

# 내마식 오버레이 접합금속소재 설계기술

김준기 · 김지희 · 김기남 · 김선진

## Design of Erosion Resistant Overlay Welding Material

Jun Ki Kim, Ji Hui Kim, Ki Nam Kim and Seon Jin Kim

### 1. 서 론

최근 국제유가의 가파른 상승은 석유자원 확보와 대체에너지 개발 경쟁을 더욱 치열하게 하고 있다. 특히, 중동 등 온난지역의 에너지자원이 고갈되어가고 기후온난화로 인해 북극 등 극한지역의 자원탐사가 가능해지면서 극한지 유정과 오일샌드 개발이 가속화되고 있다. 이에 따라 내마모성, 저온인성 등의 우수한 성능을 갖는 첨단소재에 대한 요구가 증대되고 있다.

오일샌드는 중질유인 비투먼(bitumen)을 함유하는 모래 또는 암석으로, 이들을 모아 Fig. 1과 같이 비투먼을 추출한 후에 정제과정을 거치면 석유를 얻을 수 있다. 1배럴의 석유를 추출하기 위해서는 오일샌드 2톤이 필요한 것으로 알려져 있다. 캐나다 오일샌드의 2008년 일일 생산량은 120만 배럴로 하루에 240만톤의 오일샌드가 처리되고 있다.

추출과정에서 오일샌드와 고온수의 슬러리를 이송하

는 hydrotransport 라인의 내벽은 Fig. 1과 같은 마식환경에 노출되어 있다. 마식(erosion)이란 고체입자, 액체 등의 반복적 충돌에 의해 소재의 표면이 손실되는 현상을 말한다. 현재 사용되고 있는 API-X65/X70급 강재의 마식률은 1,000시간에 수 mm 정도이며, 이로 인해 파이프라인 교체수명이 1년 미만인 것으로 알려져 있다.

이러한 오일샌드 이송라인을 비롯하여 해저자원의 양광 파이프라인 등과 같이 극심한 마식환경에 사용하기 위한 소재로는 WC, B<sub>4</sub>C 등의 고경도 탄화물을 들 수 있다. 이들은 분말소재로 용사공정에 의해 내벽에 코팅되며 내마식성이 우수한 것으로 알려져 있지만 소재가격 및 공정비용이 매우 고가이고 코팅층의 조성편차가 심하며 취성이 크다는 단점이 있어 극한지 에너지라인에 적용하기는 어려운 상황이다.

