

경량 알루미늄합금의 최신 접합기술동향

유 호 천* · 김 환 태*

*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램

Recent Technological Tendency of Joining for Light Aluminium Alloy

Ho-Cheon Yoo* and Hwan-Tae Kim*

*KISTI ReSEAT Program

1. 서 론

최근 수송기기의 연비향상과 매연가스 저감을 위한 경량화추세에 따라 알루미늄합금의 접합기술의 중요성이 한층 더 높아지고 있는데, 이에 대비하여 국제적인 경쟁력을 갖춘 고효율 용접기술의 국내 자체개발과 정착이 요구된다.

본 해설에서는 경량 알루미늄합금의 최신 접합기술동향을 파악하기 위하여 국내 및 해외의 학술문헌 정보, 특허 정보 및 최신 기술동향분석을 행하였는데, 주로 NDSL과 ScienceDirect 등에 의해서 알루미늄합금의 최신 접합기술동향에 관한 과학기술정보를 발췌하였다. 국내 알루미늄합금의 접합기술 발전을 위하여 용접방법에 따른 최신 접합기술특성과 국내외 동향을 체계적으로 분석하였으며 향후 기술전망을 제시하고자 하였다.

2. 용접방법에 따른 접합기술동향

2.1 MIG 용접

이재(異材) 접합에 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 직류펄스 MIG용접하는 경우, 아크가 불안정하게 되어 스퍼터가 발생하기 쉽고 산화막을 제거하는 클리닝작용이 불충분하므로 이에 대한 개선이 요구된다¹⁾.

Murakami et al.²⁾은 알루미늄과 일반탄소강을 플럭스 코어드 Al-12%Si 용가와이어로 GMA용접하는 경우에 접합부의 횡방향 인장강도는 알루미늄 모재의 70%에 도달하였음을 확인하였다. 그러나 M. Staubach 등³⁾은 알루미늄합금에 아연도금강판을 접합하는데 있어서 Zn기 용가재는 Al-Si용가재에 비해 접합강도를 크게 향상시켰다.

아크용접은 주로 열에 의한 변형이 심하며, 작업자의 기능이나 날씨에 크게 영향을 받으므로 이를 해결하기

위하여 이중 알루미늄합금인 5083-O와 5456-H116에 대하여 ER5183 용접재료로 로봇을 이용하는 기술이 시도되고 있다⁴⁾.

MIG 도치에 전극으로서 소모성 용가와이어를 장착시키고, 불활성가스를 방출하는 방법⁵⁾은 입열량을 감소시켜 용접열영향부의 폭을 줄일 수 있으며 다양한 용가재의 사용으로 접합부의 고온균열을 방지할 수 있다. 또한 자동화공정의 속도를 더욱 증가시킬 수 있다.

아크의 안정화를 위해 아르곤 보호가스 중에 O₂가스를 300ppm 정도 첨가하거나 원주용접시 시작되는 부분과 끝나는 부분의 용입을 개선하기 위하여 아르곤보호가스 중에 헬륨가스를 70~80%정도 혼합하여 사용하였다⁶⁾.

철강-알루미늄합금의 접합시 플럭스 코어드 와이어(Cs계 플럭스+4047)를 사용하여 1050 알루미늄과 SPCC(냉간압연강판)의 이중재료 겹치기이음부를 GMAW 브레이징법으로 접합함으로써 입열량을 억제하고 Fe-Al 2원계 금속간화합물의 생성을 억제시켰다⁷⁾. 6022 알루미늄합금과 GI아연도금강판의 이중재료 겹치기이음부를 극저입열 용접함으로써 금속간화합물의 두께를 1 μ m 정도로 얇게 만들고 Fe-Al의 확산을 억제시켰다⁸⁾.

비금속재물의 생성을 억제하고 용접부의 인성을 향상시키기 위하여 플럭스 코어드 아크용접에 적용할 수 있는 리튬알루미늄합금을 함유하고 금속전극부와, 금속전극부에 인접한 플럭스부로 구성된 용접전극의 제조기술을 확립하였다⁹⁾.

일본 Kobe Seikoshō¹⁰⁾에서는 AlF₃를 특정량 포함하고 염화물을 포함하지 않는 불화물을 조성으로 하는 플럭스와, Si 1~13wt.% 함유한 외피 알루미늄합금의 플럭스 코어드 와이어를 이용하여 고장력강재와 6000계 알루미늄합금재의 고강도 이중재료끼리의 용융접합하여 높은 접합강도를 얻었다. Sumitomo Light Metal

IND¹¹⁾에서는 4000계 혹은 5000계 알루미늄과 강을 접치기하여 용가와이어를 사용하여 MIG용접으로 접합하였다.

Al 6061의 MIG 펄스용접시 예비가스 유출시간이 2초 이상에서 기공발생이 현저히 낮게 되고 용접전류가 증가함에 따라 기공발생이 증가하였다. 또한 펄스파형의 피크전류가 높아질수록 기공발생은 감소하는 경향을 보이고 있다¹²⁾.

2.2 TIG 용접

TIG 용접이나 레이저용접과 같은 용융용접 방법은 알루미늄계 피용접재와 철계 피용접재와의 접합시 계면에 FeAl₃ 혹은 Fe₂Al₅ 등의 취약한 Al-Fe계 금속간화합물이 매우 두껍게 생성하여 접합강도를 현저히 저하시킨다¹⁾.

싱가포르의 Eagle Services Asia Private Limited에서는 알루미늄 항공기부품의 용접부에 기공(porosity)을 없애기 위해서 첫째, 밀폐된 용접박스 내에서 100°C 이상으로 예열하고 교류전류의 TIG용접을 이용하였으며, 둘째 밀폐된 분위기 내에서 아르곤과 헬륨이 혼합된 불활성 가스를 방출하고 용접비드의 윗부분을 제거하여 원하는 두께로 만들었다¹³⁾.

미국 Praxair Tech. Inc.¹⁴⁾는 TIG용접 시에 주파수 가변화에 의한 모재로의 열침중성 개선을 필요로 하였으며, 교류아크의 주파수를 초음파영역으로 하여 용접부에 발생하는 기포의 발생을 억제할 수 있었다. 아크용접에 산소 0.6~1.9%, 헬륨 및 아르곤 10~24%를 주성분으로 하는 보호가스 조성물을 개발하였는데, 고속자동화 용접에 사용하여 뛰어난 기계적 특성을 유지하면서 용접속도, 이음부 피트-업 공차 및 용락을 현저하게 개선시킬 수 있었다.

