

《論 文》

7000계 Al 합금의 확산접합에 관한 연구

진영철 · 홍은성 · 김양수 · 이민상 · 유창영*

전북대학교 공과대학 금속공학과

*국립중앙과학관

A Study on the Diffusion Joining of 7000 Al Alloy

Y. C. Jin, E. S. Hong, Y. S. Kim, M. S. Lee and C. Y. Yoo*

Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University

Department of Scientific & Technological History

ABSTRACT

To investigate the properties of diffusion bonding of 7050 Al alloy, the diffusion bonding joints have been produced in self-made diffusion bonding hot-press which admits a defined application of the bonding pressure during the heating phase and also rapid cooling after the bonding process with various bonding condition.

The strength of the bond increases with increasing the bonding time and temperature. Shear test at room temperature showed that high strength up to 70% that of parent metal (320 MPa), 220 MPa for the specimen bonded 14 hr at 560°C, with 3 MPa. In this case, however, there is large deformation more than 20% reduction in thickness. The results were correlated with joint characteristics found by optical microstructure and by fractography by SEM. When the strengths of the bonds are more than 50% that of parent metal, a great deal of dimples stretched along the direction of shear stress are observed over the fractured surface of the bond. On the microstructure of the bond line, initial morphology of the bond line disappeared for the grain boundary migration with increasing the bonding time.

1. 서 론

확산접합(diffusion welding)은 접촉된 재료의 표면이 유착(coalescence)되어 접합이 일어나는 고상 접합법으로서¹⁾, 두개의 깨끗한 표면을 불활성 분

위기나 진공상태의 고온(0.5-0.8 Tm)에서 접촉시켜, 적절한 압력을 가하면서 두 표면을 접합시키는 방법을 말한다.

확산접합이 이루어지기 위해서는 creep 변형, 계면에서의 확산, 재결정 형성, 결정립 성장 등의

여러가지 현상이 일어나야 한다. 확산접합을 위하여 기본적으로 조절해야 할 변수로는 접합온도, 접합압력, 접합시간, 표면조도, 표면의 청결상태, 접합시 용기내부의 진공도 등이 있다²⁾. 이들 각각의 인자들이 접합강도에 영향을 미치기 때문에 각 재료에 있어서 이상적인 조건을 찾는 연구가 많이 수행되어 왔다^{3,9)}.

특히 이러한 변수 중 접촉표면에 존재하는 산화막과 표면오염은 확산의 장애를 가져올 수 있다. 상온의 대기중에서 Au를 제외한 모든 금속은 20-100Å의 산화막으로 덮여 있으므로³⁾ 확산접합을 촉진시키기 위해서 산화막을 기계적인 방법으로 제거하는 것을 고려할 수 있다. 그러나 대부분의 금속에서 산화막은 금속히 재생되므로 계면에서의 산화막은 불가피하게 존재한다. 표면의 미소 돌출부의 높이와 산화피막의 두께가 원자간 거리에 비해서 훨씬 크므로 원자간 인력이 작용할 수 없고, 따라서 산화막이 파괴되고 순수한 금속표면이 접촉될 수 있도록 미소 돌출부의 크립변형과 같은 다른 기구들이 수반되어야만 한다^{4,5)}.

특히 Al은 치밀하고 안정한 산화피막으로 덮여 있기 때문에 확산접합이 어렵고, 접합시 변형량을 크게 하거나^{6,7)} 삽입금속이 사용된다⁸⁾. 그러나 변형량이 크면 정밀성을 저하시키고, 삽입금속을 사용하면 접합부의 조성 및 조직상의 전이층이 남기 때문에 접합된 부재의 사용환경에 대한 문제가 남아 있다.

