

알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도 특성에 관한 연구

A study on the strength characteristics of welded joints in aluminum carbody of rolling stock

서승일*

* 한국철도기술연구원 고속철도사업단

ABSTRACT In this paper, static and fatigue load tests for the specimens, components and carbody were carried out to investigate the strength of welded joints in aluminum rolling stock. Tensile load test results showed that the static strength of welded joint for heat-treated alloys is reduced significantly and fatigue strengths are scattered by the welding imperfections. Component and whole carbody fatigue test results showed agreements with the design fatigue strength standards for specimens of same joint detail. Test results revealed that full penetration welding and strict management of welding procedure are crucial for securing strength of welded joint in aluminum carbody.

1. 서 론

국내에서 알루미늄 철도차량은 5년간의 개발 기간을 거쳐 시제 차체가 완성되었고, 표준전동차 및 G7 한국형 고속열차의 개발로 실용화에 성공하였다. 최근 개통한 광주시 전동차는 국내 최초의 상업화된 알루미늄 철도차량이다.

알루미늄 철도차량은 경량화와 함께 대형 압출재를 활용한 제작의 용이성, 완벽한 재활용에 의한 환경 친화성 등이 큰 장점이라고 할 수 있으나, 용접부의 결합에 따른 강도 취약성 등의 문제점도 있다. 본 논문에서는 알루미늄 철도차량을 개발하는 과정에서 문제시 되었던 용접부의 강도에 대한 연구 결과¹⁾를 소개하고자 한다.

2. 용접부 인장 시편의 강도

알루미늄 합금의 용접 시에는 고온과 상온의 수소용해도 차이에 의한 기공과 고온에서 입계 사이의 액막에 의한 고온 균열 등의 결합이 발생한다. 이런 용접결합은 용접부의 강도 저하에 기여하게 된다. 국내 철도차량에 적용되는 알루미늄 합금 소재로, 압출재에 대해서는 A6005A와 판재에 대해서는 A5083이 주로 활용되고 있다. A6005A 합금은 압출성이 우수하나 고강도를 위해 T6의 열처리를 실시해야 하는데, 열처리후 강도가 높아진 압출재를 용접한 경우, 항복강도 및 인장강도는 40% 정도 저하된다. 강도 저하

는 열처리 효과의 소멸과 함께 결합이 주요 원인이라고 추정된다. 상대적으로 A5083은 비열처리계 합금으로서 H112 재질의 경우 용접부의 인장 강도 저하는 10% 정도이다. Table 1은 알루미늄 합금에 대한 강도기준²⁾이다.

Table 1 Mechanical properties of typical aluminum alloys

Material	Tensile Strength (MPa)		Yield Strength (MPa)		Elongation (%)
	Base Metal	Weld Joint	Base Metal	Weld Joint	
A6005A T6	260	165	215	115	8
A5083 H112	275	247	125	110	12

용접부의 인장강도 저하에 대한 대책으로는 철저한 시공 관리에 의한 용접결합 방지와 함께 설계 측면에서 용접 결합부의 두께를 증가시켜 강도를 보상할 수 있다.

용접부에 존재하는 기공과 고온균열 등의 결합은 인장강도의 저하 뿐만 아니라 반복하중 하의 피로강도도 저하시킨다. 압출재 용접부에서 추출한 Fig. 1과 같은 인장시편에 대해서 피로강도 시험을 수행하였다. Fig. 2의 시험 결과를 ERAAS³⁾에서 제시하는 설계 기준과 비교해 보면 용접부의 피로강도가 모재의 피로강도보다는 전체적으로 저하됨을 확인할 수 있고, 시험 결과가 맞대기 이음의 피로 설계기준을 중심으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 피로시험 결과의 편차가 현저함을 볼 수 있는데, 이는 용접 시공에

따른 결함 함유의 다소에 의해 피로강도가 변화함을 말해 준다. 따라서 철저한 시공 관리에 의한 결함 발생의 억제가 피로강도 확보를 위해 필수적임을 알 수 있다.

