

A2024-T6/A6061-T6의 摩擦熔接 特性에 관한 研究

이세경*, 민택기⁺

(논문접수일 2005. 8. 29, 심사완료일 2005. 11. 11)

A Study on the Properties in Friction Weldability of Dissimilar Aluminum Alloys A2024-T6/A6061-T6

Se-Gyoung Lee*, Taeg-Ki Min⁺

Abstract

This study deals with the friction welding of A2024-T6 to A6061-T6; The friction time was variable conditions under the conditions of spindle revolution of 2000rpm, friction pressure of 50MPa, upset pressure of 100MPa, and upset time of 5.0seconds. Under these conditions, the microstructure of weld interface, tensile fracture surface and mechanical tests were studied, of friction weld, and so the results were as follows.

1. When the friction time was 1.5seconds under the conditions, the maximum tensile strength of the friction weld happened to be 292MPa, which is 94.2% of the base material's tensile strength(310MPa). At the same condition, the maximum shear strength was 212MPa, which is equivalent to 103% of the base material's shear strength (205MPa).
2. At the same condition, the maximum vickers hardness was Hv146 at A2024-T6 nearby weld interface, which is higher Hv3 than condition of the friction time 0.5seconds, and the maximum vickers hardness was Hv120 from weld interface of A6061-T6, which is higher Hv28 then base material's.
3. The results of microstructure analysis show that the structures of two base materials have fractionized and rearranged along a column due to heating and axial force during friction, which has affected in raising hardness and tensile strength.

Key Words : friction welding(마찰용접), aluminum alloy(알루미늄 합금), friction time(마찰시간), friction pressure(마찰압력), tensile strength(인장강도)

* 충남대학교 대학원 기계공학과 (prince54@empal.com)
주소: 305-764 대전시 유성구 공동 220번지
⁺ 충남대학교 기계공학과

1. 서론

마찰 용접은 비가열식 고상(固相)용접으로 피용접재에 회전운동과 함께 가압시켜 접촉면에서 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 용접방법⁽¹⁾으로 접촉면이 용융되기 전 일정한 온도에 도달하였을 때, 압력을 가하면 소성변형을 일으키면서 접합되므로 접합강도가 우수하고, 신뢰성이 좋으며, 격심한 소성운동으로 결정의 조대화나 금속간 화합물이 생기기 어렵고, 접합부에서만 발열하므로 일반 용접에 비하여 열효율이 높다.

또한, 마찰용접법은 국부적인 마찰열에 의해 접합부에서만 열이 발생하기 때문에, 타 용접에 비해 용접온도가 낮아 금속간 화합물의 발생이 적고 고온균열이 적으며, 매우 좁은 열영향부(HAZ)⁽²⁾를 만든다.

일반적으로 알루미늄 합금은 용융용접을 사용하고 있다. 그러나, 용융용접은 높은 용접에너지가 필요하기 때문에 비경제적이고, 열영향부가 넓어 용접성이 떨어지며, 용접 결함이 많이 발생한다. 특히 항공우주산업 등 첨단산업의 발달과 더불어 제품의 경량화에 따른 알루미늄의 사용이 점차 확대되고 있는 현실에서 에너지 효율성 및 용접성이 뛰어난 새로운 용접법⁽³⁾에 대한 연구⁽⁴⁾ 및 개발이 요구된다.

본 연구에서는 기계적 성질은 우수하지만 알루미늄합금 중 용접성이 불량한 초두랄루민(A2024-T6)⁽⁵⁾과 가공성 및 강도가 높으며 내식성이 뛰어나 항공기의 부품, 선박용 부품, 자동차 부품으로 사용되는 알루미늄합금(A6061-T6)의 마찰용접에 있어서, 브레이크형 용접기⁽⁶⁾를 이용하여 마찰 시간에 따라 마찰용접의 인장 및 전단강도에 미치는 영향과 파단면 및 용접부의 조직 변화를 비교하며, 기계적 성질의 향상과 용접 결함을 극소화시킬 수 있는 마찰용접 조건⁽⁷⁾을 연구하고, 용접부의 경도분포, 매크로 조직을 분석하여 이들의 관계를 비교 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 알루미늄합금 A2024-T6와 A6061-T6이다. 이들 재료는 직경 20mm의 환봉을 길이 75mm로 각각 절단하고, 양면을 선반으로 가공한 후, 마찰면의 이물질을 제거하기 위하여 아세톤으로 세척하였다.

