

# 피로 강도 및 경량화를 고려한 대차프레임 설계

## Bogie Frame Design Considering Fatigue Strength and Minimize Weight

박 병 화\*                      김 남 포\*\*                      김 정 석\*\*                      이 강 용\*\*\*  
Park, Byung Hwa              Kim, Nam Po              Kim, Jung Seok              Lee, Kang Yong

### ABSTRACT

In development of the bogie, the fatigue strength of the bogie frame is an important design criteria. Also the bogie frame weight reduction is required in order to save energy and materials. In this study, structural analysis of bogie frame by using the finite element method has been performed for the various loading conditions according to the UIC standards and it has been attempted minimize the weight of bogie frame by back-propagation neural network and genetic algorithm. Finite element mesh generation and finite element analysis were performed by Altair HyperMesh and ABAQUS.

### 1. 서 론

철도차량용 대차 프레임은 차체의 하중을 지지하는 핵심 구조 부품의 하나로 차륜 및 차축, 원수장치, 제동장치, 견동기 및 동력전달장치 등의 다양한 부품들이 연결되어 있으며, 차체에 의한 하중도 불규칙한 선로와 차체, 주행 장치, 윤축(wheelset)의 운동모드에 의한 동하중 등의 다양한 하중을 받는 구조물이다. 따라서 대차 구조물의 안전성은 열차의 안전과 직결되기 때문에 대차프레임이 상용화되기까지는 공인된 규격에 의한 정하중 및 피로하중 시험조건을 만족해야 한다. 그러나 최초 설계안에 대하여 제작된 시제품이 처음부터 바로 시험을 통과하도록 설계한다는 것은 매우 어려운 일이며 시험과 보강설계를 병행하며 설계조건을 만족시키는 것은 비용과 시간 측면에서 매우 비효율적이다. 선행해석 단계로 유한요소법을 이용한 대차의 구조해석을 수행하면 많은 시간과 비용을 절약할 수 있으며 대차프레임의 구조해석은 국내외에서도 여러 차례 연구된 사례가 있다[1,2]. 또한 선행해석 과정에서 대차 프레임의 경량화를 위한 최적설계 문제를 구성하고 적절한 최적화 알고리즘을 적용하면 설계자가 지향하는 피로강도의 만족과 경량화라는 두 가지의 목적을 동시에 수행할 수 있다. 대차프레임의 경량화 최적화 방법에 대해서는 고속차용 대차프레임의 최적설계에 대한 연구[3]가 제시된 바가 있으나 이 논문에서는 JIS[4]에서 정의하고 있는 여러 하중조건 중에서 가장 높은 응력값을 나타내는 하중에 대한 최대응력과 허용응력의 관계를 구속조건으로 설정하여 최적화를 수행하였다. 그러나 JIS에서는 피로강도에 대한 설계조건을 요구하고 있으므로 구속조건은 피로강도 평가 결과가 되어야 한다.

본 연구에서는 UIC[5]에서 규정하고 있는 피로강도 평가 방법을 이용하여 대차프레임의 피로평가를 수행하였으며 피로강도 결과를 구속조건으로 하고 경량화를 목적함수로 하는 최적설계문제를 구성하였다.

\* 연세대학교 기계공학과 대학원 석사과정, 비회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\* 연세대학교 기계공학과 교수, 정회원

## 2. 대차의 피로내구 해석

### 2.1 대차프레임의 유한요소 모델

본 연구에서 사용된 대차는 볼스터형 대차로 대차의 볼스터와 브레이크 장치를 제외한 대차프레임의 유한요소 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 유한요소 모델의 총 절점수는 28,251개로 2710개의 육면체 솔리드 요소와 23,870개의 사각형 쉘 요소가 사용되었으며, 경계조건은 1차 현수장치 위치에 실제 대차와 동일한 강성을 갖는 스프링요소와 빔(beam)요소를 사용하였다. Fig. 1의 (a)에서는 볼스터 및 기타 부품을 포함한 대차 구조물의 모델과 부과되는 하중의 종류를 나타내었으며 (b)에서는 실제 해석이 사용되는 대차프레임의 유한요소 모델을 나타내었으며 Table 1에는 대차프레임에 사용되는 재료인 SWS490A의 JIS에서 규정되어있는 물성치를 나타내었다.

