

마찰용접에서 A2024와 SM45C의 삽입재에 관한 연구

윤 병 수, 강 성 보, 민 택 기

A Study on Insert Metal in Friction Welding of A2024 to SM45C

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

Abstract

This study was investigated on the friction welding of A2024 aluminum alloy to SM45C carbon steel with insert metals. The tensile strength of welded joints, the hardness distribution of welds, the microstructure of welds and the tensile fracture surfaces were mainly investigated through this experiment.

When aluminum alloy A6351 was used as insert metal, the maximum tensile strength of welded joint was obtained. In this case, the maximum joint efficiency was 76.2 percent of base metal.

Optimal welding conditions were $N=2,000\text{rpm}$, $P_1=40\text{MPa}$, $P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.5\text{ sec}$, $t_2=5\text{sec}$.

1. 서론

항공기를 비롯한 각종 수송기계 및 기계부품 제작등에 널리 사용하고 있는 A2000계 알루미늄합금은 비강도, 내열, 고강도면에서 매우 우수한 합금으로 특히, 강도면에서 기계구조용강에 버금가는 강도를 갖고 있는 열처리 합금이라는 특징을 가지고 있다. 그러나, 구리 이외에 저융점 공정을 형성하는 마그네슘이나 규소를 포함하고 있기 때문에 내식성이 떨어지고, 용접균열 감수성이 강하여 용융 용접성이 다른 알루미늄합금에 비교하여 많이 떨어지기 때문에 리벳, 볼트 등의 기계적 접합이 많이 이용되고 있다.^{1),2)}

A2000계 알루미늄합금과 탄소강의 마찰용접^{3),4)}은 용접계면에 취약한 금속간 화합물을 형성하고, 응고 및 고온

균열이 발생되기 때문에 용접성이 현저하게 떨어진다. 따라서, 이들 재료의 용접성을 향상 시키기 위하여 삽입재를 사용하게 되는데, Koichi Ogawa 등³⁾은 공업용 순 알루미늄(A1050)을 삽입재로 사용하여 A2017 알루미늄합금과 SM45C 탄소강을 마찰용접한 결과 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 모재강도 26%에서 73%로 용접강도를 향상시켰으며, Hiizu Ochi 등⁴⁾은 삽입재로 알루미늄에 3% Mg을 첨가한 합금을 사용하여 A2017 알루미늄합금과 SM45C 탄소강을 마찰용접한 결과 최대 인장강도 380 MPa를 얻었고, 용접부 강도는 삽입재의 모재 강도에 영향을 받는다고 하였다.

본 연구의 목적은 마찰용접의 삽입재로 강도가 낮고, 연성이 좋은 A1050과 구조용재로 연성과 어느정도 강도를 갖는 A6351 그리고, 6000계 알루미늄합금 중 강도가

큰 A6061을 사용하여 A2024 알루미늄합금과 SM45C 탄소강을 마찰용접하고, 삽입재가 이들 이종재료의 용접강도에 미치는 영향과 용접부의 조직 그리고, 인장파면을 관찰하여 용접성과 삽입재에 대해 검토하고자 한다.

2. 실험재료

실험에 사용된 재료는 인공시효재인 A2024 알루미늄합금과 SM45C 탄소강이고, 삽입재로 A1050, A6061, A6351의 상용 알루미늄합금을 사용하였다. 이들재료는 직경 20mm의 환봉을 길이 100mm로 각각 절단하고, 양면을 선반으로 가공한 후, 접합면을 초음파 세척기로 세척하였다. 재료의 화학성분과 기계적 성질을 Table 1, Table 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt.%)

Materials		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Pb	C	Al
Weld metal	A2024	4.34	0.27	0.30	0.50	1.47	-	-	Bal.
	SM45C	0.10	Bal.	0.26	0.65	-	-	0.51	-
Insert metal	A1050	-	0.13	0.14	-	0.01	-	-	Bal.
	A6061	0.39	0.34	0.46	0.14	0.83	0.48	-	Bal.
	A6351	0.48	0.16	0.91	0.57	0.69	-	-	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials		T.S(MPa)	Elongation(%)	Hardness(mHv)
Weld metal	A2024	520	11	148
	SM45C	875	8.5	287
Insert metal	A1050	107	31	32
	A6061	305	16.3	119
	A6351	216	20	70

3. 실험방법

마찰용접은 브레이크식 마찰용접기(NSF - 30H, 남선(주))를 사용하였다. 먼저, SM45C와 삽입재를 Table 3

의 용접조건으로 마찰용접한 후 플래시를 제거하고, 삽입재의 두께가 4mm가 남도록 절단한 다음 Table 4의 용접조건으로 A2024와 마찰용접하였다. 마찰용접 시험편을 Fig. 1에 나타냈다.

