

## 전자기 성형에 의한 알루미늄 합금관과 폴리우레탄봉의 접합연구 -전자기 접합 연구 I -

김 남 환\*, 손 희 식\*, 황 운 석\*\*, 이 중 수\*

### A Study on Electromagnetic Joining of Aluminum Tubes to Polyurethane Cores

N. H. Kim\*, H. S. Sohn\*, W. S. Hwang\*\*, J. S. Lee\*

#### ABSTRACT

The joining processes of aluminum alloy tubes and polyurethane cores by electromagnetic impulsive compression are studied. The influences of various geometrical factors (the length of joined part, the thickness of tube, and the clearance between tube and core) and the process factors (the discharged energy and the number of discharge) are examined experimentally and discussed. And the magnetic pressure in metal/polymer joining is calculated and is compared to the pressure in metal/metal joining. The following results are obtained; (1) The joining strength is dependent upon the residual radial strain of the polyurethane cores, (2) The joining strength increases as discharged energy and the number of discharge increase, but decreases as the clearance, thickness and joining length of tube increases, (3) In the case of metal/polymer joining, energy loss is increased and the value of magnetic pressure is less than that in the case of metal/metal joining.

#### 1. 서 론

전자기 접합법은, 순간적인 강력한 자기장을 이용하여 금속을 가공하는 전자기 성형법의 원리<sup>1)~3)</sup>를 이용하는 것으로, 주로 축 대칭형의 가공물을 대상으로하여 자동차 산업, 항공 산업, 전기 산업과 병기 산업등의 여러 분야의 체결 및 조립작업에 많이 이용되고 있다. 전자기 접합법은 극히 단시간내에 접합이 가능하고, 압제 외벽에 전자기 압력을 균일하게 가할 수 있으며, 비접촉식이어서 압제에 가공 흔적이 발생치 않으며, 자속 집중기만의 교환으로 각종 형상과 치수의 접합체의 접합이 가능하다는 등의 특징이 있어, 현재 알루미늄, 동 및 강<sup>4)</sup>의 금속간의 접합에 대해 양호한 접합을 얻기 위

한 조건등에 대하여 많은 연구<sup>5)</sup>가 수행되고 있다.

또한, 전자기 접합법은 압제가 전자기력으로 변형가능한 전기 전도성이 양호한 재료이면 모재(core)는 금속, 비금속에 상관없이 접합이 가능할 것으로 예견되므로, 금속과 세라믹의 접합에도 이를 응용하려는 연구<sup>6)</sup>가 시도되고 있다.

고분자 재료의 경우, 근년 각종의 새로운 재료가 계속 개발되고, 기존 재료의 특성이 향상됨에 따라 그 적용 범위가 급속히 확대되고 있다. 이에 동반하여 고분자 재료와 금속의 각각의 특성을 살린 고성능 조합부품의 요구가 증대되고 있으며, 이의 우수한 접합 기술의 개발 또한 요구되고 있다.

따라서, 본 저자들은 금속과 고분자 재료의 접합에

\* 국방과학연구소

\*\* 성화대학 금속공학과

있어서 전자기 성형법에 의한 접합 가능성을 타진하고, 접합 공정상의 제반 문제점을 도출, 분석하여 이의 접합 기술을 확립하기 위하여, 최근 내식성, 유연성, 기밀성과 충분한 강도 등의 장점으로 화학 플랜트, 해양 구조물 등에 적용이 증가되고 있는 폴리우레탄 재료와 금속(알루미늄, 동합금)과의 전자기 축관 성형에 의한 접합 방법을 실험적, 이론적으로 검토하고 있다.

본고는 그 제1보로서 알루미늄 합금과 압재와 폴리우레탄 봉 소재의 접합에 있어, 자속 집중기를 사용한 전자기 축관 성형 방식의 적용 가능성을 실험적으로 고찰하였다. 실험은 접합부 길이, 압재의 두께, 압재와 모재사이의 간극 등의 형상 인자와, 방전 에너지, 방전 회수의 공정 인자등, 전자기 접합시의 제반 인자가 접합 강도의 미치는 영향에 대하여 수행하였으며, 이 결과를 금속/금속<sup>1</sup>, 금속/세라믹 접합<sup>2</sup>의 경우와 비교하여 검토하였다. 또한, 자속 집중기를 사용한 전자기 축관 성형에서의 금속/고분자 재료 접합에 있어서, 같은 방전 에너지, 같은 형상의 접합구조의 경우라 할지라도 금속/금속 접합의 경우와 비교하여 자속 집중기 내부의 자속 밀도와 압재에 가해지는 자기 압력에 변화가 발생하게 되므로, 각각의 경우의 자속 밀도와 자기 압력을 구하여 이를 비교하고 그 차이점을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 시험편

본 접합 실험에 사용된 시험편은 튜브 형상의 압재 (Al 6061)와 봉 형상의 Metyl diisocyanate계 폴리우레탄 모재이며, 알루미늄 합금의 조성을 Table 1에, 알루미늄 합금과 폴리우레탄의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. Fig. 1(a)에 도시한바와 같이, 압재는 길이를 20~40mm, 두께를 0.8~2.0mm로 제작하였고, 모재는 간극이 0.1~1.0mm범위에 있도록 그 외경을 변화(15.8~18.6mm)시켰다. 또한 시험편은 전자기 접합후 접합된 상태대로 인장 시험기에서 인장 시험이 가능한 형상으로 제작하였다.

