

## 알루미늄 차체의 사이드멤버 충돌에너지 흡수성능 최적설계

김 정 호<sup>1)</sup> · 김 범 진<sup>1)</sup> · 허 승 진<sup>\*2)</sup> · 김 민 수<sup>2)</sup>

국민대학교 자동차공학대학원<sup>1)</sup> · 국민대학교 기계 · 자동차공학부<sup>2)</sup>

### The Crush Energy Absorption Capacity Optimization for the Side-Member of an Aluminum Space Frame Vehicle

Jung Ho Kim<sup>1)</sup> · Bum Jin Kim<sup>1)</sup> · Seung Jin Heo<sup>\*2)</sup> · Min-Soo Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 20 April 2004 / Accepted 16 July 2004)

**Abstract** : In order to improve the frontal crash performance of an Aluminum Space Frame Vehicle, this presents a systematic optimal design process to maximize the crush energy absorption capacity of side-members while satisfying the maximum displacement constraint. In this study, five design types are studied for selecting a good collapse initiator. Then, for the selected collapse initiator type, 7 design variables are defined to represent cross section shape, thickness and bead interval. The systematic optimization processor, R-INOPL uses DOE, RSM and numerical optimization techniques. R-INOPL uses only 14 analyses to solve the 7 design variable optimization problem. the final design can improve 103.9% of the internal energy and reduce 13.9% of the maximum displacement.

**Key words** : Response surface method(반응표면법), Collapse initiator(접힘유도모우드), Frontal crash performance(전방충돌특성)

## 1. 서론

최근 자동차관련 핵심 기술은 환경규제와 안전 관련 법규강화에 따른 차량 배기가스 저감 기술과 차량 충돌안전도 향상 기술로 집약될 수 있다. 그러나 환경차원의 기술적 요구사항은 차량의 경량화에 그 초점을 맞추고 있는 반면, 종래의 자동차 기술개발 설계 목표인 고안전, 승차감 및 편리성, 고성능 차량의 개발은 환경차원과 상반되어 급격한 차량 무게의 증가를 요구하고 있다. 이에 따라 차량 경량화를 위해 최근에는 차체프레임 제작방식과 유사한 이른바 Aluminum Space Frame(ASF) 제작방식이 도

입되어 대표적인 초경량 차체의 제작 기술로서 크게 주목받고 있다.<sup>1-4)</sup>

본 연구에서는 알루미늄 경량차체의 전방 충돌성능 향상을 위하여 전방충돌 시 대부분의 충돌에너지를 흡수하는 전방 사이드멤버의 최적설계를 수행하였다. 설계 모델에는, 좌굴을 유도하기 위한, 접힘 유도모우드(collapse initiator)를 사이드멤버에 적용하였다. 최적설계의 절차는, 실험계획법(design of experiments : DOE)을 이용하여 전방 알루미늄 사이드멤버의 구성요소가 충돌에너지 흡수 측면에 미치는 기여도를 분석하고, 이를 토대로 반응표면법(response surface method : RSM)과 최적화를 반복적으로 적용하였다. 마지막으로, 최적화된 모델은 half-car 모델에 적용하여 해석 결과를 검증함과 동

\*To whom correspondence should be addressed.  
sjheo@kookmin.ac.kr

시에 초경량 알루미늄 차체의 충돌안전도 측면의 설계방안을 제시하였다.

