工學碩士 學位論文

Al 합금과 스테인리스강의 고상 확산접합성 연구

A Study on the Solid Diffusion Bonding of Al Alloy/STS Steel

指導敎授 金 永 植

2000年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

李 京 植

本 論文을 李 京 植의 工學碩士 學位論文으로 認准함

主　審 : 工學博士　李 成 烈　(인)

委　員 : 工學博士　金 允 海　(인)

委　員 : 工學博士　金 永 植　(인)

2000年　2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

李　　京　　植

목 차

A Study on the Solid Diffusion Bonding of Al Alloy/STS Steel

Kyoung-Sik Lee

Department of Materials Engineering

Graduate School

Korea Maritime University

Abstract

Microstructural analysis and tensile testing of directly diffusion-bonded joints of A6061(T6) to STS316L were conducted in order to evaluate the joinability of aluminum alloy to stainless steel. Diffusion bonding of A6061(T6)/ STS316L was carried out at 748 883K for 30min 150min applying 1 8 MPa in vacuum degree of 10-5 Torr.

SEM observation revealed that the reaction layer was formed at the A6061(T6)/STS316L interface. It was refered that the intermetallic compounds such as FeAl3, Fe2Al5 were identified in the reaction layer in the different literature. However, various intermetallic compounds which is not same as FeAl3, Fe2Al5 were founded in this experiment. It was explained that the reaction layer was formed by reciprocal action of reaction and diffusion. The tensile strength of A6061(T6)/ STS316L joints was risen up to about 140 MPa. The fracture modes shifted from the ductile fracture to the brittle fracture in reaction

layer with increasing of the temperature.

XRD analysis revealed that the fracture surface contains a large amount of Al elements in the temperature of 748 803K. It was identified that the fracture occurred at the A6061 side at this temperature. However, it was identified that the fracture occurred at the intermetallic compounds in the temperature above 813K.

Main conclusions are obtained as follows;

1. The most suitable bonding conditions which the tensile strength of the joints was risen up to 140 MPa were clarified to be the bonding temperature of 748 803K, the time of 90 150min, the pressure of 1 3 MPa and vacuum degree of 10-5 Torr.
2. In the temperature of 748 803K, tensile strength of the joints was increased by reciprocal action of reaction and diffusion with increasing of the temperature. However, in the temperature above 813K, tensile strength of the joints was decreased by excessive formation of brittle intermetallic compounds and by transmitting cracking due to thermal stress.
3. In the temperature of 748 803K, fracture occurred at the A6061 side in ductile fracture modes. However, in the temperature above 813K, fracture occurred at the interface in brittle fracture modes.
4. In the temperature of 748 803K, it seems that Fe, Cr, Ni and other elements of STS 316L side diffuses into A6061 side, therefore the tensile strength is risen by forming thin and

strongly combined reaction layer. However, in the temperature above 813K, it seems that the above elements diffuses excessively into A6061 side, therefore the tensile strength falls down by forming thick and brittle reaction layer and by inducing stress concentration at the intermetallic compounds inside of reaction layer in the interface.

1. 서 론

1.1 확산접합의 정의 및 원리

확산접합이란, 두 모재를 용융, 변형시키지 않는 범위 내의 적정한 가열, 가압 조건하에서 두 모재를 서로 밀착시켜, 접합 면 사이에 발생하는 원자의 확산을 이용하여 접합하는 방법이다. 즉 청정하고 평활 한 접합면 끼리를 결정의 격자상수(수 Å) 정도까지 접근시키면, 모재 각각에 들어있는 금속이온에 대해 자유전자의 공유화가 시작되고, 이로 인해 금속결합이 발생하여 접합되는 방법이다[1), 2), 4)].

확산접합의 종류에는 고상 확산접합과 액상확산접합(Transient Liquid Phase Diffusion Bonding, TLP법)의 두 종류로 크게 분류할 수 있다[1) 5)]. 먼저, 고상 확산접합의 경우, Insert metal을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우가 있다. 일반적으로, Insert 금속을 사용하지 않는 경우의 고상 확산접합법(직접 접합법)은 Fig. 1(a)에 나타낸 것처럼 다음과 같은 접합과정을 거쳐 접합이 이루어진다.

1) 고온 creep 변형과정 : 가열, 가압에 의해 고온 크리프 변형과 유사한 소성변형이 일어나, 각종의 표면피막이 파괴되고 국부적으로 순수한 금속표면끼리 접촉되어 밀착 면적이 증가하는 단계.
2) void 축소 및 입계 이동과정 : void가 계면에너지를 적게 하기 위해 구상화되면서, 입계 확산 및 표면 확산에 의해 void가 점점 축소 되고, 선상의 입계가 입계 에너지를 낮추기 위해 이동하기 시작하는 단계.
3) void 소멸과정 : 입계 이동이 활발히 일어나고, 체 확산에 의해 void가 거의 소멸하는 단계. 이 과정에서 결정립의 성장이나 재결정현상

이 일어나는 경우가 많다. 그리고 각종 산화피막이나 표면피막은 일반 적으로 고용 또는 미세화 되고 모재 속으로 분산된다.

이러한 접합방법은, 同種 금속의 접합에 주로 이용되는 방법이다.

다음으로, Insert metal을 사용하는 고상 확산접합법의 경우를 Fig. 1(b)에 나타내고 있다. 그림에서 보이는 것처럼, Insert metal이 고상 상태로 접합되는 방법이다. 이와 같은 방법은, 異種 금속이나 금속과 ceramics와의 접합에 주로 이용되는 방법이다. 그리고, 액상확산접합(TLP법)이라는 것은 Insert metal을 삽입하여, 이 Insert metal이 용융된 후, 확산을 이용해 등온 응고[5] 시켜 두 모재를 접합시키는 방법이다. 그 모식도를 Fig. 1(c)에 나타내고 있다. 이것은 Ni기 내열합금의 접합 등에 주로 이용되는 접합방법이다.

1.2 확산접합의 특징

확산접합법은 모재를 녹여 접합하는 용융 용접이나 다른 고상접합(냉간 및 열간 압접, 마찰 압접)에는 없는 특징[2], [4], [5]이 있는데, 열거하면 다음과 같다.

1) 응고(주조)조직이 없으며, 균열, 기공, 취화부 등의 용융 용접에 특히 있는 결함이 생기기 어렵다.
2) 同種 금속의 접합에 있어, 접합부는 모재와 거의 같은 물리적, 화학적 성질을 갖는다.
3) 용융 용접에서는 곤란한 분산 강화형 합금, 활성금속(Zr, Ti 등), 내열 합금, 고 융점 금속 등의 면 접합을 다른 용접법에 비해 용이하게 할 수 있다.
4) 치수 정밀도가 높다.

5) 복잡한 형상의 면 접합이 가능하고, 다수의 이음 부의 동시접합이 가능하다.

6) 접합 후의 열 응력, 열변형이 작다.

7) 면 접합이기 때문에 모재의 판 두께에 의존하지 않는다.

8) 융점 차이가 큰 재료끼리의 접합이 비교적 용이하다.

9) 異種 재료사이에 생기는 상호(반응)확산의 적절한 제어에 의해 異種 금속간, 금속-세라믹스 간 등의 접합이 비교적 용이하다.

10) 접합과 열처리가 동시에 행해질 수 있는 가능성이 있다.

11) 異種재 접합에서 생기는 잔류 응력을 Insert metal을 적절히 조합함으로써, 열 응력 발생을 저감시킬 수 있다11 13).

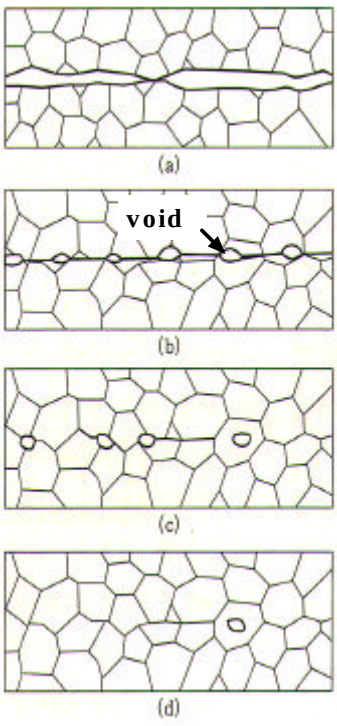
이러한 장점들 외에도, 몇 가지 단점도 가지고 있다.

1) 연속작업이 곤란하다.

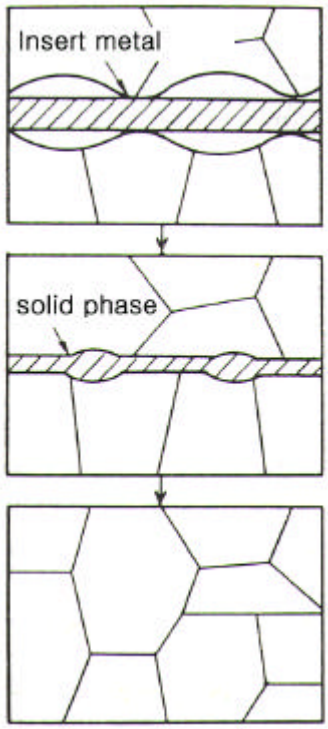
2) 가압 지그와 모재와의 고착 방지 및 균일 가열 등의 방법이 모색 되어야 한다.

3) 주로 진공 분위기 또는 불활성 가스 분위기에서 접합해야 되므로, 접합장치가 대단히 고가이다.

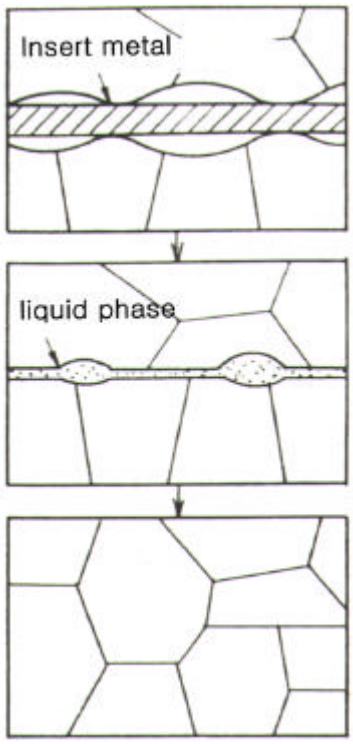
4) 접합 면의 평활 도와 청정 도에서 엄격한 제약이 따른다.



