

고속철도차량 갱웨이 벨로우즈의 비선형 해석

강길현¹, 김철수^{2*}

¹(주) 현대로템, ²한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Nonlinear Analysis of Rubber Bellows for the High Speed Railway Vehicle

Gil-Hyun Kang¹ and Chul-Su Kim^{2*}

¹Hyundai Rotem Co.

²Dept. of Railway Vehicle System Engineering, KNU

요약 갱웨이 벨로우즈는 관절형 고속철도차량 객차 끝단부 사이에 다양한 변위차를 고려하여 갱웨이 프레임에 장착된 이중 주름구조 네오프렌 고무부품이다. 실제 운행중의 벨로우즈의 파손은 터널 통과시 기밀 파손으로 인한 이명 현상 발생과 함께 소음 증가로 승객의 승차감에 심각한 영향을 미친다. 본 연구에서는 고속철도차량 갱웨이 벨로우즈의 안전성 연구 일환으로서, 차량주행시 차량 끝단부의 3축 회전변위(롤링, 요잉, 피칭변위차)를 고려한 갱웨이 벨로우즈의 비선형 해석을 수행하였다. 본 고무의 비선형 재료 특성은 단축인장 및 등2축 인장시험을 수행하여 구하였다. 또한, 비선형 해석결과로부터 회전변위 및 마찰계수의 영향을 평가하였다.

Abstract Gangway bellows in this study is the double wrinkled neoprene rubber component to accept various deviations between the carriage end parts of the articulated type high speed railway vehicle(HSRV). The fatigue failure of the bellows has a harmful effect on the riding comfort for the passengers with the increase of noise and ringing in the ears due to air-tightness failure during pass through a long tunnel. In this study, to assure the safety of gangway bellows of the HSRV, non-linear analysis of the gangway bellows considering triaxial angular displacement(rolling /yawing/pitching) between the carriage end parts are performed. The non-linear properties of the rubber are determined by uniaxial tension and equi-biaxial tension test. Moreover, from the results of non-linear analysis, the effects of the angular displacements and frictional coefficients are evaluated.

Key Words : Gangway Bellows, High-Speed Railway Vehicle, Neoprene Rubber, Nonlinear Finite Element Analysis

1. 서론

비선형 및 대변형 특성을 갖는 고무는 초탄성 재료(hyperelastic material)로 분류되며, 철도차량[1-3] 고무부품은 소음 및 진동을 억제하기 위하여 매우 다양하게 적용되고 있다. 이중에서 갱웨이 벨로우즈는 현재 운용중인 KTX-series와 같은 고속 철도차량 객차 사이 '통로연결막'이다. 이는 갱웨이 프레임(gangway frame)사이에 장착된

난연재(flame retardants)의 네오프렌 고무(neoprene rubber)부품으로서, Fig. 1과 같다. 이 부품은 관절대차 형식 고속철도차량의 객차 끝단부 갱웨이 프레임사이에 위치하며, 고무의 초탄성에 의한 수축과 이완 특성을 이용한 주름형태의 2중 구조이다. 이 부품은 곡선 및 터널 주행시 차량한계 이내에서 3축 회전변위(롤링, 요잉, 피칭) 모드조건하에 공기 기밀성(air tightness) 유지와 소음을 차단하는 중요한 역할을 한다. 실제 운행중에 Fig. 1의 하

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 1, 2013

Revised July 19, 2013

Accepted August 7, 2013

단사진과 같은 벨로우즈의 피로파손은 터널 통과시 기밀 파손으로 인한 이명 현상 발생(예: 고속/터널주행시 심각) 및 소음 증가로 승객의 승차감에 심각한 영향을 미치므로 이에 대한 건전성 평가가 중요하다.

