

전자기 성형에 의한 금속과 고분자재료의 접합강도 해석

김 남환, 황 운석, 손 희식, 이 중수
국방과학연구소

1. 서 론

전자기 접합후의 접합체의 접합력은 압재와 모재사이의 잔류 탄성 변형도에 의해 발생하게 된다. 즉 두 부재사이의 접합강도는 접합후의 잔류 탄성 변형량 및 사용재료의 기계적 강도에 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 접합 강도를 얻을 수 있다는 점이다. 특히, 높은 접합 강도를 얻기 위해서는 접합체 형상설계, 그리고 이에 따른 자속 집중기 형상의 적합한 설계(1)와 더불어 제공정 인자의 영향 분석(2)을 통한 최적 공정의 선택이 필수적이다. 이를 해결하기 위해서는 적절한 접합모델을 통한 접합체의 해석방법 개발과 이를 검증할 수 있는 실험이 요구된다.

전자기 접합강도 측면에서의 이론적인 해석 연구는 Murata 등(3)에 의해 수행된 결과가 유일하게 보고되어 있다. 이들은 금속과 금속간의 접합을 대상으로 하여 전자기 접합 과정과 접합 기구의 용력-변형도 해석을 통해 접합강도를 계산하였다.

그러나 모재가 폴리우레탄과 같은 elastomer에 해당하는 고분자 재료인 경우, 즉 금속/고분자 재료의 전자기 접합에 있어서는, Murata 등이 제시한 계산식에 의해서는 그 접합 강도를 정확히 예측할 수가 없게 된다. 그것은 elastomer에 해당하는 고분자 재료의 경우 금속에 비하여 작은 외력에서도 쉽게 변형이 되며, 탄성 구역에서도 직선적인 변형도-용력 관계를 나타내지 않고, 상당히 변형이 진행된 이후에도 탄성 회복이 가능하기 때문이다.

저자들은 전보(4)에서 알루미늄 합금관과 폴리우레탄 봉의 접합에 있어 접합강도가 폴리우레탄 재료의 잔류 변형도에 의존함을 보이고, 또한 접합체에 인장하중이 작용할 때 폴리우레탄 재료의 반경방향 자긴력 감소의 발생을 고려한 접합강도 계산식을 제안하였다. 본고에서는 접합체의 길이(l), l/r 등의 기하학적 형상과 마찰계수의 변화가 접합강도에 미치는 영향을 실험과 계산을 통하여 검토하고 금속/금속 접합의 경우와 비교하였다.

2. 전자기 접합과정

2-1. 금속/금속 접합

Fig.1에 금속/금속의 전자기 접합 경우에 있어서 전자기 압력에 의해 접합되는 압재와 모재의 변형과정을 용력-변형도 곡선으로 나타내었다. 이는 다음의 3단계로 구분할 수 있다.

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

과정 (ii) : 압재와 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 자긴력을 발생 시키는 과정 (압재 : 직선 BE, 모재 : 곡선 CD)

즉, 두재료가 접합력을 갖기 위해서는 탄성 회복후 압재와 모재사이에 잔류 변형이 존재하여야 하며, 따라서 압재에는 인장상태의, 모재에는 압축상태의 원주방향 잔류응력(σ_θ)이 존재해야 된다.

Murata 등(3)은 금속/금속 접합체의 전자기 접합강도를 축방향 인장시의 마찰력에 의한 전단강도

$$F_0 = 2\pi r t \mu q_0 \quad (1)$$

에 의해 이를 계산하고, 알루미늄관과 동봉의 전자기 접합실험을 통하여 이 결과를 확인하고 있다.

