

최신의 고능률 브레이징 기술개발 동향

유 호 천^{*,†}

*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

Recent Study of Technical Development for High Efficient Brazing

Ho-Cheon Yoo^{*,†}

*KISTI ReSEAT Program, Pohang 37655, KOREA

†Corresponding author : yooho278@reseat.re.kr

(Received November 9, 2015 ; Revised December 21, 2015 ; Accepted January 13, 2016)

Abstract

Recent developing tendency for technologies of high efficient brazing are studied by searching of NDSL, Science Direct, KIPRIS, PCT and so on. Active metal brazing, arc brazing, fluxless brazing, brazing with low melting point, reactive air brazing, laser brazing, laser droplet brazing are investigated. By optimal selecting of the above mentioned technologies, it needs to investigate an economical metallurgical design and the advanced brazing methods. To improve the embrittlement of intermetallic compound at brazing interface, it must be studied the inexpensive variant metals including nonmetals and the heat sources(MIG, TIG, Laser) by hybrid techniques.

Key Words : Brazing, fluxless brazing, Laser brazing, Active metal, Laser droplet, Intermetallic compound

1. 서 론

현재 국내 산업의 브레이징기술과 관련된 국내 중소기업체에서는 국내외 경쟁력이 심화됨에 따라 독자기술의 확보가 힘들고 새로운 기술정보의 입수에 어려움을 겪고 있다. 이러한 어려운 상황을 해결하고 국제적인 경쟁력을 지향하는 것을 목표로 NDSL, Science Direct, KIPRIS, PCT 등의 문헌검색을 통하여, 국내외 학술지와 특허내용을 수집분석하여 기술정보를 제공하였다.

2. 최신의 고능률 브레이징 기술동향

2.1 활성금속 브레이징기술

세라믹부재와 금속부재의 접합방법으로서 통상 활성금속 브레이징법이 이용되고 있다¹⁾. 이 방법은, 세라믹부재에 대해서 활성원소를 브레이징재 중에 첨가시켜 그 브레이징재를 진공 중에서 가열함으로써 세라믹부재 표면에 반응층을 형성시킨다. 이것에 의해 브레이징재의 젖음성과 밀착성의 향상을 도모한다. 예를 들면 세

라믹스로서의 질화물을 이용하는 경우에는 반응층의 세라믹부재측 제 1층에 TiN가 생성되고, 탄화물을 이용하는 경우에는 TiC, 산화물로는 TiO가 형성된다. 또한 종래에 Cr, V, Mo와 같은 원소를 활성용가재 합금첨가물로 이용한 적은 있지만, IVA족 원소의 소량첨가는 성공한 연구결과로 볼 수 있다.

활성금속 브레이징에 사용되고 있는 브레이징합금은 Ag-Cu-Ti계, Cu-Ti계, Co-Ti계, Al-Ti계, Cu-Zr계, Zr-Ni계가 주류를 이루고 있으며, 최근에는 고온용 브레이징 합금으로 연구되고 있는 Ni-Cr, Pt, Pd, Au 및 Cu계 합금 등이 있다²⁾. 이들 합금은 예를 들면, Ti나 Zr, Nb, Hf, Ta 등과 같은 활성금속이 첨가되어 있다²⁾.

세라믹끼리, 세라믹과 금속과의 접합에 사용되는 활성금속 브레이징재로서 Ag-Cu합금에 활성금속성분인 Ti가 첨가된 Ag-Cu-Ti합금이 종래부터 잘 알려져 있다. 이 활성금속 브레이징재의 문제는 가공성인데, 균열, 단선, 파단이 일어나기 쉽다. 이것은 Ag-Cu-Ti합금에서는 주조응고 시에 Ag-Cu합금 소지 중에 50-100 μ m의 큰 Cu와 Ti의 금속간화합물이 석출되기 때문

이다. Tanaka Kikinzoku Kogyo³⁾에서는 Ag-Cu-Ti 합금에 Sn을 첨가하여 급냉응고시키지 않고 Ag합금소지에 석출하는 화합물의 입자직경을 제어하여 가공성을 개선한 브레이징재를 제시하였다. Ag-Cu-Ti-Sn합금 활성금속브레이징재는 Ag합금소지 중에 분산된 금속간 화합물의 미세화에 의해 가공성이 개선되고 경박단소환치수에까지 소성가공이 가능하다. 또한 브레이징성(접합강도)도 충분히 갖추고 있어 종래의 Ag-Cu-Ti합금 활성금속브레이징재에 비해 동등 이상의 성능을 구비하고 있다.

활성 브레이징공정에서 마무리가공 시에 금속표면의 표준 조도값은 $1.5\mu\text{m}$ 이하가 바람직하고, 비금속 표면은 $0.8\mu\text{m}$ 이하로 추천되고 있다. 모든 공정은 불활성가스, 고진공 및 환원분위기에서 가능하지만, 고진공환경은 $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 이하로 유지하는 것이 바람직하다⁴⁾.

2.2 아크 브레이징기술

현재 자동차 차체에는 일반강에서 1000MPa급 첨단 고장력강까지 다양한 강종들이 적용되고 있고, DP강은 자동차 차체의 트렁크리드 사이드필러 등 미려한 외관이 필요한 접합부에 적용된다. 고장력강판에 MIG와 TIG용접을 적용할 경우, 과도한 입열로 인하여 모재가 변형되고, 용접열영향부가 넓게 형성되어 내식성과 기계적 성질을 해치기 때문에 이를 해결하기 위하여 조옥제 등⁵⁾은 1000MPa급 DP강에 대하여 Cu-5.3wt%Sn 삽입금속을 사용하여 아크브레이징기술을 확립하였다.

아크용접에서 용가재는 주로 동합금와이어가 사용되고 있는데, Si와 Mn을 함유한 Cu-Si합금과 Al을 함유한 Cu-Al합금이 일반적으로 사용되고 있다. Taiyo Nippon Sanso Corp.⁶⁾에서는 Cu를 주성분으로 하고 Al을 함유한 솔리드와이어를 사용하고, 펄스용접이행과 단락용접이행을 주기적으로 행하고 실드가스로서 산소가스가 0.03-0.3 vol.%, 나머지는 아르곤(Ar) 혼합가스를 사용하여 가스실드 아크브레이징을 하였다. 이 방법은 아크의 불안정현상을 개선하고 스퍼터의 발생을 저감할 수 있고, 비드의 젖음성을 개선하기 때문에 평탄한 비드를 얻을 수 있는 장점이 있다.

도금강판은 MIG/metal active gas용접으로 알려진 GMAW 동안에 여러 가지 어려움에 직면하고 있다. 초과된 아연 증발은 스퍼터의 발생, 기공의 형성, 불균일한 비드형상 등으로 인하여 용접품질을 악화시키고, 용접 후 세정(cleaning) 비용을 증가시키고 재작업을 유도하여 생산성이 낮아지고 내부식성을 크게 손상시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 가스메탈아크 브

레이징(혹은 MIG브레이징)이 활발히 연구개발되고 있다⁷⁾.