이 재료의 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

본 실험에 사용된 마찰용접기는 브레이크 타입(NSF-30H, 남전기공, Revolution : 2000rpm, Maximum axial force :

Table 1 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Elements \ Materials	A2024-T6	A6061-T6
Si	0.30	0.6
Mn	0.50	0.15
Mg	1.47	0.9
Zn	0.03	0.25
Cu	4.34	0.1
Cr	0.10	0.2
Fe	0.27	0.35
Al	Bal.	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
A2024-T6	580	222	11	139
A6061-T6	310	205	9	92

98000N)으로, 회전축, 고정축, 회전을 급정지시키기 위한 디스크 방식의 브레이크와 압력을 얻기 위한 유압펌프, 유압 실린더, 피스톤 등의 유압장치, 플래시 제거장치, 용접 사이클을 제어하기 위한 시간·유압 제어장치, 고정척 테이블의 운동을 제어하기 위한 리미트스위치 등으로 구성되어 있다.

마찰용접부의 기계적 시험을 위해 최대 용량 50ton의 만능재료시험기(Model : DYHU-50-AD, Dae Yeong)를 사용하였으며, 경도시험은 마이크로 비커어즈 경도시험기(Model : MVK-H1, Mitutoyo Co., Jap)를 사용하였다.

예비실험을 통하여 회전수, 압력, 시간 범위를 설정하였다. 회전수는 처음 고정된 용접시험편이 스핀(Spin)을 일으키지 않고 충분한 발열이 일어나는 2000rpm으로 하고, 마찰압력은 충분한 발열을 할 수 있는 50MPa의 압력으로 하였다.

같은 방법으로 엷셋압력 또한 용접 시험편에 척킹(Chucking)력에 의한 변형을 주지 않는 범위 내에서의 최대 압력인 100MPa로 설정하였다.

위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간 규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 하여 실험하였다.

Table 3과 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였으며, 인장시험은 Fig. 1과 같이 시험편을 표준 규격 KS B 0801 14호에 맞게 제작하였다.

Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution (N)	Friction pressure (P ₁)	Friction time (t ₁)	Upset pressure (P ₂)	Upset time (t ₂)
2000 rpm	50 MPa	0.5	100 MPa	5.0 sec
		1.0		
		1.5		
		2.0		
		2.5		

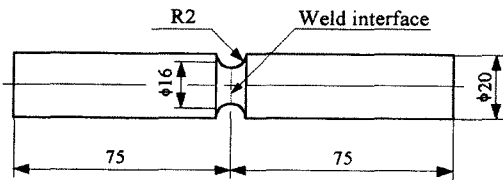


Fig. 1 Specimen of tensile test

마찰용접부의 전단강도를 시험하기 위하여 용접면에 R2의 노치 가공을 하였고, Fig. 2와 같은 전단 고정구를 설계 제작하였으며, 여유틈새(Clearance)는 1mm로 하였다. 인장시험 및 전단시험은 모두 마찰용접 후 96 시간 시효 처리한 후 실시하였다.

경도시험과 현미경 조직검사를 위한 시험편은 폴리코트(Polycoat)로 시험편을 마운팅하고, 용접단면을 입도 #200, #800, #1,500의 샌드페이퍼로 1차 연마하였다. 그 후, 연마제로 1µm의 알루미나 파우더를 증류수와 혼합하여 사용하였고, 폴리셔(Polisher)로 폴리싱(Polishing) 하였다.

경도시험은 시험편의 원주부에서 중심방향으로 R/2 떨어진 위치에서 용접면에 수직방향으로 실시하였다.

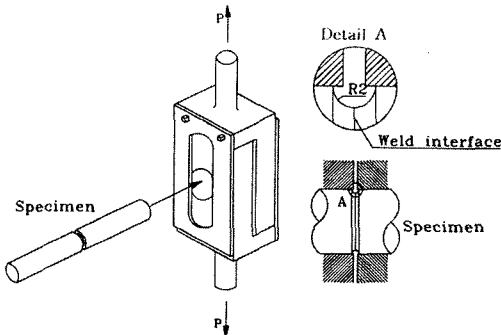


Fig. 2 Configuration of shear test

측정 범위는 접합면의 미세 경도분포를 고려하여 용접면으로부터 1mm까지는 0.2mm 간격으로, 나머지 10mm까지는 0.5mm 간격으로 측정하였으며, 하중은 200g으로 하였다.

