

벌크 시멘트 트레일러의 정동적 유한요소해석

김진곤^{**} · 이재곤^{*}

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Static and Dynamic Finite Element Analyses of a Bulk-Cement Trailer

Jin Gon Kim^{**} and Jae Gon Lee^{*}

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Deagu

(Received March 5, 2012 ; Revised June 7, 2012 ; Accepted June 11, 2012)

Key Words: Bulk-Cement Trailer(벌크 시멘트 트레일러), Finite Element Analysis(유한요소해석), Taguchi Method(다구찌 기법)

초록: 본 논문에서는 하부 프레임 구조가 보다 단순해진 분말류 운송차량인 벌크시멘트 트레일러의 정동적 특성을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 이를 위하여 벌크시멘트 트레일러가 받는 하중의 대부분을 지지하는 새시 프레임과 탱크부분을 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 삼차원 상세 유한요소모델링을 수행하였다. 자유진동해석을 통하여 차체의 동적특성을 이해하는데 필수적인 벌크시멘트 트레일러 몸통의 고유진동수와 진동모드를 분석하였다. 또한, 정적인 응력해석을 통하여 트레일러의 취약부위를 찾은 후 다구찌 실험계획법을 적용하여 경량화를 시키면서도 취약부위의 강도를 높일 수 있는 방안을 제시하였다.

Abstract: In this study, we analyze the static and dynamic characteristics of a bulk-cement trailer with a simpler structure that carries powders. The commercial software ANSYS is used to prepare a detailed three-dimensional model of the chassis frame and tank body that bear most of the load of a bulk-cement trailer for the finite element analysis. Modal analysis is conducted to examine the dynamic characteristics of the trailer body, and static analysis shows weak links in the structure. Finally, we propose a method to increase the strength of vulnerable areas and to reduce the weight of the trailer by applying the Taguchi method.

1. 서론

최근 대형 트럭이나 트레일러와 같은 수송기계 분야에서 고유가에 따른 물류비 증가와 배기가스로 인한 환경문제 등으로 차체 경량화에 대한 요구가 갈수록 커지고 있다. 자동차 산업에서는 고강도강을 적용한 차체 경량화 및 유한요소법을 적용한 구조해석과 관련된 연구가 매우 활발하게 이루어져 왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 자동차 산업과 달리 체계화된 연구가 이루어지지 않던 대형 수송기계 분야에서 최근 유한요소법을 이용한 최적설계를 통하여 40피트 평판 트레일러의 경량 하부 프레임을 개

발하는 연구가 진행되었다.^(5,6)

다양한 대형 수송 트레일러 중에서 벌크 시멘트 트레일러(Bulk-cement trailer)는 시멘트, 플라이 애쉬 및 파우더 등의 분말류를 운송하는 특수차량이다. 벌크 트레일러의 프레임은 수하물에 의한 하중의 대부분을 지지하기 때문에 충분한 강도유지를 하면서도 경량화된 구조를 가지는 것이 중요하다.⁽⁷⁾ 또한, 유동성을 가지는 분말류를 운송하기 때문에 안정적인 차량설계를 위해서 차체 구조의 동적특성을 파악하는 것도 필요하다.⁽⁸⁻⁹⁾ 하지만, 국내에서는 제작되는 벌크 시멘트 트레일러의 정적 및 동적인 특성을 분석하고 구조해석을 통하여 경량화를 시도하고자 하는 기초적인 연구들이 아직까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는, 국내 D사에서 개발하고자 하는

† Corresponding Author, kimjg1@cu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

벌크 시멘트 트레일러의 정동적 특성을 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 상세하게 분석하였다. 정적해석에서는 트레일러의 주행 시 발생하는 유동성 분말류의 무게중심 변화 등의 동적하중 효과⁽¹⁰⁾는 고려하지 않았다. 최종적으로, 다구찌 실험계획법을 적용하여 구조해석을 통해 찾은 취약부위의 강도를 개선하면서도 트레일러를 경량화 시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 유한요소모델링 및 고유진동해석

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 벌크 시멘트 트레일러의 CATIA 소프트웨어를 이용한 솔리드 모델링 형상을 보여주고 있다. 이 트레일러는 기존의 벌크 시멘트 트레일러보다 하부 프레임이 가운데 채널 프레임만으로 구성되어 탱크가 하중지지 역할을 하는 비교적 단순해진 구조를 가지고 있다. 하부 프레임에는 3.6mm(전방 탱크 지지판), 4.5mm(후방 하부 프레임) 그리고 6mm(후방 범퍼부) 두께의 강판들이 사용되었다. 그리고 탱크의 상부는 2.5mm 그리고 하부는 2.8mm 두께의 강판이 사용되었다. 사용되는 강판은 국내 P사의 항복강도가 700MPa 이상이고 인장강도가 780MPa 이상인 고강도강(ATOS80)이 사용되었다.

