

研究論文

## 탄소강(SM45C)과 알루미늄 합금(A6063)의 마찰용접성에 관한 연구

강 성 보\* · 민 택 기\*\*

### A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(SM45C) to Aluminum Alloy(A6063)

S. B. Kang\* and T. K. Min\*\*

**Key Words** : Friction welding (마찰용접), Plastic deformation (소성변형), Weld interface (용접경계면), Upset length (업셋길이), Shear strength (전단강도)

#### Abstract

This study deals with the friction weldability of machine structural carbon steel (SM45C) to Al-Mg-Si aluminium alloy (A6063). The bonding strength of friction welded joints, from all mechanical test, exceeded that of A6063 base metal, under the condition of friction time 1.5 sec, upset pressure 80MPa. The friction welded joints under these conditions exhibited tensile strength of 262MPa, bending angle of 90° without crack at weld interface and shear strength of 113MPa. Consequently, the friction weldability of SM45C to A6063 was very excellent, and that was possible without special preparation of weld surfaces

#### 1. 서 론

다기능과 경량화를 추구하는 각종 분야에 사용할 목적으로 알루미늄과 철강재료를 접합시키기 위한 각종 연구가 활발해지고 있다. 특히, 마찰용접(friction welding)과 같은 고상용접은 이러한 이종금속들을 서로 접합하는데 매우 효과적이다.

알루미늄과 철강재료의 마찰용접에 관한 연구는 일본을 중심으로 이전부터 수행되어 왔다. Hasui 등<sup>1)</sup>은 순 알루미늄 A1050과 SM25C의 마찰용접에서 표면조건의 영향에서, 용접면에 존재하는 산화피막과 기름막을 제거한 경우에 훌륭한 기계적 성질을 얻을 수 있음을 보여주었다. Yashan 등<sup>2)</sup>과 Chernenko 등<sup>3)</sup>은 스테인리스강과 순 알루미늄 A1100의 마찰용접시 매우 훌륭한 이음과 기계적 성

※ 1997년 10월 20일 접수

\* 학생회원, 충남대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 충남대학교 기계공학과

질을 얻을 수 있음을 보여주었다. 이들의 공통된 특징은 순 알루미늄(1000계열)과 철강재료와의 마찰용접 특성이 우수하다는 점이다.

그러나 A2017, A5056, A6061, A7075 등의 알루미늄 합금과 탄소강 혹은 스테인리스강과의 마찰용접에서는 이음효율이 매우 낮게 나타나는 데(60% 미만), 이를 개선시키기 위해서 순 알루미늄 계열의 중간삽입재(interlayer)의 사용을 제시하고 있다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 순 알루미늄 계열 보다 강도가 높으면서도 내식성과 압축성이 우수한 알루미늄 합금인 A6063과 기계구조용 탄소강 SM45C를 직접 마찰용접하여 인장, 굽힘, 전단 등의 기계적 시험과 용접계면의 SEM 사진을 통해서 마찰용접성을 평가하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 기계구조용 탄소강 SM45C와 내식성과 연성이 풍부한 Al-Mg-Si 계열의 알루미늄 합금 A6063이며, 두 재료의 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타냈다.

사용된 두 재료는 모두 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉의 형태이고, 산화피막, 기름 등의 이물질들을 제거하기 위하여 마찰용접 이전에 용접

면을 선반 가공한 다음 아세톤으로 세척하였다.

사용된 마찰용접기는 최대추력 10톤의 브레이크 타입 모델로서 스피들 회전수가 1000rpm과 2000rpm으로 고정되어 있다. 탄소강 SM45C를 회전부 유압척에 설치하고, 알루미늄 합금 A6063을 고정부 유압척에 설치하여 마찰용접을 하였다. 또한 양쪽 유압척으로부터 돌출된 재료의 길이는 25mm가 되도록 하였다. 업셋길이를 감소시킬 목적으로 마찰압력  $P_1$ 은 20MPa로 가능한 한 낮게 설정하였고, 용접계면에서 철-알루미늄 금속간화합물이 생성되는 것을 방지하거나 최소화하기 위해서는 비교적 낮은 용접온도가 요구되므로<sup>3)</sup> 1000rpm의 낮은 회전수를 사용하였다.