(a) Solid phase diffusion bonding(no Insert metal)



(b) Solid phase diffusion bonding(used Insert metal)



(c) TLP diffusion bonding

Fig. 1 A theory of diffusion bonding

1.3 접합조건 및 공법

전 절에서 확산접합의 전체적인 개요에 대해서 살펴보았다. 이 절에서는 요즘 연구분야가 확대되고 있는 異種재료의 접합을 중심으로, 異種재료의 접합에 관여하는 여러 인자와 접합공법 등에 대해서 간단히 살펴볼 것이다.

우선, 異種재료 접합의 성공여부를 지배하는 인자로는, 완전한 재료의 접촉에 이어 계면의 금속 물리학적인 반응이 뒤따라야 하는데, 어떠한 반응이 생기고, 어떠한 성질의 계면이 생성되는가는 재료의 조합, 접합온도, 유지시간, 압력, 분위기 등에 따라 달라지게 된다[5), 14)]. 적절한 재료의 조합은 두 모재 사이의 반응확산에 큰 영향을 줄 수 있는 것이므로, 신중한 선택이 필요하다. 본 실험에 사용한 A6061 모재(Al-Mg-Si계)는 STS316L과는 융점이나 열 팽창계수 등에서 큰 차이를 보이는 재료이지만, 공통 원소를 많이 함유하고 있으며, 특히 접합에 악영향을 주는 산화알루미늄 층을 환원시킬 수 있는 Mg성분[6)]이 들어 있는 재료이기 때문에 충분한 접합이 이루어질 것이라고 사료된다. 이 두 모재의 화학조성 및 물리적·기계적 성질을 Table 1, 2에 각각 나타내고 있다[7) 9)]. 접합온도는 모재의 융점이하의 온도(보통 1/2 2/3Tm, Tm : 융점)에서 접합하는 것이 바람직하며, 유지시간이 길수록 반응확산현상의 촉진으로 인해 우수한 접합부가 얻어진다. 변형 없는 접합 이음매를 얻기 위해서는 소성변형이 발생하지 않는 범위 내에서 가압 하여 주는 것이 바람직하다. 또한 분위기 제어도 중요한 인자 중의 하나 이다. 실제로 금속표면에는 산화물, 흡착가스 등 오염 물질이 존재한다. 이러한 오염물질은 표면처리에 의해 어느 정도 제거할 수는 있지만, 2차 적인 오염을 방지하기 위하여 진공 분위기 중에서 가열하여 산화물 층이 형성되지 않는 에너지 적

으로 활성화된 표면을 만들어 줄 필요가 있다. 즉, 고체가 진공 중에서 그 표면이 청정한 경우에는 고체표면에 존재하는 원자는 내부의 원자와는 달리 원자결합의 일부가 끊어진 상태의 에너지 준위가 높은 불안정한 활성상태로 된다. 이러한 상태에서 접합이 이루어진다면, 접합이음매 특성이 개선될 수 있다. 확산접합에 일반적으로 이용되는 접합 분위기는 약 10-3 10-5 Torr이다. 하지만, Al과 같이 표면에 산화피막이 다량으로 존재하는 금속에 대해서는 10-5 Torr이상의 진공 분위기에서 접합할 필요가 있다[2), 5), 6)].

다음으로, 접합공법에 대한 설명이다[2), 14)]. Hot Press(일 방향 가압법)와 HIP(정수압 가압법)이 대표적인 방법으로, 어떤 공법을 채택할지는 접합되는 부품의 형태, 치수 등에 따라 달라진다.

1) Hot Press에 의한 방법
   a. 캡슐을 이용할 필요가 없다.
   b. 소형이고 단순한 형상의 접합은 용이하다. 그러나, 복잡한 형상의 경우 균일 압력 분포가 얻어지지 않는다.
   c. 큰 면적의 접합 시, 큰 하중용량의 설비가 필요하다.
   d. 일 방향 가압을 위하여 압력을 너무 높히게 되면, 모재의 소성변형이 발생한다. 따라서, 적정 가압 조건의 선정이 필요한데, 이것은 재료에 따라 달라질 수 있다.
2) HIP 접합
   a. 캡슐 설계, 봉입, 탈기, 이형의 시간이 걸리지만, 복잡한 형상의 접합이 용이하다.
   b. 큰 면적이라도 면압이 일정하다.
   c. 등방압 가압이므로 높은 가압력으로 큰 변형 없이 고 정밀도의 접합이 가능하다.

본 실험에 이용한 접합법은 Hot Press에 의한 방법을 채택하였는데, HIP방식의 장점 중 일부를 살리기 위해 다양한 방법으로 접합을 실시하여 그 중 최적이라고 생각되는 방법을 선택하였다. 자세한 설명은 실험장치의 소개에서 기술할 것이다.

※ 異種材 접합에 있어 금속간화합물의 생성과 거동

異種材의 확산접합에서는 상호(반응)확산에 의해 접합부에 금속간화합물(intermetallic compounds)이 형성된다. 일반적으로, 금속간화합물은 상태도에 표시되어 있는 농도에서 나타나지만, 확산 유속이 심하게 일어나 열 평형에서 벗어나는 경우에는 상태도에 보여지지 않는 상이 나타날 수도 있다. 이처럼 새로운 확산층이 형성되는 상호확산을 반응확산이라고 한다[5]. 그리고, 금속간화합물 그 자체의 화학결합은 상당히 강한 편이지만, 모재와 금속간화합물과의 계면, 금속간화합물의 입계 등은 반드시 강하지는 않다. 이와 같이 異種材 접합부에 국부적으로 금속간화합물이 형성되게 되면, 금속간화합물을 중심으로 void가 형성되어 이곳에서 응력집중으로 인한 접합부 근방에서의 파단이 발생한다. 이때, 금속간화합물이 너무 두껍게 형성되면, 입계를 따라 균열이 진전되어 입계 파괴가 발생한다.

Table 1 Chemical compositions of materials used(wt %)

	Fe	Al	Cr	Ni	Mg	Si	Mn
STS316L	**bal.**	-	**16.0 18.0**	**12.0 15.0**	-	≤1.0	≤2.0
A6061	≤0.03	**bal.**	0.04 0.35	-	**0.8 1.2**	**0.4 0.8**	≤0.15

	C	Mo	P	Cu	S	Zn	Ti
STS316L	**≤0.03**	2.0 3.0	≤0.04	-	≤0.03	-	-
A6061	-	-	-	0.15 0.4	-	≤0.25	≤0.15

Table 2 Physical and mechanical properties of materials used

	m.p (K)	thermal expansion coeff. (1/℃) ×10-6	thermal conductivity (100℃) (cal/㎠・sec)	modulus of elasticity (MPa)	tensile strength (MPa)	load at 0.2% elongation (MPa)	elongation (%)
A6061	**853 923**	**24**	0.37	68.6	**310**	275	12
STS316L	**1643 1673**	**16**	0.05	19.3×104	**558**	290	50

1.4 연구배경 및 목적

재료란 고도공업사회를 지배하고 이끌어 가는 아주 중요한 요소 중의 하나이다. 즉 선박, 항공기, 자동차, 우주선 및 각종의 구조물에 대해, 그 필요성이 절실히 요구되는 요소인 것이다. 이러한 공업제품에 대해서 요구되는 재료는 한 가지 기능을 발휘하는 수준에서 벗어나 더욱 다 기능적이고, 복잡한 형상의 제품을 요구하게 되었다. 이러한 관점에서 재료끼리의 접합기술이 필요하게 되었고, 더욱 소형이고 정교한 제품에까지 그 범위를 확대하기에 이르렀다[10), 15)]. 그러나, 기존의 용융접합법으로는 이러한 목적을 달성하기가 대단히 곤란하며, 특히 異種재료의 접합에 있어서는 취약한 금속간화합물의 다량생성으로 인하여 접합부의 특성에 큰 악 영향을 미치는 결과를 초래한다. 이러한 여러 가지 이유에서, 정밀접합의 한 분야로 그 적용범위가 더욱 확대되고 있는 확산접합을 이용하면 변형이 없고도, 우수한 특성을 가지는 접합재료를 얻을 수 있다. 특히 본 실험에서 사용한 A6061(T6)을 비롯한 다른 여러 알루미늄합금은 내식성에서 우수한 특성을 가짐과 동시에, 재료 경량화 및 리사이클성의 관점에서 그 적용범위가 계속 확대되고 있는 재료이다. 또한 스테인리스강은 내식성 및 내열성에서 우수한 재료로서 현재까지 많은 분야에서 적용이 되어왔으며, 앞으로도 그 적용범위는 더욱 확대될 것으로 전망되고 있는 재료이다[3), 8), 10), .] 따라서, 이러한 우수한 특성을 가지는 재료 끼리를 변형이 없이, 정밀하게 접합할 수 있다면, 극 저온 내압 용기, 고 진공 기기, 자동차, 항공기, 우주선, 구조물 및 일반 공업제품에 이르기까지 그 적용범위도 더욱 확대 될 것이라 사료된다.

현재 알루미늄과 철강재의 접합에 있어, 접합계면에서의 산화피막거동 및 반응확산에 의한 취약한 금속간화합물의 생성, 그리고 그에 따른 접

합부의 특성 평가에 대한 기초적인 연구는 어느 정도 되어있다[16) 18)]. 그러나, 여러 접합 조건에 따른 접합부의 반응층 형성이 접합강도에 미치는 영향, 파면의 형상과 파면에 대한 정밀한 분석, 최적의 접합조건의 선정, 접합강도의 향상을 위한 접합기구의 해석 및 새로운 접합방법의 개발 등에 대한 상세한 보고가 이루어진 것이 거의 없는 실정이다. 그런데, 취약한 금속간화합물 내부에서 발생하는 열 응력으로 인한 영향을 줄이기 위해, 異種금속의 확산 접합에 Insert metal을 많이 이용하고 있으며, 직접접합법에 의한 방법은 그 추세가 줄어들고 있는 추세이다. 그 연구 동향으로서, Ag와 같은 Insert metal을 사용하면, 열 응력을 저감시킬 수 있고, 우수한 접합 이음매를 얻을 수 있는 장점[11) 13)]이 있다. 그러나, 이러한 접합법의 장점을 더욱 더 부각시키고 cost 저감 등의 측면에서 볼 때, Insert metal을 이용하지 않고, 접합조건의 제어 및 접합방법 등의 개선에 의해 열 응력을 저감시켜 우수한 접합 이음매 특성을 얻기 위한 보고 사례는 미비한 실정이다.