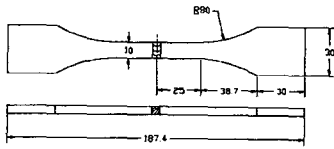


Fig. 1 Tensile specimen for fatigue test

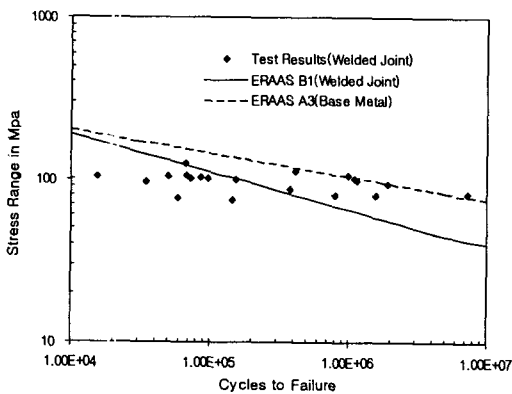


Fig. 2 Fatigue strength of tensile specimens of welded joint

3. 차체 부분구조의 피로강도

기하학적 영향을 고려하여 압출재 용접부의 피로강도를 파악하기 위해 Fig. 3와 같은 부분구조 시편의 피로시험을 수행하였다. 부분구조의 시편에 대한 피로강도 결과는 Fig. 4에 정리되어 있다. Fig. 4에 따르면 ERAAS의 B3(Full Penetration Transverse Butt Joint)이음부의 피로 설계 기준과 상당히 일치하는 결과를 주고 있다.

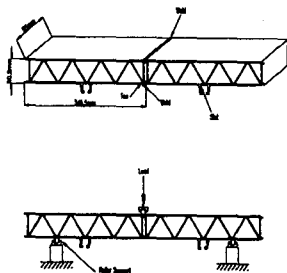


Fig. 3 Fatigue test for components

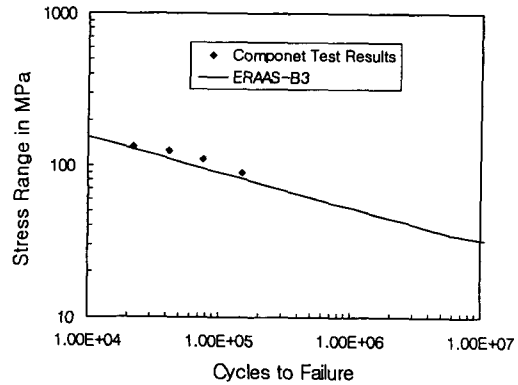


Fig. 4 Fatigue strength of components

4. 차체 용접부의 정적 강도

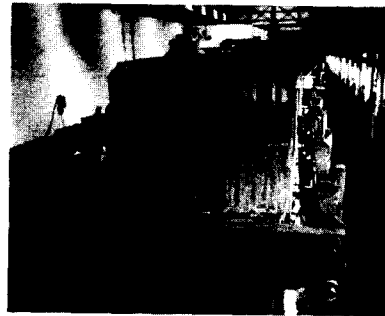


Fig. 5 Static load test for carbody



Fig. 6 Crack around window corner

철도차량용 차체에 대해서는 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중 등의 하중을 가하여 시험을 실시하고 균열 및 항복 발생 여부를 검증하여야 한다. 설계 과정에서 구조해석을 통해 강도를 검증하였으므로, Fig. 5와 같은 수직하중 작용 시에 차체에 작용하는 응력을 계측하면 대부분 항복응력 이하가 된다. 그런데, 출입문과 창문 모서리와 같은 응력 집중부에서는, Fig. 6와 같이 용접부 항복응력 이하에서도 균열이 발생하였다. 이 균열은 차체의 특성 상 차체 미려도를 위해

외부 표면에서 비드를 제거한 상태에서 부분용입된 용접부에서 발생한 것이다. 철저한 시공을 통한 부분용입의 방지와 부분용입을 원천적으로 차단할 수 있도록 설계 변경이 필요하다.

5. 차체의 피로강도

알루미늄 합금 용접부의 경우, 앞에서 기술한 바와 같이 피로강도가 취약하므로 시제차의 경우에는 차체 전체에 대해 피로하중 시험을 실시함으로써 강도를 입증할 필요가 있다. Fig. 7은 선로를 주행하는 철도차량이 받는 동적 하중을 재현하기 위해 차체 볼스터 하부에 유압 가진기를 설치하고 주기적으로 하중을 가하여 차체 변동 응력을 유발하는 시험 장면이다.

