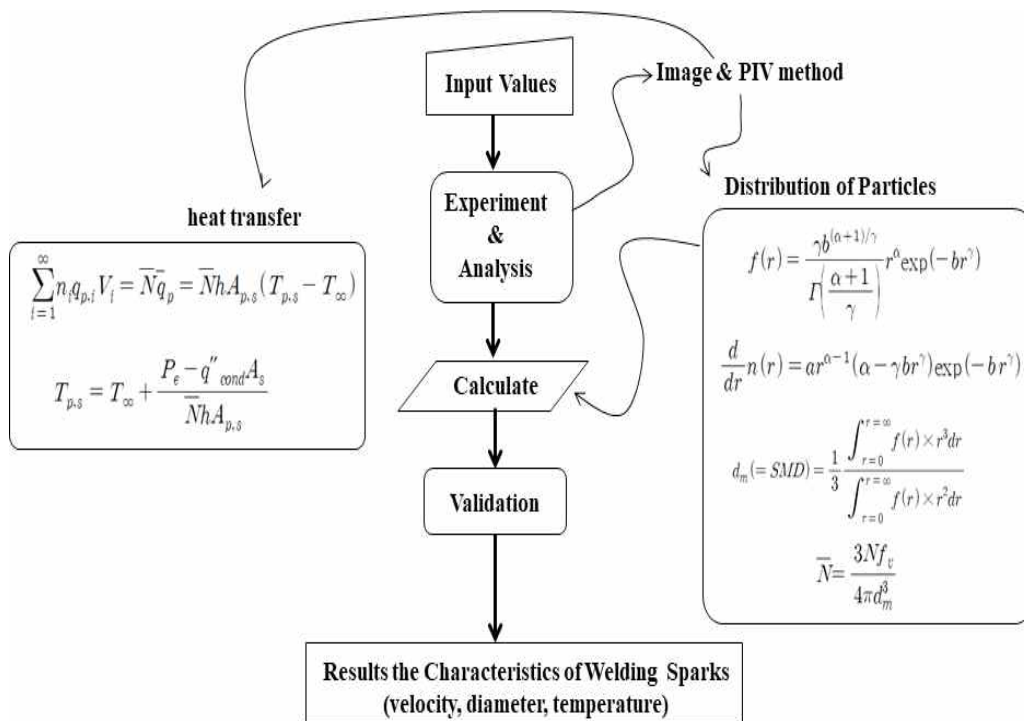


그림 2-11. The Schematic Diagram of the relation

(6) 불티 특성 분석

- 그림 2-12은 수정된 감마 함수(modified gamma distribution)의 분율인 $f(r)$ 에 대해서 $\alpha=2$ 인 경우 γ 가 3 ~ 9의 각각의 값을 가질 때 식 (2.13)과 (3.14)를 사용하여 계수를 산출하여 나타낸 결과임. 그림에서 보듯이 평균 액적의 크기는 최소 1.6mm부터 최대 6.05 mm 정도까지인 것을 확인할 수 있음. 또한, $\gamma=3$ 과 $\gamma=4$ 일 때 각각의 최대 입자의 크기는 약 10.5 mm와 약 7 mm로 불티로 인해서 화재가 발생할 수 있는 입자의 크기가 약 5mm 이상인 경우로 가정하였을 때 위험 조건에 해당한다고 판단할 수 있음. 하지만, 주변 가연물이 불티입자의 열원에 의해서 화재로 확산될 수 있는 최소 크기는 기존 문헌자료의 실험 조건에 따라서 서로 다른 경향이 있기 때문에 보다 일반화할 수 있는 실험 방법에 의해서 화재 확산 위험성이 있는 최소 입자 크기에 대한 연구가 필요한 것으로 판단됨. 본 연구에서는 연구 사례 중 화재 확산 위험의 최소 크기를 약 5 mm 이상인 불티가 존재하는 경우로 가정하여 불티의 입자 특성을 분석 함.
- 그림 2-13는 수정된 감마 함수(modified gamma distribution)의 분율인 $f(r)$ 에 대해서 $\gamma=4$ 인 경우 $\alpha=1 \sim 7$ 의 각각의 값을 가질 때 식 (2.13)과 (2.14)를 사용하여 계수를 산출하여 나타낸 결과임.
- 그림에서 보듯이 평균 액적의 크기는 최소 3.0mm부터 최대 4.9 mm 정도로 Figure 2.3의 결과에 비해서 편차가 작은 것을 확인할 수 있음. 또한, 그래프에서 분포형상이 오른쪽을 급격히 치우친 형태를 보이고 있으며, 이로 인해서 화재가 확산될 수 있는 불티입자의 크기가 5mm 이상인 경우 모두 가능성이 높은 것으로 사료됨. 즉, 그림 2-12과 그림 2-13의 결과는 불티의 분포 형상에 따라서 화재가 확산될 수 있는 조건이 다르게 나타날 수 있는 것을 정량적으로 나타낸 결과로 분포 조건을 결정해 주는 실험 조건이 매우 중요한 것으로 사료됨.

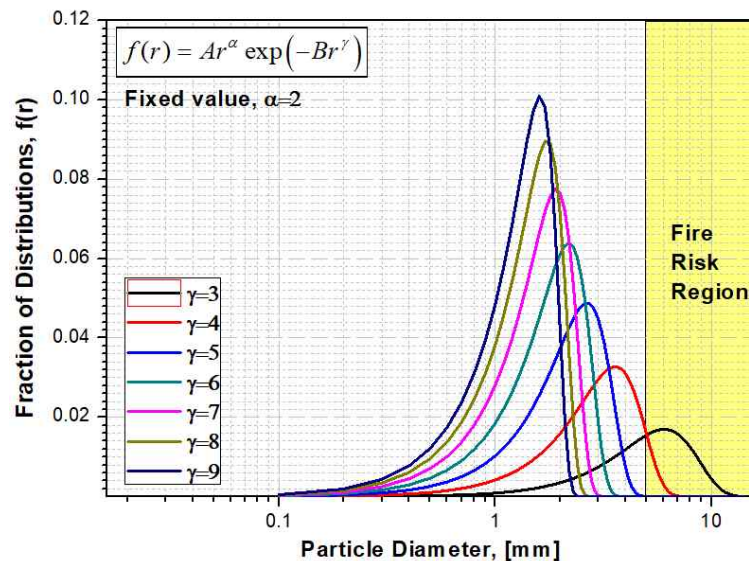


그림 2-12. The results of the distribution of the particles for $\alpha=2$ and $\gamma=3, 4, 5, 6, 7, 8$, and 9.

표 2-20. Results of the Coefficients of the Distribution function (fixed value of $\alpha=2$)

Cal.	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
a	0.0090	0.0418	0.1029	0.1854	0.2808	0.3821	0.4845
b	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030
alpha	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
Landa	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000
r_m	6.0571	3.5930	2.6606	2.1926	1.9173	1.7382	1.6134

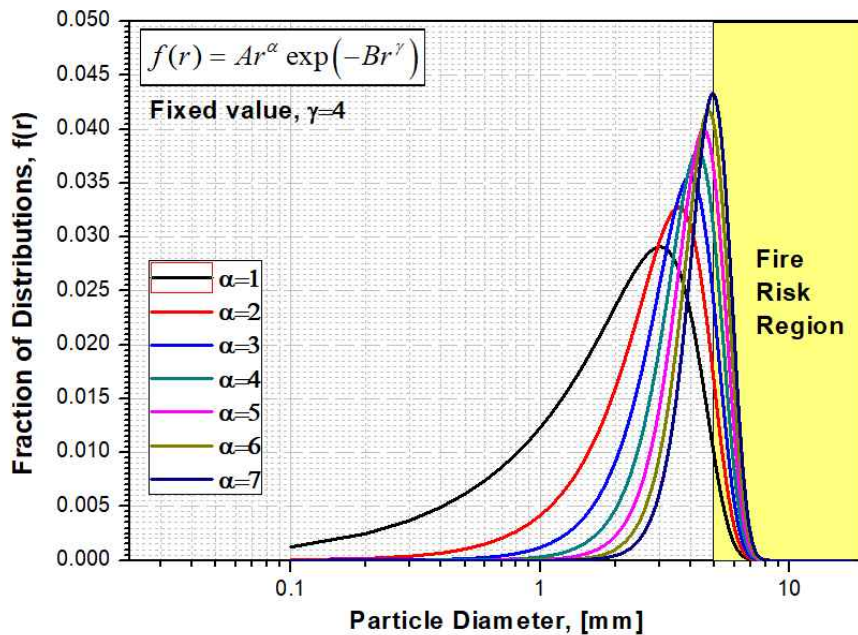


그림 2-13. The results of the distribution of the particles for $\gamma=4$ and $\alpha=1, 2, 3, 4, 5, 6$, and 7 .

표 2-21. Results of the Coefficients of the Distribution function
(fixed value of $\gamma=2$)

Cal.	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
a	0.0124	0.0042	0.0012	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
b	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030
alpha	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000
Landa	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
r_m	3.0214	3.5930	3.9764	4.2729	4.5180	4.7287	4.9145

- 전자기학 원리에 의하면 용접봉과 모재사이의 아크전압은 아크의 길이와 전류에 따라 증가[12]. 용접봉의 용접속도는 아크전류에 정비례하지만 아크전압에는 무관해서, 고능률을 얻기 위해서는 대전류를 사용. 모재표면에서 측정된 용접금속의 깊이인 용입은 전류 I가 클수록 깊어지고 용접속도 v 가 빠를수록 감소하여 식 (2.21)과 같이 나타낼 수 있음[12].

$$H = \frac{V_{arc} I_{arc}}{u_{arc}} \quad (2.21)$$

- 여기서 H , V_{arc} , I_{arc} 그리고 v 는 각각 전기에너지(J/cm), 전압, 아크전류 그리고 용접속도를 의미하며, 전기에너지는 전력의 크기와 다음과 같은 관계를 갖고 있음.

$$P_e = H \times v_{arc} \quad (2.22)$$

- 따라서, 전력에 의한 열효율이 100%로 가정하였을 때 용접 모재에 전달되는 열원은 전기에너지와 용접속도에 따라서 달라지며, 본 연구에서는 전기에너지, 입자의 유속 그리고 입자의 평균크기 변화에 따라서 불티입자의 온도를 분석 함.
- 그림 2-14는 용접 속도가 15cm/min, 불티 입자의 평균 크기가 평균 크기 3mm, 입자 유속 5m/s, 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m² 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m²일 때 220V 전압에 대해서 전류의 크기 변화에 따른 입자의 온도분포를 예측한 결과임. 그림에서 보듯이 전류의 크기가 변함에 따라서 전기 에너지의 크기는 약 2.2kW ~ 44 kW까지 변하는 것을 확인

할 수 있으며, 불티입자는 전류의 크기에 비례하여 선형적으로 증가 함. 또한, 그림 3-6의 결과로부터 용접 불티로 인해서 화재가 확산될 수 있는 온도가 300℃ 이상으로 가정한 경우 전류의 크기는 120 A 이상의 범위에 해당하는 것을 알 수 있음. 하지만, 전류의 크기가 증가할수록 입자의 분포 형상이 달라질 수 있기 때문에 정확한 예측값을 확인하기 위해서는 전류의 증가에 따른 평균 입자의 크기를 산출해야 하며, 본 연구에서는 입자 크기분포에 대한 해석적 결과에 한정하여 온도를 분석함.

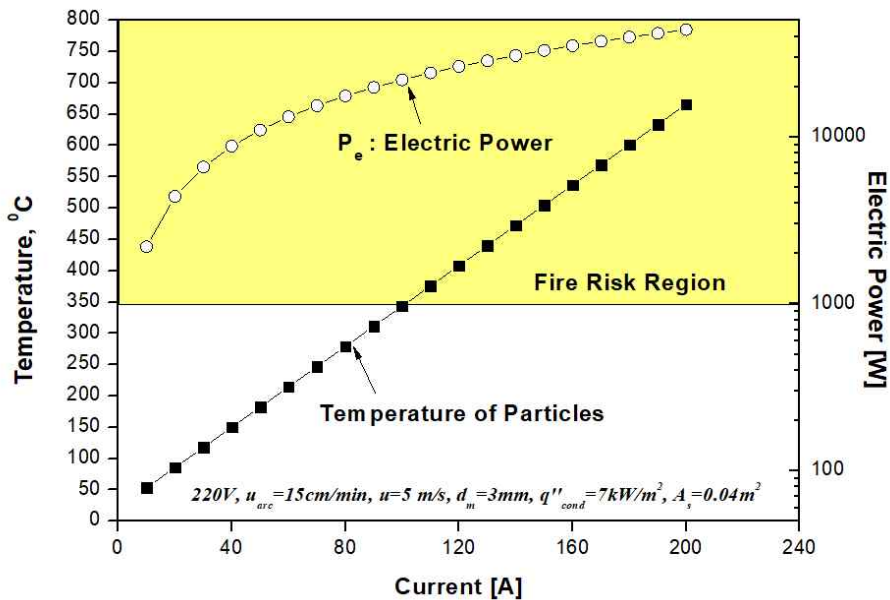


그림 2-14. Temperature of Particles VS. Current Variation

- 그림 2-15은 용접 속도가 15cm/min, 불티 입자의 평균 크기 3mm, 전기에너지가 22kW, 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m² 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m²일 때 입자의 유속이 바람 등의 영향으로 인해서 2 m/s ~ 20m/s로 증가하는 경우 입자의 온도를 예측한 결과임. 그림에서 확인할 수 있듯이 불티의 온도는 오른쪽 좌표에 나타난 대류열전달 계수에 지배적인 영향을 받으며 원형 구는 입자의 유속 크기가 증가할수록 외부와의 열전달이 빠르게 일어나게 됨. 따라서 불티의 입자는 유속에 반비례하여 감소하게 되는 것을 확인할 수 있음.

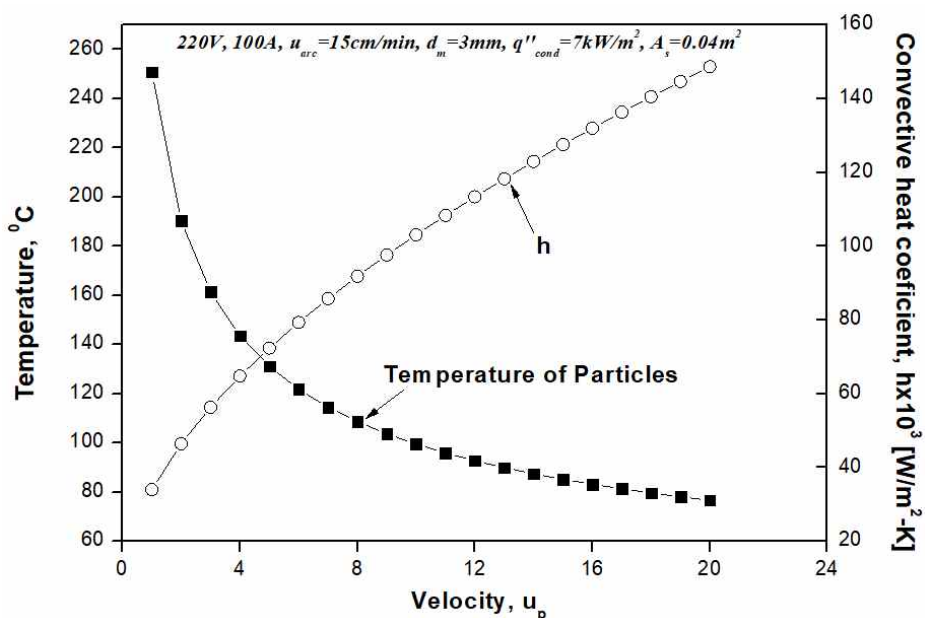


그림 2-15. Temperature VS. Velocity of Particles

- 그림 2-16은 용접 속도가 15cm/min, 불티입자의 유속 5m/s, 불티입자의 총 체적이 $3.4 \times 10^{-6} \text{m}^3$, 전기에너지가 22kW, 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m² 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m²일 때 불티 입자의 평균 크기가 2mm ~ 20mm에 대한 불티 입자의 온도와 개

수를 산출한 결과임.

- 그림에서 보듯이 입자의 크기가 증가할수록 입자의 개수가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 그 결과 외기로부터 불티 입자를 냉각하는 표면적이 작아져서 입자의 온도가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있음. 즉, 미립화된 입자가 많아질수록 대류열이 분산되어 입자 하나의 온도가 낮아지게 되지만 동일 체적 조건에서 입자의 크기가 증가할수록 입자의 개수가 감소하기 때문에 불티의 온도는 증가하게 되며 그 결과 약 11mm 정도에서 불티의 온도는 300℃가 증가하여 탄화수소 계열 등의 가연물에 비산될 경우 화재가 확산될 가능성이 더욱 증가할 수 있는 것을 의미함.

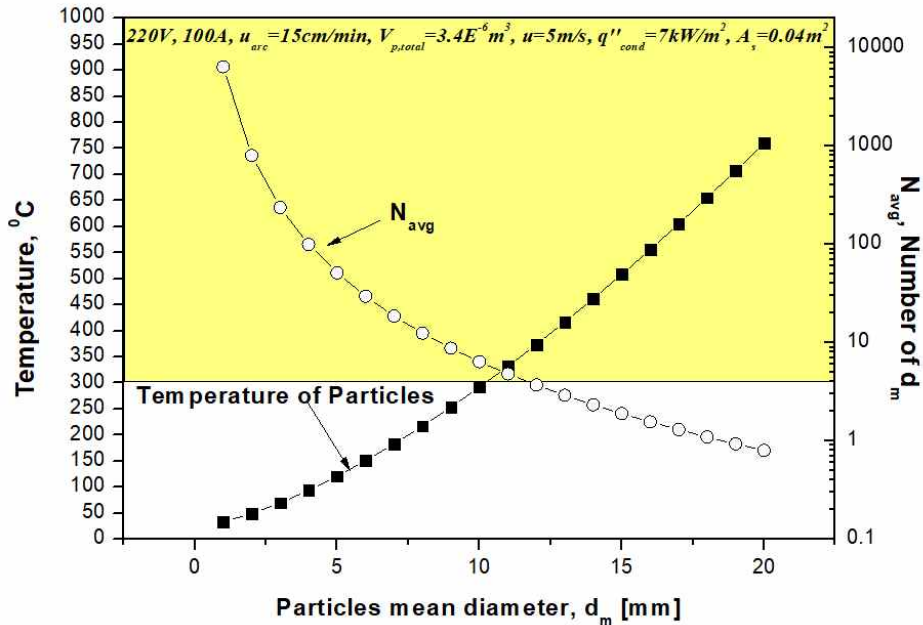


그림 2-16. Temperature of Particles for Fixed Volume VS. Particle Mean Diameter

- 그림 2-17은 용접 속도가 15cm/min, 불티입자의 총 체적이 $3.4 \times 10^{-6} \text{m}^3$, 전기에너지가 2.2kW, 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m^2 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m^2 일 때 불티 입자의 평균 크기가 2mm ~ 20mm에 대해 바람 등의 영향으로 유속의 크기가 4m/s ~ 12m/s로 변화하는 경우 불티 입자의 온도와 개수를 산출한 결과임.
- 그림에서 보듯이 입자의 유속 크기가 증가할수록 대류 열전달 계수가 증가하기 때문에 냉각의 속도가 더욱 빠르게 나타나고 그 결과 화재로 확산될 수 있는 액적의 크기는 유속의 크기에 비례하여 감소하게 되는 것을 의미함.
- 특히, 식 (2.1) ~ (2.20)에서 보듯이 화재 확산은 불티입자의 온도와 액적의 밀도 수 및 크기 그리고 유속에 따라서 달라지며 액적의 크기가 증가할수록 불티의 온도가 증가하고 유속의 크기에 반비례하여 감소하기 때문에 화재 위험도와 관련하여 최적의 안전 조건에 해당하는 불티입자의 크기 분포가 존재하는 것을 알 수 있음.

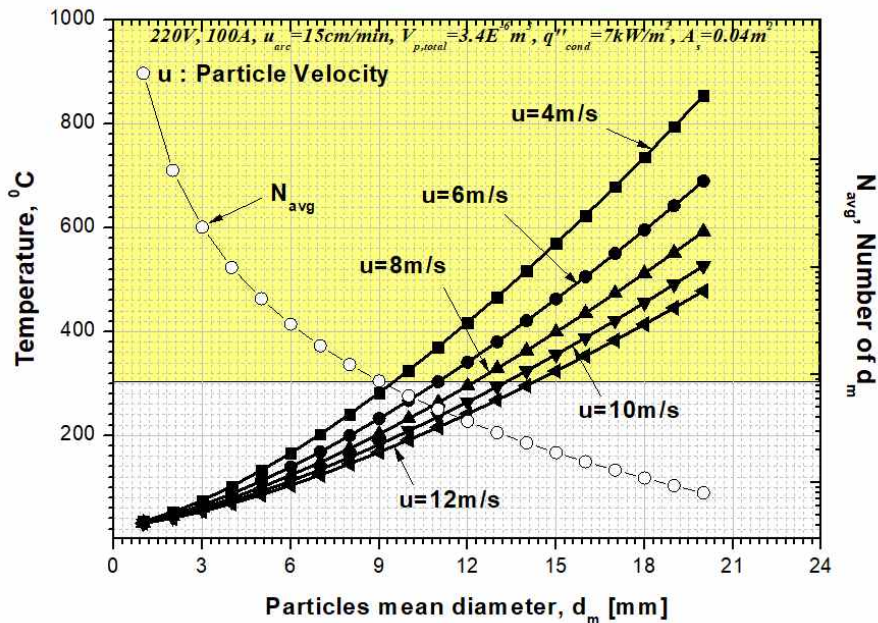


그림 2-17. Temperature of Particles VS. Particle Mean Diameter
for $u=6\text{m/s}$, 8m/s , 10m/s and 12m/s

- 그림 2-18는 용접 속도가 15cm/min , 불티입자의 총 체적이 $3.4 \times 10^{-6}\text{m}^3$, 불티입자 유속의 크기가 4m/s , 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m^2 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m^2 일 때 전기에너지의 크기가 $11\text{ kW} \sim 31\text{kW}$ 인 경우 불티 입자 평균 크기에 따라서 온도와 개수를 산출한 결과임. 그림에서 화재가 확산될 수 있는 불티의 온도가 300°C 로 가정한 경우 전력의 크기가 증가할수록 불티 평균입자의 크기가 작은 범위에서도 화재가 확산될 수 있는 것을 의미함.

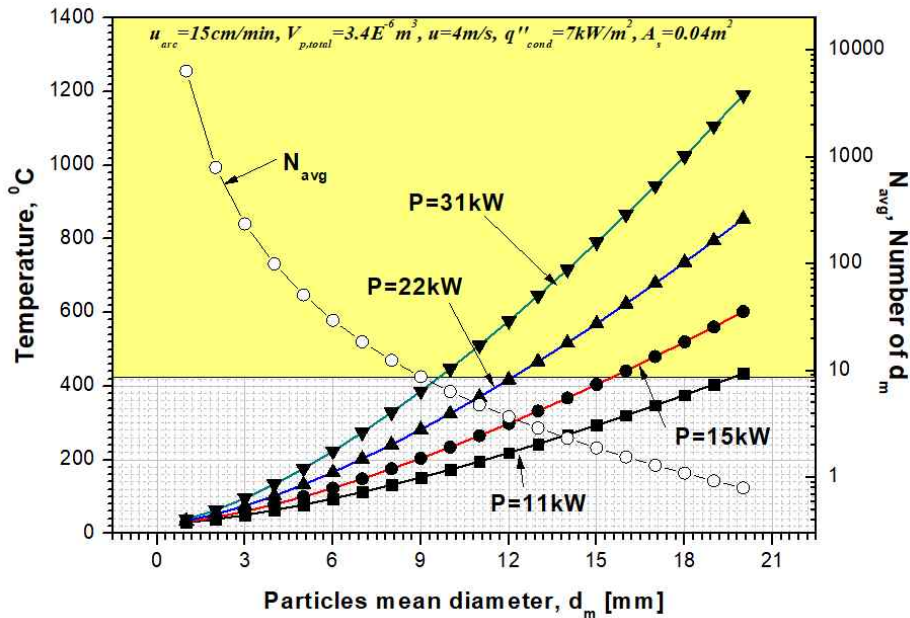


그림 2-18. Temperature of Particles VS. Particle Mean Diameter for
 $P=11\text{kW}$, 15kW , 22kW and 31kW

(7) 결론

- 본 연구에서는 용접 조건에 따른 불티 입자의 특성 기초 연구를 위해서 입자의 크기 분포와 평균 크기 그리고 불티의 평균온도에 관한 해석적 연구를 수행함. 이를 위해서 아크 용접에서 발생하는 전기에너지와 전도 및 대류 열전달의 에너지 평형 관계로부터 불티 입자의 평균온도 예측 모델을 제시하였으며, 수정된 감마함수(modified gamma distribution) 모델을 사용하여 불티의 분포 함수와 평균 크기를 산출하였다. 그 결과 용접 속도가 15cm/min , 모재로 전달되는 열유속이 7kW/m^2 , 그리고 정상상태 조건에서 표면적이 0.04m^2 일 때 다음과 같은 관계를 분석함.

- 첫째, 불티의 분포함수 모델을 사용하여 입자의 평균 크기가 최소 1.6mm에서부터 6.05mm까지의 특성을 계수 변화에 따라서 분석한 결과 γ 의 값이 증가할수록 분포 특성이 우측으로 치우친 형태로 나타났으며, 이러한 결과는 불티의 최대 입자 크기가 증가하기 때문에 화재 위험도가 비례하여 증가하는 것을 의미한다. 따라서 용접 조건에 따른 불티의 분포 실험에서 γ 의 크기가 증가하는 관계를 정량화할 필요가 있는 것으로 판단됨.
- 둘째, 아크 용접기가 약 2.2kW ~ 44 kW까지의 변하는 경우 불티의 평균 입자 크기가 3mm에 대해서 불티입자의 온도를 산출한 결과 약 100A 이상인 경우 불티의 온도가 350℃ 이상이 되어 가연성 물질이 화재가 확산될 수 있는 점화온도 이상에 도달하는 것으로 사료되며, 보다 정확한 값을 예측하기 위해서는 불티 입자 분포와 온도 측정에 관한 실험이 선행되어야 할 것으로 판단됨
- 셋째, 불티 입자의 평균 크기 3mm, 전기에너지가 2.2kW인 조건에서 바람 등으로 인해서 유속의 크기가 2m/s ~ 20m/s로 증가하는 경우 대류열전달계수가 증가하여 불티의 온도는 반비례하여 감소하며, 동일 조건에서 입자의 크기가 증가할수록 온도는 상승하였음.
- 이러한 결과는 입자의 크기 증가에 따라서 온도는 유속에 반비례하며 입자 크기에 비례하는 결과를 보여준 것으로 화재로 확산될 수 있는 불티 입자의 온도가 결정된 경우 위험성을 최소화할 수 있는 불티의 크기가 존재하는 것을 의미함. 특히, 입자 크기는 용접 조건에 따라서 달라지기 때문에 본 연구 결과는 용접기 종류 및 조건에 따른 불티 입자 분포를 정량화하기 위한 연구에 유용한 자료가 될 것으로 판단됨.

2-5. 불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축

(1) 용접 조건에 따른 불티의 열화학적 특성

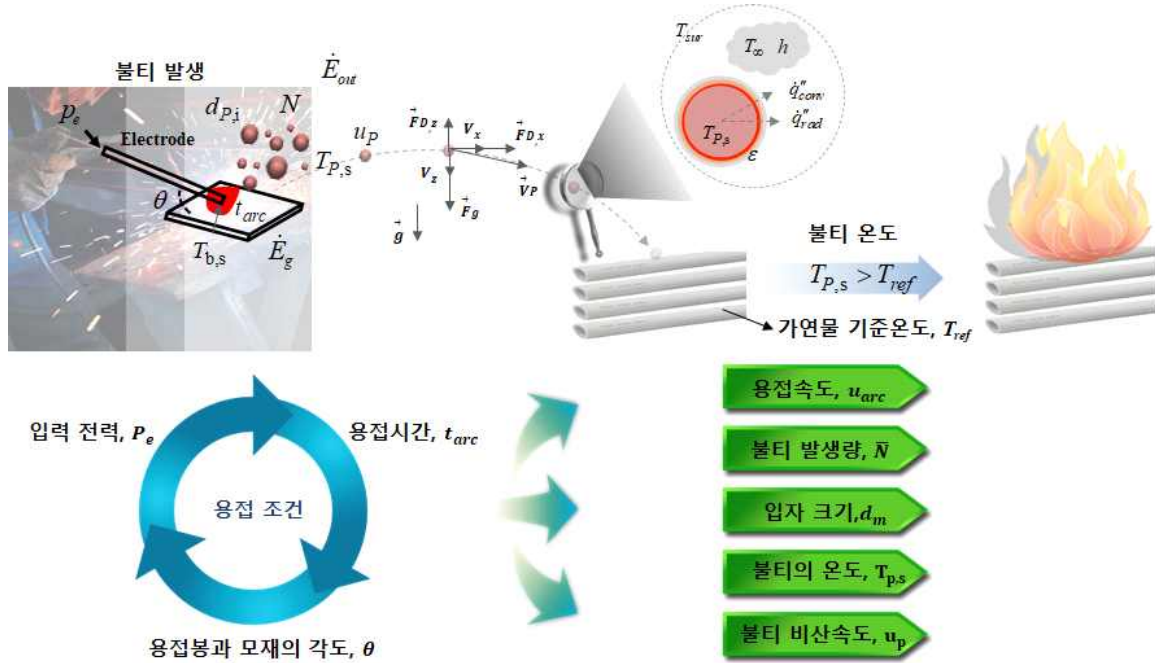


그림 2-19. 불티 발생에 따른 화재 확산 상관관계

(2) 실험장치 제작 및 분석 방법

- 아래의 그림은 electrode와 base metal의 용접 각도($\theta=90^\circ$)가 일정하고 Welding torch의 이송 속도를 최대 7mm/s로 하여 제작한 SMAW 반자동화 실험장치와 입자의 크기 및 비산 속도를 분석하기 위한 방법을 보여주고 있음.
- 그림에서 보듯이 용접 시간(Δt)과 electrode에 공급되는 전력의 크기(P_e) 변화에 따라서 불티를 비산시키도록 구성하였으며, 초고속 카메라(Model : phantom LC310)와 열화상 카메라(Model : Fluke Tix501)를 사용하여 불티의 비산 속도와 평균 온도를 측정하였다. 입자의 크기 분포는 $50 \times 46 \times 64$ cm의 아크릴 상자에 모든 불티가 포집 되도록 구성하여 Image J 프로그램을 사용하여 산출하였으며, 본 연구에서 사용한 실험장치 사양을 표 2-22에 기입하였음.

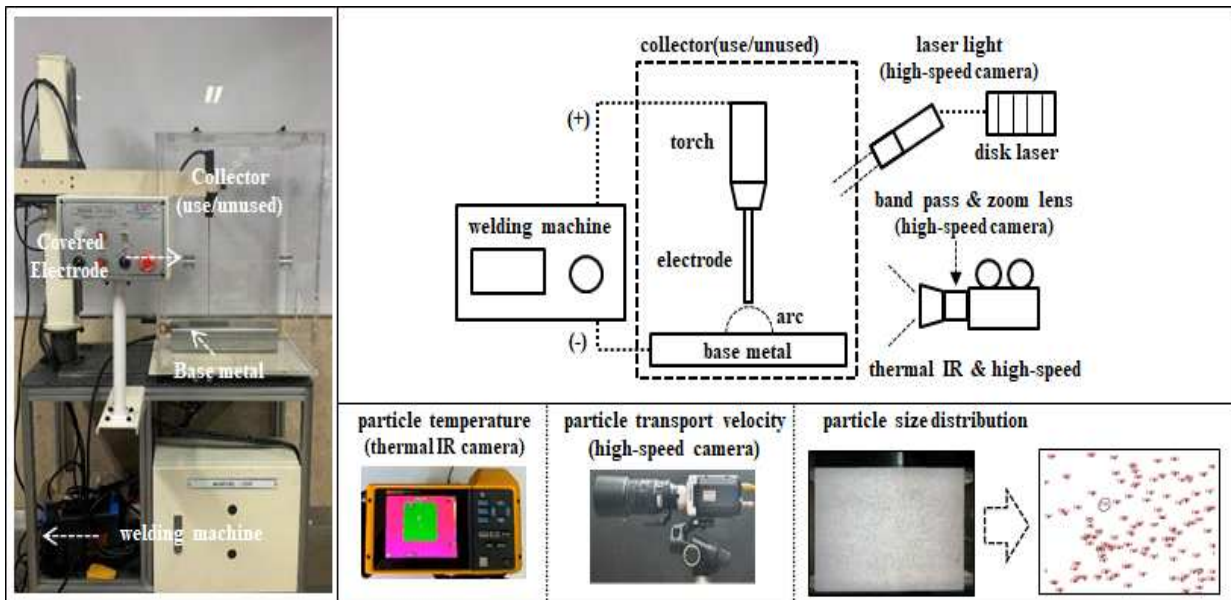


그림 2-20. Schematic diagram and pictures of experiment apparatus for welding spatter analysis.

㏑ 2–22. Specification of Experiment Apparatus.

Measurement	Specification						
Welding machine	Output current 20~220 A, Rated Input Vol. 220 V, Rated Frequency 50/60 Hz, Rated duty cycle 60 %, Model : Rolwal MMA-200E						
Thermal imaging camera	Infrared resolution 640 x 480, Temp. measurement range -20 to 650 °C, Accuracy ±2 °C or 2 %, Frame rate 60 Hz, Model : Fluke Tix 501						
High speed camera	Resolution 640 x 480, Sample Rate 10,000 fps, Model : phantom LC310 Lens : Nikon 105mm, 2X converter Band-pass filter : Ø 50mm, 810 nm/12nm, CN code 90022000						
Electronic Energy Meter	230 AC, 60 Hz, 16A/3680 W (Model : KEM2500)						
Precision balance	Load Weight Max 320g, Accuracy 0.1 mg, Model : PX224KR						
Electrode [wt, %] [Density, kg/m ³]	Core	Coating					
	Iron	Titanium Dioxide	Feldspar	Mn	Sodium Silicate	Limestone	Mica
	65-75	10-15	5-10	1-5	1-5	1-5	1-5
	7860	3900	2560	7400	2400	2930	2600

2-6. 용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험

(1) 입자 측정

- 입자의 크기 및 분산도 등은 물질전달 뿐만 아니라 입자들 사이에서의 Emulsion이나 Aerosol, Dispersion, 그리고 suspension 등의 정보를 제공해 주기 때문에 미립자 계를 적용하는 공학 분야에서는 매우 중요한 연구 중 하나임.
- 입자의 크기 및 분산도의 정확한 측정은 중합 속도론 (입자의 생성, 성장 및 응집)을 다루는데 필수적이며, 입자의 크기 및 분산도는 hiding power, tinting strength 등 최종 물질의 물리화학적 특성 결정에 있어서 중요한 변수로 작용하는 것으로 보고되고 있음[2.1-2.2]. 하지만, 조금실 등의 연구에 따르면 입자를 측정하는 목적에 따라서 측정 장비의 적설성이 검토되어야 하는 것으로 언급되고 있음. 그의 연구 논문에서 소개한 내용에 따르면 Aires와 Figueiredo는 세 가지의 상업적인 광산란 (light scattering) 방식 장비 (Malvern 사의 Autosizer, Coulter N4와 Coulter LS130)를 이용하여 크기 비율과 부피 비가 다른 bimodal 입자의 정확한 분포도를 측정하는데 실패했다는 결과를 발표함[2.3].
- Elizalde와 Leiza는 다양한 크기의 표준 입자를 혼합 비율을 달리하여 4가지 측정법-CHDF (capillary hydrodynamic fractionation), DCP (disk centrifuge photo sedimentometry), DLS (dynamic light scattering), TEM (transmission electron microscopy, 투과 전자 현미경법)-에 따른 결과를 비교하고 입자 크기 분산 특성에 따른 가장 효과적인 분석법에 대한 정보를 기술함[2.4]
- Koehler와 Provder는 PMMA를 분석하는데 6가지의 장비-DCP, SdFFF(sedimentation field flow fractionation), HDC (hydrodynamic chromatography), QELS (quasielastic light scattering), turbidimetry, TEM-를 사용하여, 결과적으로 광산란 방식을 통해서 입자의 크기가 가장 큰 값을 얻었고, TEM을 통해서 가장 작은 값을 얻을 수 있었다고 기술하고 있음[2.5]
- Lange는 여러 분석 장비 중 평균 입자 크기는 turbidimetry를 통해 가장 신뢰할 수 있는 값을 얻었고, 입자 크기 분산도 값은 ultracentrifugation과 DCP, 전자현미경 방식이 가장 효과적인 방식이라고 기술 하고 있음[2.6]
- Lee는 단분산성, 다분산성 아크릴계 라텍스 입자를 분석하였는데, 각각 FFF는 평균 입자 크기와 분산도를 얻는 경우, PCS (photon correlation spectroscopy)는 크기가 작고 단분산성 입자인 경우에 정확한 결과를 얻으며 큰 입자나 다분산성의 경우에는 산란각을 다양하게 변화시켜야만 이상적인 값에 가까운 결과를 얻을 수 있다고 기술하고 있음[2.7].
- 하지만, 입자 측정 장비의 신뢰성에 관한 연구는 현재까지도 꾸준히 연구개발 되어야 하며, 분석 장비의 선정에 따른 오차율을 고려하였을 때 동일한 실험 조건을 구성하는 게 무엇 보다 중요한 것으로 판단됨. 특히, 입자 측정 장비는 작동 원리에 따라서 고가의 가격을 형성하지만, 고온의 불티 입자와 같은 경우 빛의 산란 등에 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 이미지 분석에 의한 방법을 선택하였으며, (3). 이미지 분석 방법 절에 자세한 사항을 나타내었음.

(2) 불티의 분포함수 모델

- 불티가 비산되는 현상을 측정 장치 등을 사용하여 크기 분포를 산출하면 그림 3-21과 같은 정규 분포($f(r)$)의 함수를 갖게 됨. 여기서 불티입자를 연속체로 가정하게 되면 정규분포화된 분율 (Normalized distribution fraction)로써 액적의 밀도수 (N)에 의해서 $Nf(r)$ 의 관계를 갖게 됨.
- 따라서 액적의 분포 상태를 의미하는 $n(r)$ 은 수학적으로 Log-normal, Rosin-rammler, Log-hyperbolic 및 수정된 감마 함수(modified gamma distribution) 등으로 표현할 수 있음. 하지만, 각각의 모델에 대해서 주요 상수 값의 민감도와 실험에 의해서 측정된 분포 현상에 적합한 계수는 경험에 의해서 산출해야 하며, 본 연구에서는 연소 및 화재 공학 분야에서 가장 범용적으로 사용할 수 있는 식 (2.23)와 같이 수정된 감마 함수를 사용함[2.8-2.9]

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.23)$$

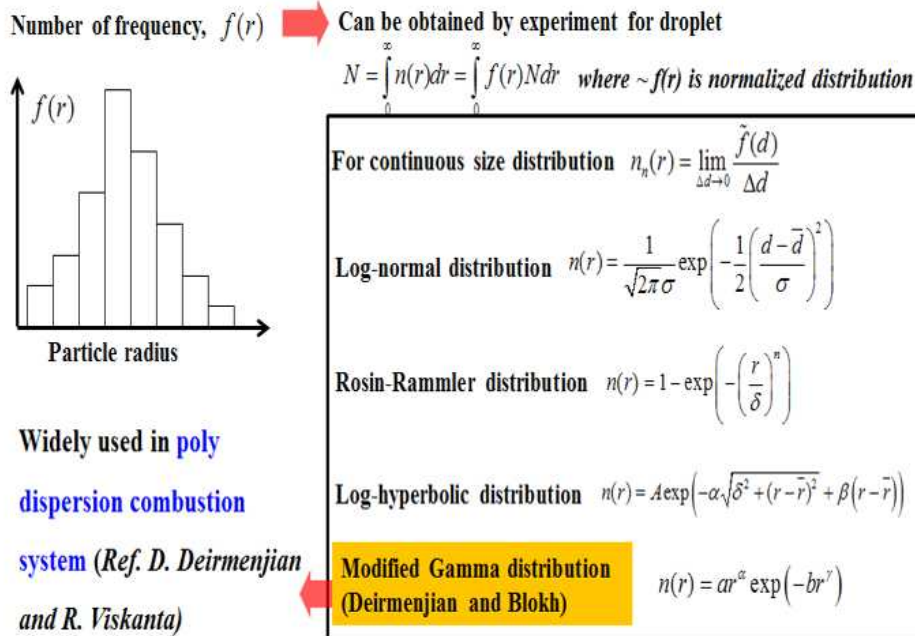


그림 2-21. Previous model equations of the distribution function.

- 특히, 식 (2.23)는 그림 2-22와 같이 3개의 경계 조건($f(r \rightarrow 0) = 0$, $f(r)/dr = 0$, $f(r \rightarrow \infty) = 0$)을 갖고 있어야 하기 때문에 분포상수는 식 (2.24)과 같은 관계에 의해서 서로 종속적인 관계를 갖고 있으며, $f(r)$ 은 식 (2.25)과 같이 정리됨 [2.8-2.9]

$$\frac{d}{dr} n(r) = ar^{\alpha-1} (\alpha - \gamma br^{\gamma}) \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.24)$$

$$f(r) = \frac{\gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right)} r^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}) \quad (2.25)$$

- 따라서 분포상수 b 와 a 는 식 (2.26)과 식 (2.27)의 관계를 만족해야 하며, 입자의 분포 특성과 광학 두께의 상관관계를 분석하기 위해서는 분포상수인 α 와 γ 가 노즐에 따라서 결정되어야 하는 것을 알 수 있음.

