

Al/Cu 마찰용접부의 파단분석

박재현* · 권영각* · 장래웅*

Failure analyses of friction welded Al/Cu joints

J. H. Park*, Y. G. Kweon* and R. W. Chang*

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Aluminium(알루미늄), Copper(구리) Intermetallic Compound (금속간 화합물), Tensile Strength(인장강도) Flash(덧살)

Abstract

The microstructure and fractography of the friction welded joint of Al to Cu have been investigated in order to understand the formation of intermetallic compounds and their effects on the failure in tensile test of the joint. The variation of welding pressure did not affect significantly the tensile strength of joint. However, the tensile strength of joint decreased as welding time increased. The thickness of reaction layers of welded joints was several micro-meters and mainly composed of intermetallic compounds of CuAl_2 , Cu_9Al_4 and $\text{Al} + \text{CuAl}_2$. The thickness of CuAl_2 , Cu_9Al_4 was increased with welding time. However, CuAl_2 was gradually changed to Cu_9Al_4 which caused the decrease of tensile strength. Even though the morphology of fractured surfaces depended upon the welding time, the failure occurred along CuAl_2 intermetallic compound itself or between CuAl_2 and Cu_9Al_4 in most cases.

1. 서 론

알루미늄과 구리의 접합부는 전기부품, 열교환기 등에 많이 사용되고 있으며 재료비의 절감을 위해

구리 부분을 알루미늄으로 일부 대체하려는 시도가 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 용융용접의 경우, 용접후 응고 시에 Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 여러 종류의 금속간 화합물이 생성되어 용접부를 상당히 취약하게 하므로 용접부의 강도는 상당히 낮을 수 밖에 없다. 이러한 점을 보완하기 위한

* 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

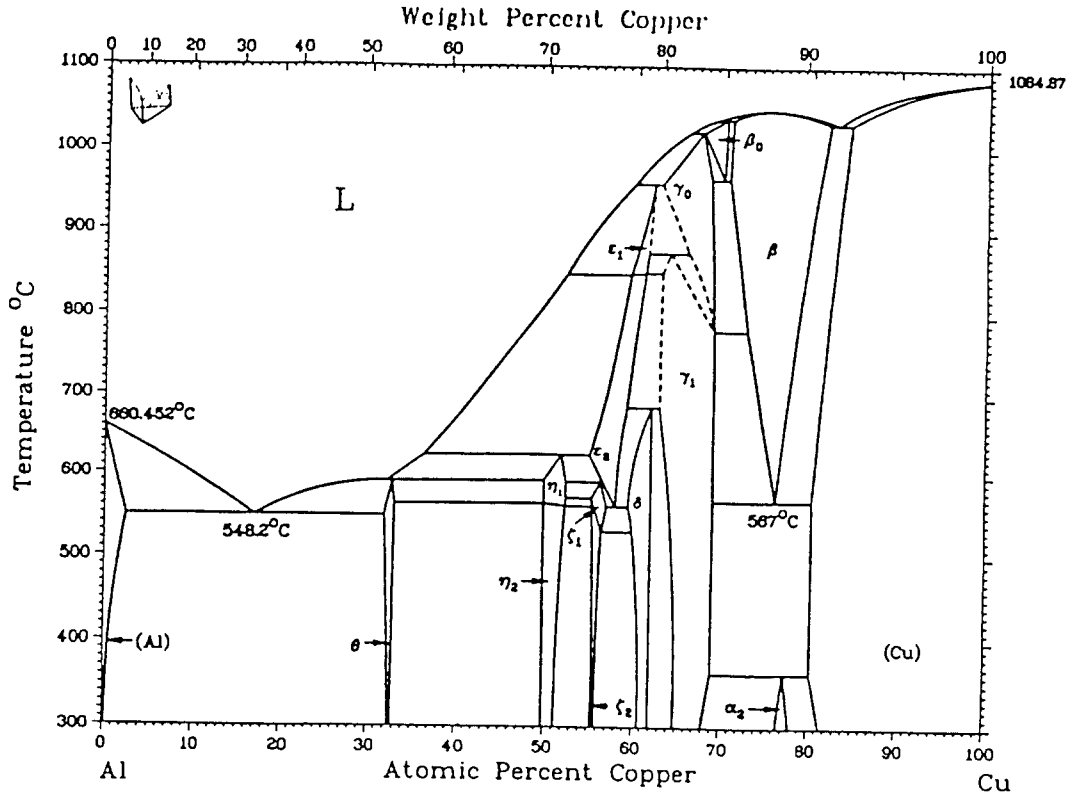


Fig. 1 Binary alloy phase diagram of Al/Cu⁷⁾

각종 고상접합법에 관한 연구가 시도된 바 있으며 현재 냉간압접, 폭발압접, 확산접합등에 관한 연구가 보고되고 있다^{4~5)}.

마찰용접에 의한 접합은 회전체인 경우 간단하게 접합할 수 있고 대량생산이 가능하다는 이점 때문에 현재 주로 전기관련 부품에 적용되고 있는데 이 부품들은 송전관계에 주로 사용되기 때문에 사고발생이 허용되어서는 안되는 주요한 부품으로서 이미 일본에서는 1975년도 부터 각 제조회사에서 월 수만개씩 제작하고 있다.

알루미늄과 구리의 마찰용접에 관한 연구는 오래 전부터 연구된 것으로 알려져 있으나 구체적인 마찰용접조건 및 연구 내용이 공개된 것은 거의 없으며 다만 일부의 연구결과가 공개되고 있을 뿐인데 그 내용은 마찰용접시 형성되는 반응층의 분포 및 형성 메카니즘, 파단시의 파단경로 등에 관해 언급하고 있다. 그러나 최근까지의 연구 결과에서는 반응층이 수십~수백 μm 폭으로 매우 두꺼운 경우에 한 해서만

언급되고 있을 뿐이며 반응층이 극히 얇게 형성되는 경우의 마찰용접 조건 에 대해서는 연구되고 있는 것이 거의 없다^{3~5)}.

따라서 본 연구에서는 알루미늄과 구리를 마찰용접시 기존의 연구에서 밝히지 못했던 극히 얇은 반응층이 형성되는 경우의 반응층 분포 및 형성메카니즘, 파단시의 파단경로등에 관하여 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편준비

마찰용접에 사용된 재료는 순수 구리 및 알루미늄이며 실험에 사용된 재료의 화학성분은 Table 1 과 같다. 사용된 재료의 직경은 $\phi 20$ 으로 일정하게 하였고 사용된 마찰용접기는 Nitto FF45II-C, 최대

Table 1. Comparison of chemical composition of used specimens with standard specification

	Cu	Al	Zn	Fe	Mn	Ti	Mg	Si	비고
Pure Cu	≥99.5	—	—	—	—	—	—	—	standard
Al 1100	0.2	bal.	0.05	0.5	0.1	—	—	0.5	"
Pure Cu	≥99.5	—	0.0017	0.0083	—	—	—	—	specimen
Al 1100	0.14	bal.	0.094	0.65	0.34	0.01	0.39	—	"

Table 2. Friction welding conditions for Al/Cu joints
material combination : Al/Cu, r.p.m : 1600

test No.	P ₁ (kgf/mm ²)	P ₂ (kgf/mm ²)	t ₁ (sec.)	t ₂ (sec.)
A-1	4	10	0.5	3
A-3	4	10	1.5	3
A-4	4	10	2.5	3
B-3	4	10	1.5	3
C-1	6	12	0.5	3
C-2	6	12	1	3
C-3	6	12	1.5	3
C-4	6	12	2.5	3
C-5	6	12	4	3
D-1	8	12	0.5	3
D-2	8	12	1	3
D-3	8	12	1.5	3

추력 30톤인 브레이크식(brake type) 마찰용접기이며 작업조건은 Table 2와 같다. 여기서 P₁, t₁은 마찰압력 및 시간을, P₂, t₂는 업셋압력 및 시간을 나타낸다.

