

## 알루미늄 차체 하중 시험 방법에 관한 비교 평가

### Comparison and Evaluation of Load Test Methods for Aluminum Car Body

서승일<sup>1</sup> · 박춘수<sup>1</sup> · 신병천<sup>2</sup>

Sung-Il Seo · Choon-Soo Park · Byung-Cheon Shin

#### Abstract

Aluminum carbody for rolling stocks is light and perfectly recycled, but includes severe defects which are very dangerous to fatigue strength. Static load test has been performed up to date to assess structural safety of the carbody. However, static load test is not sufficient to evaluate fatigue strength of the carbody, because fatigue failure is caused by dynamic load. In this study, the established load test methods for carbody are described and the characteristics of the methods are discussed. Also, a testing method to simulate dynamic loading condition is proposed for evaluation of fatigue strength of the carbody. The results by the proposed testing method are compared with the results by the static load test and new findings are discussed.

**Keywords :** Large Scale Load Test(대형 구조 시험), Aluminum Carbody(알루미늄 차체), Dynamic Load Test(동적 하중 시험), Fatigue Strength(피로 강도), Alternating Stress(변동 응력)

## 1. 서론

알루미늄 철도차량은 경량화와 가공의 용이성, 재활용성 등의 장점이 있으나, 용접 시 발생하는 고온균열과 기공 등의 결함에 의해 용접부 강도가 취약해지는 단점[1,2]이 있어 설계와 제작 시에 충분한 기술적 검토가 필요하다. 특히 용접부 피로강도에 대한 평가는 필수적이다. 철도차량 차체에 대해서는 각종 규격에서 실물 차체에 대한 정하중 시험을 요구하고 있고[3,4], 정하중 시험 결과에 따라 정적 강도와 함께 피로강도도 평가하도록 되어 있다.

본 연구에서는 알루미늄 철도차량 차체의 안전성을 검증하기 위한 하중 시험 방법에 대해 고찰하고, 정하중 시험 결과와 동적 하중 시험 결과의 비교 분석을 통해 하중 시험 방법에 따른 피로강도 평가의 차이점을 고찰하고 정하중 시험 방법 개선 방향을 모색한다. 구조 신뢰성 확보를 위한 하중 시험 방법에 대해, 정하중 시험만 수행하여 왔던 관례에서 벗어나서 실물 차체에 대한 동적 하중 시험을 실시하여 피로강도를 평가하고 정하중 시험과의 차이를 고

찰하고 적정 피로강도 평가를 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, 지그 상의 실물 차체에 대해 각 하중 상태를 구현하여 강도를 평가하도록 규정하고 있다. 국내의 전동차 설계를 위한 규격은 JIS를 적용하고 있으며, 표준사양서[5]에도 세부 하중 시험 기준이 제시되어 있다. 표준사양서에 따르면 차체 피로에 가장 많은 영향을 미치는 수직하중은 운전 정비 상태일 때의 하중과 최대 승객 하중을 더하고, 대차의 하중을 제외한 하중에서 상하진동 가속도 1.2를 곱하고 다시 구조체 하중과 시험기 하중을 제외한 하중이 된다. 수직하중은 Fig. 1과 같이 중량물을 균등 분포시켜 차체에 가하고 차체의 응력과 처짐을 측정하여 강도를 평가하게 된다. 응력은 스트레인 게이지로 변위량은 다이얼 게이지로 측정하도록 규정되어 있다. 피로강도를 평가할 시에는 정하중 성분과 변동하중 성분을 분리하

1 한국철도기술연구원, 책임연구원

2 한국기계연구원, 책임연구원

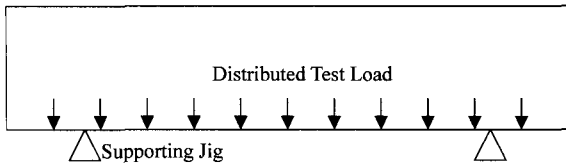


Fig. 1. Static load test

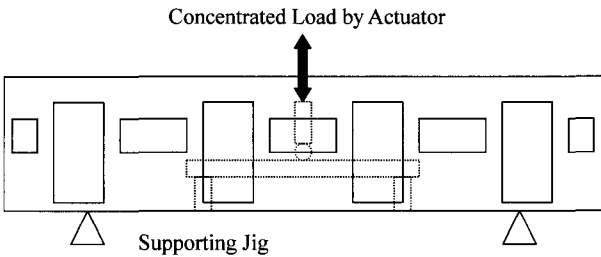


Fig. 2. Dynamic load test by Oomura

여 Goodman선도를 이용하고 있다[3]. 그러나 동하중 상태를 정하중 상태로 대체시키는 과정에는 예상치 못한 문제점들이 나타날 수 있다.

