

승용차용 알루미늄 시트의 경량화 및 내구성능 향상을 위한 최적설계

김 병 길¹⁾ · 김 민 수²⁾ · 김 범 진³⁾ · 허 승 진^{*2)}

ATES¹⁾ · 국민대 기계자동차공학부²⁾ · 국민대 자동차공학대학원³⁾ · 국민대 기계자동차공학부²⁾

Optimal Design of the Passenger Vehicle Aluminum Seat for Weight Reduction and Durability Performance Improvement

Byung-Kil Kim¹⁾ · Min-Soo Kim²⁾ · Bum-Jin Kim³⁾ · Seung-Jin Heo^{*2)}

¹⁾8F Fine Bldg., 673-5 Deunchon-dong, Gangseo-gu, Seoul 157-030, Korea

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

³⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 6 September 2004 / Accepted 25 February 2005)

Abstract : In order to minimize weight of vehicle seat, an optimum design of aluminum seat is presented while satisfying stress and fatigue life constraints. In this study, the analysis model is validated by comparing its stress with that of test. Then, two-level orthogonal array is used to estimate the design sensitivity for 7 design variables. Finally, the sequential approximate optimization (SAO) is performed using the constructed RSM models. The approximate RSM models are sequentially updated using the analysis results corresponding to the approximate optimum obtained during the SAO. After 14 analyses, the SAO gives an optimal design that can reduce 16.7% of weight while increasing 369% of fatigue life and satisfying stress constraint.

Key words : Optimal design(최적설계), Response surface method(RSM : 반응표면법), Fatigue life(피로수명), Sequential approximate optimization(SAO: 순차적 근사최적화)

1. 서 론

최근 자동차 산업의 경쟁력은 빠르게 변화하는 수요 패턴에 맞추어 개발 기간의 단축과 비용 절감이 절실히 요구되고 있다.

아울러 고객의 요구를 반영하는 제품의 품질 향상은 필수이기 때문에 이와 관련된 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 제품의 내구 관점에서 고려되는 내구 수명 예측은 중요한 연구 분야중 하나이며 이를 위해 CAE를 활용한 내구 최적 설계 관련 연구가 주목받고 있다. 하지만 이러한 내구 해석 분

야의 진보에 발맞추어 내구 최적 설계 관련 연구개발은 아직까지 미흡한 실정이다.¹⁾

따라서 제품의 개발 기간을 단축시키고 초기 설계 단계에서 내구 품질 향상과 원가절감을 위한 경량 제품의 최적 설계 기술은 반드시 확보되어야 한다. 본 연구에서는 현재 개발되고 있는 승용차용 알루미늄 시트 프레임을 대상으로 내구 수명을 고려하여 경량 최적 설계를 수행하고자 한다. 우선적으로 내구 최적 설계를 위한 기초 연구를 위하여 FMVSS 202 법규에 상응하는 시트 프레임 해석을 수행하며 규제치 만족 여부를 판단하였다. 또한, FMVSS 202와 백모멘트 내구 해석 시, 응력 집중이 예상되는 프레임 영역에 대한 변형률 측정 시험 및

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

해석을 수행하여 유한요소 모델의 검증작업을 추가적으로 수행한다. 마지막으로 순차적 근사 최적화(SAO) 기법을 시트 프레임에 적용하여 백모멘트 내구 시험 법규에 따른 내구해석 및 내구수명을 고려한 최적 설계를 수행한다. 이는 축소화된 실험계획법 및 반응표면 모델을 적용함으로써 내구수명을 고려한 경량 최적 설계를 가능하게 하였다.

2. FMVSS 202 범규에 따른 시트프레임의 유한요소해석

본 절에서는 시트 프레임의 내구 최적 설계를 수행하기 위해 앞서 시트 프레임의 구조 안전성 측면에서 기본적으로 고려되는 FMVSS 202 범규 만족 여부를 유한요소해석을 이용하여 판단하도록 하였다.

