

전기자동차의 유럽 OFFSET 충돌 특성 기초 연구

A Basic Study of the European Offset Characteristics of Electric Vehicle

조 용 범*, 신 효 철**
Yong Bum Cho, Hyo-Chol Sin

ABSTRACT

European offset impact analysis of an electric vehicle was done using the robust design method. Section properties of some of the vehicle structure components which influence the european offset impact characteristics were chosen as the main factors for the design. Eight factors were considered for the analysis: one with two level and seven with three level combinations comprising the $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array. It is shown that the sensitivities of the factors and the best combination of the factors can be obtained. One of the noteworthy results is that the design with the lower stiffness of the front components of engine room than the rear components can absorb more crash energy. Also it is shown that there exist interactions between some of factors considered.

주요기술용어 : Design of experiments(실험계획법), Response table(반응표), Internal energy(내부에너지), Electric vehicle(전기자동차), Analysis of variance(분산분석)

1. 서 론

전기자동차 개발시 충돌 성능에 대한 기본적인 검토로 가장 악조건에 해당하는 유럽 offset 충돌에 대한 기본적인 설계 방향을 찾을 수 있는 기초적인 특성 연구를 하고자 한다. 연구 방법으로 전기자동차의 주요 구조물의 강성 변화에 따른 충돌 특성의 변화를 연구하여 최적설계를 할 수 있는 기초를 마련하고자 한다.

전기자동차를 구성하는 요소들이 많고 충돌 성능에 관련된 부재와 강성의 조합수가 매우 많으므로 최소의 조합으로 최대의 효과를 얻을 수 있도록 실험계획법(Design of Experiments)을 이

용한다.¹⁻³⁾ 실험계획법에 사용할 인자는 유럽 offset base model을 해석하여 내부에너지가 높은 자동차의 엔진룸의 구조물을 중심으로 선택한다. 선택된 인자들의 강성 변화에 따른 충돌 특성의 변화를 상해치⁴⁾로 판명해야 하나 offset 해석 모델이 객실 내부의 구조가 설계되어 있지 않아 차량의 충돌 에너지 흡수 관점으로 평가하고자 한다.

2. 해석 내용

2.1 실험계획법의 인자 선정 및 목표값 설정

본 연구에서는 유럽 Offset 모델에 대한 기초해석을 실시, 그 결과를 분석하여 내부에너지가 높은 차량 앞부분의 부재와 차량 앞부분과 객실부

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

Table 1 Control factors

Factor	
A	Roof rail
B	Bumper assembly
C	Circular longitudinal member
D	Rectangular longitudinal member
E	Sub longitudinal member front
F	Sub longitudinal member rear
G	Sub cross member
H	Front cross member

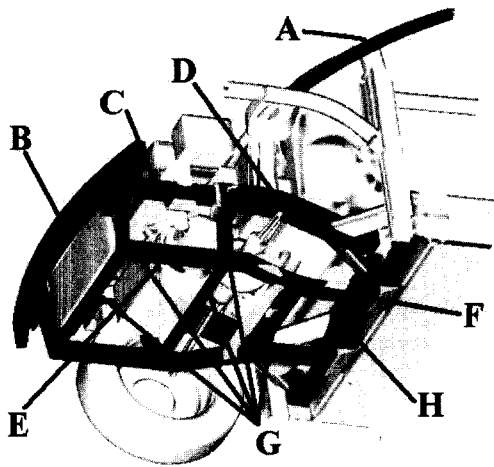


Fig. 1 View of selected factors

를 연결하는 부재를 인자로 선정하였다. 이 인자들을 정리하면 Table 1과 같다.

충돌 특성을 평가하는 목표값은 다음과 같이 선정된 인자의 내부에너지 총량(η_1), 단위무게 당 에너지(η_2)와 offset 성능을 평가하는 지표⁶⁾의 일부인 운전석 dash board 하단 중앙의 변형량(η_3)으로 정한다.

$$\eta_1 = PSE_i + PE_b + PE_{ac} \quad (1)$$

$$\eta_2 = 10\{\text{LOG}[(E_i/M_i)^2/8] + \text{LOG}(E_b/M_b)^2 + \text{LOG}(E_{ac})^2\} \quad (2)$$

$$\eta_3 = -10\text{LOG}(D_{\max})^2 \quad (3)$$

PSE_i = 선정된 인자들의 내부에너지 합 의 평균 값에 대한 퍼센트(%)

PE_b = barrier의 내부에너지 평균값에 대한 퍼센트(%)

PE_{ac} = E_{ac} 의 평균값에 대한 퍼센트(%)

SE_i = 선정된 8인자들의 내부에너지 합(J)

E_i = 선정된 8인자들의 내부에너지(J)

M_i = 선정된 8인자들의 무게(J)

E_b = barrier의 내부에너지(J)

M_b = barrier의 무게(kg)

A_b = b-pillar 하단의 가속도-변형(G-S) 선도의 최대변형량 발생시간까지의 평균 가속도(G)

D_b = b-pillar 하단의 가속도-변형(G-S) 선도의 최대변형량(mm)

$E_{ac} = A_b \times D_b(m^2/s^2)$

D_{\max} = 더미의 발이 놓여지는 위치의 dash board 최대 동적 변형량(mm)

