

〈학술논문〉

가속수명시험을 위한 KTX 구조물의 S-N 선도 추정

정달우[†] · 최낙삼* · 박수한**

S-N Curve Estimation of a KTX Structure for an Accelerated Life Testing

Dal-Woo Jung, Nak-Sam Choi and Su-Han Park

Key Words: Rainflow Counting(레인플로우 집계), Accelerated Life Testing(가속내구시험), Miner's Rule(누적손상법), S-N Curve Estimation (S-N선도 추정), 등가하중(equivalent stress)

Abstract

An accelerated fatigue test is essentially required to maintain the reliability of the actual structure of KTX under operation conditions. However, actual fatigue life cannot be obtained if specimens are not adequate to the conventional fatigue test. Moreover component maker did not provide data of loading stress (S) - cycles at the failure (N). In this study, we suggest a prediction method of the S-N curve for establishing an accelerating test under various load levels. Load history was acquired from the field tests. A Rainflow method was used on the cycle counting of the field load data, and then, an S-N curve was obtained through the iteration process under the condition that the damage index satisfies to 1 in the Miner's rule.

1. 서 론

반복하중을 받는 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 내구성시험(durability test)에 의한 피로수명 평가가 필요하다. 특히 인명과 관련된 비행기, 선박, 철도와 같은 운송수단의 경우 피로수명평가에 대한 중요성이 더욱 크다. 그러나 대부분의 이러한 구조물들은 장수명으로 설계되었기 때문에 피로시험에 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 경제적으로 이들의 수명을 평가하기 위하여 합리적인 가속수명시험(accelerated life testing, ALT)이 필요하다.⁽¹⁻¹⁰⁾

현재 국내에서 운용되고 있는 KTX(한국형고속철도)의 경우 소모성 부품의 대부분을 제작국인 프랑스에서 수입하고 있다. 이 부품들은 프랑스 현지의 운용환경을 기준으로 설계되어 한국의 실정과는 맞지 않기 때문에 몇몇 부품들은 제작사에서 제시하는 보증기간보다 훨씬 짧은 기간동안 사용되어지고 있다. 또한 제작사 측에서는 부품에 대한 물성데이터(재질, 물성치, S-N 선도 등)를 제공하지 않기 때문에 한국 실정에 맞는 부품의 수명을 평가하는데 많은 어려움이 있다. 이렇듯 제작사에서 제공한 교체주기 및 안전관리 지침의 항목들을 한국에서는 사용할 수 없기 때문에 현장 작업자들이 일일이 전수 검사하여 부품을 관리하고 있는 실정이다. 객관적인 품질기준을 확보하기 위해서는 기초 물성시험 및 피로시험을 수행해야 하지만, 부품의 가격이 매우 고가이며 충분한 시험편을 확보하기 힘들고, 더구나 기초물성 데이터가 없기 때문에 가속수명시험 자체가 불가능한 상태이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과
* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영학부
E-mail : jungdalwoo@hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5283 FAX : (031)406-7063
** (주) 알에스피

다년간의 현장 운용으로 축적된 부품수명 데이터와 실차실험을 통하여 획득한 하중이력을 이용하여 KTX 구조물의 기초 물성 및 하중(S)-고장시 누적사이클수(N) 선도를 역으로 추정하고, 이를 통한 가속내구시험 조건을 도출하고자 한다.