2-2 금속/고분자 재료 접합

본 실험의 경우와 같이 모재가 폴리우레탄일 경우, 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-변형도 곡선을 나타낸다. 일반적으로 폴리우레탄은 변형속도가 빠를 경우 시간이 지남에 따라 응력이완 또는 변형도 이완현상이 나타나나 변형속도가 느릴 때는 위와같은 현상이 적게 일어난다. 본 실험에서는 시간의 변화에 따른 폴리우레탄의 물성변화는 고려하지 않았다. 또한 전자기 성형의 경우처럼 변형이 극히 짧은 시간동안에 발생하는 경우 폴리우레탄은 의탄성 거동을 일으킬 만한 시간적 여유가 없어 탄성거동만을 나타냄으로서, 같은 변형량을 얻기 위해서는 일반적인 변형속도 범위내의 응력보다 훨씬 큰값을 필요로 한다.(5) 그러나 곧 의탄성 거동이 나타나 응력이완 현상이 일어나므로 해석상 이와같은 짧은시간 동안의 거동은 무시할 수 있다.

Fig.3은 모재가 폴리우레탄인 경우의 변형과정이며, 그림상의 변형도 내에서 모재는 탄성거동(의탄성 포함)을 한다. 폴리우레탄의 경우 역시 앞에서 기술한 금속/금속의 경우와 같은 과정이 일어나나 과정 Ⅲ에서 접합후 탄성회복 경로는 곡선 CD'0가 아니라 곡선 CDO를 따르며, 따라서 접합후의 모재의 잔류 변형도 $\epsilon_{\theta 0}$ 로 인한 잔류 응력은 $\sigma_{\theta 0}$ 가 된다. 또한 본 실험의 경우, 폴리우레탄은 알루미늄보다 탄성계수가 훨씬 작으므로 실제적으로 D, D', C점은 거의 같은 위치이며 $\sigma_{\theta 0}' \approx \sigma_{\theta 0}$, $\epsilon_{\theta 0}' \approx \epsilon_{\theta 0}$ 라고 할 수 있다.

금속/고분자재료 접합체에 있어 고분자재료에 축방향 인장하중이 가해질때의 접합강도는, 이 인장력으로 인한 모재의 반경방향 수축변형도에 해당하는 변형도 이완이 발생하게 된다. 따라서, 외부 인장력의 증가에 따라 자간력 q는 감소하게 되고, 이에 의한 마찰 저항력은 Fig.3의 곡선 DO를 따라 감소하게 되어, 이 저항력과 외부 인장력이 같아질때 접합체가 분리하게 된다. 이 때의 접합강도 F^* 는 아래의 식(2)로 나타낼 수 있다. ((2)식의 유도도는 전보(4)를 참조하기 바람).

$$F^* = \pi r^2 \frac{2t\mu a}{(1-\nu)^b \cdot r + 2t\mu b} \epsilon_{r0b} \quad (2)$$

3. 실험 방법

3-1. 시험편

관형상의 Al 6061 합금 압재와 봉 형상의 Methyl diisocyanate계 폴리우레탄 모재를 시험편으로 사용하였으며 알루미늄 합금의 조성을 Table 1에, 알루미늄 합금과 폴리우레탄의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 압재는 길이를 20~40mm, 두께를 1mm로 제작하였고, 모재는 간극이 0.1~1.0mm 범위에 있도록 그 외경을 변화(15.8~18.6mm)시켰다. 또한 시험편은 전자기 접합후 접합된 상태대로 인장 시험기에서 인장 시험이 가능한 형상으로 제작하였다.

3-2. 실험 장치 및 방법

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

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 & Polyurethan

Mechanical properties				
	Young's modulus (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Al6061	0.7 x 10 ⁴	11.6	18.3	22.7
polyurethan	-	-	1.34	430

범용 압축 코일을 사용하였다. 그 밖의 성형장치, 성형용 코일의 제원은 전보(2)와 같다. 발생하는 자기장을 집중시키기 위하여, 전기 전도성 및 기계적 강도가 우수한 AL2024-T6로 자속 집중부 길이 40mm의 자속 집중기를 제작하여 사용하였으며 그 형상과 치수를 Fig.4에 나타낸다.

전자기 축관 성형에 의한 접합 실험은 시험편을 자속 집중기 내부에 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 장착하여 속도 3mm/min에서 인장 시험을 하였다.