유한요소모델링은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 Fig. 2와 같이 바퀴부를 제외한 나머지 차체부분에 대해서만 수행하였다. 곡률을 가지고 복잡한 구조의 하부 프레임과 탱크는 삼차원 셸 요소(shell element)인 SHELL63요소를 14만개 이상 사용하여 상세하게 모델링하였으며, 탱크 내부의 보강 프레임은 BEAM188 요소(3D finite strain beam element)들로 모델링하였다. 유한요소모델링을 통해 구한 바퀴부를 제외한 트레일러의 전체 무게는 약 2463kg 정도인 것으로 나타났다.

자유진동해석을 수행한 결과, 매우 다양한 형태의 진동모드들이 발생하였다. 저차모드들에서는 Fig. 3과 같이 주로 벌크 탱크의 앞뒤 부분과 하부 프레임들에서 국부적인 진동모드들이 발생하였다. 벌크 시멘트 트레일러의 전체 구조에서 발생하는 주목할만한 진동모드들만 살펴보면 제일 먼저 8차 고유 진동수에서 Fig. 4와 같은 탱크

중앙부가 팽창 및 수축하는 형태의 진동모드가 발생하였다. 다음으로 8차와 11차 고유진동수에서는 탱크 단면의 진동모드가 Fig. 5와 6과 같이 원통형 셸 구조물에서 발생하는 진동모드와 유사한 형태의 변형이 발생하였다. 벌크 탱크의 길이 방향으로 발생하는 굽힘 진동모드는 Fig. 7과 같이 19차 고유진동수에서 발생하였다. 하지만, 발생하는 진동모드들은 대부분 25Hz 내외의 비교적 낮은 범위의 고유진동수 값들을 가진다.

구조물의 안정성이 중요한 가압형 원자로나 저장 탱크 등에서는 내진해석을 위해서 유체로 채워진 원통형 탱크의 고유진동 해석에 대한 이론 및 실험적 연구가 많은 연구자들에 의해 활발히 이루어져 왔다.^(11,12) 벌크 시멘트 트레일러도 분말의 유동에 의한 차체의 전복 및 동적특성에 미치는 영향을 보다 정확하게 파악하기 위해서는, 향후 분말과 같은 비압축성이고 비점성인 유체의 거동과 연성된 구조의 동적 특성에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