금속재료 중에서는 Co계나 Ni계 합금이 Fe계 합금에 비해 다소 우수한 내마식성을 보이는 것으로 알려져

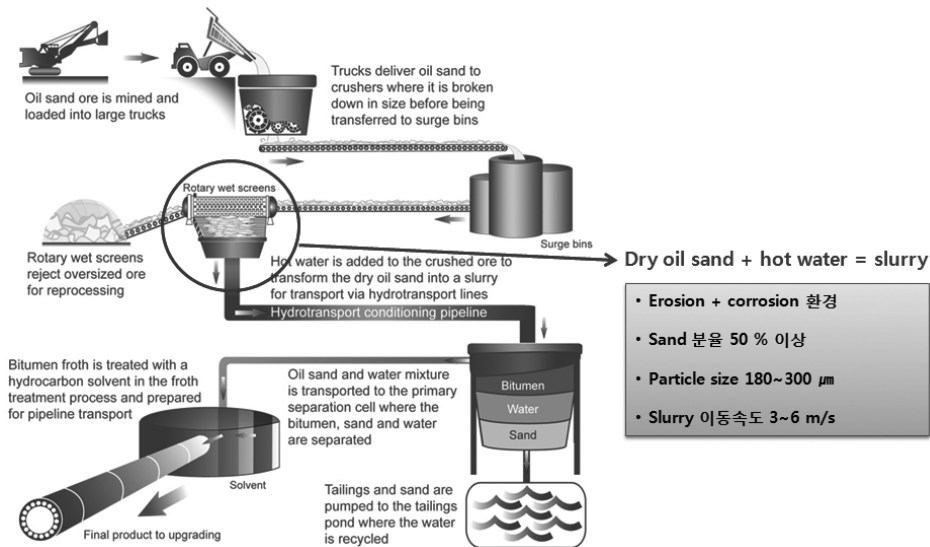


Fig. 1 The oil sand extraction process and the erosive environment

있다. 이들은 고가의 금속이기 때문에 저렴한 Fe계 모재 위에 오버레이하는 방식으로 적용되어야 하지만 이들의 내마식성은 공정비용에 비해 만족스럽지 못하여 아직까지 극심한 마식환경에 대한 소재 측면에서의 적절한 대책이 없는 상황이다.

이처럼 산업적 수요가 증대되고 있는 극한지용 내마식 소재를 개발하기 위해서는 내마식성과 함께 저온인성을 부여하는 방안이 요구된다. 다량의 고경도 탄화물은 재료의 경도와 내마식성을 높이지만 재료의 인성을 저하시킨다. 따라서 연성-취성 천이현상이 없어 저온인성이 우수한 오스테나이트 기지상에, 고경도 석출상이 없어도 재료의 표면을 급격히 가공경화시키는 변형유기 마르텐사이트 상변태 효과를 극대화할 수 있는 신개념 합금설계 기술의 도입이 필요하다.

한편 내마식 합금조성이 개발되더라도 오버레이 용접 재료로 상용화되기 위해서는 용착부 합금조성을 일정하게 유지할 수 있도록 모재와의 희석률을 정교하게 제어하는 방안이 필요하다. 용접플럭스 설계기술은 용접 시 금속이행모드, 용융지 유동거동 등과 같은 용접현상의 제어를 통해 오버레이 용접재료의 용접성과 희석률 등의 최적화하기 위한 기술이다.

본 연구는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기지상의 특성을 극대화하기 위해 변형유기 마르텐사이트 상변태를 제어하는 strain-induced metallurgy와 오버레이 용접부의 희석률을 제어하기 위한 flux metallurgy 등의 원천기술에 대한 것으로, 이와 관련하여 합금성분과 임계변형에너지 및 변형유기 마르텐사이트 상변태와의 관계규명을 통한 내마식 고인성 합금조성 설계기술과 용접플럭스와 용접조건, 아크용접성 및 비드형상의 관

계규명을 통한 플럭스조성 설계기술에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 내마식 합금조성 설계

변형유기 마르텐사이트 상변태 현상에 대한 연구를 위해서는 기지상이 오스테나이트상이어야 하므로 먼저 첨가원소에 따른 오스테나이트 안정영역을 예측하기 위해 오스테나이트/마르텐사이트 경계를 나타내는 비평형 상태도(non-equilibrium phase diagram)의 구축이 필요하다. 상경계 영역이 중요한 이유는 첨가되는 합금 원소의 조성변화에 따라 오스테나이트상의 안정영역이 변화하고, 또한 오스테나이트 영역 내에서도 위치에 따라 오스테나이트상의 안정성, 즉 변형유기 마르텐사이트 상변태의 발생경향이 각각 다르기 때문이다.

