

A2024-T4 摩擦熔接시 반경 변화에 따른 機械的 性質 研究

박근형*, 민택기⁺

(논문접수일 2007. 2. 21, 심사완료일 2007. 4. 5)

A Study on Mechanical Properties According to the Radius Change Position of Outer Circumference in A2024-T4 Friction Welding

Keun Hyung Park*, Taeg Ki Min⁺

Abstract

The present study examined mechanical properties according to the change of outer circumference in the friction welding of A2024-T4 stock, which is used much as aircraft structure, truck wheel, stainless materials and A2024-T4 stock with 10 hollow at the center. Welding conditions were fixed at RPM 2,000rpm, friction pressure of 50MPa, friction time of 1.5sec, upset pressure of 120MPa and upset time of 2.0 seconds. From the result of this study were drawn conclusions as follows :

According to the result of a tensile strength test, the solid shaft showed linear increase of tensile strength with the change of outer circumference, the hollow shaft showed maximum tensile strength when the length (L) was 2mm and decrease of tensile strength with the change of outer circumference. hardness appeared to increase and then decrease for welding interface, and it showed maximum hardness 155Hv at L=5mm of the solid shaft. Bending strength increased linearly for change of the distance (L) of outer circumference in the solid shaft and then decreased linearly in the hollow shaft. the result of examining tissue, the tissue grew finer around the welding interface and divided the basic material and the welding surface.

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Bending Strength(굽힘강도), Microstructure(미세조직), Hardness (경도), Tensile Strength (인장강도), Welding Condition(용접조건), Friction Time(마찰시간)

* 충남대학교 대학원 기계공학과 (khyupark@nate.com)
주소: 301-305 대전광역시 유성구 봉명동 한진오피스텔 815
+ 충남대학교 기계공학과

1. 서론

자동차 및 항공기를 비롯한 각종 수송기계, 군수용 기계, 화학 플랜트 등 여러 분야에서 사용되고 있는 각종 구조재 및 부품은 재료 절감 및 경량화, 고강도, 내식성, 열전도성 등의 차원에서 다양한 특성을 지니고 있는 알루미늄 합금을 사용하거나 또는 알루미늄 합금으로 대체하는 경향이 높아지고 있다.

자동차 및 항공기를 비롯한 각종 수송기계, 군수용 기계, 화학 플랜트 등 여러 분야에서 사용되고 있는 각종 구조재 및 부품은 재료 절감 및 경량화, 고강도, 내식성, 열전도성 등의 차원에서 다양한 특성을 지니고 있는 알루미늄 합금을 사용하거나 또는 알루미늄 합금으로 대체하는 경향이 높아지고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

A2024-T4는 열처리용 알루미늄 합금으로 구리와 마그네슘이 주성분이며 고강도 자연시효(自然時效)의 항공기 구조용 합금으로서 원래 A2017 합금과 대체하기 위하여 개발된 것으로, 가공성이 우수하여 내식용 재료, 자동차 휠, 항공기의 구조재 등에 널리 사용되고 있으며, 기계적 성질(피로한계, 경도, 전단강도, 인장강도)이 다른 열처리용 알루미늄 합금에 비하여 비교적 우수한 편이다⁽⁵⁾. 그러나 용접성 및 내식성, 전도도는 다른 열처리용 알루미늄 합금(4xxx, 6xxx, 7xxx 계열)에 비하여 좋지 않은 편이다.

특히 A2024-T4는 구리와 마그네슘이 주성분으로 이들 원소에 의하여 용접시 용접균열 발생 가능성이 높기 때문에 쉽게 용접을 하는 것이 어렵다⁽⁶⁾.

알루미늄의 용접에 많이 사용되는 용융용접 방법으로는 가스-텅스텐 아크용접, 가스-메탈(와이어) 아크용접, 가스용접 등이 많이 사용되고 있으나 열집중이 떨어지기 때문에 변형이 발생하기 쉽고 균열, 강도 면에서 적용 가능한 합금의 종류가 제한적이다.

본 연구는 기계적 성질은 우수하나 타 알루미늄 합금에 비해서 용접성이 떨어지는 A2024-T4 동종재료 형상이 중실축이고 지름이 같은 두 재료를 마찰 용접하였을 때 외주부로부터 반경 변화 위치에 따른 기계적 성질을 고찰하고, 중실축의 내부의 변화 중에서 축 중심이 중공이 된 중공축에 대해 외주부로부터 반경 변화 위치에 따른 기계적 성질을 고찰해 봄으로써 마찰 용접 후 중실축 및 중공축의 외주부가 가공변화 되었을 때 기계적 성질 변화를 예측하여 기계 구조 설계에 도움을 주고 품질을 향상하는데 목적을 두었다.