2.1 FMVSS 202 범규의 개요

승용차용 시트 프레임의 안전성 판단 기준으로 활용되는 북미안전기준(FMVSS 202)은 다음과 같다. 시트 프레임은 하부 트랙을 바닥에 완전 구속시키고 앞좌석 시트는 반드시 Head Restraints가 있어야 한다. 이 상태에서 헤드 레스트 후방으로 준정적으로 200lb(890N)의 하중을 부과하며 이때 움직인 거리가 Seat Back의 Torso line을 기준으로 4 inch (102mm)이 내여야만 한다. 또한, 하중이 가해지는 동안 프레임, 또는 등받이의 파손이 없어야 한다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

2.2 유한요소 해석모델

2.2.1 재료의 물성치

Fig. 2에서는 시트 프레임 각 부분의 명칭과 사용 재질 명을 제시하였다. 이에 대한 물성치 정보는 Table 1에 정리하였으며 해석을 위한 물성치 정보로 적용하였다.

2.2.2 해석 모델, 하중 및 경계조건

FMVSS 202 범규에 따른 해석을 수행하기 위하여 고려한 시트 프레임의 유한요소모델은 쉘 요소로 구성되며 해석 시간을 줄이기 위해 솔리드로 모델링 된 시트 트랙은 제거하였다. 단, 실제 시험의 경계 조건을 고려하여 트랙과 고정되는 하단 브라켓의 볼트 체결부위는 모든 자유도를 구속하였다.

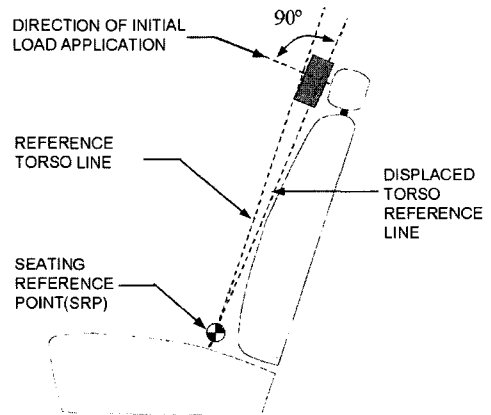


Fig. 1 Schematic view for the FMVSS 202 test

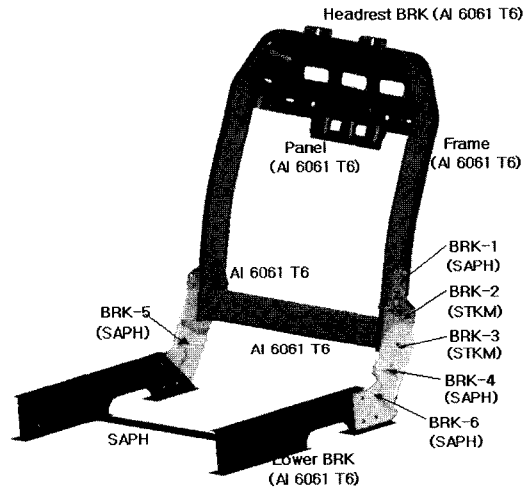


Fig. 2 Name of components and materials

Table 1 Material properties

Material	Yield stress [MPa]	Ultimate stress [MPa]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Al 6061 T6	276	329	69,000	0.33
SAPH	345	588	195,000	0.3
STKM	238	511	210,000	0.3

특히, FMVSS 202 기준에 따른 하중 부과 시, 회전 이 발생하는 리클라이너 체결 부위는 겹쳐진 부품들에 대하여 쉘 모델로 정밀하게 구현하였고, RBE 요소를 이용하여 실제에 가깝게 구속조건을 처리하였다. 오른쪽 리클라이너의 경우에는 실제 제품의 작동방식과 같게 Y 방향의 회전 자유도를 부여하며

왼쪽의 경우에는 모든 자유도를 구속한다. 이는 Fig. 3에서 그림으로 나타내었다.

