[논문] 열처리공학회지, 제16권 제1호(2003)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 16, No. 1, (2003) pp. 2~9*

Al합금과 이종금속의 접합계면에서의 미세조직과 접합강도에 미치는 열처리조건의 영향

김익수* · 최병영* · 강창룡**
*전북대학교 공과대학 신소재공학부, 자동차 신기술연구센타
**부경대학교 공과대학 재료공학부

The Effect of the Heat Treatment Conditions on the Strength and Microstructure in the Bonded Interface in Dissimilar Metal and Aluminum Alloy

Ick-Soo Kim,* Byung-Young Choi* and Chang-Yong Kang**
**School of Adv. Mate. Eng., Automobile Hi-Technology Res. Center, Chonbuk National Univ., Chonju 561-756, Korea*
**Div. of Mat. Sci. and Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-031, Korea*

Abstract The aluminum alloy which is light and has excellent thermal conductivity and iron base alloy that is remarkable heat-resistece and wear resistence properties were bonded together. The bond was created between a stationary and a rotating member by using the frictional heat generated between them while subjected to high normal forces on the interface of Al alloy and iron base alloy. The microstructure of the bonded interface of friction welding and the strength in the bonded interface formed under various bonding conditions were examined through TEM, SEM with EDX and triple bending test. In interface of bonding materials formed after various heat treatment, bonding strength was substantially different, resulting from formation of intermetallic compound or softening during annealing.

(Received June 22, 2002)

Key words: Bonding, Al-Fe, Microstructure, Interface strength, Intermetalliccompound, Friction welding, Upset welding

1. 서 론

최근, 자동차 산업을 비롯한 항공기 산업 등과 같은 수송기기산업 분야에서는 에너지 저감 및 환경문제 극복의 관점에서 수송기기의 경량화를 위해 알루미늄 합금의 이용이 확대되고 있다. 이에 따라 비강도(인장강도/비중)가 크고 내식성 및 가공성이 좋으며 경제성이 뛰어난 알루미늄 합금과 이종금속간의 접합의 중요성 또한 새롭게 대두되고 있다[1-5]. 그러나 일반적으로 알루미늄과 이종금속간의 접합에서, 상태도에 따르면 알루미늄의 접합계면에 취약한 금속간 화합물이 생성되어짐에 따라 높은 신뢰성을 갖는 강도를 보장하기는 어렵다[6~8]. 알루미늄 합금은 양호한 열 전도성을 구비한 경량구조용 재료로서 내연기관에의 사용범위가 넓어지고 있으나 철계 합금에 비해 내마모성 및 고온강도가 열악하기 때문에 최근에 그러한 점을 보완하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[6-8].

본 연구는 이러한 것에 기인하여, 특히 경량성을 중심으로 우수한 열전도율과 내열성을 갖는 재료의 개발을 목적으로, 가볍고 열전도율이 뛰어난 알루미늄 합금과 내열성, 내마모성이 우수한 철합금과의 마찰접합(friction welding) 및 업셋용접(upset welding)을 통해 여러 가지 접합조건 중에서 최적의 접합조건을 알아 보고 접합후 처리조건의 변화에 따라 생성되는 반응화합물을 포함한 미세조직을 관찰하여, 그것이 계면의 접합강도에 미치는 영향을 고찰하였다.

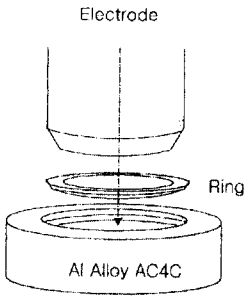
2. 실 험 방 법

본 실험에 사용된 시료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 업셋용접에서는 철계 소결재와 알루미늄

Table 1. Chemical composition of the materials used (mass%)

