

研究論文

삽입재를 사용한 A2024-T6와 SM45C의 마찰용접에 관한 연구

강성보* · 윤병수** · 민택기**

A Study on Friction Welding of A2024-T6 and SM45C using Insert Metals

S. B. Kang*, B. S. Yun** and T. K. Min**

Key Words : Insert Metal (삽입재), Remaining Layer (삽입재 잔존층), Soft Zone (연화역)

Abstract

This study was undertaken to investigate the friction welding of A2024-T6 aluminum alloy and SM45C carbon steel using insert metals. The relationships among the friction welding conditions, the tensile strength of joints, the hardness distribution of welds, the microstructure of welds and the tensile fracture surfaces were mainly investigated through this experiment.

When the A6063-T5 aluminum alloy of insert metal was used, the maximum tensile strength of joint was obtained. In this case, the maximum joint efficiency was 75.3 percent and in the case of unusing the insert metals, it was 37.7 percent. Optimal welding conditions were $N=2000\text{rpm}$, $P_1=40\text{MPa}$, $P_2=140\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{sec}$ and $t_2=5\text{sec}$.

1. 서 론

A2024-T6는 초듀랄루민으로 알려진 합금으로 듀랄루민(A2017)보다 인공시효성을 향상시켜 강도가 높을 뿐만 아니라 절삭성 및 내부응력에 대한 내식성, 연신을 등이 우수하다. 항공기의 구조재로 1930년에 개발되어 주로 항공기의 외판 클래딩

재, 각종 기계구조용재, 단조재 등에 많이 사용되고 있다.

2000계 알루미늄합금과 강의 마찰용접^{1,2)}은 석출 강화 원소인 Cu, Mg이 용접계면에 취약한 금속간 화합물의 생성과 성장을 촉진하며, 알루미늄을 경화시켜 균열을 발생시키고 또한, 산화물을 형성하여 용접부의 강도가 현저하게 떨어지는 데, 이러한 결점을 보완하기 위하여 삽입재(insert metal)를 사

※1998년 2월 10일 접수

* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

** 정회원, 충남대학교 기계공학과

용하는 연구가 활발하다. 마찰용접에서 사용되어온 삽입재는 주로 연성이 풍부한 공업용 순 알루미늄과 Ni, Zn, Ti, Cu 등과 같은 단일금속을 용접 및 도금하는 방법으로 사용되어 왔다.

Hiizu Ochi 등¹⁾은 A2017과 S45C의 마찰용접에서 알루미늄에 3%의 Mg을 첨가한 알루미늄합금의 삽입재를 사용한 경우 최대 인장강도 380MPa를 얻었고, 순 알루미늄(A1050)을 사용한 경우에는 280MPa의 인장강도를 얻었다.

본 연구의 목적은 마찰용접의 삽입재로 상용 알루미늄합금인 A1050, A5083, A6063-T5를 사용하여 알루미늄합금 A2024-T6와 탄소강 SM45C를 마찰용접하고, 삽입재가 마찰용접강도에 미치는 영향과 용접부의 조직 및 인장파면을 고찰하고, 최적 마찰용접조건과 삽입재로서의 실용가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험재료

실험에 사용된 재료는 A2024-T6와 SM45C이고, 삽입재로 알루미늄합금(A1050, A5083, A6063-T5)이 사용되었다. 이들 재료는 직경 20mm의 환봉을 길이 100mm로 각각 절단하고, 양면을 선반으로 가공한 후, 용접면을 초음파 세척기로 세척하였다. 재료의 화학성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타났다.

Table 1. Chemical composition of materials (wt%)

Materials		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Ni	C	Al
Weld metal	A2024-T6	4.34	0.27	0.30	0.50	1.47	0.03	0.02	0.03	0.005	-	Bal.
	SM45C	0.10	Bal.	0.26	0.65	-	-	-	-	0.07	0.51	-
Insert metal	A1050	-	0.13	0.14	-	0.01	-	-	0.01	-	-	Bal.
	A5083	0.01	0.21	0.18	0.67	4.11	0.16	0.12	0.01	0.001	-	Bal.
	A6063-T5	0.11	0.37	0.45	0.02	0.53	0.10	0.03	-	0.28	-	Bal.