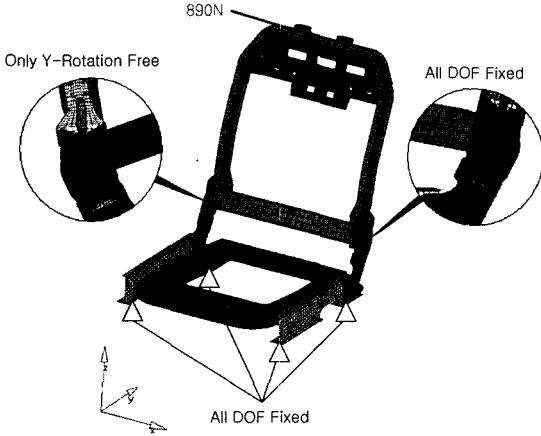


Fig. 3 Loading and boundary conditions of aluminum seat FE-model

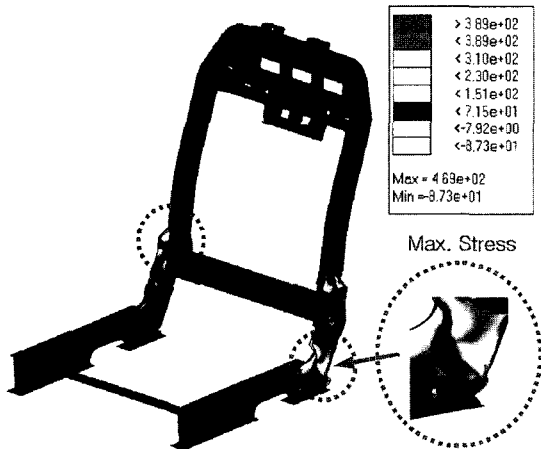


Fig. 4 Stress contour of analysis result

2.3 유한요소모델 해석 결과

앞 절에서 제시한 FMVSS 202 범규에 따라 MSC/NASTRAN을 이용하여 알루미늄 시트 프레임의 해석을 수행하였다. Fig. 4에서는 해석 결과를 응력분포도로 나타내었으며 최대 응력이 BRK-6과 BRK-1에서 발생하여 최대값 446.2 MPa를 나타냄을 확인하였다. 이는 사용된 물성치인 SAPH의 극한강도(588 MPa) 이하 값을 가짐으로 파손이 발생하지 않음을 예측할 수 있으며 헤드레스트 끝단의 최대 변

형량이 12.3mm를 나타내어 기준치인 102mm이내임을 확인하였다. 따라서 본 알루미늄 프레임은 FMVSS 202 범규를 모두 만족하고 있음을 알 수 있었다.

3. 시트 프레임의 변형률 측정 시험 및 해석

앞 절에서 수행한 FMVSS 202 해석을 통해서 예상되는 응력집중 영역에 대하여 변형률 측정 시험 및 해석을 수행하였다. 이는 다음절에서 수행하는 백모멘트 내구 해석의 내구 수명과 밀접한 연관이 있으므로 변형률 측정을 통한 응력해석을 통하여 유한요소 모델의 정확도를 판단하고자 하였다. 변형률 측정 시험은 프레임 응력집중 영역에 대하여 Fig. 5와 같이 로제트단축 스트레인 게이지를 부착하고, 프레임 상단에 유압장비를 이용한 하중을 추가하여 변형률을 산출한다. 또한, 주응력,²⁾ 주변형률²⁾ 관계식 및 후크²⁾의 법칙을 적용하여 응력 해석을 수행한다. 실험 결과에 대한 하중-응력 선도는 Fig. 6에 나타내었으며 하중에 대한 응력 값이 거의 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

