

차량 충돌 해석을 통한 중앙분리대의 최적 성능 설계

Optimal Performance Design for Concrete Median Barrier with Crashworthiness Analysis

한석영*, 고성호**, 최형연***
Seog Young Han, Seong Ho Ko, Hyung Yeon Choi

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an optimal performance design of a concrete median barrier using the design of experiment and crash simulation which is done by Pam-Crash, one of the commercial crash simulation software. A formula of characteristic value was suggested to obtain an optimal performance design considering all of von Mises stress, volume and acceleration at center of gravity of a heavy truck. An optimal design of a concrete median barrier was obtained by the analysis of variance based on design of experiment and crash simulation. A crash simulation with the optimal design was accomplished in order to verify the suitability of the suggested formula and the proper application of the design of experiment. The obtained optimal design was satisfied for a domestic design regulation of a concrete median barrier.

주요기술용어 : Median barrier(중앙분리대), Design of experiment(실험계획법), Crash analysis(충돌해석), Optimal performance design(최적 성능설계), Orthogonal array(직교배열표), Characteristic value(특성치)

1. 서론

우리 나라의 자동차 보유대수는 1999년 말까지 10,469,599대로서 1970년도의 자동차 등록대수 13만대에 비교하면 약 80배가 증가하였으며, 또한 운송수단이 대형화, 고속화 되어감에 따라 사고발생시 인·물적 피해 규모도 대형화/다양화되어 지난 5년간 연평균 25만여 건의 교통사고가 발생하여 연평균 1만여 명이 사망하고, 연평균 34만여 명의 부상자가 발생하여 연간 GDP의

2.6%에 해당하는 약11조 1천억원('97년도)이 교통사고로 인해 손실되고 있다.¹⁾

이와 같은 교통사고가 발생하는 주원인은 과속, 신호위반, 중앙선 침범 등과 같은 운전자의 법규위반에 의한 인적요인, 차량정비 및 운행관리 불량으로 인한 자동차 요인과 도로환경 요인에 기인된다고 할 수 있겠으나, 도로의 고기능화(고속화, 다차로화) 요구에 부응하는 교통안전시설의 설치가 이루어지지 않아 교통사고시 인·물적 피해를 최소화하지 못하는 기능적 미비도 대형교통사고의 원인으로 작용하고 있다.

교통안전시설은 교통사고 예방에 직·간접적인 기능을 가진다. 즉, 교통안전시설의 설치 유무

* 회원, 한양대학교 기계공학부

** 회원, 현대·기아자동차

*** 회원, 홍익대학교 기계공학과

와 성능 그리고 관리상태에 따라 교통사고 발생을 감소시키거나 사고의 정도를 경감시킨다. 특히, 콘크리트형 중앙분리대는 운전자 실수에 의해 중앙선을 넘어 대향차로로의 진입으로 인한 대형교통사고를 예방하여 피해를 최소화하기 위함이다.

현재 국내에서는 외국의 콘크리트 중앙분리대 설계를 그대로 도입하여 사용하고 있다. 반면 외국에서는 대형 차량(트럭, 버스)에 대해 콘크리트 중앙분리대가 그 기능을 충분히 수행하지 못하여 이를 개선하기 위해 대형 사고 방지를 위해 연구 중에 있으며 높이를 높여 가는 추세이다.^{2,6)}

따라서, 본 연구에서는 대형 차량에 대해 콘크리트 중앙분리대의 기능을 충분히 발휘하기 위한 최적 성능설계를 수행하여 국내 설계규정을 만족하면서 중앙분리대의 체적, 응력 그리고 트럭의 가속도를 모두 고려한 최적 형상을 결정하였다. 먼저 중앙분리대의 형상을 결정짓는 형상 설계인자들을 결정한 후, 직교배열표를 구성하고 이를 바탕으로 충돌 해석 프로그램인 Pam-Crash⁷⁾를 사용하여 트럭과 중앙분리대 간의 충돌 모의해석을 수행하였다. 여기서 얻어진 결과를 실험계획법을 이용하여 분석함으로써 각각의 설계인자들에 대한 최적조합을 찾아내었다.

2. 콘크리트 중앙분리대

2.1. 콘크리트 중앙분리대의 기능

중앙분리대의 주기능은 중앙선 침범과 같은 치명적인 사고를 방지하고 대향차로와의 명확한 구분을 가능케 함으로써 운전자의 명확한 판단을 유도하기 위함이다. 대향차량의 불빛을 막아주는 방현망의 설치를 용이하게 하여 운전자에게 보다는 운전환경을 제공한다. 일반적인 중앙분리대의 역할을 정리하면 다음과 같다.

