

실험계획법을 이용한 구조물의 최적설계

Optimal Design for a Structure Using Design of Experiment

고 성 호(현대·기아자동차), 한 석 영*(한양대), 최 형 연(홍익대)

Sung Ho Ko(Hyundai & Kia Motors), Seog Young Han(Hanyang Univ.), Hyung Yeon Choi(Hongik Univ.)

ABSTRACT : The median barrier is one of the roadside hardware to prevent severe human and property damage from highway traffic accidents. The foreign standard of concrete median barrier was introduced and implemented without modification fitting to domestic vehicle and highway condition. In a car accident, median barrier doesn't protect vehicle effectively, especially for heavy vehicle such as bus and heavy truck. The purpose of this study is to develop the optimal performance design of concrete median barrier using the design of experiment with crash simulation analysis which is done by Pam-Crash that is one of the commercial crash simulation software. As a result of this study, an optimal design of concrete median barrier is obtained considering von Mises stress, volume and COG acceleration of truck.

Key words: Concrete median barrier(콘크리트 중앙분리대), Crash simulation(모의 충돌 실험), Design of experiment(실험계획법), Shape optimization(형상 최적화)

1. 서론

교통안전시설은 교통사고 예방에 직·간접적으로 결정적인 기능을 가진다. 즉, 교통안전시설의 설치 유무와 성능 그리고 관리상태에 따라 교통사고 발생을 감소시키거나 사고의 정도를 경감시킨다. 특히, 콘크리트형 중앙분리대는 차량의 중앙선 침범에 따른 교통저항을 감소시켜 교통용량을 증대하고 대향차로 오인사고 및 중앙선 침범사고 방지 불법 U-turn 방지, 좌회전 및 U-turn 폭원

으로 활용 대향차량간 차량전조등 불빛 차단으로 현광에 의한 운전자 눈부심 방지의 기능을 가지고 있다.

콘크리트 중앙분리대의 종류에는 Fig. 1과 같이 1950년대 미국의 자동차 회사인 GM사는 차량의 성능향상과 도로의 증가로 중앙선 침범으로 인한 사고가 증가하자 분리대용 방호울타리를 제안하여 이것을 미국의 대부분의 도로에 이용된 GM형 방호울타리, 그후 1960년대 New Jersey 주에서 개발되고 1980년 우리나라의 남해고속도로에 도입되어 전국에 적용되어 왔지만 차량의 중앙선 침범사고는 감소하였으나 중앙분리대 등반 및 추월사고가 증가하는 단점을 나타낸 NJ형 방호울타리, 이 NJ형의 단점을 보완하기 위해 1977년 FHWA에서 두 개의 경사부가 만나는 지점을 좀더 낮추어 설계함으로써 차량의 등반사고를 줄인 F형 중앙분리대, 그리고 90년대 미국 텍사스 교통연구소에서 제안하여 현재 그 실용성을 연구 중에 있는 단일경사형 중앙분리대가 있다.

현재 국내 고속도로에서 적용하고 있는 중앙분리대 시설은 콘크리트 소재의 Configuration F Barrier, 방현망, 시선유도표지(delineator)로 구성되어 있다.

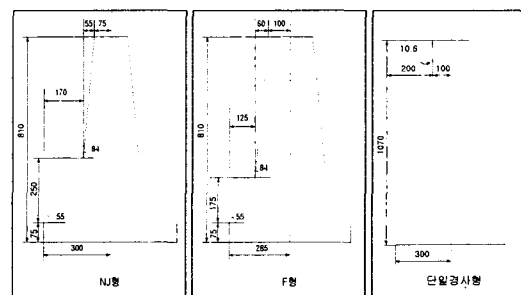


Fig. 1 콘크리트 중앙분리대 종류

이 중앙분리대는 현재 중앙선 침범 사고를 예방하는데 있어서 문제점이 있는 것이 사실이다. Fig. 2에서와 같이 차량 특히, 트럭 등 대형차량이 방호벽을 충돌했을 때 차량이 전도되거나 넘어가는 것을 효과적으로 지지하지 못하고 있으며, 차량을 위해 설치한 방현망이 사고 발생 시 또다른 위해 요인이 되고 있다. 따라서 현재 외국에서는 이를 방지하기 위해 중앙분리대의 높이를 높이는 추세에 있다.

