

대차프레임의 피로설계 및 피로강도 평가

Fatigue Design and Fatigue Strength Evaluation of Bogie Frame

이상록* 이학주** 한승우** 김정엽*** 차정환*** 강재윤**** 박찬경*****
Lee, S. R. Lee, H. J. Han, S. W. Kim, J. Y. Cha, J. H. Kang, J. Y. Park, C. K.

ABSTRACT

Stress analysis of the bogie frame by using the finite element method has been performed for the various loading conditions according to the results of vehicle dynamics analysis. Multiaxial fatigue analysis methods such as signed von Mises method, and typical critical plane theories were reviewed, and margin of safety for fatigue is defined. Multiaxial fatigue analysis program to predict the margin of safety of bogie frame under non-proportional loading conditions has been developed by using a commercial command language. Fatigue analysis of bogie frame under multiaxial loading was performed through this program and finite element analysis result. The procedure developed in this study is considered to be useful for the fatigue strength analysis in preliminary design stage of railway components under multiaxial loading condition.

1. 서론

대차(Bogie)는 크게 대차프레임, 차륜 및 차축, 현수장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달장치 등으로 구성되며, 대차프레임은 형상이 복잡하고 하중을 직접 지지할 뿐 아니라 하중조건도 정적 및 동적 하중이 복합적으로 작용하고 있다. 대차프레임은 차체 자중, 승객 하중에 의한 정적 하중과 곡선주행, 제동 시 발생하는 준 정적 하중(Quasi-Static Load) 및 불규칙한 선로와 차체, 대차, Wheelset의 상대운동에 의한 동적 하중을 받고 있다. 즉 하중 진폭, 평균 하중 및 주파수가 변화되는 복합 피로하중을 받고 있으므로 대차프레임의 강도 설계 시에는 반복적인 피로하중을 고려하여야 한다.^{(1), (2)}

본 연구에서는 철도차량 동특성 해석 프로그램(VAMPIRE)을 이용하여 고속전철에 사용되는 동력객차용 동력 대차프레임에 작용하는 피로하중을 구하였으며, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 대차프레임의 구조해석을 수행하였다. 주용력 크기와 방향이 시간에 따라 변하는 비위상(Non-proportional) 다축하중을 받는 대차프레임의 피로해석을 위한 프로그램(KIMM-FATIGUE)을 PCL(PATRAN Command Language)을 이용하여 개발하였다. 개발된 프로그램은 하중이력, 유한요소해석 결과 및 재료의 물성치를 입력으로 하여, 현재 제안되어 있는 대표적인 다축피로 손상 기준에 따라 피로안전율(MSF : Margin of Safety for Fatigue)을 계산할 수 있으며, 해석 결과 얻어진 MSF의 분포를 PATRAN을 이용하여 출력 할 수 있도록 되어있다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부 책임연구원, 정회원
** 한국기계연구원 구조시스템연구부 선임연구원, 정회원
*** 한국기계연구원 구조시스템연구부 연구원, 비회원
**** 한국과학기술원 기계공학과 선임연구원, 정회원
***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 대차프레임에 작용하는 하중

대차는 철도 차량을 구성하는 구조 부품 중에서 가장 중요한 요소 중의 하나이므로, International Union of Railway(UIC)에서는 Code를 제정하여 동력차에 사용되는 대차프레임의 피로 강도를 평가하는 기준(UIC Code 615-4)을 제안하고 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 영국철도연구소에서 개발한 철도차량 동특성 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 주행 중에 대차프레임에 작용하는 동하중이력을 계산하였으며, 해석 방법 및 절차는 참고 문헌에 상세히 나타나있다.⁽⁴⁾

해석에 사용된 고속전철의 차량 편성은 그림 1과 같이 동력차(P) + 동력객차(M) + 객차(T) 3량 + 동력객차(M)의 총 6량으로 하였다. 대차는 동력차용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 2대, 동력객차용 동력대차(MTB, Motorized Tailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Tailer Bogie) 4대로 구성되어 있다.

