

特輯 : 특수재료의 접합 및 접합에 의한 재료의 복합화

강/비철금속 이종금속 간의 용접 및 접합

박화순 · 김우열 · 강정운

Welding and Bonding of Dissimilar Metal Steel/Nonferros Metal

Hwa-Soon Park, Woo-Yeol Kim and Chung-Yun Kang



박화순/부경대학교/
1955년생/열원의 응용
에 의한 재료의 표면개
질 및 전자기기의 마이
크로 솔더링



김우열/부경대학교/
1946년생/브레이징,
솔더링 삽입금속의 개
발, 열교환기 제조분
야



강정운/부산대학교/
1953년생/접합공학 및
용접야금

1. 서 언

항공기, 우주산업, 전자기기, 저온기기 등 첨단 산업분야에는 고품질, 고기능성을 가지면서, 가격면에서 유리한 제품 생산기술이 요구되고 있다. 이에 부응하여 신소재에 대한 관심이 고조되고 있지만, 신소재가 개발되더라도 신뢰성 측면에서 많은 문제점을 갖고 있기 때문에 실제 적용에는 문제가 많다. 그러나 이미 개발된 합금을 조합하여 복합화한다면 단일재료에서 얻을 수 없는 경제성과 가능성을 얻을 수 있다는 장점 때문에 최근에 복합재료 제조 방법 중에서도 실용성이 가장 좋은 접합법에 대한 관심이 많아지고 있다.

이종재료 간의 접합기술은 오래 전부터 일상생활 용품에 이용되어 왔고, 주로 육성용접 혹은 브레이징 기술이 많이 이용되어 왔다. 용접 및 접합 기술과 재료의 발달과 더불어 복합화 기술도 더욱 발전되고 있다. 그러나 모든 이종재료 간의 용접 및 접합이 가능하다고는 말할 수 없고, 용접 차에 따라서 불가능한 조합이 있으며, 계면에 취약한 생성상이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균

열이 발생하는 등으로 인하여 양호한 성능을 얻을 수 없다는 문제가 있다.

여기서는 이종금속 간의 용접 및 접합 시에 발생할 수 있는 문제점과 그 해결책 및 적용예에 등에 대해서 기술하고자. 접합방법으로서는 용융용접 및 확산용접만을 대상으로 한다.

2. 용융용접에 의한 이종금속의 복합화

2.1 일반적인 문제점

2.1.1 물성 차이에서 생기는 문제점과 해결 방안¹⁾

물리적, 화학적, 기계적인 성질이 다른 금속을 접합하는 경우, 용접 중 혹은 용접 후에 문제가 발생할 경우가 많다. 특히 우수한 성능을 갖는 접합부를 얻기 위해서는 모재 및 용가재의 합금 설계, 용접방법, 이음부의 설계, 열처리 등에 대한 충분한 검토가 있어야 할 것이다.

이종금속 간의 용융용접시, 두 금속의 용접, 열전도도, 열팽창계수 등에 대한 조사로부터 용접시

에 문제가 발생할 것인지, 아니면 불가능한지를 대략적으로 예측이 가능하다. 여기서는 일반적으로 많이 사용되는 강을 중심으로 다른 금속과 용접한 경우에 대해서 생각하여 보기로 한다.

가장 기본적인 것은 두 금속의 용점 차이이고, 두 금속의 용점 차가 100℃ 이내에 있으면 통상적인 용융용접이 가능하지만, 용점 차가 이보다 큰 경우에는 용융용접이 어렵고, 브레이징이나 고상화산접합으로 접합하여야만 만족한 결과를 얻을 수 있다. 표 1은 탄소강과 각종 금속과의 용점 및 물리 상수를 비교한 것이다. 예를 들면 표 1¹⁾로부터 알루미늄과 탄소강의 용점이 곤란하다는 것을 알 수가 있다. 특히 용점 차가 큰 경우에는 용접부에 균열이 발생하기 쉽다. 즉 용고 시에 용점 차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 이것은 고용점 측의 모재에 중간의 용점을 가지는 용가재를 피복하여 용접하면 해결 가능하다.