Table 2. Mechanical properties of materials

Materials		Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Weld metal	A2024-T6	520	11	148
	SM45C	875	8.5	287
Insert metal	A1050	130	31	32
	A5083	348	12	111
	A6063-T5	195	13	55

3. 실험방법

실험에 사용된 마찰용접기는 회전수가 1000rpm, 2000rpm으로 고정되어 있는 브레이크식 마찰용접기(model: NSF-30H, 남선(주))를 사용하였다.

먼저 탄소강 SM45C와 삽입재를 Table 3의 용접 조건으로 마찰용접하여 플래시를 제거한 후 삽입재가 4mm가 남도록 절단하여 초음파 세척기로 세척한 다음 Table 4의 용접조건으로 알루미늄합금 A2024-T6와 마찰용접하였다.

인장파면을 관찰하기 위하여 플래시만 제거한 상태로 인장시험을 하였고, 시효성을 고려하여 용접후 10일이 지난 후에 실시했다.

용접부의 경도시험은 측단면을 절단하여 연마한 후, 하중 100g의 마이크로 비커스 경도기로 용접계면의 중심부에서 각각 측방향으로 0.2mm 및 0.5mm의 등간격으로 측정하였다.

용접부의 조직을 관찰하기 위해 5% Nital 시약으로 탄소강 SM45C를 먼저 5초 동안 부식한 다음, Keller 시약으로 5초 동안 알루미늄합금 A2024-T6를 부식하여 광학현미경으로 관찰하였고, 인장파면을 조사하기 위해 SEM 관찰과 EDS분석을 하였다.

Table 3. Friction welding conditions of SM45C to Insert metals

Welding conditions \ Insert metals	Direct	A1050	A5083	A6063-T5
Spindle speed N (rpm)	2000	2000	2000	2000
Friction pressure P_1 (MPa)	40	40	40	40
Upset pressure P_2 (MPa)	80~160	80	120	80
Friction time T_1 (sec)	0.5~1.5	1	1	1
Upset time T_2 (sec)	5	5	5	5

Table 4. Friction welding conditions of A2024-T6 and SM45C with insert metals

Welding conditions \ Insert metals	Direct	A1050	A5083	A6063-T5
Spindle speed N (rpm)	2000	2000	2000	2000
Friction pressure P_1 (MPa)	40	40	40	40
Upset pressure P_2 (MPa)	80~160	80~160	80~160	80~160
Friction time T_1 (sec)	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5
Upset time T_2 (sec)	5	5	5	5

4. 실험결과 및 고찰

4.1 총업셋길이

회전수 2000rpm, 마찰시간 1.0초로 고정하고, 업셋압력을 80~160MPa로 변화시킨 경우의 총업셋길이를 Fig. 1에 나타냈고, 마찰시간을 0.5~1.5초로 변화시킨 경우에는 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 총업셋길이는 업셋압력과 마찰시간이 증가함에 따라 거의 비례하여 증가하는 마찰용접의 전형적인 양상을 보여주고 있다.

삽입재를 사용하지 않고 직접 마찰용접한 경우에는 총업셋길이가 1.5mm 미만으로 매우 짧았으며, 삽입재를 사용한 경우에는 업셋길이가 이보다 매우 길었다. 본 실험에서 삽입재의 길이를 4mm로 고정하였기 때문에 총업셋길이가 4mm보