본 연구의 목적은 현재 우리나라에서 사용하고 있는 교통안전 시설 중 외국을 설계를 도입하여 사용하고 있는 콘크리트 중앙분리대 기능과 성능을 위의 추세에 맞춰 대형차량에 대해 극대화하여 대형교통사고의 발생을 미연에 방지하고 또한 최소화하기 위해 최적의 성능을 발휘할 수 있는 설계대안을 실험계획법을 이용하여 충돌 모의 실험을 통하여 얻을 데이터들을 분석하여 각각의 인자들에 대한 최적의 조합을 찾고자 한다.

2. 방호울타리의 설계기준

방호울타리는 도로의 종류, 충돌속도를 고려하여 다음의 표와 같이 적용종별이 결정되며, 교통조건과 기하구조 조건이 특별히 나쁜 경우와 한 단계 높은 종별의 것을 사용하도록 하고 있다.

3. 실험계획법

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 많은 존재하는 원인들 중에서 실험에

Table 1 종별로 적용하는 도로의 종류 및 설계 조건

구분	종별	적용도로	설계조건						
			충격도 (KJ)	차량의 충돌 속도 (Km/h)	차량의 중앙 (t)	차량의 충돌 각도 (도)	차량이 받는 가속도 (g)	최대 충돌 변형거리 (m)	
								지주물 속역에 해당할 때	콘크리트에 해당할 때
고속용	A	고속도로 지동차선용도로 특히 주요 일반 국도	130	60	14 및 3.5	15	40이하	1.10이하	0.30이하
	B	주요 일반국도 주요 지방도 도시내 주요도로	60	40					
	C	기타도로	45	35					
	S	도로의 종류에 관계없이 철도 통과 교차 또는 인접한 도로구간	230	80					
분리대용	Am	고속국도 지동차 선용도로 특히 주요 일반국도	130	60	14 및 3.5	15	40이하	강성 방호울타리에서는 고려하지 않음	
	Bm	기타도로	60	40					

자료 : 도로안전시설 설치 및 관리지침 -방호울타리편-, 건설교통부, 1997



Fig. 2 중앙분리대 충돌사고 예

직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 부른다. 실험의 효율을 올리기 위하여 실험환경을 층별(classified)한 원인도 인자라는 개념에 포함시키며 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준이라 한다. 실험을 실시하기 이전에 대한 충분한 계획이 없이는 원하는 실험의 목적을 달성하기 어렵다. 실험계획법이란 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하여, 어떠한 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 가를 계획하는 것이라고 정의 할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 짰다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법을 선택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택했다는 의미이다. 데이터의 분석방법으로는 분산분석(Analysis of Variance:ANOVA), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis) 등이 있다. 본 논문에서는 분산분석을 이용해서 데이터를 분석하여 각 인자들의 최적조합을 찾으려고 한다.

4. 콘크리트 중앙분리대의 충돌 해석

4.1 대형트럭 모델링

일반적으로 차량 전체를 모델링하여 충돌 모의 실험을 하는데 많은 계산 시간이 소요된다. 이로 인해 계산시간을 단축하기 위해서 해석 시 크게 영향을 끼치지 않는 부분은 간략하게 모델링하였고, 여러 해석의 경험을 바탕으로 필요 부분을 빔(beam) 요소로 대체하였고 큰 변형이 발생하지 않는 부분은 강체(rigid body)로 구속하여 계산시간을 최소화하였다.