2.2 인자의 수준 선정 및 배열표

위의 절에서 선정된 8개 인자의 수준(Level)을 정할 때 주어진 최소의 해석으로 만족한 결과를 얻을 수 있도록 일부실시법을 이용하였다. 인자들 간의 상호작용이 실제로는 존재할 수 있지만 본 연구에서는 상호작용이 없는 것을 가정한다. 상호작용이 없다고 가정하여 인자 중 하나는 수

Table 2 Level of factors

Factor	Level			Base model
	1	2	3	
A	2mm	4mm		2mm
B	2mm	2.5mm	3mm	3mm
C	2mm	3mm	4mm	3mm
D	1.9mm	3mm	4.2mm	3.5mm
E	1.3mm	2mm	2.8mm	2mm
F	1.6mm	2.5mm	3.5mm	2.5mm
G	1mm	2mm	3mm	2mm
H	1.5mm	2.5mm	3.5mm	2.5mm

준 2로 나머지 인자는 수준 3으로 정하여 직교배열표 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 이용한다.³⁾

각 인자들의 수준은 강성으로 하고, 강성은 면적 관성모멘트로 정한다. 본 전기자동차의 부재는 알루미늄 압출재이며, 면적 관성모멘트는 변형이 발생하는 주축에 대한 값이다. A인자의 강성은 수준 1의 면적 관성모멘트를 1로 볼 때 수준 2는 2이다. B인자의 수준은 면적 관성모멘트의 비가 각각 1, 1.25, 1.5이고, G인자는 1, 2, 3이고, H인자는 1, 1.67, 2.3이다. 나머지 인자들은 수준 1, 2, 3의 면적 관성모멘트 비가 각각 1, 1.5, 2이다. Table 2는 각 인자의 수준에 대한 면적 관성모멘트 비율에 해당하는 부재의 두께이다.

2.3 해석 모델

본 연구에 이용한 전기자동차의 해석 모델은 Fig. 2와 같다.

Table 2의 인자별 수준 내용을 이용하여 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표로 18개의 해석모델을 구성하여 정리하면 Table 3과 같다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 해석결과

2절에서 정한 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 직교배열표를 이용하여 Table 3의 해석 조합으로 해석한 결과를 2.1절에서 정한 목표값으로 정리하면 Table 4, 5와 같다. Table 4는 선정된 8인자의 내부에너지 합(SE_i), barrier 내부에너지(E_b), B-pillar 좌측 하단의 평균가속도(A_b), B-pillar 좌측 하단에서 구한

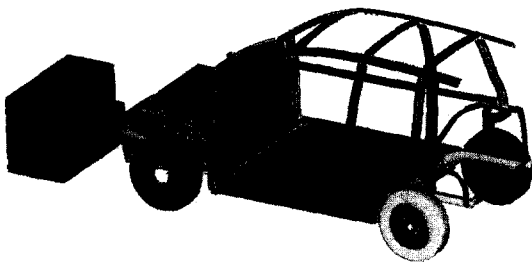


Fig. 2 Oblique view of european offset model

Table 3 Thickness list of $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array (unit : mm)

Exp. no.	Factor							
	A	B	C	D	E	F	G	H
case1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.3	1.6	1.0	1.5
case2	2.0	2.0	3.0	3.0	2.0	2.5	2.0	2.5
case3	2.0	2.0	4.0	4.2	2.8	3.5	3.0	3.5
case4	2.0	2.5	2.0	1.9	2.0	2.5	3.0	3.5
case5	2.0	2.5	3.0	3.0	2.8	3.5	1.0	1.5
case6	2.0	2.5	4.0	4.2	1.3	1.6	2.0	2.5
case7	2.0	3.0	2.0	3.0	1.3	3.5	2.0	3.5
case8	2.0	3.0	3.0	4.2	2.0	1.6	3.0	1.5
case9	2.0	3.0	4.0	1.9	2.8	2.5	1.0	2.5
case10	4.0	2.0	2.0	4.2	2.8	2.5	2.0	1.5
case11	4.0	2.0	3.0	1.9	1.3	3.5	3.0	2.5
case12	4.0	2.0	4.0	3.0	2.0	1.6	1.0	3.5
case13	4.0	2.5	2.0	3.0	2.8	1.6	3.0	2.5
case14	4.0	2.5	3.0	4.2	1.3	2.5	1.0	3.5
case15	4.0	2.5	4.0	1.9	2.0	3.5	2.0	1.5
case16	4.0	3.0	2.0	4.2	2.0	3.5	1.0	2.5
case17	4.0	3.0	3.0	1.9	2.8	1.6	2.0	3.5
case18	4.0	3.0	4.0	3.0	1.3	2.5	3.0	1.5

가속도의 가속도-변위 곡선(G-S선도)상의 최대 변형량(D_b)을 나타내며, Table 5는 B-pillar 평균 가속도와 G-S선도의 최대 변형량의 곱(E_{ac}), dash board의 최대 동적 변형량(D_{max}) 및 roof rail(A인자)을 제외한 인자들의 무게(M_8)를 정리한 것이다. barrier의 무게 M_b 는 9.57kg이다.

3.2 목표값 반응표 계산

Table 4, 5의 결과를 이용하여 2.1절에서 정한 목표값에 대한 반응표를 구한다. 반응표는 각 인자의 수준별 평균값을 구하여 수준변화에 따른 결과 변화양상을 보는 것이다.