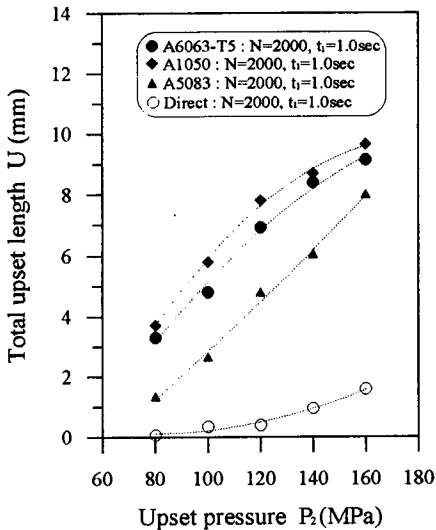


Fig. 1 Relationships between total upset length and upset pressure

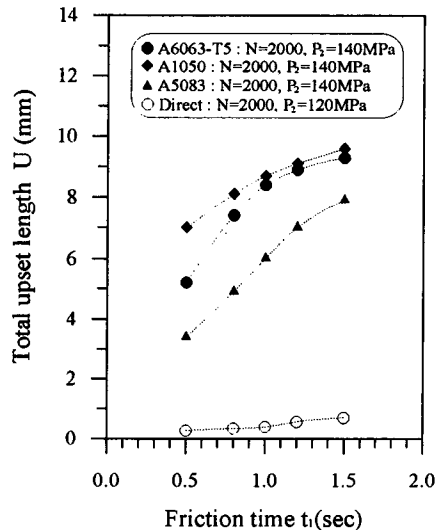


Fig. 2 Relationships between total upset length and friction time

다 짧은 용접조건은 삽입재가 플래시로 빠져나가 지 못하고 용접계면에 많이 남아있는 경우이고, 4mm보다 긴 경우에는 삽입재가 플래시로 빠져나감과 동시에 A2024-T6 모재도 플래시를 형성하였기 때문이다. 총업셋길이가 지나치게 긴 경우는 삽입재가 모두 플래시로 빠져나가 용접계면에 남아 있지 않아 결국 삽입재를 사용하지 않은 경우와 같은 결과로 된다.

총업셋길이는 삽입재 A1050, A6063-T5, A5083 그리고 삽입재를 사용하지 않은 경우의 순으로 길게 나타났으며, 연성이 좋은 삽입재일수록 총업셋길이가 긴 것으로 보아 총업셋길이는 삽입재의 연성에 관계됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 총업셋길이와 인장강도와의 관계를 나타낸다.

삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 총업셋길이가 0.5mm에서 최대 인장강도 196MPa를 얻었고, 삽입재를 사용한 경우에는 삽입재 A5083은 총업셋길이 5mm에서 최대 인장강도 307MPa, A1050은 총업셋길이 9mm에서 최대 인장강도 346MPa, A6063-T5는 총업셋길이 8.5mm에서 최대 인장강도 392MPa를 얻었다.

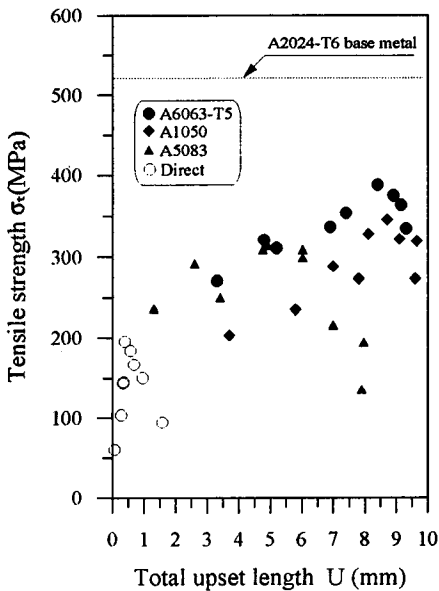


Fig. 3 Relationships between tensile strength and total upset length

4.2 인장시험

주축 회전수 2000rpm, 마찰시간 1.0초로 고정하고 업셋압력을 80MPa에서 160MPa까지 변화시킨 경우에 대한 인장강도를 Fig. 4에 나타냈고, 주축 회전수 2000rpm, 업셋압력 140MPa(삽입재), 120MPa(direct)로 고정하고 마찰시간을 0.5초에서 1.5초까지 변화시킨 경우의 마찰시간과 인장강도와의 관계를 Fig. 5에 나타냈다.

