

용접방법에 따른 오버레이 용접기술의 연구동향

유 호 천*†

*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

Recent Study of Overlay Welding on Welding methods

Ho-Cheon Yoo*†

*KISTI(Korea Institute of Science and Technology Information) ReSEAT Program

†Corresponding author : yooho278@reseat.re.kr

Abstract

Recent developing tendency of overlay welding on welding methods are studied by searching of NDSL, ScienceDirect and KIPRIS. PTA, Laser cladding, SMAW, GTAW, GMAW, SAW and ESW are selected as welding methods. Development and improvement of various new overlay welding processes and technology are introduced, especially PTA and Laser cladding in abroad overlay welding technology are activated substantially.

Key Words : Overlay welding, PTA, Laser cladding, SMAW, GTAW, GMAW, SAW. ESW

1. 서 론

현재 국내 오버레이용접기술은 발전설비, 제철설비, 광산기계, 토목건설기계, 시멘트설비, 석유화학설비, 제지설비, 금속소성 가공기계 등 전반적인 산업분야에 표면경화와 보수에 널리 이용되고 있으나 대부분의 국내 관련 중소기업체에서는 오버레이용접에 대한 제조비용의 과중과 경쟁력의 심화로, 상당한 어려움을 겪고 있다. 이러한 어려운 국내의 상황을 탈피하고 국제적인 경쟁력을 갖추기 위해서는 국내의 최신 오버레이 용접기술을 분석하고 지속적으로 발전시켜 나가야 한다. 이를 위해 NDSL, ScienceDirect 및 KIPRIS의 검색을 통하여, 국내의 오버레이 용접관련 학술지와 특허자료를 입수하여 오버레이 용접기술 동향을 체계적으로 분석하였다. 그리고 용접방법(PTA, 레이저 클래딩 용접, SMAW, GTAW, GMAW, SAW, ESW)에 따른 해외 및 국내의 오버레이 용접의 기술개발 동향을 파악하고 정성분석하였으며 향후 기술전망을 제시하였다.

2. 용접방법에 따른 기술개발 동향

2.1 PTA(Plasma Transferred Arc)

플라즈마 아크용접(PAW)에서는 오버레이 용접재료

로서 피복이 없는 봉 또는 와이어를 사용할 수 있으나, 분말을 많이 이용하고 있다. 분말을 사용할 경우에는 플라즈마 이행아크(Plasma Transferred Arc : PTA)를 이용한다. 분말은 불활성 분위기의 플라즈마 토치로 이송되어 직접 아크로 분출되면서 용해되고 모재에 접합하여 용융결합을 이루게 된다. 전극과 모재사이에 연결된 직류전원 공급장치에서 이행아크에 대한 에너지가 공급되며, 전극과 노즐사이에 연결된 2차전류의 공급장치는 비이행아크(non-transferred arc)를 유지시키고, 이행아크의 열을 보충하며, 이행아크가 발생할 때 길잡이 역할을 한다. 또한 보호가스는 공급장치를 통하여 아크주변에 장막과 같은 보호막을 형성한다.

PTA하드페이싱은 독특한 열원으로 비교적 두껍게 오버레이 용접하는데 금속야금학적으로 무난하게 접합할 수 있는 매우 유망한 표면개질기술이며, 낮은 가격, 높은 입열량, 높은 용착효율, 쉬운 작업성, 합성이 용이한 분말공급 시스템을 갖추고 있으며 경우에 따라서 표면 예비처리가 필요없을 수도 있는 장점을 갖고 있다^{1,2)}.

원자력발전소에 들어가는 밸브 시팅 표면에 종래에는 값비싼 Co계 합금제품의 스텔라이트(Stellite)가 사용되어 왔으나 방사능을 가진 스텔라이트와 비교해서 거의 동일한 금속학적 품질특성을 갖고 있는 값싼 철계

Norem02(1.23C-4.3Mn-25.4Cr-3.38Si-4.0Ni-2.0Mo-0.01Co-balance Fe)가 Gauthier Beaurin 등³⁾에 의해 PTA 오버레이 용접으로 개발되었다. 이 개발품은 1100°C 이하에서 미세조직과 경도는 거의 변하지 않으며 내마모성(특히, galling)이 우수하므로, 향후 대체여부에 관심이 고조되고 있다.

회주철의 금형 모서리를 코팅하기 위하여 F. Fernandes 등⁴⁾은 PTA기술로 Ni계 하드페이싱 합금을 적용하였다. 이 경우 아크전류의 증가는 주철의 회석량을 증가시키고 입계에 석출물의 양과 탄소박편(C-flake)을 증가시켜 조직을 미세화시키지만 경도를 감소시켜 내마모성을 저하시키므로 최적의 전류선정이 중요하다.

Q. Y. Hou 등⁵⁾에 의하면 Ni계 합금 용접재료에 PTA 용접에 의해 0.8 wt.% nano-Al₂O₃입자의 첨가로, 적층결합과 전위 셀월(cell wall) 형성을 촉진하여 슬라이딩마모저항성을 1.7배 향상시켰다.

C. Sudha 등⁶⁾에 의해 AISI 304L강에 PTA공정을 이용하여 37.05Ni-15.39Fe-33.4Cr-10.26B-1.74C-2.16Si 합금분말로 최대 7mm의 두께까지 오버레이 용접을 하였다. GTA용접에서의 상호확산 두께는 2.5mm 이하였으나 PTA용접에 의한 상호확산 두께는 GTA용접에 비해서 훨씬 얇은 760 μ m 이하를 나타내었다.

C. Katsich 등⁷⁾에 의하면 PTA용접인자로서 용접전류, 진동(oscillation)과 용접속도, 기관, 분말공급속도, 가공물과 노즐과의 거리 및 캐리어, 실딩과 플라즈마 가스의 유동속도 등이 영향을 미친다. 특히 WC/W₂C로 강화된 Ni계 MMC의 바람직한 탄화물/모재 계면층의 형성과 2차경화상 석출은 높은 전류에서 더 촉진됨을 확인하였다.

J. F. Flores 등⁸⁾은 PTA용접한 결과, Fe-27.2Cr-2.8C기지에서보다 FeCrC-MMC에서 내마모성을 크게 상승시킬 수 있었다. 65wt.% WC의 첨가에 의한 MMC 강화상으로 W-rich 금속간 상이 촉진되어 670HV₁₀₀에서 1140HV₁₀₀까지 상승시킬 수 있었다.