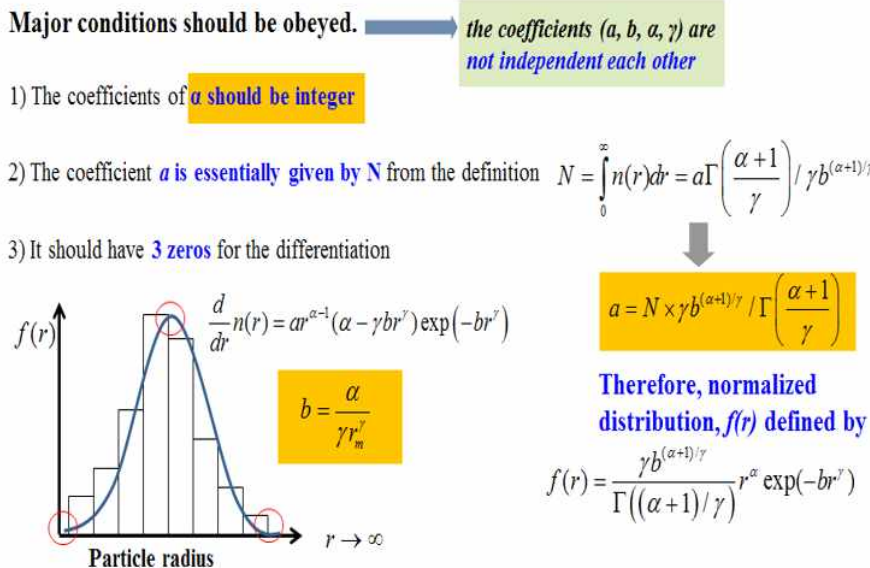


그림 2-22. Boundary conditions of the modified gamma distribution function

$$b = \frac{\alpha}{\gamma r_m^\gamma} \quad (2.26)$$

$$a = \frac{N\gamma b^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma((\alpha+1)/\gamma)} \quad (2.27)$$

- 여기서 N 과 Γ 각각 입자 밀도 수(m^{-3})와 감마함수를 각각 의미함. 또한, 불티입자의 크기 분포가 그림 2-23과 같이 산출된 경우를 가정하였을 때 Deirmenjian의 수정된 감마 분포 함수(modified gamma distribution function)를 적용하였으며, 동일한 관계식을 적용함

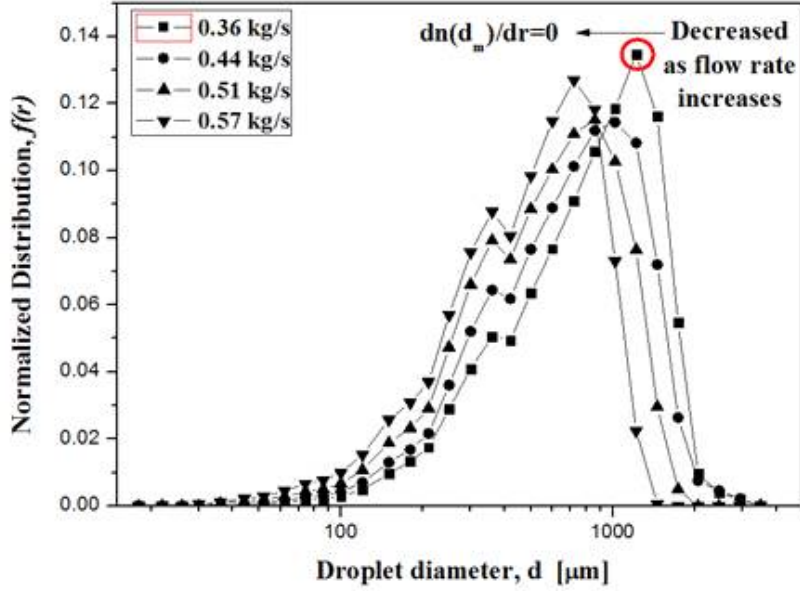


그림 2-23. The experiment results of the normalized distribution fraction of the droplets as the flow rate increases.

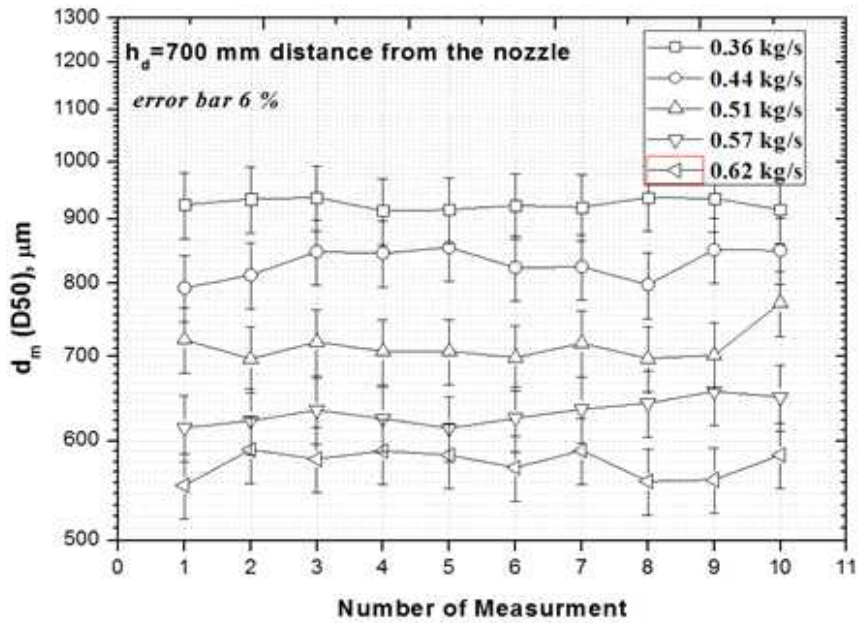


그림 2-24. The results of D50 for the repeated test as the flow rate increases.

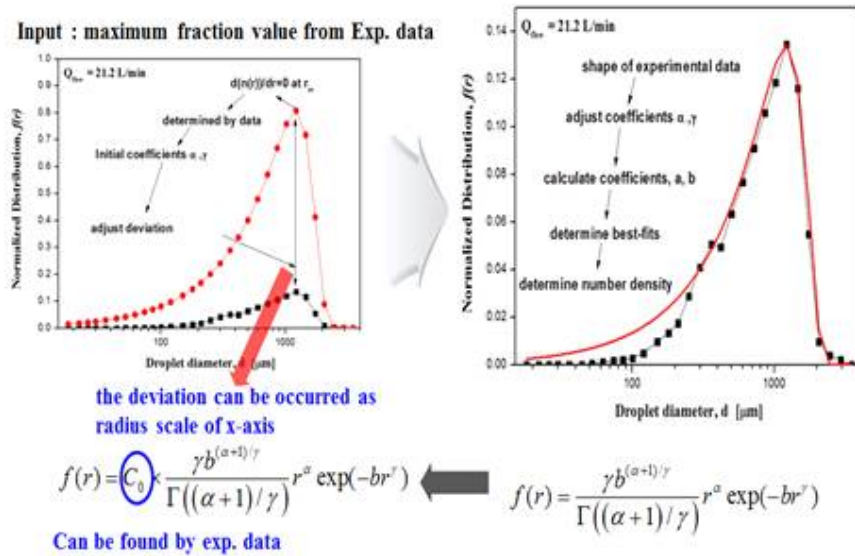


그림 2-25. Fitting method of the modified gamma distribution function.

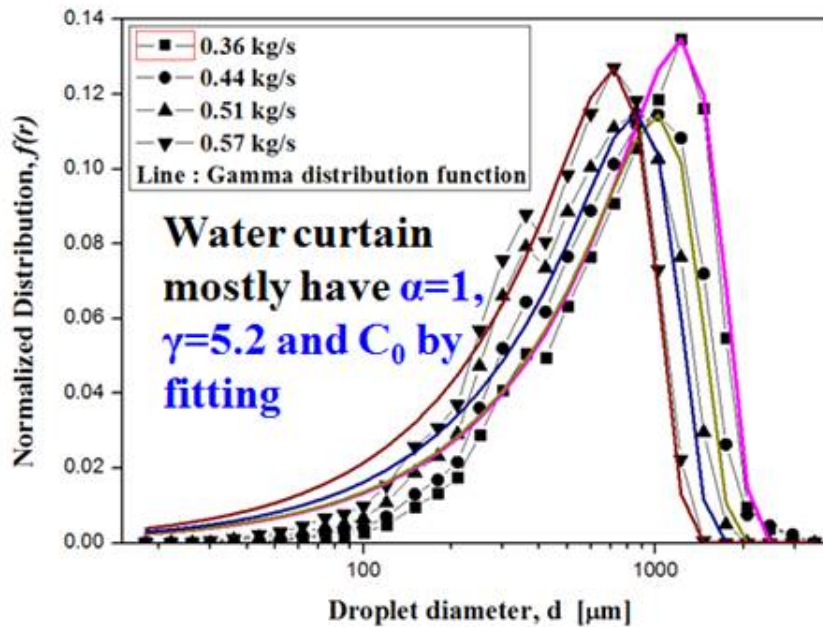


그림 2-26. Experiment and fitting results of modified gamma distribution of the water curtain

(3) 이미지 분석 방법

- 불티 입자의 크기분포를 측정하기 위해서 ImageJ Program을 사용하여 분포함수를 산출하고자 함
모재에 용접을 가하는 동안 발생하는 불티 입자는 열화상카메라(Model FLUKE RSE600)를 사용하여
초당 60 프레임, 640 x 480 픽셀의 크기로 촬영하였음.
- Image J Program에 의해서 액적의 크기를 산출하는 방법은 Calibration → Define Range →
Regulate RGB → Analysis로 진행되며, 상세한 내용은 아래의 그림으로 나타내었음.

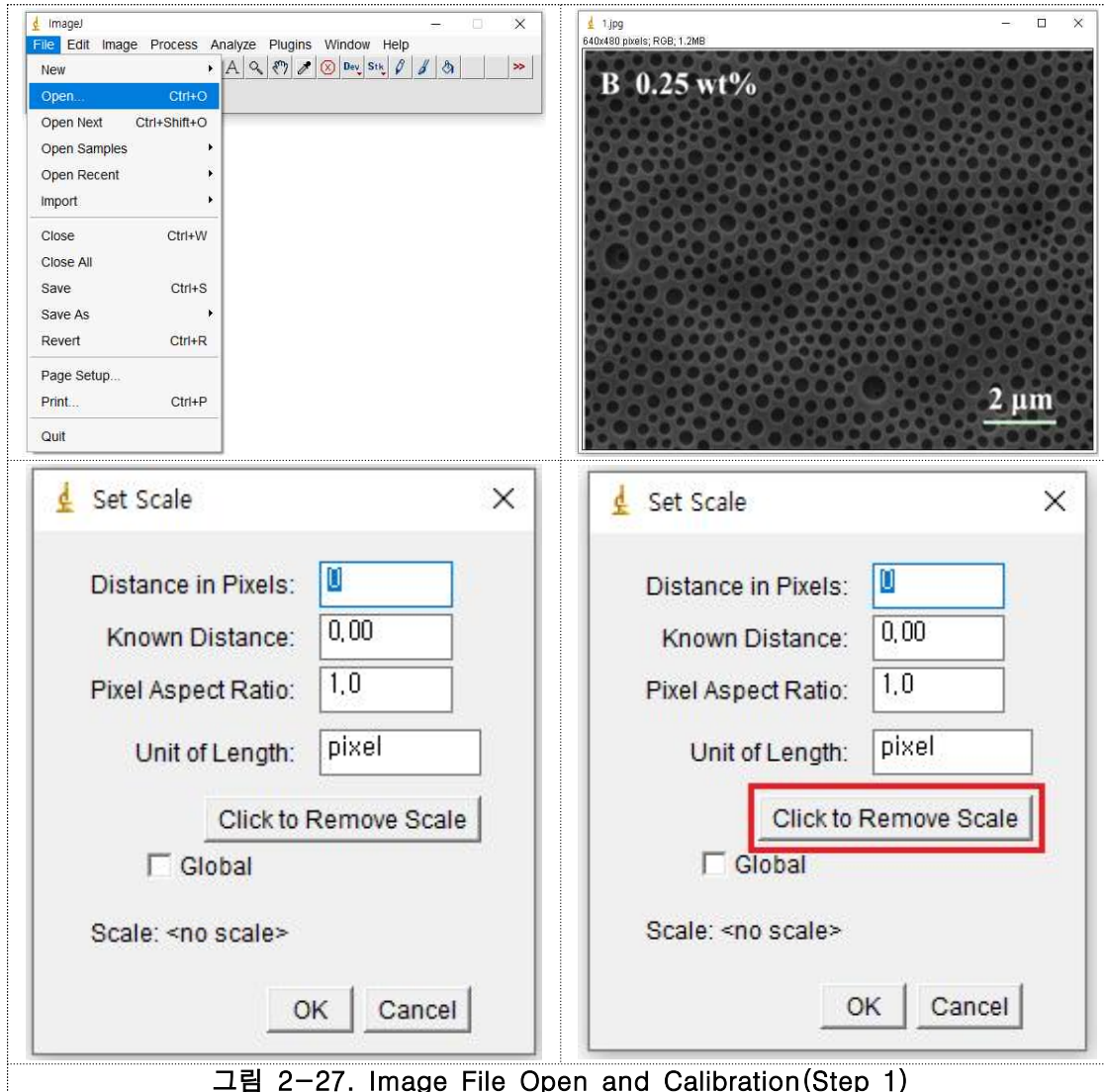


그림 2-27. Image File Open and Calibration(Step 1)

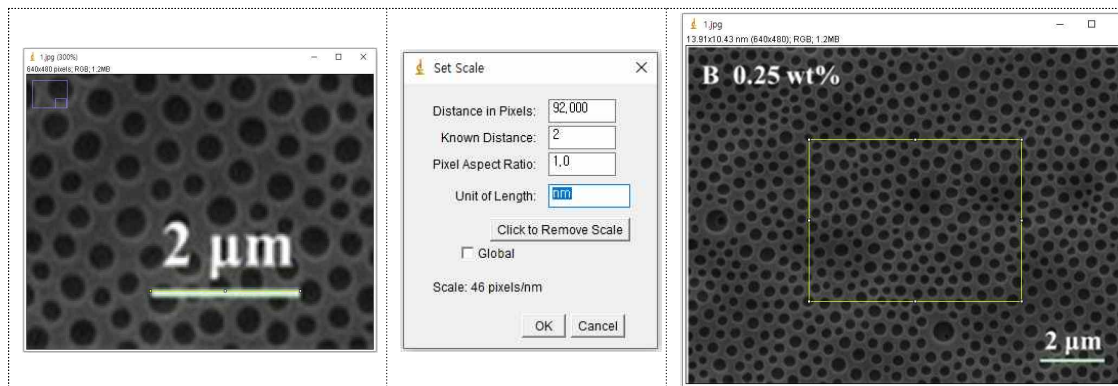


그림 2-28. Define Interesting Range by Rectangular
& Verify Calibration by line (2nm) (Step 2)

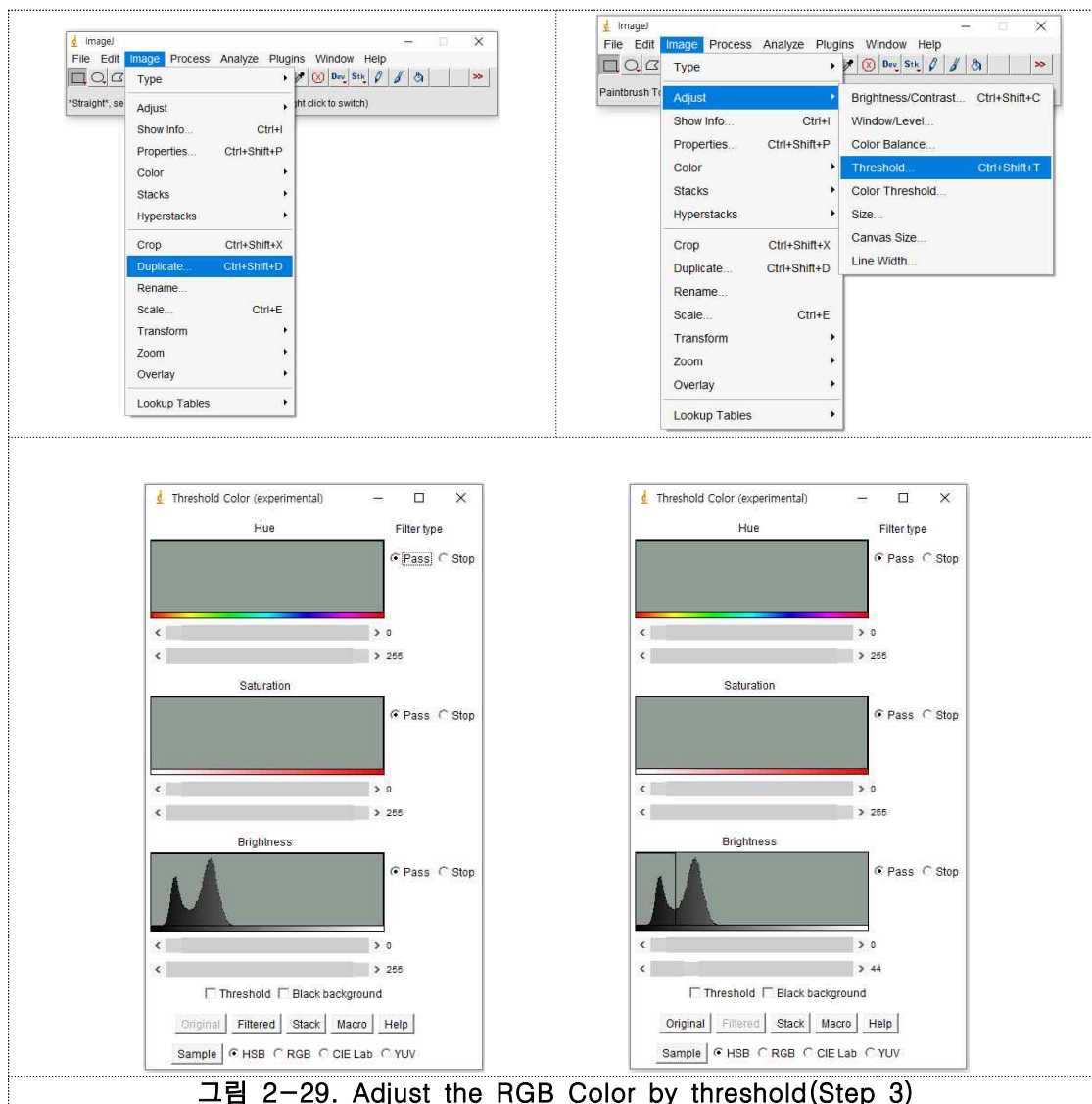


그림 2-29. Adjust the RGB Color by threshold(Step 3)

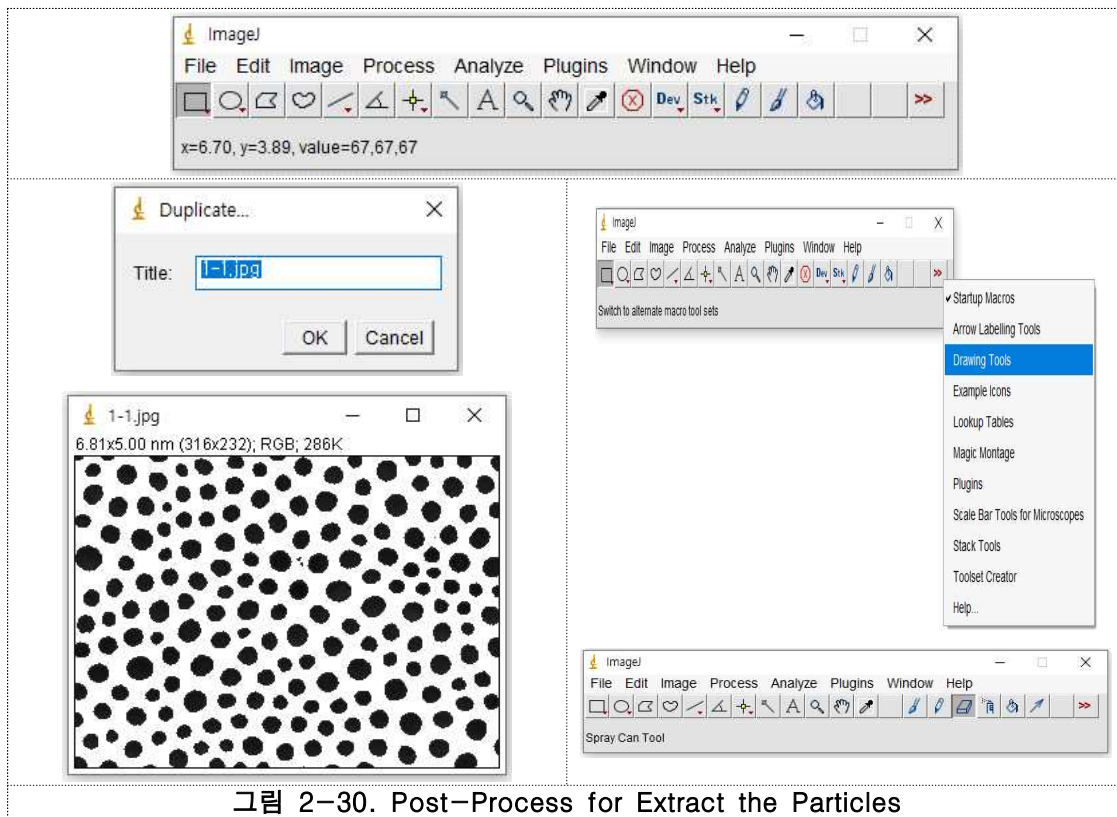


그림 2-30. Post-Process for Extract the Particles

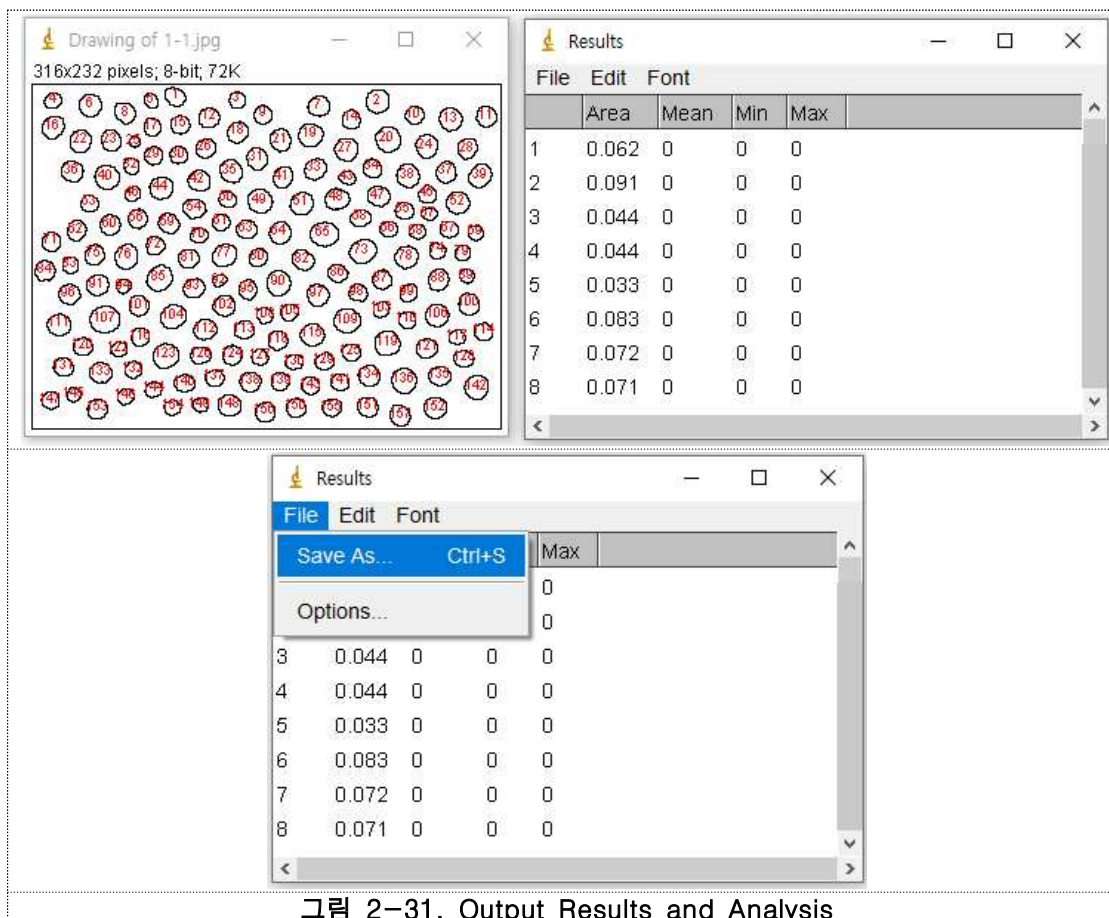


그림 2-31. Output Results and Analysis

- 그림 2-32는 이미지 분석 기법에 의한 분포함수 구하는 과정을 설명하기 위한 것으로 고속 카메라 (9만 프레임/초, 384 x 128픽셀)를 사용하여 측정하는 분사 노즐의 축분포 현상과 액적 특성 분석 방법(미립자의 속도, 크기, 다공성)을 보여주고 있음. 각 점의 위치는 200mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm, 1,000 mm이며, 분사된 입자는 노즐에서 수직 방향으로 변화한다는 것을 알 수 있음. 관심영역에 대해서 액적의 평균 크기는 체적/표면적 비를 의미하는 Sauter Mean Diameter 에 의해서 산출을 하였으며, 식 (2.28)과 같이 정의할 수 있음[2.10].

$$d_m (= SMD) = \frac{1}{3} \frac{\int_{r=0}^{\infty} f(r) \times r^3 dr}{\int_{r=0}^{\infty} f(r) \times r^2 dr} \quad (2.28)$$

- 여기서, $f(r)$ 과 r 은 분포함수(Distribution function)와 측정 체적 내에서 분포하고 있는 액적의 직경을 각각 의미한다. 특히, 입자의 밀도수와 평균 직경의 크기 관계는 아래의 식으로 표현할 수 있음.

$$\bar{N} = \frac{3Nf_v}{4\pi d_m^3} \quad (2.29)$$

- 따라서 분포함수 모델과 이미지 측정 결과를 적용하여 다양한 실험 조건에 따라서 불티가 발생하는 현상에 관한 입자의 크기분포를 모델링하여 정량적인 결과를 얻을 수 있음.

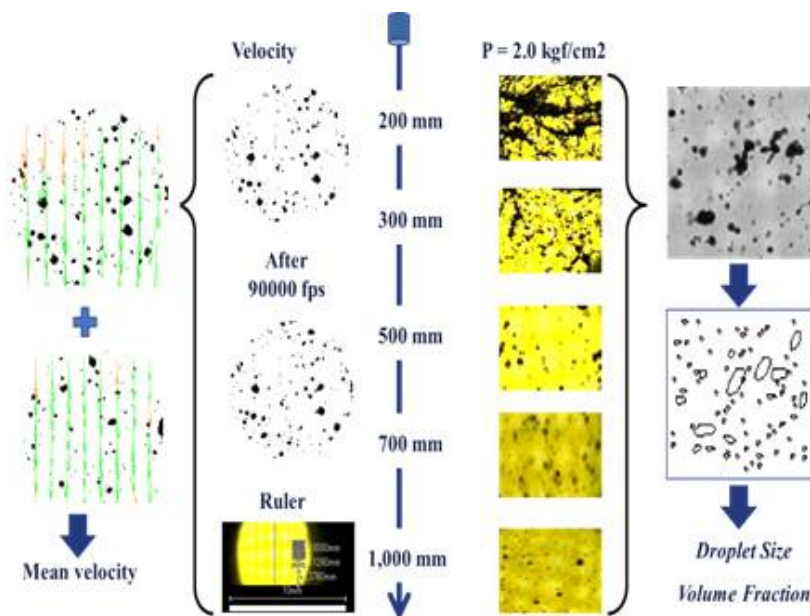


그림 2-32. 이미지 분석 기법

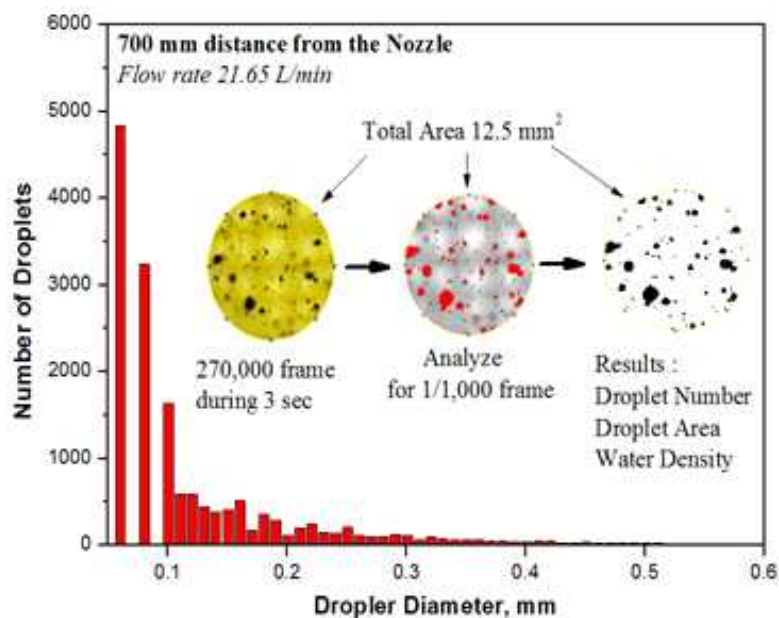


그림 2-33. Examples of the Distribution of the Particles

(4) 운동량 분석 방법

- 불티 포집기의 성능을 예측하기 위해서는 용접이 발생하는 지점으로부터 비산되는 입자의 크기 분포뿐만 아니라 속도벡터의 크기를 산출해야 함.
- 특히, 화재로 확산되는 불티의 크기는 기존 문헌 자료에 따라서 최소 5 mm이상 정도로 예측하고 있으며 입자의 크기가 증가할수록 비산되는 거리가 비례하여 증가하기 때문에 본 연구에서는 평균 입자의 크기를 도출한 후 그림 2-34과 식 (2.30)의 관계에 의해서 최대 속도의 크기를 산출하고자 함.

$$\dot{m}_p = \rho A u_{p,max} \quad (2.30)$$

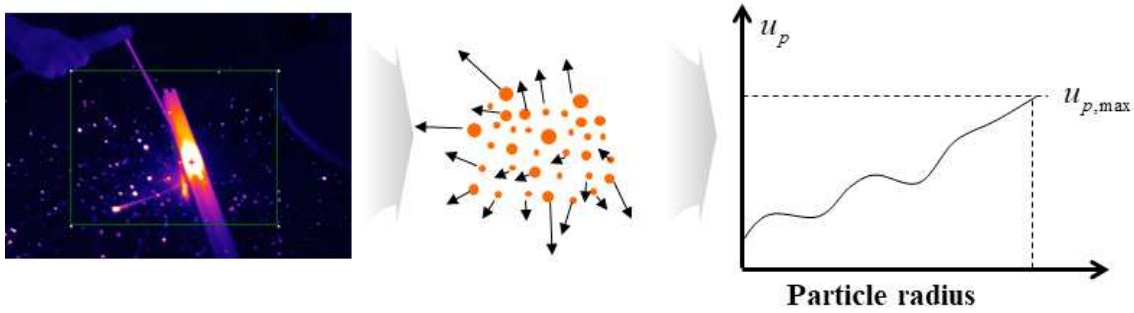


그림 2-34. The Schematic Diagram of the Particle Velocity Analysis

(5) PIV Method

- 불티 입자의 운동량을 분석하기 위해서는 평균 유속의 크기를 산출해야 하며, 본 연구의 경우 MATLAB 프로그램을 사용하여 사용자 정의 함수에 의해서 구성되어 있는 PIVlab 1.32 버전을 사용하였음.
- PIVlab는 그림 2-34과 같이 시간 간격에 따라서 이미지 처리된 관심 면적에 대해서 속도 분포를 계산할 뿐만 아니라 유동의 패턴을 도출하거나 표시하는데 유용한 Open-Source Particle Image Velocimetry 소프트웨어다. 사용자 친화적인 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 통해 PIV 분석과 데이터 후 처리를 빠르고 효율적으로 할 수 있음.

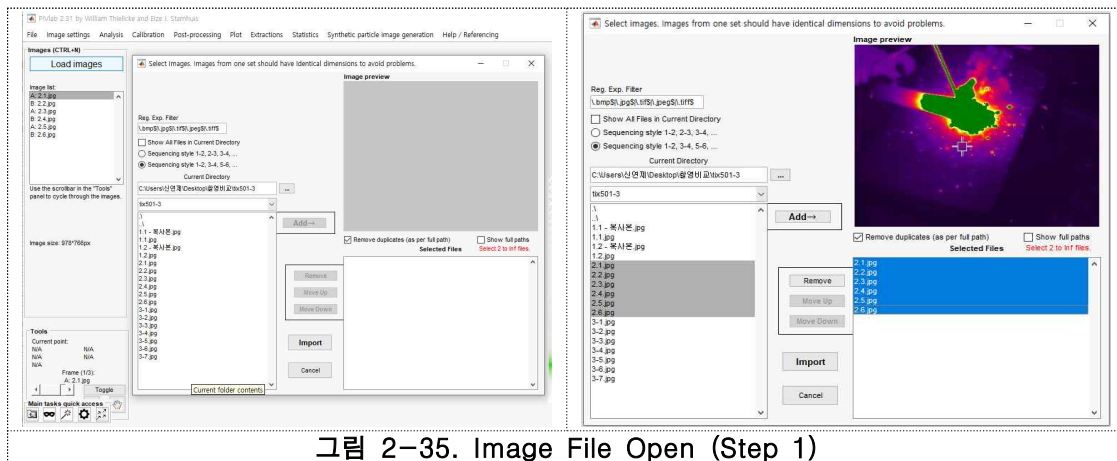
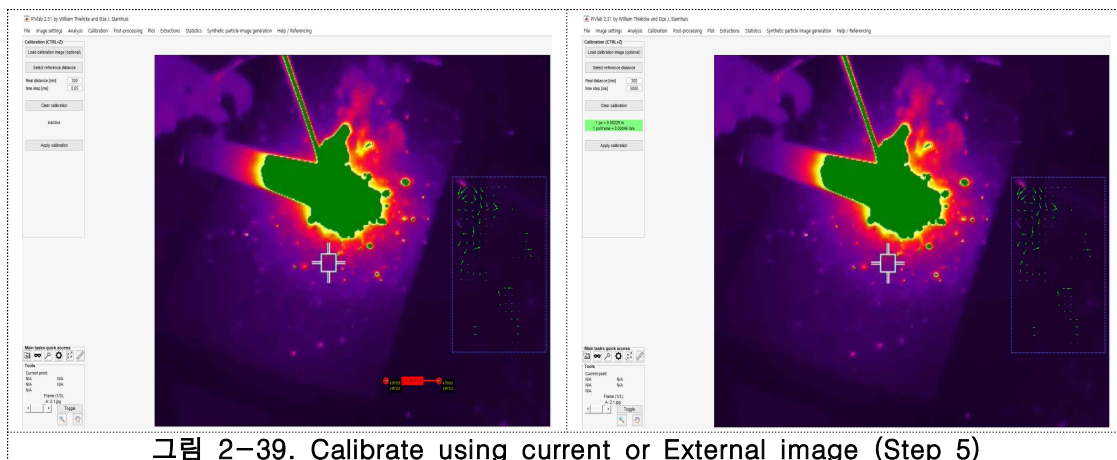
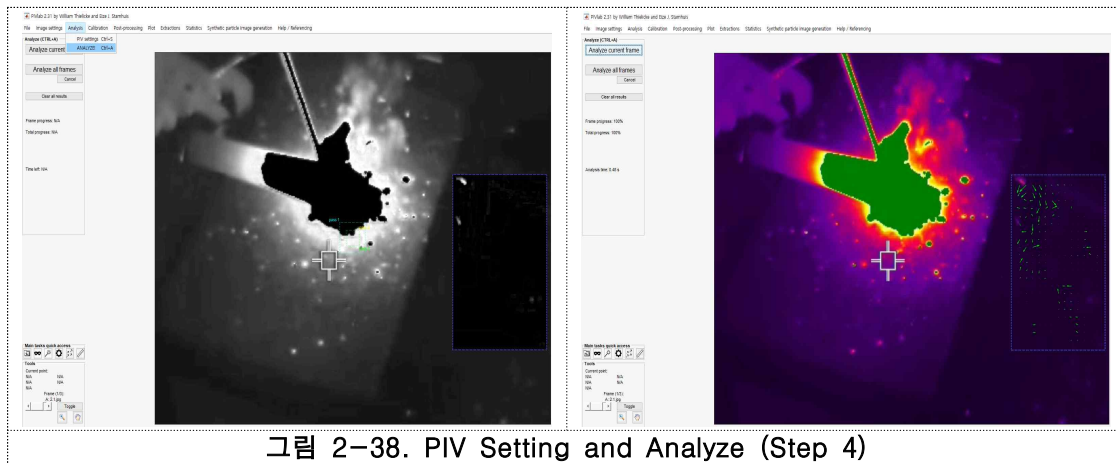
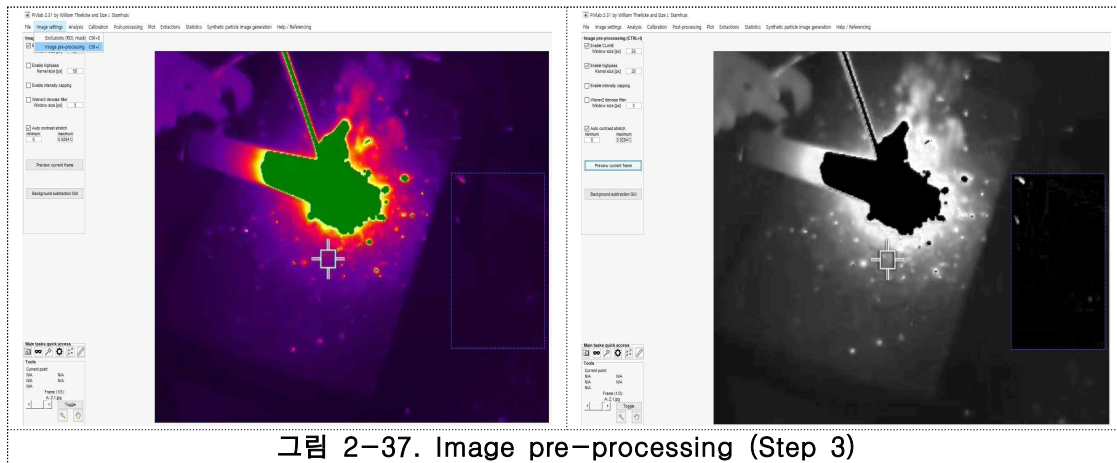
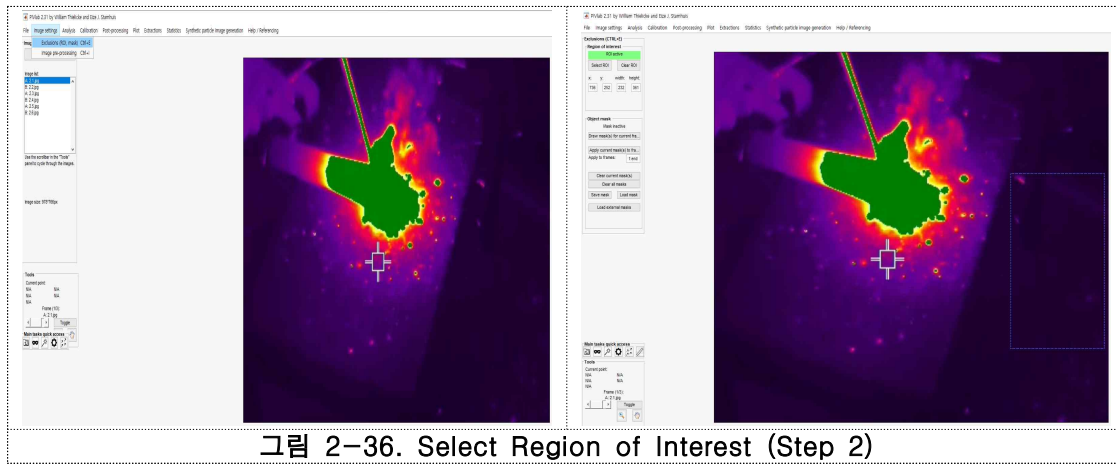


그림 2-35. Image File Open (Step 1)



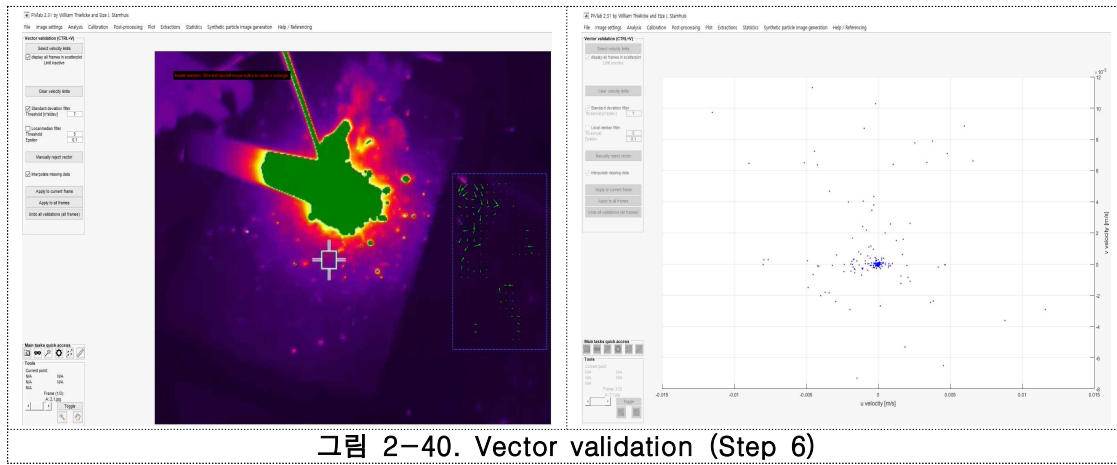


그림 2-40. Vector validation (Step 6)

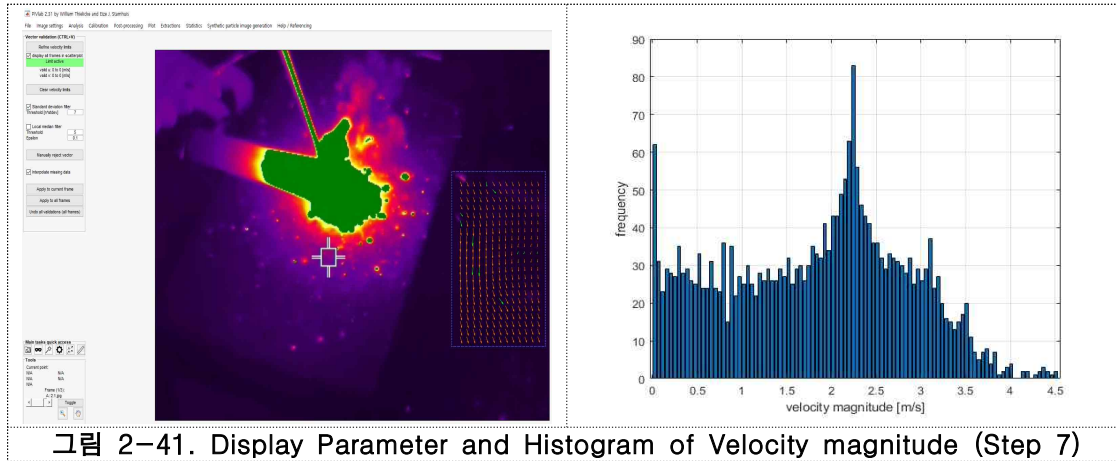


그림 2-41. Display Parameter and Histogram of Velocity magnitude (Step 7)

(6) 실험장치 구성 및 실험조건

- 용접과정으로 인해서 불티가 발생하여 비산하는 현상을 이미지 분석 기법과 PIV 방법에 의해서 정량적으로 운동량을 산출하기 위해서는 용접 조건(용접 속도, 모재와 용접봉의 종류, 사용전력, 용접시간 등)을 고려해야 함.
- 따라서 본 연구에서는 그림 2-42과 같이 계측부와 용접부를 구분하였으며 용접 모재가 일정한 속도로 움직일 수 있도록 제어 모터를 사용하고 용접봉의 각도를 고정하여 단위시간동안 용접봉인 감소되는 크기가 일정하도록 실험조건을 구성

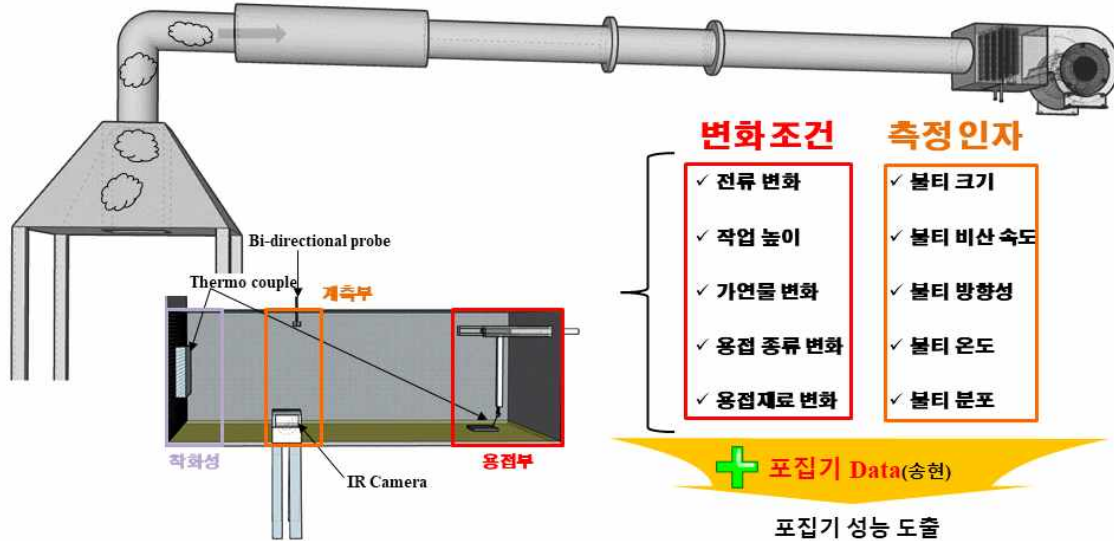


그림 2-42. The Schematic Diagram for the Experiment Conditions

- 실험 장치는 아크용접의 특성을 고려하여 용접봉 소모속도에 따라 Torch Stander가 20 ~ 150 mm/min의 속도로 하강 이동할 수 있는 반-자동화 제어장치, 용접 불티 발생장치(용접기), 열화상 카메라, 서브 카메라, Test bed, 전류측정기 등으로 구성하였다. 아래의 그림은 실험장치의 요구 성능을 고려한 설계 과정을 나타내고 있음.

