

고속철도차량 갱웨이 통로연결막의 최적설계

김철수*

¹한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Optimal Design of Gangway Connections for the High Speed Railway Vehicle

Chul-Su Kim^{1*}

¹Dept. of Railway Vehicle System Engineering, KNU

요약 관절형 고속철도차량 갱웨이 통로연결막은 객차 끝단부 사이에 다양한 회전각 변위하에 통로의 기밀을 유지하는 이중 주름구조 고무부품이다. 비선형구조해석결과로부터 본 부품의 심각한 작용하중조건 중의 하나는 차량기지내 작은 곡선반경의 인입선 통과시 발생하는 혼합모드(롤링+요잉)회전 각변위조건이다. 본 연구에서는 고속철도차량 통로연결막의 안전성 향상 연구 일환으로서, 통로연결막의 단면형상에 대하여 SIMP 기법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 비선형 구조해석결과로부터 본 최적설계안의 최대 주변형률은 혼합모드 및 롤링모드하에서 기존모델보다 각각 68% 및 39% 감소함을 확인하였다.

Abstract The gangway connection of the articulated high speed railway vehicles (HSRV) is a double wrinkled rubber component to seal the air of the corridor under a range of angular deviations between the carriage end parts. From the results of non-linear structural analysis, one of the severe loading conditions for the connection is mixed mode (rolling+yawing) angular displacements while passing through the small-radius curved siding track of the HSRV depot. In this study, to ensure the safety enhancement of the component, the optimal design for the cross section of that was performed using the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) method. Nonlinear finite element analysis confirmed that the decreases in the maximum principal strain of the optimized design under rolling and mixed modes are 68% and 39%, respectively, compared to the initial design.

Key Words : Finite Element Analysis, Gangway connection, High-Speed Railway Vehicle, Topology Optimization Method

1. 서론

관절형 고속철도차량(articulated high speed railway vehicle)의 갱웨이 통로연결막(gangway connection)은 객차 끝단부 사이에서 3축 회전각변위(롤링, 요잉 및 피칭)조건하에 연결통로의 공기 기밀을 유지하는 이중 주름구조 고무부품이다. 본 통로연결막은 갱웨이 프레임 상부 양쪽 코너부분에서 주행동안 Fig. 1과 같이 단면변형과 함께 주름사이에서 찢어지는 현상이 발생한다. 이러한 부품 파손은 실제 주행동안 승객의 이명 현상(예: 고속/터널주행시 심각) 및 소음 증가로 인하여 승차감에

악영향을 미친다. 또한 네오플렌 재질의 고무부품인 통로연결막은 관절형 철도차량 조립조건을 감안하면 이의 파손에 따른 빈번한 유지보수 및 교체가 어려운 실정이다. 따라서 기존 통로연결막의 파손방지 및 수명연장을 위해서는 단면형상의 최적 설계연구가 필요하다.

철도차량용 고무부품 기존연구[1,2]는 재질 특성[1]과 길이방향 모드하에서 방진고무부품의 특성 평가[2]에 국한되었다. 또한 국내의 고무부품에 관한 최적화연구[3-5]는 다양한 최적설계 알고리즘을 이용하여 응력완화에 준한 형상 최적화를 수행하였다. 그러나, 본 통로연결막과 같이 3축 회전각조건하의 고무부품 연구는 수렴여부가

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 June 20, 2014

Revised July 9, 2014

Accepted July 10, 2014

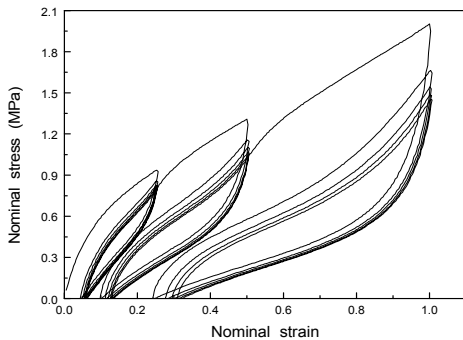
어려우므로 아직까지 미비한 실정이다.