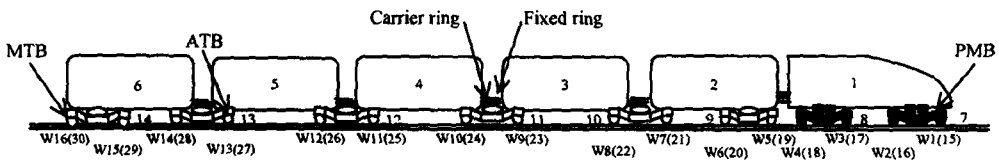


그림 1. 동력학 해석을 위한 차량 시스템 편성

그림 2는 해석에 사용된 British Railway에서 제공하는 캔트, 곡률, 폭방향, 수직방향 및 궤간에 대한 불규칙도를 보여주며, 이때의 주행속도는 350 km/h이었다.

주행중의 대차프레임에 작용하는 동하중은 차량 시스템의 전, 후부에 장착된 동력객차용 동력대차(MTB, 1,2)에 대해서 대차프레임에 연결된 동적요소인 1, 2차 현수장치 장착 지점에서의 작용력을 이용하여 계산하였다.

그림 3은 동력학 해석 결과 얻어진 수직방향 및 레일 폭 방향 하중이력을 보여 주며, Cut-off Frequency = 30 Hz인 Low Pass Filter를 사용하여 Noise를 제거하였다. 표 1은 동력학 해석 결과 얻어진 하중이력에서 구한 최대하중, 최소하중, 하중진폭 및 평균하중을 보여주며, 여기에서 보여주시는 않지만 UIC Code⁽³⁾에서 규정한 하중크기와 비교적 잘 일치하는 값을 얻었다.

표 1. 동력학 해석 결과

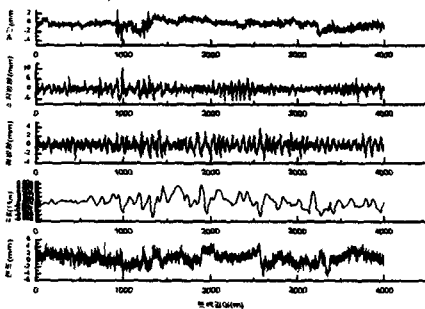
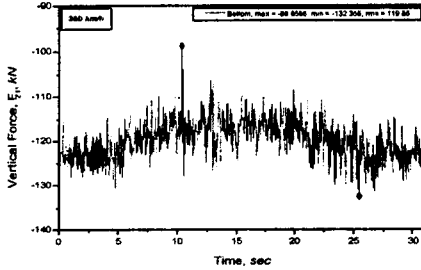
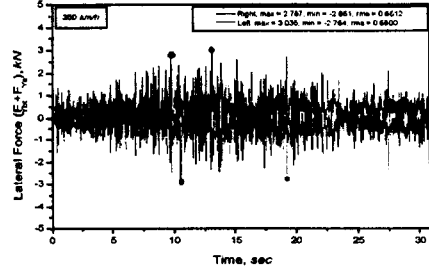


그림 2. 트랙의 불규칙도

구분	최대하중 (kN)	최소하중 (kN)	하중진폭 (kN)	평균하중 (kN)
수직, F_{z1}	- 98.7	- 132.4	16.9	- 115.6
수직, F_{z2}	- 111.6	- 146.0	17.2	- 128.8
폭, F_y	Right	2.8	- 2.9	2.9
	Left	3.0	- 2.8	2.9



(a) 수직방향 하중이력(F_{Z1})



(b) 폭방향 하중이력(F_Y)

그림 3. 동력객차용 동력 대차프레임에 작용하는 하중이력

3. 대차프레임 유한요소 해석

대차프레임 피로해석을 위한 응력 상태를 파악하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다. 대차프레임의 유한요소 모형화하기 위해서 Shell 요소를 사용하였고, Axle Box, Axle, Brake Anchor Plate에 작용하는 하중을 모형화하기 위해서는 Beam 요소를 사용하였으며, 1차 현가장치를 모형화하기 위해서는 Spring 요소를 사용하였다. 유한요소모형, 경계조건, 기계적특성 등에 관한 상세한 사항은 참고문헌에 나타나 있으며,⁽²⁾ 그림 4는 대차프레임에 수직하중 및 폭방향하중이 작용하는 경우의 경계조건 및 하중조건을 보여준다.

대차프레임의 소재는 용접성을 고려하여 탄소강 및 합금강 단강품(Carbon and Alloy Steel Forging)의 일종인 LF1(ASTM)으로 선정하였다.