- 차량의 중앙선 침범에 따른 교통저항을 감소함으로써 교통용량 증대
- 대향차로 오인사고 및 중앙선 침범사고 방지
- 불법 유-턴 방지

- 각종 도로표지판 및 교통시설 설치장소로 활용
- 좌회전 및 유-턴 폭원으로 활용
- 보행자에 대한 교통안전성 역할
- 대향차량간 차량전조등 차단 역할
- 중앙분리대 폭원이 넓은 경우 도로를 횡단하는 차량에 대한 안전성 역할 및 교통처리의 용이성 제공

2.2. 콘크리트 중앙분리대의 종류

2.2.1 미국의 콘크리트 중앙분리대

1) NJ형

1950년대 미국의 자동차 회사인 GM사는 차량의 성능향상과 도로의 증가로 중앙선 침범으로 인한 사고가 증가하자 분리대용 방호울타리를 제안하였으며, 그후 1960년대 New Jersey 주에서 개발한 NJ형 방호울타리는 1980년 국내의 남해 고속도로에 도입되어 전국에 적용되어 왔다. 그러나 NJ형은 차량의 중앙선 침범사고는 감소하였으나 중앙분리대의 등반 및 추월사고가 증가하는 단점을 가지고 있다.

2) F형

NJ형의 실시결과 계속적인 대형사고의 발생으로 인해 새로운 중앙분리대의 모형을 연구하게 되었다. 1977년 FHWA는 이러한 대형사고의 발생을 보완하는 F형 중앙분리대를 개발하였다. F형은 두 개의 경사부가 만나는 지점을 좀더 낮추어 설계함으로써 차량의 등반사고를 줄인 형태이다. 국내에서는 과거 NJ형을 사용하다가 90년대 초반부터 F형 중앙분리대를 도입 사용하고 있다. 그러나 F형은 승용차나 경트럭의 전도방지기능은 수행 가능하나 버스나 트럭에 대해서는 방호기능이 부족한 단점이 있다.

3) 단일경사형

단일경사형 중앙분리대는 90년대 미국 텍사스 교통연구소에서 제안하여 현재 그 실용성을 연구중에 있다. 단일경사형은 NJ형이나 F형과는 달리 각의 변환부분을 없앤 단일한 경사를 준 형태이다. 미국의 콘크리트형 중앙분리대의 제원

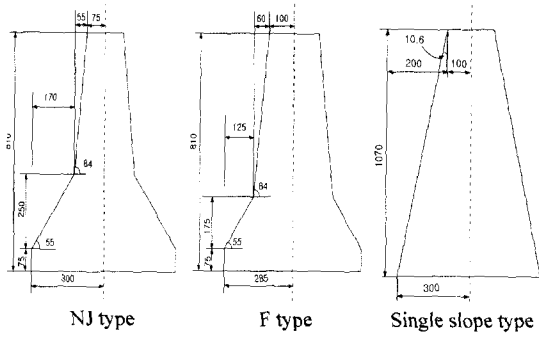


Fig. 1 Types of the american concrete median barriers

은 Fig. 1과 같다.

2.2.2 국내의 콘크리트 중앙분리대

현재 국내 고속도로에서 적용하고 있는 중앙 분리대 시설은 Fig. 2와 같이 미국의 설계를 도입한 F형 콘크리트 중앙분리대, 방현망 그리고 시선유도표지(Delineator)로 구성되어 있다.

2.3. 방호울타리의 설계 기준

방호울타리는 도로의 종류, 충돌속도를 고려하여 Table 1과 같이 적용종별이 결정되며, 교통

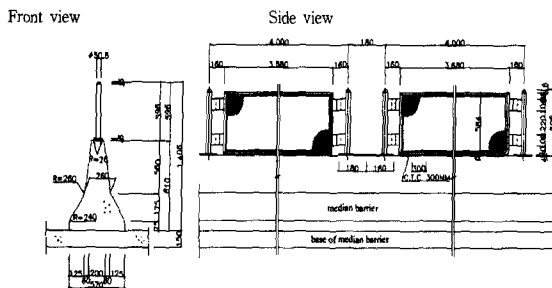


Fig. 2 Present design of domestic concrete median barrier

조건과 기하구조 조건이 특별히 나쁜 경우와 한 단계 높은 중별의 것을 사용하도록 하고 있다.

2.4. 콘크리트 중앙분리대의 문제점

중앙분리대는 여러 가지 기능을 수행하는 시설이지만, 중앙분리대의 가장 중요한 기능은 중앙선 침범사고를 예방하여 주행안전을 높이고, 대향차로 차량의 전조등을 차광하여 주행의 쾌적성과 교통용량을 증가시키는 것이다. 그러나, 고속도로에 설치된 중앙분리대 시설은 후자의 기능은 대체로 만족스럽게 수행하고 있지만, 전자의 경우에 있어서는 약간의 문제점이 있는 것이 사실이다. Fig. 3에서와 같이 대형 차량 특



Fig. 3 Examples of heavy vehicle's crash accidents with a concrete median barrier

Table 1 Design standard of concrete median barrier¹⁾

Classification	Implemented road	Design condition				
		Impact value (kJ)	Collision speed (km/h)	Mass of vehicle (ton)	Collision angle (°)	Degree of acceleration to the vehicle (g)
Am	Freeway main national road	130	60	14	15	under 4g
Bm	Others					

히 대형 트럭이 방호벽을 충돌했을 때 차량이 전도되거나 넘어가는 것을 효과적으로 저지하지 못하고 있다.