2.2 기계적 특성시험

2.2.1 인장시험

각각의 마찰용접 조건에 따른 접합강도를 평가하기 위하여 인장시험을 실시하였으며 동일조건 하에서 3개를 평가하여 평균값을 취하였다.

2.2.2 경도시험

용접부에 대한 미세조직의 변화를 예측하기위해 경도시험을 하였으며 측정방법은 하중 5 g의 micro-vickers hardness 측정기를 사용하였다.

2.3 조직검사

접합부에서의 조직시험 및 인장시편 분석을 위해 광학현미경 및 SEM(scanning electron microscopy)을

이용하였다. Al/Cu 접합재의 경우는 동시에 에칭하기가 곤란하므로 NH₄OH 와 H₂O₂를 일정비율로 섞은후 Cu쪽을 먼저 에칭하고 다시 Al을 Keller 시약으로 재 에칭하였다.

2.4 접합계면 및 파면분석

Al/Cu 의 마찰용접부는 용접후 접합계면에서 각종 반응층이 생성될수 있으므로 접합부에서의 반응층 검토를 위해 EDAX(energy dispersive analysis of X-ray)를 접합부를 따라 실시하였으며 인장시험에 의한 파단부의 파단경로를 예측하기 위해 파면부의 X-ray 분석을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접부의 형상

Photo.1은 Al/Cu 마찰용접후의 접합부를 용접 조건별로 나타낸 것이다. 전체적으로 볼때 구리의 용점(1084°C)이 알루미늄의 용점(660°C)보다 훨씬 높으므로 알루미늄 쪽만이 소성변형되어 flash를 형성하고 있음을 알 수 있다. A-1, 3, 4(P₁=4 kgf/mm², P₂=6 kgf/mm²)의 경우와 같이 마찰압력(P₁) 및 업셋압력(P₂)이 낮은 경우, 마찰시간이 증가하여도 flash의 형성은 많지 않음을 알 수 있다. 그러나 마찰압력 및 업셋압력이 높을 경우 마찰시간이 증가하면 flash 형성의 증가는 두드러짐을 보여 주고 있다.

마찰용접시 생성되는 flash는 Al과 같은 연한 재료의 경우 Photo.2 (a)와 같이 톱니형태의 flash가 순간적으로 짧은 시간에 형성 되는것을 알 수 있는데 flash 형성시 동심원 형상으로 둥글게 형성되는 것이 아니라 어떤 시점을 기준으로 와선식 [Photo.2 (b)]으로 형성되는 것을 알 수 있다. P₁ 보다 더 큰 업셋압력 P₂가 작용되면서 브레이크가 작동시, 토크는 급속히 증가하면서 Photo.2 (c)에서 보는 바와 같이

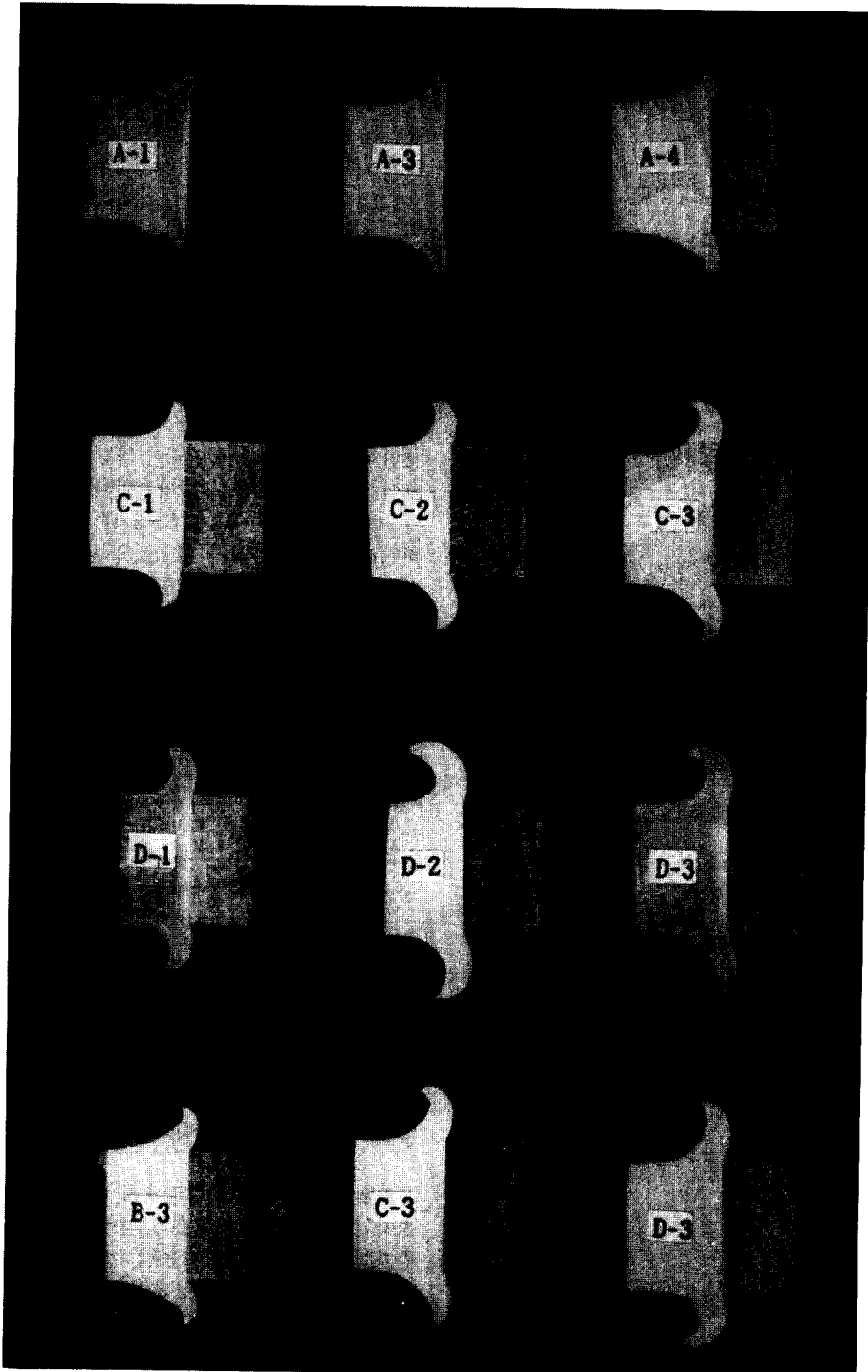
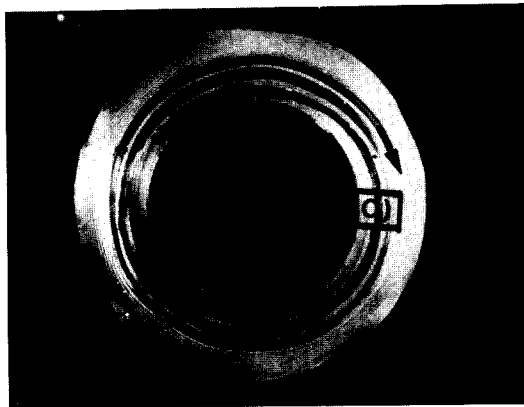
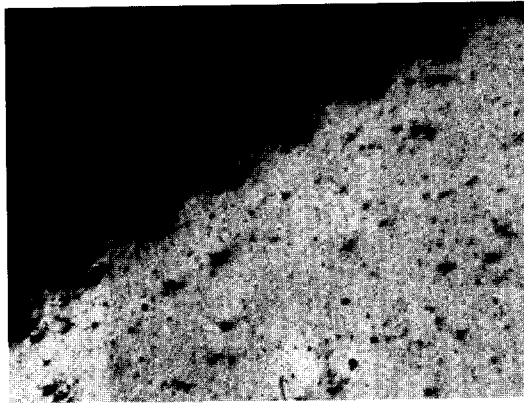