## 2. 접힘 유도모우드를 적용한 알루미늄 사이드멤버의 충돌해석 및 설계모델 선정

차량의 충돌 시 주요 구조의 변형 형태는 순수하게 축방향 압피나 굽힘방향 붕괴의 형태로 나타나는 것이 아니라 두 현상의 복합적인 형태로 나타나

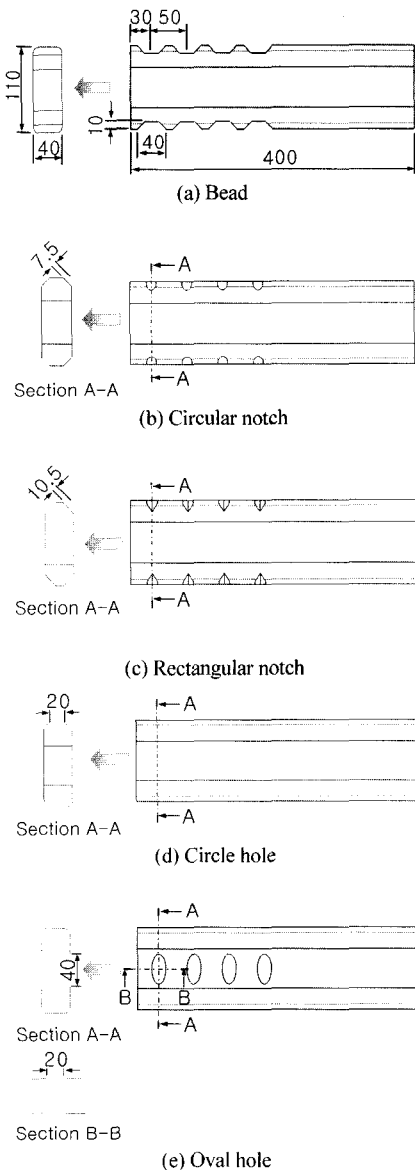


Fig. 1 Five types of aluminum extrusion

게 된다. 따라서, 효과적인 에너지 흡수를 위해서는 굽힘붕괴(bending collapse)가 발생하지 않고 연속적으로 진행되는 축방향 좌굴모드(axial buckling mode)가 형성되어야 하며, 이러한 좌굴 형태를 미리 예측하고 조절할 수 있어야 한다. 이를 위해서 충격 부재 끝 부분의 적당한 위치에 약함(weakness)을 주는 접힘 유도모우드를 설치할 수 있으며, 이를 통해서 정해진 위치에서 안정적이고 규칙적인 접힘 과정을 유도할 수 있다. 접힘 유도모우드는 벽 쪽이나 모서리 부분에 흠집(stamping)이나 구멍(punching)을 내어 약함을 만드는 두 가지 형태로 연구될 수 있으며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 알루미늄 전방 사이드멤버에 대하여 5가지 형태로 접힘 유도모우드를 적용하였다.

접힘 유도모우드를 적용한 알루미늄 사이드멤버에 대해서 A-필라 후반부에 600kg의 부가질량을 가하고 엔진 및 서브프레임을 적용하여 고정벽에 50km/h의 속력으로 충돌해석을 실시하였다. 해석 대상인 알루미늄 압출부재의 단면 형상 및 재질특성은 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 여기서, 메인 프레임의 두께  $t_1$ 는 1.8mm이며 보강재의 두께  $t_2$ 는 2.7mm, 보강재 사이의 거리  $w$ 는 53mm, 모서리 부위의 반경  $R$ 은 7mm이다.

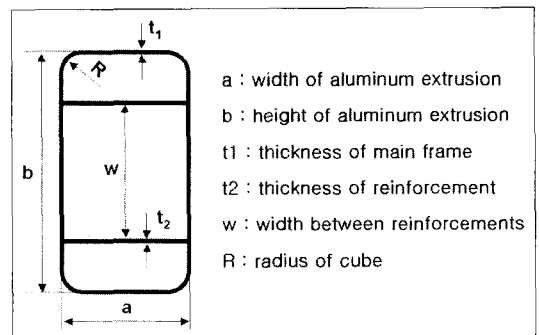


Fig. 2 Cross-sectional shape of aluminum extrusion

Table 1 Material Properties of aluminum extrusion

Extrusion material	Young's modulus [GPa]	Density [g/mm <sup>3</sup> ]	Poisson's ratio	Yield stress [MPa]
AL6061-T6	69	2.7	0.33	275

