

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.353

다구찌기법을 이용한 대형 평판트레일러 하부프레임 경량설계

김진곤^{*†}, 윤민수^{**}

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부, ** 포항산업과학연구원 강구조연구소

Optimal Design of Lightweight Frame for Heavy Flat-Bed Trailer by Using Taguchi Method

Jin Gon Kim^{*†} and Min Su Yoon^{**}

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

** Steel Structure Research Laboratory, RIST

(Received August 12, 2009 ; Revised January 11, 2010; Accepted January 19, 2010)

Key Words : Flat Bed Trailer(평판트레일러), Lightweight Frame(경량프레임), Finite Element Analysis(유한요소해석), Design of Experiments(실험계획법)

초록: 최근 환경문제로 인한 차량의 연료절감이 중요해지면서 수송산업에서도 대형 수송기계의 경량설계에 대한 필요성이 지속적으로 커지고 있다. 본 연구에서는, 고강도강으로 대체된 대형 평판 트레일러 프레임의 경량모델을 개발하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 이를 위하여, 트레일러 프레임의 주요 설계변수들을 선정하고 다구찌 기법을 적용하여 응력, 처짐량 그리고 비틀림 강성에 대하여 최적화된 결과를 도출하였다. 또한, 도출된 경량설계안의 타당성을 검토하기 위하여 시작품을 제작하여 실제 내구시험을 수행하였다.

Abstract: For achieving economical fuel consumption, an increase in the load bearing capacity, and for environmental conservation, there is a constant demand for lightweight frames of commercial vehicles used in the transportation industry. In this study, a structural analysis of the frame of a heavy flat-bed trailer was performed to determine the optimal design of a new lightweight frame made of high-strength steel. To identify the key design parameters of the trailer frame, Taguchi's orthogonal array was used in the experiments. Using ANSYS, a commercial FEA program, the frame structure was optimized with respect to stress, deflection, and torsional stiffness by performing stress and vibration analyses. A physical model of the trailer was also built to verify the validity of the numerical analyses. Finally, an on-road fatigue test of the new lightweight frame made of the high-strength steel, ATOS80, was performed to confirm the durability of the new design.

1. 서론

20세기 후반부터 자원절약, 에너지절약, 지구환경대책 등에 대한 관심이 증가함에 따라 기계부품의 중량 감소에 대한 전 세계적 대책이 요구되고 있다. 대형 수송기계 및 중장비 산업분야는 국내에서 연간 약 35만톤 정도의 강을 사용하며 지속적으로 성장하는 분야임에도, 지금까지 자동차 산업에 비해 구조 경량화 기술 확보가 매우 부족한 상황이다. 하지만, 대형 수송기계의 경우 제조업체가 영세하고 생산대수가 완성차보다 적지만, 경량화의 기대효과는 매우 크다. 실제, 스웨덴의 Cargo Modul Trading 사는 SSAB 사의 Domex 강을 사용하여

트레일러의 중량을 1.6톤 경량화시켜 컨테이너 3개가 장착된 Fig. 1과 같은 트레일러의 경우 연간 250일 운행 기준으로 약 97,000 유로 이상을 절감하고, 이산화탄소 배출량을 10톤 이상 절감시켰다.⁽¹⁾ 국내에서는 현재 40톤의 차량 총중량 제한법규가 적용되고 있어 트레일러의 경량화가 더욱 필요하지만 관련 연구는 찾아보기 어려운 현실이다.

