

철도 차량의 축에 대한 구조 해석을 통한 융합 기술연구

조재웅

공주대학교 기계자동차공학부

Study on Convergence Technique through Structural Analysis on the Axle of Railway Vehicle

Jae-Ung Cho

Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

요약 철도차량에서의 축은 안전한 운행을 하기 위해서는 중요한 역할을 함으로서 그 강도 및 내충격성, 재질, 안전계수, 응력 및 변형이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 Model 1과 Model 2의 시뮬레이션 모델들이 있다. 이 모델들은 CATIA와 ANSYS로 설계, 구조 및 피로 해석을 통한 융합 기술을 수행함으로써 연구된다. Model A의 최대 변형량과 최대 등가응력이 Model B보다 더 작음으로서 Model A가 Model B보다 내구성을 더 가지고 있다. 본 연구 결과를 철도 차량의 부품 설계에 응용함으로써 파손을 방지하기 위한 내구성이 고찰될 수 있다. 그리고 디자인 면에서의 융합 기술로의 접목도 가능하여 미적인 감각을 나타낼 수 있다.

• **Key Words** : 철도 차량의 축, 구조 해석, 피로 해석, 내구성, 융합 기술

Abstract As the axle at the vehicle of railway has the important role for safe running, the strength, and impact-proof, safety factor, stress and deformation must be considered. There are the simulation models of 1 and 2 in this study. These models are investigated by performing the convergence technique through the design, the structural and fatigue analyses with CATIA and ANSYS. As the maximum deformation and equivalent stress of model A are lower than those of model B, model A has more durability than model B. The durability to prevent the damage can be investigated by applying the result of this study into the part design of the vehicle of rail road. And it is possible to be grafted onto the convergence technique at design and show the esthetic sense.

• **Key Words** : Axle of railway vehicle; Structural analysis; Fatigue analysis, Durability; Convergence technique

1. 서론

철도차량에서의 축은 안전한 운행을 하기 위해서는 중요한 역할을 함으로서 그 강도 및 내충격성, 재질, 안전계수, 응력 및 변형이 고려되어야 한다. 기본적으로 화물용 철도 차량의 무게는 1량에 약 43톤 정도 되며, 4-5축 정도가 된다. 이러한 점을 고려해 볼 때, 1축당 걸리는 하중은 약 10톤 이상이며 여기에 탑승인원, 사람들의 짐, 화

물 등을 고려한다면 하중은 훨씬 더 크게 된다. 그러므로 철도 차량의 축은 일반 도로 차량과는 다르게 강도와 재질을 더욱더 신중하게 고려해야만 한다[1,2]. 그러나 실제 시험은 실험규모, 비용 그리고 안전문제 등으로 인해 구현되기 어렵기 때문에 이를 대체해서 할 수 있는 실험장치의 필요성이 점차 증가하고 있다. 더욱이 설계 단계에서의 ANSYS를 통한 정적 구조해석을 하여 하중에 의한