표 1. 탄소강과 다른 금속과의 용점 및 물성 비교

재료 성질	탄소강	알루 미늄	동	티탄	오오스트나이트 스테인레스강	70Ni- 30Cu	76Ni- 16Cr- 8Fe
선팽창 계수	1.0	2.1	1.5	0.7	1.4	1.2	1.0
열전 도도	1.0	3.1	5.9	2.4	0.7	0.4	0.2
비열	1.0	1.9	0.8	1.2	1.0	1.1	0.9
비중	1.0	0.3	1.1	0.6	1.0	1.1	1.1
용점	1.0	0.4	0.7	1.1	0.9	0.9	0.9

다음으로 열전도의 차를 생각할 수 있다. 열전도가 차가 큰 경우에는 용접 열원을 열전도도가 높은 모재 쪽에 가깝게 하여 열적 균형을 맞추는 것이 바람직하다. 또한 열전도도가 높은 모재를 예열하게 되면 열적균형이 이루어져 용입을 균일하게 할 수 있다. 동시에 용접금속이나 HAZ의 서냉 효과, 입열량의 감소 효과가 있다.

열팽창계수의 차는 접합부의 균열과 관련된다. 냉각시에 인접한 금속 끼리의 열팽창계수가 큰 경우, 한 쪽은 인장응력, 다른 쪽은 압축응력이 작용하게 된다. 인장응력을 받은 금속은 용접 중에 고온균열이 발생하기 쉽다. 열적, 기계적으로 응력을 이완시키지 않는 한 사용 중에 저온균열을 일으

키기 쉽다. 두 금속이 접한 HAZ에서 응력은 다음 식으로 추정할 수 있다.

$$\delta = E + \Delta \alpha + \Delta T$$

여기서 E는 금속의 영율, $\Delta \alpha$ 는 금속의 선팽창계수의 차이이다. 용접금속의 열팽창계수는 두 금속의 회석에 의해 증가하거나 감소한다. 예를 들면 순 Ni를 대상으로 Cu로 회석한 경우 열팽창계수는 증가하지만, Fe, Cr, Mo 등으로 회석될 경우는 감소한다.

2.1.2 모재와 용접금속의 상호작용 문제

용접금속에서는 용융된 모재와 용가재가 회석되어 새로운 상이 생길 가능성이 높고, 계면에서는 고상인 모재와 용가재가 반응하여 액화현상이나, 반응층의 형성 등의 다양한 현상이 발생한다. 용접금속의 경우, Cu와 Ni합금과 같이 전율고용체를 형성하는 합금에서는 큰 문제 없이 용접이 가능하다. 그러나, 복잡한 상이나, 금속간화합물이 형성되는 경우에는 문제가 되고, 양호한 용접부를 얻기 위해서는 적절한 용가재를 선택하여야 한다.

또한 용접금속의 조성은 일반적으로 균일하지 않고, 특히 다층용접하는 경우에는 조성적 불균일을 일으키기 쉽고, 모재와 인접한 부분에는 조성적 농도구배가 일어나기 쉽다. 이것은 용접 용고 균열이나 고온균열을 일으키는 원인이 된다. 실제 용접에서 용접금속은 연성이 양호하고, 균열감수성이 없는 조직을 얻어야 하고, 강도도 저강도 측의 모재와 동등 이상이어야 한다. 이것은 모재의 용입량으로부터 정성적으로 파악할 수 있다.

HAZ의 입계에 액상인 용접금속이 침투하여 입계균열이 일어나는 경우가 있다. 소위 액화균열로서, Cu가 많은 용접금속에서 일어난다. 용접 중에 탄소강의 입계에 Cu가 침투하여 입계균열을 일으킨다. 침투 정도는 모재의 예열이나 인장응력 등에 의해 크게 좌우된다.

이음부의 설계 시 각 모재, 용가재의 용융특성과 동시에 회석의 영향을 고려하여야 한다. 개선을 크게 하면 용융금속의 아크 조절을 쉽게 할 수 있다. 회석이 부적당하면 주기적으로 응력을 받는 용도에 사용되는 부품은 사용 중 문제가 발생할 소지가 많다.