F형이나 NJ형 중앙분리대에 대한 충돌시험결과를 발표한 보고서에서는 방호벽의 높이가 32" (810mm)이면 차량의 전도를 방지할 수 있다고 언급되어 있지만, 미국의 실물충돌시험 결과 (TTI 충돌시험)⁵⁾에 의하면 중·대형 차량 충돌 시에는 차량의 전도를 충분히 저지할 수 없다는 결과를 나타내고 있다.

3. 실험계획법

실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 수행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떤 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 구성했다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대한 인자를 선정하고, 실험방법을 선택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다.

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 값을 특성치(characteristic value)라 하며, 이 특성치에 영향을 주는 원인 중에서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(Factor)라고 한다. 또한, 실험을 하기 위한 인자의 실험조건을 수준(Level)이라 한다. 본 연구에서는 각각의 설계 변수에 대한 설계치수를 수준으로 선택하였다.

인자의 수가 많은 경우에 실험횟수를 줄이기 위하여 먼저 주효과와 기술적으로 보아서 있을 것 같은 두 인자간의 교호작용을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 두 인자 이상의 교호작용을 희생시켜서 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 구성할 수 있도록 만들어 놓은 표를 직교배열표라 한다.

본 논문에서는 중앙분리대의 성능을 결정하

는 형상인자를 선정하고, 인자들간의 교호작용을 검출하기 위해 L18 직교배열표를 구성하였으며, 검출된 두 인자간의 교호작용을 제거하기 위해 L27 직교배열표를 구성하였다. 이로부터 구해진 데이터의 분석방법⁸⁾으로는 분산분석(Analysis of Variance: ANOVA), 상관분석(Correlation Analysis), 회귀분석(Regression Analysis)법 중 분산분석법을 이용하여 각 인자들의 최적조합을 구하였다.

4. 콘크리트 중앙분리대의 최적화

4.1 대형 트럭과 콘크리트 중앙분리대의 모델링

1) 대형 트럭

일반적으로 차량 전체를 모델링하여 충돌 모의해석을 하는 데는 많은 계산 시간이 소요된다. 따라서, 충돌해석시 크게 영향을 끼치지 않는 부분은 간략하게 모델링 하였고, 여러 해석의 경험을 바탕으로 필요 부분을 보(Beam) 요소로 대체하였으며, 큰 변형이 발생하지 않는 부분은 강체(rigid body)로 구속하여 계산시간을 최소화하였다.

대형 트럭 모델은 크게 7개의 그룹으로 캡(cab), 도어, 프레임, 타이어, 어셈블리, 적재함, 그리고 기타로 나눌 수 있다. 캡 부분은 충돌시 범퍼와 함께 변형이 가장 많이 발생하는 부분으로 조밀하게 모델링 하였다. 도어 부분은 충돌이 발생하는 왼쪽부분은 셸(shell) 요소로 모델링이 되어 있는 반면 반대쪽은 보 요소로 대체하여 요소의 수를 줄였다. 프레임과 적재함은 경사 충돌시 큰 변형을 일으키지 않으므로 보다 큰 요소로 모델링 하였다. 앞타이어 부분은 여러 번의 조정 과정을 거쳐 실제 거동과 비슷한 결과를 나타낼 수 있도록 조밀하게 모델링하였으며 타이어 내부압을 적용하였다. 뒷타이어 부분은 중앙분리대와 접촉이 발생하는 부분에는 앞타이어와 같은 메시(mesh)와 조건을 주었으나 그 나머지 부분은 계산 시간을 단축시킬 수 있도록 조금 크게 모델링하였다. 어셈블리 부분은 솔리드(solid) 요

소로 단순 모델링된 엔진, 트랜스미션, 적재 화물과 쉘 요소로 모델링된 후차축부(rear axle housing)로 구성되었다. 기타 완충장치 및 동력 전달축은 바(bar)와 보 요소로 모델링하였다. 실차와 동등한 무게 배분을 위해서 적정 위치의 절점(node)에 부가질량(added mass)을 주었다. 대형 트럭 모델에 사용된 요소의 종류와 개수는 솔리드 요소 612개, 쉘 요소 24,073개, 보 요소 24개, 바 요소 2개가 각각 사용되었고, 절점(node)의 개수는 모두 23,578개가 사용되었다. 이렇게 모델링된 대형 트럭을 Fig. 4에, 그 제원을 Table 2에 나타내었다.

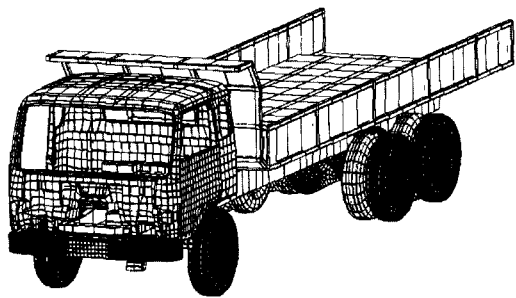


Fig. 4 Isotropic view of the developed heavy truck model

Table 2 Specification of the heavy truck model

Division		Specification
Overall	Length(mm)	9,389(9,738) (Include cargo)
	Width(mm)	2,264(2,490) (Include cargo)
	Height(mm)	2,520(2,728) (Include cargo)
Wheel base	First(mm)	5,050
	Second(mm)	1,300
Cargo's inside dimension	Length(mm)	8,140(7,378)
	Weight(mm)	2,490(2,390)
	Height(mm)	1,413(535)
Unloaden vehicle weight (Kg)		8,933
Max. pay load (Kg)		5,069
Gross vehicle weight (Kg)		14,002
Tread	Front(mm)	2,000
	Rear(mm)	1,805