트레일러의 대형 프레임은 여러 개의 측면부재(side member)와 크로스부재(cross member)들이 용접에 의해 복잡하게 연결된 사다리꼴 구조이다. 각 부재는 단면모양이 일반적으로 'C'형 또는 'H'형 채널(channel)인 열연강판을 사용하므로, 결합부위 등에서 응력집중에 의한 파손이 발생할 수 있다. 그러므로, 프레임 설계 시 수치해석을 통한 프레임의 정확하고 상세한 응력해석이 매우 중요하다. 대형트럭의 경우 프레임의 비틀림 강성이 구조물의 안전성 및 차량 조향성 등에 많은 영향을

† Corresponding Author, kimjg1@cu.ac.kr

미치기 때문에 이와 관련된 다수의 연구들이 진행되었다.⁽²⁻⁶⁾ 또한, 반응표면기법을 이용하여 고유진동수와 강도측면에서 차량의 새시 프레임을 최적설계한 연구도 수행되었다.⁽⁷⁾

본 연구에서는, 대표적인 국내 철강업체에서 생산되는 ATOS80(항복강도 700MPa 이상)으로 제작된 기존 대형 평판트레일러(flat-bed trailer, FBT)의 하부 프레임을 경량화시키기 위해서 실험계획법과 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하였으며, 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 셸요소(shell element)로 프레임을 모델링하여 실험적으로 검증하였다. 설계변수 변경에 따른 반복적인 해석을 효율적으로 수행하기 위해서, ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 대형 평판트레일러의 하부 프레임 구조물의 자동 유한요소모델링 프로그램을 구축하여 활용하였다. 유한요소해석을 통해 개발된 경량화된 고강도강 모델은 중량은 17% 경량화 시키면서도 강도 저하는 거의 발생하지 않았다.

2. 유한요소모델링 및 해석

본 연구의 경량화 대상모델은 Fig. 2와 같은 국내 평판트레일러 제작업체인 H사 평판트레일러의 하부프레임이다. 유한요소해석을 위하여 뒷바퀴축, 상부 목재판 등과 같이 프레임의 전체적인 역학적 거동에 미치는 영향이 적은 부착물들은 제외하고 사다리형 하부 프레임 구조물만 고려하였다. 하부프레임은 항복강도가 700MPa인 고강도강을 사용하여 제작되었다.

Fig. 3은 주요 형상변수들에 대한 최적설계를 위해 ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 평판트레일러 하부프레임의 형상변수들간의 기하학적 관계를 구하여 작성한 자동 유한요소모델링 프로그램으로부터 생성한 3차원 유한요소모델이다. 과도한 유한요소의 사용을 방지하고 유한요소모델링의 오차를 최소화시키기 위해서 ANSYS의 mapped mesh 기능을 사용하였다. 이를 위해 솔리드 모델링 단계에서 부품끼리 결합되거나 교차하는 위치에서는 모두 사각형 모양으로 면을 분할하였다. 프레임의



Fig. 1 Lightweight container of Cargo Modul Trading Company in Sweden

유한요소모델링 시 형상변수 변화에 따라 차이는 있지만 대략 8만개 이상의 4절점 SHELL63 요소가 해석에 사용되었다. 유한요소모델링 결과 경량화 대상 모델의 하부프레임 질량은 약 2,637.5kg이었다.

Fig. 4는 정적응력해석에 사용될 구속조건과 하중조건을 나타내고 있다. 구속조건은 트랙터와 트레일러의 연결을 위한 하부 프레임과 전방 킹핀의 체결부위, 그리고 하부 프레임과 후방 바퀴들이 연결되는 부위들을 적절하게 구속하였다. 하중조건은 현행 도로법규인 40톤 총 중량제에 의해 실제 적재할 수 있는 수하물 중 하부 프레임에 가장 큰 부하를 줄 수 있는 30톤 코일 한 개를 적재하는 경우의 집중하중을 대상으로 하였다. Fig. 5는 상기의 하중 및 구속조건을 이용하여 해석한 정적 응력해석 및 자유진동해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과 30톤 코일에 의한 집중하중이 작용하는 경우 프레임의 후방 바퀴 지지부 근처에서 286.8 MPa의 최대 von-Mises 응력이 발생하였다. 그런데 이는 Fig. 5(a)와 같이 실제 현장에서 가장 피로파괴가 빈번하게 발생하는 위치와 정확하게 일치하였다. Fig. 5(c)는 자유진동해석을 통해 구한 2.667 Hz의 비교적 낮은 고유진동수를 가지는 프레임의 1차 비틀림 진동모드를 보여주고 있다. 현재 프레임에 가해지는 외부의 주요 가진에 대한 구체적인 정보는 없지만, 여러 연구결과들에⁽²⁻⁵⁾ 의하면 사다리형(ladder) 대형 상용차 프레임은 비틀림 강성이 구조물 거동에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