본 연구에서는 관절형 고속철도차량[6] 통로연결막의 안전성 향상 연구 일환으로서, 비선형 위상 최적설계 프로그램인 ATOM(Abaqus Topology Optimization Module)을 이용하여 본 부품의 단면형상에 대한 최적설계(안)를 제안하고자 한다. 또한 주요 하중모드(롤링, 혼합조건(롤링+요잉))하에 기존모델과 개선안에 대한 비선형 구조해석(nonlinear structural analysis) 결과로부터 개선여부를 검토하고자 한다.



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

2. 기계적 특성 평가



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

고무 소재의 초탄성거동을 고려한 비선형 유한요소해석시 해의 정확도를 높이기 위하여 본 연구에서는 등2축인장시험을 수행하였다. 해석 입력자료로 사용되는 기계적 특성은 Fig. 2와 같은 안정화된 응력-변형률 선도로부터 구하였다. 이로부터 고무 부품 해석에 사용되는 변형

률에너지 함수는 식 (1)의 오그덴 모델(Ogden's model)이다[7].

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

여기서 U 는 변형률에너지, $\bar{\lambda}_i$ 는 편향 주연신률(deviatoric principal stretches)이고, μ_i, α_i 는 등2축인장 시험(Equi-biaxial tension test)으로 얻어진 재료상수들이며[8], Table 1과 같다. 이 표의 비선형 재료상수들은 네오프렌 고무재질의 통로연결막에 대한 비선형 유한요소해석의 입력자료로서 사용하였다.

[Table 1] Nonlinear material properties of the rubber

Strain	Ogden model's material constants					
	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
25%	1.23E-6	1.460	1.15E-5	7.46E-6	4.967	2.354
50%	2.64E-6	1.168	4.07E-7	1.26E-5	3.291	0.452
100%	7.53E-7	2.66E-6	1.06	5.98E-6	0.42	2.167


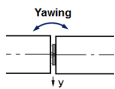
3. 갱웨이 벨로우즈 최적설계

3.1 비선형 구조해석

본 부품의 거동은 차량 곡선 통과와 선로구배 조건하에 주행동안 차량한계 범위 내에서 롤링(rolling), 요잉(yawing) 및 피칭(pitching) 각변위를 갖는다. 이러한 회전각변위조건 중에서 심각한 하중모드는 롤링각으로 보고[8]되었다. 그러나 본 연구에서는 Table 2와 같이 차량기지 인입선조건을 고려하여 롤링 및 혼합모드조건($2\beta \pm \alpha$)에 추가하여 수행하였으며, 이는 요잉각변위에서 기존 연구[8]의 하중조건($\beta \pm \alpha$)보다 가혹하다.

Fig. 3은 Table 2의 혼합모드 회전각변위 조건하(2번째 조건)에 본 통로연결막의 코너부 중심에서 비선형 구조해석결과를 나타낸 것이다. 해석상의 경계조건은 기존 연구[8]와 동일하며, 기계적 거동 파라미터는 고무 재료의 초탄성거동을 고려하여 최대 주변형률(maximum principal strain)로서 평가하였다. 이 그림에서 최대 주변형률값은 주름사이의 9번 골지점(valley)에서 0.765이다. 이는 기존 연구결과[8]의 다른 회전모드(롤링, 피칭, 요잉)의 경우보다 크기 때문에 본 부품의 최적설계 수행시 작용하중조건으로 고려해야 한다.

[Table 2] Applied angular displacement with mode types

No.	operation condition	Applied angular displacement
1	straight ± cant deficiency in HSRV depot, side wind effect etc	Rolling (±α°) 
2	Rolling + curved siding track(R125) condition in HSRV depot	Mixed (Yawing(2β°) + Rolling(±α°)) 

(※α, β, γ : a given value by means of production company [9])

3.2 위상최적설계

위상 최적설계는 이산화된 각 요소의 밀도 또는 기타 특성을 설계변수로 하여 목적함수와 제한조건에 따른 각 요소의 유무를 판정하여 최종적인 설계위상을 도출하는 방법이다. 이는 크게 균질화법(homogenization design method)에 의한 방법과 밀도법(Solid Isotropic Material with Penalization Method, SIMP)으로 구분한다. 균질화 방법은 설계영역을 유한개의 요소로 구분하였을 지라도 설계변수의 개수는 무한개가 되므로 경우에 따라서는 해를 구하기 어렵다. 본 연구에서는 상대적으로 적용하기가 쉽고 연구자들 사이에 널리 사용되는 밀도법(SIMP)을 적용하였다[10].