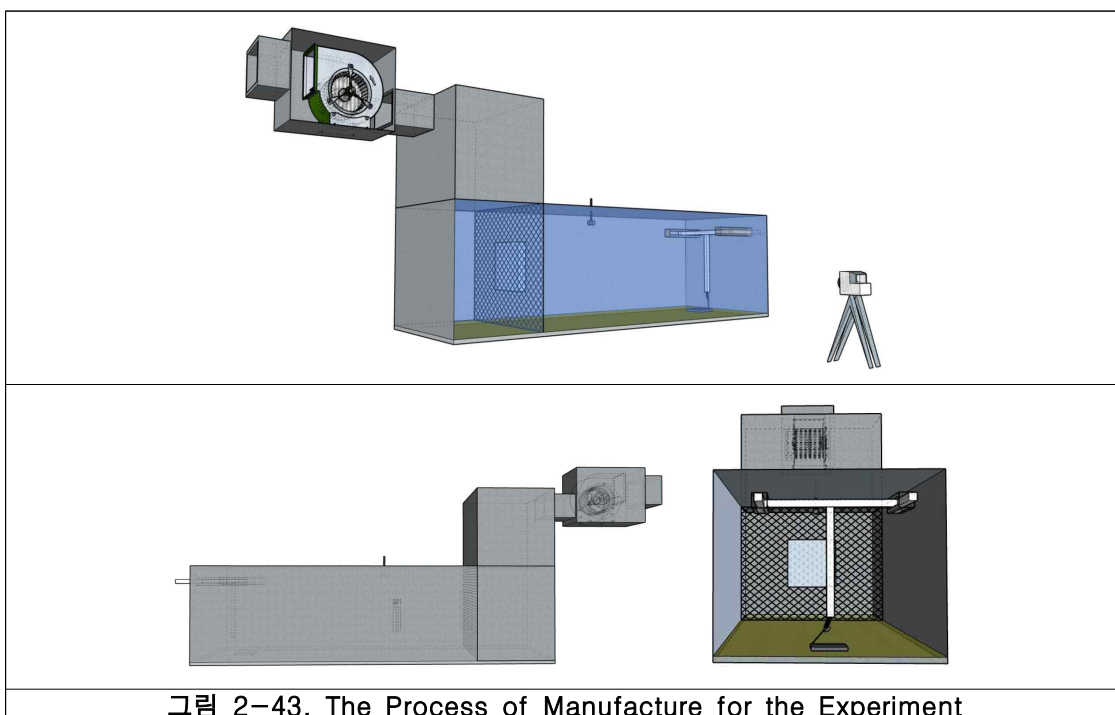


그림 2-43. The Process of Manufacture for the Experiment

- 그림 2-44은 최종 본 연구를 위해서 구성한 실험장치를 나타내고 있으며, 용접 작업대는 현장의 작업 조건을 고려하여 높이가 0.3 m ~ 1.0 m까지 가변할 수 있는 구조로 하였으며, 용접 작업은 실험 조건을 제외한 변수를 최소화하기 위하여 용접봉 및 모재가 각각 수직, 수평 이동이 가능한 반자동화 용접 장치를 제작하였음.
- 용접 시 발생하는 불티의 운동량 및 온도를 측정하기 위하여 용접 지점에서 1 m 이격된 곳에 평행하게 열화상 카메라를 설치하였으며 실험 조건, 실험 장비 및 계측 장비의 주요 사항은 표 2-23과 같음.

표 2-23. Specification of the Experiment Apparatus

Measurement	Specification			
Welding Machine	Power voltage : 220 V, Rated input capacity : 7 KVA, Actual output current : 20~220 A, Efficiency : 60 %, No-Load voltage : 65 V, Model : Rolwal MMA-200E			
Thermal Camera	Temperature measurement range : -20 °C ~ +800 °C Accuracy : ±2 °C or 2%, Frame rate : 60 Hz, Infrared resolution : 640 x 480, Model : FLUKE RSE-600			
Current Sensor	A Range : DC 2500 · AC 1000, Frequency : 5-500 Hz, Model : FLUKE-376 FC			
Experiment Condition				
Welding current [A]	70	100	130	150
Working Time [s]	30	50	70	

Contact Angle: 90°, Arc Length: 5 mm, base metal material: Iron Electrode diameter, d_{el}: 4.094 mm

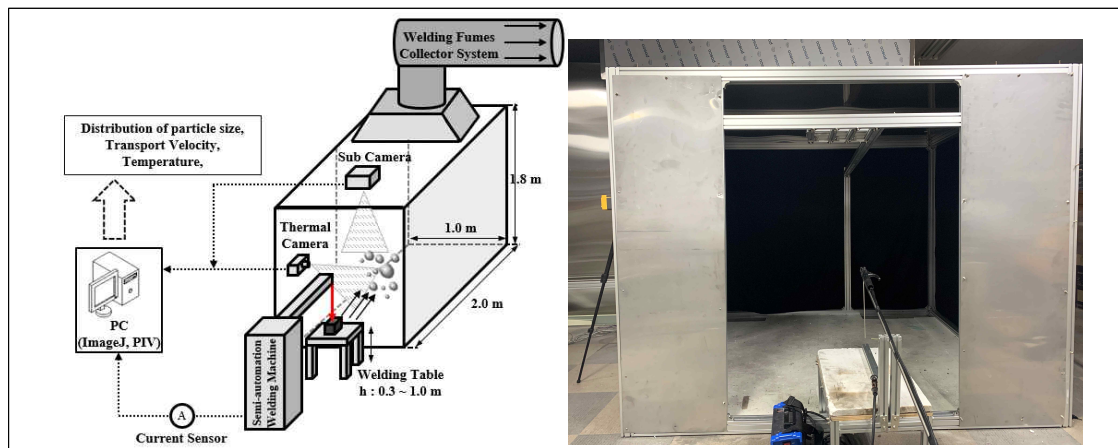


그림 2-44. Schematic diagram of the experiment on the Semi-auto welding test device.

출원 번호 통 지 서

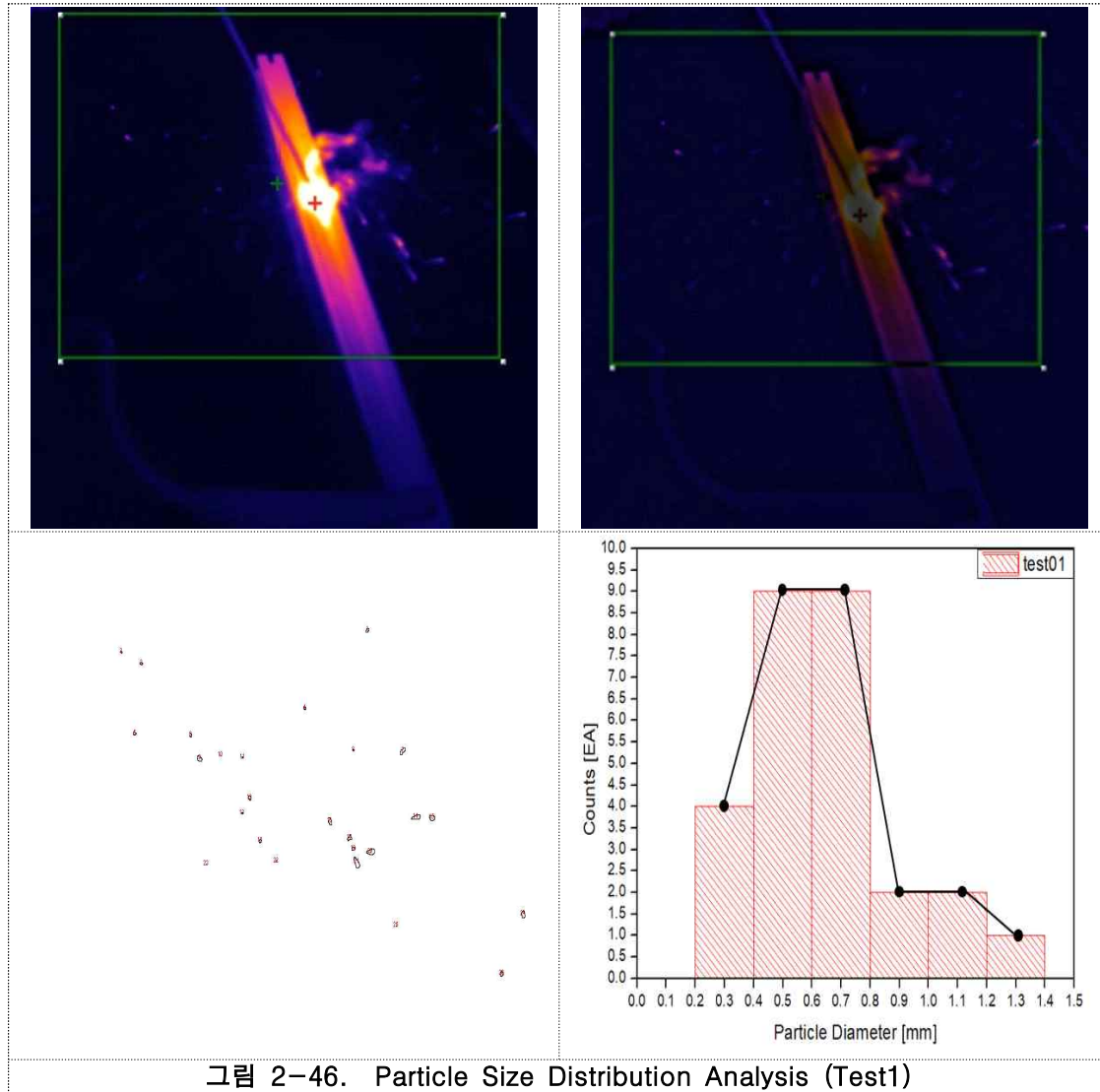
출 원 일 자 2019.11.04
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1012319)
출 원 번 호 10-2019-0139194 (접수번호 1-1-2019-1125644-18)
출 원 인 명 칭 동양대학교 산학협력단(2-2006-006866-7)
대 리 인 성 명 이오식(9-2005-001186-8)
발 명 자 성 명 유우준 노경철 신연제
발 명 의 명 칭 응접 불티 반자동화 실험 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>·특허마당·PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/S8/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

(7) 측정결과 및 분석



- 그림 2-46은 아크 용접기의 전압 220V이고 70A인 조건에서 용접 불티가 비산되어 입자가 발생된 경우 열화상 카메라를 사용하여 측정한 사진과 이미지 분석에 의해서 크기분포를 나타낸 결과임. 그림에서 보듯이 RGB 처리 과정에서 불티의 입자만 남게 되며 구형의 직경으로 환산하여 구성하게 되면 아래의 오른쪽과 같은 분포 함수 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있음. 특히, 입자의 크기는 약 0.6 ~ 0.7mm 가 가장 많이 발생한 것으로 나타났으며, 빈도수의 경우 향후 보다 정확한 측정 방법을 개선할 필요가 있는 것으로 사료됨.

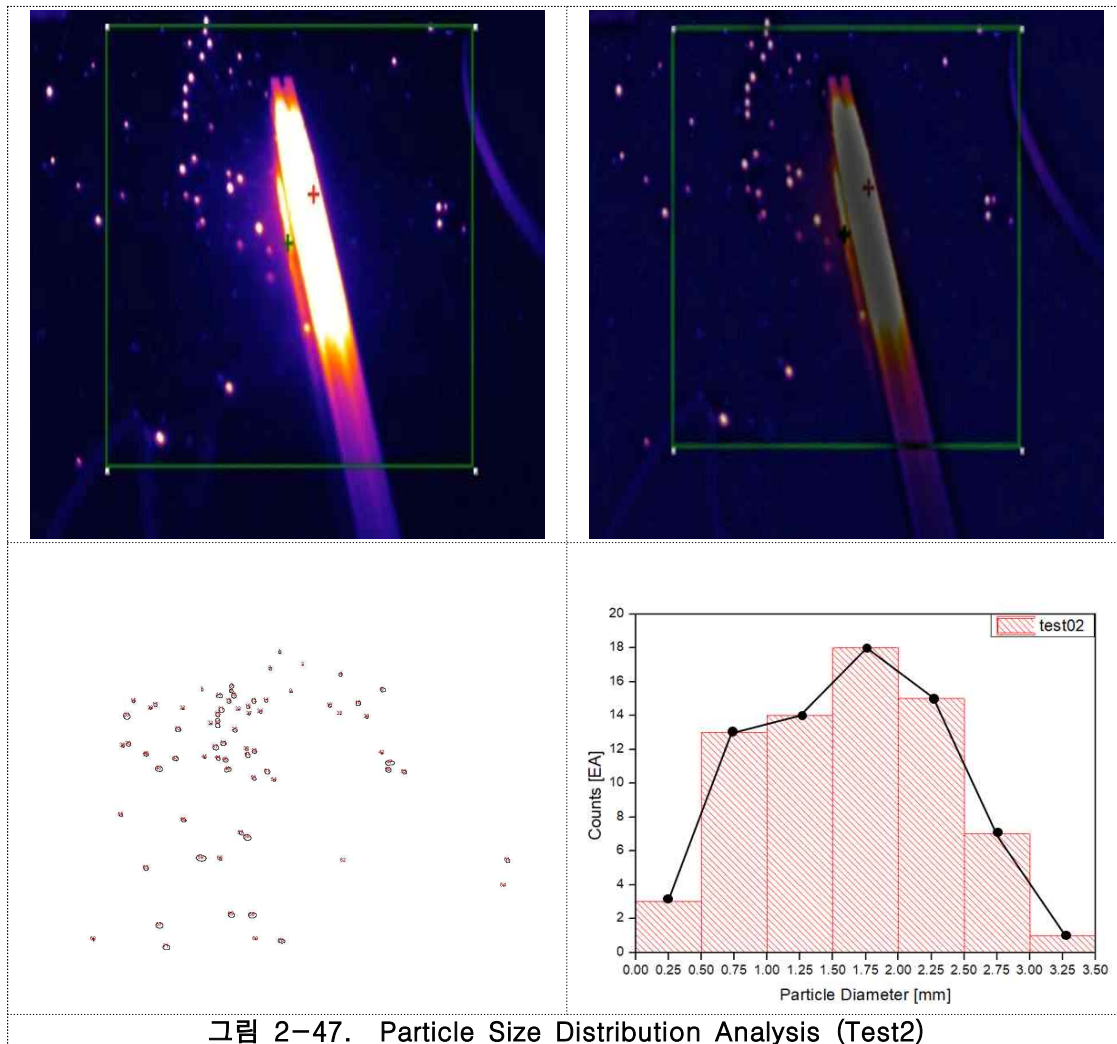


그림 2-47. Particle Size Distribution Analysis (Test2)

- 그림 2-47와 그림 2-48은 아크 용접기의 전압 220V이고 90A인 조건에서 용접 불티가 비산되어 입자가 발생한 경우 열화상 카메라를 사용하여 측정한 사진과 이미지 분석에 의해서 크기분포를 나타낸 결과임. 그림에서 보듯이 입자의 크기는 약 1.6 ~ 1.8 mm 정도가 가장 많이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 그림 2-46과 다르게 분포 형상은 중앙에서 오른쪽으로 치우친 형태로 나타났음. 즉, 그림 2-46과 그림 2-47에서 알 수 있듯이 불티의 분포는 용접 조건에 따라서 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구 결과는 분포함수 모델식과 비교하여 분포 계수를 결정하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단됨.

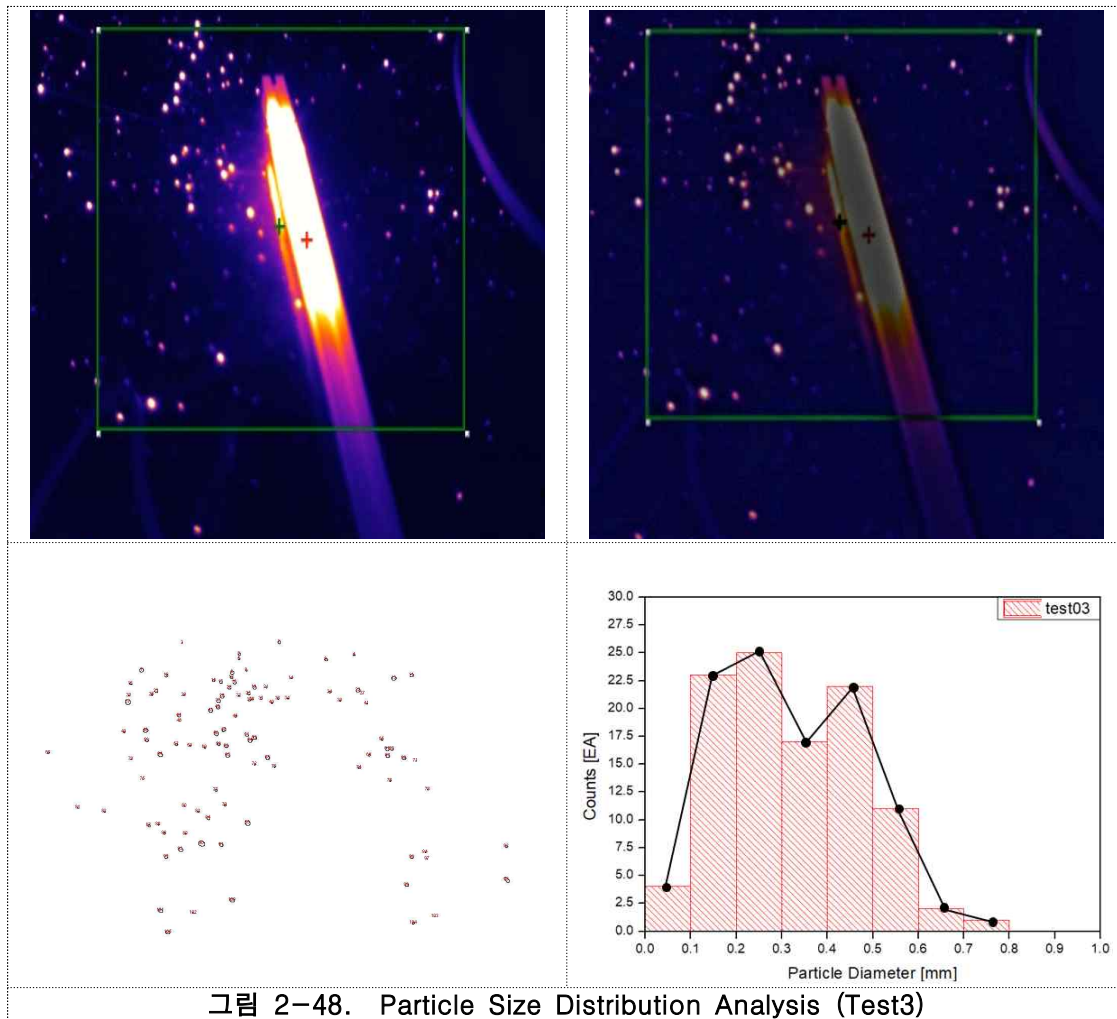


표 2-24. 실험 조건에 따른 입자의 크기

Experiment Condition	Particle Size [mm]	
	Max	Avg. Size Distribution
70 [A], 20 [s]	3.4	0.5 ~ 0.7
70 [A], 30 [s]	4.2	0.2 ~ 0.4
90 [A], 20 [s]	3.3	1.6 ~ 1.8
90 [A], 30 [s]	3.5	1.6 ~ 1.8

- 그림 2-49는 아크 용접기의 전압 220V이고 70A인 조건에서 불티 입자의 운동량을 분석하기 위해서 PIV 방법에 의한 유속크기 분포를 산출한 결과를 보여주고 있음. 그림에서 보듯이 입자의 방향은 x축을 기준으로 할 때 양방향 분포도가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 유속 크기는 최소 -2m/s 정도에서 최대 6m/s 정도까지 고르게 분포되어 있으며, 역방향인 -0.5m/s 정도가 가장 많이 나타남. 특히, 입자의 유속 크기는 화재 확산과 관련된 주요 변수로 입자의 속도가 최대인 경우 대류 열전달이 증가하여 불티의 온도가 감소할 수 있지만, 가연물이 축적된 보다 넓은 영역에 비산될 수 있기 때문에 본 연구의 경우 유속은 절대값을 기준으로 하여 가장 높은 값과 작은 값으로 구분하여 데이터를 구축하고자 함.

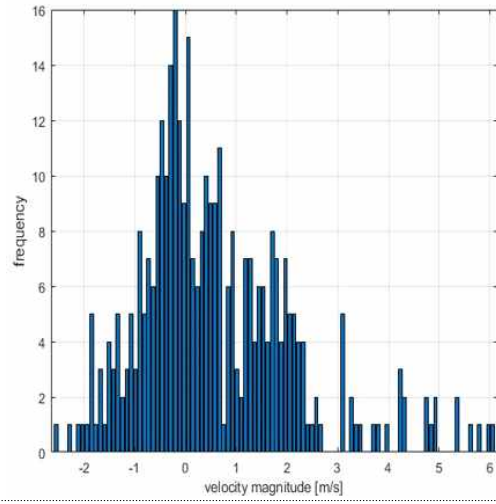
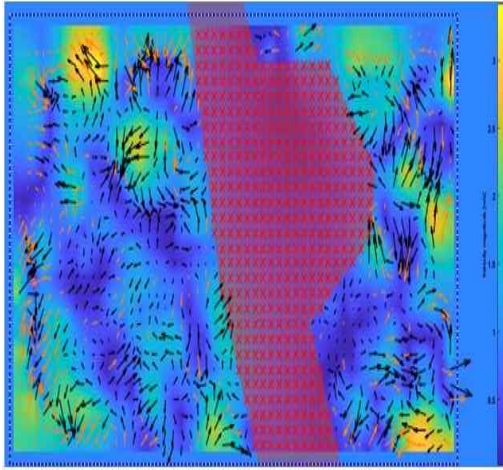
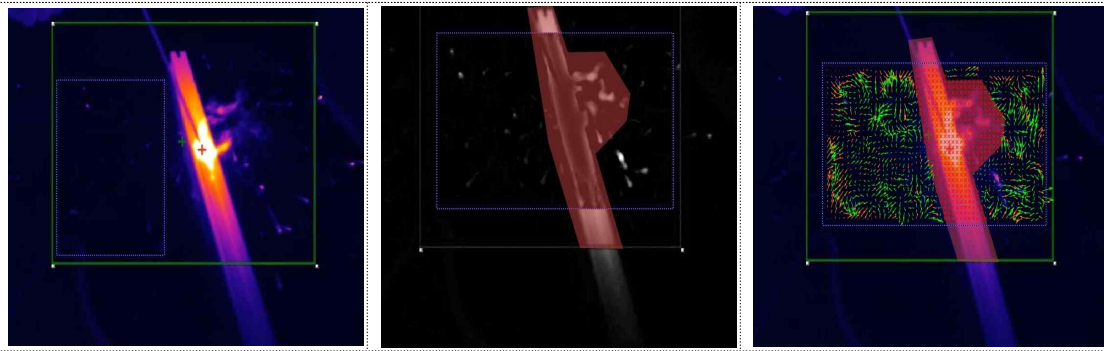


그림 2-49. Particle Velocity Distribution (Test1)

- 그림 2-50와 그림 3-51은 아크 용접기의 전압 220V이고 90A인 조건에서 불티 입자의 운동량을 분석하기 위해서 PIV 방법에 의한 유속크기 분포를 산출한 결과이며 분석 방법은 그림 2-49와 같음.

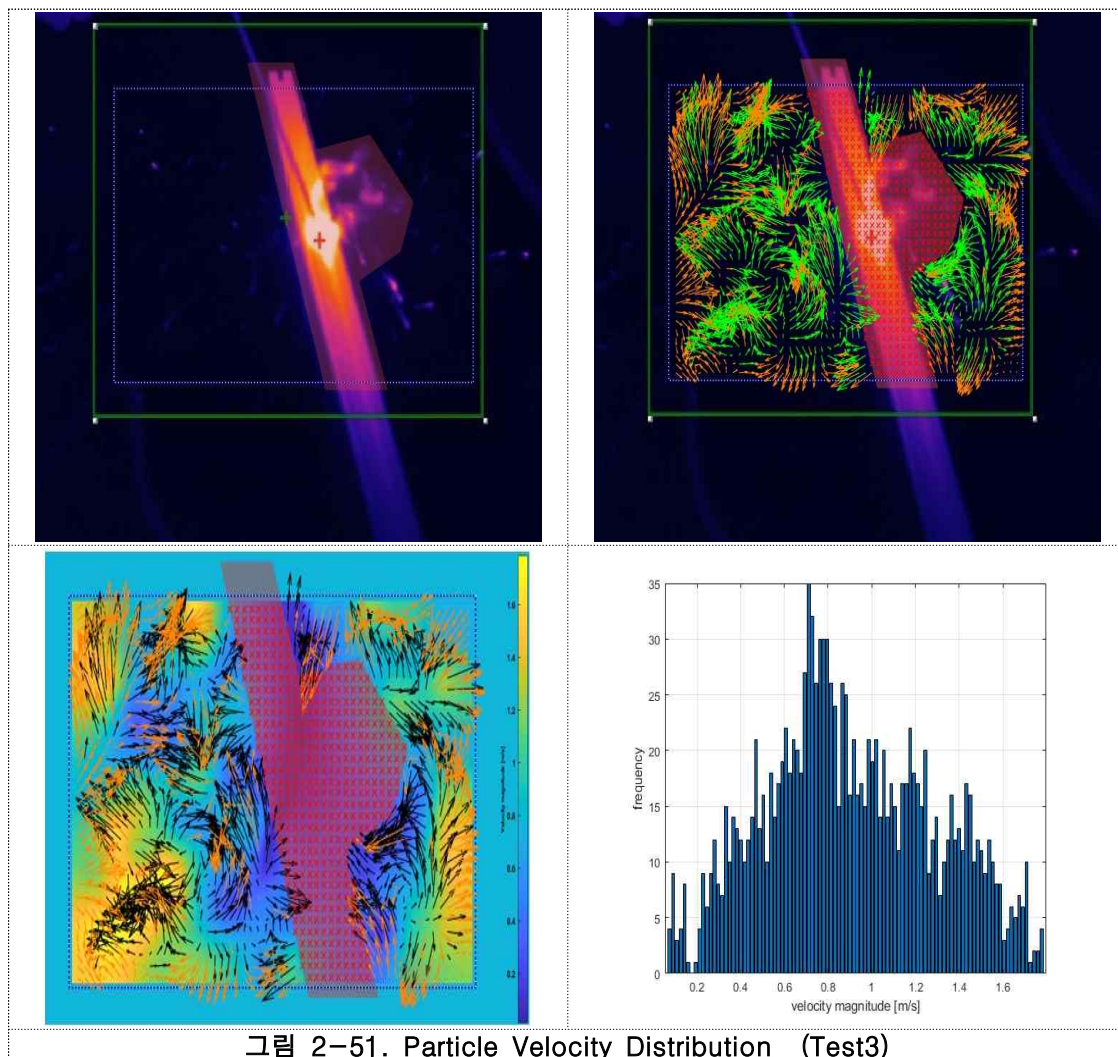
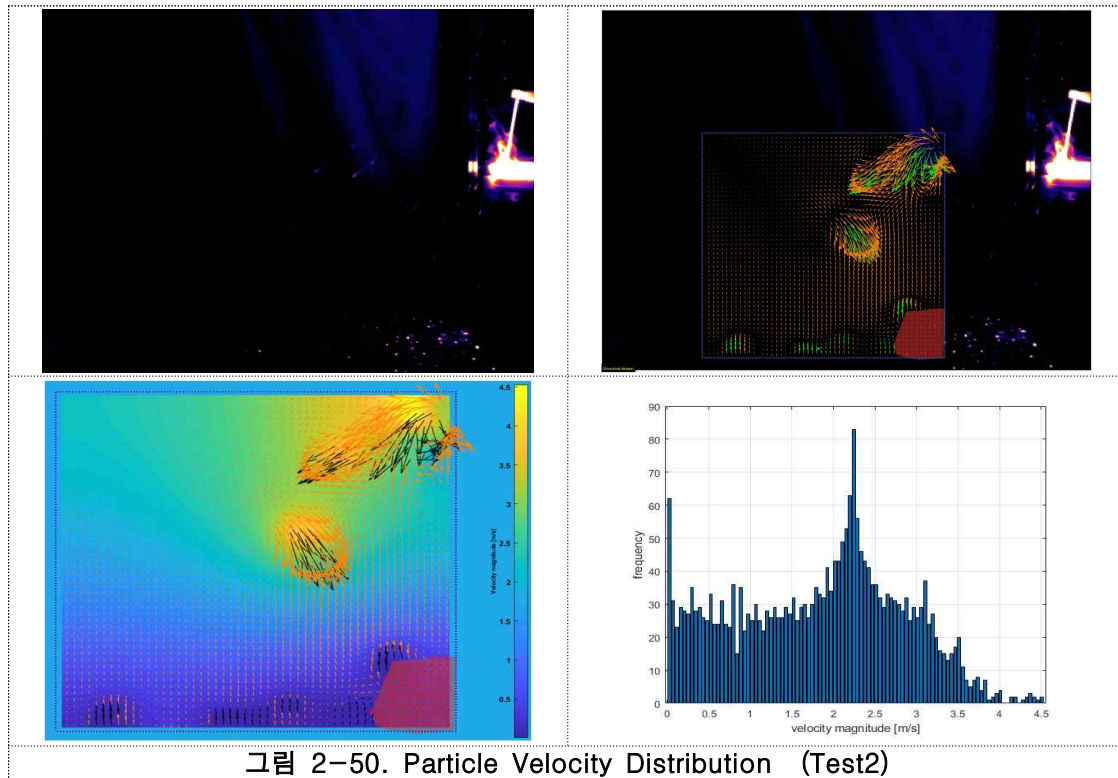


표 2-25. 실험 조건에 따른 입자의 유속 크기

Experiment Condition	Velocity [m/s]		
	Min	Max	Avg. Distribution
70 [A], 20 [s]	± 0.5	± 6.0	± 2.0
70 [A], 30 [s]	± 0.6	± 5.8	± 1.9
90 [A], 20 [s]	± 0.6	± 4.5	± 2.3
90 [A], 30 [s]	± 0.5	± 4.7	± 2.3

(8) 볼티 온도 분석

- 그림 2-52와 그림 2-53은 아크 용접기의 전압 220V이고 70A와 90A인 조건에서 볼티 입자가 발생 시 용접 모재와 볼티의 온도를 열화상 카메라를 사용하여 측정한 사진임. 그림에서 보듯이 입자의 온도는 최대 약 380 ~ 550℃ 범위에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 모재의 온도는 1200℃ 이상으로 나타났음. 즉, 볼티의 발생 온도는 전류 변화의 조건과 작업 시간에 따라서 증가하는 것으로 확인 할 수 있음.

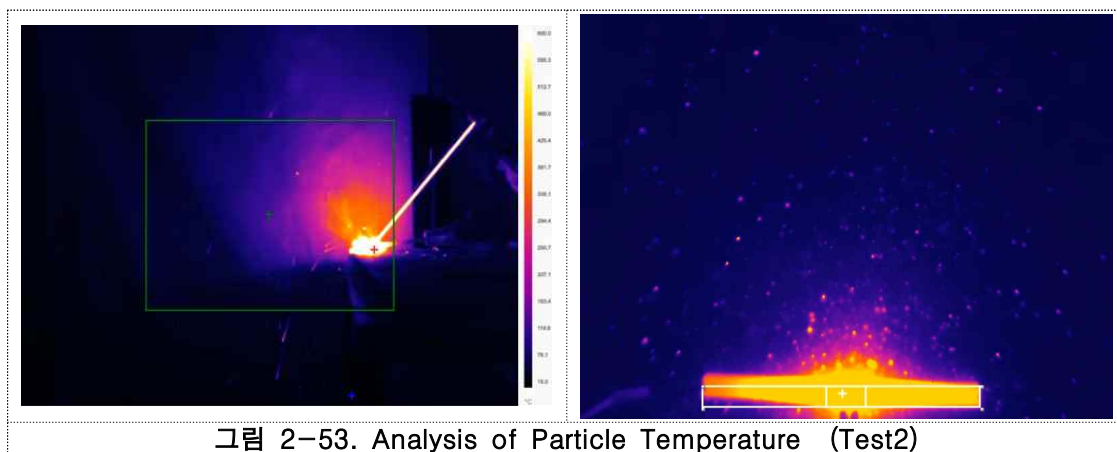
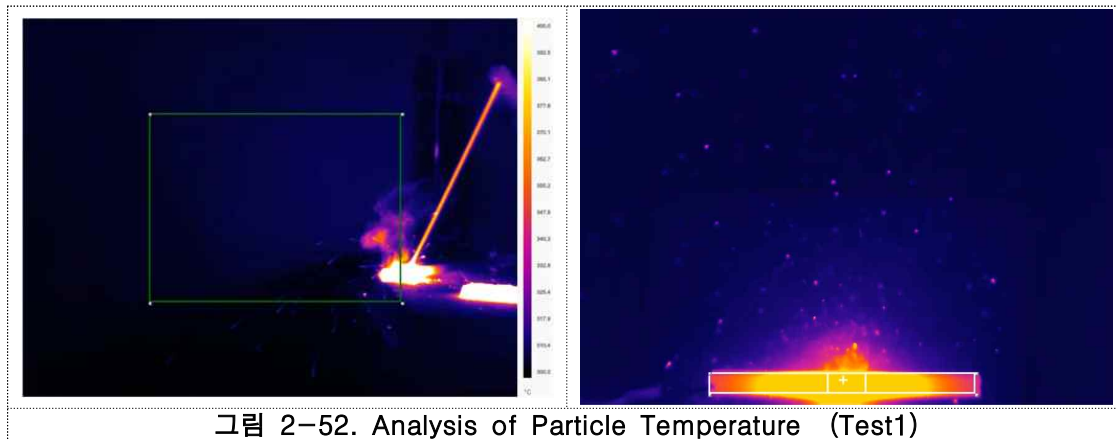


표 2-26. 실험 조건에 따른 온도

Experiment Condition	Max Temperature [°C]	
	Particle	Base Metal
70 [A], 20 [s]	382	1200 <
70 [A], 30 [s]	430	1200 <
90 [A], 20 [s]	367	1200 <
90 [A], 30 [s]	544	1200 <

(9) 결과요약

- 본 연구 보고서에서는 이미지 분석에 의한 불티 입자의 크기분포와 운동량을 분석하기 위한 방안을 제시하였으며, 실험 장치를 구성하고 불티 발생 조건에 따라서 측정한 결과를 나타냄. 특히, 불티 발생 실험장치의 경우 다양한 용접 조건을 고려한 설계를 기반으로 제작한 것으로 향후 반복 실험을 수행하여 장치의 성능을 보완할 경우 유용한 분석 장비로 활용할 수 있는 것으로 판단됨.
- 용접기의 전압 220V에 대해서 전류 크기의 경우 70A, 90A 그리고 용접 작업 시간의 경우 20s, 30s인 조건에서 불티 입자의 평균 크기분포와 최대 크기, 유속의 최대 크기와 최소 크기의 측정값 그리고 입자와 모재의 최대 온도를 분석한 결과 아래와 같은 표로 나타남.

표 2-27. 실험 조건에 따른 결과

Experiment Condition	Particle Size [mm]		Velocity [m/s]			Temperature [°C]	
	Max	Avg. Size Distribution	Min	Max	Avg. Distribution	Max	
						Particle	Base Metal
70 [A], 20 [s]	3.4	0.5 ~ 0.7	±0.5	±6.0	± 2.0	382	1200 <
70 [A], 30 [s]	4.2	0.2 ~ 0.4	±0.6	±5.8	± 1.9	430	1200 <
90 [A], 20 [s]	3.3	1.6 ~ 1.8	±0.6	±4.5	± 2.3	367	1200 <
90 [A], 30 [s]	3.5	1.6 ~ 1.8	±0.5	±4.7	± 2.3	544	1200 <

2-7. 건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 향상 방안 분석

(1) 주요 내용

- 포집기 종류와 포집 성능 향상 방안 분석
- 제품 설계 및 시제품 제작
- 필터 및 자력에 따른 포집 성능 향상

(2) 용접가스 포집기 성능 분석

가. 용접 가스 국소배기장치 후드

1) 국소 배기의 정의 및 구성 요소

- 국소배기는 발생원에서 방출된 유해물질이 작업장 내로 확산되기 전에 발생원 근처에서 포집 제거하는 환기 방식
- 구성 요소 : 가정용 진공청소기의 구조와 유사한 후드와 덕트, 공기청정기, 송풍기, 배출구로 구성 됨

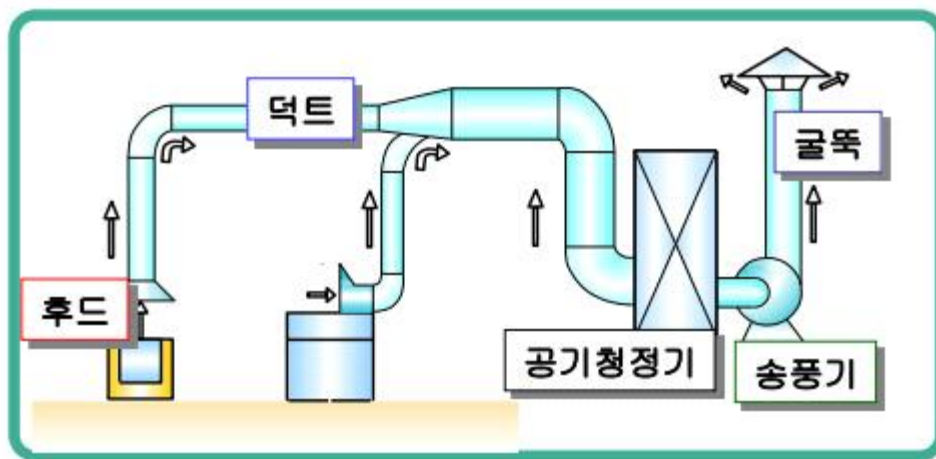


그림 2-54. 국소박이 장치 구성도

2) 후드의 재질

- 쉽게 마모되거나 부식되지 않는 재료를 사용
- 유해물질의 종류에 따라 철재, 플라스틱을 선택

3) 후드의 모양

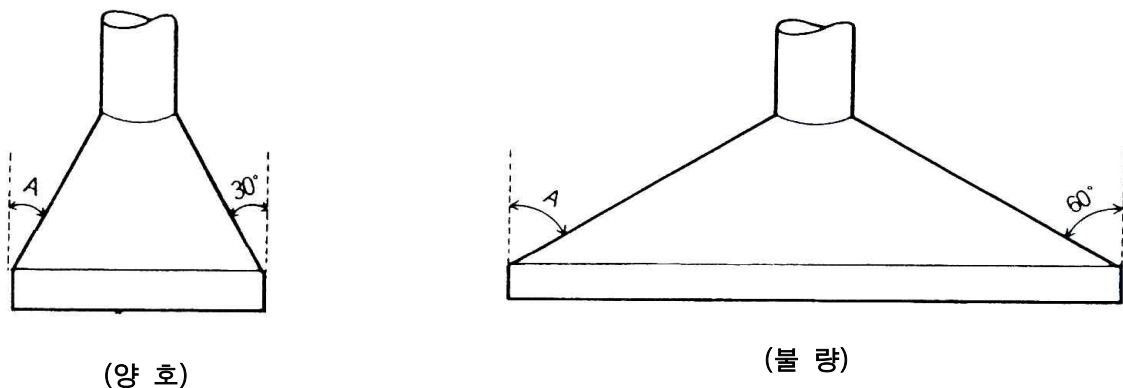


그림 2-55. 후드의 모양

- A는 30° 가 적당(최대 45°)
- A는 45° 이상이면 비효율적임.