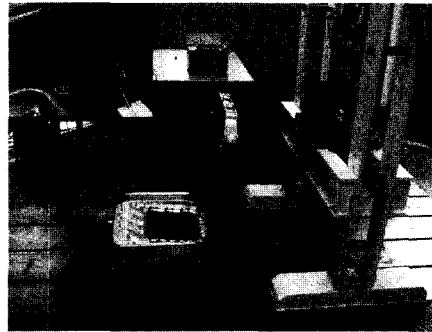


Fig. 5 Equipment for strain measurement

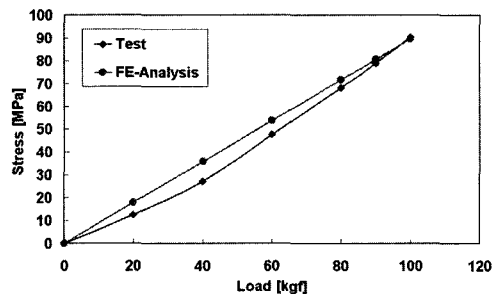


Fig. 6 Load-stress diagram

아울러 유한요소모델에 대하여 시험과 동일한 하중을 부과함에 따른 응력 값을 함께 나타내어 시험 응력 값과 해석 결과를 비교할 수 있다. 해석 모델의 경우 응력 값의 선형성은 더욱 분명함을 알 수 있었고, 시험과의 응력 값 오차는 0.8%~30%임을 확인하였다.

4. 시트프레임의 내구 성능을 고려한 경량 최적설계

4.1 백모멘트 내구 시험의 개요

일반적으로 시트프레임은 FMVSS 202 법규를 만족하면 내구 법규에 따른 백모멘트 내구 시험을 추가적으로 수행하여 내구성을 평가하게 된다. 백모멘트 내구 시험은 Fig. 7과 같이 하단 프레임을 구속하고 74kgf의 반복하중을 유압장비를 이용하여 가하며 4만회 동안 용접부, 볼트 및 리벳 연결 부위 등의 파손이 없어야 한다.

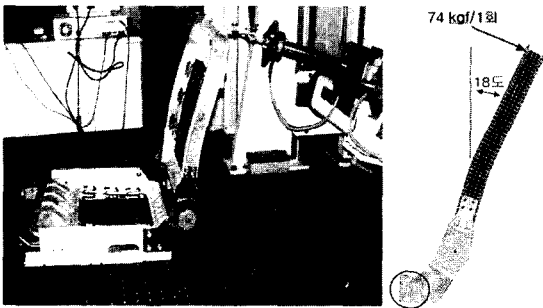


Fig. 7 Equipment for back moment durability test

4.2 설계변수 선정 및 민감도 해석

앞 절에서의 유한요소해석, 변형율 시험 및 응력 결과를 토대로 내구 최적 설계를 위한 설계변수를 선정하였다. 설계변수는 BRK-1~BRK-6의 두께, t_1 ~ t_6 , Lower BRK의 두께 t_7 로 선정하였다. 또한, 변수들에 대한 초기 설계치와 상/하한치는 Table 2에 정리하였다. 다음으로 설계변수에 대한 피로수명의 민감도를 계산하기 위하여 설계변수의 상/하한치에 대한 2-수준 직교배열표인 Plackett-Burman³⁾을 적용하였고 이에 상응하는 응력 해석 및 MSC-Fatigue⁴⁾를 이용한 내구 수명 해석 결과들을 Table 3에 정리하였다.

Table 3의 결과를 이용하여 민감도 해석을 수행하여 보면 Fig. 8과 같이 응력 및 내구 수명에 대한 민감도 바 차트를 통하여 설계 변수 변화에 따른 각각의 성능지수 변화를 예측할 수 있다. 그러나 각각의 설계 변수에 따라서 민감도 결과가 선형적인 증가 혹은 감소를 나타내지 않고 불룩 혹은 오목한 형상을 나타내어 본 민감도 해석만으로는 정확한 최적해를 얻기가 어려움을 판단하였다. 따라서 4.3절에서는 반응표면 모델 생성을 통하여 순차적인 근사 최적화를 수행하여 내구 설계를 완성하도록 하였다.

