

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.388

가속수명시험을 위한 KTX고속열차 구조물의 S-N 선도 추정

정달우[†] · 최낙삼* · 박수한**

(2009년 1월 22일 접수, 2009년 3월 20일 수정, 2009년 3월 25일 심사완료)

S-N Curve Deduction of a KTX High-Speed Train 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(가속수명시험), Miner's Rule(누적손상법), S-N Curve Deduction(S-N선도 추정), Equivalent Stress(등가하중)

Abstract

An accelerated fatigue test is essentially required to maintain the reliability of the actual structures of KTX under operation conditions. However, actual fatigue life cannot be obtained because the conventional fatigue tests are not adequate to the real load conditions. Moreover foreign component makers have not provided data of the loading stresses (S) versus cycles at the failure (N). In this study, we suggested a deduction 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. After that, 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. The deduced S-N curve was applied to the performance evaluation of Korean-made sealed knuckles compared with imports.

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.⁽¹⁻¹¹⁾

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 주기로 부품교체가 이루어지고 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

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영학부

E-mail : nschoi@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 가속피로시험 조건을 도출하고자 한다.

2. 하중이력 측정 및 신호처리

2.1 변형률이력 측정장치 구성

한국형 고속열차가 운행중에 받는 하중이력을 측정하기 위하여 서울과 부산을 운행하는 실제 KTX 열차로서 승객이 만차의 약 2/3 상태로 되는 일자에 운행하는 차량을 시험대상으로 하였다. Fig. 1은 실차에 스트레인 게이지를 부착한 사진과 스트레인 게이지의 배치도를 나타낸다. 열차 하부 구조물의 커넥팅로드(connecting rod)에 스트레인 게이지 4개(그림에서 ch1, ch2, ch3, ch4)를 장착하여 운행에 따른 각 게이지에서의 변형률이력을 측정하였다. 일교차에 따른 오차는 온도보정을 통해 제거하였으며, 샘플링속도 1500 Hz로 실측된 데이터는 해석의 효율을 고려하여 10 Hz로 재생처리하였다.

2.2 변형률-하중 변환

스트레인 게이지를 통해 획득한 변형률이력을 피로수명평가에 적합한 하중이력으로 변환하기 위해 실차실험에서 사용한 하부구조물을 스트레인 게이지가 붙어있는 원형상태로 분리하여 하중-변형률의 정적시험을 별도로 수행하였다. Fig. 2(a)는 KTX구조물에 스트레인 게이지가 부착된 상태의 커넥팅로드 부품이며, Fig. 2(b)는 유압피로시험기를 이용하여 하중의 증감에 따른 변형률의 변화를 알아보는 변형률-하중 변환실험을 나타낸다. Fig. 3과 같은 변형률-하중 변환시험결과를 통해 식 (1)과 같은 변형률-하중 변환결과식을 구했다.

$$y = -3^{-13}x^5 - 4^{-10}x^4 + 6^{-8}x^3 + 2^{-5}x^2 + 0.119x + 1.32 \quad (1)$$

이 관계식을 이용하여 변형률이력측정값을 하중이력으로 변환하였다.

2.3 하중이력 측정결과

Fig. 4는 부산역과 서울역 사이를 운행할 때 실차실험을 통해 획득된 하중이력을 나타낸다. Fig.

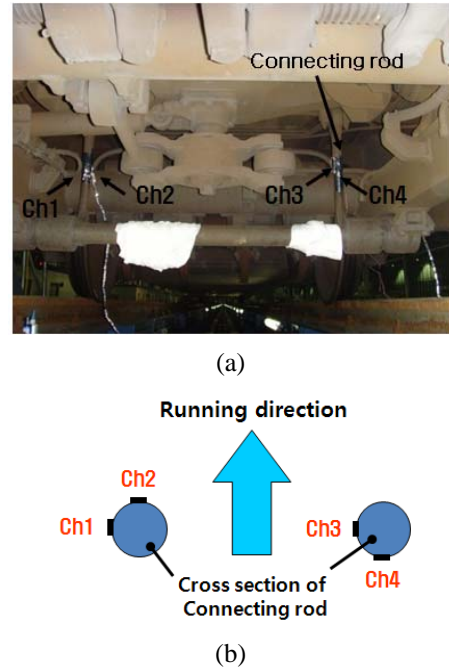


Fig. 1 Configuration of experimental setup for load history monitoring : (a) photos of strain gauges adhered on the connecting rod in the actual KTX, (b) schematic of the locations of gages in (a)