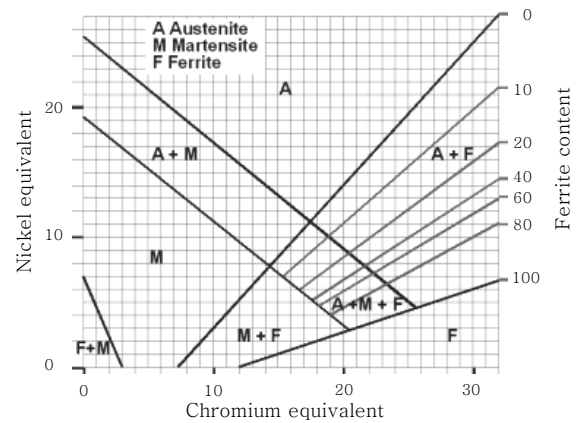


Fig. 3 Schaeffer diagram

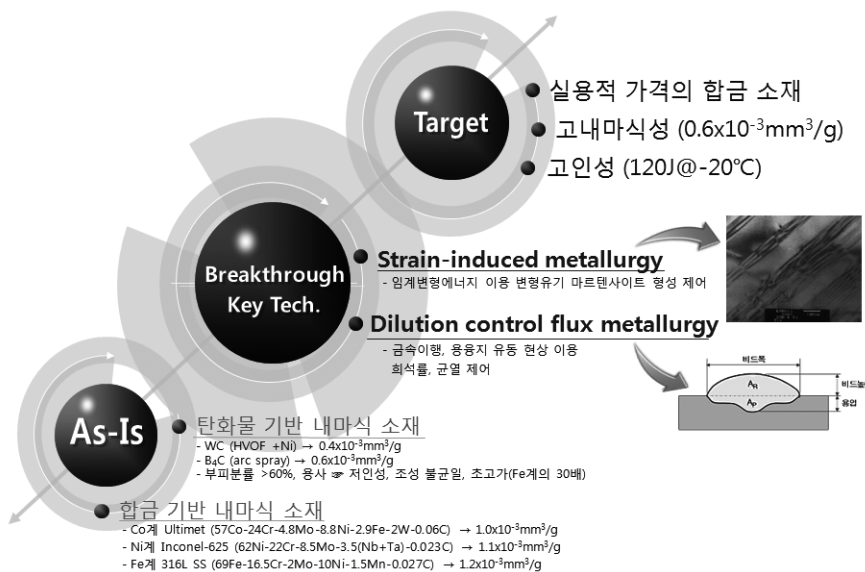


Fig. 2 Overview of the R&D project for the erosion resistant overlay welding material

오스테나이트와 마르텐사이트 안정영역을 나타내는 자료로는 Fig. 3에 나타난 Schaeffer 도표를 비롯하여 Delong, WRC 도표 등이 있지만 이들 도표들은 대부분 합금원소 첨가량이 적거나 탄소함량이 많지 않은 조성범위에 대해서 유효하기 때문에 고크롬, 고탄소 조성범위에 있어서는 오스테나이트/마르텐사이트 상경계 영역에 대한 비평형상태도를 실험적으로 구축할 필요가 있다<sup>1,2)</sup>.

변형유기 마르텐사이트는 소성변형의 자취로서 생성되는 것으로 외부에서 가해지는 응력이나 충격을 흡수하는 효과가 있다<sup>3)</sup>. Fig. 4와 같이 소재의 표면 오스테나이트 기지상 내에 반복적으로 생성된 마르텐사이트는 급격한 가공경화를 유발하여 응착(adhesion)과 연삭(abrasion) 등의 표면손상에 저항하는 것으로 보고되어 있다<sup>4)</sup>.

임계변형에너지는 일정량의 변형유기 마르텐사이트가 형성되는 데에 필요한 최소변형량으로 정의되며, 합금원소와 정량적인 관계를 수립할 수 있는 인자이다<sup>5)</sup>. 따라서 임계변형에너지와 변형유기 마르텐사이트와의 관계, 그리고 합금원소와 임계변형에너지와의 관계를 규명하게 되면 합금원소에 따른 변형유기 마르텐사이트 상변태의 정확한 예측 및 제어가 가능해질 것으로 예상된다.