Al alloy AC4C	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	pb
	0.25max	6.5~7.5	0.20~0.45	0.35max	0.55max	0.35max	0.10max	0.20max	0.10max
	Sn	Cr	Al						
	0.05max	0.10max	Bal						
Fe-Sintered	C	Ni	Cr	Mo	Co	W	Cu	Fe	
(PB7E)	1~1.5	0.8~2.3	5~7.5	0.3~0.7	6.5~8.5	1.8~3.3	11~15	Bal	
steel SUH31	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Fe
	0.35~0.45	1.50~2.50	0.60max	0.40max	0.030max	13.00~15.00	14.00~16.00	2.00~3.00	Bal
Al alloy A1070	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al	
	0.04max	0.20max	0.03max	0.04max	0.03max	0.25max	0.03max	Bal	
steel S15C	C	Si	Mn	P	S	Fe			
	0.13~0.18	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030max	0.035max	Bal			

합금 AC4C, 오오스테나이트계 내열강 SUH31과 알루미늄합금 AC4C 2종류를 조합시켜 접합한 시료를 사용했다. 업셋용접의 접합형상과 접합조건의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 열처리에 의한 접합강도의 영향을 검토하기 위해 철계 소결재와 알루미늄합금 AC4C는 773 K×10 h, 673 K×10 h의 조건으로 열처리를 실시 하였으며, 오오스테나이트계 내열강 SUH31과 알루미늄 합금은 773 K×10 h의 열처리를 실시하였다. 두시료 모두 석영관에 아르곤을 봉입하여 전기로에 의해 가열한 후 서냉하였다.



	Current/kA	Bonding Time/ms	Maximum Pressure/kN
PB7E-AC4C	75	800	30
SUH31 AC4C	70	550	30

Fig. 1. The outline of bonding state and bonding condition of the upset welding.

마찰접합은 순 알루미늄 A1070과 탄소강 S15C의 시료를 가지고 6종류의 조건(A~F)으로 접합을 실시하였다. Table 2는 이러한 접합조건을 나타낸다. A와 B 조건의 시료의 특징은 마찰시간과 업셋시간은 같지만 B시료가 마찰압력, 업셋압력, 회전수가 A보다 크며, C와 D, E와 F는 마찰시간만을 변화시켜 D와 F의 시료의 계면에 계면화합물의 생성을 촉진시켰다. 접합계면에서의 미세조직의 관찰은 투과전자현미경(TEM)과 주사전자현미경(SEM)에 의해 관찰하였으며 EDX에 의해 계면의 원소를 분석하였다. 또한 접합부의 강도를 평가하기 위해 시험편 크기 2.5×3.0×0.35 0.65 mm의 서브 사이즈의 시험편을 제작, 3점 굽힘시험(triple bending test)을 실시하였으며 파단된 단면을 SEM에 의해 관찰하였다.

Table 2. Condition of friction welding

Specimen	Friction pressure (MPa)	Friction time (s)	upset pressure (MPa)	upset time (s)	rotation speed (rpm)
A	9.1	1	29.3	6	18.00
B	28.6	1	41.2	6	2200
C	7	2	17.5	5	1800
D	7	6	17.5	5	1800
E	28	1	38.5	5	3000
F	28	4	38.5	5	3000

Fig. 2. The microstructure of the bonded interface of upset welding (Fe-sintered material and AC4C) observed by TEM.

여기서 업셋용접과 마찰접합에 대해서는 참고문헌 [9-11]에 자세히 기술하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 계면의 미세조직 관찰

Fig. 2는 TEM에 의해 관찰된 업셋용접 시험편(철계 소결재와 AC4C의 접합상태 그대로)의 접합계면을 나타내고 있다. 사진 하부의 검은 부분이 철이며 상부의 조금 희게 보이는 부분이 알루미늄 이다. 이러한 계면의 미세조직의 관찰결과, 계면에는 금속간 화합물이 발견되지 않았으며, 이러한 결과는 다른 시험편(철계 소결재와 AC4C의 773 K×10 h 열처리를 실시한 시편)에서도 같은 경향이 나타났다.