4) 후드와 오염원과의 거리는 가까울수록 양호

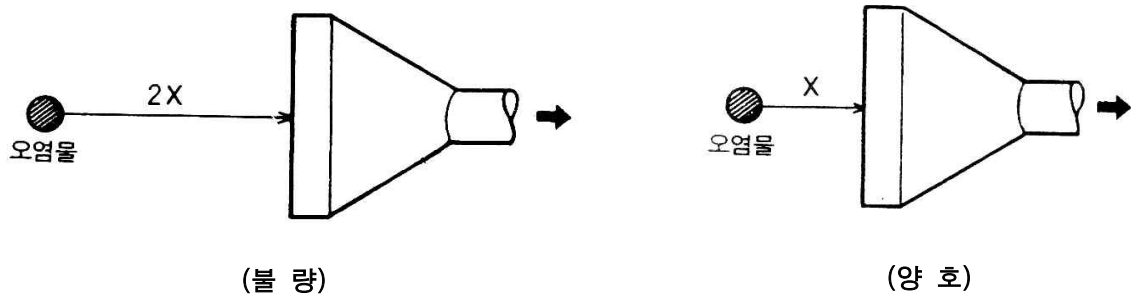


그림 2-56. 후드와 오염원과의 거리는 가까울수록 양호

- 오염물질과 후드와의 거리가 (B)는 (A)보다 2배밖에 되지 않지만 오염물질을 배출시키기 위하여 (B)는 (A)보다 4배의 동력이 필요함

5) 후드의 형태와 유기 입기류의 모양

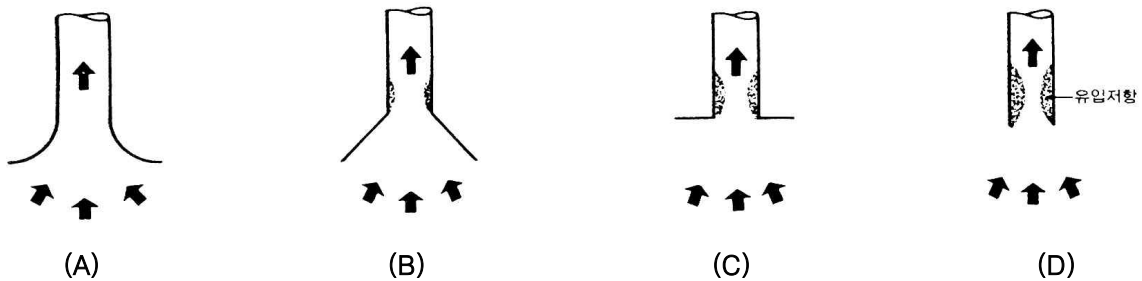
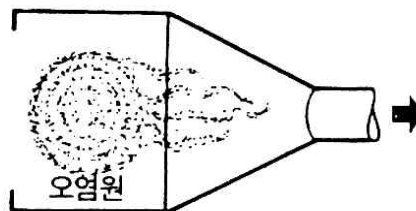


그림 2-57. 후드의 형태와 유기 입기류의 모양

- 배기효율의 크기 $A > B > C > D$

6) 후드의 형태와 위치



(양호)

그림 2-58. 후드의 형태와 위치

7) 후드의 형식과 적용작업

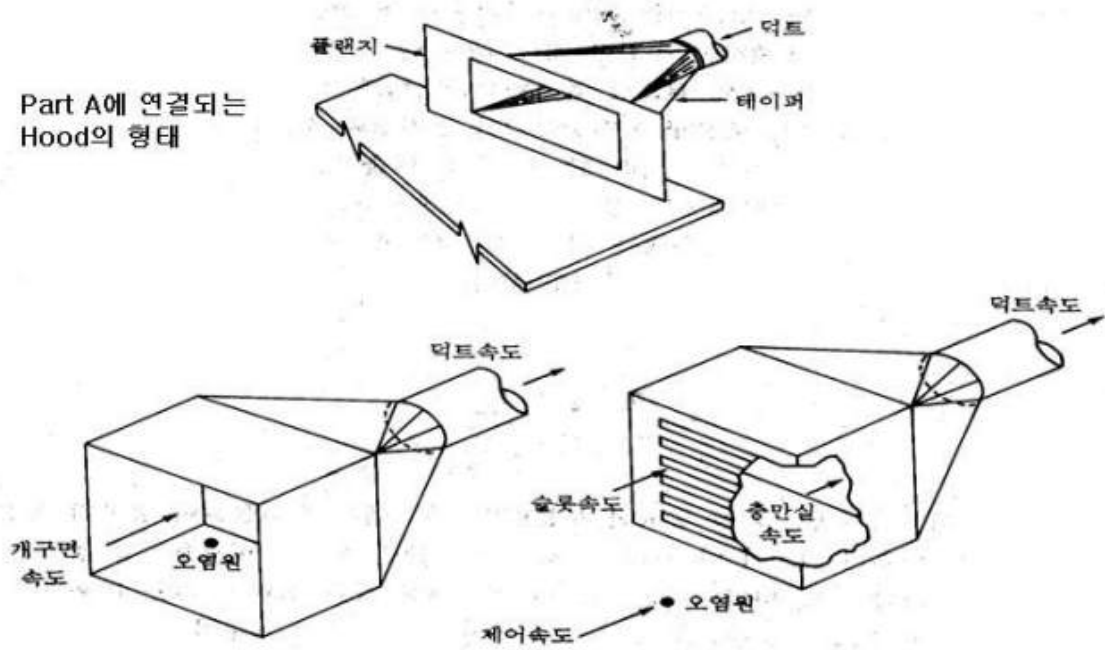
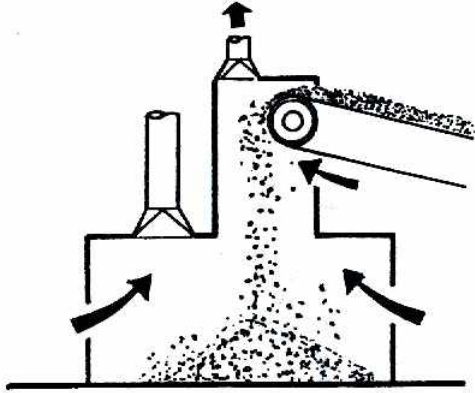


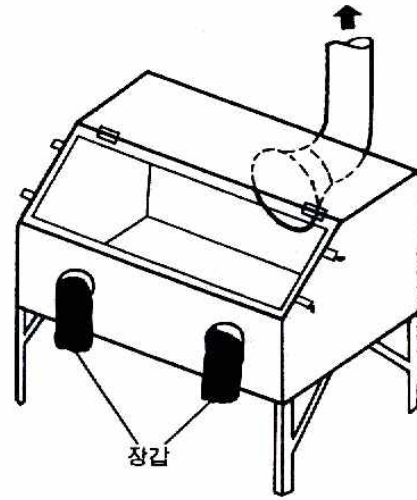
그림 2-59. 후드의 형식과 적용작업

표 2-28. 후드의 형식과 적용 작업

식	형	적 용 작 의 예
포위식	포위형 장갑부착상자형	분쇄, 마무리작업, 공작기계, 체분저조 농약등 유독물질 또는 독성가스 취급
부스식	드래프트 챔버형 건축부스형	연마, 포장, 화학분석 및 실험, 동위원소취급, 연삭 산세척, 분무도장
외부식	슬로트형 루바형 그리드형 원형 또는 장방형	도금, 주조, 용해, 마무리작업, 분무도장 주물의 모래털기 작업 도장, 분쇄, 주형해체 용해, 체분, 분쇄, 용접, 목공기계
레시바식	캐노피형 원형 또는 장방형 포위형 (그라인더형)	가열로, 소입, 단조, 용융 연삭, 연마 탁상그라인더, 용융, 가열로



(포위형)



(장갑부착 상자형)

그림 2-60. 포위식

A. 제어속도

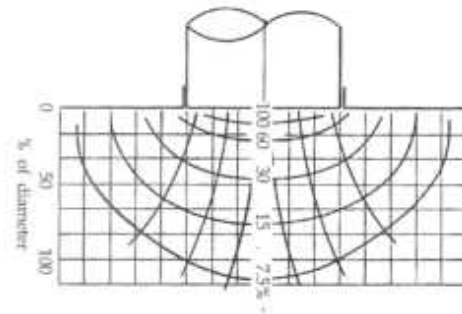
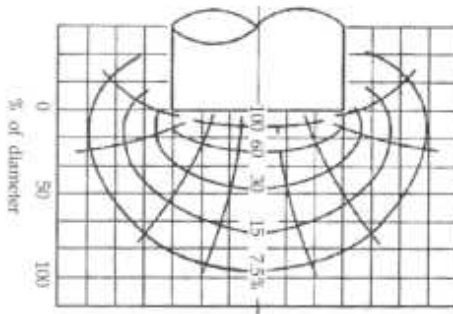
특정 위치에서 제어대상 물질 주변의 공기속도를 변화시켜 제어대상 오염물질을 Hood 안으로 흡인하기 위한 최소 필요속도

B. 필요풍량(Q)의 산정

Type 1: 덕트형 후드

$$\bullet Q = V_o \times A_o = V_c \times A_c$$

- V_o : Hood 입구 면에서의 평균유속 (m/sec)
- A_o : Hood 입구의 면적 (m^2)
- V_c : 오염물질의 탈출을 막기 위한 제어속도 (m/sec) /오염물질의 종류에 따라 결정
- A_c : 제어속도와 동일한 크기의 속도(m/sec)를 가지는 포위면의 면적(m^2)



- Hood 단면으로부터 직선거리에 따른 풍속변화

$$\frac{y}{100 - y} = \frac{0.1 A_o}{X^2}$$

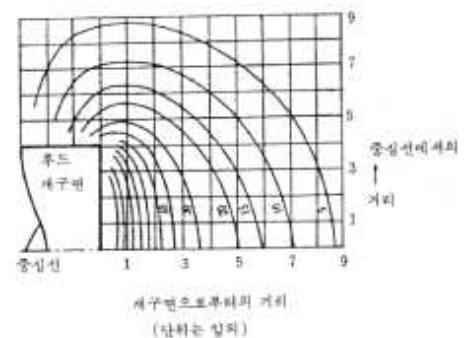
y : 거리 x 에서 속도 100분율($= 100 \times V_X / V_o$)

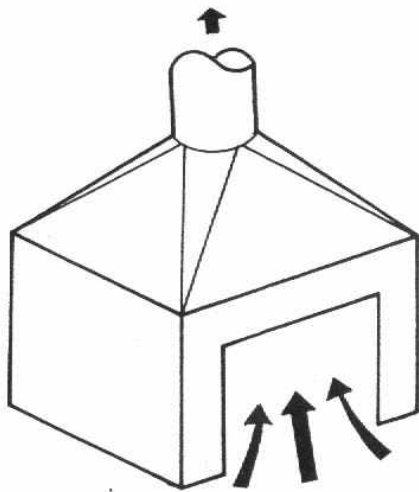
A_o : 개구면적(m^2)

X : 개구면으로부터의 거리(m)

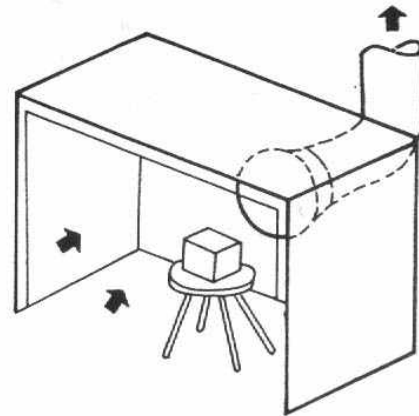
V_X : 거리 X 에서의 속도 (m/sec)

V_o : 개구면의 평균속도 (m/sec)



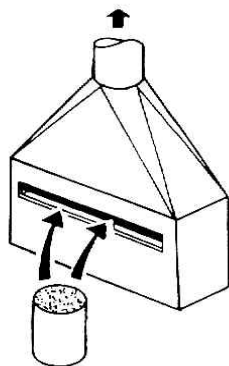


(드래프트 챔버형)

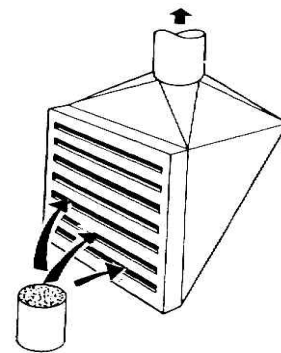


(건축부스형)

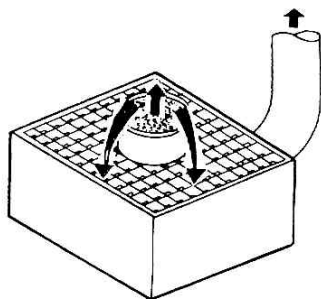
그림 2-61. 부스식



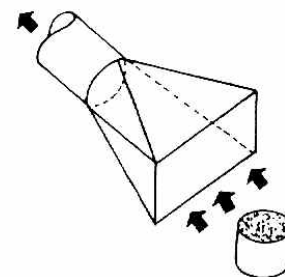
(슬로트형)



(루바형)



(그리드형)

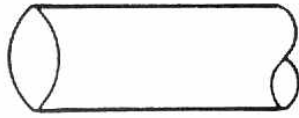


(장방형)

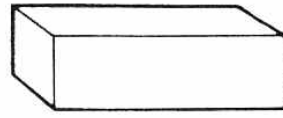
그림 2-62. 외부식

나. 국소배기장치 덕트

1) 덕트의 모양



(원통형)



(각형)



(신축형)

그림 2-63. 덕트의 모양

- 배기효율 : 원통형 > 각형 > 신축형
- 배기효율은 덕트의 모양에 따라 원통형이 신축형(Flexible)이나 각형에 비해 압력손실이나 마찰 손실이 적으므로 원통형 덕트로 설치하는 것이 바람직함.

2) 덕트의 재질(유해물질 사용구분과 덕트재질)

표 2-29. 유해물질 사용구분과 덕트재질

사 용 구 분	재 질
유기용제	아연도금 강판
강산과 염소계 용제	스테인레스스틸, 강판
알 칼 리	강 판
주물사, 고온가스	흑피강판
전리방사선	중질콘크리트 덕트

3) 덕트의 굵기 (함석판, 강판의 경우)

표 2-30. 덕트의 굵기

덕트의 단면 형태	크 기(cm)	판 두께(mm)
원 형	지름 20 이하	0.6
	20~40	0.8
	45~75	1.2
	75이상	1.5
각 형	긴변이 45이하	0.8
	45~120	1.2
	120이상	1.5

4) 가지덕트의 연결요령

- 주덕트와 가지덕트를 연결할 때에는 확대관 또는 축소관을 이용하여 엇갈리게 연결시키고 가지덕트와 가지덕트 사이의 거리는 덕트지름의 6배이상 되도록 해야 함.

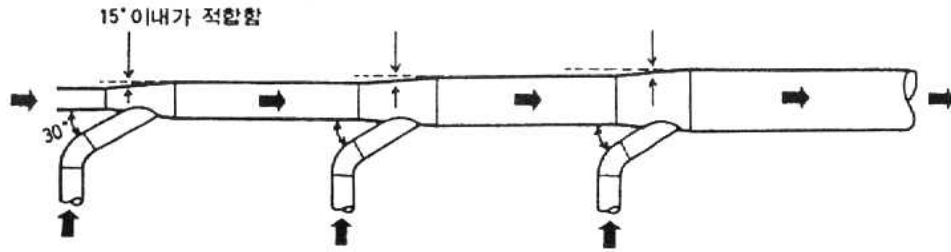
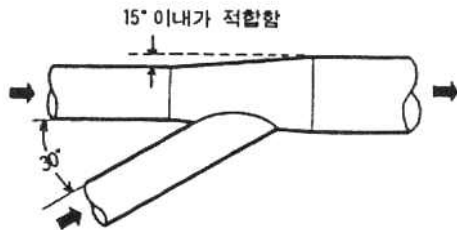
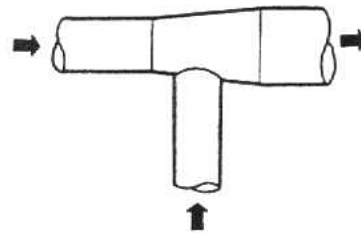


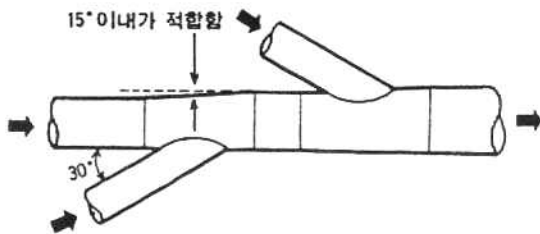
그림 2-64. 가지닥트의 연결요령



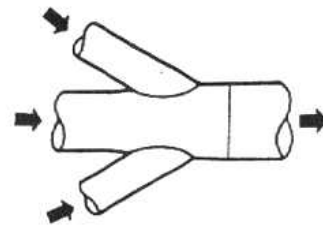
(양 호)



(불 량)



(양 호)



(불 량)

그림 2-65. 가지닥트의 연결요령

5) 곡관의 연결요령

- 곡관의 구부러지는 경사는 가능한 완만하게 하도록 하고 구부러지는 관의 중심선의 반지름이 덕트직경의 2.5배 이상이 되도록 해야 함

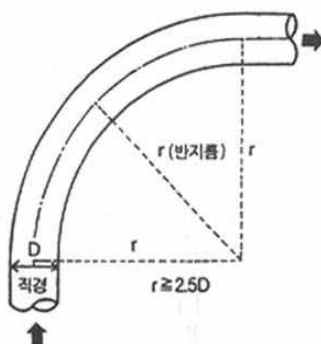


그림 2-66. 곡관의 연결요령

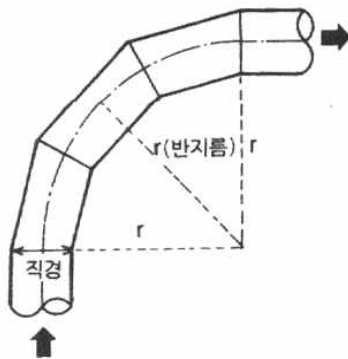
6) 새우등 곡관 사용의 경우

- 덕트직경이 15cm미만은

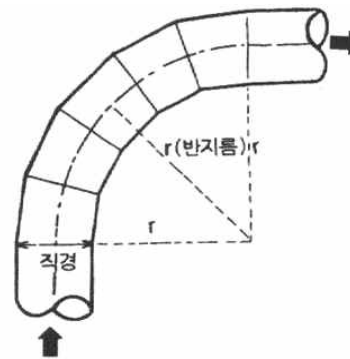
- 덕트직경이 15cm이상인 경우

곡관 3개 이상

곡관 5개이상 사용



(덕트직경이 15cm미만)



(덕트직경이 15cm이상)

그림 2-67. 새우등 곡관 사용의 경우

7) 덕트에서의 청소구 설치

- 덕트를 오래기간 사용하면 덕트내부에 유해물질이 퇴적되므로 청소구를 설치하여 정기적으로 청소하도록 함

표 2-68. 유해물질의 덕트내 반송속도

유해물질 발생형태	유해물질 종류	반송속도(m/s)
증기·가스·연기	모든 증기, 가스 및 연기	5.0 ~ 10.0
흙	아연흙, 산화알루미늄 흙, 용접흙 등	10.0 ~ 12.5
미세하고 가벼운 분진	미세한 먼분진, 미세한 목분진, 종이분진 등	12.5 ~ 15.0
건조한 분진이나 분말	고무분진, 먼분진, 가죽분진, 동물털 분진 등	15.0 ~ 20.0
일반 산업분진	그라인더 분진, 일반적인 금속분말분진, 모직물분진, 실리카분진, 주물분진, 석면분진 등	17.5 ~ 20.0
무거운 분진	젖은 톱밥분진, 입자가 혼입된 금속분진, 샌드 블라스트분진, 주철보링분진, 납분진 등	20.0 ~ 22.5
무겁고 습한 분진	습한 시멘트분진, 작은 칩이 혼입된 납분진, 석면 덩어리 등	22.5이상

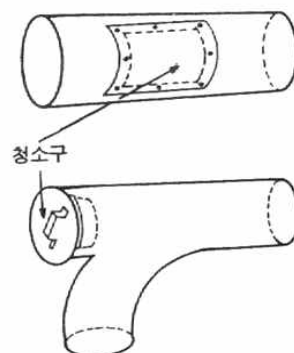


그림 2-69. 덕트에서의 청소구 설치

표 2-32. 유해물질의 발생형태별 공기정화방식

유해물질 발생형태			공 기 정 화 방 식	
분진	분진	5 미만	여과방식, 전기제진방식	분진지름 : 중량법으로 측정 한 입경분포에서 최대빈도를 나타내는 입자지름
	지름	5 ~ 20	습식정화방식, 여과방식, 전기제진방식	
	(μm)	20 이상	습식정화방식, 여과방식, 관성방식, 원심력방식 등	
흄			여과방식, 습식정화방식, 전기제진방식 등	
미스트·증기·가스			습식정화방식, 흡수방식, 흡착방식, 촉매산화방식, 전기제진방식 등	

(3) 용접 불뚱 흡입 장치 개발

가. 개발 진행 4단계

- 1단계 : 유입되는 큰입자(용접불뚱, 흄, 가스)의 오염물질을 1차 걸러주고, 가스의 흐름을 일정하게 분사 (ELIMINATOR, DEMISTER)
- 2단계 : 유입되는 분진을 이온화(전기적 성질) (IONIZER)
- 3단계 : 이온화 된 분진을 포집 (CELL)
- 4단계 : 제거된 유해물질의 재비산을 방지(AFTER FILTER)
- OPTION : 활성탄 탈취 FILTER인 경우 불쾌한 악취까지 완전히 제거

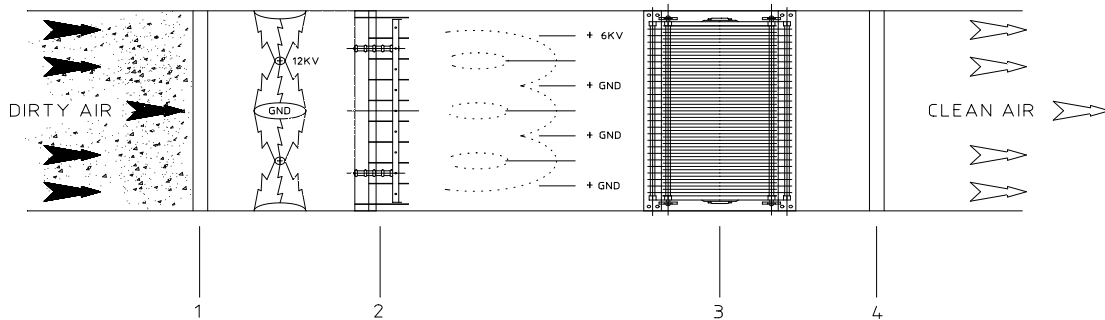


그림 2-70. 용접 불뚱 포집 장치 개념도

나. 용접 불뚱 흡입장치 사양

- 용 량 : $13\text{m}^3/\text{min} \sim 25\text{m}^3/\text{min}$ (1Set 당)
- 효 율 : 95% 이상
- 규 격 : CELL IONIZER

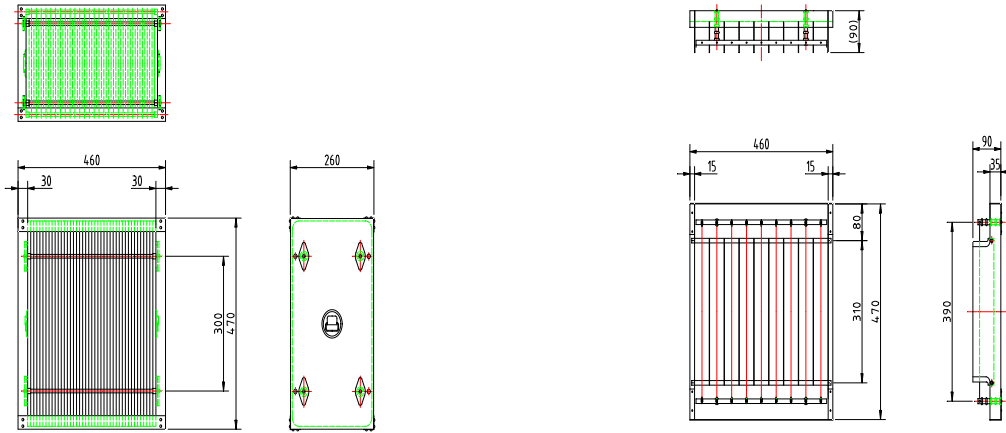


그림 2-71. 용접 흡입장치 기본 설계도

- 전 원 : 220V / 60Hz / 0.5A
- 정압 손실 : 20mmAq
- 처리 풍속 : 1m/sec ~ 2.0m/sec
- Power Pack : DC 6Kv/12Kv (소비전력 : 60 ~ 80W/EA, 2.5A/EA)

다. 용접 불티 흡입장치의 구성과 특성

- CASE : 집진실로써 용량에 따라 1.6t ~ 3.2t의 강판으로 제작되며, 열처리 도장으로 마감 처리
- PRE FILTER : Al' Mesh로 구성되며, 집진실 내부로 인입되는 오염원의 흐름을 일정하게 분사
- AFTER FILTER : Al' Mesh로 구성되며, 집진 된 오염물의 재비산 되는 것을 방지하며, 불쾌한 악취 (용접 가스) 등을 제거하기 위해 Carbon Filter를 장착
- POWER PACK : CASE의 외부에 설치되어 있고, 운전 시 용이하도록 Lamp를 설치하였으며, CELL과 IONIZER의 High Voltage Insulator에 DC 6Kv/12Kv의 전원을 공급
- IONIZER :

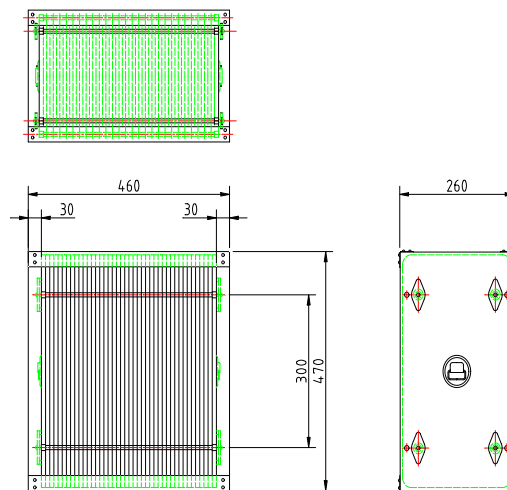


그림 2-72. IONIZER

- 1Set의 처리 용량은 12m³/min ~ 25m³/min
- 9개의 T/S Wire와 10개의 집진 Plate로 구성
- 집진 Plate는 2t의 Al'으로 됨
- T/S Wire의 연결은 Sus Spring으로 되어 있어 점검이 간편
- 1Set 당 4개의 P.P Insulator로 구성되어 있음

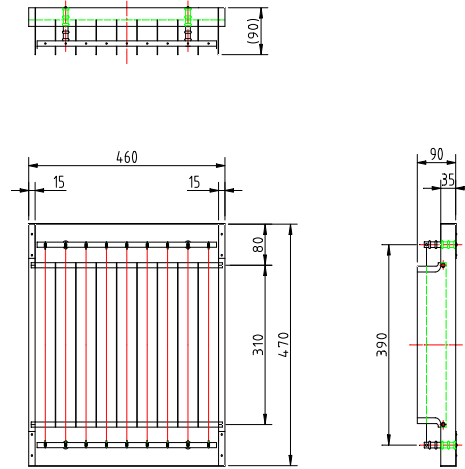


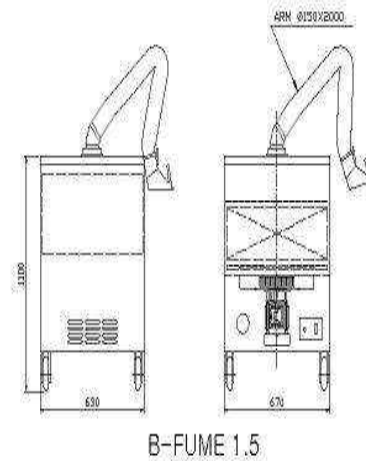
그림 2-73. CELL

- CELL의 집진 용량은 12m³/min ~ 25m³/min이며, 집진 면적은 12.22m² ("+", "-" Plate)
- 1Set 당 8개의 P.P Insulator로 구성
- CELL과 CELL의 연결은 Sus Spring으로 연결
- 집진 Plate는 Al'으로 되어있고, 0.5t
- 전원은 DC 5,000V ~ 6,000V

(4) 제품 비교 성능 분석



- 모델명 : CAFU04
- 제조사 : 청우씨엔티(한국)



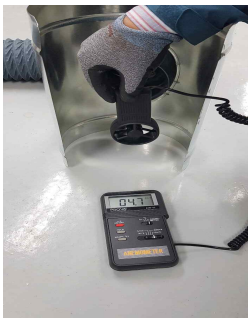
- 모델명 :
- 제조사 : 송현엘앤씨(주)

그림 2-74. 기존 제품 과 개발 예정 제품 비교 분석

표 2-33. 기존 제품과 개발 제품 사양 비교

Product name	CAFU04	송현 개발 제품
전원(V)	220V	220V
HOOD TYPE	Dry and without oil, 3-4 bar	사각형 모양 후드(Ø250)DUCT 직접 연결
적용성	Indoor	indoor/ outdoor
출력	2.23	Carbon steel
풍량(m3/min)	17 m/s	21 m/s
덕트 길이 (mm)	160	220

표 2-34. 시제품 제작 성능 분석

			
본체 및 후드결합	후드 입구 풍속 26.4 km/hr	전기집진+compressed air : 31 km/hr	후드입구 모양 개선 시 풍속 영향

권 원 생 령

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2019.10.28
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1011519)
출 원 번 호 10-2019-0134759 (접수번호 1-1-2019-1101546-91)
출원인 명칭 송현엔지니어링 주식회사(1-2015-053406-1)
대 리 연 성 명 이오식(9-2005-001186-8)
발 명 자 성 명 권영선 김병직
발 명의 명 칭 공사 현장용 휴대용 필터 포집 장치

특 허 청 장

<< 연 내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행사항은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 통보된 납입일수중에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(가판코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(검정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허위(patent.go.kr) 접속 > 관원자식다문서도 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보장이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안나 마드리드 제도(상표))를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 - <http://www.kipo.go.kr/특허대영-4C7/마드리드>
※ 우선권 인정기간 - 특허·실용신안은 12개월, 상표(디자인)은 6개월 이내
※ 대외특허상표권의 선출원을 기초로 우리나라에 우선주장출원 시, 선출원일 이후 6개월부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특고원하기서(PTO/58/200)를 제출하거나 우리나라에 우선권 주장서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2019-0000000, 상표출원 40-2019-0000000
7. 중언원이 직무수행과정에서 개발한 발명(사용자(기업))가 명확하게 공개하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록요구에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 통보된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

표 2-35 사이클론 집진 장치에 대한 성능표

사이클론 집진 장치 (개발1)																			
구조 및 원리	전기식집진기 보다 우수한 모터식 펜을 (싸이클론) 제작 하여 강력한 흡입력을 발휘 모터는 3마력으로 추가로 컨트롤러를 제작하여 부착 필터 망을 개선 (현재 개발 중) 활성탄 및 흡 전용 첨착액을 필터에 사용 모터의 싸이클론 펜 방식의 흡입으로 무거운 불티는 아래쪽 400*650 1차포집 미세분진과 가스 2차 필터 400파이 의 교체형 필터 에서 제거및 2차포집																		
구성 과 몸체	구성- 모터 와 펜, 집진 필터, 이동식 모터와 필터 거취대																		
제원	<table border="1"> <tr> <td>모터 전력</td><td>150W</td></tr> <tr> <td>전 기</td><td>200V/3HP</td></tr> <tr> <td>RPM</td><td>3450/최대 (RPM 조절 가능) 컨트롤러 별도 부착</td></tr> <tr> <td>팬지름</td><td>400mm</td></tr> <tr> <td>입구</td><td>100mm</td></tr> <tr> <td>흡입구</td><td>2개 각 100mm</td></tr> <tr> <td>공기흐름</td><td>750CFM</td></tr> <tr> <td>크기</td><td>1050*770*1780</td></tr> <tr> <td>무게</td><td>45kg</td></tr> </table>	모터 전력	150W	전 기	200V/3HP	RPM	3450/최대 (RPM 조절 가능) 컨트롤러 별도 부착	팬지름	400mm	입구	100mm	흡입구	2개 각 100mm	공기흐름	750CFM	크기	1050*770*1780	무게	45kg
모터 전력	150W																		
전 기	200V/3HP																		
RPM	3450/최대 (RPM 조절 가능) 컨트롤러 별도 부착																		
팬지름	400mm																		
입구	100mm																		
흡입구	2개 각 100mm																		
공기흐름	750CFM																		
크기	1050*770*1780																		
무게	45kg																		

(5) 후드 크기 및 모양에 따른 흡입 상태에 대한 실험

가. 실험장치 개요 :

- 후드의 폭 : 700mm
- 용접 가스 등 오염물질 발생 위치: 작업대 상부 중앙의 100mm위
- 두 후두간의 거리 : 700mm

나. 흡입구 모양 및 사이즈 변경

표 2-36. 흡입구 모양 및 사이즈 변화에 따른 실험 조건

실험케이스	Hood(사각형)		Hood(타원형)	
Case 1	12m/s	15m/s	17	21
Case 2	0.5	0.23	0.75	0.34

- 포착효율 : 급기Fan후단과 배기Fan후단에서 농도를 측정하여 효율을 평가
- 온도측정 : 실험조건을 단순화하기 위하여 되도록이면 입출구의 온도 차이 가없도록 입구에 500mm 간격으로 3개소, 출구 에 500mm 간격으로 3개소에서 측정 및 외기온도 측정

표 3-37. 렌탈 제원

모델	작업 높이(m)	발판 높이(m)	장비크기(m) (길이X폭X높이)	작업대크기		적재중량 (kg)	장비중량 (kg)	동력	타입	비고
				기본(m)	확장(m)					
HL-40	6	4	1.25X0.78X1.55	0.78X1.25	확장안됨	200	750	배터리	1인용	
SJ-3015	6.4	4.6	1.65X0.77X1.98	0.70X1.60	0.70X2.50	227	998	배터리	씨저	
SJ-3219	7.6	5.8	1.65X0.81X1.99	0.70X1.60	0.70X2.50	227	1,070	배터리	씨저	
SJ-3220	8.0	6.2	2.26X0.81X2.02	0.70X2.10	0.70X3.00	363	1,644	배터리	씨저	
SJ-4626	9.7	7.9	2.26X1.17X2.29	1.10X2.10	1.10X3.00	386	1,956	배터리	씨저	
SJ-4832	11.6	9.8	2.32X1.22X2.35	1.10X2.10	1.10X3.00	386	2,536	배터리	씨저	
SJ-6832	11.6	9.8	2.52X1.73X2.52	1.50X2.10	1.50X3.00	454	2,576	배터리	씨저	
GS-1930	7.6	5.8	1.83X0.76X2	0.70X1.60	0.70X2.50	454	1,179	배터리	씨저	
GS-2032	8.0	6.2	2.26X0.81X2.02	0.70X2.10	0.70X3.00	363	1,547	배터리	씨저	
GS-2646	9.7	7.9	2.26X1.17X2.29	1.10X2.10	1.10X3.00	386	2,132	배터리	씨저	
JLG-3969	13.7	11.9	2.70X1.80X2.70	1.55X2.70	1.55X3.90	340	3,992	배터리	씨저	
JLG-4069	14	12.2	3.1X1.75X2.81	1.65X2.97	1.65X3.90	363	4,790	배터리	씨저	
SZ-090	11.0	9.0	3.50X2.00X2.25	1.90X3.50	확장안됨	500	4,850	디젤	Z형	
Z-45	15.7	13.9	5.50X2.20X2.10	0.76X1.82	확장안됨	227	6,287	디젤	굴절	
AWP-40	11	9	1.34X0.74X1.98	0.66X0.68	확장안됨	159	352	AC220V	1인용	



표 2-38. 제원 비교표

구분	개발제품(자사)	경쟁제품 A사	경쟁제품 B사
전원	삼상 220/380V	단상 220V	단상 220V
조절방식	인버터 방식	조절 없음	조절 없음
출력	0.75kw	0.75kw	0.75kw
정압	160mmAq	160mmAq	160mmAq
풍량	40m ² /min	12m ² /min	24m ² /min
RPM	0~3200rpm/min	1800rpm/min	1800rpm/min
필터방식	헤 파필터, 콜게이트활성탄 필터	헤 파필터	헤 파필터, 벌집모양활성탄 필터
사이즈	670(W)x670(W)x860(H) mm (62kg)	1050*770*1780 (65kg)	1050*770*1780

- 건설현장 적용 2차 제작송풍기의 소형화를 충족하기 위한 3가지 개선사항
 - 포집기를 소형화하며 포집성능을 향상시키기 위한 원뿔형 흡입구조를 통해 유속기능을 향상시킴



그림 2-75. 포집기 필터 및 내부사진

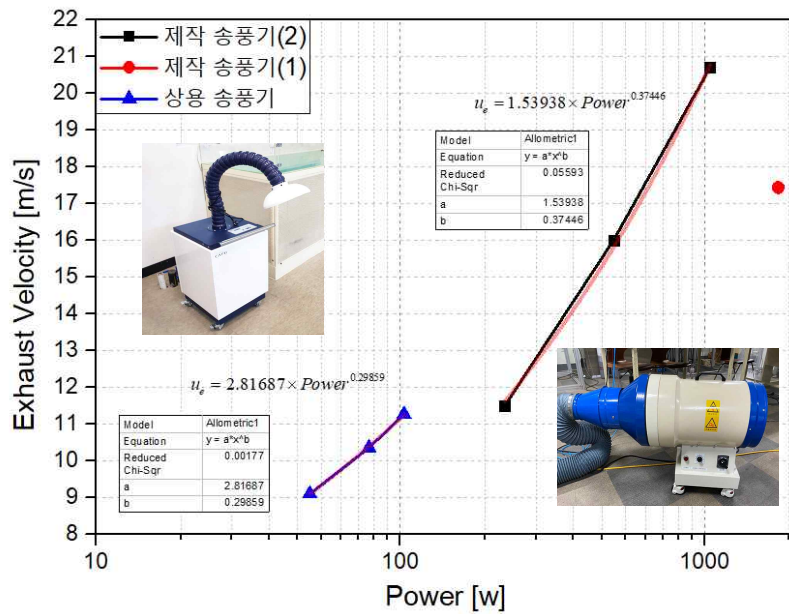


그림 2-76. 송풍기 성능 비교

표 2-39. 송풍기 성능 비교

Test Case	송풍기	Power [w]	Exhaust Velocity [m/s]
1	상용 송풍기	220.5	11.49
		503	16.00
		1043	20.70
2	제작 송풍기 (1) (싸이클론)	1747	17.43
3	제작 송풍기 (2)	50.5	9.10
		79	10.35
		103	11.26

- 콜게이트 필터 사용으로 포집성능 향상

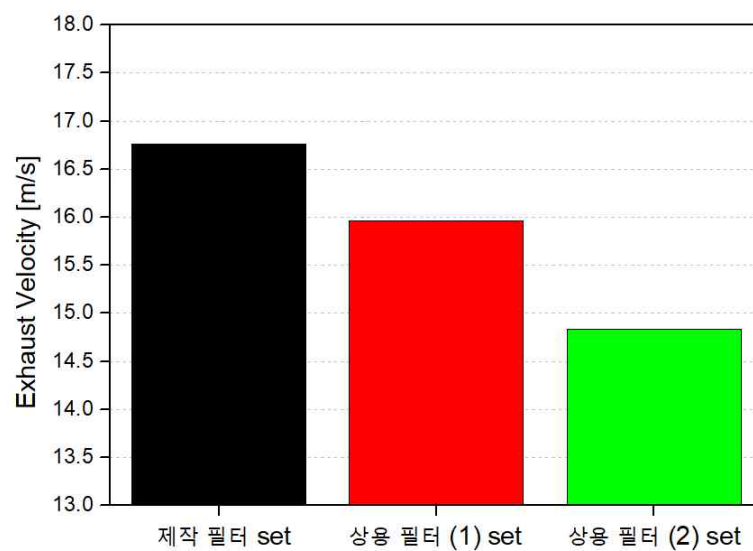


그림 2-77. 필터 비교 결과

표 2-40. 필터 비교 결과

Test Case	필터	필터 총 두께 [mm]	Exhaust Velocity [m/s]	Average Efficiency [% (m/s)]
제작 필터 SET	헤 파 필터+ 프리 필터 + 콜 게이트 필터 1개	59.8	16.76	81.82
상용 필터 (1) SET	헤 파 필터+ 카본필터(위닉 스)1개	38	15.96	77.84
상용 필터 (2) SET	헤 파 필터+ 카본필터(캐리 어)1개	38	14.84	72.34

- 제작 헤 파 필터 사용으로 포집성능 향상

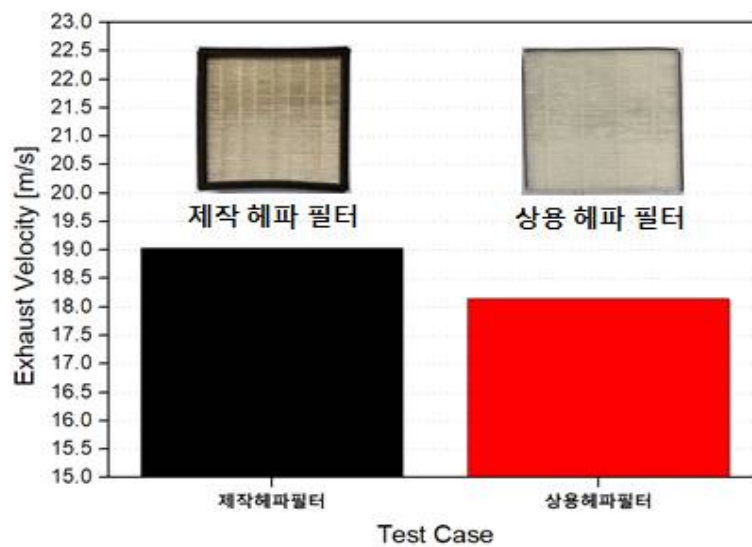


그림 2-78. 필터 비교 결과

표 2-41. 필터 비교 결과

Test Case	필터	필터 총 두께 [mm]	Exhaust Velocity [m/s]	Average Efficiency [% (m/s)]
제작 필터	제작 헤 파 필터	46	19.04	92.82
상용 필터	상용 헤 파 필터	28	18.14	88.47