용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 용접 시험편을 부식액(HCl 20ml+ H₂O 30ml)에서 10초 동안 부식시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장강도와 업셋길이

마찰압력 50MPa, 업셋압력 100MPa, 업셋시간 5.0초의 조건하에서 마찰시간을 변수로 한 용접부의 인장강도와 업셋길이의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 재료는 일정 온도에 이르면 소성 변형을 일으키게 되고 압력에 의해서 플래시로 배출이 되며 이로 인하여 마찰면의 온도가 저하된다. 이러한 온도의 저하는 소성 변형에 대한 저항을 증가시키고 이로 인하여 고체상태 용접에서 기계적 힘에 의해 접합 능력을 향상시킨다.

본 실험에서도 위의 내용과 같이 마찰시간의 증가에 따라 강도가 향상되는 양상을 띠었으며, 마찰시간 1.5초를 정점으로 하여 다시 감소하는 형태를 나타내었다. 최대 인장강도는 마찰시간 1.5초에서 얻어졌고, 인장강도 값이 292MPa로 A6061-T6 모재 인장강도(310MPa)의 94.2%였다.

업셋길이는 마찰시간의 증가에 따라 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 인장강도의 경향과 유사하게 마찰시간 1.0초에서 1.5초로 증가할 때 가장 많은 증가를 나타내었다. 또한 마찰시간 1.5초에서 그 이상으로 증가할 때는 업셋

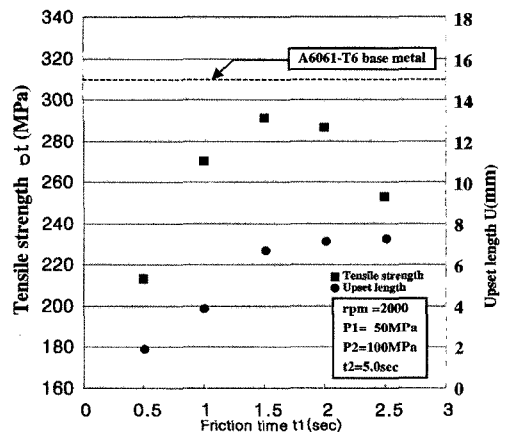


Fig. 3 Relationship between friction time and tensile strength

기울기가 비교적 완만한 형태로 바뀌는 양상을 보였다.

위와 같은 업셋길이의 양상은 인장강도와도 연관이 있으며, 적정 마찰시간(본 실험에서는 1.5초로 나타났음)에서의 최대 인장강도 값은 업셋 압력이 두 재료의 접합부에 높은 효율로서 전달될 수 있는 이상적인 조건이었을 것으로 추측된다. 따라서 본 실험의 범위 내에서는 마찰시간을 1.5초 이상으로 함에 따라 발생한 열량의 증가는 접합강도를 저해하는 요소로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 마찰 시간 0.5초에서 덤플의 형상이 비교적 고르게 나타났다.

최대 인장 강도를 나타내었던 마찰시간 1.5초에서는 파단면이 불규칙하며 양쪽의 모재(A2024-T6 및 A6061-T6) 일부가 상대쪽의 모재쪽으로 서로 달라붙는 형상을 보였으며, 은빛 파면도 마찰시간 0.5초, 2.5초 때와 비교하여 매우 적게 발견되었다. 이러한 파단면의 특징은 인장강도와 어느 정도 일치함을 보여준다.

Fig. 4은 인장 파단면을 나타낸 것이다.

