

## Sled Test용 Steel Bar Breaking System의 설계

조인용\*, 이형주\*, 이권희\*\*, 박경진\*\*\*

### Design of a Steel Bar Breaking System in a Sled Test Facility

In-Yong Cho\*, Hyung-Joo Lee\*, Kwon-Hee Lee\*\*, Gyung-Jin Park\*\*\*

**Key Words:** Crash Pulse(충돌특성곡선), Design of Experiment(실험계획법)  
Orthogonal Array(직교배열표)

#### ABSTRACT

Steel bar breaking system is a component of a sled test system for automobile crashworthiness. It is a recent idea for the sled test. In a sled test, a crash pulse is given as a input made from a real test. The steel bar breaking system is designed to generate a certain crash pulse. Orthogonal arrays from design of experiments (DOE) are employed. The factors of the array are panel thickness and the number of steel bars, and the levels are candidate values of them. A simulation is utilized for the crash analysis. A commercial system called LS/DYNA3D is adopted. A test system is designed based on the results.

#### 기호설명

- m : mass, Kg
- t : thickness, mm
- E : Young's modulus, GPa
- v : velocity, mm/msec
- a : acceleration, mm/msec<sup>2</sup>

#### 1. 서 론

자동차의 충돌시 발생하는 감속도 곡선을 재현할 수 있는 장비인 Sled Test System으로 부터 실차 충돌시 감속도 곡선을 재현할 수 있도록 Steel Bar Breaking System을 개선 하고자 한다. 일부 완성차 업체에서는 30mph이상의 속도에서 시험을 요구하고 있고 Sled의 무게를 350Kg정도로 증가할 경우 대차 및 레일의 안전도를 점검 해야한다. 이미

Steel bar Breaking System은 선진국에서 이용되어 지고 있으나 국내에서는 아직 Steel Bar의 배치에 대한 기술이 없어 선진국에서 막대한 기술료를 지불하여 도입하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 표준 감속도 곡선에 대한 Steel Bar의 적절한 배열을 통하여 표준 감속도 곡선과 유사한 감속도 곡선을 구하고자 한다.

Steel Bar Breaking System을 이용한 실차의 감속도 곡선을 얻기 위해 시뮬레이션기술을 이용하였으며 거기서 얻은 결과 자료를 분석하여 Sled Test의 특성을 밝힐 수 있다. 또한 여러 인자들을 다양하게 분리하여 Steel Bar Breaking System을 모델링 한다. 이를 통한 결과의 분석으로부터 개발기간의 단축, 경비의 절감을 통해 최적의 설계를 구현할 수 있다.

실차의 표준 감속도 곡선을 재현하기 위한 Steel Bar의 배치에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 가장 큰 영향을 미치는 Panel의 두께와 각 열을 구성하는 Steel Bar의 개수를 가장 중요한 인자로 고려하였다. 단, 초기 시뮬레이션의 결과로부터 Steel

\* 한국시뮬레이션기술(KOSTECH)

\*\* 한양대학교 최적설계신기술연구센터

\*\*\* 한양대학교 기계공학부

Bar사이의 간격은 고정하여 인자로 고려하지 않았다.

표준 감속도 곡선의 재현에 영향을 주는 인자들로부터 실험계획법을 세울 수 있으며 그 중 Steel Bar Breaking System에 대한 설계경향과 초기설계안을 도출하기 위하여 직교배열표를 이용하여 최적수준의 Steel Bar Breaking System을 구할 수 있다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 기본이론

본 연구에서는 표준 감속도 곡선 또는 실차의 감속도 곡선을 보정 대상으로 하여 시뮬레이션을 통하여 도출되는 감속도 곡선과의 오차를 최소화 하는 Steel Bar의 배열을 얻고자 한다.