원자로부터으로서 Ni합금의 적응성을 검토하기 위하여, D. Kesavan 등⁹⁾은 316L강 표면에 Ni계 Colmonoy 5 하드페이싱합금으로 PTA용접한 후 650°C에서 5000시간 시효처리한 결과, 수지상의 γ -Ni 조대화가 일어났다. 또한 Cr₂₃C₆입자의 석출과 성장을 가져오고 Ni₃Si 석출물이 구상형태에서 입방형태로의 전이가 일어나, 기지 내의 크롬 결핍으로 내마모성(dry sliding wear)과 내부식성(pitting)이 열화되는 문제점이 있었다. 또한 Guru-moorthy 등¹⁰⁾에 의하면 Ni계 합금으로 PTA용접한 후에 650°C에서 250시간 비교적 짧은 시간동안 시효처리한 결과, 미세조직과 경도의 열화는 없

었으며, Bhaduri 등¹¹⁾에 의해 550°C에서 5000시간동안 장시간 시효처리한 결과, Colmonoy 5합금의 미세조직 변화는 없었으나 경도가 16%나 감소하였다.

PTAW에 의한 NiCrBSi 합금 경도는 T. Liyanage 등¹²⁾에 의해 Cr-rich입자량 뿐만 아니라 수지상간 상의 부피율에 의해 제어됨을 확인하였다. 405HV인 1차 수지상은 수지상간 상의 출현으로 860HV까지 상승시킬 수 있었다. Fe 혹은 Si의 첨가는 Ni 내에 Cr의 용해도를 감소시켰으며, B은 수지상간 지역에서 Ni₃B와 CrB의 형성이 촉진됨이 관찰되었다.

Oliveira 등¹⁾에 의하면 Co를 하드페이싱한 PTA 용접에서 펄스전류 방법을 적용하면 응고조직은 미세 균일하게 되어 회석량은 적어지게 되어 높은 경도를 나타낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 과도한 전류세기의 상승은 회석률을 높이고 경도를 낮추는 역할을 하므로 주의하여야 한다.

2.2 레이저 클래딩(Laser Cladding)

레이저 클래딩은 다른 코팅방법(예, 용사, Air plasma spray 등)과 비교해 더욱 두껍게 그리고 기관과 더욱 최소화된 열변형으로 용접할 수 있는 장점이 있다¹³⁾. 레이저 클래딩은 장치가격이 높은 반면에 장점으로서 첫째, CAD/CAD과 접목하여 쾌속조형 또한 3차원 미세부품 수선 등을 위한 공정시간이 단축가능하고, 둘째 레이저의 특성상 급속가열 및 냉각이 가능하여 모재의 본래 특성을 유지하고 열영향부의 정밀제어가 가능하고, 셋째 공정 중 모니터링 및 최적화작업이 가능하여 고가부품의 비파괴 수선작업에 유리하고, 넷째 다수의 분말노즐을 이용하여 경사기능재료를 생산하기 용이하고, 다섯째 센서 또는 자석과 같은 열에 민감한 부품들을 삽입하여 스마트 구조물을 제작하기 유리하다¹⁴⁾.

레이저 클래딩은 아크용접이나 고온용사와 같은 하드페이싱 기술에 비해 더욱 우수한 내마모성, 낮은 회석률, 강한 금속접착력을 갖는 장점이 있다. 실레로 Navas 등¹⁵⁾은 Stellite-6 코팅층을 레이저 클래딩하여 AISI 강에서보다 마모계수 15배나 뛰어난 슬라이딩 내마모성을 얻을 수 있었다.

Girish R. 등¹⁶⁾은 저탄소 오스테나이트강(STS 304L) 표면에 4kW CW CO₂ 레이저에 의해서 Colmonoy-6를 오버레이 용접한 결과, 스캔속도와 분말공급속도를 조절하여 17.3%의 최적의 회석률과 최고경도 746VHN을 얻을 수 있었다.

펄스 레이저 클래딩은 매우 낮은 입열량, 제어된 국부가열과 급속한 냉각속도의 장점을 갖고 있는데, C. P. Paul 등¹⁷⁾에 의해 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용하

여 저탄소강에 WC-12wt.% Co를 복합층으로 레이저 클래딩하여 계면강도 60MPa, 클래드층의 미세경도 1250~1700VHN_{1000g}을 얻었다.

Wei Zhang¹⁸⁾에 의하면 열간금형용 강표면에 Fe-VC 복합분말을 10kW CO₂ 레이저 클래딩함으로써 망상의 탄화물과 초미세한 탄화물 입자가 분산된 Fe계 과포화 고용구조를 얻을 수 있었으며 모재의 경도보다 3.5배나 높은 H_{v0.2}900을 나타내어 경제적인 효율성을 크게 향상시켰다.

원자력발전소나 화학공장에서 사용되는 Inco-nel 182와 같은 Ni계 초내열합금은 입내균열 혹은 입내응력부식균열에 의한 손상이 일어나는 경우, TIG용접으로 보수용접을 실시해 왔으나 높은 입열량으로 인해 작업상 불편함을 가져와, Gang Bao 등¹⁹⁾에 의해 레이저빔에 의한 표면용융법으로 보수용접을 적용하여, 높은 정밀성, 신뢰성, 효율성 및 생산성으로 경제적인 가치를 높였다.

J. M. Amado 등¹³⁾은 미리 혼합시킨 합금분말을 이용하여 NiCr-WC MMC층을 레이저 클래딩에 의해 저합금탄소강 표면에 오버레이 용접을 하였다. 강화된 텅스텐입자는 구상의 용융 탄화텅스텐으로 이루어졌으며, 용접된 코팅층의 균열은 NiCr기지의 크롬함량에 달려 있는데, Cr함량이 약 8% 이하에서는 균열이 발생되지 않았으나 Cr함량의 감소는 기지조직의 경도를 감소시켜 내마모성을 저하시키므로 최적의 Cr함량에 대한 선정이 중요하다.

레이저 스캔속도를 3000mm/min.로 증가시킴으로써 양호한 표면형태와 높은 경도로 균열이 발생되지 않는 Ni계 WC복합재료 오버레이 용접이 가능하기 때문에, 최근 레이저유도 하이브리드 급속클래딩(LIHRC, laser induction hybrid rapid cladding)이 괄목할 만한 주목을 받고 있다.²⁰⁾ 특히 50wt.%의 WC첨가로 LIHRC에 의해 단지 600mm/min.의 레이저스캔속도만으로 단일 트랙의 Fe계 코팅이 가능하다. Shengfeng Zhou 등²¹⁾은 클래딩속도를 증가시키고 클래드층의 균열을 방지하기 위하여 LIHRC 장치를 개발하여 Ni계 WC를 복합코팅한 결과, 균열이 없는 양호한 금속접합이 이루어졌다. LIHRC의 효율은 예열을 하지 않은 레이저 클래딩보다 4배나 더 증가하였다.

