

철도차량용 대형 알루미늄 압출재 용접부의 피로강도 평가

Fatigue Strength Evaluation of Butt Welded Aluminum Alloy Component for Railway Vehicles

한승우* 이학주* 이상록**
Han, Seung Woo Lee, Hak Joo Lee, Sang Rok

ABSTRACT

The fatigue strength of welded aluminum alloy component has been evaluated. Extruded aluminum alloy component Al 6005-T6 was considered. That component could be one of appropriate candidates for floor structure in railway cars. Finite element analysis has been performed to obtain stress distribution in the welded aluminum component. The results of finite element analysis have been applied in designing the experimental setup for fatigue strength evaluation of welded component. Three point bending fatigue test has been employed, until fracture occurs, to evaluate the fatigue strength of the welded component. In addition, the fatigue strength of the component has been compared with that of specimen.

1. 서론

최근 철도차량에 대한 알루미늄 합금의 적용이 현저히 증가하고 있는 실정이다. 이는 알루미늄 합금이 기존의 Steel 이나 Stainless Steel에 비하여 철도차량을 경량화 하는데 이점이 있으며, 이로 인하여 에너지 절감 및 유지보수비의 절감을 가져오기 때문이다.

일본의 경우 동경과 신 오사카 사이를 운행하고 있는 Nozomi의 경우 알루미늄 압출 형강재의 도입으로 기존의 Steel 차량에 비해 25%의 중량을 감소시킴으로써 운행속도의 증가와 주행시간을 크게 단축하였다고 보고하고 있다[1].

유럽의 경우 1988년 이전까지는 지하철 및 통근열차에 알루미늄 합금이 널리 사용되어 오다가 1980년대 말부터 독일의 ICE를 중심으로 고속전철 등에도 널리 이용되고 있다[2]. 또한 프랑스에서도 차세대 고속전철인 TGV NG에 알루미늄 합금을 도입할 예정이다.

미국의 경우에도 철도차량에의 알루미늄 이용율이 점점 증가하여 요즘에 주문되고 있는 화차의 경우 99%이상이 알루미늄 차량이라고 밝히고 있다[3].

철도차량의 경량화를 위한 알루미늄 합금의 적용은 고강도 알루미늄 합금의 개발, 대용량 압출기의 개발, 대형 압출재의 압출기술의 발달 및 알루미늄 합금의 자동용접 기술개발 등에 의해 가속화 되고 있다.

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 선임연구원, 정희원

** 한국기계연구원 신교통기술연구부 책임연구원, 정희원

본 연구에서는 철도차량에 사용할 알루미늄 합금(Al 6005 T6)으로 압출된 압출재 용접부의 피로강도를 평가하고자 한다. 용접부의 응력분포를 알아보기 위하여 용접 시험편과 압출재 용접부에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 ANSYS(Ver. 5.3)와 PATRAN/NASTRAN을 이용하였다. 시험대상 압출재가 굽힘하중을 받는 차체 Underframe에 사용되는 것을 고려하여 굽힘 피로시험을 수행하였으며, 특히 용접부에서 최대 굽힘 모멘트가 발생되도록 하기 위해 3점 굽힘 피로시험(3-point Bending Fatigue Test)을 수행하였다. 용접 압출재와 용접시험편의 피로강도를 비교하여 연관성을 살펴보았다.

2. 유한요소해석

2.1 용접 시험편

ANSYS를 이용하여 소재 용접부의 구조해석을 수행하였다. 대칭성을 고려하여 시험편의 1/4을 모델링하였으며, 20-Node Isoparametric Solid 요소를 사용하였다. 그림 1은 18,859개의 절점과 3,348개의 요소로 이루어진 용접시험편의 유한요소 모델을 보여주며, 시험편의 Grip 부위에 압력을 부가하였다.

그림 2는 Weld Toe 부위의 주응력 분포를 보여주며, Toe의 기하학적 형상에 의한 응력집중계수는 1.539로 계산되었다.