피로해석은 취약부위로 예측되는 Transom과 Side Frame이 교차하는 부위의 밑 부분에서 72개의 절점에 대해서 수행되었다.⁽²⁾

수직방향하중 및 폭방향 하중(P_{k, FEA})이 작용하는 경우에 유한요소해석으로부터 얻은 응력성분 (σ_{ij,k})을 이용하여, 식 (1)에 의한 선형중첩으로 응력이력을 구하였다. 그림 5는 절점 4,796에 작용하는 응력이력을 보여 주며, 여기서 보이지는 않지만 비위상 다축응력을 받고 있다.

$$\sigma_{ij}(t) = \sum_k \sigma_{ij,k} \left(\frac{P_k(t)}{P_{k, FEA}} \right) \quad (1)$$

여기서, k : load case

σ_{ij,k} : load case k 일 때의 응력성분

P_k(t) : 하중 크기(load case k, 시간 t)

P_{k, FEA} : 유한요소해석에 이용된 하중크기(load case k)

이다.

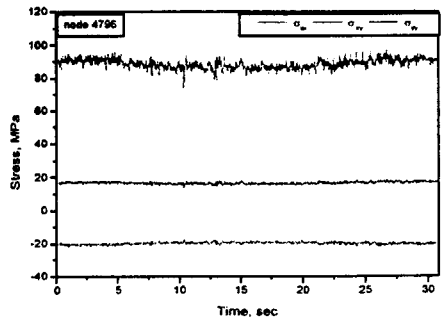
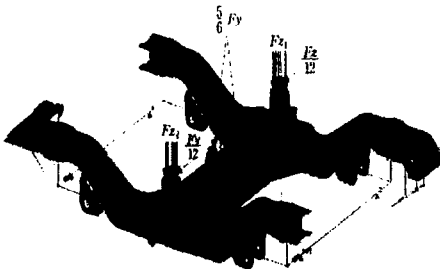


그림 4. 대차프레임 유한요소 모형 및 경계조건 그림 5. 취약부위 절점 4,796에서의 응력이력

4. 대차프레임 다축피로 해석

4.1 피로안전율

다축하중을 받는 부품의 피로설계를 위해서 취약부위에서 동가응력(Equivalent Stress)을 정의하고, 이를 단축하중의 피로성질을 이용하여 피로수명을 예측하는 접근방법이 많이 사용되어왔다. 이를 위해 다축하중을 받는 부품의 동가응력을 정의하기 위한 많은 노력이 시도되어 왔으나 아직까지 피로수명 예측에 적합한 동가응력이 제안되지 않고 있으며, 제안된 다축피로 수명 예측식은 소재, 하중상태(일정진폭 또는 변동진폭 하중), 하중종류(축하중, 비틀림하중, 굽힘하중 및 비틀림 굽힘하중의 비), 그리고 주응력 방향의 변동 여부에 따라 적용 여부가 달라질 수 있다.

특히 최근에는 변동진폭 하중의 경우의 수명예측을 위해서 다축파형계수법(Multiaxial Cycle Counting)의 알고리즘 개발에 관한 연구가 보고되고 있다.^{(6), (7)}

현재까지 제안된 비위상 다축 변동하중 하에서의 피로손상을 계산하는 방법은 크게 동가응력개념을 이용하는 방법과 Critical Plane 개념을 이용하는 방법으로 구분된다. 본 연구에서는 동가응력을 이용하는 방법 중에서 Signed von Mises 방법과 Critical Plane 개념을 이용하는 방법 중 Normal Strain Method, Shear Strain Method, Smith-Watson-Topper Method,⁽⁸⁾ Fatemi-Socie Method⁽⁹⁾ 및 Wang-Brown Method⁽¹⁰⁾를 이용하여 대차프레임의 피로안전율을 구하였다. 피로안전율(Margin of Safety for Fatigue)은 식 (2)와 같이 허용응력에 대한 작용 동가응력의 비로 정의된다. 고주기 피로영역에서의 피로해석을 위해 피로한도를 기준으로 안전율을 계산할 수 있는 프로그램(KIMM-FATIGUE)을 개발하였으며, 유한요소해석 결과와 KIMM-FATIGUE를 이용하여 대차프레임의 피로해석을 수행하였다.