*교신저자 : 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

접수일 2014년 11월 5일

수정일 2014년 12월 18일

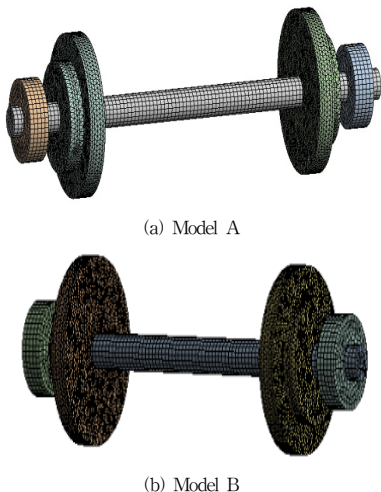
게재확정일 2015년 2월 20일

전체 변형율과 응력해석을 구현할 수 있고, 기차바퀴의 피로 해석을 수행하여 그 내구성을 평가할 수 있었다 [3,4,5]. 또한 철도 차량의 용도에 따라 다른 축을 적용함으로써 차량의 중량 감소 및 소재 절감으로 인한 도입 비용 절감을 예상해 볼 수 있다. 또한 기차 축의 피로 해석을 수행하여 내구성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 철도 차량의 축 형상과 하중에 의한 구조 및 피로 해석을 하였다. 모델 A는 중실축이고 모델 B는 중공축이다. 해석 결과, 중실축이 일반적으로 내구성 및 피로 하중이 높으나 중하중 및 경하중이 작용되는 지하철 및 승객 전용 기차의 중공축에 대하여 충분한 강도를 확보할 수 있다고 사료된다[6]. 본 연구의 결과를 종합하여 차량의 부품 설계에 응용한다면, 그 파손 방지 및 내구성[7,8,9,10,11,12,13,14,15]을 검토하여 그 설계에 유용하게 활용될 것으로 사료된다. 그리고 디자인 면에서의 융합 기술로의 접목도 가능하여 미적인 감각을 나타낼 수 있다.

2. 연구내용

2.1 해석 모델

해석을 위한 모델링을 하기 위해서 불필요한 부품과 기하학적 요소를 제거하고, 나머지 필요한 부분은 유한 요소 모델링이 용이하게 표면을 다듬질 하거나 조합하는 전처리를 수행하였다. 본 연구에서는 해석모델로서 중실축을 가진 Model A와 중공축을 가진 Model B의 메시들은 Fig. 1과 같다. Table 1은 이 모델링의 재료인 구상흑연 주철로서의 물성치를 나타낸 것이다.



[Fig. 1] Meshes of models

[Table 1] Material property of case iron

Young's Modulus	19 GPa
Poisson's Ratio	0.27
Density	2770 kg/m3
Tensile Yield Strength	250 MPa
Compressive Yield Strength	280 MPa
Tensile Ultimate Strength	310 MPa
Compressive Ultimate Strength	0 MPa

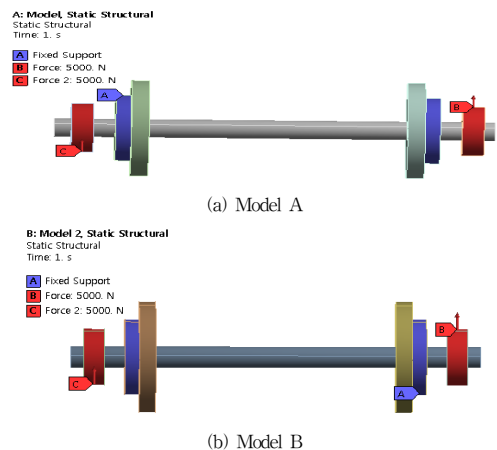
2.2 해석 조건

Fig. 2 (a), (b)는 Model A 및 B에 대한 모델의 해석에 대한 조건으로서 철도 레일과 맞닿는 부분에 하중 조건을 주었으며, 객차와 연결되는 외측 원형고정 부위를 고정 조건을 주었다. 이를 이용하여 구조해석 및 피로해석을 수행하였다.