국내외 고무부품에 관한 연구[4-7]는 성분배합 등의 경험적인 수법에 의존하거나 유한요소해석을 이용하여 단축 하중모드조건하에 변형거동을 예측하여 설계에 적용하고 있다. 예를 들어, 철도차량용 고무부품 기존연구는 재질 특성[4]과 단축 모드하에서 방진고무부품의 특성을 평가하였다[5]. 그러나, 본 벨로우즈와 같이 3축 회전 변위 모드와 혼합모드조건하에 고무부품 비선형 해석 연구는 해의 수렴여부가 어려우므로 아직까지 미비한 실정이다.

또한 현재까지 안전성 인증위한 관련 법규[8]에서도 본 벨로우즈는 이의 화재성능과 기본 재료특성을 평가하는 수준에 머물러 있다. 따라서 본 연구에서는 이의 안전성 검토 연구 일환으로서, 네오프렌고무의 물성시험을 수행하여 비선형 해석에 필요한 재료물성치를 평가하고자 한다. 이로부터 차량한계 및 풍압을 고려한 각각의 3축 회전과 혼합모드조건하에 고속철도차량 갱웨이 벨로우즈의 비선형 해석을 수행하고자 한다. 또한 각 모드별 해석 결과로부터 주요 하중모드의 영향을 파악함으로써 설계 변수 및 리그시험의 기초자료에 반영하고자 한다.

2. 벨로우즈 고무 기계적 특성 평가

고무소재는 금속재료와 달리 대변형 범위에서도 탄성 거동을 나타내는 초탄성 특성을 갖는다. 고무 재료의 초탄성 거동은 대변형 범위내에서 등방성이라는 가정하에 네오-후크(Neo-Hookean), 무니-리브린(Mooney-Rivlin), 오그덴(Ogden), 말로우(Marlow) 모델 등 다양한 형식으로 표현되어 왔으며[7], 이 중에서 범용적으로 고무 부품 해석에 사용되는 변형률에너지 함수는 식 (1)의 오그덴 모델과 식 (2)의 무니-리브린 모델이다[5,7,9,10].

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) \quad (1)$$

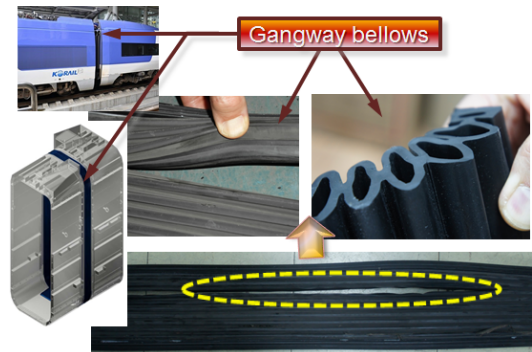
$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)(I_2 - 3)^j \quad (2)$$

여기서 U 는 변형률에너지, $\bar{\lambda}_i$ 는 편향 주연신률(deviatoric principal stretches)이고, C_{ij} , μ_i , α_i 는 단축

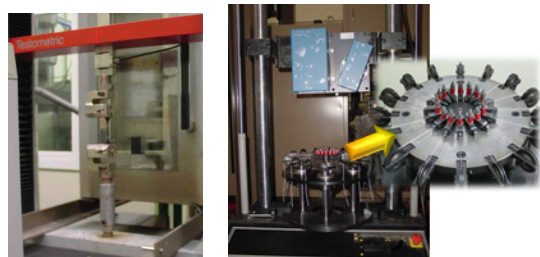
인장, 등2축 인장시험(Equi-biaxial tension test)으로 얻어진 재료상수들이다.

본 연구에서는 유한요소해석시 해의 정확도와 수렴성을 높이면서 시험과 해석 사이 오차를 최소화하기 위하여 네오프렌 고무소재에 대한 단축 및 등2축 인장시험을 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수행하였다. 참고로 Fig. 3은 등2축 인장시험의 시험편 형상이다[5].