이와 같은 조건하에서 마찰시간  $t_f$ 과 업셋압력  $P_2$ 를 변화시켜 마찰용접을 하였으며, 사용된 용접 조건들을 Table 3에 나타내었다.

마찰용접한 시험편의 모든 기계적 시험은 만능 재료시험기에서 했고, 인장시험을 위해 Fig. 1에서 보여주는 것과 같은 인장시험편을 사용했다. 이러한 방법은 Yashan 등<sup>2)</sup>이 이용했던 방법과 유사하며, 알루미늄 합금의 소성변형을 제한하여 용접면으로부터 멀리 떨어진 알루미늄 합금 A6063 모재에서 파단이 일어나는 것을 방지하고, 가능한 한 용접면에 인접한 곳에서 파단을 유도하는 것이다.

용접시험편의 굽힘인성을 평가하기 위한 방법으로 3점 굽힘시험(곡률반경 : 23mm, 지지점 거리

Table 1. Chemical composition of materials

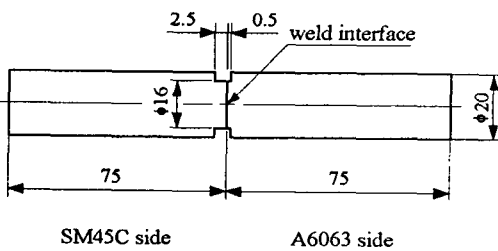
Materials	Alloying element (Wt. %)									
	Si	Mg	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	C	Fe	Al
A6063	0.45	0.53	0.11	0.02	0.03	0.28	0.10	-	0.37	Bal.
SM45C	0.29	-	0.11	0.68	0.3	0.07	-	0.46	Bal	-

Table 2. Mechanical properties of materials

Material	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
A6063	190	347	106	13	55
SM45C	680	-	-	-	220

**Table 3.** Friction welding conditions

Spindle revolution N (rpm)	1000
Friction pressure $P_1$ (MPa)	20
Friction time $T_1$ (sec)	0.5~2.5
Upset pressure $P_2$ (MPa)	20~100
Upset time $T_2$ (sec)	6

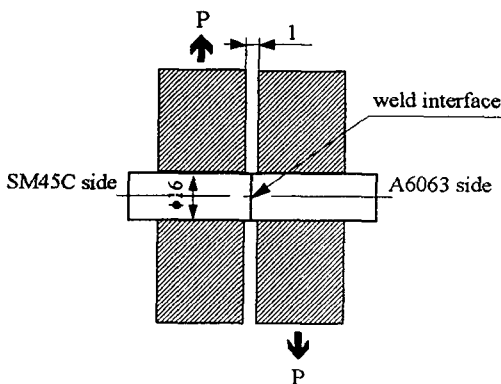


**Fig. 1** Shape and dimension of tensile test specimen

: 108mm) 을 하였다. SM45C-A6063 마찰용접 시험편을 직경 16mm의 환봉으로 가공하였고, 용접 계면이 지지점 중간에 오도록 하였다.

마찰용접부의 전단강도를 평가하기 위한 방법은 Fig. 2와 같은 전단지그를 설계 제작하여 용접계면이 정중앙에 오도록 하고 전단시험을 하였다.

또한 인장파면과 용접부의 현미경 조직을 관찰하기 위해 SEM을 이용하였고, 용접계면에서의 확산 여부를 EDAX(Energy Dispersive Analysis of X-ray)로 정성 평가하였다.



**Fig. 2** Shape and dimension of shear test specimen

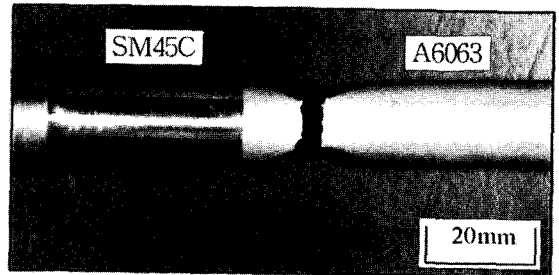
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 인장시험