Photo. 1 Effects of welding variables on the flash formation of friction welding-
welding conditions : as shown in Table 2



faying surface | flash II formed by P₂ | flash I formed by P₁

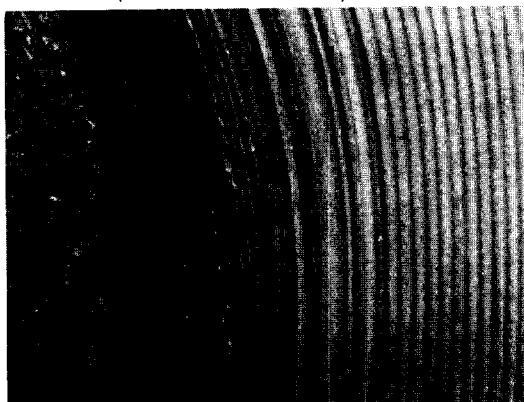


Photo. 2 Flash formed by friction welding of Al/Cu(C-3)
 (a) appearance of flash
 (b) direction of metal flow
 (C) Continued

flash I 보다 더 폭이 넓은 등간격의 flash II가 형성되게 된다. 이때 마찰계면에 이미 존재하고 있는 와선형의 궤적이 P₂에 의해 마찰면 밖으로 밀려나게 되므로 이 경우에도 P₁ 압력이 작용할 때와 같이 와선식의 flow를 형성하는 것을 알 수 있다.

3.2 인장시험 결과

Al/Cu의 마찰용접강도는 Table 3에 보는 바와 같이 Al 모재의 강도값인 18 kgf/mm²에는 다소 못미치는 값들을 나타냈으며 전부 집합부에서 수 μm거리내의 Al 열영향부를 따라 파단이 일어났고 연신율이 거의 없는 직선적인 파면양상을 나타내었으며 외관적으로 보면 마치 구리에 알루미늄이 약간 묻어있는 것처럼 보임을 알 수 있었다. 초기 마찰압력을 4, 6, 8 kgf/mm²로 변화시킨 경우 (B-3, C-3, D-3) 인장강도값을 비교하면 거의 차이가 없는것으로 보아 초기 마찰압력은 인장강도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

Table 3. Results of tensile test for friction welded joints (Al/Cu)

material combination : Al/Cu, r.p.m : 1600

test No.	P ₁ (kgf/mm ²)	P ₂ (kgf/mm ²)	t ₁ (sec.)	t ₂ (sec.)	TS(kgf/mm ²)
A-1	4	10	0.5	3	12.9
A-3	4	10	1.5	3	11.2
A-4	4	10	2.5	3	10.6
B-3	4	12	1.5	3	12.2
C-1	6	12	0.5	3	13.2
C-2	6	12	1	3	12.2
C-3	6	12	1.5	3	11.5
C-4	6	12	2.5	3	10.4
C-5	6	12	4	3	9.9
D-1	8	12	0.5	3	12.84
D-2	8	12	1	3	11.81
D-3	8	12	1.5	3	11.8

tensile strength of Al : 18kgf/mm²

마찰시간에 따른 인장강도의 변화를 보기위해 마찰시간을 각각 변화시켰을때, 전반적으로 마찰시간이 증가함에 따라 인장강도는 감소함을 알 수 있었고 이는 용접부를 따라 형성된 금속간화합물 때문으로 판단된다. 이러한 사실로 부터 본 연구에서 사용한 마찰용접 조건의 경우 인장강도가 높은 마찰용접부를 얻기 위해서는 마찰용접 시간을 0.5초 이하로 하여 금속간화합물의 형성을 최소화 시켜야 함을 알 수

있다. 그러나 마찰용접에 필요한 적정 발열온도에 도달하는 최소시간은 다른 연구결과³⁾에 의하면 최소한 0.3 ~ 0.5초는 되어야 하므로 불완전 접합부가 없으면서 금속간화합물의 형성을 최소화 시킨, 인장강도가 가장높은 접합부를 만들기 위해서는 보다 세심한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3 경도시험결과

Al/Cu를 마찰용접하면 접합부에서 반응층을 형성하게 되고 이러한 반응층의 형성은 상당히 취약하므로 접합강도에 악영향을 줄 수가 있다. 반응층을 포함하는 Al/Cu의 마찰용접 접합부는 상당히 좁으므로 초미소 경도계를 이용하여야 한다.

Fig.2 (a)는 5 g의 하중을 이용하여 접합부로부터

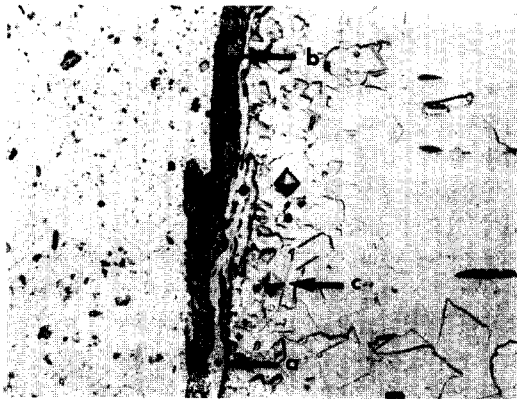
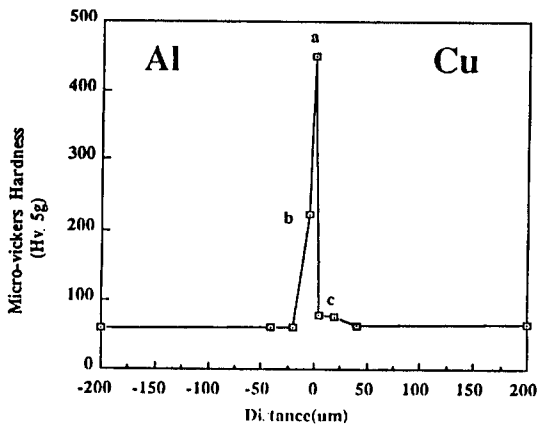


Fig. 2 Hardness distribution and microstructure of friction welded joint of Al/Cu(C-3)

50 μm 내의 경도변화를 측정할 것을 나타내고 있다. 최고 경도값은 반응층으로 추정되는 곳에서 얻어졌으며 그 값은 Hv.450정도이다. Al과 Cu를 확산용접한 경우 얻을 수 있는 반응층은 CuAl_2 , CuAl , Cu_9Al_4 등의 금속간 화합물로서 각각의 경도값 측정치는 Hv.510, Hv.1100, Hv.783으로 보고되어 있다⁶⁾. 물론 이경우는 Knoop hardness로 측정된 값을 환산한 것이고 측정하중도 25 g으로 다르므로 다소의 오차는 있을 수 있으나 이 자료에 의할 것 같으면 마찰용접부의 반응층의 경도값이 확산용접부의 CuAl_2 경도치와 비슷하므로 반응층의 주는 CuAl_2 일 것으로 생각된다.

Fig.2 (b)의 Al 측에서 검게 표시되는 부위(b지점)에서는 모재에 비해 경도값이 높게 나타나는데 이는 상호확산에 의한 합금화 때문으로 여겨지며 이러한 층의 분포는 접합부의 성분분석 결과로부터도 잘 나타나는데 평균조성이 3 ~ 4 atm.% Cu인 것(Photo.3, 4)으로 보아 Al + θ 상(CuAl_2)의 혼합조직임을 알 수 있다. Cu 측의 접합부 부근에서 나타나는 경도상승 효과(c지점)는 조직사진에서도 볼 수 있듯이 재결정에 의한 조직의 미세화 때문으로 생각된다.

3.4 접합계면 및 파면분석

3.4.1 성분분석

Al/Cu 접합부의 인장시험 결과로부터 마찰시간 증가에 따른 접합부의 강도저하 원인을 규명하고 접합부에서의 확산정도 및 반응층 형성 유무를 구체적으로 검토하기 위해 마찰용접 시간이 가장짧은 C-1시편과 마찰용접 시간이 가장 긴 C-5 시편에 대해 EDAX 분석을 하였으며 분석부위는 접합면의 중심 및 외곽 2부위로 나누어 분석하였다. Photo.3 및 4는 그 결과를 나타낸 것이다.

