리 뷰 논 문

오버레이 용접에 있어서 용접재료에 따른 최신 연구동향

유 호 천*,†

*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

Recent Study in Variation of Welding Materials for Overlay Welding

Ho-Cheon Yoo*,†

*KISTI ReSEAT Program, Daejeon 305-806, Korea

†Corresponding author : yooho278@reseat.re.kr

(Received August 16, 2013 ; Accepted December 5, 2013)

Abstract

Recent developing tendency of overlay welding on welding materials are studied by searching of NDSL, Science Direct, KIPRIS and so on. Fe, Co, Ni and WC are selected as welding materials. Development and improvement of various new overlay welding technology, especially improvement of quality and formation of crack are introduced. Also the prospective technologies of overlay welding are anticipated.

Key Words : Overlay welding, PTA, Laser cladding, Welding crack, Welding material

1. 서 론

최근 국내 오버레이 용접재료의 연구개발 분야에서는 생산성 향상을 위한 용접시공상의 공법개선, 고에너지 열원을 이용한 첨단기술 및 새로운 합금개발에 대한 기술확립이 절실한 시점에 있다. 특히 국내 기업체의 오버레이 용접재료의 기술확립은 국제경쟁력 확보를 위해서 필수적으로 거쳐야 하는 과제이다. 향후 각종 산업분야에의 오버레이 용접기술의 정착을 위해서는 산학연이 합심하여 공동목적으로 적극적인 지원을 해야 할 것이다. 또한 국내 용접관련 산업 및 용접재료업체의 기술개발 의지가 필요한 이 시점에서, 오버레이 용접기술에 대한 제조기술의 확립과 향후 방향제시를 목표로 하고 있는 정보자료의 출현이 국내산업 발전을 더욱 활성화할 수 있는 촉진제가 될 것이다. 이를 위해 본고에서는 NDSL, ScienceDirect, KIPRIS 등의 검색을 통하여, 국내외 오버레이 용접관련 학술지와 특허자료를 입수하여 체계적으로 분석하였다. 특히 용접재료에 따른 오버레이 용접기술 개발동향을 파악하기 위하여 철계, Co계, Ni계, WC계 재료에 관한 해외 및 국내 오버레이 용접의 기술개발 동향을 파악하고 정성분석하였으며 향후 기술을 전망하였다.

2. 용접재료에 따른 기술개발동향

2.1 철계

저합금 고장력강에 오스테나이트계 스테인리스강의 오버레이 클래딩용접 시에는 최적의 용접공정인자를 선정함으로써 블로우홀, 핀홀 및 포착된(entrapped) 슬래그와 같은 결함이 없는 클래드 접합부를 형성시키는 제조기술이 필요하다[1].

Izutani 등[2]은 Fe기지에 Cr 15.0~50.0 wt.%, C 0.20wt.% 이하, Si 15.0wt.% 이하, Mn 20.0wt.% 이하를 함유시킨 플럭스 코어드 용접와이어를 이용하여 순아르곤을 실드가스로서 하드페이싱 용접하여 양호한 용접 작업성 및 저희석률을 실현하여 내식성이 우수한 용접부를 얻었다. 이 방법은 특히 용착속도, 용착효율이 크다는 장점이 있다.

저합금고장력강에 대한 스테인리스강의 오버레이 용접은 내부식성과 저온인성을 향상시키기 위한 연구에 활기를 띠고 있는데, 최근 Pan 등[3]은 16Mn강과 9Cr

강 표면에 고경도 마르에이징강을 용접하여 경도, 내마모성 및 균열저항성을 향상시켰다. Lu 등[4]에 의해 AISI 1045강 표면에 SAW에 의해 Fe-Mn-Cr-Mo-V 합금을 클래딩한 실적이 있다.

S. Zhou 등[5]에 의하면 레이저유도 하이브리드 급속클래딩(LIHRC, laser induction hybrid rapid cladding)에 의해 스캔속도를 3500mm/min, 최대 분말공급속도를 120g/ min.로 하여 AISI 1045강 표면에 80wt.%Fe계+20wt. %WC합금을 대면적으로 코팅하여 내마모성(dry sliding wear)을 크게 향상시켰다. 이때 Fe계 합금의 평균입도는 80㎛로 하였으며, 세라믹 상으로 WC입자의 평균입도 30㎛로 하고 과립상(granulating)으로 WC+ W_2C공정의 층상혼합물로 제조하였다.

Xiaowen Qi 등[6]에 의하면 Fe-23Cr-3.5C성분의 플럭스 코어드 와이어에 V첨가의 영향을 조사하였다. V함량이 증가할수록 내마모성이 증가하였는데, 벌크형 1차 탄화물의 양은 감소하고 미세한 공정탄화물의 양은 상승하였다. 기지조직(마르텐사이트+잔류오스테나이트) 내에 M_7C_3와 VC형의 탄화물이 석출되었으며, VC는 하드페이싱 금속의 응고 후에 2차 탄화물로서 석출이 되었다.

Hao Feifei 등[7]은 하드페이싱 시에 예열이나 후열이 필요없고, 높은 가소성(plasticity)과 인성 및 내마모성과 동시에 용접균열이 발생시키지 않는 재료를 개발하기 위하여 희토류산화물($LaAlO_3$, Ce_2O_3, Ce_2O_2S)의 첨가 영향을 조사하였다. 이 방법은 특히 중탄소강으로 된 샤프트, 기어 등을 하드페이싱 오버레이 보수용접하는데 유용하게 활용할 수 있다. 희토류 산화물이 5.94wt.% 첨가시 5~10㎛크기의 가장 미세한 입도를 얻을 수 있었으며 이 이상 첨가 시에는 희토류산화물과 δ-Fe와의 부정합(misfit)과, 핵생성의 효율성이 상실되어 페라이트 입도가 증가하였다.