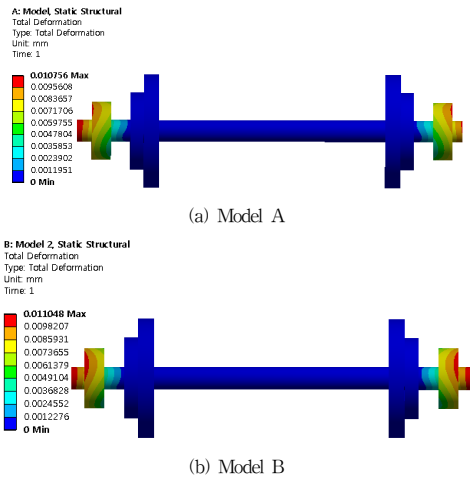
3. 연구결과

3.1 구조해석 결과

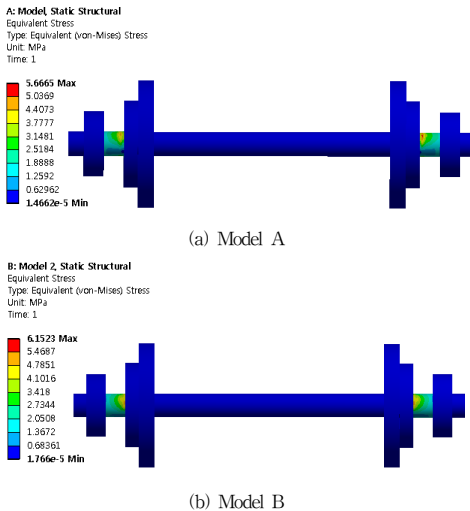
구조 해석 결과, Fig. 3 (a), (b) 및 Fig. 4 (a), (b)는 Model A 및 Model B에 대한 각각의 전변형량과 등가응력의 등고선 그림들이다. 최대의 변형량은 모델 A와 B에서는 각각 0.010756mm, 0.0111048mm이고, 최대의 등가응력은 첫 번째 모델이 5.67MPa, 두 번째 모델이 6.15MPa로서 각각 나타났으며 철도차량 바퀴와 레일이 맞닿는 아랫면에서 가장 많은 변형과 응력이 발생하였다. Model A의 최대 변형량과 최대 등가응력이 더 작게 걸려서 내구성면에서 더 좋아짐을 알 수 있다.



[Fig. 2] Fixed support & force conditions of models



[Fig. 3] Contour of total deformation at model

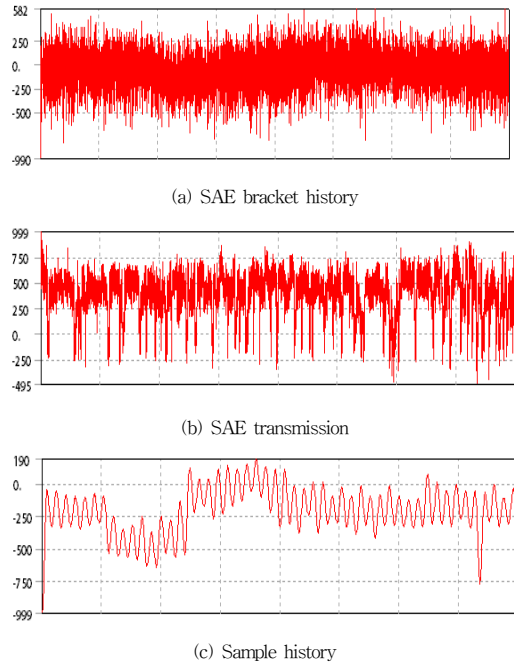


[Fig. 4] Contour of Equivalent Stress at model

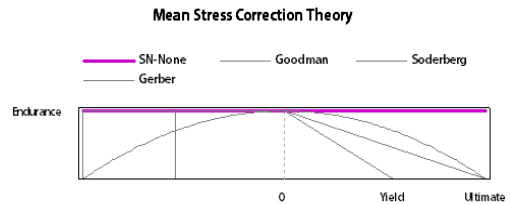
3.2 피로 해석 결과

Fig. 2와 같이 철도 차량의 축에 힘을 작용하여 피로 해석을 수행하였다. Fig. 5에서의 평균 응력은 Fig. 2의 구조 해석에서 사용한 하중 조건과 같다. 실제 철도 차량이 달리면서 바퀴의 축이 받는 피로는 셀 수 없이 많을 것이다. Fig. 5와 같이 실질적으로 받을 수 있는 불규칙 진폭하중의 내역들로서 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’ 및 ‘Sample history’이고 이 3가지 경우들로서 서로 공히 비교 할 수 있다. 각각의 하중에 따라서 주기적인 사이클들의 경과에 따른 하중의 진폭 양상들을 보여주고 있다. 식 (1)은 Goodman식으로서, 본 연구에서

사용할 수 있는 연성 재질에 적용할 수 있는 평균응력 및 응력 진폭에 대한 피로한도와 인장강도에 대한 관계를 나타내고 있다. Fig. 6은 이 식을 이용하여 X 및 Y축 상에서 각각 평균 응력과 응력 진폭을 나타낸다.