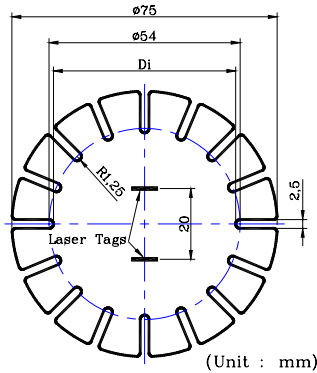
Fig. 4는 변형률 25%, 50%, 100%에서 각각의 물성시험으로부터 얻어진 응력-변형률 선도이다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 본 네오프렌 고무는 사이클 수 증가에 따라 응력이 완화되는 물린스 효과(Mullin's effect)를 보이며, 3~5회 반복후 안정화된 거동을 나타냈다. 해석 입력 자료로 사용되는 기계적 특성은 Fig. 4(a)와 같은 안정화된 응력-변형률 선도로부터 구하였으며, 이에 대한 결과는 Table 1과 같다. 이 표의 재료상수들은 각각 식 (1)과 식 (2)의 오그덴 모델 및 무니-리브린 모델의 계수들이며, 이들은 Fig. 4(b)로부터 유한요소해석 소프트웨어



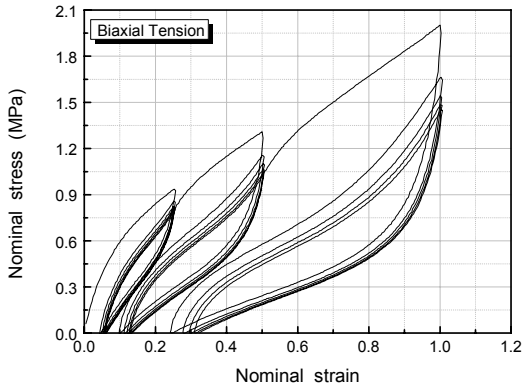
[Fig. 1] Gangway rubber bellows for high speed railway vehicle



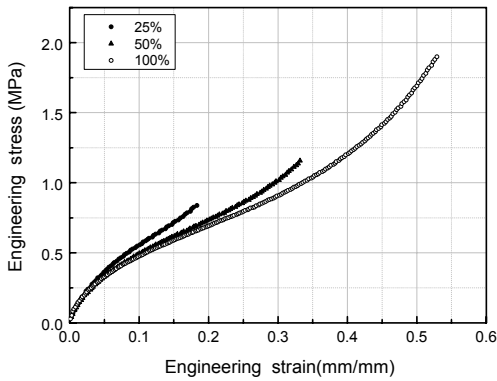
[Fig. 2] Tests of neoprene rubber for bellows under uniaxial (left photo) and equi-biaxial(right photo) tension



[Fig. 3] Specimen of equi-biaxial tension test



(a) Mullin's effect



(b) stress-strain curve

[Fig. 4] Stress-strain curves of the neoprene rubber under equi-biaxial tension

웨어인 ABAQUS 6.12를 사용하여 계산된 값이다. 표에서 보는 바와 같이 변형을 증가에 따른 강성(G)는 두 모델에서 모두 증가하며, 각각의 변형률에서 유사한 값을 갖는다. 따라서 Table 1의 비선형 재료상수들은 네오프렌

고무재질의 철도차량 벨로우즈에 대한 유한요소해석의 입력자료로서 사용하였다.

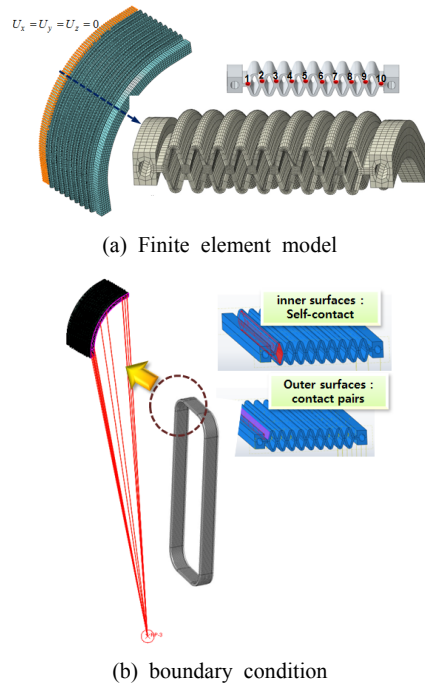
[Table 1] Nonlinear material properties of the neoprene rubber