GMAW 브레이징공정은 GMAW의 높은 용착(deposition) 속도와 브레이징 시의 저온접합에 대한 장점을 공유하고 있다. 또한 낮은 용융점을 지닌 용접재료를 사용하기 때문에 높은 용접속도와 낮은 열입열량은 안정된 작업을 확보하고, 양호한 기계적 성질, 내부식성 및 피로특성을 나타내어 자동차의 성능과 수명을 향상시킨다⁷⁾.

Shome 등⁷⁾은 아연도금된 저탄소강과 고강도 DP590 강에 대하여 Cu-Al계(CuAl_8) 용가와이어를 이용하여 MIG브레이징 하였다. 용가 와이어로 인하여 Cu기지에 분산된 Fe-rich 상은 강도와 경도를 확보하였다.

기존의 레이저+MIG하이브리드 용접에서는 높은 에너지밀도의 레이저빔이 주요 열원으로 작용하여 깊은 용입이 형성된다. 그러나 Qin 등⁸⁾은 대형 스폿 레이저+MIG 아크 브레이징-용융 용접공정을 제시하였다. 레이저는 선도하는 보조열원으로 아크를 안정화시키고 강을 예열할 목적으로 초점이탈(defocusing) 상태로 사용하였고, MIG 아크는 주요 열원으로 사용하였다. 이 방법은 통상의 MIG 용접에 비해서 공정안정성, 용접외관 품질 및 용접효율을 개선시킬 수 있었으며, 종래의 레이저+MIG하이브리드용접에 비해서도 더 낮은 에너지비용을 가져왔다. 또한 수치 시뮬레이션방법을 적용하여 용접에너지조건을 예측할 수 있었고 용접품질을 제어할 수 있었다.

Meng 등⁹⁾은 아연도금강판에 Al합금의 접합에 대하여 Fig. 1과 같은 방법을 사용하여, 대형 스폿 레이저+MIG 아크 브레이징-용융용접 열공정을 개발하였다. 이때 강은 용융되지 않은 상태에서 Al합금이 완전히 용입되었으며, 브레이징된 계면에서 온도장은 불균일과 비대칭 분산이 이루어졌다. 또한 3D 유한요소 모델을 이용하여 에너지 조건(레이저출력, 용접전류, 용접속도 등)을 확립하였다.

알루미늄합금과 스테인리스강을 접합하기 위하여 Zhang 등¹⁰⁾은 보조 TIG 토치를 주요 MIG 토치의 평행된 위

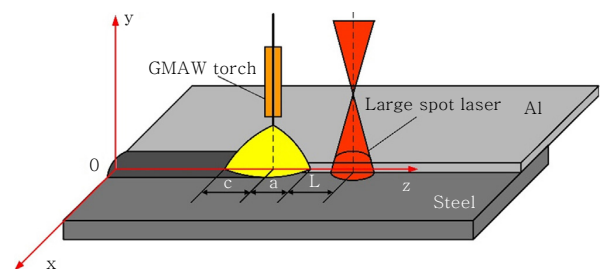


Fig. 1 Schematic of laser + MIG arc brazing-welding experimental system⁹⁾

치에 부착시켜, 강에 열을 가하게 하는 새로운 하이브리드 용접기술을 제시하였다. TIG 도치의 부착효과로 인하여 균열이 발생하기 쉬운 취약한 Fe-Al 금속간화합물 층은 균질화 되고, 용융금속 내의 비철원자의 용해도가 증가하였는데, 금속간화합물 내에 Cr과 Ni의 함량을 상승시켜 접합부 인장강도를 96.7MPa에서 146.7 MPa까지 증가시켰다.

2.3 무플렉스 브레이징기술

최근 자동차의 경량화추진에 따라 자동차용 열교환기에도 재료의 박육 고강도화가 추구하고 있다. 알루미늄 재료의 고강도화에는 알루미늄합금에 Mg첨가가 대단히 유효하지만, 플렉스를 사용한 브레이징에서는 Mg와 플렉스가 반응하여 고융점의 MgF_2 를 생성하기 때문에 이것이 브레이징 시에 저해요인이 되고, 재료 중의 Mg를 소비하기 때문에 Mg의 감소로 고강도화에 기여하지 않는다는 문제점이 있다⁹⁾.

플렉스와 진공설비를 필요로 하지 않고, 무플렉스에서 브레이징을 양호하게 하기 위하여 Mitusbishi Aluminium Co.⁹⁾에서는 브레이징 로내에 승은 시에 적어도 450°C부터 용융 전까지의 온도범위에서 산소농도를 50ppm 이하, 질소가스농도를 10vol.% 이하로 가열하여 플렉스를 사용하지 않고 Al-Si-Mg계 브레이징재에 의해 알루미늄합금재를 함유한 브레이징 대상물을 접합하는 방법으로 종래의 무플렉스 방법에 비해 제조비용 상승을 적극 억제하고, 접합부의 신뢰성을 비약적으로 향상시켰다.

브레이징에 의해 제조되는 열교환기를 구성하는 알루미늄재료는 심재인 알루미늄합금판의 한쪽 면 또는 양면에 브레이징재 등을 클래드한 브레이징시트가 사용되고 있다. 일반적으로 브레이징시트의 심재합금으로서는 용융온도가 600°C 이상의 알루미늄합금이 사용되고, 클래딩 되는 브레이징재 합금으로서는 용융온도가 600°C 이하의 Al-Si계합금이 사용되고 있다. 이 브레이징시트에 의해 열교환기의 부재(탱크, 튜브, 핀)를 제조하여, 이것을 조합시켜 600°C전후의 온도로 가열함으로써 브레이징시트의 브레이징재 부분만을 용융하여 타 부재와 브레이징된 열교환기를 제작할 수 있다. 열교환기를 구성하는 다수의 부재를 한 번에 브레이징 할 수 있기 때문에 브레이징시트는 열교환기용 재료로서 널리 이용된다¹¹⁾.

Kanto Yakin Kogyo Co.¹¹⁾는 알루미늄합금의 심재와 심재의 한쪽 혹은 양쪽에 클래드된 알루미늄합금의 브레이징재로 하고, 심재 및 브레이징재의 적어도 어느 한쪽에 Mg를 함유하는 알루미늄 브레이징시트로 하고,

아르곤가스함유 분위기의 로내에서 플렉스를 사용하지 않고 가열해서 브레이징하여, 보다 양호하고 안정된 브레이징성을 지니면서도 고가의 진공가열장치와 플렉스를 이용하지 않고 공업적으로 적용가능한 브레이징방법을 제공하였다.

알루미늄제 열교환기의 제조 시에 Sumitomo경금속(주)¹²⁾에서는 브레이징가열 시에 플렉스를 도포하지 않고 알루미늄합금 브레이징 시트를 이용한 브레이징클래드기술을 확립하였다. 알루미늄합금 심재의 한쪽 면 혹은 양면에 Al-Si계 알루미늄합금 브레이징재를, 알루미늄합금의 중간재를 삽입하여 클래드로 하고, 심재가 0.1-1.3%의 Mg를 함유한 알루미늄합금, 브레이징재를 Si 6-13%함유한 Al-Si계 알루미늄합금, 중간재가 Si 6%미만을 함유한 알루미늄합금으로 선정하였다.