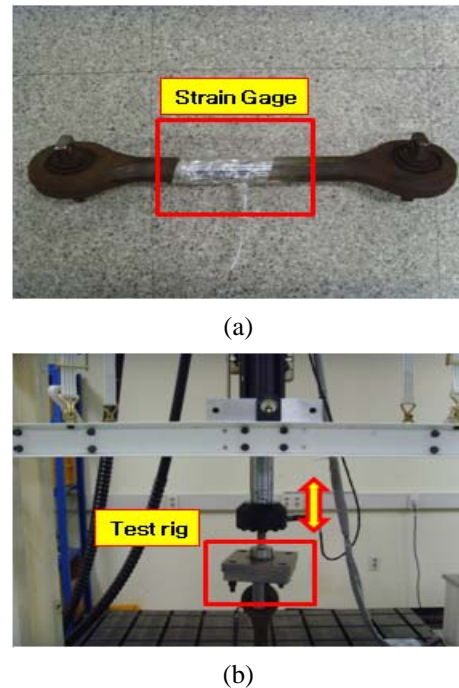


Fig. 2 Experimental setup for strain-load conversion : (a) a connecting rod specimen extracted from the tested KTX, (b) gripping parts of the specimen in the hydraulic fatigue test machine

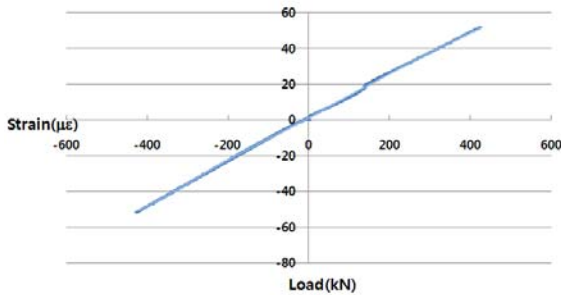


Fig. 3 Load-strain curve for the conversion to load history

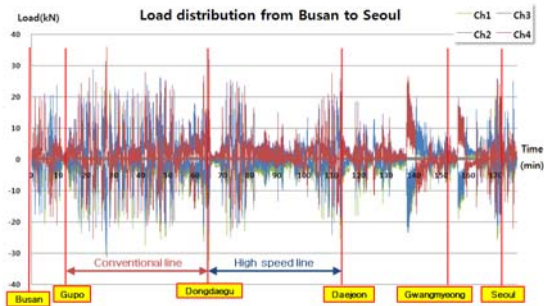
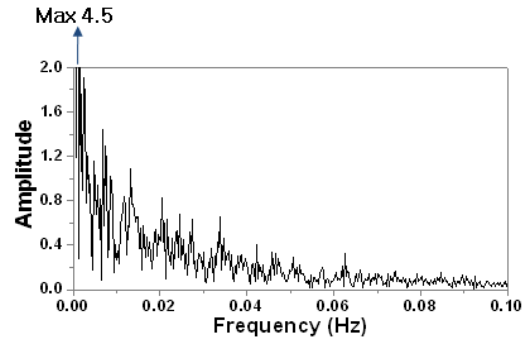


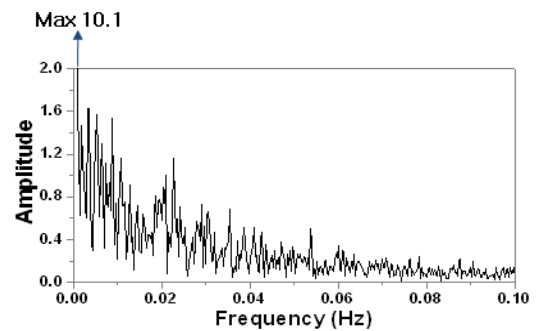
Fig. 4 Load history from Busan to Seoul station

1의 부위에 장착된 4개의 스트레인 게이지에서 획득한 각각의 데이터는 스트레인 게이지가 설치된 좌우 위치에 따라 서로 위상만 180° 차이가 날뿐, 신호의 강도는 거의 유사한 결과를 보였다. 즉, 시간에 따른 절대하중의 분포가 전 영역에서 유사하게 나타나므로 4개의 신호 중에서 어떠한 신호를 선택하더라도 KTX 하부 구조물에 걸리는 대표적인 하중신호로 간주 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 한 개의 신호를 선택하여 S-N 선도 추정을 위한 입력하중으로 선정하였다.