Hao Feifei 등[8]은 희토류 산화물이 함유된 플럭스 코어드 와이어로 제조한 Fe-Cr-C계 합금으로 된 고크롬주철의 하드페이싱 후에 탄화물의 형태를 관찰한 결과, ① 희토류 산화물의 양이 증가할수록 탄화물의 부피율은 증가하고 면적과 원둘레가 감소되어, 탄화물은 더욱 미세하고 더욱 원형으로 되려는 경향과, ② 희토류 산화물이 탄화물의 비균질 핵생성 원으로 작용하고 미세한 M_7C_3탄화물의 생성을 촉진하는 경향을 확인하였다.

일본 Nidetz Hard Co., Maruyama Takamiz는 내열균열성, 내마모성 및 내식성이 우수한 하드페이싱 용접된 연속 주조용 롤을 국내에 특허출원[9]하였다. 하드페이싱 재료에 대해서 Cr 13~20wt.%을 함유시킨 강기지에 C 0.07wt.% 이하로 낮게 제한하고 다량의 티타늄(0.5~4wt.%)을 1≤Ti/N≤20의 범위로 첨가하여 친화력이 강한 질소와 반응시켜 기지의 크롬농도를 억제시키지 않고 질화물을 입내에 골고루 석출시켜 내열균열성 및 내식성을 유지하면서 내마모성을 겸비할 수 있도록 하였으며 동시에 Co, Mo, Ni 등의 값비싼 첨가원소를 줄일 수 있는 방안이다.

Fe-Cr-C 합금계는 고경도 분산상인 크롬탄화물을 이용하는 대표적인 철계 하드페이싱의 합금 중 하나이다. 원전 밸브용으로 종래에 사용해 오던 Co계 Stellite 합금을 초정 오스테나이트가 먼저 생성시켜 용접균열이 발생되지 않는 아공정계 Fe-Cr-C합금계로 대체하기 위한 연구가 김준기 등[9]에 의해 시도되었다. 오버레이 용접용 메탈코어드 와이어는, 외피 및 외피 내에 충진되는 충진재를 포함하는 오버레이 용접용 와이어에 있어서, 충진재는 합금분말 및 플럭스분말을 포함하며, 합금분말은 Fe-Cr-C 합금을 기본 조성으로 하고, 비드의 희석률에 따라 Cr 및 C의 질량 비율을 조절함으로써, 용접완료 후 용착부의 최종 합금 조성이 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 변태되는 순간인 변형유기상변태 경계선에 근접하도록 형성되며, 플럭스분말은 Mn, Al, Si, Ti, ZrO_2, NaF 및 MgF_2가 각각 소정 질량 비율로 첨가되어 조성되고, 각 조성 성분의 질량 비율에 따라 비드의 희석률 조절이 가능하다[10].

Co계 Stellite합금을 대체하기 위해 국내에서 자체 개발된 Co-free Fe-20Cr-1.7C-1.1Si계 메탈코어드 와이어(1.6mmΦ)에 대하여 한규호 등[11]은 GMA육성용접시 용접조건이 모재와의 희석률 및 비드형상에 미치는 영향을 조사하였다. 용적이행모드는 240A에서 27V, 270A 이상에서는 30V가 단락 이행모드에서 스프레이 이행모드로 천이되는 구간으로 나타났다. 용접비드의 희석률에 영향을 미치는 주요인자는 용접전류이며 주로 용접시 용입깊이가 일정한 반면 용착량이 증가하는데 기인하고, 용접비드의 퍼짐성에 미치는 주요인자는 용접전압이며 주로 용입깊이 대비 용입폭의 증가가 큰 데에 기인하는 것으로 추정하였다.

고크롬탄화물(Fe-18.3Cr-3.3C, Carbide 35.7%)의 아크육성 용접부에 대하여 김민호 등[12]은 연삭가공을 대체하여 CBN이나 PCD공구를 사용하는 효율이 좋은 선삭가공기술을 확보하였다.

고크롬계 철계 합금에 일반적으로 첨가되는 합금원소로는 Mo, Ni, Mn, Cu 등이 있다. Mo은 냉각시 펄라이트 변태를 억제하며 이차 탄화물 석출을 효과적으로 억제함으로써 경화능을 향상시킨다. Ni, Mn 및 Cu 역시 경화능을 향상시키며 펄라이트변태를 억제하는 역할

을 한다. 이외에도 Nb, V을 첨가하여 고경도 탄화물을 형성함으로써 고크롬 철계의 내마모성을 향상시킨다[13].

김종철 등[13]은 MAG용접에서 YGW11와이어를 용접봉으로 하고, 고크롬계 복합분말(Cr_3C_2-Mo- Mn-NbC)로 고크롬 철계 오버레이층을 형성시킨 결과, 일정와이어 송급속도에 대한 상대적 분말공급량의 증가 및 일정 복합분말 공급량에 대한 상대적 와이어 송급속도의 감소가 경질의 초정탄화물(M_7C_3) 및 NbC량을 증가시킴으로써, 경도를 증가시키고 비마모량을 감소시켰다.

Nb/C 8~13 정도의 Nb을 함유한 페라이트계 스테인리스 용접재료는 용착금속이 응고하면서 조대한 페라이트 결정립이 생성되고 입계에 석출된 화합물로 인해 굽힘연성이 저하된다. 이를 개선하기 위하여 김영일 등[14]은 용접부에 Al이 0.04~0.09%, Ti 0.2~0.5% 첨가 하여 조직 미세화의 효과에 의해 굽힘연성을 확보하였다.

2.2 Co계

원자력 발전소에 들어가는 밸브는 표면실링을 위하여 우수한 재료를 사용하여야 수명을 크게 연장시킬 수 있다. 최근 Co계 Stellite계 합금으로 Stellite 6과 21을 주로 비드용접하여 사용한다. 고온 스팀밸브는 내마모성과 내부식성이 요구되지만 Co금속은 활성방사선에 대한 염려와 가격이 너무 비싸기 때문에 값싼 재료에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다[15].