인장시험편은 인장시험 후 파면을 관찰하기 위하여 플래시만 제거하였으며, 시효성을 고려하여 용접후 일주일 지나서 실시하였다. 용접부의 경도시험은 용접계면의 중심부에서 축방향으로 0.2mm 및 0.5mm의 등간격으로 측정하였다.

용접부의 조직관찰을 위해 5초 동안 전해부식하여 광학현미경으로 관찰하였으며, 인장파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하고 EDS분석을 하였다.

Table 3 Friction welding conditions of SM45C to insert metals

Welding conditions	Insert metals		
	A1050	A6061	A6351
Spindle speed N(rpm)	1,000	1,000	1,000
Friction pressure P ₁ (MPa)	40	40	40
Upset pressure P ₂ (MPa)	80	120	100
Friction time T ₁ (sec)	1	1	1
Upset time T ₂ (sec)	5	5	5

Table 4 Friction welding conditions of A2024 to SM45C with insert metals

Welding conditions	Welding specimens			
	Direct	A1050	A6061	A6351
Spindle speed N(rpm)	2,000	2,000	2,000	2,000
Friction pressure P ₁ (MPa)	40	40	40	40
Upset pressure P ₂ (MPa)	80~160	80~160	80~180	80~160
Friction time T ₁ (sec)	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.8
Upset time T ₂ (sec)	5	5	5	5

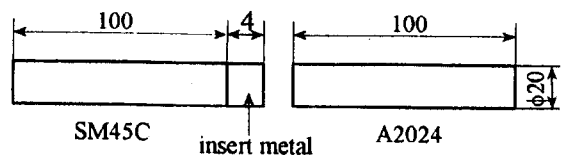


Fig. 1 Friction welding specimen(unit : mm)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 총업셋길이

주축회전수 2,000rpm, 마찰시간 1.0초로 고정하고, 업셋압력을 80~200MPa로 변화시킨 경우의 총업셋길이를 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 2에서 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우(Direct)는 총업셋길이가 1.5mm 미만으로 매우 적게 나타났다. 삽입재를 사용한 경우에는 이보다 많은 업셋길이가 나타났다. 연성이 좋은 A1050의 업셋길이가 가장 크게 나타났으며, 6000계열의 알루미늄합금인 A6061과 A6351은 같은 양의 업셋길이를 보여주고 있다.

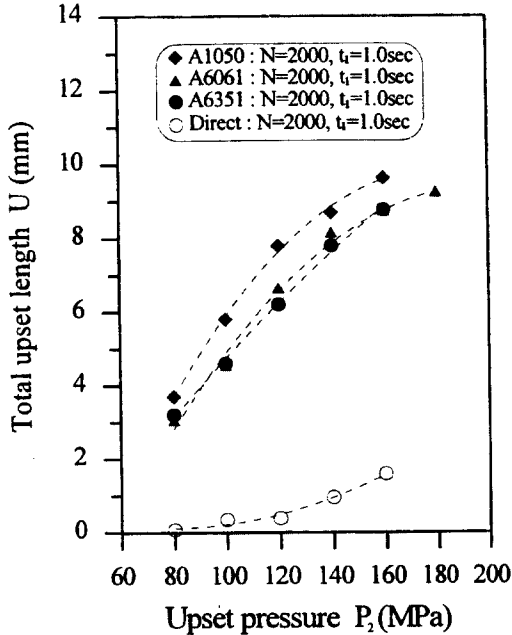


Fig. 2 Relationships between total upset length and upset pressure

주축회전수 2,000rpm, 마찰시간 1.0초, 업셋압력을 80~200MPa로 변화시켜 용접한 결과 최대강도를 얻은 업셋압력을 각각 고정하고, 마찰시간을 0.5초~1.8초로 변화시킨 경우의 총업셋길이를 Fig. 3에 나타냈다.

Fig. 3에서 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우는 총업셋길이가 1mm 미만이며, 삽입재를 사용한 경우에는 A6061, A1050, A6351의 순으로 총업셋길이가 더욱 크게 나타났다. A1050보다 연성이 나쁜 A6061의 총업

셋길이가 더욱 크게 나타난 것은 높은 업셋압력(180MPa) 때문으로 사료된다.