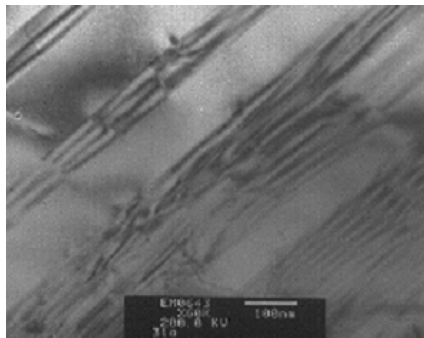


Fig. 4 Strain-induced martensite

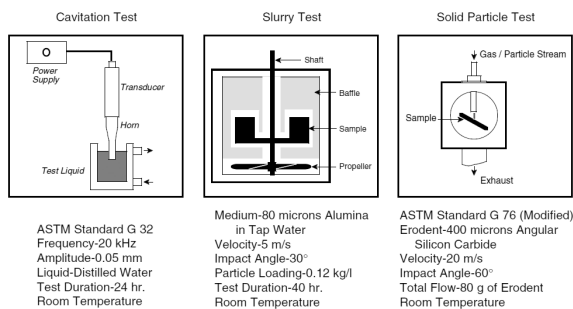


Fig. 5 Evaluation methods of erosion loss

재료의 마식저항성을 평가하는 방법에는 Fig. 5와 같이 마식을 발생시키는 물질에 따라 캐비테이션 마식(cavitation erosion), 슬러리 마식(slurry erosion), 고체입자 마식(solid particle erosion) 등이 있다. 캐비테이션 마식은 유속의 변화로 인해 발생하는 캐비티에 의한 마식으로 ASTM G32에 초음파를 이용한 시험방법이 규정되어 있으며 시간에 따른 손실깊이(mm)로 나타내어진다. 고체입자마식은 ASTM G76에 따라 단위 중량의 고체입자와의 충돌에 의한 소재의 손실부피( $\text{mm}^3/\text{g} \times 10^4$ )로 나타내어진다<sup>6)</sup>.

### 3. 용접플렉스조성 설계

중소형 부품의 오버레이 용접공정으로는 피복아크용접과 가스텅스텐아크용접(GTAW), 가스메탈아크용접(GMAW) 등이 있다. 용접와이어를 용가재로 사용하는 GMA 용접은 용접봉을 사용하는 피복아크용접이나 GTA 용접에 비해 용착률이 2배 정도 높으며 자동화가 가능하다는 장점이 있으나 모재와의 희석률이 10~40%로 과도할 수 있어 주의가 필요하다<sup>7)</sup>.

Fig. 6에 나타난 오버레이 용접비드에서 희석률 D는  $A_p / (A_r + A_p)$ 로 정의되며 모재 및 용가재의 합금조성과 함께 오버레이 용접부의 합금조성과 미세조직을 결정하는 인자이다<sup>8)</sup>. 오버레이 용접재료의 합금조성은 대부분 모재보다 합금원소 함량이 높기 때문에 희석률이 증가할수록 오버레이 용접부의 합금원소 함량이 낮아져 성능이 저하된다. 접합부의 신뢰성을 위해 10% 정도의 희석률은 필요하지만 희석률이 과도한 경우에는 원하는 성능을 얻기 위해 합금성분 함량을 증가시켜야 하므로 용접비용을 증가시키는 원인이 된다<sup>7)</sup>.

기존의 용접재료 제조기술은 용접부의 구조적 건전성을 확보하기 위해 용입을 증가시키는 방향으로 연구가 이루어져 왔으나 오버레이 접합금속의 경우에는 모재와의 조성차이가 크기 때문에 용착부의 합금조성을 최적으로 제어하기 위해서 용착부 희석률을 작으면서 일정하게 유지하는 것이 중요하다.

특히 변형유기 마르텐사이트 상변태를 강화기구로 활

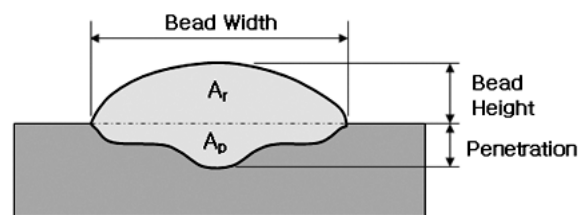


Fig. 6 Geometry of overlay weld bead



Fig. 7 Pilot line for the production of metal cored welding wire



Fig. 8 GMA welding station

용하는 내마식 합금의 경우에는 오스테나이트상과 마르텐사이트상의 경계지점 합금조성이 가장 우수한 내마식성을 나타낼 것으로 기대되고 있는데, 오버레이 용접부가 최적의 내마식성을 유지하기 위해서는 합금조성이 상경계에 가까우면서 마르텐사이트 상영역으로 넘어가지 않도록 오버레이 용접부에서 희석률의 편차를 정교하게 제어하는 것이 필요하다<sup>9)</sup>.