Table 1. Chemical composition of Al alloy

Chemical composition (wt %)									
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
96.11	0.26	1.12	0.35	0.64	0.91	0.02	0.01	0.56	0.02

Table 2. Mechanical properties of Al alloy & Polyurethane

Mechanical properties				
	Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Al6061	0.7×10 <sup>4</sup>	11.6	18.3	22.7
polyurethane	-	-	1.34	430

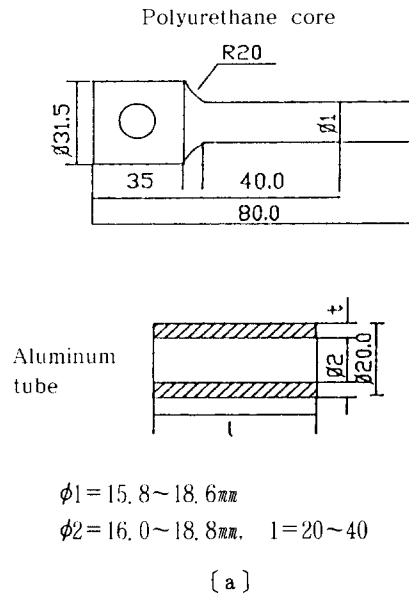


Fig. 1 Dimensions of workpieces (a) and setup (b) for electromagnetic joining experiment.

### 2-2. 실험 장치 및 방법

순간적인 강자기장을 발생시키기 위한 전자기 성형 장치로는 콘덴서 충전방식인 미국 Maxwell Co.의 8KJ 용량의 전자기 성형기 (Model : Magneform 7100)을 이용하였다. 성형용 코일은 내경 101.6mm, 길이 100mm로서, 자속 집중기를 교환하여 사용할 수 있는 범용 압축 코일을 사용하였다. 발생하는 자기장을 집중시키기 위하여, 전기 전도성 및 기계적 강도가 우수한 AL2024-T6로 자속 집중부 길이 40mm의 자속 집중기를 제작하여 사용하였으며 그 형상과 치수를 Fig. 2에 나타낸다.

전자기 축관 성형에 의한 접합 실험은 시험편을 자속

집중기 내부에 Fig. 1(b)와 같이 설치하고 2~8KJ의 방전에너지로 방전하여 수행하였다.

그리고, 압재와 모재의 전자기 접합 후의 접합 강도를 평가하기 위하여 인장 시험기(INSTRON Model 4505)에 용량 500kg의 로드셀을 정착하여 속도 3mm/min에서 인장 시험을 하였다.

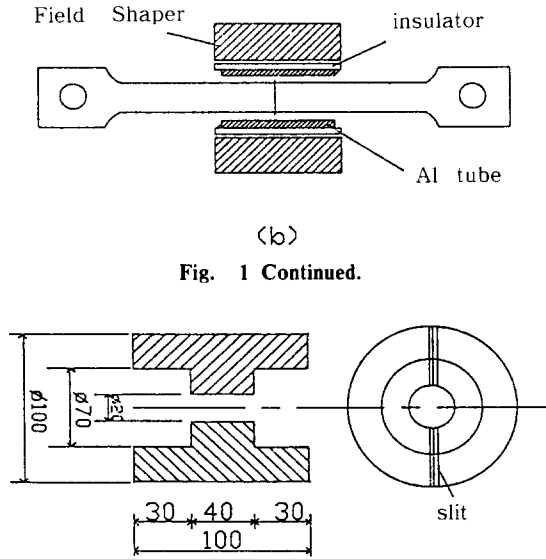


Fig. 2 Geometry of field shaper.

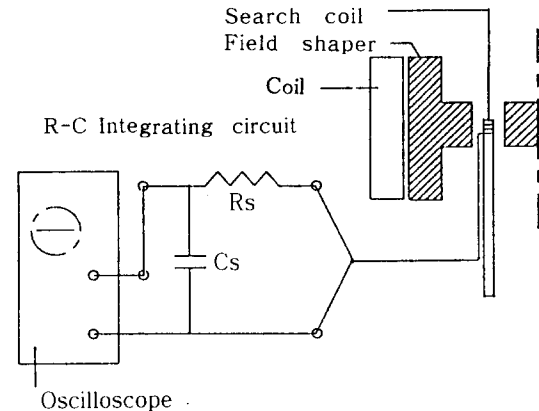


Fig. 3 A methodology of measurement of magnetic flux density

### 2-3. 자속 밀도 측정 및 자기 압력 계산

압재에 가해지는 자기 압력을 구하기 위하여, Fig. 3

에 도시한 바와 같이, 시험편과 자속 집중기 사이에 또는 시험편 내부에 서치 코일(Search coil)을 설치하였다. 그리고, 이를 R-C 적분회로(저항 100k $\Omega$ , 용량 0.1 $\mu$ F)에 연결하고 이 적분회로를 통과하는 자속 밀도 파형(B(t))을 오실로스코프(TEK 2430A, 주파수 대역 200MHz)로 측정하였다. 측정되는 자속 밀도는 감쇄 정현파의 형태로 나타나며 그 일례를 Fig. 4에 나타낸다.