대형트럭 모델은 크게 7개의 그룹으로 캡(cab), 도어, 프레임, 타이어, 어셈블리, 적재함, 그리고 기타로 나눌 수 있다. 캡 부분은 충돌 시, 범퍼와 함께, 변형이 가장 많이 발생하는 부분으로 조밀하게 모델링 하였다. 도어 부분은 충돌이 발생하는 왼쪽부분은 쉘(shell) 요소로 모델링이 되어 있는 반면 반대쪽은 빔 요소로 대체를 하여 요소의 수를 줄였다. 또한 프레임과 적재함은 경사 충돌 시 큰 변형을 일으키지 않으므로 보다 큰 요소로 모델링 하였고, 앞 타이어인 경우 여러 번의 조정 과정을 거쳐 실제 거동과 비슷한 결과를 나타낼 수 있도록 조밀하게 모델링 하였으며 타이어 내부압을 적용하였다. 뒷 타이어인 경우 중앙분리대와 접촉이 발생하는 부분에는 앞 타이어와 같은 mesh와 조건을 주었으나 그 나머지 부분은 계산 시간을 단축시킬 수 있도록 좀더 크게 mesh 모델링을 하였다. 어셈블리 부분은 solid 요소로 단순 모델링된 엔진, 트랜스미션, 적재 화물과 shell 요소로 모델링된 후차축부(rear axle housing)로 구성되어있고 기타 완충장치 및 동력 전달축은 바(bar)와 빔(beam) 요소로 모델링을 하였다. 실차와 동등한 무게(weight) 배분을 위해서 적정 위치의 노드에 부가질량(added mass)을 주었다. Fig. 3는 mesh 모델링된 대형트럭을 보여주고 있다.

대형트럭 모델에 사용된 요소(element)의 개수는 24711개이고 절점(node)의 개수는 23578개이다.

4.2 대형트럭 모델의 중앙분리대에 대한 충돌 모의 실험

충돌 해석의 타당성과 현재 설치된 콘크리트 중앙분리대의 충돌 성능을 검증하기 위해 현재 우리나라에 설치되어 있는 콘크리트 중앙분리대를 모델링하여 충돌 성능 모의 실험을 수행하였다. Fig. 4는 이 실제 실험에서 트럭의 거동을 보여주고 있다. 차량 충돌 해석은 상용 충돌 해석 프로그램인 Pam-Crash를 사용하였다. 충돌 모의 실험은 충돌 실험 규정 즉, 충돌각도 15°, 충돌 속도 60 km/h로 충돌 모의 실험을 수행하였다.

대형트럭의 충돌 모의 실험에서는 최대 1.45×10^{-5} s의 time step을 사용하였고, 1 ms단위로 결과를 얻었다. 대형트럭의 거동을 알기 위해서 엔

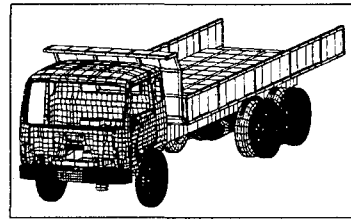


Fig. 3(a) 개발한 대형트럭 모델



Fig. 3(b) 개발한 대형트럭 측면 모델

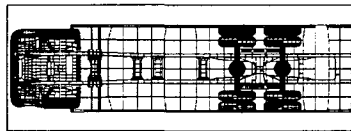


Fig. 3(c) 개발한 대형트럭 하부 모델



Fig. 4 충돌 실험 결과

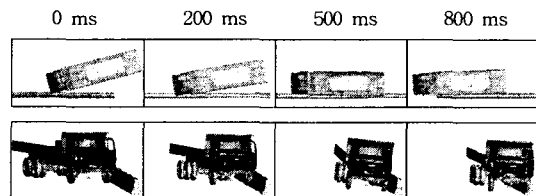


Fig. 5 충돌 모의 실험 결과

진, 대형트럭의 중심(Center of Gravity, 이하 COG)등의 절점을 선택하여 Nodal Time History를 관찰할 수 있게 하였다. Fig. 5에서는 대형트럭의 초기 상태에서부터 중앙분리대와의 충돌 순간, 충돌 후 변형 형상 및 거동을 그림으로 나타내었다. 모의 충돌 실험 결과 에너지 선도와 대형트럭의 속도 및 가속도 선도는 Fig. 6, 7, 9와 같다.