여러 나라에서 Co무첨가 신합금으로서 Fe계와 Ni계가 선정되어 적용이 시도되고 있다. ① Fe계 합금은 오스테나이트 기지에 C, Cr, Si, W, Mo 및 B을 첨가하여 재료를 강화시켜 양호한 내열 피로성능을 향상시키고 있다. Fe계 합금(예, Norem02)은 상온에서 Co계 합금과 비슷한 경도와 내마모성을 나타내지만 200℃에서는 다량의 Fe함량으로 인하여 고온경도와 스크래치 저항성이 급격히 떨어진다[16]. ② Ni계 합금은 Ni-미쉬결정에 C, Cr, Si, W, Mo 및 B을 첨가하여 제조되어 양호한 내마모성과 내부식성을 얻을 수 있었지만 아직 완전하지 못하여 연구가 진행되고 있다[17].

Stellite 6는 고온에서의 마모특성 및 내부식성이 우수하나 가격이 비싸 제작 및 주기적인 보수에 따른 비용이 상당히 크다. 따라서 현재에는 전세계적으로 Stellite 6와 등등한 내마모성 및 내부식성을 보유하고 상대적으로 저렴한 합금, 예를 들면 PTA용접시 Inconel 625 합금 또는 Inconel 718 합금으로 대체하려는 노력이 윤병현 등[18]에 의해 시도되었으나, 적용분야에 알맞은 연삭마모 및 미끄럼 마모에 대한 특성보증에 대한 파악이 무엇보다 중요하다.

Co계 Stellite합금은 슬라이딩 조건하에서의 내마모성이 우수하여 핵발전소 밸브의 하드페이싱 재료로 흔히 사용되어 왔다. 그러나 코발트는 방사선피폭의 공급원이라는 염려로 인하여 동등한 성질을 지닌 다른 하드페이싱합금으로 대체하는 노력이 진행되어 왔다. 이에 대한 일환으로 이권영 등[19]은 개발된 Fe계 Co-free 하드페이싱합금(Fe-20Cr-1.7C-1.0Si)과 Fe계 NOREM 02를 Stellite 6을 AISI 304강 위에 GTA 하드페이싱 용접하여 비교한 결과, 27~302℃에서 100사이클의 슬라이딩 마모성시험에서 동등한 내마모성을 나타내었다. 또한 NOREM 02는 202℃이하에서 Stellite 6와 거의 동등한 내마모성을 나타내었다.

2.3 Ni계

인코넬 오버레이 용접은 원전기기의 튜브시트, 주기기 노즐 등에 적용된다. 주로 적용하는 용접 프로세스는 서브머지드 아크 스트립 오버레이, 일렉트로 슬래그 스트립 오버레이, 가스텅스텐 아크용접 및 수동용접(SMAW) 등이 있다[20].

Ni계 합금분말은 내마모성과 내부식코팅이 적용되는 광석채굴, 석유탐사, 발전 및 시멘트 산업에 널리 이용되고 있다. Ni계 합금으로서 기계적 성질(예, 경도, 인성)이 우수하고 자용성(self-fluxing) 성질을 갖춘 NiCrBSi합금이 D. Kesavan 등[21),22),23]에 의해 널리 공개되어 있으며, 이러한 재료의 내마모성은 경화입자에 의해서 향상되는 것으로 알려져 있다.

C. Katsich 등[24]은 Ni계 합금(Ni-4.0Cr-2.7Si-1.5Fe-1.1B-0.2C)에 구상의 탄화텅스텐를 이용하여 내마모성을 향상시켰다. 여기에서 탄화텅스텐은 60mass%의 분율로 구성되었으며 직경 63~150㎛ 범위의 구상 WC/W_2C로 이루어진 공정반응에 의한 용융혼합물이다. 또한 W_2C 결정은 층상형태의 구조로 삽입되어 특별한 용융과정으로 제조하였다.

NiCrBSi합금계는 3종류의 오버레이공정에 의한 차이점을 나타내고 있다. 첫째 HVOF(high velocity oxyfuel) 용사에 의한 NiCrBSi합금의 코팅기술이 N. Y. Sari 등[25]에 의해 개발되었으며, E. Gruzdys 등[26]의 연구결과, 소량의 Ni_3B와 CrB상을 지닌 γ-Ni고용체로 구성되어 내마모성의 향상을 가져왔다. 둘째, 레이저 클래딩방법은 T. Gómez-del Río 등[27]에 의해 ① 준안정 Ni_3B 공정상을 지닌 수지상의 Ni-rich 상과 ② Ni-Si층상의 공정상을 지닌 수지상간 상과 ③ CrB, Cr_3C_2 혹은 $(Cr,Fe)_7C_3$로 이루어진 석출물이 관찰되었다. 셋째, PTW용접의 출현으로 C. Sudha 등[23]에 의해서 15kg/h까지의 높은 코팅속도와 약 85%의 양

호한 용착효율과 낮은 희석률을 나타내었다. PTA용접에서는 γ-Ni 수지상과 수지상간 석출물로 이루어지는데, 이 수지상간 석출물에는 Cr탄화물과 Cr붕화물을 함유시켜 내에로젼성이 향상시켰다. C. Sudha 등[23]에 의해 Cr_2B, Cr_3C_2와 Cr_7C_3 입자를 함유한 γ-Ni상을 발견하였다. J. F. Flores 등[28]에 의해 γ-Ni 수지상과 수지상간 석출물(Cr탄화물과 Cr붕화물)을 관찰하였다.

Ch. Just 등[29]은 Ni기지에 60wt.%WC/W_2C로 구성시킨 금속기지복합재료(MMC, Metal matrix composites) 하드페이싱 합금에 대하여 PTA용접에 의한 용접전류에 대한 변화를 조사하였다. 높은 용접전류에서는 WC상의 함량이 3배나 증가하였으며 용접전류를 약 25% 상승시킴에 따라 계면의 두께가 5배 증가하였다.

Kaiser Samuel[30]은 저녹스(NOx) 화력 보일러 내의 보일러 튜브용 용접 오버레이로서 사용하는 경도 및 열전도도를 증가시킨 합금을 제시하였다.