Fig. 4에서 고속화구간(대전-동대구)과 비고속화구간(동대구-구포)의 하중이력을 비교해 보면, 고속화 구간의 경우 선로의 대부분이 직선화 구간으로 이루어져 있어서 비고속화 구간보다 낮은 진폭의 하중이 비교적 넓게 분포함을 보인다. 반면에 비 고속화 구간의 경우 열차의 운행속도가 고속화 구간에 비해서 약 100 km/h 정도만큼 낮았음에도 불구하고 곡선구간이 상대적으로 많고 또한 선로도 기존에 사용하던 일반선로를 사용하기 때문에 높은 하중의 분포가 고속화 구간에 비해 전반적으로 크게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5 FFT frequency spectral analysis results of the KTX loading history curves in Fig.4: (a) high speed service zone, (b) low speed conventional service zone

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 고속화구간과 비고속화구간의 하중이력을 FFT 변환한 결과를 나타낸다. 고속화, 비고속화구간의 FFT 분석결과 KTX운행에 따른 진동주파수를 계측하여 보면, 대부분의 진폭신호는 0.6 Hz 이하의 영역에서 나타나며, 주파수 0.7 Hz 이상에서는 거의 0.1 이하의 미소한 진폭을 보인다. 따라서 고속화, 비고속화구간 모두 기존에 알려진 KTX고속열차의 주요 구조물들의 공진주파수인 1~80 Hz^(12,13)가 실제의 진동에 영향을 미치지 않는 것이다. 하지만 비고속화 구간의 경우 FFT 결과를 보면 진폭 1.0 이상의 주파수 성분이 고속화 구간의 경우보다 1.5~2배 정도 더 많이 분포하고 있다. 이는 KTX고속열차의 수명에 악영향을 끼치는 주행시의 진동이 비고속화 구간에서 1.5배이상 크게 발생하고 있음을 나타내는 것으로, 고속화 구간만을 상정하여 설계된 KTX 구조물의 내구수명을 짧게 만드는 주원인이라 사료된다.

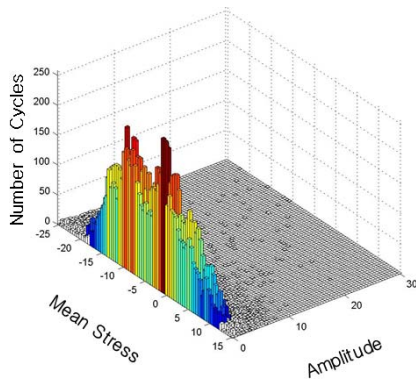


Fig. 6 Cycle counting result of load history in Fig. 4 using rainflow counting method

2.3 싸이클 카운팅

가변하중을 받는 구조물의 수명을 예측하기 위해서는 복잡화된 하중이력을 몇 개의 단순화된 하중이력으로 줄이는 싸이클 카운팅(cycle counting)을 수행해야 한다. 본 연구에서는 연속효과(sequence effects)를 잘 모사하는 레인플로우 카운팅(rainflow counting)법을 사용하여 불규칙한 하중이력을 분석하였다. Fig. 4에 나타낸 하중이력을 분석하기 위해서 상용 프로그램인 Matlab 6.0을 이용하여 레인플로우 카운팅 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램은 ASTM E1049⁽¹⁴⁾의 예제를 통해 검증하였다. Fig. 6은 본 하중이력의 하중진폭과 평균하중에 대한 레인플로우 카운팅 결과이다.