5가지 접합 유도모우드를 적용한 모델에 대하여 상용 비선형 해석 프로그램인 PAM-CRASH<sup>2)</sup>를 이용하여 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석 결과 5가지 유형 모두 심한 굽힘이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 좌굴 세김에도 불구하고 축방향 좌굴이 유도되지 않고 굽힘이 발생한 주된 요인은 후방부의 강도 취약에 의한 것으로 판단되며, 이를 방지하기 위해서는 사이드멤버의 전방부에서 안정적인 좌굴을 유도하고 후방 지지부에서 충분한 굽힘 강성을 가짐으로써 안정적인 압축붕괴 모우드를 유도하기 위한 설계변경이 요구된다. 따라서 전방 사이드멤버의 안정적인 압축붕괴를 유도하기 위하여 Fig. 3에서 보는 것과 같이 구조재를 설계하여 전방 사이드멤버와 후방 지지대를 연결하는 방안을 제시하고자 한다.

이전과 동일한 방법으로 설계 제안된 모델에 대한 충돌해석을 수행하였으며, 이를 통해 기존 사이드멤버 대비 구조재 및 좌굴모우드 적용에 따른 설계 제안 사이드멤버의 붕괴거동 및 충돌에너지 흡수 양상을 분석하였다. Fig. 4는 초기모델 및 5가지 설계 제안 모델에 대한 충돌해석 시의 변형양상을 나타낸다. 접합 유도모우드의 적용으로 전방 사이드멤버의 좌굴이 효과적으로 유도되었으며 구조재의 추가로 인해서 초기모델에서 발생한 굽힘 현상이 전혀 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

지금까지의 해석결과를 Table 2에 나열하였다. 결과를 살펴보면, 모든 모델들이 충돌에너지 흡수량, 변형량 모두 매우 근접한 결과를 나타내었으며 충돌에너지 흡수량은 초기 모델 대비 최대 81.2% 증가하였고, 변형량은 최대 15.6% 감소한 결과를 나타내었다. 하지만, 접합 유도모우드를 실제적으로 적