Dalian대학¹⁵⁾에서는 알루미늄합금(5A02-H34)과 스테인리스강(STS 304)을 접합하는 경우 플럭스 코어 Zn-15%Al 용가와이어로 용접한 후 280°C에서 30분 동안 어닐링하여 인장강도를 향상시켰다. 스테인리스강과 용착부 사이의 계면층 두께는 1.5 μ m 이하였으며 용착부는 ZnO-enhanced Zn-Al 서멧이 형성되는 것이 관찰되었다.

S.B. Lin 등¹⁶⁾은 알루미늄합금(5A06)과 스테인리스강(STS 321)에 대하여 Al-Cu 용가재(2319Al-Cu6)와 내부식성 플럭스를 사용하여 TIG 버트용접을 한 결과, 172.5MPa의 인장강도에 도달할 수 있었다. 이때 사용된 플럭스는 Nocolok flux (KAlF₄ and K₂AlF₆ eutectic), Zn과 Sn의 금속분말, K₂SiF₆ 등

이었다. 또한 금속간화합물 층은 3~5 μ m, 주성분은 Fe₄Al₁₃임을 밝혔다.

2.3 저항 점용접

저항 점용접은 알루미늄 표면에 형성되는 강고한 산화피막의 영향, 전극재료와 알루미늄의 합금화가 원인으로 전극이 빨리 소모되고, 통전저해에 의하여 이음부 강도의 편차가 발생하며, 불균일한 너깃의 생성, 강재에 비하여 연속타점성이 뒤떨어지는 등의 문제점이 있다. 이를 해결할 수 있는 용접기술의 확보가 중요하다.

알루미늄합금의 열전도율이 연강보다 약 3배 정도 낮아서 용융부 주위의 온도상승에 의한 용접열손실이 크고 높은 전류를 필요로 하며 낮은 용융온도와 높은 전기전도도로 인하여 짧은 용접수행시간을 필요로 한다. 또한 소성영역(약 95~200°C)이 극히 좁고 모재의 강도가 낮으므로 용접시 전극가압력에 따른 용접물의 과도한 압흔(indentation) 등 용접불량이 발생하기 쉽다¹⁷⁾. 일본 Nissan Motor Co.¹⁸⁾에서는 3매 이상의 이중속재료(알루미늄합금판, 아연도금강판 및 나강판)을 포개어 접합하는 방법을 개발하였다.

일본 Nippon Light Metal Co.에서는 합금성분, 응고, 압연 및 용체화처리 조건을 제어한 후에 재결정입경의 평균치가 25 μ m 이하이고 금속간화합물이 5000개/mm² 이상 존재하는 프레스 성형성 및 연속 저항스폿 용접성이 우수한 알루미늄합금판을 개발하였다¹⁹⁾.

Ranfeng Qiu 등^{20,21,77)}은 강판 등에 의한 덮개판(cover plate)를 이용하여 A5052 알루미늄합금에 SPCC 냉연강 혹은 STS 304를 저항 점용접하였다.

2.4 레이저빔 용접

고출력에 의한 고밀도 에너지로서 3차원 레이저용접 시스템 및 관련 장치 구축²²⁾으로 인하여 빠른 용접속도와 용입깊이가 깊고 용융폭이 적기 때문에 열에 의한 변형이 적어 열영향부가 매우 좁다는 장점과 한쪽면에서의 용접이 가능하다.

레이저용접성이 우수하고 용접부의 기공발생도를 감소시킨 전지케이스 덮개용 알루미늄 합금판재를 국내에 특허출원하였다. 일본 Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.에서는 알루미늄합금에 금속간 화합물을 10000 μ m²당 40개 이상²³⁾ 혹은 2~5 μ m 범위의 Si 단상²⁴⁾을 함유시켰다. 일본 Kobe Seikosyo²⁵⁾에서는 펄스레이저용 A1000계 알루미늄합금재를 개발하였는데, 액상에서의 점도를 0.001Pa·s로 감소시키고, 또한 기공의 단면적과 개수의 곱으로 표시되는 기공 총단면적(μ m²)을 관찰

구간의 길이(mm)로 나눈 용접부 기공발생도를 $1.5(\mu\text{m}^2/\text{mm})$ 이하로 하였다.

중국 Harbin Institute²⁶⁾에서는 알루미늄합금(5A06 Al alloy)과 티타늄합금(Ti-6Al-4V)을 레이저로 접합하였다. 아르곤가스 분위기에 Al-12Si 용가와이어를 이용하여 레이저 용접을 하였는데, 이 방법은 진공 중에서 실시하지 않아도 되며, 복잡한 부분에도 접합이 가능하다.

미국 Alcoa Inc.²⁷⁾에서는 레이저빔 진동을 이용한 알루미늄합금의 용접방법을 개발하였는데, 레이저빔이 키흐의 위치가 변함에 따라, 키흐가 용융금속 풀의 전 구역에 걸쳐서 진동하여 용융금속이 키흐를 채우도록 하였다.

일본 Kobe Seikoshō에서는 알루미늄계 피용접재와, 아연계 피복층을 갖는 철계 피용접재에 대하여 용융용접하는 이종재료의 접합방법을 개발하였다¹⁾. 플럭스를 이용하여, 레이저빔으로 용접하여 플럭스도 용융하도록 하면서 높은 계면 접합력으로 피용접재를 접합하는 방법이다.

6000계 Al과 강을 겹치기 용접하는 경우 Fe_2Al_5 와 FeAl_3 가 두텁게 관찰되어 150N/mm의 강도 밖에 얻을 수 없지만, GA강판의 도금층을 사전에 레이저 조사²⁸⁾로 제거하면 GI강판과 같은 정도의 220N/mm의 강도를 얻을 수 있다.

6061Al과 GA강판의 접합시 계면에 플럭스(CsF)를 도포한 후에 Fe-Al의 비금속개재물을 형성하기 어려운 은납(silver solder)을 이용하여 반도체 레이저 브레이징 용접²⁹⁾을 실시한 결과, IMC의 형성은 이루어지지 않았으며 약 $130\text{N}/\text{mm}^2$ 의 양호한 인장강도를 얻을 수 있었다.