S. Zhou 등²²⁾은 LIHRC법을 이용하여 멀티트랙 겹치기(overlapping)로 Fe계 20wt.% WC 코팅을 실시하여 Fe계 수지상간 기지 내에 과포화된 고용체 α-Fe와 탄화물(즉, M₁₂C와 M₂₃C₆)을 석출시켜 내마모성을 크게 향상시켰다.

K. A. Chiang 등²³⁾은 SK3-탄소공구강의 표면에

Stellite 12 Co계 합금에 WC함량을 변화시킨 WC-Co-Cr-C를 첨가하여 레이저 클래딩에 의해 복합코팅을 하였다. WC가 40wt.%로 증가 시에 M₇C₃(M=W, Co, Cr)에서 M₂₃C₆로 탄화물이 변태하는 모습이 관찰되었다.

Shihong Shi 등²⁴⁾은 분말공급용 헤드를 이용하여 레이저 클래딩을 실시하였다. 원전용 밸브의 표면실링에 Co무첨가 FeCr-1(C 1.0wt.%, Cr 21.0wt.%, Ni, Mn, Mo W, V, B, Si, Re 소량첨가) 분말은 활성화된 방사선오염을 피할 수 있고, Fe₃C, Fe₅C₂ 및 Fe_{0.4}Mn_{3.6}C에 의해서 미세탄화물 분산강화에 의한 고경도, 고용강화 및 2차상 강화효과를 기대할 수 있으므로 차세대 원자력발전소용 밸브의 표면실링에 활용될 것으로 기대된다.

Wei Zhang²⁵⁾에 의하면 2Cr13강(Fe-0.21wt.%C-13.5wt.%Cr)표면에 TiC-Co 복합분말을 레이저 클래딩함으로써 과포화된 오스테나이트계 수지상에 TiC가 분산된 조직을 얻을 수 있었으며 클래드층의 평균경도는 H_{v0.2}660, 경화층의 평균경도는 H_{v0.2}450을 나타내어 터빈블레이드 수명을 크게 향상시킬 수 있었다. 향후 플라스틱금형 분야에 경제적 효율성 향상에 대한 기대가 가능하다.

레이저 클래딩을 위한 Rofin-Sinar 850 CO₂ 레이저 저장치가 W. C. Lin 등²⁶⁾에 의해 개발되었는데, 연강에 Stellite 6(Co-28.5Cr-5.06W-1.34Ni-1.33Si)과 Tribaloy T-900(Co-23Mo-18Cr-16Ni-2.7Si)을 레이저 클래딩한 결과, T-900은 Stellite-6보다 내마모성과 내부식성이 우수하였으나 클래딩 공정 중에서 균열을 방지하기 위하여 예열처리를 하였다. Dong-sheng Wang 등²⁷⁾은 5kW CO₂ 레이저 클래딩에 의해서 NiCrBSiC 하드페이싱 코팅층에 V₂O₅를 첨가하여 인성을 향상시키고 조직미세화와 고온균열감수성을 줄였다. 조대하고 취약한 크롬 붕화물과 탄화물을 미세균일한 바나듐 붕화물과 탄화물로 변환시킬 수 있는데, V₂O₅ 5wt.% 이상 첨가로 고온균열을 완전히 없앨 수 있었다.

J. M. Amado 등²⁸⁾은 2-kW 산업용 Nd-YAG laser (Rofin-Sinar)의 레이저 클래딩 조업에서 대입열의 레이저 에너지밀도와 낮은 스캔속도로 인하여 구형의 WC함유량을 가장 많이 분산시켜 평균경도가 1000~1500Hv인 NiCr-WC 클래딩 층(상표 : Spherotene)을 형성시켰다.

Hamamoto Yosio 등²⁹⁾에 의해 가열용 레이저빔을 스티브 튜브의 균열 부분에 응력부식균열감수성이 낮은 재료로 오버레이 용접을 행하여 새로운 균열의 발생의

방지와 노수 누설 방지를 위한 원자로 노저부의 보수용 접기술을 확보하였다.

알루미늄합금 AC2B 모재의 내마모성을 향상시키기 위하여 강남현 등³⁰⁾은 Fe합금분말을 2kW CO₂ 레이저 클래딩 공정으로 하드페이싱한 결과, 분말공급량이 증가하고 속도가 감소하면 Ac는 증가하였으며, 넓은 Ac와 좁은 Wp를 갖는 클래드층을 획득하기 위해서는 속도를 줄이기보다 분말공급량을 증가시키는 것이 유리하였다. 또한 250°C로 예열로 계면균열 발생률을 감소시키고 내마모성을 향상시켰다. 또한 패스간의 겹침률이 50% 오버랩 오버레이 샘플이 0% 오버랩에 비해서 왕복슬라이딩 마모성이 우수하였다.

2.3 SMAW(Shielded Metal Arc Welding)

YANG Ke 등³¹⁾은 질소를 고정시키는 원소인 Nb와 Ti이 첨가(1.2wt.%)된 새로운 형태의 SMAW 하드페이싱 FCW를 개발하였다. 래스 마르텐사이트, 잔류오스테나이트 및 탄질화물의 미세조직을 갖고 있으며, 특히 미세하게 분산된 탄질화물은 내고온마모성을 크게 향상시켜 롤의 수명을 크게 향상시킬 수 있었다.

X. H. Wang 등³²⁾은 Fe-Ti, 루틸, 흑연, 탄산칼슘, 플루오르화칼슘으로 된 플럭스로 이루어진 전극(H08A)을 이용하여 SMAW에 의해 AISI 1045강 표면에 Fe계 하드페이싱 용접을 하였다. 용접되는 동안에 FeTi과 흑연 사이에 직접적인 야금반응에 의해 TiC입자(3~5 μ m)를 생성시켜, 이 TiC입자를 래스 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트 기지 내에 10.4~15.6vol.%로 균일하게 분산시킨 결과, 양호한 내마모성과 낮은 마찰계수를 얻을 수 있었다.

