

알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도 특성에 관한 연구

서 승 일*

*한국철도기술연구원 차량기계연구본부

A Study on the Strength Characteristics of Welded Joints in Aluminum Carbody of Rolling Stock

Sung-Il Seo*

*Rolling Stock Research Department, Korea Railroad Research Institute, Kyonggi 437-050, Korea

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 test results showed that the static strength of welded joint for the heat-treated alloy is reduced significantly and fatigue strength data are scattered by the welding imperfections. Component and whole carbody fatigue test results showed agreements with the design fatigue strength standards for specimens of the same joint detail. Test results revealed that full penetration welding and strict management of welding procedure are crucial for securing the strength of welded joint in aluminum carbody.

* Corresponding author : siseo@krii.re.kr

(Received May 31, 2004)

Key Words : Aluminum rolling stock, Weld joint, Fatigue strength, Load test

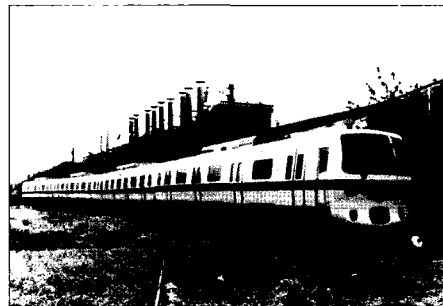
1. 서 론

국내에서 알루미늄 철도차량은 1994년부터 개발을 착수하여 5년간의 개발 기간을 거쳐 시제 차체가 완성되었고, Fig. 1과 같은 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 문제시되었던 용접부의 강도에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다.

2. 용접부 시편의 인장강도

알루미늄 합금의 용접 시에는 고온에서 Fig. 2와 같이 기공과 고온 균열 등의 결함이 발생한다. 기공은 모



(a) Urban electric multiple unit



(b) Korea high speed train

Fig. 1 Prototype aluminum rolling stocks

재 및 와이어 표면에 부착된 수분이나 보호 가스 중에 고용된 수소 등이 고온 상태에서 수소로서 용착금속에 용해되었다가 응고 시에 용해도 차이에 의해 방출되어 잔류하는 것이다. 또한 용접 시 고온에서 입계에 존재하는 응고점이 다른 액막은 용착금속의 냉각 수축에 따라 균열로 성장하여 고온 균열이 된다. 기공은 용착금속속에서 주로 발생하였으며, 고온균열은 열영향부에서 많이 발생하였다. 기공과 고온 균열은 용접부의 인장강도와 피로강도를 저하시키는 원인이 된다. Fig. 2의 결합이 발생한 경우의 용접조건 및 결합부 상세 사항은 각각 Table 1 및 Fig. 3과 같다. 기공의 감소를 위해서는 용접시의 수소원이 될 수 있는 수분 또는 불순물의 제거가 필수적이고, 고온균열의 방지를 위해서는

Table 1 Welding conditions for aluminum extrusion profiles

Materia	A6005A T6
Joint Thickness	4 (mm)
Process	Automatic GMAW (DCRP)
Welding Current	196~204 (A)
Welding Voltage	24.5~24.8 (V)
Welding Wire	E5356 ϕ 1.2
Welding Speed	60 (cm/min)
Shielding Gas	Ar 99.9%
Flow Rate	22 (l/min)
No. of Pass	1