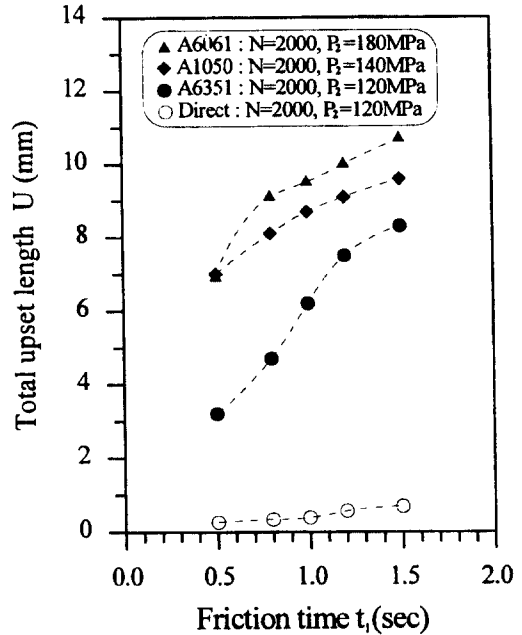


Fig. 3 Relationships between total upset length and friction time

Fig. 2와 Fig. 3에서 총업셋길이는 업셋압력과 마찰시간이 증가함에 따라 거의 비례하는 마찰용접의 전형적인 양상을 보여주고 있다.

총업셋길이가 삽입재 두께 4mm보다 적은 경우는 삽입재 일부만 플래시로 배출되고 나머지는 삽입재 잔존층으로 많이 남아 있는 상태이고, 4mm 이상인 경우는 삽입재가 플래시로 배출되면서 함께 모재(A2024)도 플래시로 배출된 상태이다. 총업셋길이가 지나치게 길면, 삽입재가 모두 플래시로 배출되어 삽입재를 사용하지 않은 결과로 된다. 따라서, 용접면에 남아있는 삽입재 잔존층의 두께가 용접부 강도에 미치는 영향이 크을 알 수 있다. 본 실험에서 최대 인장강도를 얻은 조건들의 삽입재 잔존층(remained layer) 두께를 Fig. 4에 나타냈다.

Fig. 4에서, 삽입재 잔존층 두께는 중심부 근처에서 얇았고, 중심부에서 8mm 떨어진 곳에서 가장 두껍게 나타났다. 중심부에서 A1050은 40 μ m, A6061은 105 μ m, A6351은 550 μ m이었고, 중심부에서 8mm 떨어진 곳에서는 A1050은 250 μ m, A6061은 380 μ m, A6351은 610 μ m이었다.

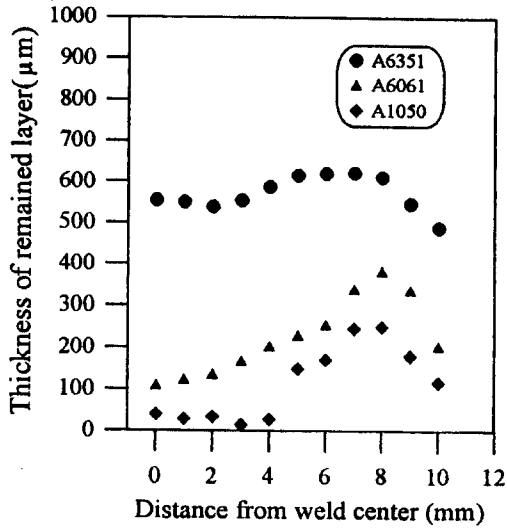


Fig. 4 Thickness of remained layer

4.2 인장시험

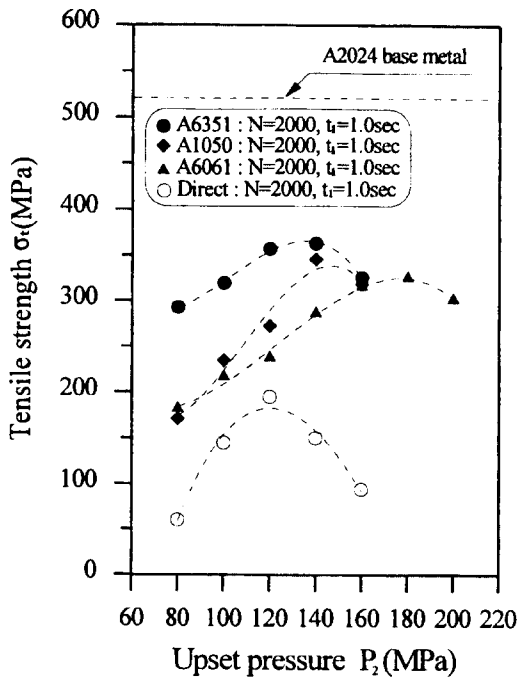


Fig. 5 Relationships between tensile strength and upset pressure

Table 4의 용접조건으로 마찰용접한 결과 업셋압력이 인장강도에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내고, 마찰시간이 인장강도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타낸다.