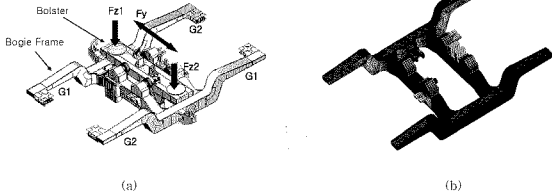


Fig. 1 Model of bogie frame

Table 1 Material properties of bogie frame( $kgf/mm^2$ )

Material	Yielding Strength	Tensile Strength	Fatigue Limit		
			Basic Material	Grinding	Welded joint
SWS490A	33	50	16	11	8

### 2.2 대차프레임의 하중조건 및 피로내구성 평가

UIC에서는 수직과 좌우 하중 및 트랙의 비틀림 하중에 대하여 피로강도를 평가하기 위한 주요 운행 하중조건(main in-service load)을 제시하고 있다. 롤링(rolling)에 의한 수직하중의 동적인 변화는 수직하중과  $a$ 의 곱으로 표현하고, 바운싱(bouncing)에 의한 수직하중의 변화는 수직하중과  $\beta$ 의 곱으로 표현한다. UIC에서 정의하는 일반적인 유럽 철도 기준에서는 정상적인 운행조건하에서  $\alpha=0.1$ ,  $\beta=0.2$ 로 정의하고 Table 2의 하중조건에 따른 해석을 수행하여 얻어진 평균응력과 응력진폭에 대해 Goodman 선도에 의한 설계조건을 만족하도록 규정하고 있다. 수직하중  $Fz$ , 좌우하중  $Fy$ , 비틀림하중  $Ftor$ 은 UIC 615-4 규정에 의해 구해졌으며 그 값은 다음과 같다.

$$Fz = 12320 \text{ (kgf)} \quad Fy = 7100 \text{ (kgf)} \quad Ftor = 461 \text{ (kgf)}$$

본 연구에서는 Table 2에서 제시된 17가지의 하중조건에 대한 해석을 전부 수행하지 않고 피로 해석이 타당범위내의 선형 해석이라는 점을 이용하여 정적 수직하중인  $Fz$ 에 대하여  $Fz1=Fz$ ,  $Fz2=Fz$ , 좌우하중  $Fy$ , 서로 다른 대각방향의 비틀림 하중  $Ftor1$ ,  $Ftor2$ 의 해석결과에 대하여 Table 2의 하중조건으로 응력중첩을 이용하여 계산 시간을 최소화 할 수 있는 후처리 과정을 개발하여 해석시간을 최소화 하여 사용하였다. 식 (1)에서는 평균응력과 응력진폭을 정의하였으며

여기서 사용된  $\sigma_{max}$ 와  $\sigma_{min}$ 은 ERRI B12 RP17[6]에 따라 Fig. 2의 과정으로 구해졌다. 계산된 평균응력과 응력진폭을 Goodman선도에 적용한 결과는 Fig. 3과 같으며 용접 후 grinding부에 대해서 피로강도를 만족하지 못하는 것으로 평가되었다.

Table 2 Load cases of main in-service loads

Load case	Vertical force		Transverse force	Torsional force	
	Fz1	Fz2		G1	G2
1	Fz	Fz	0		
2	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	0		
3	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	Fy		
4	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	0		
5	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	Fy		
6	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	0		
7	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	-Fy		
8	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	0		
9	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	-Fy		
10	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	Fy	Ftor1	
11	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	Fy		Ftor2
12	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	Fy	Ftor1	
13	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	Fy		Ftor2
14	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	-Fy	Ftor1	
15	$(1 - \alpha - \beta)Fz$	$(1 + \alpha - \beta)Fz$	-Fy		Ftor2
16	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	-Fy	Ftor1	
17	$(1 - \alpha + \beta)Fz$	$(1 + \alpha + \beta)Fz$	-Fy		Ftor2

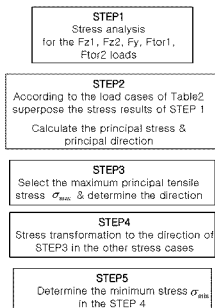


Fig. 2 Determination of the  $\sigma_{max}$  and  $\sigma_{min}$

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{and} \quad \sigma_{amplitude} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

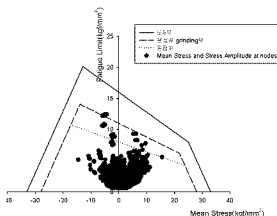


Fig. 3 Goodman Diagram of SWS490

### 3. 대차프레임의 최적설계

#### 3.1 설계문제 정의

근사최적화기법은 주어진 시스템을 묘사하는데 있어서 설계자가 요구하는 오차의 범위를 만족시키는 근사적인 모델을 생성하는 방법이다.