대차프레임의 피로설계 기준이 되는 무한수명설계 개념에서는 소성변형률을 무시할 수 있으며, 이 경우에 피로안전율은 식 (3) - (7)와 같이 표시할 수 있다.⁽⁵⁾

Signed von Mises 방법의 경우에는 식 (2)를 이용하여 MSF를 구한다.

$$\text{Margin of safety for fatigue} = \frac{\text{Allowable stress}}{\text{Equivalent stress by applied load}} \quad (2)$$

- Normal strain :

$$\text{MSF} = \frac{2\sigma'_f (2N_f)^b}{\Delta\epsilon_n E + 2\sigma_m (2N_f)^b} \quad (3)$$

- Shear strain :

$$\text{MSF} = \frac{2(1+\nu)\sigma'_f (2N_f)^b}{E \cdot \Delta\gamma} \quad (4)$$

- Smith-Watson-Topper/Bannantine :

$$\text{MSF} = \sqrt{\frac{2\sigma'_f{}^2 (2N_f)^{2b}}{\sigma_{n,\max} (E \cdot \Delta\epsilon_n)}} \quad (5)$$

- Fatemi-Socie :

$$\Delta\gamma \cdot G \cdot (\text{MSF}) + \Delta\gamma \cdot G \cdot (\text{MSF})^2 n \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} = \sigma'_f (2N_f)^b + n \frac{\sigma'_f{}^2}{2\sigma_y} (2N_f)^{2b} \quad (6)$$

- Wang-Brown :

$$\text{MSF} = \frac{\sigma'_f (2N_f)^b}{\frac{E \cdot \Delta\gamma / 2 + S \cdot E \cdot \Delta\epsilon_n}{1 + \nu + S(1 - \nu)} + 2\sigma_{n,\text{mean}} (2N_f)^b} \quad (7)$$

4.2 허용응력

대차프레임의 소재인 LF1(ASTM)의 기계적 특성 및 피로특성을 구하기 위해서 인장시험 및 피

로시험을 수행하였다. 인장시험 결과, 대차프레임 소재의 항복강도(0.2 % Offset) 및 인장강도는 각각 335 MPa 및 469 MPa로 측정되었으며, 연신율은 45.1 %이었다. 정적강도에 대한 허용응력은 시험 결과 측정된 항복강도의 약 76 %인 255 MPa로 결정하였다.

소재의 피로 특성을 파악하기 위해서, 10 톤 용량의 유압식 피로 시험기를 이용하여 최소 단면적 12.0 × 6.0 mm를 갖는 평판 시험편에 대한 피로시험을 수행하였다. 시험편에 육안으로 관찰 가능한 균열이 발생하여 균열길이가 약 2 - 3 mm 정도까지 진전되는 Cycle 수를 감지하여 파손으로 간주하고, 이를 피로 수명으로 정의하였다.

그림 6은 대차프레임 소재의 피로시험결과인 응력진폭 - 피로수명(Stress Amplitude - Fatigue Life)관계를 보여준다. 그림에서 사각형 및 원 기호는 평균응력이 0, 102 및 150 MPa인 작용하는 경우의 피로시험 결과를 나타내며, 평균응력이 증가하면 피로강도가 감소함을 알 수 있다.

그림 7은 평균응력 변화에 따른 피로한도(Fatigue Limit)의 변화를 보여준다. 그림에서 실선은 현재 고속전철용 대차프레임의 피로설계 시 사용되는 모재부의 허용응력 선도를 나타내며, 마름모(◆)와 원(●)은 피로시험 결과 얻어진 피로한도 및 식(8)을 이용하여 실험결과를 수정한 허용응력을 각각 표시한다. 대차프레임 소재의 피로시험결과로부터 허용응력을 산출 한 결과, 평균응력이 작용하지 않는 경우에 실제 설계 시 사용되는 허용응력과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 평균응력이 작용하는 경우에는 약간의 차이가 발생되었으며, 이의 원인을 규명하기 위한 추가 연구는 더욱 수행되어야 한다. 본 연구에서는 실선으로 표시된 현재 사용하고 있는 허용응력선도를 이용하여 피로해석을 수행하였다.