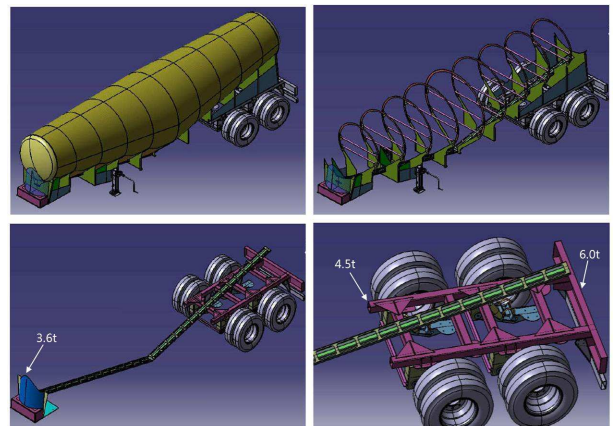


Fig. 1 CATIA solid modeling of a new-type bulk-cement trailer

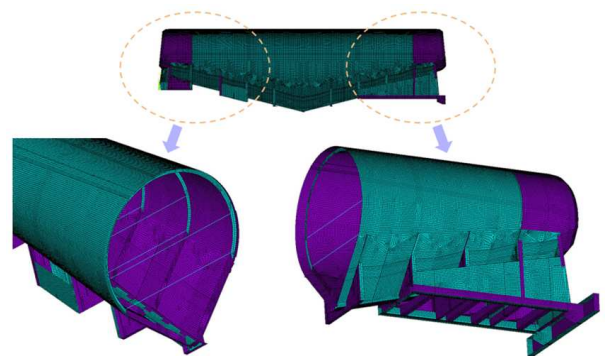


Fig. 2 Finite element modeling of the bulk-cement trailer

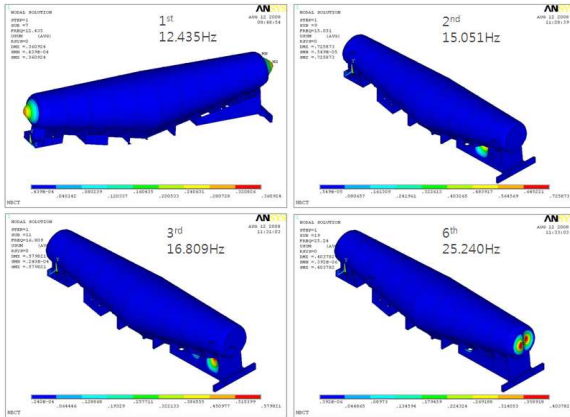


Fig. 3 Lower order local vibration modes

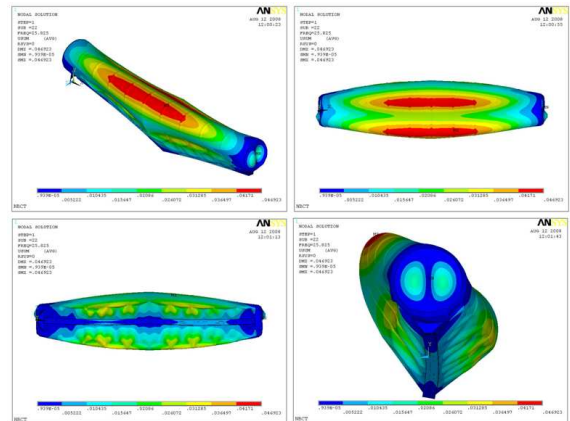


Fig. 6 16th vibration mode (25.825Hz)

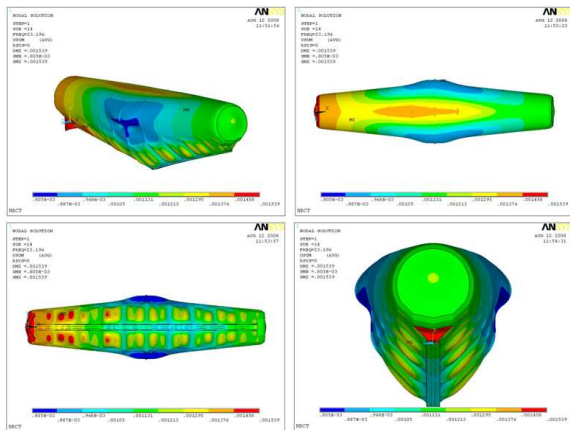


Fig. 4 8th vibration mode (23.196Hz)

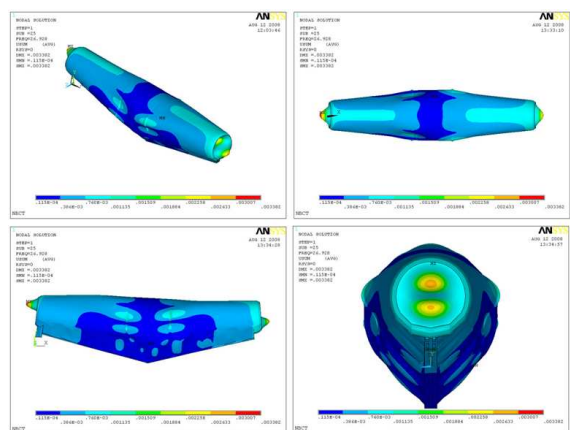


Fig. 7 19th vibration mode (26.928Hz)