### 2.2 집중하중에 의한 동적 하중 시험

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. 그러나 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 크

기의 유압 가진기의 가진으로 대체하였다.

### 3.2 시험 설비 및 제어

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 DC제어기에 의하여 결정된 입력신호를 유압가진기의 서보밸브에 보내어 유압가진기내로 유입되는 압력에 해당되는 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.

### 3.3 시험 절차

동적 하중 시험의 절차는 Fig. 5와 같다.

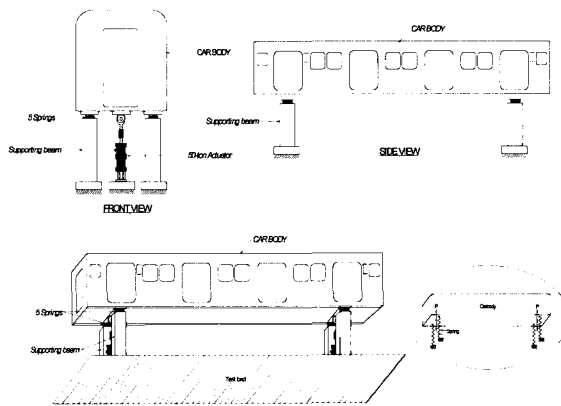


Fig. 3. Set-up for dynamic load test

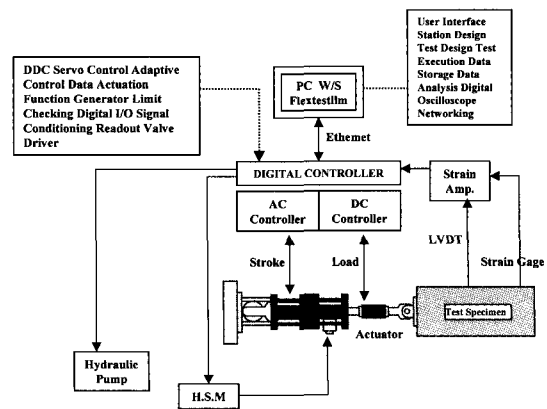


Fig. 4. System configuration of dynamic load test

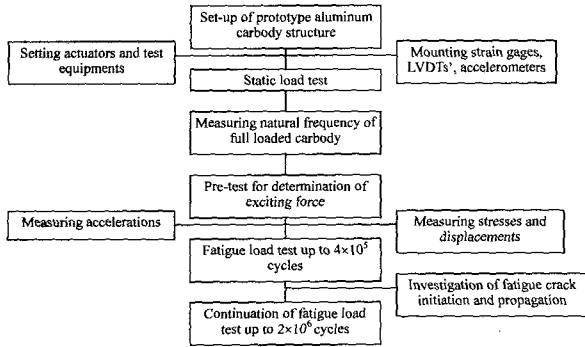


Fig. 5. Procedure for dynamic load test

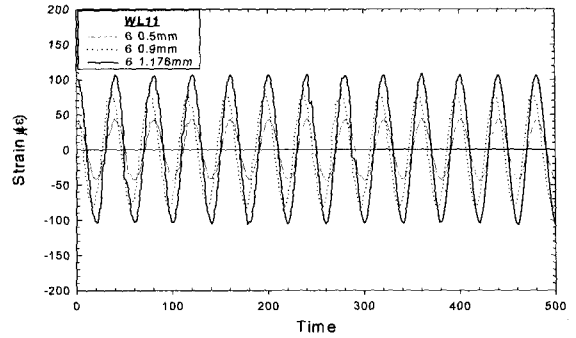


Fig. 7. Strain history during dynamic load test

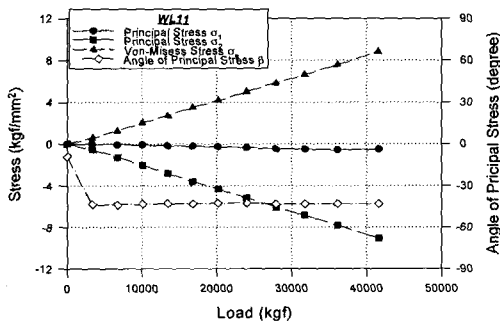


Fig. 6. Static load test results

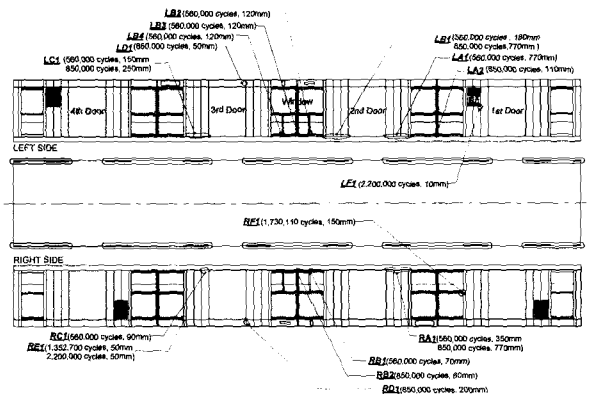


Fig. 8. Fatigue cracks occurred in the car-body

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 41.6톤이 얻어지도록 하중을 적재한다. 하중 적재 후에 응력과 변위를 측정하여 정하중 시험 결과를 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 표준사양서에 규정된 차체 변동하중[5]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.  $4 \times 10^5$  사이클에서 시험을 일단 중단하여 전반적인 균열 발생 상황을 점검하고 치명적인 균열에 대해 보수 용접을 실시한 후에 피로 하중 시험을 계속한다.