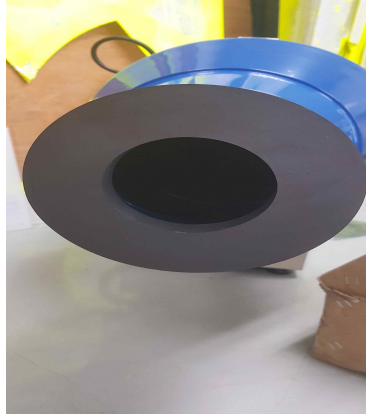
(6) 유해가스 탈취율

(28115) 충북 청주시 청원구 오창읍 양창3길 21 Tel : 043-711-8875 Fax : 043-711-8804 TEST REPORT 의뢰자 : 송원엘앤씨 주식회사 주 소 : 경기도 화성시 동탄순환대로 823(영천동) 803 호(영천동,에이텍시티) 접수번호 : M271-20-16191 접수일자 : 2020-10-22 발급일자 : 2020-11-04 종도 : 중질관리용 쪽번호 : 1/2 의회자제시료명 : 필터 탈취성능평가 SH-10 의회하신 시료에 대한 시험결과와 아래와 같습니다. ■ 시험결과 ■ - 다음장 참조 - FITI 시험연구원장 ※ 문서 확인 번호 : RBC6-72CQ-967K ※ (홈페이지 접속 후 "상적서확인" 메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 번호 여부를 확인할 수 있습니다.) E-DOCUMENT SERVICE 이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체내용에 대한 불합을 보증하지 않으며, 사용자는 의뢰자가 제시한 사항입니다. 이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 간접, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 무단의 사용을 금합니다. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.	(28115) 충북 청주시 청원구 오창읍 양창3길 21 Tel : 043-711-8875 Fax : 043-711-8804 접수번호 : M271-20-16191 쪽번호 : 2/2 01. 탈취성능시험 가스검지관법 (FITI 시험지침서 FTM-5-2 : 2004) : 탈취율, % <table> <tr> <th></th><th>#1</th></tr> <tr> <td>암모니아</td><td>93.3</td></tr> <tr> <td>아세트산</td><td>94.3</td></tr> <tr> <td>톨루엔</td><td>29.7</td></tr> <tr> <td>아세트알데하이드</td><td>19.9</td></tr> <tr> <td>포름알데하이드</td><td>31.0</td></tr> </table> 주) · 시 료 면 : 100 cm² (10 cm × 10 cm) · 가 스 액 : 5 L · 가스배내 가스량 : 3 L · 측정시간 : 2 h 경과 후 · 초기농도 : 암모니아(100 ppm), 아세트산(50 ppm), 톨루엔(20 ppm), 아세트알데하이드(14 ppm), 포름알데하이드(15 ppm) · 탈취율(%) = ((Cb - Cs)/Cb) × 100 · Cb : Blank, 2 h 경과 후 시험가스백 안에 남아 있는 시험가스의 농도 · Cs : 시료, 2 h 경과 후 시험가스백 안에 남아 있는 시험가스의 농도 ** 시험 결과 기록 원료 ** - 시료사진 - E-DOCUMENT SERVICE 이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체내용에 대한 불합을 보증하지 않으며, 사용자는 의뢰자가 제시한 사항입니다. 이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 간접, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 무단의 사용을 금합니다. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.		#1	암모니아	93.3	아세트산	94.3	톨루엔	29.7	아세트알데하이드	19.9	포름알데하이드	31.0
	#1												
암모니아	93.3												
아세트산	94.3												
톨루엔	29.7												
아세트알데하이드	19.9												
포름알데하이드	31.0												
(28115) 충북 청주시 청원구 오창읍 양창3길 21 Tel : 043-711-8875 Fax : 043-711-8804 TEST REPORT 의뢰자 : 송원엘앤씨 주식회사 주 소 : 경기도 화성시 동탄순환대로 823(영천동) 803 호(영천동,에이텍시티) 접수번호 : M271-20-16195 접수일자 : 2020-10-22 발급일자 : 2020-11-04 종도 : 중질관리용 쪽번호 : 1/2 의회자제시료명 : 필터 탈취성능평가 SH-40 의회하신 시료에 대한 시험결과와 아래와 같습니다. ■ 시험결과 ■ - 다음장 참조 - FITI 시험연구원장 ※ 문서 확인 번호 : QH2P-F3KK-DCP2 ※ (홈페이지 접속 후 "상적서확인" 메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 번호 여부를 확인할 수 있습니다.) E-DOCUMENT SERVICE 이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체내용에 대한 불합을 보증하지 않으며, 사용자는 의뢰자가 제시한 사항입니다. 이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 간접, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 무단의 사용을 금합니다. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.	(28115) 충북 청주시 청원구 오창읍 양창3길 21 Tel : 043-711-8875 Fax : 043-711-8804 접수번호 : M271-20-16195 쪽번호 : 2/2 01. 탈취성능시험 가스검지관법 (FITI 시험지침서 FTM-5-2 : 2004) : 탈취율, % <table> <tr> <th></th><th>#1</th></tr> <tr> <td>암모니아</td><td>99.8 초과</td></tr> <tr> <td>아세트산</td><td>99.9 초과</td></tr> <tr> <td>톨루엔(TOLUENE)</td><td>97.5 초과</td></tr> <tr> <td>아세트알데하이드</td><td>85.1</td></tr> <tr> <td>포름알데하이드</td><td>91.3</td></tr> </table> 주) · 시 료 면 : 100 cm² (10 cm × 10 cm) · 가 스 액 : 5 L · 가스배내 가스량 : 3 L · 측정시간 : 2 h 경과 후 · 초기농도 : 암모니아(100 ppm), 아세트산(50 ppm), 톨루엔(20 ppm), 아세트알데하이드(14 ppm), 포름알데하이드(15 ppm) · 탈취율(%) = ((Cb - Cs)/Cb) × 100 · Cb : Blank, 2 h 경과 후 시험가스백 안에 남아 있는 시험가스의 농도 · Cs : 시료, 2 h 경과 후 시험가스백 안에 남아 있는 시험가스의 농도 ** 시험 결과 기록 원료 ** - 시료사진 - E-DOCUMENT SERVICE 이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체내용에 대한 불합을 보증하지 않으며, 사용자는 의뢰자가 제시한 사항입니다. 이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 간접, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 무단의 사용을 금합니다. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.		#1	암모니아	99.8 초과	아세트산	99.9 초과	톨루엔(TOLUENE)	97.5 초과	아세트알데하이드	85.1	포름알데하이드	91.3
	#1												
암모니아	99.8 초과												
아세트산	99.9 초과												
톨루엔(TOLUENE)	97.5 초과												
아세트알데하이드	85.1												
포름알데하이드	91.3												

그림 2-79. 탈취 성능 시험 결과

(7) 자력에 따른 포집 능력 분석

표 2-42. 네오디뮴, 페라이트 자석의 특징

네오디뮴(Nd) 자석,		<table><tr><th colspan="2">각종모터, 솔렘형스피커, 이어폰, 의료기기</th></tr><tr><td>사용온도</td><td>~150℃ (curie max: 310℃)</td></tr><tr><td>자속밀도 (Tesla)</td><td>매우높음 >1.42</td></tr><tr><td>보자력 (KA/m)</td><td>bHC >859 iHC >955</td></tr><tr><td>기계강도 (HV)</td><td>비커스 500~600</td></tr><tr><td>가 격</td><td>Midium</td></tr></table> 네오디뮴(Nd-Fe-B)자석 국민자석(B.H.Tech) 현존하는 재질 중에서 자력이 가장 강하며, 작은 사이즈로 큰 자력을 발휘할 수 있습니다. 매우 쉽게 녹스는 것이 결점입니다. 코발트 자석과 함께 희토류 자석이라고 부릅니다.	각종모터, 솔렘형스피커, 이어폰, 의료기기		사용온도	~150℃ (curie max: 310℃)	자속밀도 (Tesla)	매우높음 >1.42	보자력 (KA/m)	bHC >859 iHC >955	기계강도 (HV)	비커스 500~600	가 격	Midium
각종모터, 솔렘형스피커, 이어폰, 의료기기														
사용온도	~150℃ (curie max: 310℃)													
자속밀도 (Tesla)	매우높음 >1.42													
보자력 (KA/m)	bHC >859 iHC >955													
기계강도 (HV)	비커스 500~600													
가 격	Midium													
페라이트 (Ferrite)자석		<table><tr><th colspan="2">소형DC, 스피커, 원구, 차량용모터류</th></tr><tr><td>사용온도</td><td>~400℃ (curie max: 450℃)</td></tr><tr><td>자속밀도 (Tesla)</td><td>낮음 >0.385</td></tr><tr><td>보자력 (KA/m)</td><td>bHC >230 iHC >230</td></tr><tr><td>기계강도 (HV)</td><td>비커스 480~580</td></tr><tr><td>가 격</td><td>Chip</td></tr></table> 페라이트(Ferrite)자석 자력은 약하지만 보자력이 비교적 높기 때문에 자력이 수비게 줄지 않는 소재입니다. 기계적 강도가 낮아 매우 쉽게 깨지기 때문에 취급시에 주의가 필요합니다.	소형DC, 스피커, 원구, 차량용모터류		사용온도	~400℃ (curie max: 450℃)	자속밀도 (Tesla)	낮음 >0.385	보자력 (KA/m)	bHC >230 iHC >230	기계강도 (HV)	비커스 480~580	가 격	Chip
소형DC, 스피커, 원구, 차량용모터류														
사용온도	~400℃ (curie max: 450℃)													
자속밀도 (Tesla)	낮음 >0.385													
보자력 (KA/m)	bHC >230 iHC >230													
기계강도 (HV)	비커스 480~580													
가 격	Chip													

- 네오디뮴 본드자석은 소결법으로 제조하는 네오디뮴자석과 조성이 비슷하지만, 자석분말을 플라스틱 수지나 에폭시계 수지와 혼합하여 성형고형화한 자석
- 자분의 양은 중량환산으로 약 90% , 체적환산으로 60~70%
- 자기적 특성은 일반적인 네오디뮴 자석에 비하면, Br은 1/2정도이고 (BH)max로 1/4~1/8로 자기특성은 낮아짐
- 재료자체의 물리특성은 소결자석과 거의 동등하지만, 수지의 내열성에 좌우되므로 사용가능 온도는 100도씨 이하
- 방청은 에폭시 등의 수지로 코팅하는 방법이 일반적

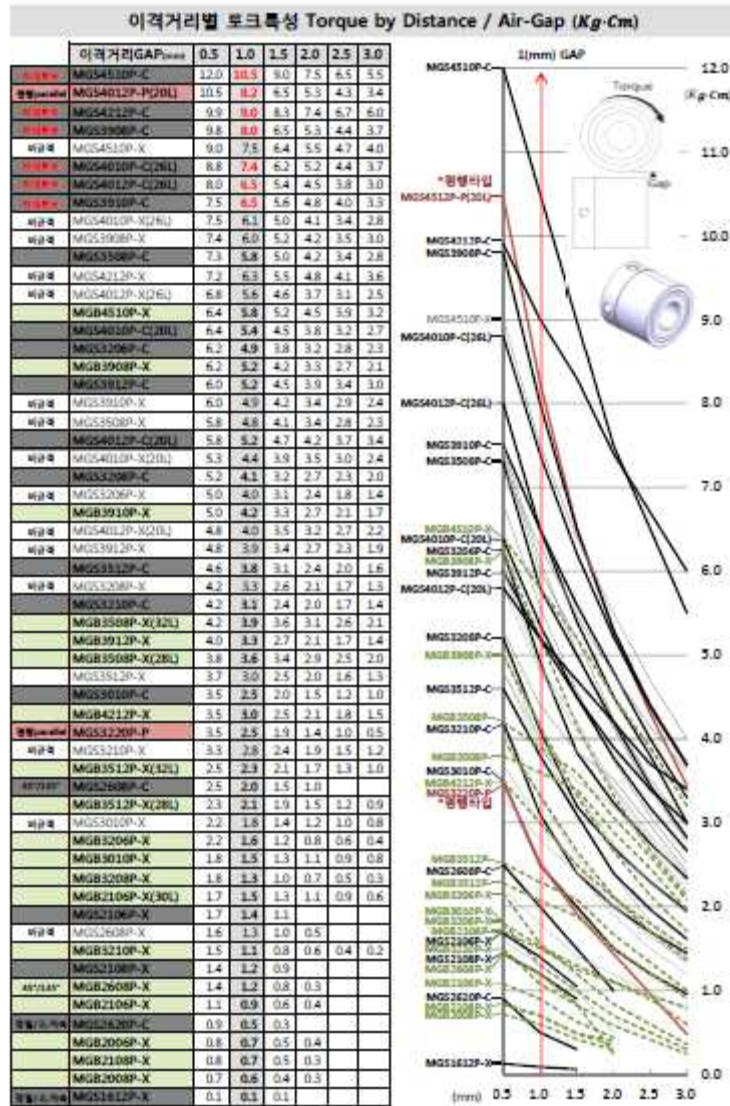


그림 2-80. 자석 이격거리별 토크 특성

(8) 결과요약

- 건설현장 적용을 위한 볼티포집 및 유해가스 포집 효율을 높이기 위해 원뿔형 흡입구조 적용으로 소형화하며 성능향상
- 콜게이트 활성탄 필터 탑재로 볼티포집 장치의 효율성(풍량확보)향상
- 본드계, 본디드, 사출자석 등 자석의 종류 중 네오디뮴 자석이 실험결과 볼티포집을 위한 가장 적합한 자석으로 포집성능을 향상시킴

* 건설현장에서 적용가능한 사이즈로 소형화하며 포집 성능을 향상시키기 위한 3가지의 개선사항 : 원뿔형 흡입구조, 콜게이트 활성탄 필터 사용, 네오디뮴 자석 사용을 통해 기존의 용접 가스 포집기 및 싸이클론 포집기 이상의 성능으로 용접볼티 포집기능을 향상시켜 건설현장에 적용 가능하도록 설계함

2-8. 포집기 내부 유동 현상 해석 및 볼티 흡입 조건 분석

(1) 이론적 접근 방법

- 아래의 그림은 용접 과정에서 나타나는 볼티 입자의 총 체적을 나타낸 개략도로 그림에서 보듯이 용접 시간(Δt)과 electrode에 공급되는 전력(P_e)에 따라서 base-metal에 용융된 질량($\Delta m_{b,p}$)을 측정하면 식 (2.31)과 같이 볼티 입자의 총 질량($\Delta m_{p,total}$)을 산출할 수 있음. 하지만, electrode 내부의 core는 Iron($\rho_{Iron} = 7,860 \text{ kg/m}^3$)그리고 외부의 shield는 Sodium Silicate($\rho_{Sodium Silicate} = 2,400 \text{ kg/m}^3$)등이 혼합되어 있기 때문에 볼티 입자를 구성하고 있는 재료의 혼합비가 주어진 경우에 한해서 $\Delta V_i = \Delta m_i / \rho_i$ 관계로 입자 한 개의 체적(ΔV_i)산출이 가능함.

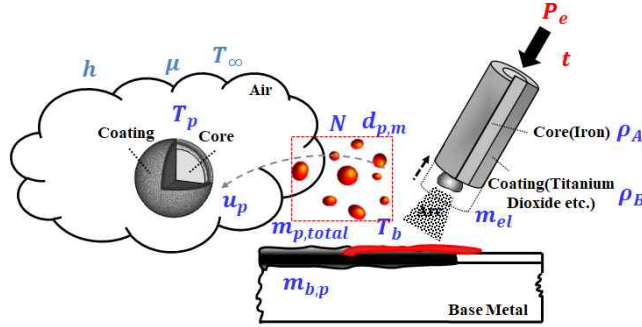


그림 2-81. Schematic Diagram of Welding Spatters by the SMAW and Assumptions for energy balance of the Particles and the Base Metal.

$$\Delta m_{p,total} = \Delta m_{el} - \Delta m_{b,p} \quad (2.31)$$

- 여기서 Δm_{el} , $\Delta m_{b,p}$ 그리고 $\Delta m_{p,total}$ 는 각각 electrode의 질량, base-metal에 부착된 solidified weld metal의 질량 그리고 비산된 입자의 총 질량을 의미함. 기존 연구사례에 의하면 볼티의 입자가 가연물에 착화된 초기 온도를 최대값으로 하여 정상상태 조건을 가정하면 식 (2.32)과 같이 평균 입자의 온도를 예측한 바 있음 [2.11]

$$T_{p,s} = T_{\infty} + \frac{P_e - \sigma \epsilon A_{b,s} (T_{s,b}^4 - T_{sur}^4)}{N h A_{p,s}} \quad (2.32)$$

- 여기서 $T_{p,s}$, T_{∞} , T_{sur} , P_e , σ , ϵ , $A_{b,s}$, $T_{b,s}$, N , h 그리고 $A_{p,s}$ 는 평균 입자의 온도, 주위 온도 (surrounding temperature), 표면온도(surface temperature), 전력(electrical power, P_e), 스테판 볼츠만 상수, 방사율, 모재 표면적(surface area for base metal), 모재 온도 (surface temperature for base metal), 밀도 수(The number of particle mean diameter), 대류 열전달계수 그리고 입자의 겉넓이를 각각 의미 함. 입자의 평균 크기 와 대류 열전달계수 h 는 식 (2.33) ~ (2.34)와 같음 [2.11].

$$N = \frac{6V_{p,total}}{\pi d_{p,m}^3} \quad (2.33)$$

$$Nu_D = \frac{h d_{p,m}}{k} = 2 + 0.6 Re_D^{0.5} Pr^{1/3} \quad (2.34)$$

- 여기서 $V_{p,total}$, $d_{p,m}$, Nu_D , k , Re 그리고 Pr 는 입자의 총 체적, 평균 입자 직경(means diameter of particles), 누셀 수(Nusselt number), 열전도계수(thermal conductivity), 레이놀즈 수(Reynolds number, $Re_D = \rho_{up,m} d_{p,m} / \mu$) 그리고 프란틀 수(Prandtl number, $Pr = C_p \mu / k$)를 의미함. 따라서, $V_{p,total}$ 과 $d_{p,m}$ 그리고 $u_{p,m}$ 가 주어진 경우 식 (2.33)와 (2.34)에 의해서 식 (2.32)의 온도분포 예측이 가능함. 하지만, 용접 시간과 전력의 크기에 따라서 입자의 총 체적과 평균크기 그리고 비산 속도가 달라지기 때문에 식 (2.32)과 같은 함수 관계가 종결되어야 함[2.11-2.12].

$$N, d_m, h \sim f(P_e, \Delta t) \quad (2.35)$$

(2) 포집기 내부 유동 현상 및 흡입 조건 분석을 위한 실험조건

- 용접 과정에서 발생하는 불티의 흡입 조건을 분석하기 위해서 용접시간과 공급 열량 변화에 따른 실험조건을 표 2-43과 같이 선정하였으며, 열화상 카메라와 초고속 카메라에 의해서 불티의 표면 온도와 비산 속도를 산출함

표 2-43. Experiment Conditions for the Effects of Thermal Characteristics of Welding Spatters on the Welding Time and Supply Power

Test Number	Welding time, Δt [s]	Supply Power, P_e [W]
Case #1	30	984
Case #2	50	
Case #3	70	
Case #4	30	1337.3
Case #5	50	
Case #6	70	
Case #7	30	1802.0
Case #8	50	
Case #9	70	
Case #10	30	2067.5
Case #11	50	
Case #12	70	

Contact Angle: 90 °, Arc Length: 5 mm, base metal material: Iron
Electrode diameter, d_{el} : 4.094 mm, Material properties of Electrode: Table 1.

(3) 실험 결과 분석

- 그림 2-82은 용접 시간(Δt)이 30s, 50s 그리고 70s 각각의 경우 electrode에 공급되는 전력의 크기(P_e) 변화에 따라서 electrode의 길이가 감소되는 속도(u_{rate})를 측정한 결과임. P_e 가 증가함에 따라서 electrode가 base metal에 용접되는 양($\Delta m_{b,p}$)이 증가하기 때문에 u_{rate} 이 감소되는 속도가 비례하여 증가하였으며, P_e 가 동일한 경우 Δt 와 관계없이 u_{rate} 은 일정하여 식 (2.35)와 같은 관계식과 $\pm 5\%$ 범위에서 측정값이 일치하는 것으로 나타남

$$u_{rate} = a_1 + b \times P_e \quad (2.36)$$

- 여기서 a_1 와 b_1 은 실험상수로 base metal과 electrode가 표 2-43과 같고 전력의 크기 (984 ~ 2067) W 이상인 조건에서 $a_1=1.997 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ 와 $b_1=0.7011 \text{W-mm/s}$ 의 값이 유효한 것으로 판단됨.

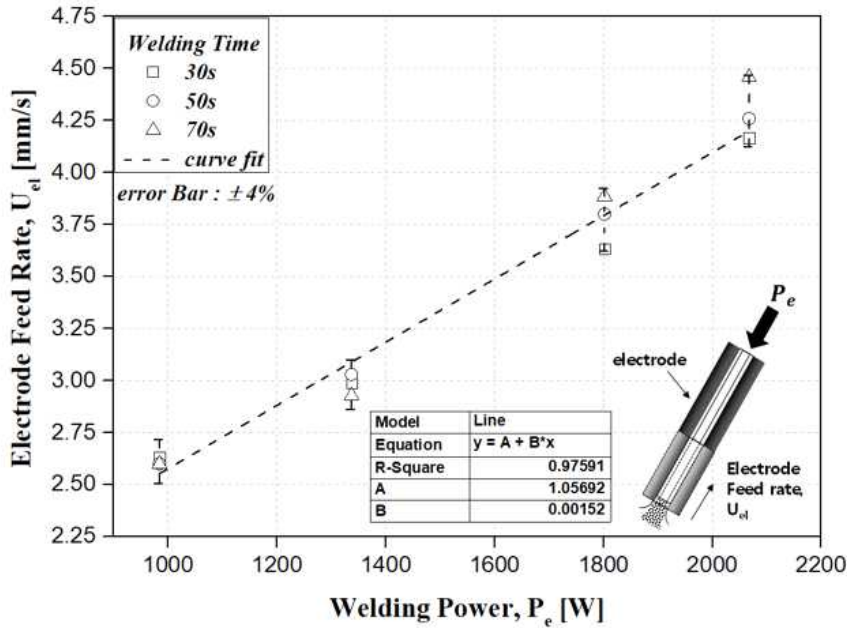


그림 2-82. Electrode feed rate in accordance with welding power for welding time 30 s, 50 s and 70 s

- 아래의 그림은 용접 시간(Δt) 이 30s, 50s 그리고 70s인 각각의 경우 electrode에 공급되는 전력 (P_e)의 크기 변화에 따른 electrode의 질량 감소(Δm_{el})와 base-metal에 용착된 질량 ($\Delta m_{b,p}$)을 측정 한 결과임. 그림에서 opened symbol은 Δm_{el} 를 나타낸 것으로 U_{rate} 에 비례하여 증가하며 동일 P_e 조건에서 이 증가하면 Δm_{el} 이 비례하여 증가하는 결과를 보여주고 있음. 따라서 식 (2.35)과 로드셀에 의해서 측정한 electrode의 밀도값($\rho = 4,726 \text{ kg/m}^3$)를 적용하면 Δm_{el} 은 dotted-line으로 표현한 식 (2.36)과 같으며, 약 $\pm 5 \%$ 범위에서 측정값과 일치하는 것을 확인할 수 있음.

$$\Delta m_{el} = u_{rate} \times \Delta t \times \left(\frac{\pi}{4} d_{el}^2 \right) \times \rho_{el} \quad (2.37)$$

- 여기서 d_{el} 은 electrode의 직경(4.094mm)을 의미하며, 그림에서 주목할 만한 점으로는 closed symbol 값에서 보듯이 $\Delta m_{b,p}$ 의 측정값은 Δt 와 P_e 크기에 비례하여 증가하였으며, Δm_{el} 의 전체 값 중 평균 88.6 % 정도가 base-metal에 용착되는 현상을 확인할 수 있음. 이러한 결과는 electrode에 공급되는 P_e 에 의해서 약 11.4 % 정도가 불티를 발생하는데 소모되는 것을 의미하며, electrode에 전달되는 에너지는 식 (2.38)과 같이 가정하여 단순화할 수 있음.

$$\sigma \varepsilon A_{b,s} (T_{s,b}^4 - T_{sur}^4) \equiv 0.886 P_e \quad (2.38)$$

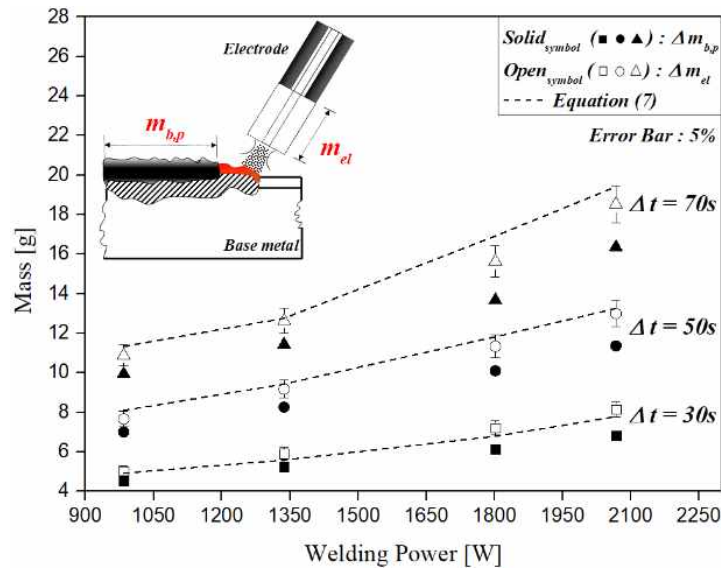


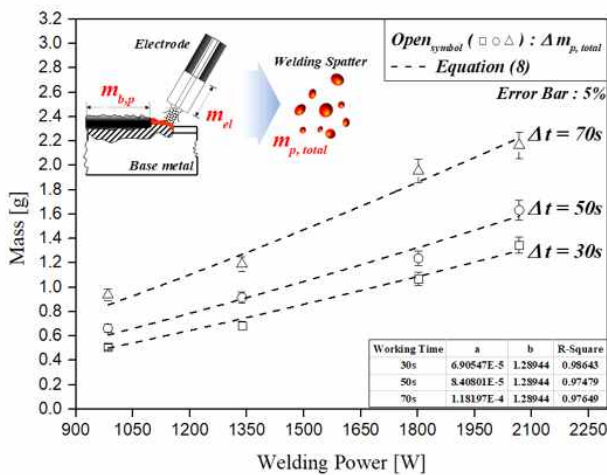
그림 2-83. Experiment results of Δm_{el} and $\Delta m_{b,p}$ in accordance with P_{efor} $\Delta t = 30s, 50s$ and $70s$.

- 그림 2-84(a)는 용접 시간(Δt)이 30s, 50s 그리고 70s 각각의 경우 식 (2.31)과 electrode의 질량 감소(Δm_{el}) 및 base-metal에 용착된 질량 ($\Delta m_{b,p}$)을 이용하여 electrode에서 비산된 입자의 총 질량($\Delta m_{p,total}$)을 산출한 결과임. Δt 가 동일한 조건에서 electrode로 공급되는 전력(P_e)이 증가함에 따라서 $\Delta m_{p,total}$ 의 산출값을 곡선 접합(curve-fitting)한 결과는 식 (2.39)과 같음.

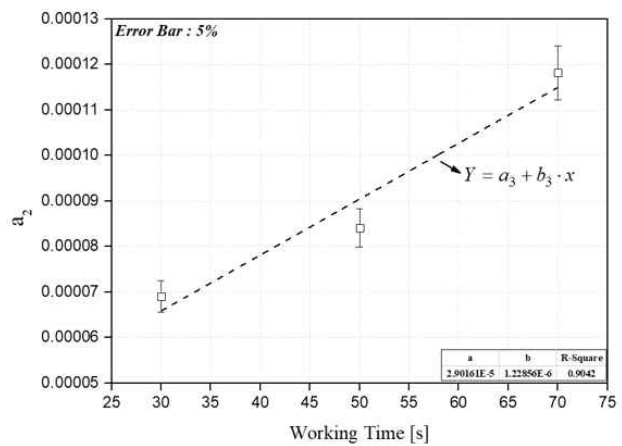
$$m_{p,total} = a_2 \cdot P_e^{b_2} \quad (2.39)$$

- 여기서 a_2 는 Δt 의 변화에 따라서 그림 2-48(b)와 같은 관계를 갖고 있으며, b_2 가 1.28944로 일정할 때 식 (2.40)와 같은 경향을 갖는 것으로 나타남

$$a_2 = 6.5g + 1.6g/s \times \Delta t \quad (2.40)$$



(a) $\Delta m_{p,total}$ VS Welding Power



(b) Curve-fit results of a_1 with working time

그림 2-84. The Effects of Supply Power on the total mass of welding particles for Welding time 30s, 50s and 70s.

- 그림 2-85는 electrode와 비산된 불티의 직경($d_{p,i}$)이 1.736mm, 2.023mm, 2.294mm 그리고 2.352mm 각각의 경우 질량($m_{p,i}$)과 체적($\Delta V_{p,i}$)을 산출하여 측정된 밀도 값(ρ_i)을 나타낸 결과임. electrode는 금속 재료의 성분이 혼합되어 있기 때문에 비산되는 불티 입자 한 개의 밀도(ρ_i)는 shield와 core의 재료 함유량에 따라서 불규칙하게 달라질 수 있음. 특히, 비산되는 불티의 총 체적($\Delta V_{p,total}$)을 구하기 위해서는 각각의 입자를 구성하고 있는 금속 재료의 질량 비가 결정되어야 하지만, 최소 1,000개 이상의 0.1 mm 이하의 작은 입자에 대해서 각각의 혼합성분을 측정하여

밀도를 분석하는 데에는 한계가 있는 것으로 판단됨. 따라서, 본 연구에서는 $\rho_{p,total} \equiv \rho_{el}$ (4,726kg/m³) 로 가정하여 식 (2.41)과 같이 $\Delta V_{p,total}$ 을 산출하여 볼티의 열적 특성을 분석하고자 함.

$$\Delta V_{p,total} = \frac{\Delta m_{p,total}}{\rho_{el}} = \frac{(a_3 + b_3 \times t) \times P_e^{b_2}}{\rho_{el}} \quad (2.41)$$

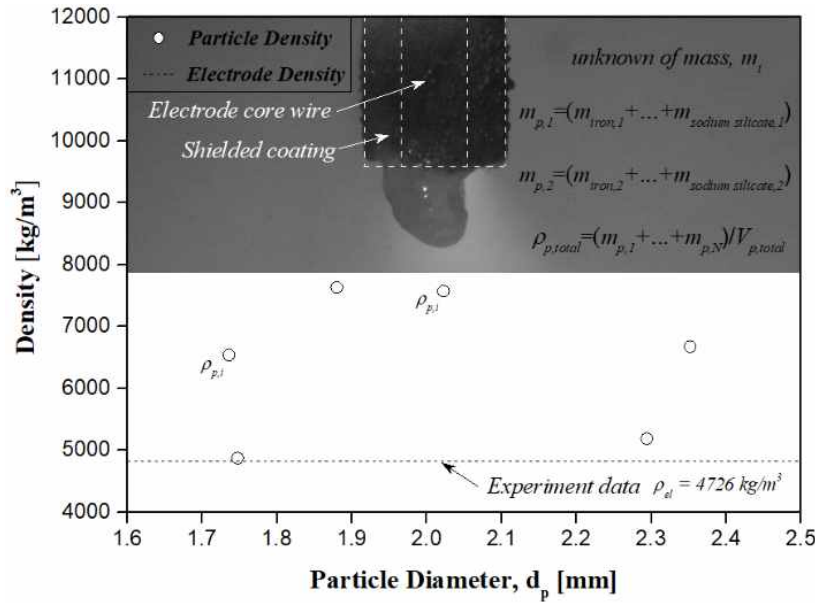
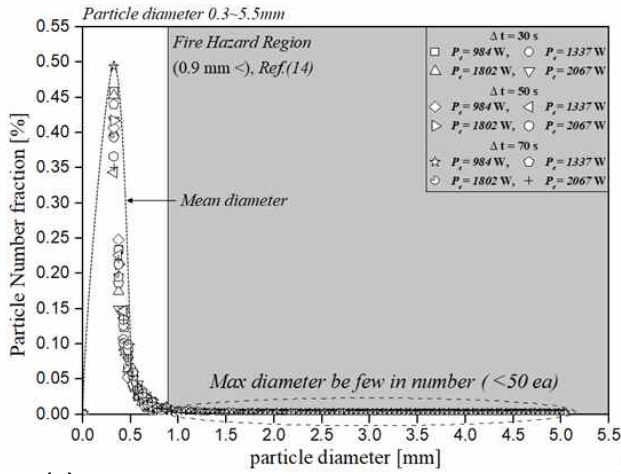


그림 2-85. The Measured value of one particle density for the particle diameter, $d_p = 1.73\text{--}2.35\text{mm}$

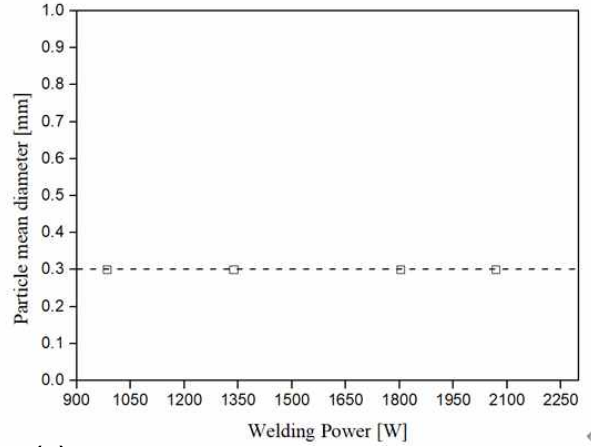
- 그림 2-86은 용접 시간(Δt)이 30s, 50s 그리고 70s 각각의 경우 electrode에 공급되는 전력의 크기(P_e) 변화에 따라서 비산되는 입자의 총 개수(N_{total})에 대한 각각의 입자 개수(N_i)를 분률(N_i / N_{total})로 표현하여 나타낸 결과임. 입자의 크기분포는 W 50 cm x D 46 cm x H 64 cm 로 제작한 아크릴 공간에 볼티를 포집한 후 Image J프로그램을 사용하여 산출하였으며, 분해능을 고려하여 0.3mm 이하의 크기를 제외하고 크기분포를 분석함. 그 결과 평균 입자 크기($d_{p,m}$)는 와 P_e 에 관계없이 직경 0.3mm 정도로 나타났으며, 기존 연구 결과($d_{p,m} < \Delta t$ 0.5mm)와 유사한 값을 갖는 것으로 판단됨[2.13, 2.14]. 따라서, 평균 입자의 총 개수(N)는 식 3.41 를 적용하면 산출이 가능하지만, 본 연구는 비산 입자의 열적 특성에 따른 화재 위험성을 예측하는데 중요한 목적이 있으며, 용접 과정에서 발생하는 최대 입자의 크기($d_{p,max}$)에 따른 열적 특성을 분석하기 위해서 식 (2.42)과 같이 평균입자의 개수(N)를 최대 입자와 크기의 개수(N_{max})로 나타냄.

$$N_{max} = \frac{6V_{total}}{\pi d_{p,max}^3}, \quad N = N_{max} \left(d_{p,max} / d_{p,m} \right)^3 \quad (2.42)$$

- 여기서 최대 입자의 크기를 의미하는 $d_{p,max}$ 는 아직 결정되지 않은 값으로 식 (2.42)을 종결하기 위해서 Δt 과 P_e 의 크기 변화에 따른 $d_{p,max}$ 의 상관관계를 분석하고자 함.



(a) Particle number fraction VS. particle diameter



(b) Particle mean diameter VS. Welding power

그림 2-86. The Results of the Number Fraction of Particle Diameter(left) and the Particle Mean Diameter when $P_e = 984, 1337, 1802$ and 2067 and $\Delta t = 30s, 50s$ and $70s$.

- 그림 2-87은 용접 시간(Δt)이 30s, 50s 그리고 70s 각각의 경우 용접봉에 공급되는 전력의 크기 (P_e) 변화에 따라서 비산되는 입자의 최대 크기($d_{p,max}$)를 분석한 결과임. 각각의 측정값은 3회의 반복 실험에서 나타난 최대 입자 측정값의 평균을 나타낸 것으로 동일 P_e 조건에서 Δt 이 증가 할수록 base-metal의 용착부 주변의 온도가 상승하여 electrode에서 비산되는 입자의 크기가 증가한 것으로 판단됨. 또한, 동일 Δt 조건에서 P_e 의 크기가 증가할수록 electrode에서 용융되는 질량에 비례하여 비산 입자의 크기가 증가하였으며, 식 (2.43)와 같은 경향으로 나타남.

$$d_{p,max} = a_4 \times P_e^{b_4} \quad (2.43)$$

- 여기서 a_4 와 b_4 는 실험상수로 $b_4=0.4825$ 로 일정한 경우 a_4 는 그림 2-88(b)에 의해서 식 (2.44)과 같이 나타낼 수 있음.

$$a_4 = a_5 + b_5 \times \Delta t \quad (2.44)$$

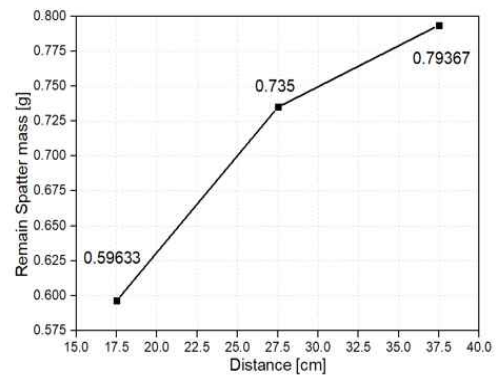
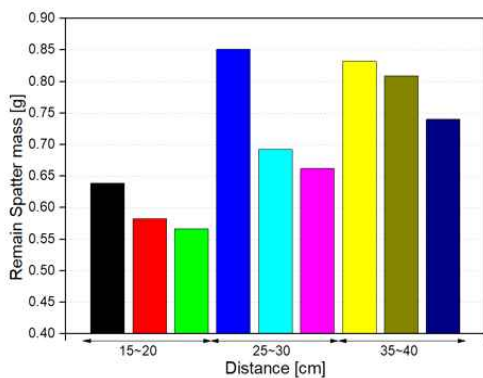
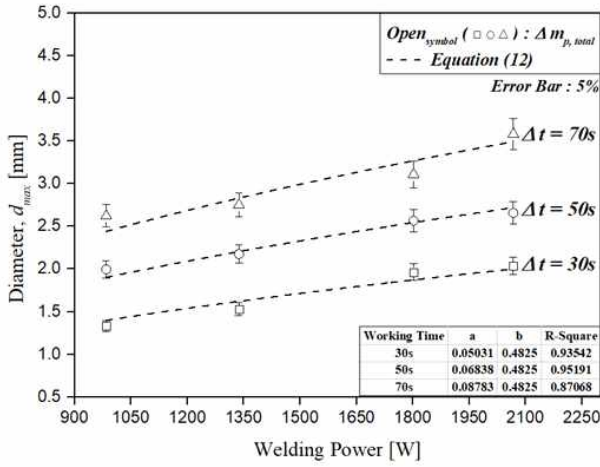
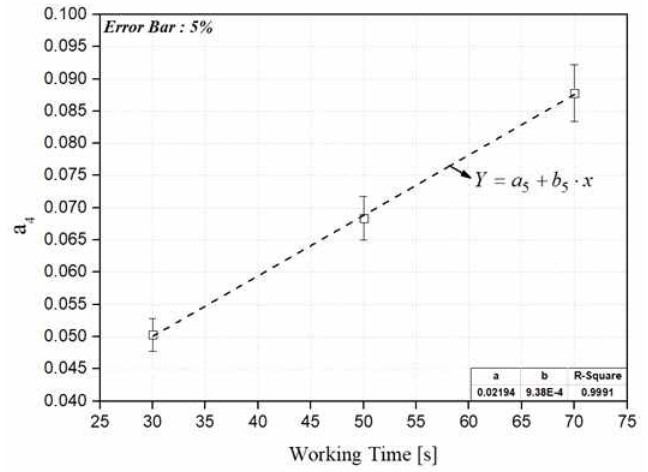


그림 2-87. 볼티 비산 거리에 따른 포집기 유동해석 및 흡입 조건 분석



(a) Maximum particle diameter VS. Supply power

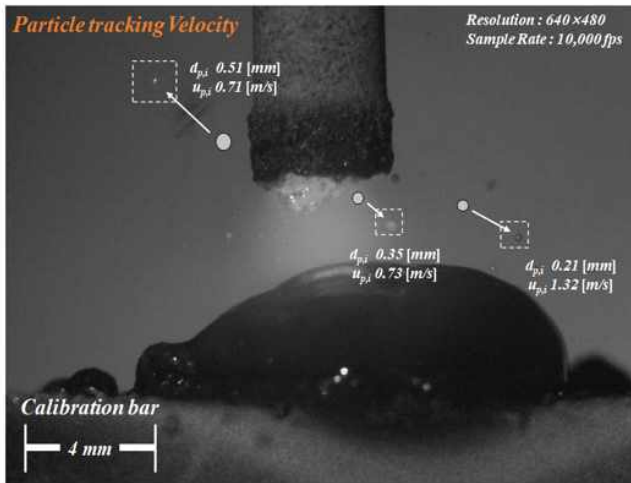


(b) The Experiment coefficient of a4 VS Welding time

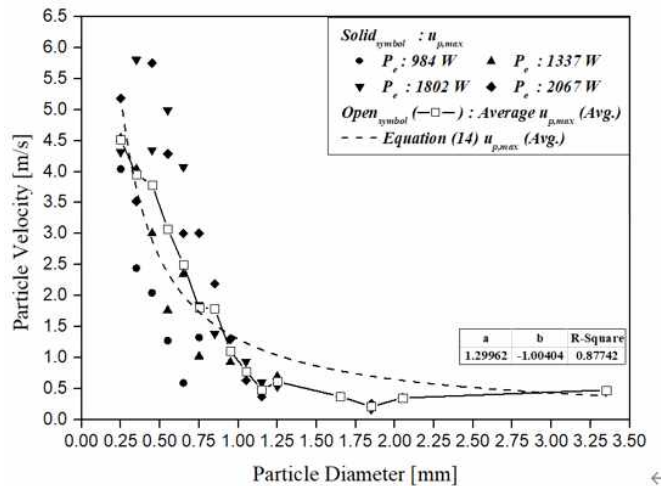
그림 2-88. The Effects of Supply Power on the distribution of the particles and the max diameter of the particles total mass of welding particles for Welding time 30s, 50s and 70s.

- 그림 2-89(a)는 초고속카메라(Model : phantom LC310)와 PTV(particle tracking velocimetry) 기법(method)을 사용하여 전력 984W인 조건에서의 입자 크기에 따른 평균 유속 측정 과정을 나타낸 결과임. 주목할 만한 점으로는 표 2-43와 같은 용접 시간(Δt)과 공급 전력(P_e)에 따른 실험 조건에 대해서 입자의 크기가 증가할수록 비산 속도의 크기는 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났으며, 비산 입자의 최대 크기(d_{p,max})에 따른 비산 속도(u_{p,max})의 상관관계를 그림 2-89(b)과 같이 분석함. 그림에서 보듯이 u_{p,max}는 Δt와 P_e의 크기 변화에 ±10 % 이내의 편차로 d_{p,max}가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 식 (2.45)와 같은 관계를 갖고 있음

$$u_{p,max} = 1.3 \times d_{p,max}^{-1.004} \quad (2.45)$$



(a) Welding particle Velocity contour



(b) Particle velocity VS Particle diameter

그림 2-89. The results of the particle velocity in accordance with the maximum particle velocity

- 용접 시간(Δt) 및 electrode에 공급되는 전력(P_e)의 크기 변화에 따른 입자의 총 체적(V_{p,total}), 최대 입자 수(N_{max})와 입자 크기(d_{p,max}) 그리고 비산 속도(u_{p,max})의 관계를 식 (2.33)의 대류 열전달 계수에 적용하면 식 (2.46)와 같이 정리할 수 있음

$$h_{max} = (2 + 0.6 \text{Re}_{d,max}^{0.5} \text{Pr}^{1/3}) k(T_{ref}) / d_{p,max} \quad (2.46)$$

- 여기서 Re_{d,max}는 최대 입자 직경(d_{p,max})를 고려한 Reynolds number(Re_{d,max}=ρ_pu_{p,max}d_{p,max}/μ)를 의미함.

