

이종재료의 전자기 결합

박영배* · 김현영** · 오수익*

Electromagnetic Joining of Dissimilar Mmaterials

Y.B. Park, H.Y. Kim and S.I. Oh

Abstract

Nowdays, related with vehicle weight reduction, many automotive maker are trying to develop spaceframe. If aluminum member and steel member are applied together in constructing spaceframe, there will be many advantages in aspect of increasing strength and saving weight of automotive. In this case, joining method of aluminum and steel members has to be proposed. For this method, electromagnetic joining has many advatages compared to welding. In this paper, joining of aluminum tube and steel tube using eletomagnetic pressure was studied and strength of joint was evaluated through comprssion test.

Key Words : Electromagnetic Joining, Dissimilar Material Joing, Spaceframe, Joint Design

1. 서 론

차량의 무게를 10% 경량화 하면 연료를 약 5~7%정도 줄일 수 있으며 차량의 공기저항을 10%줄이면 2%의 연료를 줄일 수 있다는 보고에서도 알 수 있듯이 경량화의 중요성은 매우 크다. 최근의 자동차는 운송이라는 기본적인 기능 외에 외관, 주행 성능, 승차감, 안전성, 연비 및 환경문제 등과 같은 다양한 기능을 요구 받고 있다. 보다 높은 안전성과 편의성에 대한 요구, 여유 있는 차량 성능에 대한 욕구 등으로 인하여 차량 설계 시 과거 보다 더 큰 엔진, 더 많은 편의 시설, 안전 시설 등을 장착하게 되었으며, 이로 인해 필연적으로 차량의 무게는

점차적으로 증가하게 되었고 연비는 감소하게 되었다. 따라서 차량 전체 중량의 25%에 달하는 차체 설계 강도의 유지, 경량화, 차량 내부 면적의 확대가 중요한 요소로 등장하고 있다. 미국 캘리포니아주가 2003년부터 실시할 예정인 ZEV(배기가스 제로차)판매 의무규제로 인해 전기 자동차(EV), 하이브리드 자동차(HEV) 등에 대한 개발은 더 이상 선택 사항이 아닌 필수 사항이 되었으며, 이들 차량은 기존의 차량에 비해 경량화 되면서도 강도를 유지하는 차체 설계가 필수적이며 보다 넓은 내부 면적을 필요로 한다. 이에 대응하여 선진 자동차업계에서는 ULSAB (Ultra-Light Steel Auto Body), ULSAC (Ultra-Light Steel Auto Closures), ASP(Auto

