

금속과 고분자 재료의 접합강도 해석

- 전자기 접합 연구 II -

손희식*, 김남환*, 이종수*, 황운석*

Analysis of Joining Strength in Electromagnetic Joining of Metals to High Toughness Polymers

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

ABSTRACT

Electromagnetic joining of aluminum alloy tubes to high toughness polyurethane rubber cores is studied in order to estimate the joining strength and to analyze the effect of the process variables. The equation which can estimate the joining strength is proposed under considering the elastic recovery of the polyurethane core and the radial shrinkage of the core by pulling it axially. The obtained results are as follows: 1) The joining strength is mainly dependent on the magnitude of residual elastic strain of the polyurethane core. 2) The radial shrinkage (residual strain reduction) of the core during the axial pulling causes the joining strength to decrease severely. The equation for the reduced axial strength is proposed and it is found that the estimated values agree well with experimental results. 3) The magnitude of radial shrinkage could be reduced for the smaller value of ratio l/r . 4) The joining strength in metal/polymer joining increases as the friction coefficient increases. But its effect of friction coefficient is insignificant in comparison with the case of metal/metal joining.

1. 서론

전자기 접합후의 접합체의 접합력은 압재와 모재사이의 잔류 탄성 회복력에 의해 발행하게 된다. 즉 두 부재사이의 접합강도는 접합후의 잔류 탄성 변형량 및 사용재료의 탄성계수에 의해 결정될 수 있다. 두 재료의 접합에서 전자기 접합법을 적용하여 얻을 수 있는 이점은, 압재 둘레를 따라 거의 균일한 압력을 작용시킬 수 있으므로 접합체의 외관이 균일하다는 점과 여타의 접합법과 비교하여 공정이 단순하고 비교적 높은 접합강도를 얻을 수 있다는 점이다. 특히, 높은 접합강도

를 얻기 위해서는 접합체 형상설계, 그리고 이에 따른 자속 집중기 형상의 적합한 설계^{(1)·(2)}와 더불어 제공정 인자의 영향 분석^{(3)·(4)}을 통한 최적 공정의 선택이 필수적이다. 이를 해결하기 위해서는 적절한 접합모델을 통한 접합강도의 해석방법 개발과 이를 검증할 수 있는 실험이 요구된다.

전자기 접합강도 측면에서의 이론적인 해석 연구는 Murata등⁽⁵⁾에 의해 수행된 결과가 유일하게 보고되어 있다. 이들은 금속과 금속간의 접합을 대상으로 하여 전자기 접합 과정과 접합 기구의 응력-변형률 해석을 통해 접합강도를 계산하였다.

* 국방과학연구소 (정회원)

** 성화대학교 금속공학과

그러나 모재가 고인성 폴리우레탄과 같은 일레스토머 (elastomer)에 해당하는 고분자 재료인 경우, 즉 금속/고분자 재료의 전자기 접합에 있어서는, Murata 등이 제시한 계산식에 의해서는 그 접합강도를 정확히 예측할 수가 없게 된다. 그것은 이와같은 고분자 재료의 경우 금속에 비하여 작은 외력에서도 쉽게 변형이 되며, 탄성 구역에서도 직선적인 응력-변형을 관계를 나타내지 않고, 상당히 변형이 진행된 이후에도 탄성 회복이 가능하기 때문이다⁽¹⁰⁾.

저자들은 전보⁽³⁾에서 알루미늄 합금관과 폴리우레탄 봉의 전자기 접합에 있어서의 제정공인자의 영향을 분석한데 이어, 본고에서는 접합강도가 폴리우레탄 재료의 잔류변형률에 의존함과 접합체에 인장하중이 작용할 때 폴리우레탄 재료의 반경방향 탄성수축 현상이 발생함을 고려하여 금속/고분자 재료의 접합강도 계산식을 제안하고, 이를 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다. 또한, 접합체의 길이(ℓ), 형상비(ℓ/r) 등의 기하학적 형상과 마찰계수의 변화가 접합강도에 미치는 영향을 금속/금속 접합의 경우와 비교하여 검토하였다.