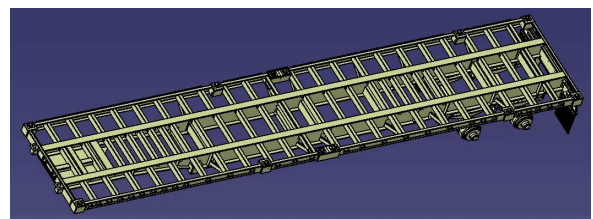
3. 경량 최적설계

3.1 실험인자 및 직교배열표 작성

본 장에서는 전술한 해석조건에 대하여 다구찌기법을 이용하여 트레일러 하부 프레임의 경량화



(a)



(b)

Fig. 2 40 feet flat-bed trailer: (a) A photograph and (b) CATIA solid modeling of sub frame

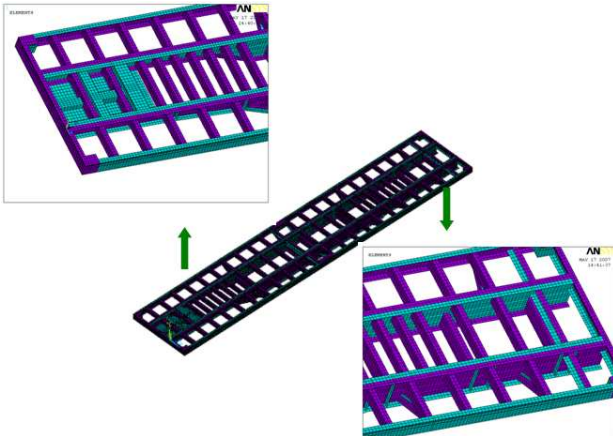


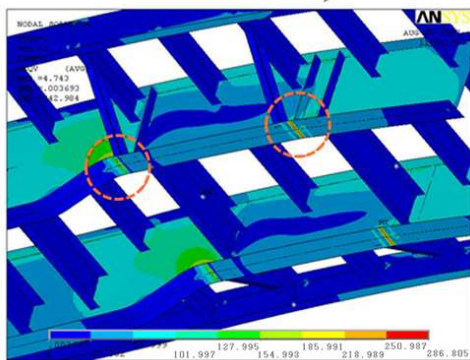
Fig. 3 Parametric finite element modeling using ANSYS APDL



Fig. 4 Boundary and loading conditions for static analysis



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Analysis results: (a) failure part, (b) maximum stress of a deformed frame and (c) 1st torsional vibration mode

를 위한 형상 최적설계 문제를 정의한 후 이를 해석하고자 한다. 다구찌 기법은 기술개발, 제품설계, 공정설계 및 관리 등을 최적화하기 위하여 사용되는 통계적 실험계획법으로서, 제품설계에 적용하면 사용환경을 고려하여 우수한 성능을 가지도록

Table 1 Cross section of members and their design factors

Part	Cross Section
Main Beam	
Upper & Lower Cross Member/ Cross Channel/ Supporter Channel	
Side Member	