2) 콘크리트 중앙분리대

콘크리트 중앙분리대는 현재 국내에서 사용 중인 F형(Fig. 2 참조) 중앙분리대와 실험계획법을 사용하여 최적조합을 도출하기 위한 두 개의 L₁₈과 L₂₇의 직교배열표에 따라, 그리고 실험계획법에 의해 구해진 최적조합의 중앙분리대에 대해 동일한 조건하에서 결과를 산출하기 위하여 모두 같은 방법으로 모델링 하였다. 즉, 트럭과 직접적으로 충돌하는 부분은 필요한 데이터를 얻기 위해 조밀하게 모델링 하였고 그 이외의 부분은 계산시간을 고려하여 큰 요소로 모델링 하였다. 콘크리트 중앙분리대의 물성치는 해석 경험과 콘크리트 물성치에 대한 자료^{9,10}를 바탕으로 Pam-Crash에서 제공하는 탄소성 솔리드 요소(elastic-plastic for solid element)를 사용하였다. Fig. 5는 모델링 된 F형 콘크리트 중앙분리대 중의 한 예이다.

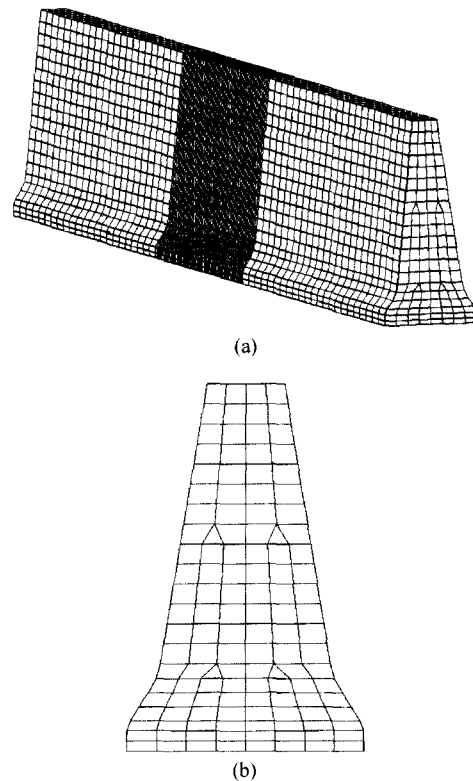


Fig. 5 An example of the concrete median barrier model

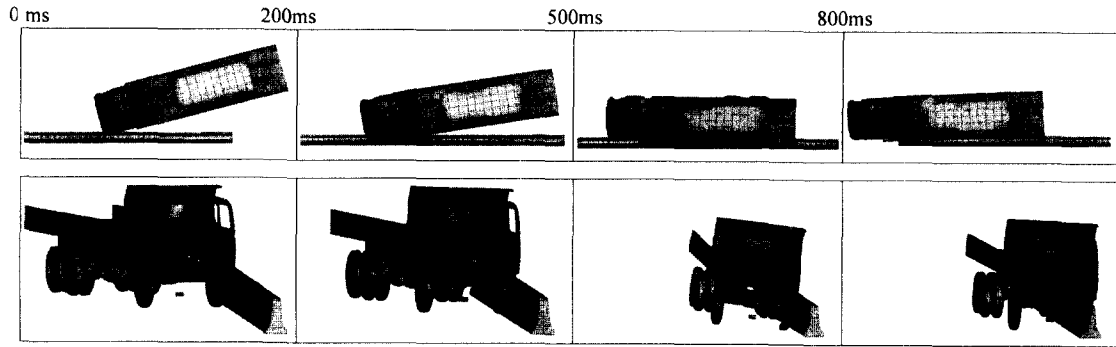


Fig. 6 Top and isotropic view of the crash simulation

4.2 기존의 중앙분리대와 대형 트럭과의 충돌 모의해석

충돌 해석의 타당성과 현재 설치된 콘크리트 중앙분리대의 충돌 성능을 검증하기 위해 기존의 콘크리트 중앙분리대를 모델링하여 충돌 모의해석을 수행하였다. 차량 충돌 모의해석은 충돌 실험규정, 즉 충돌각도 15°, 충돌속도 60km/h의 조건에서 수행하였다. 대형 트럭의 충돌 모의해석에서는 최대 1.45×10^{-5} s의 time step을 사용하였고, 1ms 단위로 결과를 얻었다. 대형 트럭의 거동을 알기 위해서 엔진, 대형트럭의 중심(center of gravity, COG) 등의 절점을 선택하여 절점시간 이력(nodal time history)을 관찰하였다. Fig. 6에 대형 트럭의 초기 상태에서부터 중앙분리대와 충돌 순간, 충돌 후 변형 형상 및 거동을 나타내었다. 모의 충돌해석 결과로 에너지 선도와 대형 트럭의 속도 및 가속도 선도는 Fig. 7, 8 그리고 9에 나타내었다.