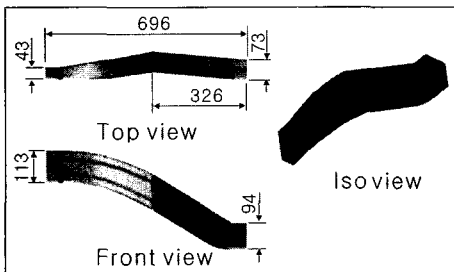


Fig. 3 Design of connector

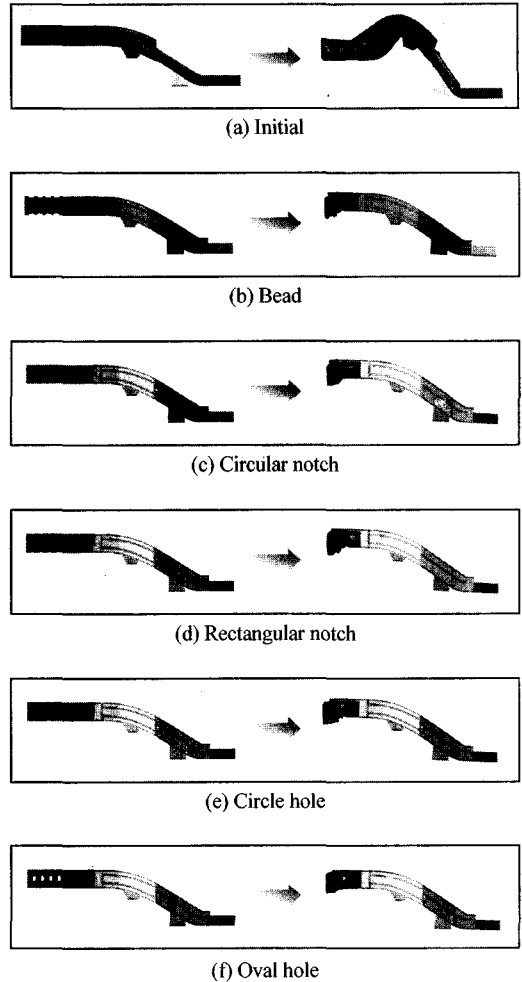


Fig. 4 Deformed shape of proposed aluminum side-members

Table 2 Analysis result of six types of aluminum side-member

Type	Ei [kJ]	Dmax [mm]	Collapse mode
Initial	24.10	254.2	Bending collapse
Bead	41.30 (+71.4%)	218.1 (-14.2%)	Axial collapse
Circular notch	43.68 (+81.2%)	214.5 (-15.6%)	Axial collapse
Rectangular notch	43.37 (+80.0%)	215.7 (-15.2%)	Axial collapse
Circle hole	43.17 (+79.1%)	214.4 (-15.7%)	Axial collapse
Oval hole	43.17 (+79.1%)	215.5 (-15.2%)	Axial collapse

\*Ei : Internal energy; \*Dmax : Maximum displacement

용함에 있어서 punch를 이용한 구멍 내기 공정보다 bead 및 notch 제작공정이 제작 공정비 절감 측면에서 유리하므로 본 연구에서는 circular notch를 적용한 모델을 선정하여 근사 최적화를 수행하고자 하였다.

### 3. 반응표면법을 적용한 알루미늄 전방 사이드멤버의 충돌에너지 흡수 최적설계

2장에서는 5가지 접합 유도모우드를 적용한 알루미늄 사이드멤버에 대한 충돌해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 이번 장에서는 앞장에서 선정된 설계모델에 대해서 설계변수의 상/하한치에 대한 2수준 Plackett-Burman 직교배열표<sup>6)</sup>와 반응표면 모델을 이용하여 알루미늄 전방 사이드멤버의 충돌에너지 흡수 최적설계를 수행하고자 한다.

#### 3.1 설계변수 및 목적함수의 선정

알루미늄 전방 사이드멤버의 충돌에너지 흡수 최적설계를 수행하기 위해서 Fig. 5와 같이 알루미늄 전방 사이드멤버의 주요 요소인 메인 프레임의 두께  $t_1$ 과 보강재의 두께  $t_2$ , 보강재 사이의 거리  $w$ , 모서리 부위의 반경  $R_c$ , 노치부의 반경  $R_N$ , 사이드멤버 전방부에서 첫번째 노치부까지의 거리  $d_1$ , 노치부 사이의 거리  $d_2$ 와 같이 총 7가지 설계변수를 선정하였다. 목적함수는 충돌에너지 흡수량을 최대화하는 것이며 7가지 설계변수는 초기모델의 데이터를 기준으로 Table 3과 같이 설정하였다.

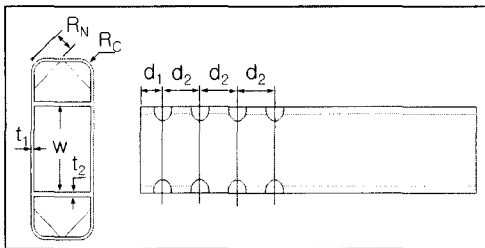


Fig. 5 Design variables of front side-member

Table 3 Design variables and their limits

Design variable	(단위 : mm)						
	$t_1$	$t_2$	$w$	$R_c$	$R_N$	$d_1$	$d_2$
Lower bound	1.0	1.0	35	3.0	7.5	30	40
Middle value	2.0	2.0	50	6.0	10	50	50
Upper bound	3.0	3.0	65	9.0	12.5	70	60

#### 3.2 설계민감도 해석

목적함수에 대한 설계변수의 민감도(design sensitivity)를 평가하기 위해서 Plackett-burman 직교배열표 및 중간값 모델에 대한 충돌해석을 수행하여 Table 4에 나열하였고, 설계변수에 대한 충돌에너지의 민감도를 구하여 Fig. 6에 나타내었다.

