

# Clean 용합소재 설계 기술 개발

장웅성 · 박서정 · 윤병현 · 허완욱 · 방국수 · 강남현

## Development of Clean Welding Consumables

Woong-Seong Chang, Seo-Jeong Park, Byung-Hyen Yoon, Wan-wook Huh, Kook-Soo Bang and Nam-Hyun Kang

### 1. 서 론

최근 세계적인 관심을 끌고 있는 기술 중의 하나가 친환경 관련 기술로 철강산업에서는 접합시 발생하는 유해가스나 열악한 작업환경으로부터 작업자를 보호하기 위하여 환경친화적인 접합기술을 개발하고 있다. 특히, CO<sub>2</sub> 가스 저감기술을 접합시에는 접합부를 대기로 부터 보호하기 위하여 보호가스를 사용하게 되는데, 우리나라는 CO<sub>2</sub> 가스를 보호가스로 하는 FCAW 용접법<sup>1)</sup>이 많이 사용되고 있다.

접합금속소재에서 수소는 지연파괴<sup>2)</sup>를 발생하여 접합소재의 성능을 저하시키는 주요 침입형 원소이다. 따라서 접합소재의 고성능화를 위해서는 hydrogen-free 형 접합금속소재의 개발이 필수적이다.

또한, 접합금속소재의 용융시 발생하는 fume은 인체에 악영향을 미치는 요소로서 fumeless 접합소재 등의 신 기술 개발이 필요하다.

기존의 생산성 중심에서 친환경 CO<sub>2</sub>-free 및 fumeless 접합재료와 고신뢰성 defect free 접합재료 개발을 위한 대체가스용 접합재료 설계 및 interstitial 제어 플럭스 설계 의 패러다임 전환이 필요한 시점이다. 특히, 조선산업에서는 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 FCAW 적용을

이 90% 정도로 대부분의 제작공정을 차지하고 있다. 따라서, CO<sub>2</sub> 가스를 줄이거나 대체하는 등의 기술 개발이 절실한 실정이다. 수송기기 및 지상, 해상구조물의 고신뢰성 확보<sup>3)</sup>를 위해서는 접합부 균열발생 및 성능저하의 원인이 되는 수소함량을 극소화하기 위한 접합소재 제조기술이 요구되며 이에 대응한 접합부 수소 거동에 대한 해석기술이 필요하며, 접합소재의 과학적 플럭스 설계기술 도입과 DB화를 통한 고유원천소재 제조기반 확보가 요구된다. 접합소재의 저수소화를 위하여 미국의 링컨사는 접합소재에 불소(F)를 첨가하여 수소를 낮추는 기술을 개발하였으나, 불소 역시 불화물을 형성하여 환경에 유해하다. 접합소재의 실용화시 다량의 fume 발생으로 환경을 저해하는 요소로 작용하여 Cs 을 첨가한 flux를 설계함으로써 fume 발생량을 기존의 절반으로 줄이는 기술 등이 개발되고 있다.

또한, 탄소배출권 등의 제약으로 CO<sub>2</sub> 가스 사용환경에 대한 규제가 심해지면서 접합에서 가장 많이 사용되는 보호가스인 CO<sub>2</sub> 가스를 저감하기 위한 수단으로 100% 의 Ar 가스의 사용이 가능하나 CO<sub>2</sub> 가스에 비하여 아크안정성, 열용량 등의 실용성이 떨어지는 단점이 있어 Ar 80%-CO<sub>2</sub> 20%의 혼합가스를 사용하는 기술이 개발되고 있다.