정하중 시험 결과를 표시해 보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 적재하중에 대하여 응력은 거의 선형성을 보이며, 이 중 가장 큰 응력을 받는 곳은 측정점



Fig. 9. Crack on the fillet joint of side post

WL11(창문 우측 하단 모서리)로서 응력크기는 91.9MPa ( $9.38\text{kgf/mm}^2$ )정도가 된다. 동하중 시험 중의 스트레인 변화는 Fig. 7과 같다.

시험 진행에 따라 발생한 피로 균열을 정리해 보면 Fig. 8과 같다. 초기의 피로 균열은 중앙부에서 집중적으로 발생하였음을 볼 수 있다. Fig. 9는 초기에 발생한 출입문 포켓 판넬 하부 균열을 보여 준다.

## 4. 시험 결과에 대한 분석

### 4.1 변동 응력에 대한 분석

정하중 시험에서는 변동하중 성분을  $\pm 0.2g$  고려하여 만 차 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. 10과 같이 차체 중앙부에서의 응력 변동폭과 차체 단부 근처에서의 응력 변동폭이 상당한 차이가 있음을 발견할 수 있다.

이러한 응력 진폭의 차이는 Fig. 11과 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 변동 하중을 적절하게 고려할 수 없음을 알 수 있다.

### 4.2 피로 수명에 대한 분석

차체 재질은 알루미늄 합금 A6005A T6이고, 항복강도 및 인장강도가 각각 215MPa과 245MPa이며, 연신율(elongation)이 8%이다. 발생된 피로 균열을 S-N선도 상에 표시하면 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 기호에 해당하는 위치는 Fig. 8에 제시되어 있고 실선 및 점선의 S-N곡선은 알루미늄 구조물

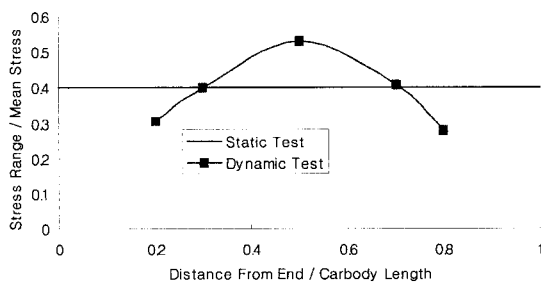


Fig. 10. Stress range along the carbody length

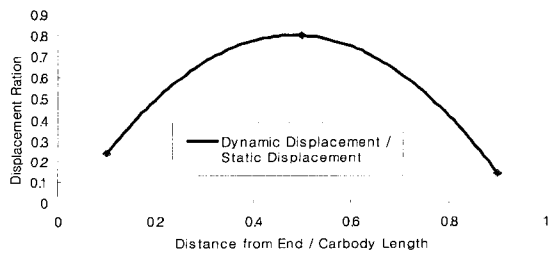


Fig. 11. Variation of displacement along the carbody length

에 대해 일반적으로 적용하고 있는 유럽 기준이다[7]. Fig. 12를 보면 시편에 대한 피로강도 곡선과 본 시험에서 얻어진 결과가 근접함을 볼 수 있다. 균열이 발생한 Fig. 9과 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.