* 서울대학교 기계항공공학부

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

Steel Partnership) 등과 같은 컨소시엄을 통하여 초경량 차체의 설계, 생산공정감소, 가격경쟁력향상 등에 관한 기술 개발에 계속 박차를 가하고 있다. 1994년 세계 주요 철강 회사들을 중심으로 차체 경량화를 위하여 조직된 ULSAB 컨소시엄은 기존의 강판 대신 고장력 강판을 이용하고, 하이드로포밍 기술, 테일러 블랭크 등을 사용함으로써 차체의 중량을 감소시키려는 노력을 하고 있으며 1998년에는 25%의 중량 감소를 실현한 차체 모델을 제시하였다. 한편 Audi에서는 알루미늄 압출재를 이용한 알루미늄 스페이스 프레임(aluminum spaceframe) 차체를 구성하여 경량화된 차체모형을 생산하였다. 뿐만 아니라 AK Steel사와 Autokinetics사에서는 롤 포밍을 통해 제작된 스테인리스 스틸 모듈라 프레임(stainless steel modular frame)을 이용하여 경량화된 차체를 개발중에 있다. 차체의 경량화를 위한 방법 중 가장 효과가 있는 것은 기존의 철강 재료 대신에 알루미늄과 같은 경량 재료를 차체에 적용하는 것이다. 그러나 알루미늄의 경우 스틸에 비해 성형성이 낮고 강성이 떨어지며 접합을 위해 새로운 설비와 기술을 보강해야 한다. 그러므로 두 재료를 조합하여 강성이 크게 요구되거나 성형이 어려운 곳에 스틸을 사용하고 동일 강성을 유지하면서 비강도 차이에 의해서 경량화를 이루려고 하는 곳에는 알루미늄을 사용한다면 아주 좋은 대안이 될 수 있다. 차체의 경량화를 위한 또 한가지 방법으로는 새로운 차체를 개발하는 것이다. 경량화를 위한 차체 개발 방법으로는 기존 차체 구조를 변경하는 방법, 기존의 패널 방식을 유지하면서 새로운 차체를 개발하는 방법, 새로운 개념을 도입한 전용차체를 개발하는 방법이 있을 수 있다. 기존의 차체를 개량하거나 기존의 개념 하에 새로운 차체를 설계하는 방식은 기존 부품의 활용, 설계 노하우의 축적 등으로 인해 투자 비용을 최소화할 수 있지만 경량화, 내부 면적의 확대의 목적을 충분히 달성하기에 어려움이 있다. 그러나 새로운 전용 차체 구조를 개발할 경우 경량화를 크게 이룰 수 있으며 향후 확대 적용이 가능하고 차량 성능의 향상에 크게 기여할 수 있다. 기존의 판재성형을 통하여 제작된 차체의 경우 상하 여러 개의 판재를 용접하여 사용하는데 비하여, 스페이스 프레임 차체의 경우 압출이나 롤 포밍등의 방법을 통하여 대량 생산된 고장력 강판의 프레임을 사용하므로 부품의 규격화, 생산원가 절감, 금형 투자 감소, 개발기간 단축 등의 효과를 기대할 수 있다.^{7,8)}

본 연구에서는 향후 스페이스 프레임 차체를 구성하는데 있어서 알루미늄과 스틸의 이종재료를 적용할 경우에 대비하여 이에 대한 결합방법으로서 전자기 결합을

제시하고자 한다. 전자기 결합은 강한 전이 자기장을 변형하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 금속을 변형시키는 방법으로써 고속 성형법이라 불리우는 기술의 한 가지이다.⁴⁾ 일반적으로 이종재료의 결합의 경우 용융점이 서로 틀리고 전위차로 인한 부식 등의 이유로 서로간의 결합이 힘들다고 보고되고 있으며 여전히 연구가 진행중이다. 이에 대한 대안으로서 전자기 결합은 서로의 모재를 녹여서 결합하지 않으므로 용접시에 생기는 문제점이 없으며 스틸이나 알루미늄에 코팅을 하여서 전위차에 의한 접촉 부식을 막을 수 있다. 본 연구에서는 향후 스페이스 프레임을 구성할 경우 사용가능성이 높은 알루미늄 압출 부재와 스틸 하이드로포밍 부재와의 결합을 단순화한 원형 튜브의 결합 방법을 제시하고자 한다.

2. 전자기 성형

전자기 성형은 로렌츠의 힘(Lorentz force)에 기반을 두고 있다. 전류가 전도체에 빠른 시간 동안에 흐르게 되면 자기장을 형성시킨다. 형성된 자기장의 변화는 주위 전도체에 처음 전류에 반대하는 방향으로 와전류를 유도하게 된다. 이 와전류 또한 자신의 자기장을 발달시켜서 처음 전도체와 두번째 전도체 사이에서 반발력이 생기게 된다. 이 반발력이 재료의 항복 강도 이상이 되면 재료가 성형된다. 그러나 자기장이 점차로 재료 내에 침투하면 가공성은 없어지면 대부분의 경우 자기 압력의 지속 시간은 수십나지 수백 microsec이다. 이처럼 압력 펄스의 지속시간이 짧기 때문에 가공을 위해서는 성형압력이 피가공체에 충분한 운동에너지를 줄 수 있을 정도로 커야하며 효율을 높이기 위해서 최대 압력은 재료의 항복 응력보다 수 배 이상이어야 한다. 전자기 성형에서의 성형방법은 크게 환관 성형, 축관 성형, 평면 성형으로 분류된다. 본 연구의 목적은 알루미늄 튜브의 축관 성형을 통하여 스틸 튜브와 결합을 하는데 있다. Fig. 1에 전자기 축관 성형의 개략도를 나타내었다. 일반적인 축관 성형 시 전자기 성형의 과정은 다음과 같다. Fig. 2(a)에서 보이듯이 코일에 전류 I_1 가 흐르게 되면 자속 집중기(field shaper)에 첫번째로 전류 I_1 이 유도된다. 자속 집중기는 소재의 각 부분별로 분포되는 전자기 압력을 제어하여 자기력을 모아주는 역할을 하는 장치이다. 이 유도된 전류는 자속 집중기 안의 튜브에 두번째 전류 I_2 를 유도시키게 되며 서로의 자기장으로 인하여 자속 집중기와 튜브는 반발하게 된다. 이 반발력으로 튜브는 압축 성형이 되는 것이다. Fig. 2(b)는 코일과 자속집중기, 그리고 소재에 흐르는 전류의 방향을 단면으로 나타내었다.