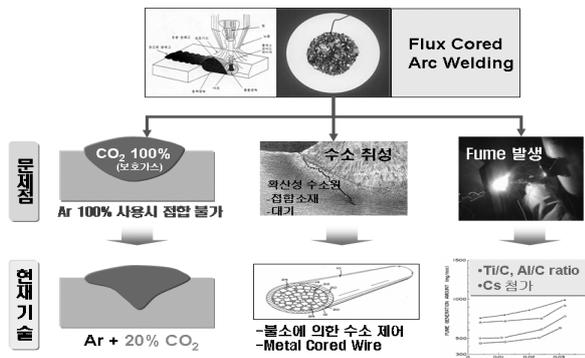


Fig. 1 Review of FCAW technology

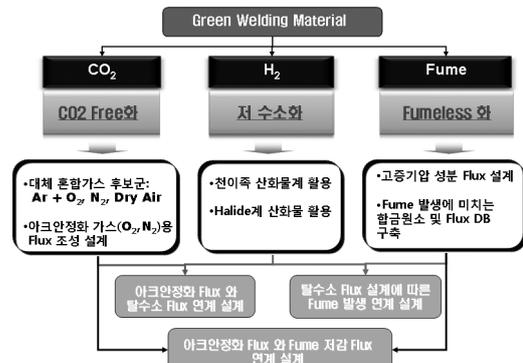


Fig. 2 Demanded core technologies

특히, 조선산업에서는 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 FCAW 적용율이 90% 정도로 대부분의 제작공정을 차지하고 있다. 따라서, CO<sub>2</sub> 가스를 줄이거나 대체하는 등의 기술 개발이 절실한 실정이다.

본 연구 과제는 주요 핵심 산업의 요구에 부응하여 Clean 용합소재의 설계 및 기술 개발을 목표로 수행 중에 있으며, 본 장에 연구 내용들을 소개하고자 한다.

### 2. 저수소/저Fume/CO<sub>2</sub> free 접합소재의 설계

먼저, 선행 연구 단계로 저수소화<sup>4)</sup>를 위한 flux 설계를 위하여 수소의 생성 및 집적 메커니즘을 명확하게 규명하고 flux 성분들과의 상호관계를 분석하여 수소 trap 기구를 규명하고자 하며, 수소 trap의 원천 봉쇄를 위하여 튜브를 sealing하는 기술에 대한 검토가 이루어 질 것이다. 또한, CO<sub>2</sub> 가스의 기능을 대체할 수 있는 가스를 선정하고 실용성, 즉, 아크안정성 및 열용량 감소를 극복하기 위한 flux 조성을 설계하고자 한다. Fume 발생 최소화를 위해 fume 발생기구의 규명을 통해 fume 발생 최대 산화물의 거동 분석을 통하여 fume 발생에 대한 각 원소별, 산화물의 영향을 파악하여 제어인자들을 도출하고 data를 축적할 계획이다

이들 연구를 통해 확산성수소량 2ppm, CO<sub>2</sub> 혼합비 0%, fume 발생량 400mg/min인 접합소재를 개발하고자 한다. 심화, 응용연구 단계에서는 1단계에서 개발된 새로운 조성의 flux를 포함하는 접합소재에 대한 상용화 가능성을 타진하고 상용화에 필요한 소재 공정기술 및 신뢰성을 확립하고자 한다.

선행단계에서 구축된 data를 기본으로 하여 수소 trap 방지를 위한 산화물의 성분을 정밀제어 하여 확산성 수소량을 1ppm까지 제어하고자 한다. fume 발생 억제를 위해서는 고중기압성분의 산화물 설계를 통하여 fume 발생량을 300mg/min 까지 낮추고자 하며, CO<sub>2</sub> free 접합소재의 성분화합물을 조성원소들을 정밀제어 하여 CO<sub>2</sub> 대체가스 및 flux 성분을 설계하고자 한다.



Fig. 3 Final goals of developed technology

이러한 clean 용합소재의 실용화 기반을 구축하고, pre-pilot 시험을 거쳐 실용화에 필요한 공정변수들을 검증하고자 한다. 실용화단계에서는 접합소재 maker 들을 중심으로 새로운 성분 및 조성의 clean 용합소재의 소재의 상용화를 위한 최적 공정기술 확립을 위해 pilot-plant scale의 시작품 제작 및 관련 소재원천 기술을 확보하고, 특허화하여 관련기술을 선점함으로써 세계 시장을 선도하고자 한다.

새로운 조성의 clean 용합소재 제조를 위한 flux 혼합 및 튜브 제조 기술을 scale-up 하는 공정을 최적화하고 단계적 연구를 통하여 확산성 수소량 1ppm, fume 발생량 200mg/min 및 CO<sub>2</sub> free가 구현되는 clean 접합소재를 개발하고자 한다.