Strain	Mooney-Rivlin			Ogden						
	C_{10}	C_{01}	G_m	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3	G_o
25%	0.739	0	1.48	1.23E-6	1.460	1.15E-5	7.46E-6	4.967	2.354	1.46
50%	0.601	0	1.20	2.64E-6	1.168	4.07E-7	1.26E-5	3.291	0.452	1.168
100%	0.535	0	1.07	7.53E-7	2.66E-6	1.06	5.98E-6	0.42	2.167	1.057

3. 갱웨이 벨로우즈 구조해석

3.1 유한요소모델 및 경계조건

본 갱웨이 벨로우즈는 관절식 대차 형식의 고속철도 차량 객차 사이 연결통로막에 사용되는 네오프렌 고무(neoprene rubber)부품이다. 이의 거동은 차량 곡선 통과와 선로구배 조건하에 주행동안 차량한계 범위 내에서 기본적으로 3종류의 회전 각변위(rotating angular displacement)로서, 롤링(rolling), 요잉(yawing) 및 피칭(pitching) 변위를 갖는다.




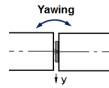
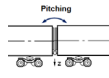
[Fig. 5] Finite element model and boundary condition of gangway bellows

Fig. 5는 갱웨이 벨로우즈의 비선형 구조해석 (nonlinear transient structural analysis)을 위한 유한요소망에 대한 하중 및 경계조건을 함께 나타낸 것이다. 그림 5(a)의 유한요소모델은 벨로우즈의 코너부분을 8절점육면체(C3D8H)로 구성하였으며, 총 노드수와 요소수는 각각 196,645 및 163,759개이다. 본 연구 네오프렌 고무는 비압축성으로 가정하여 재질 특성시험으로 얻어진 재료 상수들을 이용하였다. 경계조건은 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 갱웨이 프레임과 조립조건을 고려하여 한쪽 물딩면에 변위를 모두 구속하였고($U_x = U_y = U_z = 0$), 외부와 안쪽표면에서는 작용하중에 따른 면접촉을 고려하여 각각 자기접촉(self-contact)과 상호접촉(contact-pairs) 조건을 부여하였다. 하중조건은 그림 5(b)와 같이 차량 끝단부 연결조건을 고려하여 센터피봇중심에서 3축 회전 변위와 혼합모드(롤링+요잉) 회전을 각각 부여하였다.

Table 2는 운행조건에 작용 회전각 변위조건을 정리한 것이다. 제시된 조건은 정차상태 기준으로 최소곡선 R250, 캔트 조건, 레일 불규칙도 최대공차, 풍속 45 m/s, 차륜 마모조건 등을 고려하여 차량중심과 단부 형상의 차이로부터 각 모드의 회전변위를 계산한 값이다[11].

또한, 본 벨로우즈는 기구학적 관점에서 관절대차에 직접 고정된 하단부보다 자유스러운 상단부 양쪽 코너부에서 큰 회전각변위를 갖는다(Fig. 5(a) 참조).