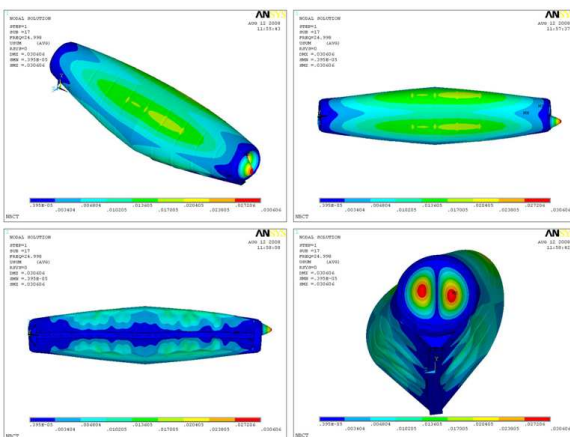


Fig. 5 11th vibration mode (24.998Hz)

3. 응력해석 및 경량설계

본 절에서는, Fig. 2의 벌크 시멘트 트레일러의 유한요소모델을 이용하여 정적 응력해석을 수행

하였으며, 이를 통하여 구조의 취약부위를 찾아 강도를 개선하면서도 무게를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. 응력해석을 위해서 Fig. 8과 같이 앞쪽 킹핀 홀 구속지점과 뒤쪽 바퀴 연결부위의 변위성분들을 구속하였으며($u_x = u_y = u_z = 0$), 안전계수(S=2)를 고려하여 벌크 탱크 하부에 수직 방향 합력이 실제보다 큰 30톤의 분포 압력을 가하였다. 응력해석 결과 Fig. 9와 같이 벌크 탱크 앞쪽에서 422MPa의 최대 von-Mises 응력이 발생하였다. 그림에서 P1, P2, P3, P4는 각각 값이 큰 순서대로 응력집중이 발생하는 위치를 나타내고 있다.

다음으로 벌크 탱크에 응력이 집중되는 부위는 수준을 낮추면서 전체적인 무게를 줄이기 위해 벌크 탱크 하단부의 부분별 적절한 두께를 다구찌 실험계획법을 적용하여 찾고자 한다. 실제 자동차에서는 경량화를 위해 두께, 강도 등이 다른 강판을 적절한 크기와 형상으로 절단한 후 레이

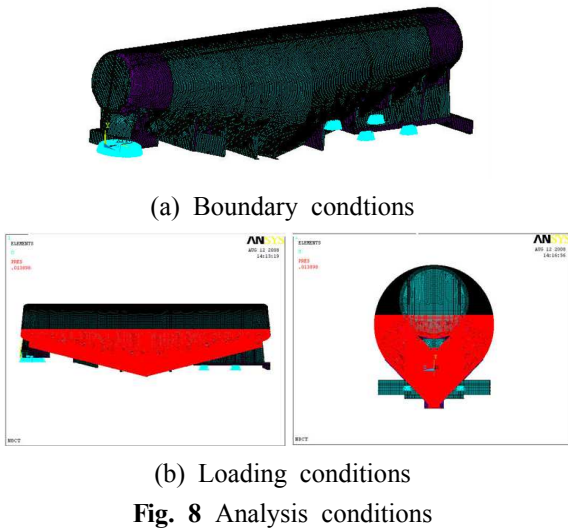


Fig. 8 Analysis conditions

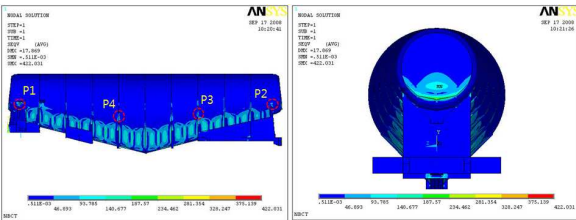


Fig. 9 Stress distributions and locations of stress concentration(P1, P2, P3, P4 in order of value)

저로 용접하여 원하는 형태의 부품으로 가공하는 테일러 블랭크(Tailor welded blank)방법이 적용되고 있다. 벌크 시멘트 트레일러도 자동차와 같이 서로 다른 두께의 강판들을 적절하게 사용한다면 취약부위의 강도를 보완하면서도 경량화를 시킬 수 있는 좋은 방안이 될 수 있을 것이다. 다구찌 기법은 제품설계 및 공정관리 등을 최적화하기 위해서 사용되는 통계적 실험계획법으로서, 사용 환경을 고려하여 우수한 성능을 가지도록 설계변수를 최적화시키도록 제품설계에 적용할 수 있다.