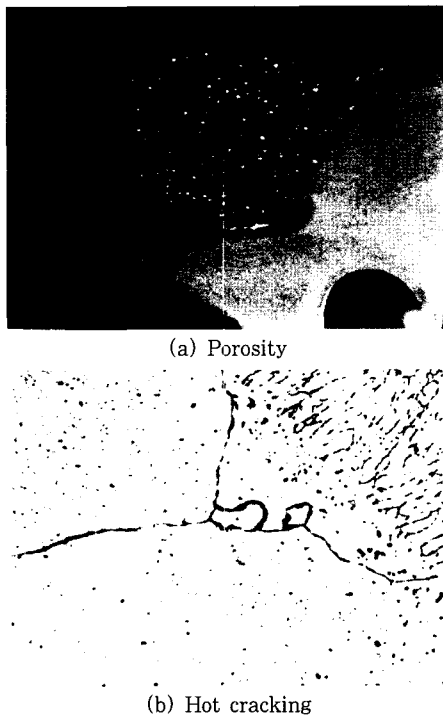


Fig. 2 Weld defects of aluminum extrusion profiles A6005A

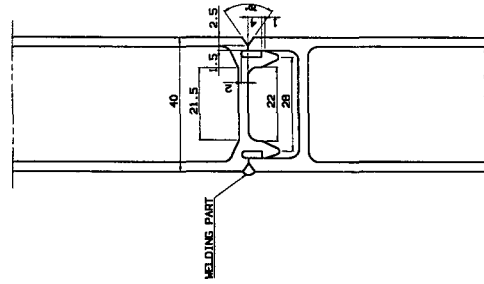


Fig. 3 Typical welding joint of aluminum extrusion profile

용접봉의 적절한 선정이 중요하다. 일반적으로 5000계열과 6000계열의 합금에는 E5356 용접봉을 많이 사용하므로 본 연구 과정에서도 A6005A 압출재 용접을 위해 E5356 용접봉을 사용하였으나, 고온균열이 심하게 발생하는 경우에는 E4043용접봉을 사용하여 고온 균열을 감소시키도록 노력하였다. E4043용접봉을 사용하는 경우 용착금속의 인장강도는 다소 저하 되는 경향이 있었다.

국내 철도차량에 적용되는 알루미늄 합금 소재로, 압출재에 대해서는 A6005A와 판재에 대해서는 A5083이 주로 활용되고 있다¹⁾. 광주시 지하철 및 한국형 고속열차의 차체를 이루는 지붕구조, 측구조, 하부구조, 단부구조가 모두 A6005A 압출재를 사용하여 제작되었다. 전두부의 곡면을 이루는 일부 판재는 A5083을 사용하였다. A5083은 기존에 선박이나 내식성 구조용 재질로 사용 실적이 많은 범용 재질이나 A6005A는 철도 차량용 대형 압출재 생산을 위한 알루미늄 합금 소재로서 본 연구를 통해 개발되었다. 본 연구의 시험은 모두 A6005A 압출재에 대한 것이다.

A6005A 합금은 압출성이 우수하나 고강도를 위해 T6의 열처리를 실시해야 하는데, 열처리후 강도가 높아진 압출재를 용접한 경우, 항복강도 및 인장강도는 40% 정도 저하된다. 강도 저하의 원인은 열처리 효과의 소멸과 함께 용접결함이라고 추정된다. 상대적으로 A5083은 비열처리계 합금으로서 H112 재질의 경우 용접부의 인장 강도 저하는 10% 정도이다. Table 2는 알루미늄 합금에 대한 강도기준²⁾이고, Table 3는 차체의 대부분을 구성하는 알루미늄 합금 A6005A의 주요 조성 기준과 실제 시험결과를 나타낸다.

용접부의 인장강도 저하에 대한 대책으로는 철저한 시공 관리에 의한 용접결함 방지와 함께 설계 측면에서 용접 결합부의 두께를 증가시켜 강도를 보상할 수 있다. Fig. 2의 기공과 고온균열 등의 결함은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 인장강도를 저하시킬 뿐만 아니라 반복하중 하의 피로강도도 저하시킨다. 압출재 용접부에

Table 2 Mechanical properties of typical aluminum alloys

Material	Tensile strength(MPa)		Yield stress(MPa)		Elongation(%)
	Base metal	Weld joint	Base metal	Weld joint	
A6005A T6	260 <	165 <	215 <	115 <	8 <
A5083 H112	275 <	247 <	125 <	110 <	12 <