Table 2 Design variables and their limits

Design Variables	Lower Value	Center Value	Upper Value
BRK-1 t_1 [mm]	3.1	3.2	4.0
BRK-2 t_2 [mm]	2.8	4.0	4.6
BRK-3 t_3 [mm]	2.8	4.0	4.6
BRK-4 t_4 [mm]	1.8	2.3	2.8
BRK-5 t_5 [mm]	2.4	3.2	3.8
BRK-6 t_6 [mm]	3.0	3.2	3.8
Low. BRK t_7 [mm]	3.2	5.0	5.8

Table 3 Analysis results for DOE table

Runs	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	t_4 [mm]	t_5 [mm]	t_6 [mm]	t_7 [mm]	Mass [kg]	Stress [MPa]	Fatigue life [Cycles]
1	4.0	4.6	4.6	1.8	3.8	3.0	3.2	4.243	334.3	4.9285E5
2	3.1	4.6	4.6	2.8	2.4	3.8	3.2	4.153	481.9	3.2950E4
3	3.1	2.8	4.6	2.8	3.8	3.0	5.8	4.694	455.2	1.2596E4
4	4.0	2.8	2.8	2.8	3.8	3.8	3.2	4.015	348.9	4.3151E5
5	3.1	4.6	2.8	1.8	3.8	3.8	5.8	4.738	470.4	2.2400E4
6	4.0	2.8	4.6	1.8	2.4	3.8	5.8	4.620	472.8	3.2773E4
7	4.0	4.6	2.8	2.8	2.4	3.0	5.8	4.646	332.4	6.3340E5
8	3.1	2.8	2.8	1.8	2.4	3.0	3.2	3.698	466.7	1.4494E4
9*	3.2	4.0	4.0	2.3	3.2	3.2	5.0	4.504	446.2	3.1800E4

*analysis result of the initial design

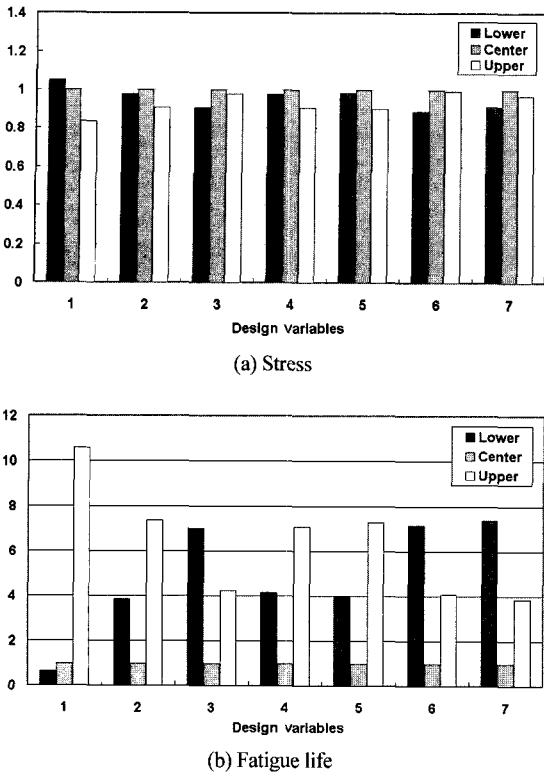


Fig. 8 Design sensitivity for stress and fatigue life

4.3 반응표면모델 및 순차적 근사최적화 기반의 내구 최적 설계

Table 3에서 적용한 직교배열표는 Plackett-Burman Design에 설계 중심점을 포함한 ISCD-II(Incomplete Small Composite Design-II) 실험계획법으로써 실험점을 획기적으로 줄인 방법이다. 따라서 본 논문에서는 이를 기반으로 한 반응표면 모델을 생성하도록 하였고 근사 모델의 미지수 보다 실험점이 부족함으로 인한 특이 현상을 해결하기 위하여 특이해 분해 기법 기반의 최소자승법을 적용한다.^{5,6)} 또한, 반응표면 모델을 이용한 근사 최적설계는 확장 라그랑지 승수 기법을 적용하였고 보수적 최소자승법을 고려하여 근사 모델 생성 시, 질량은 절대평가, 응력은 과대평가, 그리고 내구 수명은 과소평가 근사모델을 생성하였다.^{5,6)} 내구 수명을 고려한 경량 최적화 설계 정식을 나타내보면 식 (1)~(4)와 같다. 응력과 피로수명에 대한 제약조건식 (2)와 (3)에서 사용된 S_a 와 f_a 는 Table 5에 정리한 초기 설계치에 상응하는 응력과 법규 만족치이다. 그리고 식 (4)의 설계 변수 상/하