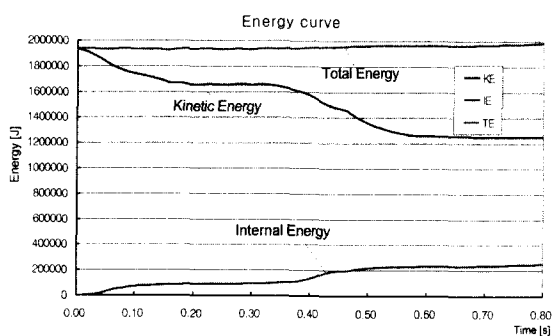


Fig. 7 Energy curve of the crash simulation

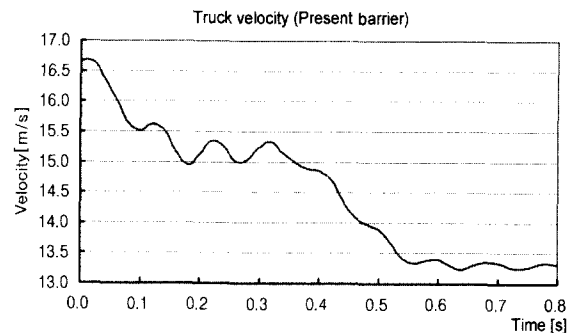


Fig. 8 Velocity curve of the heavy truck

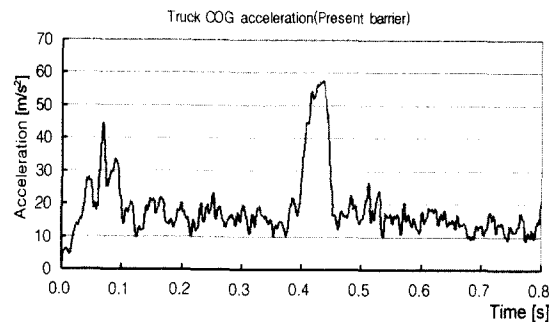


Fig. 9 Acceleration curve of the heavy truck at the center of gravity

에너지 선도에서 전에너지(total energy) 선도는 거의 일정하다. 운동에너지 감소량이 내부 에너지 증가량 보다 많은 것은 대형 트럭과 지면과의 마찰을 고려하기 위해 마찰계수 0.87을 적용¹¹⁾ 하였기 때문이다. 속도는 초기 충돌이후 약 20% 감소함을 알 수 있었고, 가속도는 충돌 초기에 44.63m/s^2 가 나와 4G 이상의 가속도가 발생하여

설계규정을 벗어남을 알 수 있었다. 뒷타이어 부분이 중앙분리대와 충돌하는 400ms 이후 부근에서 최대 가속도가 발생하였는데, 이것은 경사충돌시 트럭에 변형이 일어나지 않을 것이라 판단되는 부분을 강체로 구속하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 실험계획법을 실시할 때는 초기 충돌 때 나타나는 가속도를 최대 가속도로 하여 수행하였다.

4.3 중앙분리대의 설계인자 선정

중앙분리대의 설계인자는 중앙분리대의 형상이 대칭형이기 때문에 한쪽 면의 형상이 결정이 되면 중앙분리대의 전체 형상이 결정이 된다. 따라서 Fig. 10과 같이 중앙분리대의 형상을 결정지을 수 있는 8개를 설계인자로 선정하였다. 여기서 R_1 , R_2 는 필렛(fillet)부의 반경을 나타낸다.

설계변수에 대한 수준값 선정은 미국의 TTI(Texas Transportation Institute)에서 86년 실시한 차종별 충돌시험⁵⁾을 기초로 차량의 전도 방지에 필요한 높이를 산정하였고, 나머지 설계변수들은 각국에서 사용되고 있는 중앙분리대의 제원을 근거로 중앙분리대의 상·하 폭과 형상을 결정짓는 각도들을 결정하였다.

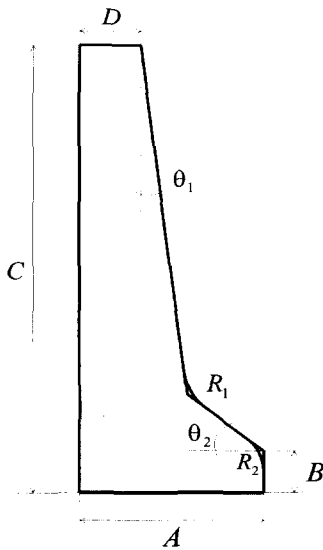


Fig. 10 Design variables of the concrete median barrier

4.4 실험계획법을 이용한 중앙분리대 최적 성능 설계

본 연구에서는 8개의 설계인자를 최소한의 실험횟수로 최대한의 인자를 배치할 수 있는 L_{18} 직교배열표를 이용하여 주효과를 검출하였다. L_{18} 직교배열표에 각 설계인자들을 배치하기 위해 중앙분리대 형상을 결정하는 변수 중 영향도가 작다고 판단되는 R_1 을 2수준으로, 나머지는 각각 3수준으로 하였다. Table 3에 실험계획법을 사용하기 위한 설계인자와 수준을 나타내었다.