신용범 등³³⁾에 의하면 Mn-Ni-Cr-Mo강에 대한 Inconel 690의 오버레이 용접과정 중에 자주 발생하는 균열현상을 분석하고 균열방지대책을 확립하였다. STS 309L 클래드층과 Inconel 690의 클래드층을 연결하는 경계 부위에서 고온균열현상이 가장 심하게 발생하였는데, Nb이 상대적으로 많이 함유된 SMAW방법이 초층과 두 번째 층 사이의 입계에 다량의 Nb으로 인하여 GTAW방법보다 균열감수성이 민감하다는 것을 확인하였다.

SMAW에 의한 용접부에서 발생한 균열의 파면상에서는 Nb화합물의 존재 또는 Nb이 농화되어 있는 것을 알 수 있었으며, 균열발생이 상대적으로 적었던 GTAW 용접부에서 발생한 균열의 파면에서는 Nb이 전혀 검출되지 않는 것으로 보아 Nb은 Inconel 690용접부에서의 고온균열 발생의 주요인의 하나인 것으로 추정된다³⁴⁾. 또한 균열은 용접입열량이 증가할수록, 또한 용접

비드가 길수록 발생량이 증가하는 경향을 보이고 있으나 용접시작부와 종료부의 용접순서를 적절히 조합하면 균열발생이 현저히 감소된다.

2.4 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)

M. Mosallae pour 등³⁵⁾은 Al-Si용가재를 사용하여 AISI 1006강 표면에 Al-Fe계 합금층으로 GTAW 오버레이 용접한 결과, FeAl기지에 침상의 금속간 석출물인 Fe₃Al과 FeAl₃을 형성시켜 경도를 획기적으로 향상시킬 수 있었다. 또한 500±50°C에서 예열처리와 300±20°C에서 후열처리 효과로 고온균열감수성을 낮출 수 있었다. 지금까지 Fe-Al합금은 균열에 대한 감수성이 높아 주로 클래드재료로 사용하였으나 향후 내산화성 분야에 적용범위의 확대가 가능하다고 볼 수 있다.

R. Arabi Jeshvaghani 등³⁶⁾은 TIG공정을 이용하여 stellite 6(Co-29Cr-4W-1.2C-2Ni)에 의해 합금화된 구상흑연주철의 내마모성을 향상시키기 위하여 표면합금층의 수지상간 지역에 M₇C₃와 M₂₃C₆와 같은 공정탄화물을 함유한 Co-rich 수지상 조직을 형성시켰다.

저탄소강에 대하여 수명연장을 하기 위하여 후열처리를 해야 하는데, 현장 작업 시에 후열처리가 어렵기 때문에 이를 대체하기 위한 기술로 변진귀 등³⁷⁾은 텀퍼비드 용접을 적용할 경우 후열처리를 생략할 수 있는 텀퍼비드 용접기술을 확립하였다. 원자력 주기기의 노즐에 사용되는 SA508 Gr.3 모재에 용가재로서 Alloy 52 및 52M을 사용하여 자동 GTAW 용접을 적용하여, 용접부 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)에 대한 열화를 방지할 수 있는 용접기술을 제시하였다.

권준모 등³⁸⁾에 의해 플라스틱 금형용 크롬-몰리브덴강의 표면에 Fe-30.3Cr-8.64Ni-0.08C의 용가재를 이용하여 GTAW 오버레이 용접을 행한 결과, 후열처리와 300°C 이상의 예열처리를 실시하게 되면 용착성이 좋아지고 냉각속도가 느려져서 응력을 완화시켜주기 때문에 균열이 발생되지 않았다. TIG용접에서 박효희 등³⁹⁾은 기종와이어의 용착금속용융효율을 높이도록 큰 단면적을 가지면서도 아크쪽 표면적이 큰 사각단면적을 가지는 와이어를 이용하여 용융속도를 향상시켜 생산성을 향상시켰다.

Inconel 690의 GTAW에 의한 용접부가 SMAW에 비하여 균열발생이 크게 감소하였으며, STS 309L과 인접한 위치에서 균열이 잘 발생한다는 것은 Nb과 같은 특정성분 뿐만 아니라, 용접재료, 모재 또는 인접용접부의 화학조성에 따라서 Inconel 690 용접부의 고온균열감수성이 크게 변화된다³⁴⁾.

2.5 GMAW(Gas Metal Arc Welding)

중소형 부품의 하드페이싱에 사용되는 오버레이 용접 공정으로는 SMAW과 GTAW가 일반적이었으나 최근에는 생산성이 높은 GMAW의 비중이 증가하고 있다.

GMA오버레이용접에서 희석률을 최적화하는 방법으로는 용접공정을 통한 비드형상 제어를 고려해야 한다. Murugan 등⁴⁰⁾에 의하면 스테인리스강의 클래딩을 위한 GMA오버레이 용접에서 희석률은 용접전압과 와이어송급속도 증가에 따라 상승하고 콘택트 팁-모재간 거리 증가에 따라 감소하며 용접속도와는 무관하였다.

극한지용 내마식 고인성 오버레이 용접재료 개발을 위해 김남훈 등⁴¹⁾은 Fe-12Cr-1.2C 합금조성을 갖는 메탈코어드 와이어에 대하여 Ca함유 용접플럭스 첨가가 용착부 형상 및 희석률변화에 미치는 영향을 조사하여 용접플럭스 설계기술을 확립하였다.

GMA오버레이용접에서 희석률을 최적화하는 방법으로 김남훈⁴¹⁾, 김일수⁴²⁾은 용접전류, 용접전압, 용접속도를 입력변수로 하여 일반구조용 강 GMA용접비드형상을 예측하는 신경회로망 모델을 제시하였다. 또한 손준식 등⁴³⁾은 GMA용접공정에서 용접시 발생하는 외란의 영향을 최소화하고 비드형상을 예측할 수 있는 선형방정식과 비선형방정식 및 신경회로망모델을 개발하였다.

GMA 용접을 위한 오버레이 용접용 메탈코어드 와이어를 제조하기 위하여 합금분말로 Fe-Cr-C합금을 기본조성으로 하고 비드의 희석률에 따라 Cr과 C의 질량 비율을 조절함으로써 용접완료 후 용착부의 최종합금조성이 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 변태되는 순간인 변형유기 상변태 경계선에 근접하도록 하였다. 또한 플럭스 분말에 Mn, Al, Si, Ti, ZrO₂, NaF 및 MgF₂를 첨가시켜 희석률을 효과적으로 조절하였다⁴⁴⁾. 합금의 마모저항성을 높이기 위하여 Cr과 C의 비율을 변형유기 상변태경계영역으로 설정함으로써 변형유기 상변태를 극대화하였다.