Fig. 3은 TEM에 의해 관찰된 마찰접합에 의한 각각의 시료의 접합계면을 나타내고 있다. Fig. 3의 a와 b는 각각의 조건A, B에 의해 접합된 시료를 나타내었으며 여기서도 역시 상부의 검은 부분이 철이다. 이러한 철의 부분이 검게 나타나는 것은 알루미늄과 철의 전해연마의 정도의 차이에 의한 것으로 사료된다. Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 3의 b(조건B)의 □부분의 고배율에 의해 관찰된 미세조직 사진으로 Fig. 4의 b와 Fig. 5의 b는 각각의 철, 알루미늄의 암시야상으로 Fig. 3의 철과 알루미늄의 위치관계가 정확했음을 시사하고 있다. Fig. 6 또한 조건 B 시료의 접합계면을 나타내었으며 사진에서 확인된 것과

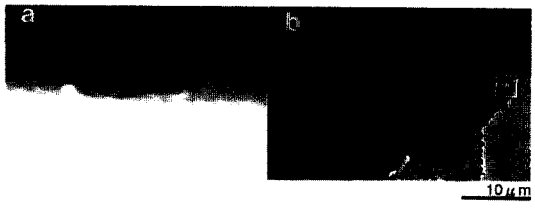


Fig. 3. The microstructure of the bonded interface of friction welding observed by TEM (the upper part : S15C, the lower part : A1070). a) Condition A specimen, b) Condition B specimen.

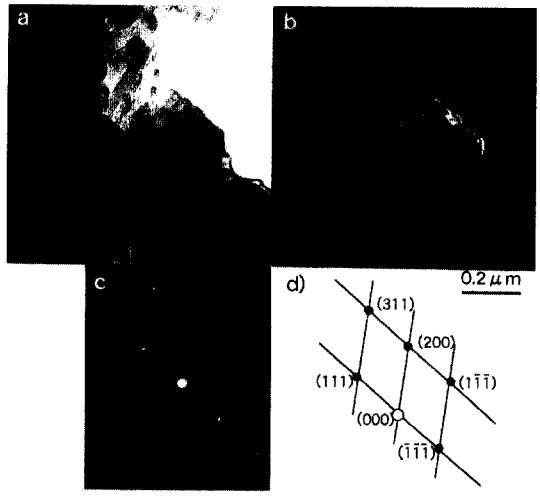


Fig. 4. The microstructure of the aluminum in the bonded interface of friction welding test specimen B observed by TEM. a) Bright field image, b) The dark field image by (111)Al, c) d) Diffraction pattern of Al.

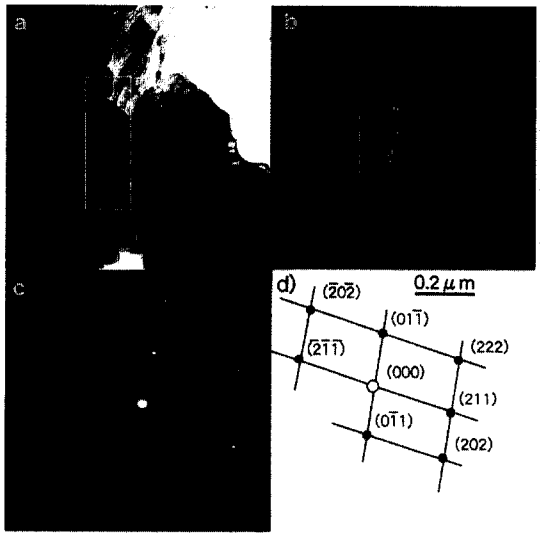


Fig. 5. The microstructure of the Fe in the bonded interface of friction welding test specimen B observed by TEM. a) Bright field image, b) The dark field image by (011)Fe, c) d) Diffraction pattern of Fe.

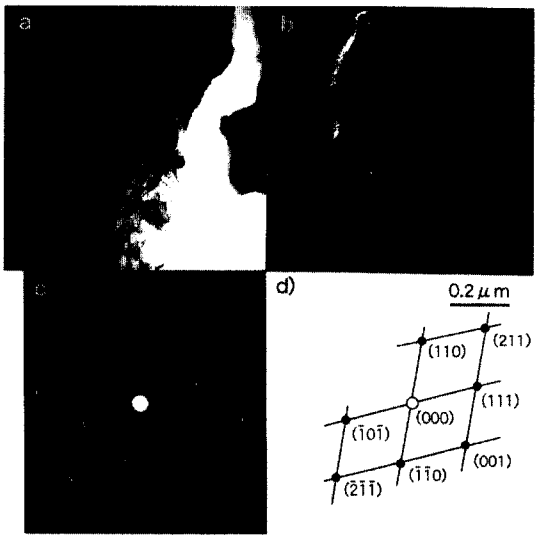


Fig. 6. The microstructure of the bonded interface of friction welding test specimen B observed by TEM. a) Bright field image, b) The dark field image by (110)Fe, c) d) Diffraction pattern of Fe.