Furukawa-Sky Aluminum Corp.¹³⁾는 심재에 브레이징재(25-250 μ m 두께), 박피재의 무플렉스 브레이징시트(5-30 μ m 두께)를 차례로 적층하였는데, 심재는 브레이징재보다 융점을 높게 하고, 브레이징재와 박피재와의 계면에 존재하는 산화물의 함유량을 0.1ppm 이하로 하여 균일한 브레이징성과 안정적인 접합을 가능하게 하였다. 박피재의 재질로서는 Al-Si-Mg합금의 브레이징재의 용융개시온도(약 580°C)와 비교해서 높은 용융개시온도를 가지는 순 Al계 합금 또는 Al-Mn계 합금이 적당하다.

열교환기, 전자기기 냉각용의 구조체 등의 제조에 사용되고 있는 알루미늄합금 브레이징시트는 Al-Mn계 합금으로 된 심재에 Al-Si계 합금으로 된 브레이징재를 배열한 클래드판이 있고, 브레이징재에 의해 접합부재의 접합이 된다. 여기에서 알루미늄합금 브레이징시트를 적용한다. 브레이징방법으로서는 질소 등이 비산화성가스 분위기로 중에서 플렉스를 사용하여 행하는 노코록쿠법이 현재 주류로 되어 있다. 이 방법에 의한 비산화성가스분위기로는 진공로 등과 비교해서 연속식 생산설비로 하기 쉽기 때문에 양산성이 우수한 점이 널리 사용되고 있는 이유이다¹³⁾.

현재 자동차용 열교환기의 많은 부분은 Al-Mn계 심재에 Al-Si계 브레이징재를 클래드한 브레이징시트에 K-Al-F계 화합물로 된 불화물 플렉스, 즉 노코록쿠(Nocorokku) 플렉스를 도포하고 불활성가스 분위기로 가열하여 접합한다. 그렇지만, 최근의 자동차부품의 전자화에 따라 일부의 열교환기에서는 브레이징 후의 플렉스잔사가 표면처리성을 저해하는 등의 문제가 지적되고 있으며, 고성능화를 위해서 냉매통로를 미세하게 한 열교환기에서는 플렉스잔사가 냉매통로를 폐쇄하여 열교환성능이 대폭적으로 저하하는 문제점이 발생

하고 있다¹²⁾.

노코록쿠법의 문제점은 플럭스에 알루미늄표면의 산화피막을 파괴시킴으로써 브레이징에 의한 접합을 가능하게 하는 것이지만, 이 플럭스는 Mg와 반응하여 고용점의 물질이 되어 그 효과를 상실할 가능성이 있다. 이 때문에 Mg를 첨가한 Al합금의 브레이징에는 적당하지 않다는 문제가 있다. 또한 플럭스 및 그 도포공정에 코스트가 높다는 점과, 처리 후의 접합부와 기타의 표면에 플럭스의 잔사가 존재한다는 문제도 있다. 여기에 비산화성 가스분위기로부터 플럭스를 사용하지 않고 브레이징접합을 가능케 하는 무플럭스브레이징 기술이 검토되고 있다. 향후 공업적 규모의 열간압연기를 이용하여 무플럭스 브레이징용 박피의 브레이징시트를 제작하는 것을 검토하고 있다¹³⁾.

Sumitomo경금속(주)¹⁴⁾는 플럭스와 유해원소(Be)를 사용하지 않고 값싸게 브레이징시트를 제조하기 위해서 Mg 0.2-1.3wt.% 함유한 알루미늄합금의 심재의 한쪽면 혹은 양쪽면에 Si 6-13wt.%, Li 0.004-0.1% 함유한 알루미늄합금의 브레이징재를 클래드 하였으며, 자동차용 열교환기(라디에이터, 히터, 콘덴서, 증발기 등)의 브레이징에 사용할 수 있는 알루미늄합금 브레이징시트를 제공하였다.

선 접촉을 기본으로 하는 브레이징기술은 브레이징가열 중에 산화를 억제하기 위해 대기 중 혹은 불활성가스 분위기 중에서 플럭스를 사용하여 브레이징 하는 것이 일반적이었다. 그렇지만 최근에는 박피재와 심재와의 중간재로서 Al-Si계합금 브레이징재를 클래드한 브레이징시트를 불활성가스 중에서 무플럭스 브레이징 하는 방법이 개발되었다. 특히 차량적용 IGBT 등의 발열을 면접촉으로 냉각하는 열교환시스템의 수요가 높아져 알루미늄판재를 면끼리 접합기술이 더욱 필요하게 되었다¹⁵⁾.

Nippon경금속(주)¹⁵⁾은 알루미늄합금부재 사이에 Si 3-12wt.%, Mg 0.1-5.0wt.% 함유하고, 두께 15-200 μ m의 브레이징재인 단층 브레이징시트를 면접촉시켜 불활성가스분위기에서 570 $^{\circ}$ C 이상으로 유지하고 0.6gf/mm² 이상의 면압으로 무플럭스로 알루미늄합금부재끼리 접합하여 낮은 제조비용으로 품질을 안정화 한 면브레이징기술을 개발하였다.

Nippon경금속(주)¹⁶⁾은 브레이징시트에 의해 알루미늄합금부재와 동합금부재를 불활성가스분위기 중에서 무플럭스 면브레이징할 때에 금속간화합물(θ 상) 층의 성장을 억제시켜 알루미늄합금부재와 동합금부재 간의 열전도율을 높이고, 브레이징강도(전단력)이 우수한 면브레이징기술을 확립하였다. 면브레이징 방법은 불활성

가스분위기 중에서의 브레이징이 가능하고, 연속로에 의한 생산방식을 채용할 수 있기 때문에 배치로에 의한 진공브레이징에 비해서 생산효율이 높다. 또한 단층형의 브레이징시트를 사용하기 때문에 전체적으로 저비용화가 가능하다.

2.4 저용점 브레이징재의 제조기술

브레이징재는 지구환경보호, 특히 절전, 에너지절감에 착안한 접합방법이 주목을 받고 있다. Sn이 주요금속인 경우, Cu₆Sn₅, Cu₃Sn 등의 취약한 금속간화합물(IMC)이 생성되어 기계적 특성이 저하한다. Nihon Superior Co.¹⁷⁾에서는 Sn-Cu합금에 Ni를 0.1-2.0wt.% 첨가함으로써 접합물 중에서 Cu₃Sn IMC 등의 생성을 억제하여 500~600 $^{\circ}$ C에서 접합이 가능한 저용점 브레이징용가재(Sn-Cu-Ni)를 개발하여 전자부품과 가스기구, 냉동기의 각종 열교환기 부품 및 배관 접합부의 신뢰성을 향상시켰다.