마찰시간이 가장짧은 C-1(0.5초)시편의 경우 접합면의 중심부에서 반응층이 1 μm 내외로 매우 좁다. 따라서 전자빔 크기(1 μm 내외)를 고려할때 정확하게 반응층의 성분을 분석하기가 곤란하므로 Fig.1에서 볼 수 있는 CuAl_2 (73 atm.% Al), CuAl (50 atm.% Al), Cu_9Al_4 (37atm.% Al) 등의 존재를 구분 하기는 다소 어렵다. 단지 접합면 중심부 및 외곽부에서 관찰한 각각의 반응층 정중앙을 정량분석시 68.4, 60 (atm.% Al) 등인것으로 미루어 볼때 CuAl_2 임을 짐작할 수는 있다. 한편 모재와 반응층의 사이에서 나타나는 3 ~ 4 atm.% Cu의 혼합층(photo.3 (b), photo.4 (a), (b)의

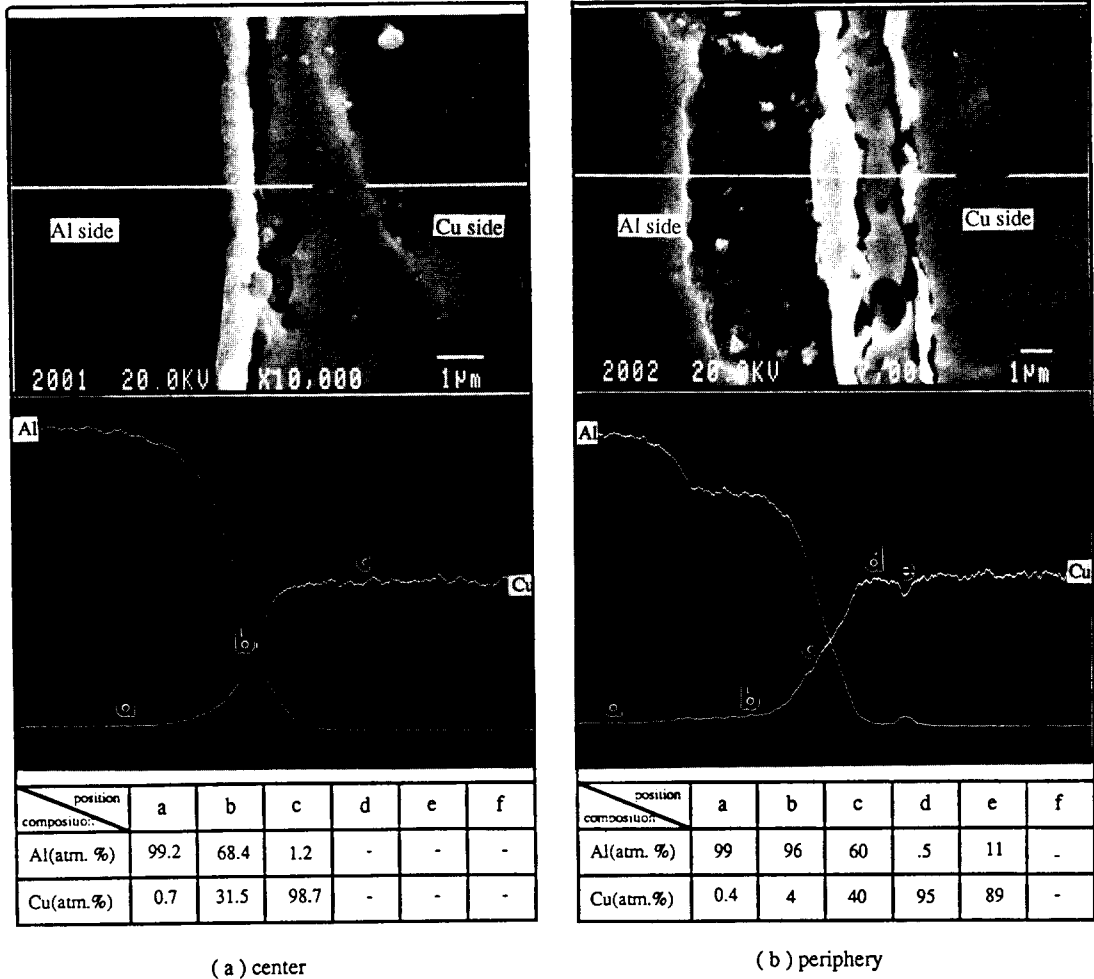


Photo. 3 EDAX analysis along arrow direction of Al/Cu joint(C-1)

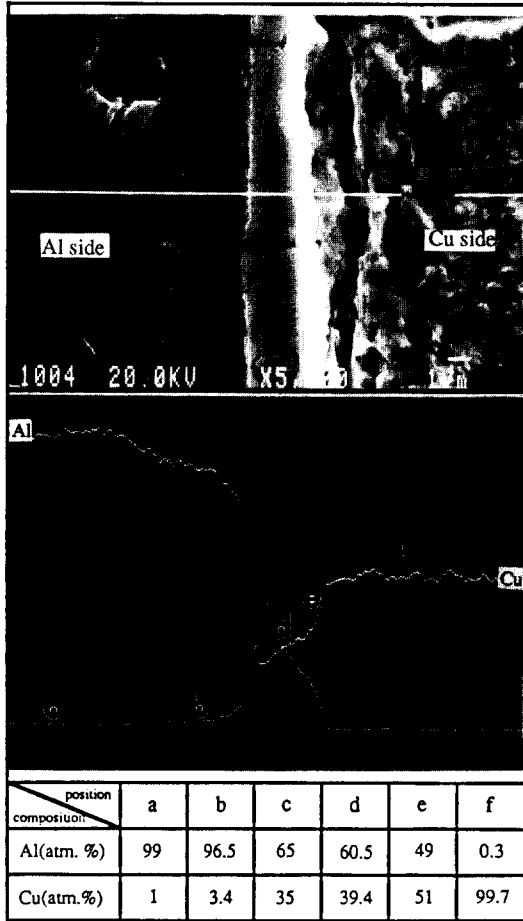
b 지역조성)은 Hasui의 연구결과³⁾에서도 언급했듯 Al+CuAl₂ 일것으로 판단된다.

마찰시간이 가장 긴 C-5(4초)의 경우는 마찰면 중앙부에서는 Photo.4 (a)와 같이 65 atm.% Al 조성이 일정하게 유지되는 영역이 존재함을 알 수 있고 이러한 사실로 부터 반응층은 대부분이 CuAl₂임을 알 수 있다. 그러나 외곽부의 경우 Photo.4 (b)에서 보는 바와 같이 조성이 일정하게 유지되는 부분이 2곳(c, d)에 존재하며, 특히 d부위는 광범위하게 존재함을 알 수 있다. c 조성은 상태도상(Fig.1)에 의하면 CuAl₂ 이고 d 부위는 Cu₉Al₄ 임을 분명히 알 수 있다.

