

와전류 제동프레임의 구조해석 및 최적설계

이승철[#], 강신유^{*}

Structural Analysis and Optimal Design of Eddy Current Brake Frame

Seung-Chul Lee[#], Shin-You Kang^{*}

ABSTRACT

The eddy current brake system is a non-contact brake based on the mutual relation between the rail and the frame. Consequently, the accuracy is required in estimating the stress concentration and the deformation of the eddy current brake system. In this paper, the static analysis considering the gravity and the suction force for the deformation and the stress concentration of the main frame of the initially designed eddy current brake system was carried out. The shape of the I-type beam obtained from the optimization was analyzed and compared with the initial model. Also, the initial model was modified based on the optimization model and the result was verified to have the acceptable improvement.

Key Words : Optimal Design (최적설계), Eddy Current (와전류), Brake System (제동장치)

1. 서론

본 논문에서는 한국형 고속전철의 제동장치인 와전류 제동장치의 메인 프레임을 구조해석을 통하여 안전한 시스템을 유지 가능하도록 하고자 한다. 와전류 제동장치는 Rail 과의 상호력을 이용하는 비접촉 제동장치로서 기존의 고전적인 제동장치와는 다른 작동환경과 작동조건을 가지기 때문에 와전류 제동장치의 메인 프레임에 대한 응력집중 및 변형을 정확히 예측할 필요가 있다.

따라서 Eddy Current Equipment 설계 기준(안)에서 제시하고 있는 자중의 25 G 와 인력을 고려한 정적해석을 통하여 메인 프레임의 최대 변위와 응력을 검토함으로써 와전류 제동장치에 적합한 프레임인가에 대해 검증하고, 프레임의 중량감소

를 위하여 자중의 25 G 와 전자석 인력을 고려하여 와전류 제동프레임의 wide flange beam 에 대해 ANSYS 5.5 의 Sub-problem Approximation Method 를 이용한 최적설계를 수행한다. 최적화를 통하여 얻어진 wide flange beam 의 형상을 와전류 제동프레임의 초기모델과 비교·분석하고, 초기 모델에 반영하여 해석함으로써 저감효과를 검증한다. 마지막으로 제동 인가시 레일로부터 전달될 수 있는 충격력에 대한 과도해석을 수행하여 충격력에 대한 프레임의 특성 및 구조물의 응력분포를 분석하여 충격력에 대한 구조적 안정성에 대해 검토해 본다.

2. 와전류 제동프레임의 정적해석

2.1 유한요소 모델링

접수일: 2003년 7월 3일; 게재승인일: 2004년 2월 20일
교신저자, 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부 대학원
Email: dr237@netian.com Tel. (033) 256-6373
* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

와전류 제동 장치의 작동 원리는 전자석이 레일에 가깝게 접근하여 주행할 때 레일에 발생하는 와전류로 인해 레일에는 주행 반대방향의 위상을 갖는 자극이 발생하게 된다. 이때 발생하는 위상차에 의해 제동력을 발생시킨다. 와전류 제동장치에서는 레일과 전자석의 간격유지가 중요하므로 본 논문에서는 와전류 제동프레임의 중앙부분의 변위와 응력분포에 대해 중점을 두어 프레임의 최적화를 수행하도록 한다. 와전류 제동프레임은 프레임 중앙에 최대 발생되는 모멘트에 대한 영향을 최소화하기 위해 wide flange beam 구조로 설계되었고, 모멘트가 작은 부분에서의 중량 감소를 위해 wide flange beam 이 총 3 개의 단면형상을 갖도록 설계되었다. 프레임의 형상 및 프레임 단면의 치수는 Fig.1, Fig.2 와 같다.¹