6111 Al과 SPCC강에 대하여 레이저조사⁸⁾로 겹치기 용접을 하는 경우 최적의 시공조건을 파악하였다. 저속도 고입열조건에서 $\text{Fe}_2\text{Al}_5(5\mu\text{m})$, $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}(1\mu\text{m})$ 의 금속간화합물이 형성되지만, 고속도 저입열에서 $1\mu\text{m}$ 정도의 얇은 연성을 가진 Fe-rich한 IMC, 즉 Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 등이 형성되었다.

Al과 강의 접합시 SPCC강에 레이저 조사한 직후에 롤압접하면 IMC 두께가 $4\sim 5\mu\text{m}$ 정도로 얇게 되고, 또한 연성이 있는 Fe-rich한 Fe-Al, Fe_3Al 의 구성비율이 취성적인 Al-rich한 FeAl_3 , Fe_2Al_5 에 비해 28~40%로 증가하여 양호한 접합부를 얻을 수 있다³⁰⁾. Nippon Light Metal Co.³¹⁾는 내압력성 및 레이저용접성을 동시에 향상시키는 배터리 케이스용 시효처리된 알루미늄 합금판의 제조기술을 확립하였다.

미국 NASA Johnson Space Center^{32,33)}에서는 피로

균열의 성장을 억제하기 위하여 마찰교반접합된 7075-T7351 알루미늄합금판의 용접부에 대한 레이저 피닝 처리를 하였다. 그 결과 3층 레이저 피닝처리는 슛피닝이나 1층 레이저피닝처리에 비해서 압축잔류응력과 표면경화 효과의 상승으로 피로균열의 성장을 크게 완화시킬 수 있었다.

레이저용접은 높은 에너지 밀도를 갖기 때문에 매우 깊은 용접두께를 얻을 수 있고 아크용접에 비해서 약 2배에서 10배까지의 고속용접이 가능하다. 빠른 냉각속도로 인해 수직상간격이 좁고 열영향부와 열변형이 작아 기계적 성질의 개선이 가능하다. 최근 고품질, 고정밀도(高精密度), 고속도에 대한 기술이 추진되고 있다.

2.5 레이저-아크 하이브리드 용접

알루미늄합금의 용접시 용입깊이의 증가, 그루브 간격 여유의 완화 용접속도의 고속화, 기공과 용착부족(underfill)의 저감과 안정화를 얻기 위하여 레이저와 아크를 동시에 사용하는 하이브리드용접을 개발하고 있다²⁴⁾.

YAG 레이저-GMAW 하이브리드 용접은 첫째, 용접비드의 표면이 미려한 것이 특색이며, 용입이 깊고 고속도 용접화가 가능하고, 둘째 가스메탈 아크용접의 고전류 상태에서 높은 아크압력에 의해 용탕이 모목형상으로 되면서 기포의 발생이 억제되고, 셋째, YAG 레이저빔을 가스메탈 아크용접의 아크에 근접시킴으로써 용입을 깊게 해주는 장점이 있다³⁵⁾.

용융지와 응고재료에 대해 가장 양호한 최적의 형태를 만들어주기 위하여 보호가스의 성분, 유량, 이온화전위를 고려하여야 하는데, 특히 경제성을 고려하여 값비싼 헬륨의 양을 줄이기 위해서는 가스유동속도를 최대한 낮추어야 한다³⁶⁾.

자동차, 조선산업에 널리 이용되고 있는 레이저 키홀 용접은 높은 정밀도, 깊은 용입깊이, 작은 용접변형 및 높은 용접속도가 장점이다. 그러나 5000계, 6000계 알루미늄합금에는 기공과 고온균열과 같은 용접결함의 발생을 용이하게 하고 강도를 감소시킬 수 있다. 향후 하이브리드 레이저-MIG 용접을 적용하여 언더컷의 억제, 기공형성의 방지, 용착금속의 화학성분의 개질 등을 이루어야 할 것이다²²⁾.

레이저 브레이징 기술로 철강-알루미늄합금의 이종금속 접합기술을 개발하였는데, SPCC/6022 SMAW 겹치기이음부에 대해 SPCC 측에 레이저 빔을 조사하여 고속도·저입열 접합하여 금속간화합물을 $1\mu\text{m}$ 정도의 두께로 억제시키고 접합부의 연성을 높였다³⁷⁾.

6000 알루미늄합금과 GA(합금화 용융아연도금)강판

의 겹치기 필릿이음부에 대해 Zn-15%Al 브레이징재를 사용하여 레이저 브레이징 접합하였다³⁸⁾.

YAG 레이저-MIG 하이브리드 용접에서 MIG의 전류를 증가시키면 기공의 발생을 억제할 수 있다. MIG의 고전류 조건하에서 아크압력보다 용탕이 오목한 형상으로 됨으로써 기공의 발생이 억제되거나 생성하여도 표면에서 소실된다고 보고되고 있다³⁵⁾.

YAG 레이저-MIG 하이브리드 용접을 실시함으로써 YAG 출력의 반감화(半減化)와 용접속도의 60%증가가 가능하게 되어 접합부강도는 MIG보다 개선되고 겹치기 유도 YAG 레이저 단독에서보다 2배 정도로 향상시켰다³⁹⁾.

YAG 레이저-MIG 하이브리드 용접의 적용사례로 유럽의 AUDI의 신형 AB의 루프⁴⁰⁾와 VW의 Phacton의 도어⁴¹⁾ 등이 있다. 일본에서는 철도차량의 중공형체 끼리의 용접에 적용되었다. MIG 용접에서 그루브의 설계 변화없이 적용가능하였고, 좁은 그루브에서도 종래 MIG에 비교해서 4배의 고속도화가 가능하였으며 열영향부의 저감에 의해서 피로강도를 크게 향상시켰다³⁸⁾.

레이저빔 용접에 MIG 브레이징을 적용하는 경우, 이종금속 접합용으로 개발된 알루미늄도금강판을 사용하여 IMC 미형성지역을 형성시킬 수 있으며 동시에 중앙부에 MIG 브레이징의 경우보다도 얇은 IMC를 형성시켜 200N/mm의 높은 인장전단강도를 얻을 수 있다⁴²⁾.

J. Zhou, H.L. Tsa²²⁾는 레이저-MIG 하이브리드 용접에 용가재를 적용하여 언더컷의 억제, 기공형성의 방지, 용착금속의 화학성분의 개질을 이루었다.

G. Sierra 등⁴³⁾에 의해 6016 알루미늄합금과 아연도금된 저탄소강에 대하여 레이저-double side TIG용접으로 접합하였다. 계면에는 2~40 μ m 두께의 중간반응층이 형성되었는데, 10 μ m 이상의 금속간화합물 층이 형성될 경우에 용접부에 균열이 관찰되었다. 플럭스를 사용하지 않는 경우에는 용착부에 아연유기공으로 인하여 140N/mm의 낮은 강도를 나타내었으나, 플럭스를 사용한 경우에는 190~250N/mm의 매우 높은 강도를 얻을 수 있었다.