3.2.1 설계문제 정식화

통로연결막 단면에 대한 위상최적설계의 설계변수 $X_i \in [0, 1]$ 는 식 (2)와 같다.

$$X_i = \frac{\rho_i}{\rho_0}, \quad i = 1, 2, \dots, NDT \quad (2)$$

여기서 ρ_0 모재 밀도, NDT는 설계영역안의 전체 유한요소수이다. 외적 작용하중하에 저장된 전체 변형률에너지 $U(u)$ 는 식 (3)과 같이 계산된다[10,11].

$$\begin{aligned} U^d(u) &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon(u) : E^H \varepsilon(u) d\Omega \\ &= \frac{1}{2} \bar{u}^T \left[\int_{\Omega} B^T E^H B d\Omega \right] \bar{u} = \frac{1}{2} \bar{u}^T [K] \bar{u} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 $\varepsilon(u)$, E^H , B 및 $[K]$ 는 각각 6x1변형률 행렬(strain matrix), 6x6탄성계수 행렬(elasticity constant),

기본 구배 행렬(the gradient matrix of basis functions), 강성행렬(global stiffness matrix)이다. 초기 설계 영역에서 전체 질량(total mass, M_0)에 대한 상대질량분율(relative mass fraction, m_f)은 위상최적화에 따라 최소화되어야 하며, 이는 식 (4)와 같이 표현한다.

$$m_f = \frac{M}{M_0} = \frac{\sum_{i=1}^{NDT} V_i X_i}{\sum_{i=1}^{NDT} V_i} = \frac{V}{V_0} \quad (4)$$

통로연결막 단면에 대한 위상최적 설계의 공식화는 식 (5)와 같다.

Find $X = X_{i=1}^{NDT}$, $X_i = \rho_i / \rho_0$

Minimize $V = m_f V_0$

Subject to $[K] \bar{u} = f$, $0 \leq X_i^{\min} \leq X_i \leq 1$,

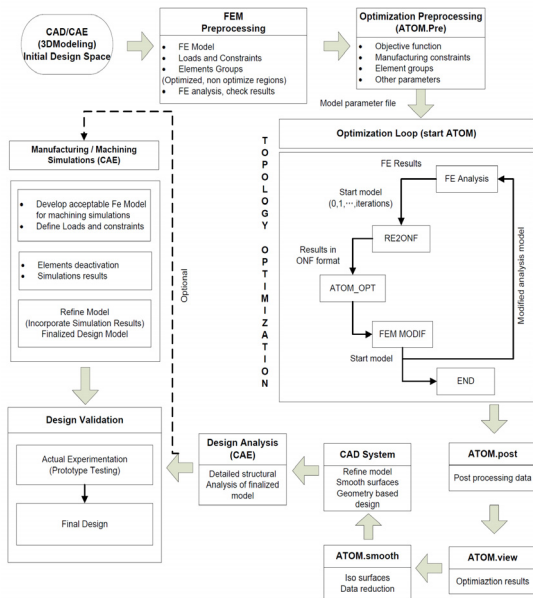
$$(1 - \beta)(u_I^{\min})_j \leq (u_j) \leq (1 + \beta)(u_I^{\max})_j, \quad I = x, y, \quad j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

여기서 u^{\min} 는 하중 및 경계조건하에 초기설계단계의 모델이고, 구속조건은 정적해석의 경계조건과 동일하다[8]. 설계변수 최저값 X_i^{\min} 은 유한요소 강성행렬이 특이행렬화 되지 않도록 설정하였다.