Nihon Superior Co.¹⁸⁾는 CuO 0.3~41.4wt.%, Ni 0.04~2wt.%로 하고, 나머지는 Sn인 저용점 브레이징재를 개발하였다. 여기에 Al을 미량 첨가함으로써 Al이 핵이 되어 Cu₆Sn₅ IMC이 길게 나무형태로 성장하려는 속도를 늦추어 유동성을 촉진시켰다. 또한 Ge를 비롯하여 Zn, Sb, Bi, P, Se, Ga, Ag, In, Pd, Fe, Ti, Au, Co, Cr, Mo, Mn, V, Cs 등의 미량첨가는 유동성, 내산화성, 경도 등을 향상시키는데, 이에 대한 함유량도 저용점에 중요한 영향을 미친다.

Lee¹⁹⁾에 의하면 A357(Al-7%Si) 용가재를 590~600 $^{\circ}$ C로 가열하여 반응고 상태에서 브레이징하여 반응고 성형법의 장점인 결함 감소와 접합강도를 향상시켰다. 대기 중에서 플럭스를 사용하지 않은 상태에서 수행한 반응고 브레이징이 완전히 용융된 용가재를 사용하는 전통적인 브레이징보다 기공과 같은 내부결함이 발생할 확률은 크게 감소함을 알 수 있었다.

2.5 대기접합용 브레이징재의 제조기술

플럭스를 필요로 하지 않는 대기 브레이징기술로서 반응성 대기브레이징법(Reactive Air Brazing)을 사용하였는데, 반응성대기브레이징법에서 접합온도를 낮추기 위하여 Ag계 브레이징재의 저용점화에 대한 각종 재료가 제안되고 있다²⁰⁾.

NHK Spring Co.²⁰⁾에서는 Ag의 용점 이하에서 용융할 수 있으며, 접합체의 고온내구성의 향상을 도모할 수 있는 대기접합용 브레이징재 및 이를 이용한 집전재료(current collector)를 제시하였다. Ag, Ge, B, Si

을 필수성분으로 함유하고, Ag 이외의 구성원소의 체적비의 합계가 50-90%로 설정하고, Ag 이외의 구성원소의 함유량 중에 Si의 체적비는 22% 이상으로 설정하고, Ag 이외의 구성원소의 함유량 중에 B의 체적비는 14% 이상으로 설정하였다.

대기 브레이징기술로서 통상 플럭스브레이징법을 거론할 수 있는데, 모재의 접합면에 플럭스를 도포하고, 플럭스에 의한 접합부에서의 환원분위기를 얻음과 동시에 산소진입을 차단함으로써 양호한 접합체를 얻는다. 예를 들면 브레이징재로서 Ag계 브레이징재인 BAg-8을 사용하는 경우, BAg-5의 용점인 780°C보다도 낮은 용점을 가지는 플럭스를 이용하여, 브레이징재보다도 먼저 플럭스를 용융시킨다. 이것에 의해서 접합면의 활성화 및 브레이징재의 산화방지를 함으로써 보다 양호한 접합체를 얻을 수 있다¹⁾.

플럭스를 필요하지 않는 대기 브레이징기술에는 반응성 대기 브레이징법(Reactive Air Brazing)을 이용하는 것을 고려해 볼 수 있다¹⁾. US 2003/0132270A1에 의하면 세라믹부재와 내열금속부재를 접합하는 경우, Ag에 CuO를 첨가한 Ag-Cu계 브레이징재를 이용한 반응성 대기브레이징법에 의해 대기접합 시에 브레이징재의 주성분이 Ag 등의 귀금속성분이므로 브레이징재에서는 플럭스가 불필요하게 되어 그 결과, 플럭스에 의한 문제를 해소할 수 있다. 또한 반응성 대기브레이징법에서의 접합온도를 낮추기 위해서 Ag계 브레이징재의 저용점화를 도모하기 위한 여러 재료가 제안되고 있다. 예를 들면, 일본 특허 2008-202097호 공보에 의하면 Ag-Ge-Si계 합금이 브레이징재로 제안되고 있다.

NHK Spring Co.¹⁾에서는 Ag와 B를 필수성분으로 하고, Ag 50-92vol.%, B 8-50vol.%로 하는 대기 접합용 브레이징재를 개발하였다. 여기에서 B는 300°C 이상에서 산화하는데, 산화물의 용점도 비교적 낮은 온도(약 577°C)의 저용점재료이며, B를 필수성분으로 함유함으로써 브레이징재의 저용점화를 도모할 수 있었다.

2.6 레이저 브레이징기술

Ungers 등²¹⁾은 Fig. 2과 같은 방법으로 카메라를 기반으로 하는 공정조절 시스템을 제시하였다. 공정 동안에 기계적 인자를 평가하기 위한 하드웨어기반의 알고리즘은 FPGA(Field Programmable Gate Array) 기술에 의해 실행되었다. CMOS 카메라는 브레이징 레이저와 광학적인 경로를 통하여 공동 축으로 통합되어 있으며, 하드웨어기반의 속도측정에 대한 정확성이 높은 것으로 평가되었다. 이로 인해 브레이징속도와 같은

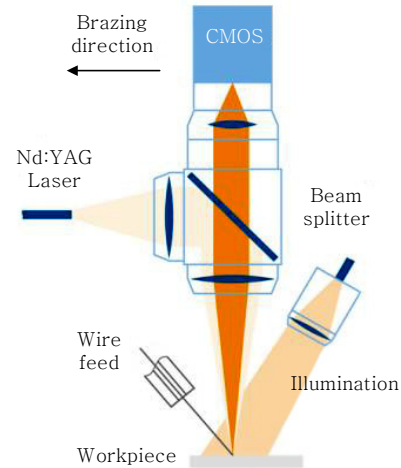


Fig. 2 Diagram of the optical set-up for laser brazing²¹⁾

기계적 인자의 관리뿐만 아니라 브레이징된 품질을 같은 시스템으로 판단할 수 있는 장점이 있다²¹⁾.

Tang 등²²⁾은 알루미늄에 대하여 단일 빔과 이중 빔의 레이저 브레이징기술을 개발하였다. 통상의 AlSi₁₂ 용가 와이어와 비교하여 더욱 낮은 응고범위를 가진 AlZn₁₃Si₁₀Cu₄ 용가와이어를 사용한 결과, 매우 양호한 젖음성을 나타내었다. 또한 AlSi₁₂ 와이어에 비해서 73% 이하의 더욱 낮은 입열량이 요구되었으며, 접합부에도 높은 경도값을 얻을 수 있었다. 특히 이중 빔 기술은 접합부 품질을 향상시키는데 높은 가능성을 보여주었다.