3-3. 자속 밀도 측정 및 자기 압력 계산

압재에 가해지는 자기 압력을 구하기 위하여, Fig.5에 도시한 바와 같이, 시험편과 자속 집중기 사이에 또는 시험편 내부에 서치 코일(Search coil)을 설치하였다. 그리고, 이를 R-C 적분회로 (저항 100KΩ, 용량 0.1μF)에 연결하고 이 적분 회로를 통과하는 자속 밀도 파형 B(t)을 오실로스코프 (TEK 2430A, 주파수 대역 200MHz)로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 폴리우레탄의 변형도와 접합 강도의 관계

접합부 길이, 직경등의 형상인자를 일정하게 하고 방전에너지, 방전회수의 공정인자를 달리하여 접합실험을 한 경우의, 접합후 측정된 폴리우레탄의 반경방향 변형도 (ϵ_{θ})와 접합강도 시험결과를 Fig.6에 나타낸다. 또한 앞절의 (1), (2)식에 의하여 계산된 결과를 같이 나타냈는데, 그림에서 점선은 외부인장하에서 자기력 감소를 고려하지 않은 경우, 즉 Murata 등이 금속/금속의 접합강도 계산에 적용한 식(1)로부터 계산한 것이며, 실선은 이

감소효과를 고려한 식(2)에 의해 계산한 결과이다. Fig.6에서 알 수 있는 바와같이 식(1)에서 계산된 결과는 실험치의 수배에 해당하는 큰 값을 보이고 있으나, 자긴력 감소를 고려한 식(2)에 의한 계산 결과는 실험치와 잘 일치하고 있다.

이 결과는 금속과 폴리우레탄과 같은 고분자재료의 접합에 있어서는, 고분자재료에 축방향 인장하중이 작용할 때 금속/금속 접합에 있어서는 Murata등의 해석방법의 적용은 부적절하며, 폴리우레탄 모재의 탄성이완에 의한 자긴력 감소효과를 고려해 주어야 함을 알 수 있다. 또한, 이는 접합후의 폴리우레탄 모재의 탄성변형량을 측정함으로써, 앞절의 계산법에 의해 그 접합강도를 평가할 수 있음을 나타낸다.

4-2. 접합부 길이와 접합강도의 관계

Fig.7은 방전에너지 8KJ로 하여 3회 방전한 경우의 압재 길이와 접합 후의 모재의 반경 방향 변형도와의 관계를 나타낸다. 압재 길이 20mm에서는 약10% 이상의 변형도를 보이나 압재 길이가 증가할수록 변형도는 감소하며 40mm 길이에서는 약 2.5%의 변형도가 얻어진다.

Fig.8은 방전 회수 3회인 경우의 압재 길이와 접합 강도와의 관계를 도시하는데, 길이가 증가할수록 접합 강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. Murata등(3)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)를 (1)식에 의해 접합부 길이에 직선적으로 비례하여 증가한다고 설명하고 있다.

그러나, Fig.9에 나타낸 바와 같이 본 실험에 있어 자속 집중기와 압재사이의 자속 밀도의 측정 결과는, 압재의 길이 증가에 따라 자속 밀도, 즉 압재에 가해지는 자기 압력이 감소함을 보이고 있다. 또한, 자긴력에 비례하는 Fig.7의 모재의 변형도 역시 압재 길이의 증가에 따라 감소하고 있다. 따라서, 압재의 길이가 증가함에 따라 접합부의 면적은 증가하지만, 이 보다는 자속 밀도의 감소등에 의해 압재와 모재의 변형도가 감소하여 자긴력이 감소하게 되고, 이에 따라 접합 강도도 감소하는 것으로 생각되며, 전자기 접합에 있어 압재 길이는 접합부 면적과 자긴력 변화의 두가지 요소를 모두 고려하여 결정하여야 할 것으로 생각된다. 또한 접합부 길이 20~40mm의 경우에 대하여 (2)식으로부터 계산한 결과를 Fig.8에 점선으로 표시하였는데, 실험치 보다 약 10kg/cm² 정도 낮은 값을 보이고 있으나 그 경향은 잘 일치하고 있다.