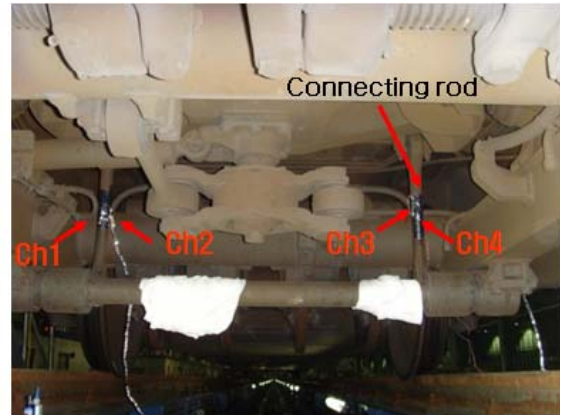
2. 하중이력 측정 및 신호처리

2.1 하중이력 측정장치 구성

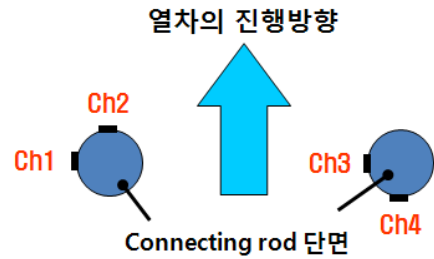
한국형 고속열차가 운행중에 받는 하중이력을 측정하기 위하여 서울과 부산을 운행하는 실제 KTX 열차를 시험대상으로 하였다. 열차 하부 구조물의 커넥팅로드(connecting rod)에 스트레인 게이지(strain gauge) 4개를 장착하여 운행에 따른 변형률이력을 측정하였다. Fig.1 은 실차에 스트레인 게이지를 부착한 사진과 스트레인 게이지의 배치도를 나타낸다. 일교차에 따른 오차는 온도 보정을 통해 제거하였으며, 샘플링속도 1500Hz로 계측된 데이터는 해석의 효율을 고려하여 10Hz로 재생하였다. 또한 변형률이력을 피로수명평가에 적합한 하중이력으로 변환하기위해 실차실험에서 사용한 하부구조물을 스트레인 게이지가 붙어있는 원형상태로 분리하여 하중-변형률의 정적시험을 별도로 수행하였으며, 이를 통해 서울-부산간의 변형률 이력곡선을 하중이력곡선으로 변환하였다.

2.2 하중이력 측정결과

Fig.2는 부산역과 서울역 사이를 운행할 때 실차실험을 통해 획득된 하중이력을 나타낸다. 동일한 부위에 장착된 4개의 스트레인 게이지에서 획득한 각각의 데이터는 스트레인 게이지가 설치된 좌우 위치에 따라 서로 위상만 180° 차이가 날뿐, 신호의 강도는 모두 동일한 결과를 보였다. 따라서 시간에 따른 절대하중의 분포가 전 영역에서 유사하게 나타나므로 4개의 신호 중에서 어떠한 신호를 선택하더라도 KTX 하부 구조물에 걸리는 대표적인 하중신호로 간주 할 수 있다. 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 한 개의 신호를 선택하여 S-N 선도 추정을 위한 입력하중으로 선정하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Configuration of experimental setup for load history monitoring : (a) strain gauges adhered on the connecting rod, (b) schematic of the locations of gages in (a).

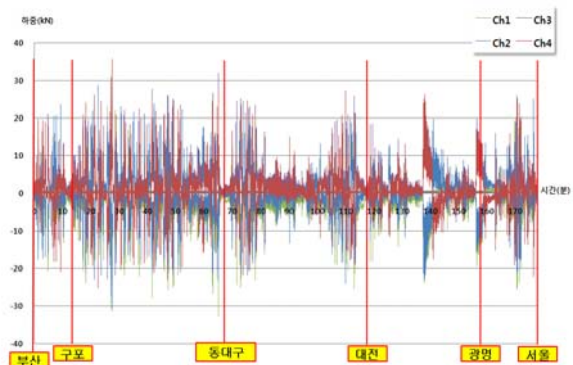


Fig. 2 Load history from Busan to Seoul station.

2.3 사이클 카운팅

가변하중을 받는 구조물의 수명을 예측하기 위해서는 복잡화된 하중이력을 몇 개의 단순화된 하중이력으로 줄이는 사이클 카운팅(cycle counting)을 수행해야 한다. 본 연구에서는 연속효과(sequence effects)를 잘 모사하는 레인플로우 카운팅(rainflow counting)법을 사용하여 불규칙한 하중이력을 분석하였다. Fig. 2에 나타난 하중이력

을 분석하기 위해서 상용 프로그램인 Matlab 6.0을 이용하여 레인플로우 카운팅 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램은 ASTM E1049의 예제를 통해 검증하였다.