3.2 전단시험

마찰시간 변화에 따른 전단강도 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

일반적으로 마찰용접 접합부에서는 재료의 섬유조직이 업셋과정에서 소성변형 때문에 플래시로 배출하게 되는데 이 때 용접면에 대하여 평행하게 재배열된다⁽⁶⁾. 이러한 조직의 재배열은 축에 대한 수직방향의 부하(Load)시 취약

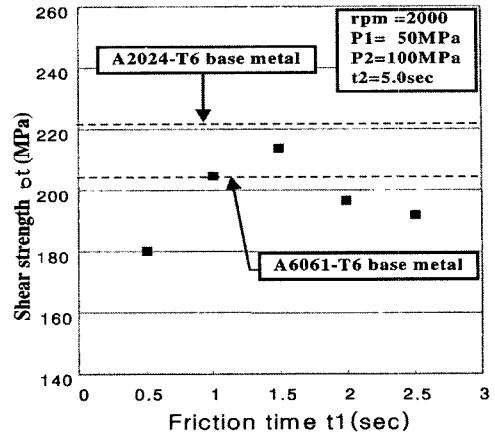


Fig. 5 Relationship between friction time and shear strength

한 성질을 띠는 것으로 여겨지고 있다. 이러한 수직방향의 기계적 성질을 고찰하기 위해 전단시험을 수행하였다.

도표에서 보여 주듯이 마찰시간의 증가에 따라 전단강도가 증가하다가 마찰시간 1.5초를 기준으로 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

최대 전단강도는 마찰시간 1.5초에서 212MPa로 A6061-T6의 모재강도 205MPa에 약 103%에 해당되는 강도를 나타내었다. 이 강도는 A2024-T6 모재(222MPa)에 비하여는

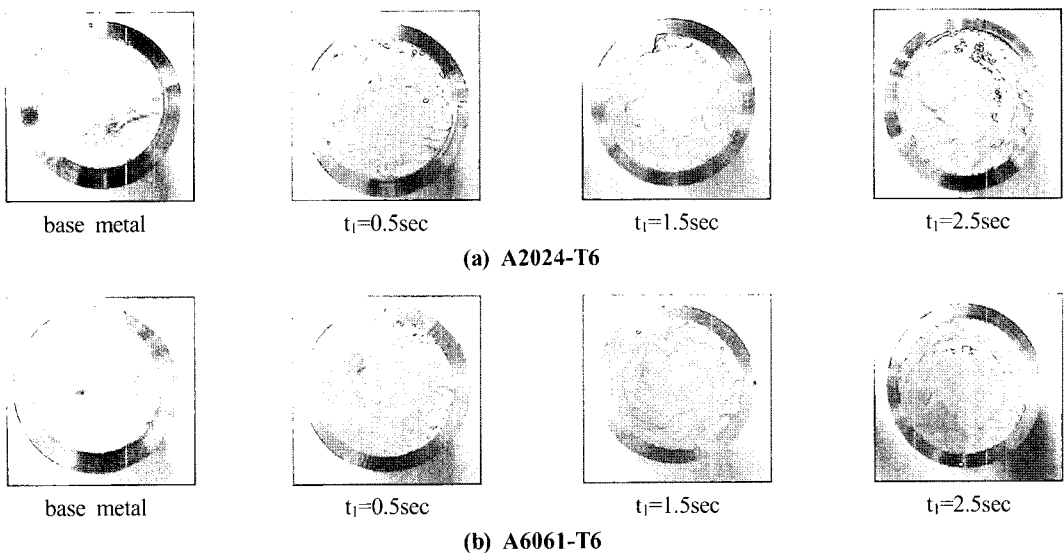


Fig. 4 Tensile fracture surface

낮은 수치이나, A6061-T6 모재에 비해 높은 수치로, 일반적으로 마찰 용접물이 가지는 용접계면에 대한 수평 하중의 취약성을 고려해 볼 때, 양호한 용접결과로 사료된다.

전체적인 전단강도의 경향은 인장시험과 유사한 경향을 보였는데, 이와 같이 마찰시간 1.5초를 정점으로 포물선 형태이고, 인장시험 때와 같이 마찰시간 1.5초 이상의 과도한 마찰열의 발생은 오히려 압셋압력의 효율을 떨어뜨려 용접성을 저해하는 요소로 작용하였다.

Fig. 6는 전단 시험에서 최대 강도와 최소 강도를 나타내었던 조건의 전단 파단면이다.