2. 시험편 및 실험 방법

2.1 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 A2024-T4로 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 마찰용접 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 중실축(Solid shaft)은 직경 $\phi 20\text{mm}$ 환봉을 길이 100mm씩 절단 가공하였고 중공축(Hollow shaft)은 중실축의 크기에 $\phi 10\text{mm}$ 드릴로 직경의 중심에서 축 방향으로 50mm 중공을 만들어 제작하였으며 마찰용접 직전에 용접면을 정밀하게 선삭 가공 하고 이물질 제거를 위해 아세톤으로 세척하였다.

본 실험은 마찰용접, 인장시험, 인장 파단면 검사, 경도시험, 굽힘시험, 조직검사 순으로 진행하였다^(3,5,6).

마찰용접은 문헌연구 및 예비실험을 통하여 적절한 압력과 시간을 설정하여 마찰용접을 실시하였다. 용접조건 중 회전수 2000rpm, 마찰압력 50MPa, 업셋압력 120MPa로 고정하고 마찰 시간과 업셋 시간을 변화를 주어 최적조건을 구한 후 이 용접조건으로 본 실험을 위한 마찰 용접을 실시

Table 1 Chemical composition of material(Wt. %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A2024-T4	0.1	0.10	4.28	0.51	1.44	0.05	0.02	0.02	Bal.

Table 2 Mechanical properties of material

	Tensile strength (MPa)	Bending strength (Mpa)	Hardness (Hv)	Elongation (%)
A2024-T4	512.4	73.8	126.1	33

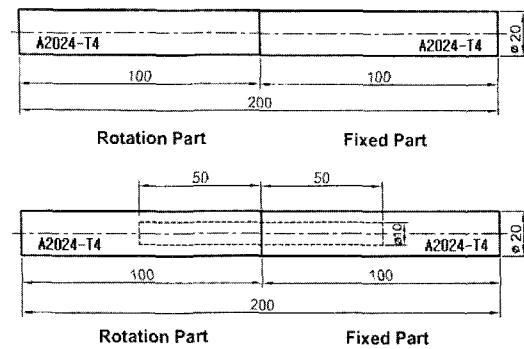


Fig. 1 Shape and dimensions of friction welding specimens

하였다. 이러한 용접조건을 Table 3에 나타내었다.

위 예비시험 결과 최적조건은 마찰시간 1.5sec, 업셋시간 3sec에서 나타났다.

인장시험은 마찰용접에 의해 발생한 시험편의 플래시를 선반 가공하여 제거한 다음 용접 부위에 나사바이트를 이용하여 60°의 각도로 노치를 주어 실시하였고, 외주부 변화량에 따른 결과를 관찰하기 위해 노치의 깊이를 증실축은 1~5mm, 증공축은 1~4mm까지 각각 외주부 변화를 1mm씩

Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution (N)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Friction time (t ₁ , sec)	Upset pressure (P ₂ , MPa)	Upset time (t ₂ , sec)
2,000 rpm	50	0.5	120	5
		1		
		1.5		
		2		
2,000 rpm	50	1.5	120	2
				3
				4
				4
				5

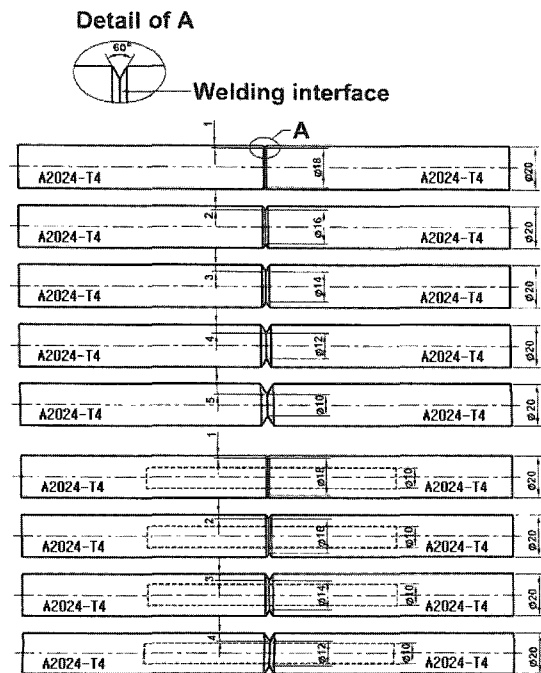


Fig. 2 Tensile and bending test specimen

증가시켜 Fig. 2와 같이 각각 5개, 4개의 시험편을 제작하여 만능재료시험기로 인장시험하였다.