그림 1. 용접시험편 유한요소 모델

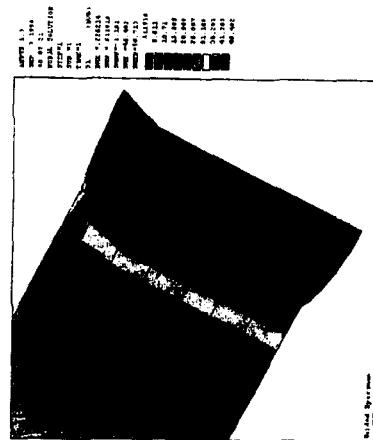


그림 2. 용접시험편 주응력 분포

2.2 압출재

알루미늄 압출재에 3점 굽힘하중이 작용하는 경우에 취약부위를 예측하고, 취약부위에서의 하중-응력 관계를 구하기 위해서 구조해석을 수행하였다.

PATRAN을 이용하여 유한요소 모형을 완성하였으며, 육면체 요소를 사용하였다. 그림 3은 49,205개의 절점과 26,064개의 요소로 이루어진 압출재의 유한요소 모형 및 경계조건을 나타낸다. Slot 바깥쪽에서 변위를 고정시키고, 용접 Bead 위에 9.8 kN의 하중을 부가하였다.

그림 4는 위의 경계조건으로 해석을 수행하여 구한 주응력분포를 보여주며, 그림 5, 6은 주응력이 큰 부위를 확대한 모습으로, 주응력은 압출재 중앙의 Weld Toe와 Slot 부위에서의 크게 발생하였다.

표 1은 9.8 kN 의 하중이 작용할 경우의 최대 주응력 크기 및 발생되는 위치를 보여준다.

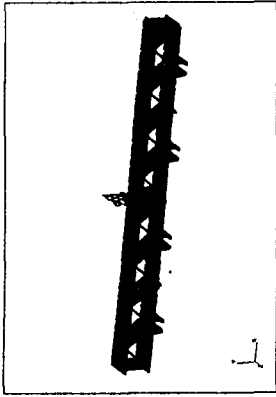


그림 3. 압출재 유한요소 모형 및 경계조건

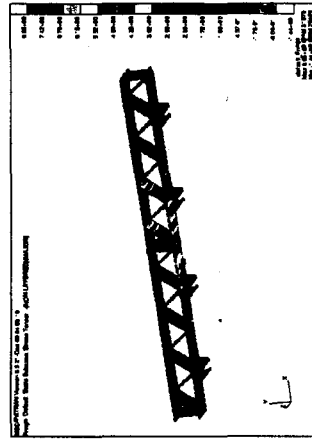


그림 4. 압출재 주응력 분포

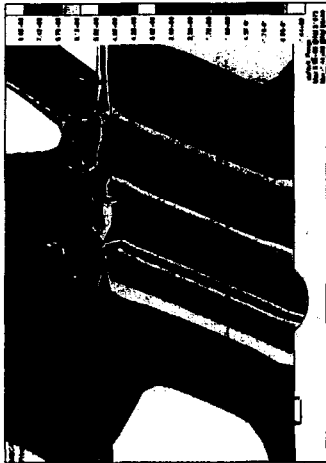


그림 5. 압출재 주응력 분포 (Weld Toe 부위)



그림 6. 압출재 주응력 분포 (Slot 부위)

표 1. 압출재 구조해석 결과 얻어진 최대주응력 크기

위 치	하중 (kN)	최대 주응력 크기 (MPa)
Weld Toe 부	9.8	78.3
Slot 부	9.8	78.9

3. 피로시험

3.1 용접 시험편

용접 시험편의 모재(Base Metal)는 알루미늄 6005-T6이고 이에 대한 화학 조성과 기계적 성질은 표 2와 같다[4,5].

시험편의 형상 및 치수는 JIS Z3103에서 제시한 시험편에 따라 그림 7과 같이 하였다[6].

시험편은 아르곤 가스를 사용한 불활성가스 아크 용접법 (MIG : Inert Gas-Shield Metal Arc Welding)으로 맞대기 용접하였으며, 용접부의 재질은 직경 1.2mm의 Al 4043-H16이다. 용접 후, 비파괴 검사를 수행하여 시험편을 채취하였다.

최적 설계조건을 결정하기 위하여 모재의 두께를 2.5mm와 3.0mm로 변화시켰고, 용접이음부의 홈 모양을 홈의 각도가 90° 인 V형으로 하였다. 용접부의 덧살은 다듬질하지 않았으며, 압출 방향과 평행하게 용접하여 시험편을 제작하였다. 용접이음부의 홈 모양은 그림 8 와 같다.

