

고속철도차량 갱웨이 통로연결막의 내구성 평가

강길현¹, 우창수², 김철수^{3*}

¹(주) 현대로템, ²한국기계연구원 ³한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Durability Evaluation of Gangway Connections for the High Speed Railway Vehicles

Gil-Hyun Kang¹, Chang-Su Woo², Chul-Su Kim^{3*}

¹HYUNDAI ROTEM Co., ²KIMM,

³Dept. of Railway Vehicle System Engineering, KNUT

요약 관절형 고속철도차량의 승차감 향상 및 주행안전을 위해서는 객차 갱웨이 통로연결막에 대한 화재안전성, 방음기능과 함께 3축 회전각변위(롤링/요잉/피칭) 모드하의 내구성을 만족하는 것이 중요하다. 그러나 국내의 경우 본 통로연결막에 대한 내구성 시험 및 규격은 아직 표준화되지 않고 있다. 본 연구에서는 비선형 구조해석 결과와 고무피로특성으로부터 피로수명을 예측하였다. 또한, 리그 피로시험을 구축하여 본 부품의 내구성을 검토하였다.

Abstract To increase the riding comfort and running stability of articulated type high speed railway vehicles(HSRV), it is important that the gangway connections for the passenger car satisfied fire safety, sound proof and durability under triaxial angular displacement (rolling/yawing/pitching) modes. On the other hand, a domestic test standard on the durability of the rubber components has not been determined. In this study, the fatigue life was predicted using the results of the nonlinear finite element analysis and the fatigue properties. Moreover, a fatigue rig test of the component was constructed to examine the durability.

Key Words : Gangway Connection, Durability, Triaxial Angular Displacement, Mixed Mode

1. 서론

철도차량의 통로연결막(gangway connection)은 승객들의 차량간 이동을 위하여 객차 끝단사이에 설치한 구성품으로서, 이의 종류는 차종에 따라 다양하다. 이 중에서 관절형(articulated type) 고속철도차량의 통로연결막은 Fig. 1 과 같이 차체 갱웨이 프레임사이에 장착된 2중 주름구조의 난연재 고무부품이다. 본 고무부품의 기술적 요구성능은 화재안전성, 방음기능과 함께 주행시 차량한계 이내에서 3축 회전각변위(triaxial angular displacement) 모드하의 내구성(durability)을 요구한다. 뿐만아니라, 관절형 철도차량의 조립조건을 감안한다면

이의 파손에 따른 빈번한 유지보수 및 교체가 어려운 실정이다. 그러나, 아직까지 본 기술 인증을 위한 관련 철도 안전법 및 규격에서는 화재안전성과 기본 재료특성 범위만을 제시하는 수준이다. 따라서 관절형 고속철도차량의 승객 안전 및 승차감 향상을 위해서는 고무재질의 통로연결막에 대한 내구성 평가에 대한 체계적인 연구가 중요하다.

철도차량 부품의 내구성 또는 피로해석에 관한 연구 [1-5]는 응력-수명접근법에 준하여 금속재질의 차량 주행장치용 부품들을 대상으로 다양한 시험 및 해석으로부터 이의 피로수명을 평가하였다. 특히 철도차량용 고무부품 기존연구[4,5]는 재질 특성[4]과 축방향 단순모드하

본 논문은 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원에서 미래철도기술개발사업의 자유공모과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chul-Su Kim(Korea National University of Transportation)

Tel: +82-070-8855-1649 email: chalskim@ut.ac.kr

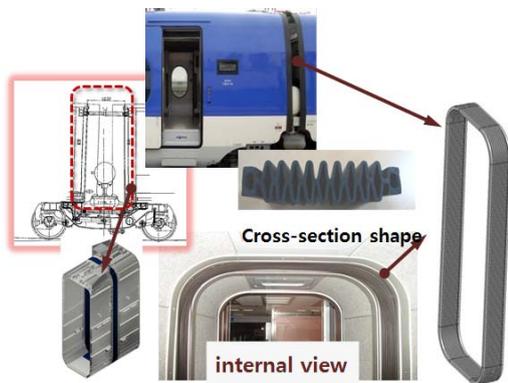
Received July 11, 2014

Revised August 5, 2014

Accepted August 7, 2014

에서 방진고무부품의 특성 평가[5]에 국한되었다. 그러나, 본 통로연결막과 같이 3축 회전각변위와 혼합모드조건하에 고무부품의 내구성 평가 관련연구는 아직까지 미비한 실정이다.