2. 전자기 접합강도 해석

2.1 금속(관)/금속(봉)의 접합

Fig. 1에 금속/금속의 전자기 접합 경우에 있어서 전자기 압력에 의해 접합되는 압재와 모재의 변형과정을 원주방향 응력-변형률 곡선⁽⁹⁾으로 나타내었다. 이는 다음의 3단계로 구분할 수 있다.

과정 (i): 압재가 전자기 압력을 받아 변형되어 모재에 접촉하기까지의 과정 (곡선 O'A)

과정 (ii): 압재가 모재가 접촉하여, 전자기 압력에 의해 접촉면이 서로 접촉된 상태에서 함께 변형되는 과정 (압재: 곡선 AB, 모재: 곡선 OC)

과정 (iii): 전자기 압력의 작용후에 압재와 모재가 탄성 회복을 하여 자진력을 발생시키는 과정 (압재: 직선 BE, 모재: 곡선 CD)

즉, 두재료가 접합력을 갖기 위해서는 탄성 회복후 압재와 모재사이에 잔류변형($\Delta\epsilon$)이 존재하여야 하며, 따라서 압재에는 인장상태의, 모재에는 압축상태의 원주방향 잔류응력(σ_r)이 존재하여야 된다. Fig. 1에서 접촉압력 q 와 모재 및 압재의 잔류변형률 사이에는 $\Delta\epsilon_c = q \cdot (1-\nu) / E_c$ 와 $\Delta\epsilon_t = q \cdot r / hE_t$ 의 관계가 있고, 이로부터

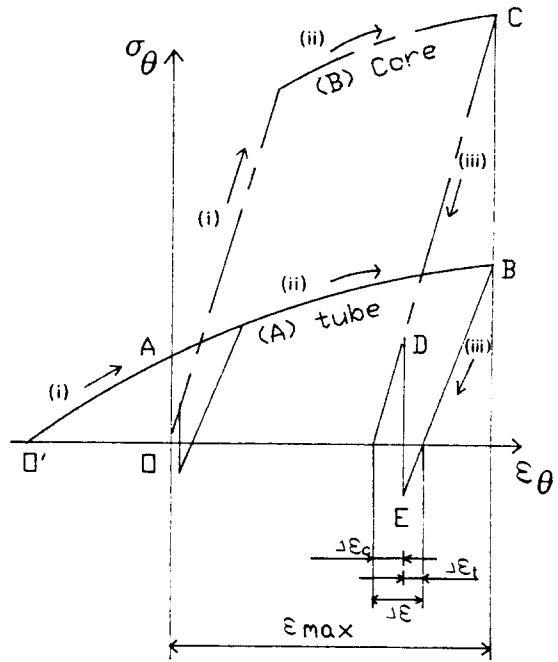


Fig. 1 Circumferential stress and strain correlationship of a metal tube (A) and a metal core (B) during electromagnetic joining process

접촉압력 q 와, 모재와 압재사이의 전체 잔류변형률 $\Delta\epsilon$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_c + \Delta\epsilon_t = \frac{q_0(1-\nu)}{E_c} + \frac{q_0 r}{hE_t} \dots \dots \dots (1)$$

그리고 접합체에 축방향 인장력을 가하는 경우의 접합강도, 즉 접촉면의 마찰력에 의한 전단강도는 아래식으로 표시된다.

$$F_s = 2\pi r \ell \mu q_0 \dots \dots \dots (2)$$

단, 여기서 E_c 와 E_t 는 압재와 모재의 종탄재 계수를, 그리고 r 과 ν 는 모재의 반경과 poisson ratio를 나타낸다. 그리고 ℓ 은 접합부 길이, μ 는 접촉부의 마찰계수이다. Murata 등⁽⁹⁾은 위의 식에 의해 접합강도를 계산하고, 알루미늄 관과 동 봉의 전자기 접합실험을 통하여 이 결과를 확인한 바 있다.