피로강도 및 피로수명을 결정하기 위해 일정 응력 제어방식으로 피로하중을 가하였으며, 이러한 제어 방식에 대한 피로하중 실험 방법은 ASTM Standard에서 제시하고 있다[7-11]. 시험기는 용량 100kN의 유압식 피로 시험기(INSTRON, Model 1350)을 사용하였다.

응력비 $R(\equiv \sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 은 0으로 하여, 응력진폭과 평균응력(Mean Stress)을 동일하게 설정하였다. 시간에 대한 하중의 변화는 정현파로 설정하였고, 시험 주파수(Test Frequency)는 15Hz로 하였으며, 실험은 상온에서 수행하였다.

최대 응력이 140, 120, 100, 90, 80(MPa)인 5가지로 피로 시험을 실시하였고, 시험편의 완전한 파단을 최종 피로파손의 기준으로 설정하였다.

표 2. 알루미늄 6005-T6의 화학적 조성과 기계적 성질

화학적 조성 (weight percent, maximum)										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	others (each)	others (total)	Al
0.6-0.9	0.35	0.1	0.1	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	0.05	0.15	remains
기계적 성질										
인장강도					260 MPa (minimum)					
항복응력					240 MPa (minimum)					
탄성계수					70 GPa (추정)					
밀도 (20℃)										
2.70 Mg/m ³										

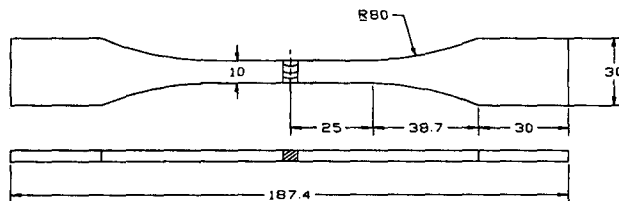


그림 7. 시험편의 형상 및 치수 (mm)

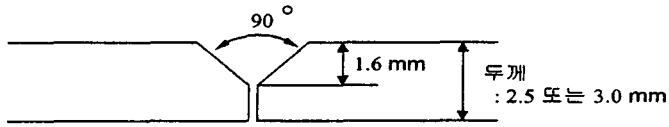


그림 8. 용접부의 홈 모양

3.2 압출재

폭 545.5 mm 로 압출된 압출재 2개를 중앙부위에서 용접하여 피로시험용 시험편을 제작하였다. 피로시험에 사용된 알루미늄 압출재의 형상 및 주요 치수는 그림 9와 같으며, 압출재의 치수는 1090 x 80.5 x 92 mm 이다. 표 3은 피로시험편 제작시 사용된 압출재의 용접 조건을 보여준다 [12].

피로시험에 사용된 시험기는 500kN 용량의 유압식 피로시험기이며, 시험기에 장착된 500kN 용량의 Loca Cell을 이용하여 하중을 측정하였다. 시험은 상온 대기중(20°C)에서 수행되었으며, 구체적인 시험 조건은 표 4와 같다.

위의 조건으로 시험을 수행하여 시험편에 균열이 발생, 진전되어 완전 파단되는 경우를 파손으로 간주하고, 이 때의 Cycle 수를 피로수명으로 정의하였다.

표 3. 압출재 용접조건

용접방법	불활성가스아크 용접 (MIG) (Inert Gas Shielded Metal Arc Welding)
용접봉	5356, 직경 1.2 mm
보호가스	아르곤 99.9 %
전류	180 A - 190 A
전압	23.8 V
Wire 이송속도	10.2 m/min
용접속도	30 - 40 cm/min