에너지 선도에서 전에너지(total energy)선도가 거의 일정하다. 운동에너지 감소량이 내부 에너지 증가량 보다 많은 것은 대형트럭과 지면과의 마찰 때문이다. 속도는 초기 충돌이후 약 20% 감소함을 알 수 있고 가속도는 충돌 초기에 4G

이상의 가속도(44.63m/s^2)가 발생하였고 뒷타이어 부분이 중앙분리대와 충돌하는 400ms 이후 부근에서 최대 가속도가 나옴을 알 수 있다. 이것은 경사충돌 시 트럭에 변형이 일어나지 않을 것이라 판단되는 부분을 충돌 계산 시간 단축을 위해 강체로 구속하였기 때문에 충돌 후 강체 거동에 의해 트럭의 회전이 실제보다 많이 나타나 뒷타이어가 중앙분리대와 충돌 시 최대 가속도가 발생했다는 판단 하에 실험계획법을 실시할 때는 초기 충돌 때 나타나는 가속도를 최대 가속도로 하여 계산하였다.

5. 콘크리트 중앙분리대의 최적화

5.1 설계변수 선정

중앙분리대의 설계변수는 중앙분리대의 형상이

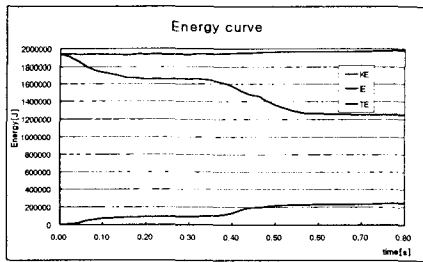


Fig. 6 에너지 선도

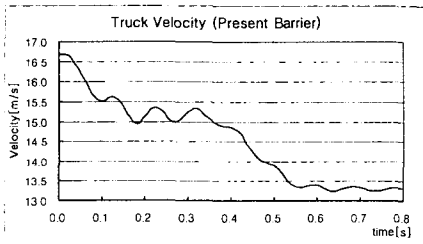


Fig. 7 대형트럭의 속도 선도

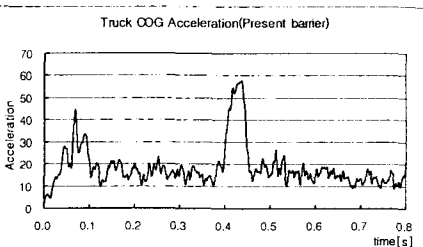


Fig. 8 대형트럭의 가속도 선도

대칭형이기 때문에 한쪽 면의 형상이 결정이 되면 중앙분리대의 전체 형상이 결정이 된다. 따라서 Fig. 9와 같이 중앙분리대의 형상을 결정지을 수 있는 8개를 설계변수로 선정하였다. 여기서 R_1 , R_2 는 건부(fillet)의 반경을 나타낸다.

설계변수에 대한 수준값 선정은 우선 방호벽의 높이에 있어서 소요높이를 구하기 위해서는 실물 충돌 시험이 필요하나 현실적인 여건상 미국의 TTI(Texas Transportation Institute)에서 86년 실시한 차종별 충돌시험을 기초로 차량의 전도방지에 필요한 높이를 산정하였다. Fig. 10은 TTI에서 제시한 충돌실험 결과 차종별 무게중심의 높이와 방호벽 높이와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그리고 나머지 설계변수들은 각국에서 사용되고 있는 중앙분리대의 제원을 근거로 이들을 고려하여 중앙분리대의 상·하 폭과 형상을 결정짓는 각도들을 결정하였다.