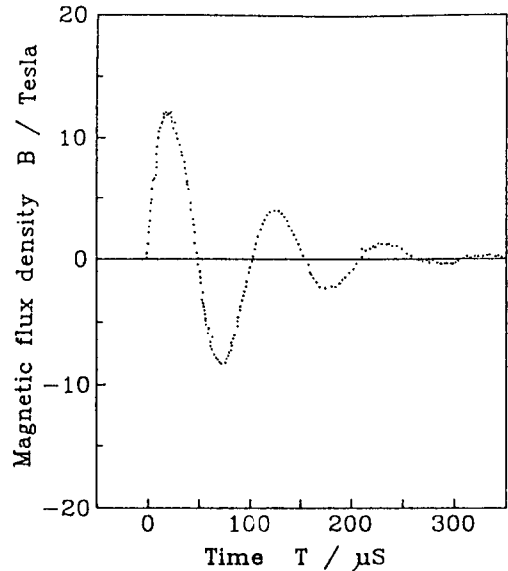


Fig. 4 An illustration of typical magnetic flux wave as measured.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3-1. 압재의 변형 형태

Fig. 5는 길이 30mm인 알루미늄 합금관을 사용하여 8KJ의 방전 에너지로 접합을 하였을 때, 접합부 길이 방향의 각 위치에서의 폴리우레탄 봉 모재의 반경 방향 변형도( $\epsilon_r$ ) 분포와 방전 회수의 관계를 보인다. 여기서  $\epsilon_r$ 는 압축 변형도를 나타낸다. 방전 회수에 관계없이 어느 경우에 있어서도 중앙부에서의 변형이 가장 작으며 중앙부에서 멀어질수록 변형량이 증가해 양단부에서는 변형량이 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다.

Fig. 6은 20, 25, 30, 35, 40mm길이의 압재를 각각 3회 방전하여 접합한 후 모재의 반경 방향의 변형도 분포를 나타낸다. 20~35mm길이의 경우는 Fig. 5에서의 경우와

같이 중앙부에서 변형이 가장 작으며 양단부로 갈수록 변형량이 증가하여 중앙이 볼록한 대칭적 형상을 보이고 있다. 압재의 길이가 자속 집중부의 길이와 같은 40mm 경우에는, 전 길이에 걸쳐 거의 일정한 변형도 분포가 얻어진다.

이 결과는 전자기 성형에 의한 금속관의 자유 축관에서 자속 집중부보다 관의 길이가 짧을 때는 볼록한 형상, 같을 때는 직선형, 관의 길이가 클 때는 오목한 형상이 얻어진 결과<sup>7)</sup>와 일치하고 있어, 본 실험의 압재와 모재의 접합은 금속간의 접합, 금속-세라믹 접합에서와는 달리 압재의 변형 형태가 자유 축관의 변형 양상과 유사함을 알 수 있다.

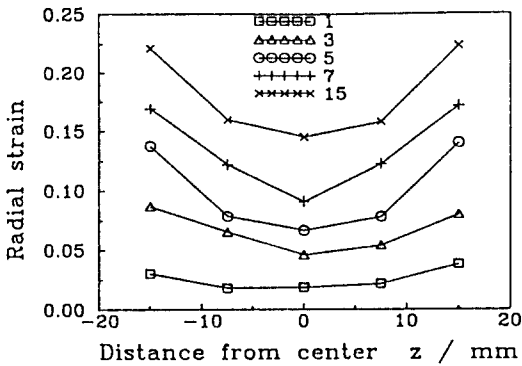


Fig. 5 Distribution of radial strain of P.U. core according to discharge number. (discharged energy 8KJ, joined length 30mm)

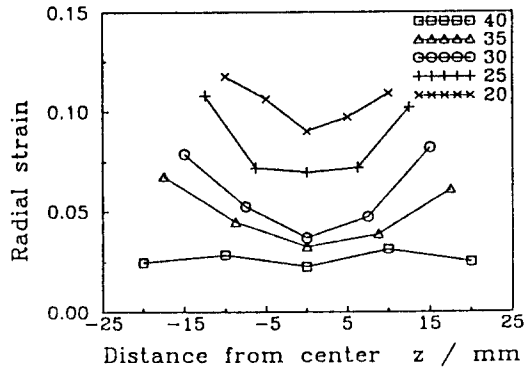


Fig. 6 Distribution of radial strain of P.U. core with respect to various joined lengths. Length of field shaper is fixed to 40mm. (discharged energy 8KJ, discharge number 3)

### 3-2. 공정 인자 및 형상 인자의 영향

#### 3-2-1. 방전 에너지의 영향

Fig. 7은 방전 에너지의 변화에 따른 접합 후의 모재의 반경 방향 변형도 분포와 그 평균치를 나타낸다. 접합부의 길이는 30mm이며, 이 경우에도 방전 에너지의 크기에 관계없이 중앙부에서 변형이 가장 작으며 단부로 갈수록 변형량이 증가하고 있다. 2KJ의 방전 에너지의 경우 모재의 변형도는 매우 작으며, 그 이상의 방전 에너지에 있어서는 에너지가 증가할수록 변형도가 증가함을 알 수 있다. 이는 에너지 증가에 따라 압재에 가해지는 자기 압력이 증가하기 때문이다.