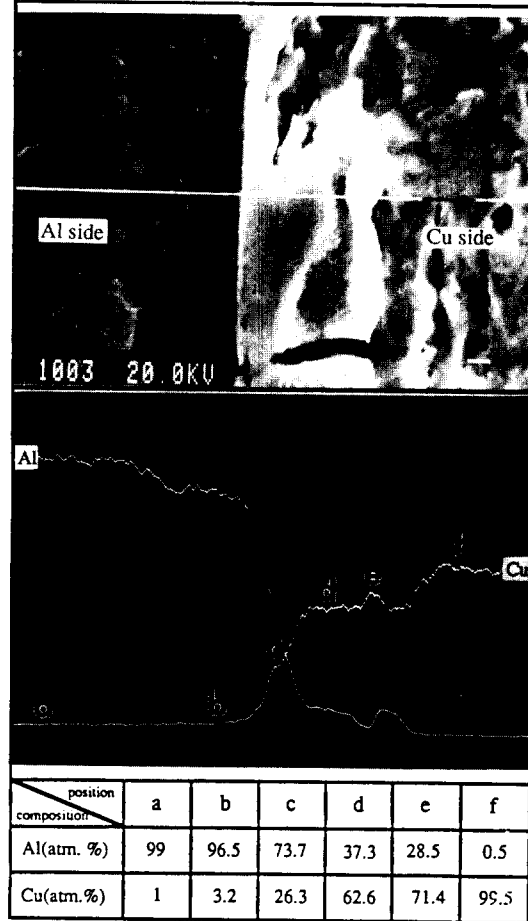
따라서 우선적으로 C-1 과 C-5를 비교시 마찰 시간이 증가할 수록 중심부 및 외곽 모두에서 반응

층의 두께가 증가함을 알 수 있고 마찰시간이 긴경우 접합부의 중앙과 외곽부의 반응층 두께 차이가 커짐을 알 수 있다.

반응층의 형성 및 분포에 대해서는 여러가지 의견이 있으며 성분상의 변화를 가지는 폭의 크기는 용접조건에 따라 달라지지만 수십에서 수백 µm 범위이며 기계적인 혼합이나 용융 혹은 반응용 상태에서 형성되었다고 보고하고 있다³⁻⁵⁾. 그러나 이러한 연구결과에서 언급한 반응층들은 본 연구에서와 같은 연속적인 띠형상 보다는 성분분포의 기복이 심한 불연속적인 혼합층으로 이루어져 있으며 폭 자체가 상당히 넓다. 하지만 본 연구에서 관찰할 수 있는 반응층의 분포는 수 µm 범위 이내의 연속적인



(a) center



(b) periphery

Photo. 4 EDAX analysis along arrow direction of Al/Cu joint(C-5)

피를 형성하고 있으므로 반응층은 고온에서의 상호 확산에 의해 형성되었을 가능성이 높다고 말할 수 있으며 이러한 차이는 마찰압력 및 압착압력이 전 반적으로 다소 높았기 때문으로 판단된다.

한편 마찰시간의 증가에 따라 반응층의 두께가 증가함과 동시에 Cu_9Al_4 의 생성이 두드러지며 이는 마찰시간이 긴경우의 시편에서 특히 강하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 마찰시간의 증가에 따라 전체적인 $CuAl_2$ 의 양은 증가하나 기존의 $CuAl_2$ 층은 상호확산에 따라 Cu_9Al_4 층으로 점차적으로 변함을 알 수 있다.

마찰시간이 긴경우 외관부 사진의 하부를 보면 Cu_9Al_4 로 생각되는 반응층에서 크랙이 발생한 것을 발

견할수 있는데 이러한 사실로부터, Cu_9Al_4 반응층은 $CuAl_2$ 보다 훨씬 brittle 하다는 것을 알 수 있다. 이 때문에 마찰용접 시간이 증가함에 따라 마찰용접 강도는 떨어지는 것으로 사료된다.

3.4.2 XRD(X-ray diffraction)파면분석

Al/Cu 마찰용접부위의 반응층을 면밀하게 분석하고 인장시의 파단경로를 예측 하기위해 C-1 및 C-5 두 시편에 대해 각각의 시편 양쪽을 XRD분석을 하였다. 마찰시간이 가장짧은 C-1의 경우 Fig.3 (a), (b) 두 결과로부터 EDAX 분석으로는 그 존재를 확인할 수 없었던 $CuAl_2$ 및 Cu_9Al_4 의 존재를 확인하였

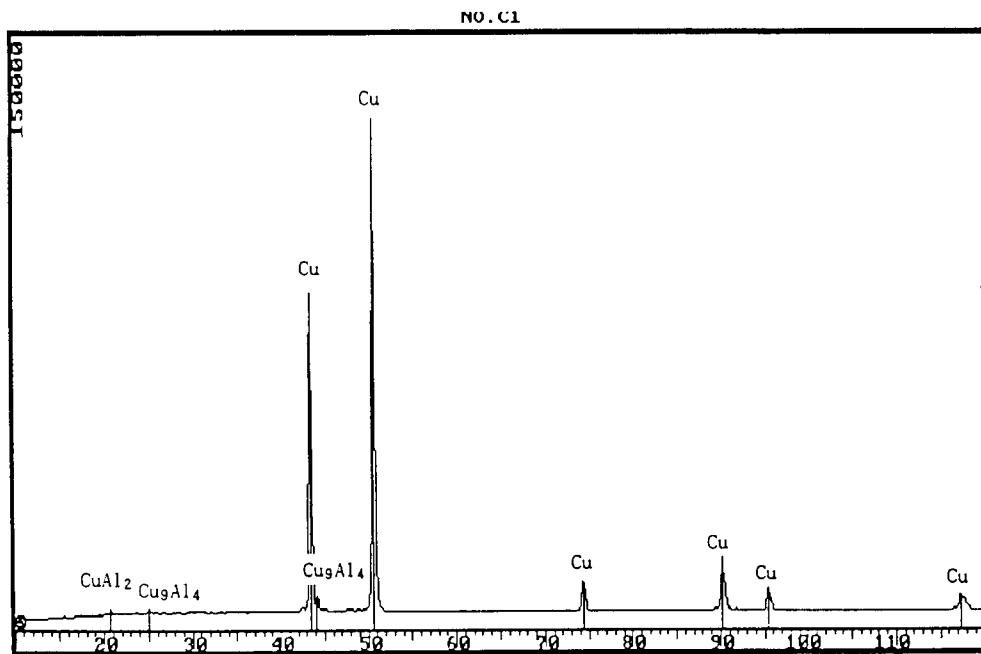
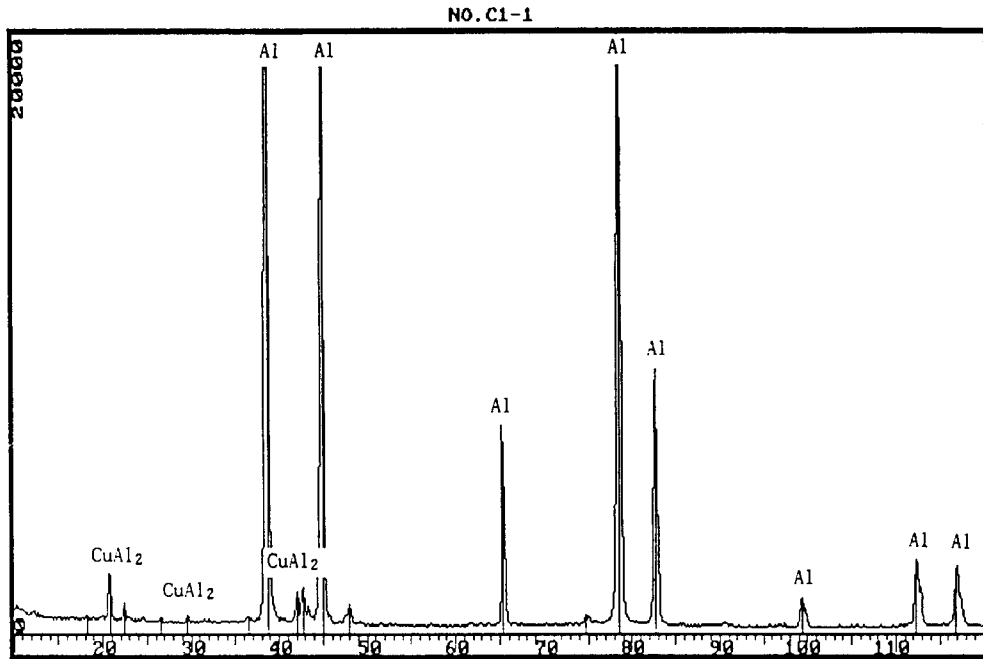