Table 3 Chemical analysis of A6005A

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Standard(DIN)	0.5~0.9	< 0.35	< 0.03	< 0.5	0.4~0.7	< 0.3	< 0.2	< 0.1	Remainder
Test Average	0.78	0.13	0.01	0.16	0.50	0.10	0.03	0.02	Remainder

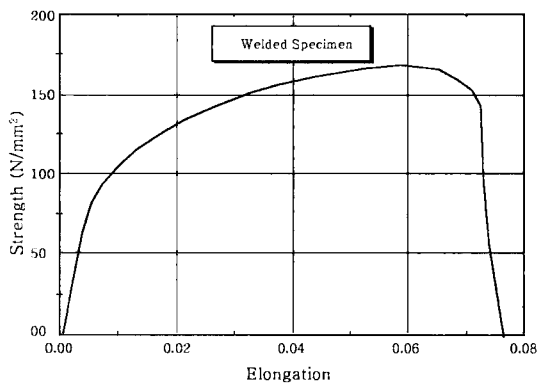


Fig. 4 Tensile strength of welded joint of aluminum alloy

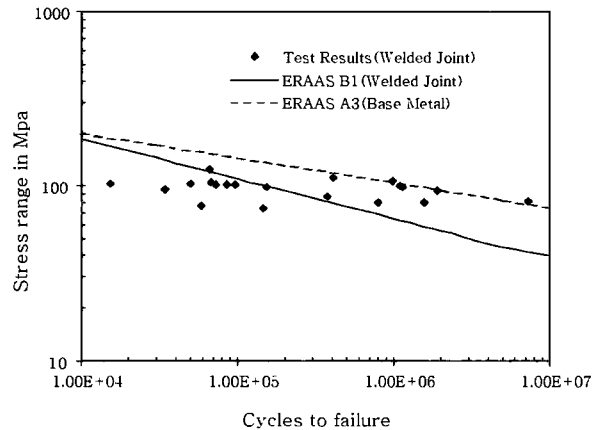


Fig. 6 Fatigue strength of tensile specimens of welded joint

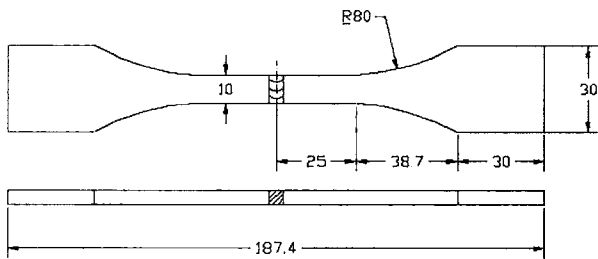


Fig. 5 Transverse specimen for fatigue test (Thickness = 2mm)

서 추출한 Fig. 5와 같은 인장시편에 대해서 편진 피로 강도 시험을 수행하였다. Fig. 5의 인장시편은 압출재 용접부를 잘라내어 비드를 포함하여 전체를 연마하여 가공한 것이다. Fig. 5에 대한 시험 결과를 Fig. 6와 같이 ERAAS³⁾에서 제시하는 설계 기준과 비교해 보면 용접부의 피로강도가 모재의 피로강도보다 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 피로

강도가 변화함을 말해 준다. 따라서 철저한 시공 관리에 의한 결함 발생의 억제가 피로강도 확보를 위해 필수적임을 알 수 있다.

3. 차체 부분구조의 피로강도

기하학적 영향을 고려하여 A6005A 압출재 용접부의 피로강도를 파악하기 위해 Fig. 7 및 Fig. 8과 같은 부분구조 시편에 대해 3점 굽힘 피로시험을 수행하였다. 부분구조 시편 제작을 위한 용접조건은 Table 4와 같다.