### 3. CO<sub>2</sub> free 를 위한 플럭스 성분 영향 해석

CO<sub>2</sub>-free 셀프실드용접을 행할 때 가장 큰 문제점은 용접금속에의 질소 및 산소용해에 의한 연성 및 인성저하이다. 따라서 최종 개발목표인 고인성의 용접금속을 얻기 위하여서는 용접과정 중 용접부위의 질소 및 산소용해의 정도 그리고 그 억제방법을 정확히 파악하는 것이 선결문제이다. 따라서 1차년도에서는 기존의 500MPa 급 와이어를 사용하여 용접과정 중 용접금속에 얼마만큼의 질소와 산소가 용해되는지, 그리고 용접변수 (전류, 전압, 속도, CTWD 등)에 따라 용해되는 양에 얼마만큼의 차이가 있는지를 조사한 후, 용해된 질소와 산소에 의한 용접금속 중 질화물과 산화물의 형성정도 및 인성에 미치는 영향을 정량화한다. CO<sub>2</sub>-free 셀프실드용접용 플럭스 코어드 와이어는 용접금속에 용해되는 질소 및 산소를 고정하기 위하여 Ti, Al, Zr 등 여러 가지 질화물 및 산화물 형성원소를 첨가한다. 하지만 이러한 원소들이 기지 중에 고용하게 되면 용접부의 변태조직을 변화시켜 인성에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 Al은 강력한 페라이트 안정화원소로 냉각과정 중 오스테나이트형성을 억제하여 인성을 저하시키게 된다. 따라서 용접금속의 인성향상을 위하여 오스테나이트 안정화 원소인 C를 첨가하거나, 인성을 향상시키는 Ni를 첨가하기도 한다. 하지만 이러한 시도에도 불구하고 용접금속 조직은 페라이트와 베이나이트 등 저인성의 조직을 나타낸다. 따라서 2차년도에서는 셀프실드 용접금속 인성향상을 위하여 기존의 미량합금원소인 Ti, Al, C, Ni 등의 첨가량을 최적화함과 함께, 새로운 시도로서 일반적인 CO<sub>2</sub> 용접금속에서 나타나는 고인성 조직인 침상페라이트를 CO<sub>2</sub>-less 용접금속에서도 형성시키는 시도를 행하고자 한다.

한편 셀프실드 와이어 개발에 있어서 또 다른 문제점

은 다층용접시 Al 등의 농화에 따라 인성이 더욱 저하된다는 점이다. 따라서 얇은 판의 단층용접에 비하여 두꺼운 판의 다층용접에 적용하는 와이어 개발에는 첨가원소의 농화에 따른 인성저하 문제도 함께 해결해야 할 문제이다. CO<sub>2</sub>-free의 용접을 행하기 위하여서는 플럭스 중에 CaCO<sub>3</sub> 등 CO<sub>2</sub>를 발생시키는 플럭스 성분이 없어야 한다. 이런 경우 CaCO<sub>3</sub> 대신 Mg, Fe 등의 금속 증기를 이용하여 용접금속을 보호하기 때문에 많은 양의 흡이 생기는 단점이 있다. 따라서 clean용접을 위하여 소량의 첨가로 차폐효과를 나타내는 대체원소를 찾는 것이 필요하다. 한편 용접작업성의 향상을 위하여 용접과정 중 스파터의 형성을 최대한 억제하기 위하여 적절한 아크안정제를 선택하여야 하며 또한 슬래그의 점도 등을 증가시켜 전자세용접이 가능하도록 하여야 한다. 따라서 3차년도에서는 용접과정 중 흡이나 스파터발생을 억제하고 전자세용접이 가능한 플럭스를 개발하고자 한다.