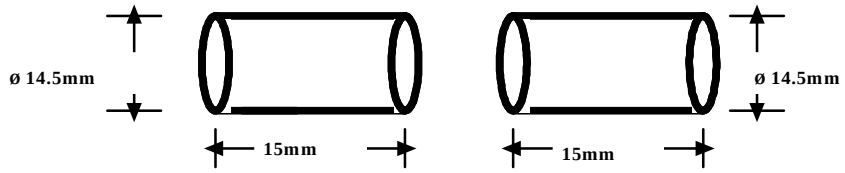
이러한 이유에서, 본 실험에서는 A6061(T6) 알루미늄합금과 STS316L 스테인리스강의 직접 확산 접합법을 통해 최적의 접합조건 및 강도향상을 위한 접합기구를 규명함으로써, 실용화 및 신뢰성 향상을 위한 기초적인 자료를 얻는 것을 목적으로 하였다.

2. 접합재료 및 방법

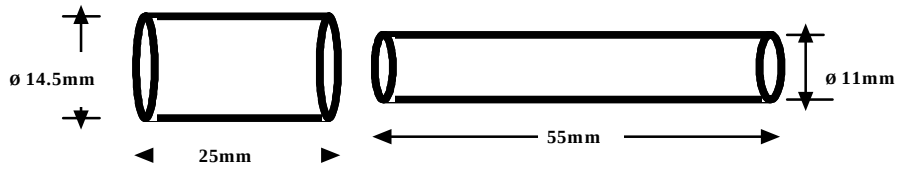
2.1 접합재료

본 실험에 이용한 재료는 냉간 압출재인 A6061(T6) 및 STS 316L로 봉상 재료를 선반 가공하여 접합에 이용하였다. 시험편의 형상은 반응층 관찰용(두 모재 모두 ø14.5mm×15mm)과 접합강도 평가용(A6061은 ø14.5mm×25mm, STS 316L은 ø11mm×55mm)으로 나누어 제작하였다. Fig. 2에 시험편의 형상을 나타내었다. 이 그림의 인장시험편의 형상에서 A6061 모재의 길이가 짧고 직경이 큰 이유는, 접합 시 모재의 creep 변형을 고려한 것이며, STS316L모재의 길이는 길고 직경이 작은 이유는, 접합 후 인장 시험편 가공에서 생기는 응력 집중으로 인한 접합 시험편의 파단을 고려한 것이다.

접합면의 표면처리는 A6061은 emery paper 1500A → 연마포 3㎛ 및 1㎛, STS 316L은 투묘(Anchoring)효과의 영향을 조사하기 위해, emery paper 1500Cw → 연마포3㎛ 및 1㎛, 또한 1500Cw → wire brush로 스크래치 처리한 시험편으로 나누어 제작하였으며, 메칠 알코올로 10min 동안 초음파 세척 후, 드라이 기로 건조시킨 다음 접합에 이용하였다



(a) Bonding specimen made for observation of reaction layer



(b) Bonding specimen made for tensile test

Fig. 2 Shape of specimen

2.2 접합장치 및 방법

본 실험은 모재 표면의 산화피막에 의한 접합불량을 고려하여 고 진공 분위기에서 접합을 실시하였다. 접합실험에 이용한 실험장치는 전체 진공 방식인 Vacuum Hot Press로 Photo 1에 실험장치를 나타내고 있으며, Fig. 2에 그 내부구조의 모식도를 나타내고 있다.

2.2.1 접합조건 및 순서

준비된 접합시험편을 이용하여 다음과 같은 조건에서 접합을 실시하였다. 접합온도는 748 883K, 유지시간은 30min 150min 사이에서 변화시켰으며, 가압력은 0 8MPa 사이에서 변화시켰다. 접합분위기는 10-5 Torr이상의 고 진공 분위기에서 실시하였다.

실험순서는 표면처리 후 깨끗하게 세척된 시험편을 드라이기로 건조시킨 다음, Fig. 3에 나타낸 것처럼 원추형상의 Jig를 가압 Press에 연결하여 alinement를 맞추고, Jig에 맞게 center가공된 시험편을 서로 밀착시킨 후, 가압 Press로 어느 정도 가압·고정시켜서 접합을 실시하였다. 마지막으로 접합온도 부근에서 1회에 걸쳐 가압력을 더 가해주었다.

2.2.2 접합부의 반응층의 관찰 및 상온인장시험

접합부의 반응층을 조사하기 위해 접합된 시험편을 fine cutter로 절단하여 mounting한 다음, polishing을 실시하였고, keller시약(불산 2㎖ + 질산 5㎖ + 염산 3㎖ + 증류수190㎖)으로 etching 시켜, 광학 현미경(OM) 및 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 접합부의 조직사진촬영

및 성분분석을 실시하였다.

그리고, Instron type 재료시험기를 이용하여 온도·압력·시간·표면조도 인자에 따른 접합부의 인장강도를 평가하였다. 이때, test용 시험편의 접합부 근방을 직경 9mm로 선반 가공한 다음, 인장속도 3.0 mm/min로 test하였다.

2.2.3 접합부의 파면에 대한 분석

파면의 관찰을 위해 SEM을 이용하여 파면의 미세 조직 사진을 촬영하였고, 파면에서 관찰되는 반응층의 성분조사 및 분석을 위해 EDX 및 XRD분석을 실시하였다.

Photo 1 Vacuum hot press

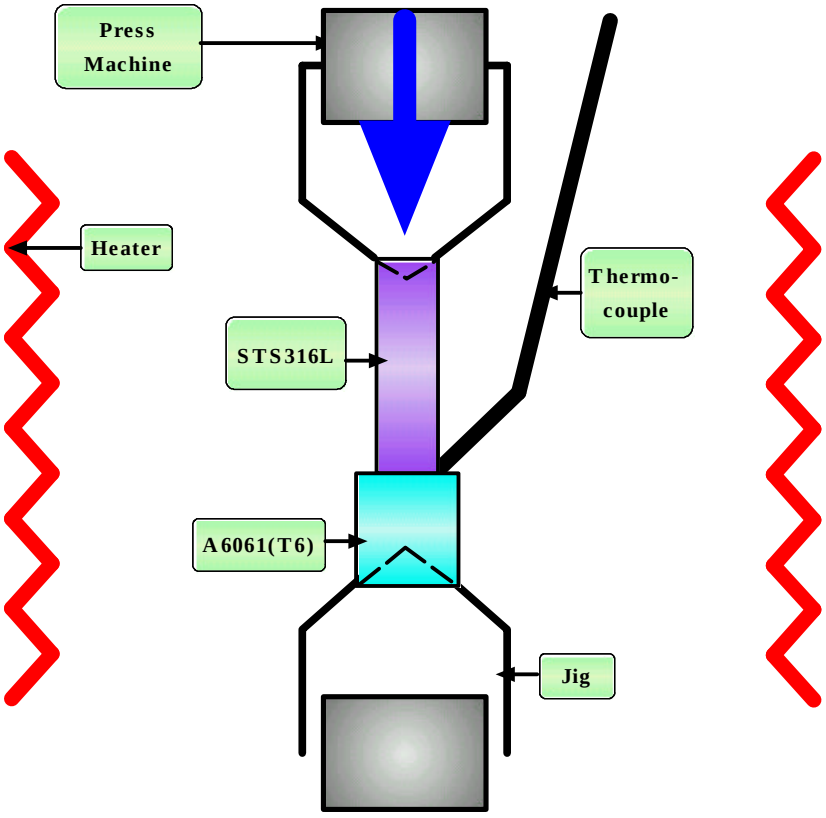


Fig. 3 Inside of vacuum hot press

3. 결과 및 고찰

3.1 접합부의 반응층, creep 변형 및 접합강도에 미치는 가압력의 영향

접합온도 및 유지시간을 각각 748K, 120min으로 일정하게 유지한 상태에서, 가압력을 1 8 MPa 사이의 범위에서 변화시키면서 접합강도를 평가하였다. 그 실험결과를 Fig. 4 및 Photo 2 (a), (b)에 나타내고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 가압력의 증가는 어느 정도 범위까지는 접합강도 향상에 기인하고 있다. 그러나, 가압력이 너무 높아지게 되면, 사진에서 볼 수 있는 것처럼, 오히려 creep 변형 등의 문제점이 발생하여 접합 후 모재의 큰 손상을 초래하였다. 이것은 모재의 변형이 거의 없이 정밀하게 접합한다[1]는 확산접합의 목적에 크게 벗어나는 것이다. 그리고, alinement가 정확하게 맞지 않게 되어 균일한 접합이 이루어지지 않으므로, 오히려 접합강도가 저하하는 현상이 나타났다. 특히, 가압력을 5 8 MPa 까지 증가시켜 접합한 결과, creep변형의 정도가 너무 심해서 인장시험을 실시할 수 없었다. 또한, 반응층의 관찰 결과에서도 Photo 3에서 보여지는 것처럼 별다른 차이점이 발견되지 않았다.

이상의 결과를 바탕으로 구해진 최적의 가압조건은 1 3MPa의 범위가 됨을 알 수 있었다.