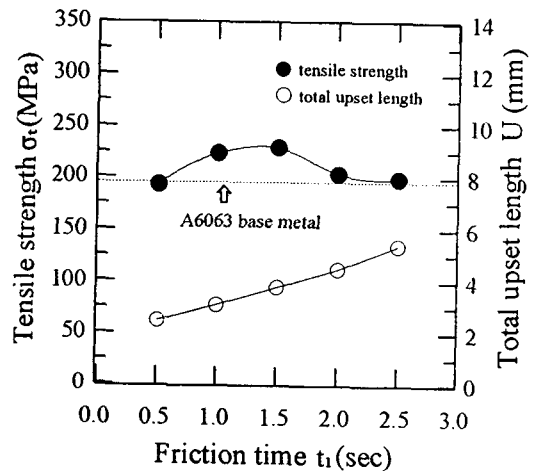
SM45C와 A6063 용접 시험편을 Table 3과 같은 조건으로 마찰용접하여 표준 규격 KS B 0801 14A 호의 인장 시험편으로 가공한 다음 인장시험을 하였다. 그 결과 대부분의 인장 시험편은 Photo 1과 같이 용접계면으로부터 멀리 떨어진 A6063 모재에서 연성파단 되었다.

회전수 1000rpm, 업셋압력 40MPa의 조건으로 접합한 경우의 용접부의 인장강도  $\sigma_t$ , 업셋길이 U와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있듯이 업셋길이는 마찰시간에 비례하여 점진적으로 증가하였고, 용접부의 인



**Photo 1** Tensile test specimen failed in the A6063 base met



**Fig. 3** Relationship between friction time and tensile strength ( $P_2 = 40\text{MPa}$ )

장강도는 마찰시간의 증가와 더불어 증가하다 마찰시간 1.5초에서  $\sigma_t = 228\text{MPa}$ 의 최대 값을 기록하였다. 그 이상의 마찰시간에서는 인장강도가 오히려 감소하는 경향을 나타내었는데, 이러한 결과로부터 SM45C와 A6063 사이의 마찰용접에 필요한 적정 마찰가열 시간이 1.5초임을 알 수 있다.

Fig. 4는 마찰시간을 1.5초로 고정한 다음 업셋압력  $P_2$ 를 변화시켜 마찰용접했을 경우, 업셋압력  $P_2$ 와 용접부 인장강도  $\sigma_t$ , 업셋길이 U와의 관계를 보여준다.

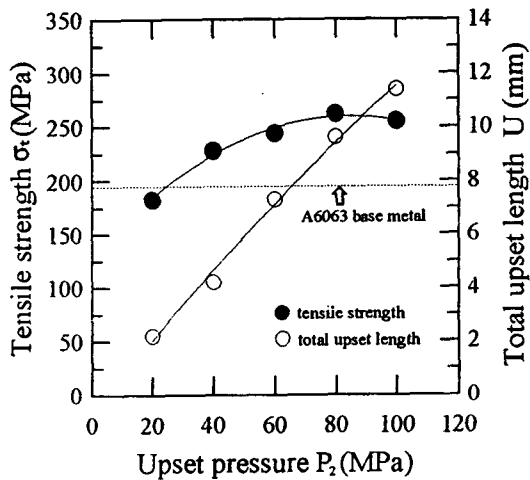


Fig. 4 Relationship between upset pressure and tensile strength ( $t_f = 1.5\text{sec}$ )

업셋압력이 증가하면서 업셋길이는  $P_2$ 는 20MPa일 때 2.2mm,  $P_2$ 가 100MPa일 때 11.4mm로 업셋압력의 증가와 함께 크게 증가하였고, 용접부의 인장강도 또한 더욱 증가하여  $P_2$ 가 40MPa 이상일 경우 A6063 모재의 인장강도 (190MPa)를 능가하였고,  $P_2$ 가 80MPa일 때  $\sigma_t$ 는 262MPa로서 최고치를 나타냈다.

업셋압력의 증가에 따라 용접부의 인장강도가 증가되는 것은 여러 가지 원인을 들 수 있다. 즉, 금속조직의 미세화, 업셋 플래시의 증가에 의한 용접면 이물질 배출의 촉진 등이다<sup>9)</sup>.

Photo 2는 마찰시간  $t_f = 1.5$ 초에서 업셋압력  $P_2$ 의 변화에 따른 SM45C측 인장파면 형태를 나타낸 사진이다.