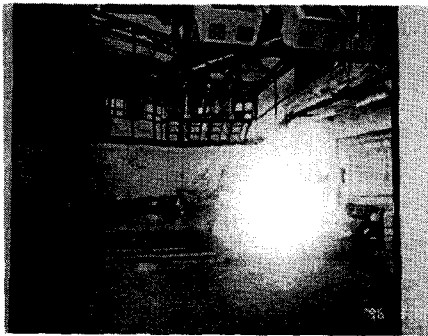


Fig. 1 Sled Test Facility

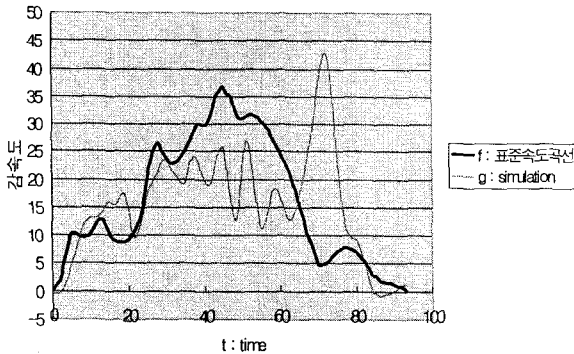


Fig. 2 Comparison of deceleration curve for real pulse and simulation pulse

표준 감속도 곡선을 보정 대상으로 하여 시뮬레이션을 통하여 도출되는 감속도 곡선과의 오차는 다음의 식(1)으로 오차 량을 계산할 수 있다.

$$F = \int_0^{t_{\max}} (g - f)^2 dt \quad (1)$$

$g$  = 시뮬레이션을 통한 감속도 곡선

$f$  = 표준감속도 곡선

$t$  = 시간

Steel Bar의 배열은 직교배열표를 이용하여  $F$ 를 최소화하는 최적의 Steel Bar의 배치를 결정한다.

### 2.2 해석조건<sup>1, 2)</sup>

- 대차무게 : 350Kg
- Steel Bar의 종류 : 9t, 12t, 16t
- 탄성계수 : 200 GPa
- 밀도 :  $7.85e^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- 대차 속도 :  $13.4 \text{ mm/msec}^2 \approx 48 \text{ km/h}$

### 2.3 직교배열표

직교배열표란 성능특성치(characteristics)에 영향을 미치는 인자의 수가 많은 경우에 큰 그물을 쳐서 주효과와 기술적으로 보아서 있을 것 같은 2인자 교호작용(interaction)을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 교호작용을 희생시켜서 실험횟수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표이다. 직교배열표는 인자(factor)와 수준(level)을 고려하게 되는데 인자는 성능특성치에 영향을 주는 요인이며 수준은 실험을 하기 위한 인자의 실험조건을 의미한다. 이 표에 의한 분석은 최소한의 실험으로 최적수준을 결정해주는 방법을 제시해 준다.<sup>3)</sup>

실험을 계획하여 배치하는 방법은 여러 가지가 있으며 가장 정확한 방법은 모든 경우를 고려하는 전조합실시법이다. 전조합실시법에서 인자 수를  $p$ , 수준 수를  $q$ 라고 할 때 실험횟수는  $q^p$ 로 나타나므로 인자수 및 수준수가 늘어날수록 실험횟수가 급속히 증가하여 경제적인 측면에서 볼 때 거의 사용 불가능한 경우가 있다. 예를 들면  $p=4, q=3$ 인 경우 모든 경우의 수를 고려하면 실험횟수는  $3^4 = 81$ 이지만 직교배열표를 이용하면 교호작용(interaction)이 없는 경우에 실험횟수를 9회로 줄일 수 있다.<sup>3-5)</sup>

본 해석에서는 4개 수준계가 이용되었으며 각

인자간에 교호작용이 없다고 가정하여 인자의 수가 4이하인 경우로서  $L_9(3^4)$  을 사용하여 배치하였다.

### 3. Steel Bar Array

#### 3.1 변수(Factor) 및 수준(Level) 선정에 따른 경우의 수

표준감속도 곡선을 보정대상으로 하여 시뮬레이션을 통하여 도출되는 감속도 곡선과의 오차를 최소로 하는 Steel Bar의 배열(Array)을 결정하기 위하여 ① Panel 두께(A) ② 1열의 Panel개수(B) ③ 2열의 Panel개수(C) ④ 3열의 Panel 개수(D)를 Steel Bar Array의 변수로 선택하였으며 Steel Bar의 단(端)의 개수를 수준으로 선택하였다.(최소수준 : 1단(端), 최고수준 : 3단(端)) 선택되어진 변수와 수준에 따른 모든 경우의 수는 다음과 같이 결정할 수 있으며 그에 따른 표는 Table 1과 같다.