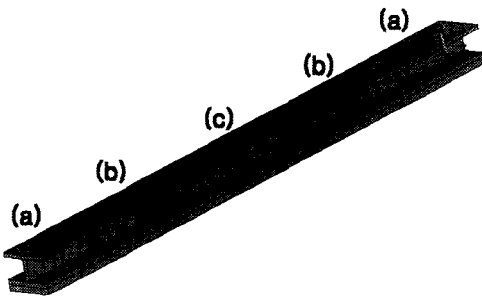


Fig. 1 Shape model of wide flange beam

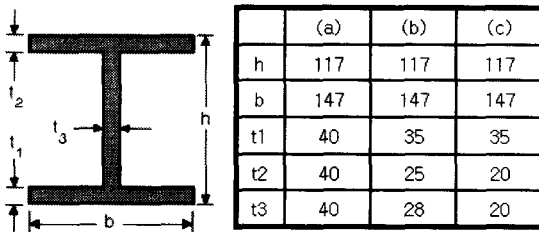


Fig. 2 Section of wide flange beam

Fig.2 의 wide flange beam 의 단면치수와 초기 설계 도면을 바탕으로 3-D 모델링 하였다. 프레임은 10-Node Solid Element(Solid 92 3-D 10-node Tetrahedral Structural Solid)를 사용하였으며, 와전류 제동프레임의 하중 및 구속조건에 대한 대칭성을 가정하여 1/2 모델로 축소모델링을 하였다. 유한요소

모델의 Node 는 66017 개이고, Element 는 37081 개로 구성되어 있고, 와전류 제동프레임의 전체 형상은 Fig. 3 과 같다.

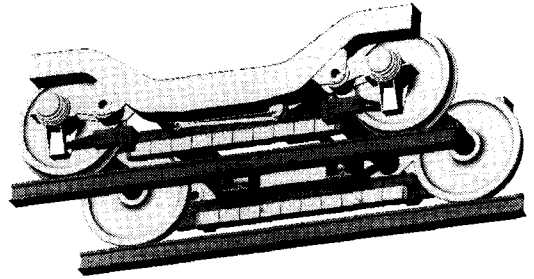


Fig.3 3-D Model of eddy current brake system

프레임에 적용된 재료는 SCMn2 이며 그 기계적 성질은 Table 1 에 나타나 있다.^{2,3}

Table 1 Material properties of SCMn2

Material property	Value
Young's modulus	210GPa
Poisson's ratio	0.3
Density	7850 kg/m ³
Yield stress for	
Tension	590MPa
Compression	590MPa
Bending	710MPa
Torsion	360MPa

2.2 25G 의 자중과 인력에 의한 정적해석

2.2.1 개요

와전류 제동프레임의 Proof load 를 Eddy Current Equipment 설계 기준(안)에 의거하여 자중의 '25G + 인력'으로 하여 변위와 응력에 대해 안정적인 설계인가에 대해 검토한다.

2.2.2 하중조건 및 경계조건

프레임과 Leg 가 Leg-pin 에 의해 연결되어지는 부분을 수직 방향인 y 방향에 대해 구속을 시켰고, 1/2 축소모델 이므로 대칭면이 되는 Cross-bar 의 끝부분을 x 방향에 대해 구속하였으며, 프레임의 중앙부 Node 는 z 방향에 대해 구속 시켰다. 하

중은 Eddy Current Equipment 설계 기준(안)에 의거하여 자중(1/2 모델의 무게인 304.8 kg + wide flange beam 하단에 장착되어지는 전자석 10 개의 무게 125 kg)의 25G 를 wide flange beam 의 하단면에 압력의 형태로 변환시켜 y 방향에 대해 적용했다. 그리고, 전자석으로부터 발생하는 인력의 절반 값인 10000N 을 wide flange beam 하단면에 전자석이 장착되는 면적으로 나눈 값인 33676.8 N/m² 의 압력으로 하여 인력이 작용하는 y 방향으로 적용하였으며 Fig. 4 와 같다.