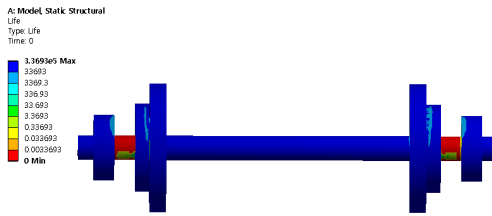
[Fig. 5] Load histories at nonuniform fatigue loads



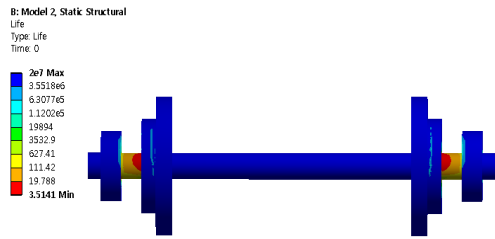
[Fig. 6] Mean stress correction

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (1)$$

여기서, S_e : 피로한도
 S_u : 인장강도
 σ_a : 응력진폭
 σ_m : 평균응력

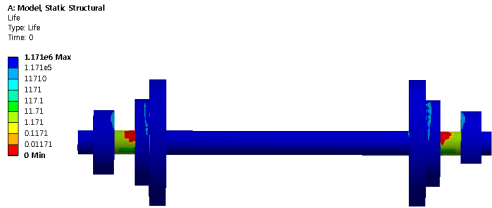


(a) SAE bracket history

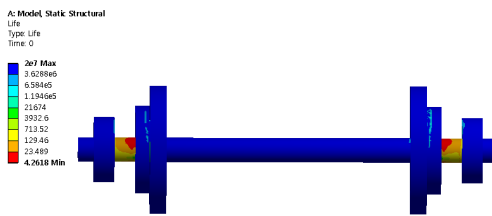


(c) Sample history

[Fig. 8] Contour plots of fatigue life at model A

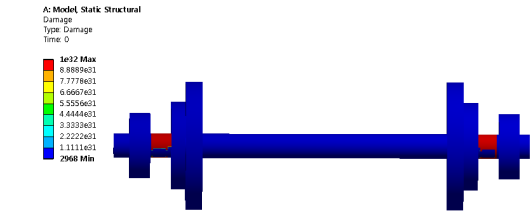


(b) SAE transmission

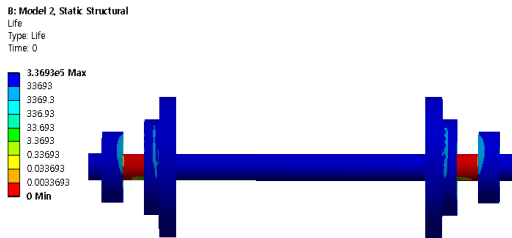


(c) Sample history

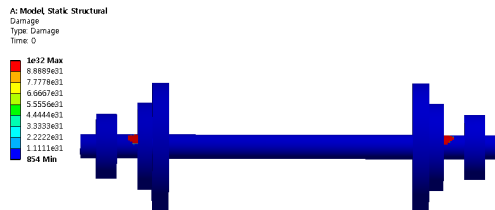
[Fig. 7] Contour plots of fatigue life at model A