용접플럭스조성 설계기술은 오버레이 용접시 희석률의 편차를 작게 제어하기 위해서 용접플럭스 첨가를 통해 아크특성, 용접금속 이행모드, 용융지 유동 등을 제어하는 기술이다. 일례로 용융지의 표면장력 온도계수를 조절하는 원소를 함유하는 용접플럭스를 첨가하여 Marangoni 대류의 방향을 바깥쪽으로 흐르도록 유동을 조절하면 희석률을 감소시키고 비드의 퍼짐을 증가시키는 효과를 얻을 수 있다<sup>10)</sup>.

다양한 용접플럭스를 첨가한 메탈코어드 용접와이어 시제품 제조에 사용되는 파일릿 제조설비 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 실제 플럭스코어드 용접와이어 생산과정과 동일하게 조관, 분말충진, 인발 공정을 통해  $\Phi 1.6\text{mm}$  와이어가 제조되며 최종적으로 정렬권취를 통해 용접스

플에 감아진다. 제조된 용접와이어는 Fig. 8에 나타난 GMA 용접스테이션에서 용접전류 및 전압 파형계측을 통해 아크특성 및 용접이행모드에 대한 평가가 이루어진다.

#### 4. 맺 음 말

변형유기 마르텐사이트 상변태를 이용하는 신개념 내마식 합금조성 설계기술과 오버레이 용접시 희석률의 정교한 제어를 통해 원하는 합금조성의 용접부를 형성하는 용접플럭스조성 설계기술에 대한 연구를 통해 우수한 내마식 성능을 갖는 오버레이 접합금속소재가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

또한 오일샌드, 해저자원 등의 에너지라인 이외에도 임계변형에너지를 이용한 변형유기 마르텐사이트 제어 합금설계 기술은 건설중장비 적재함, 버켓 등에서 사용되기 위한 고인성 내마모 강판의 연구개발에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 수행되고 있는 “상변태/임계에너지 제어 접합금속소재 기술”의 일환으로 추진되고 있으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Schaeffler, A.L., Weld. J., London, 1947, **26**, 601
2. Delong, W.T., Ostrom, G.A. and Szumachowski, E.R., Weld. J., London, 1956, **35**, 521
3. Zaiyou Wang, Jinhua Zhu, Materials Science and Engineering A358 (2003) 273-278
4. Ji Hui Kim, Kang Hee Ko, Seung Dae Noh, Gyung Guk Kim, Seon Jin Kim, Wear, **267**, 1415-1419
5. Ji Hui Kim, Kwon-Yeong Lee, Kang Hee Ko, Ji Young Kim, Ki Nam Kim, Joon Young Oh, Seon Jin Kim : Wear, **266**, 1137-1140
6. Annual Book of ASTM Standards G-32 and G-76

7. R. Menon: Recent advances in cored wires for hardfacing, *Welding J.*, Nov (2002), 53-58
8. J. A. Francis, B. Bednarz, and J. V. Bee: Prediction of steady state dilution of in multipass hardfacing overlays deposited by self shielded flux cored arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, **7-2** (2002), 95-101
9. Kyu-Ho Han et al.: Effects of GMA Welding Conditions on the Bead Shape of Hardfacing Overlay Welding, *Journal of KWS*, **25-5** (2007), 514-519 (in Korean)
10. B. Pollard: The effects of minor elements on the welding characteristics of stainless steel, *Welding Research Supplement*, Sep (1988), 202s-213s



- 김준기
- 1971년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구부
- 용접접합소재, 오버레이, 접착
- e-mail : jkim@kitech.re.kr



- 김지희
- 1978년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구부
- 철강 및 비철 재료, 하이브리드 접합
- e-mail : opellia@kitech.re.kr



- 김기남
- 1982년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 철강 및 비철 재료, 마모 및 마식
- e-mail : yaddio@naver.com



- 김선진
- 1953년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 철강 및 비철 재료, 원자력소재, 마모
- e-mail : alloylab@hanyang.ac.kr