2.2 금속(관)/고분자 재료(봉)의 접합강도 해석

본 실험의 경우와 같이 모재가 고인성 폴리우레탄인 경우, 이 폴리우레탄 재료는 금속에 비해 탄성계수가 극히 작으며, 금속과는 달리 상당한 변형량까지 비록 탄성적이지는 않으나 의탄성 거동을 일으켜 응력 제거후 변형이 회복되는 특성을 갖고 있다. Fig. 2에 본 실험에 사용된 폴리우레탄의 응력-변형을 곡선을 나타낸다.

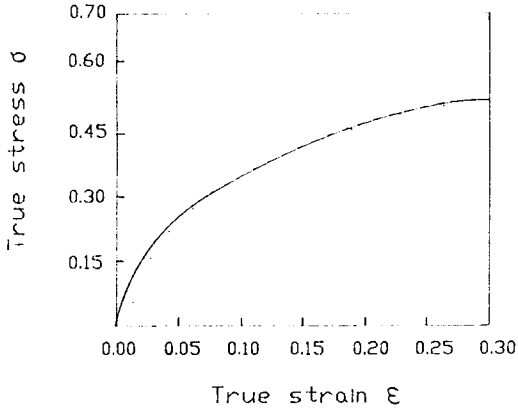


Fig. 2 Stress-strain curve for polyurethane under uniaxial tension

Fig. 3은 모재가 폴리우레탄인 경우의 접합 과정이며, 그림상의 변형을 내에서 모재는 탄성거동(의탄성 포함)을 한다. 폴리우레탄의 경우 역시 앞에서 기술한 금속/금속의 경우와 같은 과정이 일어나나 과정(III)에서 접합후 탄성회복 경로는 곡선 CD'O가 아니라 곡선 CDO를 따르며, 따라서 접합후의 모재의 잔류변형을 ϵ_{r0} 로 인한 잔류응력은 σ_{r0} 가 된다. 또한 본 실험의 경우, 폴리우레탄은 알루미늄 보다 탄성계수가 훨씬 작으므로, 금속의 탄성 회복량 ($\epsilon_{r1}-\epsilon_{r0}$)은 모재인 폴리우레탄의 압축 변형량 ϵ_r 에 비하여 극히 작은 값이므로 이하의 접합과정 해석에서는 $\epsilon_{r0} \approx \epsilon_{r1}$ 으로 근사화하였다.

압재인 원관과 모재인 봉의 전자기 접합에 있어, 압재의 두께가 얇으므로 압재는 원주방향 응력 σ_r 만이 존재하는 단축응력 상태에 있다. 또한 모재는 양단이 개방되어 있으므로, 축방향 응력 $\sigma = 0$ 인 평면 응력상태이고 탄성역과 소성역 모두 원주방향 응력과 반경방향 응력사이는 $\sigma_r = \sigma_r$ 인 관계가 성립하게 된다.¹²⁾ 또한 모재는 봉 형상이므로 $\epsilon_r = \epsilon_r$ 이 만족된다.

본 실험의 경우에서와 같이 모재가 폴리우레탄일 때는 접합 진행중 및 접합후에도 탄성거동 범위내에 존재한다. 따라서 접합후의 모재의 잔류(탄성) 변형률 ϵ_{r0} (= ϵ_{r1})와 잔류응력(자긴력) q 는 모재의 탄성 거동이 금속과 같이 직선적일때 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{r0} = \frac{q_0(1-\nu)}{E} \dots \dots \dots (3)$$

그런데, 폴리우레탄은 일반적인 금속과는 달리 탄성역에서 응력-변형을 관계가 직선적인 관계를 나타내지 않으므로, 폴리우레탄 모재의 인장시험 곡선 (Fig. 2)으로부터 얻은 축방향의 응력-변형을 $\sigma_r - \epsilon_r$ 관계를 다음과 같이 수식화 하였다.