Ikeda dezunao 등[31]은 용접 금속에 있어서의 연성저하 재열 균열에 대한 우수한 내균열성을 갖고, 용접금속의 인장강도를 모재와 동등 이상으로 높일 수 있고, 용접 작업성이 우수한 용접용 Ni기 합금 솔리드 와이어를 개발하였다.

H. Kashani 등[32]에 의해 TIG용접을 이용하여 Inconel 625, Stellite 6 및 Stellite 21을 공구강에 오버레이 용접한 결과, Inconel 625이 고온(550℃)에서 가장 우수한 내마모성을 가지며, Ni계 코팅층이 Co계 코팅층보다 치밀한 산화물 층으로 인하여 고온에서 더 양호한 내마모성을 나타내었다.

Co 혹은 Ni로 된 용접재료를 하드페이싱함으로써 종래부터 마모에 대한 문제점[33]을 해결해 왔으나 원자로 부품(Indian Proto-type Fast Breeder Reactor)은 격심한 작업조건으로 기인되는 마모손상에 견디어내야 한다. 그러나 Co계 합금(예, Stellite 6)은 방사선 활동으로 사용상 바람직하지 못하여 대체합금으로 Ni계 합금을 검토한 결과, 장기간 시효연구에서 오스테나이트계 스테인리스강의 표면에 Ni계 Colnomoy 5의 하드페이싱 증착은 550℃에서 40년의 사용수명을 보증할 수 있을 정도의 적절한 경도를 유지하고 있음을 보여주었다.

니켈합금 용접재료인 Alloy 82/182용접부의 일차수응력부식균열은 해외 원자력발전소내 주요기기의 건전성을 저해시킬 수 있는 요인으로 용접시 발생하는 인장잔류응력에 의해 발생되고 있다. 이승건 등[34]은 균열을 예방하기 위한 방법으로 인장 잔류응력을 줄일 수 있는 오버레이 용접기술을 확립하였는데, 축방향 및 원주방향에 비해서 노즐에서 배관방향으로 설계하여 용접하는 것이 잔류응력을 효과적으로 감소하였다.

이종금속용접부 재료로 쓰이는 Alloy 82/182는 일차수응력부식균열에 민감하며 이종금속 내면에 인장용접 잔류응력이 발생하기 쉽다. 이에 송태광 등[35]은 고리 3호기 6안전·방출 노즐을 대상으로 이종금속 용접부에 발생하는 잔류응력을 예측하고 오버레이 용접의 영향을 파악하였다. 또한 H-Y Bae 등[36]은 고리원전 가압기 예방용접 오버레이 용접연구에서 배관에서 노즐방향으로 용접하는 것에 비하여 노즐에서 배관방향으로 용접할 때 이종용접부 내부의 잔류응력을 더 낮추는 효과가 있다는 것을 확인하였다.

고리원전 밀림관 노즐의 강한 인장잔류응력이 발생되는 보수용접부에 대해 Alloy82/182로 버터링/D.M.W (dissimilar metal weld)하는 경우, 보수용접 깊이에 따라 동종용접과 예방용접 오버레이로 인하여 인장잔류응력의 크기가 변화하는 것을 오창영 등[37]은 정량적으로 분석하였는데, 용접부 응력집중이 되는 현상을 방지할 수 있도록 형상을 만드는 것을 권장하였다.

원전노즐 이종금속 용접부에 사용되는 Inconel 600계열 용접재료는 응력부식균열에 민감하며, 특히 용접유기 잔류응력 및 사용중 하중에 의한 균열발생 위험이 크다. 응력부식균열을 완화시키는 방법으로 기계적 응력완화, 오버레이 용접 및 내응력부식균열성이 우수한 재료의 사용 등이 있다. 이 중에서 오버레이용접은 배관내면이 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 낮추어주는 효과가 있는 것으로 알려져 있어 현재 적용되고 있다[38].

정인철 등[20]에 의하면 원전기기(노즐 및 배관부) 표면에 오버레이 목적으로 사용되는 인코넬 용접시 인장응력을 압축응력으로 개선시키기 위하여 응력부식균열을 예방하기 위한 템퍼비드 오버레이 기법을 적용하였으며 다층용접을 통해 템퍼링 효과를 줌으로써 후열처리 효과를 갖도록 하였다.

안용수 등[39]은 Inconel 625 및 718의 PTA에 의한 육성층의 열영향부 액화균열은 응고시 Nb, Mo, Ti 등이 결정립계 및 수지상입계에 편석하여 저융점 γ/NbC, γ/Laves 공정상을 형성하여 결정립계에 균열을 유발시키는 현상을 관찰하였으며, 응고균열의 정도는 저융점 공정상의 형태와 양, 그리고 합금의 응고온도범위에 따라 결정되고, 희석률이 증가할수록 C/Nb ratio가 증가하고 합금의 균열감수성이 낮아진다는 것을 확인하였다.

2.4 WC계

C. P. Paul 등[40]에 WC-12wt.%Co을 레이저 클래딩한 결과, 산업분야에 적용할 수 있는 Co함유량의 범

위가 10~15wt.%임을 확인하였다. WC 입자는 부분적 혹은 완전한 용해가 없어야 하며, 평균입도크기가 약 10㎛의 크기가 바람직하며 WC의 날카로운 끝부분이 분명히 보이도록 하드페이싱 용접되어야 한다. WC는 지나친 가열 혹은 부분용융으로 인하여 WC-Co합금 내에 탄소의 석출이 흑연으로 변이($2WC \leftrightarrow W_2C + C$)함으로써 탄소의 결핍을 가져오고, 동시에 이 흑연은 대기중의 산소와 반응하여 CO와 CO_2를 형성시켜 가스기공(porosity)의 결함으로 나타날 수 있고, 이로 인해 W, Co, C를 함유한 매우 취약한 3원계 공정합금을 형성시키므로 주의해야 한다. 특히 WC-Co의 제조시, 제어하기 어려운 국부가열이나 상호작용 시간이 길어지기 때문에 알맞은 탄화물량으로 제조하기 어려운 단점이 있다.

