

## 도시철도차량 구조체의 수명평가에 관한 연구

정중덕\*(KRRI), 천홍정(KRRI), 한석운(KRRI)

### A Study on Life Assessment for Urban Transit Structure

J. D. Chung(KRRI), H. J. Chun(KRRI), S. Y. Han(KRRI)

#### ABSTRACT

In these days, almost urban railway vehicle has been serviced under the random load application. But it is very important that fatigue life prediction for structures is major factor of safety. So do this, it is required that fatigue assessment method for cumulative damage approach while Korea domestic regulations only has endurance limit approach. With this endurance limit approach, fatigue life prediction is impossible. In this research, it will be present that fatigue assessment for urban transit structure by using of cumulative damage approach method and related theories.

**Key Words** : Fatigue assessment (피로평가), Life prediction (수명예측), Urban transit (도시철도),

#### 1. 서론

현대의 도시에서 운행되는 철도차량의 대부분은 불규칙한 변동하중을 받고 있으므로, 기계 및 구조물의 설계 및 건전성 평가를 위해 변동하중하의 피로수명예측이 매우 중요하다. 이러한 변동하중하의 피로수명을 예측하기 위해서는 누적손상법(cumulative damage approach)을 사용한 수명계산이 필요하나 현행 국내의 철도차량 피로강도관련 규격인 KS R9210에는 내구한계법(endurance limit approach)에 의한 무한수명 판단여부만 존재하여 피로수명을 구체적으로 예측할 수 있는 기법이 존재하지 않고 있다. 통상적인 기계구조물의 피로수명평가는 누적손상을 통해 이루어지는데, 이 누적손상법의 기본이 되는 선형 손상법칙은 1924년 Palmgren에 의하여 처음으로 제안되었고, 1945년 Miner에 의하여 더욱 발전되었다. 오늘날 일반적으로 이 방법은 Miner의 법칙으로 식 (1)과 같이 알려져 있다.

$$\frac{n_i}{N_i} = \text{cycle ratio} \quad (1)$$

여기서  $n_i$ 는 응력크기  $\sigma_i$ 에서의 반복수,  $N_i$ 는 응력크기  $\sigma_i$ 에서의 피로수명이다(그림 1, 2참조).

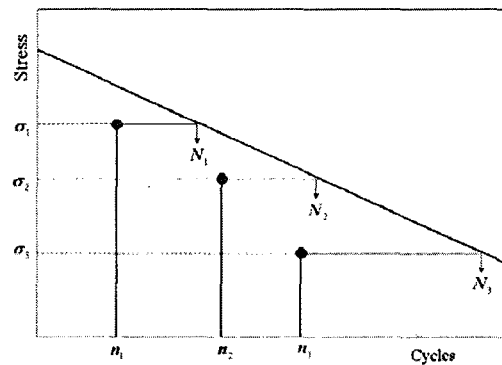


그림 1 응력 수명 선도에 있어 Miner 법칙의 효과

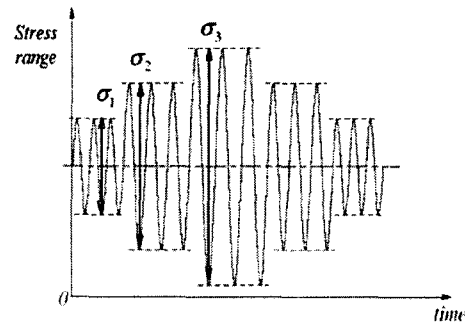


그림 2 가변진폭하중에 의한 동응력

## 2. 관련이론

손상율(damage fraction,  $D$ )은 하나 또는 일련의 과정에 의하여 사용된 수명의 비율로 정의된다. 그림 2와 같은 가변진폭하중 하에서 각각의 응력 범위( $\sigma$ )에 대하여 해당하는  $S-N$  선도 상에서의 피로한도와 실제 반복회수의 비(ratio)를 모두 합한 손상(damage) 정도가 구조물의 사용수명 동안 1(unity)을 초과하면 구조물은 피로파괴가 발생한다는 이론으로 식 (2)와 같다.

$$\text{Damage } D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \rightarrow \text{Failure} \quad (2)$$

불규칙한 변동하중에 의한 작용하중이력은 어떠한 단계의 배열에도 따르지 않고 다양한 크기의 랜덤하중분포로 이루어져 있다. 몇몇 응력크기에서의 랜덤하중 이력을 사용한 시험은 Miner의 법칙과 잘 일치된다고 알려져 있다. 현실적으로 철도선진국 대부분의 철도차량 관련 규격 및 사양서 등은 Miner 법칙에 의해 실동응력을 손상으로 환산할 것을 추천하고 있다.