Table 1 Factors and their levels of steel bar breaking system

	Factor	Level 1	Level 2	Level 3
1	Panel 두께(A)	9	12	16
2	1열의 Panel개수(B)	1	2	3
3	2열의 Panel개수(C)	1	2	3
4	3열의 Panel개수(D)	1	2	3

#### 3.2 직교배열표(Orthogonal Array)의 작성

시뮬레이션 횟수를 적게 할 수 있는 실험계획법을 간단히 짚아 줄 수 있도록 만들어 놓은 직교배열표를 이용하여 표에 따른 시뮬레이션의 경우는 다음의 Table 2와 같이 만들 수 있으며 Steel Bar의 구성 Fig. 3과 Sled Test장비의 측면은 Fig. 4와 같다.

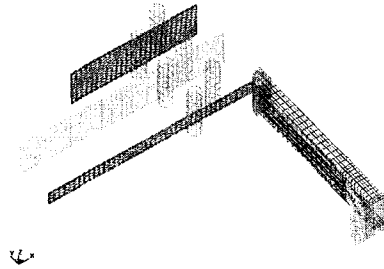


Fig. 3 Finite element model of sled test facility

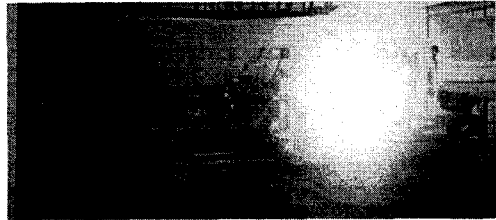


Fig. 4 The real test is utilized for the crash analysis

Table 2 Matrix experiment and observed extension moment

Exp. No	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	$\sum(g-f)^2$
1	1(9t)	1	1	1	$F_1=14700.28$
2	1(9t)	2	2	2	$F_2=12424.74$
3	1(9t)	3	3	3	$F_3=6957.21$
4	2(12t)	1	2	3	$F_4=5776.43$
5	2(12t)	2	3	1	$F_5=16614.96$
6	2(12t)	3	1	2	$F_6=24962.81$
7	3(16t)	1	3	2	$F_7=38730.45$
8	3(16t)	2	1	3	$F_8=54050.32$
9	3(16t)	3	2	1	$F_9=106611.50$

- F : 두곡선의 차를 나타내는 상대
- Factor A : Panel의 두께
- Factor B : 1열 Panel 개수
- Factor C : 2열 Panel 개수
- Factor D : 3열 Panel 개수

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1 9t 기준

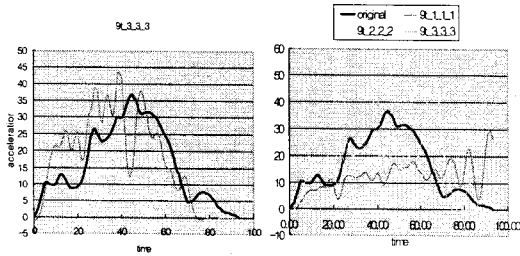
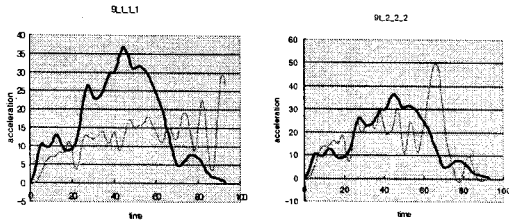


Table 3 Comparison of results based on 9t

Exp No	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	$\sum(g-f)^2$
1	1(9t)	1	1	1	$F_1 = 14700.28$
2	1(9t)	2	2	2	$F_2 = 12424.74$
3	1(9t)	3	3	3	$F_3 = 6957.21$