3. S-N 선도 추정

3.1 고장모드 및 피로파괴의 가정

가속피로수명의 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. 한국에서 다년간의 실제 운용경험을 통해 얻은 부품의 교체수명은 운행거리로 환산하여 60만 km로 알려져 있으며 이는 서울-부산을 1439회 운행한 것에 상당한다. 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 예측정확도를 높이기 위해 Damage 계수(D)를 0.5 ~ 2 범위 내에서 상황에 맞게 선택하기도 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 (2)과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \tag{2}$$

3.3 평균응력 및 최대인장하중 설정

실차실험을 통해 획득한 KTX고속열차의 하중이력은 완전교변응력이 아니기 때문에 평균응력을 고려한 Goodman 선도를 사용하였다. Goodman 선도를 사용하기 위해서는 인장강도 (S_u)의 값을 알아야 하나 본 연구의 대상이 되는 구조물의 경우 기초물성데이터가 없기 때문에 인장강도 또한 추정해서 대입해야 한다. S-N 선도에서 싸이클 횟수 1회일때의 파괴하중이 정적 인장하중이므로 식 (3)과 같이 S-N선도 회귀식에 싸이클수(N)=1을 대입하여 최대인장하중을 설정한다.

$$S_u = 10^a \cdot 1^b \tag{3}$$

3.4 S-N 선도 추정 계산과정

Fig. 7은 S-N 선도 추정을 위한 반복 계산과정을 나타낸다. S-N 선도를 추정하기 위해서는 우선 식 (4)와 같은 임의의 S-N 선도를 가정한다. 가정한 임의의 회귀식과 싸이클 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 때까지 반

복 계산을 통해 S-N 선도 계수 a, b를 추정한다. 이러한 과정을 거쳐 Miner's rule을 만족하는 S-N 선도를 얻게 된다.

$$S = 10^a \cdot N^b \quad (4)$$

S-N선도 추정을 위한 피드백 계산은 Excel과 Visual Basic을 이용⁽¹⁵⁾하여 Fig. 7의 전 과정을 자동으로 수행하도록 프로그래밍하였다.

3.5 등가하중 계산

3.4절의 계산과정을 통해 최종적으로 얻은 S-N 선도는 Fig. 8에 나타난다. 이때의 a값은 7.21, b는 -0.93이다. 이 결과를 통해 가변하중인 KTX고속열차의 하중이력을 실험실에서 재현할 수 있도록 동등한 일정진폭하중인 등가하중(equivalent stress, S_{eq})으로 변환하고자 한다. 등가하중은 S-N 선도 추정 결과를 식 (5)에 대입하여 구할 수 있다.

$$S_{eq} = \left[\frac{\sum_{j=1}^k S_{aj}^\alpha n_j}{\sum_{j=1}^k n_j} \right]^{1/\alpha} \quad (5)$$

여기서 $\alpha = -1/b$ 이다. 예를 들어, 실차 실험을 통해 획득한 하중이력에 대한 등가하중은 4.43×10^7 사이클수에 1.25 kN였다.

4. 가속수명시험 모델

본 연구에서 구한 등가하중 1.25 kN을 피로시험시에 이용할 경우 누적 사이클수가 4.43×10^7 으로 된다. KTX 구조물의 특성상 시험편의 크기가 대단히 크고, 또한 피로시험 속도가 1~3 Hz에 불과하므로 시험시간과 비용이 매우 많이 들것이다. 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.⁽¹⁶⁾ 또한 국내 고속철도의 경우 일부 구간이 비고속화된 기존철도로 구성되어 있기 때문에 설계시 고려되었던 하중보다 더 큰 하중을 받고 있으며, 이에 따라 KTX 구조물의 수명이 설