3. S-N 선도 추정

3.1 고장모드 및 피로파괴의 가정

가속내구수명의 시험조건을 도출하기 위해서는 S-N 선도가 필요하다. 하지만 본 연구의 경우 하중이력과 현장에서 제시한 부품의 수명을 통해 S-N 선도를 역으로 추정해야 하므로 부품의 수명에 대한 정의가 필요하다. 다년간의 실제 운용경험을 통해 얻은 부품의 수명은 60만km이며 이는 서울-부산을 1439회 운행한 것과 동일하다. 따라서 실차실험을 통해 획득한 Fig. 2와 같은 하중이력이 1439회 반복 되었을 때 부품의 수명이 끝난다고 가정한다. 또한 운행거리에 따른 부품의 누적손상율은 선형적이라 가정한다.

3.2 구조물의 Damage 계산

변동하중이력에 의한 KTX 구조물의 Damage를 계산하기 위해서 선형누적손상이론인 Miner's rule을 사용하였다. Miner's rule은 각 응력에서의 사이클 반복수(n_i)와 그때의 피로수명(N_i)의 비의 합이 1이 될 때 피로파괴가 발생한다는 이론이다. 재료의 피로파괴특성에 따라 Miner's rule의 예측 정확도를 높이기 위해 0.5 ~ 2 범위 내에서 상황에 맞는 다양한 Damage 계수(D)를 사용하기도 하지만, 본 연구에서는 기초적인 데이터가 없는 상태에서 S-N 선도를 추정하기 때문에 어떠한 선행 예측을 하지 않은 보통의 Damage 계수인 1을 사용한다. Miner's rule의 수식은 식 (1)과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \quad (1)$$

3.3 평균응력 및 최대인장하중 가정

실차실험을 통해 획득한 KTX의 하중이력은 완전교변응력이 아니기 때문에 평균응력을 고려해 주기 위해 Goodman 선도를 사용하였다. Goodman 선도를 사용하기 위해서는 인장강도 (S_u)의 값을 알아야 하나 본 연구의 대상이 되는 구조물의 경

우 기초물성데이터가 없기 때문에 인장강도 또한 추정해서 대입해야 한다. S-N 선도에서 사이클 횟수 1회일때의 파괴하중이 정적 인장하중 이므로 식 (2)과 같이 S-N선도 회귀식에 사이클수(N) 1을 대입하여 최대인장하중을 가정한다.

$$S_u = 10^a \cdot 1^b \quad (2)$$

3.4 S-N 선도 추정 계산과정

Fig. 3은 S-N 선도 추정을 위한 반복 계산과정을 나타낸다. S-N 선도를 추정하기 위해서는 우선 식 (3)과 같은 임의의 S-N 선도를 가정한다. 가정한 임의의 회귀식과 사이클 카운팅을 통해 획득한 하중이력으로부터 각각의 하중에 따른 수명을 계산하고, 이때 누적손상율 D의 합이 1을 만족하는지 여부를 판단한다. D가 1을 만족하지 않을 경우 처음 가정한 S-N 선도 회귀식이 Miner's rule을 만족하지 않는 것이므로 피드백 과정을 거쳐 최종적으로 D=1가 만족할 때 까지 반복 계산을 통해 S-N 선도 계수 a, b를 추정한다. 이러한 과정을 거쳐 Miner's rule을 만족하는 S-N 선도를 얻게 된다.

$$S = 10^a \cdot N^b \quad (3)$$

선도 추정을 위한 피드백 계산은 Excel과 Visual Basic을 이용하여 Fig. 3의 전 과정을 자동으로 수행하도록 프로그래밍 하였다.⁽¹¹⁾

3.5 등가하중 계산

3.4절의 계산과정을 통해 최종적으로 얻은 S-N 선도는 Fig. 4에 나타낸다. 이때의 a값은 7.21, b는 -0.93이다. 이 결과를 통해 가변하중인 KTX의 하중이력을 실험실에서 재현할 수 있도록 동등한 일정진폭하중인 등가하중(equivalent stress, S_{eq})으로 변환하고자 한다. 등가하중은 S-N선도 추정 결과를 식(4)에 대입하여 구할 수 있다.

$$S_{eq} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n S_{aj}^\alpha n_j}{\sum_{j=1}^n n_j} \right]^{1/\alpha} \quad (4)$$

여기서 $a = -1/b$ 이다.

즉, 실차 실험을 통해 획득한 하중이력에 대한 등가하중은 4.43×10^7 사이클에서 1.25kN였다.