Fig. 7의 시험편을 인장 시험기에서 단축 인장 시험을 하여, 접합체의 분리가 발생할 때의 강도로서 접합 강도를 구한 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 변형도의 경우와 같이 방전 에너지 증가에 따라 접합 강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 8KJ의 방전 에너지에서 약 65 kgf의 접합 강도가 얻어진다. 이들 결과로부터 방전

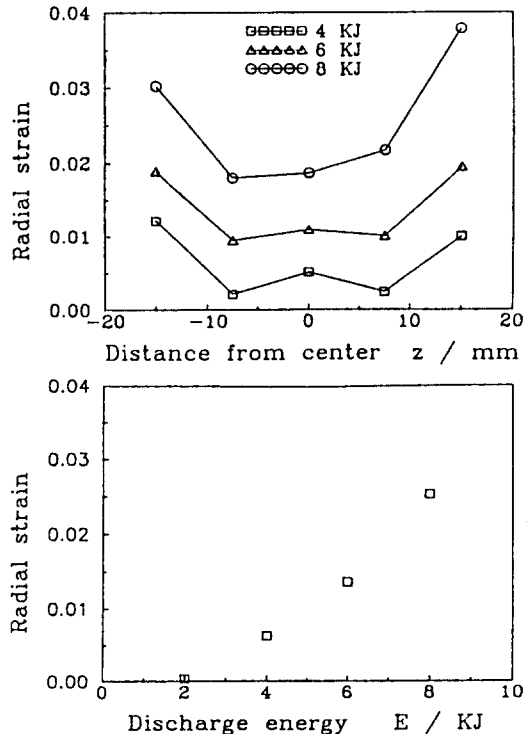


Fig. 7 Radial strain of core after joining. (a) Distribution of radial strain. (b) Average radial strain according to discharged energy.

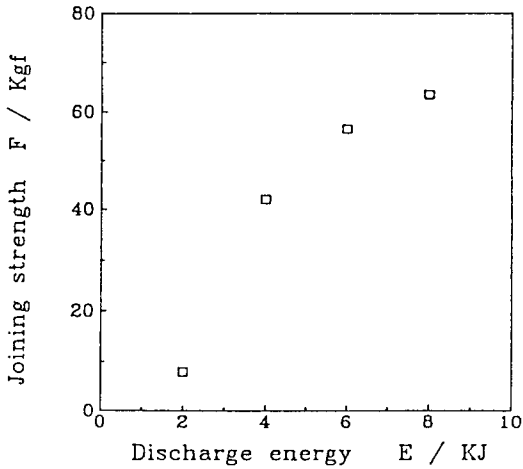


Fig. 8 Effect of discharged energy on joining strength.

에너지가 증가하면 압재에 가해지는 자기 압력이 증가하고, 따라서 압재와 모재의 변형도가 증가하며, 이 증가된 모재의 변형도에 의해 접합부의 자기력이 증가하여 접합강도가 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

### 3-2-2. 압재 길이(접합부 길이)의 영향

Fig. 9는 방전 에너지 8KJ로 하여 3회 방전한 경우의 압재 길이와 접합 후의 모재의 반경 방향 변형도와와의 관계를 나타낸다. 압재 길이 20mm에서는 약 10% 이상의 변형도를 보이나 압재 길이가 증가할 수록 변형도는 감소하며 40mm 길이에서는 약 2.5%의 변형도가 얻어진다.

Fig. 10은 방전 회수 3회인 경우의 압재 길이와 접합 강도와와의 관계를 도시하는데, 길이가 증가할수록 접합 강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. Murata 등<sup>4)</sup>은 금속(알루미늄관)/금속(동봉)의 전자기 접합에서 본 실험의 결과와는 달리 접합부 길이의 증가에 따라 접합 강도가 직선적으로 증가하는 실험 결과를 얻고 있다. 그리고, 방전 에너지가 같을 경우에는 발생하는 자기 압력이 같고, 또한 접합부의 면적은 접합부의 길이에 비례하므로 접합 강도(전단 강도) P는  $P=2\pi r \ell \mu q$ 에 의해 접합부 길이에 직선적으로 비례하여 증가한다고 설명하고 있다. (r,  $\ell$  : 압재의 반경과 길이,  $\mu$  : 마찰계수, q : 자기력)

그러나, Fig. 11에 나타낸 바와 같이 본 실험에 있어 자속 집중기와 압재사이의 자속 밀도의 측정 결과는, 압재의 길이 증가에 따라 자속 밀도, 즉 압재에 가해지

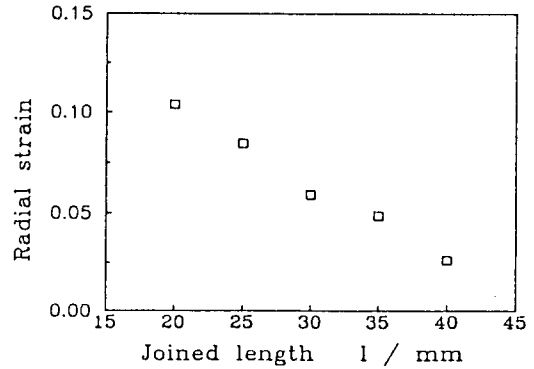


Fig. 9 Effect of joined length on average radial strain of core. (discharge number 3)