각 인자(X)의 수준수는 l 이고, 각 수준마다 k 개

Table 4 Analysis results(part 1/2)

Exp. no.	SE _i	E _b	A _b	D _b
Base	39,808	73,963	13.85	884
case1	40,837	69,000	12.75	1,045
case2	38,128	72,733	13.10	946
case3	42,587	72,343	15.27	846
case4	41,687	66,101	12.90	1,005
case5	43,043	68,062	13.87	955
case6	44,987	72,548	13.53	930
case7	46,710	66,105	13.69	1,000
case8	49,841	61,700	14.03	900
case9	44,336	58,206	13.22	915
case10	39,372	75,599	13.86	958
case11	41,621	72,142	13.0	980
case12	40,206	68,156	14.1	913
case13	42,470	70,881	13.39	970
case14	44,393	76,552	14.63	930
case15	44,858	66,514	11.89	1,061
case16	37,664	79,655	13.65	875
case17	44,736	62,727	13.0	990
7case18	45,342	60,739	13.23	895

Table 5 Analysis results(part 2/2)

Experiment no.	Eac	Dmax	M8
Base	120.10	21	20.5
case1	130.67	154	12.64
case2	121.54	87.5	18.78
case3	126.74	35.5	29.85
case4	127.13	112.9	21.03
case5	129.98	102.8	17.38
case6	123.40	103.3	20.50
case7	134.30	109	22.10
case8	123.9	70.67	20.18
case9	118.7	125.35	19.0

(Table 5 continued)

Experiment no.	Eac	Dmax	M8
case10	130.28	64.6	17.94
case11	124.98	89.1	18.86
case12	126.25	128.0	19.77
case13	127.43	52.8	20.10
case14	133.51	24.9	21.49
case15	123.80	150.1	17.34
case16	117.13	6.77	20.61
case17	126.25	130.3	21.18
case18	116.15	186.3	19.48

*M₈ : Mass sum of 8 factors, kg(except only A factor)

의 반복이 있고, 각 인자의 *i*수준의 데이터를 x_{ij} , 평균을 \bar{X}_i 라하고 이것은 식 (4)와 같다.

$$\bar{X}_i = \sum_{j=1}^k \sum_{k=1}^k \frac{x_{ij}}{k} \quad (4)$$

$L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표를 이용하여 식 (4)와 같이 구하며, 식 (5)는 B인자의 계산에 대한 예이다. B_1 은 B인자의 수준 1의 평균값으로 두께가 2 mm의 경우이고, B_2 는 수준 2의 평균값으로 두께가 2.5mm, B_3 는 수준 3의 두께가 3mm 경우이다.

$$B_1 = \text{B인자 수준 1의 결과의 평균값} \\ = (\text{case1} + \text{case2} + \text{case3} + \text{case10} \\ + \text{case11} + \text{case12})/6$$

$$B_2 = \text{B인자 수준 2의 결과의 평균값} \\ = (\text{case4} + \text{case5} + \text{case6} + \text{case13} \\ + \text{case14} + \text{case15})/6$$

$$B_3 = \text{B인자 수준 3의 결과의 평균값} \\ = (\text{case7} + \text{case8} + \text{case9} + \text{case16} \\ + \text{case17} + \text{case18})/6 \quad (5)$$

목표값 η_1 은 Table 3의 해석 case 별 결과를 전체 평균(T)에 대한 비율(%)로 치환하여 식 (1)로 계산하였고, η_2 는 해석 case별 결과를 상용로그 값으로 치환하여 식 (2)로, η_3 는 상용로그값으로

Table 6 Analysis results

Experiment no.	η_1	η_2	η_3
Base	295.58	191.34	-26.44
case1	299.30	192.05	-43.75
case2	291.14	187.64	-38.84
case3	305.06	188.13	-31.00
case4	294.27	190.84	-41.05
case5	302.47	186.90	-40.24
case6	308.33	189.15	-40.28
case7	311.63	194.67	-40.75
case8	304.23	191.44	-36.98
case9	282.20	187.22	-41.96
case10	305.11	192.90	-36.20
case11	301.13	190.80	-38.99
case12	293.09	188.26	-42.14
case13	303.21	192.25	-34.45
case14	320.75	193.89	-27.92
case15	299.52	187.79	-43.52
case16	296.61	195.27	-16.61
case17	295.73	190.24	-42.30
case18	286.22	186.85	-45.40

Table 7 Response table of η_1

Factor	Average η_1 by level		
	1	2	3
A	299.85	300.15	
B	299.14	304.76	296.10
C	301.69	302.57	295.74
D	295.36	297.96	306.68
E	304.56	296.48	298.96
F	300.65	296.61	302.74
G	299.07	301.91	299.02
H	299.48	297.10	303.42

치환하여 식 (3)으로 계산하였고, 이를 정리하면

Table 8 Response table of η_2

Factor	Average η_2 by level		
	1	2	3
A	189.78	190.92	
B	189.96	190.14	190.95
C	193.00	190.15	187.90
D	189.82	189.43	191.80
E	191.23	190.21	189.61
F	190.56	189.89	190.59
G	190.60	190.40	190.05
H	189.66	190.39	191.00

Table 6과 같이 된다.

Table 6의 결과를 이용하여 각 목표값 별로 구한 반응표를 정리하면 Table 7~9와 같다.