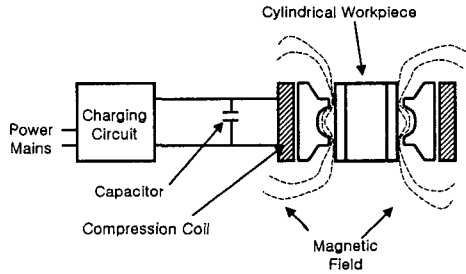


Fig. 1 Schematic view of electromagnetic tube compression

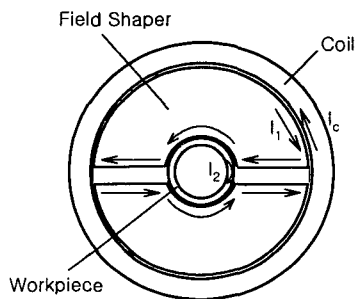


Fig. 2(a) Current flow direction in coil(top view)

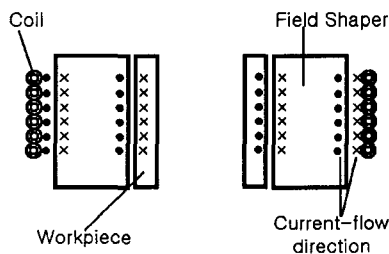


Fig. 2(b) Current flow direction in coil(side view)

3. 실험

3.1 시편의 물성치와 조성

알루미늄 튜브의 재료로서 차량 구조용 재료로 사용 가능한 6000계열 알루미늄 중 압출재로 많이 제작되고 있는 6061을 선택하였으며 인공시효 열처리(T6)을 하였다. 스틸 튜브의 재료로는 고강도와 내마모성이 좋아서 구조용 부품에 사용되는 S45C를 선택하였다. 알루미늄 6061의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었으며 알루미늄 6061과 스틸 S45C의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Al 6061

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Others	Al
0.4-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	rem

Table 2 Mechanical properties of applied specimen

Material	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Shear strength (Mpa)
Al6061 T6	276	310	207
S45C	343	568	

3.2 실험장치의 구성

전자기 결합기로는 Maxwell magneform을 사용하였다. 최대 에너지 저장 용량은 16kJ이다. 전자기 결합을 위한 코일 내부 실험 장치를 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다.

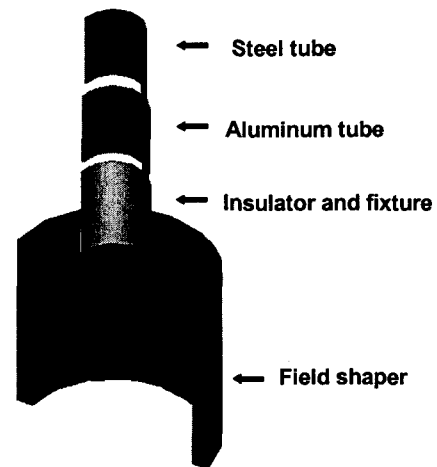


Fig. 3 Schematic view of electromagnetic joining equipment

3.3 결합부 분석

일반적으로 결합부의 강도는 모재의 강도보다 커야 한다. 이를 위해서 결합부에 적절한 형태의 요철을 주어야만 한다. 일반적인 전자기 결합 형태를 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서는 축방향 하중에 저항할 수 있는 결합부를 설계하는데 목적을 두었다. 스틸 튜브에 압축 하중을 주었을 경우 결합부가 지지할 수 있는 하중은 접촉