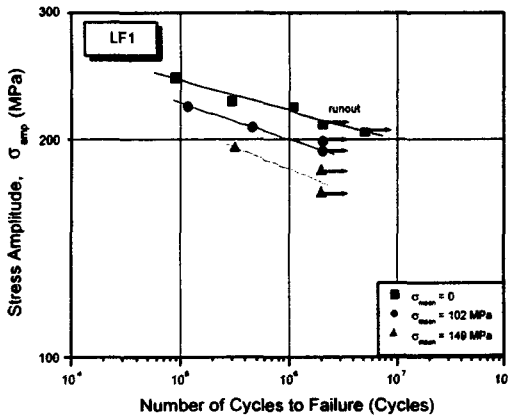


그림 6. 대차프레임 소재의 피로시험 결과

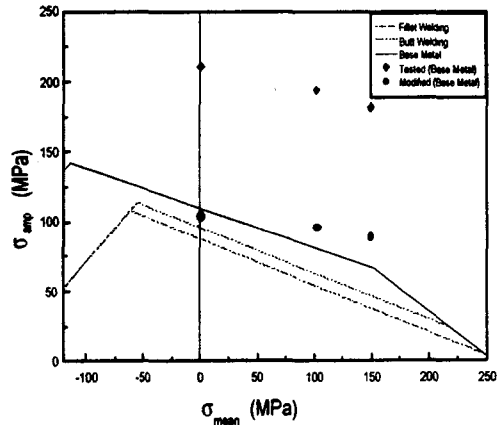


그림 7. 소재의 피로한도 및 허용응력

$$\sigma_{allowable} = \frac{1}{f_m f_s} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4}{K_f} \sigma_{mtl} \quad (8)$$

여기서,

$\sigma_{allowable}$: 부재의 허용응력

σ_{mtl} : 시험결과 얻어진 소재의 피로강도

f_m : 소재의 피로한도에 대한 안전율

f_s : 작용하중에 대한 안전율

C_1 : 치수효과, C_2 : 하중형식 효과, C_3 : 표면상태 효과, C_4 : 용접효과

K_f : 피로노치계수 이다.

f_m 은 소재의 화학성분, 열처리, 가공 등이 불균일하게 분포될 수 있는 가능성과 위의 식에서 나타난 C_1, C_2, C_3, C_4 및 K_f 를 추정하는데 있어서의 오차를 고려하기 위한 소재의 피로강도에 대한 안전율이다. 일반적으로 C_1, C_2, C_3, C_4 및 K_f 를 비교적 정확하게 추정할 경우에는 f_m 은 1.1~1.2

를 사용하며, 정확한 데이터가 없어 유사한 재료의 특성에서 유추하거나 예측하지 못한 부식 등이 발생할 가능성이 있는 경우에는 f_m 은 1.5를 적용한다.

f_s 는 부재에 작용하는 하중의 불균일, 즉 진동이나 충격에 의한 응력, 열응력 및 잔류응력 등의 영향을 고려하기 위한 작용하중에 대한 안전율을 나타낸다. 일반적으로 하중 및 작동조건이 안정되어 있는 경우에 $f_s=1.1$ 을 사용하지만 예측하기 어려운 과다하중이 예상되면 $f_s=1.2\sim 2$ 를 사용하여야 한다.

현재 자동차나 철도차량의 설계에 있어서 $f=f_m \cdot f_s$ 의 값은 1.2~1.3이 많이 사용되고 있으며⁽¹¹⁾, 본 연구에 있어서도 비교적 정확한 소재의 피로특성 데이터나 정확한 하중이력 측정치를 이용할 수 있으므로 $f_m \cdot f_s=1.2$ 를 사용하였다.

표 2는 대차프레임 소재의 피로 시험 결과 얻어진 강도데이터를 식(8)을 이용하여 부재의 허용 응력으로 변환하기 위한 상수들을 보여준다.

표 2. 소재 시험 결과를 이용하여 허용응력을 산출하기 위한 상수

상수	값	비고
C_1 치수효과	0.812	시험편과 부품 취약부위 치수 보정
C_2 하중형식 효과	1/0.923	시험편과 부품 취약부위 하중형식 영향 보정
C_3 표면상태 효과	0.675	시험편과 부품 취약부위 표면상태 영향 보정
C_4 용접효과	0.556	모재부의 경우 $C_4 = 1$
K_f 노치효과	1	
$f_m \cdot f_s$ 안전율	1.2	

4.3 PCL을 이용한 대차프레임 피로해석

유한요소해석 결과와 하중이력을 이용하여 다축하중하에서 대차프레임의 피로해석을 수행하는 프로그램을 PCL(PATRAN Command Language)을 이용하여 개발하였으며, 그림 8은 개발된 프로그램의 흐름도이다.⁽⁴⁾

본 프로그램은 유한요소 해석결과를 PATRAN의 DB 파일에서 바로 Access하여 처리하고, 피로 해석결과를 PATRAN을 이용하여 나타냄으로써 복잡한 다축피로해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 장점이 있다.