$$\sigma_r = a \epsilon_r^b \dots \dots \dots (4)$$

여기서, a, b는 상수이다. 본 실험의 폴리우레탄의 경우 압축시험에서의 응력-변형을 곡선은 인장시험의 결과와 거의 동일한 곡선이 얻어진다. 따라서, 축방향 인장과 압축시 거동이 같을때 외부 압력에 의해 모재에 반경 방향의 응력 σ_r 및 원주 방향의 응력 $\sigma_r (= \sigma_r)$ 가 가해질 경우, σ_r 과 ϵ_r 의 관계는 식(4)로부터

$$\sigma_r = a \left(\frac{\epsilon_r}{1-\nu} \right)^b \dots \dots \dots (5)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 접합후의 접합체 사이에 작용하는 자긴력 q 와 모재의 변형률 ϵ_{r0} 은 자기 σ_r 과

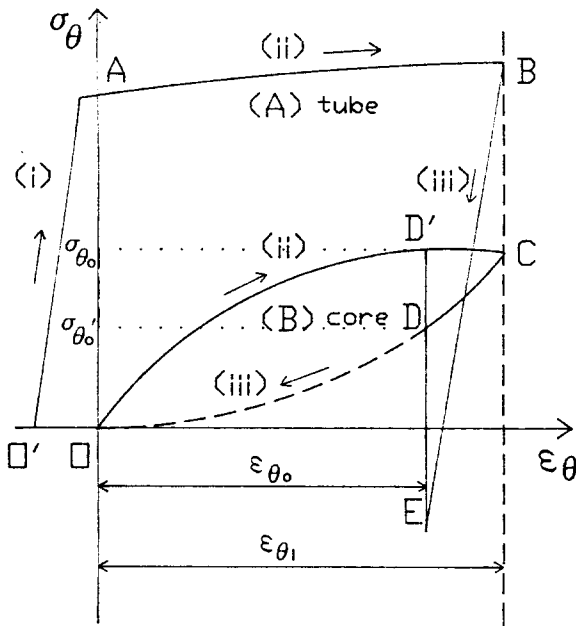


Fig. 3 Stress and strain correlationship of a metal tube (A) and a polyurethane core (B) during electromagnetic joining process

ϵ_r 에 대응하므로, 이들의 관계는

$$q_0 = a \left(\frac{\epsilon_{r0}}{1-\nu} \right)^b \dots \dots \dots (6)$$

으로 표시할 수 있다. 식(2)와 식(6)으로부터, 접합강도 F 는 다음과 같다.

$$F_0 = 2\pi r l \mu a \left(\frac{\epsilon_{r0}}{1-\nu} \right)^b \dots \dots \dots (7)$$

즉, Fig. 4에 나타낸것처럼, 접합강도는 모재의 변형을 증가에 따라 점선 OA 경로를 따라 F 의 마찰저항을 갖게된다.

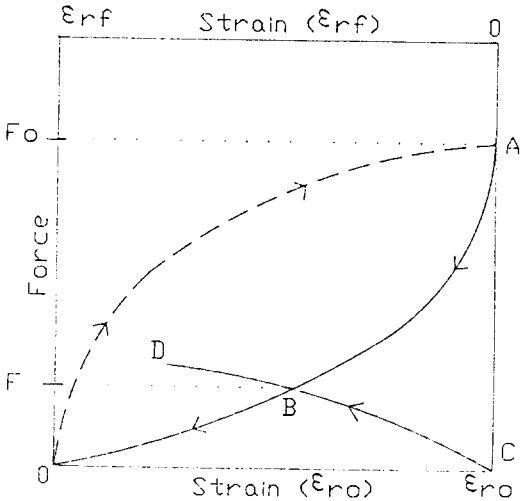


Fig. 4 Force-strain diagram for the equilibrium state of core material under tensile loading after having completed electromagnetic joining