특히, 공기의 thermal conductivity (k), specific heat(Cp), viscosity(μ) 그리고 density(ρ)는 기준 온도(Reference temperature, $T_{ref}=(T_{p,s}+T_{\infty}) / 2$)에 따라서 그림 2-90(a)와 같이 변하며, 본 연구에서는 Incopera의 자료에 의해서 식 (2.47)~(2.50)와 같은 관계식을 적용하여 산출할 수 있음[2.15]

$$k(T_{rep}) = -7.16 \times 10^{-3} + 1.72 \times 10^{-4} \times T - 2.45 \times 10^{-7} \times T^2 + 2.29 \times 10^{-10} \times T^3 - 9.81 \times 10^{-14} \times T^4 + 1.63 \times 10^{-17} \times T^5 \quad (2.47)$$

$$c_p(T_{rep}) = 1.05 - 2.89 \times 10^{-4} \times T + 6.83 \times 10^{-7} \times T^2 - 3.4 \times 10^{-10} \times T^3 + 2.25 \times 10^{-14} \times T^4 + 1.55 \times 10^{-17} \times T^5 \quad (2.48)$$

$$\mu(T_{rep}) = 4.26 \times 10^{-6} + 4.93 \times 10^{-8} \times T + -1.33 \times 10^{-11} \times T^2 + 2.36 \times 10^{-15} \times T^3 \quad (2.49)$$

$$\rho(T_{rep}) = 374.074 \times T^{-1.0114} \quad (2.50)$$

- 그림 2-90(b)는 대류 열전달 계수(h)의 경향을 분석하기 위해서 T_{ref} 에 따라서 $d_{p,max}=0.1mm, 0.3mm, 1.0mm, 3.0mm$ 인 경우 각각의 h를 분석한 결과를 보여주고 있음. 그림에서 입자 크기에 따른 비산 속도($u_{p,max}$)는 식 (2.45)에 의해서 각각 13.12m/s, 4.35m/s, 1.30m/s, 0.43m/s로 $d_{p,max}$ 가 증가함에 따라서 작아지기 때문에 h가 감소하는 것을 확인할 수 있음. 따라서 용접 시간과 공급 전력을 고려한 최대 입자의 볼티 평균 온도 예측 식 (2.32)은 최대 온도예측 식 (2.51)과 같이 정리할 수 있음.

$$T_{p,s} = T_{\infty} + \frac{0.13P_e}{N_{max} h_{max} A_{p,max} r_{ratio}} \quad (3.51)$$

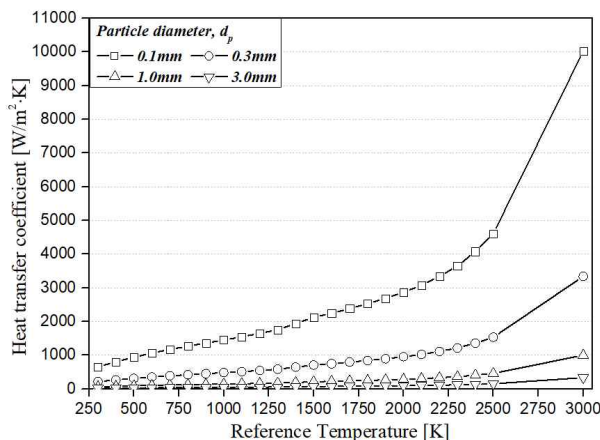
- 여기서 N_{max} , h_{max} , $A_{p,max}$ 그리고 r_{ratio} 는 각각 볼티 입자가 최대 크기일 때의 총 개수, 열전도 계수, 겹넓이 그리고 $d_{p,m}$ 을 $d_{p,max}$ 로 치환하는 과정에서 산출되는 상수를 의미함. 특히, 식 (2.52)입자의 평균 개수(N)와 평균 겹넓이($A_{p,m}$)은 $N=N_{max}(d_{p,m}/d_{p,max})^{-3}$ 와 $A_{p,m}=A_{p,max}(d_{p,m}/d_{p,max})^2$ 이며, 볼티 온도를 결정해 주는 대류 열전달 계수(h)는 $h=h_{max} \times (d_{p,m}/d_{p,max})^{-0.5} \times (u_{p,m}/u_{p,max})^{0.5}$ 이기 때문에 r_{ratio} 는 다음과 같은 관계를 갖게 됨

$$r_{ratio} \sim \left(\frac{u_{p,m}}{u_{p,max}} \right)^{0.5} \left(\frac{d_{p,m}}{d_{p,max}} \right)^{-1.5} \quad (2.52)$$

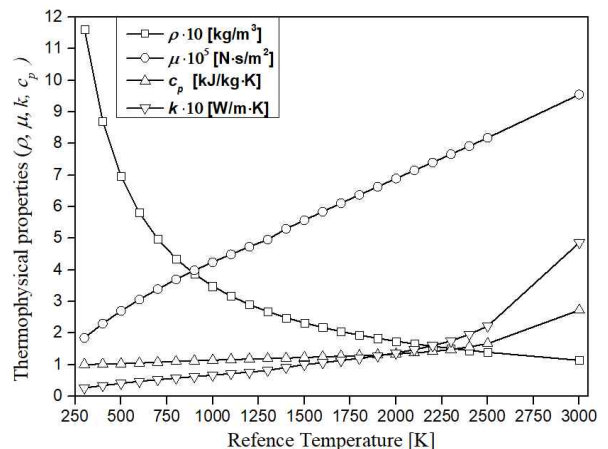
- 여기서 $u_{p,m}/u_{p,max}$ 는 평균 속도와 최대 속도의 비를 의미하며, 직경의 크기에 따라서 달라지므로 식 (2.53)와 같은 관계로 표현할 수 있음

$$\left(\frac{u_{p,m}}{u_{p,max}} \right)^{0.5} = C \left(\frac{d_{p,m}}{d_{p,max}} \right)^{0.5} \quad (2.53)$$

- 여기서 C는 속도 편차에 따라서 달라질 수 있는 실험상수를 의미하며, 대류 열전달 계수를 구하기 위한 k, Cp, μ and ρ 이 식 (2.47) ~식(2.50)와 같이 $T_{p,s}$ 의 함수이기 때문에 볼티의 최대 온도를 예측하기 위해서는 최대 입자의 식 (2.43)와 최대 속도 식 (2.45) 그리고 대류 열전달 계수 식 (2.36)를 식 (2.51)에 적용하여 반복 계산을 수행해야 함.



(a) Reference Temperature VS Heat transfer



(b) Reference Temperature VS

그림 2-90. The Effects of the heat transfer coefficient of the maximum particle diameter and velocity in accordance with the thermophysical properties (ρ , μ , k , c_p)

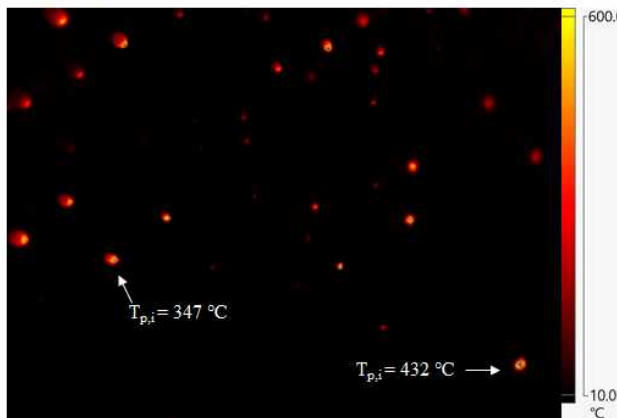
- 그림 2-91(a)는 용접 시간(Δt)이 70s이고 electrode에 공급되는 전력(P_e)의 크기가 1337 W인 경우 열화상 카메라(Model: Fluck Ti520)에 의해서 70s 동안 아크릴 포집판에 축적되는 불티의 온도를 60 frame per second(fps)로 하였을 때 분석한 최대 온도($T_{p,max}$) 측정 결과를 보여주고 있음. 그림에서 최대 온도는 약 432 °C 정도로 나타났으며, 평균 347 °C 정도의 불티 온도를 확인할 수 있음
- 그림 2-91(b)는 표 3-43와 같은 용접 시간(Δt) 및 electrode에 공급되는 전력(P_e)의 실험 조건에 따라서 불티의 최대 온도 측정 값과 식 (2.51)을 사용하여 산출한 결과를 나타내고 있음. 그림에서 보듯이 실험값의 경우 Δt 변화에 따라서 최대 ± 10 % 이내로 평균 값과 일치한 반면 P_e 의 크기에 따라서 증가하는 경향을 확인할 수 있음. 주목할 점으로는 식 (2.51)에서 C값이 일정한 경우 시간 변화에 의한 최대 편차는 $\pm 2C$ 이내로 작은 반면 P_e 의 크기에 비례하여 증가하는 경향이 실험값과 일치하는 것으로 산출됨. 하지만, C=1, 2, 3 그리고 4인 경우 P_e 증가에 따른 불티의 최대 온도가 상승하는 기울기는 실험값에 비해서 작은 것을 확인할 수 있으며, 이러한 주요 이유는 각각의 P_e 조건에서 불티의 평균 비산 속도와 최대 비산속도의 차이가 증가하기 때문에 C의 값이 다른 것으로 판단됨. 각각의 P_e 조건에서 C의 값은 식 (2.54)과 (2.55)의 관계로 구할 수 있음.

$$C = 309.67 \times P_e^{-0.6876} \quad (2.54)$$

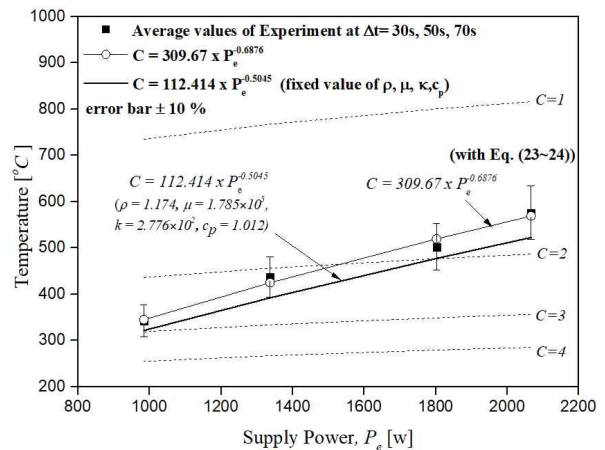
$$C = 112.414 \times P_e^{-0.5045} \quad (2.55)$$

- 여기서 C1은 각각 불티의 최대 온도를 예측하기 위해서 관계식 (2.47) ~ (2.50)를 이용하여 반복 계산에 의해서 산출한 결과이며, C2는 밀도, 열전도 계수, 점성계수 그리고 비열이 상온 298K의 값으로 하여 계산한 값을 의미하고 있음. 따라서 C2를 적용한 관계식을 사용하면 약 5%의 오차 범위에서 불티의 최대 예측이 가능한 것을 확인할 수 있음.

Temperature Contour



(a) Welding particle Temperature contour



(b) Supply Power VS Particle Temperature

그림 2-91. The results of temperature contour and the comparison of the prediction with experiment values of C.

- 그림 2-92은 용접시간(Δt)이 30s ~ 70s이고 $P_e=984$ W ~ 2067.5W인 조건에서 불티의 최대 온도와 최대 직경을 산출한 결과임. 기존 연구사례로부터 화재 확산 위험성이 있는 불티의 최소 입자 크기가 0.9mm이고 착화 가능한 온도가 350C 이상인 경우 용접 가능한 시간은 10초 이하이고 공급 전력은 최대 1150W이하로 하여야 하는 것을 확인할 수 있음. 따라서 본 연구의 결과로부터 electrode의 종류와 용접 시간이 정해진 경우 용접 불티에 의해서 화재 위험성을 최소화 하기 위한 공급 전력의 크기 산출의 정량적인 분석이 가능한 것으로 판단됨 .

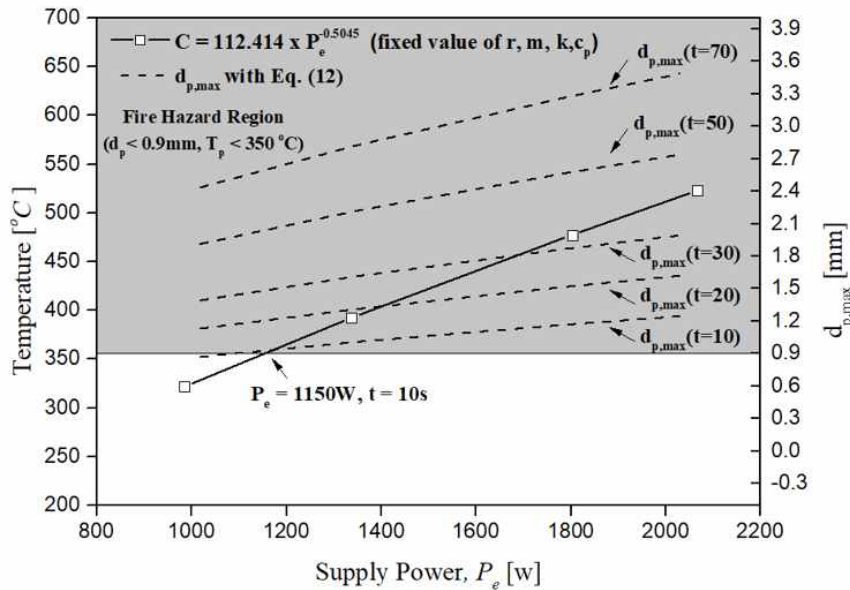


그림 2-92. The prediction results of the maximum diameter and temperature of the welding particle in accordance with supply power and welding time.

(4) 결과요약

- 본 연구에서는 SMAW용접 과정에서 electrode에 공급되는 전력과 용접 시간 변화에 따른 불티의 체적, 최대 직경, 비산 속도 및 최대 입자 수의 상관관계를 분석하였으며, 용접시간 30s, 50s 그리고 70s 각각의 경우 electrode에 공급되는 전력의 크기 변화에 따라서 다음과 같은 결과를 도출함.
- 첫째, electrode와 비산된 입자의 질량을 산출한 결과 동일 용접 시간에 대해서 electrode에 공급되는 전력의 크기가 증가할수록 비산되는 입자의 질량이 증가하는 경향식을 도출함. 특히, 비산되는 불티의 질량은 소모되는 electrode의 전체 질량 중 평균 약 11.45 % 정도로 작았으며, 비산된 입자의 밀도는 electrode를 구성하고 있는 재료의 체적비에 따라서 약 4876 kg/m³~7572kg/m³의 범위에서 불규칙한 값을 갖는 것으로 나타남.
- 둘째, 불티의 입자 크기를 산출하기 위해서 용접 과정에서 발생된 불티를 포집한 후 Image J분석 기법을 사용하여 크기 분포를 분석한 결과 평균 직경은 약 0.3mm 로 용접 시간과 공급전력의 크기와 상관없이 일정하게 나타남. 하지만, 화재 위험성에 중요한 영향을 미치는 최대 입자의 크기는 용접 시간과 공급 전력에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었으며, 불티의 비산 온도 예측을 위해서 최대 입자를 고려한 경향식을 도출함.
- 셋째, 비산되는 유속의 크기는 용접 시간 및 공급 전력의 크기에 따라서 최대 ±91% 이상의 편차가 발생하였으며, 이러한 이유는 electrode에서 불티가 발생하는 동안 밀도의 차이가 큰 재료가 혼합되어 운동량에 영향을 미치는 것으로 판단됨. 하지만, 입자의 크기가 증가할수록 비산 속도는 감소하는 것으로 나타남
- 넷째, 본 연구에서 도출한 용접 시간 및 전력 크기 변화에 따른 비산 입자의 체적, 최대 직경 및 유속 크기의 경향식을 도출하여 용접 과정에서 최대 온도 측정값과 비교한 결과 약 10 %이내로 일치함. 결과의 정확성을 검증한 후 불티의 최대 온도 350 C 이상이고 입자의 직경이 0.9 mm인 경우를 분석한 결과 용접 시간 10s이고 1150W 이하인 경우로 화재 위험성을 최소화할 수 있는 결과를 도출함.
- 주목할 점으로는 불티의 최대 온도는 용접 시간과 관계없이 공급 전력 변화에 비례하여 증가하였으며, 본 연구는 용접 불티에 의해서 화재 위험성을 최소화하기 위한 방안을 정량적으로 제시하는데 중요한 자료의 활용이 가능할 것으로 판단됨.

2-9. 볼티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험

(1) 주요 내용

다양한 흡입 노즐 형상 제작: 산발적으로 발생하는 용접 볼티들을 포집하기 위한 원통형, 고깔콘, 아르진 라운드 형으로 노즐 흡입구 형상 제작을 통한 용접 볼티 포집 효율 변화 체크



그림 2-93. 볼티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작

- 노즐형상은 기존에 포집용으로 사용되고 있는 종류 중 원통형, 고깔형, 꺾인라운드형 중 고깔형이 포집성능 향상에 효율적인 것으로 나타남

(2) 결과요약

- 노즐에 원형으로 자석을 배치하기 편리하며 꺾임이 없고 유속에 더욱 효과적인 역할을 할 수 있는 고깔형이 적합함

(3) 포집력 이론적 접근

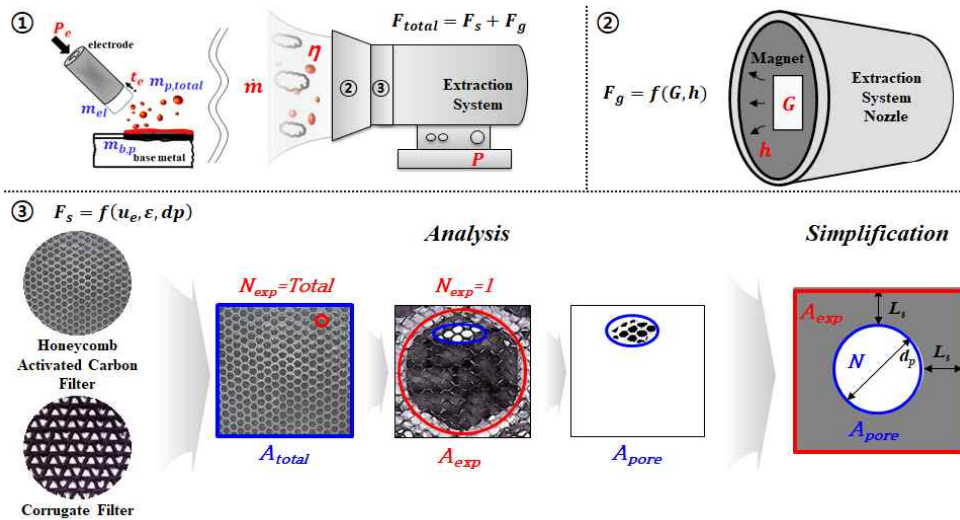


그림 2-94. 용접 가스 및 입자 포집기 및 흡입력(F_{total})에 분석에 대한 가정

- 그림 2-94은 본 연구에서 용접 과정 시 발생하는 볼티를 포집하기 위한 실험장치 개략도임. 그림에서 보듯이 볼티의 포집력(F_{total})은 송풍기의 흡입력(F_s)과 자력(F_g)의 변화에 따라서 달라지기 때문에 식 (2.56)과 같이 나타낼 수 있음.

$$F_{total} = F_g + F_s \quad (2.56)$$

- 포집기의 흡입력은 흡입유량과 유속에 의해서 식 (2.57)과 같이 나타낼 수 있음.

$$F_s = \rho A_e u_e^2 = \dot{m} \times u_e \quad (2.57)$$

- 여기서 $\dot{m}$, ρ , A_e , u_e 는 각각 덕트 내부의 질량유량, 유체밀도, 덕트 내부 면적과 유속을 의미함

특히, u_e 는 필터의 형상 및 구조에 따라서 달라지기 때문에 본 연구에서는 식 (2.58)과 같이 다공성 매질 접근법에 의해서 Brinkman-extended Darcy 모델을 분석함.

$$\frac{d\langle P \rangle_f}{dx} = \frac{\epsilon \mu_f}{K} \langle u \rangle_f - \frac{u_f}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \langle u \rangle_f}{\partial r} \right) + \frac{\rho_f \epsilon^2 C_E}{K^{1/2}} |\langle u \rangle_f| \langle u \rangle_f \quad (2.58)$$

- 여기서 $\langle P \rangle_f$, u_f , $\langle u \rangle_f$, ϵ , K 그리고 r 은 각각 압력, 점성계수, 유체의 속도, 기공률(Porosity), 투과율(Permeability, K), 그리고 반경방향 길이를 나타냄. $\langle \rangle_f$ 는 유체의 체적 평균을 의미하며 $\langle u \rangle_f$ 는 식 (2.59)과 같은 관계에 의해서 기공율과 투과율에 의해서 식 (2.60)과 같은 관계를 갖고 있음.

$$u_e = \frac{K}{\mu_f} \frac{dp}{dx} = \epsilon \times u_{hp, mean} \quad (2.59)$$

$$u_e \sim f(K \frac{dp}{dx}) \sim \epsilon \times dp \quad (2.60)$$

- 여기서 V_{total} , V_{fluid} , A_{total} 그리고 A_{fluid} 는 각각 이미지 분석한 필터의 총 체적, 기공의 체적, 필터의 총 면적과 기공의 면적을 의미하며, 이미지 분석한 필터의 총 면적은 식(2.61)과 같이 정의할 수 있음.

$$A_{total} = A_{exp} N_{exp} \quad (2.61)$$

- 여기서 A_{exp} 과 N_{exp} 는 그림 2-94의 오른쪽 그림에서 보듯이 필터의 대표체적(relative volume)의 면적 및 개수를 의미하며, 그림 2-94과 같이 이미지 분석한 1개의 기공 면적(A_{pore})과 N_{exp} 를 통하여 식(2.62)과 같이 기공의 직경을 단순화하여 산출할 수 있음.

$$A_{fluid} = N_{exp} A_{pore} \rightarrow A_{pore} = \frac{\pi d_p^2}{4} \rightarrow d_p = \sqrt{\frac{A_{pore} \times 4}{\pi}} \quad (2.62)$$

- 식 (2.62)을 통하여 산출된 d_p 와 A_{exp} 는 그림 2-94과 같이 단순화시키면 식(2.63)과 같이 셀 1개의 고체의 길이(L_s)를 산출할 수 있으며, L_s , d_p 를 사용하여 단순화된 형상의 기공 개수(N)는 식 (2.64)과 같이 정의할 수 있음.

$$A_{exp} = (2L_s + d_p)^2 \rightarrow L_s = \frac{\sqrt{A_{exp}} - d_p}{2} \quad (2.63)$$

$$N = \frac{L_1}{d_p + 2L_s} \times \frac{L_2}{d_p + 2L_s} \quad (2.64)$$

- 여기서 L_1 , L_2 는 송풍기 내부에 삽입되는 필터의 가로와 세로의 길이를 의미하며, 단순화된 d_p , N 을 사용하여 실험에 사용된 필터의 ϵ 은 식(2.65)과 같이 산출할 수 있음.

$$\epsilon = \frac{\frac{\pi}{4} d_p^2 \times N}{L_1 \times L_2} \quad (2.65)$$

- F_g 는 자성의 크기(G)와 거리(h)에 따라서 달라지기 때문에 식 (2.66)과 같은 함수 관계로 나타낼 수 있음

$$F_g = f(G, h) \quad (2.66)$$

- 따라서 식 (2.57)과 (2.66)에 의해서 F_{total} 은 최종 식 (2.67)과 같은 관계로 나타낼 수 있음

$$F_{total} = f(G, h) + \dot{m} \times u_e \quad (2.67)$$

(4) 실험 장치 구성

- 그림 2-95은 제작한 SMAW 반자동화 실험장치 및 불티 및 가스 포집기 실험장치 및 포집력을 분석하기 위한 방법 개략도를 보여주고 있음. 그림에서 보듯이 용접봉, 모재 그리고 포집되지 않은 불티의 무게를 정밀저울을 사용하여 포집된 불티를 측정함. 또한 덕트 내부에 열유속계를 설치하여 필터의 형상 및 포집기의 용량 변화에 따른 흡입 유속을 측정하였으며, 자력 측정기를 사용하여 거리에 따른 자력을 측정함. 본 연구에서 사용한 실험 장치 사양은 표 2-44와 같음

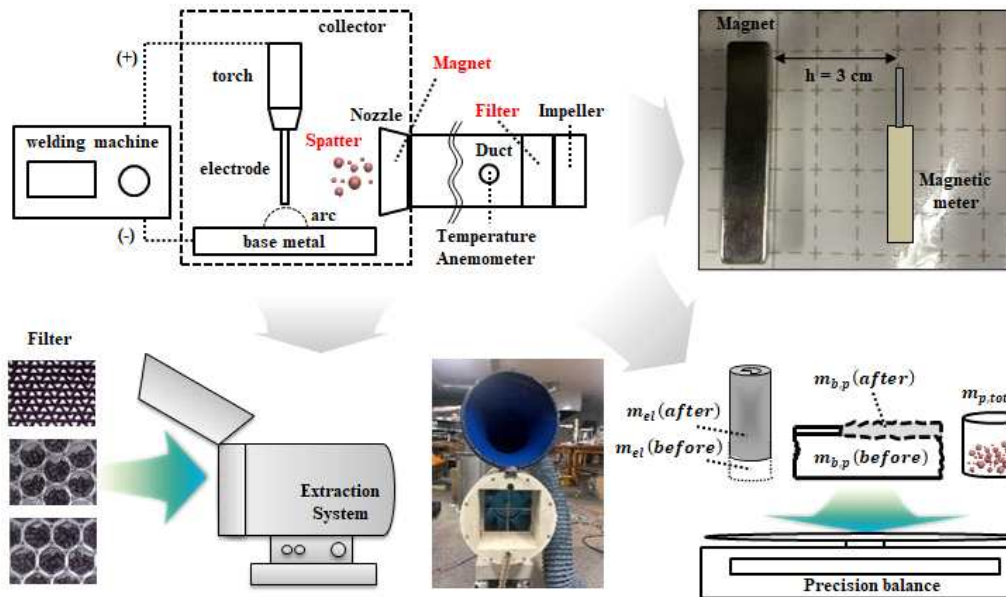


그림 2-95. 실험 장치 사진 및 개략도

표 2-44. 시험 장비 주요 사양

Measurement	Specification
Welding machine	Output current (20~220) A, Rated input voltage 220 V, Electric power (0~2.5) kW Rated duty cycle 60%, Model : Rolwal MMA-200E
Exhaust Fan	Capacity 1100W, Inlet diameter 12cm, Size 670*670*860mm(62kg), RPM 3200
Temperature Anemometer	Max. measurement range (T 500 ℃, u 50 m/s), Accuracy (T 1%, u ±1.5% F.S) Model : KANOMAX anemometer 6162
Precision balance	Max. load 320 g, Accuracy 0.1 mg, Model : PX224KR
Magnetic meter	Max. Range 30,000(DC) 15,000(AC) G, Accuracy 1 G, Model : MG3002
Electrode	High titanium oxide Type electrode (AWS E-6013), Diameter 4.0mm

(5) 실험 결과

(5.1) 포집력 분석(F_{total} , F_g , F_s)

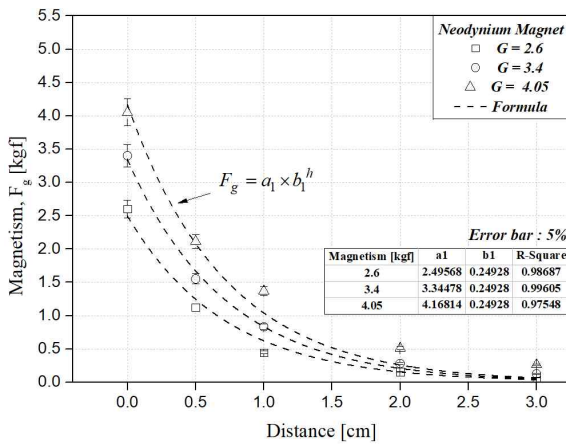
- 그림 2-96(a)은 Magnetic meter를 사용하여 최대 자성의 크기(G)가 2.6 kgf, 3.4 kgf 그리고 4.05 kgf인 자석을 사용하여 거리(h) 변화에 따라서 힘(F_g)의 크기를 측정한 결과임. 그림에서 보듯이 동일한 h에 대해서 F_g 는 G에 비례하여 증가하였으며, $h > 3$ cm이상인 경우 F_g 의 값은 0으로 나타남. 따라서 G와 h에 대해서 F_g 는 $\pm 5\%$ 범위에서 식 (2.68)과 같은 실험식으로 표현할 수 있음.

$$F_g = a_1 \times b_1^h \quad (2.68)$$

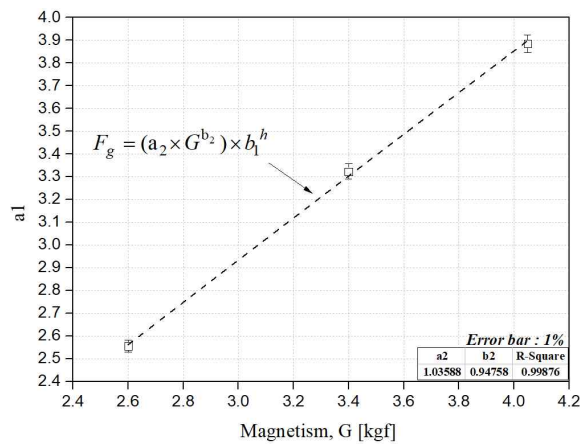
- 여기서 a_1 은 G의 변화에 따라서 그림 2-96(b)와 같은 관계를 갖고 있으며, b_1 가 0.24928로 일정할 때 식(2.69)과 같은 경향을 갖고 있음.

$$F_g = (a_2 \times G^{b_2}) \times b_1^h \quad (2.69)$$

- 표 2-45는 F_s 를 산출하기 위하여 L_1 , L_2 가 200*200 mm 크기인 필터의 기공의 크기(dp)와 기공률(ϵ)을 분석하였으며, 여기서 A_{total} , A_{exp} , A_{pore} , N_{exp} 는 측정값이며, d_p , L_s , N , ϵ 는 식(2.58)~(2.65)을 통해 단순화하여 산출한 결과임. 분석 결과 필터 기공(유체)의 직경은 각각 3.06 mm, 2.87 mm, 2.45 mm(Average data)가 나타났으며, 기공률은 각각 6.94 %, 4.60 %, 28.55 %(Average data)로 나타났음.



(a)



(b)

그림 2-96. 거리에 따른 자력 계측 결과

표 2-45. 필터 별 측정 및 분석 결과

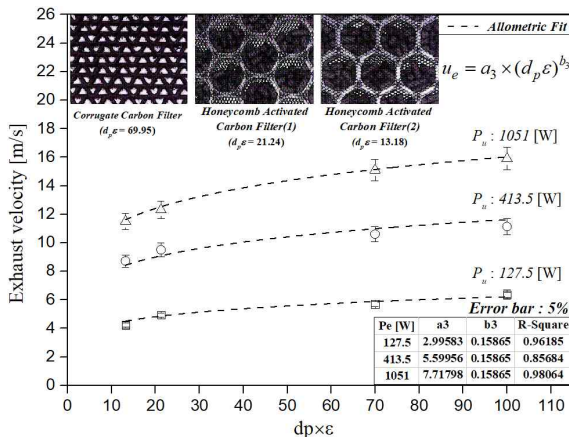
Filter	A _{total} [mm ²]	A _{exp} [mm ²]	A _{pore} [mm ²]	N _{exp} [EA]	d _p [mm]	L _s [mm]	N [EA]	ε [%]
Carbon(1)	40000	105.87	7.35	378	3.06	3.61	378	6.94
Carbon(2)	40000	140.40	6.45	285	2.87	4.49	285	4.60
Corrugate(1)	1809.7	16.76	4.95	108	2.51	0.79	2387	29.57
Corrugate(2)	885.9	18.46	5.07	48	2.54	0.88	2167	27.49
Corrugate(3)	289.4	14.47	4.14	20	2.30	0.75	2764	28.60

- 그림 2-97(a)은 포집기 용량(P_u) 127.5W, 413.5W 그리고 1051W 조건에서 3종류의 필터에 따라서 덕트 내부의 흡입 유속(u_e)을 측정한 결과임. 동일 P_u 조건에서 기공률($d_p \epsilon$)이 증가할수록 덕트 내부 ΔP 가 감소하기 때문에 u_e 는 증가하는 것으로 판단되며, 식(2.70)과 같은 관계식과 $\pm 5\%$ 범위에서 측정값이 일치하는 것으로 나타남.

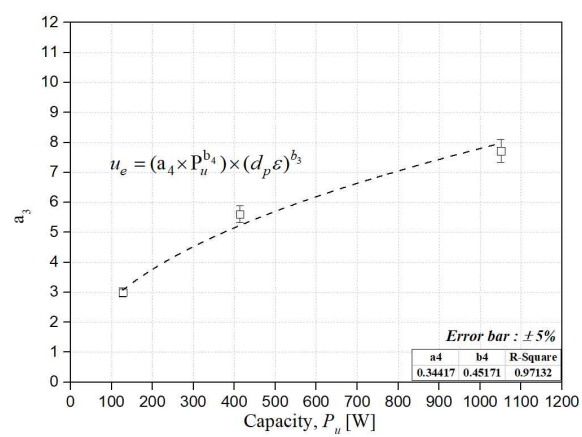
$$u_e = a_3 \times (d_p \epsilon)^{b_3} \quad (2.70)$$

- 여기서 a_3 와 b_3 는 실험상수로 b_3 가 0.15865로 일정할 경우 a_3 는 그림 2-97(b)에 의해서 식(2.71)과 같이 나타낼 수 있음.

$$u_e = (a_4 \times P_u^{b_4}) \times (d_p \epsilon)^{b_3} \quad (2.71)$$



(a)



(b)

그림 2-97. 필터 형상 및 포집기 용량 변화에 따른 유속 관계 분석

- 송풍기를 사용한 볼티 포집 능력은 덕트의 노즐 형상에 따라서 흡입부 반경의 거리 별 유속에 따라서 달라질 수 있음. 그림 2-99은 15.9 m/s의 덕트 내부 유속조건에서 송풍기 노즐 중앙에서 거리에 따른 흡입 유속을 측정한 결과임. 노즐 중앙에서 X축 30cm이상에서 포집 효율이 없는 것으로 확인함

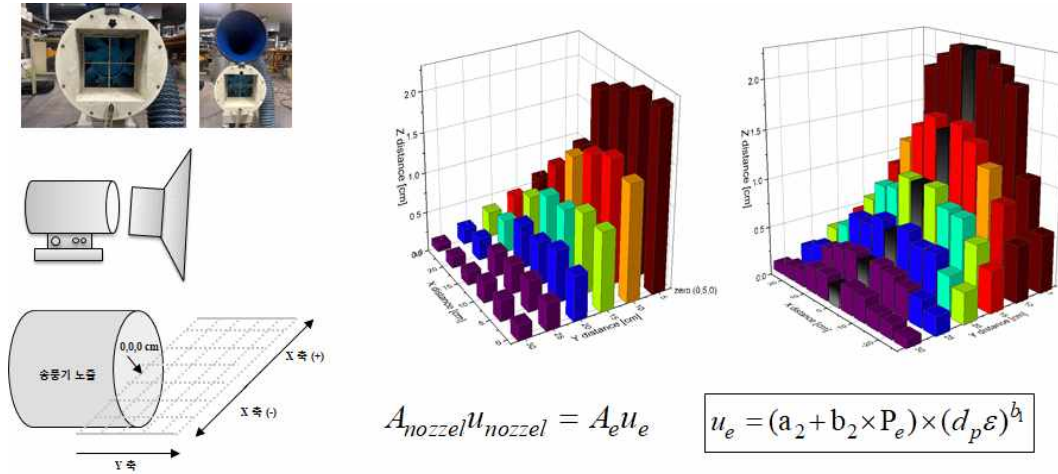


그림 2-98. 노즐에서 부터 거리에 따른 흡입 유속

- 따라서 화재 위험성을 최소화하기 위한 총 비산된 입자 중 포집된 입자의 비율은 자력의 크기와 송풍기의 용량, 필터 및 노즐 형상에 따라서 달라지며 식(2.67)은 예측식 식(2.69), (2.71)을 통하여 식(2.72)과 같은 관계를 갖고 있음

$$F_{total} = F_g + F_s = (a_2 \times G^{b_2}) \times b_1^h + (a_4 \times P_u^{b_4}) \times (d_p \epsilon)^{b_3})^2 \quad (2.72)$$

(5.2) 포집 효율 분석(η)

- 2-8절에서 언급되듯이 볼티 입자의 총 질량($\Delta m_{p,total}$)은 그림 2-94과 같이 용접 시간(Δt)과 electrode에 공급되는 전력(P_e)에 관계를 가지고 있으며, 그림 2-95과 같이 electrode의 질량(Δm_{el}), base-metal에 용융된 질량($\Delta m_{b,p}$)을 측정하면 식 (2.73)과 같이 볼티 입자의 총 질량($\Delta m_{p,total}$)을 산출할 수 있음.

$$\Delta m_{p,total} = \Delta m_{el} - \Delta m_{b,p} \quad (2.73)$$

- 사용된 용접봉의 질량은 용접 시간과 전력에 따라서 사용되는 용접속도 예측 식을 제시한바 있으며, 식(2.74)과 같은 관계를 갖고 있음

$$u_{rate} = 0.988 \times 0.157 \times 10^{-2} \times P_e \quad (2.74)$$

- 2-8절에 의하면 사용된 용접봉의 직경 및 밀도, 용접시간 전력을 통하여 사용된 용접봉의 질량 예측 식을 제시하였음

$$\Delta m_{el} = u_{rate} \times \Delta t \times \left(\frac{\pi}{4} d_{el}^2 \right) \times \rho_{el} \quad (2.75)$$

- 전력의 크기가 984~2067.5W 이상인 조건에서 식(2.76)과 같이 용접봉의 밀도 값을 적용하여 용접 전력 및 시간에 따라서 발생하는 총 볼티의 질량을 예측한 바 있으며, 본 연구에서는 식(2.77)과 같은 관계를 갖고 있음

$$\Delta m_{p,total} = (2.9 \times 10^{-5} + 1.23 \times 10^{-6} \times \Delta t) \times P_e^{1.28944} \quad (2.76)$$

$$\Delta m_{p,total} = \Delta m_{l,p} + \Delta m_{c,p} \quad (2.77)$$

- 여기서 $\Delta m_{c,p}$, $\Delta m_{l,p}$ 는 각각 포집된 볼티의 질량과 포집되지 않은 볼티의 질량을 의미 함. 따라서 볼티가 포집되는 효율은 식(2.78)과 같이 나타낼 수 있음

$$\eta = \frac{\Delta m_{c,p}}{\Delta m_{p,total}} \times 100 \quad (2.78)$$

- 그림 2-99은 송풍기 용량 1051W, 자력 2.6 G조건에서 F_{total} 에 따라서 발생한 총 불티의 질량 중 포집된 불티의 비율을 측정한 결과임. 동일한 형상을 가지는 송풍기를 사용하여 용접 작업 중 발생하는 유해가스 및 비산 불티의 화재 위험성을 최소화하기 위하여 불티 포집율 70%이상의 포집 능력을 구현하기 위해서는 d_{pe} 이 69.95인 조건에서 1192W 이상의 송풍기 용량이 필요한 것으로 나타났음.

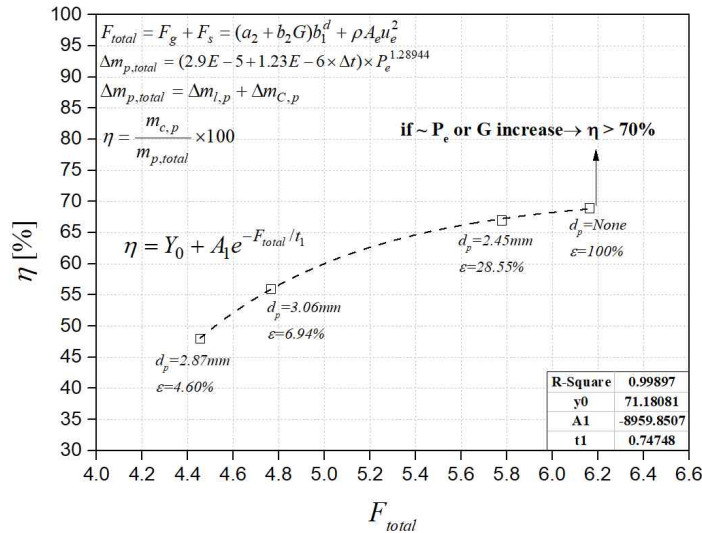


그림 2-99. 포집력(F_{total})에 따른 포집 효율(η) 분석 결과

(5-4) 용접 종류 및 위치에 따른 불티 특성 및 포집 효율

- 현재 가장 불티의 위험성이 큰 아크용접에 대해 개발된 것이므로 용접종류는 어떠한 용접에도 포집기의 성능은 발휘 될 수 있음. 작업지점에서 거리 20cm 이내로 각도가 유지되면서 설치되기 위한 실용성을 확보하기 위해 포집기 노즐의 각도 조절이 필요하며 주름관이 각도에 맞도록 조절되어 어떠한 자세에서도 포집기의 입구가 각도를 유지하며 20cm 이내에 설치될 수 있어야 포집기의 성능이 일정하게 발휘될 수 있을 것으로 판단 됨.
- 주름관, 노즐, 포집기와 주름관 연결부위의 360도 회전성 등의 기능이 개발되면 용접불티의 특성과 관계없이 활용할 수 있다고 판단됨.