구리계 용가와이어를 이용한 아연도금강판의 레이저 빔 브레이징은 우수한 접합품질과 높은 접합강도를 얻는데 효과적인 공정이므로 자동차산업, 특히 루프와 세분된 뒷문(tailgate)과 같은 노출된 부분에 널리 응용되고 있다. Heitmanek 등²³⁾에 의해 제시된 레이저빔 브레이징기술은 용가재를 이용하여 레이저빔으로 2강판 사이에 빈틈(gap)을 채우는 방법이다. 아연도금강판을 브레이징을 하기 위한 연결폭도 최대 하중을 지탱할 수 있도록 최소의 연결 폭으로 구성되어야 하고, 빔 스캐닝에 대한 작업공정(온도 포함)의 안정성과 표면품질의 향상에 대한 연구가 추진되어야 할 것이다.

Al과 강의 고온접합 시에 주요한 문제점은 TIG 혹은 MIG와 같은 공정에서 기계적 성질을 해치는 취약한 금속간화합물 상의 형성이다. Mathieu 등²⁴⁾은 Al과 강의 접합 시에 85% Zn, 15% Al로 이루어진 용가와이어를 이용하여 레이저 브레이징 기술로 양호한 기계적 품질특성을 보여주었다.

마그네슘합금과 철강 이중소재에 대하여 다이오드 레이저를 사용하여 브레이징기술을 적용한 결과, 도금강판에 대한 용융필러와이어의 퍼짐성은 주석도금강판이나

니켈도금강판에서보다 아연도금강판이 가장 양호하다는 결론을 얻었다³⁵⁾. 아연도금강과 초고강도강인 22MnB5 강을 접합하는데 있어서 Mittelstädt 등²⁵⁾은 2빔-레이저 브레이징공정과 Cu계 용가재(CuSi₃Mn₁)를 이용하여 기존의 용접공정에 비해서 입열량을 감소시켜 변형의 억제하고, 후공정을 간편화하고 접합부 인장강도를 확보할 수 있었다.

27 레이저 용적 브레이징기술(LDB; Laser Droplet Brazing)

LDB에서 나타나는 현상은 4단계 상(phase)으로 분류되는데, 솔더 예비성형체는 노즐 안으로 유입되어 정의된 지속시간의 레이저펄스로 조사된다²⁷⁾. 예비성형체는 액상선온도 위에서 가열되어 노즐습윤의 원인이 된다. 질소압력에 의해서 액상의 브레이징 용적은 노즐로부터 분출된다. 용융된 브레이징 용적은 계속적으로 압전세라믹과 구리와이어의 금속화로 습윤시켜 고정된 전기기계적인 접합을 하게 된다. 접합에 영향을 주는 제조인자는 레이저출력, 펄스지속시간, 노즐내부의 질소압력, 노즐사이의 거리 및 기판의 금속화이다.

Stein 등²⁷⁾은 Cu₈₉Sn₁₁ 예비성형체를 이용한 LDB 기술을 검토하였으며, 압전세라믹 액추에이터 모듈의 전기기계식 접촉을 원활히 하기 위해서 기존의 WC/Co 노즐과 비교해서 ZTA(Zirconia Toughened Alumina) 노즐재료와 형태를 조사하였다. 특히 접합부 위치의 정확성, 접합부 높이 및 분리 시간에 미치는 노즐의 영향을 평가하여 매우 긍정적인 해결책을 찾아내었다.

Jeromen 등²⁸⁾은 Ni과 Ag₁₅Cu₈₀P₅ 합금호일을 이용하여 여러 두께로 레이저 용적발생법을 시도하였다. 이 방법은 특히 더 작은 용적의 발생에서도 유동성을 향상시킬 수 있었으며, 열적 안정성을 가져다주었다.

레이저 용적 브레이징법²⁹⁾은 크게 와이어 브레이징과 구형(spherical)의 예비성형체를 이용할 수 있다. 와이어 브레이징법에서는 내구력이 있는 접속이 이러한 방법으로 형성시킬 수 있지만, 하나의 용적을 만드는데 재생산성은 낮다. 용적용융이 모든 방향에서 와이어의 끝부분에서 진동하기 때문에 표면에서 용적 위치가 분산되는 경향이 있다. 더욱이 용적의 크기는 임의로 조절할 수 없고, 1mm 이하라고 하는 낮은 제한을 받기 때문에 접합높이에 대한 요구를 만족시킬 수 없다. 브레이징 용적의 대량작업에서는 세라믹부품에서 높은 열응력을 받아 종종 모듈 내에서 균열을 일으키는 단점이 있다. 구형의 예비성형체를 사용하는 경우, 세라믹복합

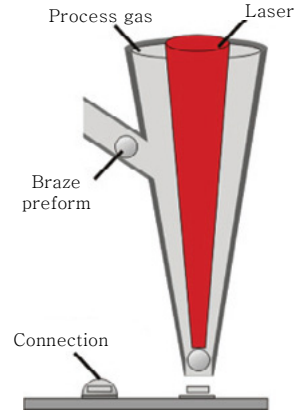


Fig. 3 Schematic of the laser brazing approach²⁹⁾

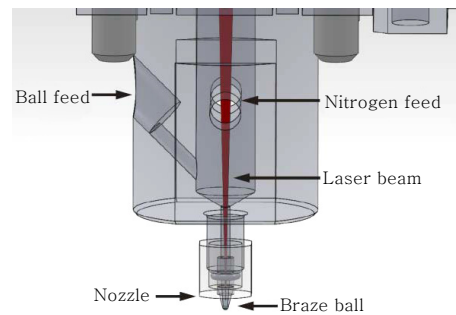


Fig. 4 Experimental setup of brazing³⁰⁾

재료의 모듈에 대한 손상을 방지하고, 브레이징 접촉에 대한 재생산성을 향상할 수 있다. 또한 브레이징 용적의 양 뿐만 아니라 비행경로(flight path)도 조절할 수 있다²⁹⁾. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 비행경로는 노즐과 질소의 후압력에 의해 조절되는데, 원하는 접촉점 위에 브레이징 용적을 떨어뜨린다.

압전기부품을 경량구조체 내에 통합시키는 경우, 기계적인 진동에 대한 센싱 혹은 활성 감쇠(active damping)에 대한 가능성을 높이거나 혹은 에너지 수확(harvesting)에도 활용할 수 있다. 또한 압전기모듈은 600℃까지의 고온에 노출되기 때문에 전기적 접촉부위가 고온하중에 견디기 위해서는 최소한의 접합높이가 필요하다. 그러나 다이캐스팅 동안의 높은 압력에 대비해 200μm 이하의 매우 작은 접합높이가 요구되고 있다³⁰⁾.

Quentin 등³⁰⁾은 연속적으로 대량의 브레이징 용적을 만들어내기 위하여 구형의 예비성형체를 사용하였다. 예비성형체 직경을 노즐의 출구직경보다 약간 크게 하여 우선 노즐출구를 막은 상태에서, 질소를 가압하여 브레이징 불이 노즐로부터 분출되어 나오게 하였다.

Fig. 4와 같은 방법으로 단일 브레이징 구(sphere)(Cu₈₉Sn₁₁, d=600μm)를 노즐안으로 공급하고 노즐출

구를 막고, 질소압력을 100-140 mbar로 가압하여 기판을 완전히 가열하지 않아도 브레이징이 가능하도록 하였으며, 에너지입력을 정확하게 조절하였다.