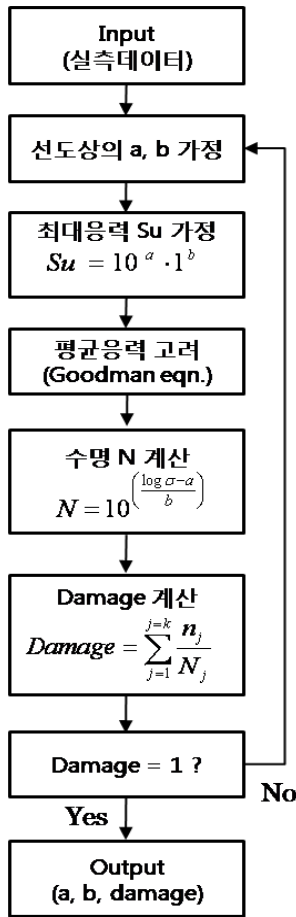


Fig. 3 Analysis algorithm for S-N curve estimation

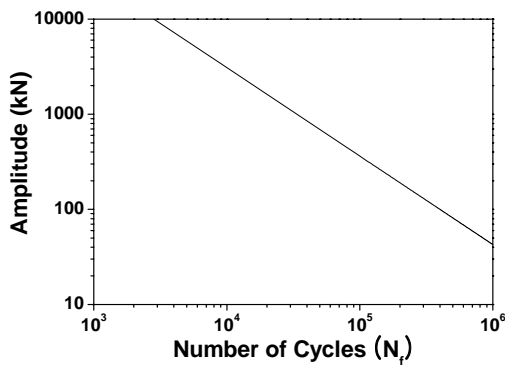


Fig. 4 Estimated S-N Curve of a KTX component

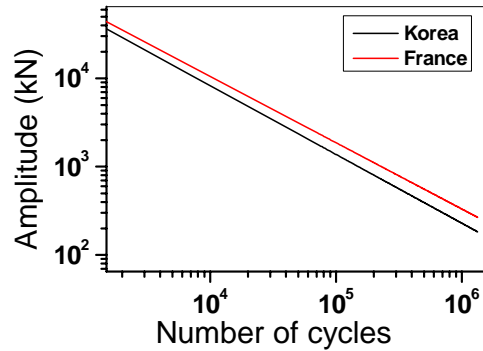


Fig. 5 Comparison of the estimated S-N curves obtained from the load histories in Korea and France

4. 가속수명시험 모델

본 연구에서 구한 등가하중의 경우 피로시험에 필요한 사이클수가 4.43×10^7 이다. 열차 구조물의 특성상 시험편의 크기가 대단히 크고, 또한 피로시험 속도가 1~3Hz에 불과하므로 시험시간과 비용이 매우 많이 들게 된다. 따라서 이에 대한 가속수명시험 조건이 반드시 필요하다.

피로시험 조건에서 하중이력의 변동에 따른 내구수명 편차가 다른 설계인자에 의한 편차에 비해 수명에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 또한 국내 고속철도의 경우 일부 구간이 기존철로(비고속화 철로)로 구성되어 있기 때문에 설계시 고려되었던 하중보다 더 큰 하중을 받고 있으며, 이에 따라 KTX 구조물의 수명이 설계수명보다 짧아지게 될 수 있다.⁽¹³⁾ 기존철로와 고속 전용철로가 혼합된 한국의 경우와 고속 전용철로로만 이루어진 프랑스의 경우를 하중이력만을 비교하여 본 연구에서 제시한 추정법을 통해 S-N 선도를 구해 본 결과, Fig. 5와 같이 기존선이 혼합된 한국고속철도 KTX의 내구수명이 프랑스 고속철보다 확실히 짧았음을 알 수 있었다. 이를 통해 하중이력의 차이가 KTX의 피로해석에서 가장 민감한 변수임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 하중조건만을 가속인자로 고려했다.

가속수명 조건은 하중조건만을 고려하였기 때문에 역누승법(inverse power law)을 사용하였다.