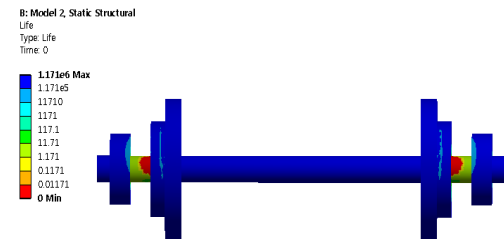
(a) SAE bracket history



(a) SAE bracket history

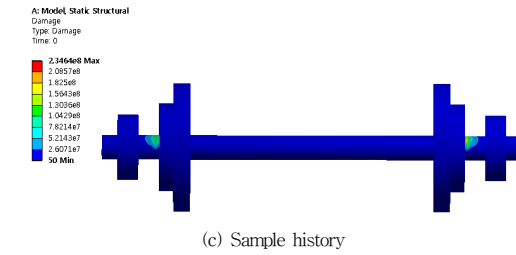


(b) SAE transmission

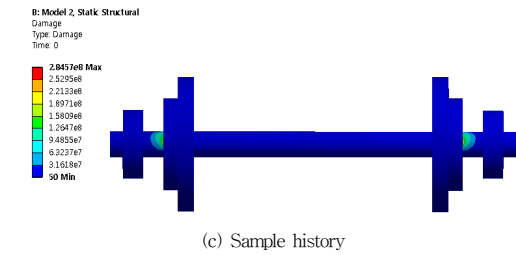
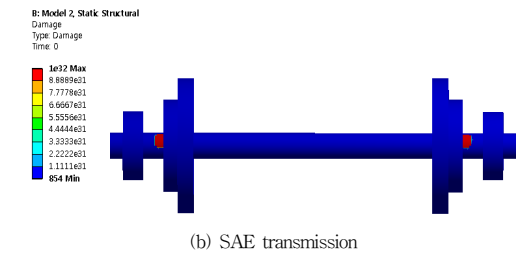
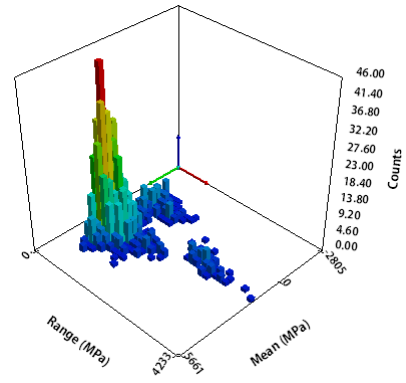
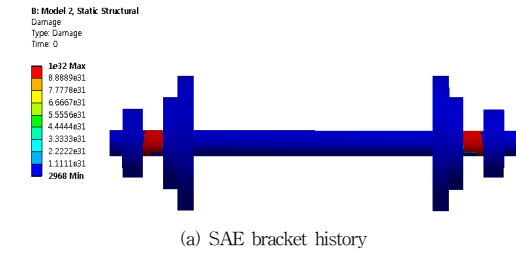
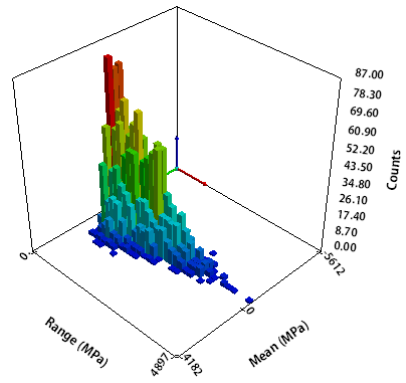


(b) SAE transmission

Fig. 7 및 8은 Model A와 B에 대하여 각각 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’ 및 ‘Sample history’ 이고 이 3가지 경우에 있어 피로 수명에 대한 그림들이다. 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’에서 보면, 그 최대 수명이 Model A와 B에 대하여 3.3693×10^5 , 1.2856×10^5 Cycle로서 그 수명이 가장 작음을 알 수 있다. 그리고 ‘Sample history’의 경우는 Model A와 B, 둘 다 2×10^7 Cycle로서 가장 길어짐을 알 수 있다. 따라서 불규칙 피로 하중들중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