임희식 등[38]은 SCM440 모재 위에 WC-12%Co계 초경합금 그릿(grit)과 저탄소강 와이어와 함께 GMAW를 이용한 오버레이 용접하여 WC- 12%Co/저탄소강 MMC(Metal matrix composites) 오버레이 용접을 하여 그릿과 기지부에 Fe_6W_6C를 생성시켜 내마모성을 향상시켰다.

3. 오버레이 용접기술 동향

3.1 용접시공 기술 현황

고크롬 철계 오버레이 용접 시에 일정와이어 송급속도에 대한 상대적 분말공급량을 증가시킴으로써 오버레이 층에 경질의 탄화물량이 증대되어, 경도는 증가하게 되고 비마모량은 감소되는 효과가 있다[13].

연성층 확보를 위해 탄소 고용도가 작은 Ni-Fe계 와이어를 사용하여 초층에 버터링함으로써 용접부의 균열을 방지할 수 있었다[41].

니켈합금의 용접부는 연강이나 스테인리스강에 비해 용입깊이가 얕다. 용접개선면 각도는 일반 V이음부에서는 10~20° 더 크게 하고 루트면은 1.6mm 정도로 적게 한다. 필렛 형태에서 용접비드는 일반용접과 달리 약간 볼록한 형태가 결함방지에 유리하며, 잔류응력에 의한 응력집중을 완화시켜 균열에 대한 민감성을 낮추게 한다[20].

3.2 오버레이 용접재료 현황

지금까지 상품화되어 있는 오버레이 용접재료는 강 또는 Fe계 저합금, Cr백철 또는 Fe계 고합금, 탄화물, Ni계 합금과 Co계 합금으로 분류되어 있다. 오버레이 용접합금의 미세조직은 연성인 Fe계, Ni계, Co계의 기지조직에 붕화물, 탄화물 또는 금속간 화합물과 같이 경도가 높은 석출물로 구성되어 있다. Fe계와 Co계 오버레이 용접합금은 탄소가 일반적으로 최대 4%정도 포함되어 있으므로 탄화물이 주된 경화상이다. Ni계 오버레이 용접합금의 경화상은 탄화물과 붕화물로서 탄소와 B은 약 5%까지 혼합되어 있다. 모합금의 첨가원소 함량에 따라 특정한 탄화물과 붕화물이 형성되며 대부분의 Ni계, Co계 그리고 고합금 Fe계 오버레이 용접합금의 기지조직에는 Cr이 최대 35%, Mo 또는 W이 최대 20%에 미량의 Si과 Mn이 포함되어 있다.

3.3 합금원소 절감기술 현황

오일샌드 이송라인을 비롯하여 해저자원의 양광 파이프라인 등과 같이 극심한 마식환경에 사용하기 위한 소재로는 WC, B_4C 등의 고경도탄화물을 들 수 있다. 이들은 분말소재로 용사공정에 의해 내벽에 코팅되며 내마식성이 우수한 것으로 알려져 있지만 소재가격 및 공정비용이 매우 고가이고 코팅층의 조성편차가 심하여 취성이 크다는 단점이 있어 극한지 에너지라인에 적용하기는 어려운 상황이다[42].

Co계 재료는 고온단조 산업에서 하드페이싱 용접증착에 광범위하게 사용될 수 있을 것이다. 그러나 값비싼 Co계 Stellite 합금을 대체하기 위하여 국내에서 Co-free Fe-Cr-C계 메탈코어드와이어 연구가 추진되었다. 하드페이싱 내마모재료로는 텅스텐탄화물(WC)과 Co계 Stellite합금분말이 주로 사용되고 있으나, WC는 고가이고 Co계 Stellite합금은 환경문제로 인하여 사용을 꺼려하고 있기 때문에 Fe계(Fe-Cr-C) 하드페이싱 분말을 선정되고 있다. Fe계 분말은 기계적 성질이 우수하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다[43].

3.4 희석률 최적화 기술 현황

오버레이 용접재료의 합금조성은 대부분 모재보다 합금원소 함량이 높기 때문에 희석률이 증가할수록 오버레이 용접부의 합금원소 함량이 낮아져 성능이 저하된다[9,42].

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.

변형유기 마르텐사이트 상변태를 이용하는 신개념 내마식 합금조성 설계기술과 또한 오일샌드, 해저자원 등의 에너지라인 이외에도 임계변형에너지를 이용한 변형

유기 마르텐사이트 제어합금설계 기술은 건설중장비 적재함, 버켓 등에서 사용되기 위한 고인성 내마모 강판의 연구개발에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

PTA용접시 희석률이 증가할수록 전체 저융점상의 양이 감소하고 액화균열감수성은 희석률이 증가할수록 감소하는 경향을 보이므로 최적의 희석률 결정이 용접시 공상 주의해야 할 하나의 항목이다.

GMA 오버레이용접에서 희석률을 최적화하는 방법으로는 먼저 용접공정을 통한 비드형상 제어를 고려해 볼 수 있다. 하드페이싱용 합금조성은 대부분 모재보다 합금원소함량이 높기 때문에 희석률이 증가할수록 오버레이 용접부의 내마모성은 저하한다. 접합부 신뢰성을 위해 10% 정도의 희석률은 필요하지만 희석률이 과도한 경우에는 원하는 내마모성능을 위해 다층용접을 적용해야 하므로 높은 희석률은 용접비용을 증가시키는 원인이 된다.

용융금속의 모재에 대한 희석은 용접파형과 관련이 있으며, 일반적으로 용접전압 및 전류의 증가는 입열량을 높여 희석률을 증가시킨다.