$$\text{Minimize : } F(x) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot X_i \cdot \rho \quad (2)$$

$$\text{Subject to : } \sigma_{\text{amplitude}} < \sigma_{\text{permissible}} \quad \rightarrow \quad n = \frac{\sigma_{\text{amplitude}}}{\sigma_{\text{permissible}}} < 1 \quad (3)$$

식 (2)의 F(x)는 최소화 of 기준이 되는 목적함수로서 대차프레임의 중량으로 선정하였고, N은 요소의개수,  $A_i$ 는 i번째 요소의 면적,  $X_i$ 는 i번째 요소의 두께이다. 식 (3)에서는 Goodman 선으로부터 구해진 허용응력을 구속조건으로 설정하였다.

Table 3은 각 설계변수의 초기지와 상한, 하한을 나타내고 있으며 Fig. 4는 대차 모델 각 부분에 적용된 설계변수를 보여주고 있다.

Table 3 Design Variables and Initial Value

	Design Variables	Initial	Lower	Upper
Upper cover plate of side frame	X(1)	16	12	20
Lower cover plate of side frame	X(2)	16	12	20
Inner vertical cover plate of side frame	X(3)	12	8	16



Fig. 4 Design Variables of Bogie Frame

#### 3.2 역전파 신경회로망 (Back-Propagation Neural network)

본 연구에서는 피로평가에 소요되는 계산량 5회가 소요되므로 최적화 알고리즘과 유한요소해석을 직접적으로 연결하여 사용하는 것은 계산시간에 있어서 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 신경회로망 알고리즘[7]은 이용하여 설계변수와 구속조건 사이의 근사화 모델은 만들어서 최적화 알고리즘과 연결하였다. 신경망은 생물학적 뉴런을 모델링한 유닛들과 그 유닛 사이의 가중치 연결들로 이루어지며 각 신경망 모델에 따라 다양한 구조와 독특한 학습 규칙을 갖는다. 각 신경망은 계층별로 그룹화된 뉴런들의 집합으로 구성되어 있다. 입력, 중간, 출력의 세 계층으로 이루어져 있으며, 중간계층의 수는 모델링하는 문제의 비선형성에 따라 다양하게 사용될 수 있다. 신경망의 장점은 처리 노드가 많기 때문에 시스템의 부분적인 결함을 갖고 있더라도 전체 시스템은 안정적으로 동작할 수 있으며 불완전한 입력정보에도 합리적인 반응을 생성할 수 있다. 따라서 본 연구에서와 같이 여러 개의 출력조합으로 나타나는 비선형 시스템의 근사함수로 사용하기 적합하며 궁극적으로 널리 응용되는 오류 역전파 학습(error back propagation training)알고리즘을 사용하였다.

훈련데이터는  $3^3$  요인실험법에 의해 27개의 데이터를 작성하였으며 3개의 검증데이터를 통해 가중치 학습의 신뢰성을 검토하였다. 구속함수에 사용된 절점은  $3^3$  요인실험법의 각 결과마다 식 (3)의  $n$ 값이 최대가 되는 절점으로 정하였다. 27회의 결과에서 구속조건에 사용될 서로 다른 위치의 절점은 모두 4개가 나왔다. 그 위치와 절점의 번호를 Fig. 5에 표시하였으며 4개의 절점에 대한 근사화 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Errors between BPN result and fatigue analysis result each test data

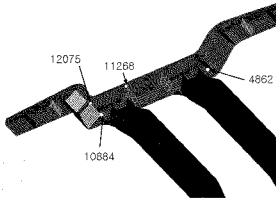


Fig. 5 Constraint condition nodes

		Node number			
		11268	4862	10884	12075
Test data #1	Result of BPN	1.165	1.015	0.918	1.171
	Result of fatigue analysis	1.110	1.069	0.968	1.146
	Error(%)	4.913	5.026	5.173	2.195
Test data #2	Result of BPN	0.716	0.961	0.906	0.828
	Result of fatigue analysis	0.723	0.976	0.981	0.840
	Error(%)	0.933	1.521	1.533	1.405
Test data #3	Result of BPN	1.109	0.982	0.887	1.105
	Result of fatigue analysis	1.068	1.032	0.937	1.094
	Error(%)	3.879	4.819	5.312	0.984

### 3.3 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 다수의 개체군으로 구성된 개체군을 구성하여 해를 탐색해 가는 조합적 최적화 기법으로 해를 바이너리 코딩하여 사용하며 경사도벡터의 값을 사용하지 않고 목적함수의 값만을 이용하여 최적해를 탐색해 가는 방법이다. 이러한 유전 알고리즘은 유전자 부동을 방지하고 다양한 탐색을 확보해 주기 위하여 해 집단의 크기는 30~200개체 사이에서 유지하여야 한다. 하지만 많은 개체를 운용하면 계산부담이 증가하며 이를 해결하기 위하여 Goldberg[8-9]는 직렬 유전 알고리즘(Serial GA)안에서 작은 집단을 효율적으로 다룰 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법에 기초하여 Krishnakumar[10]는 매우 작은 집단을 운용하는 유전 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 Krishnakumar의 이론을 바탕으로 개체수를 5개로 진화연산을 수행하여 최적값을 구하였다.