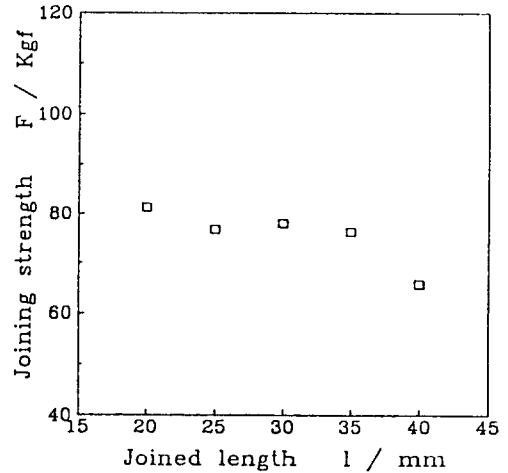


Fig. 10 Effect of joined length on joining strength

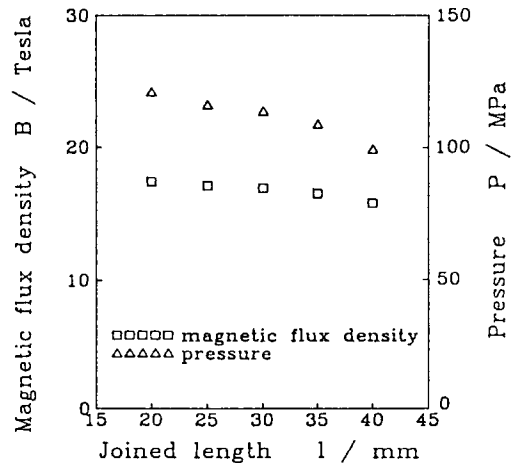


Fig. 11 Relationship between joined length and magnetic flux density and magnetic pressure.

는 자기 압력이 감소함을 보이고 있다. 또한, 자진력에 비례할 것으로 예측 되는 Fig. 9의 모재의 변형도 역시 압재 길이의 증가에 따라 감소하고 있다. 따라서, 압재의 길이가 증가함에 따라 접합부의 면적은 증가하지만, 이 보다는 지속 밀도의 감소등에 의해 압재와 모재의 변형도가 감소하여 자진력이 감소하게 되고, 이에 따라 접합 강도도 감소하는 것으로 생각되며, 전자기 접합에 있어 압재 길이는 접합부 면적과 자진력 변화의 두가지 요소를 모두 고려하여 결정하여야 할 것으로 생각된다.

### 3-2-3. 압재 두께의 영향

Fig. 12와 Fig. 13은 압재의 두께 0.8~2mm에 있어 8KJ, 3회 방전후 모재의 변형도와 접합 강도를 나타낸 결과이다. 압재의 두께가 증가할 수록 모재의 변형도는

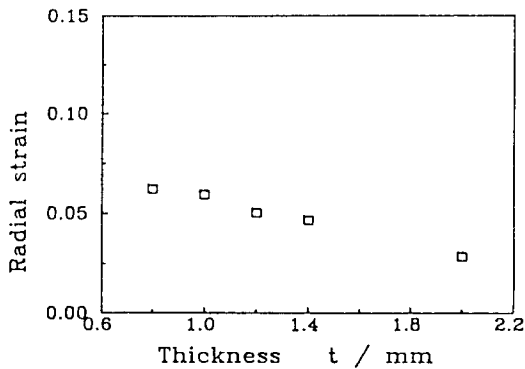


Fig. 12 Effect of tube thicknesses on average radial strain of core. (discharged energy 8KJ, discharge number 3, joined length 30mm)

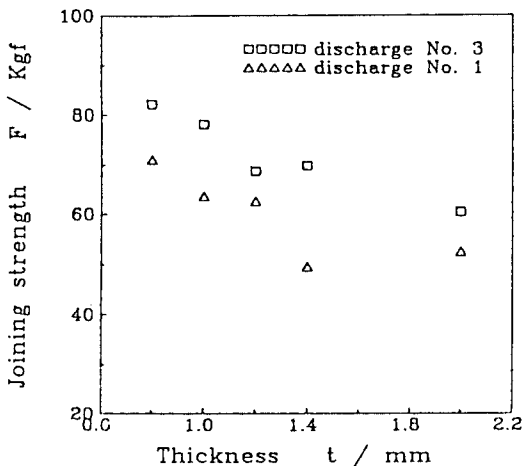


Fig. 13 Effect of tube thickness on joining strength.

감소하고 있으며, 접합 강도에 있어서도 변형도의 경우와 같이 두께 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

전자기 접합에 있어 압재의 두께에 대해서는 방전 에너지와 압재의 소성 변형량의 관계 뿐만 아니라, 응력 제하시 나타나는 모재의 탄성 회복을 억제 가능한 두께가 고려되어야 한다. 본 실험의 범위에서는 가장 두께가 작은 0.8mm관의 경우에서 최대 접합 강도가 얻어졌다. 이는, 모재가 폴리우레탄과 같은 고분자 재료의 경우에 있어서는 금속과 비교하여 탄성 회복 응력값이 매우 작으므로 압재의 두께가 충분히 작은 값에서도 높은 접합 강도가 얻어질 수 있는 것으로 생각된다.

### 3-2-4. 접합 간극의 영향

압재와 모재 사이의 간극을 0.1~1.0mm로 조정하여 8KJ의 방전 에너지로 접합한 경우의 압재와 모재의 변형량을 Fig. 14에, 이 때의 접합 강도를 Fig. 15에 나타낸다. 간극이 클수록 압재의 변형량은 증가하고 있으나 모재의 변형량은 감소하여 1mm이상의 간극에서는 모재는 거의 변형이 발생하지 않는다. 이것은 압재가 간극만큼 자유 축관된 후 접합이 진행되었기 때문이다. 접합 강도는 금속/금속<sup>4</sup>, 금속/세라믹<sup>5</sup>에서의 경우와 같이 간극이 작을수록 증가하는 결과를 보이고 있다.