#### 4. 저수소 flux 구조 해석

용접 flux의 수소용해도는 대기 중 수분 용해도와 flux 구성 성분과의 친화력으로 결정되는 것으로 용융시 용융 금속 성분과 반응에 의해 용융 금속 중으로 확산되어 용융금속부의 수소 용해도를 증가시키게 된다. 따라서 용융 금속 중 확산성 수소 용해도를 최소화하기 위해서는 용융 flux의 수소 및 hydrate형 수산화물(OH<sup>-</sup>)의 용해도 최소화를 위한 flux 조성 제어가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 기존 rutile 계 flux와 기타 산화물계 용접 flux계의 hydrate ion의 용해도(hydrate capacity)를 열역학적으로 측정하여 수소 용해

도에 미치는 첨가성분의 영향을 정량화하여 5mg/100g 이하의 수소 용해도를 달성할 수 있는 성분계를 도출하고자 한다. 용융에 따른 flux 구조 변화는 network breaker(산소이온, O<sup>2-</sup>)와 network former ion(SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>, AlO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, F<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>-</sup> etc)등 이온구조 변화를 야기함으로써 수소 용해도를 변화시킴으로서 이와 같은 ion의 존재비에 따른 수소용해도 변화를 정량화하여 3mg/100g 이하의 수소용해도의 flux계를 도출하고자 한다. 용접 flux의 요구특성인 점성, 용융온도 그리고 수소 용해도를 동시에 만족시키기 위한 halide ion(F, Cl)의 영향을 열역학적으로 평가하고, 2차년도까지의 연구 결과인 염기성 및 산성계 산화물의 영향을 동시에 고려함으로써 수소 용해도가 2mg/100g 이하를 달성할 수 있는 최적 불소성분의 최소 첨가 농도 도출 한다. 또한 개발된 Rutile계, 산화물계, 그리고 불소계 flux의 사용을 위한 필요 충분조건인 용융온도, 점성, 계면장력의 최적화 simulation을 통하여 상용화 조건을 도출하고 용접 flux의 용해반응기구, 용해도, 조성의 영향과 물성치 간의 상관성을 data base화 및 전산 모델을 구축한다.

#### 5. 수소 집적 및 방출거동 해석

본 연구개발은 모재(800MPa급)와 저수소/고수소 용접재료에 따른 수소집적 및 방출 거동 해석과 기공, 석출상, 저온변태상 등 미세조직 거동에 따른 용접부 수소거동 해석 및 용접부 수소지연과피 vs. 미세조직 연관성 규명을 목표로 하고 있다. 용접방법으로는 V-notch GMA One-pass 자동용접을 실시한다. Electrochemical cathodic charging (정전류 음극전해에 의한 수소주입) 조건을 확립하고 시편 전처리를 위해 기계 연마,