본 연구에서는 차량 운행조건을 고려한 통로연결막의 비선형 구조해석결과와 고무피로특성으로부터 피로수명을 예측하고자 한다. 또한 실질적인 내구성 평가를 위하여 실물 리그피로시험시스템을 구축함으로써 피로예측수명을 비교·검토하고자한다.



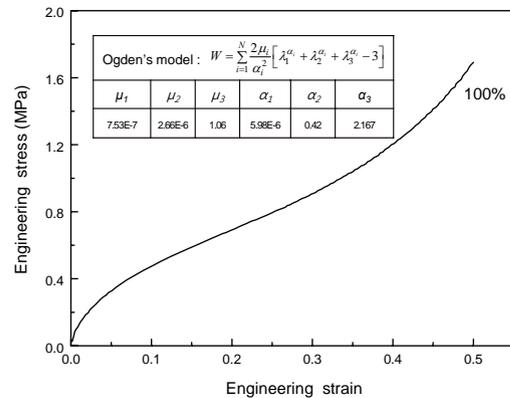
[Fig. 1] Gangway connection of the articulated high speed railway vehicle

2. 물성 및 피로시험

본 연구에서 사용된 재료는 철도안전법에서 규정하는 난연성을 갖는 네오프렌 고무(neoprene rubber)이다. 이의 기계적 특성은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 등2축 인장시험(Equi-biaxial tension test)으로 구하였다[6]. 그림에서 W 는 변형률에너지, λ_i 는 편향 주연신률(deviatoric principal stretches)이고, μ_i, α_i 는 변형률에너지함수형태의 오그덴 모델(Ogden's model)[7]의 재료상수들이다.

한편, 본 부품은 차량 주행시 반복하중과 피로누적에 의한 손상을 받으므로 피로특성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 반복하중(또는 변위)하에 의한 최대 인장변형률을 평가할 수 있는 3차원 고무 피로 시험편을 제작하였다[5]. Fig. 3은 본 부품의 소재 피로특성 평가를 위한 피로시험기와 3차원 고무 피로시험편을 함께 나타낸 것이다. 고무 피로시험편은 양단에 금속편을 가황하여 접착시킨 장

구형 타입으로 반복하중에 의한 이완이 발생되지 않고 압축/인장변형이 가능하다. 최대 인장변형률 발생부위가 어떠한 변형에도 일정하게 발생되도록 중심부 형상은 타원 단면형상이다. 피로시험은 변위제어 방식으로 전기모터를 이용하였고, 3개의 시험편을 장착하여 각기 다른 평균 변위와 변위 진폭을 부여하면서 수행하였다. 시험편의 피로파손 기준은 최대하중이 초기 하중의 80%까지 감소하는 시점의 사이클 수로 정의하였다.