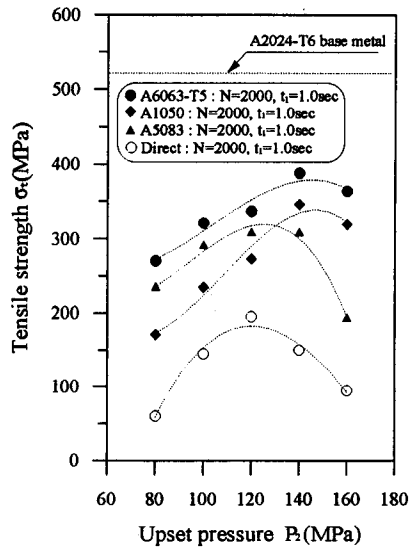


Fig. 4 Relationships between tensile strength and upset pressure

Fig. 4와 5에서 인장강도가 최대 값에 도달할 때까지는 업셋압력과 마찰시간이 증가함에 따라 상당히 증가하지만, 최대 인장강도 값을 기점으로 업셋압력과 마찰시간이 증가하면 인장강도는 오히려 감소하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 삽입재 잔존층(remaining layer)의 두께에 대한 영향으로 사료된다. 즉, 인장강도가 낮은 경우에는 업셋압력이나 마찰시간이 불충분하여 삽입재가 플래시로 배출되지 못하여 삽입재의 잔존층이 용접계면에 많이 남아 있어 삽입재 자체의 강도가 영향을 미치게 되며, 최대 인장강도를 보인 경우는 삽입재가 적정량의 플래시로 배출되어 삽입재의 잔존층이 적당하여 강도가 증가되었으며, 최대강도를 보인 용접조건 이상에서는 용접계면에 삽입재의

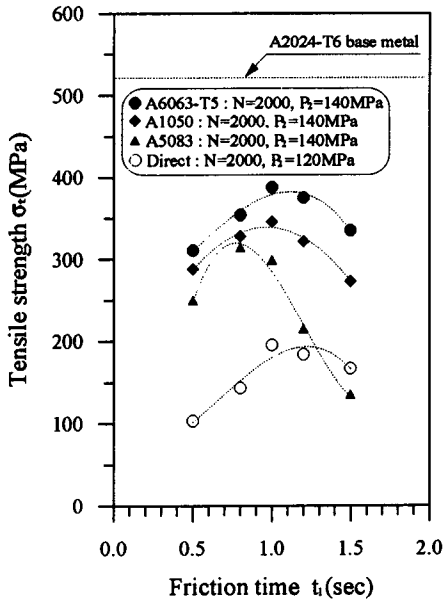


Fig. 5 Relationships between tensile strength and friction time

잔존층이 얇아져서 강도가 낮아지거나, 또는 삽입재 잔존층이 모두 없어져 결국 삽입재를 사용하지 않은 경우의 강도로 된다.

Fig. 5에서 삽입재 A5083을 사용한 경우, 마찰시간 1.2초 이상에서의 인장강도가 삽입재를 사용하지 않은 경우와 유사하게 낮은 강도를 보이는 것은 바로 이러한 이유이다. 최대 인장강도를 얻은 용접 조건에서 중앙단면에서의 삽입재 잔존층 두께는 A6063-T5를 사용한 경우는 $230\mu\text{m}$, A5083을 사용한 경우는 $1070\mu\text{m}$, A1050을 사용한 경우는 $40\mu\text{m}$ 이었다.

삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 최대 인장강도는 업셋압력 120 MPa, 마찰시간 1.0초에서 196MPa로 A2024-T6 모재강도 (520.4 MPa)의 37.7%에 해당하는 낮은 용접강도를 보였으나, 삽입재를 사용한 경우에는 이보다 높은 강도를 보여 삽입재의 역할이 큼을 알 수 있다.