Fig. 3 Results of X-ray analysis at fractured surface for Al/Cu(C-1)

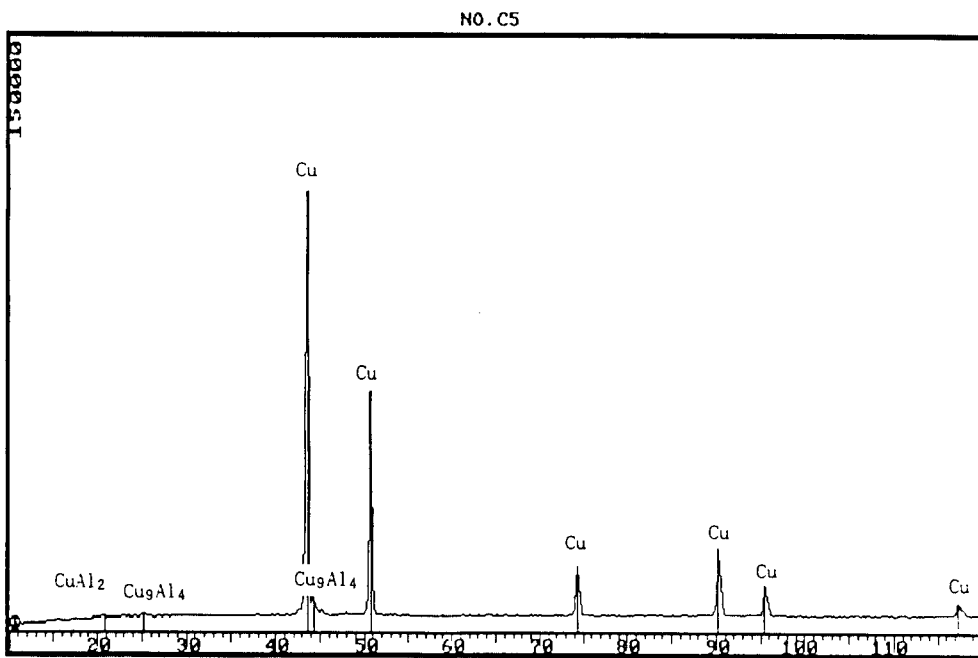
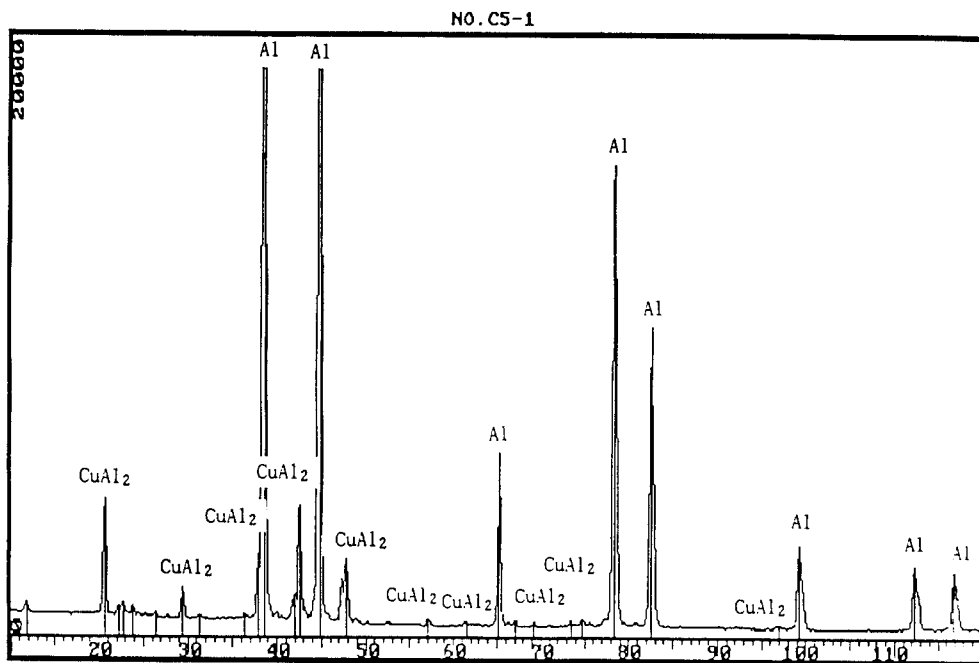
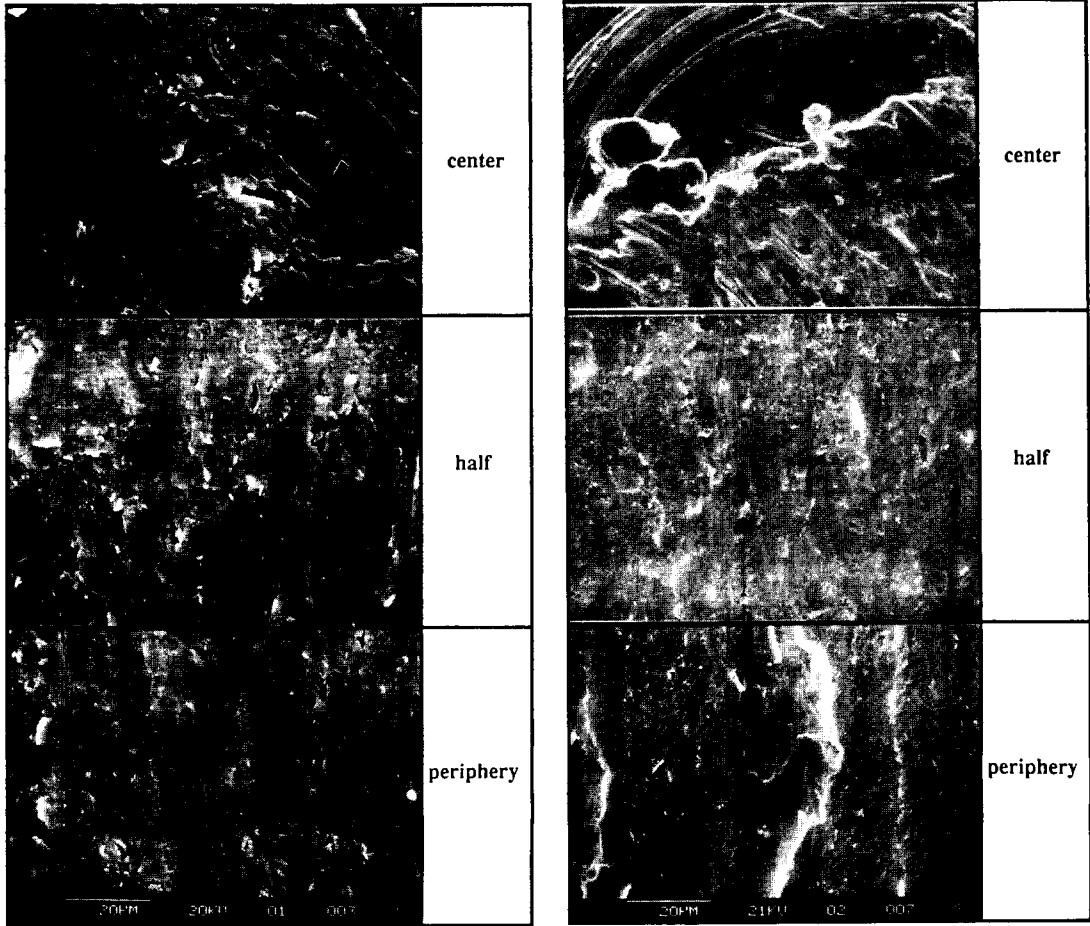


Fig. 4 Results of X-ray analysis at fractured surface for Al/Cu(C-5)