Al 합금의 확산접합에 대한 연구는 2000 계열의 합금과 항공기용 초소성재료인 7475, 용접용 합금인 7003에 대한 것이 주류를 이루고 있으며, 이들 실험의 결과도 실험장치와 접합분위기에 따라 많은 차이를 보여 주고 있다^{3,9-10)}. 따라서 본 연구에서는 약 10^{-1} torr의 공업적 진공하에서 7050 Al 합금의 확산접합성을 알아보기 위하여 접합온도, 접합시간 및 하중을 변화시켜 안정한 접합조건을 조사하였고, 각 접합조건에 따른 접합강도와 접합조

직을 관찰하여 7050 합금의 확산접합현상을 규명하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

2.1. 시편 준비

본 실험에 사용된 7050 Al 합금의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

위의 조성을 갖는 판상 재료를 480°C에서 24시간 균질화 처리를 하고, 460°C에서 열간압연하였으며 표면을 연삭한 후 냉간압연하여 3mm 두께의 판상 시료를 얻었다. 압연하여 얻은 판상 시료를 10×10mm로 가공한 뒤 잔류응력을 제거하기 위하여 420°C에서 6시간 열처리를 하였다. 모든 재료는 일정한 표면조도와 청결도를 얻기 위해 SiC 연마지 #1200으로 연마한 후 초음파 세척기에서 아세톤으로 세척하였고 이때 Roughness Tester로 시편의 표면 돌출부의 높이(Hmax)를 측정된 결과 4.5 μm이었다. 세척작업을 한 후 즉시 시편을 연마 혼적이 서로 수직이 되게 접촉시켜서 접합장치에 장입하였다.

2.2. 접합공정

실험에 사용한 접합장치는 본 실험에 적합하도

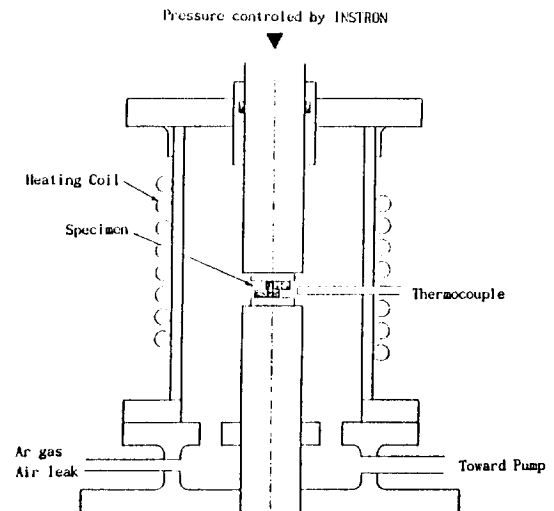


Fig. 1. Schematic diagram of the bonding chamber.

Table 1. Chemical compositions of specimen.

elements	Zn	Mg	Cu	Si	Mn	Zr	Al
wt%	6.2	2.2	1.9	0.12	0.10	0.09	bal.

록 자체 제작한 것으로서 가열장치, 온도제어장치, 그리고 가압장치의 세 부분으로 구성되어 있으며 그 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 시편을 접합장치에 장착하고 10^{-1} torr 하의 아르곤 가스 분위기에서 520-560°C의 온도까지 1°C/sec의 속도로 가열한 후 30분간 유지하고 유압 서보 만능시험기로 접합하중을 가하였다. 접합공정이 끝난 후 120°C에서 24시간 동안 시효처리 하였다. 접합조건은 접합온도 520-580°C, 접합압력 3-5 MPa ($0.3-0.51 \text{ Kg/mm}^2$), 그리고 접합시간 30-900분으로 변화시켜 접합하였다.

또한 접합시료의 변형량에 따른 접합강도의 영향도 함께 고려하기 위해서 하중을 100 MPa로 한 후 변형량이 각각 10-40%가 될 때까지 하중을 가하여 그 때의 전단강도를 함께 비교하였다.

2.3. 접합체의 강도 측정 및 분석

접합체의 강도 측정은 0.033 mm/sec의 속도로 전단시험을 하였으며 전단시편과 grip의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 접합체의 파괴강도는 파괴 때까지 작용한 힘을 접합면적으로 나누어 구하였으며 전단시험한 후 파단이 일어난 파단면은 주사전자현미경으로 관찰하였다. 접합계면층의 관찰은 접합체를 종단면으로 절단하여 광학현미경으로 관찰하였다.