업셋압력  $P_2$ 가 20MPa인 조건에서 SM45C 측의

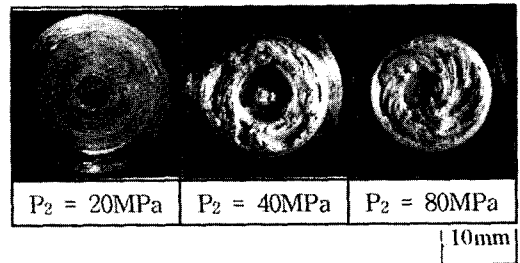
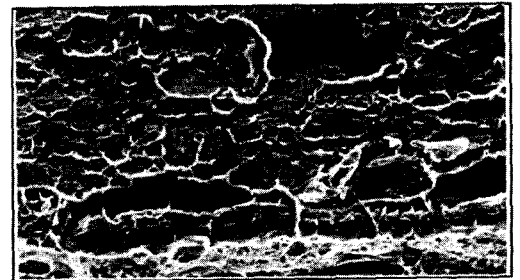


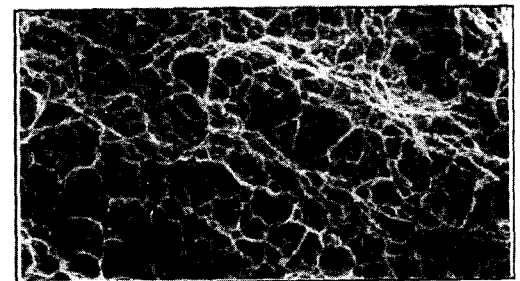
Photo 2 Tensile fracture surface

파면은 평활하고 알루미늄이 얇게 달라붙어 있는 것으로 보이는데, Fig. 4에서도 알 수 있듯이 이와 같은 상태에서도 용접부의 인장강도는 183MPa로서 A6063 모재에 접근하였다. 업셋압력  $P_2$ 가 40MPa인 조건에서는 파면 상에 덤플과 함께 나선형의 알루미늄 합금의 소성유동 흔적이 나타났으며,  $P_2$ 를 80MPa까지 증가시킨 경우에는 나선형의 소성유동 흔적이 더욱 커지고 파면의 대부분 영역이 덤플로 나타났다.

Photo 3은 인장파면의 SEM 사진을 보여준다. 업셋압력  $P_2$ 가 20MPa인 조건에서는 파면 위에 알루미늄이 얇게 달라붙어 있는 것을 볼 수 있고, 덤



(a)  $P_2 = 20\text{MPa}$



(b)  $P_2 = 80\text{MPa}$

Photo 3 SEM image of tensile fracture surface

플의 크기가 불균일하며, SM45C 모재 표면의 일부가 노출된 미접합 영역이 존재한다. 그러나 파면의 상당 부분은 연성파단을 일으킨 것으로 확인된다. 반면, 업셋압력  $P_2$ 가 80MPa인 조건에서는 완전한 연성파단을 보여준다.

### 3.2 굽힘시험

마찰시간  $t_1$ 을 1.5초로 고정한 다음 업셋압력  $P_2$ 를 변화시켜 마찰용접한 SM45C-A6063 용접 시험편에 대해서 90°까지 3점지지 굽힘시험을 했고, 굽힘시험 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

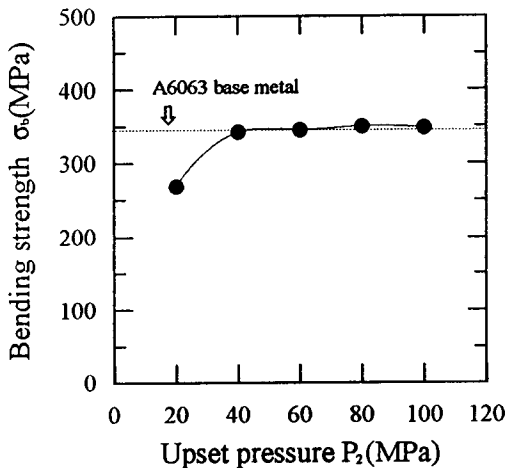


Fig. 5 Relationship between upset pressure and bending strength ( $t_1 = 1.5\text{sec}$ )

업셋압력  $P_2$ 가 20MPa일 때 용접부의 굽힘강도는 A6063 모재 (347MPa)보다 낮은 268MPa였으며, 용접계면에서 균열이 발생하는 시점의 굽힘각은 7°로 미소하게 나타났다.