Fig.10은 길이 20~80mm의 경우에 대하여 계산한 결과를 나타낸다. 폴리우레탄의 잔류변형도가 동일할때, 접합부의 길이증가에 따라 접합강도가 증가하는 결과를 보이고 있으나, 금속/금속에서의 경우(3)와 같이 직선적인 증가가 아니며, 길이가 증가함에 따라 그 증가량은 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

4-3. 접합강도에 미치는 l/r 및 마찰계수의 영향

탄성변형도 이완이 발생하지 않는 경우, 또는 초기접합강도 F_0 와 자긴력 감소효과와의 발생에 따른 접합강도 F^* 의 비는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{F^*}{F_0} = \frac{r(1-\nu)^b}{r(1-\nu)^b + 2\ell\mu\nu^b} = \frac{1}{1 + \frac{2\ell\mu\nu^b}{r(1-\nu)^b}} \quad (3)$$

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

Fig.11은 접합부 길이 ℓ 과 폴리우레탄 봉의 반경 r 의 비 (ℓ/r)에 대한 F^*/F_0 의 변화를 식(3)에 의해서 계산한

결과와 실험한 결과를 나타낸다. l/r 이 클수록 접합강도 F^* 는 감소함을 알 수 있으며, l 과 r 이 같을때 F^* 는 F_0 의 약 1/2에 해당한다.

본 실험의 범위에서 l/r 값이 2.2~4.5 범위에 있으며 이때 접합강도 F^* 는 초기치 F_0 의 10~30%에 머물게 된다. 따라서 폴리우레탄과 같은 고분자 재료가 포함되는 구조체 설계시 가능한 l/r 을 적게 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 마찰계수 μ 의 변화에 대한 접합강도 F^* 의 변화를 식(2)에 의해 계산한 결과이다. 마찰계수 μ 의 증가에 의해 접합강도는 증가함을 보이고 있다. 그러나 금속/금속에서의 경우(3)와 같이 접합강도는 마찰계수의 증가에 의해 직선적으로 증가하지 않고 마찰계수 0.5 이상에서는 그 증가량이 크게 둔화됨을 알 수 있다.

5. 결론

금속 관(알루미늄 합금)과 고분자 재료 봉(폴리우레탄)의 전자기 접합에서, 전자기 접합후의 잔류응력 - 잔류 변형도 관계로부터 축 방향의 인장응력을 받을때 폴리우레탄의 반경방향의 변형도(ϵ_{θ})를 고려한 접합강도 계산 결과와 실험결과로부터 접합부 길이, 형상, 마찰계수등이 접합강도에 미치는 영향을 검토하였으며 이하 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 금속(압재)/고분자재료(모재)의 접합강도는 모재인 폴리우레탄의 잔류 탄성 변형도에 의하여 지배받는다.
2. 본 실험의 방전에너지 범위에서 접합부 길이의 증가는 접합강도가 감소 하는 결과가 얻어졌다.
3. 접합체 형상을 나타내는 l/r 의 비가 작을수록 접합강도를 감소시키는 탄성변형 이완효과가 감소한다.
4. 마찰계수의 증가에 의해 접합강도가 증가하나, 금속/금속의 경우에 비해 그 증가량은 둔화되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최재찬, 조용철, 이종수, 황운석, 김남환, "전자기 성형에서의 테이퍼진 자속 집중기의 자기압력에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 7, No. 2, pp14~27, 1990
2. 김남환, 손희식, 황운석, 이종수, "전자기 성형에 의한 알루미늄 합금관과 폴리우레탄봉의 접합 연구", 한국정밀공학회지 부고중, 1991
3. 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
4. 이종수, 김남환, 황운석, 손희식, "알루미늄 합금관과 폴리우레탄 봉의 전자기 접합 연구", 한국정밀공학회 '90년도 추계학술대회 초록집, pp28~38, 1990
5. Van Vlack, "Materials Science for Engineers", p231, Addison-Wesley, 1969
6. Gunter Oertel, "Polyurethane Handbook", p467, HANSER PUBLISHERS, 1985