### 4.3 시험 방법에 대한 평가

Fig. 12를 기초로 하여 Goodman선도를 그려보면 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 차체 중앙부에서 발생한 필렛 용접부의 균열에 대해 부분 용입 필렛용접부의 S-N곡선을 기초로 동적 하중 시험 결과 및 정하중 시험 결과를 나타낸 것이다. 정하중 시험 결과에서 응력 진폭(응력 변동폭의 1/2)은 평균 응력의 20%를 고려한 것이고 동적 하중 시험 결과는 실제 측정된 응력진폭이다. Fig. 13을 통해 차체 전체 길이에 걸쳐 균일한 진동 가속도를 가정한 응력 진폭을 고려하는 정

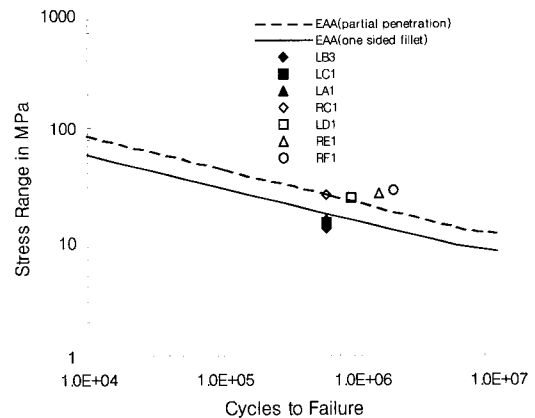


Fig. 12. S-N curves for crack points

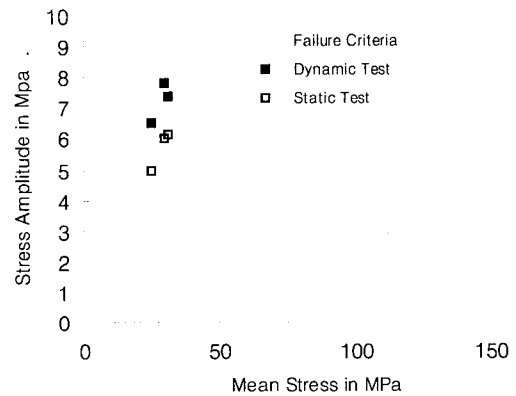


Fig. 13. Estimation for fatigue crack initiation

하중 시험 결과는 실제로 작용하는 응력 진폭에 비해 과소 평가 가능성이 있어 차체 피로 균열 발생을 사전에 예측하지 못하는 문제점이 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실제 궤도 위에서 운행 중인 차체가 받는 하중을 재현할 수 있는 동적 하중 시험 방법을 제시하고, 실제 도시철도차량 알루미늄 차체에 대해 하중 시험을 수행하여 차체 피로강도를 평가하고 분석하였다. 정하중 시험에서는 차체 운동 가속도가 일정하다고 가정하여, 균일한 동적 하중을 부가하여 하중 시험을 수행하고, 시험 결과에 기초하여 차체의 변동 응력 진폭을 가정하고 피로강도를 평가한다. 집중 하중에 의한 동적 하중 시험은 하중점 근처에서 분포 하중에 의한 응력 결과와 상당한 차이를 보이고 있어 차체의 실제 동적 상태에서의 차체 피로강도를 평가하기에는 부족한 점이 있다.

정하중 시험 결과로부터 유추한 변동 응력 분포는 동적 하중 시험에서 얻어진 변동 응력 진폭과 차이를 보이고 있으며 이는 알루미늄 차체의 탄성 효과에 따른 차체 길이 방향의 가속도 분포 차이로 사료된다. 따라서 균일한 동적 부가하중을 고려하는 정하중 시험의 개선이 필요하다고 판단된다.

용접 이음부의 상세가 유사한 시편에 대한 S-N곡선에 기

초하여 추정된 피로 수명은 실제 차체의 동적 하중 시험 결과로부터 얻어진 피로 수명과 유사한 결과를 보이고 있으며, 이에 근거하여 시편 피로강도를 이용하여 차체 피로강도를 유추하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.



1. Seo, S. I., Kim, J. T., Park, I. C., Lee, D. H. and Shin, D. S., "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, 1999, 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, 1999, pp.54-60.
3. Japanese Industrial Standards, "Test methods for static load of body structures of railway rolling stock", E7105, 1989.
4. International Union of Railways, "Loadings of coach bodies and their components", UIC 566-OR, 1993.
5. Ministry of Construction and Transportation, "Standard Specifications for Urban Transit Unit", No.1998-53, 1998, pp.173-182.
6. Oomura, K., Okuno, S., Kawai, S., Masai, K. and Kasai, Y., "Faique Test of an Actual Car Body Structure", *Journal of Japanese Mechanical Society*, Vol.58, No.545, 1992, pp.20-25.
7. European Convention For Constructional Steelwork, "European Recommendations for Aluminum Alloy Structures Fatigue Design", *ECCS Technical Committee*, 1992.