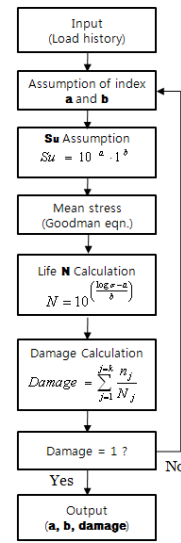


Fig. 7 Analysis algorithm for S-N curve estimation

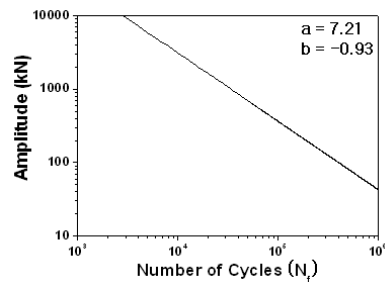


Fig. 8 A suggested S-N Curve of a KTX component deduced in this study

계수명보다 짧아지게 될 수 있다.⁽¹⁷⁾ 비고속철로와 고속전용철로가 혼합된 한국의 하중이력 분포와 고속 전용철로로만 이루어진 프랑스의 하중이력 분포⁽¹⁸⁾를 Table 1에 비교하여 나타낸다. 이 하중분포의 차이가 KTX 구조물의 수명곡선에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 하중-진폭 분포성분을 제외한, 나머지 조건(주파수 성분, 사용 환경, 운행거리당 Damage 누적손상을 등)은 동일하다는 가정 하에 본 연구에서 제시한 추정법을 이용하여 S-N 선도를 구해 Fig. 9에 나타내었다. 기존선이 혼합된 KTX고속열차의 피로수명이 TGV고속열차보다 Fig. 9와 같이 확실히 짧았음을 알 수 있었다. 이를 통해 하중이력의 차이가 KTX의 피로해석에서 민감한 변수임을 알 수 있

Table 1 Comparison of load distributions between France TGV and Korea KTX

Load (kN)	France	Busan → Seoul	Yongsan → Kwangju
0 ~ 8	35%	17.4%	13.7%
8 ~ 15	50%	70.8%	73.8%
15 ~ 30	13%	11.6%	12.0%
30 ~ 40	2%	0.2%	0.5%
40 ~	-	Under 0.02%	Under 0.01%

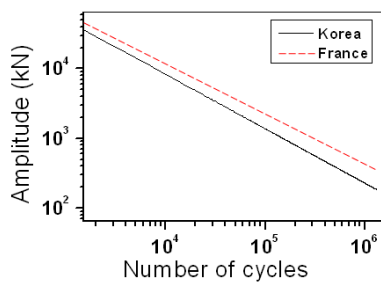


Fig. 9 Comparison of the deduced S-N curves obtained from the load histories in KTX and TGV

다. 따라서 본 연구에서는 하중조건만을 가속인자로 고려하였기 때문에 역누승법(inverse power law)을 사용하였다. 역누승식은 식 (6)에 나타난다.

$$\frac{\text{Life at normal stress}}{\text{Life at accelerated stress}} = \left(\frac{\text{Accelerated stress}}{\text{Normal stress}} \right)^\beta \quad (6)$$

본 연구에서 추정한 S-N 선도의 결과를 식 (6)에 대입하여 가속조건을 도출하였으며, 이때의 역누승지수 β 는 1.075이다. 본 연구의 경우 가속수명조건에 하중만을 고려하였기 때문에 역누승지수 β 의 값은 식 (5)의 α 의 값과 동일하다.

일반적으로 재료의 피로시험결과를 통해 가속수명시험에 적용하는 파괴사이클 수는 $10^3 \sim 10^7$ 사이클 범위로 정하므로 본 연구에서 추정한 S-N 선도도 이 범위에서 가속시험이 가능하다고 가정한다. 본 실험에서 사용한 커넥팅로드 끝부분에 연결된 실드너클(sealed knuckle)부품은 열차운행중에 마모피로를 받게 되는데 이에 따라 현재 2년주기로 부품을 교체하고 있다. 이 부품을 국산화하여 Fig. 10과 같이 마모피로가

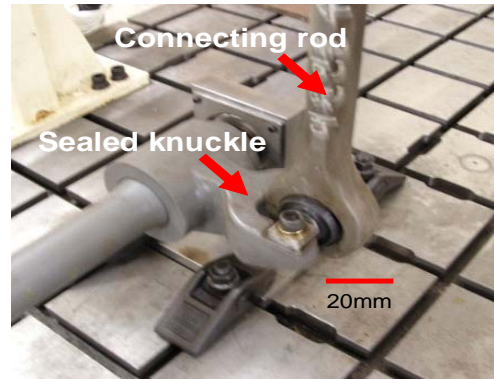


Fig. 10 Accelerated wear-fatigue life testing of sealed knuckle component of KTX train by hydraulic fatigue test machine

