

# 도시철도차량 알루미늄 차체의 동적 하중 시험에 의한 피로 강도 평가

서승일<sup>†</sup> · 박춘수<sup>†</sup> · 신병천<sup>\*</sup>

## Fatigue Strength Evaluation of the Aluminum Car body of Urban Transit Unit by Large Scale Dynamic Load Test

Sung Il Seo, Choon Soo Park and Byung Cheon Shin

**Key Words:** Aluminum Carbody(알루미늄 차체), Alternating Stress Amplitude(변동 응력 진폭), Dynamic Load Test(동적 하중 시험), Fatigue Strength(피로강도), Static Load Test(정하중 시험)

### Abstract

Aluminum carbody for rolling stocks is light and perfectly recycled, but includes severe defects which are very dangerous to fatigue strength. Structural integrity assessment for the carbody by static load test has been performed up to date. In this study, to evaluate fatigue strength of the aluminum carbody of urban transit unit, a testing method to simulate dynamic loading condition was proposed and the fatigue strength of the carbody was evaluated. The dynamic load test results showed that the alternating stress ranges were different from the estimated ranges based on the static test results. Excessive stress ranges at the center are thought to come from the flexible motion of the carbody.

published fatigue test data for aluminum components, but variation of alternating acceleration along the length due to flexibility of carbody yielded unexpected results. Because fatigue strength based on the static test results may be overestimated at the center, modification of testing method is necessary.

### 1. 서 론

알루미늄 합금은 경량이면서 고강도의 특성을 지니고 있고, 압출성능이 우수하기 때문에 단면이 균일한 철도차량 차체의 유용한 재질로 적용될 수 있다. 현재 국내에서는 5년간의 개발 기간을 거쳐 알루미늄 철도차량이 개발 완료되었으며 [1][2], 현재 상업용 차량이 제작 중에 있다.

알루미늄 차체는 여러 장점에도 불구하고, 용접 시 발생하는 고온균열과 기공 등의 결함에 의해 용접부 강도가 취약해지는 단점이 있어 설계와 제작 시에 충분한 기술적 검토가 필요하다. 특히 용접부 피로강도에 대한 평가는 필수적이다. 알루미늄 철도차량 차체에 대해서는 각종 규격에서 실물 차체에 대한 정하중 시험을 요구하고 있지만, 저하중 시험 결과에 따라 저저가도와 함께 피로강도도 평가하도록 되어 있다.

본 연구에서는 알루미늄 철도차량 차체의 구조 신뢰성 확보를 위해, 정하중 시험만 수행하여 왔던 관례에서 벗어나서 실물 차체에 대한 동적 하중 시험을 실시하여 피로강도를 평가하고 정하중 시험과의 차이를 고찰하고 적정 피로강도 평가를

<sup>†</sup> 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단  
E-mail : siseo@krii.re.kr  
TEL : (031)460-5623 FAX : (031)460-5649

<sup>\*</sup> 한국기계연구원 구조연구부

위한 방법에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 차체 하중 시험 방법에 관한 고찰

### 2.1 정하중 시험

JIS[3]나 UIC[4]와 같은 철도차량 관련 규격에서는 차체에 작용하는 하중을 정의한 후, 지그상의 실물 차체에 대해 각 하중 상태를 구현하여 가다르 피가라도로 규정하고 있다. 차체에 가자 심각한 영향을 미치는 수직 변동 하중에 대해서는 변동 가속도만큼 고려한 수직하중을 Fig. 1과 같이 중량물을 균등 분포시켜 차체에 가라고 차체의 응력과 처짐을 측정하여 강도를 평가하게 된다. 피로강도를 평가할 시에는 정하중 성분과 변동하중 성분을 분리하여 Goodman선도를 이용하고 있다[3]. 그러나 동하중 상태를 정하중 상태로 대치시키는 과정에는 예상치 못한 문제점들이 나타날 수 있다.