### 4.2 12t 기준

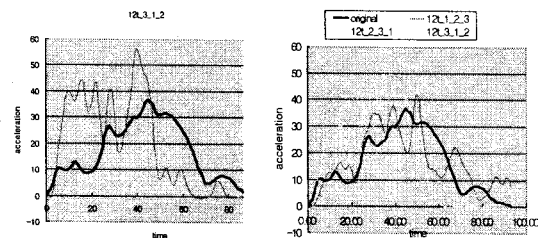
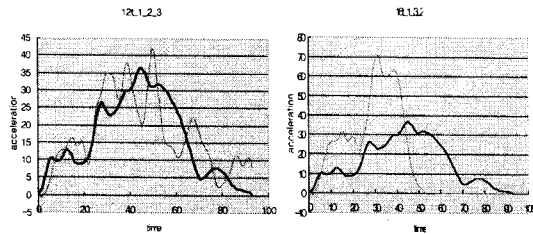


Table 4 Comparison of results based on 12t

Exp. No	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	$\sum(g-f)^2$
4	2(12t)	1	2	3	$F_4 = 5776.43$
5	2(12t)	2	3	1	$F_5 = 16614.96$
6	2(12t)	3	1	2	$F_6 = 24962.81$

### 4.3 16t 기준

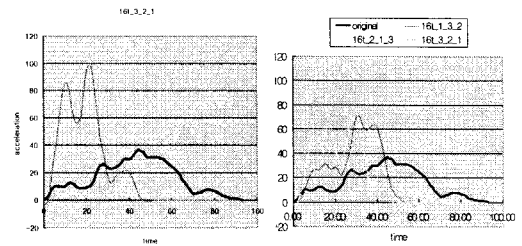
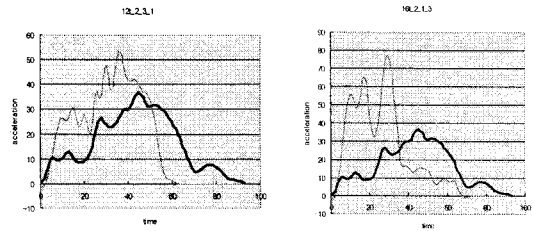


Table 5 Comparison of results based on 16t

Exp No	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	$\sum(g-f)^2$
7	3(16t)	1	3	2	$F_7 = 38730.45$
8	3(16t)	2	1	3	$F_8 = 54050.32$
9	3(16t)	3	2	1	$F_9 = 106611.50$

### 4.4 Steel Bar Breaking System의 최적설계

직교배열표상의 값을 이용하여 표준감속도곡선과 가장 유사한 Steel Bar Breaking System을 설계하기 위한 최적의 변수 선정은 Table 6과 같이 설정할 수 있다.

Table 6 Optimum values for each design levels

인자	측정치	최적 수준
두께(A)	$A_1 : F_1 + F_2 + F_3 = 34082$	$A_1$
	$A_2 : F_4 + F_5 + F_6 = 47354$	
	$A_3 : F_7 + F_8 + F_9 = 199391$	
단의 개수(B)	$B_1 : F_1 + F_4 + F_7 = 59206$	$B_1$
	$B_2 : F_2 + F_5 + F_8 = 83088$	
	$B_3 : F_3 + F_6 + F_9 = 138530$	
단의 개수(C)	$C_1 : F_1 + F_6 + F_8 = 93712$	$C_3$
	$C_2 : F_2 + F_4 + F_9 = 124811$	
	$C_3 : F_3 + F_5 + F_7 = 62301$	
단의 개수(D)	$D_1 : F_1 + F_5 + F_9 = 137925$	$D_3$
	$D_2 : F_2 + F_6 + F_7 = 76116$	
	$D_3 : F_3 + F_4 + F_8 = 66783$	

따라서 Steel Bar Breaking System을 이용하여 표준감속도 곡선을 재현하기 위한 최적의 Steel Bar의 배치는  $F=A_1B_1C_3D_3$ 로 선택할 수 있다. 이 결과로부터 구한 감속도 곡선 Fig. 6 및 테스트후의 Steel Bar Breaking System의 모양은 Fig. 5와 같다.