3. 정성분석 및 향후 기술전망

3.1 활성금속 브레이징기술

활성 브레이징 기술은 생산 시의 제조원가를 절감할 뿐만 아니라 제조시간을 절감할 수 있는 장점이 있어, 향후 금속-세라믹 브레이징 접합에 적용성이 좋아 점점 더 광범위하게 사용하게 될 것이다⁴⁾.

금속과 세라믹 접합의 가장 큰 문제점은 특성이 크게 다른 두 재료간의 원자간 결합에 있다. 이를 위해 처리 시간을 단축하고, 접합강도를 개선하기 위한 새롭고 신뢰성 있는 활성금속 브레이징 접합이 이용되고 있다²⁾.

브레이징 합금에의 활성금속 원소의 첨가목적은 첫째로 이온결합성이 강하고, 표면에너지가 높은 세라믹에 대해 산화환원반응을 일으켜 용융금속의 젖음성을 향상시키는 것이고, 둘째로 물리적 화학적 성질이 다른 두 재료 간에 양립성을 부여해줄 수 있는 천이지역, 즉 계면생성물을 형성시키기 위함이다²⁾.

3.2 아크 브레이징기술

아크브레이징은 MIG 또는 TIG 용접과 브레이징 접합법을 하이브리드화 시킨 접합방법으로 브레이징 용접 와이어와 모재사이에 아크를 발생시켜 이 아크열을 이용하여 접합하는 공정이다. 이 공정의 장점은 강판에 대한 열영향이 적고 자동화가 용이하며, 또한 역극성 전원을 사용함에 따라 모재의 청정작용으로 플럭스 사용이 불필요하고, 스패터 또는 흠의 발생이 아주 적다는 장점을 가지고 있다⁵⁾.

아크브레이징은 전기아크를 열원으로 하여, 접합하는 모재보다 용점이 낮은 금속 또는 합금을 용가재로 사용하여, 모재를 거의 용융시키지 않고 접합하는 방법이다. 아크브레이징은 GMA(Gas Metal Arc) 용접 등의 용융용접에 비해서 저입열이므로 변형의 발생이 적고, 갭이 큰 계면의 접합이 가능하기 때문에 자동차 차체부품 등의 박판을 접합하는데 적당하다⁶⁾.

아크브레이징은 통상 피가공물을 거의 용융하지 않기 때문에 저입열로 변형이 적은 접합을 실현할 수 있다. 계면의 강도는 판재와 용착금속과 접하는 면에서 확보되어야 하는데, 특히 아크브레이징에 많이 사용하고 있는 겹치는 계면의 경우에는 상판과 용착금속과의 접촉

면을 충분히 확보할 필요가 있다. 종래에 사용되고 있는 아크브레이징방법에서는 비드의 젖음성이 나쁘기 때문에 비드 폭이 좁은 불룩한 비드가 형성되기 쉽고, 상판과 용착금속과의 접촉면을 충분히 확보하는 것이 곤란하다는 문제가 있기 때문에 이에 대한 개선이 필요하다⁶⁾.

레이저+MIG하이브리드 용접에서는 레이저빔이 주요 열원으로 작용하여 깊은 용입이 형성되지만, 레이저+MIG 아크 브레이징-용융 용접공정기술의 개발⁸⁾로 인하여 레이저는 보조열원으로 아크를 안정화시키고 강을 예열할 목적으로 사용하고, MIG 아크는 주요 열원으로 사용한다. 이 방법은 통상의 MIG 용접에 비해서 공정안정성, 용접외관 품질 및 용접효율을 개선시킬 수 있으며, 종래의 레이저+MIG하이브리드용접에 비해서도 더 낮은 에너지비용을 가져올 수 있는 장점이 있으므로 향후 발전가능성이 기대된다.

보조 TIG 토치를 주요 MIG 토치의 평행된 위치에 부착시켜, 강에 열을 가하게 하는 하이브리드 용접기술¹⁰⁾은 취약한 Fe-Al 금속간화합물 층을 균질화시키고 접합부 인장강도를 상승하는 효과가 크므로 향후 고강도 복합재료의 개발에 도움을 줄 수 있을 것이다.

3.3 무플럭스 브레이징기술

최근 전기자동차와 하이브리드카 등에 구동계의 변경에 따라, 예를 들면, 인버터냉각기와 같이 전자부품을 탑재한 열교환기가 등장하여, 플럭스의 잔사가 문제시 되는 경우가 증가되고 있다. 이 때문에 인버터냉각기의 일부는 플럭스를 사용하지 않는 진공브레이징법에 의해 제조되지만, 진공브레이징법은 가열로의 설비비와 유지보수비가 높고, 생산성과 브레이징의 안정성에도 문제가 있기 때문에 질소가스로 내에서 플럭스를 사용하지 않고 접합하는 요구가 증대될 것으로 예상된다¹⁴⁾.

고온 플럭스를 사용하지 않는 Ni기 초내열합금의 TLP(Transient Liquid Phase) 브레이징기술은 고효율 고온용 열교환기 조립에 중요한 접합법인데, 통상의 브레이징 공정보다 접합시간을 길게 하여 삼입금속 성분(예, Cr, Al, Ti) 중에 특히 용점저하원소를 액상 삼입금속 내로 확산시키는 방법이다. 모재로 사용되는 합금의 종류와 형태(판재, 포일)와 삼입금속의 조성구성에 따라 접합현상이 각기 다르기 때문에 앞으로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다³⁶⁾.

자동차용 열교환기 등에는 제품의 내식성 확보를 목적으로 Zn이 첨가되지만, 진공가열 하에서는 Zn이 증발하기 때문에 재료 내에 충분한 Zn이 잔존하지 않고, 충분한 내식성을 확보할 수 없다는 단점이 있다. 또한

노의 내벽에는 증발한 Mg와 Zn이 퇴적하므로 정기적인 청소도 필요하다. 최근에는 상기 문제를 해결하는 방법으로 대기압 하의 플럭스 없는 브레이징이 제안³¹⁾되고 있다.

플럭스 도포공정과 진공설비 등의 도입운용 비용과 브레이징 시에 사용되는 피복 등의 부자재 비용, 재료의 산 세정 등의 새로운 공정비용을 발생시키지 않고, 열교환기 등의 형상에 안정적인 접합상태를 얻는 것이 가능한 알루미늄계의 범용적인 무플럭스 방법이 제안^{9,31)}되고 있다.

최근 플럭스와 유해원소(예, Be)를 사용하지 않고, 알루미늄을 질소가스로 내에서 값싸게 브레이징 하기 위한 알루미늄합금 브레이징시트의 제조기술이 요구되고 있다¹⁴⁾.

3.4 저융점 브레이징재의 제조기술

브레이징 용가재에 미량원소를 첨가하여, 브레이징 시에 500-600℃에서 접합을 가능하게 하여 취약한 금속간화합물 생성을 최대한 억제하고, 접합부의 신뢰성을 향상시키고 절전 및 에너지절감의 목적으로 저융점 브레이징용가재의 개발기술이 요구되고 있다.