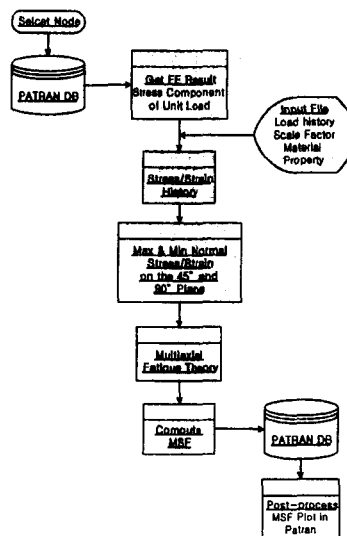


그림 8. 피로해석 프로그램(KIMM-FATIGUE)의 흐름도

그림 9는 KIMM-FATIGUE를 이용하여 구한 피로안전율 분포를 보여주며, 그림 10은 주요 절점에서 구한 피로안전율을 보여 준다. 그림에서 Shear Strain > Fatemi-Socie > Smith-Watson-Topper > Normal Strain > Signed von Mises > Wang-Brown의 순서로 피로안전율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 해석 대상 대차프레임의 최소 피로안전율은 1.59로 나타나 해석대상 대차프레임이 피로하중에 대해 안전하게 설계되었음을 알 수 있다.