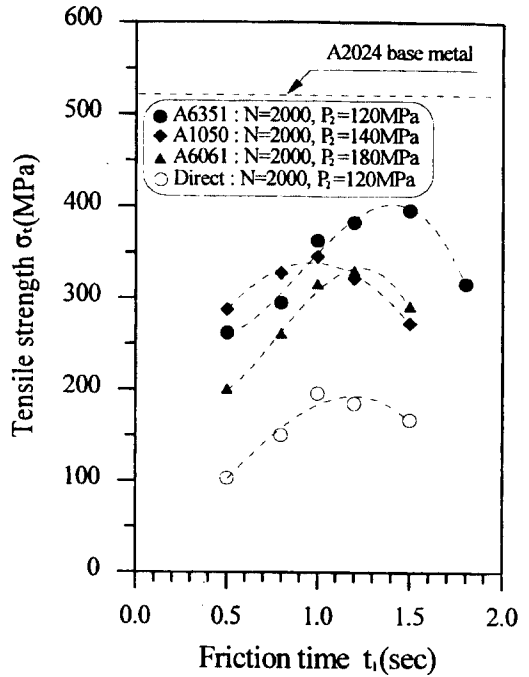


Fig. 6 Relationships between tensile strength and friction time

Fig. 5, Fig. 6에서 인장강도는 업셋압력과 마찰시간이 증가함에 따라 증가하지만, 최대 인장강도를 기점으로 업셋압력과 마찰시간이 증가하면 인장강도는 오히려 감소하는 결과가 나타났다. 이와같이, 높은 업셋압력과 마찰시간이 긴 경우에 인장강도가 감소하는 것은 마찰열에 의해 연화한 부분이 플래시로 배출되는 양이 많게 되어 접합면에 도달하는 온도가 낮아 결국 부적절한 용접조건으로⁶⁾ 되어 강도가 감소하는 것으로 사료된다.

최대 인장강도는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 업셋압력 120MPa, 마찰시간 1.0초에서 196MPa를 얻었다. 이것은 A2024 인장강도의 37.7%로 매우 낮은 용접강도이나, 삽입재를 사용한 경우에는 이보다 높은 강도를 얻어 삽입재의 역할이 큼을 알 수 있다. 삽입재를 사용한 경우, A1050은 업셋압력 140MPa, 마찰시간 1.0초에서 최대 인장강도 346MPa를 얻었고, A6061은

업셋압력 180MPa, 마찰시간 1.2초에서 최대 인장강도 326MPa를 얻었다. 그리고, A6351은 업셋압력 120MPa, 마찰시간 1.5초에서 최대 인장강도 396MPa를 얻었다. 이것은 본 실험에서 얻은 최대 인장강도로서 A2024 모재강도의 76.2%에 해당하였다. 마찰용접 강도로서는 만족한 강도는 아니지만, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 비교하면 상당한 강도라고 사료된다.

Hiizu Ochi 등⁴⁾은 용접부의 강도가 삽입재의 모재 강도에 영향을 받는다고 하여 삽입재의 강도가 높은 A6061에 대해서 높은 용접강도를 기대하였으나, 기대에 미치지 못하는 낮은 강도를 얻었다. 최대 인장강도가 삽입재 A6351, A1050, A6061의 순으로 나타난 것으로 보아서 용접부의 강도는 삽입재의 모재 강도에 영향을 받지 않았다.

4.3 경도시험

삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 시험편 ($P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{sec}$)과 삽입재를 사용한 경우, 인장시험에서 최대강도를 얻은 A6351의 시험편 ($P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.5\text{sec}$)을 가지고 용접계면의 중심에서 축 방향으로 좌우 1mm까지는 0.2mm의 등간격으로, 1mm 이상은 0.5mm의 등간격으로 측정하여 Fig. 7에 나타냈다.