역누승식은 식(5)에 나타낸다.

$$\frac{\text{Life at normal stress}}{\text{Life at accelerated stress}} = \left(\frac{\text{Accelerated stress}}{\text{Normal stress}} \right)^\alpha \quad (5)$$

본 연구에서 추정된 S-N 선도의 결과를 식 (5)에 대입하여 가속조건을 도출하였으며, 이때의 역누승지수 α 는 1.075이다. 가속 실험을 수행해 본 결과, 현장에서 발생하는 고장모드(failure mode)를 $10^3 \sim 10^7$ 사이클 범위에서 비교적 잘 모사하고 있음을 알았다.

4. 결 론

본 연구에서는 기초물성데이터가 존재하지 않는 KTX 구조물을 대상으로 가속수명시험 조건을 도출해 내기위한 S-N 선도 추정법을 제시하였다. 피로해석을 위한 입력하중인 고속열차의 하중이력은 실차실험을 통해 획득하였으며, rainflow counting 법으로 사이클 집계하였다. 선형손상이론인 Miner's rule을 이용하여 누적손상을 $D=1$ 을 만족하는 S-N 회귀식을 반복계산을 통해 추정하였다. 추정된 S-N 회귀식을 역누승법에 대입하여 가속수명시험 조건을 도출하였으며, 가속수명시험을 수행한 결과 $10^3 \sim 10^7$ 사이클 범위에서 구조물의 파괴모드를 잘 모사하였다.

참고문헌

(1) Kang Yong Lee, Byung Hwa Park and Deuk Yong Lee, 2003, "Program Development for the Determination of Equivalent Load for Accelerated Fatigue Testing and the Estimation of Fatigue Life," *Korean Society for Railway*, Vol. 6, No. 4, pp. 265~272.

(2) G. Allegri and X. Zhang, 2008, "On the inverse power laws for accelerated random fatigue testing," *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, No. 6, pp. 967-977

(3) Yang, J. N. and Jones D. L., 1980, "Effect of

Load Sequence on the Static Fatigue of Composite," *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 12, pp. 1525~1531.

(4) Guangxu Cheng and Alan Plumtree, 1998, "A Fatigue Damage Accumulation Model Based on Continuum Damage Mechanics and Ductility Exhaustion," *International Journal of Fatigue*, Vol. 16, No. 4, pp. 287~293.

(5) K. Staevski and D. Chankov, 1995, "A Comparative Analysis of Accelerated Methods for Fatigue Life and Reliability Prediction of Machine Parts under Variable Loading," *Journal of Material Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 30~39.

(6) X. Yang, W. Yao and Y. Chen, 2002, "Application of Accelerated Fatigue tests to Study Calendar Life on Airplane Structure," *Corrosion Science and Protection Technology*, Vol. 14, No. 3, pp.172~174

(7) R. H. Salzman and S. M. Reaburn, 2001, "Probabilistic Modelling for Timing Belt Fatigue Life Predictions using Accelerated Testing," *International Journal of Materials & Product Technology*, Vol. 16, No.4-5, pp. 446~461.

(8) R. I. Stephens, P. M. Dindingert and J. E. Gungert, 1997, "Fatigue Damage Editing For Accelerated Durability Testing using Strain Range and SWT Parameter Criteria," *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, No. 8-9, pp. 599~606.

(9) C. Zhang, I. Chuckpaiwong, S. Y. Liang and B. B. Seth, 2002, "Mechanical Component Lifetime Estimation Based on Accelerated Life Testing With Singularity Extrapolation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 16, No. 4, pp. 705~718

(10) W. B. Nelson, 2004, "Applied Life Data Analysis," *John Willey & Sons*.

(11) Wayne L. Winston, 2004, "Microsoft Excel Data Analysis and Business Modeling", *Microsoft press*

(12) seong Hun Chu, Sung Hyo Son, Young Il Ryu, Seung Jin Hea, Hong Jae Yim, 2005, "A Study on Various Factors of Fatigue Analysis for

Knuckle," *Korean Society of Automotive Engineers*, KSAE05, F0259, pp. 1639~1645.

- (13) Youn Jung Kim, Jeong Heum Choi, Dong Chul Han, Young Gukk Kim, 2005,"The Study on Wheel Wear Analysis in UIC60 and KS50N of Korea High Speed Railway," *Korean Society for Railway*, Vol. 2005, No. 0, pp. 1~6.