### 3-2-5. 방전 회수의 방향

Fig. 16은 방전 회수와 모재의 변형량( $\epsilon_c$ ), Fig. 17은 방전 회수와 접합 강도와의 관계를 나타낸다. 방전 회수의 증가에 따라 변형량은 계속 증가하는 결과가 얻어지나, 접합 강도는 7회에서 최대를 나타내고 그 이상의 방전에서는 감소하는 경향을 보인다. 이는, 방전 회수 증가에 따른 압재 단면의 변형 정도를 나타낸 Fig. 18에서 보는 바와 같이, 7회까지는 방전 회수의 증가에 따라 잔류 변형도의 증가에 의해 자진력이 증대되어 접합 강도가 증가되었으나, 7회 이후부터는 압재의 불균일한 변형이 증가하게 되어 전체적인 접합 면적이 감소하게 되므로 접합 강도가 감소하는 것으로 생각된다.

이상, 방전 에너지, 방전 회수, 압재의 길이, 두께, 간극등의 공정 인자와 형상인자가 압재(알루미늄 합금관)와 모재(폴리우레탄 봉)사이의 접합 강도에 미치는 영향에 대하여 살펴 보았다. 결과적으로 방전 에너지가 클수록, 모재와 압재 사이의 간극이 작을 수록 접합 강도가 증가하였으며, 방전회수의 경우는 7회까지는 방

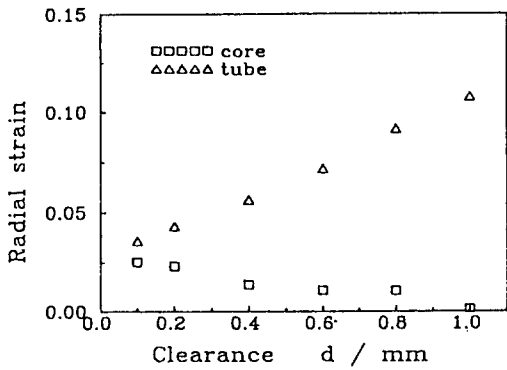


Fig. 14 Discrepancy between radial strain of core and tube in accordance with initial clearances. (discharged energy 8KJ, discharge number 1, joined length 30mm)

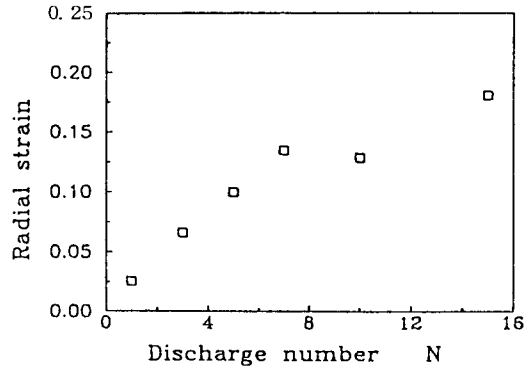


Fig. 16 Effect of discharge number on average radial strain of core. (discharged energy 8KJ, joined length 30mm)

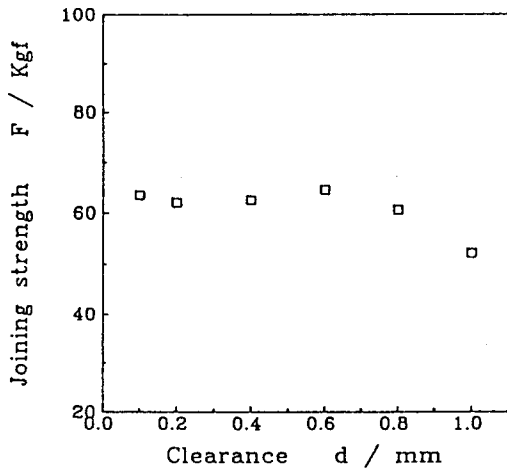


Fig. 15 Effect of initial clearances on joining strength.

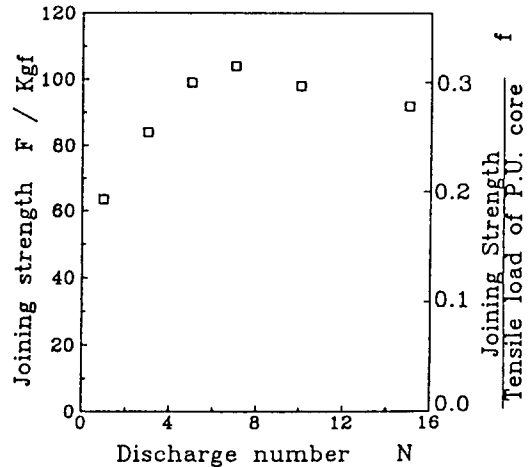


Fig. 17 Effect of discharge number on joining strength. (f=joining strength/tensile load of P. U. core)

전 회수가 증가할 수록 증가하고 그 이상에서는 감소하였다. 압재의 두께 증가는 접합 강도가 감소하는 경향을 보였다. 그리고 압재의 길이는 금속/금속, 금속/세라믹의 접합에서 이미 보고된 결과와는 달리 길이가 짧을 수록 압재와 모재의 변형도가 증가하였으며, 강도도 이와 함께 증가하는 결과가 얻어졌다.

압재 또는 모재 중에서 강도가 약한 쪽의 인장 파단 강도보다, 접합체의 접합강도가 크게되는 것을 이상적인 접합의 조건이라고 할 때, Fig. 17의 우측 Y축에 [f=접합강도/폴리우레탄 봉의 인장 파단강도]의 비율로서 나타낸 본 실험의 결과는 최대치가 약 0.3(접합강도

105kgf) 정도이다. 이 값은 알루미늄과 같은 금속/금속의 전자기 접합의 경우보다 낮은 값이며, 그 원인으로서는 다음 절에서 고찰하는 방전 에너지의 손실에 의한 것이 지적될 수 있으며, 또한 본 실험의 8KJ의 방전 에너지는 최적값이 아니며 접합 강도의 향상에는 더욱 큰 방전 에너지가 필요한 것으로 생각된다. 그러나 f=0.3 정도의 접합 강도에서 폴리우레탄 봉의 연신율은 약 60%에 도달하게 되므로, 구조적인 관점에서 볼 때 접합체로서 요구되는 접합강도는 충분히 만족하는 것으로 생각할 수 있다.

또한, 본 실험에서 수행한 전 경우에 있어 접합 강도

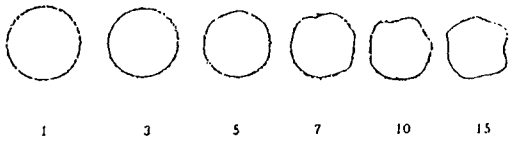


Fig. 18 Sequential change of deformed tube ends according to the increase of discharge number.

의 변화는 모재인 폴리우레탄 봉의 변형도 변화와 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 접합 강도는 폴리우레탄 모재의 변형도에 대한 의존성이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이에 대하여는 다음의 제2보에서 상세히 고찰 하기로 한다.

### 3-3. 금속/고분자 재료 접합에서의 자기압력

#### 3-3-1. 자기압력 계산 방법

축관에 의한 전자기 접합 중의 금속관 압재에 가해지는 자기압력 P는, 관 외부의 자속밀도를  $B_o$ , 관 내부의 자속밀도를  $B_i$ 라고 할 때, Maxwell 응력을 나타내는 다음식<sup>1)</sup>

$$P = \frac{1}{2\mu_o} (B_o^2 - B_i^2) \quad (1)$$

으로 부터 얻을 수 있다. 여기서  $\mu_o$ 는 진공 투자율을 나타낸다. 그러나, 일반적으로 압재에 가해지는 자기 압력을 극대화하기 위해서는 자속 집중기와 압재사이의 공간을 최소화 하여 자속을 집중시키게 되므로, search coil에 의해  $B_o$ 값을 직접 측정하기는 곤란하다.

압재와 모재가 없을 때의 자속 집중기 내부를 통과하는 전체 자속을  $\Phi_f$ 라고 하고, 자속의 통과 경로로서 자속 집중기 내측의 공간이외에 자속 집중기의 표피 깊이(skin depth)와 슬리트(slit)부분도 고려할 때

$$\Phi_f = B_f \{ \pi(a_f + \delta_f)^2 + N_s a_s (d_s + 2\delta_f) \} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $B_f$ 는 자속 집중기만 존재할 경우의 자속 집중기 내부의 자속 밀도이고,  $a_f$ 는 자속 집중기의 내반경,  $a_s$ 와  $d_s$ 는 각각 슬리트의 길이와 폭이며,  $d_f$ 는 자속 집중기의 표피 깊이,  $N_s$ 는 슬리트의 갯수이다.

압재가 존재할 때의 자속 집중기 내의 전체 자속  $\Phi_t$ 는, 전자기 접합중의 압재의 기하학적 변형을 무시하면

$$\Phi_t = B_o \{ \pi(a_f + \delta_f)^2 + N_s a_s (d_s + 2\delta_f) - \pi(a_t + t - \delta_t)^2 \} + B_i \pi(a_t + \delta_t)^2 \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이 때  $B_o$ 는 자속 집중기와 압재사이의 공간에서의 자속밀도이며  $B_i$ 는 압재 내부의 자속 밀도이다. 또한,  $a_f$ 와  $t$ 는 압재의 내반경과 두께이며,  $\delta_f$ 는 압재의 표피 깊이를 나타낸다.

$\Phi_f$ 와  $\Phi_t$ 는 근사적으로 같다고 볼 수 있으므로, (2)와 (3)을  $B_o$ 에 대하여 정리하면

$$B_o = \frac{B_f \{ \pi(a_f + \delta_f)^2 + N_s a_s (d_s + 2\delta_f) \}}{\pi(a_f + \delta_f)^2 + N_s a_s (d_s + 2\delta_f) - B_i \pi(a_t + \delta_t)^2 - \pi(a_t + t - \delta_t)^2} \quad (4)$$

이 얻어진다. 따라서  $B_f$ 와  $B_i$ 를 측정함으로써(4)에 의해  $B_o$ 의 근사값을 얻을 수 있으며, 이 결과를 (1)에 대입하여 압재에 가해지는 자기 압력을 추정할 수 있다.

#### 3-3-2. 금속/금속과 금속/고분자 재료 접합에서의 자기 압력 비교

알루미늄관과 알루미늄 봉과의 접합과 같은 금속/금속 접합의 경우, 압재와 모재사이의 간극이 작을 때 압재 내부의 자속 밀도  $B_i$ 는 극히 작은 값( $B_i \approx 0$ )을 갖게되므로, 이 때의 자기 압력  $P_v$ 은 (1)로 부터,

$$P_M = \frac{1}{2\mu_o} B_o^2 \quad (5)$$

과 같이 표시할 수 있다. 그러나 본 실험에서와 같은 알루미늄 압재/폴리우레탄 모재의 접합의 경우는 모재를 관통하는 자속 밀도  $B_i$ 가 존재하게 되어, 자기압력  $P_v$ 가  $P_M$ 보다 작은 값을 갖게된다.