업셋압력  $P_2$ 가 40MPa 이상일 경우에는 굽힘강도가 거의 일정하게 나타났고, A6063 모재의 굽힘강도와 거의 차이가 없었다. 또한 굽힘각 90°에서도 용접계면에서 균열 발생이 없이 A6063측 모재에서 굽힘이 발생하였다. 업셋압력  $P_2$ 가 40MPa 이상으로 증가하여도 더 이상 굽힘강도가 증가하지 않은 것은 A6063측 모재에서 굽힘이 일어났기 때문으로 생각된다.

그러므로 업셋압력  $P_2$ 가 40MPa 이상으로 되면, 용접부의 굽힘강도는 A6063 모재와 비교하여 동등

한 수준이거나 그 이상으로 되는 경향을 보였다.

Photo 4는 굽힘각 90°까지의 굽힘시험에서 균열이 발생되지 않은 SM45C-A6063 마찰용접 시험편의 굽힘시험 후의 양상을 보여준다.

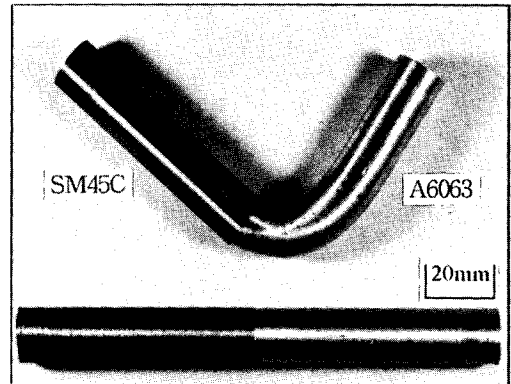


Photo 4 Bend test specimen bended in the A6063 base metal

### 3.3 전단시험

Fig. 6은 마찰시간 1.5초에서 업셋압력  $P_2$ 의 변화에 따른 SM45C-A6063 마찰용접부의 전단강도  $\sigma_s$ 를 나타낸다.

SM45C-A6063 마찰용접부의 전단강도는  $P_2$ 가 40MPa 이상일 때, A6063 모재의 전단강도 (106MPa)를 증가하였고,  $P_2$ 가 80MPa일 때 마찰용접부의 전단강도는 113MPa로 최고치를 나타냈다. 결과적으로 Fig. 4에서 알 수 있듯이, SM45C-A6063 마찰용접부의 강도가 A6063 모재의 강도에 상응하거나 이를 증가하는 적정 업셋길이는 4mm인 것을 알 수 있다.

Photo 5에 마찰시간 1.5초에서 업셋압력  $P_2$ 의 변화에 따른 SM45C측 전단파면 형태를 나타냈다.

인장시험 결과와 비교해 보면, 업셋압력  $P_2$ 가 80MPa에서 SM45C-A6063 마찰용접부의 전단강도율 (SM45C-A6063 마찰용접부의 전단강도/A6063 모재의 전단강도)은 106%로서 인장강도율 (SM45C-A6063 마찰용접부의 인장강도/A6063 모재의 인장강도) 138%보다 낮다. 이러한 원인은 Ogawa 등<sup>6</sup>에 의해 보고된 바와같이 압연방향(소재의 축방향)으로 평행하게 늘어진 A6063 모재의 섬유조직이 소성유동으로 인해 용접계면 근처에서 계면과 평행하게 배열되기 때문이라고 생각된다.

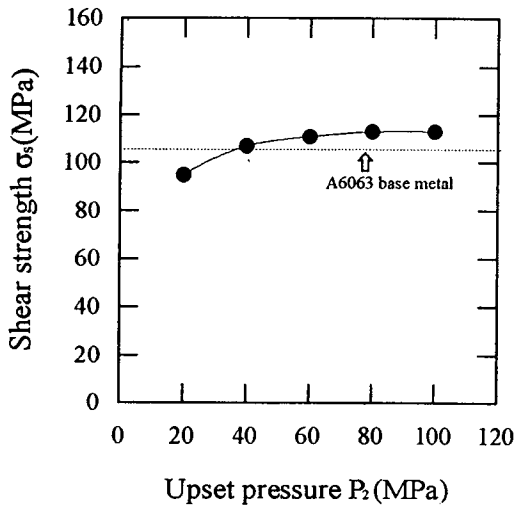


Fig. 6 Relationship between upset pressure and shear strength ( $t_1 = 1.5\text{sec}$ )