본 연구에서는 인자들간의 교호작용들이 모든 행들에 거의 균등하게 교락되어 있어 강건설계에서 가장 많이 사용되고 있는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표를 사용하였다. 모든 계산은 Excel에서 프로그래밍하여 수행하였다. Table 1과 2는 각각 Fig. 10에 표시된 벌크 탱크 하단부의 8개의 두께 인자들과 그들의 수준을 보여주고 있다. 고려된 평가특성들은 Fig. 9와 같이 트레일러에 발생하는 응력값(큰 순서대로 P1, P2, P3, P4)과 전체 중량

으로 설정하였으며, 2개의 평가특성은 모두 값이 작을수록 우수한 설계이므로 망소특성(smaller-the-better type)에 해당한다. 직교배열표를 이용하여 설계인자가 계의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 분석에 사용된 SN비(Signal to noise ratio)는 다음과 같다.

$$SN_{smaller-the-better} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad (1a)$$

$$SN_{larger-the-better} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1b)$$

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

Table 3에 정리된 직교배열표를 이용한 해석결과들로부터, Table 4와 같이 모든 설계인자들의 수준별 평균 기여도를 정리하였다. 예상되는 4군데의 취약부위에서 측정된 응력값은 수준별 설계인자들의 평균 기여도 판별을 용이하게 하기 위해서 각 위치별로 적절한 가중치를 주어 응력값의 평균화된 기여도를 계산하였다. 예를 들면, 설계인자 A의 수준 1의 평가특성에 대한 평균화된 기여도는 최대응력이 발생하는 위치 P1에서의 응력값에는 나머지 위치에서의 값들보다 2배의 가중치를 주어 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} (A_1)_{stress} &= \left[\sum_{i=1}^4 w_i A_{1,P_i} \right] / \sum_{i=1}^4 w_i \\ &= [2(-52.68) - 50.68 - 50.74 - 50.87] / 5 \\ &= -51.53 \end{aligned}$$

나머지 설계인자들에 대해서는 위와 유사하게 수준별로 평균화된 응력값에 대한 평균 기여도를 계산하여 Fig. 11과 같이 요인효과 선도로 표시하였다. Fig. 12는 무게에 대한 설계인자들의 수준별 평균 기여도를 보여주는 요인효과 선도이다. 선도에서 기울기가 급할수록 기여도가 큰 설계인자이며, 현재 수준과 비교하여 그 차이로 개선효과를 평가할 수 있다는 의미를 가진다. 이 요인효과 선도에 의거하여 취약부위의 강도 저하없이 전체적으로 무게를 줄일 수 있는 탱크 하단부의 적절한 두께 수준을 Table 5와 같이 최종 선정하였다. 변경된 하부 프레임의 두께를 적용하여 초기 모델과 동일한 조건에서 해석한 결과를 Table 6에 비교하였다. 해석결과 벌크 탱크 하부의 무게를 약 125kg(전체 무게의 약 5%)를 줄이면서도, 최대응력의 크기는 6% 이상 감소시키는 결과

를 얻을 수 있었다. 큰 하중을 받지 않는 탱크 상부와 하부지지 프레임에 대해서도 추가적인 경량설계를 수행한다면 더욱 큰 경량화 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1 Design factors and their levels

Design factors	Thickness level [mm]		
	1	2	3
A	2.5	2.8	3.0
B	2.5	2.8	3.0
C	2.5	2.8	3.0
D	2.5	2.8	3.0
E	2.5	2.8	-
F	2.5	2.8	3.0
G	2.5	2.8	3.0
H	2.5	2.8	3.0

Table 2 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array

Exp. no.	Design factors							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