Table 9 Response table of η_3

Factor	Average η_3 by level		
	1	2	3
A	-39.43	-36.40	
B	-38.49	-37.91	-37.34
C	-35.47	-37.55	-40.72
D	-41.93	-40.30	-31.50
E	-39.52	-36.53	-37.69
F	-39.99	-38.56	-35.19
G	-35.44	-40.32	-37.98
H	-41.02	-35.19	-37.53

Table 7~9의 반응표를 그림으로 그리면 Fig. 3~5와 같고, 그림의 그래프 중 굵은 선은 강성의 변화에 따라 목표값의 변화가 큰 인자를 표시한 것이다. 엔진룸의 앞부분에 위치하여 충돌에너지를 흡수가 용이한 B, C, D 인자의 민감도가 높다.

3.3 분산분석(Analysis of variance)

해석 결과에서 각 목표값에 대한 인자별 반응

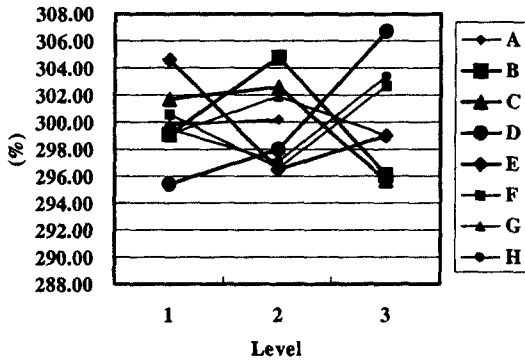


Fig. 3 Response table of η_1

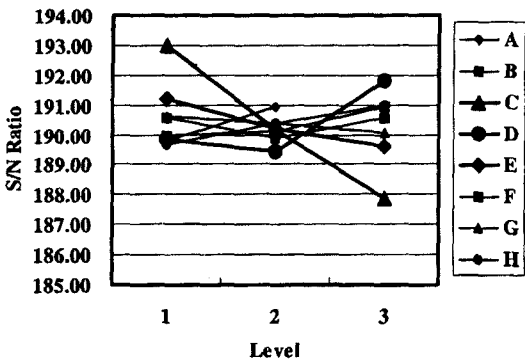


Fig. 4 Response table of η_2

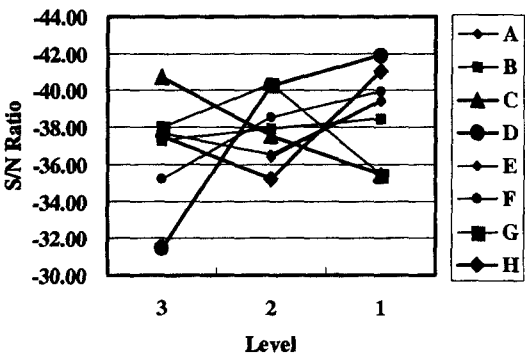


Fig. 5 Response table of η_3

표를 구하였고, 인자별 민감도를 분석하기 위해 목표값에 대하여 계산 절차³⁾에 따라 분산분석을 실시한다.

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(S_x , sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련

된 각 인자의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 것이다. 즉, 목표값의 산포를 인자별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는지 규명하는 것이다. 제곱합을 자유도(ϕ_x)로 나눈 제곱평균(V_x , mean square)을 오차분산(V_E)으로 나눈 값(F ratio)이 큰 인자가 목표값에 대한 영향도가 크다. 데이터의 총평균을 X_{tot} 라 하면 각 인자의 제곱합은 식 (6)과 같다.

$$S_x = k \sum_{i=1}^l (X_i - X_{tot})^2 \quad (6)$$

총 제곱합은 식 (7), 각 인자 자유도는 식 (8), 오차의 자유도는 식 (9), 각 인자의 제곱평균은 식 (10), 오차의 제곱평균은 식 (11) 및 F ratio는 식 (12)와 같다.

$$S_T = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k (X_{ij} - X_{tot})^2 \quad (7)$$

$$\phi_x = l - 1 \quad (8)$$

$$\phi_E = l(k - 1) \quad (9)$$

$$V_x = \frac{S_x}{\phi_x} \quad (10)$$

$$V_E = \frac{S_E}{\phi_E} = \frac{S_T - S_x}{\phi_E} \quad (11)$$

$$F_{ratio} = \frac{V_x}{V_E} \quad (12)$$

목표값에 대한 분산분석결과는 Table 10~12와 같다. η_1 , 즉 선정된 부재와 barrier의 충돌에너지 흡수량을 크게 하려면 B인자(Bumper assembly), C인자(Circular longitudinal member), D인자(Rectangular longitudinal member), E인자(Sub longitudinal member)의 강성을 적절히 조정하는 것이 효과적이다. 부재와 barrier의 단위무게 당 효율성(η_2)을 증가시키려면 A인자(A-pillar와 Roof rail), C, D, E 및 H인자(Front cross member)의 강성을 조절하는 것이 효과적이다. Dash board의 변형량(η_3)을 작게 하기 위해서는 C, D, H인자의 강성을 조절하는 것이 좋다.