2.2 강과 비철금속과의 용접 시 문제점

2.2.1 강과 동 의 용접²⁾

동, 동합금과 탄소강과의 용접은 육성용접, 크레드용접 등이 있지만, 여기에 사용되는 재료에는 주로 Cu-Al계, Cu-Ni계의 두 종류가 있다. 여기서는 이 두 합금과 강과의 용접시 발생하는 기술적인 문제점과 대책을 살펴 보고자 한다.

Fe-Cu 2원계 상태도에서 보면, Fe와 Cu는 서로 거의 고용하지 않는 것을 볼 수 있다. 강의 회석에 의해서 용접금속에 침입한 Fe는 석출상으로 편석하고, 이와 더불어 강에서 용입된 탄소는 Fe 중에 농축되어 Fe₃C를 형성한다. 이 세멘타이트는 대단히 경하므로 용접부의 저항성, 내식성 등을 저하시킨다. 또한 용접부 근방의 강 쪽의 입계에 용융동이 침투하는 현상이 일어나는 액화균열이 일어나기 쉽고, 사용 중에 피로파괴의 기점이 되는 등 강도 저하의 원인이 된다.

Cu-Ni합금과 탄소강의 용접에서도 앞에서 같이 용접금속에 Fe₃C가 편석하기 쉽다. Cu-Ni합금의 육성용접시 Ni함유량이 많은 모넬 혹은 Ni로 초층을 용접하고 Cu-Ni로 육성용접하면 액화균열을 방지할 수 있다.

동합금과 탄소강의 용접에는 피복아크용접과 TIG용접이 많이 사용된다. 피복아크용접은 아크

가 불안정하기 때문에 TIG용접을 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 전술한 용융동의 입계편석이나 용접금속 내에 Fe의 편석을 적게 하기 위하여 일반적으로 용입 깊이를 얇게 하는 TIG 혹은 자동 MIG 오시레이션 용접법을 사용하는 편이 좋다. Cu합금과 탄소강의 열전도도가 좋기 때문에 예열이 필요하고, 예열온도는 통상 100~200℃ 정도이다

2.2.2 강과 Al합금의 용접^{3,4)}

Al과 강과의 용접에서는 용접부의 경계에 취약한 금속간화합물층을 형성시키지 않는 용접법이 바람직하다. Fe-Al 2원계 상태도 상에서 보면 Al량이 약 33% 이하에서는 αFe(Fe₂Al) 단상이고, 약 62% 사이에서는 FeAl₂, Fe₂Al₅, FeAl₃의 금속간화합물이 출현한다. 전자빔 용접 결과에 의하면, Fe 중에 Al이 33~62%로 포함되면 상기와 같은 취약한 금속간화합물이 형성되어 용고 후 냉각에 따라서 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 Al량이 62%이상 혹은 33%이하에서는 균열이 발생하지 않는다. 이 영역을 안정 조성영역이라고 할 수 있다. 용접금속이 안정 조성영역으로 조정하였다 하더라도 모재와의 경계부의 천이영역에서는 완전히 균열을 방지할 수가 없다. 그래서 TIG, MIG 용접에서는 삼입금속을 사용거나, 이종금속

표 2. 강과 Al합금과의 용접으로 제조된 복합화 제품의 예

이종금속의 조합	용 접 방 법	용 도
탄소강/순Al	탄소강 표면을 저용점 금속인 Zn, Al 등으로 피복 브레이징	Al 제련 접극과 Al Bus Bar (최근, 폭발압접 이음부 사용)
용접구조용강/A5083	폭발용접	선박용 Transition 이음부
스테인레스강/Al	마찰용접	인쇄기용, copy기 roller
SUS304/Al/SUS304	열간압접 (압연)	clad판, 가정용기물
	열간압접 (press)	상동, (압력밥솥)
동	냉간압접	conector, lead 선
	마찰압접	conector
	마찰압접	transition 이음부
	Flesh butt 용접	"
	초음파 용접	"
	브레이징	도체 터미널
	동표면을 Zn, Al, Ag삼입금속 피복 후 브레이징	전극관 (Zn 정련) 의 접점
Laser 용접	콘덴서의 실린더	