GMA용접시 희석률을 낮추기 위해서는 저전류 스프레이 이행이 가능한 펄스공정 개발이 필요하다. 최저입열량의 용접조건, 낮은 비드높이와 얇은 용입을 얻고, 최적의 펄스 파형을 목표로 해야 한다. 하현주 등⁴⁵⁾에 의해 펄스를 이용하여 인코넬 625 와이어를 사용한 2층의 오버레이용접을 하였는데, 원가절감을 위해 비드높이를 최대 4mm로 낮추면서 희석률 5% 미만을 얻을 수 있었다.

회주철 트리밍 금형에 대한 경화육성 자동 MIG용접시 발생하는 균열 및 기공방지에 대한 유광선 등⁴⁶⁾의

연구결과, 노즐내경을 넓혀 용접부에 기공발생을 방지하였다.

2.6 SAW(Submerged Arc Welding)

The NanoSteel Company⁴⁷⁾에서는 판재, 파이프 및 엘보우를 포함하는 다양한 제품 위에 서브머지드 아크에 의한 오버레이 용접 및 종래의 고체 전극와이어에 결합될 수 있는 Fe+Mn 10~75wt%, Cr 10~60wt% 등이 함유된 Fe계 공급원료 파우더를 개발하였다.

김창규 등⁴⁸⁾은 SAW 용접방법을 이용한 연주를 하드페이싱에 사용하는 새로운 용접와이어에서 나타나는 문제점 중 가장 많은 비율을 차지하는 균열의 발생을 방지하면서, 동시에 연주물에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있는 용접재료로 0.06%C-12~13%Cr-2.5%Ni-1%Mo 기지에 Nb 0.1%, V 0.15%를 단독 또는 동시에 첨가하여 용접결합의 발생을 억제하였다.

물 육성용접에 사용되는 용접와이어로는 통상적인 MIG용접에 사용되는 소경의 스테인리스 와이어가 주로 사용됨에 따라 용접속도가 너무 느린 문제가 있어, 용접속도를 증가시키기 위하여 선경을 키우고 자동용접할 수는 있으나 스테인리스 와이어의 가격이 너무 비싸지기 때문에 경제적이지 못하다. 강한규⁴⁹⁾는 오버레이 용접을 수행한 다음 응력제거 열처리후에도 용착금속의 충격인성치가 떨어지지 않고, 소결형 플럭스와 조합하여 용접시공시 작업성이 뛰어난 물 하드페이싱용 플럭스 코어드 와이어를 개발하였다.

2.7 ESW(Electro Slag Welding)

광폭의 전극을 사용하는 ESW용접법으로 개발된 3Cr-1Mo-V-Ti-B강에 오스테나이트계 스테인리스강을 오버레이 용접하여, 박리균열의 형성기구와 용접조건을 김동진 등⁴⁴⁾에 의해 검토한 결과, 용접속도가 증가함에 따라 냉각속도가 증가하여 마르텐사이트량이 증가하고 δ페라이트량이 감소하고 미세화되었다. 고속용접으로 용접부 계면에 마르텐사이트의 생성폭이 증가하여 계면의 오스테나이트의 결정립크기가 미세화되고 탄화물이 분산되기 때문에 박리균열을 억제할 수 있다.

3. 향후 기술전망

3.1 PTA(Plasma Transferred Arc)

PTA에 의한 오버레이 용접은 많은 장점이 있으므로 향후 발전전망이 밝다. 용접전류, 분말공급속도, 진동 및 토치 이송속도에 따라 오버레이 용접층을 폭 5mm,

두께 0.2mm로부터 폭 38mm, 두께 6mm까지 광범위하게 조절할 수 있다. 용접재료인 분말은 용착속도 4.5kg/h에서 오버레이할 부품의 크기와 형상에 따라 95%까지 회수가 가능하다. 또한 이 방법은 모재와의 반응성이 GTAW와 비슷한 수준이며 자동화가 쉬우므로 생산성이 높다.

PTA Welding M/C은 대형 구조물이나 대형제품을 오버레이할 때 효과적이며, 플라즈마를 약 1만°C 열원으로 사용하므로, 사용재료에 제한이 없다. 오버레이 두께 제어가 용이하고, 완전 자동화가 가능하다. 특히 모재에 국부적으로 표면에 열을 가하므로, 열영향부를 최소화할 수 있으므로, 불량제어 및 잔류응력을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 하지만 다른 오버레이 용접보다 고가이므로, 배기벨트와 같은 조합금재, 내열강과 같은 높은 신뢰성이 요구되고 고가의 재료를 육성하는데 향후 많이 선호될 수 있을 것이다.

PTA에 의한 오버레이 용접에도 단점은 있다. 즉 장치가 고가이며 오버레이 부분이 평면 또는 원통형이 아닌 경우에는 특별한 공구가 필요하다. 보호가스인 아르곤은 토치의 중심으로 공급되어 전극과 용접금속을 보호하며, 분말의 공급에도 사용되므로 GTAW에 비하여 소모량이 많은 편이다. 또한 넓은 면적을 오버레이할 경우 예열이 필요하며, 과도한 예열이나 용접시간이 길면 토치가 과열되므로 주의하여야 한다.

PTA공정에서 하드페이싱의 미세조직은 용접전류, 용접속도, 진동 폭을 비롯하여 기관의 예열, 분말공급속도, 가공물과 노즐과의 거리 및 캐리어, 실딩과 플라즈마 가스의 유동속도 등 많은 인자에 대한 영향을 고려하여야 한다⁷⁾. 선택된 용접인자를 기초로 하여 기관재료와의 희석, 입열량, 코팅온도 및 용융금속 점성의 제어기술이 필요하다. 또한 금속기지분말, 탄화물분말 등의 합성에 의한 상호작용에 의해 독특하게 형성되는 계면 상의 새로운 미세조직에 대한 메커니즘 규명도 이루어져야 한다^{1,7)}.

금속기지 복합재료의 경화상과 모재의 결합력 저하에 따른 계면분리는 두꺼운 코팅층보다 얇은 코팅층이 유리하다. 두꺼운 계면상 층은 충격하중에서 더욱 취약한 구조를 만들 수 있으므로, 계면상의 마이크로경도를 원래의 1차 경화상에 비해 감소시킬 수 있는 방안이 필요하다^{50,51)}.