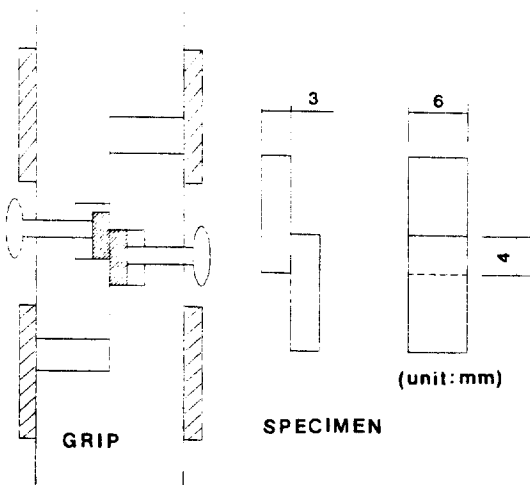


Fig. 2. Schematic diagram of specimen and grip for shear test.

3. 결과 및 고찰

3.1. 접합계면관찰

Photo 1은 7050 Al 합금의 접합시간의 변화에 따른 접합계면의 진행 상태를 나타낸 것이다. 접합시간이 증가함에 따라서 크립변형량이 증가하고, 이에 따라서 산화막이 존재하지 않는 영역이 (a), (b), (c)의 순으로 증가하고 있으며, 또한

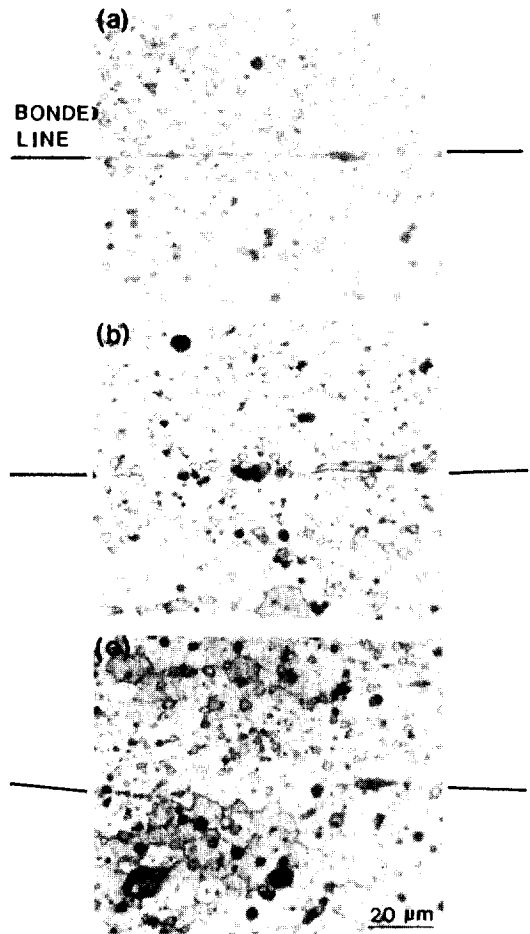
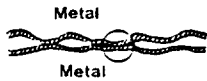


Photo 1. Typical joint interface region in 7050 Al alloy.
 (a) first stage (560°C, 3 MPa, 3 hrs)
 (b) second stage (560°C, 3 MPa, 6 hrs)
 (c) third stage (560°C, 3 MPa, 14 hrs)

계면에서의 결정입계의 이동이 일어나고 있다. (a)는 560°C 에서 3 MPa 로 3 시간 동안 접합한 시편의 접합계면으로서 계면 전체에 연속적인 산화막이 형성되어 있으며, 국부적으로 산화막이 파괴된 곳을 통하여 접합부가 형성되고 있다. (b)는 560°C 에서 3 MPa 로 6 시간 동안 접합한 것으로 시간과 온도의 증가에 따라서 접합계면이 불연속적으로 단락되고, 접합부의 크기가 증가하고 있다. (c)는 560°C 에서 3 MPa 로 14 시간 동안 접합한 것으로서 형성된 접합부에서 초기의 계면이 완전히 사라진 부분이 관찰되며, 이곳에서 결정입계의 이동과 함께 결정립이 성장하였다. 이는 입계 확산에 의해서 결정입계의 이동과, 접합시간이 길어짐에 따른 결정립 성장에 의한 것으로 생각된다. (a), (b), (c)의 전단강도 값은 각각 150 MPa, 190 MPa 와 220 MPa 였다.