표 3. Al/강 트랜지션 재료의 종류

조합 및 용도		용도	용접법
이종금속의 조합			
Al/steel	3033/Ti/steel 5083/Al/steel 1050/steel 3003/steel	선박용 선박용 Al 정련용 어선 냉동기용	폭발용접
Al/Ca	Al/Cu Al/Cu pipe	전극용 냉장고용	폭발용접 마찰용접 브레이징
Al/SUS	5083/1100/Ti/Ni/SUS304 1100/SUS304 pipe 1100/SUS304	극저온용 극저온용 박판 spot 용제용	폭발용접 마찰용접 열간압연

의 표면을 Al, Zn 등을 피복하여 용접하는 특수 공법이 필요하다.

표 2⁴⁾는 Al 혹은 Al합금과 이종금속과의 용접 예를 나타낸다. 가장 신뢰성이 있는 용접법으로는 미리 Al과 강과 접합된 트랜지션을 사용하여 Al/Al/강/강의 구조로 용접하는 것이다. 이 트랜지션 재료의 제조에는 주로 폭발용접, 마찰용접 등이 사용되고 있다. 표 3⁵⁾은 이미 사용되고 있는 트랜지션 재료의 종류와 접합 방법을 나타내고 있다. 용접은 통상의 TIG 및 MIG 용접과 거의 같은 요령으로 접합이 가능하다. 후판 용접의 경우 트랜지션 재료를 사용하면 동종금속 간의 용접과 같기 때문에 널리 사용되고 있다. 한편, 취약한 금속간 화합물의 생성을 억제하기 위해서는 이종금속 표면에 적당한 금속으로 피복하고, 이종금속을 거의 용융시키지 않게 주의하면서 피복금속과 접합하는 소위 브레이즈 용접법이 널리 사용되고 있다. 이때 사용되는 피복금속으로는 Sn, Zn 등의 저융점 금속, 브레이징용 삽입금속, 순 Al판, Al 합금판 등이고, 제조법으로는 전기도금, 용융도금, 브레이징, 육성용접 등이고, 두께는 20 μ m에서 수mm이다. 이 피복금속의 종류, 두께, 피복방법에 따른 접합부의 강도의 영향에 대한 여러 보고가 있으나 서로 일치하지 않고 있다.

그림 1⁶⁾은 Al/강 용접이음부의 강도에 미치는 합금층의 영향을 표시한 것이다. 이것으로부터 합금층의 두께가 증가할수록 급격히 저하하는 것을 볼 수 있다. 결국 합금층과 강도는 밀접한 관련이 있다는 것을 시사한다. 또한 Al과 강의 접합부의

경우 전극전위가 다르므로 전해질 하에서 부식의 영향이 크게 나타날 가능성이 많기 때문에 가능한 한 부식환경에서 사용되는 제품일 경우 유기 피막으로 피복하는 것이 바람직하다.

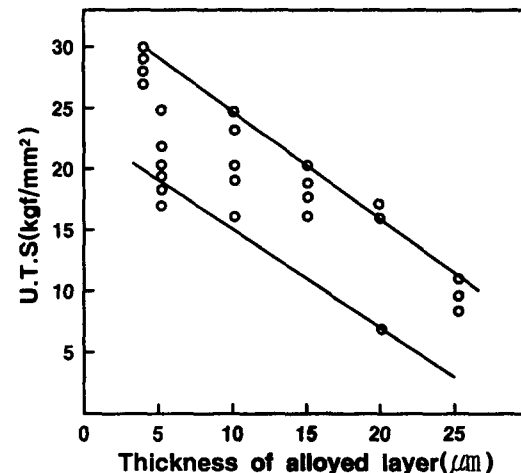


그림 1. Al/강 용접이음부의 강도에 미치는 합금층의 영향

한편 전자빔 용접과 Laser빔 용접은 에너지밀도가 높고, 열원이 아주 가늘고, 더우기 위치를 자유롭게 이동이 가능하다는 특징 때문에 이종금속간에 접합에 가장 유력한 접합법이라고 생각된다. 표 4⁷⁾는 및 표 5⁸⁾는 Al에 대한 타 금속과의 용접성을 나타낸 것이다. 전자빔 용접은 모재 근방의 천

이영역에서 균열 등의 실용상의 문제가 많다. Laser빔 용접은 Al의 반사율이 높고, 기공의 문제 때문에 아주 우수한 접합이음부를 얻을 수 없다는 것이 문제이다.