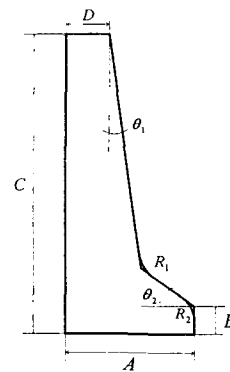


Fig. 9 중앙분리대의 설계변수

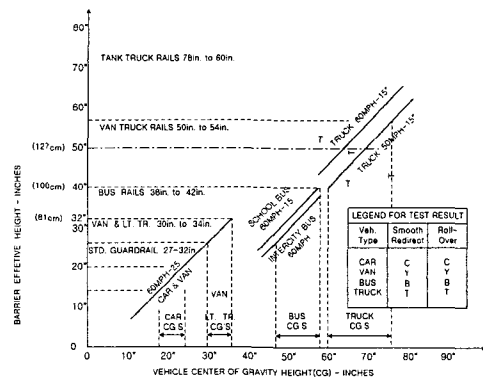


Fig. 10 TTI에서 제시한 충돌실험 결과 차종별 무게중심의 높이와 방호벽 높이와의 상관관계

5.2 실험계획법을 이용한 형상최적설계

직교배열표는 인자가 많은 경우에 실험의 횟수를 적게 하면서도 모든 인자를 포함한 일부실험법을 쉽게 배치할 수 있고 하나 하나의 실측치는 취급한 이자에 관한 정보를 동시에 포함하고 있으나 실험의 배치에 있어서 정확히 균형이 잡혀 있으므로 하나의 인자의 효과를 구할 때 다른 인자의 영향에 대하여 치우침이 없으며 실험 데이터로부터 요인변동의 계산이 용이하다는 장점으로 많이 쓰이고 있다. 이 문제에서 8개의 설계변수를 최소한의 실험횟수로 최대한의 인자를 배치할 수 있는 L_{18} 직교배열표를 이용하여 주효과를 검출하였다. 그러나 형상을 결정하는데 각 인자들의 교호작용 또한 영향을 미치므로 교호작용이 있다고 판단되는 인자를 검출하여 마지막으로 L_{27} 직교배열표를 이용하여 최적조합을 찾아내었다. 특성치는 충돌 모의 실험을 통해 얻은 트럭의 COG에서의 최대 가속도, 중앙분리대의 최대 Mises 응력과 중앙분리대의 체적을 각각의 최대값으로 표준화(normalize)하여 다구찌가 제안한 망소특성 계산식에 넣은 값을 사용함으로써 위 세 가지 영향을 모두 고려하였다.

$$\text{특성치} = -10 \log\left(\frac{1}{3} (\|\max VM \text{ stress}\|^2 + \|\max Vol.\|^2 + \|\max COG \text{ Acl.}\|^2)\right)$$

위의 분산분석표에서 A, C, θ_2 만이 $\alpha=0.10$ 에서 유의하다. 인자의 수준별 통계를 참조하여 보면 특성치가 큰 값이 최적이므로 이들 인자들의 최적조건은 $R_{22}A_3B_2C_2D_1\theta_{12}\theta_{23}R_{12}$ 이다.

이 조건을 가지고 추정치를 계산해보면 3.23 (± 0.29)인 반면에 모의 실험 결과는 2.09가 나왔다. 이 같은 결과는 설계변수간의 상호 교호작용을 무시했기 때문에 정확한 최적조건을 찾지 못했다고 판단된다. 유의하지 않다고 판단되는 설계변수 중 R_1 과 R_2 를 뺀 설계변수와 교호작용이 있다고 판단되는 $B \times C$, $B \times \theta_1$, $C \times \theta_1$ 을 L_{27} 직교배열표에 배치시켰다.