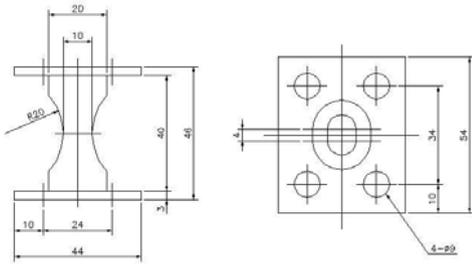


[Fig. 2] Stress-strain curves of the neoprene rubber under equi-biaxial tension

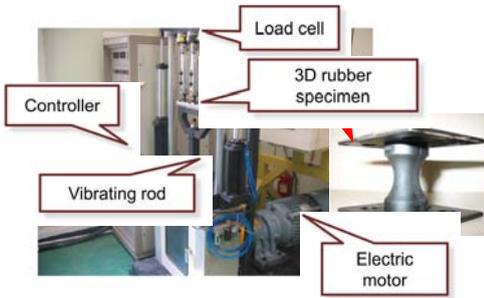
3. 해석 및 시험결과

3.1 비선형 구조해석

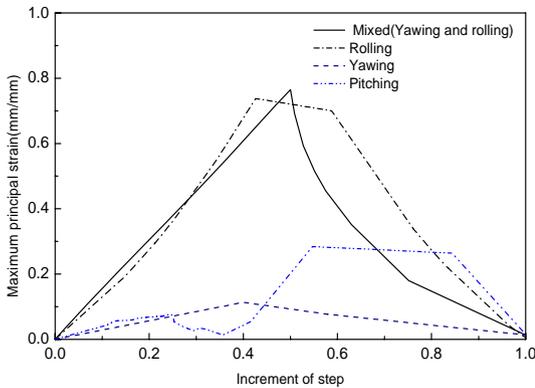
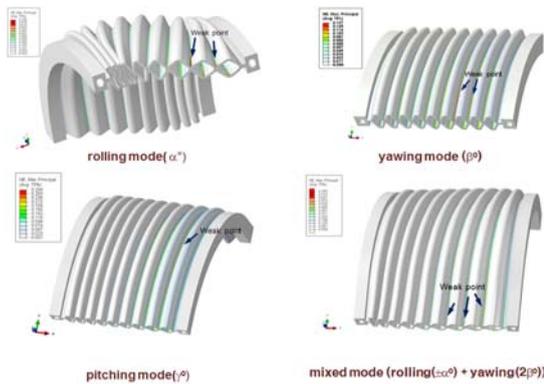
Fig. 4는 4종류의 회전각변위 조건하에 통로연결막의 코너부 중심에서 최대 주변형률(Maximum principal strain) 이력 및 분포를 함께 나타낸 것이다. 해석상의 경계조건은 차체 끝단부(carbody end part) 갱웨이 조립조건에 준하여 구속하였다[6]. 최대 주변형률 이력은 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 얻어진 것이다. Fig. 4의 해석결과로부터 심각한 하중모드는 롤링각(rolling, α°)과 혼합모드조건(mixed mode, $2\beta^\circ + \alpha^\circ$)이며, 최대 주변형률값은 주름사이의 골지점(valley)에서 각각 0.738 및 0.765이다. 이들 2가지 조건은 Table 1과 같이 내구성 평가를 위한 실물 피로시험(fatigue test)의 가속화된 작용하중조건으로 적용된다.



(a) Three-dimensional dumbbell specimen



(b) Experimental apparatus of rubber fatigue test
[Fig. 3] Fatigue test system of rubber



[Fig. 4] Maximum principal strain distribution and histories of gangway connection for HSRV

3.2 내구성 해석

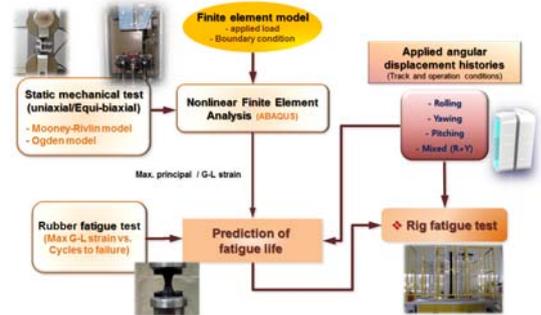
Fig. 5는 본 통로연결막의 내구성 평가 절차를 나타낸 것이다. 피로수명 예측은 비선형 구조해석에서 얻은 공칭변형률로부터 식 (1)에 의하여 최대 그린-라그랑지변형률(Green-Lagrange strain)로 변환하고, 고무소재의 변형률-수명($\epsilon_{G-L} - N_f$) 선도에 준하여 계산된다.