PTA 오버레이 용접은 용사에 비해서 낮은 제조원가와 높은 생산성을 나타내고 있으며 레이저에 의한 코팅층보다 더 두껍게 육성할 수 있어서 내충격성을 향상시키는 연구에 더욱 전망이 밝을 것으로 예상된다.

3.2 레이저 클래딩

레이저 클래딩은 높은 자동화비율과 낮은 변형으로 인하여, 표면개질 기술에 촉망을 받을 수 있는 새로운 분야가 될 수 있을 것이다. 레이저를 이용한 금속의 내마모성 향상기술은 고출력 CO₂레이저의 응용으로 가능하게 되었다. 이 기술에는 레이저 합금화, 레이저 클래딩, 레이저 용해 입자분사, 변태경화, 그리고 레이저 글레이징 등이 있다. 이들 중 몇 가지는 레이저 대신 다른 열원을 이용하기도 하지만 오버레이 용접기술은 부분적인 가열이 용이한 고출력 레이저를 이용하는 경향이 높아지고 있다.

금속기지 복합재료(MMC)는 연성의 기지금속 내에 고경도, 강화상이 포함되어 있는데, 강화성분은 보통 세라믹 혹은 Ti, W, Cr 탄화물과 같은 내화금속 화합물로 이루어지며, 모재로서 보통 Ni 혹은 Co계 합금의 선정 이유는 고온에서 내부식성을 향상시키기 위함이다. 저탄소강의 표면에 Ni계 MMC층의 용접도 연구되고 있는데, 특히 탄화텅스텐은 고용점, 고경도, 낮은 열팽창 및 양호한 용접성으로 경화상의 이유로 선정된다¹³⁾.

상온과 고온에서 클래딩층의 내마모성과 내부식성을 향상시키기 위하여 WC입자는 용융점, 고경도, 낮은 열팽창계수 및 가소성(plasticity)에 대한 바람직한 성질을 가지고 있다. 그래서 Fe계⁵²⁾, Co계⁵³⁾, Ni계⁵⁴⁾ 등과 같은 비교적 광범위한 합금에서도 레이저 클래딩에 의해 세라믹-금속 복합재료를 형성할 수 있는데, 터빈 블레이드, 발전소, 자동차엔진 밸브 등과 같은 주요부품을 보수용접하는 분야에서도 적용을 기대할 수 있다.

레이저 클래딩에 의한 세라믹-금속 복합재료는 높은 균열감수성을 나타내어 많은 분야에서 적용범위를 제한 받고 있다. 클래딩 층의 균열을 극복하고 용착효율성을 향상시킬 수 있는 방법들이 개발^{55,56)} 되고 있다. 레이저-클래딩 하드페이싱 코팅에서 균열을 줄이기 위하여 2가지 방법이 거론되고 있다²⁷⁾. 첫째, 예열과 후열처리에 의해서 응고속도를 늦춘다. 이 방법^{57,58)}은 복잡하고, 제조시간 및 에너지가 많이 소비되는, 특히 부피가 큰 가공물에 적합하다. 둘째, 희토류 원소 혹은 금속산화물을 첨가함으로써 현미경조직을 미세화시킨다. 이 방법은 첫 번째 방법에 비해 적용하기 쉽고 기술적, 경제적 견지에서 유연성이 있다.

마르텐사이트계 스테인리스강의 일종인 2Cr13강(Fe-0.21wt.%C-13.5wt.%Cr) 표면에 레이저 클래딩 TiC-Co복합분말의 오버레이 용접기술²⁵⁾은 응력을 강하게 받는 부품, 즉 샤프트, 엑셀 슬리브, 블레이드 휠, 터빈 블레이드의 제조에 이용되고 있으나 내마모성

이 부족하여 사용수명이 짧았다. 향후 이 분야에 용접 기술의 확대가 기대된다.

현재 레이저 클래딩기술은 국내에서 고가 및 고신뢰성을 요구하는 부품에만 제한적으로 활용되고 있다. 레이저·자동화장비 제작기술을 국산화하여 레이저 클래딩장치의 대중화에 힘을 쏟고, 고부가가치 부품소재 산업이 활성화된다면 국내 레이저 클래딩기술의 활용도는 더욱 높아질 것으로 판단된다.

3.3 GMAW

용접와이어를 용가재로 사용하는 GMA용접은 용접봉을 사용하는 피복아크용접이나 GTA용접에 비해 용착률이 2배 정도 높으며 자동화가 가능하다는 장점이 있으나 모재와의 희석률이 10~40%로 과도할 수 있어 주의가 필요하다⁵⁹⁾. 희석률은 모재 및 용가재의 합금조성과 함께 오버레이 용접부의 합금조성 및 미세조직을 결정하는 인자로 알려져 있다.

효율적인 GMA오버레이용접을 위해서는 희석률 이외에도 비드의 퍼짐성, 스패터 등이 고려될 필요가 있다. 퍼짐성이 부족하면 비드가 좁고 뾰족하여 용융불량이 일어나기 쉬우며, 체적 대비 접합부 면적이 감소됨에 따라 응력집중이 가중되어 접합면에서의 균열발생이 심화된다. 또한 스패터는 GMA용접에 있어서 아크안정성을 판단할 수 있으며 용가재의 손실을 초래하고 용접 부외관을 강화시킬 수 있는 요인이 될 수 있다.

철계합금에서 관찰되는 변형유기 마르텐사이트 상변태는 입자의 충돌에 의한 충격을 흡수하고 소재의 표면을 가공경화시켜 내마식성 향상 및 저온인성에 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한 합금조성의 정교한 제어가 필요하기 때문에 오버레이 용접에 적용하기 위해서는 모재와의 희석률을 제어하는 방안이 필요하다⁴¹⁾.

3.4 GTAW

용접와이어를 이용한 TIG용접은 우수한 용접품질을 확보할 수 있는 장점이 있기 때문에 비철합금으로 이루어진 플랜트의 배관, 압력용기의 용접에 널리 적용되고 있지만 상대적으로 용접생산성이 떨어진다는 문제점이 있다³⁹⁾. 생산성을 높이기 위해서는 전류를 높이고 용접 속도를 증가시켜야 하지만 대전류를 사용하게 되면 아크압력에 의한 강한 아크력에 의해 용융지 표면에 심한 압입현상이 생기며 언더컷, 험핑비드, 분리비드 등과 같은 용접결함이 발생되어 고속용접에 한계가 있다³⁹⁾. 향후 TIG용접에서 용융속도를 향상시켜 생산성을 증가시키는 기술개발이 필요하다.