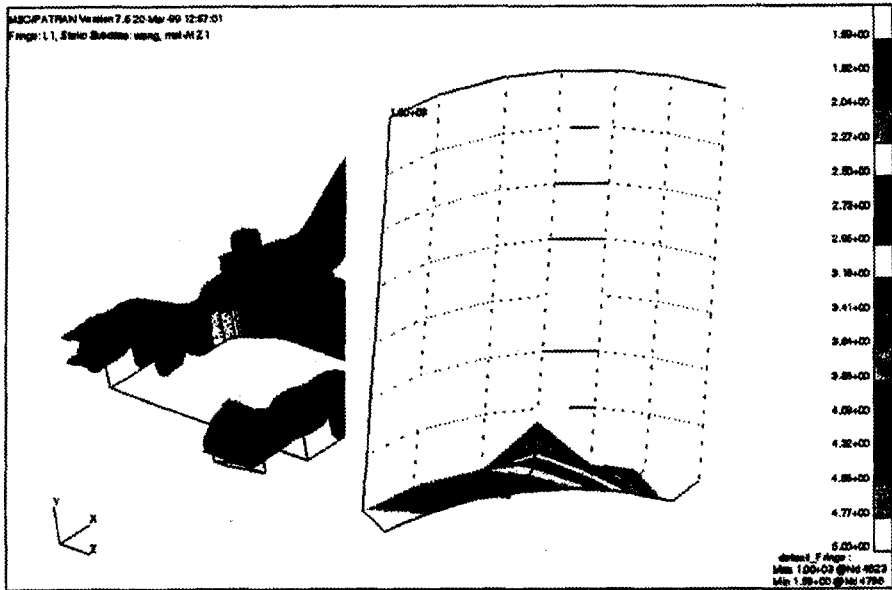


그림 9. KIMM-FATIGUE를 이용하여 구한 대차프레임의 피로안전율 분포

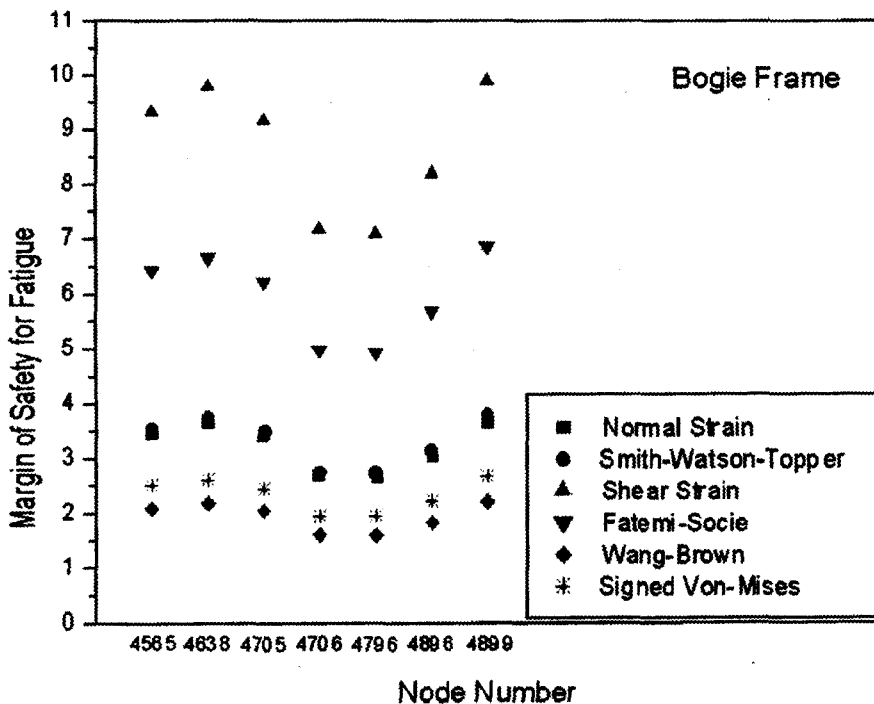


그림 10. 주요 절점에서 구한 대차프레임의 피로안전율

5. 결론

등가응력을 이용하는 방법과 Critical Plane 개념을 이용하는 방법으로 다축피로손상을 예측하기 위한 제안 식을 검토하였고, 유한요소해석 결과 및 피로손상식을 이용하여 피로안전율을 계산하는 프로그램(KIMM-FATIGUE)을 개발하였으며, 이를 이용하여 다축하중을 받는 고속전철용 대차프레임의 피로해석을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

KIMM-FATIGUE는 여러 가지 피로손상 모델을 이용한 비위상 다축피로해석이 가능하며, 응력성분 이력과 소재의 물성치를 입력데이터로 하여 피로안전율을 계산하도록 구성되어 있다. 본 프로그램은 유한요소 해석결과를 PATRAN의 DB 파일에서 바로 Access하여 피로해석을 수행하고, 피로 해석결과를 PATRAN을 이용하여 나타냄으로써 복잡한 다축피로해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 장점이 있다.

KIMM-FATIGUE를 이용하여 구한 대차프레임의 최소 피로안전율은 1.59로 나타나 해석대상 대차프레임이 피로하중에 대해 안전하게 설계되었음을 알 수 있다.

대차프레임 소재의 피로시험결과로부터 허용응력을 산출한 결과, 평균응력이 작용하지 않는 경우에 실제 설계 시 사용되는 허용응력과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 평균응력이 작용하는 경우에는 약간의 차이가 발생되었으며, 이의 원인을 규명하기 위한 연구는 더욱 수행되어야 한다.

6. 참고문헌

1. 이상록 외(1996), "대차의 구조 및 강도해석 기술 개발(II)," 한국기계연구원 연구보고서, BSN121-382.M.
2. 이상록 외(1998), "피로설계 및 내구성평가 기술 개발(II)," 한국기계연구원 연구보고서, 97-II-1-2.
3. UIC Code 615-4(1994), Motive Power Units - Bogies and Running Gear - Bogie Frame Strength Tests, International Union of Railways.
4. 이상록 외(1999), "PCL을 이용한 고속전철용 대차프레임의 다축피로 해석," '99 10th MSC Korea Users' Conference Proceedings, pp. 567-580.
5. KSD 4125(1983), 저온 압력용기용 단강품, 한국공업규격.
6. K. Dressler, V. B. Kottgen and H. Kotzle(1995), "Tools for fatigue evaluation of non-proportional loading", Proceedings of Fatigue Design '95, Finland.
7. M. Brokate, K. Dressler and P. Krejci(1996), "Rainflow counting and energy dissipation for hysteresis models in elastoplasticity", Eur. J. Mech. Solids, Vol. 15, No. 4, pp. 705~737.
8. J. Bannantine(1989), A Variable Amplitude Multiaxial Fatigue Life Prediction Method, Ph. D Thesis, University of Illinois.
9. A. Fatemi, D. Socie(1988), "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 11, No. 3, pp. 149-165.
10. C. Wang, M. Brown(1993), "A Path-Independent Parameter for Fatigue Under Proportional and Non-Proportional Loading", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 16, pp. 1285-1298.
11. 일본기계학회(1981), 금속재료 피로강도의 설계자료(I), 개정 제2판, 일본기계학회, pp. 6-8.

후기 : 본 연구는 1999년도 건설교통부/통상산업부/과학기술부 선도기술사업인 "고속전철기술 개발사업"의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.