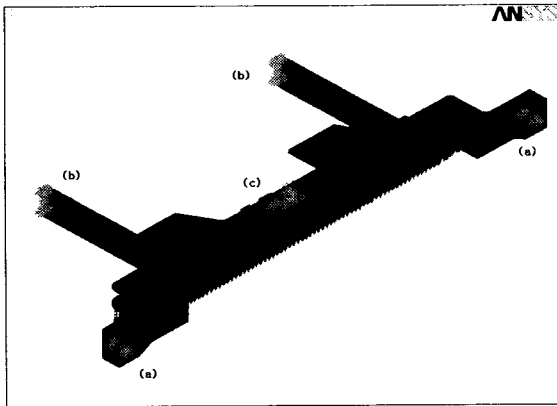


Fig. 4 Loading and boundary condition of frame

2.2.3 결과 및 고찰

Proof load 인 25G 자중과 인력에 의한 정적해석결과 와전류 제동프레임에서 관심 부분인 wide flange beam 중앙의 변위는 4.2mm, 응력은 86GPa 이 발생하였다. 재료의 항복응력이 590MPa 이므로 중앙부에서 발생한 변위와 응력에 대해 안정적인 결과를 보였다. 프레임 중앙부의 처짐과 응력분포에 대하여 Fig.5, Fig.6 에 나타내었다.

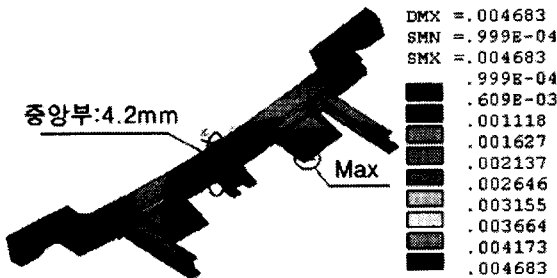


Fig. 5 Maximum displacement by 25G gravity

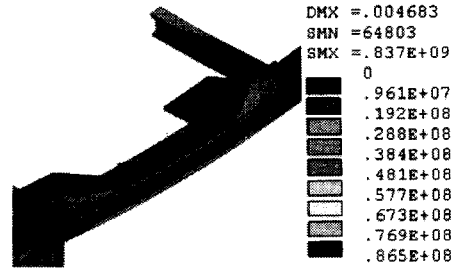


Fig. 6 Maximum stress by 25G gravity

3. 와전류 제동프레임의 최적설계

3.1 최적설계의 개요

최적화 과정을 통하여 와전류 제동프레임의 wide flange beam 단면의 높이, 폭 및 길이에 대하여 설계변수를 지정하여 제약 조건인 변위와 응력에 대한 최적해를 구함으로써 초기모델의 wide flange beam 의 형상과 비교하여 중량의 저감 효과를 보인다.

3.2 최적설계의 정식화

본 논문에서는 ANSYS 5.5 에서 제공되어지는 Sub-problem Approximation Method 를 사용하여 각 설계변수 값들을 생성하고 그 데이터 점 위에 Least square method 를 사용하여 각 최적화 루프가 새로운 데이터 점을 생성하고 목적함수 근사화를 수행한다. 이 방법은 각 점들을 단순히 Curve fitting 하여 근사화 하므로 빠른 시간 안에 근사해를 구할 수 있는 장점이 있으며 종속변수(목적함수와 상태변수)의 도함수가 아닌 오직 그 값을 Zero-order method 로 개선한 것으로서 종속변수는 Least square method 에 의해 근사화 되고, 제약 최소화 문제는 Penalty function 을 이용하여 비제약 문제로 전환된다. 값의 최소화는 근사화 되고 Penalty function 에 수렴할 때까지 반복 수행한다.

치수 및 형상 최적설계에 대한 일반적인 정식화는 목적함수 및 제약조건 함수를 정의함으로써 다음과 같이 표시할 수 있다.^{4,6}

$$\begin{aligned} & \text{Minimize Weight (X)} \\ & \text{Subject to } \sigma \leq \sigma_{\text{all}} \\ & \delta \leq \delta_{\text{all}} \end{aligned}$$

여기서 X 는 설계변수, 그리고 σ , δ 는 각각 응력과 변위를 의미하고 σ_{all} , δ_{all} 은 각각 응력, 변위에 대한 허용 값을 표시한다. Fig. 7은 wide flange beam의 최적설계에 대한 흐름도이다.^(7,8)

초기설계에 대하여 해석을 수행한 후 설계변수와 제약함수의 범위를 설정하고, 1차 최적설계를 수행한다. 이 경우 설계변수의 상·하한 값은 요소의 파괴 없이 움직일 수 있는 최대량으로 결정한다. 만일 1차 결과로부터 형상과 요소의 분할상태가 적절치 못할 경우 다시 설계변수를 정의하여 요소분할이 적절한지 검토를 반복한다. 만족한 요소분할이 이루어진 후 제약함수 조건에 만족하는지를 검토하고, 적절치 못할 경우 설계변수 범위의 설정을 바꾸는 과정으로 돌아간다.