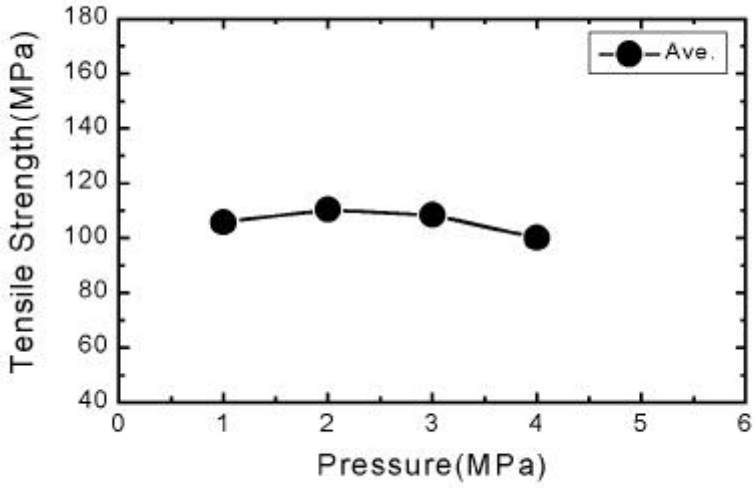
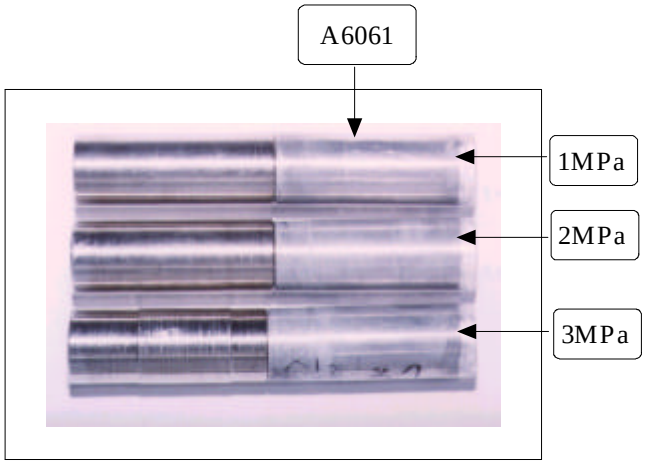
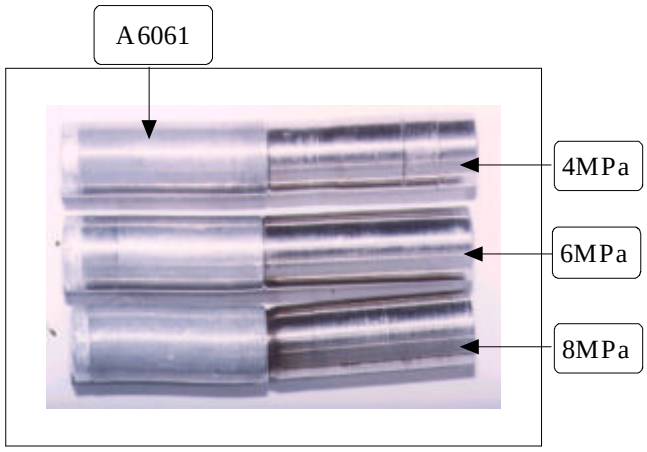


Fig. 4 Effect of pressure on tensile strength
of A6061/STS316L joints
(Bonding temp. : 748K, Bonding time : 120min)



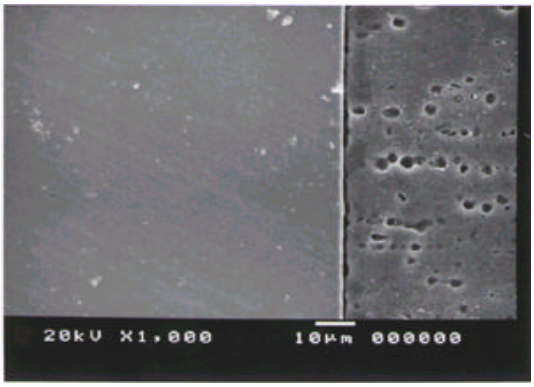
(a) at pressure of 1 3 MPa



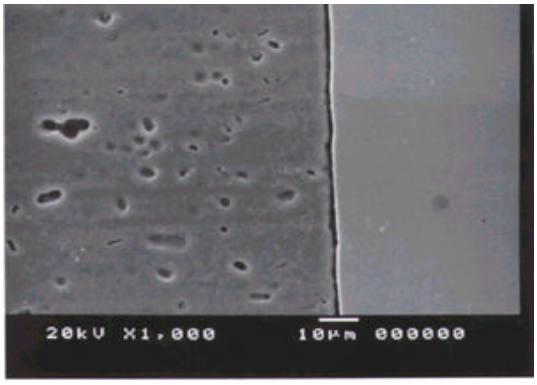
(b) at pressure of 4 8 MPa

Photo 2 Effect of pressure on creep of joints

(Bonding temp. : 748K, Bonding time : 120min)



(a) at pressure of 1 3MPa



(b) at pressure of 8MPa

Photo 3 SEM microstructure of the A6061/STS316L joints

(Bonding temp. : 748K, Bonding time : 120min)

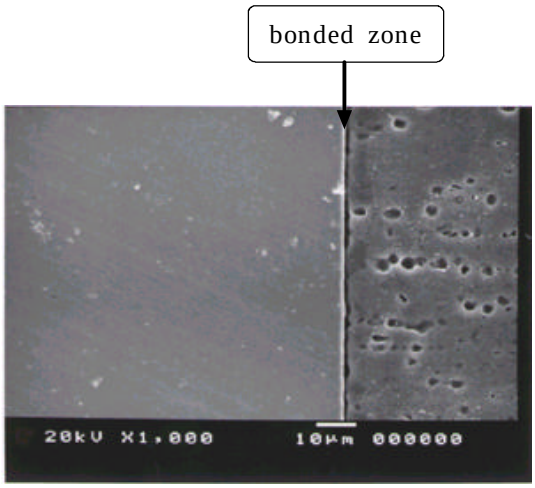
3.2 접합부의 반응층 및 접합강도에 미치는 접합온도의 영향

확산 접합부에서의 온도에 따른 반응층의 두께 측정은 확산량에 따른 접합강도와 관련하여 중요하다. 접합 가압력 및 유지시간을 각각 1 3MPa(실험에서 얻어진 creep변형이 거의 발생하지 않는 범위의 가압 조건), 120min으로 일정하게 유지하면서 접합을 실시하였다. 접합온도에 따른 접합부의 반응층을 SEM으로 관찰하여 그 결과를 Photo 4, 5에 걸쳐 나타내었으며, Fig. 5에 반응층에 대한 line-scanning한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 수직으로 그어진 선은 접합부를 나타내고 있다. 사진으로부터 알 수 있듯이, 748 798K의 범위에서는 반응층을 거의 관찰할 수 없었다(약 1㎛). 그런데, 온도를 상승시켜 823 883K의 온도범위에서는 두꺼운 반응층을 관찰할 수 있었다(약 10 30㎛). 그러나, 이 온도 범위에서는 반응층의 내부로 균열이 크게 진전되어 있었으며, 일부는 시편의 채취 및 cutting 과정에서 파단이 일어났다. 이것의 원인으로는, 반응층 내부에 두껍고 취약한 금속간화합물(intermetallic compounds)이 과다하게 생성되고, 냉각 시 발생하는 열 응력으로 인한 균열의 진전 때문으로 추정되는 결과이다. 열 응력의 완화 방법으로는 Insert metal을 이용하는 등의 방법이 있다. 그리고, line-scanning한 그림으로부터 두 모재사이의 반응확산에 의한 반응층의 생성을 확인할 수 있다. 그림 및 사진으로부터 알 수 있듯이, 반응층의 생성은 A6061모재 쪽으로 생성되고 있다. 이러한 반응·확산의 정도는 온도의 증가에 따라 증가함을 이 결과를 통하여 알 수 있다.

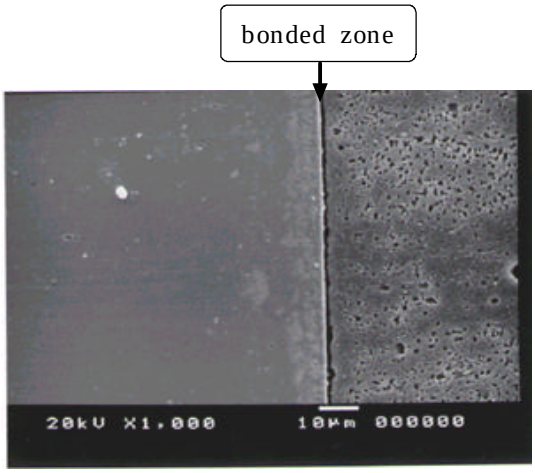
다음으로, 온도에 따른 접합강도를 test한 결과, 온도상승과 더불어 접합강도가 상승하여 803K의 접합온도에서 최대인장강도 140MPa을 얻을 수가 있었다. 그래프에서 온도의 상승과 더불어 접합강도가 조금 증가하

고 있는데, 이것은 접합온도의 상승에 따른 반응·확산 현상의 촉진으로 금속학적인 결합이 더욱 견고해지기 때문이다. 이때 접합강도는 110 140MPa 사이의 범위에서 거의 균일하게 나타났다(Al 모재는 접합한 후 서냉에 의해 T6→T0 처리가 되기 때문에 접합강도가 125MPa까지 떨어짐9)). 그러나, 온도를 더욱 상승시켜 813K이상의 온도로 되면, 오히려 접합강도가 급격히 저하되는 경향을 나타내었으며, 또한 모재의 손상 및 Creep 변형도 현저하게 나타났다. 이것은 반응층의 관찰 결과에서도 알 수 있듯이, 반응층의 내부에 두껍고 취약한 금속간화합물이 과다하게 형성되어 그 내부로 열 응력에 의한 균열의 진전이 발생하고, 이로 인해 급격한 접합강도 저하 현상이 발생한다고 추정되는 결과이다. 그리고, 823K 이상의 고온에서는 접합이 제대로 이루어지지 않았으며, 접합이 이루어졌다 하더라도 쉽게 파단해 버려, 접합강도를 평가할 수 없었다. Fig. 6에 인장시험 결과를 나타내고 있다. 그래프에서 ●는 5개의 시편 중 최대값 및 최소값을 제외한 나머지 세 개의 평균치를 나타내며, 아래 위의 간격은 세 개 시편의 평균오차를 나타내는 것이다.

이상의 결과로부터 최적의 접합온도는 748 803K의 온도범위가 된다는 것을 알 수 있었다.