CHEN Yan-bin 등⁴⁴⁾은 5A06 알루미늄합금에 대하여 CO₂ 레이저-GTA 양면용접을 하였다. 이 방법은 용접부의 미세한 결정립과 좁은 구간의 용접열영향부로 인해 결함생성이 억제되고 인장강도와 연신율의 상승을 가져오는 효과가 있다.

2.6 마찰교반 접합

전기적 에너지의 열원이 필요없으며 별도의 용가제나 용제의 공급도 불필요하다. 입열량이 MIG, TIG용접에

비해 60% 수준으로 이에 따른 열변형 및 잔류응력의 발생이 적어 기계적 성질이 향상된다. 또한 고상화 균열이나 블로우홀 또는 기공 등이 발생하지 않으며 용융이 발생되지 않아 미세한 압출조직이 남게 되고 양호한 용접이 이루어진다.

7075-T6 알루미늄합금을 이용하여 마찰교반접합을 실시한 결과, 톨 회전속도 1600rpm에서 동적 재결정이 가장 효율적으로 일어나 가장 높은 인장강도를 나타내었다⁴⁵⁾.

최근 알루미늄합금재료의 TFT-LCD용 서셉터의 접합에 마찰교반용접이 이용되었다^{46,47)}. 서셉터와 캡이 경계되는 부분에 경계선을 따라 형성된 충전홈에 서셉터와 캡이 원활하게 접합하도록 유도하는 촉매제를 충전하여 마찰교반용접으로 접합시키는 것이 특징이다. 또한 접합부의 누설문제가 없어 세라믹 코팅시 발생하는 미소 균열 및 미립자의 발생을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

일본 Kawasaki Jukogyo⁴⁸⁾에서는 불활성가스 중에서 구조용강을 알루미늄합금과 함께 용접할 수 있는 마찰교반접합 장치를 개발하였다. 또한 용접토에 AlN을 코팅하여 마찰열에 의한 연화현상을 억제하여 톨의 수명을 크게 향상시켰다.

목포해양대학교 산학협력단⁴⁹⁾에서는 마찰교반용접성과 수소취화방지성능이 우수한 알루미늄합금으로 된 친환경 레이저선박건조기술을 확립하기 위하여 Al 5052-O와 5083-H321 합금에 대한 최적의 용접조건을 규명하였으며, (주)고강알루미늄에 의해 7000계 알루미늄합금계 압출재를 이용한 자동차 범퍼백빔의 제조방법이 개발되었다⁵⁰⁾.

마찰교반 접합에서는 공구(tool)의 온도가 매우 높아 연화 및 열화가 발생되므로 공구는 내마멸성이 높고 공구의 선단부에서의 손상과 변형이 방지되고 보수유지 비용이 절감되며 생산성이 향상되는 방향으로 기술개발이 이루어지고 있다.

2.7 마찰교반 점접합

프로브와 솔더가 일체식으로 제조된 톨(Fixed Pin Tool)을 사용하는 마찰교반점접합은 일본에서 Matsuda RX-8을 시작으로 양산차에 적용되고 있으며 운전비용을 대폭적으로 삭감할 수 있다. 그러나 일체식 톨의 경우 점접합 후에 구멍이 남게 되면 접합부의 강도와 내식성이 저하되는 문제점을 갖고 있다. 복동식 톨의 경우 아래에 놓인 모재쪽으로 소성유동이 일어나 계면근방의 접합체적이 증가하기 때문에 후판 또는 3매 이상 판재의 겹치기 점접합에도 유리하다⁵¹⁾.

종래의 일체식 툴을 대신하여 개발된 복동식 툴 (Adjustable Pin Tool)을 사용하면 접합부에 구멍이 남지 않아 툴을 교환하지 않고도 두께가 다른 모재를 접합할 수 있다. 복동식 툴을 탑재한 로봇건이 개발되었으며, 이 장치를 이용하여 구멍이나 덧살이 남지 않는 마찰교반점접합을 실시함으로써 여러 종류의 판두께에서 연속적인 작업이 가능하다⁵¹⁾.

일반적으로 용융용접과정에서는 계면에 Fe_2Al_5 등의 취약한 금속화합물이 형성되기 때문에 접합이 대단히 어렵지만, 여기에 새로운 마찰교반점접합법⁵²⁾이 발표되고 있다. 6016 Al합금을 상판으로 하고 연강판을 하판으로 하여 툴을 알루미늄과 강 의 계면 직상까지 교반접합하는 방법이다. 이 방법은 접합계면에 금속간화합물이 생성되지 않고 나노단위의 비정질 층의 새로운 계면 구조가 형성되므로 강력한 접합이 가능하다.

일본 Gifu Prefectural Research Institute⁵³⁾에서는 종래의 프로브 툴 대신에 스크롤 툴을 개발하였다. 스크롤 툴의 회전속도를 3000rpm, 쇼울더 플런지 깊이를 0.7mm로 한 결과, Al 6061-T4 판의 최대 인장전단강도를 종래의 3.9kN에서 4.6kN까지 향상시킬 수 있는 효과가 있었다.

Paris-Sud대학의 S. Bozzi⁵⁴⁾는 Al 6016/IF-steel 의 마찰교반점접합시 금속간화합물(IMC)의 특성을 조사하였다. IMC층은 타원의 석출물이 얽혀 있는 형태(tangle)로 되어 있으며 길이는 약 200nm이다. IMC층의 두께는 회전속도와 침투깊이의 증가에 따라 상승하게 되고, IMC층이 두터우면 균열이 쉽게 생성되고 전파된다. 또한 회전속도가 3000rpm, 툴 침투깊이 2.9mm일 때 최적의 두께는 8 μ m였으며, 가장 경도가 높은 IMC는 $FeAl_2$ (1000HV), Fe_2Al_5 (1100HV)로 확인되었다.