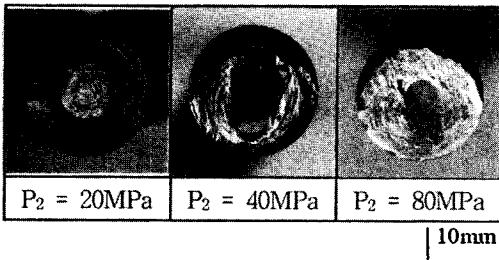


Photo 5 Shear fracture surface

### 3.4 용접부의 현미경 조직

Photo 6은 SM45C-A6063 마찰용접부의 SEM 사진으로서, 용접 시험편의 중심축으로부터 원주방향으로 5mm 떨어진 곳을 보여준다.

업셋압력  $P_2$ 가 20MPa인 (a)의 경우에는 용접계면이 파형(wave form)을 이루고 있다. 이는 SM 45C측 용접면을 준비하는 과정에서의 절삭가공 흔적으로 생각되는데, 이를 확인하기 위하여 용접면을 입도 #1000의 샌드 페이퍼로 연마하고 동일 조건에서 마찰용접을 한 결과 파형은 나타나지 않았다. 결국 업셋압력  $P_2$ 가 20MPa인 조건에서 SM 45C측은 변형이 적었고, 사진에서 알 수 있는 바와 같이 용접계면에 인접한 곳에서 미세한 소성유동 형태로 나타났다.

업셋압력이 증가함에 따라서 파형은 감소된 것

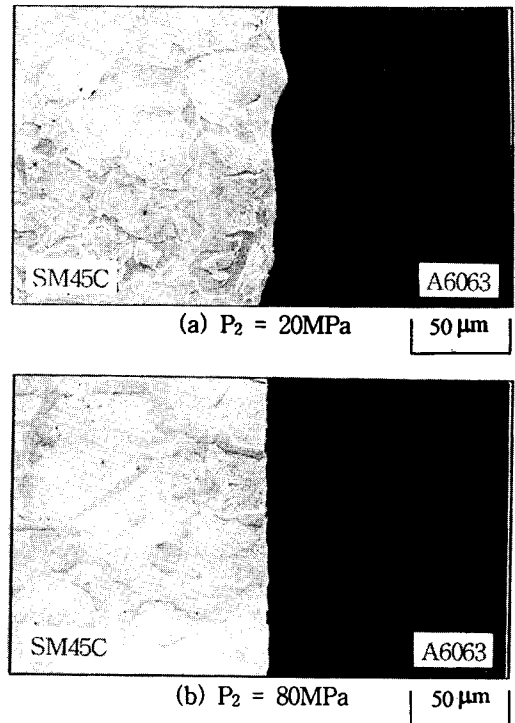


Photo 6 Microstructure of friction weld

으로 확인되었고, 업셋압력  $P_2$ 가 80MPa인 (b)의 경우에는 펄라이트와 페라이트로 이루어진 용접계면의 형태가 단조롭고 직선상에 가깝게 나타났다. 용접계면 근처에서 SM45C는 소성유동이 매우 적고, 브레이킹 과정에서 생긴 강한 마찰토크에 힘입어 입자들이 마멸 혹은 전단된 형태로 나타난다. 이것은 용접계면에서 이물질 배출을 증가시키고, 새로운 금속표면을 노출시킴에 따라서 두 금속간의 결합력을 강화시킬 것으로 생각된다.

Fig. 7은 EDAX 정성분석한 결과로서 용접계면에 수직방향으로 line scanning하여 Fe와 Al의 분포를 나타낸 것이다.  $P_2$ 가 20MPa와 80MPa인 조건 모두 용접계면에 인접한 A6063 측에서는 SM 45C의 성분인 Fe가 약  $2\mu\text{m}$  정도 확산되었고, SM 45C 측으로의 Al의 확산은 약  $1\mu\text{m}$  정도로서 상호확산의 좋은 형태를 보여준다. 두 조건에서의 결과가 비슷한 것은 마찰시간  $t_1$ 이 1.5초로서 동일하기 때문이며, 최고 도달온도는 Chernenco 등<sup>3)</sup>의 실험결과와 비교해 볼 때, 두 조건 모두 400℃ 내의 일 것으로 추정된다. 결국, 업셋압력  $P_2$ 가 20MPa로