A2024의 경도분포에서 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 용접계면으로 부터 모재의 경도보다 약간 낮은 경도분포를 보이다가 급격하게 낮은 경도분포를 보이는 연화역(soft zone)이 용접계면으로 부터 5mm~10mm 까지 5mm에 걸쳐 존재하고 있으며, 열영향부의 영역은 11mm이었다. 그리고, 삽입재 A6351을 사용한 경우, 용접계면으로부터 0.5mm이내에서 가장 낮은 경도분포를 보이는 것은 삽입재 잔존층의 경도이고, 용접계면으로부터 1mm~1.5mm에서의 높은 경도는 계면에 인접한 조밀한 조직의 경도로 보이며 1.5mm~4mm의 낮은 경도는 열영향부의 조대한 조직의 경도로 보인다. 그리고, 8mm~13mm에서의 아주 낮은 경도는 연화역으로 5mm에 걸쳐 존재하고 있다. 열영향부의 영역은 13mm로 직접 용접한 경우보다 더욱 넓었다. 연화역은 가공연화나 열처리 등에 의해 경도를 높인 모재를 사용한 용접부에서 관찰되는 현상²⁾이라는 보고가 있으나, A2024 시효재는 200℃ 전후의 온도로 수습초~수분 동안 가열하면 소입적 후의 경도로 낮아지는 복원현상⁵⁾의 특성을 가지고 있다. 따라서, 마찰열에 의한 온도의 영향으로 석출물이 형성되는 초기 단계인 GP1존이 사라지는 복원현상으로 사료된다

다. 열영향부의 영역이 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우보다 삽입재를 사용한 경우에 더욱 큰 것으로 보아서 삽입재를 사용한 경우가 열이력이 큼을 알 수 있다.

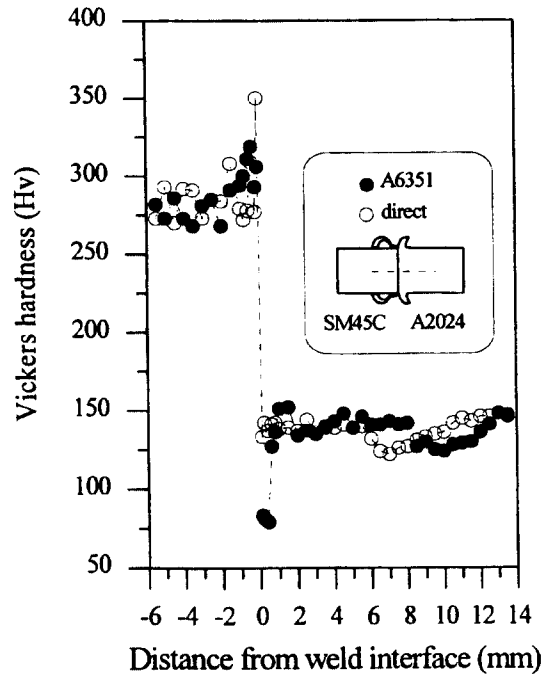
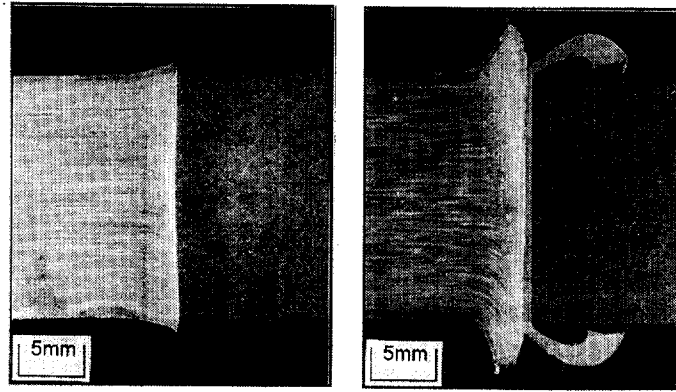


Fig. 7 Hardness distributions of friction welds (A6351 : $P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.5\text{sec}$, Direct : $P_2=120\text{MPa}$, $t_1=1.0\text{sec}$)

SM45C의 경도분포는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우, 용접계면으로 부터 약 0.2mm에서 최대 경도(350Hv)가 나타났는데, 이는 조직(Photo 2)에서 용접계면의 탄화물층으로 보이는 조밀한 조직의 경도로 보인다. 그러나, 삽입재를 사용한 경우에는 이 피이크 경도가 나타나지 않았다. 열영향부의 경도는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 삽입재를 사용한 경우 모두 모재보다 약간 높은 경도를 보이고, 열영향부의 영역은 약 2mm이내로 매우 좁았다. SM45C 열영향부의 경도분포가 모재보다 약간 높게 나타난 것은 높은 업셋압력에 의한 가공경화로 사료된다.