H. Badarinarayan 등⁵⁵⁾은 5754 Al합금의 마찰교반점용접시 툴의 솔더부와 핀부에 대하여 최적의 형태를 조사하였다. 오목한 솔더부는 편평하거나 볼록한 솔더부보다 정적 강도가 상승되었으며 삼각형 핀부는 실린더형 핀부보다 더 높은 정적 강도를 나타내었다. 또한 Shigeki Hirasawa 등⁵⁶⁾은 실린더형의 핀은 1500rpm으로 회전시 직경이 5mm, 길이가 1.5mm인 것을 제시하였으며, 강도향상을 위해서는 오목한 솔더부에 삼각형 핀으로 된 툴을 제시하였다.

2.8 브레이징

지금까지 브레이징판의 제조에 롤 접합, 용사법, 주조법 등을 적용하여 왔으나 이들에 대한 장단점을 비교 분석하여 최적의 제조기술의 확립이 필요하다⁷⁾. 특히

플럭스를 사용하지 않고 진공이 아닌 가스분위기에서 브레이징할 수 있는 기술이 필요하다. 플럭스의 높은 가격과 취급의 불편으로 인하여 플럭스 양을 감소시킬 수 있는 접합방법의 개발연구에 주력하고 있다⁵⁷⁾. 최근 자동차의 경량화를 위하여 열교환기의 각 부재를 얇게 하고, 브레이징 시트의 브레이징 후의 강도, 내식성을 더욱 향상시키는 연구가 필요하다⁵⁸⁾.

불활성가스 분위기 중에서 플럭스를 사용하지 않고 알루미늄-실리콘 용가재를 사용하여 브레이징판을 접합할 수 있는 기술이 독일 Aleris Aluminium Koblenz GmbH⁵⁷⁾에 의해 개발되었는데, 이 방법은 작업의 용이하고 제조원가를 절감할 수 있으며 특히 열교환기 등을 공업적으로 대량 생산하는데 응용할 수 있다.

불활성가스 분위기 중에서 플럭스를 사용하지 않고 브레이징기술을 개발한 특허로서 유럽특허 EP-1430988, EP-1306207, US특허 No.4,908, 184, 2004/0028940-A1 등이 있다. 주로 플럭스를 줄이는 방법으로 Mg을 2.0wt.% 이하로 첨가하거나 Si, Bi, Cu, Si, Zr, Cr, Mn 등을 1종 이상 소량으로 첨가한 용가재를 개발하여 접합성능의 개선에 주력하고 있다.

Aleris Aluminium Koblenz GmbH^{59,60)}에서는 ① Al-Mn계 코어합금을 주조, ② 균질화, ③ Al-Si계 브레이징합금으로 코어알루미늄합금을 클래딩, ④ 열간과 냉간압연, ⑤ 재결정 어닐링, ⑥ 변형경화 및 최종 어닐링 단계를 거쳐, 코어관통에 대한 낮은 감수성과 양호한 성형성을 지닌 최종 평균입경이 약 60 μ m 미만인 알루미늄합금 브레이징판의 제조기술을 확립하였다.

고가의 진공 솔더링 장치를 사용하지 않고서도 플럭스리스 금속 부품을 브레이징 함으로써 고품질의 솔더점을 달성할 수 접합기술을 Hydro Aluminium Deutschland GmbH⁷⁸⁾에 의해 개발되었다.

일본 Furukawa-Sky Aluminium Corp.에서는 희생 양극재-심재-중간재-브레이징 필러금속을 클래드한 알루미늄합금 브레이징 시트^{58,79)}를 개발하였는데, 심재, 중간재 및 희생 양극재 중에 존재하는 구(球)에 상당하는 입자지름이 0.1 μ m 이하인 금속간 화합물의 갯수 밀도를 크게 증가시킨 알루미늄합금 브레이징 시트에 대한 제조기술을 확립하였다.

향후 대량 생산을 위한 브레이징 공정기술은 초경량, 초소형, 고효율, 내식성이 요구되는 방향으로 추진되어 나가야 한다. 구체적으로 ① 동종뿐만 아니라 이종금속 간에도 접합이 가능, ② 원가절감 및 다양한 부품의 설계가 가능, ③ 강한 접합강도, ④ 미려하고 정교한 접합부 생성을 요구, ⑤ 세척성, 기밀성, 내부식성 등에 대한 다양한 특성, ⑥ 자동차를 통한 대량생산이 가능해야 한다⁵⁷⁾.

2.9 전자빔 용접

Hidetoshi Fujii 등⁶¹⁾은 전자빔 용접시 알루미늄합금에서 용융지에서부터 방출되지 못한 버블(bubble)이 응고과정 중에 붙잡혀 $4Al(l) + Al_2O_3(s) = 3Al_2O(g)$ 에 의해 기포가 발생되는데, ① 응고시 용융지 내에서 용해된 원소들의 용해도의 감소, ② 화학적인 반응, ③ 키홀 현상, ④ 높은 증기압으로 인한 원소의 증발, ⑤ 루트부에서 포획된 가스, ⑥ 보호가스의 물리적 트랩핑에 의해 기포가 발생한다고 밝히고 있다.

아크에 의한 고전류 밀도(예를 들면, 종래의 가스급속 아크용접의 150amp.와 비교하여 350amp.)를 이용한 접합방법은 겹치기 침투 접합의 가스급속 매립 아크 용접에 직접 적용할 수 있다. 또한 전자빔 용접뿐만 아니라 레이저빔 혹은 플라즈마용접으로도 적용할 수 있다⁶²⁾.

미국 Alcoa Inc.⁶²⁾에서는 접합 표면으로부터 표면 산화물을 음극 방식으로 제거할 수 없는 경우와 제한된 침투 및 불충분한 계면 깊이를 극복하기 위하여, 가스급속 매립 아크(GMBA) 용접 방법을 이용한 연속적인 또는 간헐적인 겹치기 침투 전자빔접합기술을 확립하였다.

전자빔 용접부에 발생하는 고온균열의 생성원인은 주로 Cu, Si, Mg, Zn과 같은 합금성분이 알루미늄합금의 결정립계에 편석이 된 것으로 밝히고 있다⁶³⁾.

2.10 초음파 용접

초음파 용접은 저항 점용접이나 마찰교반 점용접에 비하여 용접당 에너지가 매우 적다^{64,65)}. 용접시간은 마찰교반 점용접에 비하여 대단히 짧고 저항 점용접과 거의 비슷한 수준으로 짧은 편이다.

독일 Schunk Sonosystems GMBH⁶⁷⁾에서는 알루미늄 와이어로 된 연선들을 금속으로 이루어진 U형 캐리어와 초음파 용접에 의해 도전 접속하는 방법을 개발하였다.