3.5 SMAW

SMAW은 GMAW, GTAW, PAW보다 높은 증착속도, 낮은 제조가격, 양호한 외관모습으로 인하여 롤³¹⁾을 하드페이싱하는데 매우 유망한 공정이다. 특히 SMAW용 FCW(Flux Cored Wire)는 기계적 특성과 내마모성을 가장 효율적으로 향상시키기 때문에 최근 활발하게 개발되고 있다.

롤 하드페이싱 용접에 사용되는 용접 와이어로는 통상적인 MIG 용접에 사용되는 소경의 스테인레스 와이어가 주로 사용됨에 따라 용접속도가 느린 문제가 있다. 용접속도를 증가시키기 위해 선경을 키우고 자동용접할 수는 있으나 스테인리스 와이어 가격이 너무 비싸지기 때문에 경제적이지 못하다. 향후 MIG 용접 대신에 용접속도가 빠른 자동 SMA 용접에 적용하여 용접 작업성을 향상시키고 다층 용접후 균열방지하고 충격인성이 보장된 저렴한 하드페이싱 용접용 와이어와 용접 방법의 개발이 요구되고 있다²⁹⁾.

3.6 SAW

서브머지드 아크를 이용한 하드페이싱 용접에서는 용접재료들의 대부분이 0.2% 이상의 높은 탄소함량을 가지고 있어 용접시 과도한 부피의 팽창 및 내부 잔류응력 등에 의해 균열의 발생 가능성이 대단히 크다. 이에 따라 용접부에 대한 충분한 예열 및 용접중 층간 온도의 유지시공, 용접후 열처리 등으로 어느 정도 균열을 방지할 수 있으나 현실적으로 대형 구조물에 대한 예열, 층간온도의 유지 및 후열처리 등은 용이하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 탄소를 0.1% 이하로 낮게 관리하여 마르텐사이트 변태율을 조절하고, 강도와 내마모성은 Nb, V, Mo 등의 합금원소 첨가로 고용강화와 탄화물의 석출경화 등을 이용하면 대응이 가능하다.

4. 결 론

1) 오버레이 용접방법으로서 PTA, 레이저 클래딩, SMAW, GTAW, GMAW, ESW에 대한 연구가 주로 이루어지고 있으며 이중에서 해외에서는 PTA와 레이저 클래딩이 활성화적으로 진행되고 있다.

2) 오버레이 용접기술에 대한 정성분석 결과, 국내 연구는 최근 10년간 GMA, GTA, SMA, PTA, 레이저 클래딩을 중심으로 연구가 꾸준히 추진되고 있으나 향후 경제성 및 용착효율성을 감안한 새로운 기술의 정착이 필요하다.

3) 향후 국내 오버레이 용접기술은 다양한 용접기술, 특히 PTA와 레이저 클래딩 용접기술이 활성화 되어야 할 것으로 기대된다. 이외에도 생산성 및 품질 향상을 위한 자동화용접기술의 개발이 요구되고 있다.

후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

참 고 문 헌

- D'Oliveira et al. : Pulsed current plasma transferred arc hardfacing, *Journal of Materials Processing Technology* **171** (2006) 167~174
- K. Siva, N. Murugan, R. Logesh : Int. J. Adv. Manuf. Technol. **41** (2009) pp.2441. Namhoon Kim, Jin-Hyun Koh et al. : Effects of Welding Fluxes on the GMA Overlay Welding Behavior, *Journal of the Korean Welding Society* (2010-Spring) 72 (in Korean)
- Gauthier Beaurin et al. : Microstructural and mechanical properties evolutions of plasma transferred arc deposited Norem02 hard-facing alloy at high temperature, *Materials Science and Engineering A* **528** (2011) 5096~5105
- F. Fernandes et al. : Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron, *Surface & Coatings Technology*, **205** (2011) 4094~4106
- Q. Y. Hou et al. : Influence of nano-Al₂O₃ particles on the microstructure and wear resistance of the nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc overlay welding, *Surface & Coatings Technology* **205** (2011) 2806~2812
- C. Sudha et al. : Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel, *Surface & Coatings Technology*, **202** (2008) 2103~2112
- C. Katsich, E. Badisch : Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions, *Surface & Coatings Technology* **206** (2011) 1062~1068
- J. F. Flores et al. : Erosion-corrosion degradation mechanisms of Fe-Cr-C and WC-Fe-Cr-C PTA overlays in concentrated slurries, *Wear* **267** (2009) 1811~1820
- D. Kesavan, M. Kamaraj : Influence of aging treatment on microstructure, wear and corrosion behavior of a nickel base hardfaced coating, *Wear* **272** (2011) 7~17
- K. Gurumoorthy et al. : Microstructures and wear properties of nickel based hardfacing alloy, *Mater. Sci. Technol.* **22** (2006) 975~980
- A. K. Bhaduri et al. : Selection of hardfacing material for components of the indian prototype fast breeder reactor, *J. Nucl. Mater.* **334** (2004) 109~114
- T. Liyanage et al. : Influence of alloy chemistry on micro-structure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding, *Surface & Coatings Technology* **205** (2010) 759~765
- J. M. Amado et al. : Crack Free Tungsten Carbide Reinforced Ni(Cr) Layers obtained by Laser Cladding, *Physics Procedia* **12** (2011) 338~344
- Namhyun Kang and Yeongon Yoo : Laser Cladding Technology in Overlay Welding, *Journal of the Korean Welding Society*, **25(1)** (2007) 7~8 (in Korean)
- Navas C : Tribological properties of laser clad Stellite 6 coatings on steel substrate. *Surface Engineering* **22** (2006) 26~34.
- Girish R. Desale et al. : Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel, *Wear* **266** (2009) 975~987
- C. P. Paul et al. : Cladding of WC-12 Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser, *Materials Science and Engineering A* **464** (2007) 170~176
- Wei Zhang et al. : Research on Microstructure and Property of Fe-VC Composite Material Made by Laser Cladding, *Physics Procedia* **25** (2012) 200~204
- Gang Bao et al. : Stress corrosion cracking sealing in over-laying of Inconel 182 by laser surface melting, *Journal of Materials Processing Technology* **173** (2006) 330~336
- Zhou S et al. : Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding, *Materials Science and Engineering* **480(1-2)** (2008) 564~572
- Shengfeng Zhou et al. : Microstructure characteristics of Ni-based WC composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding, *Materials Science and Engineering A* **480** (2008) 564~572
- S. Zhou et al. : Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding, *Optics & Laser Technology* **44** (2012) 190~197
- K. A. Chiang et al. : Microstructural characterization & microscopy analysis of laser cladding Stellite 12 and tungsten carbide, *Journal of Materials Processing Technology* **182** (2007) 297~302
- Shihong Shi et al. : Study of cobalt-free, Fe-based alloy powder used for sealing surfaces of nuclear valves by laser cladding, *Nuclear Engineering and Design* **245** (2012) 8~12
- Wei Zhang et al. : Research on Microstructure and Property of TiC-Co Composite Material Made by Laser Cladding, *Physics Procedia* **25** (2012) 205~208