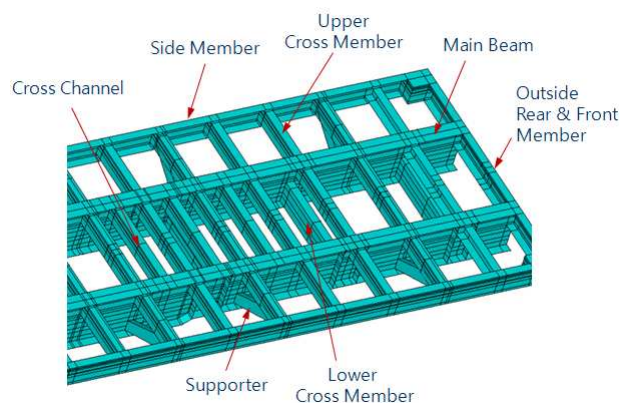


Fig. 6 Design factors of trailer frame

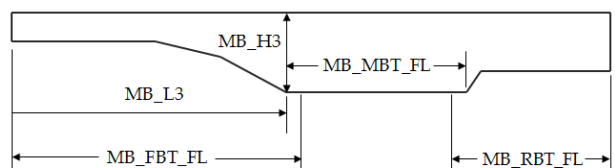


Fig. 7 Side view of main beam and two design factors

Table 2 Factors and their levels

No.	Design Factor	Level [%]		
		1	2	3
A	MB_L3	0	10	-
B	MB_H3	-10	0	5
C	MB_TOP_F	-15	0	5
D	MB_TOP_FT	-15	0	5
E	MB_BTM_F	-15	0	5
F	MB_FBT_FT	-10	0	5
G	MB_MBT_FT	-10	0	5
H	MB_RBT_FT	-10	0	5
I	MB_WT	-10	0	5
J	Outside Front Member Thickness	-10	0	10
K	Outside Rear Member Thickness	-10	0	10
L	CH_W	-20	0	5
M	CH_F	-20	0	10
N	CH(Cross Channel) Thickness	-15	0	10
O	UCM_F	-20	0	10
P	UCM Thickness	-15	0	10
Q	SM(Side Member) Thickness	-20	0	10
R	SM_F1 & F2	-10	0	10
S	SM_W	-10	0	5
T	LCM_W	-20	0	5
U	LCM_F	-20	0	10
V	LCM Thickness	-15	0	10
W	SC(Supporter Channel) Thickness	-20	0	10
X	SC_W	-20	0	10
Y	SC_F	-20	0	10
Z	Main Beam Stiffener Thickness	-10	0	10

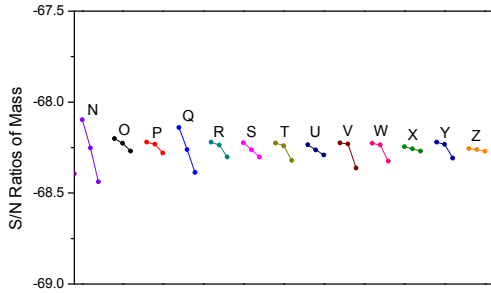
설계변수를 최적화시킬 수 있다. 실험계획법과 다구찌기법을 적용하기 위하여 우선 설계인자의 수준 및 직교배열표를 작성하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 그리고 Table 1 은 범규 및 제작에 의한 규제사항 등을 고려하여 트레일러 설계자들과 협의하여 선정된 주요 설계인자들을 보여주고 있다.

다구찌 기법에서는 인자들간의 교호작용들이 모든 행들에 거의 균등하게 교락되어 있는 L_{18} 직교배열표 사용이 강건설계에서 가장 보편적으로 사용되고 있다. 하지만, 본 연구에서는 다소 많은 설계인자를 고려하였기 때문에 일반적이지는 않지만 $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$ 의 다구찌 직교배열표(orthogonal array) 를⁽⁸⁾ 선정하고, 직교배열표에 배치된 총 54 회의 해석을 수행하였다. 이때 사전에 수행한 민감도 해석결과를 통하여 변수들간의 교호작용은 무시할 만하다고 판단하였다. Table 2 는 최종적으로 선정된 26 개의 모든 인자와 그들의 수준을 정리하고

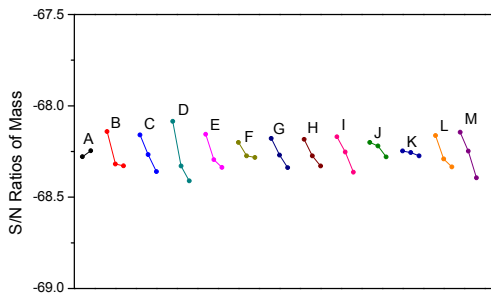
Table 3 Analysis Results of array $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$