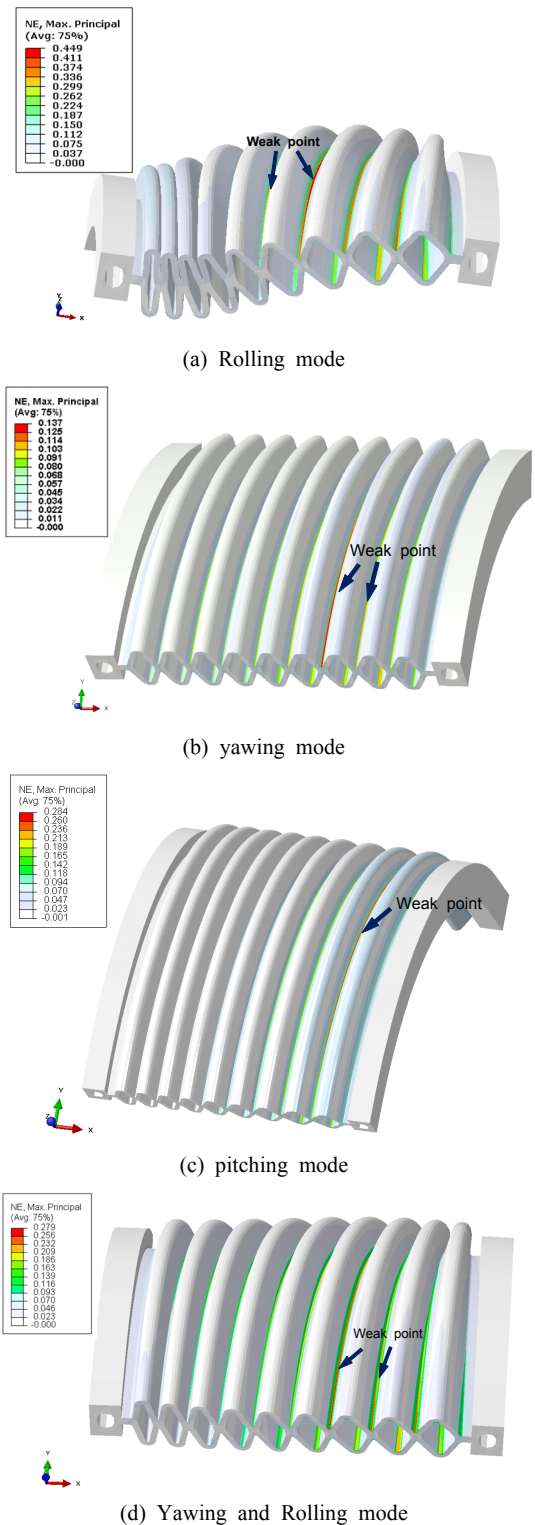
[Table 2] Applied angular displacement with mode types

	operation conditions	Applied angular displacement
1	straight line± side wind speed, etc	Rolling ($\pm \alpha^\circ$) 
2	R250 curve	Yawing (β°) 
3	R250 curve + wind speed, etc	Yawing(β°) + Rolling($\pm \alpha^\circ$)
4	wheel wear, suspension etc	Pitching(γ°) 

(※ α, β, γ : a given value by means of production company[11])

3.2 모드별 해석결과

본 벨로우즈의 기계적 거동은 고무의 초탄성 비선형 재료거동을 고려하여 최대 주응력보다 최대 주변형률 (maximum principal strain)로서 평가하였다[6,7,9,10].

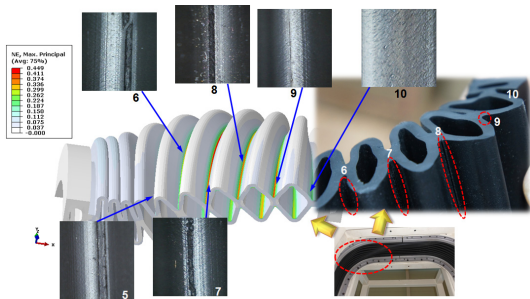


[Fig. 6] Max principal strain distribution of gangway bellows under various angular displacement modes

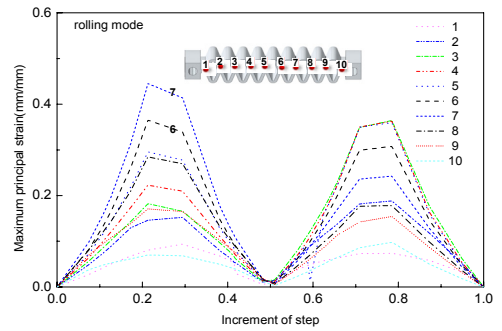
Fig. 6은 Table 2의 3가지 회전각변위조건((a)~(c))과 혼합모드(d)하에서 가장 큰 회전각 변위를 갖는 벨로우즈의 코너부 중심에서 최대 주변형률분포를 나타낸 것이다. 최대 주변형률값은 공통적으로 주름사이의 골지점(valley)에서 발생하였다. 참고로 Fig. 7은 실제 주행중에 철도차량 벨로우즈 곱몸에서 발견된 결함 사진과 롤링 모드하의 비선형 해석결과를 함께 비교한 것이다. Fig. 7에서 상단과 하단 그림들은 주름사이의 미소 균열사진으로서 해석결과의 취약부와 동일하며, 이로부터 해석결과의 유효성을 확인할 수 있다고 판단된다.