26. W. C. Lin, C. Chen : Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding, *Surface & Coatings Technology* **200** (2006) 4557~4563
27. Dong-sheng Wang et al. : Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad $V_2O_5/NiCrBSiC$ alloy coatings, *Surface & Coatings Technology* **202** (2008) 1371~1378
28. J. M. Amado et al. : Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene1) hardfacing alloys for the mining and mineral industry, *Applied Surface Science* **255** (2009) 5553~5556
29. Toshiba Corp., Hamamoto Yosio et al. : method of repairing bottom section of nuclear reactor, Korean unexamined patent 10-2011-0063802 (in Korean)
30. Nam Hyun Kang et al. : Behaviors of the interface cracks an Al-Fe dissimilar joining, *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Spring (2006-5) 59~61 (in Korean)
31. YANG Ke et al. : A New Type of Submerged Arc Flux Cored Wire Used for Hardfacing Continuous Casting Rolls, *Journal of Iron and Steel Research, International*, **18(11)** (2011) 74~79
32. X. H. Wang et al. : Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles, *Journal of Materials Processing Technology*, **168** (2005) 89~94
33. Y. B. Shin et al. : Cracking and Its Prevention in Overlay Welds of Austenitic Stainless steels/Inconel 690 on Mn-Ni-Cr-Mo Steel for Reactor Pressure Vessel, *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Oct. **01** (2000) 211~213
34. Byung-Il Yang et al. : Hot Cracking Behavior in Inconel 690 Overlay Welds on Mn-Ni-Cr-Mo Steel for Pressure Vessels, **20(2)** (2002) 82~89
35. M. Mosallae pour et al. : Surface modification of low carbon steel substrate by Al-rich clad layer applied by GTAW, *Surface & Coatings Technology* **206** (2011) 217~223
36. R. Arabi Jeshvaghani et al. : Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6, *Materials and Design*, **32** (2011) 2028~2033
37. Jin-Gwi Byeon, Kwang-Soo Park : Development of Temper Bead Welding Process for Preemptive Weld Overlay of Alloy 82/182 Welds, *KWJS 2009-Autumn* pp.16 (in Korean)
38. J. M. Kweon et al. : Characteristic of GTAW weld overlay on Cr-Mo steel, *KWS (2004-Autumn)* 135~137 (in Korean)
39. Hyo Hui Park et al. : Process development for productivity improvement In-pipe TIG Overlay welding, June 09, *Korea Society of Marine Engineering* (2011), 78 (in Korean)
40. N. Murugan et al. : Effect of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel, *J. of Matereals Processing Technology*, **41** (1994) 381~398
42. Ill-Soo Kim, Joon-Sik Son : An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process, *J. of Materials Processing Technology*, **159** (2005) 113~118
43. Joon-Sik Son, Ill-Soo Kim et al : Development of experimental model for bead profile-prediction in GMA welding, *Journal of KWS* **23-4** (2005) 41-47 (in Korean)
44. Dong-Jin Kim et al. : Effect of Welding Condition on Microstructure of Transient Zone in Overlay Weld of 3Cr-1Mo Steel/STS-309L, *Journal of KWS*, **18(2)** April (2000) 176~183
45. Hyeon-ju Ha et al. : Overlay welding by pulse MIG welding with Inconel 625 for marine crude oil extraction pipe inside, *The Korean Society of Marine Engineering*, June 09, (2011), 75 (in Korean)
46. K. S. YOO et al. : The development of prevention technique for crack and porosity occurred during hardening overlay auto MIG welding for press die of gray cast iron, *KWS Autumn* November (2005) 114~116 (in Korean)
47. The NanoSteel Company, Brenergun Daniel James et al. : feedstock powder for production of high hardness overlays, Korean unexamined patent 10-2012-0040735 (in Korean)
48. Chang-Gyu Kim et al. : Effects of Nb, V on the Mechanical Properties of Continuous Casting Rolls Overlaidhang, *The Korean Society of Ocean Engineers* **18(2)** (2004) 70~76 (in Korean)
49. KISWEL, Han-Kyu Kang : Flux cored wire for overlaying of roll and method for overlaying of roll using thereof, Korean patent, 10-0543693 (in Korean)
50. Ch. Just et al. : Influence of welding current on carbide/matrix interface properties in MMCs, *Journal of Materials Processing Technology* **210** (2010) 408~414
51. Ch. Just et al. : Influence of processing conditions on the carbide/matrix interface in sintered composite layers, *Surface & Coatings Technology* **205** (2010) 35~42
52. Amado J. M. et al. : Laser cladding of tungsten carbides hardfacing alloys for the mining and mineral industry, *Applied Surface Science* **255(10)** (2009) 5553~5556
53. Chiang KA, Chen YC. : Microstructural characterization and microscopy analysis of laser cladding stellite 12 and tungsten carbide, *Journal of Materials Processing Technology*, **182(1-3)** (2007) 297~302
54. Acker K et al. : Influence of tungsten carbide particle size and distribution on the wear resistance of laser clad WC/Ni coatings, *Wear* **258(1-4)** (2005) 194~202
55. Wang D et al. : Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad $V_2O_5/NiCrBSiC$ alloy coatings, *Surface and Coating Technology* **202(8)** (2008) 1371~1378
56. Paul CP et al. : Cladding of WC-12Co on low

carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser, Materials Science and Engineering **464(1-2)** (2007) 170~176
 57. M. Duraselvam, R. Galun, S. Siegmann, V. Wesling : Laser in Engineering **15** (2005), 355

58. E. Fernandez, M. Cadenas, R. Gonzalez, C. Navas, R. Fernandez, de Damborenea : Wear **259** (2005), 870
 59. R. Menon : Recent advances in cored wires for hardfacing, Welding Journal, Nov. (2002) 53~58



- 유호천
- 1951년생, 공학박사
- 한국과학기술정보연구원 전문연구위원
- 용접야금 및 공정, 금속공학, 정보분석
- e-mail : yooho278@reseat.re.kr