삽입재를 사용한 경우의 최대 인장강도는 삽입재 A1050의 경우 업셋압력 140MPa, 마찰시간 1.0초에서 346MPa, A5083인 경우 업셋압력 120MPa, 마찰시간 0.8초에서 307MPa, A6063-T5인 경우에는 업셋압력 140MPa, 마찰시간 1.0초에서 392MPa를 얻어 각각 본 실험에서의 최대 인장강도를 얻었다. 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에 얻은 최대 인장강

도는 A2024-T6 모재강도의 75.3%로 만족할 수 있는 용접강도는 아니지만, 삽입재를 사용하지 않은 경우와 비교하면 상당한 용접강도이다.

Hiizu Ochi 등¹⁾은 A2017과 S45C의 마찰용접에서 알루미늄에 3%의 Mg을 첨가한 알루미늄합금의 삽입재를 사용한 경우 최대 인장강도 380MPa를 얻었고, 순 알루미늄 (A1050)을 사용한 경우에는 최대 인장강도 280MPa를 얻은 것과 비교하면, 본 실험에서 삽입재를 사용한 경우, 이보다 높은 용접강도를 얻은 것으로 보아 상용 알루미늄합금도 삽입재로서의 실용성이 충분히 있다고 사료된다. 물론, Hiizu Ochi 등¹⁾의 연구와 서로 비교하는 것은 사용한 재료와 용접조건이 각각 다르기 때문에 곤란하다고 하겠으나, 유사한 재료에서의 삽입재가 마찰용접 강도에 미치는 영향에 대한 경향은 비교할 수 있다고 사료된다.

인장시험 결과, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 용접계면에서 파단이 일어났고, 삽입재를 사용한 경우에는 모두 삽입재 내에서 파단이 일어났다.

4.3 용접부의 경도

용접부의 경도시험은 인장시험에서 최대 인장강도를 얻은 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우 ($P_2=120\text{MPa}$, $t_f=1.0\text{초}$)와 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 시험편 ($P_2=140\text{MPa}$, $t_f=1.0\text{초}$)을 가지고, 용접계면의 중심에서 축방향으로 측정하였다. 이 경우, 용접부의 경도분포를 관찰하기 위하여 용접계면에서 축방향 1mm까지는 0.2mm의 등간격으로 측정하고, 그 이후는 0.5mm 등간격으로 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 6에서 알루미늄합금 A2024-T6의 경도분포는 삽입재를 사용하지 않고 직접용접한 경우와 삽입재를 사용한 경우 모두 열영향부에서 모재보다 미소하게 경도값이 낮아지다가 급격하게 낮은 경도분포를 보이는 연화역 (soft zone)이 존재하였다. 이 때, 연화역은 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 용접계면에서 5.5mm 떨어진 곳에서부터 11mm까지 5.5mm에 걸쳐 형성되었으나, 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에는 용접계면에서 7mm 떨어진 곳에서부터 11mm까지 4mm에 걸쳐 형성되었다.

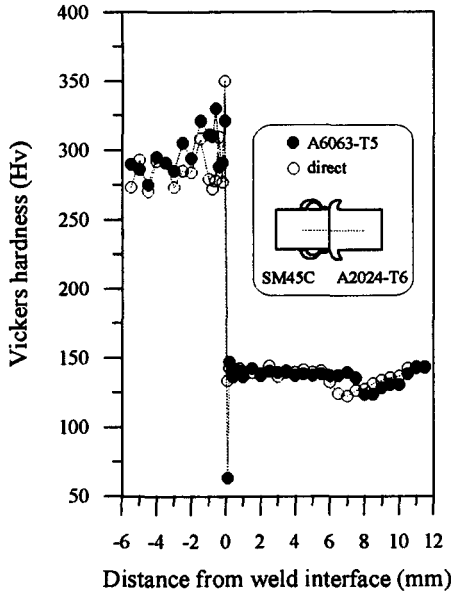


Fig. 6 Hardness distributions of friction welds (A6063-T5 : $P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{sec}$ Direct : $P_2=140\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{sec}$)

이와 같이 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 보다 삽입재를 사용한 경우의 연화역이 용접계면으로부터 더욱 먼 곳에서 형성되었고, 연화역의 범위가 좁아졌다.

A2024 시효재는 200℃ 전후의 온도로 수십초~수분동안 가열하면 소입 직후 상태의 경도에 거의 가까운 값으로 낮아지는 복원현상³⁾의 특성이 있다. Kazuyoshi Kato⁴⁾의 알루미늄합금(A2024) 동종재 마찰용접에서 용접계면으로부터 축방향으로 10mm 떨어진 곳의 온도분포는 마찰이 시작된 후 4초에 최대온도 약 227℃에 도달하고, 10초 후에는 약 177℃로 서서히 감소하고 있어 결국 용접계면으로부터 10mm 떨어진 곳의 온도는 177℃~227℃로 적어도 6초 이상 지속되고 있다. 따라서 연화역의 형성은 석출물이 형성되는 초기 단계인 GP1존이 가열에 의해 사라지는 복원현상으로 사료된다.

삽입재 A6063-T5를 사용한 경우 용접계면에서의 낮은경도 (Hv58)는 삽입재 잔존층의 경도이다.

SM45C 측의 경도분포는 직접 용접한 경우와 삽입재를 사용한 경우 모두 용접계면 근처에서 높은 경도를 나타냈으며, 전반적으로 유사한 결과를 보였다. 용접계면 근처에서 경도의 상승 요인은 가

공경화로 여겨진다. 직접 용접한 경우에는 용접계면에서 약 0.2mm 떨어진 곳의 경도가 Hv350으로 가장 높았고, 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에는 용접계면에서 경도의 큰 상승은 나타나지 않았다.

A2024-T6의 열영향부는 용접계면으로부터 약 11mm로 넓게 나타났으나, SM45C는 약 2mm 미만으로 매우 좁게 나타났다.

4.4 용접부의 조직

용접단면의 중심부를 광학현미경으로 관찰한 결과를 Photo 1에 나타내었다. 이 Photo 1의 (A)는 최대 인장강도를 얻은 삽입재 A6063-T5의 경우이고, Photo 1의 (B)는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우이다.

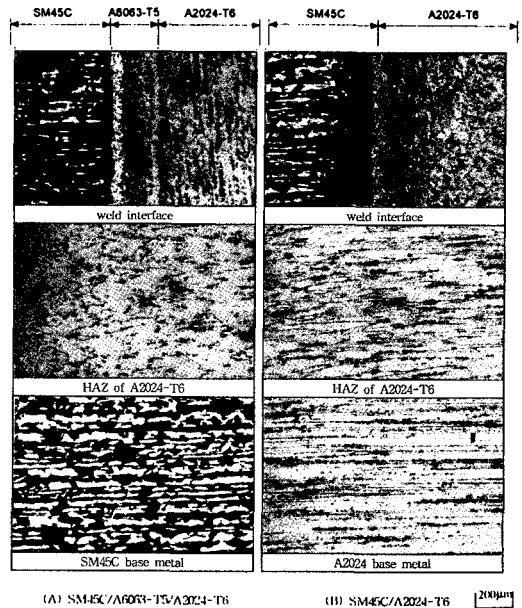


Photo 1. Microstructure of friction welded joints

이들의 용접계면을 비교해 보면, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우, 용접계면에 인접한 A2024-T6는 압연방향의 조직이 용접계면에서 축방향에 수직인 방향으로 재결정이 일어나 조직이 조밀하게 되었으며, SM45C는 용접계면에서 축방향에 수직인 재결정 영역이 A2024-T6보다 좁고, 폭이 약 200µm인 미세한 조직을 형성하고 있다. 직접 용접한 경우, 용접계면 인접한 곳에서 경도가

크게 상승된 것은 이러한 이유이다. 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에 삽입재 잔존층 그리고 이것에 인접한 A2024-T6는 모두 축방향에 수직한 방향으로 재결정되었으며, 조밀한 재결정 조직이 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 보다 훨씬 넓게 나타났다. SM45C는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 달리 축방향에 수직한 조밀한 조직의 영역이 매우 좁게 나타났다.