Table 4 Analysis results for the DOE table and middle value

Model	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	$E_i$ [kJ]	$D_{max}$ [mm]
	1	2	3	4	5	6	7		
1	1	1	1	-1	1	-1	-1	37.77	203.8
2	-1	1	1	1	-1	1	-1	16.47	243.5
3	-1	-1	1	1	1	-1	1	10.46	253.4
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	25.48	229.6
5	-1	1	-1	-1	1	1	1	17.03	243.1
6	1	-1	1	-1	-1	1	1	29.05	220.7
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	38.21	204.0
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	11.02	252.0
9	0	0	0	0	0	0	0	24.19	232.1

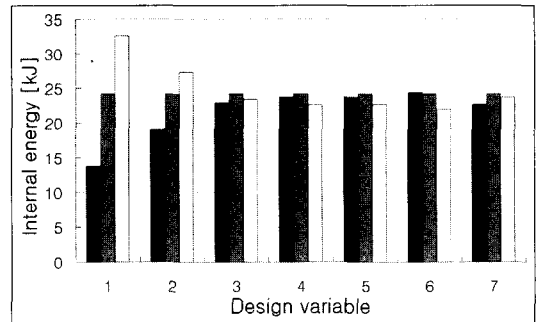


Fig. 6 Design sensitivity for the internal energy

설계민감도를 살펴보면, 1번과 2번, 그리고 6번 설계변수는 명확하게 선형적으로 증가 또는 감소하는 양상을 보이는 반면, 나머지 3, 4, 5, 7번 설계변수는 위로 볼록한 형태를 나타낸다. 그래서 보다 정확한 최적치를 얻기 위하여 반응표면 모델을 이용하는 근사 최적화를 수행하고자 한다.

#### 3.3 반응표면 모델을 이용한 알루미늄 전방 사이드멤버의 최적설계

반응표면 모델을 이용한 알루미늄 전방 사이드멤버의 근사 최적화를 수행하기 위한 정식화는 다음과 같다.

$$\max_X \tilde{E}(X) \quad (1)$$

subject to

$$\tilde{\delta}_{\max}(X) \leq 200 \quad (2)$$

and

$$x_i^L \leq X \leq X_i^U \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (3)$$

여기서 식 (1)은 X에 대하여 충돌에너지를 최대화한다는 의미이며 X는  $t_1, t_2, w, R_c, R_N, d_1, d_2$ 를 포함한다. 또한, 식 (2)는 최대변위가 200mm를 넘지 않아야 함을 나타내고 식 (3)은 각각의 설계변수에 대해 상/하한치를 넘지 않아야 함을 의미한다.

상기의 순차적 근사 최적화는 R-INOPL<sup>7)</sup>을 이용하여 해결한다. R-INOPL은, 미지수의 개수에 비하여 실험점이 절대적으로 부족한 최소자승법을 풀기 위하여, 특이해 분해(SVD) 기법을 적용한다. 또한, 근사 최적치의 유용성(feasibility)를 향상시키기 위하여, 사용자의 목적에 따라 근사함수를 보수적으로 생성하는 보수-최소자승법<sup>8)</sup>을 적용한다. 또한, 근사화된 최적화 문제는 ALM기법에 기반을 둔 B-INOPL<sup>9)</sup>을 내부적으로 이용한다. 본 연구에서는 2차식의 반응 표면 모델을 적용한다. 목적함수인 에너지는 과소평가(under-estimate) 모델을 제약조건인 최대변위는 과대평가(over-estimate) 모델로 생성하였다. 과대/과소평가 모델의 생성 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 7을 참조하기 바란다.

Table 4의 자료를 이용한 첫 번째 근사 최적치는  $(t_1^*, t_2^*, w^*, R_c^*, R_N^*, d_1^*, d_2^*) = (3, 3, 60, 3, 7.5, 31, 60)$  이었다. 이 근사 최적치에 대한 정확한 유한 요소 해석을 수행하고, 이를 추가한 근사모델을 생성하여 두번째 최적설계를 수행하였다. 이와 같은 순차적 근사 최적화를 수행한 결과를 Table 5에 정리하였다. 본 연구의 근사 최적화는, 7개의 설계변수를 갖는 설계문제를, 총 14회의 해석(Table 4의 결과 + 5회)만에 일정한 값으로 수렴시켰다. 최적화의 목적인 충돌에너지는 초기 모델보다 약 62% 개선된 39.78kJ을 나타냈고 제약 조건인 최대 변형량은 약 14% 감소한 199.2mm를 나타내었다.

초기 설계치와 본 연구에서 수행한 근사최적설계

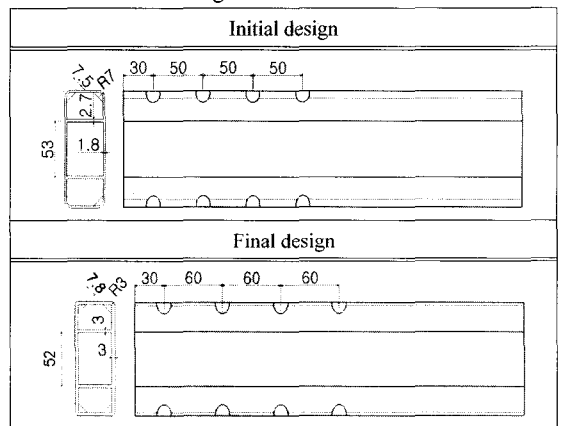
Table 5 Summary of optimization history for SAO

Iter.	$t_1$	$t_2$	w	$R_c$	$R_N$	$d_1$	$d_2$	$E_1$ [kJ]	$D_{\max}$ [mm]
0	1.8	2.7	53	7	7.5	30	50	24.56	230.9
1	3	3	60	3	7.5	31	60	39.37	198.9
2	3	3	65	4.8	8.7	30	60	37.81	204.2
3	3	3	65	3	7.5	30	60	39.09	201.2
4	3	3	52	3	7.5	30	60	39.64	198.5
5	3	3	52	3	7.8	30	60	39.78	199.2

Table 6 Comparison of initial and final design

	Initial design	Final Design	Chang rate
$E_1$ [kJ]	24.56	39.78	+62.0%
$D_{\max}$ [mm]	230.9	199.2	-13.7%

Table 7 Comparison of side-member shape between initial and final design



치의 충돌 성능은 Table 6에 비교하였고, 단면형상 및 치수변화는 Table 7에 나열하였다. 이 때의 치수를 비교하면, 메인 프레임과 보강재의 두께는 각각 67%와 11% 증가한 upper bound값을 나타내었고 모서리의 반경은 57% 감소한 3mm를 나타내었으며 노치부의 간격은 20% 증가한 60mm를 나타내었다.

추가적으로 보수최소자승법을 이용한 근사화 모델의 검증에 위해 최적화된 알루미늄 사이드멤버에 대한 충돌해석을 수행한 결과, 충돌에너지는 근사 모델의 경우 39.54kJ로 해석 결과인 39.78kJ보다 작게 나왔고 최대 변형량은 근사모델이 200mm로 해석 결과인 199.2mm보다 크게 나왔으며 이러한 결과는 보수최소자승법의 과소평가(under-estimation)와

과대평가(over-estimation)를 만족하는 타당한 결과라고 할 수 있다.

#### 4. Half-Car 모델을 이용한 최적설계 결과검증

최종적으로 최적화 모델의 검증을 위해 최적화된 알루미늄 전방 사이드멤버를 half-car 모델에 적용하여 충돌해석을 실시하였다. 충돌 속도 및 질량은 전차량 모델의 충돌해석 결과와 유사한 충돌 변형 거동을 유도하도록 계산된 등가의 값을 적용하였고, A-pillar 후방을 강제 처리하여 속도 및 질량을 부가하였다. 해석 결과는 Fig. 7 및 Table 8에 나타내었으며 충돌에너지 흡수 측면에서 최종모델은 초기모델에 비해 103.9% 증가하였고 최대 변형량은 반대로 13.9% 감소함을 확인하였다.