Exp. No.	Max. Stress [MPa]	1 st Torsional Freq. [Hz]	Mass [kg]
1	506.3	2.112	2169.8
2	367.1	2.226	2293.4
3	355.1	2.504	2656.4
4	398.5	2.311	2492.3
5	304.8	2.457	2649.0
6	302.7	2.659	2650.4
7	464.1	2.567	2612.2
8	275.5	2.581	2673.2
9	320.4	2.646	2801.0
10	282.1	2.794	2710.2
11	292.0	2.380	2478.3
12	275.8	2.498	2588.3
13	327.3	2.567	2694.1
14	299.0	2.601	2584.1
15	299.0	2.647	2588.9
16	319.7	2.618	2697.3
17	300.4	2.658	2577.9
18	293.2	2.729	2676.9
19	821.0	2.658	2635.2
20	286.5	2.583	2594.0
21	281.3	2.654	2569.5
22	301.6	2.588	2713.7
23	346.9	2.663	2564.9
24	292.8	2.732	2674.2
25	277.7	2.537	2578.1
26	261.7	2.682	2563.7
27	365.0	2.383	2632.0
28	314.7	2.427	2575.7
29	312.0	2.773	2613.8
30	322.2	2.354	2565.0
31	337.9	2.453	2380.5
32	328.8	2.492	2561.5
33	398.1	2.988	2552.7
34	311.6	2.365	2534.3
35	354.4	2.448	2681.3
36	461.0	2.386	2564.9
37	292.3	2.535	2601.4
38	272.6	2.662	2649.7
39	296.5	2.687	2580.0
40	307.4	2.549	2604.5
41	298.2	2.658	2600.0
42	294.9	2.692	2631.6
43	341.5	2.610	2478.4
44	316.9	2.414	2603.8
45	304.1	2.695	2571.3
46	289.1	2.600	2611.4
47	289.8	2.589	2606.8
48	278.1	2.829	2616.4
49	278.2	2.454	2476.1
50	256.4	2.604	2604.1
51	323.0	2.580	2624.3
52	877.3	2.554	2603.6
53	310.8	2.644	2680.5
54	312.7	2.808	2615.6

있다. 인자 A 를 제외하고 나머지 25 개의 인자(B~Z)들은 모두 3 수준을 가지는데 수준 2 는 현재 설계 치수, 수준 1 은 현 수준 대비 감소 퍼센티지를 그리고 수준 3 은 현 수준 대비 증가 퍼센티지