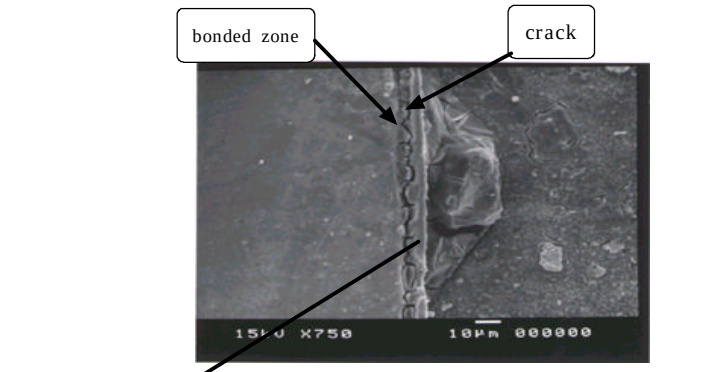
(a) at 748K



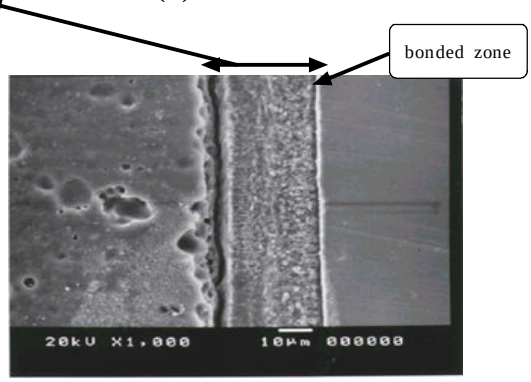
(b) at 798K

Photo 4 SEM microstructure of theA6061/STS316L joints

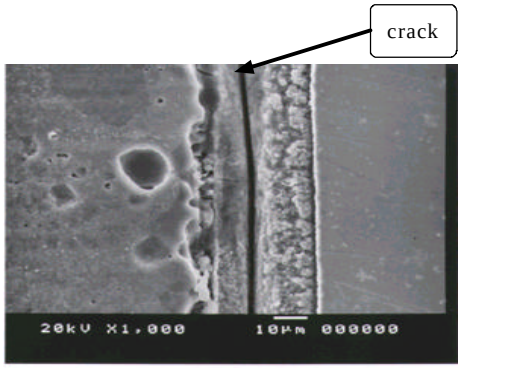
[Bonding time : 120min, Pressure : 1 3MPa]



(c) at 823K



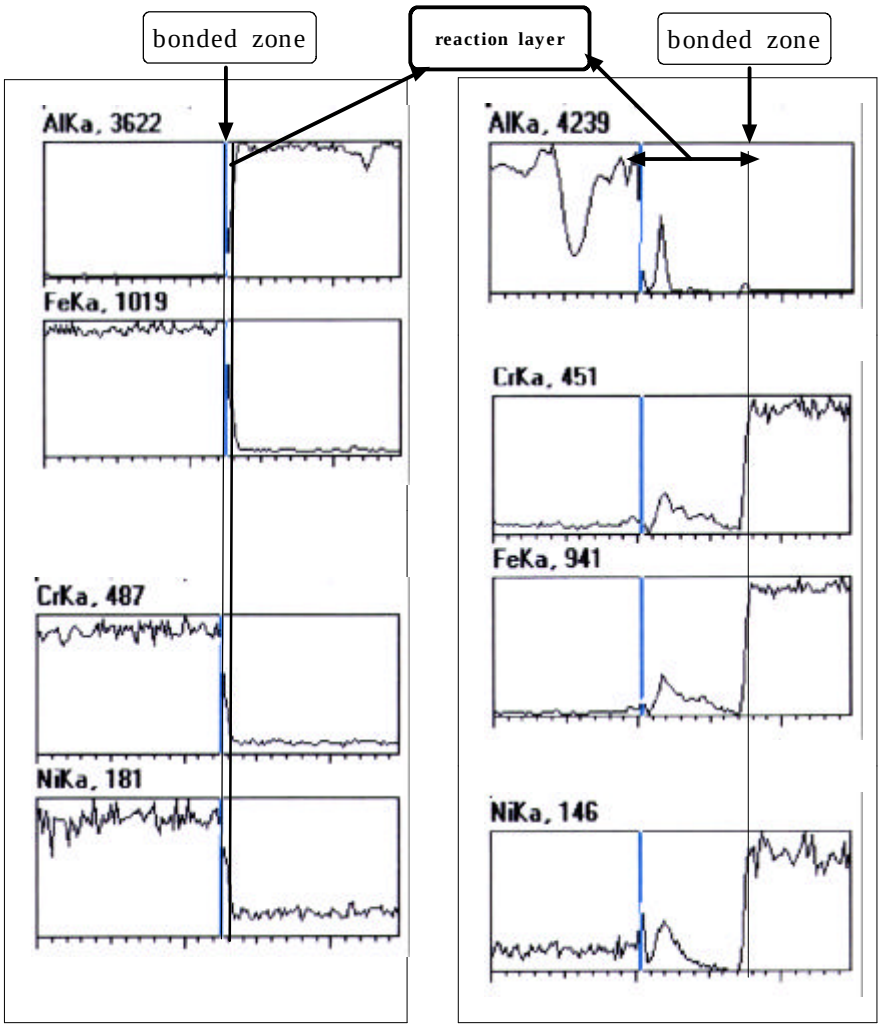
(d) at 883K-1



(e) at 883K-2

Photo 5 SEM microstructure of theA6061/STS316L joints

[Bonding time : 120min, Pressure : 1 3MPa]



(a) at temp. of 748K (a) at temp. of 883K

Fig. 5 Line-scanning of joints

(Bonding time : 120min, Pressure : 1 3MPa)

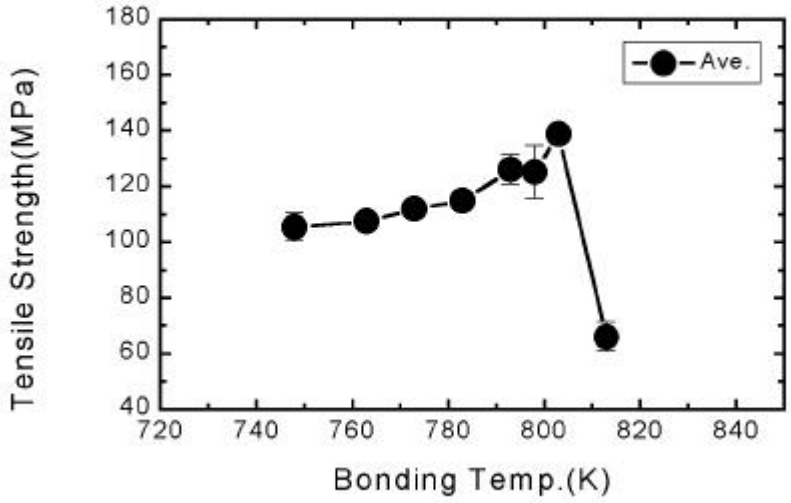


Fig. 6 Effect of bonding temp. on tensile strength of A6061/STS316L joints
[Bonding time : 120min, Pressure : 1 3MPa]

3.3 접합강도에 미치는 유지시간의 영향

확산접합에서는 유지시간을 길게 할수록 반응·확산 현상이 촉진된다. 본 실험에서는 가압력 및 접합온도를 각각 1 3MPa, 748K로 일정하게 유지한 상태에서, 유지시간을 30 150min사이의 범위에서 변화시키면서 최적의 접합유지 시간을 찾아내고, 그 조건에서의 접합강도를 평가하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 그래프에서도 알 수 있듯이 유지시간이 짧을 때에는 접합강도를 평가할 수 없었는데, 이것은 저온·단시간의 접합조건에서는 반응·확산 현상이 충분히 이루어지지 못해 반응층을 형성할 조건에 도달하지 못했기 때문이다. 따라서, 우수한 접합부 이음매를 얻기 위해서는 접합유지 시간을 어느 정도 길게 할 필요가 있음을 본 결과에서도 알 수 있었다.

이상의 결과 최적의 접합시간은 90 150min의 범위 사이인 것을 알 수 있었다.

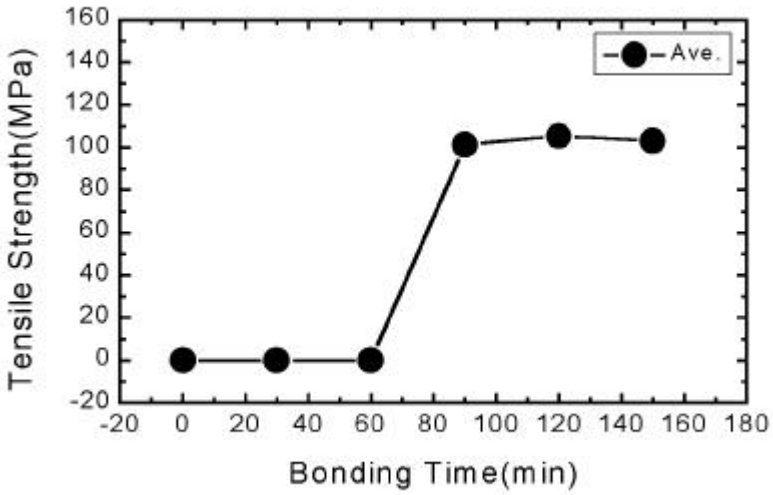


Fig. 7 **Effect of bonding time** on tensile strength of A6061/STS316L joints
[Bonding temp. : 748K, Pressure : 1 3MPa)

3.4 접합강도에 미치는 표면조도의 영향

앞 절에서 얻어진 최적의 접합조건, 즉 접합온도 748 803K, 유지시간 90 150min, 가압력 1 3MPa의 접합조건에서 표면조도가 접합부의 강도에 어느 정도 영향을 미치는지에 대해 조사하기 위해, 다음과 같은 조건으로 실험을 실시하였다.