3.5 용접균열 방지기술 현황

하드페이싱 용접부의 균열감수성은 응고되는 과정에 취약한 상을 바로 합성될 수 있는 새로운 상으로 대체함으로써 감소시킬 수 있다. NiCrBSiC계 하드페이싱 코팅층에는 크롬 붕화물과 탄화물과 같은 조대하고 취약한 상의 형성은 균열의 원인이 되고 있다. 여기에 CrB_2(2200℃)과 CrB(2100℃)과 같은 크롬붕화물을 바나듐의 첨가로 바나듐붕화물, 즉 VB(2551°C), VB_2(2750°C), V_2B_3 (2640°C) 및 V_3B_4(2640°C)로 대신에 형성시킬 수 있기 때문에 균열발생을 크게 방지할 수 있다[44].

원자력 발전용 가압수형 경수로를 구성하는 압력 용기 및 증기 발생기 등의 고압용 용기에 있어서는, 종래의 Ni-15Cr계 합금에서 문제가 되는 SCC(응력 부식균열)에의 대책으로서, 그 구성 재료로서 Ni-30Cr계 합금이 채용된다. Ni-30Cr계 용가재를 사용하여 오버레이 용접한 경우, 다패스 용접에 의한 용착금속이 적층되는 용접부의 내부에서, 미소한 균열이 발생하기 쉽다고 하는 문제점이 있다. 이 입계 균열은 용접 금속이 응고하는 과정에서 발생하는 응고 균열과 구별하여, 연성저하 재열균열이라고 불리는데 Ikeda deznao 등[31]은 이러한 균열을 방지하는 방법을 확립하였다.

Inconel 690 오버레이 용접부에 균열이 잘 발생한다는 것은 Nb과 같은 특정성분 뿐만 아니라, 용접재료, 모재 또는 인접용접부의 화학조성에 따라서 고온균열감수성이 크게 변화된다[45].

Ni계 합금분말에 적당한 양의 V_2O_5[44], TiO_2[46], La_2O_3 and CeO_2[47] 첨가로 기공이나 균열이 없는 Ni계 하드페이싱 코팅층을 확보할 수 있다.

3.6 품질향상 연구 현황

용접구조물의 제조에 있어서 스테인리스 용접은 결정립 조대화와 Cr 탄화물의 석출에 의한 용접부 연성저하 및 입계 예민화가 문제시되고 있다. 특히 탄소강에 초층 하드페이싱 용접할 경우, 모재와의 희석에 의한 탄소량의 증가와 크롬량의 감소로 인해 용접부에 마르텐사이트조직이 생성될 가능성이 있어 Nb 및 Ti를 첨가한 고Cr계 Type 430(17%Cr) 용접재료를 사용하여 초층용접을 함으로써 페라이트기지를 안정화시키고 Cr탄화물 석출에 의한 예민화를 방지한다[14].

하드페이싱 용접부 연성회복을 위해 700℃ 이상으로 후열처리하게 되면 탄소강의 강도가 저하되므로 용접 그대로 상태 상태 또는 탄소강의 후열처리 온도인 610℃ 정도에서 용접부 연성을 확보해야 한다[14].

격심한 마모와 부식환경에서 수명을 연장하기 위하여 사용되는 WC/W_2C를 함유한 Ni계 기지로 구성된 MMC의 기계적 성질에 영향을 미치는 중요한 인자로서 탄화물이 결합되어 있는 계면이 될 수 있다. 이외에도 탄화물의 양, 크기 및 분포에도 크게 영향을 미치게 된다. 특히 2차적인 W, Ni, Cr 등과 같은 원소를 함유한(rich) 탄화물, 질화물, 붕화물 등에 의해서도 미세조직 및 품질특성을 좌우시킨다[35].

4. 향후 기술전망

4.1 용접시공 기술

제조업의 경쟁력 강화를 위한 설비의 고도화 유지의 필요성은 증대될 것이며, 이를 위한 한 방편으로 오버레이 용접기술의 적극적인 적용 및 개발은 우수한 품질의 저가 오버레이 용접재료 개발, 생산성 향상을 가질 수 있는 용접시공기술의 개발, 오버레이 용접기술 적용을 위한 새로운 수요개발 측면에서 이루어져야 한다. 연구개발을 통한 신기술의 개발로 새로운 수요창출의 노력이 요구되고 있다.

오버레이 용접재료의 경우에는 첫째 내마모성, 내열성, 내소부성, 내충격성, 내산화성 등과 같이 복합물성을 가지는 합금개발, 둘째 용접균열을 발생하지 않는 고경도 내마모성 합금개발, 셋째 고기능 오버레이 용접재 제조를 위한 원료분말 제조기술, 용접봉 및 와이어

제조기술 그리고 플럭스 제조기술 개발이 요구된다.

오버레이 용접공정의 경우에는 첫째 저희석 및 박육(육성층 1~2mm) 오버레이 용접기술, 둘째 고합금화 및 복합 탄화물화 유도 공정기술, 셋째 고융착 용접기술, 넷째 열영향부 물성제어 공정기술, 다섯째 신용접법(PTA, 레이저빔, 전자빔 용접 등)의 적용기술 개발이 요구되고 있다.

4.2 잔류응력 완화기술

용접과정 중 발생되는 인장잔류응력은 원전배관 이종용접부의 일차수 응력부식균열(PWSCC)이 발생되는 원인 중 하나라고 알려져 있다. 보수용접은 강한 인장잔류응력을 유도하기 때문에 이종용접부의 일차수 응력부식균열을 유도하기 쉽다. 향후 용접부 응력집중이 되는 현상을 방지할 수 있도록 형상을 만드는 것이 중요하다.

Inconel 625 및 718합금 육성층의 열영향부는 급격한 가열 및 냉각사이클 뿐만 아니라 입열의 불균일과 전체 용접부 경직성으로 인하여 구속응력을 받아, 응력 및 열사이클이 열영향부에서 액화균열을 일으키는 원인으로 작용한다. 용접부 가까이에서 작용하는 응력이 가장 크며, 조성적 액화 및 초기 용융에 의해 형성된 액막이 결정립계를 취화시키고 이러한 구속응력이 취화된 결정립계에 작용하면 균열을 쉽게 발생시킬 수 있다.