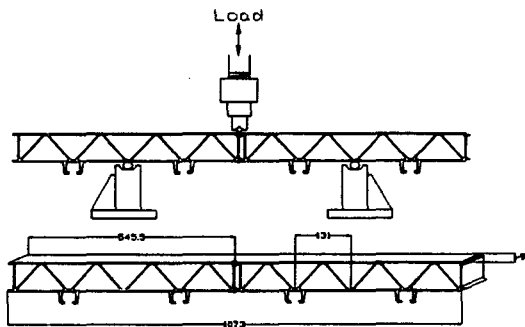


그림 9. 알루미늄 압출재 형상, 치수 및 용접위치

표 4. 피로시험 조건

하중상태	3점 굽힘 피로시험
제어방법	Closed-Loop, 하중제어
시험온도	상온 대기 중
하중파형	정현파 (Sine Wave)
시험주파수	3 - 5 Hz
최대 하중 범위	10.78 - 17.64 kN (최소하중 : 0.98 kN)

4. 결과 및 고찰

압출재를 이용하여 피로강도를 평가하면 실제 압출재의 피로시험 결과를 이용하므로 여러 가지 변수의 영향, 즉 크기효과, 하중형식 효과, 표면조도 효과, 응력집중 효과, 가공 공정에서의 가공 효과 등이 고려된 상태에서 평가하므로 압출재 소재의 피로시험 결과를 이용하는 것 보다 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

그러나 압출재의 피로시험을 수행하기 위해서는 압출소재의 피로시험을 수행할 경우에 비해서 시간, 비용면에서도 매우 불리하고, 특히 압출재의 형상변화, 압출공정조건 변화에 의해서도 시험 결과가 변화되므로 많은 시험이 요구되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 압출재 소재의 피로강도 및 압출재의 피로강도를 비교하여, 압출재 소재와 압출재의 피로강도와의 연관성을 살펴보았다.

하중비 R=0 인 모재[13] 및 용접 시험편의 피로시험 결과를 수정 Goodman 식을 사용하여 평균 응력이 0 (Zero, R=-1)인 등가응력-피로수명 관계로 변환하였다. 그림 10는 이때의 응력-피로수명 관계를 양대수 좌표상에 나타낸 것이다. 용접 시험편의 피로수명은 모재에 피해 짧은 것을 알 수 있으며, 이는 Weld Toe에서의 응력집중과 잔류응력 등에 기인한 것이다.

압출재 소재의 응력-피로수명 관계 및 압출재의 하중-피로수명 관계를 균열이 발생되는 위치에서의 극부응력-피로수명 관계로 변환하는 데는 앞에서 수행된 압출재 소재 및 압출재의 유한요소해석 결과를 이용하였다. 즉, 압출재 소재의 공칭응력-피로수명 관계를 Weld Toe 응력-피로수명 관계로 변환하는 데는 응력집중계수 1.539를 적용하였으며, 압출재의 하중-피로수명 관계를 파손부위에서의 응력-피로수명 관계로 변환하는 데는 표 1의 결과를 적용하였다.

압출재 소재 및 부재의 등가응력-피로수명 관계의 차이는 첫째로 시험편 및 압출재의 두께가 다르기 때문에 발생하는 치수효과와, 둘째로 시험편은 인장피로시험 결과이고 압출재는 굽힘 피로시험 결과에 기인한 하중 형식이 다른 효과 등에 그 이유가 있을 것이다.

치수효과는 다음 식으로 고려할 수 있다[14].

$$C_s = 1.189 d_{eq}^{-0.097} \quad (8 \leq d_{eq} \leq 250 \text{ mm})$$

$$C_s = 1.0 \quad (d_{eq} \leq 8 \text{ mm})$$

$$0.0766 d_{eq}^2 = 0.05 bh$$

d_{eq} = 단면이 원이 아닌 경우의 등가 직경

b = 균열발생부 폭

h = 균열발생부 두께

이며, 압출재 소재의 경우 b=10, h=3 이고, 압출부재의 경우 B=95, h=5 이므로 $C_s=0.9$ 를 얻을 수

있다.

하중형식의 효과는 S_e 가 피로한도를 나타낼 때 인장하중과 굽힘하중에 대하여 다음 식과 같은 관계를 고려할 수 있다[15].

$$S_e(\text{Axial}) = 0.923 S_e(\text{Bending})$$

그림 11은 Weld Toe에서의 등가응력-피로수명 관계를 보여준다. 그림에서 사각형기호(□)는 치수효과와 하중형식 효과를 고려하여 수정된 압출재 소재 용접부 등가응력-피로수명 관계를, 삼각형기호(△)는 압출재 부재의 등가응력-피로수명 관계를 보여준다.