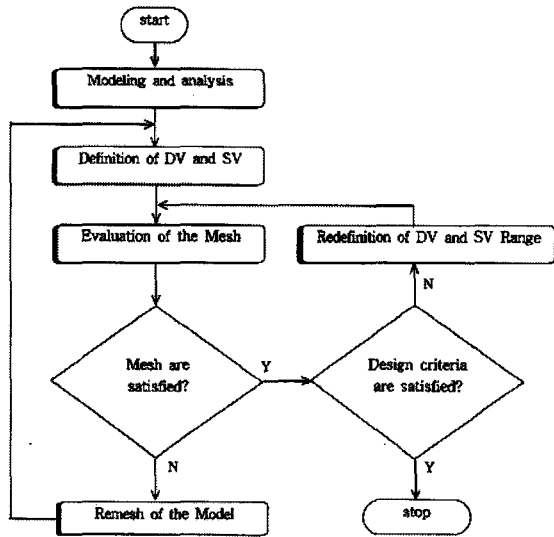


Fig. 7 Flowchart of optimum process

와전류 제동프레임의 wide flange beam에 대한 최적설계를 위하여 다음과 같은 정식화를 이용하였다.

Find X
 Minimize volume of wide flange beam
 Subject to $\sigma \leq \sigma_{all}$
 $\delta \leq \delta_{all}$
 $X=[t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, w_1, w_2, h_1, l_1, l_2]$

여기서 $t_1 \sim t_9$ 까지는 wide flange beam의 세 단면의 치수를 나타내고, w_1, w_2 는 wide flange beam 위·아래 폭을 나타낸다. 또한 l_1 은 t_1, t_2, t_3 의 치수를 갖는 wide flange beam의 길이이고, l_2 는 t_4, t_5, t_6 의 치수를 갖는 wide flange beam의 길이이다. t_4, t_5, t_6 는 wide flange beam의 총 길이 2.02 m에서 l_1, l_2 를 뺀 길이를 갖게 된다. Wide flange beam의 단면 설계변수인 t 는 Fig.8과 같이 설정된다.

그리고 σ 는 wide flange beam의 최대 발생응력이며, δ 는 wide flange beam이 변형되는 y 축 방향의 최대 변위이다.

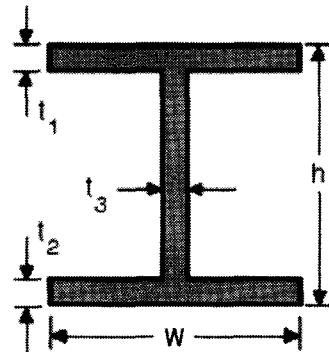


Fig. 8 Design variable of wide flange beam section

3.3 Wide flange beam의 최적설계

본 논문에서는 와전류 제동프레임의 최적화 과정에서 Wide flange beam에 대해 자중과 인력을 받는 단순지지 보로 가정하여 최적설계를 수행하였다. 최적화 된 최적모델의 정적특성을 초기모델과 비교하기 위하여 초기모델에 대한 wide flange beam의 단순지지 보 모델에 대한 25G의 자중과 25G의 전자석 무게, 인력을 고려하여 해석한 결과 프레임의 중앙부에서의 변위는 2.5mm, 응력은 72.1MPa이 발생하였다. wide flange beam의 최적설계를 위한 제약함수의 설정은 초기모델에서 발생된 변위인 2.5mm를 Defl로 설정하여 최적설계수행 중 허용범위를 넘지 않도록 하였고, 허용응력은 SCMn2의 항복 응력인 590MPa을 넘지 않도록 설정하였다. 설계변수로는 wide flange beam의 세 단면의 치수 모두와 한 단면이 갖는 길이로 설정하였고, 목적함수로는 제약함수의 조건을 만족하면서 전체 중량을 최소화하기 위해 wide flange beam의 전체 체적을 체적변수로 설정하였다.