그림 2-100. 포집된 불티 사진

2-10. 불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가

(1) 개요

- 본 연구는 “건설현장 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 포집 기술 개발”과제의 결과물인 용접 불티 포집 능력을 의뢰자 제시 규격에 따라 시험한 시험결과임

가. 시험대상 :

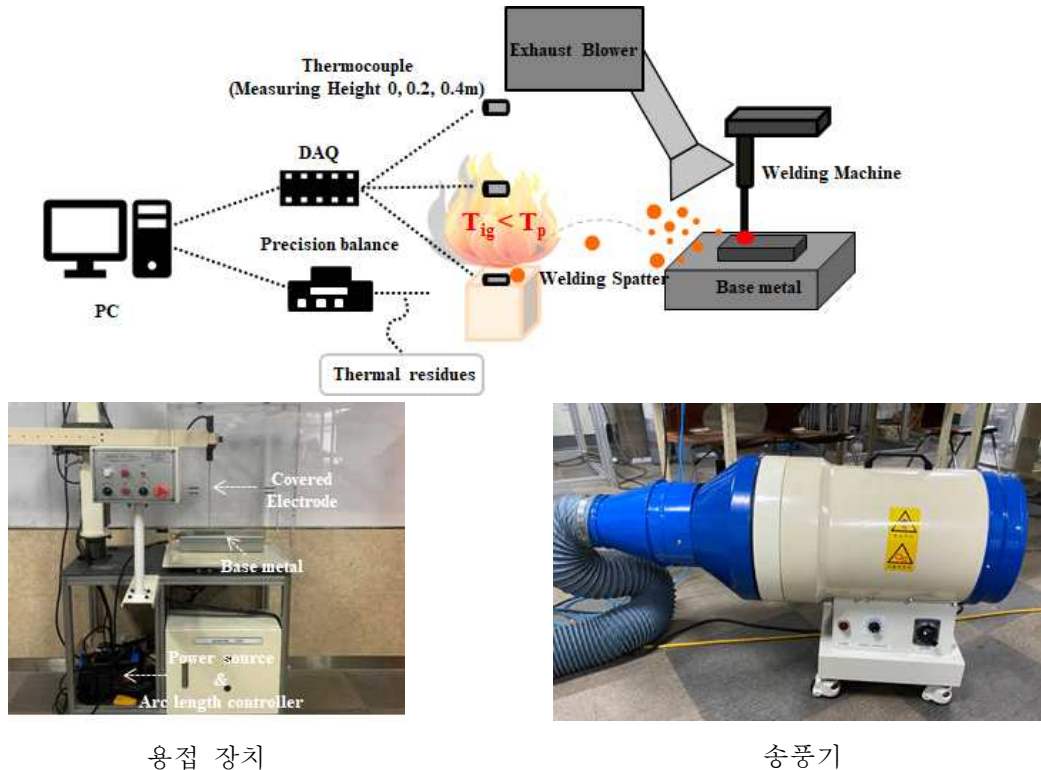


그림 2-101. 불티 포집 장치 실험 개략도 및 사진

표 2-46. 시험 장비 주요 사양

주요 장비	사양
용접기	출력 전류 20~220 A, 사용 전력. 220 V, 사용 효율 60 %, 모델명 : Rolwal MMA-200E
송풍기	최대 사용 전력 1043 W, 최대 유속 20.7 m/s
열전대	계측 범위: -200 ~ 1,000℃, 모델명 : K-Type Wire
데이터 수집 장치	측정 온도 범위 K-Type -100< TS <1370℃, 모델명 GL840
정밀 저울	최대 표시 : 0~320g, 1논의 값 0.001g, 모델명 FX-300i

(2) 시험항목별 시험방법

가. 불티 포집기 사용 여부에 따른 화재 확산 위험성 분석

1) 실험 구성

- 용접 작업 지점에서 거리 1 m 이내에 고체 가연물(폴리우레탄 폼 보온재 체적 0.2x0.2x0.2 m)을 위치
- 용접 장치를 통하여 1800 W 조건에서 아크 용접 수행
- 아크 용접 시 발생하는 불티를 포집하기 위하여 제작 송풍기를 작업 거리에서 수평 방향으로 30cm에 위치시키며 송풍기, 자석, 필터(제작, 상용에 따라 차압이 달라지기 때문에 유속조건이 달라짐) 사용 여부에 따른 화재 확산 실험 수행

2) 온도 측정

- 용접 불티가 가연물에 비산 시 가연물의 점화 온도보다 입자의 온도가 높을 경우 연소
- 송풍기 사용 여부에 따라 가연물이 화재 확산 시 열전대(K-TYPE)를 사용하여 온도 측정
- 열전대는 가연물 중앙에서 0, 20, 40 cm 높이에 위치

3) 질량 측정

- 용접 불티가 가연물에 비산 시 가연물의 점화 온도보다 입자의 온도가 높을 경우 연소
- 송풍기 사용 여부에 따라 가연물이 연소 후 실험 전, 후 질량 비교

(3) 실험 조건

표 2-47. 실험 조건

구분 시험횟수	포집조건				비고
	송풍기	유속조건[m/s]	자석	필터	
Case#1	None		None	None	
Case#2	O	16.76	O	콜 게이트 필터(제작)	
Case#3	O	16.76	None	콜 게이트 필터(제작)	
Case#4	O	15.96	None	카본 필터(상용)	

(4) 시험결과

표 2-48. 점화시간

구분 시험횟수	용접 후 착화 시간 [s]	비고 (성능 목표)
Case#1	4	해당없음
Case#2	N/A	-
Case#3	29	-
Case#4	14	-

표 2-49. 가연물 온도 측정

구분 시험횟수	시험 전 온도 [℃]	최대 온도 [℃]	최대 온도 도달시간 [s]	비고 (성능 목표)
Case#1	19.500	362.000	39.000	해당없음
Case#2	19.7	N/A	N/A	-
Case#3	18.9	472.3	129	-
Case#4	19.1	494.1	94	-

표 2-50. 가연물 질량 측정

구분 시험횟수	실험 전 질량 [g]	실험 후 질량 [g]	비고 (성능 목표)
Case#1	117.220	0	해당없음
Case#2	119.462	119.462	-
Case#3	115.953	0	-
Case#4	118.391	0	-

표 2-51. 시험 자료

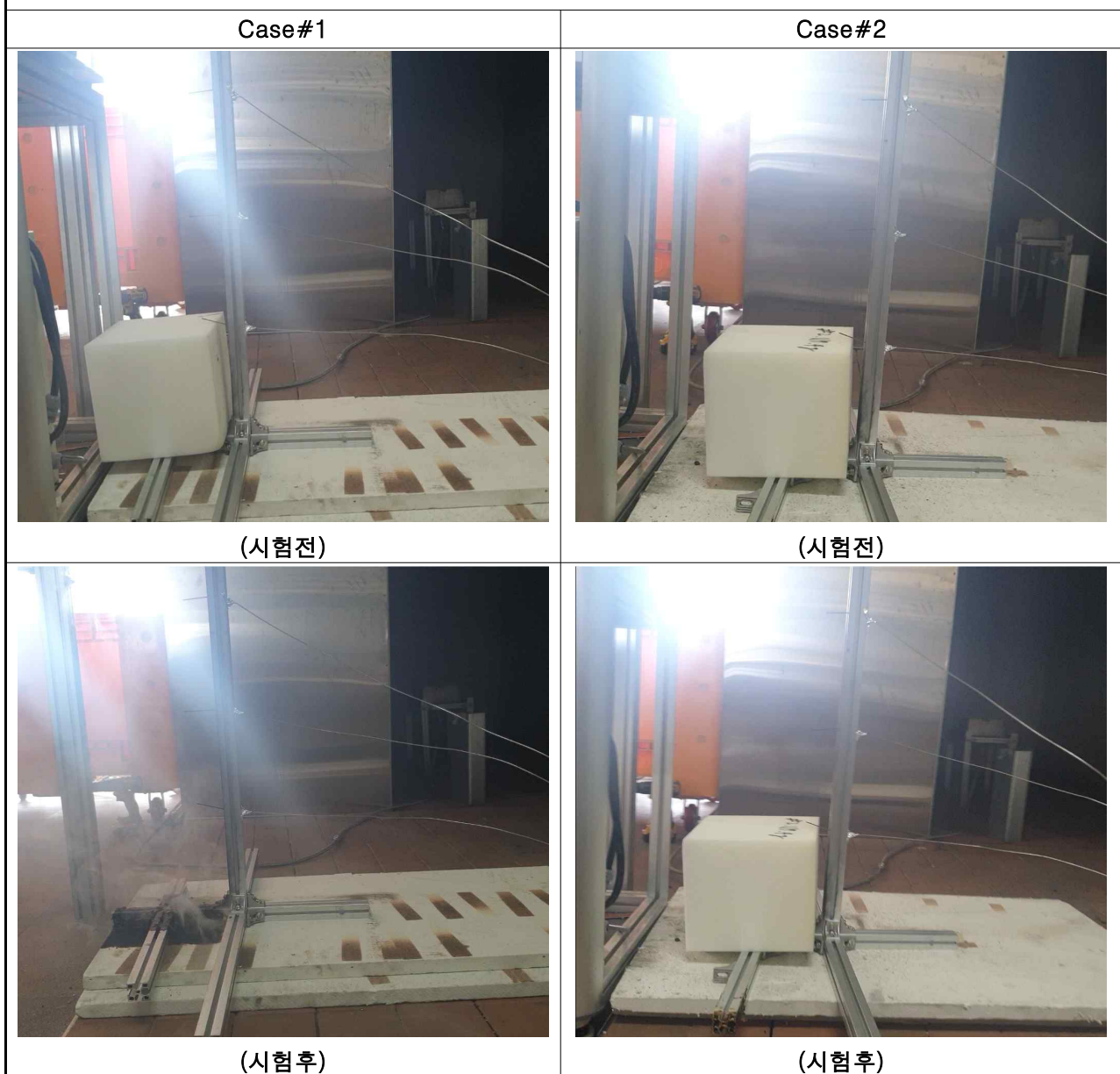


표 2-52. 시험 자료

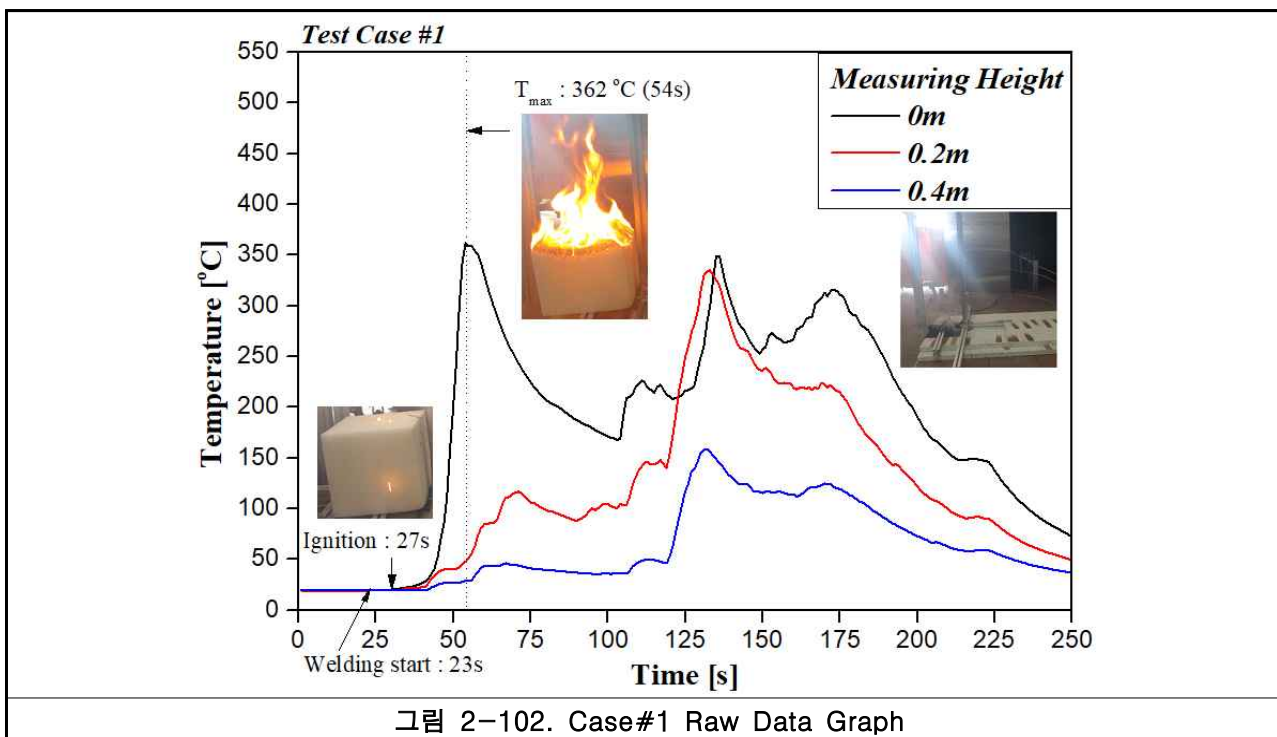


그림 2-102. Case#1 Raw Data Graph

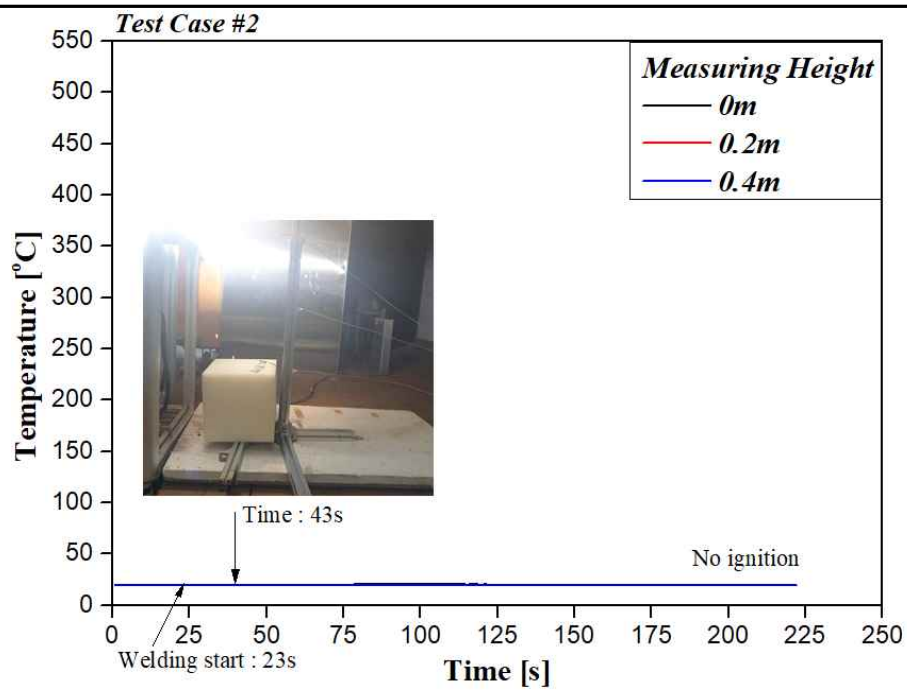


그림 2-103. Case#2 Raw Data Graph

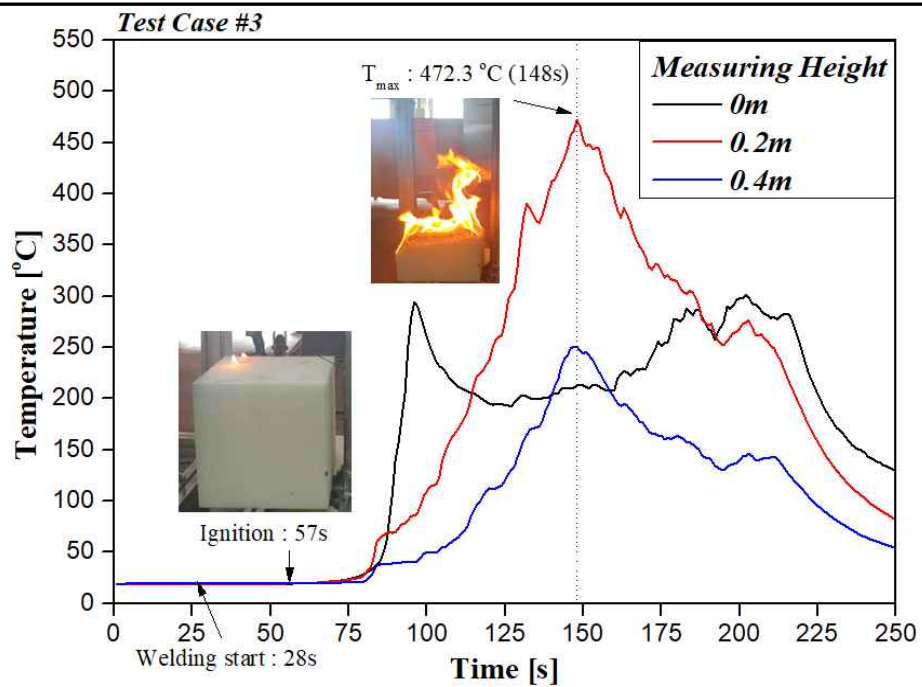


그림 2-104. Case#3 Raw Data Graph

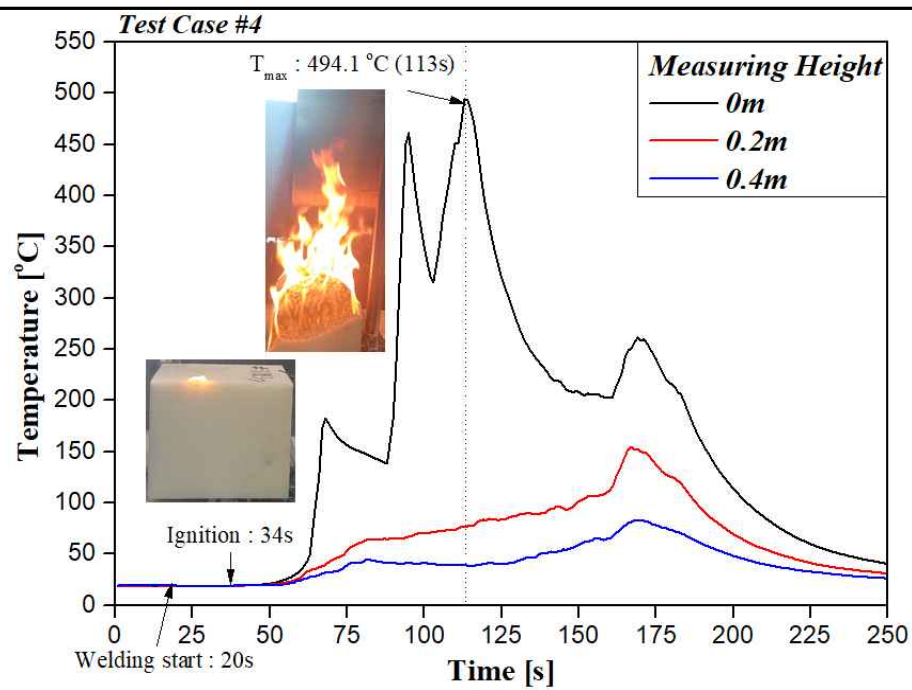


그림 2-105. Case#4 Raw Data Graph

시험 성적서

성적서 번호 : T2020-13307

회사명 : 송현열연씨 주식회사
대표자 : 권영선
주소 : 경기도 화성시 동탄순환대로 823, 803호(영천동, 에이텍시티)
연락처 : 031-8003-7740
1. 시험명 : 볼티포집장치
규격 및 형식 :
2. 성적서의 용도 : 국토교통과학기술진흥원 제출용
3. 접수일자 : 2020.10.23
4. 시험일자 : 2020.10.23 ~ 2020.11.02
5. 시험방법 : 외관 및 제1 규격
6. 시험결과 : 불합 판정

시험자 : 송나영

송나영

승인자 : 김승진

김승진

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 자료 및 시험결과에 시험한 결과로 이 밖에 제도에 대한 증명서를 보증하지 않습니다.
2. 이 성적서는 우리 시험연구원의 사관동의 없이 복제, 전전, 광고 및 고충물로서 사용될 수 없으며 무단 사용 시 처벌을 받습니다.
3. 이 성적서의 사용은 무효입니다.

2020년 11월 02일



한국기계전기전자시험연구원

www.ktc.or.kr 46519 부산광역시 북구 금곡대로 457, 1층
TEL 051-336-1566



KS-F708-054 Rev.2

Page : 1 of 4

Code NO : SRFX-LNFQ-TXZV



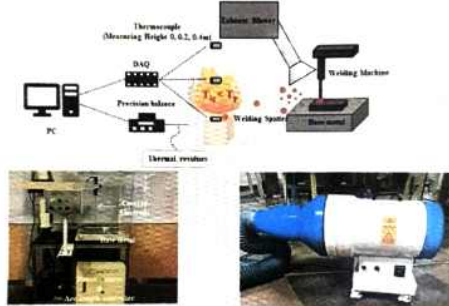
시험 결과

성적서 번호 : T2020-13307

1. 시험 개요

이 시험결과는 "건설현장 용접 붐의 화재확산 방지를 위한 포집 기술 개발"과제의 결과물인 용접 붐의 포집 능력을 의뢰자 제시 규격에 따라 시험한 시험결과임

가. 시험대상 :



용접 장치

송풍기

<붐의 포집 장치 실험 개략도 및 사진>

KS-F708-054 Rev.2

Page : 2 of 4

Code NO : SRFX-LNFQ-TXZV



시험 결과

성적서 번호 : T2020-13307

2. 시험 방법

가. 붐의 포집기 사용 여부에 따른 화재 확산 위험성 분석

1) 실험 구성

- 고체 가연물을 준비한 후, 용접 장치를 통하여 아르곤 용접 수행
- 아르곤 용접 시 발생하는 불꽃을 포집하기 위한 제작 송풍기를 위치시켜 화재 확산 시험 수행

2) 온도 측정

- 용접 붐의 가연물에 비한 시 가연물의 경화 온도보다 입자의 온도가 높은 경우 연소
- 송풍기 사용 여부에 따라 가연물이 화재 확산 시 열전도(K-TYPE)를 사용하여 온도 측정

3) 질량 측정

- 가연물의 시험 전, 후 질량 측정

4) 시험 조건

시험횟수	포집조건			비고
	송풍기	저석	필터	
Case#1	None	None	None	
Case#2	O	O	플 게이트 필터(제거)	
Case#3	O	None	플 게이트 필터(제거)	
Case#4	O	None	카본 필터(상용)	

KS-F708-054 Rev.2

Page : 3 of 4

Code NO : SRFX-LNFQ-TXZV



시험 결과

성적서 번호 : T2020-13307

3. 시험 결과

No	가연물의 시험 전 질량(g)	가연물의 시험 후 질량(g)	용접후 취화 시간 (s)	시험 전 온도 (°C)	최대 온도(°C)	최대 온도 도달시간(s)
Case#1	117.220	0	4	19.5	362.0	39.0
Case#2	119.462	119.462	-	19.7	-	-
Case#3	115.953	0	29	18.9	472.3	129
Case#4	118.391	0	14	19.1	494.1	94

KS-F708-054 Rev.2

Page : 4 of 4

Code NO : SRFX-LNFQ-TXZV

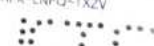


그림 2-106. 시험 결과

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 최종 목표의 달성도

(1) 최종 목표

구분	내용
최종 목표	건설현장 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 포집 기술 개발
세부 목표	▪ 건설현장 불티 특성과 가연성 물질의 화재 확산 조건 분석 ▪ 용접기 종류에 따른 불티의 비산 현상 주요 메커니즘 분석 ▪ Lab-scale 테스트 베드 구축 및 시뮬레이션을 적용한 불티 포집 방안 연구 ▪ 실험실 규모의 불티 포집기 제작 및 실증실험에 의한 성능 평가

(2) 정량적 연구성과 목표 및 달성도

■ 주관연구기관 : 동양대학교

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치	달성도
1차년도	2019	가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석	건설현장 주요 가연 물질 열화학적 물성 조사	DB 구축 자료 1건	6.25	100 %
			가연성 물질의 종류에 따른 불티 점화 조건 분석			
		용접기 종류 및 불티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리	아크 용접에서 불티 발생과 관련된 주요 인자 정리	SCI(E) 1편	12.5	100 %
			차원 해석 기법에 의한 용접기 불티 특성 분석			
		용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험	이미지 분석에 의한 불티 입자의 크기 분포 측정	실험 데이터 분석 보고서 1건	18.75	100 %
			용접 조건에 따른 불티 입자의 평균 온도 및 가연물 착화시간 측정			
			불티 입자 특성(평균크기, 비산 거리)을 고려한 운동량 해석	SCI(E) 1편	12.5	100 %
2차년도	2020	불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축	불티의 비산 조건을 고려한 실험실 규모의 용접기 제작	실험장치 제작 1건	15%	100%
			불티 특성의 정량적 측정 방안을 고려한 테스트 베드 구축			
		포집기 내부 유동 현상 해석 및 불티 흡입 조건 분석	불티 포집기 격자망 및 필터의 규격에 따른 내부 유동 해석	SCI(E) 1편	20%	100 %
			불티 입자 특성을 고려한 흡입 유량 설계값 산출			
			불티 비산 거리에 따른 포집기 유동해석 및 흡입 조건 분석			
		불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가	불티 발생 조건을 고려한 포집기 효율 기초 실험	성능평가 자료 1건	25%	100 %
			불티 포집기 유무에 따른 가연물 화재 확산 실증 실험 및 성능 평가			

■ 공동연구기관 : 송현엘앤씨(주)

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치	달성도
1차년도	2019	용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구사례 조사	용접기 종류에 따른 불티 입자크기, 비산거리, 열원의 온도 관련 자료 구 축	DB 구축 자료 1건	18.75	100%
			기존 용접 가스 포집기의 불티 포집 시 필요한 성능 분석			
		건설현장 분류별 용접기 종 류와 가연성 물질의 환경 조건 분석	현장 공종별 주요 용접 작업과 주변 가연물 현장 조사	보고서 1편	12.5	100%
			현장 공종별 용접 지점과 가연물의 배치 조건을 고려한 화재 시나리오 제시	설계자료 1건	18.75	100%
2차년도	2020	불티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험	실험실 규모의 불티 포집기 제작	특허출원 1건, 노즐 시제품 제작 2건	25%	100%
			포집기 외부 유동 현상을 고려한 노 즐 형상 설계			
			불티의 정적 상태를 가정한 포집기 효율 기초 실험	특허출원 1건	15%	100%
		건설현장 조건을 고려한 포 집기 성능 향상 방안 분석	불티 포집기 현장 적용성 강화를 위 한 설계 변수 분석	보고서 1편	20%	100%
			설계 변수를 적용한 불티 포집기 제 작 및 기초 실험 결과 분석			100%

3-2. 관련 분야 기여도

(1) 본 연구개발은 용접 시 발생하는 불티의 입자 특성을 분석하여 건설현장에서 화재 확산의 위험성을 방지하기 위한 불티의 포집 기술을 개발하는데 주요 목적이 있음. 따라서 1차년도에는 용접 조건(정격 용량, 용접시간, 용접각도)을 고려한 불티 발생 장치를 제작하여 불티 입자의 크기분포와 비산 속도가 불티의 온도변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 2차 년도에는 불티의 입자 특성을 고려한 포집 장치의 원천 설계 기술을 개발하기 위해서 포집기의 구조, 필터의 압력 강하량과 흡입 유량의 상관관계 및 노즐 흡입부 자성의 특성에 관한 실험 연구를 수행하였음. 본 연구 결과를 통해서 제시한 불티 온도 예측 모델과 불티 흡입률 상승을 고려한 설계 자료는 포집기 제품을 개발하는데 유용할 것으로 판단됨.

(2) 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
가연성 물질의 열화학적 특성을 고려한 불티의 점화 조건 분석	■ 과제계획서에서 제시한 가연성 물질 5종의 목표치를 현장 공종별 주요 가연성 물질로 구분하여 열화학적 특성 분석에 관한 자료를 구축하였으며 불티 점화조건과의 상관성을 분석하였으므로 기존 목표대비 100% 이상을 달성한 것으로 평가하고 있음.
용접기 종류 및 불티 입자를 고려한 주요 매개변수 이론정리	■ 아크 용접에서 발생된 불티입자의 열적 특성에 관한 이론 결과를 1차년도 SCIE급에 논문을 게재한 상태이며, 2차년도 실험결과를 분석하여 SCIE급 논문에 제출한 상태임. 본 여구 결과는 건설현장 화재 확산 방지를 위한 가이드라인을 제시할 것으로 기대하고 있음.
용접 조건에 따른 불티 입자의 분포, 크기, 열원, 가연물 착화시간 등 기초 실험	■ 기존 연구사례를 조사한 결과 용접 조건(전기, 용접모재, 시간, 위치 등)을 고려한 불티입자의 분포 특성에 관한 연구는 매우 부족한 상태로 본 연구 보고서에서 제시한 사항은 매우 중요한 기초 연구자료로 평가하고 있음.
불티 발생용 Lab-scale 테스트 베드 구축	■ 아크용접에 해당하는 SMAW방식은 용접봉과 모재, 용접봉 공급 전력 및 용접 시간 등 작업 환경에 따라서 불티 발생 의존도가 높은 공정에 해당하며, 본 여구에서 특허 등록한 테스트베드는 불티의 정량적 평가를 위해서 유용성이 있는 실험장치로 판단하고 있음.
포집기 내부 유동 현상 해석 및 불티 흡입 조건 분석	■ 불티 특성에 관한 정량적 결과를 바탕으로 포집기의 불티 제거율에 관한 기초 연구를 수행하였으며, 포집 성능 향상을 위해서 필터와 자성 그리고 구조 분석에 의해서 개발된 포집기 개발을 위한 설계 자료를 구축하였음. 본 연구 결과는 건설현장에 적합한 포집기 제작을 위한 기초 자료의 활용이 높을 것을 사료됨.
불티 발생 조건에 따른 포집기 실증 실험 성능 평가	■ 포집 성능 향상을 고려한 시제품 개발을 통해서 불티 기초 성능 실험을 실시하였으며, 그 결과 5kgf이상의 자성 및 콜케이트 필터를 적용한 경우 화재 확산 위험성이 최소화 되는 결과를 확인 하였음. 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 공인기관의 현장 시험을 실시하였으며, 결과의 검증을 완료한 상태임. 따라서 최적의 포집기 형상 및 자성 그리고 기공률을 고려한 필터를 장착한 시제품 개발에 본 연구 결과는 매우 중요한 자료로 평가하고 있음.
용접기 종류에 따른 불티 특성 기존 연구 사례 조사	■ 시장조사 결과 포집기의 경우 용접 흡 및 가스만 단독 흡입 가능한 국소배기 장치가 주를 이루고 있으며 용접 불티 흡입 장치는 아직 국내에 개발된 사례 없음. 따라서 기존 포집기의 성능 분석 자료 등은 기초원천 기술 개발에 유용할 것으로 예상하고 있음.

건설현장 분류별 용접기 종류와 가연성 물질의 환경 조건 분석	■ 불티 특성 분석과 동시에 1차 년도 예비 테스트 용으로 시제품을 제작하고 성능을 정성적으로 비교 분석하였으며, 불티를 포집하기 위해서는 2차 년도 연구 개발(흡입구 적합 면적 산출 및 풍량속도 계산, 불티 및 흙 그리고 가스 흡입 및 필터링 가능한 콜 게이트 카본 필터 적용 방안 및 설계 제시 등)에 집중할 필요가 있는 것으로 판단됨.
불티 포집기 흡입부 노즐 형상 제작 및 기초 실험	■ 노즐의 형상을 분석한 결과 부손실을 최소화 할 수 있는 유선 형태의 길이/직경비가 5 이상인 제품이 흡입기에 적합한 것으로 판단되나, 길이가 증가하는 경우 현장 적용성은 낮아질 수 있는 것으로 판단됨. 따라서 기존 양산되고 있는 유선형태의 길이/직경비가 5 이하인 제품을 적용하는 것이 효율성이 높은 것으로 판단하고 있음.
건설현장 조건을 고려한 포집기 성능 향상 방안 분석	■ 포집기 성능 향상은 크게 3단계(구조, 자성 및 필터)로 구분하여 기초 실험을 수행하였음. 특히, 용접 조건에 따라서 정량적으로 제시한 불티 발생량에 대한 포집기 제거율의 기초 자료를 구축하고 검증을 완료한 상태이며, 본 연구에서 제시한 성능 향상 방안은 포집기 시제품 개발을 위한 설계의 활용이 요용한 것으로 판단됨.

<본 연구 보고서 용어 참고>

※ 용접가스 : 용접 과정에서 아크열 등에 의해서 발생하는 기체

※ 용접 흙 : 용접 과정에서 발생하는 기체가 대기중 냉각 과정을 통하여 미립화된 고체

4. 연구개발성과의 활용계획

(1) 용접 불티의 화재 확산 방지를 위한 건설 현장 작업 환경 개선

- 본 연구 과제를 추진함에 따라서 건설현장의 공종별 용접기의 종류 및 화재 위험성을 최소화하기 위한 용접 작업 환경의 분석이 가능하며, 용접 작업 시 발생하는 용접부산물, 용접 불티, 슬래그, 용접흄, 가스 등의 포집 기술을 개발하고 건설현장에 적용함에 따라서 근로자의 작업 환경 개선에 활용이 가능할 것으로 판단됨.

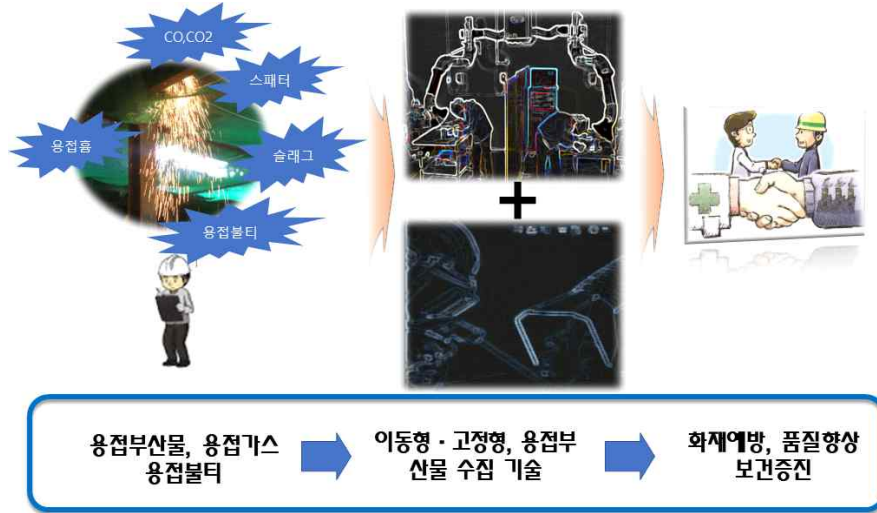


그림 4-1. 용접 불티의 화재 확산 방지를 통한 근로자의 작업 환경 개선

(2) 건설 현장 용접작업 특성에 따른 불티 포집 기술 적용

- 건설현장에서 용접작업으로 인해서 화재가 발생할 수 있는 위험성은 용접작업의 형태, 용접기 종류, 용접 위치와 공간(상하동시작업, 간섭작업 등) 등 건설 현장의 공정별로 다르게 발생함. 따라서 본 연구 과제로부터 개발하고자 하는 용접 불티 포집 기술은 현장 공종별로 다양하게 적용되는 효과를 기대할 수 있음.

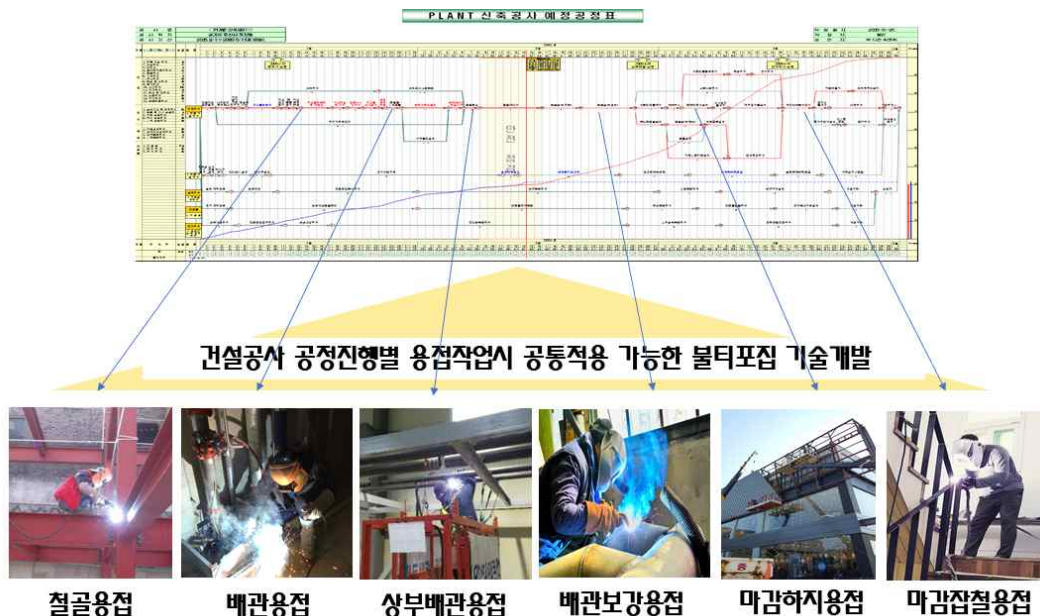


그림 4-2. 건설공사 공정진행별 용접 작업시 공통적용 가능한 불티포집 기술

4.1 기대효과

<기술적 측면>

(1) 용접 불티 기초 분석에 의한 미립자 특성 자료 제공

- 본 연구팀은 선행 연구사례로 수막설비에서 사용하고 있는 노즐의 형상과 액적 분포의 상관관계를 분석하였으며, 용접 불티의 입자 특성에 관한 기초 실험을 수행함에 따라서 도출되는 자료는 미세 입자 특성을 연구하는 기초 학문 분야에서 유용한 주제로 판단됨.

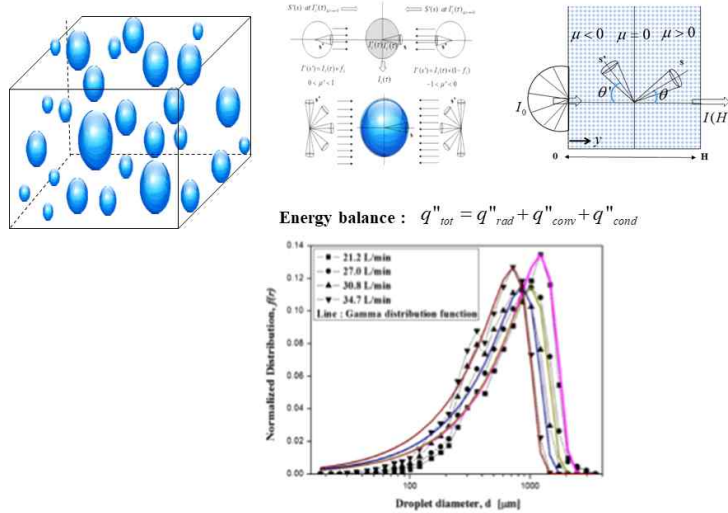


그림 4-3. 노즐의 형상과 액적 분포의 상관관계 분석

<경제·산업적 측면>

(1) 시장경제성

- 대한건설협회 「종합건설업조사」 자료에 따르면 2018년 종합건설업체의 기성액은 약 180조 정도임.

□ 종합건설업체수 및 국내건설 계약액·기성액 추이

(단위 : 개사, 억원, %)

년도	업체수	계약액	기성액
'03년	12,996	934,705	991,182
'04년	12,988	838,668	1,109,158
'05년	13,202	1,031,532	1,125,967
'06년	12,914	1,088,696	1,137,294
'07년	12,842	1,577,273	1,254,245
'08년	12,590	1,373,943	1,343,377
'09년	12,321	1,225,557	1,366,147
'10년	11,956	1,240,848	1,346,996
'11년	11,545	1,288,520	1,329,987
'12년	11,304	1,322,528	1,343,203
'13년	10,921	1,260,123	1,397,766
'14년	10,972	1,366,996	1,382,227
'15년	11,220	1,824,985	1,501,945
'16년	11,570	1,620,155	1,656,680
'17년	12,028	1,478,801	1,834,062
'18년	12,651	1,419,169	1,801,080
증감률	5.2	-4.0	-1.8

※ 자료 : 대한건설협회 「종합건설업조사」

- 화재예방을 위해 불티포집기의 투자가 현실적으로 가능한 도급순위 1위에서 50위까지의 2018년 기성액은 약 80조 정도로 산출할 수 있음.
- 또한, 도급순위 2018년 8위 L사의 매출대비 현장갯수는 연간매출 약 6조 정도임.
- 따라서 종합건설업체의 기성액의 총액에서 현실적으로 투자가 가능한 건설업체의 기성액을 고려하면 불티포집기의 투자가 현실적으로 가능한 건설현장은 연간 평균 600개소 정도로 가정할 수 있음.
- 건설현장 당 평균공사금액 약 500억 정도로 가정하면 용접팀은 철골, 설비, 마감으로 수요예측 시 철골 5팀, 설비 8개팀, 마감(잡철공사) 7개팀 총 20개 용접팀에 불티포집기 배치시 500억 현장 당 20개 정도 사용가능함.
- 현재 시중에서 판매되고 있는 용접 가스 포집기 개당 판매 가격과 불티보집장치의 기술개발을 고려

하여 100만원으로 산정 시 건설 현장 당 2,000만원 정도로 산출할 수 있음.

- 따라서 최종 불티포집기의 투자가 현실적으로 가능한 국내 건설현장은 연간 평균 600개소이므로 시정성은 120억 규모 정도로 판단됨.

구 분	'18 년도				'19 년도			
	건 수	금 액	구성비	증감률	건 수	금 액	구성비	증감률
토 목	31,626	314,089	17.4	-4.1	33,607	324,683	18.2	3.4
도 로 교 량	8,336	80,401	4.5	-16.2	8,736	87,414	4.9	8.7
터 널	331	11,895	0.7	6.8	333	10,550	0.6	-11.3
공항·철도·지하철	587	34,661	1.9	-7	626	31,149	1.7	-10.1
댐·항만	1,157	19,506	1.1	12.7	1,129	20,475	1.2	5
치수·하천 및 운하	1,740	12,076	0.7	-8.8	1,719	11,854	0.7	-1.8
상·하수도	2,012	19,028	1.1	5.7	2,276	20,350	1.1	6.9
정수장·관개수로	961	6,790	0.4	-4	991	8,764	0.5	29.1
간척, 택지, 농업용지 조성	1,884	41,378	2.3	-4.1	1,943	42,257	2.4	2.1
기타(치산, 사방 등)	14,618	88,343	4.9	4.5	15,854	91,859	5.2	4
건축	57,997	1,343,811	74.6	-0.7	63,678	1,311,343	73.7	-2.4
단독·연립주택	6,660	48,806	2.7	-6.1	7,693	49,515	2.8	1.5
아파트	9,540	684,640	38	-3.2	3,603	518,750	29.1	-24.2
호텔·숙박시설	1,155	34,313	1.9	-23.1	1,033	33,279	1.9	-3
상업용건물	4,831	77,513	4.3	0	12,013	184,389	10.4	137.9
사무용빌딩	3,528	120,159	6.7	1.7	3,553	128,257	7.2	6.7
학교	2,919	30,591	1.7	4.6	3,397	35,738	2	16.8
관공서건물	2,981	29,839	1.7	-5	3,244	32,047	1.8	7.4
병원	1,049	22,050	1.2	19	988	19,357	1.1	-12.2
공장·작업장건물	10,962	172,175	9.6	15.7	11,981	171,011	9.6	-0.7
창고·차고·터미널용 건물	2,421	31,363	1.7	-1.7	2,826	35,530	2	13.3
중교용건물	757	8,911	0.5	14.3	862	9,132	0.5	2.5
기계기구설치	87	4,759	0.3	-19.8	84	1,695	0.1	-64.4
기타	11,107	78,680	4.4	-2.2	12,401	92,632	5.2	17.7
산업환경설비	1,727	112,085	6.2	-6.7	1,674	117,162	6.6	4.5
조경	4,443	31,094	1.7	-5.5	4,401	26,853	1.5	-13.6
합계	95,793	1,801,080	100	-1.8	103,360	1,780,041	100	-1.2

(2) 산업화 방안

▪ 용접 불티 포집기술의 실용화 계획

- ▶ **규격** : 현재 불티포집기는 용접부 20cm범위 포집시 약 50%의 불티가 포집되는 성능 확보(실내 용접 작업시 포집율을 70%)한 상태이나 20cm 이격거리를 작업이 편하게 이뤄질 수 있는 30cm까지 늘려서 성능이 발휘될 수 있도록 개선 필요
- ▶ **가격** : 건설현장마다 화재안전기준을 준수하는 방식이 일부 상이하지만 5대 메이저 건설사 기준으로 용접작업시 투입되는 비용을 살펴보면, 용접작업시 화재감시자 1명(12만원/일), 소화기 3.3kg 2대 20m 마다 20kg소화기(30만원), 하부 또는 측면 불티방지포 설치(21만원), 방화수 배치 등의 비용이 투입된다고 보면 대략 63만원 정도가 용접작업 한 포인트에 대한 시작시 투자비용으로 볼 수 있음. 따라서 향후 불티포집기를 투입시 가격은 50~100만원 이내로 하면 불티방지포 등의 부수적인 비용을 사용하지 않고 아낄 수 있으므로 실제 투자되는 비용이 현재 용접작업시 투자되는 비용의 20~25% 이내에서 해결될 수 있음.
- ▶ **시장진입장벽** :
 - ⇒ 용접 종류 및 위치(위보기, 아래보기, 수평자세, 수직자세 등)에 따른 용접 불티의 특성 검토 후 결과 제시 필요.
 - ⇒ 현장 적용성 제고를 위해 경량성, 조작성, 이동성 등을 고려한 용접 불티 포집기의 개선방안 제시 필요.

현재 포집기의 무게는 60kg정도로 2인1조로 들기에 어려운 부분이 있음. 따라서 무게는 50kg이내로 2인이 이동시킬 수 있는 무게로 제작되어야 함, 특히 건설현장 용접작업 중 상부배관 용접시 테이블리프트를 활용하는 경우가 가장 많으므로 가장 많이 사용되는 높이 9.7m 테이블리프트의 폭인 1.10m에서 포집기가 설치되고 용접사가 지나다닐 수 있는 폭이 나와야 하므로 현재 0.67m 폭은 가능할 수는 있으나 0.6m 이하로 포집기 폭을 줄이고 주름관과 노즐을 길게하여 조정될 수 있는 방안이 필요함

<기대효과>

(1) 용접 불티 포집 기술의 상용화에 따른 신규 시장 및 인프라 구축

- 용접에 대한 현재 국내외 포집기술은 고정된 장소에서 용접시 발생하는 가스(fumes)에 한정하여 일부 상용화 되어 있으나 화재 확산의 주요 인자인 불티를 포집하는 기술은 없는 상태임. 또한 용접작업시 화재감시자 1명(12만원/일), 소화기 3.3kg 2대 20m 마다 20kg 소화기(30만원), 하부 또는 측면 불티방지포 설치(21만원), 방화수 배치 등의 비용이 투입됨. 불티 포집기를 적용시 관리해야 하는 인력을 화재감시자로 할 경우 포집기 비용만 추가되면서 화재예방에 대한 강화를 할 수 있는 측면이 있으나 불티포집기의 성능을 향상시킨다면 불티방지포 등의 부수적인 비용을 사용하지 않기 때문에 실제 투자되는 비용이 현재 용접 작업시 투자되는 비용의 20~25% 이내에서 해결될 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 용접시 발생하는 모든 부산물에 대한 포집 기술을 적용하여 휴대성 있는 제품이 개발될 경우 국내뿐만 아니라 국외 건설 현장에서도 용접 산업의 신규시장 형성 및 인프라 구축이 가능할 것으로 판단됨.