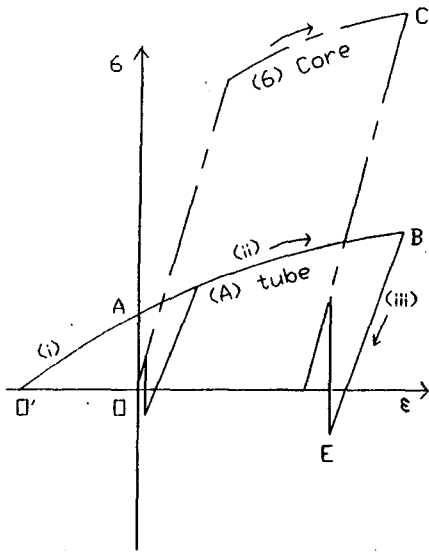


Fig. 1 Stress and strain diagram of a metal tube (A) and a metal core (B) during electromagnetic joining process.

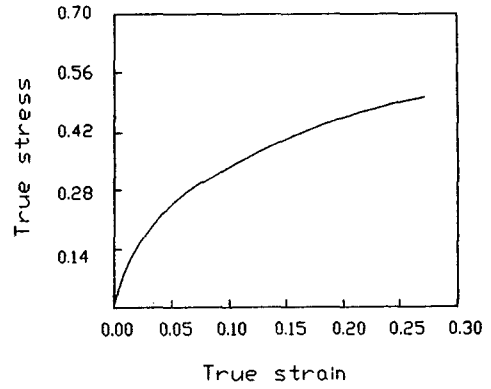


Fig. 2 Stress-strain curve for polyurethane core under uniaxial tension.

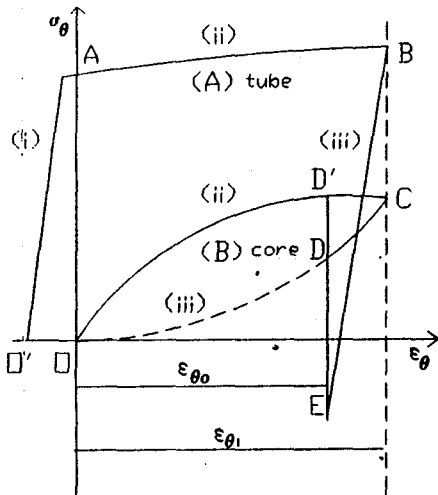


Fig. 3 Stress and strain diagram of a metal tube (A) and a polyurethane core (B) during electromagnetic joining process.

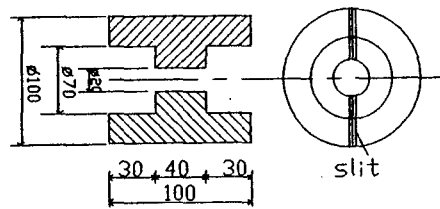


Fig. 4 Geometry of field shaper.

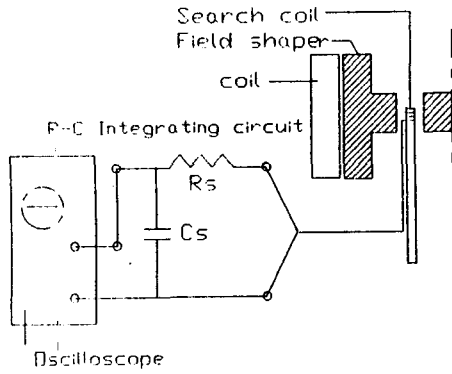


Fig.5 A methodology of measurement of magnetic flux density.

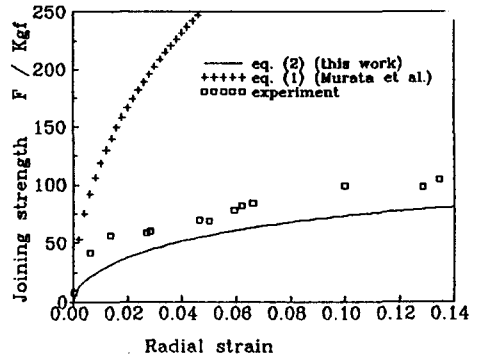


Fig.6 Comparison of joining strength between the calculated and experimental results.