## 3. 피로수명 분석

철도차량과 같이 하중이 복잡하게 변동하는 랜덤 하중하에서의 피로수명을 평가하려 할 경우, 또는 실제 랜덤하중을 간단한 프로그램 하중으로 대체하여 피로시험을 수행하려 할 경우 등에 있어서 문제가 되는 것은, 하중파형의 어떤 인자(event)를 대상으로 하여 수명을 평가하며, 하중상태를 일치시키는가 하는 것이다. 이를 해결하기 위해서 제안되고 있는 것이 하중파형 사이클 계산법(cycle counting method)으로, 그림 3과 같이 여러 분야에서 피로균열 발생까지의 수명예측에 광범위하게 사용되고 있는 Rain-flow cycle 집계방법을 사용한다. 여기에 부가하여 철도차량의 피로내구도를 검증하는 수명평가에는 용접부를 형상별로 분류하여 작성된  $S-N$  곡선과 절차가 필요하나 국내의 철도차량 관련 규격에는 이러한 절차나 자료가 없기 때문에 철도차량 용접구조물에 대해 국제적으로 사용되고 있는 BS 7608이나 EuroCode 3 또는 AWS D1.1을 사용하여 누적손상을 계산하여야 한다. 그림 4는 피로수명 산출에 사용된 BS 7608 standard basic design  $S-N$

곡선으로 생존율 97.7% (mean minus two standard deviations)에 해당하는 곡선을 나타낸 것이다. 이 규격은 현재 국내에서 사용되고 있는 철도차량의 피로강도 규격인 KS R9210에 대비하여 상당히 보수적인 관점에서 수명을 평가하기 때문에 국내에서 설계되어지고 운행되어지는 차량의 피로수명을 평가하는데 있어 충분한 타당성과 안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

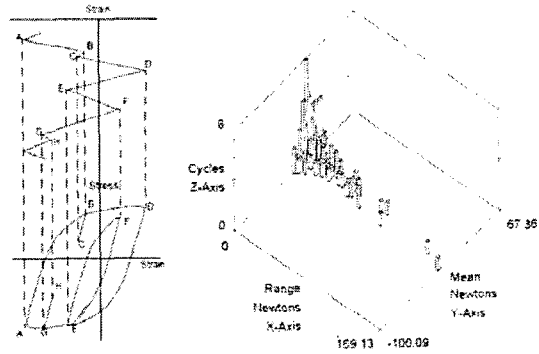


그림 3 Rain-flow cycle counting

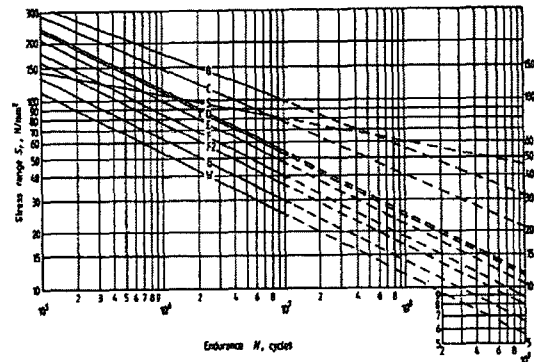


그림 4 BS 7608 standard basic design  $S-N$  curves (mean minus two standard deviations)

## 4. 결론

국내 도시철도차량 구조체의 건전성과 피로수명평가를 위해 누적손상법에 의한 구체적인 피로수명평가방법을 제안하였으며 향후 이에 대한 관련 규격개정과 국내현실에 부합하는 연구가 필요하다

## 참고문헌

1. Julia A. Bannantine, Fundamentals of metal fatigue analysis, Prentice-Hall, Inc., 1990.
2. BS7608:1993, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures. BSI.