인장시험편 절단면 검사는 절단된 인장시험편을 10mm 길이로 절단한 후 디지털카메라의 줌기능을 이용하여 초점을 맞춘 후 근접 촬영하여 관찰하였다.

굽힘시험은 만능재료시험기를 이용하여 3점지법으로 실시하였다. 시험편은 인장시험편과 같이 제작하여 각각의 시험편을 Fig. 3과 같이 지그(Jig)에 펀치의 하중작용점이 용접면에 위치하도록 시험편을 장착하고 크로스헤드(Cross Head)의 이송속도를 1mm/min로 설정하여 굽힘시험하였다. 굽힘강도는 다음 식 (1)로 구하였다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Zeta} = \frac{8P_{max} \ell}{\pi L^3} \quad (1)$$

여기서, σ_b : 굽힘강도, M: 굽힘모멘트, Z: 단면계수, P_{max} : 최대하중 ℓ : 지점간 거리, L: 시험편 직경

조직검사는 광학현미경을 이용하였으며 시험편 준비는 축 단면을 절단하여 채취한 시험편을 폴리코트(Polycoat)로 마운팅(Mounting)한 다음 용접단면을 사포(Sandpaper) 입도 #800, #1200, #1500 순으로 표면을 연마한 다음 연마제 1 μ m의 알루미나 분말을 증류수와 혼합하여 연마기(Model

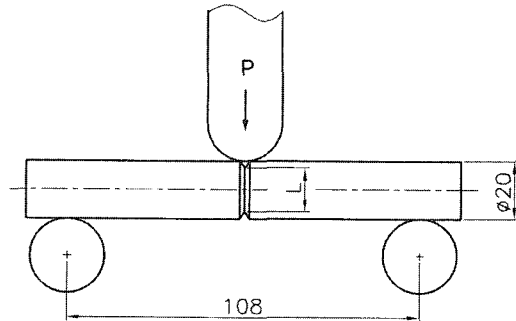


Fig. 3 3-Point bending test

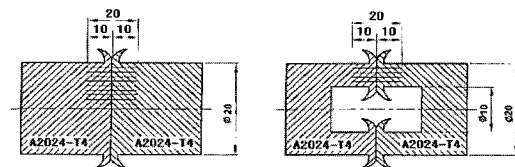


Fig. 4 Hardness measurement point of perpendicular direction from the welding section

95-2810)로 연마 하였다. 시험편의 부식은 염산 20ml와 물 30ml 용액을 섞어 에칭액을 만들었으며 시험편을 에칭액에 10초간 담근 후 에칭액 제거를 위해 2분간 흐르는 물에 세척하고 건조기로 다시 3분간 건조시켰으며 위 부식 과정은 과 부식을 방지하기 위해 신속히 처리하였다.

경도시험은 용접시험편의 축 단면을 절단하여 연마(Polishing) 한 후, 마이크로비커어스 경도시험기의 클램프에 고정시킨 후 하중을 300g으로 설정한 후 Fig. 3과 같이 원주부로부터 중심부 쪽으로 외주부의 변화 길이(L)를 1mm씩 증가하면서 용접계면 수직방향으로 양쪽 4mm씩 총 8mm에 대해 0.2mm 간격으로 경도 측정하고, 양쪽 4mm에서 10mm까지 총 12mm에 대해 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험

인장시험 결과를 Fig. 5와 같이 그래프로 나타내었다. 중실축과 중공축을 비교하기 위해 결과를 함께 표기 했으며 마찰용접 조건은 예비실험을 통해 얻은 최적조건(마찰용접기 회전수(N) 2000rpm, 마찰시간(t_1) 1.5sec, 업셋시간(t_2) 3.0sec, 업셋압력(P_2) 120MPa)을 설정하여 얻은 결과이다.

Fig. 5에서 중실축의 경우 외주부의 변화(L)에 대하여

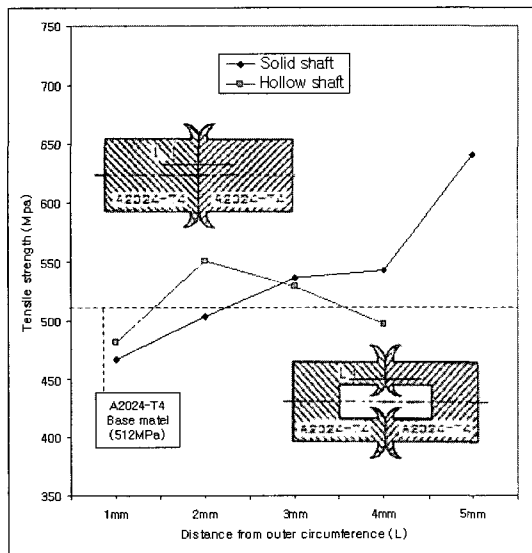


Fig. 5 Relationship between tensile strength and distance from outer circumference(L)