피로 시험에 사용된 시험기는 50톤 용량의 유압식 피로시험기이며, 시험기에 장착된 50톤 용량의 로드셀 (load cell)을 이용하여 하중을 측정하였다. 하중 주파수는 3~5 Hz이고 최대하중 범위는 1,100 1,800 kg이며 최소하중은 100 kg이다. 부분구조의 용접부는 가공하지 않은 용접 상태 그대로이며 피로시험 결과는 Fig. 9에 정리되어 있다. Fig. 9에서 제시된 응력은 공칭응력 (nominal stress)을 기준으로 하여 시험 결

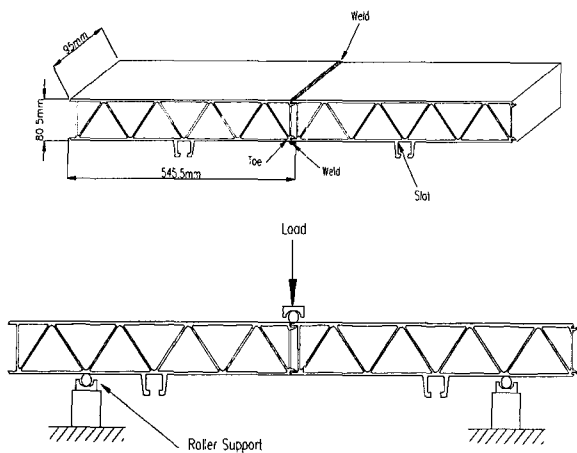


Fig. 7 Fatigue test for components

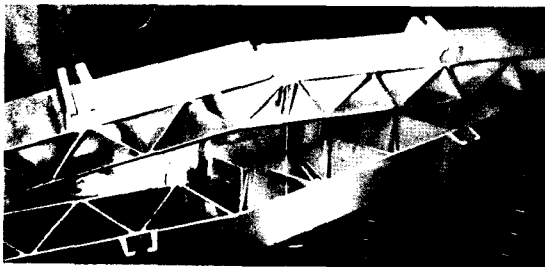


Fig. 8 Component test specimens

Table 4 Welding conditions for aluminum extrusion components

Materia	A6005A T6
Process	GMAW (DCRP)
Joint Thickness	4 (mm)
Welding Current	180~190(A)
Welding Voltage	23.9(V)
Welding Wire	E5356 ϕ 1.2
Welding Speed	30~40 (cm/min)
Shielding Gas	Ar 99.9%
Flow Rate	20 (l/min)
No. of Pass	1

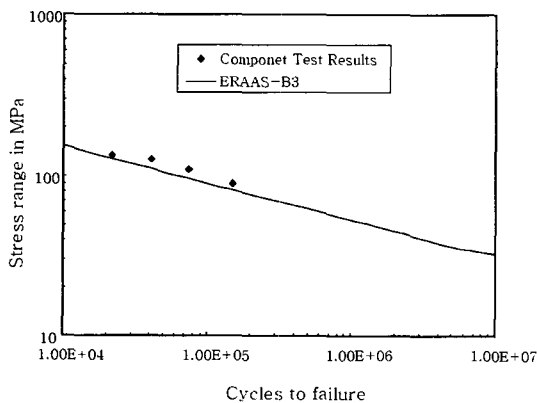


Fig. 9 Fatigue strength of components

과로부터 계산된 것인데, 부분구조의 피로시험 결과는 ERAAS의 B3(Full Penetration Transverse Butt Joint) 이음부의 단순 시편의 피로 설계 기준과 상당히 일치하는 결과를 주고 있다.

4. 차체 용접부의 정적 강도

철도차량용 차체에 대해서는 수직하중, 압축하중, 비틀림 하중 등의 하중을 가하여 시험을 실시하고 균열 및 항복 발생 여부를 검증하여야 한다. 국내 전동차의 설계 기준으로 일반적으로 적용되는 JIS 기준에⁴⁾ 따르면 하중조건은 Table 5와 같다.