Fig. 5 Deformed shape of steel bar breaking system

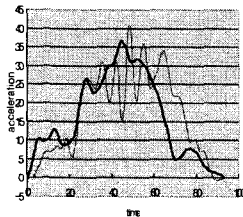


Fig. 6 Deceleration curve for optimum values

$$F = \sum(g-f)^2 = 5475$$

#### 4.5 분산 분석

각각의 인자에 대한 분산의 정도를 분석하기 위하여 인자 A, B, C, D에 대하여 분산분석을 수행하였다.

##### ① 실험별 측정치

Table 7 Simulation results with respect to design levels and their factors

실험 번호	열 번호와 인자 배치				측정치
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	14700.28
2	1	2	2	2	12424.74
3	1	3	3	3	6957.21
4	2	1	2	3	5776.43
5	2	2	3	1	16614.96
6	2	3	1	2	24962.81
7	3	1	3	2	38730.45
8	3	2	1	3	54050.23
9	3	3	2	1	106611.50

##### ② 평균분석

Table 8 Analysis of means

인자	수준			평균	최적수준
	1	2	3		
A	11360.74	15784.73	66464.09	31203.19	11360.74
B	19735.72	27696.67	46177.17	31203.19	19735.72
C	31237.80	41604.22	20767.54	31203.19	20767.54
D	45975.58	25372.67	22261.32	31203.19	22261.32

##### ③ 분산분석

Table 9 Analysis of variances

인자	제공합	자유도
A	5.624E+09	2
B	1.104E+09	2
C	6.313E+09	2
D	9.965E+09	2

Fig. 7 Graph of variances

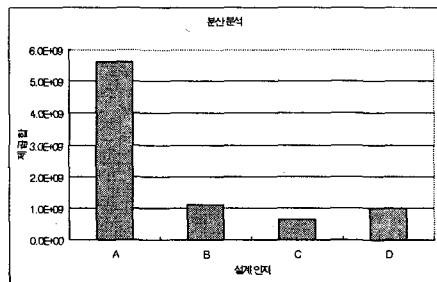


Table 7에서 얻어진 실험의 결과 값들을 오차분석과 분산분석을 통하여 분산분석 테이블을 구성하였다. 이렇게 구해진 결과 값을 통하여 목적함

수의 최적 값은 교호작용의 영향을 크게 받고 있지 않음을 알 수 있다.<sup>4),7)</sup>

## 5. 결론

1. Steel Bar Breaking System을 설계하기 위해 직교배열표를 이용한 설계를 수행하고, 분산 분석을 통해 얻어지는 최적 결과값과 교호작용의 정도를 측정하였다.

Table 10 Optimum values for crash pulse of a steel bar breaking system in a sled test facility

Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	$\sum(g-f)^2$
9t	1	3	3	F=5475

2. 시뮬레이션을 이용하여 도출한 감속도 곡선을 재현하기 위해 직교배열표(Orthogonal Array Table)를 사용한 결과는 표준감속도곡선과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 시뮬레이션을 통해 재현된 감속도 곡선으로부터 Steel Bar Breaking System을 설계할 수 있는 기하학적 형상은 Steel Bar를 9mm로 정하며 1열은 1단 2열과 3열은 각각 3단으로 한다.

위 결과에서 알 수 있듯이 오차를 최소화할 수 있는 최적의 해를 얻었다.

## 후기

본 연구는 주식회사 삼성의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) LS-DYNA3D Keyword User's Manual, 2000, Livermore Software Technology Corporation
- 2) LS-DYNA3D Theoretical Manual, 2000, Livermore Software Technology Corporation
- 3) Douglas C. Montgomery, 1991 "Design and Analysis of Experiments Third Edition", JOHN WILEY & SONS, New Yorks
- 4) 홍을표, 신문균, 박경진, 2000 "승객 상해를 최소화하는 충돌특성곡선의 결정 및 반응표면법을 이용한 충돌 부품의 최적설계", 자동차공학 회논문집, volume 9, p116-129
- 5) VisualDOC User Manual, 2001. Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, Co,
- 6) DOT User Manual, 2001. Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, Co,
- 7) 자동차 안전기준 시행 세칙, 1993. 건설교통부