열영향부의 조직을 비교해 보면, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우, 모두 축 방향으로 길게 조대화 되었으나, 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우의 조직이 삽입재를 사용하지 않은 경우 보다 더욱 조대화된 것으로 보아 열영향이 더욱 컸음을 알 수 있다.

4.5 인장파면

Photo 2는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우의 SM45C측 인장파면을 나타낸다.

Photo 2의 (A)에서 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에는 파면 중앙부와 외주부에서 덩풀이 형성되어 연성파단되었으며, 파면의 덩풀 내에서는 취성과 파괴된 입자(화살표 부분)들이 발견되었다. R/2 부분에서는 덩풀이 발견되지 않고 마찰에 의한 흔적과 미소량의 알루미늄합금이 붙어 있는 매끈한 파면을 보여주고 있다.

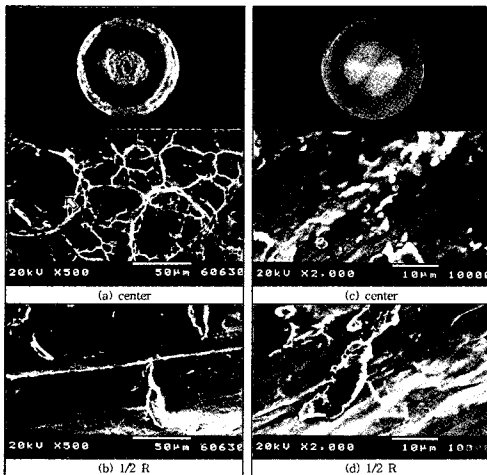
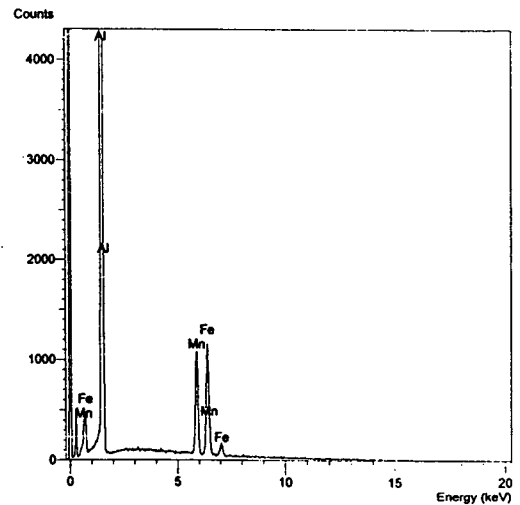


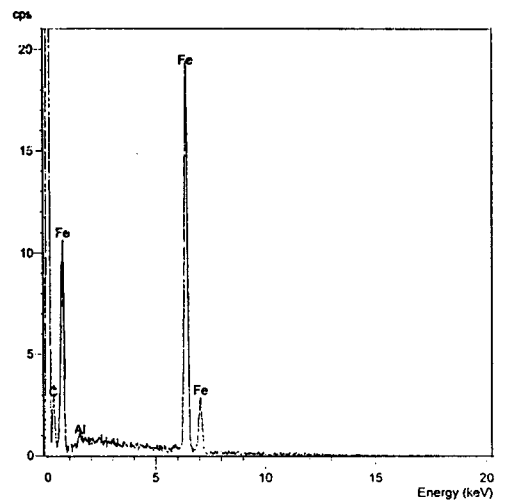
Photo 2. SEM images of tensile fracture surfaces

Photo 2의 (B)에서 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 파면의 중앙부와 외주부 일부에서 알루미늄합금이 SM45C 표면에 얇게 달라붙어 있으며, R/2 부분은 마찰에 의한 흔적과 알루미늄이 중앙부 보다 적게 붙어있는 매끈한 파면을 나타내고 그 결과 강도가 낮아짐을 알 수 있다.