3.3 용접부의 플래시 형성 및 단면

Fig. 7은 마찰압력(P_1) 50MPa, 압셋압력(P_2) 100MPa, 압셋시간(t_2) 5.0초 일 때, 마찰시간(t_1)의 변화를 주어 접합한 시편의 플래시 형상이다. 이 사진에서 볼 수 있듯이 마찰시간의 증가함에 따라 플래시가 넓게 발생되었고, A6061-T6

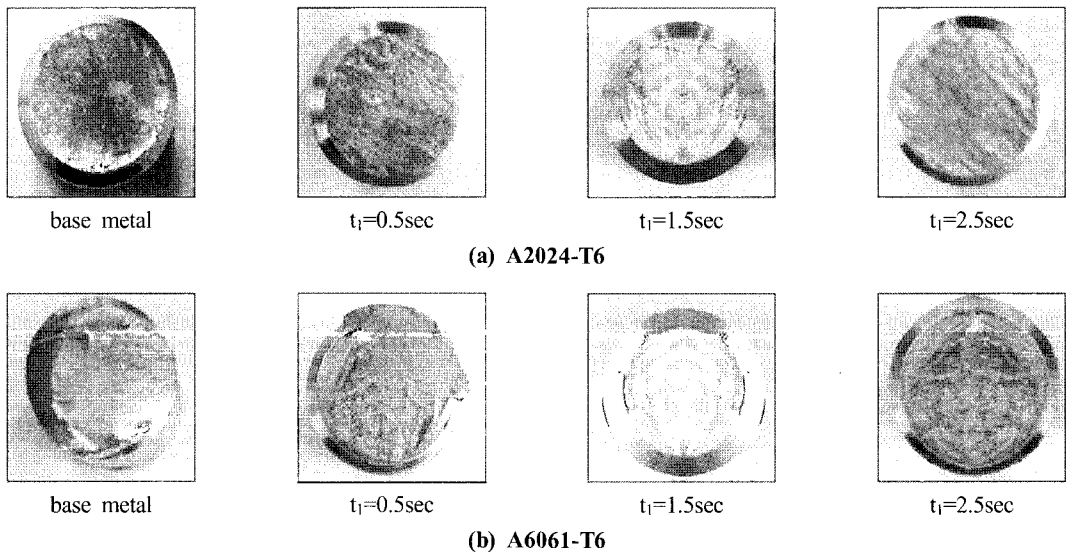
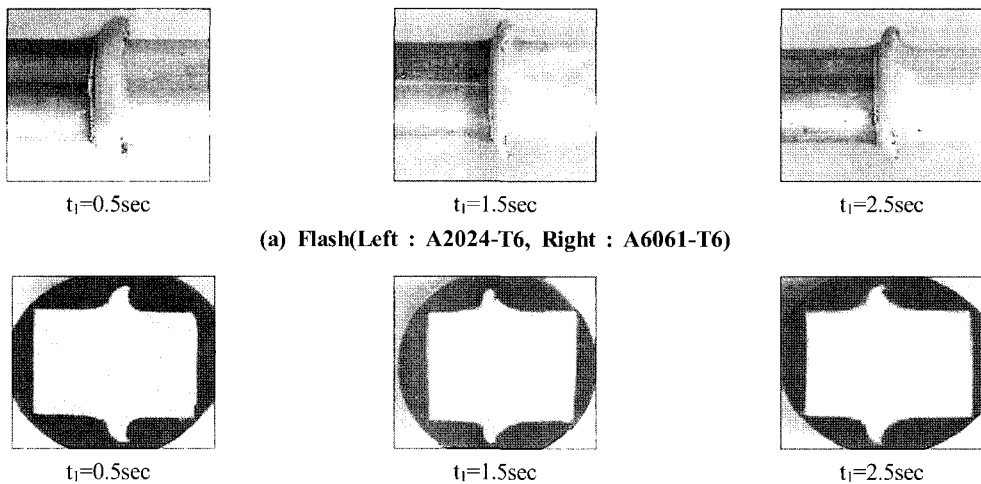


Fig. 6 Shear fracture surface



(a) Flash(Left : A2024-T6, Right : A6061-T6)
 (b) Weld section(Left : A2024-T6, Right : A6061-T6)
 Fig. 7 Macrostructure of A2024-T6/A6061-T6 friction weld

측은 플레시가 크게 발생하는 반면, A2024-T6측은 플레시가 매우 작게 발생 하였다.