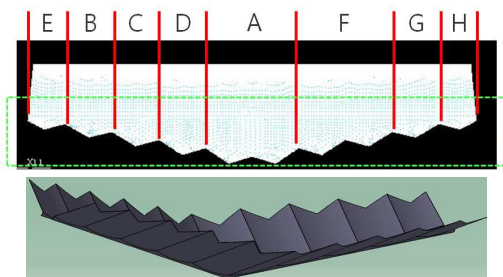


Fig. 10 Eight design factors of the lower part of bulk tank

Table 3 Analysis results of orthogonal array

Exp. no.	Weight (kg)	Stress (MPa)			
		P1	P2	P3	P4
Original	2462.6	422.0	334.7	332.2	328.5
1	2361.5	481.9	379.9	349.1	357.3
2	2423.7	427.5	335.7	343.7	348.6
3	2465.2	400.4	313.3	340.8	344.1
4	2422.1	421.5	313.1	343.5	355.9
5	2435.2	393.5	379.9	341.7	347.7
6	2419.3	476.9	336.3	348.1	344.6
7	2440.1	472.6	314.5	341.0	347.7
8	2424.5	418.4	372.3	348.0	343.7
9	2429.6	392.1	343.0	344.1	355.9
10	2442.1	398.8	373.7	335.6	338.8
11	2449.3	482.9	332.8	351.8	330.3
12	2428.4	428.3	324.2	341.1	343.9
13	2435.5	393.9	333.9	340.6	342.8
14	2451.9	476.3	321.6	335.6	338.9
15	2458.7	421.6	373.2	333.1	350.9
16	2463.6	417.4	340.9	333.1	337.9
17	2438.8	392.4	317.1	340.7	351.1
18	2461.1	473.3	369.5	335.3	342.9

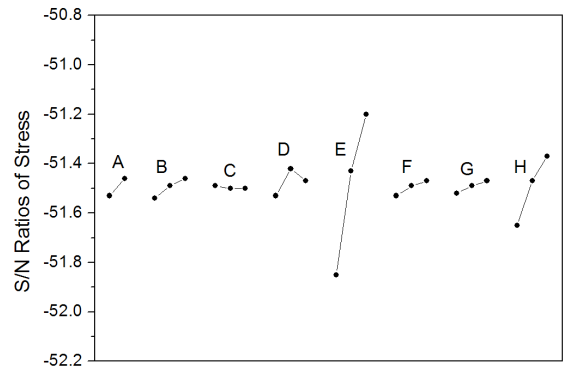


Fig. 11 Average performance diagrams of design factors: stress

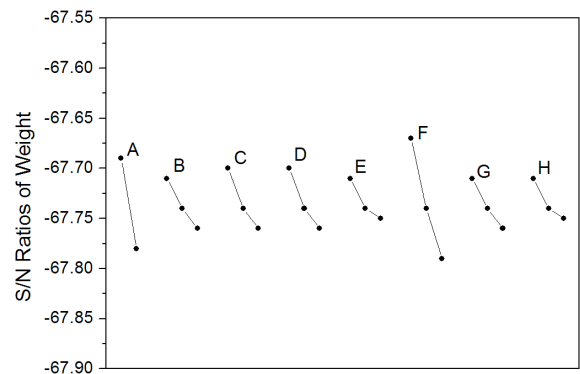


Fig. 11 Average performance diagrams of design factors: weight

Table 4 Average Performances of factors

Characteristics	Level	Design factors							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Stress(P1)	1	-52.68	-52.78	-52.66	-52.68	-53.58	-52.68	-52.67	-52.67
	2	-52.68	-52.65	-52.68	-52.41	-52.52	-52.68	-52.68	-52.68
	3	-	-52.60	-52.69	-52.67	-51.94	-52.67	-52.68	-52.68
Stress(P2)	1	-50.68	-50.69	-50.67	-50.69	-50.67	-50.71	-50.82	-51.47
	2	-50.69	-50.68	-50.69	-50.79	-50.69	-50.68	-50.65	-50.56
	3	-	-50.68	-50.69	-50.69	-50.69	-50.67	-50.59	-50.03
Stress(P3)	1	-50.74	-50.72	-50.64	-50.72	-50.72	-50.75	-50.65	-50.64
	2	-50.59	-50.64	-50.72	-50.69	-50.64	-50.62	-50.64	-50.72
	3	-	-50.64	-50.64	-50.63	-50.64	-50.63	-50.71	-50.64
Stress(P4)	1	-50.87	-50.72	-50.80	-50.89	-50.72	-50.81	-50.80	-50.80
	2	-50.68	-50.80	-50.71	-50.82	-50.80	-50.80	-50.80	-50.71
	3	-	-50.79	-50.81	-50.66	-50.80	-50.71	-50.71	-50.80
Weight	1	-67.69	-67.71	-67.70	-67.70	-67.71	-67.67	-67.71	-67.71
	2	-67.78	-67.74	-67.74	-67.74	-67.74	-67.74	-67.74	-67.74
	3	-	-67.76	-67.76	-67.76	-67.75	-67.79	-67.76	-67.75