(1) A6061 및 STS316L의 두 모재 모두 1㎛까지 Polishing처리 한 후 접합을 실시

(2) A6061은 1㎛까지 Polishing 처리하였고, STS 316L의 경우는 평활하게 연마한 후 wire brush로 임의적인 요철을 만들어 주어 접합을 실시

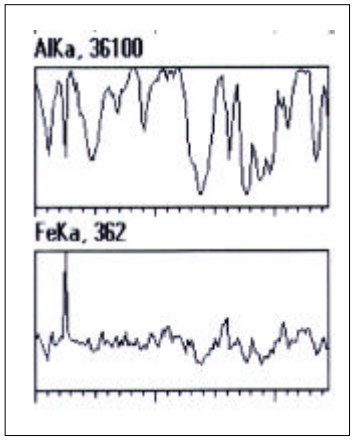
⇒ 투묘(Anchoring)효과를 재현시켜 접합부의 진 접촉면적을 증가시키기 위해

실험결과 (2)의 경우가 어느 정도 접합강도를 향상시킬 수는 있었지만, 그다지 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 나타났다.

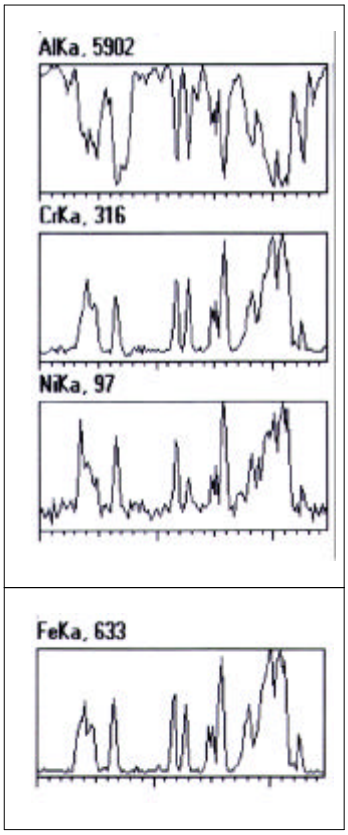
3.5 파면의 형상에 미치는 접합온도의 영향

접합유지시간이 120min, 가압력이 1 3MPa인 조건에서, 접합온도를 748 823K의 온도범위 사이에서 변화시키면서 각 온도에 대한 파면의 형상과 접합부 근방의 파괴형상을 관찰하였다. 접합온도가 748 803K의 온도범위에서의 관찰 결과를 Photo 6 9에 나타내고 있는데, 관찰 결과 파면이 전체적으로 dimple 파면 형상을 보이고 있었으며, 접합부에서의 A6061모재의 파괴 형상도 연성파괴 형상을 나타내었다. 그러나, 접합온도를 813K이상으로 증가시켜 접합했을 때의 파면의 형상은 물결이 흐르는 형상을 나타내고 있었으며, A6061모재의 연성파괴 형상도 관찰할 수 없었다. 그 결과를 Photo 10에 나타내고 있다. 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해, SEM을 이용한 미세 조직을 관찰하여 그 결과를 각각 Photo 11 13에 나타내었다. 관찰 결과 파면의 육안검사에서와 마찬가지로, 748 803K의 온도범위에서는 A6061모재에서 전체적으로 dimple 파면 형상을 나타내고 있었다. 그러나, 813K 이상의 온도범위에서는, 육안검사에서 관찰되었던 물결무늬 형상은 균열이 산재해 있는 겹겹의 층(벽개파면)으로 되어있음을 관찰할 수 있었다. 그리고, dimple 형상의 파면은 일부에서밖에 관찰되지 않았다. 이러한 형상은 온도별 인장강도평가에서 관찰되었던 접합강도 저하요인으로 작용하고 있음을 알 수 있는 결과이다. 즉, 748 803K의 온도범위에서는, 접합온도 증가에 따라 접합부에서의 반응·확산현상의 촉진으로 인하여 결합력이 강한 반응층이 형성됨으로써, A6061 모재에서 연성파괴 양상을 나타내면서 파괴가 일어나 파면 전체에 걸쳐 dimple 파면 형상을 보인다. 또한, 파면에 대해 line-scanning한 결과, 파면 전체에 걸쳐 Al 성분원소가 검출되었다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내고 있다. 그러나, 813K 이상의 온도에서는 두껍

고 취약한 금속간화합물의 형성과 열 응력으로 인하여 반응층 내부 또는 Al 모재와 금속간화합물의 계면에서 파괴가 일어나며, 다량의 균열이 산재하는 파면 형상을 나타내고 있다.



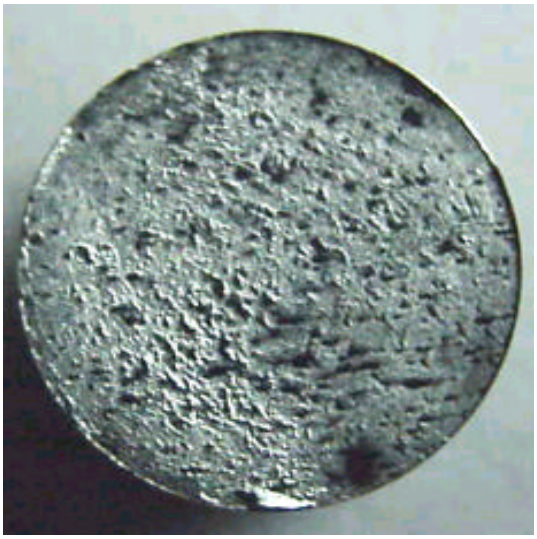
(a) Al zone



(b) STS zone

Fig. 8 Line-scanning of fracture surface
(Bonding temp. : 798K, Bonding time : 120min,
Bonding pressure : 1 3 MPa)

(a) Al side



(b) STS side

Photo 6 Shape of fracture surface at 748K

(a) Al side

(b) STS side

Photo 7 Shape of fracture surface at 783K

(a) Al side

(b) STS side

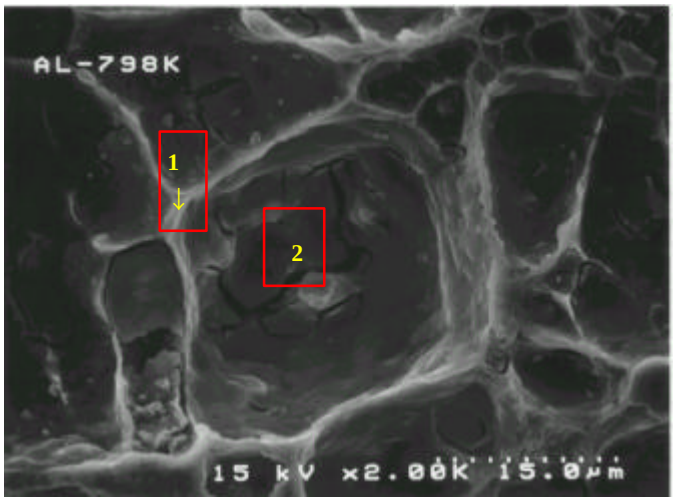
Photo 8 Shape of fracture surface at 798K

Photo 9 Shape of fracture at 748 803K

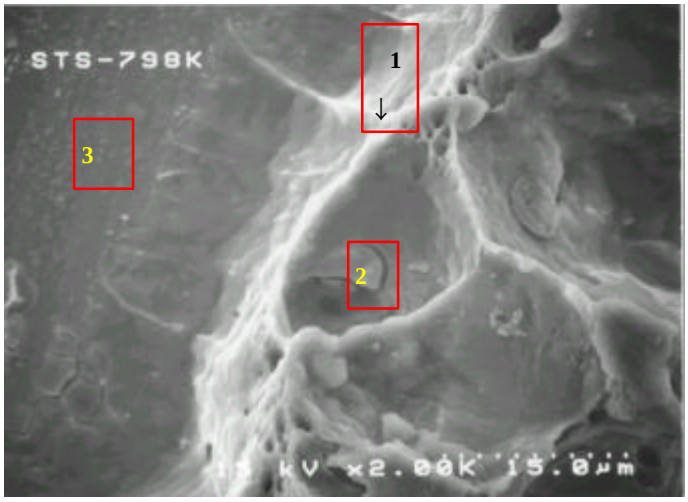
(a) Al side

(b) STS side

Photo 10 Shape of fracture surface at 813K



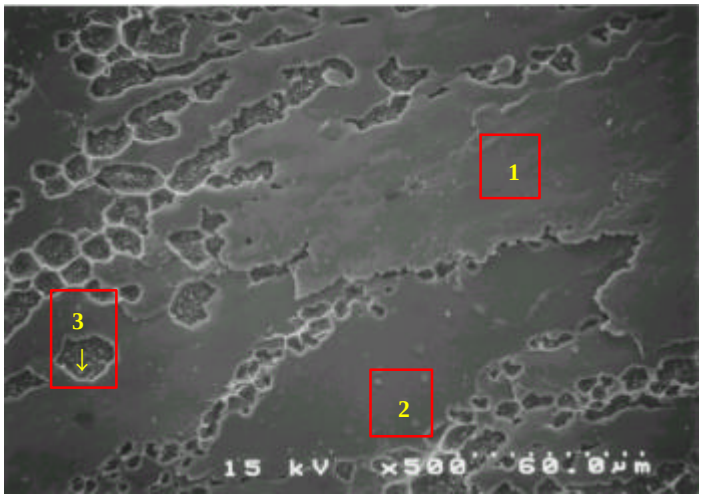
(a) Al zone



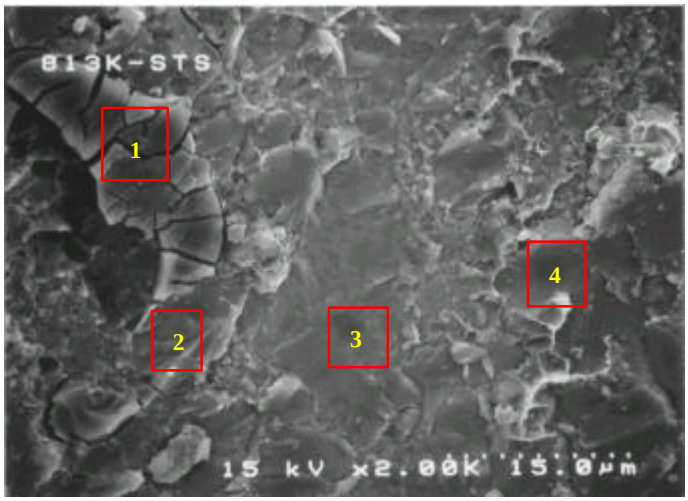
(b) STS zone

Photo 11 SEM microstructure of fracture surface

[798K, 1 3MPa, 120min]