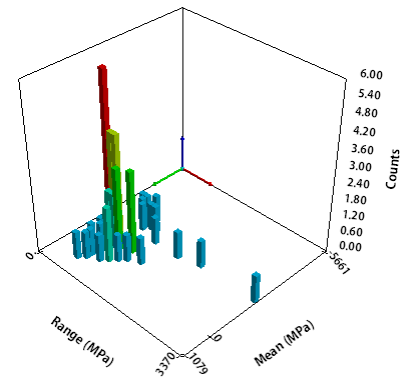


[Fig. 9] Contour plots of fatigue Damage at model A

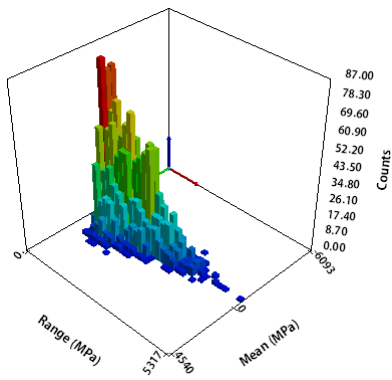


[Fig. 10] Contour plots of fatigue Damage at model A

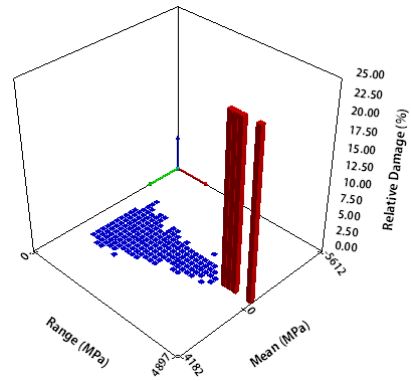
Fig. 9 및 Fig. 10은 Model 1과 Model 2 경우들에 대한 피로 손상들을 나타낸 등고선 그림들이다. 그림들에서 보면 하중의 변화가 극심한 'SAE Bracket'의 경우가 손상이 2968로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 'Sample history'의 경우가 그 손상이 50 정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE bracket history'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample history'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.



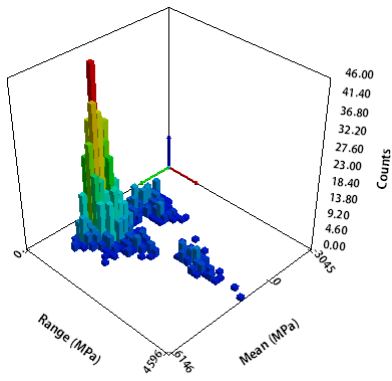
[Fig. 11] Plot of rainflow matrix at model A