L_{27} 직교배열표에 대한 분산분석표에 C와 θ_2 만이 $\alpha = 0.10$ 에서 유의하다. 그러나 F값이 2이상인 경우에는 약간의 유의성이 있다고 보기로 한다면 B, C, θ_2 와 교호작용 $B \times C$, $C \times \theta_1$ 이 유

Table 2 설계변수

설계변수	수준수	수준값		
R_2	2	100	90	
A	3	305	295	285
B	3	85	80	75
C	3	1270	1140	1000
D	3	100	85	75
θ_1	3	7	6	5
θ_2	3	65	55	45
R_1	3	290	280	270

Table 3 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 혼합직교 배열표

실험번호	R_2	A	B	C	D	θ_1	θ_2	R_1	특성치
1	100	305	85	1270	100	7	65	290	1.665
2	100	305	80	1140	85	6	55	280	2.551
3	100	305	75	1000	75	5	45	270	1.608
4	100	295	85	1270	85	6	45	270	2.166
5	100	295	80	1140	75	5	65	290	1.769
6	100	295	75	1000	100	7	55	280	1.736
7	100	285	85	1140	100	5	55	270	2.781
8	100	285	80	1000	85	7	45	290	2.320
9	100	285	75	1270	75	6	65	280	2.452
10	90	305	85	1000	75	6	55	290	1.508
11	90	305	80	1270	100	5	45	280	2.541
12	90	305	75	1140	85	7	65	270	1.816
13	90	295	85	1140	75	7	45	280	2.755
14	90	295	80	1000	100	6	65	270	1.902
15	90	295	75	1270	85	5	55	290	2.531
16	90	285	85	1000	85	5	65	280	1.407
17	90	285	80	1270	75	7	55	270	2.410
18	90	285	75	1140	100	6	45	290	3.013

Table 4 L_{18} 에 대한 분산분석표

요인	S	f	V	F
R_2	0.036	1	0.036	
A	0.607	2	0.304	3.94
B	0.135	2	0.068	
C	1.644	2	0.822	10.67
D	0.112	2	0.056	
θ_1	0.092	2	0.046	
θ_2	1.014	2	0.507	6.59
R_1	0.054	2	0.027	
e	0.420	2	0.210	
(e)	(0.850)	(11)	(0.077)	
T	4.115	17		

의 하다고 볼 수 있다. 인자들의 통계를 참조하여 보면 특성치가 큰 값이 최적이므로 이들 인자들의 최적조건은 $A_2B_2C_2D_3\theta_{11}\theta_{22}$ 가 된다. 이에 대해 계산된 추정치는 3.35 (± 0.44)이며 모의실험 결과는 2.80(체적=5.743m³, 응력=4.41Mpa, 가속도=38.7392)가 나왔다.

Table. 5 L₂₇(3¹³) 직교배열표

실험 번호	인자													특성치
	B	C	B×C	θ ₁	θ ₂	A	D	C×D	θ ₁	θ ₂	e			
1	85	1270	1	1	7	1	1	1	305	100	1	65	1	1.7301
2	85	1270	1	1	6	2	2	2	295	85	2	55	2	2.4884
3	85	1270	1	1	5	3	3	3	285	75	3	45	3	2.9221
4	85	1140	2	2	7	1	1	2	295	85	3	45	3	2.5268
5	85	1140	2	2	6	2	2	3	285	75	1	65	1	2.9816
6	85	1140	2	2	5	3	3	1	305	100	2	55	2	2.8462
7	85	1000	3	3	7	1	1	3	285	75	2	55	2	2.8997
8	85	1000	3	3	6	2	2	1	305	100	3	45	3	2.6786
9	85	1000	3	3	5	3	3	2	295	85	1	65	1	1.8552
10	80	1270	2	3	7	2	3	1	295	75	1	55	3	2.6205
11	80	1270	2	3	6	3	1	2	285	100	2	45	1	1.7368
12	80	1270	2	3	5	1	2	3	305	85	3	65	2	1.9936
13	80	1140	3	1	7	2	3	2	285	100	3	65	2	2.7826
14	80	1140	3	1	6	3	1	3	305	85	1	55	3	2.7556
15	80	1140	3	1	5	1	2	1	295	75	2	45	1	2.9376
16	80	1000	1	2	7	2	3	3	305	85	2	45	1	2.4588
17	80	1000	1	2	6	3	1	1	295	75	3	65	2	1.9320
18	80	1000	1	2	5	1	2	2	285	100	1	55	3	1.6946
19	75	1270	3	2	7	3	2	1	285	85	1	45	2	2.5139
20	75	1270	3	2	6	1	3	2	305	75	2	65	3	1.9825
21	75	1270	3	2	5	2	1	3	295	100	3	55	1	2.5549
22	75	1140	1	3	7	3	2	2	305	75	3	55	1	2.2791
23	75	1140	1	3	6	1	3	3	295	100	1	45	2	2.6100
24	75	1140	1	3	5	2	1	1	285	85	2	65	3	1.8510
25	75	1000	2	1	7	3	2	3	295	100	2	65	3	2.0412
26	75	1000	2	1	6	1	3	1	285	85	3	55	1	1.2576
27	75	1000	2	1	5	2	1	2	305	75	1	45	2	1.4117