4mm 지점까지 증가하며, 외주부의 변화가 5mm일 때 최대 인장강도를 갖는 경향을 보이지만, 중공축의 경우 외주부의 변화량(L) 2mm 지점에서 최대 인장강도를 가지고 증가했다가 감소하는 경향을 보여준다. 중실축의 경우 예비실험에서 얻어진 최적조건에서 외주부 변화량 1~5mm 사이에서 외주부 변화량(L)이 커질수록 인장강도가 높게 형성되었으나 중공축의 경우 용접부의 형상의 차이로 인한 영향으로 내부 플래시 배출로 인한 가압력의 손실과 열 배출의 차이에

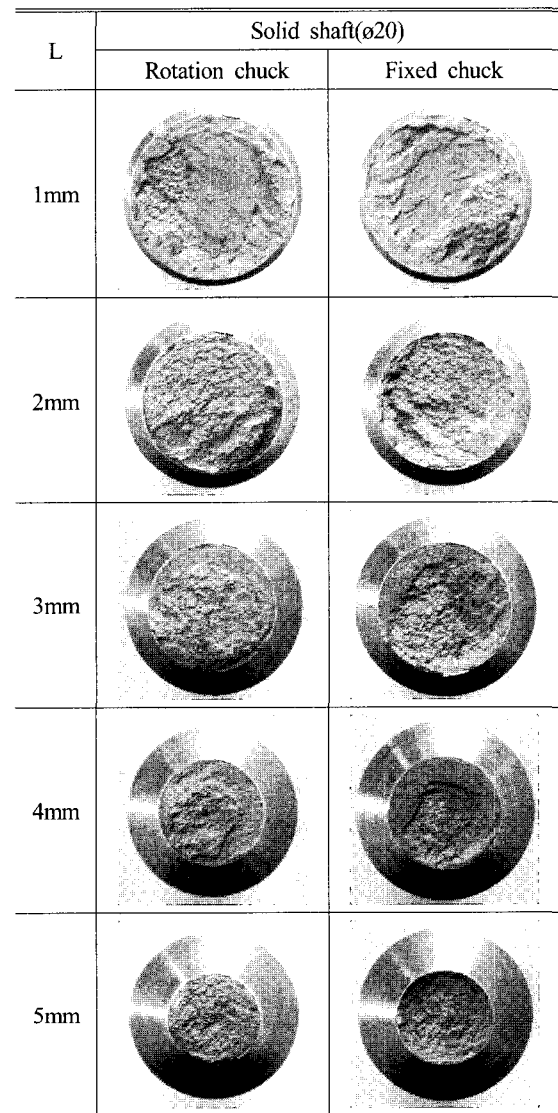


Photo 1 Tensile fracture surfaces of friction welds (Solid shaft)

의해 중실축과 다른 형태의 인장강도를 보여주는 것으로 보인다.

최대인장강도는 중실축에서 외주부 변화가 5mm 일 때 640MPa이며, 이는 모재의 인장강도 512MPa의 125%에 해당된다.

중실축과 중공축에 있어서 최대 인장강도의 차는 89MPa이며, 외주부 변화가 2mm 일 때까지는 중공축의 인장강도가 높게 나타나지만 3mm 지점에서는 중실축의 인장강도가 높아진다. 이는 중실축은 외부로만 플레시가 배출되지만 중공축의 경우는 외부뿐만이 아니라 내부 플레시 배출로 인한 가압력과 열 배출의 차이로 인한 것으로 보인다.

Photo 1과 2는 인장시험에 의해 절단된 파단면을 외주부 크기 변화에 따라 배열하였다. 고정척(Fixed chuck)과 회전척(Rotation chuck)의 모재 절단 부위는 중실축의 L=1mm를 제외하고는 모두 고정척 쪽 모재에서 파단되었다.

중실축의 경우 회전척에서 절단된 L=1mm를 제외하고 2~5mm에서 외주부 보다는 내주부의 파단면에 담플이 깊게 형성됨을 볼 수 있다. 외주부의 변화량(L)이 커질수록 인장강도가 높았던 것과 비슷한 형태로 외주부 보다는 내주부 쪽이 좀 더 인장력에 큰 저항을 가지게 됨을 알 수 있다.