$$E_i = ((\epsilon_{G-L} + 1)^2 - 1)/2 \quad (1)$$

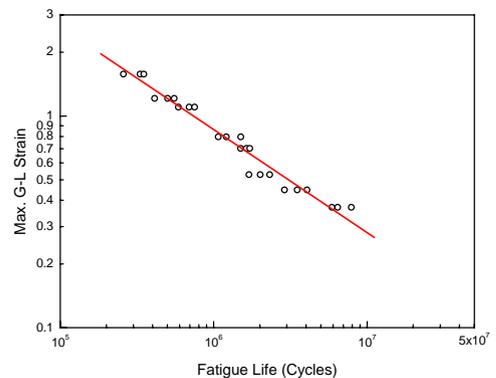
여기서 E_i 공칭변형률이고, ϵ_{G-L} 은 그린-라그랑지변형률이다.

Fig. 6은 변위제어하에서 Fig. 3의 피로시험으로부터 얻어진 피로수명에 대한 최대 그린-라그랑지변형률 (maximum ϵ_{G-L}) 관계선도를 나타낸 것이다. 여기서 최대 ϵ_{G-L} 에 따른 본 고무소재의 피로수명 예측식은 식 (2)와 같다.

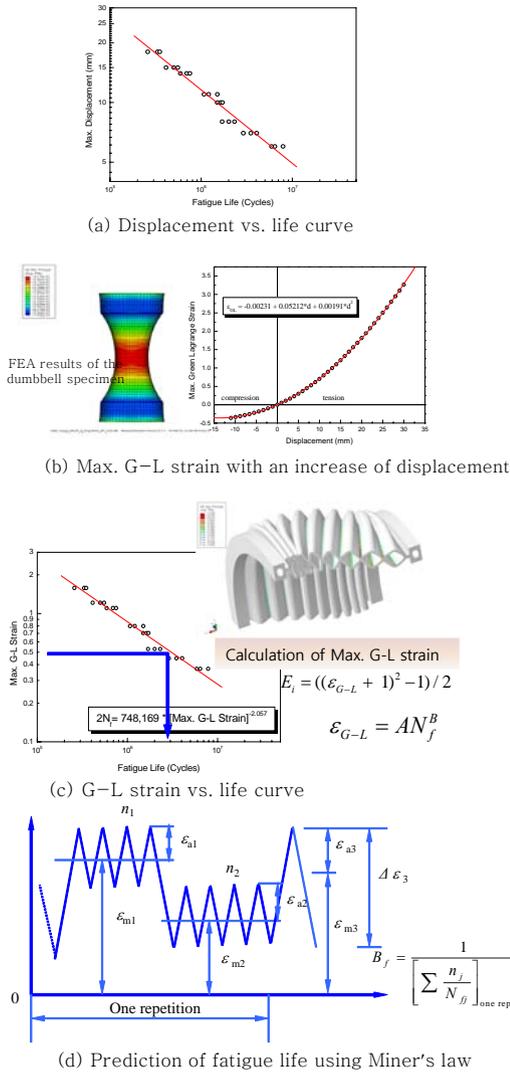
$$N_f = 748,169 \cdot [\text{Max. } \epsilon_{G-L}]^{-2.057} \quad (2)$$



[Fig. 5] Flowchart of durability evaluation of gangway connection for HSRV



[Fig. 6] Fatigue life test result of the dumbbell specimen (Maximum $\epsilon_{G-L} - N_f$ curve)



[Fig. 7] Estimation process of fatigue life

Fig. 7은 본 통로연결막의 피로수명을 예측하는 절차를 나타낸 것이다. 먼저 장구형 고무피로시험결과인 Fig. 7(a)의 최대변위-수명선도를 얻는다. 최대변위값은 Fig. 7(b)와 같이 피로시험편의 유한요소해석을 이용하여 최대 ϵ_{G-L} 으로 변환된다. 그리고 Fig. 7(c)와 (d)에서 보는 바와 같이 본 고무부품의 피로수명은 식 (2)와 Fig. 4의 해석결과로부터 예측할 수 있다. 그러나 본 통로연결막의 작용하중은 Table 1과 같이 두 종류이므로 본 연구에서는 피로 누적 손상법칙(fatigue cumulative damage law)인 식 (3)의 마이너법칙(Miner's law)을 적용하였다.

$$B_f = \frac{1}{\left\{ \sum n_i / N_{fi} \right\}} \quad (3)$$

여기서 n_i 와 N_{fi} 는 각각 작용사이클수 및 파손사이클수이고, B_f 는 파손 블록수이다. 이로부터 본 부품의 예상 피로수명은 4,363blocks(349,046 cycles)이다.