측정되는 자속 밀도  $B_f$ ,  $B_i$ 는 Fig. 4의 측정 예에서 보는 바와 같이 시간에 대하여 감쇄 정현파로서 나타나는데, 여기서는 변형을 지배하는 제1과교치의 값을 갖고 금속/금속과 금속/고분자 재료의 접합에서의 자기 압력을 비교하기로 한다.



본 실험에서 8KJ의 방전 에너지로 방전을 할 때, Bf와 폴리우레탄 모재 사용시의 Bi의 제1과고에서의 측정값은 각기,

$$B_f = 10.7 \text{ Tesla}$$

$$B_i = 3.2 \text{ Tesla}$$

가 얻어졌다. 이 결과를 (1), (3), (5)에 대입하여, 알루미늄 합금관에 대하여 금속 봉을 사용한 경우와 폴리우레탄 봉을 사용한 경우의 자속 밀도와 자기 압력을 계산하면, 각각

$$\text{알루미늄 봉의 경우 } B_{r,y} = 17.5 \text{ Tesla}, P_y = 122 \text{ MPa}$$

$$\text{폴리우레탄 봉의 경우 } B_{r,p} = 15.1 \text{ Tesla}, P_p = 87 \text{ MPa}$$

가 얻어진다. 즉, 같은 8KJ의 방전 에너지에서 폴리우레탄 봉의 경우가 알루미늄 봉과 비교해  $B_{r,p}/B_{r,y} = 0.86$ ,  $P_p/P_y = 0.71$ 로서, 자기 압력은 알루미늄 봉에 비해 70%에 지나지 않고, 고분자 재료의 접합에 있어서는 이와같이 에너지 손실이 크게 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

금속과 고분자 재료의 접합에 있어 축관 전자기 성형에 의한 전자기 접합법의 적용 가능성을 검토하기 위하여, 알루미늄 합금(Al 6061)관과 폴리우레탄 봉을 모델로 하여 제반 공정 인자인 방전 에너지, 방전 회수, 압재와 모재사이의 간극, 압재의 길이와 두께의 영향을 실험적으로 분석하였다. 또한, 자속 집중기와 압재사이의 자속밀도와 압재에 가해지는 자기 압력의 계산법을 제시하고, 금속/고분자 재료의 접합에 따르는 자속 집중기 내부의 자속 밀도 변화를 측정하고 자기 압력을 계산하여 이 결과를 금속/금속의 경우와 비교하였다. 이하 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 8KJ의 방전 에너지에서 7회 방전한 경우가 접합 강도/접합재(폴리우레탄) 인장강도의 비가 약 0.3으로서 가장 큰 값이 얻어졌다. 이는 금속/금속의 경우보다 비교적 낮은 값이며, 방전 에너지의 증가에 의해 개선이 가능할 것이다.
2. 금속/고분자 재료의 전자기 접합의 경우, 금속관 내의 고분자 재료를 관통하는 자기장이 존재하게 되어, 금속/금속 접합의 경우와 비교하여 같은 형상, 같은 방전 에너지에 대하여 자기 압력이 크게

감소한다.

3. 공정 인자중 방전 에너지, 방전 회수의 증가는 접합 강도를 상승시키며, 특히 방전 회수의 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 본 실험의 범위에 있어서 압재의 길이, 두께, 간극의 증가는 접합 강도를 감소시키는 결과가 얻어졌다.
4. 알루미늄 합금 압재/폴리우레탄 모재의 접합 강도는 모재인 폴리우레탄의 잔류 탄성 변형도에 의하여 지배받는 것으로 생각되며, 이에 대한 상세한 고찰은 다음 보에서 수행할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Bruno, E. J. High-velocity Forming of Metals, ASTM, 1968, pp155~184
2. 이종수, "전자기 성형법에 대하여", 대한 기계 학회지, Vol. 28, No. 3, pp476~486, 1988
3. Negishi, H., 이종수, 황운석, 김남환, "전자기력에 의한 소성가공 기술", 기계설계, Vol. 14, No. 1, pp94~101, 1990
4. Murata, M., Negishi, H. and Suzuki, H., "High speed Joining of Tube by Solenoidal Compression Coil", J. Jpn Soc. for Technol. of Plas., Vol. 25, No. 283, pp702~708, 1984
5. Sano, T., Takahashi, M., Murakoshi, Y., Terasaki, M. and Matsuno, K., "Electromagnetic Joining of Metal Tubes to Ceramic Rods" J. Jpn. Soc. for Technol. of Plas., Vol. 28, No. 322, pp1192~1198, 1987
6. 최재찬, 조용철, 이종수, 황운석, 김남환 : "전자기 성형에서의 테이퍼진 자속집중기의 자기압력에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 7, No. 2, pp14~27, 1990
7. Sano, T., Takahashi, M., Murakoshi, Y. and Matsuno, K. : "Electromagnetic Tube Compression with a Field Shaper", J. Jpn. Soc. for Technol. of Plas., Vol. 25, No. 283, pp731~738, 1984
8. 이종수, 김남환, 황운석, "전자기 축관성형 연구", 전자기 성형 conference(ADD), pp49~56, 1989