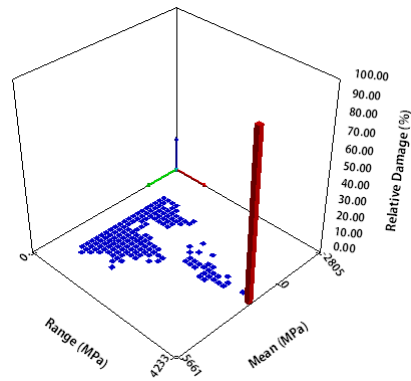
(a) SAE bracket history



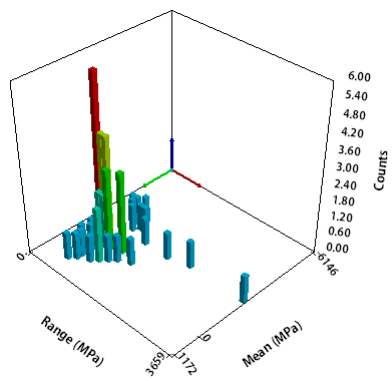
(a) SAE bracket history



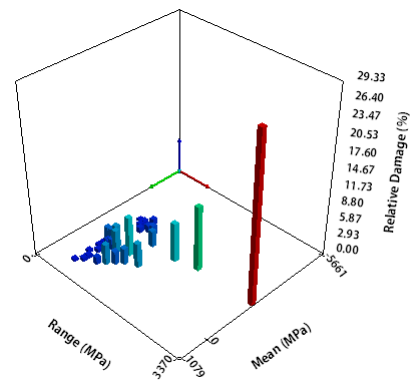
(b) SAE transmission



(b) SAE transmission



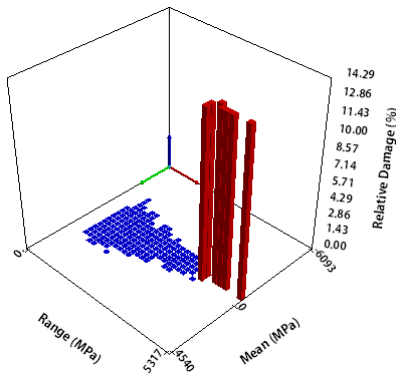
(c) Sample history



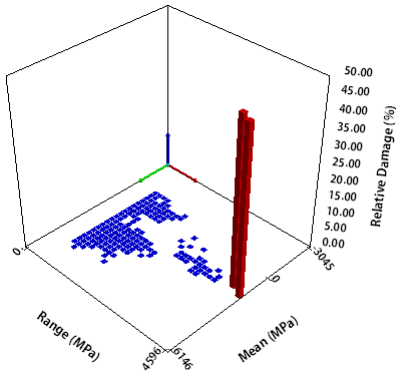
(c) Sample history

[Fig. 12] Plot of rainflow matrix at model B

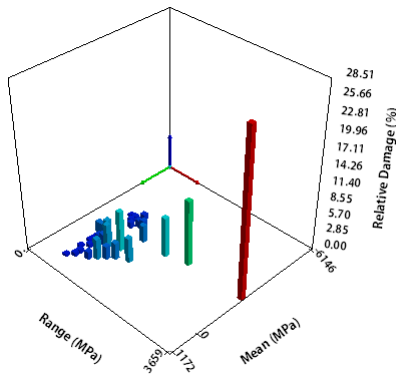
[Fig. 13] Plot of Damage matrix at model A



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



(c) Sample history

[Fig. 14] Plot of Damage matrix at model B

그리고 Fig. 11과 Fig. 12는 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 Model A와 Model B에 대한 진폭 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려진다. Z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된

다. Fig. 11 및 Fig. 12에서 보면 Model A와 Model B 공히 ‘SAE bracket history’의 경우에 있어 상대적인 손상은 평균응력이 0부근의 상태에서 최대의 빈도수가 둘 다 80정도로서 상대적인 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sample history’의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 둘 다 5정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었다. Fig. 13 및 Fig. 14는 본 연구 모델들인 A와 B의 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 13 및 Fig. 14에서 보면 Model A와 B, 공히 ‘Sample history’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균응력이 국부적으로 0Pa부터 -1011Pa이고 응력진폭 0Pa부터 1010Pa에 있어서 최대 3%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다. 그리고 ‘Sample history’의 경우가 최대 0.6% 정도의 파손가능성을 보이는 ‘SAE bracket history’나 ‘SAE transmission’의 경우보다 6배의 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 철도 차량의 중공축 및 중실 축을 가진 바퀴에 대한 구조 및 피로 해석을 통하여 다음과 같은 해석 결과를 확인하였다.

- 1) 구조 해석 결과, 모델 A와 모델 B의 최대 변형량은 각각 0.010756mm, 0.011048mm 이고, 최대 등가응력은 각각 5.67MPa, 6.15MPa로서 Model A의 최대 변형량과 최대 등가응력이 더 작게 걸려서 내구성 면에서 더 좋아짐을 알 수 있다.
- 2) 피로 해석 결과, 두 모델 공히 ‘Sample history’의 경우는 최대의 피로 수명은 ‘SAE bracket history’의 경우 보다 다소 높은 내구성을 확인 하였다. 또 ‘SAE bracket history’의 경우는 ‘SAE transmission’의 경우보다 수명이 다소 짧음을 확인할 수 있다.
- 3) 기관차의 중실 축이 내구성 및 충격, 고하중, 진동에 강한 면을 보이나 중공 축은 내구성 및 충격, 고

하중, 고진동에 약하여 무거운 화물 객차나 특수 기차에는 부적합한 것으로 확인되었다. 다만 중량 부하가 크지 않고 진동수가 크지 않은 전동차 축등과 같은 분야에는 추가 선행연구를 통해 차체 경량화를 시도해 볼 수 있을 것이다.