같이 Fe의 전자 회절 패턴이 명확한 스포트로 나타나지 않고 있는 것으로 보아 철이 서브 그래인(sub grain)화 되어있는 것으로 생각된다. 미세조직의 관점에서 조건A 시료와 B시료를 비교하여 보면, A시료에 비해 B시료가 마찰압력, 업셋압력, 회전수가 전부

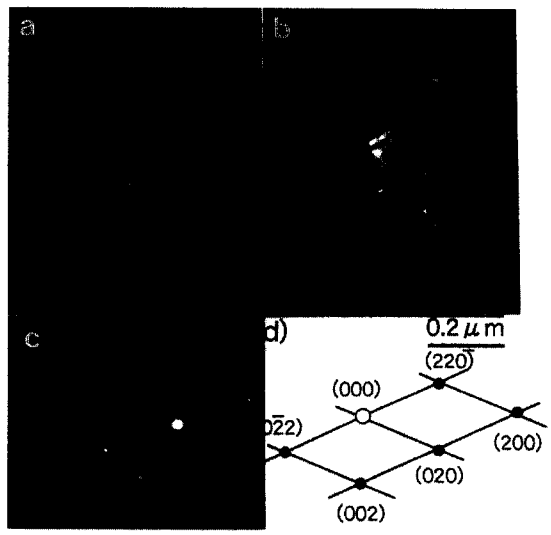


Fig. 7. The microstructure of intermetallic compound Fe_2Al_5 in the bonded interface of friction welding test specimen A observed by TEM. a) Bright field image, b) The dark field image by (022)Fe_2Al_5, c) d) Diffraction pattern of Fe_2Al_5.

크다. 그러므로 접합시 발열량이 크고, 그 결과 시료 A에 비해 결정립이 조대화되어 있는 것이 확인되었다. 또한 A시료에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같은 금속간 화합물 Fe_2Al_5가 생성되어 있음이 확인되었다. Al-Fe의 2원계 상태도에서[12] 판단해 볼 때 금속간화합물의 주위가 알루미늄인 것으로 보아 $FeAl_3$ 또는 Fe_4Al_{13} 등과 같은 알루미늄의 성분비가 높은 화합물의 생성이 예측되었으나 왜 Fe_2Al_5와 같은 화합물이 생성되었는지는 아직 불명확하며 좀 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

두 시료의 강도시험 결과 최대 인장강도는 113 MPa과 115 MPa로 나타났으며 두 시료 모두 알루미늄의 모재에서 파단이 일어났다. N. Kikuchi 등[13]은 탄소강과 알루미늄의 접합에서는 접합계면에 취약한 금속간화합물이 생성되어 접합강도가 저하하는 문제점이 있는 것으로 발표하고 있다. 그러나 본 실험에서는 이러한 보고와는 달리 금속간화합물이 생성된 시료A의 강도가 시료B의 강도와 비교할 때 동등의 접합강도를 나타내었다. 이러한 이유는 Fe_2Al_5의 입자가 미세하고, 그 생성량이 미소하기 때문에 접합계면의 강도에는 큰 영향을 미치고 있지 못하고 있는데 기인된다고 사료된다.