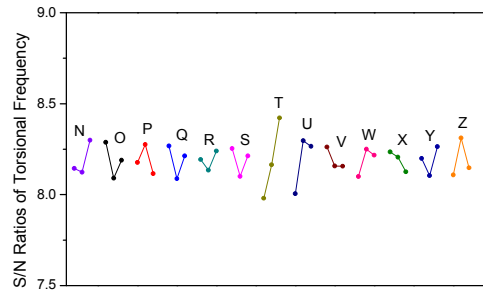


(a) Factor: A-M

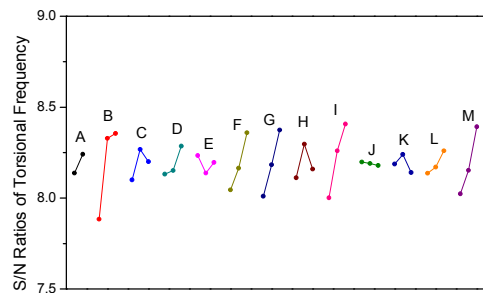


(b) Factor: N-Z

Fig. 8 Graph of factor effect for total mass

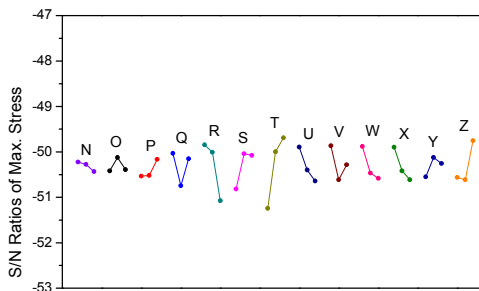


(a) Factor: A-M

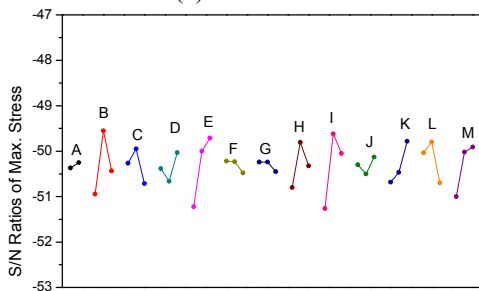


(b) Factor: N-Z

Fig. 10 Graph of factor effect for torsional frequency



(a) Factor: A-M



(b) Factor: N-Z

Fig. 9 Graph of factor effect for maximum stress

를 각각 표시하고 있다.

본 연구에서는 평가특성을 하부 프레임의 전체 중량, 하부 프레임에 발생하는 최대응력 및 비틀림 고유진동수의 3 가지로 설정하였다. 3 개의 평가 특성 중 중량 및 최대응력은 값이 작을수록 우수한 설계이므로 망소특성(smaller-the better type)에 해당되며, 비틀림 고유진동수는 클수록 좋은 망대특성(larger-

the better type)에 해당된다. 직교배열표를 이용하여 설계인자가 목적함수에 미치는 영향을 알아보기 위해 분석에 사용된 S/N 비는 다음과 같다.

$$\text{망소특성: } S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right)$$

$$\text{망대특성: } S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

여기서, n 은 동일한 설계인자의 수준조합에서의 반복측정 회수이며 y_i 는 그 때의 각각 해석값을 의미한다.

3.2 직교배열표에 의한 FEA 결과

Table 3 은 30 톤 코일을 적재하는 집중하중의 경우 $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$ 의 직교배열표에 따라 54 가지 경우에 대한 해석을 수행하여, 계산된 평가특성을 정리한 결과를 보여주고 있다. 각 설계변수들에 대한 최대응력값, 비틀림 강성 그리고 총 질량에 대한 Table 3 의 결과를 바탕으로 주요한 설계변수의 추가적인 변경 및 최적화를 위하여 질량, 최대응력, 그리고 비틀림 고유진동수에 대한 S/N 비를 다시 계산하여 각 변수들의 변화에 대한 결과의 민감도를 확인하였다 Fig. 8 에서 Fig. 10 은 설계인자의 평가특성의 수준별 평균값을 나타낸 요인효과 선도로서 기울기가 급할수록 기여도가 큰 설계

Table 4 Optimum level of factors

Factor	Level	Factor	Level
A	2	N	1
B	2	O	1
C	1	P	1
D	1	Q	1
E	2	R	1
F	2	S	2
G	2	T	3
H	2	U	1
I	2	V	1
J	1	W	1
K	3	X	1
L	1	Y	1
M	2	Z	3

Table 5 Analysis results of the optimized model

	Max. Stress [MPa]	Torsional Freq. [Hz]	Mass [kg]
Original Model	286.8	2.667	2637.5
Optimized Model	294.6	2.428	2195.1

설계인자이며, 현재 수준과 비교하여 그 차이로 개선 효과를 평가할 수 있다는 의미를 가진다. 이 요인효과 선도에 의거하여 최적설계안을 위한 26개의 설계인자 수준이 Table 4 와 같이 최종 선정되었다.