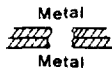
Al 합금은 산화막이 치밀하고 안정하기 때문에



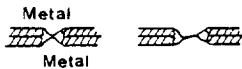
(a) original interface



(b) fracture of brittle oxide film



(c) formation of overlapped oxide-free metallic areas



(d) extrusion of the metal through the gaps created in the oxide and shear displacement of the points of the contact of oxide-free surface

Fig. 3. Schematic illustration of the bonding process¹⁾.

산화막을 통한 원자의 확산은 고려할 수 없으며 원자의 확산이 일어나기 위해서는 다음과 같은 과정이 반드시 필요하며 Fig. 3¹⁾에 모식도를 나타내었다. 접촉된 두 표면은 모두 치밀한 산화막으로 덮여 있으며 이들의 파괴를 위해서는 반드시 접합하중이 필요하다. 높은 접합온도에서 하중을 주면 접합시간이 경과함에 따라서 전위의 이동과 상승 운동이 일어난다. 이때 계면으로 이동하던 전위는 산화막에 집적되며¹⁾, 전위의 집적에 의한 응력집중은 산화막에 균열을 형성시키거나 이전에 존재하던 전위들을 이동시키든지, 또는 산화막에 새로운 전위를 형성시키면서 완화될 수 있다. 응력이 완화되는 형태는 금속과 산화막의 상대 경도와 산화막의 특성에 좌우된다. Al 합금에서는 순금속과 산화막의 경도가 각각 HV 15 와 1800 으로 그 차이가 크므로 산화막에 집적된 전위는 산화막으로부터 image force 를 받게되며 응력집중이 발생하고, 산화막에 균열을 형성하면서 완화되고 산화막의 균열은 더욱 확장된다. 그러나 계면의 양쪽의 같은 곳에서 전위가 동시에 집적되지는 않을 것이며, 산화막의 파괴는 Vaidyanth 와 Milner¹¹⁾에 의해 제시된 바와 같이 계면의 양쪽에서 독립적으로 일어날 것이다. 이와 같은 상태에서 원자의 확산에 의한 접합부의 형성은 일어날 수 없으며, 원자의 확산이 일어나기 위해서는 산화막이 파괴된 영역이 확장되어 양쪽 계면에서 서로 포개지는 영역이 형성되어야 한다.

고온에서 크립에 의한 변형을 고려할 때 접합온도, 접합시간, 그리고 접합하중의 증가는 모두 변형량을 크게하는 요인이 되며, 따라서 변형량의 증가와 더불어 산화막이 없는 금속 표면이 증가하여 원자의 확산경로를 증대시킬 것으로 생각된다.

3.2. 접합조건에 따른 전단강도의 변화

3.2.1. 온도 및 시간에 의한 영향

Fig. 4는 7050 Al 합금을 각각 520°C, 540°C 그리고 560°C 에서 30 분에서 14 시간까지 변화 시켜 가면서 하중을 3 MPa 로 접합한 경우 접합부의 전단강도를 나타낸 것이다. 초기에는 강도가 시간에 따라서 급격히 증가하다가 3 시간이 지남에 따라서 접합강도의 기울기가 낮아지고 있다. 540°C 에서 3 시간 동안 접합하였을 때 전단강도는 100 MPa 를

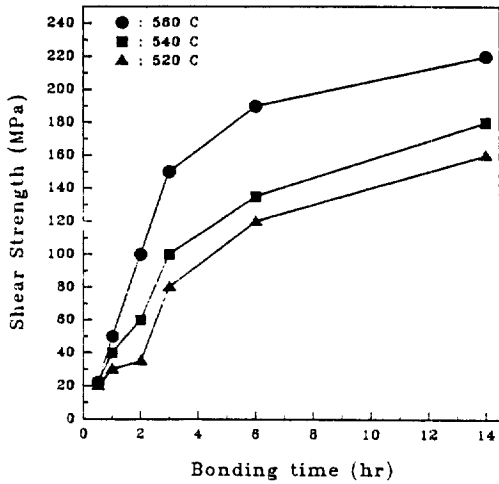


Fig. 4. Dependence of shear strength on bonding time and temperature.
(bonded with 3 MPa pressure)

나타내었으며, 560°C 에서는 150 MPa 를 나타내었다. 접합시간이 6 시간이 되면서 강도의 증가율이 적어지고 모재 전단강도(320 MPa)의 약 60% 에 달하는 강도값을 나타내었다.