Fig. 8은 각 모드조건하에 1 cycle동안 주름사이 위치별(10개소의 주름 골) 최대변형률 이력을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 모드별 최대 주변형률은 다소 차이가 있지만, 우선적으로 7번과 9번 주름의 골부분에서 크게 나타났다. 또한 가장 심각한 하중모드는 최대 주변형률 0.449인 롤링모드 조건으로서, 다른 조건들보다 크다. 따라서 가장 심각한 손상을 일으키는 주요 모드는 롤링조건이므로 이를 리그피로시험조건에 반영해야 할 것이다.

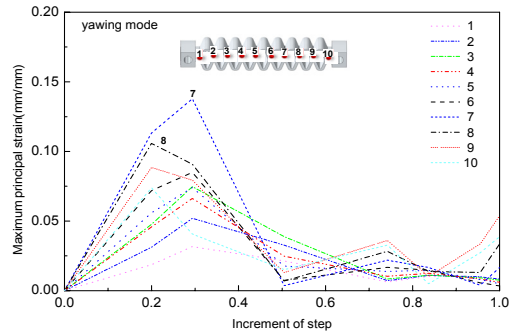
한편, 본 벨로우즈는 작동메커니즘상에 주름사이의 마찰거동을 가지므로 마찰계수에 따른 최대 주변형률을 구하였다. Fig. 9는 가장 심각한 하중모드인 롤링조건하에 마찰계수에 따른 최대 주변형률값을 나타낸 것이다. 여기서 최대 주변형률값은 코너부 주름사이 7번 골위치에서 해석 결과이며, 마찰계수 범위는 고무접촉면 건마찰조건하의 정지마찰계수 1.16에서 유효조건 0.116까지이다 [12]. 그림에서 보는 바와 같이 유효조건하에 최대 주변형률 0.363은 건마찰조건보다 약 19%감소하였다. 따라서 본 벨로우즈의 제작시 주름사이의 마찰에 의한 유효조건을 부여할 수 있는 방안을 고려해야 된다는 점을 시사한다.



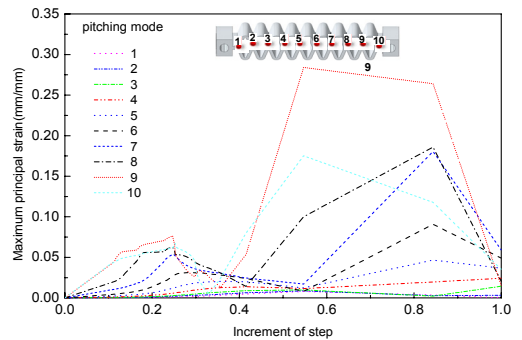
[Fig. 7] Comparisons between photos of the failed bellows and maximum principal strain distribution