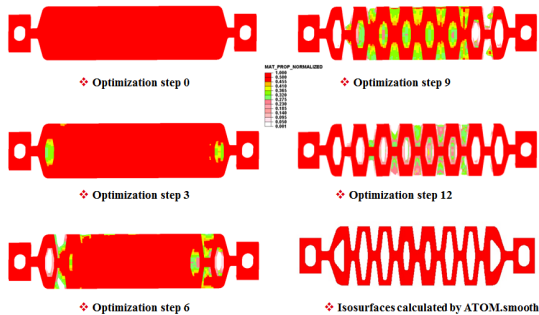
3.2.2 최적설계

Fig. 4는 통로연결막의 단면에 대한 위상최적설계 과정을 도식화 한 것이다. 최적설계 프로그램은 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS와 연동되는 ATOM이다. 모델은 최적화 대상 여부에 따라 설계영역을 정의하며, 우선적으로 재료 특성, 하중 및 경계(또는 제약) 조건을 정의한다. 3차원 모델은 텍스트파일 형식으로 저장한 후에 유한요소해석을 수행한다. 다음 단계에서 최적화 문제는 ATOM.pre 모듈에 정의되어있다. ABAQUS에 의해 생성 model.cdb 파일은 ATOM 데이터베이스로 가져온 후에 요소, 노드 및 재료 특성 등을 유한 요소의 입력자료로서 사용한다. 최적화는 각 유한 요소의 재료 특성을 설계 변수로 정의하고, 목적 함수를 최소화하거나 강성을 극대화하도록 진행한다. 대상 볼륨은 초기 설계 공간의 80%이하로 정의된다. ATOM 입력 명령은 model.par 형식의 모델 매개 변수 파일로 ATOM 데이터베이스에 저장된다. 각 단계 최적화 반복하는 동안 유한요소 모델과

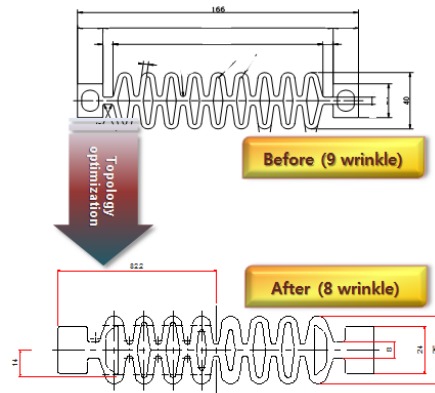
파라미터 파일이 동시에 계산한다. 각 최적화 반복의 결과는 변경될 최적화 중립 형식(*.ONF) 및 유한요소모델의 물질 분포에 저장된다. 본 모델의 최적화 단계과정은 18회 반복 후 성공하였으며, 단계 별 위상최적화 과정은 Fig. 5와 같다. 이로부터 통로연결막의 제조공정을 고려한 제작용 최적 단면은 Fig. 6과 같다. 이 그림에서 기존 단면(상단부)과 최적화 단면(하단부)을 살펴보면, 최적화 단면은 기존 9산 주름에서 8산으로 감소하고, 사다리꼴 형상의 양 끝단 형상을 갖는다.



[Fig. 4] An optimization process iteratively searches for an optimized solution



[Fig. 5] Topology optimization results-material distribution

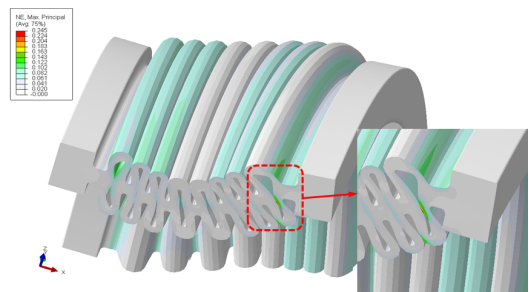


[Fig. 6] Comparison of cross-section shapes for gangway connections

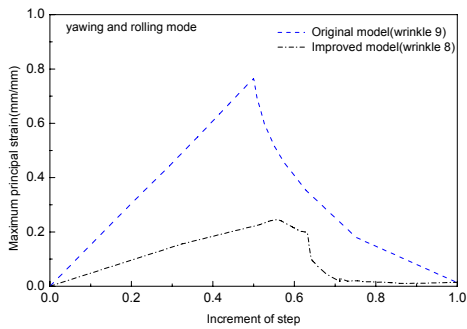
3.2.3 최적설계(안)의 비선형 구조해석

제안된 최적화 단면의 유효성을 검증하기 위하여 롤링 및 혼합모드조건하에 비선형구조해석을 수행하였다.