Table 10 ANOVA results of η_1

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
A	1	0.42*	0.42*	0.01
B	2	231.43	115.72	2.98
C	2	165.87	82.93	2.14
D	2	422.19	211.10	5.44
E	2	205.76	102.88	2.65
F	2	116.31*	58.15*	1.49
G	2	32.90*	16.45*	0.42
H	2	122.24*	62.12*	1.57
Error	0	-	-	
Total	17	1297.12		
(Error)	(7)	(271.86)	(38.84)	

*Indicates the sum of squares added together to form the pooled error sum of squares shown in parentheses

세 가지 목표값에 동시에 민감한 인자를 검토하기 위해 각 목표값의 F ratio를 정리하면 Table 13과 같다. Table 13에서 세 목표값에 동시에 민감한 인자는 C, D, E, H인자인 것을 알 수 있다.

Table 11 ANOVA results of η_2

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
A	1	5.78	5.78	5.67
B	2	3.31*	1.65*	1.62
C	2	78.38	39.19	38.43
D	2	19.36	9.68	9.49
E	2	8.13	4.06	3.99
F	2	1.89*	0.95*	0.93
G	2	0.92*	0.46*	0.45
H	2	5.48	2.74	2.68
Error	0	-	-	
Total	17	123.25		
(Error)	(6)	(6.12)	(1.02)	

*Indicates the sum of squares added together to form the pooled error sum of squares shown in parentheses

Table 12 ANOVA results of η_3

Factor	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
A	1	41.41	41.41	1.89
B	2	4.00*	2.00*	0.09
C	2	83.91	41.95	1.91
D	2	377.84	188.92	8.60
E	2	27.27*	13.63*	0.62
F	2	72.86*	36.43*	1.66
G	2	71.43*	35.72*	1.62
H	2	103.21*	51.60*	2.35
Error	0	-	-	
Total	17	1297.12		
(Error)	(7)	(271.86)	(38.84)	

*Indicates the sum of squares added together to form the pooled error sum of squares shown in parentheses

Table 13 F ratio summary of η_1, η_2, η_3

Factor	Degree of freedom	F ratio		
		η_1	η_2	η_3
A	1	0.01	5.67	1.89
B	2	2.98	1.62	0.09
C	2	2.14	38.43	1.91
D	2	5.44	9.49	8.60
E	2	2.65	3.99	0.62
F	2	1.49	0.93	1.66
G	2	0.42	0.45	1.62
H	2	1.57	2.68	2.35

3.4 최적 조합 계산 및 검증 해석

해석 결과로부터 반응표를 구하고 분산분석을 실시하여 인자별 민감도를 분석한 결과 인자 C, D, E H가 영향도가 크고 나머지 인자의 영향은 미미하다. 최적 조합은 인자 수준별 평균값에 F ratio를 곱한 값이 최대 값이 되는 인자 수준이

다. 이와 같이 계산한 결과 민감도가 높은 인자의 최적 조합은 C1, D3, E1, H3이다.

선정 인자들은 부재의 위치에 따라 크게 3가지로 분류할 수 있는데, 엔진룸의 앞부분에 있는 부재(B, C, E, G인자), 엔진룸 뒷부분에 있는 부재(D, F인자), 엔진룸과 객실을 연결하는 부재(A, H인자)로 이루어져 있다. 인자의 최적조합을 분석한 결과 이들 세 위치의 부재간의 강성 조합은 엔진룸 앞부분의 부재(C, E인자)는 약하게, 엔진룸 뒷부분의 부재(D인자)는 강하게, 엔진과 객실이 연결되는 부분(H인자)은 강하게 하는 것이 좋다. 이런 조합은 충돌 초기에는 엔진룸 앞부분의 부재가 충분히 변형하여 충돌에너지를 흡수하고, 엔진룸 후반부의 부재는 쉽게 변형되지 않아서 barrier의 변형을 충분히 유도하여 차량의 충돌에너지를 흡수토록 강성이 크고, 객실연결부재는 승객의 생존공간을 충분히 확보할 수 있도록 강성이 커야하는 것을 의미한다.

실험계획법에 의한 최적 조합의 목표값을 예측할 때 민감도가 높지 않은 인자들을 포함할 경우 과대 평가되는 결과를 초래한다.³⁾ 최적 조합에 의한 결과 예측에는 목표값에 영향이 큰 C, D, E, H 인자만을 고려한다. 이렇게 계산한 예측 결과는 목표값 1은 316.35, 목표값 2는 194.98, 목표값 3은 -30.32이다. 앞에서 계산한 인자조합을 반영한 A2, B2, C1, D3, E1, F3, G1, H3로 실제 해석한 결과는 목표값 1은 316.85, 목표값 2는 194.87, 목표값 3은 -29.07로 예측한 값과 유사한 결과를 얻었다. 이상과 같은 결과로 선정한 인자들과 인자들의 수준이 모델의 상호작용을 고려하지 않은 상태에서도 충돌 특성을 비교적 만족할 수준으로 반영한다고 할 수 있다.

3.5 인자별 상호 작용

인자간의 상호 작용이 없는 것을 가정하여 직교 배열표를 작성하여서 해석을 수행하였다. 모든 인자간의 상호작용을 고려하여 해석을 수행할 수 없으므로 목표값에 민감도가 큰 인자들간의 상호 작용에 대하여 검토한다.