확산접합은 접합시편의 미소 돌출부가 소성 변형을 일으키면서 산화막을 파괴하고, 이 파괴된 틈을 통해서 모재의 금속원자가 상호확산되어 일어난다. 접합온도가 높을수록 고온에서 모재내의 전위의 상승운동과 입계의 활주가 더 활발하게 이루어지고 따라서 크립변형량이 증가되어¹¹⁾ 산화막의 파괴가 더욱 커진다. 또한 고온에서는 자기확산 활성화에너지와 크립의 활성화에너지가 같아지며¹²⁾ 이들의 상호의존성이 크므로 온도의 증가에 따른 자기확산의 증가와 함께 계속적인 크립변형이 일어나 확산경로가 증가하고, 따라서 접합강도가 커진다. 또한 접합시간의 증가에 의한 영향에서도 시간의 증가에 따라서 크립변형이 증가하며, 원자의 확산량이 함께 증가하므로 접합강도가 증

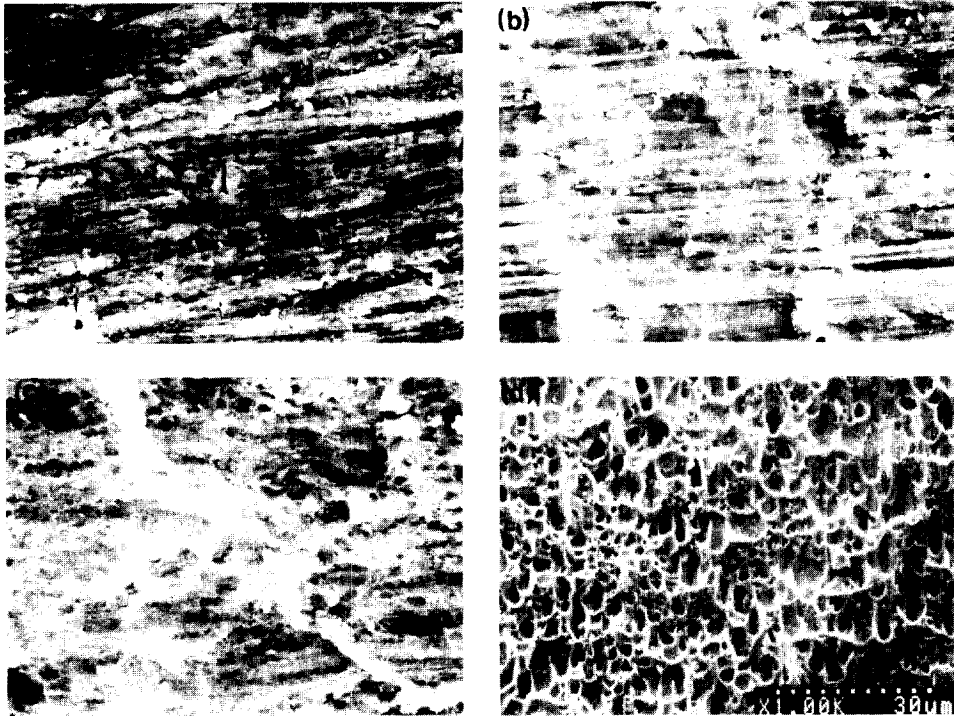


Photo 2. Fracture surface of bond line failure, bonded at 560°C, with 3 MPa.
(a) 1 hr (b) 2 hrs (c) 3 hrs (d) 14 hrs

가된다고 생각된다.