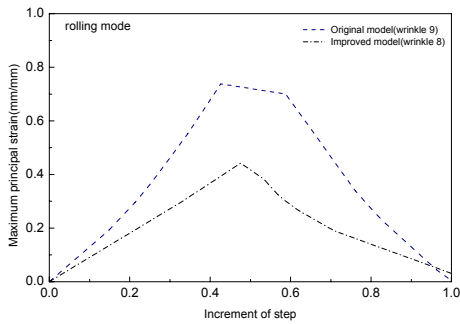
Fig. 7은 혼합모드 회전각변위 조건하(2번째 조건 No. 2)에 Fig. 6의 최적화 단면에 대한 최대 주변형률 분포이고, Fig. 8은 롤링 및 혼합모드 조건하에 1 cycle동안 취약부위에서 최대변형률 이력을 나타낸 것이다. 그림에서 혼합모드하에 최적단면의 최대 주변형률은 0.245로서 기존보다 68%감소하였다. 또한, 롤링모드하에 최적단면의 최대 변형률은 기존모델[8]보다 39%감소하였다. 이로부터 위상최적화 과정으로부터 얻은 Fig. 6의 단면의 유효성을 확인하였다.



[Fig. 7] Max principal strain distribution of the improved design under mixed mode



(a) mixed mode(Yawing($2\beta^\circ$) + Rolling(α°))



(b) rolling mode(α°)

[Fig. 8] Comparison of max principal strain histories between the original model and the improved model

4. 결론

본 연구에서는 관절식 고속철도차량 통로연결막의 안전성 향상 연구 일환으로서, 본 고무부품의 단면형상에 대한 위상최적설계를 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 차량기지 인입선조건을 고려한 혼합모드조건하에 본 통로연결막의 코너부 중심에서 비선형 구조해석 결과, 최대주변형률은 주름사이의 골지점에서 0.765이다. 이는 다른 회전모드(롤링, 피칭, 요잉) 조건보다 큰 값이므로 매우 취약조건임을 확인하였다. 따라서 향후 수행예정인 본 부품의 내구성 평가에서는 차량인입선 주행조건을 고려하여 반영해야 할 것이다.
- (2) 총 18회 단계를 거친 밀도법 위상최적설계를 수행한 결과, 통로연결막의 최적화 단면은 기존 모델보다 주름을 개선한 8산 주름과 양 끝단의 사다리꼴

형상을 갖는다.

- (3) 최적단면의 최대 주변형률은 혼합모드 및 롤링모드에서 기존모델보다 각각 68% 및 39% 감소하였다. 이로부터 위상최적화 과정으로부터 얻은 최적 단면 유효성을 확인하였다.

기존 통로연결막의 단면형상에 대한 최적설계능력을 향상시킴으로서 제품개발의 경제적 비용을 줄일 수 있었다고 판단된다. 향후에 이를 바탕으로 내구성평가가 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] 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.
- [2] 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, pp.211-216, 2007.
- [3] J. J. Kim and H.Y. Kim, "Optimum Shape Design of Engine Mounting Rubber Using a Parametric Approach", *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 2, No.2, pp.33-41, 1994.
- [4] J. H. Kim and S. T. Kim, "A Study on Shape Optimization for Seal Groove of Disc Caliper using Finite Element Method and Taguchi's Method", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No.1, 2006.
- [5] C. H. Park, H. J. Shim, D. H. Choi, J.K. Kim and S. M. Lee, "Shape Optimization Of Rubber Isolators in Automotive Cooling Modules For The Maximization Of Vibration Isolation And Fatigue Life", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 61-75, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-012-0006-7>
- [6] C. S. Kim and 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.
- [7] R. W. Ogden, "Non-linear Elastic Deformation", Dover Published, INC., Mineola, New York. 1984.
- [8] 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>

- [9] Hyubdai-Rotem, "Gangway Bellows", KTX-II Internal Report, 2009.
- [10] Bendsøe, M. P., and O. Sigmund, "Material Interpolations in Topology Optimization," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 69, pp. 635-654, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s004190050248>
- [11] O. Sigmund, "Deisgn of Multiphysics Actuators Using Topology Optimization tress Characteristics Using Tures", *Copmput. Methods. Appl. Mech. Eng.* vol.190, pp. 6577-6604, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00252-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00252-3)

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