표 4. Al합금과 이종금속과의 전자빔 용접성

Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb
5	2	5	5	5	2	5	2	5	5	5
Ni	Pb	Pr	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr	
5	2	5	4	2	5	5	5	5	5	

1. 문제없음 2. 가능 3.가능성 있음
4. 곤란 5. 불가능

표 5. Al합금과 이종금속과의 레이저빔 용접성

Ag	Au	Be	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni
F	F	P	F	P	F	F	F	P	F
Pd	Pt	Ta	Ti	W	Zn	Cd	Pb	Sn	
P	P	P	F	P	-	-	-	-	

E : 아주 우수 C : 양호 F : 약간 양호
P : 불량 - : Data 없음

2.2.3 강과 Ti합금의 용접⁹⁾

Ti은 Fe, Cr, Ni, Mn, C 등과는 취약한 고용체 혹은 금속간화합물을 만들기 때문에 Ti과 강과의 용융용접은 거의 불가능하다고 생각하여도 좋다. 전자빔 용접의 경우도 초정도로 형성되는 ε상과 η상은 화합물이 아주 취약하므로 균열이 발생하기 쉽다. 한편 Ag을 삼입금속으로 사용하고, 빔을 Fe 쪽으로 기울여 Ti의 용융량을 적게 하는 경우에는 30kgf/mm² 정도의 강도를 얻을 수 있다고 보고되고 있으나 실시공에 사용하기는 어려운 용접 방법이다.

또한 Ti과 이종금속과의 열팽창 차는 고온으로 반복가열을 받는 조건에서 사용되는 용접구조물에 치명적인 영향을 미친다.

3. 확산접합에 의한 이종금속의 접합

3.1 일반적인 고려할 사항

확산접합법은 피접합물을 용융시키지 않고, 모재가 큰 소성변형을 일으키지 않는 정도의 가압력으로 고상상태에서 접합하는 방법이다. 그림 2¹⁰⁾은 확산용접의 접합과정을 모식적으로 표시한 것이다. 접합과정은 다음의 3과정으로 대별할 수 있다.

(1) 고온 Creep 변형과정 : 가열과 가압에 의해 고온 Creep변형과 유사한 소성변형이 생겨 각종의 표면피막이 파괴되고 국부적으로 순수한 표면이 나타난다. 이 현상은 시간이 증가함에 따라 순수금속에 접촉하고 있는 면적이 증가하여 간다. 동시에 모재 상호간에 확산이동이 일어난다.

(2) 입계이동 및 Void의 소멸과정 : 미접촉부는 가늘고 긴 Void로 잔존하던 Void는 계면Energy적으로 안정되기 위해 구상화한다. 더욱 접합이 진행됨에 따라서 입계확산에 의해 Void는 점점 소실하고, 선상의 입계가 입계의 Energy를 보다 안정된 상태로 되도록 입계가 이동한다.

(3) 체확산에 의한 Void소실과정 : 입계가 이동하고, 체확산에 의해 Void가 거의 소실한다. 이 과정에서는 결정립의 성장이나 재결정현상이 생기는 경우가 많다. 각종 산화피막이나 표면피막은 일반적으로 고용하든가 미세화되고 모재에 분산한다. 그러나 이종금속간의 접합은 접합계면 근처에서 금속간화합물이 형성되는 경우가 많아 접합과정이 복잡하다.