Table 14 Analysis of interaction: C, D, E, H factors

Factor	Degree of freedom	F ratio		
		η_1	η_2	η_3
C×D	4	2.27	4.76	0.56
C×E	4	0.90	1.97	3.05
C×H	4	0.48	2.04	3.13
D×E	4	1.63	3.96	0.83
D×H	4	0.81	5.05	0.32
E×H	4	4.14	6.84	2.72

Table 13의 결과로부터 목표값에 민감한 C, D, E, H인자간의 상호 작용을 계산한 결과는 Table 14와 같다. 충돌에너지 흡수 측면(η_1, η_2)에서는 C×D인자, D×E인자, D×H인자와 E×H인자간의 상호작용이 크다. η_3 의 경우는 C×E인자, C×H인자와 E×H인자의 민감도가 높다. 세 목표값에 상호작용이 비교적 큰 인자는 E×H인자와 C×D인자이다.

Fig. 6에서 목표값 η_1 의 경우, C인자의 수준이 2, 3일 때 D인자의 강성이 증가하면 충돌에너지 흡수가 증가하지만, C인자의 강성이 낮은 경우(수준1)에는 반대의 현상을 보인다. E, H인자의 η_3 의 상호작용(Fig. 7)은 E인자의 강성이 낮은 경우(수준1)는 H인자의 강성이 증가할수록 dash board의 변형량이 감소하며, E인자의 강성이 클 경우(수준3)는 H인자의 강성의 변화에 영향이

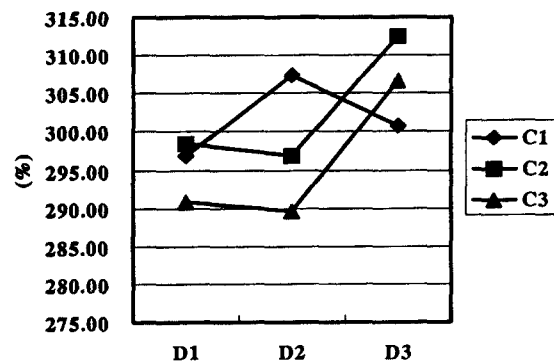


Fig. 6 Interaction of C, D factor for η_1

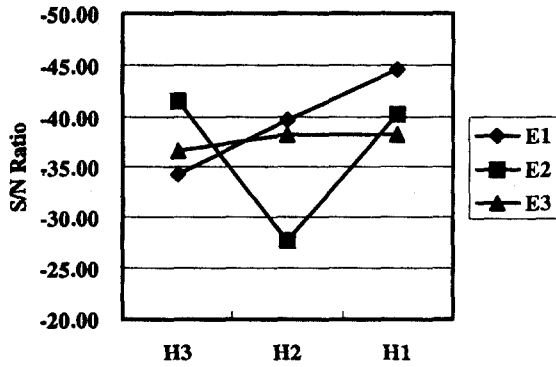


Fig. 7 Interaction of E and H factor for η_3

작으며, E인자의 강성이 중간일 경우(수준2)에는 H 인자의 강성변화에 영향을 많이 받는다.

3.6 해석결과 비교분석

Table 3과 4의 결과 중에서 가장 좋은 경우는 case 14, 나쁜 경우는 case 18로, 그 결과를 비교하여 본다. Case 14는 엔진룸 앞부분의 부재인 B, C, E인자의 강성은 약하고, 엔진룸 뒷부분과 엔진룸과 객실 연결부재인 D, F, H인자는 강성이 강하다. Case 18은 case 14와 반대의 경우이다.

Fig. 8~11은 case 14와 case 18의 엔진룸 부분의 변형모습이다. Fig. 8, 9는 case 14의 50ms, 100ms에서 변형이고, Fig. 10, 11은 case 18의 50, 100ms에서 변형모습이다. Case 18은 B, C인자의 강성이 크고 D와 H인자는 강성이 약하여 C인자는

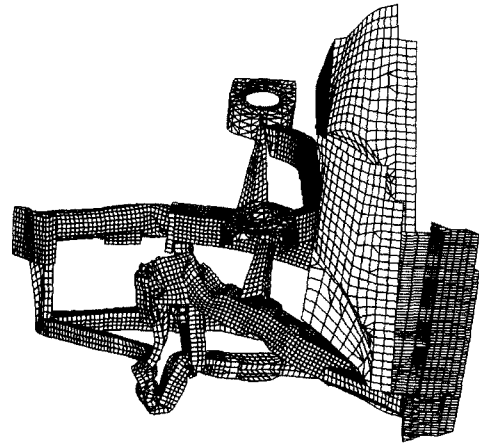


Fig. 9 Deformed shape of engine room at 100ms(case14)

변형이 작고, D인자는 변형이 크고, dash board의 변형도 역시 큰 것을 알 수 있다. Case 14는 반대로 D인자의 강성이 강하여 C인자가 변형된 후에 D인자가 변형된다.

Fig. 13의 내부에너지 그림은 SE_i 와 E_b 합을, Fig. 14는 barrier의 내부에너지(E_b)를, Fig. 15는 해석모델의 총 내부에너지를 나타낸 것이다. Case 14는 50 ms 이후에도 계속 내부에너지가 증가하면서 충돌에너지를 흡수해준다. 이것은 C인자 변형 후 D인자 변형시 D인자의 강성으로 D인자의 자체 변형이외에 barrier의 변형을 유도하여 전체적으로 충돌에너지 흡수가 계속적으로 일어나기 때문이다. Case 18은 50ms 이후에 내부