직접 용접한 경우와 삽입재를 사용한 경우, 파면의 중앙부에 대한 EDS 분석 결과를 Fig. 7에 나타냈다.



(A) SM45C/A6063-T5/A2024-T6 (Center)



(B) SM45C/A2024-T6 (Center)

Fig. 7 Result of EDS analysis in fractured surface

삽입재 A6063-T5를 사용한 경우(Fig. 7의 (A)) 덤플파면 내에서 발견된 취성입자를 중심으로 X-ray 빔을 조사한 결과, Al, Fe, Mn의 원소가 나타났다. Photo 2의 (a)에서 입자의 크기가 최대인 것은 약 $40\mu\text{m}$ 로 매우 큰 것으로 보아 석출물은 아니고 Mn, Fe, Al로 이루어진 금속간 화합물로 추정된다. 삽입재를 사용해도 용접부의 강도가 A2024-T6 모재에 다소 못 미치는 것은 이러한 원인으로 사료된다.

직접 용접한 경우(Fig. 7의 (B))에는 파면 위에 존재하는 알루미늄의 두께가 매우 얇기 때문에 Fe, Al 이외에 SM45C의 합금성분인 C가 나타났고, Mn은 발견되지 않았다. 또한 삽입재를 사용한 경우, 파면의 R/2 부분에서도 이와같은 결과를 확인할 수 있었다.

5. 결 론

상용 알루미늄합금을 삽입재로 사용하여 A2024-T6와 SM45C를 마찰용접하여 용접부의 인장시험, 경도시험, 용접계면 및 인장파면을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대 인장강도는 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우였고, 용접조건 $N=2000\text{rpm}$, $P_1=40\text{MPa}$, $P_2=140\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{초}$, $t_2=5\text{초}$ 에서 A2024-T6 모재강도의 75.3%인 392MPa를 얻어 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 37.7% 보다 훨씬 높았다. 이 때, 업셋길이는 8.5mm였고, 삽입재의 잔존층 두께는 $230\mu\text{m}$ 였다.

2. 삽입재를 사용한 경우 삽입재 A6063-T5, A1050, A5083의 순으로 인장강도가 높았으나, 삽

입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 보다 모두 높은 강도를 보였다.

3. 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 용접계면에서 파괴되는 반면, 삽입재를 사용한 경우에는 모두 삽입재 잔존층에서 파괴되었다.

4. A2024-T6의 경우에는 열영향부가 용접계면으로부터 약 11mm로 비교적 넓었으며, 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우와 삽입재를 사용하지 않은 경우 모두 열영향부에서 연화역이 확인되었다.

5. 인장파면에서 삽입재를 사용하지 않은 경우에는 덤플이 형성되지 않았으나, 삽입재 A6063-T5를 사용한 경우에는 파면의 중앙부와 외주부에서 덤플이 형성되어 연성파괴되었다.

참 고 문 헌

1. Hiizu Ochi, Koichi Ogawa, Yasuo Suga, Takuya Iwamoto, Yoshiaki Yamamoto : "인서트메탈을 이용한 알루미늄합금과 강과의 마찰용접", 輕金屬銲接, Vol. 32, No. 11, (1994), pp. 469-476
2. K. Ogawa, H. Ochi, Y. Yamamoto, M. Habe, T. Iwamoto and Y. Suga : "Friction welding of 2017 aluminium alloy and S45C carbon steel using an insert", Welding International, Vol. 8, No. 6, (1994), pp. 445
3. 輕金屬協會編 : "알루미늄기술便覽", 輕金屬出版, (1985), pp. 1189
4. Kazuyoshi Kato, Hiroshi Tokisue : "2024알루미늄합금 마찰용접의 기계적性質", 輕金屬, Vol. 40, No. 5, (1990), pp. 353