미국 U.I.T., L.L.C.^{68,69)}에서는 고출력의 부드러운 초음파 충격을 응용 제어함으로써 접합을 강화하고 합금깊이를 증가시켜 금속의 성능을 개선 및 강화하고 열화를 억제하는 새로운 다기능적 방법을 제시하였다. 소규모, 대규모 및 대량생산을 가능하게 하였으며 특히 불활성가스 브레이징에 의한 자왜 변환기, 진동시스템 및 공구의 제조에 신뢰성을 향상시켰다⁷⁾.

미국 U.I.T., L.L.C.^{70,71)}에서는 용접부의 초음파 충격처리 기술을 개발하였는데, 초음파충격처리에 의해 압축응력 영역을 생성시키고 적어도 약 50 μ m의 깊이까지의 백색층 및 비정질 조직을 형성시킴으로써 가변하중

에서 최대 약 2.5배만큼의 부식-피로 강도의 증가 및 부식 환경에서의 최대 약 20배의 수명 증가를 꾀하였다.

미국 Utah State 대학 항공우주학과^{73,74)}에서는 Al 3003, Ni 201 및 Cu에 대해서 동종과 이종거리 초음파 압밀법(ultrasonic consolidation)에 의한 접합방법을 개발하였다. 그리고 Al 3003/SiC/Al 3003과 Al 3003/SiC/Cu 복합재료에 대해 접합을 시도하였다⁷³⁾. 영국 Loughborough 대학⁷²⁾에서는 Al 1050 모재 판에 Al3003을 접합하기 위하여 초음파 압밀법을 개발하였다. 여기에서 표면산화물 층의 제거가 계면접합에 가장 중요한 역할을 하고 있음을 확인하였다.

영국 Manchester대학⁶⁴⁾에서는 기존의 저항점용접 에너지에 비해 2% 이하의 에너지로 용접할 수 있는 고전력 초음파용접(HP-USW) 방법을 개발하였으며, 일본 Toyama Prefectural대학⁷⁵⁾에서는 알루미늄과 구리에 대하여 수중에서 초음파 용접을 하여 용접열영향부에 미세한 결정립을 얻었으며, 경도향상을 가져오게 하였다.

2.11 리벳팅

지금까지 리벳팅은 일반적으로 냉간 기계가공으로 경화되거나 또는 침전 경화된 알루미늄 합금과 같은 강성대 중량비가 높은 재료로 적용되어 왔다. 그러나 강성대 알루미늄 합금은 리벳을 제조 및 설치하는 도중에 필요한 성형성이 부족하여 네킹, 균열 또는 테어링이 발생하므로 이에 대비한 재료의 개발도 시도되고 있다⁷⁶⁾.

미국 Boeing Co.⁷⁶⁾에서는 먼저 소재 내에 3~5 μ m 크기의 정제된 입자 구조를 갖는 영역을 형성시킨 다음 리벳을 형성시키는 접합기술을 확보하였다. 이러한 정제된 입자 구조로 인하여 성형성, 강성, 인성, 내구성, 내부식성, 및 내피로성과 같은 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 특히 리벳의 성형성이 향상됨으로써 리벳을 제조 및 설치하는 도중에 균열이 형성되어 퍼지는 현상이 감소되는 장점이 있다.

리벳을 제조 및 설치하는 도중에 불량을 억제하기 위해서는 높은 성형성을 유지하여야 하며 리벳 및 얻어진 구조 어셈블리의 제조비용이 증가되지 않도록 비용 효율적이어야 한다. 또한, 리벳은 강성대 중량비가 높고, 피로 및 부식에 대한 내성이 높을 뿐만 아니라 열응력에 대한 내성을 가진 재료로 형성되어야 한다.

자동차 차체에 사용되고 있는 리벳접합 중에는 셀프 피어싱 리벳이 개발되어 있는데, 피접합재에 원통형의 리벳을 두들겨 넣어 다리를 넓혀 체결하도록 하는 방법이다. 향후 접합강도의 향상 이외에도 전위차에 의한 부식의 발생 등을 고려한 최신 리벳팅기술의 개발이 요구된다.

3. 알루미늄합금의 주요 접합기술동향 및 향후 기술전망

3.1 알루미늄합금과 이종재료와의 접합기술

알루미늄합금과 구리, 철강, 스테인리스강, 니켈 및 마그네슘과 같은 이종재료와의 접합기술이 활발히 시도되고 있다.

알루미늄합금과 이종재료와의 접합시 고품질, 고정밀, 고속도에 초점을 맞추고 있으며, 고속용접으로 인하여 수지상간격이 좁고 열영향부와 열변형을 적게 하여 기계적 성질을 향상시키는 연구도 추진되고 있다.

3.2 고온균열 방지 및 기공 발생 억제기술

MIG토치에 다양한 소모성 용가재를 사용하고 불활성가스를 방출시켜 입열량을 감소시키고 용접열영향부의 폭을 줄여 고온균열을 방지하고 있다. 또한 용접부에 발생하는 기공의 발생을 억제하기 위하여, ① 밀폐된 용접박스 내에서 예열하고 교류전류의 TIG를 이용하여, 아르곤과 헬륨이 혼합된 불활성가스를 방출시키거나 ② 교류아크의 주파수를 초음파영역으로 하여 용접하는 기술이 개발되고 있다.

최근 알루미늄합금재질의 TFT-LCD용 서셉터의 접합에 접합부의 누설이 없고 세라믹 코팅시 발생하는 미소균열 및 미립자의 발생을 최소화할 수 있는 마찰교반접합기술이 연구되고 있다.

3.3 금속간화합물 형성의 억제기술

알루미늄과 철강의 접합시 계면에 $FeAl_3$ 혹은 Fe_2Al_5 와 같은 취약한 Al-Fe계 금속간화합물의 형성을 $1\mu m$ 정도 이하로 억제시켜 접합강도를 향상시키는 접합기술을 확립해 나가고 있다. 이 방법은 MIG, TIG, 플럭스 코어드 아크용접, 레이저용접과 같은 용융용접에도 입열량을 억제하는 연구가 진행되고 있다. 또한 금속간화합물의 입자크기를 최대한 줄이고 재결정립경($25\mu m$ 이하)과 용접부 기공발생도를 감소시킨 알루미늄합금 브레이징 시트에 대한 연구도 추진되고 있으며, 또한 브레이징시 금속간화합물이 형성되기 어려운 은납의 이용 기술도 시도되고 있다.