회주철 금형의 매우 낮은 연신율과 경화육성용접 시의 큰 구속응력으로 인해 용접부에 다량의 종크랙 및 횡크랙이 발생하므로 유광선 등[41]은 연성층 확보를 위해 탄소고용도가 낮은 Ni-Fe계 와이어를 사용하여 초층에 버터링을 함으로써 용접부의 균열을 방지할 수 있었다.

4.3 합금원소 제어기술

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 신개념합금설계 기술의 도입이 필요하다[42].

Inconel 625 및 718 합금의 PTA육성용접시 가장 큰 문제는 용융금속의 응고도중에 발생하는 응고 균열과 열영향부에서의 액화균열이며, 이들은 대부분 결정립계에 편석된 특정원소들(Nb, Mo, Ti, C 등)에 의한 저융점상(γ/NbC, γ/Laves) 형성이 주요 원인으로 알려져 있다. 이러한 저융점상의 양은 화학성분에 의해 결정되므로 화학성분량의 최적성분 설계가 대단히 중요한 과제가 될 수 있을 것이다.

4.4 희석률 향상기술

지금까지 희석률은 예측하기가 힘들고, 용접 시마다 균일한 품질의 용접표면조직을 얻지 못하고 마모저항성이 떨어져 표면균열 등 다양한 마모현상이 자주 발생하였다. 향후 희석률을 일정하게 유지하고 최소화시키기 위해서는 플럭스 분말 구성원소의 질량비율에 따른 최적의 조성을 설정하는 연구가 추진되어야 할 것이다.

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[49].

변형유기 마르텐사이트 상변태를 강화기구로 활용하는 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[42,49].

4.5 용접 결함(균열) 방지기술

용접작업성 개선의 측면에서 0.06%C 함량의 도입에 의해 용접결함(균열발생 등)이 발생되지 않는 양호한 용접작업성을 얻을 수 있다.

원자력발전소에 적용되는 Inconel 600은 이보다 훨씬 우수한 내식성(즉, 응력부식균열성)을 가지고 있는 Inconel 690으로의 교체가 진행되면서, 이에 대한 용접 및 클래딩이 주목을 받고 있다. 그러나 Inconel 690 용접금속은 일반 스테인리스강의 용접금속과는 달리 완전 오스테나이트이므로 고온균열에 민감하고, 기공, 용입불량 등의 결함이 발생하기 쉽다는 단점을 가지고 있으며, 용접재료 등과 관련한 용접법이 정확히 정착되지 않은 관계로 여전히 많은 불건전 용접부가 발생하고 있는 실정이다. 이에 대비하여 Inconel 690 용접부의 고온균열을 방지 또한 저감화를 위해서는 용접조건에 대한 검토와 함께, 용접재료의 화학조성, 모재 또는 인접

용접부의 종류와 이에 따른 희석, 용접순서 등을 종합적으로 고려하여 연구개발 되어야 할 것으로 생각된다[45].

인코넬 690합금 용접금속은 고온균열에 민감한 기공, 용입불량 등의 결함이 발생하기 쉽다. 특히 연성저하 응고구간에서 발생하는 연성저하균열(DDC, Ductility Dip Cracking) 결함을 방지하기 위해서는 적절한 시공조건의 설정과 용접재료의 선택이 중요하다. 용접부는 균열에 민감하므로 용가재는 불순물이 적고 연성저하균열저항성이 높은 재료를 선택해야 한다. 산화된 불순물로 이루어진 용융부의 부유물은 오염된 비드표면을 형성하므로 매 층간 클리닝에 유의해야 한다[20].

알루미늄 경량화 소재와 내마모 Fe계 재료를 접합하기 위해서는 클래드층과 모재 사이의 계면 부근에서 발생하는 Fe_3Al, $FeAl_3$, Fe_2Al_5와 같은 취약한 금속간화합물에 의한 균열의 발생에 주의하여야 한다. 클래드층의 균열의 형성은 기판의 예열에 의해서 감소시킬 수 있으므로 향후 이에 대한 연구도 중요한 과제가 될 수 있다[50].

5. 결 론

1) 오버레이 용접을 위한 용접재료로서 철계, Co계, Ni계, WC계가 있으며, 품질특성이 우수하고 값싼 철계와 Ni계 용접재료에 대한 연구가 활성화 되고 있다.

2) 최근 품질향상과 경제성을 갖춘 오버레이 용접기술을 확립하기 위해서는 용접시공기술, 잔류응력 완화기술, 용접재료에 대한 값비싼 합금원소 절감기술, 희석률 최적화기술, 용접균열 방지기술에 대한 연구가 매우 중요한 과제로 대두되고 있다.

3) 향후 오버레이 용접기술은 용접시공, 잔류응력 완화, 합금원소 제어, 희석률 향상 및 용접결함 방지기술의 개발이 더욱 활성화 될 것으로 전망된다.

후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 미래창조과학부 과학기술진흥기금과 복권기금을 지원받아 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