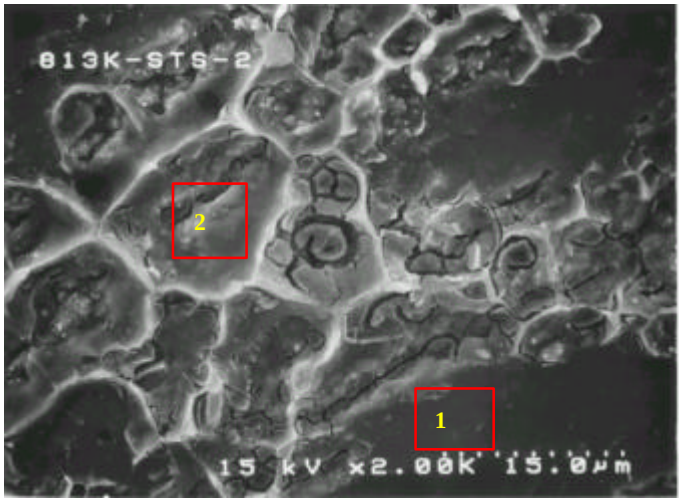
(a) Al zone



(b) STS side-1

Photo 12 SEM microstructure of fracture surface

[813K, 1 3MPa, 120min]



(c) STS side-2

Photo 13 SEM microstructure of fracture surface

[813K, 1 3MPa, 120min]

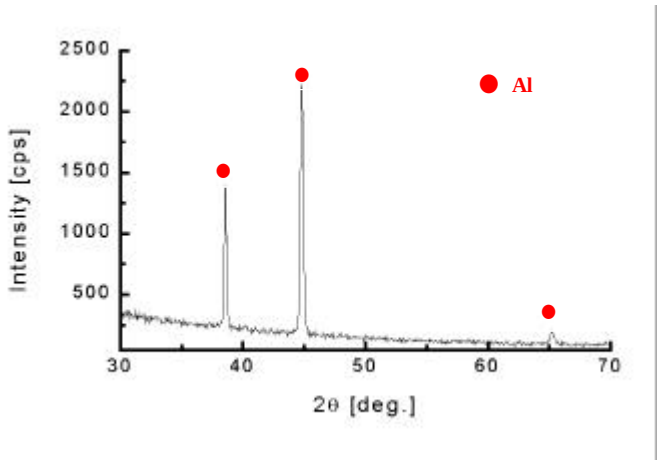
3.6 온도에 따른 파면의 형상과 EDX 및 XRD분석 결과의 관계

파면의 미세 조직의 각 부분을 EDX로 분석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻어낼 수 있었다. 우선, Photo 11에서 보여지는 것처럼, 파면에서 dimple 파면 형상이 관찰되는, 접합온도 798K의 온도에서는 여러 부분에 대해 EDX로 분석한 결과, 파면전체에 걸쳐 Al 성분이 검출되었는데, 이것은 접합부에서의 파괴가 반응층 내부가 아닌 A6061모재 근방에서 일어났음을 알 수 있는 결과들이다. 이러한 결과들은 접합온도 748 803K에서 일괄적으로 나타나고 있다. 그러나, Photo 12, 13에서 보여지는 것처럼, 파면에 균열이 산재하는 층이 겹겹이 나타나고 있는 접합온도 813K의 온도에서의 분석 결과, 파면 전체에 걸쳐 Al 성분뿐만 아니라, Fe, Cr, Ni, 그 외 다른 성분들도 과다하게 검출되었다. 이 결과로 보아, 이 온도에서의 파괴는 두껍고 취약한 금속간화합물 생성과 열 응력에 의한 과다한 균열 산재로 인해 반응층의 내부 및 Al 모재와 반응층의 계면(과다한 금속간화합물이 존재하는 영역)으로 균열이 진전하여 파괴가 일어났음을 알 수 있는 결과들이다.

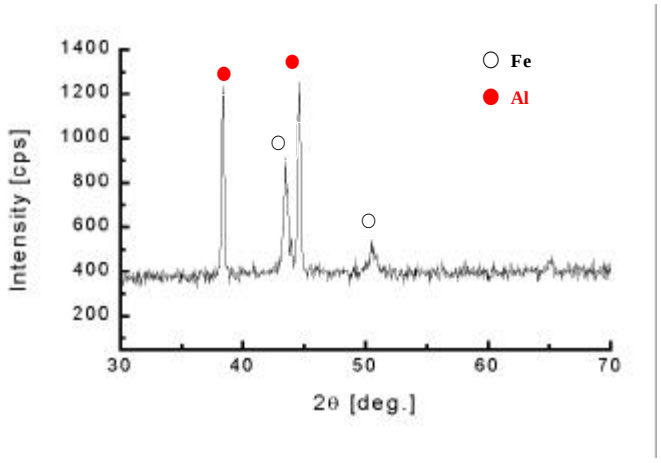
다음으로, 접합 후 인장 파단면에 대한 X-ray분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 그래프에서 보여지는 것처럼 798K온도의 Al 측 파단면에서는 대부분 Al 성분이 검출되었으며, STS 파단면에 대해서도 대부분의 Al 성분 및 일부 Fe 성분이 검출되었는데, 이것은 파단이 Al 모재 측에서 일어났음을 알 수 있게 해 주는 결과이다. 그러나, 813K의 온도의 Al 측에서는 Al 성분이, STS 측에서는 Fe 및 금속간 화합물 성분이 검출되었는데, 이것은 Al 모재 측이 아닌 Al 모재와 반응층의 계면 또는 취약한 금속간화합물 입계에서의 균열 진전에 의하여 파괴가 일어났음을 알 수 있게 해 주는 결과이다.

Table 3 EDX analysis of fracture surface

	798K					813K								
	Al		STS			Al			STS-1				STS-2	
No. / Element	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2
Al	100	97.52	100	100	32.75	67.11	97.33	100	60.81	68.12	34.01	71.55	70.64	78.7
Mg	-	-	-	-	-	-	2.67	-	-	-	-	-	-	-
Si	-	-	-	-	0.18	0.56	-	-	0.27	0.27	0.14	0.72	0.96	0.82
Fe	-	2.37	-	-	46.64	25.4	-	-	27.46	24.25	46.37	21.61	22.07	15.57
Cr	-	0.11	-	-	12.65	6.93	-	-	9.02	7.35	14.21	6.12	6.33	4.31
Ni	-	-	-	-	7.78	-	-	-	2.44	-	5.27	-	-	0.6
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total(wt%)	100													



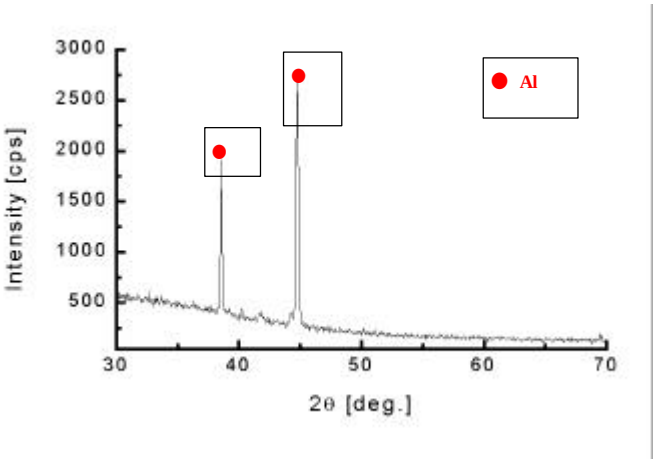
(a) Al side



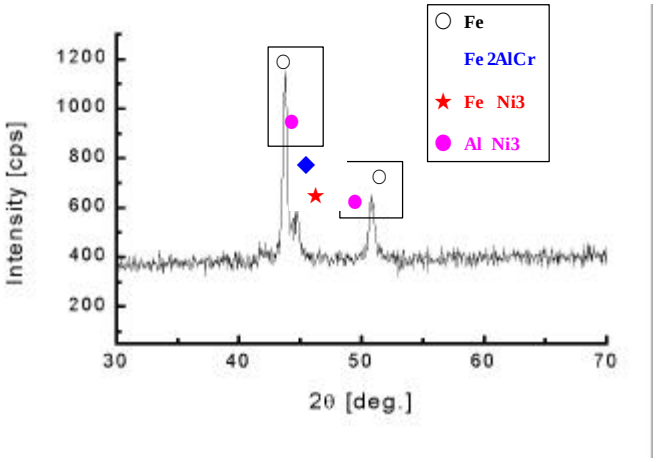
(b) STS side

Fig. 9 X-ray diffraction patterns from fracture surface

[Temp. : 798K, Time : 120min]



(a) Al side



(b) STS side

Fig. 10 X-ray diffraction patterns from fracture surface

[Temp. : 813K, Time : 120min]

3.7 접합기구에 대한 고찰

이상의 결과들을 종합하여 접합기구에 대하여 고찰하여 보았다. 그 모식도를 Fig. 11 및 Fig. 12에 나타내고 있다. 그림에서 보이는 것처럼, 748 803K의 온도 범위에서는 스테인리스강 성분 중 일정량의 Fe, Cr, Ni 등의 성분이 Al 모재 측으로 확산하여, 반응·확산에 의한 얇고 결합력이 강한 반응층이 생성됨으로써 Al 모재 측에서 연성파괴가 일어나며, 이러한 반응층의 형성이 접합강도 향상에 기인하고 있다. 그러나, 813K 이상으로 온도가 상승하면, 上記의 성분 원소가 과다하게 확산됨으로써, 두껍고 취약한 금속간화합물이 과다하게 생성된다. 또한, 열 응력에 의한 다량의 균열이 산재하게 되며, 이러한 균열의 진전에 의해 반응층 내부 또는 Al 모재와 반응층 사이의 결합계면(과다한 금속간화합물이 존재하는 영역)에서 파괴가 발생하게 된다. 이러한 반응층의 생성이 접합강도를 저하시키는 원인으로 작용하게 된다고 사료된다.