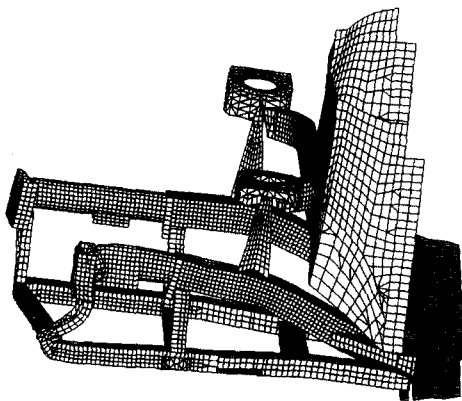


Fig. 8 Deformed shape of engine room at 50ms(case14)

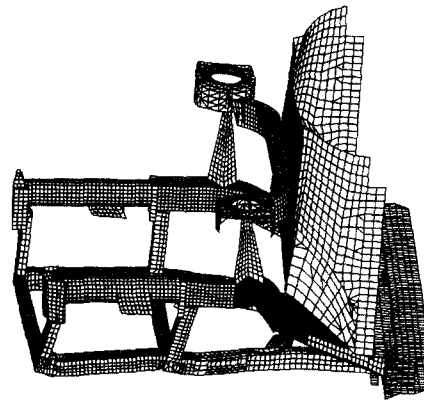


Fig. 10 Deformed shape of engine room at 50ms(case18)

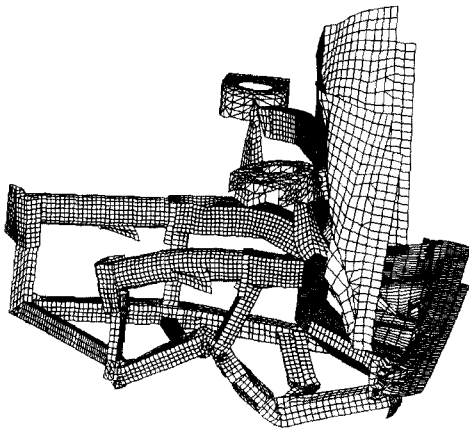


Fig. 11 Deformed shape of engine room at 100ms(case 18)

에너지 증가가 완만해지는데 C인자의 강성이 D인자보다 커서 D인자의 변형이 먼저 일어난 후 50 ms 이후에 객실부 연결부재(H인자)의 변형에 의해 barrier의 변형을 충분히 유도하지 못하기 때문이다.

Case 14와 case 18을 수치적으로 비교하면 선정된 8인자의 내부에너지 합(SE_i)은 44,393J과 45,342J로 비슷하나, barrier 내부에너지(E_b)는 76,552 J과 60,739 J로 20% 정도 차이가 나고, 총 내부에너지는 149,298J과 139,060 J로 약 7% 정도 차이가 난다. Case 14가 case 18보다 약 2kg이 무겁지만 차량전체 중량 1,400kg에 비하면 아주 작은 차이이고, 차량 주요 구조물의 강성 변화와 강성의

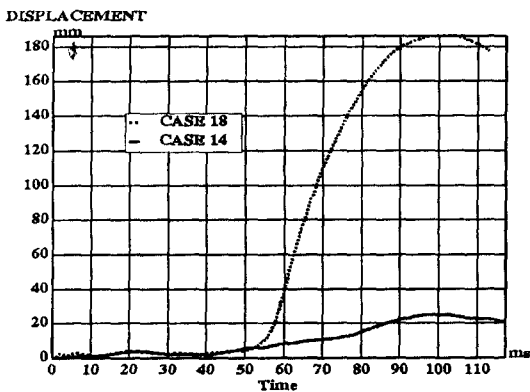


Fig. 12 Dashboard dynamic deflection : at brake pedal position(D_{max})

위치별 배열에 따라 충돌에너지 흡수량이 차이가 생기는 것을 알 수 있다.

Fig. 16, 17은 B-pillar 좌측 하단의 가속도 파형과 가속도-변위곡선(G-S선도)을 비교한 것이다.