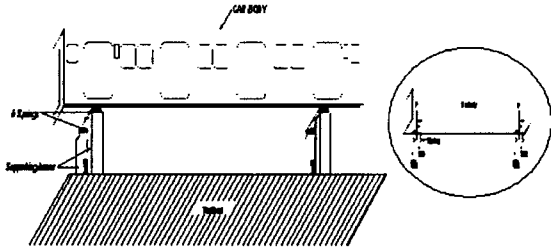


Fig. 7 Fatigue load test for whole carbody

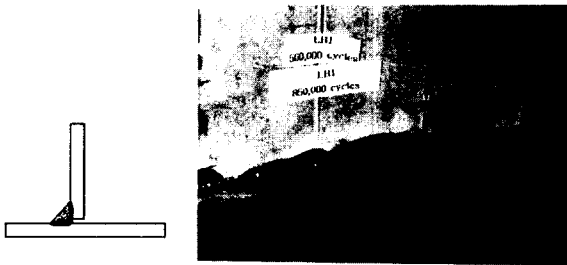


Fig. 8 First crack due to dynamic load

시험 결과에 따르면 최초의 피로 균열은 Fig. 8과 같이 차체 중앙부에서 바닥면과 결합된 수직 부재 하부에서 발생하였다. 이 부분은 구조상 일면 필렛용접이 불가피한데, 부분용입된 루트부에서 균열이 진전한 것으로 판단된다. 2×10^6 반복회수까지 균열이 발생한 곳은 대부분 용접부로서 S-N곡선으로 정리해 보면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 동일한 용접부 형상을 가진 시편에 대한 피로 설계 기준을 함께 표시하였는데, 비교 결과에 따르면 시편의 시험 결과로 얻어진 이음부 피로강도는 차체 전체에 대한 시험 결과로 얻어진 이음부 피로강도와 유사한 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다.

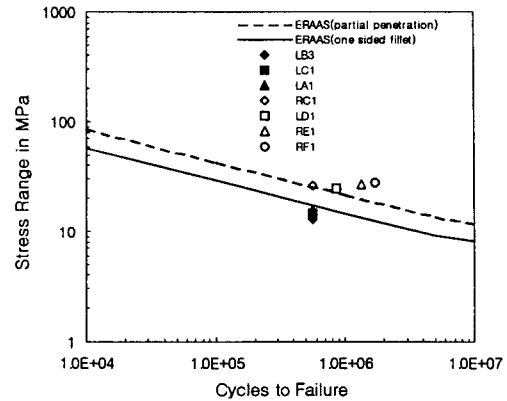


Fig. 9 Fatigue failure of carbody

4. 결 론

알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도를 확인하기 위해 시편 및 부분구조, 차체 전체에 대해 정적하중 시험과 피로하중 시험을 실시하였다. 인장 시편의 피로 시험 결과는 동일 시편의 피로 설계 기준값과 일치함을 보여 주었으나, 용접부의 결합 정도에 따라 피로강도의 편차가 심함을 나타내었다. 형상 효과를 고려하기 위한 부분구조 시편에 대한 피로시험을 통해 유사 용접 이음부의 피로강도 기준과 시험 결과가 일치함을 확인할 수 있었다. 차체 전체의 정적 하중 시험 결과는 응력 집중부의 철저한 시공관리가 필요함을 말해 주었고, 피로 하중 시험 결과는 동일 이음부의 시편 시험에 의한 피로설계 기준과 일치되는 결과를 보여주었다. 향후 차체 전체에 대한 피로 하중 시험보다는 구조해석 결과와 시편 시험 결과에 기초한 피로강도 평가로도 강도 검증이 충분할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. S. Seo, I. Park, J. Kim, D. Lee and D. Shin : Design of Aluminum Carbody and Development of Production Techniques of Large Aluminum Extrusion Profiles for Rolling Stocks, J. of KRS, 2-1 (1999), 1-15, (1998).
2. Deutsche Ind. Norm : Wrought Aluminium and Aluminium Extruded Sections, Part 1, DIN 1748, (1983).
3. ECCS-Technical Committee 2 Aluminum Alloy Structures : European Recommendations for Aluminum Alloy Structures Fatigue Design, (1992).