그림에서 수정된 압출재 소재의 등가응력-피로수명 관계와 압출재 부재의 등가응력-피로수명 관계가 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 압출재 소재의 피로시험 결과를 이용하여 압출재의 피로수명을 예측하는 것은 타당하며, 이를 이용하면 피로시험에 대한 많은 경비와 시간을 절감할 수 있으므로 효과적인 피로강도 평가가 기대된다.

압출재 용접부위의 피로설계에 필요한 용접부위 허용응력의 산출을 위해서는 고되풀이수 영역에서 피로강도를 추정할 수 있는 추가시험이 요구되며, 이를 위해서는 고되풀이수 피로영역에서의 압출재 부재의 피로시험, 두께에 따른 용접에 의한 잔류응력 분포의 예측 등에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

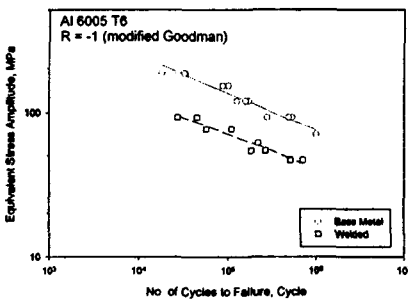


그림 10. 등가응력-피로수명 관계
(모재 및 용접시험편)

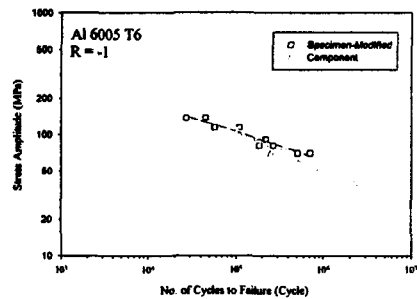


그림 11. 등가응력-피로수명관계
(수정 압출재 소재, 압출재 부재)

5. 결론

3 점 굽힘 피로시험을 수행하여 알루미늄 압출재의 용접부에 대한 피로강도를 평가하였다. 균열은 Weld Toe에서 발생하여 파단되었다. 압출재와 용접 시험편의 피로강도를 비교해 본 결과 치수효과와 하중형식의 효과를 고려하였을 때 응력-피로수명의 관계가 잘 일치함을 알 수 있었다.

압출재 용접부위의 피로설계에 필요한 용접부위 허용응력의 산출을 위해서는 고되풀이수 피로영역에서의 피로시험 및 강도평가에 관한연구와 용접 잔류응력이 피로특성에 미치는 영향등에 관한 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. F.H. Froes(1994), "Aluminum : Key to advancing the performance of the bullet train", Light Metal Age, Apr.
2. "Aluminum invades Europe's main line coach market", (1991) Railway Gazette International, June.
3. J.N. Pennington(1994), "Aluminum : Big gains coming from rail cars, bridges", Modern Metals, July.
4. American Society for Metals(1979), Metals Handbook, ninth edition, Volume 2-Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Pure Metals.
5. Material Specification and Tolerance for Modular Aluminum Extrusions, <http://www.modtoo.com/specs.htm>, Modular Tooling Systems Inc.
6. JIS Z3103, Method of Repeated Tension Fatigue Testing for Fusion Welded Joints.
7. ASTM Designation E 466-82, Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
8. ASTM Designation E 466-82, Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials.
9. ASTM Designation E 467-90, Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Loads on Displacements in An Axial Load Fatigue Testing System.
10. ASTM Designation E 606-80, Standard Recommended Practice for Constant Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing.
11. ASTM Designation E 739-91, "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(ϵ -N) Fatigue Data.
12. 내부자료(1998), AI 압출재 용접조건, 한진중공업(주).
13. 이상록 외(1996), "차세대 궤도차량의 요소기술 개발(III)," 한국기계연구원 연구보고서, UCN030-422.M, 과학기술부.
14. J. Bannantine, J. Comer and J. Handruck(1990), Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prectice Hall, pp. 12-23.
15. 이상록 외(1998), "피로설계 및 내구성평가 기술 개발(II)," 한국기계연구원 연구보고서, 97-II-1-2.

후기 : 본 연구는 1999년도 건설교통부/통상산업부/과학기술부 선도기술사업인 "고속전철기술 개발사업"의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.