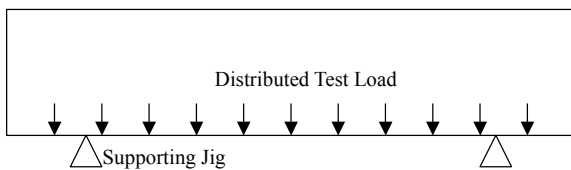


Fig. 1 Static load test

### 2.2 집중하중에 의한 동적 하중 시험

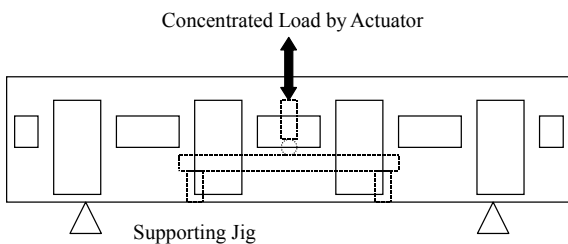


Fig. 2 Dynamic load test by Oomura

Oomura 등은 스텐레스 철도차량 차체의 피로강도 평가를 위해 Fig. 2와 같이 유압 가진기( actuator)를 통해 2점에 집중 변동 하중을 가하여 차체 피로강도 시험을 수행하였다[6]. 시험 결과에 따르면 2점 집중 하중 피로 시험을 통해 충분한 정도의 피로강도 평가가 가능하다고 한다. 그

러나 실제 철도차량이 궤도 위를 주행하면서 발생시키는 관성력에 의한 동적 하중은 적재 중량물에 따른 분포 하중 특성을 지니고 있으므로 집중 하중과 상당한 차이를 보이고 있으며, 집중 하중 부과 시 하중점 근처에서 응력이 과도하게 발생하므로 전체적인 피로강도 평가의 신뢰성을 확보하기에는 미흡하다고 할 수 있다.

## 3. 동적 하중 시험 방법

### 3.1 분포하중에 의한 동적 하중 시험 방법

실제 차체가 받게 되는 하중을 있는 그대로 반영한 시험을 통해 얻어진 피로강도 평가 결과가 신뢰성 있는 결과라고 할 수 있으므로, 본 연구에서는 실제 차체의 동적 하중 상태와 유사한 하중 상태를 구현하기 위해 Fig. 3과 같은 동적 하중 시험을 실시하였다. 대차 프레임 상의 스프링에 놓여진 만차 적재 상태의 차체는 주행 중 대차로부터 전달되는 운동에 의해 동적 하중을 받게 되는데, 본 실험에서는 대차로부터 전달되는 동적 하중을 균일 주파수, 균일 하중 크기의 유압 가진기의 가진으로 대치하였다.

### 3.2 시험 설비 및 제어

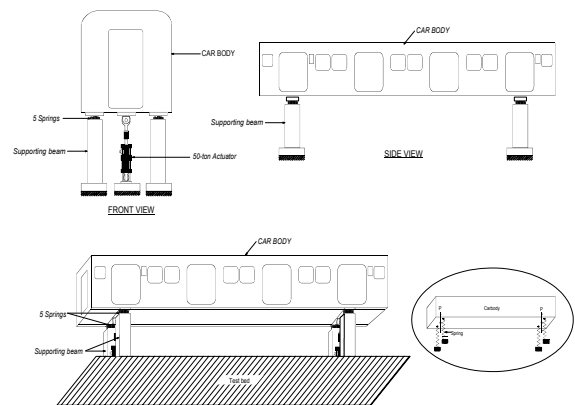


Fig. 3 Set-up for dynamic load test

대형 구조 시험용 베드에 설치된 4개의 지지대 상에 코일 스프링을 설치하고 알루미늄 차체를 위치시키고 양쪽 차체 볼스터 하부에 유압가진기를 설치한다. Fig. 4와 같이 구성된 동적 하중 시험 시스템을 통해 동적 하중이 제어되고 시험 결과가 처리된다. 유압가진기를 제어하는 디지털 제어기는 AC제어기, DC제어기 및 마이크로콘솔

(micro-console)로 구성되어 있으며, AC 또는 DC 제어기에 의하여 결정된 입력신호를 유압가진기의 서보밸브에 보내어 유압가진기내로 유입되는 압력 일정한 기름량을 조절함으로써 작용 하중 또는 변위를 제어한다. 변위 또는 하중 제어는 입력 신호와 회기신호(feed-back signal)의 차 즉 평균 오차를 영으로 수렴시키는 폐회로(closed loop) 제어 방식을 이용한다.