4.4 용접부의 조직

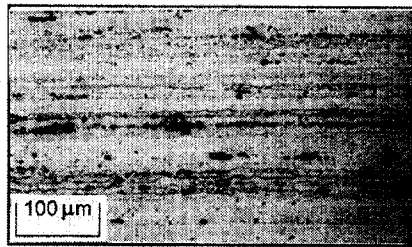
Photo 1은 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우



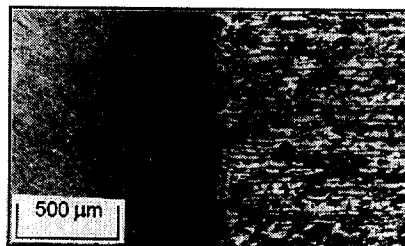
(A) A2024/SM45C

(B) A2024/A6351/SM45C

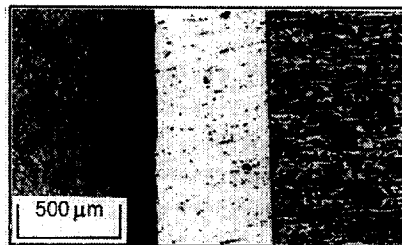
Photo 1 Macrostructure of friction welds



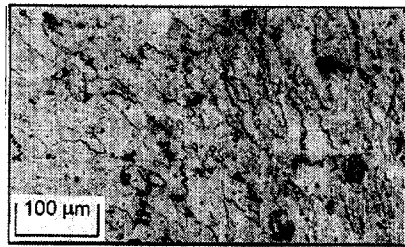
A2024 base metal



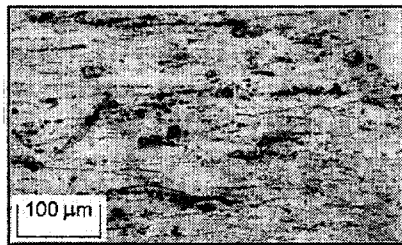
weld interface



weld interface



HAZ of A2024



HAZ of A2024

(A) A2024/SM45C

(B) A2024/A6351/SM45C

Photo 2 Macrostructure of friction welds

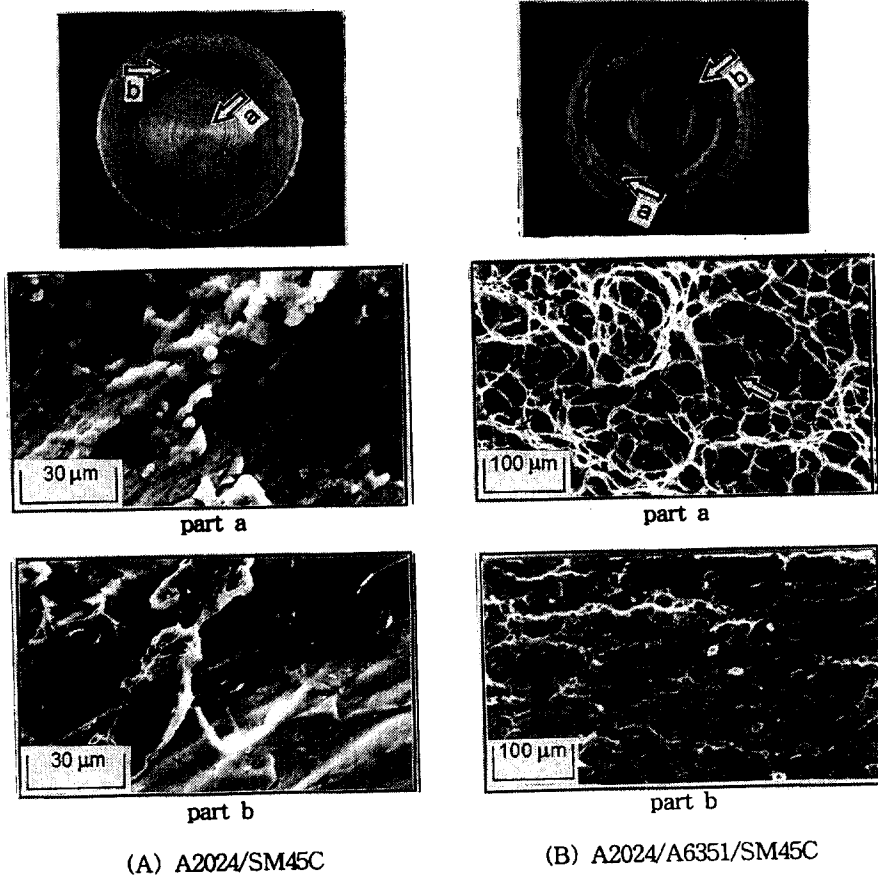


Photo 3 SEM image of tensile fracture surfaces

(A)와 삽입재 A6351을 사용한 경우(B)의 용접부 면을 보여준다. 플래시는 재질이 단단한 SM45C에서는 형성되지 않고, A2024와 삽입재인 A6351에서 형성되었다. 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 플래시의 양이 아주 적고, 삽입재 A6351를 사용한 경우에는 삽입재와 함께 A2024의 플래시 양이 상당히 많다. A2024의 소성변형 영역은 삽입재를 사용한 경우에 뚜렷하게 나타나는데, 중심부보다 원주부에서 더욱 넓게 나타났다. 용접부의 중심부를 광학 현미경으로 관찰한 결과를 Photo 2에 나타낸다. Photo 2의 (A)는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 조직이고, Photo 2의 (B)는 삽입재

A6351를 사용한 경우의 조직이다.