Fig.9 는 초기모델의 해석 결과를 보여주고, Table 2 는 설계변수와 상태변수의 초기값, 상·하한을 보여준다.

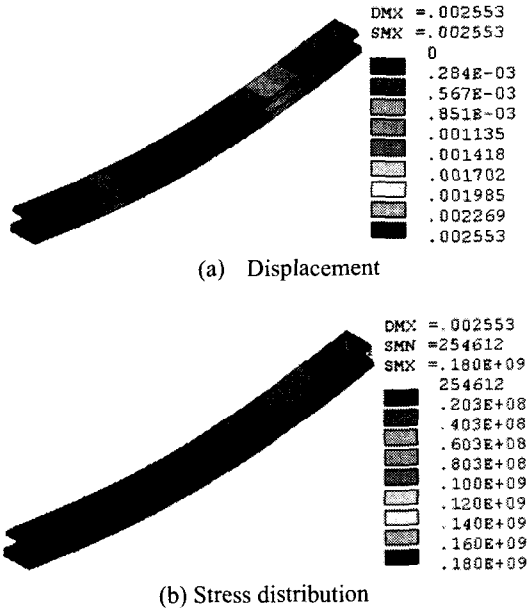


Fig. 9 F.E.A of initial model

Table 2 Range of design variables and state variable

D.V.	Initial (mm)	Lower (mm)	Upper (mm)
t ₁	20	10	40
t ₂	35	35	40
t ₃	20	10	40
t ₄	25	10	40
t ₅	35	35	40
t ₆	28	10	40
t ₇	40	10	40
t ₈	40	35	40
t ₉	40	10	40
h ₁	117	115	120
w ₁	147	145	150
w ₂	147	145	150
l ₁	270	100	500
l ₁	370	100	500
S.V.	Initial	Lower	Upper
Defl (mm)	2.553	-	2.6
Smax (MPa)	180MPa	-	590MPa

총 26 번의 최적설계를 수행한 뒤의 변형된 wide flange beam 의 형상이 Fig.10 에 나타나 있다.

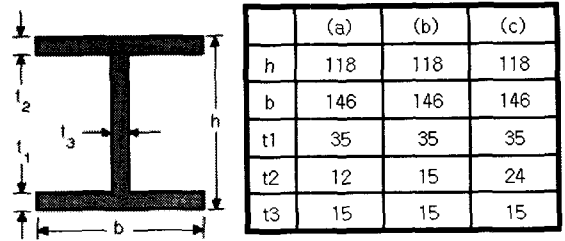


Fig. 10 Section of optimal model

최적설계 결과 그림인 Fig.11 에서 보이는 바와 같이 프레임 중앙부의 응력은 80MPa 이 발생하였으며, 변위는 2.6mm 발생하였다. 최적설계 결과는 Table 3 에 정리하였다. 목적함수인 wide flange beam 의 전체 체적은 32.7 % 감소하였다.

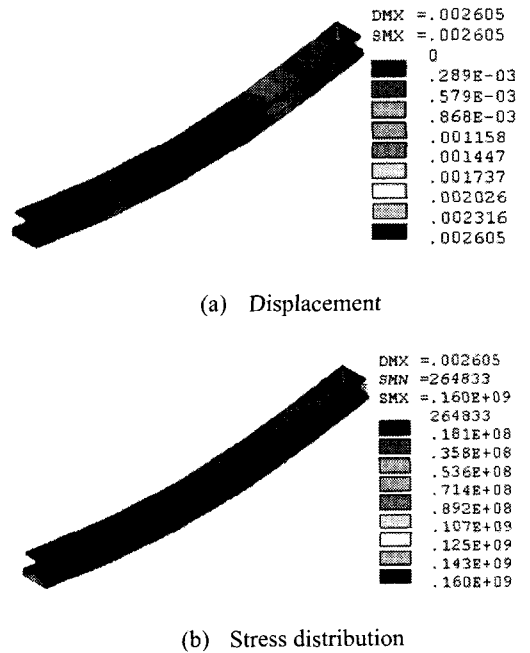


Fig. 11 F.E.A of optimal model

Table 3 Optimum result of wide flange beam

D.V.	Optimum	S.V.	Optimum
t ₁	12	Maximum Stress (MPa)	160
t ₂	35		
t ₃	15		
t ₄	15		
t ₅	35		
t ₆	15		
t ₇	24		
t ₈	35		
t ₉	15	Maximum displacement (mm)	2.6
h ₁	118		
w ₁	146		
w ₂	146		
l ₁	300		
l ₁	450		
Volume	32.7 % 감소		

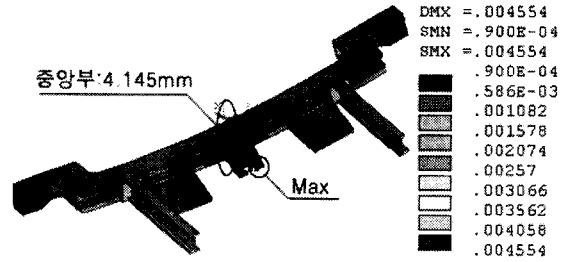


Fig. 12 Displacement of an optimal shape model

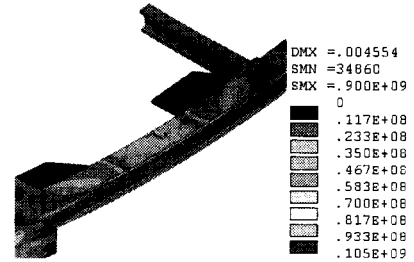


Fig. 13 Stress distribution of an optimal shape model

3.4 결과 및 고찰

와전류 제동프레임의 wide flange beam 에 대해 최적설계를 수행한 결과 초기 모델에서 발생하는 변위와 응력의 값과 유사한 결과를 얻으면서 초기 모델 보다 32.7%의 체적감량의 효과를 볼 수 있었다.

최적화 된 wide flange beam 을 와전류 제동프레임에 적용시켜 해석을 수행시킨 결과 와전류 제동 장치의 1/2 모델의 초기중량은 304.84 kg 에서 266.54 kg 으로 12.5%의 무게를 감소시킬 수 있었다. 초기모델과 최적화 된 모델에 대해 Proof load 에 대한 결과를 Table 4 에 비교하였고, Fig.12, Fig.13 에서 최적화 된 모델의 해석 결과를 보여주 고 있다.

Table 4 Initial model result and Optimum result

Initial model		Optimal shape model	
Maximum Displacement (mm)	4.2	Maximum Displacement (mm)	4.1
Maximum Von Mises Stress(MPa)	86.5	Maximum Von Mises Stress(MPa)	93.3
Weight (kg)	304.84	Weight (kg)	266.54

4. 와전류 제동프레임의 과도해석

4.1 개요

와전류 제동장치는 wide flange beam 의 중앙에 댐퍼가 장착되는 구조를 가진다. 이에 따라 앞서 모델링한 10-Node Solid Element(Solid 92 3-D 10-node Tetrahedral Structural Solid)를 사용하여 절점 48592 개, 요소 27054 개로 구성된 유한요소 모델의 초기 와전류 제동프레임과 최적설계 된 두 모델의 중앙에 damper 를 모델링하여 각각의 모델에 대한 과도해석을 통하여 초기모델과 본 논문의 결과인 경량화 된 프레임의 충격하중에 대한 거동을 비교한다. damper 로 사용된 요소는 Spring-damper Conbin 14 를 이용하였다.