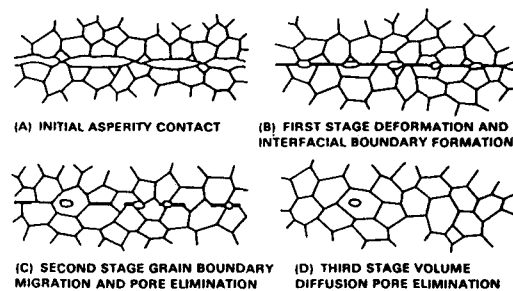


그림 2. 확산접합과정의 모식도

접합과정으로부터 알 수있는 것처럼, 건전한 이음부를 얻기 위해서는 순수 금속표면 상태를 유지하는 것이다. 금속의 표면은 그림 3¹¹⁾에 표시하는 것 처럼 복잡한 흡착층 등이 존재한다. 일반적으로 산화층을 제거하기 위해서 화학연마 혹은 기계

연마를 행한다. 이외에 바이트로 산화물을 제거하는 방법⁶⁾도 제안되고 있다. 또한, 아무리 정밀가공, 연마를 하여도 금속표면에는 적어도 몇 μm 단위의 요철이 존재하는 것이 보통이고, 이것은 원자 size로 보아 아주 큰 것이다. 보통은 약 $10\mu\text{m}$ 정도이다. 최적 평활도는 온도 및 압력에 따라 영향을 받는다. 접합면의 마무리 연마는 기계적 방법과 화학적 방법으로 대별할 수 있으나 대체로 기계적 마무리 가공이 양호한 결과가 얻어진다.

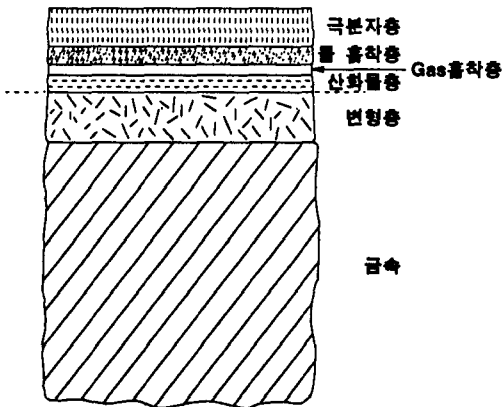


그림 3. 공업용 금속의 표면상태의 모식도

보통 확산접합은 불활성 gas 및 진공 분위기 중에서 행한다. 특수한 경우에는 수소와 같은 환원성 분위기 Gas를 사용하는 경우도 있다. 또한 접합면의 주위를 TIG나 MIG용접으로 shield하고 대기 중에서 가열, 가압하여 확산접합을 하여도 양호한 결과를 얻을 수 있다.

접합조건으로서는 접합온도, 가압력, 유지시간이 있고, 서로 상관관계를 가지고 있으므로 하나만을 제어하여서는 되지 않는다.

특히 다음과 같은 문제가 있을 경우나 목적으로 접합체 사이에 삽입금속을 넣는 경우가 많다. ① 낮은 온도에서 확산을 촉진하기 위해 ② 낮은 압력에서의 표면변형을 촉진하기 위해 ③ 금속간 화합물의 생성을 방지하기 위해 ④ 청정표면을 얻기 위해 사용된다.

삽입금속은 foil, 도금층, 증착층 등의 형태로 사용된다. 특히 이종금속간이나 고용점 재료 등의 접합에 많이 이용되고 또한 산화하기 쉬운 금속재료

의 접합에 많이 사용된다.

3.2 강과 비철금속과의 확산접합

3.2.1 강과 Al합금의 용접

Al과 스테인레스강과의 이음부는 저온장치, 원자력 산업 분야에서 널리 이용되고 있고 전자제품의 가열용기에도 적용되고 있다. Al과 스테인레스강의 확산접합에서는 다음과 같은 문제점이 있다.

(1) 양금속의 열팽창계수가 크게 다르기 때문에 가열함에 따라 접합면이 상대적으로 변형하여 접합을 방해한다. (2) Al 표면의 산화피막은 대단히 견고하고 열적으로 안정하고, 스테인레스강도 접합분위기가 낮은 경우 강고한 Cr산화피막이 형성되어 순수금속끼리의 접촉을 방해하고 확산도 방해하여 접합을 방해한다. (3) 아주 취약한 Al-Fe금속간 화합물상을 형성하기 쉽기 때문에, 접합온도, 접합시간을 제한할 필요가 있다. (4) 양금속의 경도가 다르기 때문에 응력 전달이 균일하지 않기 때문에 밀착성에 문제가 있다.