한치는 Table 2를 통해서 알 수 있다. 상기의 근사 최적화문제는 ISCD-II 직교배열표와 반응표면모델을 이용하는 R-INOPL⁶⁾을 이용하여 수행하였다.

$$\text{Minimize } mass(T) \tag{1}$$

subject to

$$Stress(T)_{\max} \leq S_a \tag{2}$$

$$Fatigue\ Life(T)_{\min} \geq F_a \tag{3}$$

$$T_i^L \leq T_i \leq T_i^U, \quad i = 1, 2, 3. \tag{4}$$

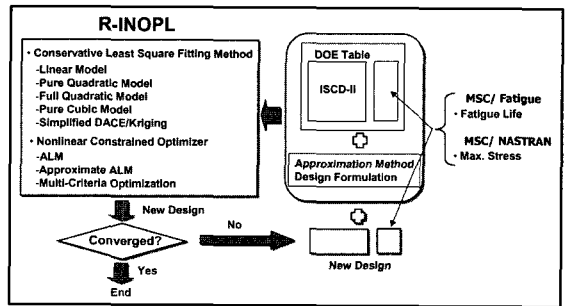


Fig. 9 SAO process using the R-INOPL

본 논문에서 사용한 R-INOPL 기반 내구 최적 설계 수행 과정을 Fig. 9에 제시하였다. 프로그램 수행 과정을 살펴보면 먼저 직교배열표와 이에 상응하는 성능지수들 및 최적화 제약 조건 등을 입력파일에 작성하고 프로그램을 수행하여 최초의 근사 최적치를 얻는다. 그리고 얻어진 1차 최적 설계 변수들을 적용한 MSC/NASTRAN과 MSC/Fatigue 해석을 수행하여 최대 응력과 내구 수명 결과를 산출한다. 또한, 새롭게 산출한 결과 데이터를 1차 최적 설계 변수들과 함께 R-INOPL의 입력 파일에 업데이트 하여 프로그램을 반복 수행한다. 이는 모든 제약 조건들이 수렴할 때 까지 반복하게 되는데 이러한 순차적인 최적화 기법을 통하여 반응표면모델은 보다 정확한 근사 해를 찾게 된다. 본 연구는 5회의 SAO 과정을 거쳐서 수렴하였으며 그 결과들을 Table 4와 Fig. 10에 정리하였다. 최종적으로 수렴한 내구 최적 모델은 Table 5에서 제시한 바와 같이 초기 모델 대비 16.7%의 중량감소를 이루는 동시에 최대 응력을 감소시키고 내구 수명을 약 3.6배 증가시킬 수 있었다. 물론 내구수명을 향상시킨 경량 최적설계 결과

는 해석을 통한 예측치이며 3절에서 수행한 시험과 해석 결과의 오차를 상고해 볼 때, 추후 시트프레임의 내구 시험을 수행하는 검증 작업이 필요하다. 본 논문에서는 7개의 설계변수를 고려한 알루미늄 시트프레임의 내구 최적 설계를 위해서 ISCD-II 직교배열표의 9번 해석과 순차적 최적화 기법을 통하여 5번의 해석이 추가적으로 요구되어 총 14번의 해석만으로도 내구 최적 설계를 가능하게 하였다.