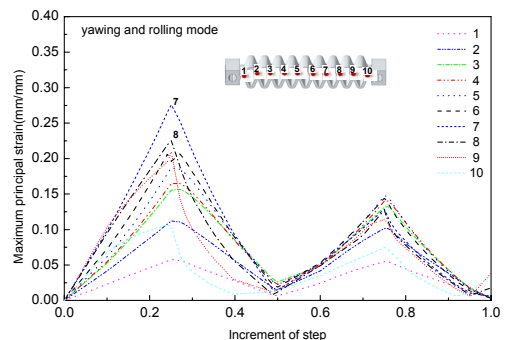
(a) Rolling mode



(b) yawing mode

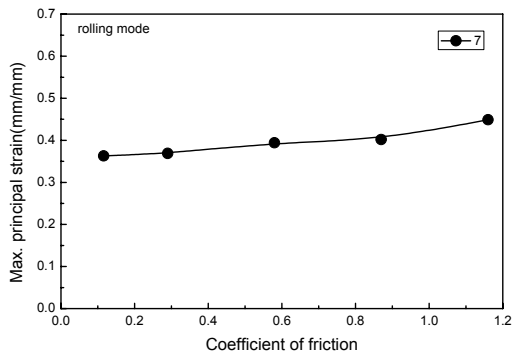


(c) pitching mode



(d) Yawing and Rolling mode

[Fig. 8] Max principal strain histories under various angular displacement modes



[Fig. 9] Maximum principal strain with a increasing coefficient of friction under rolling model

4. 결론

본 연구에서는 관절식 고속철도차량 갱웨이 안전성 검토의 연구 일환으로서, 갱웨이 프레임 사이에 장착된 네오프렌 고무 벨로우즈의 비선형해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 고속철도차량 통로연결막용 벨로우즈에 사용되는 네오프렌 고무의 기계적 특성은 단축 및 등2축 인장시험을 수행하여 평가하였고, 비선형 유한요소 해석의 입력자료인 재료상수들을 구하였다.
- (2) 본 벨로우즈의 작용하중모드는 차량주행시 차량 끝단부의 3축 회전변위(롤링, 요잉, 피칭변위차)와 혼합모드(롤링+회전)이며, 각 모드조건하에 최대 주변형률로부터 취약부위를 파악하였다. 취약부위는 주름사이의 골지점이며, 이는 고품 결합 사진으로 확인하였다.
- (3) 가장 심각한 하중모드는 최대 주변형률 0.449의 롤링 각변위 조건이며, 이를 고려하여 본 벨로우즈의 실물 리그 피로시험조건에서 반영해야 할 것이다. 또한 윤활조건하에 최대 주변형률은 건마찰조건보다 약 19% 감소하므로 본 벨로우즈의 제작시 주름사이의 마찰에 의한 윤활조건을 부여할 수 있는 방안을 고려해야 할 것이다.

현재까지 표준화 규격이 없는 본 갱웨이 벨로우즈의 해석 기술을 확보하여 특성예측 및 설계능력을 향상 시킴으로서 제품개발의 경제적 비용을 줄일 수 있었다고 판단된다. 향후에 이를 바탕으로 최적설계 및 내구성평가가 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] C. S. Kim, G. H. Kang, "Fatigue Analysis of Reduction Gears Unit in Rolling Stock Considering Operating Characteristics", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 3, pp.1085~1090, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1085>
- [2] S. H. Ahn, K. W. Chung, S. H. Jang, 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>
- [3] M. H. Park and C. S. Kim, "Conceptual Design on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Railway Platforms", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 9, pp.3882~3888, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.3882>
- [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, 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, pp.211-216, 2007.
- [6] C. S. Woo, W. D. Kim, J. D. Kwon, "A Study on the Fatigue Life Prediction and Evaluation of Rubber Components for Automobile Vehicle", *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp.56-62, 2005.
- [7] W. V. Mars, A. Fatemi, "A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber", *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp.949-961, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00008-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00008-7)
- [8] Ministry of Government Legislation, *Regulation of Railway Construction Criteria, Article 28 and 29*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009.
- [9] M. Mooney, "A Theory of Large Elastic Deformation", *Journal of Applied Physics*, Vol. 11, pp.585-592, 1940.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1712836>
- [10] R. W. Ogden, *Non-linear Elastic Deformation*, Dover Published, INC., Mineola, New York, 1984.
- [11] Hyubdai-Rotem, *Gangway Bellows*, KTX-II Internal Report, 2009.

- [12] Klyosov, A. A., *Wood-Plastic Composites*, John Wiley & Sons, Inc, hoboken, New Jersey in USA, pp.370-371, 2007

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

김 철 수(Chul-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 10월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 부교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS