

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0101

전기자동차의 유럽 측면 충돌 특성 기초 연구(I)

A Basic Study of the European Side Impact Characteristics of Electric Vehicle(I)

조용범*, 고정환*, 신호철**, 변준형***
Y. B. Cho, J. H. Ko, H. C. Sin, J. H. Byun

ABSTRACT

European side impact analysis of an electric vehicle was done using robust design. Locations and section properties of some of the vehicle structure components which influence the european side impact characteristics were chosen as the main factors for the robust 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, and that the location of the main components were as much sensitive as the section properties of those. Also it is shown that the interactions were existed between some factors.

주요기술용어 : Design of Experiments(실험계획법), Response Table(반응표), Interaction(상호작용), Electric Vehicle(전기자동차), Analysis of Variance

1. 서론

전세계적으로 환경보전과 안전에 대한 관심이 커지면서 자동차산업에도 영향을 미쳐 여러 가지의 규제형태로 나타나고 있고, 그 대표적인 것이 배기가스 규제와 충돌 안전 관련 법규들이다.

충돌 법규로는 북미의 FMVSS¹⁾와 유럽의 EEVC²⁾를 들 수 있다. 이 법규들을 만족하기 위하여 많은 충돌 실험을 실시하고 있으며, 법규항목이 증가하거나 내용이 강화되면서 실험회수의 증가로 늘어나는 비용과 시간을 절약하기 위해 유한요소법을 이용한 충돌해석이 활발하게 이용되고 있다.

현재까지의 유럽 측면에 대한 연구 결과들은 유럽과 일본을 중심으로 많은 실험 및 해석 결과가 발표되었고 우리나라에서도 최근 많은 관심을 갖고 연구가 이루어지고 있다. 이런 충돌해석의 내용을 살펴보면 기존 차량을 규제에 맞추기 위하여 보강위주의 대

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

*** 회원, 고등기술연구원

책이 주류를 이루고 있다. 차량 설계 초기 단계의 검토가 아니라 차량 완성 단계(시작차 단계)에서의 대책 위주로 되어 있어서 선택의 폭이 좁고, 보강에 따라 중량이 증가한다. 이런 결과 중에는 중요 부재의 단면 강성에 따른 충돌 특성을 연구한 것이 대부분이고 부재 강성과 위치를 함께 고려하여 측면 충돌 특성 연구를 실시하지는 않았다.³⁾

본 연구에서는 차량 설계 초기 단계에서부터 충돌 성능을 효율적으로 관리할 수 있는 기초 연구로서 전기자동차를 대상으로 충돌 주요 부재의 위치와 단면 강성을 함께 고려하여 유럽 측면 충돌 특성을 연구하였고, 선정된 변수들의 충돌 특성에 미치는 영향과 부재의 위치와 강성에 대한 충돌 설계의 기본 방향 및 충돌 특성을 변화시키는 원인을 분석하였다.

충돌 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수가 많으나 최소의 변수 조합으로 해석을 수행할 수 있게 실험계획법중 일부실시법을 이용하였고 충돌 해석 전용 프로그램(PAM-CRASH)을 이용하여 연구를 진행하였다.^{4~6)}

2. 해석 내용

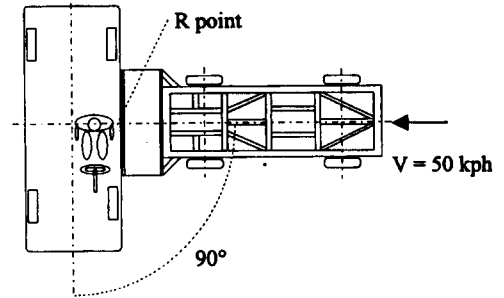
2.1 유럽 측면 충돌 법규와 실험 방법

본 연구에서 해석을 실시한 유럽 측면 충돌의 기본적인 법규 내용을 정리하면 다음

Table 1 Dummy Performance Criteria

Item	Criteria
Head	HIC < 1000
Chest	Chest deflection < 42 mm
	VC < 1.0 m/sec
Pelvis	Pubic Symphysis Force < 6.0 kN

Table 1과 같다.^{7~8)} 유럽 측면 충돌의 실험 방법은 Fig.1 과 같다.



- Moving deformable barrier against stationary Vehicle
- 6 barrier blocks, different specific stiffness
- Ground clearance : 300 mm
- 1 EUROSID 1 on the struck side
- Barrier speed : 50 kph
- Collision angle : 90°

Fig. 1 Test Conditions for the Side Impact

2.2 실험계획법의 인자 선정 및 목표 값 설정

본 연구에서는 실험계획법의 일부실시법을 이용하여 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 8가지 변수를 선정하였다. 이 변수들은 실제 차량 설계와 충돌 성능 관점에서 중요하게 다루어지는 부재들이다. 선정된 인자들은 중요 부재의 위치와 단면 강성에 대한 8개의 인자로 이루어져 있다. 이 변수들을 정리하면 Table 2와 같다.

충돌 특성을 평가하는 목표 값으로 측면 법규의 상해치 항목을 이용한다. 유럽 NCAP 실험결과를 공식적으로 발표하는 사이트(www.euroncap.com)의 결과를 살펴보면 일반적으로 유럽 측면 충돌에서 대부분의 차량은 머리 상해치와 Pubic Symphysis Force는 규제치 이하로 문제가 거의 없고 항상 문제가 되는 Rib 변형과 VC를 목표 값으로 정한다.

Table 2 Control Factors

	Factor
Location Factor	A - Door overlap percentage
	B - B-pillar x-direction location
	C - Floor Cross Member x-direction location
	D - Door Impact Beam z-direction location
Stiffness Factor	E - B-Pillar section property
	F - Floor Cross Member section property
	G - Sill Side section property
	H - Door Impact Beam section property

2.3 인자의 수준 선정 및 배열표

위의 절에서 선정한 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 가정하였다. 상호작용이 없다고 가정하여 인자중 하나는 수준 2로 나머지 인자는 수준 3으로 정하여 직교 배열표 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 이용한다.⁶⁾

각 인자들의 수준 내용을 요약하면 Table 3과 같다. B-pillar 위치는 더미의 Hip-point를 기준으로 B-pillar 하단의 x 방향 위치, Door overlap 량은 Door beltline이하의 차체 opening 부위의 면적에 대한 Door가 A-pillar와 B-pillar와 접치는 면적 비율, Floor cross member 위치는 더미의 Hip-point 기준으로 x-방향 위치를, Door impact beam 위치는 더미 Hip-point 기준으로 z-방향 위치를 나타낸다. 나머지 4개 인자는 수준 1의 단면 크기를 1로 볼 때 수준 2와 3은 각각 1.5와 2의 크기이고, Table 3의 값은 주로 변형 발생하는 방향의 단면계수이다.

본 연구에 이용한 전기자동차 모델은 알

루미늄 압출재의 균일 단면으로 이루어졌다.

Table 3 Level of Factors

Factor	Level		
	1	2	3
A	5%	15%	
B	(+)150mm	Hip-point	(-)150mm
C	(-)150mm	Hip-Point	(+)150mm
D	Hip-point	(+)100mm	(-)100mm
E	470,000mm ⁴	697,500mm ⁴	957,650mm ⁴
F	80,100mm ⁴	118,000mm ⁴	159,800mm ⁴
G	686,600mm ⁴	1,005,000mm ⁴	1,322,496mm ⁴
H	87,300mm ⁴	134,200mm ⁴	168,300mm ⁴

2.4 해석 모델

본 연구에 이용한 전기자동차의 해석 모델은 Fig. 2 와 Fig. 3과 같다.

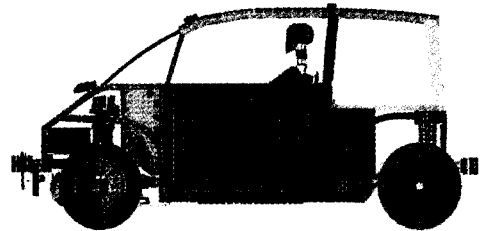


Fig. 2 Side View of Side Impact Model

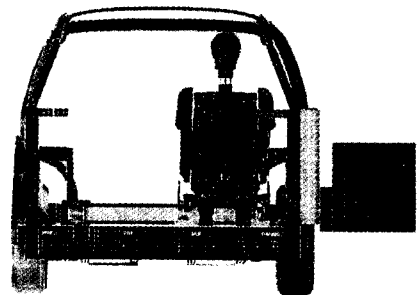


Fig. 3 Front View of Side Impact Model

3. 해석결과 및 분석

3.1 해석결과

2절에서 정한 직교배열표로 해석한 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 각 경우의 해석결과는 18번의 해석에서 얻은 Rib 변형과 VC의 평균값으로 나눈 값을 퍼센트로 표시한 것이다. Table 5와 6은 Rib 변형과 VC의 인자별 충돌 특성을 분석하기 위해 실험계획법의 선형 평균 분석법으로 구한 Rib 변형과 VC의 반응표이다. Rib 변형과 VC 반응표에서 B-pillar 위치의 수준 변화에 따라 상해치 변화가 제일 큰 것을 알 수 있다. 8 인자에 대한 반응표를 각각 위치와 단면 강성에 대한 것으로 분류하여 그림으로 나타내면 Fig. 4 ~ Fig. 7 과 같다.

Table 4 Analysis Results

Experiment No.	Injury Criteria	
	Rib deflection	VC
case1	95.38	122.42
case2	97.10	114.67
case3	105.27	105.00
case4	128.53	130.25
case5	88.71	106.53
case6	145.65	116.29
case7	109.02	77.67
case8	87.88	65.73
case9	63.42	78.66
case10	84.65	125.49
case11	69.18	90.61
case12	62.14	40.04
case13	100.79	90.87
case14	145.56	168.18
case15	133.07	109.82
case16	76.84	57.32
case17	94.89	102.20
case18	111.91	92.26

Table 5 Response Table of Rib deflection

Factor	Average m by Level			Level max-min
	1	2	3	
A	102.33	97.67		4.66
B	85.62	123.72	90.66	38.10
C	99.20	97.22	103.58	6.36
D	97.41	94.95	107.64	12.70
E	112.78	97.60	89.62	23.16
F	97.78	105.20	97.02	8.18
G	88.68	110.73	100.59	22.05
H	100.27	92.16	107.57	15.40

Table 6 Response Table of VC

Factor	Average m by Level			Level max-min
	1	2	3	
A	101.91	98.09		3.82
B	100.71	120.32	78.97	41.35
C	100.67	107.99	91.34	16.64
D	105.66	88.00	106.34	18.33
E	111.24	87.30	101.46	23.93
F	90.59	118.25	91.16	27.09
G	96.53	107.69	95.78	11.91
H	103.71	91.40	104.89	13.48

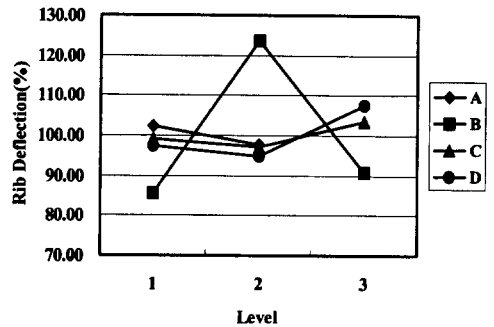


Fig. 4 Response Table of Rib deflection (Location Factor)

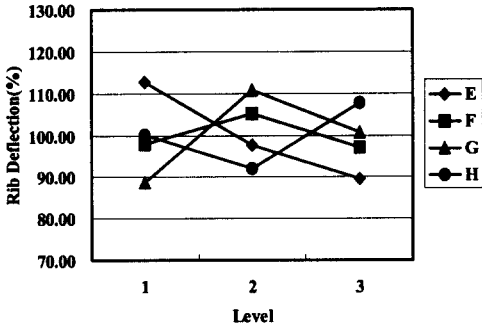


Fig. 5 Response Table of Rib deflection (Stiffness Factor)

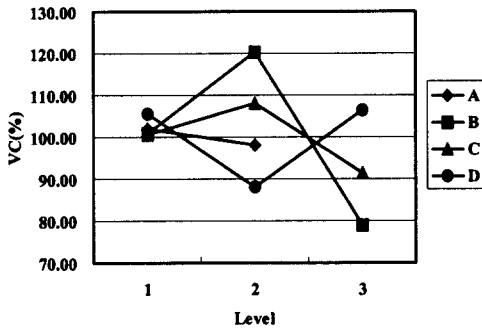


Fig. 6 Response Table of VC(Location Factor)

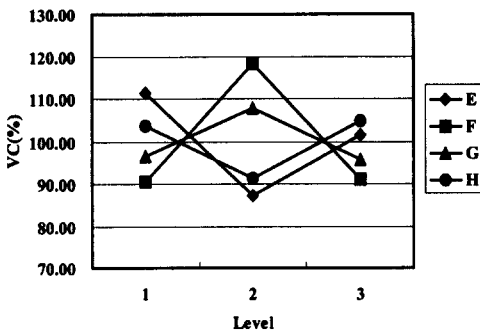


Fig. 7 Response Table of VC(Stiffness Factor)

3.2 Analysis of Variance 계산

해석 결과에서 각 목표 값에 대한 인자별 반응표를 구하였고 인자별 민감도를 분석하기 위해 ANOVA(Analysis of Variance)를 실시한다.

시한다.

Rib 변형과 VC에 대하여 계산 절차⁶⁾에 따라 ANOVA를 실시한 결과는 Table 7, 8과 같다. Table 7, 8중에서 인자 B의 sum of squares의 계산은 다음과 식과 같다.

Sum of squares due to factor B

$$= 6 \sum_{i=1}^3 (m_{A_i} - m)^2$$

다른 인자들의 Sum of squares도 위 식과 같은 방법으로 계산을 한다. 인자별 Mean square는 sum of squares 값을 인자별 자유도로 나눈 값이다. F ratio 값은 인자별 sum of squares 값 중에서 목표 값에 영향도가 적은 것들의 값을 합하여 error로 놓고, error의 mean square 값으로 각 인자의 mean square 값을 나눈 것을 말한다. F ratio 값이 클수록 인자의 목표 값에 대한 영향도가 큰 것을 나타낸다.

Table 7 Analysis of Rib Deflection

Factor	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
A	1	98*	98*	
B	2	5140	2570	16.5
C	2	166*	83*	
D	2	580*	290*	
E	2	1662	831	5.3
F	2	244*	122*	
G	2	1462	731	4.7
H	2	713	357	2.3
Error	0	0	-	
Total	17	10065	592	
(Error)	(7)	(1088)	(155.4)	

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

Rib 변형에서는 B-pillar 위치, B-pillar 강

성, Sill side 강성, Door impact beam 강성인 자 순으로 민감한 것을 알 수 있다.

Table 8 Analysis of VC

Factor	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
A	1	66*	66*	
B	2	5134	2567	8.5
C	2	836*	418*	
D	2	1297	649	2.2
E	2	1739	870	2.9
F	2	2998	1499	5.0
G	2	533*	267*	
H	2	670*	335*	
Error	0	0	-	
Total	17	13273	781	
(Error)	(7)	(2105)	(300.7)	

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

Table 9 Summary of Factor Effects

Factor	Rib Deflection		VC	
	Mean square	F	Mean square	F
A	98	-	66	-
B	2570	16.5	2567	8.5
C	83	-	418	-
D	290	-	649	2.2
E	831	5.3	870	2.9
F	122	-	1499	5.0
G	731	4.7	267	-
H	357	2.3	335	-
Error	155.4		-	

VC에서는 B-pillar 위치, Floor cross member 강성, B-pillar 강성, Door impact beam 위치인자 순서로 영향도가 높다. 목표 값 항목 별로 인자들의 민감도의 크기, 순서 및 항목이 다른 것을 알 수 있다. 목표

값과 F ratio를 인자별로 정리하면 Table 9와 같다. Rib 변형과 VC를 모두 고려하여 영향을 미치는 인자는 B-pillar 위치, B-pillar 강성, Floor cross member 강성, Sill side 강성이다.

3.3 최적 조합 계산 및 검증 해석

해석 결과로부터 반응표를 구하고 ANOVA를 실시하여 인자별 민감도를 분석한 결과 인자 B, E, F G가 영향도가 크고 나머지 인자는 error로 생각해도 무방하다. 최적 조합은 인자 수준별 평균값에 F ratio를 곱한 값이 최소값이 되는 인자 수준이다. 이와 같이 계산한 결과 민감도가 높은 인자의 최적 조합은 B3, E2, F1, G1이다.

실험계획법에 의한 최적 조합의 목표 값을 예측할 때 민감도가 높지 않은 인자들을 포함할 경우 과대 평가되는 결과를 초래한다.⁶⁾ 최적 조합에 의한 결과 예측에는 목표 값에 영향이 큰 B, E, F, G 인자만을 고려한다. 결과예측에 이용한 인자조합은 최적 조합 B3, E2, F1, G1에서 F인자는 수준 1과 수준 3의 차이가 없으므로 수준 3을 최적조합으로 하여 계산한다. 이렇게 계산한 예측 결과는 Rib 변형은 평균값의 73.96%, VC는 54.76%이다.

위에서 계산한 민감한 인자 반영한 A2, B3, C3, D2, E2, F3, G1, H2 조합으로 실제 해석한 결과는 Rib 변형이 76.4%, VC는 44.6%로 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.

3.4 인자별 상호 작용

인자간의 상호 작용이 없는 것을 가정하여 직교 배열표를 작성하여서 해석을 수행하였다. 모든 인자간의 상호작용을 고려하

여 해석을 수행 할 수 없으므로 목표 값에 민감도가 큰 인자들간의 상호 작용에 대하여 검토한다.

Table 9의 결과로부터 Rib 변형에 민감한 B, E, G, H인자의 상호 작용과 VC에 민감한 B, D, E, F인자의 상호작용을 계산한다. 각 인자별 상호작용의 영향 결과를 나타내면 Table 10, 11과 같다.

Table 10 Analysis of Rib Deflection Interactions

Factor	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
B×E	4	2710	677.5	4.4
B×G	4	700	175	1.1
B×H	4	1299	324.8	2.0
E×G	4	3212	803	5.2
(Error)	(7)	(1088)	(155.4)	

Table 11 Analysis of VC Interactions

Factor	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F
B×D	4	2861	715.3	2.4
B×E	4	2420	605	2.0
B×F	4	1234	308.5	1.0
E×F	4	3884	971	3.2
(Error)	(?)	(2105)	(300.7)	

Rib 변형에서는 B×E인자(B-pillar 위치와 B-pillar 강성), E×G인자(B-pillar 강성과 Sill side의 강성)의 상호 작용이 상대적으로 크다. VC 경우는 B×D인자(B-pillar 위치와 Door impact beam 위치), B×E인자(B-pillar 위치와 B-pillar 강성), E×F인자(B-pillar 강성과 Floor cross member 강성)의 상호 작용이 크다. 이 결과를 정리하면 Table 12와 같다. Table 12에서 Rib 변형과 VC 결과에 영향을 미치는 상호 인자는 B×E, E×G, E×F, B×D이다.

인자별 상호 작용결과를 그래프로 나타내면 Fig. 8 ~ Fig. 9와 같다.

Table 12 Summary of Interactions F ratio

Factor	Degree of Freedom	Rib Deflection	VC
B×D	4		2.4
B×E	4	4.4	2.0
B×F	4		1.0
B×G	4	1.1	
B×H	4	2.0	
E×F	4		3.2
E×G	4	5.2	

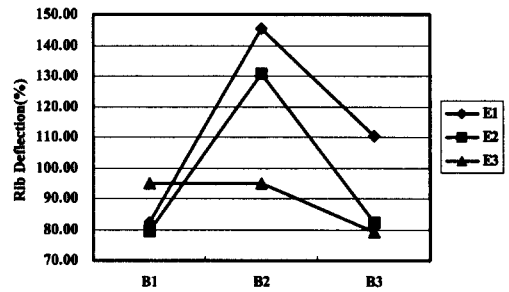


Fig. 8 B, E factor Rib Deflection Interaction

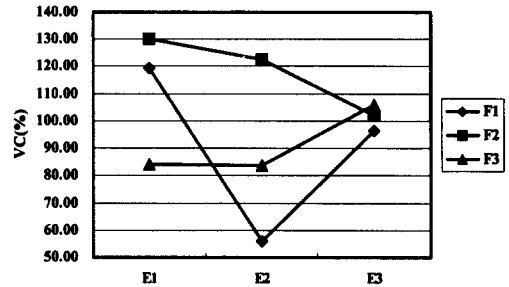


Fig. 9 E, F factor VC Interaction

4. 결론

전기자동차의 유럽 측면 충돌 특성에 대한 기초 연구로 실험계획법의 일부실험을

이용하여 충돌 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 8가지 인자를 선정하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 목표 값 반응표를 분석한 결과 위치 인자 중에서는 B-pillar 위치 대한 민감도가 크고, 강성 인자는 B-pillar 강성, Floor cross member 강성 및 Sill side 강성에 대한 민감도가 크다.
- 2) 민감도가 높은 인자들간의 상호작용을 검토한 결과 B-pillar 위치와 Door impact beam 위치, B-pillar 위치와 강성, B-pillar 강성과 Floor cross member 강성, B-pillar 강성과 Sill side 강성인자간에 상호작용이 존재한다. 좀더 정확히 충돌 특성을 얻기 위해서는 민감도가 높은 인자들의 상호작용을 고려한 해석을 추가적으로 수행하는 것이 필요하다고 판단된다.
- 3) 실험계획법을 이용한 전기자동차의 유럽 측면 충돌 해석결과 Rib 변형과 VC를 최소화하는 조합은 Door overlap량은 크고, B-pillar와 Floor cross member 위치는 Hip-point 보다 뒤쪽 또는 앞쪽으로, Door impact beam은 Hip-point 보다 높게 위치하는 것이 좋으며, B-pillar 강성은 중간, Floor Cross Member 강성은 크게 또는 약하게, Sill side 약하게, Door Impact Beam 강성은 보통인 경우가 상해치에 좋은 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구를 통하여 향후 유럽 측면 충돌 성능을 만족시키기 위한 전기자동차용 알루미늄 스페이스 프레임 설계 시 좋은 지침을 줄 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 1998년도 차세대 자동차 기술 개발 사업의 연구과제 중 “전기자동차 충돌

성능 향상 및 최적화 기술 개발“ 과제에 대한 연구비 지원에 의해 서울대학교 정밀 기계설계공동연구소에서 수행 된 것입니다. 자동차 부품 연구원과 고등기술연구원 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Code of Federal Regulation, 49, Part571.214, "Side Impact Protection", 1990.
- 2) ECE, "Draft Regulation-Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicle with Regard to the Protection of the Occupant in the Event of a Lateral Collision", TRANS/SC.1/WP.29/R.640, 1993.
- 3) Harle, N., Brown, J. and Rashidy, M., "A Feasibility Study for an optimising algorithm to guide car structure design under side impact loading", IJCrash, Vol.4, No1, pp.71-92, 1999.
- 4) 박성현, “다구찌 방법과 통계적 공정관리를 중심으로 한 품질공학”, 민영사, 1993.
- 5) 박동규, “최신 실험계획법”, 기전연구사, 1999.
- 6) Phadke, M. S., "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, 1989.
- 7) 김동석, 이명식, “측면 충돌 법규화 동향과 해석기술”, 자동차공학회지, Vol.18, No.4, pp.27-35, 1996.
- 8) Jorge A. C. Ambrosio, Manuel F. O. Seabra Pereira and Fernando Pina da Silva, "Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection", Kluwer Academic Publishers, pp.189-205, 1997.