압력으로 발생하는 마찰에 의한 하중 $F_{friction}$ 과 소재의 전단강도에 의한 하중 F_{shear} 의 합이다. 마찰에 의한 힘은 마찰계수와 자기 압력과 결합 면적의 함수이며 전단강도에 의한 힘은 재료의 전단 항복값과 결합 면적의 함수이다. 이를 다음의 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다.

$$F_{friction} = f(\mu, p, S_f) \quad (1)$$

$$F_{shear} = f(Y_s, S_s) \quad (2)$$

여기서 μ 는 마찰계수, p 는 자기 압력, S_f 는 마찰영역, Y_s 는 전단항복강도, S_s 는 전단영역을 의미한다.

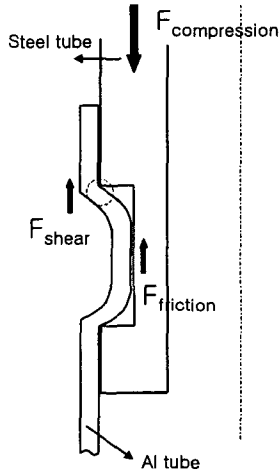


Fig. 4 Schematic view of typical type of joint

3.4 1차 결합 실험

접촉 압력으로 인한 마찰력과 요철부의 영향을 평가하기 위하여 스틸 튜브에 요철을 준 경우와 주지 않은 두 가지 형태로 실험을 하였다. 시편의 치수와 결합 형태를 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 나타내었다.

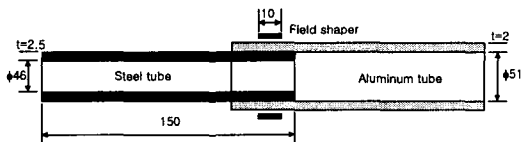


Fig. 5(a) Basic dimensions and configurations of Al and Steel tube without knurls

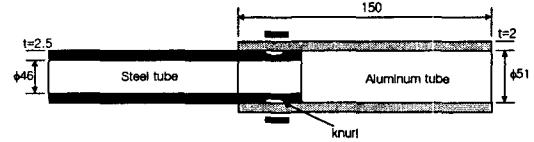


Fig. 5(b) Basic dimensions and configurations of Al and Steel tube with knurls

3.5 1차 결합 실험 평가

결합부 평가를 위해 압축 실험을 통하여 결합 하중을 측정하였다. 압축 실험은 30mm/min의 속도로 진행하였으며 Fig. 6에 압축 실험결과를 나타내었다. 요철을 준 경우 소재의 전단강도에 의해 지지되는 힘이 추가되기 때문에 요철을 주지 않은 경우보다 결합력이 커지는 것을 알 수 있다. 요철을 주지 않고 전자기 결합을 한 경우 순수히 접촉 압력에 의한 마찰력을 알 수 있으며 이에 의하여 자기압력을 계산할 수 있다. 요철을 주지 않은 경우 Fig. 6에서 보이듯이 결합부 강도가 약 15kN 정도이며 마찰계수를 0.4로 가정할 경우 약 23MPa의 접촉 압력이 계산된다. 평가된 결과를 바탕으로 요철부를 설계할 수 있었으며 2차 전자기 결합 실험을 진행하였다.

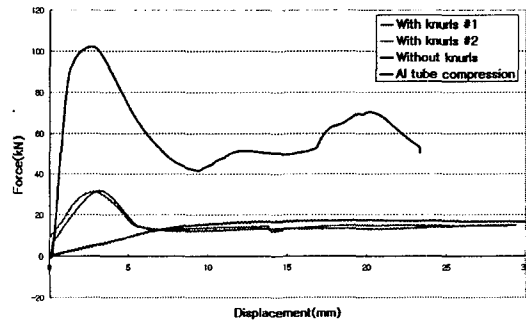


Fig. 6 Compression test profile

3.6 결합부 설계 및 2차 결합 실험

2차 결합 시험을 위한 스틸 튜브와 알루미늄 튜브의 치수를 Fig. 7에 나타내었다. 요철구간의 가공을 위해 스틸 튜브의 두께를 0.5mm 늘리고 용이한 성형을 위해 알루미늄 튜브의 두께를 1mm 줄였다.