최적값은 0.504(ton)으로 4862번 요소의  $n$ 값이 1이 되는 조건에서 최적화 결과가 도출되었으며 Fig. 6에 수렴과정을 나타내었다. 설계변수의 초기 값에서 중량이 0.528(ton)이었던 초기값에 비하여 약 4.7%의 중량 감소를 시킬 수 있었다. 최적화 결과에서 중량감소의 폭이 작은 것은 Fig. 3과 같이 초기모델의 피로강도 조건이 설계영역을 벗어난 설계였기에 중량 감소의 폭은 상대적으로 작았던 것으로 평가된다. Table 5에서는 최적화 결과와 해석 결과의 오차율 나타내었고 Table 6에서는 최적값에 대한 설계 변수의 값을 나타내었다.

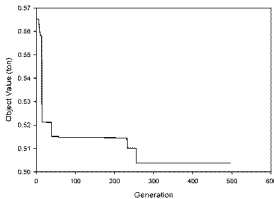


Fig. 6 Result of GA

Table 5 Errors between optimization result and fatigue analysis result

Node number	11268	4862	10884	12075
Result of GA optimization	0.881	1.000	0.961	0.995
Result of fatigue analysis	0.884	1.028	0.990	1.000
Error(%)	0.397	2.731	2.908	0.571

Table 6 Result of Optimization

Optimal Value	0.504
X1	18.151398
X2	12.019537
X3	11.875135

#### 4. 결 론

대차프레임의 개발단계에서 UIC에 의한 평가방법에 의해 대차의 피로해석을 수행하였다. 이를 위해 UIC 기준에 적합한 후처리 과정을 개발하여 피로강도 평가를 실시하였으며, 본 연구에서 대상으로 선정된 대차프레임은 아직 설계조건을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다. 대차프레임의 구조해석 및 피로강도 평가 수행후 Goodman 선도에 의한 허용응력을 설계 구속조건으로 하여 오류역진과 신경망 회로를 이용한 전역근사화 및 유전알고리즘을 이용하여 두께 최적화 과정을 수행하였다. 중량은 초기 모델에 비하여 약 4.7% 감소하였으며 최적값에 대한 설계변수에 의한 실제 피로강도평가 결과는 최적화 결과와 비교하여 2.908%의 오차로 실제 해석 결과와 비슷한 결과로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원이 주관하는 철도기술연구개발사업 기선선 속도향상 실용기술개발사업 중에서 킬팅시스템 실용기술 개발과제의 연구결과와 일부입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Stefan Dietz, Helmuth Netter and Delf Sachau (1998) "Fatigue Life Prediction of a Railway Bogie under Dynamic Loads through Simulation", Vehicle System Dynamics, Vol 29, pp. 385-402.
2. C Oyan (1998) "Structural Strength Analysis of the Bogie Frame in Taipei Rapid Transit Systems.", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail & Rapid Transit, Vol. 212 Issue 3, pp253-262..
3. 김현수, 안찬우, 최경호, 박정호 (2002, 9) "고속 화차용 대차프레임의 경량화를 위한 최적설계", 한국정밀공학회지 제19권, 제9호.
4. 日本工業規格 (JIS) E 4207 "鐵道車輛用台車の荷重試験方法"
5. International Union of Railways (UIC) 615-4 "Motive Power Units, Bogie and Running Gear, Bogie Frame Structure Strength Tests"
6. (1993) European Rail Research Institute B 12/RP 17, 7th Edition.
7. Hagan, M. T. (1996) "Neural Network Design," PWS Publish Company.
8. D. E. Goldberg (1989) "Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms," Proceeding 3rd International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Arlington, VA, pp. 70-79.
9. D. E. Goldberg (1989) "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning," Addison-Wesley.
10. K. Krishnakumar (1989) "Micro-genetic algorithm for stationary and non-stationary function optimization", SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol. 1196, pp. 282-296.