중공축에서 L=2mm 일 때와 L=3mm 일 때 용접부가 파단되기 보다 내부로 배출된 플레시부가 회전부 쪽으로 붙은 채로 파단된 형상을 보여준다. 이는 내부로 배출된 플레시부도 상당한 강도를 가지고 접합되었으며 이로 인해서 인장강도가 다소 떨어지는 열영향부의 취약한 부분이 파괴되면서 떨어져 나간 것으로 볼 수 있다.

중공축에서 L=2mm 일 때와 L=3mm 일 때 용접부가 파단되기 보다 내부로 배출된 플레시부가 회전부 쪽으로 붙은 채로 파단된 형상을 보여준다. 이는 내부로 배출된 플레시부도 상당한 강도를 가지고 접합되었으며 이로 인해서 인장강도가 다소 떨어지는 열영향부의 취약한 부분이 파괴되면서 떨어져 나간 것으로 볼 수 있다.

3.2 굽힘시험

굽힘시험의 결과를 Fig. 6에 인장시험과 마찬가지로 중실축과 중공축의 굽힘강도를 비교하기 위해 결과를 함께 표기하였다.

중실축에서는 외주부의 변화량(L)이 커질수록 인장강도와 비슷한 형태로 굽힘강도가 증가하는 모습을 보여주나 중공축에서는 감소하는 모습을 보여준다. 이는 중실축에서는 외부로만 플레시가 배출되어 내부로 갈수록 조직이 플레시로 배출되지 못하고 중심부 쪽에서 강한 압력이 작용하여 조직이 미세화 됨으로써 강도가 강해진 것으로 보인다.

중공축에서는 외부와 내부 모두 플레시가 배출됨으로써

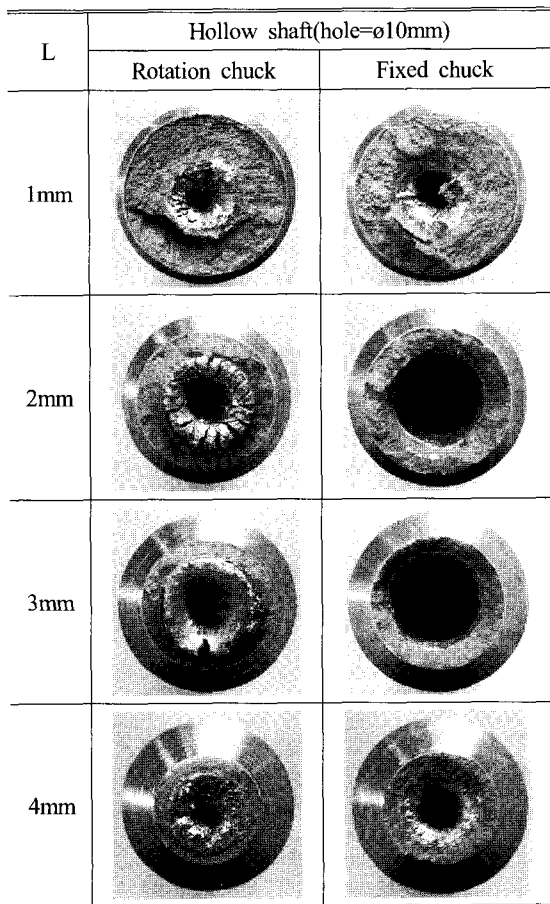


Photo 2 Tensile fracture surfaces of friction welds (Hollow shaft)

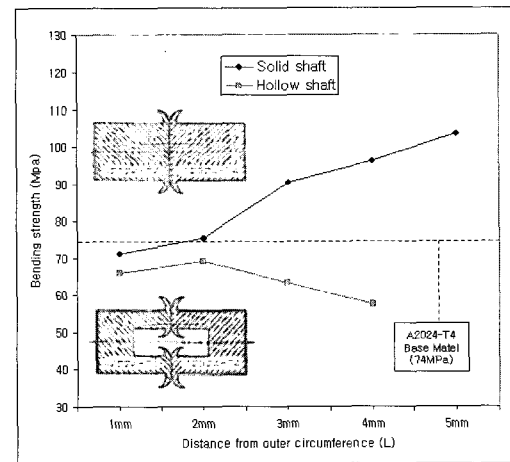


Fig. 6 Relationships between the bending strength and distance from outer circumference(L)

중실축에 비해서 굽힘강도가 떨어지는 것으로 보인다. 중공축의 경우 내부 플래시부의 접합면이 존재하고 이 접합면의 강도가 전체적인 굽힘강도에 어느정도 영향을 끼칠 것이라 추정된다.