표 6¹²⁾에는 Al과 철과 이루는 금속간화합물의 성질을 나타낸다. 이 중에 FeAl_2 , Fe_2Al_5 가 접합면에 형성된다. 이 반응층이 약 10 μm 이상으로 되면 접합부의 강도가 현저하게 감소된다. 이 금속간화합물의 성장속도는 접합온도, 가압력 Al중의 합금 원소의 종류와 양에 의해 크게 변화된다. 예를들면 Mg은 0.47% 첨가하여도 성장속도가 현저히 증가하지만 Si은 8%, Cu는 3%까지 증가시켜도 순수 Al과 비교하여 그다지 성장속도가 증가하지 않는다. 그러나, 순Al을 사용하는 경우는 금속간화합물의 성장속도가 완만하고, 스테인레스강과 양호하여 확산접합이 가능하다.

표 6. Al-Fe합금의 금속간화합물 성질

화합물	Al 함유량 (%)	경도 (Hv)	밀도 (g/cm^3)	선팽창계수 ($1/^\circ\text{C}$)
Fe_3Al	13.9	250~350	6.67	14.6×10^{-6}
FeAl	32.6	400~520	5.37	18.9×10^{-6}
FeAl_2	49.1	1000~1050	4.36	17.9×10^{-6}
Fe_2Al_5	55.0	1000~1100	4.11	15.0×10^{-6}
FeAl_3	59.0	820~980	3.95	-
Fe_2Al_7	63.0	650~680	-	-

3.2.2 강과 Ti합금의 용접¹³⁾

Ti과 강과의 용융용접은 거의 불가능하기 때문에 확산접합에 대한 검토가 많이 이루어지고 있다. Ti-15%Mo-5%Zr 합금과 0.06%C의 연강과의 확산접합에 대한 연구결과에 의하면 삽입금속을 사용하지 않고, 접합온도 900 및 1000℃ 진공도 10^{-4} mmHg, 가압력 0.5Kgf/mm²의 조건으로 접합한 경우 접합강도는 25Kgf/mm²정도이다. 접합강도가 낮은 것은 FeTi 및 Fe₂Ti 금속간화합물 중에 TiC 및 ZrC가 석출하여 접합계면이 대단히 취약하기 때문이다.

한편 Ni을 삽입금속으로 사용하고 접합온도를 700℃ 및 800℃로 낮추어 접합한 경우 33~35Kgf/mm²정도 강도가 얻어진다. 이 경우 Ti과 Ni 계면에는 Ni₃Ti 및 NiTi₂ 금속간화합물이 형성되지만 취약하지 않기 때문에 접합강도가 높다. 또한 Ti과 탄소강(SM41B)과의 접합에서도 직접 접합한 경우에는 접합강도(전단강도)가 5Khf/mm² 정도 얻어지지만, Mo, Ni을 삽입금속으로 하여 확산접합한 경우는 약 17~23Kgf/mm² 정도의 값이 얻어진다.

이와같이 삽입금속을 활용하면 접합강도를 개선할 수 있다.

참고 문헌

1. AWS : Welding Handbook, 7th Edition, Vol. 2 他
2. 大田, 吉田 : 溶接技術, 1986, No.2, 36
3. 松田 : 溶接技術, 1974, No.11, 15
4. 今泉 : 輕金屬溶接, 22-7(1984), 12
5. 久保田 : 溶接技術, 22-1(1984), 40
6. 三菱電氣 : 技術資料, EBW-201.
7. 石川 : 溶接技術, 1982, No. 8
8. V. R. Ryabov&V. I. Yumatova : Auto. Weld. , 1966. 12.
9. 新 : 溶接冶金學, 丸善(1972), 291
10. 森井, 田 : 溶接技術, 1974, No.11, 20
11. 大橋 : 金屬, 1986, No. 5, 14
12. 橋本 : 日本金屬學會誌, 13-6(1974)
13. 圓城 : 高溫學會誌, 2-1(1983), 36