완성된 차체에 대해서 Table 5의 하중을 가하고 차체 각 부분에 120개의 스트레인지지를 부착하고 하중 증분 단계마다 계측시스템을 이용하여 응력을 계측하였다. Fig. 10과 같은 수직하중 작용 시에 차체에 작용하는 응력을 계측하면 대부분 항복응력 이하가 된다. 그런데, 출입문과 창문 모서리와 같은 응력 집중부에서는, 용접부의 항복응력 이하에서도 Fig. 11과 같이 균열이 발생하였다. 이 균열은 차체의 특성 상, 미려도를 위해 외부 표면의 비드를 제거한 상태에서 부분 용입된 용접부에서 발생한 것이다. 철저한 시공을 통한 부분용입의 방지와 부분용입을 원천적으로 차단할 수 있도록 설계 변경이 필요하다. 상업용 차체의 설계 시에는 Fig. 11과 같은 부분 용입에 의한 균열이 방지될 수 있도록 차체 전체를 파형의 심재(core)가 있는 중공 압출재(hollow section)로 설계하였다⁵⁾.

Table 5 Loading condition for carbody

Loading Type	Magnitude	Loading Point
Vertical Load	55 ton (Maximum Weight \times 1.2)	Distributed on the floor
Compressive Load	50 ton	Coupler
Torsional Load	4 ton-m	Bolster

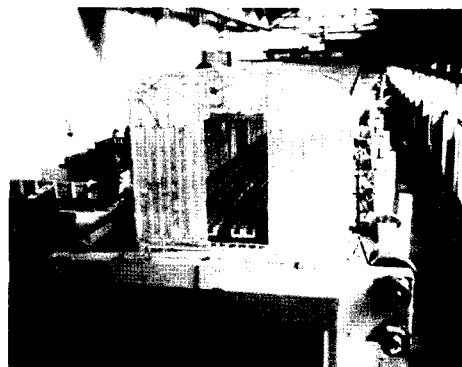


Fig. 10 Static load test for carbody

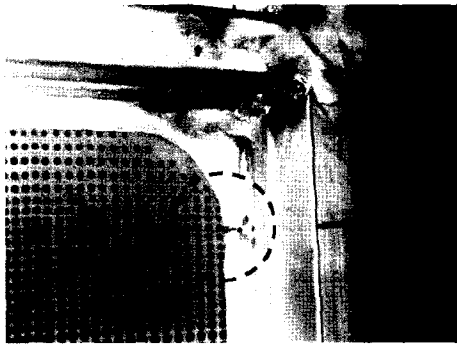


Fig. 11 Crack around window corner



Fig. 13 Aluminum carbody on testing bed for dynamic load test

5. 차체의 피로강도

알루미늄 합금 용접부의 경우, 앞에서 기술한 바와 같이 결함이 많이 존재하여 피로강도가 취약하므로 시제차의 경우에는 차체 전체에 대해 피로하중 시험을 실시함으로써 강도를 입증할 필요가 있다. 실제 철도차량이 운행 중에 받는 반복하중을 재현하기 위해 Fig. 12와 같이 차체에 최대 하중을 적재하고 대차와 연결된 볼스터 부분에 유압가진기로 차체가 받을 수 있는 가속도 0.2g를 반복적으로 재현하였다. 차체에는 정하중 시험과 마찬가지로 스트레인게이지를 부착하여 응력을 측정하고 하중을 받는 전체 과정을 측정시스템을 이용하여 저장하고 분석하였다. Fig. 13는 실제 시험 장면이다. 차체는 하부의 볼스터로부터 전달되는 가속도 운동을 통해 반복적인 수직하중을 받게 되고 취약부에서 피로 균열을 일으키게 된다.

시험 중 피로 균열이 발생한 시기 및 위치를 나타내면 Fig. 14와 같다. Fig. 14를 보면 초기의 피로균열은 차체의 중앙부에서 집중적으로 발생하였음을 알 수

있다. 이는 차체가 강체가 아닌 탄성체이고 차체 동하중에 의해 차체 중앙부에서 가속도의 변화가 가장 심하고, 이에 따라 응력 진폭의 변화가 심하였기 때문으로 사료된다⁵⁾. 최초의 피로 균열은 차체의 동적 거동에 따라 Fig. 15와 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. 16과 같다. Fig. 16에서 동일한 용접부 형상을 가진 시편에 대한 피로 설계 기준을 함께 표시하였다. ERAAS는 알루미늄 합금 용접부 피로강도를 시편의 이음부 형상과 하중 조건별로 등급을 정하고 각 등급에 대해 S-N곡선으로 제시하고 있으므로, 차체의 이음부 형상과 하중 상태를 고려하여 ERAAS에서 해당되는 등급을 찾아서 Fig. 16과 같은 비교 결과를 얻었다. 시험 결과의 비교에 따르면, 시편 시험의 피로강도는 차체 전체의 피로강도와 유사한 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다.

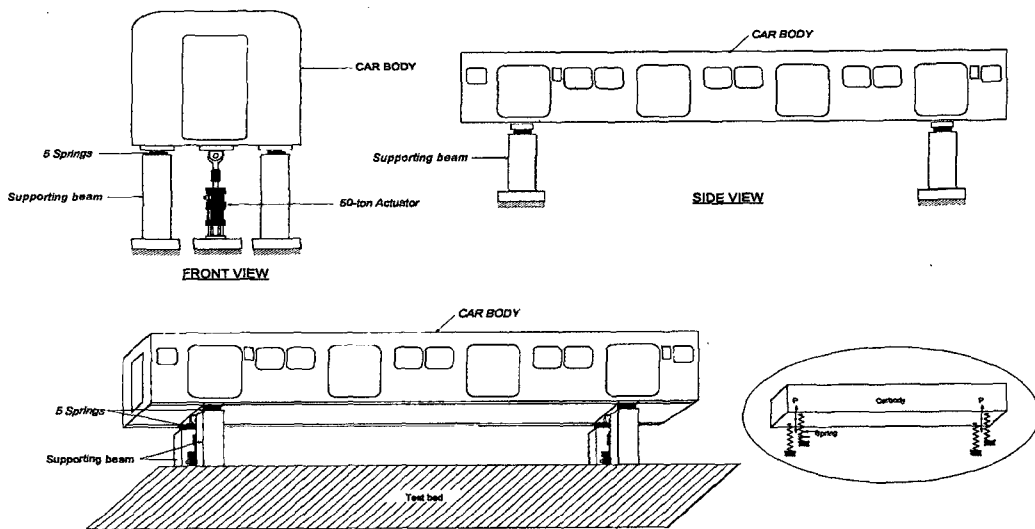


Fig. 12 Fatigue load test for whole carbody

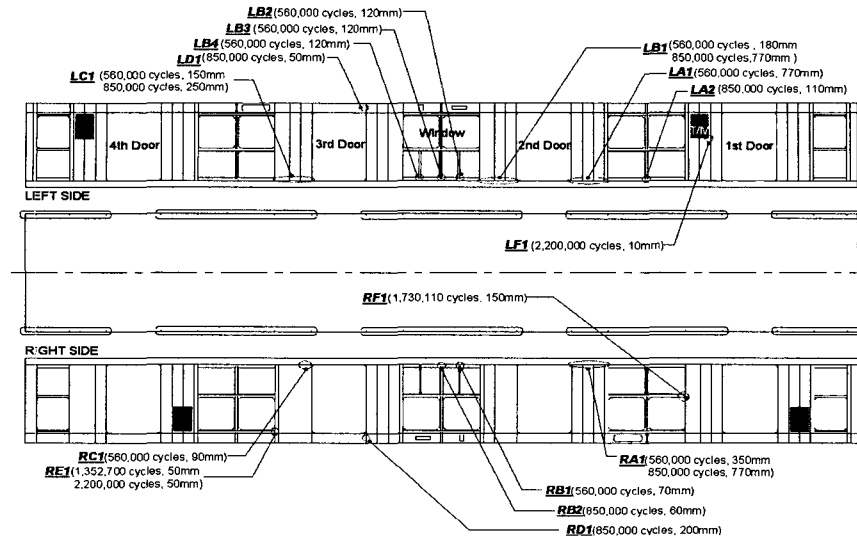


Fig. 14 Fatigue cracks of carbody

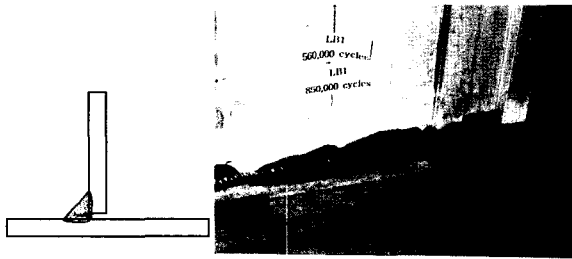


Fig. 15 First crack due to dynamic load

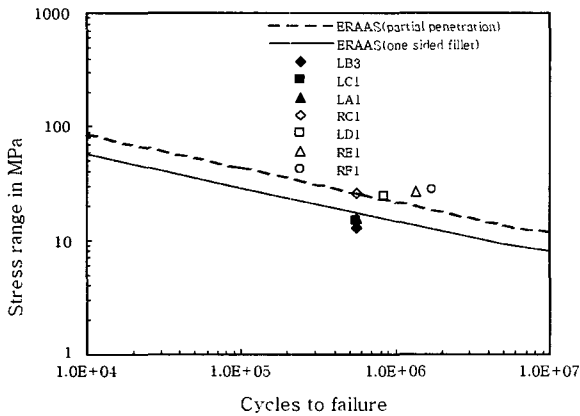


Fig. 16 Fatigue strength of carbody

6. 결 론

본 연구는 국내 기술로 개발된 알루미늄 철도차량의 상용화 과정에서 수행된 용접부 강도 특성 결과를 소개 하였다. 차체의 주요 소재로 개발한 A6005A 합금 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 유사한 경향을 보여 주었으나, 용접부의 결함 정도에 따라 피로강도의 편차가 심함을 보여 주었다. 