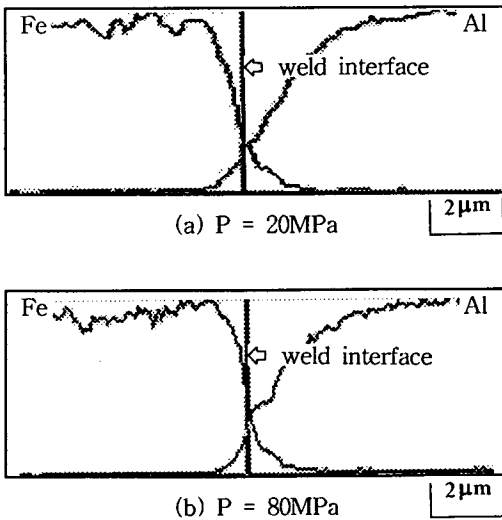


Fig. 7 Traces of EDAX

낮은 경우에도 용접부의 강도가 A6063 모재에 접근하는 것은 상호확산에 의한 결과이지만, 이러한 결과만으로는 더 이상 강도를 향상시킬 수 없음을 의미한다.

이와같은 사실들은 SM45C와 A6063의 마찰용접성이 아주 뛰어나고, 특별한 표면준비가 없어도 SM45C측 표면의 노출을 증대시키는 높은 압력의 적용으로 우수한 성능의 용접이음이 가능함을 제시한다.

결론적으로 기계적 시험과 SEM 사진을 통해서 본 SM45C와 알루미늄 합금 A6063 사이의 마찰용접 특성은 매우 우수하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기계 구조용 탄소강 SM45C와 Al-Mg-Si 계열의 알루미늄 합금인 A6063을 마찰용접하여 용접특성을 고찰하였고, 용접부의 기계적 성질을 인장시험, 굽힘시험, 전단시험에 의해 평가하였다. 얻은 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 마찰시간 1.5초, 압력 40MPa의 조건으로 마찰용접한 시험편들은 인장시험에서 A6063 모재의 인장강도(190MPa)를 능가하였고, 압력을 80MPa까지 증가시킨 경우에는 262MPa로서 최

고치를 나타내었다.

(2) 마찰시간 1.5초, 압력 40MPa 이상의 조건에서 마찰용접한 시험편들은 굽힘각 90°까지의 굽힘시험에서 용접경계면에서 균열 발생이 없이 A6063 모재에서 굽힘이 일어났다.

(3) 마찰시간 1.5초, 압력 40MPa의 조건으로 마찰용접한 시험편들은 전단시험에서 A6063 모재의 전단강도(106MPa)를 능가하였고, 압력을 80MPa까지 증가시킨 경우에는 113MPa로 최고치를 나타냈다.

(4) SM45C와 A6063 사이의 마찰용접성은 극히 우수하였고, 용접면의 특별한 준비가 없어도 SM45C측 표면의 노출을 증대시키는 높은 압력의 적용으로 우수한 성능의 용접이음이 가능하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Atsushi Hasui, Takashi Matsui : On the Effect of Faying Face Condition on Weldability in Friction Welding, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 18, No. 1, (1987), pp. 77~82
2. Yashan D., Tsang S., Johns W. L. and Doughty M. W. : Inertia Friction Welding of 1100 Aluminum to Type 316 Stainless Steel, Welding Journal, (1987), pp. 27~37
3. I. A. Chernenco : Friction welding AD1 aluminium to 12Kh18N10T steel, Welding International, No. 7, (1989), pp. 586~590
4. K Ogawa, H Ochi, Y Yamamoto, M Habe, T Iwamoto, Y Suga : Friction welding of 2017 aluminium alloy and S45C carbon steel using an insert, Welding International, Vol. 8, No. 6, (1994), pp. 445~451
5. 摩擦壓接協會 : "摩擦壓接", コロナ社, 第 3 章, (1970), pp. 26~46
6. K. Ogawa, H. Yamaguchi, T. Morimoto, K. Takematu, H. Sudo : Shear strength characteristics of aluminium alloy friction welds, Welding International, Vol. 5, No. 11, (1991), pp. 860~866