3.4 초음파 이용기술

용접부의 초음파 충격처리로 인하여 백색층 및 비정질 조직을 형성시켜 강도 및 내부식성을 크게 향상시킬 수 있는 접합기술이 개발되고 있다. 또한 고출력의 부

드러운 초음파 충격을 응용 제어함으로써 접합을 강화하고 합금깊이를 증가시켜 금속의 성능을 개선, 강화하고 열화를 억제하는 새로운 다기능적 방법이 제시되어 대량생산, 소규모 혹은 대규모 생산을 가능하게 하고 있다.

특히 초음파 압밀법(consolidation)에 의한 접합기술이 확립되고 있으며, 기존의 저항점용접 에너지에 비해 2% 이하의 에너지로 용접할 수 있는 고전력 초음파 용접(HP-USW) 방법이 개발되고 있다.

3.5 보호가스의 성분, 유량 조절기술

아크용접시 아르곤 보호가스 중에 O_2 가스와 헬륨가스를 혼합하여 사용하여 아크를 안정화시키고 있다. 경제성을 고려하여 값비싼 헬륨량을 줄이기 위해서 가스유동속도를 최대한 낮추고 있으며, 고가의 진공 솔더링 장치를 사용하지 않고 불활성 가스 분위기에서 플럭스리스 금속 부품을 브레이징 할 수 있는 제조기술을 확립하고 있다.

3.6 저입열 용접기술

아크용접시 저입열을 시도하여 아크발생성 개선, 스파터의 저감화, 고속 용접화, 용입의 안정화, 박판용 극저전류의 안정화 및 교류필스에서의 용입기술을 확보해 나가고 있다. 저항점용접이나 마찰교반용접에 비해 입열량 및 용접당 에너지가 적은 초음파 용접기술이 확대되고 있다.

후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

참 고 문 헌

1. Joining method of dissimilar material, Korean unexamined patent, KR10-2008-0061402, Kobe Seikosyo (in Korean)
2. T. Murakami, K. Nakata, H. Tong, M. Ushio : ISIJ Int. **43-10** (2003), 1596~16022
3. M. Staubach, S. Jutter, U. Fussel, M. Dietrich, : Weld. Cutt. **7-1** (2008), 30~38
4. Seong-Jong Kim : Development of welding technology using robot for dissimilar aluminium alloys, Mokpo National Maritime University (2009) 1~119, (in Korean)
5. A fusion welding process to join aluminium and

- titanium, WO2010/003595, (2010), 1~29
6. Recent fusion welding technology of aluminium alloy, *Journal of Light Metal Welding* **46-8** (2008) 352~357, (in Japanese)
 7. Muraue, Nakada et al : *ISIJ*, **43-10** (2003) 1596, (in Japanese)
 8. Lee, Kumai, Ishikawa, Furuya : *ICAA10-2006* (Vancouver), (2006), 1119
 9. Welding electrodes having a flux containing a lithium aluminium alloy and method of manufacturing a welding electrode, WO2010/046769, (2010), 1~18
 10. flux cored wire for dissimilar joining, Korean unexamined patent KR10-2008-0087034, Kobe Seikosyo (in Korean)
 11. MIG welded joint between aluminium and steel members and MIG welding process, EP1,964,637 A2, (2008), Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.
 12. Hyeong-Zu Kim, Dae-Man Kim : Study on the porosity in Al 6061 MIG weldments, *The Korean Welding & Joining Society* (2004), 5월, 179~181 (in Korean)
 13. Eagle Services Asia Private Limited, Singapore. Method of and system for AC TIG welding of aluminium aircraft engine components, EP2,161,093, (2008)
 14. Gas composition for arc welding, Korean unexamined patent, KR10-2005-0105515, Praxair Technology Inc. (in Korean)
 15. Honggang Dong : Arc joining of aluminum alloy to stainless steel with flux-cored Zn-based filler metal, *Materials Science and Engineering A527* (2010), 7151~7154
 16. S.B. Lin : Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal, *Materials and Design* **31**, (2010), 2637-2642
 17. Sang-Fil Kim, Tae-Min Hong : Study on the resistance spot welding of aluminium alloy(1) **12-4**, (1994), 475~488 (in Korean)
 18. Joining method and its structure of dissimilar metal, Korean unexamined patent KR10-2008-0089246 (in Korean)
 19. Aluminium alloy with good press formability and continuous resistance spot weldability, Korean unexamined patent: KR10-2005-0118299 Nippon Light Metal Co. (in Korean)
 20. Ranfeng Qiu : Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels, *Materials and Design* **30**, 2009, 3686~3689
 21. Ranfeng Qiu : Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate *Journal of Materials Processing Technology* **209** (2009), 4186 ~ 4193
 22. J. Zhou, H.L. Tsai : Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding *International Journal of Heat and Mass Transfer* **51** (2008), 4353~4366
 23. Aluminium alloy plate with good laser weldability for battery case cover, Korean unexamined patent KR10-2009-0023081, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd. (in Korean)
 24. Aluminium alloy plate with good laser weldability, Korean unexamined patent KR10-2009-0023081, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd. (in Korean)
 25. Aluminium alloy and battery case for pulse laser welding, Korean patent KR10-2010-0083854, Kobe Seikosyo. (in Korean)
 26. CHEN Shu-hai : Si diffusion behavior during laser welding - brazing of Al alloy and Ti alloy with Al-12Si filler wire, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **20** (2010), 64~70
 27. laser welding method using laserbeam vibration, Korean unexamined patent, KR10-2005-0023271, USA, Alcoa Inc. (in Korean)
 28. Koyama et al. : *Welding Technology* Vol. **55-6**, (2007), 91 (in Japanese)
 29. Suzuki et al. : *The Japan Welding Society* **81** (2007-9), 306, (in Japanese)
 30. *The Japan Welding Society* **21-1** (2003), 101, (in Japanese)
 31. Aluminium alloy plate for battery case, Korean unexamined patent: KR10-2009-0020458, Nippon Light Metal Co. (in Korean)
 32. O. Hatamleh : Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints, *International Journal of Fatigue* **29** (2007), 421~434
 33. O. Hatamleh : Effects of peening on mechanical properties in friction stir welded 2195 aluminum alloy joints, *Materials Science and Engineering A492*, (2008), 168~176
 34. *INALCO-2007* (Osaka) (2007), 53
 35. *Journal of 62th Laser Society in Japan*, **62** (2004), 10 (in Japanese)
 36. G. Campana et al. : Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys, *Applied Surface Science* **255** (2009), 5588~5590
 37. Matsumoto et al. : *The Japan Welding Society* **79**, (2005), 306 (in Japanese)
 38. *Journal of Light Metal Welding*, **46-2** (2008), 43, (in Japanese)
 39. Kawakuzi et al. : *Journal of Light Metal Welding*, **42-2** (2004), 52 (in Japanese)
 40. Koglin : *Automotive Circle International*, Nov., (2002), 127
 41. Lawrentz, Graph : *Automotive Circle International*, Nov., (2002), 412
 42. *Journal of Light Metal Welding*, **45-2** (2007), 63 (in Japanese)
 43. G. Sierra : Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, *Material Characterization*