Table 5 Optimum level of factors

Factor	Level	Factor	Level
A	1	E	3
B	2	F	1
C	1	G	1
D	1	H	2

Table 6 Analysis results of the optimized model

	Weight [kg]	von-Mises stress [MPa]			
		P1	P2	P3	P4
Original model	2462.6	422.0	334.7	332.2	328.5
Optimized model	2337.4	395.6	344.5	341.6	353.2

3. 결론

본 연구에서는 시멘트 및 파우더 등의 분말류를 운송하는 특수차량인 벌크 시멘트 트레일러의 정동적특성을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 벌크 시멘트 트레일러의 프레임은 수하물에 의한 하중의 대부분을 지지하기 때문에 충분한 강도유지를 하면서도 경량화된 구조를 가지는 것이 중요하다. 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용한 고유진동 해석결과, 매우 다양한 형태의 진동모드들이 발생하였다. 저차모드들에서는 주로 국부적인 진동모드들이 발생하였으며, 벌크 탱크에서는 8차 진동모드 이후에서 주목할만한 진동모드들이 발생하였다. 정적인 응력

해석을 통하여 트레일러의 취약부위를 찾은 후, 다구찌 기법을 적용하여 취약부위의 강도는 보장하면서 무게를 줄일 수 있는 설계방안을 제안하였다. 향후 연구에서는 유동성을 가지는 비압축성 분말의 거동과 연성된 구조의 동적특성에 대한 연구와 트레일러 전체 구조에 대한 경량설계 연구가 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 이러한 연구들이 지속적으로 진행된다면 국내 특장차들의 품질 경쟁력 제고에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Shin, J. K., Song, S. I., Lee, K. H. and Park, G. J., 2001, "Lightweight Automobile Design with ULSAB Concept Using Structural Optimization," *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 14, No. 3, pp. 277~286.
- (3) Yoon, S. C., Kim, Y. K., Jun, C. S. and Kim, M. Y., 2005, "Structural Strength Evaluation of a Carbody by Finite Element Analysis and Tests," *Fall Conference of KSPE*, pp. 49~54.
- (4) Yang, H. J., Kim, K. C., Lim, S. H., Kim, C. M. and Yim, H. J., 2007, "Design of High Stiffness

- and Lightweight Body for Stiffness Distribution Ratio,” *Transactions of KSNVE*, Vol. 17, No. 10, pp. 901~906.
- (5) Kim, J. G. and Yoon, M. S., 2010, “Optimal Design of Lightweight Frame for Heavy Flat-Bed Trailer by Using Taguchi Method,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 3, pp. 353~359.
- (6) Kim, J. G. and Jang, G. W., 2011, “Development of a Lightweight Frame for a 40-foot Flatbed Trailer By Using CAE-Based Structural Optimization,” *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 225, pp. 643-652.
- (7) Zhao, H. Q. and Zhang, H., 2005, “A Finite Element Analysis for the Tank Body and Frame of a Cement Tanker,” *Automotive Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 111~114.
- (8) Huang, S. W., Shi, W. and Li, L., 2010, “Dynamic Analysis Contrast on Bulk Cement Trailer's Original and Improved Model,” *Equipment Manufacturing Technology*, Issue 4, pp. 7~8.
- (9) Hong, J. S., Ham, Y. S. and Paik, Y. N., 2003, “Static Load Test of the Bogie and Vibration Performance Test, Dynamic Characteristics Analysis of the Bulk Cement Car,” *Journal of Korean Society for Railway*, Vol. 6, No. 3, pp. 186~193.
- (10) Ranganathan, R., Rakheja, S. and Sankar, S., 1990, “Influence of Liquid Load Shift on the Dynamic Response of Articulated Tank Vehicles,” *Vehicle System Dynamics*, Vol. 19, No. 4, pp. 177~200.
- (11) Jeong, K. H., Kim, K. S. and Park, K. B., 1997, “Natural Frequency Characteristics of a Cylindrical Tank Filled with Bounded Compressible Fluid,” *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 10, No. 4, pp. 291~302.
- (12) Firouz-Abadi, R. D., Haddadpour, H. and Kouchakzadeh, M. A., 2009, “Free Vibrations of Composite Tanks Partially Filled with Fluid,” *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, Issue 12, pp. 1567~1574.