두 종류의 알루미늄합금에서 플레시의 양(변형량)은 A6061-T6에서 많이 나타나지만, 용접계면으로부터 변형의 구배는 A2024-T6쪽이 크게 나타났다. 이는 A2024-T6내에 함유되어 있는 원소 중에 Cu의 양(4.34Wt%)이 많음으로 A6061보다 고온강도가 높으나 플레시에서 생긴 고온균열이 플레시로 변형을 촉진하였다고 생각된다. 이는 A2024-T6에 포함되어있는 Si의 취성에 기인한다고 본다.

접합부의 단면사진으로 알 수 있듯이, A2024-T6쪽에 Cu성분의 과부식 영향으로 인해 같은 조건의 A6061-T6에 비해 더 어두운 단면을 띠고 있다.

A2024-T6 쪽에서 관찰할 수 있는 것은 압연방향으로 늘어서 있는 모재 조직이 접합면을 기준으로 하여 원주방향으로 밀려나가는 형상을 띠고 있다.

3.4 경도시험

용접부의 경도시험은 인장시험에서 최대 인장강도를 얻은 조건($t_f=1.5$ 초)과 가장 낮은 인장강도를 나타내었던 조건($t_f=0.5$ 초)에서의 시험편을 가지고, 용접계면에서 축방향으로 측정하였다. 이 경우, 용접부의 경도분포를 관찰하기 위하여 용접계면에서 축방향으로 1mm까지는 0.2mm의 등간격으로 측정하고, 그 이후는 0.5mm 등간격으로 측정하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 경도분포의 특징은 A2024-T6 쪽과 A6061-T6쪽 모두 용접계면 근처에서 경도값이 약간 높은 경향을 띠었다. 최대 경도값은 A2024-T6 측에서 나타났는데, $t_f=1.5$ 초 조건에서 Hv146이었고, 이것은 $t_f=0.5$ 초 조건의 최대 경도값 Hv143에 비해 Hv3 정도의 근소

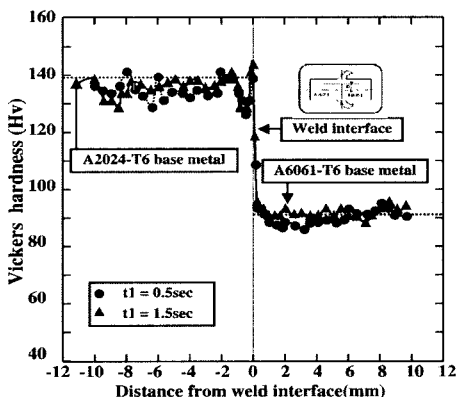


Fig. 8 Hardness distributions of friction weld

한 차를 보였다. 전반적으로 최대 경도값은 A2024-T6 모재 경도값(Hv139)과 커다란 차이를 보이지 않았다. A6061-T6 측의 경도분포 또한 용접계면 1mm 안쪽에서 미세한 경도 상승이 있었으나, 마찰시간 0.5초와 1.5초 사이의 큰 차이는 보이지 않았다.

최대 경도값은 용접계면 근처에서 Hv120이었고, 이것은 모재 경도값 Hv92에 비해 Hv28 정도 높은 수치이나 전체적으로는 모재와 커다란 차이를 나타내지는 않았다.

A2024-T6의 경우 열영향부에서 모재보다 미소하게 경도값이 낮아지다가 급격하게 낮은 경도분포를 보이는 연화역이 존재하였다. A2024-T6의 이러한 연화역은 열처리한 재료에서 일반적으로 나타나는 마찰열에 의한 풀림현상 등으로 설명될 수 있다.