본 연구에서는 직교배열표를 통해 실시한 각각의 충돌 모의해석을 통해 얻은 트럭의 중심에서의 최대 가속도, 중앙분리대의 최대 von Mises 응력과 중앙분리대의 체적을 모두 고려한 최적 조합을 찾고자 하였다. 그러나 실험계획법에는 이 독립적인 값들을 모두 고려할 수 있는 방법이 없다. 따라서, 이 값들을 모두 고려하여 분산분석을 할 수 있는 특성치를 구하는 방법으로 망소특성 계산식⁸⁾을 참조하여 식(1)을 제안하였다.

$$SN \text{ ratio} = -10 \log(a \times \|\max. VM \text{ stress}\|^2 + b \times \|\max. Vol.\|^2 + c \times \|\max. COG \text{ Accl.}\|^2) \quad (1)$$

여기서, 각 값들은 전체 실험을 통해서 얻은 결과 중 최대값으로 표준화(normalization)하였다. 식(1)의 가중치(weight factor)는 중앙분리대의 방호 성능을 고려하여 결정하였다. 대형 트럭의 충돌시 탑승자가 받는 가속도 값이 작아야 하므로 가

Table 3 Design factors and levels used in this experiment

Design factor	Level	Level value		
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 4 Orthogonal array table of $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

No. of exp.	R2	A	B	C	D	θ_1	θ_2	R1
1	100	305	85	1270	100	7	65	290
2	100	305	80	1140	85	6	55	280
3	100	305	75	1000	75	5	45	270
4	100	295	85	1270	85	6	45	270
5	100	295	80	1140	75	5	65	290
6	100	295	75	1000	100	7	55	280
7	100	285	85	1140	100	5	55	270
8	100	285	80	1000	85	7	45	290
9	100	285	75	1270	75	6	65	280
10	90	305	85	1000	75	6	55	290
11	90	305	80	1270	100	5	45	280
12	90	305	75	1140	85	7	65	270
13	90	295	85	1140	75	7	45	280
14	90	295	80	1000	100	6	65	270
15	90	295	75	1270	85	5	55	290
16	90	285	85	1000	85	5	65	280
17	90	285	80	1270	75	7	55	270
18	90	285	75	1140	100	6	45	290

속도의 영향이 가장 중요하고, 최대 von Mises 응력과 체적의 영향도는 서로 동등하다고 판단되어 $a=0.3$, $b=0.3$, 그리고 $c=0.4$ 로 결정하였다. Table 4는 실험계획법을 사용하기 위한 L_{18} 직교배열표를 나타낸다. Table 5는 각 인자들에 대한 최대치와 식(1)에 의해 계산된 특성치를 나타낸다. 이 결과를 가지고 분산분석을 하여 Table 6에 나타내었고 Fig. 11에는 각 인자들에 대한 영향도 선도를 나타내었다.

Table 6의 분산분석표에서 C, θ_2 만이 $\alpha=0.10$ 에서 유의하다. 인자의 수준별 통계를 참조하여 보면 특성치가 큰 값이 최적이므로 이들 인자들의 최적조합은 $R_{22}A_3B_2C_2D_1\theta_{12}\theta_{23}R_{12}$ 이다.

이 조합을 가지고 추정치를 계산해보면 2.86 (± 0.41)인 반면에 모의해석 결과는 2.09가 나왔다. 이와 같은 결과는 실제인자간의 상호 교호작용에 의한 것으로 판단된다. 따라서 L_{18} 직교배열

Table 5 Maximum and characteristic values of the orthogonal array table of L_{18}

No. of exp.	Max. von Mises stress [MPa]	Max. COG acceleration [m/s^2]	Max. volume [m^3]	SN ratio
1	2.7756	41.3594	0.4718	1.309
2	4.5144	38.0878	0.3588	2.230
3	8.2580	35.9984	0.2854	1.523
4	3.7269	39.8947	0.4090	1.816
5	5.9008	41.3548	0.3474	1.509
6	7.0174	39.7122	0.3096	1.526
7	3.8773	38.5016	0.3510	2.414
8	5.3994	40.2365	0.3162	2.002
9	3.8434	38.2979	0.3920	2.114
10	7.6112	39.3779	0.3080	1.339
11	3.9157	34.2715	0.4238	2.275
12	4.9363	41.4656	0.3894	1.495
13	4.5673	36.2513	0.3560	2.458
14	5.5503	41.6231	0.3470	1.591
15	4.3538	36.0825	0.3914	2.245
16	7.8787	42.8519	0.3154	0.851
17	3.6485	38.0425	0.4056	2.075
18	4.4532	38.4640	0.2994	2.646
maximum	8.2580	42.8519	0.4718	

Table 6 ANOVA table (L_{18})

Factor	S	f	V	F
R2	0.016	1	0.016	
A	0.312	2	0.156	1.82
B	0.229	2	0.115	
C	1.402	2	0.701	8.15
D	0.110	2	0.055	
θ_1	0.090	2	0.045	
θ_2	1.355	2	0.678	7.88
R1	0.027	2	0.014	
e	0.479	2	0.239	
(e)	(0.951)	(11)	(0.086)	
T	4.115	17		