4.2 하중조건 및 경계조건

과도해석 시간은 충격하중이 작용하는 시간 0.006 초 이후에도 구조물의 전반적인 응답을 파악 하기 위해 총 0.12 초 범위까지 수행하였으며 과도 해석을 위한 충격하중은 Eddy Current Equipment 설계 기준(안)에 의거하여 초기 와전류 제동프레임의 무게 304.84kg, 최적설계 되어진 와전류 제동프

레이의 무게 266.54kg 에 전자석 무게 125kg 을 합한 429kg, 391.54kg 의 50G 에 해당하는 힘인 210.8kN 과 192.0kN 을 Leg 와 연결되는 부분인 프레임 양 끝단의 절점에 y 축 방향으로 시간의 함수로 가정된 하중을 가하였다. Fig.14 는 구체적으로 제시된 충격하중의 특성이 없어 임의의 시간에 따른 시간 함수이다.

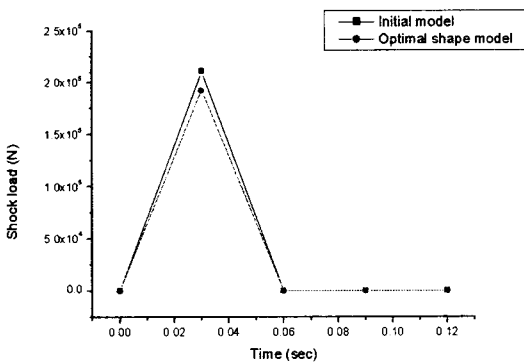


Fig. 14 Shock load of Eddy Current Brake Frame

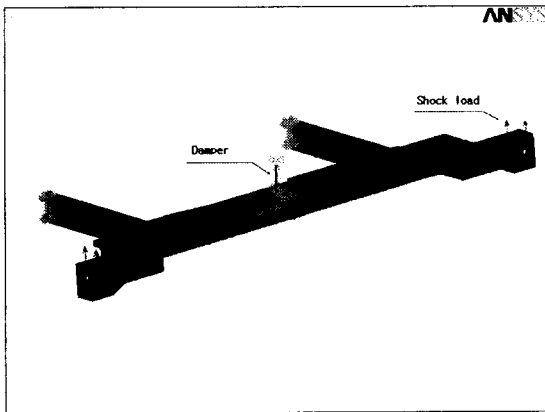


Fig. 15 Loading and boundary condition of Frame

제동 인가시 작용하는 자중과 인력 10kN 을 전자석이 장착되는 wide flange beam 하단부에 과도해석이 시작되는 시간인 0 초부터 끝나는 시간인 0.12 초 동안 일정하게 가하였다.

Damping ratio 의 설정은 damper 가 아직 설계되어 있지 않은 관계로 정확한 값을 알 수 없어 50G 의 충격하중을 와전류 제동장치가 받았을 때 와전류 제동장치의 최대 변위가 50mm 이내가 되

도록 여러 번 반복해석을 통하여 얻은 값인 $1.0 \times 10^6 \text{N/m/s}$ 를 damping ratio 로 적용하였다.

동하중 및 충격하중 해석을 위해서 시간적분을 포함한 해석과정을 요구하는데 본 해석의 시간적분시 시간증분 $\Delta T=1/120f$ 의 식에 진동해석을 통해 얻어진 와전류 제동프레임의 1,2 차 고유진동수인 19.328Hz, 24.954Hz 를 대입하여 계산한 값보다 낮은 0.002sec 정도로 취하였다.

경계조건은 모델링 된 와전류 제동프레임의 1/2 모델이므로 그 대칭면인 Cross-bar 의 끝면을 대칭방향인 x 방향에 대해 구속시켰고, damper 의 끝 절점에 대해 모든 자유도를 구속하였다. 또한 와전류 제동프레임의 중앙부 Node 들은 z 방향에 대해 구속을 시켰다. Fig.15 는 모델의 하중조건과 구속조건을 나타내고 있다.

4.3 과도해석

4.3.1 초기 모델의 과도해석

초기 와전류 제동프레임에 자중의 50G 에 해당하는 충격하중 210.8kN 을 Fig.14 와 같이 적용한 결과 최대 변위를 일으키는 부분은 충격하중을 받는 와전류 제동프레임의 양 끝단에서 0.034 초일 때 38.7mm 가 발생하였고, 프레임 중앙부의 응력분포는 302MPa 에서 528MPa 사이의 응력 값이 발생되었다.