(2) 건설현장 화재피해 저감을 통한 인적·물적 피해 감소로 국가경쟁력 제고

- 본 연구에서 개발하고자 하는 용접 불티의 포집 기술은 향후 대형 건축물 등의 용접 작업 시 활용하는데 목적을 두고 있으며, 현재의 불티 포집기는 용접부위 20cm 범위내에서 포집 시 약 50%의 불티가 포집되는 성능을 보이고 있음. 이를 실제 용접작업에 적용시키기 위해서는 실외를 제외한 실내 용접 작업 시 포집 효율을 70% 이상으로 높일 수 있는 성능으로 개선되어야하여 20cm 이격거리를 작업이 편하게 이뤄질 수 있는 30cm까지 늘려서 성능이 발휘될 수 있도록 개선하는 작업이 필요함. 이로 인한 기대 효과는 건축 현장에서 다양한 화재발생 요인을 차단하여 화재피해를 최소화하고 인적·물적 피해를 감소하여 국민의 생명과 건강 그리고 재산을 보호하는데 기여할 것으로 사료됨.

5. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 용접은 같은 종류나 다른 종류의 금속 재료에 열과 압력을 가하여 고체가 서로 결합이 되도록 접합하는 방식으로 용접과 압접 그리고 납땜으로 구분할 수 있음 [26-28]. 용접은 용접봉에 전력을 가하여 열원을 발생시키고 금속이 녹는점 이상에 도달하여 접합되는 방법임. 용접은 가스아크용접 gas metal arc welding(GMAW)과 피복아크용접shield metal arc welding (SMAW)로 구분하고 있음 [29-31]. GMAW는 연속성을 가진 용접봉과 작업 지점 사이에 플라즈마 아크를 사용하는 공정임 [32, 33]. SMAW의 경우 건설 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 아크 용접공정임 [34]. SMAW는 탄소강, 합금, 니켈, 구리합금 등의 금속과 용접봉 사이에 전력을 공급하여 열원을 발생시켜서 용접을 수행함 [34-37]. 하지만 결합되지 않은 고온의 금속 표면은 아크 방전의 고온으로 인하여 떨어져 나가며 수많은 입자가 발생되며, 이 과정에서 가연성 물질로 불티가 비산하여 발화점 이상에 도달하게 되면 가연성 물질이 착화하여 불티로 인해서 화재가 확산될 수 있는 위험성이 있음.
- 건설현장에서 SMAW 불티에 의한 화재 위험성은 인화성 유증기나 액체가 채류할 수 있는 배관 또는 밀폐 공간으로 불티가 비산하여 유증기에 착화되는 경우[34-39]와 발포 우레탄이나 샌드위치 패널 등 가연성 소재가 위치한 곳으로 불티가 비산한 후 축열에 의해서 나타날 수 있음 [41-45].

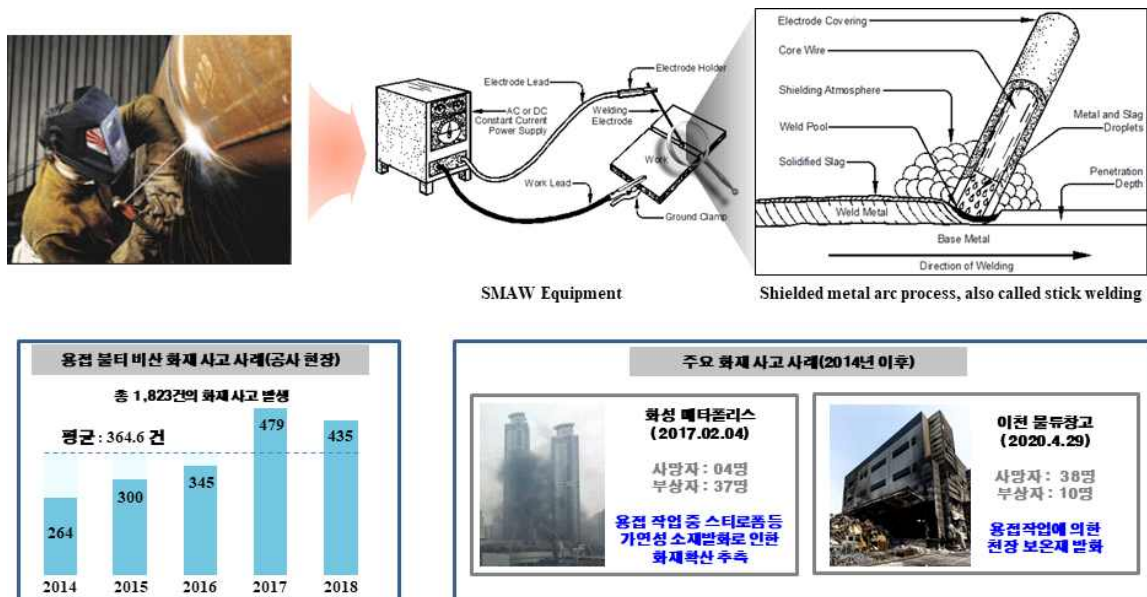
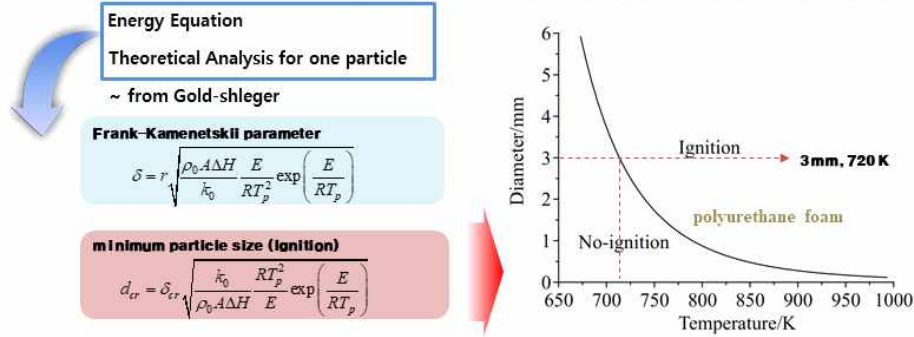


그림 5-1. 비산된 불티에 의한 화재

- 기존 연구사례에 따르면 아크 용접 등에 의해서 발생하는 불티 중 발화원이 될 수 있는 입자의 크기는 0.1 ~ 3 mm 정도이며, 작업 지점으로부터 수평방향으로 최대 11~15 m 정도까지 비산될 수 있는 것으로 보고되고 있음 [45-48]. 또한, 용접 불티에 의하여 발생한 화재 사고가 증가한다고 보고되고 있음 [49,50]. 따라서 불티 입자 분포의 열적 특성 분석은 화재공학 분야에서 매우 중요한 주제 중 하나임.

- ✓ 고온 금속 입자가 가연물에 비산 시 화재확산에 대한 위험성을 예측하기 위하여, 알루미늄 입자의 비산 중 온도, 온도에 따른 수직 수평 이동거리, 입자 크기와 온도 변화에 따른 화재 확산의 상관관계를 분석



The limitation of this study

1. Mechanical energy generation and thermal & Number density
2. Complicated model

그림 5-2. 불티 입자 분포의 열적 특성 분석

- S. Brandi et al.은 SMAW 매개변수(전류, 극성, 위치)와 용접봉(재료, 직경)에 따른 입자의 크기 분포 실험 및 불티 입자는 물에 채취한 후 슬래그 커버 제거하여 크기 분포 분석하였음.

Metal Transfer Mode Classification

- ✓ 국제 용접 연구소⁽¹⁾는 1977년도에 금속 비산에 대하여 자유비행 (free flight), 브리징(bridging), 슬래그 보호이행(slag-protected transfer)로 분류

Designation of Transfer Type	Welding Processes (Examples)
Free flight transfer	
Globular	Low-current GMA CO ₂ shielded GMA
Spray	Intermediate-current GMA Medium-current GMA High-current GMA SMA (Coated electrodes)
Explosive	
Bridging transfer	Short-arc GMA
Short-circuiting	Welding with filler wire addition
Bridging without interruption	
Slag-protected transfer	SAW
Flux-wall guided	SMA, Cored-wire, Electroslag
Other modes	

Techniques in Observing Metal Transfer

- ✓ 비산 측정을 위하여 직접적 방법과 간접적 방법으로 분류
- ✓ 직접적 방법: 사진, 영상, 고속촬영
- ✓ 간접적 방법: 금속판 퇴적, 이중 전극, 탄소전극에 대한 퇴적 (전력에 의존)
- ✓ 기타: 오실로스코프, 음향신호

Techniques	Advantages	Disadvantages
High-speed video and cinematography	Direct observation of droplet transfer Independent of optical resolution	Complex experimental setup Flash lighting time Imprecise droplet size measurement Inability to distinguish droplets
Photography	Direct observation of droplet transfer Simple experimental setup Good optical resolution	Flash lighting time Imprecise droplet size measurement Inability to distinguish droplets Inherent observation and correlation
Current and voltage monitoring	Simple experimental setup Large sampling possible	Transfer rates difficult to correlate Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets
Deposits on metal plates	Direct observation of droplet transfer Physical evidence of individual droplets Large sampling possible Simple experimental setup	Standardized working Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets
Double electrode	Direct observation of droplet transfer Simple experimental setup Large sampling possible	Standardized working Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets
Carbon electrode	Direct observation of droplet transfer Simple experimental setup	Standardized working Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets Inability to distinguish droplets

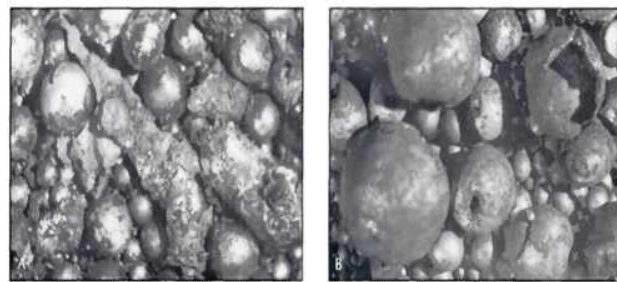
Experimental Procedure

- ✓ 각각의 용접봉을 사용하여 실험 전류
- ✓ 불티 입자는 회전하는 원반에 의하여 자가온 물로 분출하여 수거 (rpm : 890, 원반과 접촉하는 동안 응결 또는 파편이 관찰되지 않기 때문⁽⁵⁷⁾)
- ✓ 물방울의 수분을 제거한 후 모르타르등을 사용하여 슬래그 커버 분리 -> 자력으로 금속 입자 분리
- ✓ 입자는 표준 미립자 처리 기법(ASTM Standard B-215)에 따라 크기 분포 (4.75 mm, 2.80 mm, 2.00 mm, 1.40 mm, 1.00 mm, 805 μm, 500 μm의 메쉬망으로 거르는 방법)

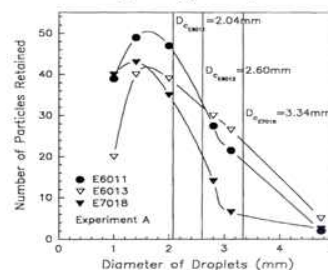


welding equipment setup showing the SMAW electrode and the rotating copper disk

Experiment Designation	Electrode Diameter (mm)	Welding Current (A)	Welding Position	Polarity
1	4	150	F	+
2	4	200	F	+
3	4	250	F	+
4	4	150	H	+
5	4	200	H	+
6	4	250	H	+
7	4	150	F	-
8	4	200	F	-
9	4	250	F	-
10	4	150	H	-
11	4	200	H	-
12	4	250	H	-
13	4	150	F	+
14	4	200	F	+
15	4	250	F	+
16	4	150	H	+
17	4	200	H	+
18	4	250	H	+
19	4	150	F	-
20	4	200	F	-
21	4	250	F	-
22	4	150	H	-
23	4	200	H	-
24	4	250	H	-



Material deposited from a shielded metal arc welding electrode. A — Metal droplets, metal droplets covered with slag, and slag particles; B — metal droplets after slag removal



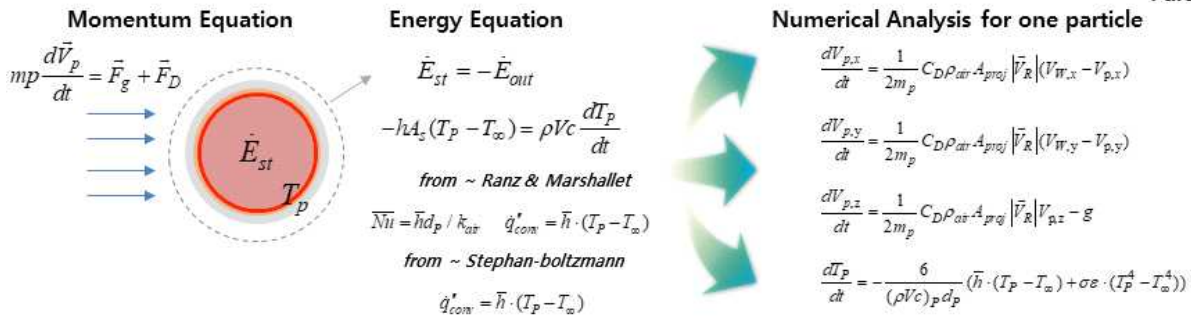
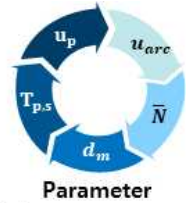
Metal size distribution determined for Experiment A to illustrate the larger number of small particles generated by an E6011 electrode

그림 5-3. SMAW 용접의 매개변수 관련 기존 문헌

- Wang 등은 GMAW의 해석결과를 검증하기 위하여 high-speed photography, laser-shadow imaging 등을 사용하였으며, 그 결과 입자의 전기 및 열에너지와 drag effects를 고려하지 않았음에도 불구하고 실험결과와 광범위하게 일치함 [22].

Tse et al. On the Flight Paths of Metal Particles and Embers Generated by Power Lines in High Winds—a Potential Source of Wildland Fires(1998)

- ✓ 운동량 방정식의 항력계수를 적용한 비산 속도와 Ranz & Marshall의 대류 및 Stefan-Boltzmann의 복사 열전달 방정식을 고려한 에너지 방정식을 Coupling 하여 시간에 따른 입자 크기 별 온도 변화 예측



The limitation of this study

1. Mechanical energy generation and thermal
2. Number density

그림 5-4. GMAW 용접의 매개변수 관련 기존 문헌

- Hu 등은 GMAW 공정 중 용해된 용접 불티 및 아크 플라즈마의 열전달 및 유체흐름을 분석하였다. GMAW 불티입자의 및 변형된 용접 풀 표면의 특성을 예측하기 위하여 Gaussian profiles 모델을 제시하였으며, 선행 연구결과 중 자유 낙하하는 입자의 온도, 속도, 압력 등에 대하여 일치한 해석결과를 도출함[7]. 그러나 SMAW의 입자 분포 및 열특성은 작업자의 용접 능력이나 작업 조건에 영향을 받으며, GMAW에 비하여 용접봉이 두껍고 비연속성의 특징을 가지기 때문에 기존 연구사례가 매우 부족하다 [12]. 따라서 용접 불티의 열적특성은 (화재공학분야에서) 많은 차이가 나타난다. GMAW는 가스 와 플라즈마 등의 열원을 사용하며 얇은 용접봉이 연속되어 공급되기 때문에 상대적으로 불티 입자가 작음. 하지만 SMAW는 두꺼운 용접봉을 사용하기 때문에 비교적 큰 입자가 발생한다[4-6]. 또한 기존 연구를 통하여 GMAW의 용접 불티의 비산 특성을 예측할 수 있지만, 아직까지 복잡한 계산과정을 통하여 비산 특성에 대한 수치적 결과를 분석 할 수 있기 때문에 화재확산 위험성 분석을 진행하는데 시간이 많이 소모될 수 있음. 그 밖의 연구사례를 정리하면 아래의 그림과 같음.

- 현재까지의 연구사례를 분석한 결과 용접 과정에서 발생하는 불티는 작업환경 조건에 따라서 달라질 수 있으며, 그 중에서도 용접봉에 전달되는 전력의 크기와 용접 시간 등은 불티의 표면 온도를 상승시키는 중요한 원인중 하나로 판단됨. 하지만, 불티를 입자로 가정하여 예측 모델을 제시한 연구 자료는 현장에서 쉽게 적용하는 데에는 한계가 있으며, 경계 조건에 따라서 비산 속도와 표면온도의 차이가 크게 발생할 수 있는 것으로 사료됨. 따라서, 용접 불티의 열적특성 및 SMAW 입자 분포 특성에 의해서 용접불티의 표면 온도를 예측하기 위한 단순화된 모델의 연구 개발이 필요한 상태임.

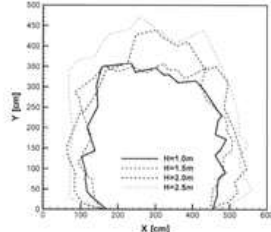
S, R, Lee et al.(2012)

"An Experimental Study on the Fire Risk at Welding - Cutting Process", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 39-45, 2009.

SMAW 인버터 용접기를 사용하여 비산되는 불티의 온도, 비산 분포, 가연물 착화성을 전류변화, 작업높이 그리고 가연물의 종류에 따른 실험을 수행하여 위험성 분석



Thermal photograph



Spread range of welding cinders



Distribution of welding cinders



Photograph of an experiment

입력전류 (A)	온도 (℃)	
	모재	비산된 불티
50	750	350
75	1,300이상	450

입력전류 (A)	불티크기 1.5mm 이상		최대 비산거리 (cm)
	갯수	최대직경 (mm)	
50	14	3.47	50
75	14	3.36	30
100	58	4.49	64
125	95	3.43	70

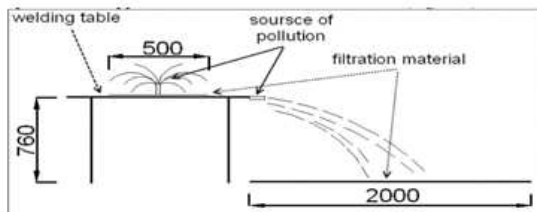
종류	용접 실험		절단 실험	
	실험	착화	실험	착화
건축	4	0	5	5
방진막	3	0	2	2
부직포	2	2	2	2
우레탄폼	4	1	2	2
비닐	3	1	3	2
종이(A4)	4	2	4	2

입자의 크기 분포 및 운동량에 대한 연구 부족

Ksenia.I, Strelets et al.(2014)

"Welding spark parameters determination for cyclone removal calculation", *Advanced Materials Research*, Vol. 941-944, pp. 2098-2103, 2002.

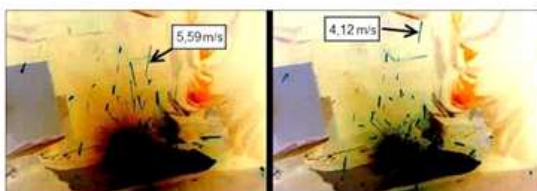
용접 불티 비산에 의한 화재를 예방하기 위해 자유낙하 불티의 비산 온도 및 속도를 측정하여 불티 포집 기술(Cyclone removal)의 가능성 검토



Experimental scheme of diameter determination

Nº	w, m/s	Nº	w, m/s	Nº	w, m/s	Nº	w, m/s	Nº	w, m/s
1	6,25	11	4,38	21	4,00	31	3,83	41	2,95
2	3,75	12	5,50	22	4,69	32	4,25	42	3,50
3	6,00	13	4,00	23	5,00	33	5,00	43	5,83
4	4,50	14	3,75	24	5,08	34	4,75	44	4,38
5	3,50	15	4,25	25	4,64	35	4,25	45	3,94
6	3,61	16	4,25	26	5,17	36	4,75	46	5,13
7	5,42	17	4,00	27	4,06	37	3,50	47	4,93
8	4,06	18	3,75	28	3,38	38	5,75	48	4,06
9	3,75	19	4,00	29	3,45	39	4,25	49	3,72
10	3,89	20	4,25	30	3,30	40	3,75	50	6,64
W_{mean}	4,41	W_{mean}	4,21	W_{mean}	4,41	W_{mean}	4,57	W_{mean}	4, W_{mean}
4,4 m/s									

Welding sparkings free falling velocity determination



Frame digital processing of welding

불티의 발생량, 크기분포, 밀도수, 방향에 대한 연구 부족

그림 5-5. 용접의 매개변수 관련 기존 문헌

Tanaka et al. (1977)	아크 용접과 oxyacetylene의 용접조건에 따라서 입자의 크기 분포, 입자 개수 및 불티의 온도 측정 용접 불티의 초기 온도가 3,500 ℃로 측정되었으며, 1m 비산 시 약 2,500 ℃로 냉각되는 것을 확인 관측된 입자온도 불일치는 용접 작업의 매개변수 및 측정 기법의 차이로 판단
Kinoshita et al. (1989)	열화상 카메라를 사용하여 SMAW 불티 입자가 작업물에서 비산 시 냉각 과정을 분석하였으며, 작업물 근처에서 1,850 ℃, 작업물 1m 아래에서 1,592 ℃로 측정 연구에서 언급되었듯이 프레임의 한계로 입자 크기는 분석 할 수 없었으며, 온도 또한 기존 단순화된 대류 냉각 모델과 차이가 나타나며, 시험 방법 및 측정 기법에 따라 차이가 나타날 수 있다고 시사됨
Hagimoto et al. (1998)	SMAW 불티입자의 크기와 비산 거리를 측정하였으며, 총 입자 중 약 90%가 0.074mm 이하의 크기 분포로 측정 됨 약 15%의 입자만 1.0mm를 초과하여 비산하는 것을 확인. 또한 용접봉의 크기 변화에 따른 입자 온도 및 입자 개수에 대한 실험 결과 입자 온도는 차이가 분명하게 나타나지 않았으며, 입자 개수만 증가 가연물 착화 실험을 수행하여 화재 위험성 정량화 하였지만, 입자 크기에 따른 분석만 수행

Combustible Material	Time to Ignition	Particle Diameter [mm]
Urethane Foam	Immediately	0.9
Styrene Foam	3-4 seconds	1.3
Cotton Wool	Immediately	0.9
Acrylic Wool	Immediately	1.1
Cotton Cloth	5-6 seconds	3.1
Wood Shavings	1-5 seconds	1.9
Saw Dust	Smoldering after 4-5 seconds	1.5
News Paper	4-5 seconds	2.5
Corrugated Paper	7-8 seconds	2.5
Ethyl Alcohol	Immediately	1.1
Gasoline	Immediately	1.4
Kerosene	No Ignition	1.5
Kerosene with Cloth	Immediately	1.3
Light Oil	No Ignition	2.0
Light Oil with Cloth	Immediately	1.9

Combustibles ignited from height of 3.5 m
Ignition Study Performed by Hagimoto et al.

**입자의 특성 (크기분포 및 밀도수, 대류열전달계수
영향, 운동량)에 대한 연구 매우 부족**

Choi et al. (1998)	GMAW를 사용하여 150A와 300A 전류 조건에서 VolumeOf Fluid(VOF)를 사용하여 불티 입자의 운동량 해석. 각각의 전류 조건에서 비산 속도와 압력, 입자 크기에 대하여 기존 문헌[Kim et al.]과 비교하였으며 일치하는 결과가 나타남
Wang et al. (2003)	GMAW의 해석 결과를 검증하기 위하여 high-speed photography, laser-shadow imaging, and metallographic Analysis 등을 사용하여 분석하였으며, 입자의 전기 및 열적 조건이 가정되었음에도 실험과 광범위하게 일치
Song et al. (2014)	고온 금속 입자가 가연물에 비산 시 화재확산에 대한 위험성을 평가하기 위하여, 알루미늄 입자의 비산 중 온도, 온도에 따른 수직 수평 이동거리, 입자 크기와 온도 변화에 따른 화재 확산의 상관관계들 분석

**SMAW 용접 불티의 화재 확산 모델에
대한 기존 연구사례 매우 부족**

GMAW와 SMAW의 차이점

1. 용접 작업의 연속성
2. 자동화의 한계

Y. S. Kim, T. W. Eagar, "Analysis of metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, 1991.

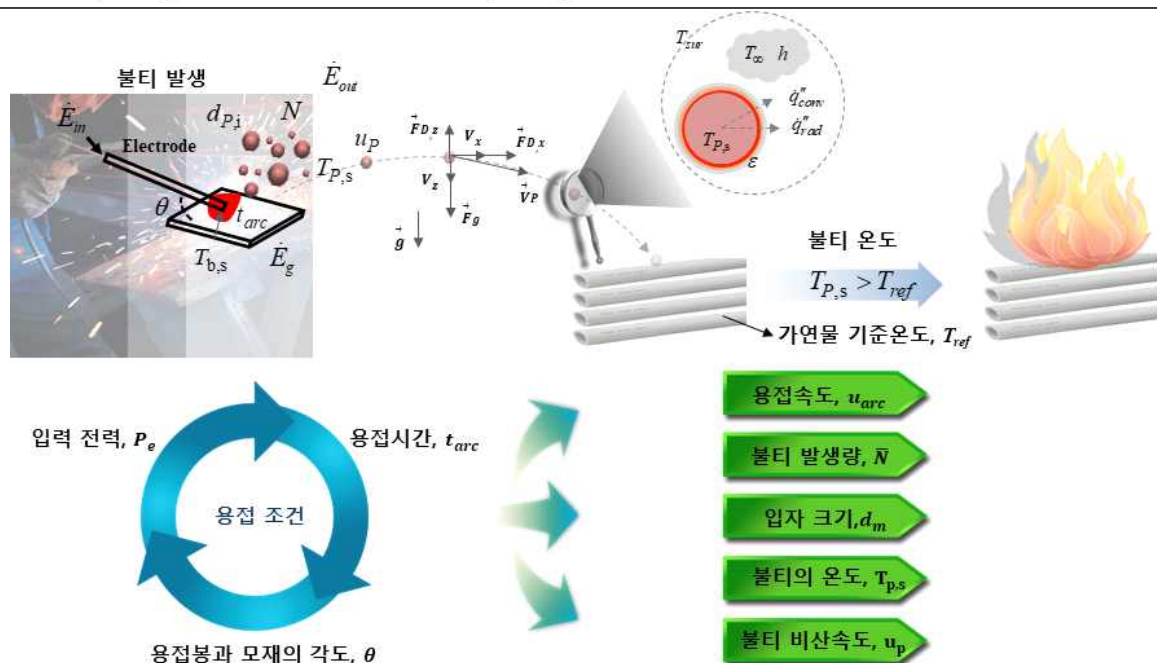


그림 5-6. 용접의 불티 매개변수

6. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	○ 본 연구 과제의 목적은 용접 불티 포집기술 개발을 위한 실험적·해석적 연구(TRL 1단계 ~ 4단계)로써 상용화 단계를 위한 원천기술 확보에 주요 목적이 있음. ○ 하지만, 용접 불티로 인한 건설현장 주변 가연물의 화재 위험성에 관한 실험 결과는 공공의 안전성을 위한 용도의 활용이 가능할 것으로 사료됨. ○ 따라서 본 과제의 결과물을 이용해 현장의 용접 불티로 인한 화재 안전성 향상과 포집 기술 개발의 활용에 사용될 수 있다고 판단하여 보안등급은 일반과제로 결정함.	

7. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 : 해당없음

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

8. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

(1) 연구실 안전조치 이행계획

- 연구실 일상점검
 - 연구개발 활동에 사용되는 기계, 기구, 전기, 약품 등의 이상 유무 및 관리상태를 매일 1회 이상 육안점검
 - 연구실 정기점검
 - 연구실의 기능 및 안전을 유지관리하기 위하여 연 1회 이상 연구실에 관한 안전점검 실시
 - 연구실 정밀안전진단
 - 유해·위험 물질 및 시설·장비, 독성가스 등 유해인자를 취급하는 연구실에 대하여 2년에 1회 이상 연구실별 안전환경관리자 주관 하에 정밀안전진단 실시
 - 연구실 일상점검 기록표 및 안전교육 일지 배치
 - 실험실 사고대응 매뉴얼(사고대응 행동절차 포함) 및 비상 연락망 구비
 - 실험실 사용에 있어 참여연구원의 교육훈련 및 보험가입 완료
 - 연구실 안전환경관리자: 집합교육 실시(신규교육, 보수교육)
 - 연구활동 종사자: 온라인교육 실시(국가과학기술인력개발원)
-

(2) 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황(해당 시 작성) : 해당없음

9. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Analysis of the Thermal Characteristics of Welding Spatters in SMAW Using Simplified Model in Fire Technology	동양대 학교	교신 저자	MDPI energies	2.702	2020.05.04	단독 사사	SCI
2	논문	Effect of Ignition Heat Source on Design Fire Curve of Polyethylene Foam in a Compartment Fire	동양대 학교	교신 저자	Case Studies in Thermal Engineering	4.02	2020.11.17	단독 사사	SCI
3	논문	The Effects of Welding Time and Supply Power on the Thermal Characteristics of Welding Spatters for Fire Risk Analysis	동양대 학교	교신 저자	MDPI energies	2.702	2020.12.04	단독 사사	SCI
4	특허	용접 불티 반자동화 실험 장치	동양대 학교	주체	한국		2019.11.04	단독 사사	출원
5	특허	공사 현장용 용접 불티 포집장치	송현엘 앤씨(주)	주체	한국		2019.10.28	단독 사사	출원
6	특허	용접 불티 반자동화 실험 장치	동양대 학교	주체	한국		2019.12.31	단독 사사	등록
7	학술대 회	용접 불티 입자의 비산 특성에 관한 기초 실험	동양대 학교	교신 저자	한국화재소 방학회		2019.11.14	단독 사사	발표
8	학술대 회	용접 불티의 비산 특성을 고려한 액체 가연물의 착화실험	동양대 학교	교신 저자	한국화재소 방학회		2019.11.14	단독 사사	발표
9	학술대 회	용접 불티 입자 크기 및 밀도 수를 고려한 화재 확산 위험성 평가를 위한 기초 연구	동양대 학교	교신 저자	산학기술학 회		2020.07.24	단독 사사	발표

10. 기타 사항 : 특이사항 없음

붙임. 참고문헌

- [1.01] 김규식 and 원충연. "[특집: 용접기술] 용접의 종류 및 원리." 전력전자학회지 4.2, pp. 14-19.(1999)
- [1.02] 임현술, and 정해관. "용접공에서 발생한 구리흡에 의한 금속열 1 레."
- [1.03] 강용선, et al. "조선업 용접작업장의 공기중 입자상물질 및 구성성분에 관한 연구." 한국산업보건학회지 17.3, pp. 245-253.(2007)
- [1.04] 사의환, 정성용, and 차형우. "자동 8 자 위빙 장치를 장착한 알곤 용접토치 및 제어장치의 개발." 대한전자공학회 학술대회, pp. 1954-1957.(2016)
- [1.05] 김철희, 문다빈, and 문숙정. "세계 용접재료시장 현황." 대한용접·접합학회지 30.5 pp. 4-8.(2012)
- [1.06] 조정호, 김철희, 강문진. "아크 용접." 기계저널 58.9, pp. 47-50.(2018)
- [1.07] 정성운, "용접 및 절단의 원인에 의한 화재통계 분석", 경북대학교 산업대학원, 금속신소재공학.(2015)
- [1.08] 이현, "용접작업 현장의 화재발생 방지에 관한 연구", 경기대학교 건설·산업대학원 : 소방·도시방재전공.(2012)
- [1.09] 양현민, 유희수, and 현승균. "SMAW 용접전원의 파형제어에 의한 저수소계 용접 특성 개선." 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집 pp. 85-85.(2015)
- [1.10] 김영국, et al, "화상 및 화재로부터 안전한 전기용접기 개발에 관한 보고서", 지식경제부 기술표준원, 대신산업.(2010)
- [1.11] 유지선, and 정영진. "폭발의 위험성에 의한 선박화재의 사고사례 분석." 한국화재소방학회 논문지 29.1, pp. 80-86.(2015)
- [1.12] 이근원, 권오승, and 하동명. "용접 불티 차단막의 방염 및 난연성능 평가." 한국화재소방학회 논문지 15.2, pp. 53-58.(2001)
- [1.13] 박영주, 홍이표, and 이해평. "마그네슘 분말의 발화 개연성에 관한 실험적 연구." 1. 한국방재학회 논문집 16, pp. 237-246.(2016)
- [1.14] 한일욱. "< 강연> 용접재료의 종류와 선정 기준." 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, pp. 1-39.(2009)
- [1.15] "화기작업 화재·폭발 예방 매뉴얼", 고용노동부, 안전보건공단.
- [1.16] 김희규, 박상현, and 정태호. "물류창고 화재분석을 통한 화재안전관리방안 연구." 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp. 598-605.(2009)
- [1.17] 이성룡. "용접·절단 작업시 화재위험성에 관한 실험적 연구." 한국화재소방학회 논문지 26.3, pp. 60-66.(2012)
- [1.18] 목연수, et al. "건설현장 화재예방에 관한 연구-용접작업을 중심으로." 한국안전학회지 (구 산업안전학회지) 17.2, pp. 69-75.(2002)
- [1.19] 한완석, 윤정미, and 공하성. "신축공사 중 건축물의 화재예방대책." 2012 년 대한안전경영과학

회 춘계학술대회. (2012)

- [1.20] 이영재, and 박형주. "공사현장의 경질 우레탄폼 노출면의 착화 및 화염확대 실증실험을 통한 착화방지공법 개발연구." 대한건축학회 논문집-구조계 29.7, pp. 83-91.(2013)
- [1.21] 이승호, and 이오걸. "화재 사고 종류에 의한 화재 예방 대책에 관한 연구." 대한전기학회 학술대회 논문집 pp. 189-191.(2013)
- [1.22] 이근원, 김관응, 이두형. "용접 불티 차단막 개발을 위한 섬유류의 적정 방염처리 방안 연구." 한국화재소방학회 논문지, 16.3, pp. 48-55.(2002)
- [1.23] 이의평. "고양종합터미널화재의 다수 사상자 발생원인 분석." 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp. 81-82.(2017)
- [1.24] 이의평. "고양종합터미널화재의 빠른 연소확대 및 연기확산 원인 분석." 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp. 77-78.(2017)
- [1.25] 소방방재청, "소방행정자료및통계".(2018)
- [2.1] J. Israelachvili, Intermolecular Surface Forces, Academic Press, 1991.
- [2.2] R. J. Hunter, Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Application, Academic Press, New York, 1981.
- [2.3] Keum-Shil Cho, Jin-Sup Shin, and Jung-Hyun Kim, 'Measurement of Particle Size and Particle Size Distribution', Polymer Science and Technology, 2004.
- [2.4] O. Elizalde and J. R. Leiza, Part. Part. Syst. Charact, 17, 236, 2000.
- [2.5] M. E. Koehler and T. Provder, ACS Symposium Series, 332, American Chemical Society, Washington, DC, p. 231-239, 1987.
- [2.6] H. Lange, Part.Part.Syst.Charact., 12, 148 1995.
- [2.7] S. Lee, S. P. Rao, M. H. Moon, and J. Calvin. Giddins, Anal. Chem., 68, 1545 (1996).
- [2.8] R. Viskanta, Radiative Transfer in Combustion Systems: Fundamental and Applications, New York. Begell House (2005).
- [2.9] D. Deirmendjian, Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions (1994).
- [2.10] Sauter, J. Die Grossenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen. VDI-Forschungsheft Nr; VDI-Verl: Berlin, Germany, 1926.
- [2.11] Shin, Y.J.; You, W.J. Analysis of the thermal characteristics of welding spatters in SMAW using simplified model in fire technology. Energies 2020, 13, 2266.
- [2.12] Song, J.; Wang, S.; Chen, H. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials. Theor. Appl. Mech. Lett. 2014, 4, 034005.
- [2.13] Omajene, J.E.; Martikainen, J.; Kah, P.; Pirinen, M. Fundamental difficulties associated with underwater wet welding. Int. J. Eng. Res. Appl. 2014, 4, 26?31.
- [2.14] Janusas, G.; Jutas, A.; Palevicius, A.; Zizys, D.; Barila, A. Static and vibrational analysis of the GMAW and SMAW joints quality. J. Vibroeng. 2012, 14, 1220?1226.
- [2.15] Incropera, F.P.; Lavine, A.S.; Bergman, T.L.; DeWitt, D.P. Principles of Heat and Mass Transfer; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2013.

- [2.16] Hojjati, A.Y.M.; Immarigeon, J. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2004, 43, 161–165.
- [2.17] Hashemabad, S.G.; Gu, Z.; Ando, T. Flux-less direct soldering of aluminum by ultrasonic surface activation. *J. Mater. Process. Technol.* 2016, 233, 135–141.
- [2.18] Liu, Y.; Liang, C.; Wei, A.; Jiang, Y.; Tian, Q.; Wu, Y. Solder-free electrical Joule welding of macroscopic graphene assemblies. *J. Mater. Today Nano* 2018, 3, 1–8.
- [2.19] Narasimhan, P.N.; Mehrotra, S.; Raja, A.R.; Vashista, M.; Yusufzai, M.Z.K. Development of hybrid welding processes incorporating GMAW and SMAW. *ICMPC* 2019, 18, 2924–2932.
- [2.20] Urban, J.L. Spot Ignition of Natural Fuels by Hot Metal Particles. *Electronic Theses and Dissertations*, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2017.
- [2.21] Janusas, G.; Jutas, A.; Palevicius, A.; Zizys, D.; Barila, A. Static and vibrational analysis of the GMAW and SMAW joints quality. *J. Vibroeng.* 2012, 14, 1220–1226.
- [2.22] Hu, J.; Tsai, H.L. Metal Transfer and Arc Plasma in Gas Metal Arc Welding. *J. Heat Transf.* 2006, 129, 1025–1035.
- [2.23] Hu, J.; Tsai, H.L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *J. Heat Mass Transf.* 2007, 50, 833–846.
- [2.24] Messler, R.W., Jr. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2008.
- [2.25] DuPont, J.N.; Lippold, J.C.; Kiser, S.D. *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2009.
- [2.26] Weman, K. *Welding Processes Handbook*; Cambridge Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2003.
- [2.27] Shigeta, M.; Peansukmanee, S.; Kunawong, N. Qualitative and quantitative analyses of arc characteristics in SMAW. *Weld. World* 2016, 60, 355–361.
- [2.28] Mikkelsen, K. An Experimental Investigation of Ignition Propensity of Hot Work Processes in the Nuclear Industry. Master's thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 2014.
- [2.29] Song, J.; Wang, S.; Chen, H. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials. *Theor. Appl. Mech. Lett.* 2014, 4, 034005.
- [2.30] Hagimoto, N.; Kinoshita, K. Scattering and Igniting Properties of Sparks Generated in an Arc Welding. In *Proceedings of the 6th Indo Pacific Congress on Legal Medicine and Forensic Sciences*, Kobe, Japan, 26–30 July 1998.
- [2.31] NFPA. NFPA Standard 51B: Standard for Fire Prevention During Welding, Cutting, and Other Hot Work; Technical Report; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2009.
- [2.32] Kim, Y.S.; Eagar, T.W. Analysis of metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Weld. J.* 1991, 72, 269–278.

- [2.33] Lin, Q.; Li, X.; Simpson, S.W. Metal transfer measurements in gas metal arc welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 2001, 34, 347.
- [2.34] Ahrens, M. Brush, Grass, and Forest Fires; Technical Report November; NFPA: Quincy, MA, USA, 2013.
- [2.35] Wakelin, H. Ignition Thresholds for Grassland Fuels and Implications for Activity Controls on Public Conservation Land in Canterbury. Ph. D. thesis, University of Canterbury, UK, 2010.
- [2.36] Choi, S.K.; Yoo, C.D.; Kim, Y.S. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW, Part 1: Globular and Spray Transfer Modes. Weld. J. 1998, 34, 347.
- [2.37] Wang, F.; Hou, W.K.; Hu, S.J.; Asibu, E.K.; Schultz, W.W.; Wang, P.C. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 2003, 36, 1143.
- [2.38] Ingason, H.; Wickstrom, U. Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer. Fire Saf. J. 2006, 42, 161–166.
- [2.39] Viskanta, R. Radiative Transfer in Combustion Systems: Fundamentals and Applications; Begell House: New York, NY, USA, 2005.
- [2.40] Deirmendjian, D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions; Elsevier: New York, NY, USA, 1969.
- [2.41] You, W.J.; Ryou, H.S. Development and application of a simplified radiative transport equation in water curtain systems. Fire Saf. J. 2018, 96, 124–133.
- [2.42] Ranz, W.E.; Marshall, W.R. Evaporation from drop, Part 1. Chem. Eng. Prog. 1952, 48, 141–146.
- [2.43] Urban, J.L.; Zak, C.D.; Song, J. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle. Proc. Combust. Inst. 2017, 36, 3211–3218.
- [2.44] Hadden, R.M.; Scott, S. Ignition of Combustible Fuel Beds by Hot Particles: An Experimental and Theoretical Study. Fire Technol. 2011, 47, 341–355.
- [2.45] Bejan, A. Adrian. Convection Heat Transfer; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [2.46] Babrauskas, V. Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management, and Forensic Science; Fire Science Publishers: Issaquah, WA, USA, 2003.
- [2.47] Schonherr, W. Fire risks with welding torches and manual arc welding—globules, spatter and how far they can be thrown. Schweiss. Schneid. 1982, 34, E74–E77.
- [2.48] Tomkow, J.; Fydrych, D.; Wilk, K. Effect of Electrode Waterproof Coating on Quality of Underwater Wet Welded Joints. Materials 2020, 13, 2947.
- [2.49] Srisuwan, N.; Kumsri, N.; Yingsamphancharoen, T.; Kaewilai, A. Hardfacing welded ASTM A572-based, high-strength low-alloy steel: Welding, characterization, and surface properties related to the wear resistance. Metals 2019, 9, 244.
- [2.50] Łabanowski, J.; Fydrych, D.; Rogalski, G.; Samson, K. Underwater welding of duplex stainless steel. Solid State Phenom. 2012, 183, 101–106.

- [2.51] Tanaka, T. On the inflammability of combustible materials by welding spatter. Rep. Natl. Res. Inst. Police Sci. 1977, 30, 51–58.
- [2.52] Pistorius, P.G.; Liu, S. Changes in Metal Transfer Behavior during Shielded Metal Arc Welding. Weld. J. 1997, 76, 305–315.
- [2.53] Xu, X.; Liu, S.; Bang, K.S. Comparison of metal transfer behavior in electrodes for shielded metal arc welding. Int. J. Korean Weld. Soc. 2004, 4, 15–22.
- [2.54] Hagiwara, T.; Yamano, K.; Nishida, Y. Ignition risk to combustibles by welding spatter. J. Jpn. Assn. Fire Sci. Eng. 1982, 32, 8–12.
- [2.55] Kinoshita, K.; Hagimoto, Y. Temperature measurement of falling spatters of arc welding. In Proceedings of the 22nd Annual Meeting Japan Society for Safety Engineering, Japan Society for Safety Engineering, Tokyo, Japan; 1989; pp. 145–148.
- [2.56] Brandi, B.; Taniguchi, C.; Liu, S. Analysis of metal transfer in shielded metal arc welding. Suppl. Weld. J. 1991, 70, 261s–270s.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.