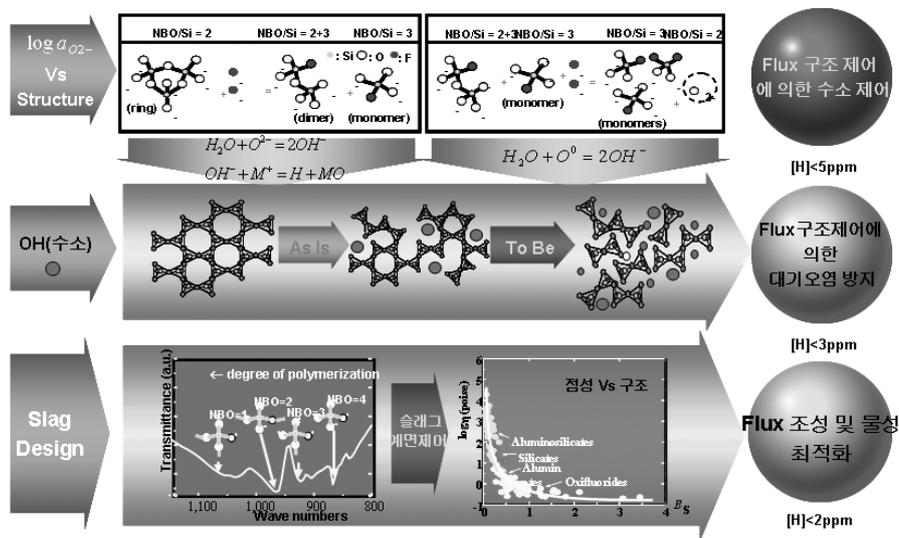


Fig. 4 Analysis of flux structure for ultra low hydrogen

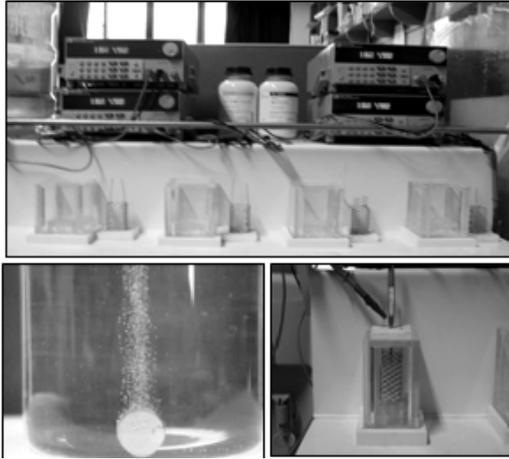


Fig. 5 Electrochemical cathodic charging unit for hydrogen

전해 연마, 세정 등에 관해 표준화를 실현한다. 수소 주입조으로는 10~50 A/m<sup>2</sup>, 48시간으로 수소주입 후 수소주입 시간에 따른 글리세린 주입 시편의 수소방출 거동의 정성적 분석과 용접부 와 모재비교 후 미세조직과의 연관성 규명을 실시한다.

수소 방출 거동 분석으로는 thermal desorption spectroscopy (TDS) 분석을 통한 확산성 수소 분석을 통하여 수소 trapping site를 해석하고, SEM-EDS, TEM, EPMA 등을 활용하여 기공, 석출상, 저온변태상 등 수소집적 및 방출 해석을 위한 미세조직 분석을 실시한다. 또한, 용접부에서의 정적하중인장시험 및 U-bending 시험과 파단면의 fractography 분석을 통한 수소 trapping site 해석을 통해 용접부 수소지연과괴와 미세조직간의 연관성을 규명한다.



- 장웅성
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 윤병현
- 1964년생
- 포항산업과학연구원
- 용접야금, 오버레이용접, 부식
- e-mail : paekam@rist.re.kr



- 방국수
- 1955년생
- 부경대학교 신소재공학과
- 철강 및 비철 용접성, 용접재료평가
- e-mail : ksbang@pknu.ac.kr



- 박서정
- 1969년생
- 포항산업과학연구원
- 레이저용접, 현상, 계측
- e-mail : sjpark@rist.re.kr



- 허완욱
- 1952년생
- 연세대학교 신소재공학과
- Flux 구조 및 물성평가, 화학야금
- e-mail : hsteve@yonsei.ac.kr



- 강남현
- 1970년생
- 부산대학교 재료공학과
- 용접야금, 레이저접합, 무연솔더
- e-mail : nhkang@pusan.ac.kr

## 6. 결 론

지식경제부 지원 하에 10년 장기 과제로 추진되는 친환경 접합금속 관련 소재원천 기술개발의 1단계 기초 연구를 수행 중에 있으며 본 사업을 통하여 신개념의 산화물 및 플럭스 제어기술을 통한 접합소재 설계기술을 개발하고 이와 관련된 다양한 분석 평가 기술을 동시에 확보함으로써 향후 다양한 산업에서 요구되는 고성능 친환경 용접재료 개발의 밑거름이 될 것으로 기대된다. 또한 지금까지 철강재료의 개발 수준에 비해 항상 비교 열위에 있는 국내 용접재료 산업의 기술경쟁력을 높이는데 기여하고 더 나아가서 친환경, 고기능 접합금속소재의 국제 표준화를 통해 세계 기술 수준을 선도하는데 기여할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 용접접합 편람 (3) 공정 및 열가공, 대한용접 접합학회 59~67
2. S.P. Lynch, "Ductile and brittle crack growth: Fractography, Mechanisms, and Criteria" Mat forum, vol.11, 268
3. 장웅성, 용접공학하계교재, 149~185, 2003
4. Akihiko Takahashi, "Influence of Microhardness and inclusion on stress oriented hydrogen induced cracking of line pipe steels" ISIJ international Vol.36 (1996) No.3, 334~340