3.5 용접부의 미세조직

Fig. 9는 인장시험결과 가장 높은 강도를 얻은 조건($t_f=1.5$

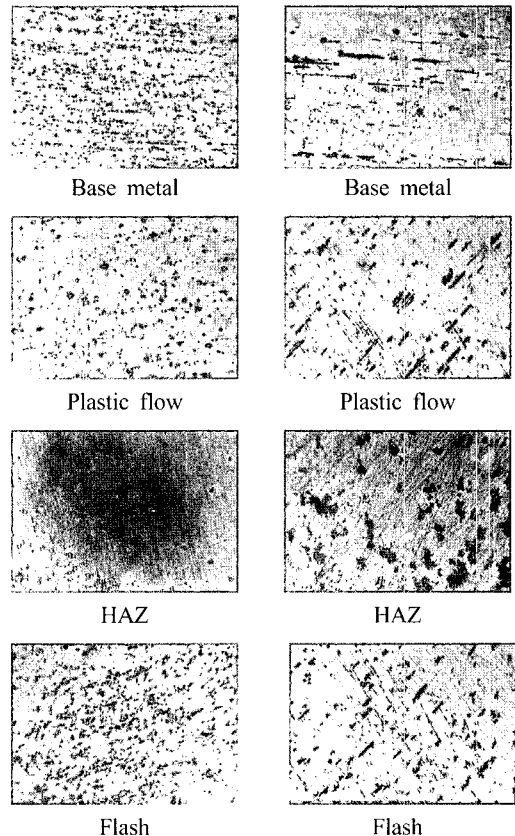


Fig. 9 Microstructure of friction weld(Mag. 100)

sec)의 조직을 광학현미경으로 100배율로 관찰한 것이다.

A2024-T6 모재의 경우 검은색 피무늬로 축방향으로 늘어 있는 조직층을 볼 수 있는데, 이는 A2024내에 첨가되어 있는 Cu와 Mg으로 생각된다. 모재(Base metal) A2024-T6, A6061-T6은 모두 섬유상 조직으로 압연방향으로 배열되어 있다. 소성유동(Plastic flow)은 강도가 약한 A6061-T6에서 현저하게 나타나며, 상대적으로 강도가 큰 A2024-T6에서는 심하게 나타나지 않았다. HAZ의 조직은 모재보다 조대화되어 있으며, 이 조대화된 조직은 경도분포에서 나타난 연화역으로 강도가 모재보다 낮은 것으로 사료된다.

플래시(Flash)는 강도가 약한 A6061-T6에서 뚜렷하게 나타났으며, 강도가 높은 A2024-T6에서는 거의 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 A2024-T6와 A6061-T6의 마찰용접에 있어서 용접조건을 『회전수 2000rpm, 마찰압력 50MPa, 업셋 압력 100MPa, 업셋시간 5.0sec』로 하고 마찰 시간을 변수로 하였을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 마찰시간 1.5sec에서 용접부의 최대 인장강도는 292MPa로 A6061-T6모재 인장강도(310MPa)의 94.2%에 해당되었고, 동일조건에서 용접부의 최대 전단강도는 212MPa로 A6061-T6모재 전단강도(205MPa)의 103%를 얻었다.
- (2) 위와 동일한 조건에서 A2024-T6 용접부의 최대경도는 Hv146으로 마찰시간 0.5sec조건의 경우에 비해 Hv3 정도로 약간 높았으며, A6061-T6 용접부의 최대경도는 Hv120으로 모재 보다 Hv28정도 높은 경도값을 얻었다.
- (3) 현미경 조직 관찰 결과, 용접계면 부근의 두 모재 조직은 마찰 과정상의 마찰열과 가압력 등에 의해 미세화 되었고, 원주방향으로 재배열되었다. 이는 접합부의 경도 상승과 인장강도에 영향을 끼친 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) Min, T. K., 1992, "Properties of Friction Welding Between the Back Metal of Bushing Part and Flange Part in A-Sn Alloy Metal Bearing," Dong-A University, Busan, Korea, pp. 4~5.
- (2) Lee, S. Y. and Yun B. S., 2001, "Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C," *Transaction of KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 65~70.
- (3) Yun, B. S., Kang, S. B. and Min T. K., 1998, "A Study on th Inset Metal in Friction Welding A2024 and SM45C," *Transaction of KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 1927.
- (4) Yun, B. S. and Min T. K., 1999, "A Study on Mechanical Properties of Super Duralumin and Carbon Steel in friction Welding," *Journal of the Korean Institute of Industrial Education*, Vol. 24, No. 1, pp. 254~263.
- (5) Go, B. H., 2003, "Effect that upset pressure of A2024-T4 same kind material friction welding gets in union special quality," Chung-Nam National University, Daejeon, Korea, pp. 34~35.
- (6) Bob, I., 1993, "Sparks Begin to Fly in Nonconventional Friction Welding and Surfacing," *Welding Journal*, May, pp. 37~40.
- (7) Kang S. B., 1997, "Properties of Friction Welding Between Cu-W sintering alloy and Cu," Chung-Nam National University, Daejeon, Korea, pp. 10~13.