- 59 (2008), 1705~1715
44. CHEN Yan-bin : Joint performance of laser-TIG double-side welded 5A06 aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **19** (2009), 26~31
 45. Chang-Yong Lee, Seon-Kyu Kim : Properties of 7075 aluminium alloy by friction stir welding, *Proceeding of KWJS*, **42** (2004.05), 159~161 (in Korean)
 46. Manufacturing method of TFT-LCD Susceptor by friction stir welding, Korean patent, KR10-2007-0772131, Almaty Co., Ltd. (in Korean)
 47. TFT-LCD Susceptor by friction stir welding, Korean patent, KR20-2006-0430089, Almaty Co., Ltd. (in Korean)
 48. Friction stir welding machine and friction stir welding tool, EP1,882,543A1, (2008), Kawasaki Jukogyo
 49. Seong-Jong Kim : Weldability according to probe position and preventing of hydrogen embrittlement in leisure boatbuilding, Mokpo National Maritime University, (2010) 1~186 (in Korean)
 50. Automobile bumper assembly and manufacturing method using 7000series aluminium alloy, Korean unexamined patent: KR10-2009-0113934, Gogang Aluminium Co. (in Korean)
 51. *Journal of Light Metal Welding* **44** (2006), 560 (in Japanese)
 52. Danaka et al. : *Light Metal*, **56** (2006), 317 (in Japanese)
 53. Y. Tozaki et al. : A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance, *Journal of Materials Processing Technology* **210** (2010), 844~851
 54. S. Bozzi : Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds, *Materials Science and Engineering A527*, (2010), 4505~4509
 55. H. Badarinarayan : Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **49** (2009), 814~823
 56. Shigeki Hirasawa : Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method, *Journal of Materials Processing Technology* **210** (2010), 1455~1463
 57. Process for fluxless brazing of aluminium and brazing sheet for use therein, WO2010/052231, 2010, 1~19
 58. Manufacturing method of aluminium alloy for brazing sheet, Korean unexamined patent, KR10-2007-0061413, Furukawa-Sky Aluminium Corp. (in Korean)
 59. Manufacturing method of aluminium alloy for brazing sheet and assembly of a light brazing heat exchanger, Korean unexamined patent: KR10-2007-0094887 Aleris Aluminium Koblenz GMBH (in Korean)
 60. Brazing sheet products of aluminium alloy and its manufacturing method, Korean unexamined patent, KR10-2010-0028565 Aleris Aluminium Koblenz GMBH (in Korean)
 61. Hidetoshi Fujii et al. : Bubble formation in aluminium alloy during electron beam welding, *Journal of Materials Processing Technology* **155~156** (2004), 1252~1255
 62. GMBA welding method in lap penetration joint, Korean unexamined patent KR10-2007-0024584 Alcoa Incorporated (in Korean)
 63. Seong-Uk Kim, Kyeong-Min Kim : Aluminium alloy by electron beam welding, *Korean Society of Laser Processing*, **4-1** (2001) 179~181, (in Korean)
 64. D. Bakavos : Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet, *Materials Science and Engineering A527*, (2010), 6320~6334
 65. S. Elangovan, S. Semeer, K. Prakasan : Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding, *Journal of materials processing technology* **209** (2009), 1143~1150
 66. Secondary battery, Korean unexamined patent KR10-2004-0107115, Samsung SDI (in Korean)
 67. Connecting method of wrought wire and its ultrasonic welding equipment, KR10-2007-0772131, Shunk Sonosystems GMBH (in Korean)
 68. Improvement of metallic properties and preventing of the metallic defect by ultrasonic impact, Korean unexamined patent: KR10-2008-0050519 (in Korean)
 69. Vibration system and tools for ultrasonic impact, Korean unexamined patent: KR10-2008-0046196 (in Korean)
 70. New property of welding joint by ultrasonic impact treatment, Korean unexamined patent: KR10-2007-0086532, U.I.T., L.L.C. (in Korean)
 71. Improvement of properties and reliability of welded rail joint by ultrasonic impact treatment, Korean unexamined patent: KR10-2008-0032138, U.I.T., L.L.C. (in Korean)
 72. R. J. Friel et al. : The effect of interface topography for Ultrasonic Consolidation of aluminium, *Materials Science and Engineering A527*, (2010), 4474~4483
 73. Y. Yang et al. : Bond formation and fiber embedment during ultrasonic consolidation, *Journal of Materials Processing Technology* **209** (2009), 4915~4924
 74. Keong-Don Lee : 3 dimensional laser welding and system technologies for frame structure, *Institute for Advanced Engineering* (2002), 1~175, (in Korean)
 75. Shin-ichi Matsuoka : Direct welding of different metals used ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology* **209** (2009), 954~960
 76. Manufacturing method of rivet with a good stiffness

and formability, Korean unexamined patent: KR10-2004-0029419 The Boeing Co. (in Korean)

77. G. D. Janaki Ram : Effect of Process Parameters on Bond Formation During Ultrasonic Consolidation of Aluminum Alloy 3003, Journal of Manufacturing Systems **25-3** (2006), 221~238

78. fluxless brazing, Korean unexamined patent, KR10-2008-0084817, Hydro Aluminium Deutch-land GMBH (in Korean)

79. Aluminium alloy for brazing sheet, Korean unexamined patent, KR10-2007-0061410, Furukawa-Sky Aluminium Corp. (in Korean)



- 유호천
- 1951년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접야금, 용접공정, 재료공학
- e-mail : yooho278@reseat.re.kr



- 김환태
- 1952년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접공학, 재료공학
- e-mail : htkimm@reseat.re.kr