반응고 브레이징 기술은 용가재를 완전용융 시키지 않고 반쯤 용융된 상태에서 브레이징하는 방법인데, 기공과 같은 브레이징 결함을 감소시킬 수 있고 접합강도가 향상된다³²⁾.

3.5 대기접합용 브레이징재의 제조기술

금속부재끼리, 세라믹부재끼리, 혹은 금속부재와 세라믹부재와 브레이징에 대기접합용 브레이징재를 적용하는 경우, 대기 중에서 브레이징 하여도, 모재의 산화를 방지할 수 있으므로 플럭스가 필요 없으며, 브레이징 자체의 산화도 방지할 수 있고, 양호한 기밀성과 접합강도를 갖는 접합체(연료전지용 혹은 고체산화물형 연료전지용 집전재료)를 얻을 수 있고, 진공처리가 필요 없으므로 제조코스트의 저감을 도모할 수 있다¹⁾.

세라믹부재와 금속부재의 접합방법으로서 제조코스트의 저감을 도모할 수 있는 것은 물론, 대기분위기 중에서도 비교적 저온영역에서 양호한 접합체를 얻을 수 있는 브레이징기술의 확립이 요구되고 있다. 이 방법은 모재의 접합면에 플럭스를 도포하고 플럭스에 의한 접합부에서 환원분위기를 얻고, 동시에 산소진입을 차단함으로써 양호한 접합체를 얻을 수 있다¹⁾.

활성금속 브레이징법은 진공 혹은 불활성가스 분위기

중에서 가열을 행할 필요가 있기 때문에 설비코스트가 높게 되며, 또한 대기의 급배기가 필요하기 때문에 연속적 생산을 행할 수가 없다. 이러한 이유로 제조코스트가 증대한다. 또한 반도체와 의료분야에서는 진공 및 활성분위기에서의 폭로가 불가능한 부재와 고온에서의 유지가 불가능한 부재가 사용되는 경우가 있다. 이 경우에는 제조프로세스가 제약을 받는다. 이상과 같은 이유에서 제조코스트의 저감을 도모할 수 있는 것은 물론, 대기분위기 중에서도 비교적 저온영역에서 양호한 접합체를 얻을 수 있는 대기 브레이징기술의 확립이 요구된다¹⁾.

3.6 레이저 브레이징기술

가열로 브레이징에서 가장 큰 이점은 브레이징 용가재를 모재 사이에 끼워넣어 접합부를 원하는 형태로 만들 수 있다. 그러나 몇 초내로 접합해야 하는 경우에는 레이저 브레이징이 유리하다³³⁾. 레이저 브레이징 기술은 금속판의 접합에 광범위하게 사용되고 있지만 특히 자동차 산업에서 매우 높은 표면품질을 요구하는 경우에 적용되고 있지만 품질제어와 공정관찰은 필수적이다.

향후 장기적 관점에서 FPGA(Field Programmable Gate Array)기술을 기반으로 하여 프로세싱 광학(optics)을 통하여 공정조절기술을 완전히 통합하여, 최적의 레이저출력과 브레이징와이어의 속도를 제어할 수 있는 자동적인 레이저브레이징의 공정기술이 개발되어야 할 것이다²¹⁾.

2빔-레이저 브레이징공정을 이용하여 아연도금강과 초고강도강의 접합기술에 대한 검토²⁶⁾가 필요하다. 기존의 용접공정에 비해서 입열량을 감소시켜 변형의 억제하고, 후공정을 간편화하고 접합부 인장강도를 보장할 수 있는 장점이 있다. 또한 레이저예열에 의해 높은 작업속도가 가능하여 모재 안으로의 구리확산을 방지하여 신뢰성을 더욱 높일 수 있다. 향후 아연도금강과 초고강도강의 브레이징접합기술은 제조원가를 절감할 수 있으며, 강성이 높아진만큼 차량의 감량효과가 있으므로 향후 수요가 확대될 것을 전망된다.

레이저 브레이징 시에 젖음성에 영향을 주는 인자^{26,34)}로서 용융되지 않은 모재(화학성과 조도를 기준), 점성과 용융금속의 화학성분 및 브레이징 지역의 온도구배 등이 있으며, 이외에도 양호한 젖음성을 위하여 예열처리를 함으로써 가능하다. 향후 이러한 인자에 대해서 연구검토하여 레이저 브레이징기술을 정착해 나가야 할 것이다.

3.7 레이저 용적 브레이징기술(LDB; Laser Droplet Brazing)

구형의 브레이징 예비성형체는 세라믹노즐 내에 위치되어 있으며, 계속적으로 레이저펄스에 의해 용융된다. 질소가압을 통하여 노즐로부터 분출된 액상 솔더는 금속화 패드와 구리와이어의 표면을 습윤시켜, 응고 후에 브레이징 접합이 되는 공정을 레이저 용적 브레이징이라 부른다²⁷⁾.

구조부품에 집적된 활성 압전세라믹 부품에 대한 적용분야로서 활성 감쇠(damping), 에너지 수확기술(harvesting), 혹은 진동과 재료파괴에 대한 모니터링 등이 있다. 향후 LDB 공정에서 해결해야 할 문제점은 도체(conductor)를 손상시키지 않거나 혹은 세라믹기판의 금속화가 일어나지 않게 하여 부품들을 전기적으로 접촉하는 것이다. 특히 압전부품은 구조된 알루미늄으로 제조된 구조체 내에 집적되어 있으므로 높은 기계적 강도와 내열성이 요구되고 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다²⁷⁾.

예비성형체에 대하여 에너지입열(즉, 레이저펄스에너지와 지속시간)을 낮추는 연구는 세라믹의 열적하중을 최소로 유지시킬 수 있으며, 균열을 방지하는데 효과적이다. 또한 브레이징재료의 증발없이 완전한 용융이 가능하다. 만약 레이저출력이 낮으면 예비성형체는 완전히 녹지 않고 노즐을 막지만, 너무 높으면 증발이 스플래터를 유도하여 잔사가 노즐 내에 남을 수 있고, 브레이징 되는 위치에 편차가 발생할 수 있기 때문에 최적의 레이저출력 범위를 찾는 것도 중요한 과제이다³⁰⁾.

브레이징 위치의 정확성을 기하기 위해서는 향후 노즐출구와 기관 사이의 거리를 최소로 유지하는 연구가 필요하고 레이저빔에 관한 브레이징의 정확성과 질소압력도 중요한 제조조건이 될 수 있다. 특히 브레이징 예비성형체의 크기가 작으면 브레이징 높이를 줄이는 효과가 있기 때문에, 작은 예비성형체를 형성시키기 위해서는 노즐크기를 줄이는 연구가 요구되고 있다³⁰⁾.