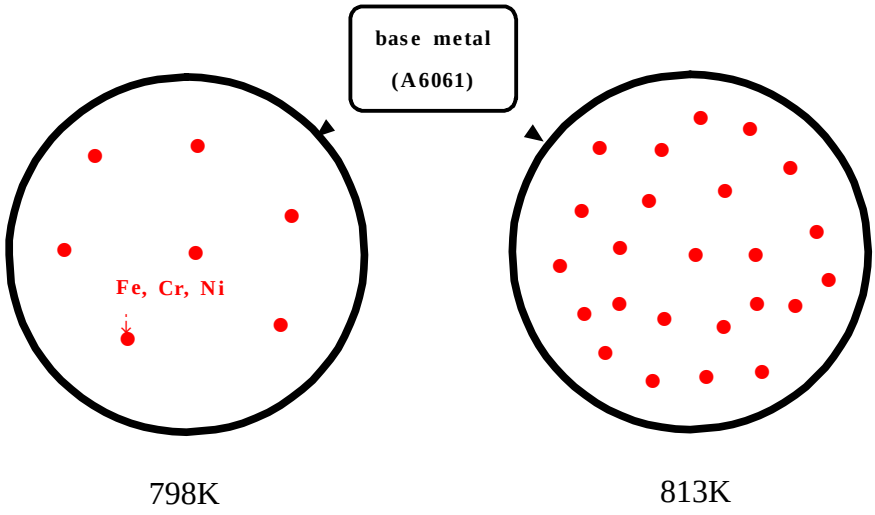


Fig. 11 A study of bonding mechanism 1

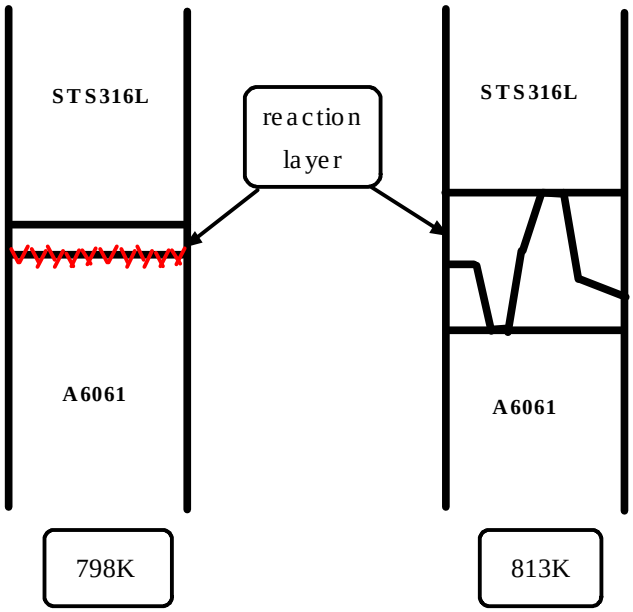


Fig. 12 A study of bonding mechanism 2

4. 결 론

A6061(T6)재 및 STS316L을 온도, 시간, 압력 조건에 따라 직접확산접합을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적의 접합조건은 접합온도 748 803K, 접합시간 90 150min, 가압력 1 3MPa, 분위기 10-5 Torr이상임을 알 수 있었다. 이때, 최대인장 강도는 약 140MPa이 얻어졌다.

2. 접합온도 748 803K에서, 강도는 온도상승과 더불어 반응·확산 현상이 촉진되어 증가하였다. 그러나, 접합온도 813K이상에서, 강도는 취약한 금속간화합물의 과다 생성과 열 응력에 의한 균열 진전으로 오히려 저하되었다.

3. 접합온도 748 803K에서, 파괴는 Al 모재 측에서 연성파괴가 발생하였다. 그러나, 접합온도 813K 이상에서, 파괴는 접합계면에서 벽개 파괴되었다.

4. 접합온도 748 803K에서는, 스테인리스강의 성분 원소 중 일정량의 Fe, Cr, Ni 등의 성분이 Al 모재 측으로 확산되어, 얇고 결합력이 강한 반응층을 형성함으로써 접합강도를 향상시킨다. 그러나, 접합온도 813K이상에서는 上記의 성분 원소가 과다하게 확산되어, 두껍고 취약한 반응층을 생성시켜, 인장 시 반응층 내의 금속간화합물 계면 응력집중이 일어나 접합강도를 저하시키는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1) **大橋 修**, Q & A **擴散接合**, **産報出版**, pp. 22, pp. 30 31

2) **金永植**, **最新熔接工學**, **螢雪出版社**, pp. 75 81

3) **대한용접학회**, **용접·접합 편람**, pp. 143 165, pp. 229 230, pp. 242 268

4) **橋本達哉·岡本郁男 共著**, **固相溶接·ろう付**, **溶接全書** 9, pp. 95 109

5) **日本 溶接學會 界面接合 研究 委員會 編**, **最近のろう接·擴散接合技術**, pp. 85 91

6) **박무섭**, Al-Si**계 액상삽입금속층을 이용한 알루미늄 브레이징 접합부 미세 조직 변화에 관한 연구**, **한국해양대학교 석사학위논문**(1999), pp. 6, pp. 27

7) **西本和俊**, **才田一幸**, **妙中 眞**, ○**黑田晋一**, I. MAKINO : Al/**ステンレス鋼の擴散接合部の組織解析** [Al/**ステンレス鋼の擴散接合に關する研究(第 1 報)**], **溶接學會全國大會講演概要 第** 64**集**(1999-4), pp. 292 293

8) **이지환**, **이정중**, **김병일**, **배차헌 편저** : **비철금속재료**, **원창출판사**, pp. 283 284

9) アルミニウムの組織と性質, 經金屬學會, pp. 477　479

10) 黒田晋一, 才田一幸, 西本和俊, A6061とSUS316の 直接接合部の組織と特性 [アルミニウム合金とステンレス鋼の擴散接合に關する研究(第1報), 溶接學會論文集 第 17巻 第 3　pp. 484　489 (1999)

11) I. MAKINO, K.KADA, 黒田晋一, 西本和俊, 才田一幸, 妙中 眞, イサ-ト金屬を用いたAl/ステンレス鋼の擴散接合繼手特性に及ぼす接合條件の影響, 接學會全國大會講演概要 第 61集(1997-9)

12) 西本和俊, 才田一幸, 妙中 眞, ○黒田晋一, I. MAKINO, インサ一ト金屬を用いたAl/ステンレス鋼の擴散接合部の組織解析 [Al/ステンレス鋼の擴散接合に關する研究(第 2報)], 接學會全國大會講演概要 第 63集(1998-10)

13) 西本和俊, 才田一幸, 草野滿洋, 表面活性化 プリコ一ト インサ-ト金屬による擴散接合性の改善, ○黒田晋一, [Al/ステンレス鋼の擴散接合に關する研究(第 3報)], 接學會全國大會講演概要 第 64集(1999-4)

14) 最新 接合 加工技術と その 應用, 日本機械學會 編, 日刊工業 新聞社, pp. 74　78

15) 特集 先端接合技術と材料複合化への應用, 日本溶接學會誌, 第 59巻 第 2　pp. 17　91 (1990)

16) **大橋**, **田村**, **吉原**, **日本溶接學會論文集**, vol. 3, No. 1(1985), pp. 152 158

17) **芹野**, **益本**, **淺田**, **本田**, **西尾**, **迎**, **日本溶接學會論文集**, vol. 4, No. 1(1986), pp. 60 66

18) **池內**, **小谷**, **松田**, **日本溶接學會論文集**, vol. 14, No.1(1996), pp. 122 128

감사의 글

논문을 마무리하는 이 순간, 지난 시간들을 되돌아봅니다. 기쁨, 슬픔, 아쉬움 등이 뒤섞여 머리 속을 어지럽게 만듭니다. 그러나, '새로운 도약'이라는 단어가 저를 다시 일어서게 만듭니다. 이것을 일깨워 주시고 많은 격려와 도움을 주신 분들의 얼굴이 떠오릅니다. 이 분들에게 무엇으로 보답을 해야 될 지 선뜻 생각이 나지 않습니다.

먼저, 언제나 부족한 저를 성심 성의껏 지도해 주시며, 앞으로 무엇을 어떻게 해 나가야 될 지를 일깨워 주신 지도교수님이신 金 永植 교수님께 깊은 감사의 마음을 글로나마 전해 올립니다. 아울러, 바쁘신 와중에도 귀중한 시간을 내셔서 논문심사를 하여주신 이 성렬 교수님, 김 윤해 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 본 논문이 완성되기까지, 항상 고민과 어려운 문제가 있을 때면, 꺼리는 내색 없이 고민을 들어주시고, 많은 조언과 도움을 주신 김 종도 교수님, 최 영국 선배님, 강 태영 선배님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한, 항상 친 형 처럼 곁에서 도움을 주고, 보살펴 준 봉희 형, 태형이 형, 인철이 형한테도 감사를 드리며, 순곤이 형, 동균이 형, 도형이 형, 성종이 형, 상곤이 형, 병환이 형, 창훈이 형, 권도 형, 세호 형, 기운이 형, 보현이 형, 상준이 형, 용접공학 실험실의 학수, 병식이, 지은이, 경아, 그리고 저의 친한 친구들인 상철이, 기태, 경일이, 재영이, 진원이, 보균이, 국현이, 재룡이, 문희, 영희, 태주, 형태, 선용이, 근현이, 종민이, 종영이, 재중이, 특히 재료 구입에 많은 도움을 준 무섭이, 재료 가공에 도움을 많이 주신 기관공장의 하 기사님, 윤 기사님 등과 그 외의 모든 재료공학과 선·후배님 들에게 고마움의 마음을 전하고 싶습니다. 그리고, 2년 가까이 친 누나 처럼 저를 걱정해 주시고, 아껴주신 서희 누나에게 깊은 감사를 드리며, 그 외 성 선생님,

수학, 영어 선생님, 학원의 학생들 모두에게 감사를 드리고 싶습니다.

끝으로, 항상 저에 대한 믿음과 깊은 사랑으로 저를 지켜보며 보살펴 주신 아버지, 어머니께 깊은 감사의 마음을 전해 올리며, 옆에서 든든한 기둥이 되어준 형과 동생 진미, 경덕이 에게도 이 마음을 전하고 싶습니다. 앞으로 무엇을 하든지 최선을 다할 것을 다짐하며, 마지막에 즈음합니다. 모두에게 정말 감사합니다.