열표를 이용하여 실험한 결과 유의하지 않은 인자 R1과 R2를 제거하고, 교호작용이 있다고 판단

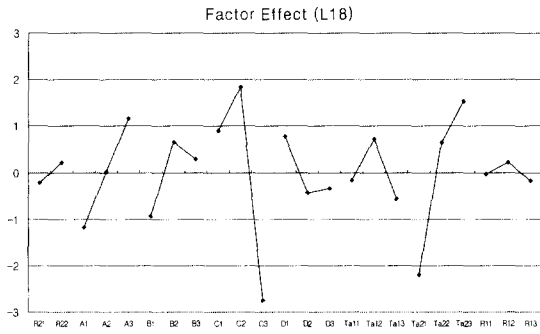


Fig. 11 Graph of factor effect (L18)

되는 $B \times C$, $B \times \theta_1$, $C \times \theta_1$ 을 L_{27} 직교배열표에 배치시켰다.⁹⁾ Table 7은 L_{27} 직교배열표에 L_{18} 직

교배열표에서 유의하다고 판단되는 인자와 교호작용을 배열시킨 것을 보여주며, Table 5와 동일한 방법으로 각 인자들에 대한 최대치와 식(1)에 의해 계산된 특성치를 구하였다. 그 결과를 가지고 분산분석 하여 Table 8에 나타내었고, Fig. 12에는 각 인자들에 대한 영향도 선도를 나타내었다.

L_{27} 직교배열표에 대한 분산분석표에서 C 와 θ_2 만이 $\alpha = 0.10$ 에서 유의하다. 그러나 F 값이 1.5 이상인 경우에는 약간의 유의성이 있다고 보기로 한다면 B , C , θ_2 와 교호작용 $B \times C$, $C \times \theta_1$ 이 유의하다고 볼 수 있다. 인자들의 통계를 참조하

Table 7 Orthogonal array table of $L_{27}(3^{13})$

No. of exp.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	B	C	$B \times C$	$B \times C$	θ_1	$B \times \theta_1$	$B \times \theta_1$	$C \times \theta_1$	A	D	$C \times \theta_1$	θ_2	e
1	85	1270	1	1	7	1	1	1	305	100	1	65	1
2	85	1270	1	1	6	2	2	2	295	85	2	55	2
3	85	1270	1	1	5	3	3	3	285	75	3	45	3
4	85	1140	2	2	7	1	1	2	295	85	3	45	3
5	85	1140	2	2	6	2	2	3	285	75	1	65	1
6	85	1140	2	2	5	3	3	1	305	100	2	55	2
7	85	1000	3	3	7	1	1	3	285	75	2	55	2
8	85	1000	3	3	6	2	2	1	305	100	3	45	3
9	85	1000	3	3	5	3	3	2	295	85	1	65	1
10	80	1270	2	3	7	2	3	1	295	75	1	55	3
11	80	1270	2	3	6	3	1	2	285	100	2	45	1
12	80	1270	2	3	5	1	2	3	305	85	3	65	2
13	80	1140	3	1	7	2	3	2	285	100	3	65	2
14	80	1140	3	1	6	3	1	3	305	85	1	55	3
15	80	1140	3	1	5	1	2	1	295	75	2	45	1
16	80	1000	1	2	7	2	3	3	305	85	2	45	1
17	80	1000	1	2	6	3	1	1	295	75	3	65	2
18	80	1000	1	2	5	1	2	2	285	100	1	55	3
19	75	1270	3	2	7	3	2	1	285	85	1	45	2
20	75	1270	3	2	6	1	3	2	305	75	2	65	3
21	75	1270	3	2	5	2	1	3	295	100	3	55	1
22	75	1140	1	3	7	3	2	2	305	75	3	55	1
23	75	1140	1	3	6	1	3	3	295	100	1	45	2
24	75	1140	1	3	5	2	1	1	285	85	2	65	3
25	75	1000	2	1	7	3	2	3	295	100	2	65	3
26	75	1000	2	1	6	1	3	1	285	85	3	55	1
27	75	1000	2	1	5	2	1	2	305	75	1	45	2

Table 8 ANOVA table (L₂₇)

Factor	f	S	V	F
B	2	0.397	0.198	1.564
C	2	1.663	0.832	6.554
θ_1	2	0.294	0.147	
A	2	0.144	0.072	
D	2	0.140	0.070	
θ_2	2	0.678	0.339	2.672
B×C	4	0.872	0.218	1.718
B× θ_1	4	0.549	0.137	
C× θ_1	4	0.762	0.190	1.501
e	2	0.142	0.071	
(e)	(10)	(1.269)	(0.127)	
T	26	5.640		

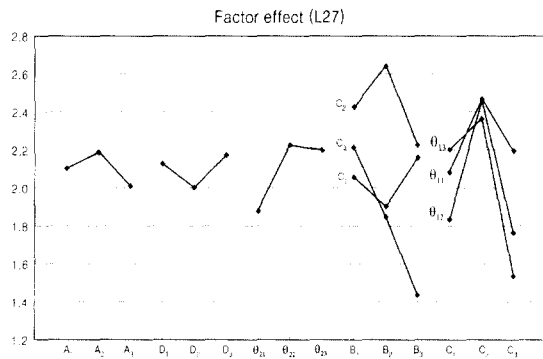


Fig. 12 Graph of factor effect (L₂₇)

여 보면 특성치가 큰 값이 최적이므로 이들 인자들의 최적조합은 A₂B₂C₂D₃ θ_{11} θ_{22} 가 된다.