최대굽힘강도는 중실축 L=5mm에서 103MPa를 얻었고 이는 모재의 139%에 해당된다. 중실축과 중공축의 굽힘강도 차이는 34MPa이며 외주부의 변화가 커질수록 강도의 차이는 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.3 조직 시험

마찰조건을 회전수(N) 2000rpm, 마찰시간(t₁) 1.5sec로 하고 마찰압력(P₁) 50MPa, 업셋시간(t₂) 3sec, 업셋압력(P₂) 120MPa로 주었을 때 중실축과 중공축의 조직사진을 관찰하였다.

Fig. 7과 같이 외주부 변화에 대해 조직을 관찰하기 위해 용접면에 대해 외주부로부터 1mm 간격(c~n)으로 관찰하였고 또한 열영향부(b) 및 모재(a) 부위를 관찰하였다.

Photo 3의 (a)는 모재부분으로 섬유상 조직이 압연 방향으로 배열되어 있으며 밝은 부분은 알루미늄 또는 구리 화합물로 생각되며, 검은 부분은 Mg 또는 Mn 화합물로 추정된다.

(b)는 열영향부의 조직으로 모재에 비하여 조직의 방향에 일정함이 없다. 이는 소성유동층이 원심력 및 비중의 차이에 의하여 검은 마그네슘과 망간화합물이 경계면 또는 플래시부로 배출되어, Al과 Cu위주(CuAl₂)로 화학성분이 재 조성되는 과정에서 재결정 되었기 때문이라 생각된다.

(c)~(j)는 용접계면에 대해 외주부로부터 중심부 쪽으로 1mm 간격으로 관찰한 것으로 중심부쪽으로 이동할수록 조직이 미세화 되었다가 다시 커지는 모습을 보이는데 이는 중공축 내부로의 플래시 배출로 인한 압력감소 및 용접 단면에서의 온도분포 영향으로 보인다.

(c)~(n)은 용접계면에 대해 외주부로부터 중심부 쪽으로 1mm 간격으로 관찰한 것으로 용접계면 주변은 어둡고 경계면에서 좌우로 벗어날수록 밝은 모습을 보인다. 경계부

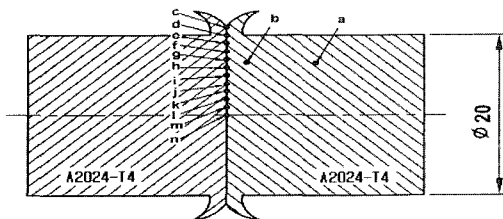


Fig. 7 Microscope photograph point of the solid shaft

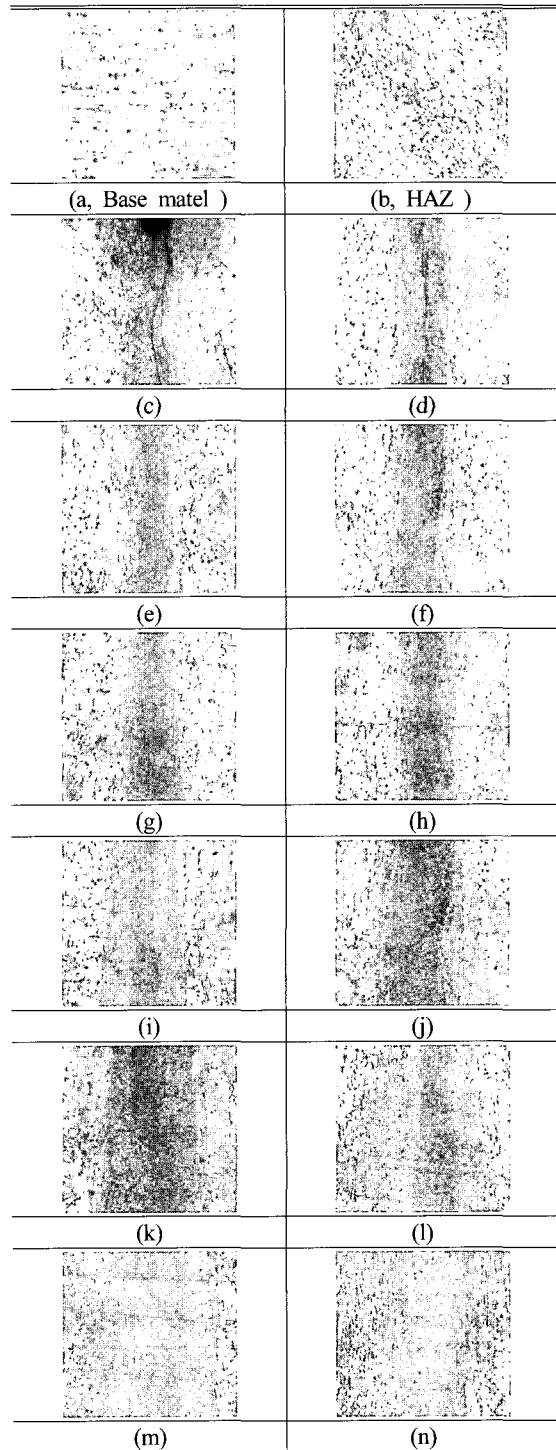


Photo 3 Microstructure of the solid shaft friction welds (Mag. 100)