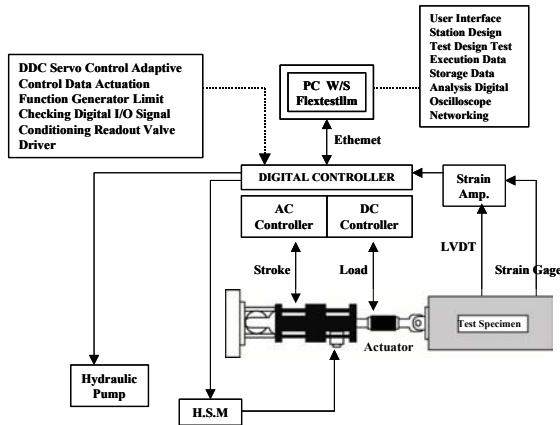


Fig. 4 Configuration of load control system

3.3 시험 절차

동적 하중 시험의 절차는 Fig. 5와 같다.

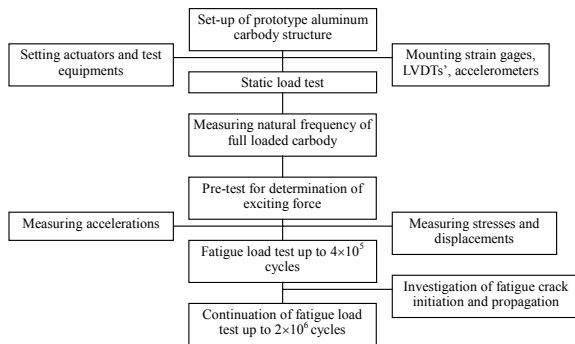


Fig. 5 Procedure for dynamic load test

알루미늄 차체를 시험 설비에 위치시키고, 응력 집중 영역을 중심으로 스트레인 게이지를 취부하고, 차체 언더프레임(underframe) 상에 변위게이지 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 설치한다. 또한 유압가진기를 차체 볼스터 하부에 지그를 통해 연결시킨다. 시험 준비가 완료되면 차체 바닥에 만차시의 적재 중량 41.6 톤이 얻어지도록 하중을 적재한다. 하중 적재 후에 응력과 변위를 계측하여 정하중 시험 결

과를 얻는다. 동적 하중 시험을 수행하기 위해 만차 적재 상태에서 차체를 가진시켜서 공진주파수를 찾고 공진주파수로 차체를 가진시켜 차체가 동적 하중을 받도록 만들게 된다. 유압가진기의 기진력(exciting force)은 표준 사양서에 규정된 차체 변동하중[6]이 얻어지도록 크기가 조절된다. 실제 시험에서는 차체의 1/4 위치에서 ±0.2g의 가속도가 나타나도록 기진력이 결정된다. 유압가진기에 의한 반복 하중이 가하짐에 따라 응력 및 변위의 이력이 기록되고 균열 발생 과정이 수시로 점검된다. 4×10<sup>5</sup> 사이클에서 시험을 일단 중단하여 전반적인 균열 발생 상황을 점검하고 치명적인 균열에 대해 보수 용접을 실시한 후에 피로 하중 시험을 계속한다. 시험 진행에 따라 발생한 피로 균열을 정리해 보면 Fig. 6와 같다. 초기의 피로 균열은 중앙부에서 집중적으로 발생하였음을 볼 수 있다. Fig. 7은 초기에 발생한 출입문 포켓 판넬 하부 균열을 보여 준다.