으며 Cu측의 파단면에서만 Cu_9Al_4 가 일부 발견되었다. 성분분석 결과에 의하면 마찰시 반응층의 분포 양상은 $Al | Al+CuAl_2 | CuAl_2 | Cu_9Al_4 | Cu$ 로 구성된다. 따라서 마찰시간에 관계없이 알루미늄 파면의 경우 Al 및 $CuAl_2$ 만 나타나므로 파단경로는 $Al+CuAl_2$ 내부 혹은 $Al+CuAl_2$ 와 $CuAl_2$ 의 경계 혹은 $CuAl_2$ 내부(x-ray 측정깊이는 $5\ \mu m$ 이상이고 $Al+CuAl_2$ 층의 깊이는 측정깊이 이내이므로 $Al+CuAl_2$ 층의 Al모재가 측정될수 있음)이다. 그러나 구리쪽 파면의 경우 Cu, $CuAl_2$, Cu_9Al_4 등이 나타나고 Al은 나타나지 않으므로 $Al+CuAl_2$ 내부를 따라 파단될 가능성은 없다. 게다가 마찰시간에 관계없이 Al측 파면에서는 Cu측 파면에서 보다 $CuAl_2$ 가 많이 검출

되므로 $Al+CuAl_2$ 혼합층 중의 $CuAl_2$ 양은 많지 않음을 감안할때 파단경로는 $Al+CuAl_2$ 혼합층과 $CuAl_2$ 경계를 따라 파단이 일어날 가능성 또한 힘들을 알 수 있다. 따라서 파단경로는 $CuAl_2$ 반응층 내부를 따라 주로 일어나다가 Cu_9Al_4 가 존재하는 곳에서는 $CuAl_2$ 와 Cu_9Al_4 의 경계를 따라 파단이 일어나는 것으로 판단된다. C-5 시편의 경우도 C-1과 비슷한 파단양상을 보이며 Cu 측 파면에서, C-1 보다는 마찰시간 증가의 영향으로 인해 Cu_9Al_4 가 약간 많이 검출됨을 성분분석 결과로 부터 알 수 있으나 그 차이는 x-ray 피크(peak)로는 거의 알 수 없음을 알 수 있다(Fig.4).



(a) Al side

(b) Cu side

Photo. 5 Fractography of friction welded joints for Al/Cu (C-1)

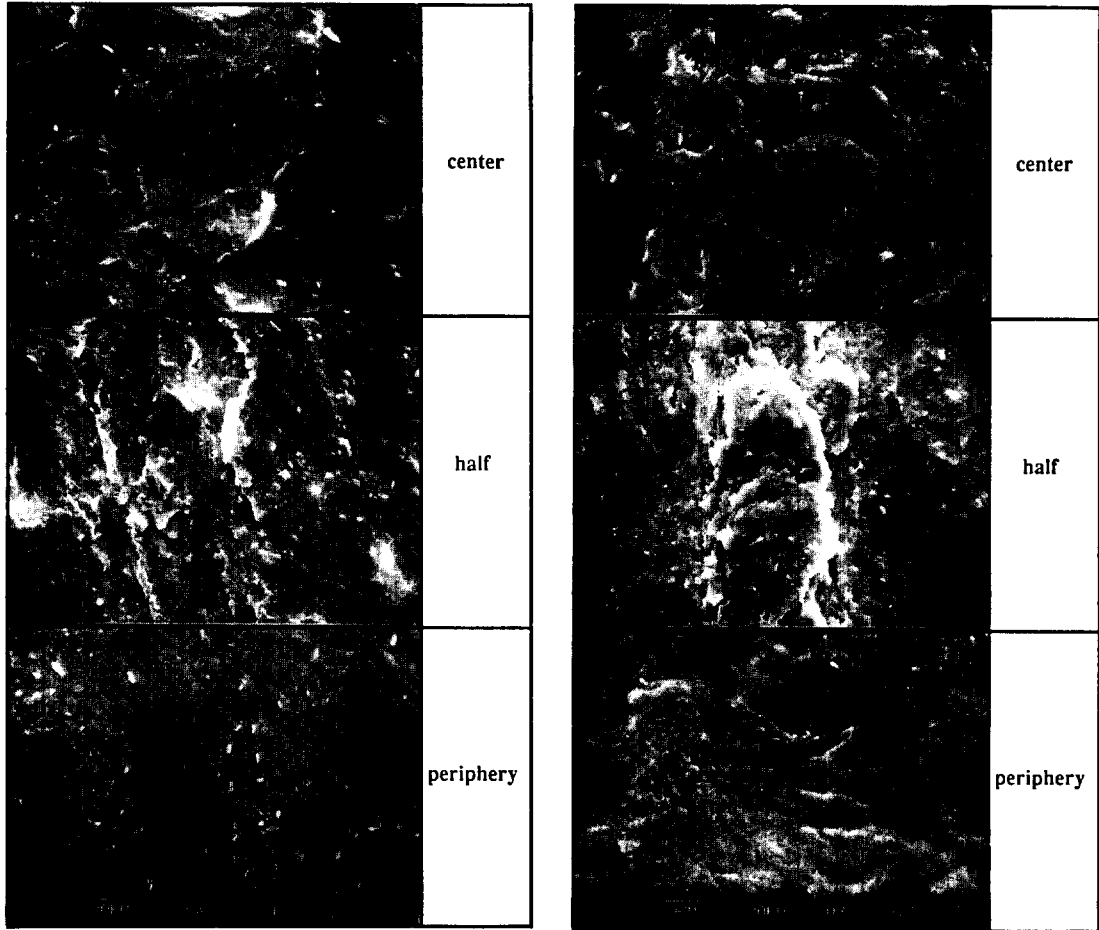
3.4.3 SEM 파면분석

Al/Cu 파단부의 파단형태 및 접합성에 대한 검토 등을 위해 파면을 SEM 으로 관찰하였으며 대상은 C-1 및 C-5 두종이다. 역시 정확성을 기하기 위해 파단된 시편의 양쪽을 분석하였으며 파단면의 중심, 1/2지점, 외곽지점등 3부위에 대하여 관찰하였다.

Photo.5, 6은 그 결과를 나타내고 있다. C-1시편의 경우 Al측 및 Cu측 모두 파단면이 평활한 것으로 봐서 취성파괴임을 알 수 있다. 따라서 앞절에서도 언급하였듯이 마찰시간에 관계없이 Al+CuAl₂ 혼합층과 CuAl₂경계를 따라 파단이 일어날 가능성은 힘들 것

이라는 것을 재 확인할 수 있다. 한가지 특이한 것은 마찰용접부 중앙에서는 마찰열 발생이 외곽보다 적게 일어나는데다 특히 C-1 시편의 경우 전체의 마찰 시간이 짧기때문에 Photo.5 (a)의 화살표에 보이는 바와 같이 중앙부에 미접합부가 존재함을 알 수 있으며 이러한 미접합부는 외곽으로 갈수록 점차 감소하는 양상을 나타낸다.

Photo.6에서 마찰시간이 긴 C-5 시편의 경우는 취성파괴의 경향이 강하긴하나 C-1과 큰 차이는 없으며 마찰시간의 증가등으로 인해 C-1 시편과는 달리 마찰용접부 중앙부에서도 미접합부는 없는 것을 알 수 있다.