Photo는 560°C, 3 MPa의 압력에서 접합시간을 1시간, 2시간, 3시간 그리고 14시간으로 하여 접합한 시편의 전단시험 결과 얻은 파단면 사진으로 Fig.4의 결과와 잘 일치하는 파단면 형태를 확인할 수 있다. (a)는 1시간 접합한 것으로, 접합하중에 의해서 모재의 미소 돌출부가 맞물린 상태에서 산화막이 없는 금속면 사이의 접촉은 아주 국부적으로만 형성되어 있으며, 사진에 나타난 파괴형태는 접합부의 연성파괴에 의한 형상이라기보다는 응축 마모면과 유사한 형상을 나타내고 있다. (b)와 (c)는 각각 2시간, 3시간 동안 접합한 것으로 시간이 지남에 따라 산화막이 없는 금속 접촉면의 증가와 함께 강한 접합부를 형성하여 파괴 형태가 모재의 파괴 형태와 같은 연성파괴 형태를 국부적으로 보여주고 있으며, 접합시간이 증가할 때는 발생하는 dimple의 양이 많아짐이 확인되었다. (d)는 14시간 동안 접합한 것으로 전형적인 연성파괴의 형태를 보여주며, 이는 강한 접합부의 형성에 의한 결과로 생각된다. 전단하중하에서 불균일한 소성변형 조건으로 인해서 타원형의 전단방향으로 연신된 dimple들이 관찰되었다.

3.2.2. 접합하중에 의한 영향

Fig.5는 접합하중을 2 MPa에서 4 MPa로 변화

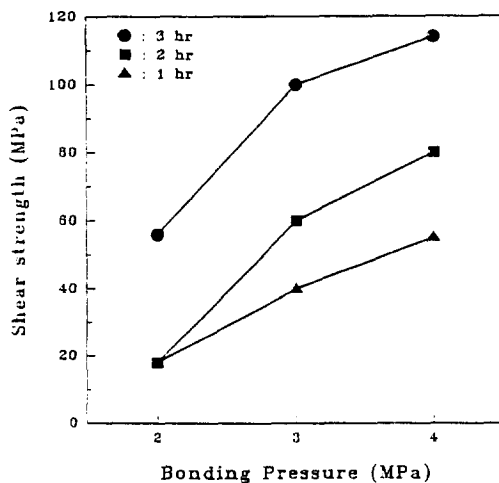


Fig.5. Dependence of shear strength on bonding pressure.
(bonded 3 hr, at 560°C)

시켜 가면서 3시간 동안 접합한 결과, 접합부의 전단강도와 하중과의 관계를 나타낸 것이다. 이 경우에도 접합하중이 증가함에 따라서 강도가 증가하며, 접합시간이 길어짐에 따라서 접합하중에 관계없이 접합강도가 증가하였다. 4 MPa의 하중으로 3시간 동안 접합한 결과 114 MPa의 전단강도를 얻었다. 원자의 확산은 확산온도와 시간의 함수¹³⁾이므로 하중과 직접적인 관계는 없으나, 접합강도가 증가하는 것은 접합하중을 증가시키기에 따라 Al 합금의 확산접합에서 반드시 수반되어야 하는 산화막의 파괴를 위한 모재의 미소 돌출부의 변형량이 증대되어 산화막이 없는 금속의 표면이 더 많이 노출됨으로써 원자의 확산 영역이 넓어지므로 같은 접합 온도와 시간에서 접합강도가 증가된다.

3.2.3. 변형률과의 관계

Fig.6은 100 MPa의 하중으로 접합장치 안에 있는 시편의 두께가 일정한 양만큼 감소하도록 소성변형 시킨 뒤에 540°C에서 0.5 MPa로 3시간 유지시켜 접합한 시편의 전단강도를 나타낸 것이다. 시편의 두께 감소율이 커짐에 따라서 접합강도가 크게 증가하다가 두께 감소율이 30%를 초과하면서 모재의 전단강도에 달하는 접합강도를 보

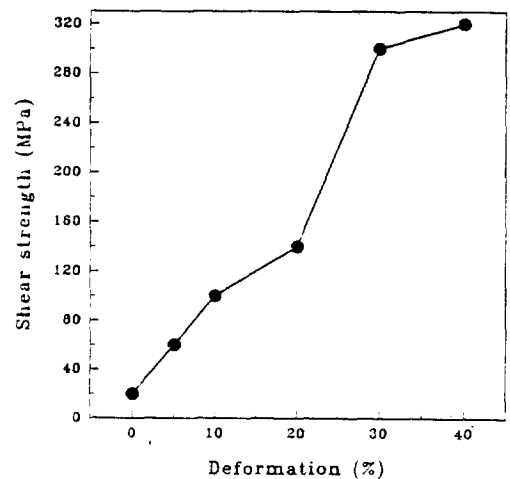


Fig.6. Dependence of shear strength on deformation of the specimen.
(bonded 3 hr at 540°C after proper deformation)

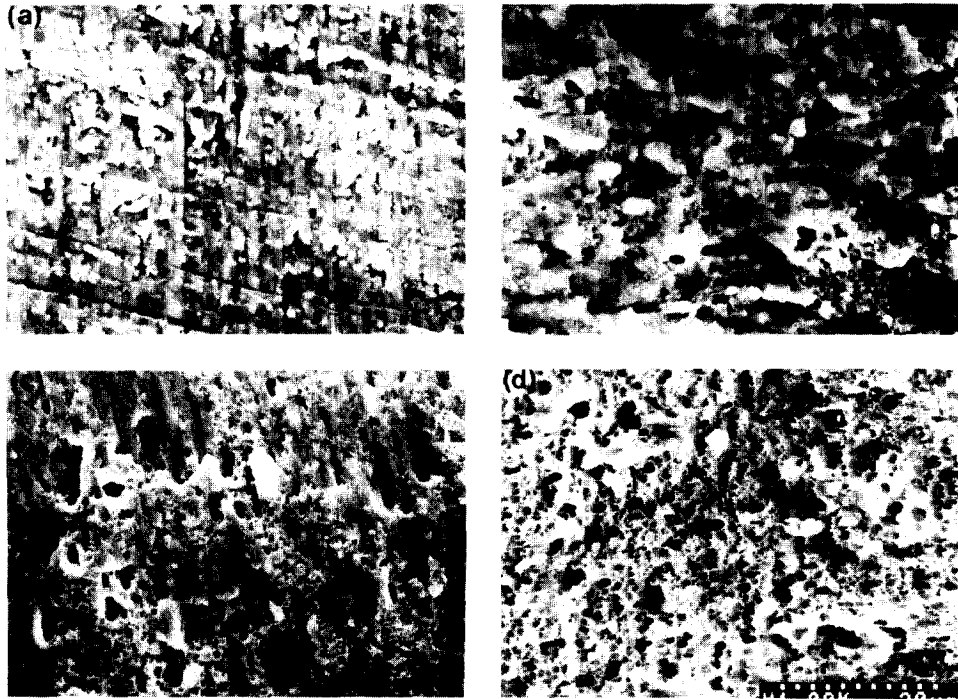


Photo 3. Fracture surface of bond line failure, bonded at 540°C, 3 hrs.

(a) 5%, (b) 10%, (c) 20% and (d) 30% deformed

이지만 증가폭은 현저하게 둔화되었다. 두께 감소율이 증가함에 따라 접합강도가 증가하는 것은 초기의 소성변형률이 증가함에 따라 산화막의 파괴가 증가하고, 산화되지 않은 새로운 금속표면의 양이 증가하여 원자의 확산 경로가 크게 증가하기 때문이다. 그러나 두께 감소율이 30% 이상에서의 접합강도는 접합계면에서 모재와 연속적인 강한 접합부가 형성되고, 모재와 접합부의 기계적 성질이 비슷하게 유지되어 접합강도가 크게 증가하지 않는다. 접합시편의 두께 감소율이 10%인 경우에 100 MPa의 전단강도를 나타내었고, 30%일때 300 MPa의 높은 전단강도를 나타내었으며 이러한 경우에 대부분 모재의 일부가 tearing 되었다. 이 실험에서는 접합하중을 0.5 MPa의 낮은 값으로 하였기 때문에 접합하중하에서의 변형을 무시한다면 산화막이 파괴될 수 있는 시간은 초기의 100 MPa의 변형하중으로 인한 소성변형이 일어나는 수 분 정도의 시간 뿐이므로 접합시간에 비해서 아주 짧다. 따라서 산화피막이 파괴된 후에는 접합부의 형성에 대한 하중의 영향은 아주 작은 것으로 생

각된다.