용접계면에서의 조직을 비교해 보면, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 A2024의 조직은 모재의 압연 방향 조직이 축에 수직인 방향으로 매우 조밀하고 넓게 재결정 되었으며, SM45C의 조직은 축에 수직인 조밀한 조직이 매우 좁았다. 삽입재 A6351를 사용한 경우, A2024의 축에 수직인 조밀한 조직은 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우 보다 좁았다. 삽입재 잔존층의 조직은 사진에 나타나지 않아서 이를 200배로 확대해 본 결과 축에 수직인 방향으로 재결정 되었음을 확인할 수 있었다. SM45C는 축에 수직인 조밀한 조직이 거의 확인되

지 않을 정도로 좁아졌다. 이것은 SM45C가 2번 째 용접 과정에서 삽입재의 차단효과²⁾에 의한 재열효과로 조직이 회복된 것으로 보인다.

열영향부의 조직을 비교하면, A2024는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 삽입재를 사용한 경우 모두 조직이 조대화 되었다.

4.5 인장파면

최대 인장강도를 얻은 조건에서의 인장파단 위치는 모두 용접계면에서 파단되었으며, A1050과 A6351은 파면의 일부에서 딴플이 형성되었다.

삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우와 삽입재 A6351을 사용한 경우의 SM45C측 인장파면과 SEM사진을 Photo 3에 나타낸다.

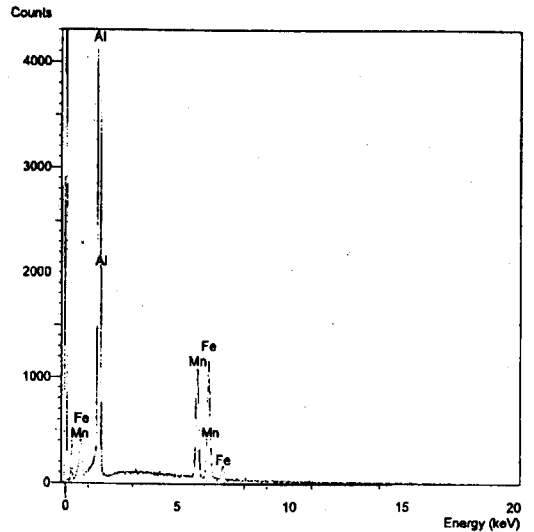
삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우(Photo 3(A))에서는 파면의 중앙부(a)와 외주부 일부에서 알루미늄합금이 탄소강 표면에 얇게 달라 붙어 있으며, R/2부분(b)은 마찰에 의한 흔적과 알루미늄합금이 중앙부보다 적게 붙어 있는 매끈한 파면으로 강도가 낮음을 알 수 있다.

삽입재 A6351을 사용한 경우(Photo 3(B))에서는 파면의 일부에서 딴플(a)이 형성되어 연성파단이 나타났으며, 평활한 파면은 알루미늄합금이 탄소강 표면에 달라 붙어 있는 매끈한 파면을 보여주고 있다.