4. 결 론

최신의 고능률 브레이징기술 개발현황과 적용분야를 파악하기 위하여 최신의 고능률 브레이징 기술동향, 소재에 따른 브레이징 적용기술, 이종재료의 브레이징 적용기술에 대한 국내외 정보를 수집하여 종합적으로 체계적인 분석을 하였다. 최신의 고능률 브레이징 기술로서 활성금속 브레이징, 아크 브레이징, 무플럭스 브레이징, 저융점 브레이징재의 제조, 대기접합용 브레이징재의 제조, 레이저 브레이징, 레이저 용적(droplet) 브

레이징이 제시되고 있다.

상기 언급된 기술을 최적으로 선정하여, 경제적인 야금학적 설계와 진보된 브레이징방법을 검토할 필요가 있다. 특히 접합부 금속간화합물의 취성을 개선하기 위하여 경제적인 여러 종류의 금속-비금속과, 하이브리드 기술에 의한 열원(MIG, TIG, Laser)을 연구해야 한다.

후 기

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

References

1. NHK Spring Co., Ltd., Brazing material for bonding in atmosphere, bonded article and current collecting material, WO2011/142262
2. SeHo Kee, Joining of Ceramic and Metal using Active Metal Brazing, *Journal of the Micro-electronics & Packaging Society*, 18(3) (2011), 1-7
3. Tanaka Kikinzoku Kogyo K. K : Active metal brazing material, WO2012/161148
4. C.A. WALKER, Metal-nonmetal brazing for electrical, packaging and structural applications, *Advances in Brazing* (2013), 498-524
5. W.J. Cho, Y.H. Cho, J.G. Yun and C.Y. Kang, Microstructure and Tensile Strength Property of Arc Braze DP steel using Cu-Sn Insert Metal, *Journal of KWJS*, 31(1) (2013), 58-64
6. Taiyo Nippon Sanso Corporation, Method for gas-shielded arc brazing of steel sheet, WO2010/038429
7. M. Shome, Metal inert gas(MIG) brazing and friction stir spot welding of AHSS, *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels(AHSS)*, (2015), 137-165
8. G. Qin, Z. Lei, Y. Su, B. Fu, X. Meng, S. Lin : Large spot laser assisted GMA brazing - fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 214 (2014), 2684-2692
9. X. Meng, G. Qin, Y. Su, B. Fu, Y. Ji, Numerical simulation of large spot laser + MIG arc brazing - fusion welding of Al alloy to galvanized steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 222 (2015), 307-314
10. H. Zhang, J. Liu, J. Feng, Effect of auxiliary TIG arc on formation and microstructures of aluminum alloy/stainless steel joints made by MIG welding-brazing process, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 24 (2014), 2831-2838
11. Kanto Yakin Kogyo Co., Ltd., Method for brazing aluminum member, and brazing apparatus used therein, WO2012/057197
12. Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., Aluminum alloy brazing sheet, method for producing same, and

- method for brazing heat exchanger formed of aluminum, WO2014/ 128880
13. Furukawa-Sky Aluminum Corp., Brazing sheet for flux-free brazing and method for producing same, WO2013/105637
 14. Sumitomo Light Metal Industries, Ltd., Aluminum alloy brazing sheet, WO2013/168669
 15. Nippon Light Metal Co., Surface brazing method of aluminum alloy material, WO2012/043030
 16. Nippon Light Metal Co., Method for surface brazing between aluminum alloy member and copper alloy member, WO2013/108465
 17. Nihon Superior Co., Ltd., Low-melting brazing filler metal, WO2015/053114
 18. Nihon Superior Co., Ltd., Low-melting point brazing material, WO2014/084242
 19. S. Y. Lee, Microstructures of Bonding Interfaces after Semi-Solid Brazing of Aluminum Using A357 as a Filler Metal, *Transactions of Materials Processing*, 21(8) (2012), 506-511
 20. NHK Spring Co., Ltd., Brazing material for bonding in atmosphere, bonded article, and current collector material, WO2012/ 077733
 21. M. Ungers, R. Rolser, P. Abels, Hardware based analysis and process control for laser brazing applications, *Physics Procedia*, 41 (2013), 524-530
 22. Z. Tang, T. Seefeld, F. Vollertsen, Laser brazing of aluminum with a new filler wire AlZn13Si10Cu4, *Physics Procedia*, 41 (2013), 128-136
 23. M. Heitmanek, M. Dobler, M. Graudenz, W. Perret, G. Göbel, M. Schmidt, E. Beyer, Laser brazing with beam scanning: Experimental and simulative analysis, *Physics Procedia*, 56 (2014), 689-698
 24. A. Mathieu, R. Shabadi, A. Deschamps, M. Suery, Dissimilar metal joining using laser, *Optics & Laser Technology*, 39 (2007), 652-661
 25. C. Mittelstädt, T. Seefeld, D. Reitemeyer, F. Vollertsen, Two-beam laser brazing of thin sheet steel for automotive industry using Cu-base filler material, *Physics Procedia*, 56 (2014), 699-708
 26. Krishna P. Yagati, Ravi N. Bathe, Koteswararao V. Rajulapati, K. Bhanu Sankara Rao, G. Padmanabham, Fluxless arc weld-brazing of aluminium alloy to steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (2014), 2949-2959
 27. S. Stein, J. Heberle, F. J. Görtler, K. Cvecek, S. Roth, M. Schmidt, Influences of nozzle material on laser droplet brazing joints with Cu89Sn11 preforms, *Physics Procedia*, 56 (2014), 709-719
 28. A. Jeromen, A. Kuznetsov, E. Govekar, Laser droplet generation from a metal foil, *Physics Procedia*, 56 (2014), 720-729
 29. C. Held, U. Quentin, J. Heberle, F.J. Görtler, M. Weigl, M. Schmidt, Laser droplet brazing for the electrical contacting of composite materials with integrated active elements, *Physics Procedia*, 39 (2012), 585-593
 30. U. Quentin, J. Heberle, C. Held, M. Schmidt, Laser droplet brazing for electrical contacting of composite materials with integrated active elements, *Procedia Materials Science*, 2 (2013), 181-188
 31. Kanto Yakin Kogyo Co., Ltd., Method for brazing aluminium member, and brazing apparatus used therein, WO 2012/057197
 32. Harima Chemicals, Incorporated, Brazing composition, tube for heat exchanger, and heat exchanger, WO2014/065074
 33. R. Beeranur, K.K. Waghmart, R.K. Singh, Characterization of vacuum brazing of SS 304 and alumina ceramic with active brazing alloy, *Procedia Materials Science*, 5 (2014), 969-977
 34. Daiichi Kigenso Kagaku Kogyo Co., Ltd., Flux for brazing aluminum materials, WO 2013/008731
 35. M.Y. Lee, S.W. Kim, Ali M. Nasiri, Norman Y. Zhou, Effects of the Types of Coating on the Laser Brazing Characteristics of Dissimilar Joints between Mg Alloy and Steel Sheet, *Journal of KWJS*, 31(4), (2013), 275-280
 36. C.Y. Gang, Trend on Research TLP Bonding of Ni and Ni base Superalloy for high temperature Heat Exchanger, *Journal of KWJS*, 30(6), (2012), 507-512