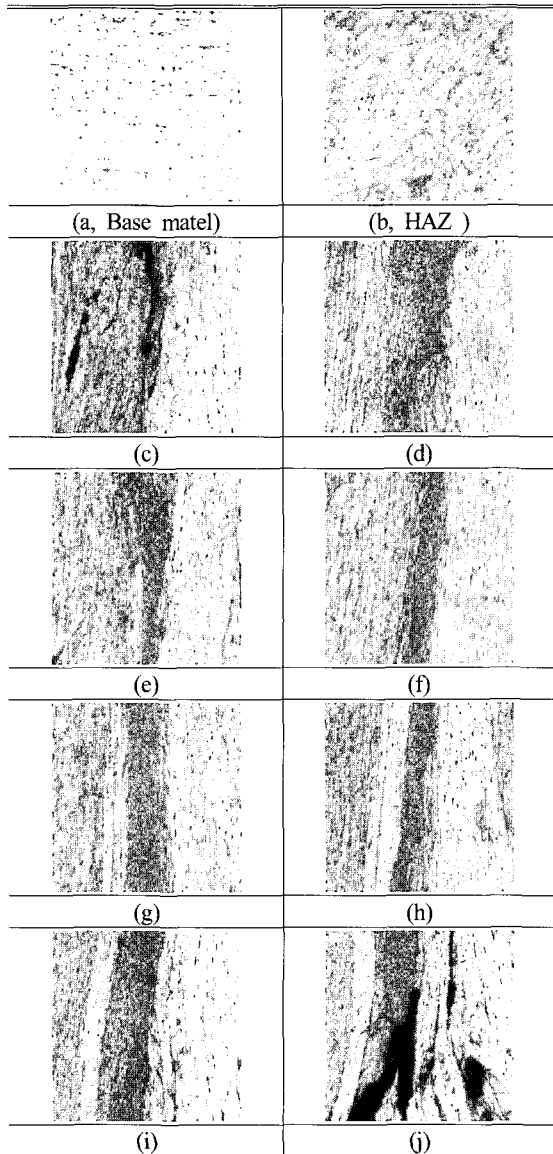


Photo 4 Microstructure of the hollow shaft friction welds(Mag. 100)

조직의 검은 부분은 마그네슘 화합물(CuMgAl₂), 망간화합물(Cu₂MnAl₂₀)이 원심력 및 비중의 차이에 의하여 경계면으로 모여 플래시로 배출되는 과정에서 재결정된 조직이라 생각된다. 외주부가 감소함에 따라서 원주부에서 중심부로 갈수록 검은 부분이 넓어지는 모습을 보이는데 이는 중심부의 압력이 높아짐으로써 조직의 미세화가 더 많이 이루어지기 때문으로 추정된다.

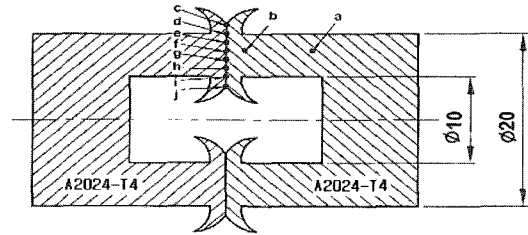


Fig. 8 Microscope photograph point of the hollow shaft

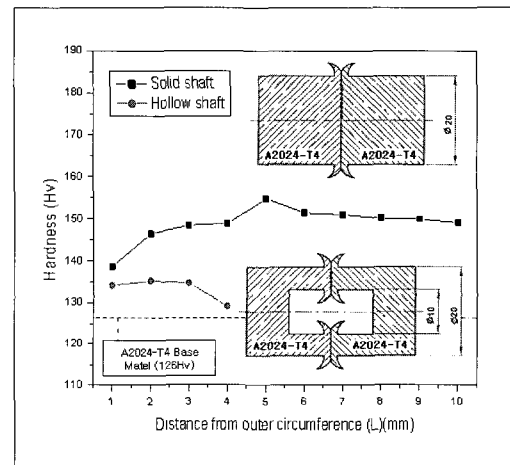


Fig. 9 Relationship between hardness and distance from outer circumference(L)

Photo 4는 Fig. 8과 같이 중공축에 대한 조직사진으로써 (a)는 모재부이고 (b)는 열영향부의 경계부로 중실축과 비슷한 조직을 보인다.