용접부 형상 효과를 고려하기 위한 부분구조 시편에 대해 피로시험을 실시하고 유사 용접 이음부의 피로 강도 기준과 비교하였다. 차체 전체의 정적 하중 시험 결과는 응력 집중부의 철저한 시공관리를 통해 루트부의 부분 용입을 방지해야 함을 말해 주었고, 부분 용입의 근원적인 방지를 위해서는 차체 설계 변경이 필요함을 제시하고 있다. 피로 하중 시험 결과는 동적 하중에 의한 차체의 동적 응답에 따라 균열이 차체 중앙에서 최초로 발생함을 보여 주었다. 또한 동일 이음부의 시편 시험에 의한 피로 설계 기준과 차체 피로 시험 결과를 비교하여 피로설계 기준의 적용 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Sung Il Seo, Il Cheol Park, Jin Tae Kim, Dong Heon Lee and Don Soo Shin : Design of Aluminum Carbody and Development of Production Techniques of Large Aluminum Extrusion Profiles for Rolling Stocks, Journal of Korea Railway Society, 2-1 (1999), 1-15, (in Korean)
2. Deutche Ind. Norm : Wrought Aluminium and Aluminium Extruded Sections, Part 1, DIN 1748, 1983, 1-20
3. ECCS-Technical Committee 2 Aluminum Alloy Structures : European Recommendations for Aluminum Alloy Structures Fatigue Design, 1992, 26-59
4. Japanese Industrial Standards : Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, JIS E7105, 1992 1-9
5. Sung Il Seo : Studies on the Prevention of Damages on the Carbody of Aluminum Rolling Stock, Journal of Korea Railway Society, 5-3 (2002), 181-186, (in Korean)