[Table 1] Maximum principal strain under applied angular displacements

	Applied angular displacement(causes)	No. of cycles
1	Rolling($\pm\alpha^\circ$, cant deficiency, side wind speed, etc)	40
2	Mixed(Rolling($\pm\alpha^\circ$) + Yawing($2\beta^\circ$, curved siding track condition in HSRV depot)	40

(※ α, β, γ : a given value by means of production company [8])

3.3 내구성 시험

본 부품의 내구성 평가를 위해서 실제 차량주행시 심각한 조건인 Table 1의 롤링과 혼합모드조건하에서 실물 피로시험을 수행하는 것이 필요하다. Table 2는 본 연구에서 구축한 실물 피로시험기의 주요 기술사양을 정리한 것이다. 본 시험기는 전기모터구동방식으로 3종류 회전각 변위 제어를 수행할 수 있다. 참고로 Fig. 8은 3종류 회전각 변위 제어장치 일례와 실물 피로시험기의 실제 모습을 각각 나타낸 것이다. 조건별 회전각 입력값에 대한 출력신호는 자이로스코프센서(Gyroscope sensor)로 확인하였다.

[Table 2] Specification of fatigue test rig

Subsystem	Contents
Motor and reduction units	<ul style="list-style-type: none"> motor: 0.65kW, 2000rpm → No.: 3(Yaw/Pitch/Roll) reducing ratio: 1:10
Frame size	<ul style="list-style-type: none"> 990 x 800 x 2,329 (Width x Thick x Height, units: mm)
Instrumentation system	<ul style="list-style-type: none"> Gyroscope sensor - 6 DOF, 1-256Hz selectable output rate (RTxQ) Control unit - Micro computer, A/D converter and S/W etc.

Fig. 9는 본 통로연결막의 실물 피로파손과 피로시험 결과를 함께 나타낸 것이다. 그림 9(a)에서 보는바와 같이 피로시험기의 피로파손은 실제 철도차량의 파손사례와 유사한 위치에서 발생하였다. 또한 Table 1의 조건하에서 본 부품의 피로수명은 189,923 cycles이며, 이는 예측수명보다 약 46 % 짧으며, 오차범위 2배 이내에서 일치한다.

4. 결론

본 연구에서는 관절형 고속철도차량량 통로연결막의 안전성 향상 연구 일환으로서, 본 고무부품의 피로수명을 예측하고 내구성을 평가하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 부품의 심각한 하중모드는 롤링모드와 혼합모드(롤링+요잉)이며, 이들 2가지 조건은 내구성 평가를 위한 실물 피로시험(fatigue test)의 가속화된 작용하중조건으로 적용된다.
- (2) 본 고무소재의 피로특성은 변위제어하에서 피로시험으로부터 얻어진 피로수명에 대한 최대 ϵ_{G-L} 관계선도로부터 평가하였다. 여기서 최대 ϵ_{G-L} 에 따른 본 고무소재의 피로수명 예측식은 다음과 같다.

$$N_f = 748,169 \cdot [\text{Max. } \epsilon_{G-L}]^{-2.057}$$

- (3) 관절형 고속철도차량량 통로연결막의 내구성 평가를 위하여 본 연구에서는 전기모터구동방식으로 3종류 회전각변위 제어를 수행하는 실물 피로 리그 시험기를 구축하였다. 본 리그시험기로부터 평가된 피로수명은 189,923 cycles이다. 이는 예측수명(349,046 cycles)보다 약 46% 짧지만, 오차범위 2배 이내에서 일치한다. 따라서 시험편의 단축 인장모드와 본 부품의 3축 회전각변위모드 차이로 인하여 다소 수명오차는 있지만, 리그시험 인가수준 설정시 최대 ϵ_{G-L} 에 의한 피로수명의 예측에 사용할 수 있다.