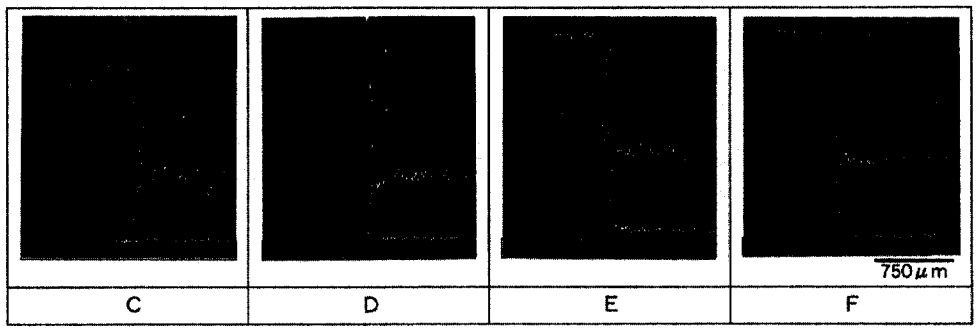


Fig. 8. Linear analysis photograph by EDX of friction welding test specimen.

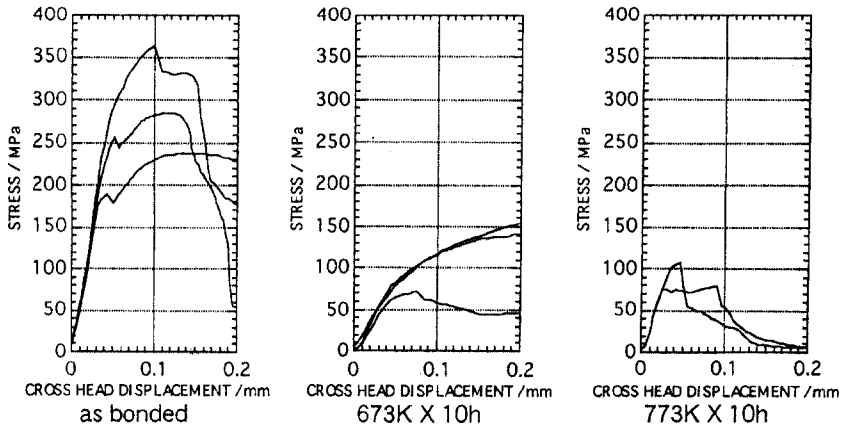


Fig. 9. The triple bending test result of upset welding test specimen (Fe-sintered material and AC4C).

Fig. 8은 시료C와 D의 계면의 EDX에 의한 선분석 결과를 나타내었다. 사진 중앙의 종선이 접합계면이며 좌측의 검은 부분이 알루미늄, 우측의 밝은 부분이 철이다. E와 F의 계면에는 다른 시료와는 달리 E보다 F의 계면폭이 넓게 나타났다. 이것은 F가 E의 시료에 비해 마찰시간이 길었기 때문에 발열량이 증대하여, 화합물이 많이 생성되었음에 기인된 것으로 보여진다. 또한 C와 D를 비교할 때 D시료가 C시료보다 마찰시간이 길었음에도 불구하고 계면 반응상에는 큰 차이가 없었다. 이는 C와 D가 E와 F 시료에 비해 마찰압력, 업셋압력, 회전수 등이 낮음으로 인해 E와 F시료보다 발열량이 억제되었기 때문이라고 사료된다.

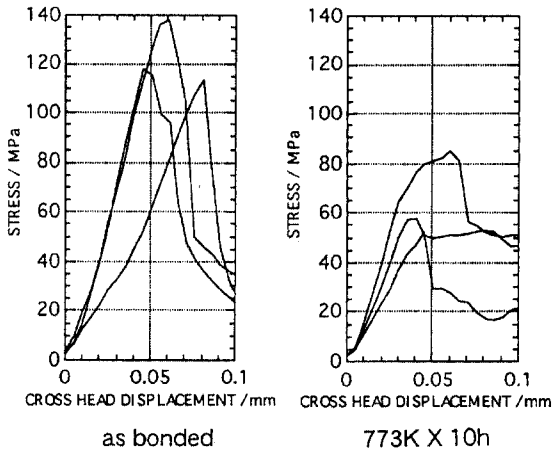


Fig. 10. The triple bending test result of upset welding test specimen (SUH31 and AC4C).

3.2. 3점굽힘 시험 및 파단면 관찰

Fig. 9와 Fig. 10은 업셋용접 시험편(철소결재-AC4C, SUH31-AC4C)의 서브사이즈 시험편을 가지고 실시한 3점 굽힘시험의 결과를 나타내었다. 열처리에 의해 두 시료 모두 강도가 크게 떨어지

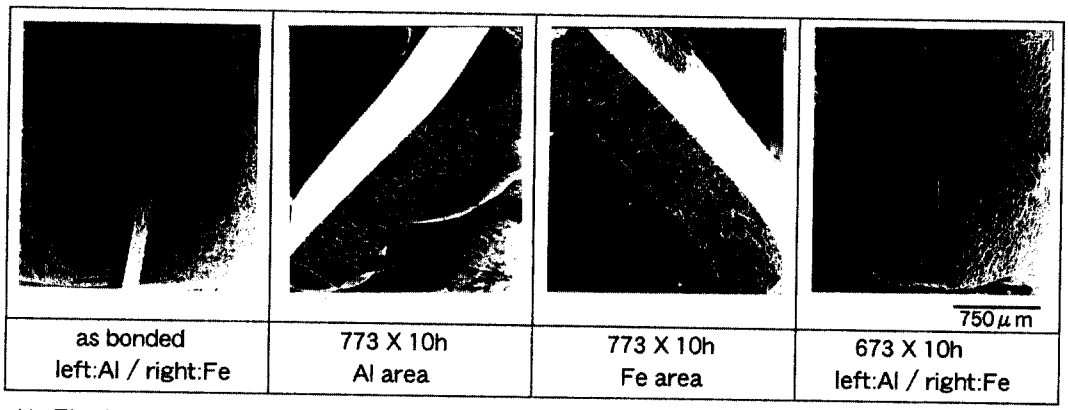


Fig. 11. The fracture surface after the triple bending test of upset welding test specimen(Fe-sintered material and AC4C) observed by optical microscope.

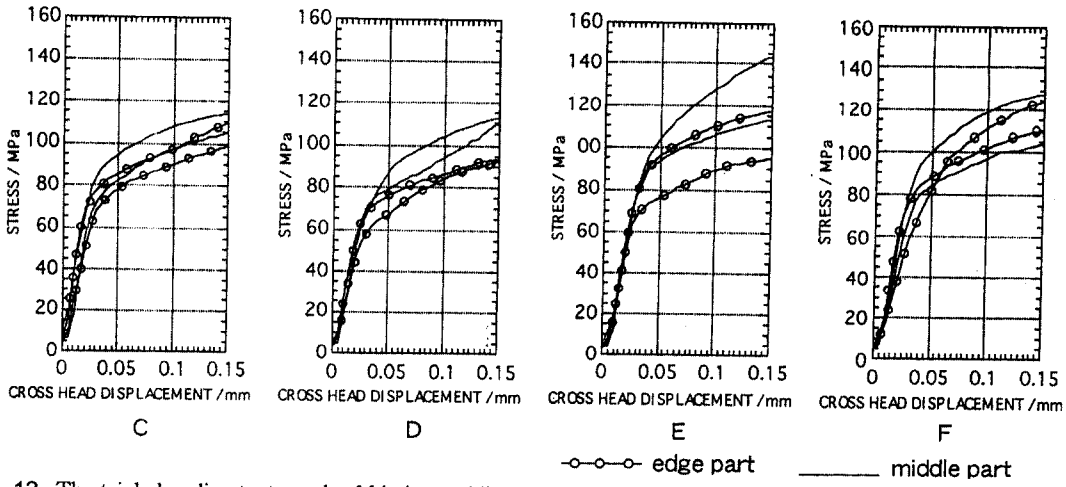


Fig. 12. The triple bending test result of friction welding test specimen.

고 있음을 알 수 있다. 773 K×10 h의 열처리를 행한 시료는 바로 파단되었으며 673 K×10 h의 열처리를 행한 시료는 최종적으로는 파단되었으나 Fig. 11의 673 K×10 h의 사진에서 보는 것과 같이 일부 알루미늄의 모재에서 파단이 일어나는 데에 따라 그래프 상에는 낮은 강도를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 이 시료가 673 K×10 h의 열처리에 의해 금속간 화합물의 생성되지 않았다고 가정한다면 계면의 접합강도는 충분하지만 어닐닝에 의한 알루미늄 합금의 모재가 연화하여 본래의 변형응력에 도달하기 전에 변형이 진행되었다고 생각할 수 있다.

Fig. 12는 마찰접합 시험편 C와 D의 서브 사이즈 시험편에 의한 3점 굽힘시험의 결과이다. C, D, E는 중간부의 변형응력 영역이 모서리부 보다 높게 나타나므로 접합강도는 중간부가 높다고 할 수 있다. F에 대해서는 장시간의 마찰시간에 의해 모서리부 역시 중간부와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 E와 F는 C와 D시료보다 전체적으로 변형응력이 높게 나타나므로 마찰응력, 업셋압력, 회전수등이 높을수록 접합강도는 높게 나타난다고 볼수있다(여기서 모서리부와 중간부는 3점 굽힘시편의 채취위치 즉, 회전축을 중심으로 3등분한 것으로 시편의 가장자리와 중간부분, 끝 모서리부분을 나타낸다). 이러한 결과를 토대로 마찰접합에 관해서 접합강도는 시편의 중심부<모서리부<중간부의 순으로 나타났다. 이것은 회전속도와 발열량에 관계하고 있다고 생각되어지며 모서리부는 회전속도가

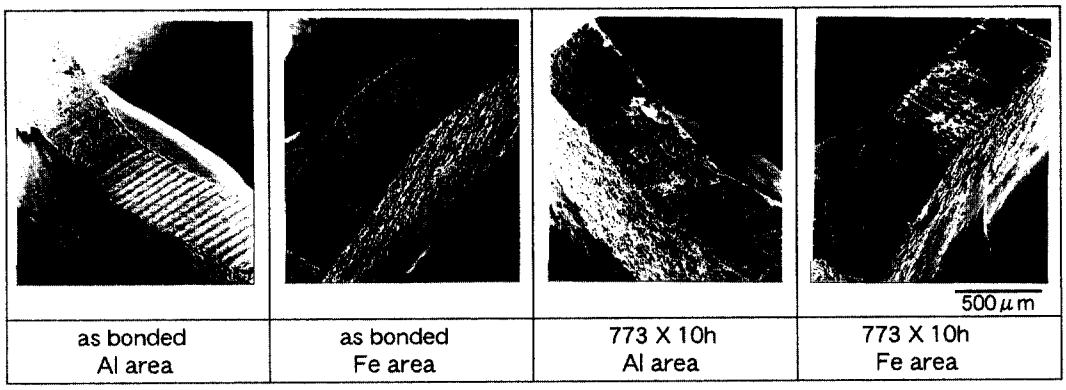


Fig. 13. The fracture surface after the triple bending test of upset welding test specimen(SUH31 and AC4C) observed by optical microscope.

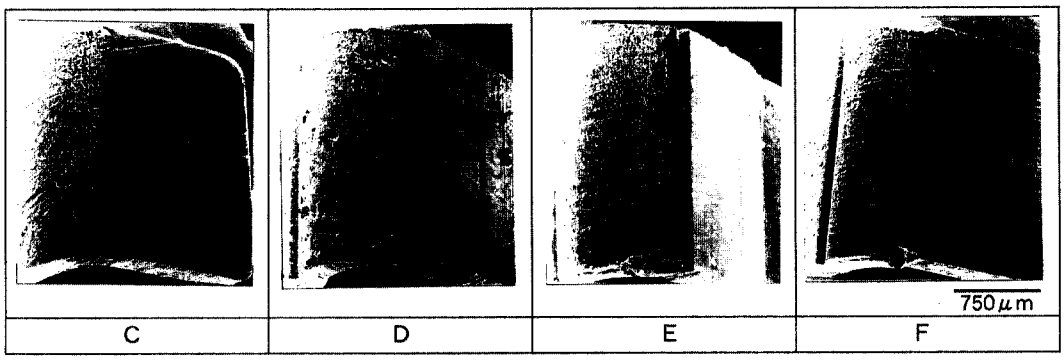


Fig. 14. The fracture surface after the triple bending test of friction welding test specimen observed by optical microscope (middle part : left; Al / right; Fe).

크고 발열 또한 크지만 외부와 접하고 있는 관계로 방열현상이 일어나며, 중심부는 방열현상은 크게 일어나지 않지만 회전속도가 작다. 따라서 발열과 방열의 균형을 이루며 아주 높은 고온을 형성하게되는 중간부의 접합강도가 가장 높게 나타나는 것으로 사료된다. 또한, EDX 선분석 결과, 시료 F는 확실하게 계면에 금속간 화합물이 형성되어 있음에도 불구하고 아주 높은 접합강도를 나타내고 있음으로 보아 접합강도에 있어서 금속간 화합물의 영향은 본 실험의 조건에서는 크게 작용하지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 11과 Fig. 13은 업셋용접에 의해 제작된 시료를 사용하여 각각의 조건에서 실시된 3점굽힘 시험후의 시험편의 파단을 광학현미경에 의해 관찰한 것으로 Fig. 13의 SUH31-AC4C와 열처리하지 않은, 접합상태 그대로의 시료, SUH31-AC4C와 773 K×10 h의 열처리를 행한 시료의 파단형태는 두 시료 모두 알루미늄의 모재에서 파단이 일어났다. Fig. 14는 마찰접합에 의한 3점 굽힘시험후의 파단면을 관찰한 것으로 모두가 중간부 부분에서 알루미늄의 모재가 굴곡되었으며 접합계면에서의 파괴는 일어나지 않았다.

4. 결 론

가볍고 열 전도율이 뛰어난 알루미늄 합금과 내열성 내마모성이 우수한 철 합금과의 마찰접합(friction welding) 및 업셋용접(upset welding)을 통해 계면에서 생성된 금속간 화합물의 영향과 마찰접합의 열처리 조건에 따른 계면의 강도변화 및 조직을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면접합시 생성되는 발열량의 증가는 결정립의

조대화와 다량의 화합물을 생성하는데 큰 영향을 미치고 있음이 확인 되었다.

(2) 접합계면에서 생성된 금속간 화합물은 접합강도를 저하시키는 요인으로 알려졌으나 그 생성된 량과 생성된 입자의 크기가 미세하면 계면의 접합강도에는 큰 영향이 미치지 않는 것으로 확인되었다.

(3) 마찰접합에의한 각 시료의 접합강도는 중심부<모서리부<중간부의 순으로 나타났으며 이러한 결과는 마찰 회전속도와 발열량에 크게 관계하고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 3점 굽힘시험 결과 업셋용접에 의해 제작된 시료의 파단형태는 대부분 알루미늄의 모재에서 파단이 일어났다.

참고문헌

1. S. Sugiura, K. Kobayashi, R. Yamamoto, K. Hyashi: 經金屬, 45 (1995) 638.
2. S. Sugiura K. Kobayashi, R. Yamamoto, K. Hyashi: 經金屬, 45 (1995) 633.
3. S. Kumai, J. Hu, Y. Hihigo, S. Nunomuta: 經金屬, 45 (1995) 198.
4. C. S. Lee, H. Li and R. S. Chandel: Journal of Materials Processing Technology, 89 (1999) 326.
5. N. Orhan, M. Aksoy and M. Eroglu: Materials Science and Engineering A, 271 (1999) 458.
6. K. Ikeuchi : 經金屬, 46 (1996) 298.
7. H. Hujida, K. Ikeuchi: 經金屬, 36 (1986) 498.
8. N. Kikuchi: 經金屬, 32 (1982) 195.
9. 용접학회편: 용접공학의 기초, 마루센.
10. 용접학회편: 용접 · 용접공학의 기초, 마루센.
11. 마찰압접협회: 마찰압접, 코로나사.
12. S. Nagazaki: 日本 data book, 日本金屬學會.
13. N. Kikuchi, S. Takeda: 經金屬, 34 (1984) 165.