Table 6 L₂₇에 대한 분산분석표

요인	f	S	V	F
B	2	0.531	0.266	2.636
C	2	1.795	0.898	8.909
θ ₁	2	0.366	0.183	1.815
A	2	0.180	0.090	
D	2	0.133	0.067	
θ ₂	2	0.585	0.292	2.902
B×C	4	0.896	0.224	2.224
B×θ ₁	4	0.585	0.146	
C×θ ₁	4	0.864	0.216	2.144
e	2	0.110	0.055	
(e)	(10)	(1.007)	(0.101)	
T	26	6.044		

6. 결론

본 연구를 통하여 콘크리트 중앙분리대의 형상 인자들을 실험계획법을 사용해서 최적 조합을 찾았다. 현재 국내에 설치된 중앙분리대와 대형 트럭과의 충돌 해석 결과 von Mises 응력은 5.31 Mpa, 트럭 COG에서의 가속도는 44.63m/s², 체적은 4.28m³이었다. 실험계획법에 의해 찾아낸 조합에 의한 충돌 해석 결과는 von Mises 응력은 4.41Mpa, 트럭 COG에서의 가속도는 38.74m/s², 체적은 5.74m³이었다. 기존 중앙분리대에서 가속도는 4G가 넘었던 반면에 찾아낸 조합에 의한 중앙분리대에서는 충돌 해석 결과 4G이하로 규정을 만족시켰다.

L₁₈ 직교배열표에서 교호작용이 있다고 판단된 인자들을 고려하여 L₂₇ 직교배열표에 배열 후 나온 조합을 충돌 모의 실험한 결과 추정치의 에러 범위를 근소하게 벗어났다. 이것은 L₂₇ 직교배열

표 영향도 분석결과 인자들 간에 다른 교호작용이 나타났다. 향후 이러한 교호작용을 고려한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 오재용, 차경준, 이규태, 진정연, “다구찌 방법과 실험계획법을 이용한 소음기의 설계 방법”, 한국자동차공학회논문집 제7권 제5호, pp121~129, 1999
- 도로안전시설 설치 및 관리지침 -중앙분리대편, 충격흡수시설편-, 건설교통부, 1998
- “PAM-CRASH Theory Manual”, 1998
- Design Construction and Maintenance of Highway Safety Features and Appurtenances, National Highway Institute, 1997
- Zaouk, A., Bedewi N. E., Kan, C.D., Schinke, H., “Evaluation of a Multi-purpose Pick-up Truck model Using Full Scale Crash Data with Application to Highway Barrier Impacts”, Presented at the 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, Italy, June, 1996
- Eberhard Haug, Jan Clincenmaillie, Xiaomin Ni, “Recent Trends and Advances in Crash Simulation and Design of Vehicles”, Proceedings of the NATO-ASI on Crashworthiness of Transportation Systems Structural Impact and Occupant Protection, 1996
- 한인환, “마찰력이 수반된 자동차 충돌의 동역학적 해석”, 한국자동차공학회논문집 제 2 권 제 2 호, pp. 1~11, 1994
- 박성현, “현대실험계획법”, 영지문화사, 1990