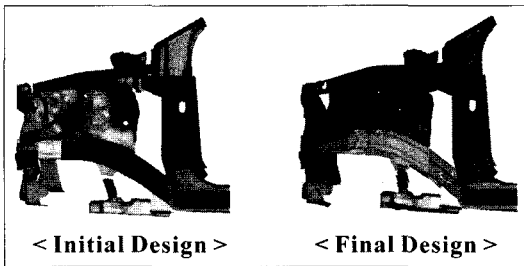


Fig. 7 Deformed shape of initial and final half-car model

Table 8 Analysis results of half-car model

	$E_i$ [kJ]	$D_{max}$ [mm]
Initial design	66.42	363.9
Final design	135.46 (+103.9%)	313.1 (-13.9%)

#### 5. 결론

본 연구에서는 초경량 알루미늄 차체의 전방 충돌성능 향상을 위하여 접힘 유도모우드를 사이드멤버에 적용하여 충돌해석을 수행하였고 알루미늄 사이드멤버의 충돌에너지 흡수 구조를 개선하였다. 또한, 반응표면법 및 순차적 근사최적화를 유한요소해석에 적용하여 7개의 설계변수에 대하여 14회의 FEM해석만으로도 전방 사이드멤버의 충돌에너지를 최대화하는 충돌최적설계를 수행하였다. 그리고 이를 half-car 모델에 적용하여 최적설계 결과를 검증하였다. 본 논문에서 수행한 연구결과를 다음

과 같이 요약한다.

- 1) 충돌에너지 흡수성능 향상을 위해 초기모델에 접힘 유도모우드 및 연결부재를 적용한 결과 충돌에너지 흡수량은 약 104%, 최대 변형량은 약 14% 감소시킬 수 있었다.
- 2) 전방 사이드멤버의 강도 증가로 인한 후방부의 취약을 막기 위해 추후 연구에서는 연결부재 및 후방 지지대의 두께를 새로운 설계변수로 추가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2004년도 국민대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### References

- 1) H. Kang, J. M. Kim, "The Development of Lightweight Body using Aluminum Space Frame," Proceeding of 8th Next Generation Vehicle Workshop, Korea Automotive Technology Institute, pp.279-283, 2000.
- 2) S. J. Heo, H. Y. Kim, "Design and Analysis of the Crash Energy Absorbing Members for an Aluminum Intensive Vehicle(III)," Proceeding of 9th Next Generation Vehicle Workshop, Korea Automotive Technology Institute, pp. 298-305, 2001.
- 3) J. H. Kim, B. J. Kim, S. J. Heo, M. S. Kim, "Robust Optimal Design of Aluminum Side-member Crash Safety using RSM and 6-sigma Concept," 2003 KSAE Spring Conference Proceedings, Vol. II, pp.829-833, 2003.
- 4) B. J. Kim, S. J. Heo, "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.3, pp.141-147, 2003.
- 5) PAM-CRASHTM, PAM-SAFETM Version 2000 Manual, 2000.
- 6) W. M. John, Statistical Design and Analysis of Experiments, Siam, Philadelphia, pp.184-186, 1998.

- 7) M. S. Kim, R-INOPL Vesion 1.5 : User's Guide for Response Surface Modeling and Approximate Optimization, www.inopl.com, 2003.
- 8) M. S. Kim, S. J. Heo, "Conservative Quadratic RSM combined with Incomplete Small Com-  
posite Design and Conservative Least Squares Fitting," KSME International Journal, Vol.17, No.5, pp.705-714, 2003.
- 9) M. S. Kim, B-INOPL Vesion 3.0 : User's Guide for Constrained Nonlinear Optimization, www.inopl.com, 2001.