4.5 최적조합에 대한 콘크리트 중앙 분리대와 대형 트럭과의 충돌 모의해석

실험계획법에 의해 결정된 최적조합에 대한 중앙분리대와 기존의 중앙분리대의 충돌 성능을 비교하기 위하여 충돌 모의해석을 수행하였다. 모의 충돌해석 결과 구해진 대형 트럭의 가속도 선도는 기존의 중앙분리대와의 충돌 모의해석 결과와 유사한 경향을 보였으며, 최대 가속도는 38.74 m/s²이 얻어졌다.

L₂₇ 직교배열표에서 특성치에 대한 추정치는

3.14(±0.42)이며 충돌 모의해석 결과 특징치는 2.80이 얻어졌다. 이는 오차 범위에 들어감으로 실험계획법에 대한 분석이 타당함을 알 수 있었다. 이에 해당하는 최대 가속도는 38.74m/s², 중앙 분리대에 발생하는 최대 von Mises 응력은 4.41 MPa, 체적은 5.743m³이었다. 위의 결과를 서로 비교하기 위해 각 결과값들을 Table 9에 나타내었다.

Table 9 Comparisons of von Mises stress, volume and acceleration of COG

Orthogonal array table of L ₂₇	Von Mises stress [MPa]	Volume [m ³]	Acceleration [m/s ²]	SN ratio
Maximum value	9.89	7.55	43.44	2.76
Minimum value	3.00	4.57	36.21	1.15
Optimal combination	4.41	5.74	38.74	2.80

Table 9로부터 최적조합을 찾기 위해 서로 독립적인 von Mises 응력, 체적, 가속도를 모두 고려할 수 있도록 제안한 식(1)에 의해 나온 결과가 타당함을 알 수 있다. 특성치를 보면 최적조합에서 가장 좋은 값을 얻을 수 있었으며, 가중치를 고려하여 나온 각각의 결과가 실험에 의한 최대·최소값 사이에 있다. 특히 대형 트럭의 COG에서의 가속도는 기존의 중앙분리대에서 4G 이상의 값이 나와 규정을 만족시키지 못했던 반면, 최적조합에서의 결과는 4G 이하로 규정을 만족시켰다.

5. 결론

본 연구에서는 실험계획법과 차량충돌 모의 해석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 콘크리트 중앙분리대의 최적 성능 설계에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험계획법을 사용하는데 서로 독립적인 von Mises 응력, 체적, 트럭의 COG에 대한 가속

도를 모두 고려할 수 있도록 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$SN \text{ ratio} = -10 \log(a \times \|\text{max. VM stress}\|^2 + b \times \|\text{max. Vol.}\|^2 + c \times \|\text{max. COG Accl.}\|^2)$$

2) 실험계획법과 차량충돌 모의해석 결과를 바탕으로 분산분석 한 결과 제안한 식의 타당성을 검증하였다.

3) 콘크리트 중앙분리대의 설계인자들에 대한 최적조합은 다음과 같다.

설계인자	R ₂₂	A ₂	B ₂	C ₂	D ₃	θ ₁₁	θ ₂₂	R ₁₂
최적조합	90 mm	295 mm	80 mm	1140 mm	75 mm	7°	55°	280 mm

4) 최적조합에 대한 콘크리트 중앙분리대와 대형 트럭과의 충돌 모의해석 결과, 국내의 방호울타리의 설계규정을 만족시켰다.

후 기

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 도로안전시설 설치 및 관리지침-방호울타리 편-, 건설교통부, 1997.
- 2) Design Construction and Maintenance of Highway Safety Features and Appurtenances, National Highway Institute, 1997.
- 3) E. Haug, J. Clinckenmaillie and X. 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.
- 4) F. J. Tokarz, "Crash Simulation for Improving Highway Safety Hardware: Status and Recommendations," Lawrence Livermore National Laboratory, 1993.
- 5) T. J. Hirsch, "Longitudinal Barriers For Buses And Trucks State-Of-The-Art," Texas Transportation Institute, 1986.
- 6) A. Zaouk, N. E. Bedewi, C. D. Kan, H. Schinke, "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, 1996.
- 7) PAM-CRASH Theory Manual, 1998.
- 8) 박성현, 응용실험계획법, 영지문화사, 1998.
- 9) 품질설계를 위한 실험계획법 -품질공학강좌 4-, 한국공업표준협회, 1991.
- 10) R. Park, T. Paulay, Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1990.
- 11) 한인환, "마찰력이 수반된 자동차 충돌의 동역학적 해석," 한국자동차공학회논문집, 제 2권 제2호, pp.1-11, 1994.
- 12) A. Zaouk, N. E. Bedewi, C. D. Kan, D. Marzougui, "Development and Evaluation of a C-1500 Pick-up Truck Model for Roadside Hardware Impact Simulation," FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, 1996.