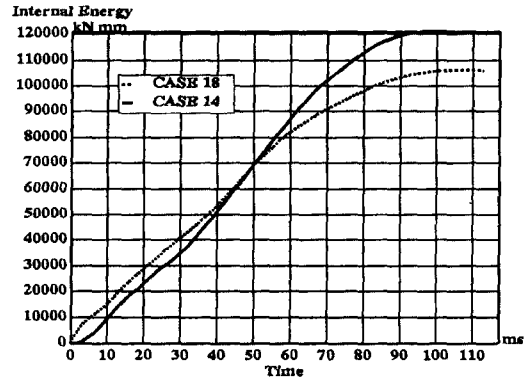


Fig. 13 Comparison of internal energy : $SE_i + E_b$

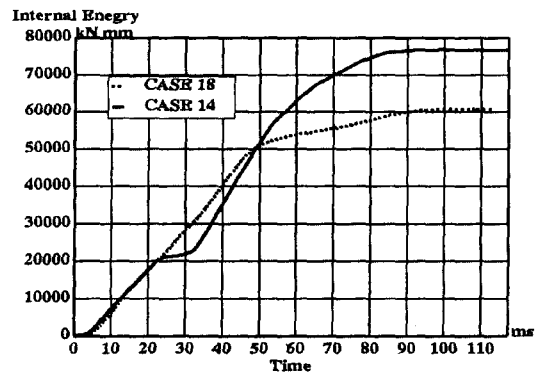


Fig. 14 Barrier internal energy(E_b) comparison

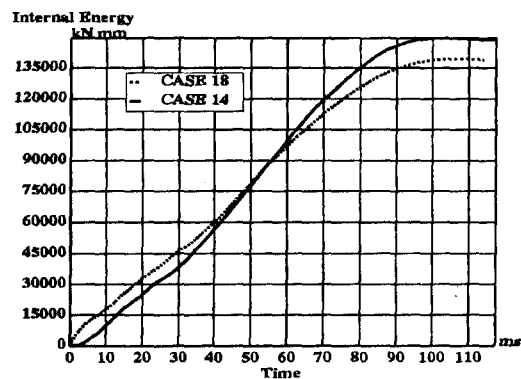


Fig. 15 Comparison of total internal energy

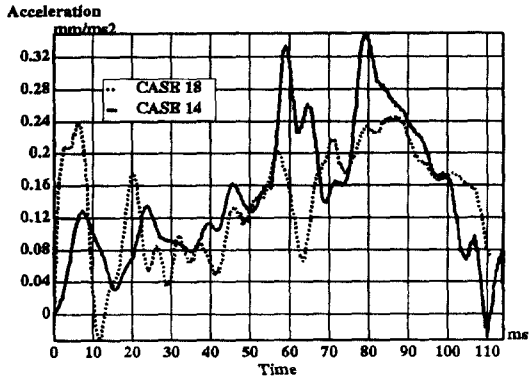


Fig. 16 Acceleration curve(Ab) at B-pillar left side : case 14 and case 18

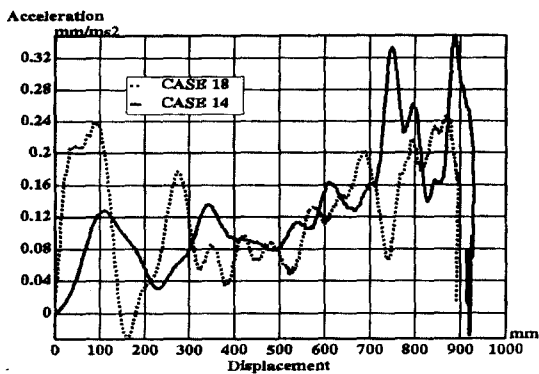


Fig. 17 G-S curve at B-pillar left side : case 14 and case 18

Case 14의 경우 dash board 변형량(D_{max})은 25mm 이고, G-S 선도 최대변형량 시점까지의 B-pillar 가속도 평균은 14.63G이다. Case 18의 경우는 D_{max} 가 186 mm, B-pillar 평균 가속도는 13.23G이다.

4. 결론

전기자동차의 유럽 Offset 충돌 특성에 대한 기초 연구로 실험계획법의 일부실시법을 이용하여 변형이 큰 8가지 인자를 선정하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충돌에너지 총 흡수량(η_1)은 B, C, D, E인자가 민감도가 크고, 단위무게당 충돌에너지 흡수량(η_2)은 A, C, D, E, H인자의 영향이 크며, D_{max} (η_3)의 경우는 C, D, H인자의 영향이 크다. 세 목

표값에 동시에 민감한 인자는 C, D, E, H인자이다.

2) 민감도가 높은 인자들간의 상호작용을 검토한 결과 C와 D인자, D와 E인자, E와 H인자 사이에 상호작용이 존재하며, 좀더 정확한 충돌 특성을 얻기 위해서는 민감도가 높은 인자들간의 상호작용을 고려한 추가적 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

3) 충돌에너지 흡수과정의 전반부는 차량부재 변형에 의하여 후반부는 barrier의 변형으로 충돌 에너지를 흡수하도록 하는 것이 좋으며, 부재의 강성 최적 조합은 엔진룸 앞부분의 부재강성(C, E인자)은 약하게, 엔진룸 뒷부분의 부재강성(D인자)은 강하게, 엔진룸과 객실부의 연결부재(H인자)는 강하게 하는 것이 좋다.

4) 본 연구를 통하여 향후 유럽 offset 충돌 성능을 만족시키기 위한 전기자동차용 알루미늄 스페이스프레임 설계 시 좋은 지침을 줄 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2000년도 차세대 자동차 기술 개발 사업의 연구과제 중 “전기자동차 충돌 성능 향상 및 최적화 기술 개발” 과제에 대한 연구비 지원과 2000년도 두뇌한국21사업 의하여 지원되어 서울대학교 정밀기계설계공동연구소에서 수행된 것입니다. 자동차 부품 연구원, 고등기술연구원, 두뇌한국21사업단 및 서울대 정밀기계설계 공동연구소 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 박성현, 다구찌 방법과 통계적 공정관리를 중심으로 한 품질공학, 민영사, 1993.
- 2) 박동규, 최신 실험계획법, 기전연구소, 1999.
- 3) M. S. Phadke, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, 1989.
- 4) J. A. C. Ambrosio, M. F. O. Seabra Pereira, F. P. da Silva, Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection,

- Kluwer Academic Publishers, pp.189-205, 1997.
- 5) 조용범, 예병우, 김태환, 신호철, “전기자동차의 유럽 Offset 충돌 특성 및 최적화 연구,” 제8회 G7 차세대 자동차기술논문집, pp.517-522, 2000.
- 6) Insurance Institute for Highway Safety, “Crash worthiness Evaluation Guidelines for Rating Structural Performance,” www.hwysafety.org/vehicle_rating/structural_pdf, 2000.