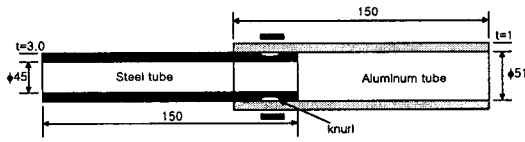


Fig. 7 Basic dimensions and configurations of Al and Steel tube at second try

알루미늄 튜브와 스틸 튜브를 결합했을 경우 결합부에서 지지할 수 있는 하중이 알루미늄 튜브의 좌굴 하중보다 커야 결합부의 설계가 성공했다고 볼 수 있다. 결합부에서 지지할 수 있는 하중은 접촉 압력에 의한 마찰력과 소재의 전단강도에 의한 하중의 합이므로 이 하중의 합이 알루미늄 튜브의 좌굴하중 보다 충분히 커야 한다. 소재의 전단 강도에 의하여 지지할 수 있는 하중은 요철부의 설계에 따라 결정된다. 요철 설계 시 요철의 치수는 자속 집중기의 성형 구간 내에서 결정되어야 하며 요철 가공시 공구날의 크기를 고려하여야 한다. 이에 따라 설계한 요철부의 형상과 치수를 Fig. 8에 나타내었다. 자속 집중기의 성형구간의 폭이 10mm이므로 요철부의 폭은 9mm로 정하였다. 요철부에서 지지하는 하중 구간을 마찰력에 의하여 지지되는 구간과 소재의 전단강도에 의하여 지지되는 구간을 각각 분리하여 Fig. 9에 나타내었다.

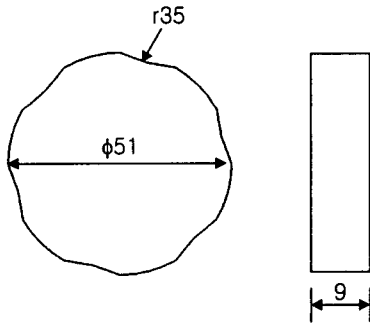


Fig. 8 Dimensions and configuration of knurls

원주 방향으로 가공할 수 있는 요철의 개수는 공구날을 고려할 경우 6개 정도이며 요철 1개당 지지할 수 있는 하중을 계산하면 2.21kN이다. 마찰력으로 지지할 수 있는 하중은 Fig. 8의 면적에서 1.18kN이다. 그러므로 요철 6개의 1구간 당 지지할 수 있는 하중은 식(3)과 같

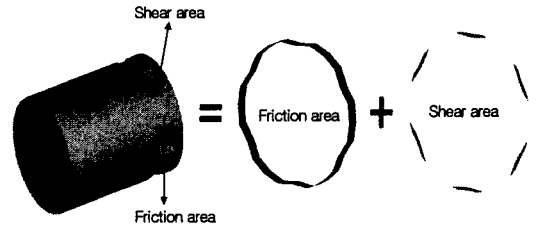


Fig. 9 Friction and shear area in knurl area

이 계산할 수 있다

$$f_{\text{joining}} = n * f_{\text{knurl}} + f_{\text{friction}}$$

$$= 6 * (2.21kN) + 1.18kN = 25.12kN$$

여기서 n 은 요철의 개수를 의미한다.

알루미늄 튜브의 좌굴하중이 34kN이다. 결합부의 요철부에서 발생할 수 있는 응력 집중과 결합 시 소재의 두께의 감소 등을 고려할 경우 좌굴 하중의 2배 정도를 결합부에서 지지해야 한다. 이를 고려하여 요철구간의 개수를 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$F_{\text{joining}} = N * f_{\text{joining}} = N * (25.1kN) > 2 * F_{\text{buckling}}$$

$$N * (25.1kN) > 2 * F_{\text{buckling}} = 63.4kN$$

$$N > 2.52 = 3 \quad (4)$$

여기서 N 은 요철구간의 개수를 의미한다.