- 4) 본 연구의 결과를 종합하여 차량의 부품 설계에 응용한다면, 그 파손 방지 및 내구성을 검토하여 그 설계에 유용하게 활용될 것으로 사료된다. 그리고 디자인 면에서의 융합 기술로의 접목도 가능하여 미적인 감각을 나타낼 수 있다.

REFERENCES

- [1] J. S. Lee, "Design Parameters for Supporting Frame in a Twist screen", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 15, No.2, pp. 85-91, 2013.
- [2] J. M. Kim, K. T. Lee, H. Y. Kim, "Numerical Modeling to Evaluate Reat Crashworthiness for Round Recliner of Automotive Seats", Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 64-71, 2009.
- [3] T, K, Lee, B, S, Kim, "The structure of an Automotive Woofer Speaker", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 19-24, 2012.
- [4] Y. S. Lee, B. H. Jun, J. M. Oh, "A Study on the Design Optimization of Composite Cylindrical Shells with Vibration, Buckling Strength and Impact Strength Characteristics", Transaction of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 5, No. 4, pp. 48-69, 1997.
- [5] H. K. Choi, J. U. Cho, "Structural Analysis on the Fracture of Bonded Double Cantilever Beam Model", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 41-47, 2012.
- [6] H. Y. Kim, S. K. Lee, Y. J. Shin, "Analyses of Deployment Process and Sled Test for Designing Airbag Module", Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 6, No. 2, pp.118-128, 1998.
- [7] J. K. Kim, B. H. Jang, Y. C. Park, K. H. Lee, "Durability Evaluation of Automobile Control Arm", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 168-172, 2012.
- [8] M. S. Han, J. U. Cho, "Structural and Fatigue Analysis on Shock Absorber Mount of Automobile", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 1, pp. 125-133, 2012.
- [9] G. H. Kang, C. S. Kim, "Damping Characterization of the Double-skin Aluminum Extruded Panels for Rolling Stock Carbody", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 7, pp. 3197-3202, 2013.
- [10] A. K. Kim, K. Tunvir, S. J. Park, G. D. Jeong, M. A. Hasan, S. S. Cheon, "Study on Compressive Behavior of Heterogeneous Al-alloy Foam by Cruciform-Hemisphere Model", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 14, Issue 6, pp. 933, 2006.
- [11] H. H. Kwon, K. J. Moon, S. E. Song, "Forging Process Analysis of the Multi-forging Die for the United Universal Pipe Joint of the Intermediate Shaft," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 19, No. 1, pp. 33-41, 2010.
- [12] S. N. Park, "Development Trend of Car Seat Technology", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 31, No. 4, pp. 26-33, 2009.
- [13] J. H. Kim, D. U. Park, J. H. Lee, M. G. Kim, W. S. Yoo, "Evaluation of Ride Comfort considering Seat Vibration", Spring Conference of the Korean Society of Automotive Engineers, pp. 933-938, 2002.
- [14] H. Y. Kim, K. T. Lee, H. I. Choi, S. T. Kim, C. S. Park, D. J. Lee, "Structural Analysis for the Development of Round Recliner", Autumn Conference of the Korean Society of Automotive Engineers, pp. 1361-1366, 2003.
- [15] J. Swanson, 2009, Ansys 120.0, Ansys Inc., USA.

저자소개

조 재 응(Jae-Ung Cho)

[종신회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)

· 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계·자동차공학부 교수

<관심분야> : 기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌 시 동적 해석