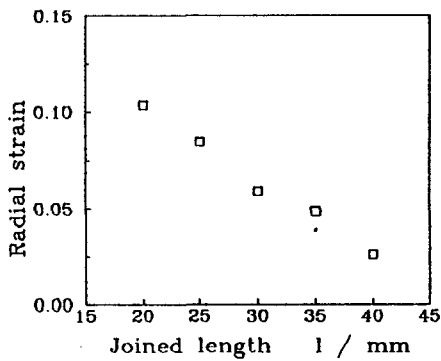


Fig.7 Effect of joined length on average radial strain of core. (discharge number 3)

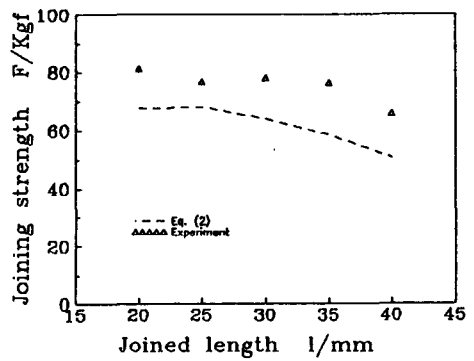


Fig.8 Computed and measured joining strength as a function of joined length.

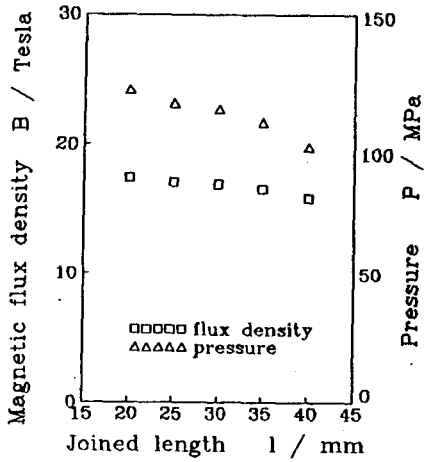


Fig. 9 Relationship between joined length and magnetic flux density and magnetic pressure.

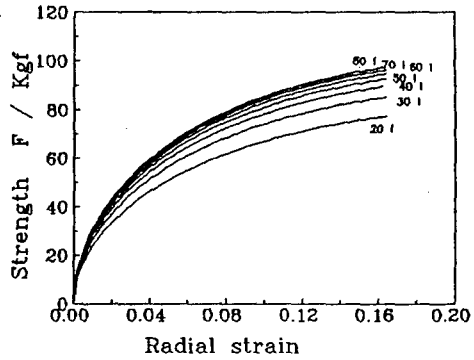


Fig. 10 Computed joining strength of various joined length as a function of radial strain.

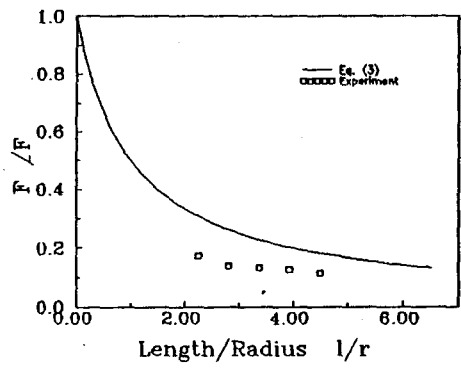


Fig. 11 Computed and measured ratio of F^*/F_0 as a function of joined length/radius.

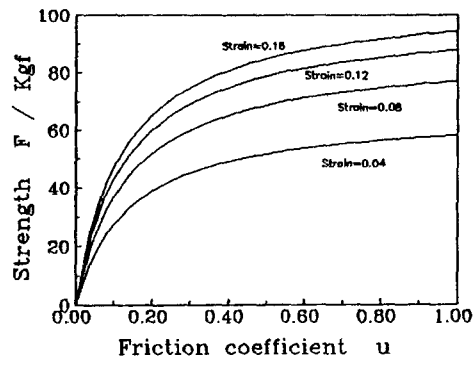


Fig. 12 Computed joining strength as a function of friction coefficient.