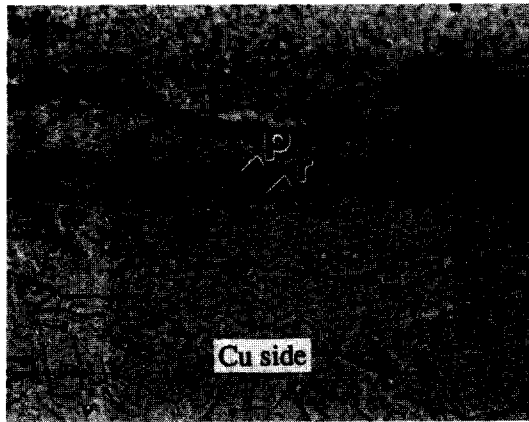
(a) Al side

(b) Cu side

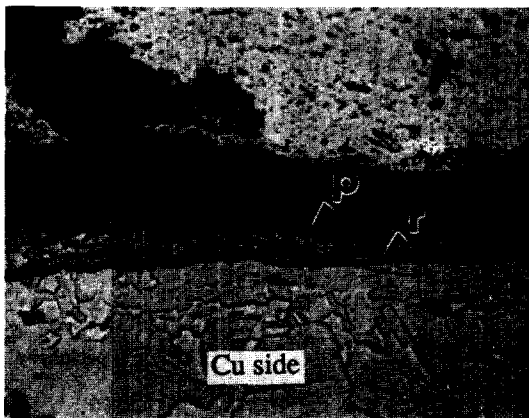
Photo. 6 Fractography of friction welded joints for Al/Cu (C-5)

3.4.4 파단부의 반응층분포

파단후 파면에 수직하게 종방향으로 절단함으로써 Al/Cu반응층의 파단경로를 세밀하게 관찰하기 위해 광학현미경으로 절단부의 조직을 관찰하였다. Al/Cu 반응층은 앞에서 언급한 바와 같이 수 μm 로 매우 얇기때문에 파단면을 수직방향으로 절단시 edge effect 에 의해 반응층이 없어지게 된다. 따라서 이러한 현상을 방지하기위해 Cu파단면측에 Cu 도금을 하였으며 그 결과를 나타낸것이 Photo.7, 8 이다.

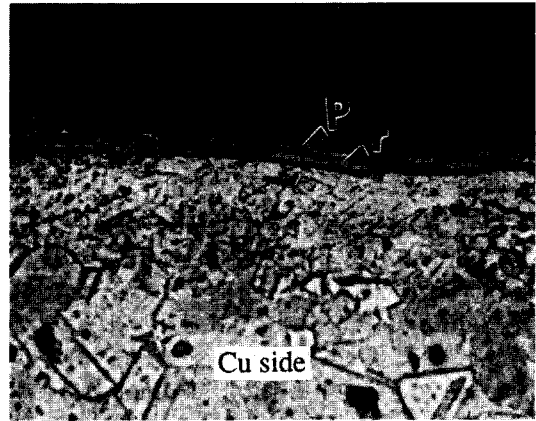


(a) center

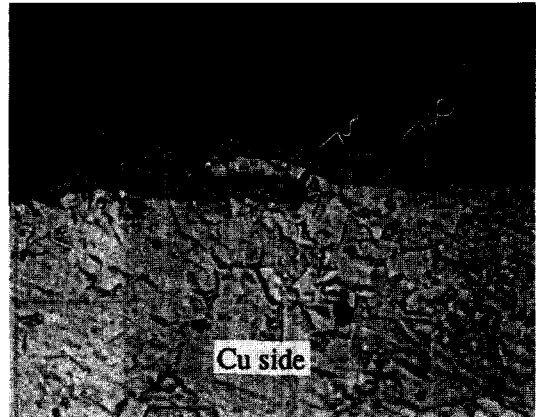


(b) periphery
 $10\ \mu\text{m}$
 p : Cu plating
 r : reaction layer

Photo. 7 Microstructures around fractured area after Cu plating on Cu side(C-1)



(a) center



(b) periphery
 $10\ \mu\text{m}$
 p : Cu plating
 r : reaction layer

Photo. 8 Microstructures around fractured area after Cu plating on Cu side(C-5)

여기서 p로 표시한 부위는 도금층이며 r은 반응층을 나타내고 있다.

Photo.7에서 관찰용접시간이 짧은 C-1의 경우 접합부 중앙에서는 반응층이 거의 없고 일부가 군데 군데 존재하는 반면에 외곽부에서는 반응층이 연속적으로 존재함을 알 수 있다. 이러한 사실로 부터 종합해 볼때 인장시험에 의한 파단시 관찰시간이 짧은 경우는 접합 중앙부가 미접합부위 혹은 접합이 미약한 부위가 존재하므로 이러한 부위를 따라 파단이 일어나다가 접합외곽부에서는 앞서 언급한 바와 같이 CuAl_2 내부 혹은 CuAl_2 와 Cu_9Al_4 와의 경계에서 파단이 일어나는 것으로 생각된다.

반면에 Photo.8에서 마찰용접 시간이 긴 경우는 미접합부가 존재하지 않으므로 Photo.8에서 보는 바와 같이 반응층이 중심부나 외곽부 모두 연속적으로 형성되며 따라서 C-1 시편의 외곽부 파단과 유사하게 CuAl_2 내부 혹은 CuAl_2 와 Cu_9Al_4 와의 경계에서 파단이 일어나는 것으로 사료된다.

4. 결 론

Al과 Cu를 마찰시간(0.5 ~ 4초), 마찰압력(4 ~ 8 kgf/mm^3), 엽셋압력(10 ~ 12 kgf/mm^2)등을 변화시켜가며 마찰용접한후 인장강도 평가 및 파단부위의 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰용접시 초기마찰압력의 증가에 따른 강도상의 변화는 거의 나타나지 않았다. 반면에 마찰시간을 0.5초에서 점차 증가시킴에 따라 반응층인 금속간화합물의 두께가 두꺼워짐으로 인해 인장강도는 감소하는 추세를 보였으며 C-1시편의 경우 13.2 kgf/mm^2 을, C-5시편의 경우 9.9 kgf/mm^2 을 나타내었다.

2. 마찰용접부의 경도는 접합부의 반응층에서 가장 높게 나타났으며, 반응층은 주로 CuAl_2 금속간화합물인 것으로 추정되었다.

3. 마찰용접부는 수 μm 폭을 가지는 $\text{Al}+\text{CuAl}_2$ 혼합층, CuAl_2 , Cu_9Al_4 의 반응층으로 구성되며 마찰시간을 0.5 초에서부터 점차 증가시킴에 따라 전체적인 CuAl_2 , Cu_9Al_4 반응층의 두께는 증가하나, CuAl_2 의 상대적인 두께는 감소하고 Cu_9Al_4 의 두께는 증가

하였다.

4. 마찰용접부의 파단경로는 마찰시간이 짧은 경우 접합부 중앙에서는 불완전 접합부의 존재로 인해 Al과 Cu의 계면에서 파단이 일어나고 접합부 외곽에서는 CuAl_2 내부 혹은 CuAl_2 와 Cu_9Al_4 와의 경계를 따라 파단이 일어난다. 마찰시간이 긴 경우는 접합부의 외곽 및 중앙부 모두에서 CuAl_2 내부 혹은 CuAl_2 와 Cu_9Al_4 의 경계를 따라 파단이 일어난다.

Reference

- 1) Kazumi Okuyama : 摩擦壓接의 應用, 溶接學會誌, (1985), Vol.54, No.6, pp.341
- 2) 摩擦壓接協會 : 摩擦壓接, (1979), pp.75, 182
- 3) 蓮亭 淳, 福島 貞夫, 衣川 純一 : 銅とアルミニウムの摩擦壓接について, 金屬材料技術研究所報告, (1969), 第12卷, 第12號, pp.103
- 4) Seiichi Kaga, Katsuhiko Fujii, Koichi Ogawa : アルミニウムと銅の 摩擦壓接について, 輕金屬溶接, (1981), Vol.19, No.11, pp.501
- 5) Masatoshi Aritoshi, Kozo Okida, Toshio Enjo, Kenji Ikeuchi, Fukuhisa Matsuda : 無酸素銅と純アルミニウムとの摩擦壓接, 溶接學會論文集, (1991). Vol.9, No.4, pp.467
- 6) Toshio Enjo, Kenji Ikeuchi, Naofumi Akikawa : 銅とアルミニウムとの 擴散溶接, 溶接學會誌, (1979), Vol.48, No.10, pp.770
- 7) Massalski : Binary alloy phase diagrams, (1986). pp.106