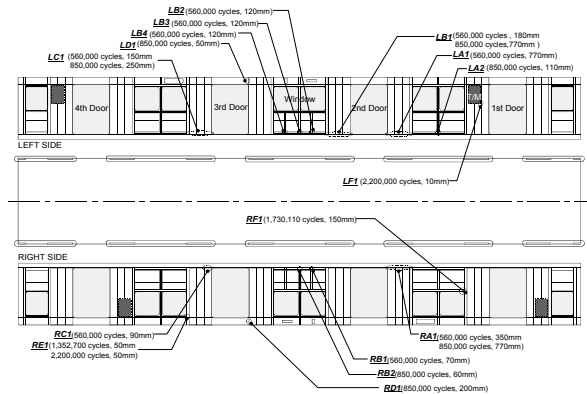


Fig. 6 Fatigue cracks occurred in the car-body



Fig. 7 Crack on the fillet joint of pocket plate

#### 4. 시험 결과에 대한 분석

##### 4.1 변동 응력에 대한 분석

정하중 시험에서는 변동하중 성분을  $\pm 0.2g$  고려하여 만차 적재 하중보다 20% 만큼 추가의 하중을 적재한 후에 응력 및 변위를 측정하고 강도를 평가한다. 따라서 모든 측정 지점에서 응력의 변동폭은  $\pm 20\%$ 가 될 수 밖에 없다. 그런데 동적 하중 시험을 통한 측정 결과를 보면 Fig. 8과 같이 차체 중앙부에서의 응력 변동폭과 차체 단부 근처에서의 응력 변동폭이 상당한 차이가 있음을 발견할 수 있다. 이러한 응력 진폭의 차이는 Fig. 9와 같은, 하중 시험 중의 차체 최대 변위 분포 곡선을 보면 설명될 수 있다. 즉 차체는 강체가 아닌 탄성체이므로 차체의 진동 중 각 위치에서의 가속도는 달라지게 된다. 특히 중앙부에서는 차체의 진폭이 가장 크게 변화하므로 가속도의 변동폭도 최대가 되고 응력의 변동폭도 최대가 됨을 확인할 수 있다. 동적 하중을 고려한 균일한 하중 부가로는 실제 차체가 받게 되는 변동하중을 적절하게 고려할 수 없음을 알 수 있다.

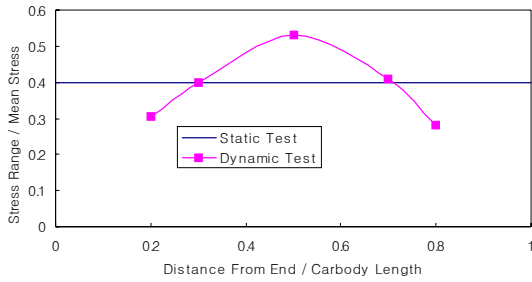


Fig. 8 Stress range along the carbody length

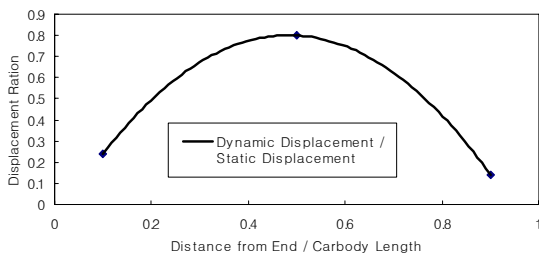


Fig. 9 Variation of displacement along the carbody length

##### 4.2 피로 수명에 대한 분석

차체 재질은 알루미늄 합금 A6005A T6이고, 항복강도 및 인장강도가 각각 215 MPa과 245 MPa이며, 연신율(elongation)이 8 %이다. 발생된 피로 균열을 S-N선도 상에 표시하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10을 보면 시편에 대한 피로강도 곡선과 본 시험에서 얻어진 결과가 근접함을 볼 수 있다. 균열이 발생한 Fig. 7과 같은 이음부의 경우 일면 필렛 용접에 대한 피로 수명 설계 곡선을 사용하면 실제 피로 수명과 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있게 된다. 또한 출입문 코너의 맞대기 이음부의 경우에도 부분 용입에 대한 피로 곡선을 적용하면 실제 균열 발생 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있게 된다.