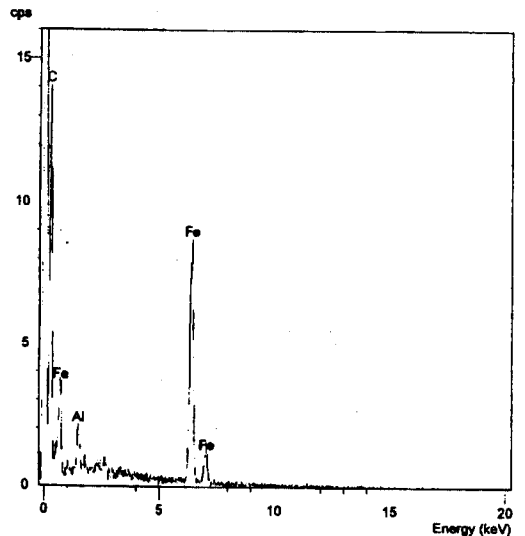
삽입재 A6351을 사용한 경우, 딴플의 분지에서 취성 파괴된 입자들(Photo 3(B)의 (a), 화살표 부분)이 발견되었다. 이를 분석하기 위해 딴플이 형성된 부분과 딴플이 형성되지 않은 부분 그리고, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 매끈한 파면에 대해서 EDS분석한 결과를 Fig. 8에 나타냈다.

딴플의 분지에서 발견된 취성입자를 EDS분석한 결과 [Fig. 8(A)]에서 Al, Fe, Mn의 원소가 나타난 것으로 보아 이들은 (Mn,Fe)Al₆ 금속간 화합물로 추정된다. 이와같은 취성의 금속간 화합물이 형성되기 때문에 삽입재를 사용해도 용접부의 강도가 A2024 모재강도에 미치지 못하는 것으로 사료된다. 그리고, 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우의 매끈한 파면을 EDS 분석한 결과

[Fig. 8(B)]에서는 SM45C측 인장파면으로 Al, Fe, C의 원소가 나타났으며, (Mn,Fe)Al₆ 금속간 화합물은 발견되지 않았다. 또한, 삽입재 A6351을 사용한 경우에서 딴플이 형성되지 않은 매끈한 파면의 EDS분석 결과도 이와같은 결과가 확인되었다.



(A) A6351/A2024/SM45C(dimple)



(B) A2024/SM45C(center)

Fig. 8 Result of EDS analysis in fractured surface

5. 결론

A2024와 SM45C 마찰용접의 삽입재로 인장강도가 각

기 다른 알루미늄합금을 사용하여 마찰용접하였다. 용접부의 인장시험, 경도시험, 용접부의 조직 및 인장파면을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 최대 인장강도는 삽입재 A6351를 사용한 경우에서 A2024 모재강도의 76.2%인 396MPa를 얻어 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우(37.7%) 보다 훨씬 높은 강도를 얻었다. 이 때, 용접조건은 $N = 2000\text{rpm}$, $P_1 = 40\text{MPa}$, $P_2 = 120\text{MPa}$, $t_1 = 1.5\text{초}$, $t_2 = 5\text{초}$ 이었다.
2. 최대 인장강도는 삽입재를 사용한 경우 A6351, A1050, A6061 순으로 높아 삽입재의 모재 강도에 영향을 받지 않았다.
3. A2024 열영향부의 경도분포에서 삽입재를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 모두 연화역이 확인 되었다.
4. 인장파면에서 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에는 덤플이 형성되지 않았으나, 삽입재 A6351를 사용한 경우에는 파면 일부에서 덤플이 형성되었고, 덤플의 분지에서 취성의 (Mn, Fe)Al₆ 금속간 화합물이 발견되었다.

참 고 문 헌

1. Hiroshi Tokisue, Kazuyoshi Kato, "2017알루미늄합금 摩擦壓接繼手の 機械的性質", 輕金屬, Vol. 28, No. 9, pp. 450, 1978.
2. Takeshi Shinoda, Kazushige Tanada, Yoshihisa Katoh, Takao Shimizu, "알루미늄합금의 摩擦壓接現象と機械的性質について", 輕金屬鎔接, Vol. 31, No. 10, pp. 351, 1993.
3. 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, pp. 445, 1994.
4. Hiizu Ochi, Koichi Ogawa, Yasuo Suga, Takuya Iwamoto, Yoshiaki Yamamoto, "인서트메탈을 이용한 알루미늄합금과 鋼의 摩擦壓接", 輕金屬鎔接, Vol. 32, No. 11, pp. 469~476, 1994.
5. 輕金屬協會編, "알루미늄技術便覽", 輕金屬出版, pp. 1189, 1985.
6. Kazuyoshi Kato, Hiroshi Tokisue, "2024알루미늄합금 摩擦壓接繼手の 機械的性質", 輕金屬, Vol. 40, No. 5, pp. 351~355, 1990.