3.4 경도 시험

Fig. 9는 용접 계면에 대하여 원부로부터 중심부 쪽으로 외주부의 변화 길이(L)를 1mm씩 증가하면서 외주부 변화에 대한 경도를 관찰하였다. A2024-T4 동종재의 접합으로 용접계면을 정확히 찾아 측정하는 데는 다소 어려움이 있었으며 다만 경도의 변화를 예측할 수 있었다.

중실축은 외주부 변화가 커짐에 따라서 플래시의 배출 영향의 감소로 경도값이 증가하다가 L=5mm에서 최대 경도값 155Hv를 나타내었으며 다시 내부로 갈수록 열영향으로 인해 조직이 연화되어 경도값이 완만하게 감소한 것으로 보인다. 중공축은 L=2mm일 때 최대 경도값을 나타내었으며 이는 외측, 내측의 플래시 배출에서 가장 영향을 적게 받아 조직이 강해진 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 항공기 구조용, 트럭차륜, 내식용 재료로 많이 사용되는 A2024-T4 열처리용 알루미늄 합금 동종재를, 회전수 2000rpm, 마찰압력 50MPa, 마찰시간 1.5sec, 업셋압력을 120MPa, 업셋시간 3sec에서 두 봉재 마찰용접과 A2024-T4의 중심에 $\varnothing 10$ 로 증공된 봉재의 마찰용접에 대해 외주부로부터 반경 변화 위치에 따른 기계적 성질을 고찰하였다.

- (1) 인장시험 결과 증실축은 외주부 변화에 대해 인장강도가 증가하며, 증공축은 외주부에서의 길이(L)가 2mm 일 때 인장강도가 가장 높으며 중심부로 갈수록 강도가 감소함을 알 수 있다. 최대인장강도는 외주부 변화가 5mm일 때 640MPa이며, 이 값은 모재의 인장강도 512MPa의 125%에 해당한다. 인장파단면의 위치는 고정척 모재에서 발생하며 증공축은 고정축의 열영향부 경계면에서 발생한다.
- (2) 경도측정 결과 용접계면에 대해서 증가하다가 감소하는 것으로 나타났으며 증실축의 L=5mm 지점에서 최대값 155Hv를 얻었다. 용접계면 수직방향은 경도값이 증가 감소를 불규칙적으로 반복하였으나 용접계면 근처 수직거리 0.5mm내에서 경도값이 높게 나타났으며 2mm 근처 까지 감소하다 다시 증가하고 감소하는 현상을 보였다.
- (3) 굽힘시험 결과 증실축은 외주부의 거리 변화(L)에 대해 선형적으로 증가하였으며 증공축은 선형적으로 감소하였다. 최대굽힘강도는 증실축 L=5mm에서 103MPa를 얻었으며 이는 모재의 139%에 해당된다.
- (4) 용접계면의 조직사진 관찰 결과 모재와 열영향부의 경

계가 구분되어 용접계면 주변으로 조직이 미세화 되었으며 용접계면의 외주부 변화가 증가함에 따라 증실축은 중심부로 갈수록 조직이 미세화 되며 증공축은 조직이 미세화 되다가 다시 커짐을 알 수 있으며, 이는 용접시 온도 분포의 영향으로 경도와 강도등 기계적 성질이 변화됨을 볼 수 있다.

참고 문헌

- (1) Vill, V. I., 1957, *Friction Welding of Metals*, American Welding Society, INC New York, Vol. 3, No. 2, pp. 8~23.
- (2) Spindler, D. E., 1994, "What Industry Needs to Know about Friction Welding," *Welding Journal*, March, pp. 37~42.
- (3) Nicholas, E. D., 1977, "Where Industry Uses Friction Welding," *Welding Design and Fabrication*, August, pp. 74~76.
- (4) Kim, U. W., Kim, T. K., 2001, "A Study on the friction weldability of inconel alloy-stainless steel," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 73~78.
- (5) Tomas, H. H., 1962, "Properties of Friction Welds between Dissimilar Metals," *Welding Research Supplement*, Oct. pp. 448s~450s.
- (6) Yun, B. S., 1998, "A Study on Insert Metal in Friction Welding of A2024 to SM45C," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, No. 6, pp.19~27.