이상에서 3개의 요철구간으로 설계된 조인트 형상을 Fig. 10에 나타내었다.

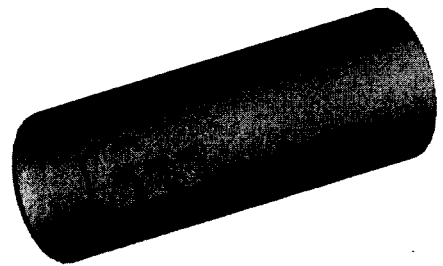


Fig. 10 Joint for eletromagnetic joining

3.7 2차 결합 실험 평가

결합부 평가를 위해 압축 실험을 통하여 결합 하중을 측정하였다. 압축 실험은 30mm/min의 속도로 진행하였으며 Fig. 11에 압축 실험결과를 나타내었다. 압축 실험 결과, 모재가 파단되기 전까지 결합부에서의 미끄러짐이 없었으며 모재가 파단되기까지의 하중을 지지하였다

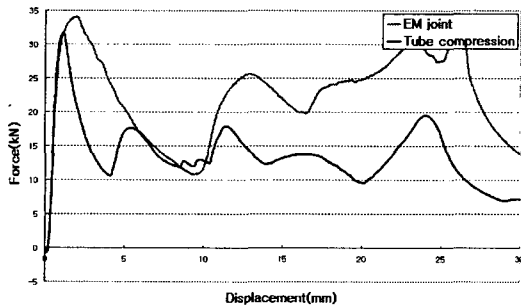


Fig. 11 Compression test profile

4. 결론

(1) 향후 스페이스 프레임 차체를 구성하는데 있어서 알루미늄과 스틸의 이종재료를 적용할 경우에 대비한 결합방법으로서 전자기 결합 실험을 하였다. 실험은 알루미늄 압출 부재와 스틸 하이드로포밍 부재와의 결합을 단순화한 원형 튜브의 결합으로 진행하였다.

(2) 1차 전자기 결합 후의 압축 실험 결과, 접촉 압력으로 인한 마찰력과 요철부의 영향을 평가할 수 있었으며 2차 전자기 결합 시험을 위한 결합부 설계에 대한 자료를 얻을 수 있었다.

(3) 2차 전자기 결합 후의 압축 실험 결과, 모재에서 파단이 발생했으며 이는 결합부 설계가 성공적이었음을 보여준다.

후 기

본 연구는 NGV에 의하여 지원되는 “신차체 구조에 대응한 최적 연결 구조 개발” 프로젝트의 연구의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) 민동균, 1991, “전자기 성형법을 이용한 축관 성형의 유한 요소 해석”, 서울대학교 대학원 공학박사학위 논문
- (2) Batygin, Yuri V., Daehn, Glenn S., 1999, “The pulse magnetic Fields for Progressive Technologies”, Kharkov, Columbus
- (3) W.S.Hwang, J.S.Lee, N.H.Kim, H.S.Sohn, 1993, “Joining of copper tube to polyurethane tube by electromagnetic pulse forming”, J.M.P.T Vol. 37 p.83~93
- (4) Metal Handbook, 9th edition, Vol14, Forming and Forging, ASM, p.643~653
- (5) S.T.S Al-Hassani, J.L.Duncan, W.Johnson, 1974, “On the parameters of the magnetic forming process”, J.M.Eng.Sci.
- (6) 김현영, 김진국, 허승진, 강혁, “알루미늄 초경량 차체의 충격 흡수부재 설계 및 충돌 안전도 평가”, 자동차공학회
- (7) T.A.Barnes, I.R.Pashby, 2000 “Joining technique for aluminum spaceframe used if automobile PART I solid and liquid phase welding”, J.M.P.T, p.62~71
- (8) T.A.Barnes, I.R.Pashby, 2000, “Joining technique for aluminum spaceframe used if automobile PART II adhesive bonding and mechanical fasteners”, J.M.P.T, p.62~71