2. 3 탄성수축을 고려한 접합강도 해석

폴리우레탄은 작은 외력에서도 변형률이 크게 변하는 재료이므로 인장력이 작용할 때의 접합강도는 인장(축) 방향의 응력으로 인해 폴리우레탄 봉의 반경(원주) 방향으로 수축변형이 발생하게 된다. 실제로 접합체에 축 방향의 외부 인장력이 존재하게 되면, 이 인장력으로 인한 모재의 반경방향 (또는 원주방향)의 변형을 수축 현상이 발생되므로, 이하의 해석에서는 이 수축 변형률을 고려하여 접합강도를 계산한다. 단축 인장에 있어서 ϵ_r 과 ϵ_r 사이에는 $\epsilon_r = -\epsilon_r / \nu$ 인 관계가 성립하므로 식(4)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_z = a \left(\frac{\epsilon_r}{\nu} \right)^b \dots \dots \dots (8)$$

(ϵ_r : 반경방향의 변형률의 절대값,
 ν : Poisson ratio)

수축되는 변형률의 ϵ_r 라 할때, 식(8)로부터

$$\epsilon_{rf} = \nu \left[\frac{\sigma_z}{a} \right]^{1/b} \dots \dots \dots (9)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 이에 의해 발생하는 자간력의 감소량을 q_f 라 하면, (6)식과 같이 $q = a(\epsilon_r / (1-\nu))^b$ 가 되어 임의의 외부 인장력이 가해지고 있을때의 자간력 q 는 초기의 자간력 q_0 에 대하여 다음의 관계가 성립한다.

$$q = q_0 - q_f = \frac{a}{(1-\nu)^b} (\epsilon_{r0}^b - \epsilon_{rf}^b) \dots \dots \dots (10)$$

이와같이 외부 인장력의 증가에 따라 자간력(q)은 감소하게 되고, 이 자간력으로 인한 마찰 저항력은 Fig. 4의 실선 AO 곡선을 따라 감소하게 되어, 이 저항력과 곡선 CD 경로를 따르는 외부 인장력이 같아질 때, 즉 그림의 곡선 AO와 CD가 만나는 점 B에서 접합체의 분리가 발생하게 된다. 이때는 다음의 관계가 성립한다.

$$2\pi r l \mu q = \pi r^2 \sigma_z \dots \dots \dots (11)$$

따라서, 식(9), (10), (11)로부터 접합체의 분리가 일어날 때의 외부 인장력 즉, 접합강도 F 는 다음과 같다.

$$F = \pi r^2 \frac{2 l \mu a}{(1-\nu)^b \cdot r + 2 l \mu \nu^b} \epsilon_{r0}^b \dots \dots (12)$$

여기서 $r=r_0 \exp(-\epsilon_r)$ 이며, r_0 는 전자기 성형 전의 모재의 반경이다.

따라서 이와같이 하여 접합 후 모재의 반경 변형률(ϵ_r)로부터 폴리우레탄의 탄성수축을 고려한 접합강도를 계산할 수 있다.

3. 실험 방법

본 접합실험에 사용된 시험편은 관 형상의 알루미늄 합금 압재(AL6061)와 봉 형상의 Metyl diisocyanate 계 고인성 폴리우레탄 (high toughness polyurethane rubber) 모재이며, 시험편의 형상, 조성, 기계적 성질 및 시험방법은 전보⁽³⁾와 같다. 그리고 접합강도의 평가

는 접합체를 인장시험편 형태로 제작하여 인장시험기 (INSTRON Model 4505)에서 수행하였다.

4. 고찰

4.1 폴리우레탄의 변형률과 접합강도의 관계

2절에서 알루미늄/폴리우레탄의 접합의 경우, 폴리우레탄이 큰 변형률에서도 탄성거동을 보이며 탄성계수가 금속에 비해 크게 작은 점으로부터, 그 접합력이 폴리우레탄의 잔류 탄성 변형률에 의존하며, 또한 축 방향의 인장 하중하에서 접합 강도는 폴리우레탄의 탄성 수축에 의해 자긴력 감소한다는 가정하에 본 해석의 계산법을 제안하였다.

접합부 길이, 직경등의 형상인자를 일정하게 하고 방전에너지, 방전회수의 공정 인자를 달리하여 접합실험을 한 경우의, 접합후 측정된 폴리우레탄의 반경방향 변형률(ϵ_r)과 접합강도 시험결과를 Fig. 5에 나타낸다. 또한

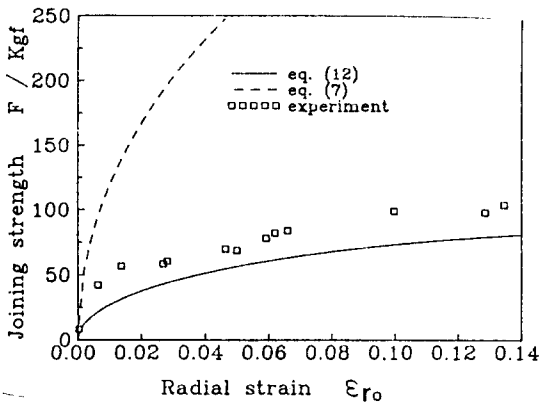


Fig. 5 Comparison of joining strength between the computed and experimental results

앞절의 (7), (12)식에 의하여 계산된 결과를 같이 나타냈는데, 그림에서 점선은 외부 인장하에서 자긴력 감소를 고려하지 않는 경우, 즉 Murata 등이 금속/금속의 접합강도 계산에 적용한 식(7)로부터 계산한 것이며, 실선은 이 감소 효과를 고려한 식(12)에 의해 계산한 결과이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 식(7)에서 계산된 결과는 실험치의 수배에 해당되는 큰 값을 보이고 있으나, 자긴력 감소를 고려한 식(12)에 의한 계산 결과는 실험치와 잘 일치하고 있다.

이 결과는 금속과 폴리우레탄과 같은 고분자재료의

접합에 있어서 접합강도를 접합체인 인장시험으로 평가할 때, 금속/금속 접합에 있어서의 Murata 등의 해석 방법의 적용은 부적절하며, 폴리우레탄 소재의 탄성이완에 의한 자긴력 감소효과를 고려해 주어야 함을 알 수 있다. 또한, 이는 접합후의 폴리우레탄 소재의 탄성변형률을 측정함으로써, 앞절의 계산법에 의해 그 접합강도를 평가할 수 있음을 잘 나타낸다.

4.2 접합강도에 미치는 형상 및 마찰계수의 영향

Fig. 6에 방전회수 3회인 경우의 압재길이에 따른 접합강도의 변화를 실험결과와 계산결과를 각각 도시하였는데, 실험결과는 길이가 증가할수록 접합강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 접합부 길이 20~40mm의 경우에 대하여 (12)식으로부터 계산한 결과는 실험치보다 약 10kgf 정도 낮은 값을 보이고 있으나 그 경향은 잘 일치하고 있다.

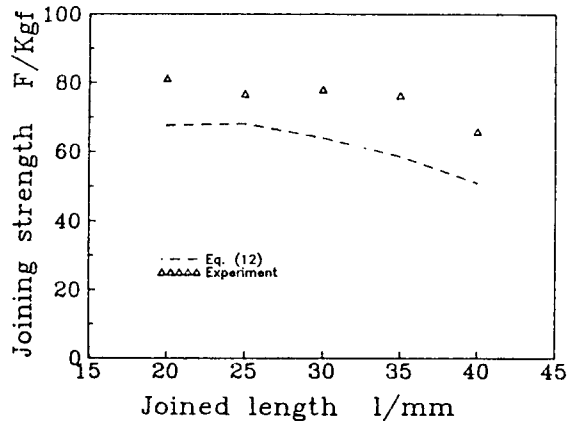


Fig. 6 Joining strength variation as joined length increases

Fig. 7은 길이 20~80mm의 경우에 대하여 계산한 결과를 나타낸다. 폴리우레탄의 잔류변형률이 동일할 때, 접합부의 길이증가에 따라 접합강도가 증가하는 결과를 보이고 있으나, 금속/금속에서의 경우⁽⁹⁾와 같이 직선적인 증가가 아니며, 길이가 증가함에 따라 그 증가량은 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

2절의 고찰로부터 접합후 축방향으로 인장력이 가해질 경우, 인장력에 의해 자긴력 감소가 발생하여 접합강도는 식(7)에 의한 접합강도 (F.)보다 저하되며 그 비율은 다음식으로 표현된다.

$$\frac{F}{F_0} = \frac{r(1-\nu)^b}{r(1-\nu)^b + 2\ell\mu\nu b}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{2\ell\mu\nu b}{r(1-\nu)^b}} \dots \dots (13)$$

위식에서 $2\ell\mu\nu b/r(1-\nu)^b > 0$ 이 항상 성립하여 비 F/F_0 값이 1보다 작게되므로, 인장력이 작용할 경우에 접합 강도 F 는 F_0 보다 작게되는 감소현상이 발생한다.

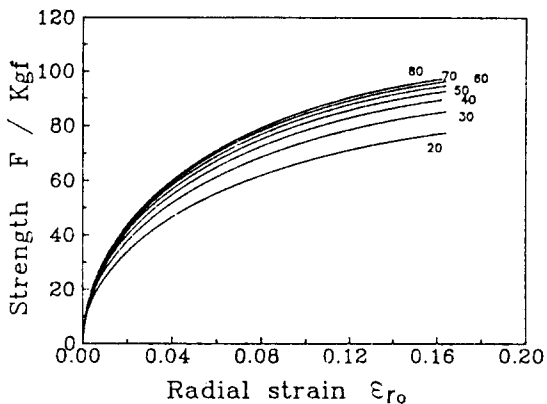


Fig.7 Computed joining strength vs. radial strain for various joined lengths

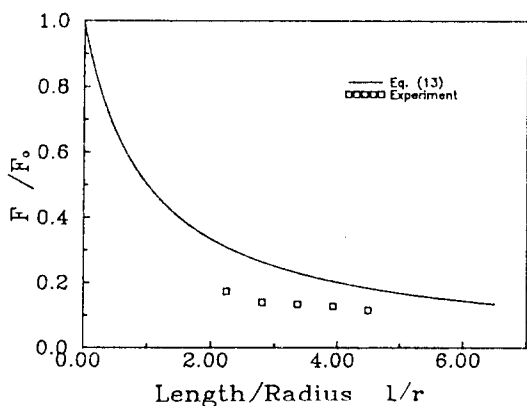


Fig.8 The reduction ratio F/F_0 of joining strength as the ratio of joined length/radius increases

Fig.8은 접합부 길이 ℓ 과 폴리우레탄 봉의 반경 r 의 비 (ℓ/r)에 대한 F/F_0 의 변화를 식(13)에 의해서 계산한 결과와 실험한 결과를 나타낸다. ℓ/r 이 클수록 접합

강도 F/F_0 는 감소함을 알 수 있으며 ℓ 과 r 이 같을때 F 는 F_0 의 약 1/2에 해당하는 값이 얻어진다. 본 실험의 범위에서 ℓ/r 값이 2.2~4.5 범위에 있으며 이때 접합 강도는 F 는 F_0 의 10~30%에 머물게 된다. 따라서 폴리우레탄과 같은 고분자 재료가 포함되는 구조체 설계시 가능한 ℓ/r 을 작게할 필요성이 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 마찰계수 μ 의 변화에 대한 접합강도 F 의 변화를 식(12)에 의해 계산한 결과이다. 마찰계수 μ 의 증가에 의해 접합강도는 증가함을 보이고 있다. 그러나 금속/금속에서의 경우⁹와 같이 접합강도는 마찰계수의 증가에 의해 직선적으로 증가하지 않고 마찰계수 0.5 이상에서는 그 증가량이 크게 둔화됨을 알 수 있다.