Table 5 는 Table 4 와 같이 결정된 총 26 개의 설계인자 및 그들의 수준을 고려하여 실제 판매되고 있는 제품의 두께를 최종적으로 적용하여 경량화시킨 평판트레일러 하부프레임을 초기 모델과 동일한 조건에서 해석한 결과를 보여주고 있다. 초기 평판트레일러 하부프레임의 경우 총 질량이 2,637.5kg 이었다. 그러나 경량화된 최종 모델의 경우 2,195.1kg 으로 약 442kg (약 17%)의 경량화가 달성되었다. 반면 최대응력은 Fig. 11 과 같이 294.6MPa 로 2.7% 증가하는데 그쳤으며, 비틀림 고유진동수는 2.428Hz 로 9% 가량 감소하여 경량화 대비 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 선정된 최종 경량모델의 시제품을 제작하여 주행실험과 Fig. 12 와 같이 피로시험을 실제 수행하였다. 100 톤의 액츄에이터를 이용하여 2 Hz 로 가진을 한 피로시험 결과 도출된 최종 모델이 요구된 100 만 사이클 이상의 내구강도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

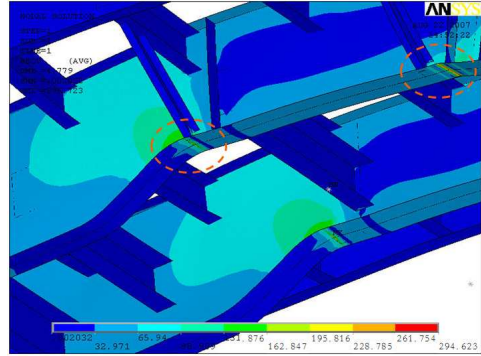


Fig. 11 Stress distribution of the optimized model



Fig. 12 Fatigue test on a prototype of the final optimized model

4. 결론

본 연구에서는 화물 육상수송의 상당량을 차지하고 있는 대형 평판트레일러의 경량화를 통한 연비절감, 운송비 절감 및 환경오염 저감을 목표로 트레일러 프레임의 경량화를 시도하였다. 이를 위해 다구찌 직교배열표에 의해 실험계획을 세운 후 유한요소해석을 통하여 프레임의 중량뿐만 아니라 경량화에 따른 응력 및 비틀림강성까지 고려하여 경량화를 위한 최적설계안을 선정하였다. 경량화된 최종모델은 중량감소에 비해 강성 및 강도저하가 무시할 수준이었으며, 실제 제작된 프레임의 주행실험 및 내구실험에서도 별다른 문제가 발생하지 않았다. 향후 평판트레일러 이외의 로우베드 (low bed), 구즈넥(gooseneck) 트레일러 등에도 본 연구와 같이 구조최적화를 통한 경량화가 이루어진다면 운송산업의 경쟁력 배가에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 2009년 기초연구사업(과제번호 : 2009-0073357)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) <http://www.ssabtunnplat.com/>
- (2) Kim, J. G., Park, S. S., Kim, I. Y. Y., Choi, S. H. and Kim, B. K., 1996, "Finite Element Modeling and Experimental Verification of the Structures with Bolted Joints," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 20, No. 6, pp. 1845~1861.
- (3) Ju, Y. S., Kim, Y. W., Kim, B. W., Moon, J. O. and Lee, K. S., 2003, "Structural Analysis of a Large Size Automobile Frame," *Fall Conference of KSAE*, pp. 1417~1422.
- (4) Ju, Y. S., Kim, Y. W., Kim, B. W., Moon, J. O. and Lee, K. S., 2003, "Structural Analysis of a Large Size Automobile Frame," *Fall Conference of KSAE*, pp. 1417~1422.
- (5) Moon, I. D. and Oh, C. Y., 2005, "Development of a Finite Element Model for Evaluating Torsional Stiffness of the Frame of a Large Truck," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 4, pp. 563~569.
- (6) Beermann, H. J., 1989, *The Analysis of Commercial Vehicle Structures*, English-languaged Edition, Mechanical Engineering Publication Limited, London.
- (7) Lee, T. H., Lee, K. K. and Koo, J. Y., 2000, "Optimization of Chassis Frame by Using D-Optimal Response Surface Model," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 24, No. 4, pp. 894~899.
- (8) Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, New Jersey.