Photo 3은 접합 후 두께 감소율(%)에 따라서 나타나는 파단면 사진으로서 소성변형을 통한 산화막의 파괴정도가 접합부의 강도에 크게 기여함을 알 수 있다. Photo 3(a)는 Photo 2(a)는 연마 흔적만이 관찰되었고 (b)와 (c)는 (a)형태의 바탕에 부분적으로 dimple들이 명확하게 관찰되며, (c)에서는 (b)보다 더 많은 dimple들을 볼 수 있다. (d)는 30%로 변형시켜 접합한 시편의 파단면 사진으로, 모재파단면 전체에 균일한 미소 dimple들을 관찰할 수 있다. 따라서 Photo 2과 Photo 3의 파단면들을 비교하여 볼 때, 각각 접합부의 파단면의 형태가 접합조건에 따라 크게 달라지는 것이 아니라, 접합조건에 따르는 접합강도의 증가에 따라서 파면의 형태가 변화함을 알 수 있다. 접합하중이 증가할 때 파단면의 형태는 기계적인 접합의 결과로 나타나는 응착 마모면과 같은 형태에서 점차 연성파괴의 거동을 보이는 dimple의 양이 증가됨을 알 수 있다.

4. 결 론

7050 Al 합금을 여러가지 접합조건에 따라 접합 후, 각 접합조건에서 얻어진 시편의 접합계면의 현미경조직을 관찰하고, 접합강도와 접합부의 파단면 형태를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접합계면의 형상은 접합시간이 길어짐에 따라 직선형에서 불규칙적인 계면형태로 변화되며, 560°C 에서 14 시간 동안 접합한 경우에는 접합면에서 입계의 이동이 일어나고, 결정립의 성장이 일어났다.
2. 모재 강도의 50% 이상을 얻기 위한 최적의 접합조건은 접합온도와 하중이 각각 520°C, 3 MPa 에서는 14 시간 이상의 접합시간이 필요하였으며, 540°C, 3 MPa 에서는 6 시간 이상, 560°C, 3 MPa 에서는 3 시간 이상이 걸렸다.
3. 접합시간과 접합하중이 증가함에 따라서 접합강도가 증가하였고, 온도가 높은 경우에 더 큰 접합강도를 얻었으며 560°C 에서 3 MPa 로 접합한 결과 모재강도의 70%에 도달하였다.
4. 모재의 소성변형량의 크기가 증가함에 따라 접합강도는 크게 증가하였으며, 모재의 두께가 30% 이상 감소하는 경우에 거의 모재의 전단강도에 도달했다.
5. 접합강도가 60 MPa 이상에서부터 파단면에서 국부적으로 dimple 들이 나타났으며, 접합강도가 모재 전단강도의 50% 이상에서는 파단면 전체에서 전단방향으로 연신된 균일한 dimple 면이 관찰되었다. 접합강도가 모재의 전단강도와 비슷한 경우에는 계면 주위의 모재가 찢기는 현상이 일어났다.

〔후 기〕

본 연구는 1991 년 교육부의 신소재분야 학술연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. W.A. Owczarski and D.F. Paulonis : Weld. J. Feb. (1981) 22-33
2. 大前 堯, 深谷保博 : 日本銲接學會誌 50(1981) 343-353
3. T.Latouche, M.Cailler and B.Sander : Weld. Int. 4 (1990) 964-969
4. Derby B and Wallach E R : Met.Sci. 16(1982) 49-456
5. Derby B and Wallach E R, Diffusion Bonding : Met.Sci. 18(1984)427-431
6. D.Houser, D.A.Kammer, J.H.Dedrick : Weld.J. 47(1967) 115-225
7. I.M.Barrta : Weld.J. 44 (1964) 241s-247s
8. 大橋, 橋本 : 日本銲接學會誌 45(1976) 76-81
9. J.Pilling, N.Ridley : Mater.sci. & Tech. 3 (1987) 353-359
10. O.Ohashi, K. Sasabe : Weld.Int. 4 (1990) 775-780
11. L.R. Vaidyanath, M.G.Nicholas, D.R.Milnrer : British Weld. J. 6(1959)
12. O.D.Sherby, P.M.Burke : Prog.Mat.Sci. 137 (1967) 325-390
13. G.H.Geiger, D.R.Poirier : "Transport Phenamena in Metallurgy" (1972) Addison-Wesley Pub. 431-449