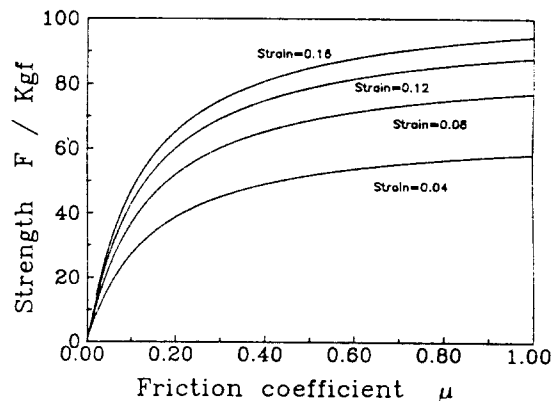


Fig.9 Joining strength F vs. friction coefficient μ

5. 결 론

금속 관(알루미늄)과 고분자재료 봉(폴리우레탄)의 전자기 접합에서, 전자기 접합후의 잔류응력-잔류변형률 관계로부터 축 방향의 인장응력을 받을 때 폴리우레탄의 반경방향의 변형률(ϵ_r)을 고려한 접합강도 계산결과와 실험결과로부터 접합부 길이, 형상, 마찰계수 등이 접합강도에 미치는 영향을 검토하였으며 이하 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 금속(알루미늄 합금 압재)/고분자 재료(폴리우레탄 모재)의 접합강도는 모재인 폴리우레탄의 잔류 탄성 변형률에 의하여 지배받는다.
2. 금속/고분자 재료의 접합강도는 고분자 재료에 축 인장 하중 작용시 자기력 감소 효과가 발생하며 이로 인해 접합강도가 크게 저하된다. 이를 고려

하여 제안된 본 해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였다.

3. 접합체 형상을 나타내는 l/r 의 비를 작게함으로써 단성 수축에 의한 자긴력이완 효과를 감소시킬 수 있다.
4. 마찰계수의 증가에 의해 접합강도가 증가하지만, 금속/금속의 경우에 비해 그 증가량은 둔화되는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 최재찬, 조용철, 이종수, 황운석, 김남환, "전자기 성형에서의 테이퍼진 자속 집중기의 자기압력에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 7, No. 2, pp. 14~27, 1990.
- 2) T. Sano, M. Takahashi, Y. Murakoshi and K. Matsuno, "Electromagnetic Tube Compression with a Field Shaper", J. Jpn. Soc. for Technol. of Plas., Vol. 25, No. 283, pp. 731~738, 1984.
- 3) 김남환, 손희식, 황운석, 이종수, "전자기 성형에 의한 알루미늄 합금관과 폴리우레탄봉의 접합 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 66~74, 1992.
- 4) T. Sano, M. Takahashi, Y. Murakoshi, M. Terasaki and K. Matsuno, "Electromagnetic Joining of Metal Tubes to Ceramic Rods", J. Jpn. Soc. for technol. of Plas., Vol. 28, No. 322, pp. 1192~1199, 1987.
- 5) J. Jablonski and R. Winkler, "Analysis of the Electromagnetic Forming Process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp. 315~325, 1978.
- 6) S. T. S. Al-Hassani, J. L. Duncan and W. Johnson, "On the Parameters of the Magnetic Forming Process", J. Mech. Eng. Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 1~9, 1974.
- 7) 이종수, 김남환, 황운석, 손희식, "동관과 폴리우레탄 관의 전자기 접합 연구", 대한기계학회 '91년도 추계학술대회 논문집, pp. 257~261, 1991.
- 8) H. Negishi, 이종수, 황운석, 김남환, "전자기력에 의한 소성가공 기술", 기계 설계, Vol. 14, No. 1, pp. 94~101, 1990.
- 9) M. Murata, H. Negishi and H. Suzuki, "High speed Joining of Tube by Solenoidal Compression Coil", J. Jpn. Soc. for Technol. of Plas., Vol. 25, No. 283, pp. 702~708, 1984.
- 10) Van Vlack, "Materials Science for Engineers", p. 231, Addison-Wesley, 1969.
- 11) Günter Oertel, "Polyurethan Handbook", p. 467, HANSER PUBLISHERS, 1985.
- 12) 김동원, "소성학", 청문각, p. 312, 1986.