4.3.2 최적화 모델의 과도해석

경량화 된 최적모델에 자중의 50G 에 해당하는 충격하중 192kN 을 가하였을 때 최대변위와 최대응력을 일으키는 시간과 그 값이 초기 모델의 과도해석의 결과와 거의 일치하였다.

최대변위는 프레임 양 끝단에서 0.034 초일 때 38.6mm 발생하였고, 프레임 중앙부의 응력분포는 313MPa 에서 548MPa 사이의 응력이 발생하였다.

4.4 결과 및 고찰

와전류 제동프레임의 과도해석을 통하여 자중의 50G 에 해당되는 충격하중이 프레임에 전달될 때 프레임에 발생하는 응력분포를 통해 충격하중이 가해지기 시작해서 끝날 때까지 전반적으로 와전류 제동프레임 중앙의 wide flange beam 에 응력이 집중되는 것을 볼 수 있었다.

충격하중이 0N 이 되는 0.06 초 이후부터의 응력분포가 현저하게 감소하였으나 일정하게 감소되

지 않고 시간에 따른 불규칙적인 응력 분포를 보였다.

중량이 12.5% 감량 된 최적모델의 과도해석 결과 초기모델과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었고, Table 5 에서 시간에 따른 초기모델과 최적모델의 과도해석에 대한 결과를 비교하여 나타내었다.

Table 5 Shock Load Analysis Results

Time (sec)	Initial model		Optimal model	
	Max. Disp. (mm)	Max. Stress (MPa)	Max. Disp. (mm)	Max. Stress (MPa)
0.01	8.15	288	8.37	245
0.03	34.63	528	34.82	548
0.06	30.97	425	28.11	138
0.09	29.45	127	26.64	120
0.12	27.70	172	24.93	197

5. 결론

본 논문에서는 정적해석을 통하여 초기 와전류 제동프레임이 구조적으로 견실한 시스템 유지를 가능하게 할 수 있는가에 대해 검증하고, 최적설계를 통해 초기 제시되었던 모델보다 경량화 된 모델을 제시하였다. 그리고 과도해석을 통하여 구조물의 거동과 응력집중 현상 및 댐핑 특성에 대해 고찰하면서 몇가지 결론을 얻을 수 있었다.

자중과 인력에 의한 정적해석 결과 와전류 제동프레임이 최대 허용하고 있는 변위와 응력 모두 매우 안정적인 결과를 보여주었고, 별도의 외력이 없다면 구조적으로 안정적이라고 할 수 있다.

와전류 제동프레임의 중량감소를 위해 가장 큰 비중을 차지하고 있는 wide flange beam 에 대해 최적설계를 수행한 결과 초기 모델에서 발생하는 변위와 응력의 값과 같은 결과를 얻으면서 초기 모델에서 32.7%의 감량 된 결과를 얻을 수 있었다. 결과적으로 와전류 제동프레임에서 총 76.6kg 의 무게 감량의 효과를 보았다.

참고문헌

1. "와전류 제동장치 3 차년도 연차보고서," (주)유진기공, 2000.
2. DATA BOOK ON FATIGUE STRENGTH OF METALLIC MATERIALS, p. 1073.
3. 金屬材料 疲勞強度의 設計資料(機電硏究社), pp. 33-36.
4. ARORA, JASBIR S., 최적설계 입문, pp. 8-9.
5. Vanderplaats, G. N., "Structural Design Optimization Status and Direction," J of Aircraft, Vol. 36, No. 1, pp. 11-20.
6. 임오강, 조현, "민감도 근사 해석법을 이용한 굴삭기 붐의 최적형상설계," 대한기계학회논문집, 제 19 권, 제 1 호, pp. 301-309, 1995.
7. "ANSYS Design Optimization," SAS IP, Inc., Canonsburg.
8. "ANSYS Advanced Analysis Techniques 3rd Edition," SAS IP, Inc., Canonsburg.