Reference

1. N. Venkateswara Rao et al. : Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel, Materials and Design **32** (2011) 2496~2506
2. Kobe Seikosyo Co. Iztani et al. : flux-cored welding wire and arc welding method for overlay welding using the same, Korean unexamined patent 10-2012-0024360 (in Korean)
3. Pan Yong-ming et al. : Research on overlaying welding rod of high hardness maraging steel. China Surf Eng **19(3)** (2006) 465~467
4. Lu Shan Ping et al. : Microstructure and wear property of Fe-Mn-Cr-Mo-V alloy cladding by submerged arc welding, J Mater Proc Technol. **147** (2004) 191~196
5. 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
6. Xiaowen Qi et al. : Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal, Surface & Coatings Technology **205** (2011) 5510~5514
7. Hao Feifei : Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism, JOURNAL OF RARE EARTHS, **29-6** (2011) 609~613
8. Hao Feifei : Effect of rare earth oxides on the morphology of carbides in hardfacing metal of high chromium cast iron, JOURNAL OF RARE EARTHS, **29-2** (2011) 168~172
9. Nidetz Hard Co., Maruyama Takamiz : Roll for use in continuous casting, Korean unexamined patent 10-2011-0070993 (in Korean)
10. KITECH : Metal Cored Wire for Overlay Welding, Korean unexamined patent, 10-2011-0120645 (in Korean)
11. Kyu-Ho Han et al. : GMA hardfacing weld-ability of Fe-Cr-C metal cored wire, Journal of the Korean Welding and Joining Society, Autumn (2004) 177~179
12. Min-Ho Kim, Tae-Young Kim : Machining Characteristics and Cutting Force Analysis of Hardfacing Overlay Welding in High Chromium Carbide, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, **18-5** (2009) 469~476 (in Korean)
13. Jong-Chul Kim and Kyeung-Chae Park : Wear Resistance Characteristics of Iron System MAG Weld Overlays with Chromium and Niobium Carbide Composite, Journal of the KWS, **20-3** (2002) 310~315 (in Korean)
14. Youngil Kim et al. : Evaluation of ferritic stainless steel FCA overlay weld metal ductility, Journal of the KWJS, Spring (2006) 140~142 (in Korean)
15. 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
16. Lee, K. Y. et al. : Sliding wear behavior of hardfacing alloys in a pressurized water environment. Wear **262** (2007) 845~849
17. Bahn, C. B. et al. : Wear performance and activity reduction effect of Co-free valves in PWR environ-

ment, Nuclear Engineering and Design **231**, (2004) 51~65
18. Yoon Byoung Hyun et al. : Wear Behavior of Plasma Transferred Arc Deposited Layers for Ni- and Co-base alloy, **19-2** (2001) 540~547 (in Korean)
19. Kwon-Yeong Lee et al. : Sliding wear behavior of hardfacing alloys in a pressurized water environment, Wear 262 (2007) 845~849
20. In Chul Jung et al. : Overlay Welding of Inconel Material for Nuclear Power Components, Journal of KWJS, **27(2)** (2009) 122~124 (in Korean)
21. D. Kesavan, M. Kamaraj : The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating, Surface and Coating Technology **204** (2010) 4034~4043
22. T. Liyanage et al. : Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding, Surface & Coatings Technology **205** (2010) 759~765
23. C. Sudha et al. : Microchemical and micro-structural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel, Surface & Coatings Technology, **202** (2008) 2103~2112
24. 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
25. N. Y. Sari, M. Yilmaz : Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr-Ni-B-Si + WC thermal spraying powders, Surface and Coating Technology **202** (2008) 3136~3141
26. E. Gruzdys, S. Meskinis, S. Tamulevicius, T. Grinys : Mater. Sci. **14** (2008) pp.4
27. T. Gómez-del Río et al. : Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings, Journal of Materials Processing Technology **204** (2008) 304~312
28. J. F. Flores, A. Neville, N. Kapur, A. Gnanavelu : An experimental study of the erosion-corrosion behavior of plasma transferred arc MMCs, Wear **267** (2009) 213~222
29. Ch. Just et al. : Influence of welding current on carbide/ matrix interface properties in MMCs, Journal of Materials Processing Technology **210** (2010) 408~414
30. Huntington Eloise Corp. Kaiser Samuel : filler metal composition and method for overlaying low NOx power boiler tubes, Korean unexamined patent 10-2009-0094435 (in Korean)
31. Kobe Seikosyo, Ikeda deznao : Ni base alloy solid wire for welding, Korean unexamined patent 10-20120057485 (in Korean)
32. H. Kashani et al. : Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies, Wear **262** (2007) 800~806
33. A. K. Bhaduri et al. : Selection of hardfacing material for components of the indian prototype fast breeder reactor, Journal of Nuclear Materials **334** (2004) 109~114
34. Seung-Gun Lee et al. : Analysis of Overlay Weld Effect on Preventing PWSCC in Dissimilar Metal Weld, The Korean Society of Mechanical Engineers, **34-1** (2010) 97~101 (in Korean)
35. Tae-Kwang Song et al. : Effect of Preemptive Weld Overlay on Residual Stress Mitigation for Dissimilar Metal Weld of Nuclear Power Plant Pressurizer, KSME-A. **32-10** (2008) 873~881 (in Korean)
36. H-Y Bae et al. : Effect of preemptive weld overlay sequence on residual stress distribution for dissimilar metal weld of Kori nuclear power plant pressurizer KSME autumn (2008) 88~93 (in Korean)
37. Oh, Chang-Young et al. : Effect of Similar Metal Weld & Preemptive Weld Overlay On Residual Stress of Repair Weldment In Surge Nozzle, Computational Design in Engineering, **22-6** (2009) 557~564 (in Korean)
38. Hee-Sik Lim et al. : Wear Behavior of WC-12%Co/ Low Carbon Steel Metal Matrix Composites(MMC) Welding Overlay, KWS **21-2** (2003) 172~179 (in Korean)
39. Yong Soo Ahn et al. : Behavior of solidification cracking with dilution in PTAW Ni-base superalloys overlay, April 01, (2000) 60~63
40. 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
41. 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, KWJS Autumn November (2005) 114~116 (in Korean)
42. Jun Ki Kim et al. : Design of Erosion Resistant Overlay Welding Material, **28-3** (2010) 31~35 (in Korean)
43. Kown-yeong Lee et al. : The effects of additive elements on the sliding wear behavior of Fe-base hardfacing alloy, Wear, **255** (2003) 481~488
44. 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
45. 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
46. M. J. Chao, E. J. Liang : Surface & Coatings Technology **179** (2004) pp.265
47. K. L. wang et al. : Journal Materials Proccessing Technology **139** (2003) 448
48. Ch. Just et al. : Influence of processing conditions on the carbide/matrix interface in sintered composite layers, Surface & Coatings Technology **205** (2010) 35~42

49. Kyu-Ho Han et al. : Effects of GMA Welding Conditions on the Bead Shape of Hardfacing Overlay welding, Journal of KWJS, **25-5** (2007) 514~519 (in Korean)

50. Girish R. Desale et al. : Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel, Wear **266** (2009) 975~987

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