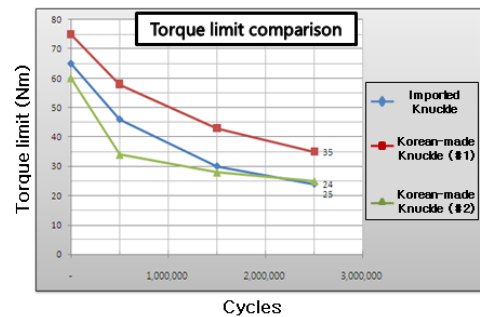


Fig. 11 Torque limit comparison between imported and Korean-made sealed knuckles evaluated through accelerated wear-fatigue life testing conditions given by the deduced S-N curve of equations (5) and (6)

속실험을 수행하였다. 3.1절에서 서술한 바와 같이 서울-부산을 운행하는 총 거리 60만 km (운행횟수 1439회)를 교체수명으로 간주함으로써 상기의 식 (5)와 (6)을 구하였으므로, 이를 이용하여 커넥팅로드에 걸리는 가속시험조건을 250만 정현파사이클, 가속하중 ± 18.2 kN, 작동주파수 3 Hz으로 적용하였다. 이 가속시험조건으로 프랑스에서 수입한 실드너클부품과 이를 국산화한 개선품 2종류에 대한 잔여 토크성능을 비교 분석하여 Fig. 11에 나타내었다. 실드너클의 경우 마모가 진행될수록 토크가 줄어들기 때문에 실드너클의 피로마모도는 토크렌치(Torque wrench)를 이용하여 잔여토크를 측정함으로써 알 수 있다. Fig. 11의 시험결과에서 국산화 개선품 #1의 경우 수입

품에 비해 잔여토크가 높게 나타남에 따라 국산화부품이 내마모피로특성면에서 더 우수하게 개발되었음을 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 기초물성데이터가 존재하지 않는 KTX고속열차 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, KTX의 실트너클부품에 적용하여 국산화부품에 대한 내마모피로 성능평가를 가능하게 하였다.

참고문헌

- (1) Lee, K. Y., Park, B. H. and Lee, D. Y., 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) Allegri, G. and Zhang, X., 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) Cheng, G. and Plumtree, A. , 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) Staevski, K. and Chankov, D., 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) Yang, X., Yao, W. and Chen, Y., 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) Salzman, R. H. and Reaburn, S. M., 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) Stephens, R. I., Dindingert, P. M. and Gungert, J. E., 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) Zhang, C., Chuckpaiwong, I., Liang, S. Y. and Seth, B. B., 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) Nelson, W. B., 2004, "Applied Life Data Analysis," *John Willey & Sons*.
- (11) Kim, J. J., Chang, S. W., Son, Y. K., 2008, "Electrical Lifetime Estimation of a Relay by Accelerated Life Test," *Transactions of KSME A*, Vol. 32, No. 5, pp. 430~436.
- (12) Kim, J. C., Jung, H. B., and Lee, J. E., 2003, "A Study on Prediction of Rouring Noise for Railway," *Journal of KSNVE*, Vol. 13, No. 1, pp. 56-62.
- (13) Oh, K. H. and Lee, C. M., 2004, "Harmonic Generation and System Response Characteristics in Electrified Railway," *Korean Society for Railway*, Vol. 7, No. 1, pp.60-64.
- (14) ASTM, 2002, "Standard Practices for Cycle counting in Fatigue Analysis," Annual Book of ASTM Standard, E1049-85, pp. 1~10.
- (15) Winston, W. L., 2004, "Microsoft Excel Data Analysis and Business Modeling," *Microsoft press*
- (16) Chu, S. H., Son, S. H., Ryu, Y. I., Hea, S. J. and Yim, H. J., 2005, "A Study on Various Factors of Fatigue Analysis for Knuckle," *Korean Society of Automotive Engineers*, KSAE05, F0259,

- pp. 1639~1645.
- (17) Kim, Y. J., Choi, J. H., Han, D. C. and Kim, Y. G., 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.
- (18) Specifications for construction work, "Technical Report of Sealed Knuckle," *KORAIL*