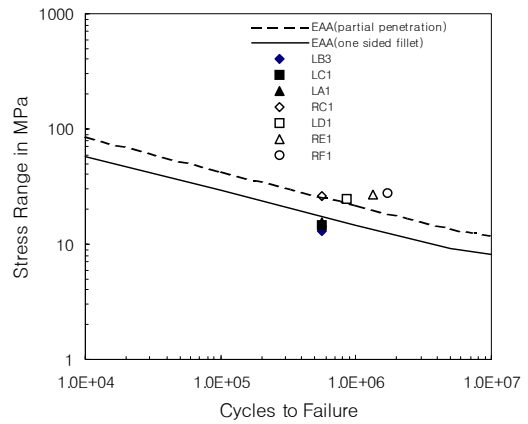


Fig. 10 S-N curves for crack points

##### 4.3 시험 방법에 대한 평가

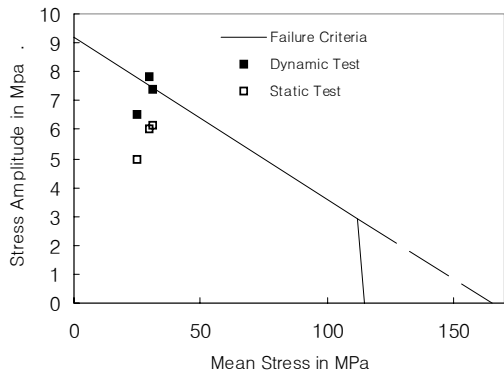


Fig. 11 Estimation for fatigue crack initiation

Fig. 10을 기초로 하여 Goodman선도를 그려보면 Fig. 11과 같다. Fig. 11은 차체 중앙부에서 발생한 필렛 용접부의 균열에 대해 부분 용입 필렛

용접부의 S-N곡선을 기초로 동적 하중 시험 결과 및 정하중 시험 결과를 나타낸 것이다. 정하중 시험 결과에서 응력 진폭(응력 변동폭의 1/2)은 평균응력의 20%를 고려한 것이고 동적 하중 시험 결과는 실제 계측된 응력진폭이다. Fig. 11을 통해 차체 전체 길이에 걸쳐 균일한 진동 가속도를 가정한 응력 진폭을 고려하는 정하중 시험 결과는 실제로 작용하는 응력 진폭에 비해 과소 평가 가능성이 있어 차체 피로 균열 발생을 사전에 예측하지 못하는 문제점이 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 도시철도차량 알루미늄 차체에 대해 실제 궤도 위에서 운행 중인 차체가 받는 하중을 재현할 수 있는 동적 하중 시험을 수행하고 피로강도를 평가하였으며, 평가 결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 차체 운동 가속도가 일정하다고 가정하여, 균일한 동적 하중을 부가한 정하중 시험 결과에 기초하여 얻어진 차체의 변동 응력 진폭은 동적 하중 시험에서 얻어진 변동 응력 진폭과 차이를 보이고 있으며 이는 알루미늄 차체의 탄성 효과에 따른 차체 길이 방향의 가속도 분포 차이로 사료된다.

2) 정하중 시험 결과로부터 유추한 변동 응력 진폭 결과를 적용하여 피로 균열 발생을 판정한 결과는 동적 하중 시험 결과에서 나타난 피로 균열 발생 결과와 차이를 보이고 있으므로 균일한 동적 부가하중을 고려하는 정하중 시험의 개선이 필요하다고 판단된다.

3) 실물 차체에 대한 피로 수명을 예측하기 위해서는 용접 이음부의 상세 사항이 근접한 부분 시험편의 피로 시험 결과를 적용하여야 한다.

## 참고 문헌

- (1) Seo, S. I., Kim, J. T., Park, I. C., Lee, D. H. and Shin, D. S., 1999, "Design of aluminum carbody and development of production technologies of large aluminum extrusion profiles for rolling stocks", *Journal of Korean Railway Society*, Vol. 2, No. 1, pp. 1~15.
- (2) Seo, S. I., Choi, S. H., Lim Y. H. and Lee, J.

S., "Development of the standardized aluminum electric motor car", *Journal of Korean Railway Society*, Vol. 2, No. 3, pp. 54~60.

- (3) Japanese Industrial Standards, 1989, "Test methods for static load of body structures of railway rolling stock", E7105.
- (4) International Union of Railways, 1993, "Loadings of coach bodies and their components", UIC 566-OR.
- (5) Oomura, K., Okuno, S., Kawai, S., Masai, K. and Kasai, Y., 1992, "Figue Test of an Actual Car Body Structure", *Journal of Japanese Mechanical Society*, Vol. 58, No. 545, pp 20~25.
- (6) Ministry of Construction and Transportation, 1998, "Standard Specifications for Urban Transit Unit", No. 1998-53.