Table 4 Summary of optimization history

Iter.	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	Mass [kg]	Stress [MPa]	Fatigue Life [Cycles]
0	3.2	4.0	4.0	2.3	3.2	3.2	5.0	4.504	446.2	3.1800E4
1	3.501	2.8	2.8	2.8	3.8	3.1	3.706	4.033	393.6	5.7178E4
2	3.544	3.256	3.338	2.8	3.8	3.0	3.2	3.992	382.3	7.4405E4
3	3.630	2.8	2.8	2.126	2.418	3.0	3.2	3.757	383.2	1.2103E5
4	3.623	2.8	2.8	1.875	2.449	3.0	3.2	3.75	384	1.1731E5
5	3.623	2.8	2.8	1.875	2.449	3.0	3.2	-	-	-

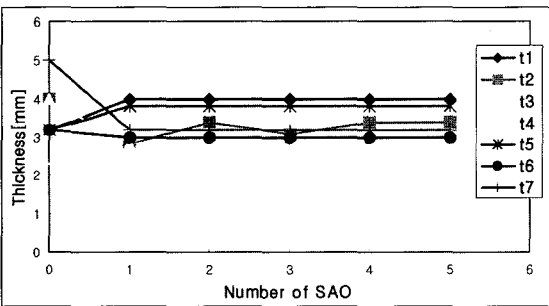


Fig. 10 History of design variables

Table 5 Comparison between initial and final design

	Initial Design	Final Design	Effect
Mass [kg]	4.504	3.75	16.7% (reduction)
Stress [MPa]	446.2	384	13.9% (reduction)
Fatigue life [cycles]	3.18E+ 04	1.1731E+ 05	369% (increase)

5. 결론

본 논문에서는 알루미늄 경량 시트의 내구 성능을 향상시키기 위한 최적 설계를 수행하였다. 이를 위한 기초 연구로써 FMVSS 202 법규에 상응하는 시트 프레임 해석을 수행하여 규제치를 만족하고

있음을 확인하였다. 또한, FMVSS 202와 백모멘트 내구 해석 시, 응력 집중이 예상되는 프레임 영역에 대한 변형률 측정 시험 및 해석을 수행하여 유한요소 모델의 정확도를 가늠하였다. 또한, 순차적 근사 최적화(SAO) 기법을 시트 프레임에 적용하여 백모멘트 내구 시험 법규에 따른 내구해석 및 내구수명을 고려한 최적 설계를 수행하였다. 이는 축소화된 실험계획법 및 반응표면 모델을 적용함으로써 해석 시간을 줄이고 내구수명을 고려한 경량 최적 설계를 가능하게 하였다. 그 결과 알루미늄 시트프레임의 16.7% 중량 감소 및 3.6배의 내구 수명 향상 효과를 얻을 수 있었다. 이는 추후 백모멘트 내구시험을 통하여 검증되어야 할 것이다. 본 논문에서 제시한 최적화 기법은 향후 시트프레임의 초기 설계 단계에서 내구 품질 확보와 원가 절감 및 개발 시간의 단축에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2004년 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

References

- 1) M. S. Kim, C. W. Lee, S. H. Son, H. J. Yim and S. J. Heo, "Shape Optimization for Improving Fatigue Life of a Lower Control Arm Using the Experimental Design," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.161-166, 2003.
- 2) Dary L. Logan, Mechanics of Materials, Harper Collins Publisher Inc., U.S.A., 1991.
- 3) W. M. John Peter, Statistical Design and Analysis of Experiments, SIAM, Philadelphia, pp.184-186, 1998.
- 4) MSC-Fatigue Quick Start Guide Ver.9, MSC Software, pp.69-73, 2001.
- 5) M. S. Kim and S. J. Heo, "Conservative Quadratic RSM Combined with Incomplete Small Composite Design and Conservative Least Squares Fitting," KSME International Journal, Vol.17, No.5, pp.705-714, 2003.
- 6) M. S. Kim, R-INOPL Ver. 1.5: User's Guide for Response Surface Modeling and Approximate Optimization, 2003.