향후 연구에는 1km 주행동안 등가 회전각변위 발생횟수를 고려하여 보증거리로 환산하고 추가 시험을 통한 신뢰도평가를 수행할 것이다.

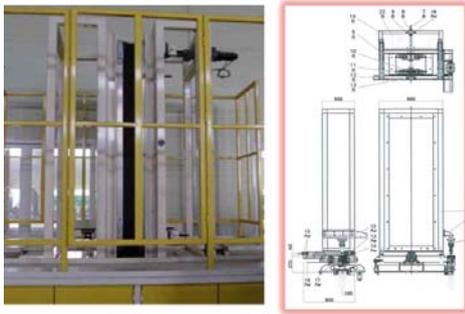
References

[1] S. H. Ahn, K. W. Chung, S. H. Jang and C. S. Kim, "Durability Evaluation of the Korean Gauge-Adjustable Wheelset System", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 12, pp.5669-5675, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5669>

[2] C. S. Kim and G. H. Kang, "Fatigue Analysis of Reduction Gears Unit in Rolling Stock Considering Operating Characteristics", Journal of the Korea

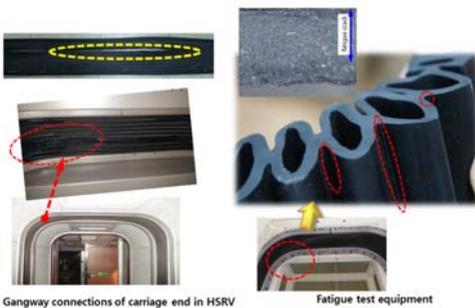


(a) Command windows



(b) Experimental apparatus

[Fig. 8] Fatigue testing equipment and softwares



(a) Real failure vs. failure of test rig



(b) final result

[Fig. 9] The result of fatigue failure for the gangway connections

Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 12, No. 3, pp.1085-1090, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1085>

[3] C. S. Kim and M. H. Park, "Durability Evaluation on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Platforms at Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 9, pp.3889-3894, 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.3889>

[4] J. H. Kim, H. M. Hur, "A Study on the Change of the Fatigue Life and The Fracture Morphology Due to the Carbon Black on the Natural Rubber for Vibration-Proof", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 8, No. 1, pp.21-26, 2005.

[5] C. S. Woo, H. S. Park and D. C. Park, "Characteristics and Useful Life Prediction of Rubber Spring for Railway Vehicle", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 10, No. 2, p.211-216, 2007.

[6] G. H. Kang and C. S. Kim, "Nonlinear Analysis of Rubber Bellows for the High Speed Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 8 pp. 3631-3637, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.3631>

[7] R. W. Ogden, "Non-linear Elastic Deformation", Dover Published, INC., Mineola, New York. 1984.

[8] Hyubdai-Rotem, "Gangway Bellows", KTX-II Internal 2nd Report, 2013.

강 길 현(Gil-Hyun Kang)

[정회원]



- 2001년 12월 : 영국 The University of Birmingham 기계공학과 졸업(Ph D)
- 1981년 5월 ~ 2007년 6월 : 기술고등고시 16회 철도청, 철도공사 근무, 현재 국토해양부 고속철도 운영위원
- 2010년 7월 ~ 현재 : (주) 현대로템 철도사업본부 근무

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량진동소음

우 창 수(Chang-Su Woo)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대 기계설계학과 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 : 영남대 기계공학과 졸업(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국토교통부 철도기술 심의위원
- 1987년 7월 ~ 현재 : 한국기계연구원 나노역학연구실장

<관심분야>

나노역학, 고무부품 신뢰성

김 철 수(Chul-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS