

직교배열표를 이용한 승객보호장구의 설계

Design Recommendations of the Occupant Protection Systems Using Orthogonal Arrays

임재문*, 박경진**
Jae Moon Lim, Gyung-Jin Park

ABSTRACT

Using the orthogonal arrays and the occupant analysis software based on the multi-body dynamics, two iterative design algorithms are proposed to improve the initial design of the occupant protection systems. Algorithm 1 sequentially moves the narrow design space within the upper and the lower design limit. Algorithm 2 sequentially reduces the relatively wide design space. Each design algorithm is composed of two levels. The first level is to improve the characteristics of the crash performance considering the noise factors. In order to obtain the robust design, the second level reduces the variations due to the tolerance of the design variable. To utilize the algorithm 1, HIC(Head Injury Criterion), 3 msec criterion value of the chest acceleration and the femur load decreased by 27.4 %, 10.4 % and 55.8 %, respectively. To utilize the algorithm 2, the results decreased by 38.0 %, 10.5 % and 3.0 %, respectively.

주요기술용어 : Occupant Analysis(승객거동해석), Occupant Protection System(승객보호장구), Orthogonal Arrays(직교배열표), Iterative Design Algorithm(반복설계 알고리즘), Robust Design(강건설계), Head Injury Criterion(HIC, 머리상해치)

Nomenclature

F_{obj} : objective function
 F_{Femur} : femur load
 A_{Head} : head acceleration
 A_{Chest} : chest acceleration
 $a(t)$: resultant acceleration

* 정회원, 대우자동차(주) 상용차부문

** 정회원, 한양대학교 기계산업공학부

1. 서론

다물체 동역학(multi-body dynamics)을 이용한 승객거동해석(occupant analysis)은 자동차 충돌 시에 조향계나 대쉬 보드(dash-board or instrument panel) 등과의 2차 충돌에 의한 승객의 거동을 관찰하고 이에 따른 상해치를 감소시키기 위하여 에어백, 안전벨트 등과 같은 승객보호장구를 설계하는데 주요한 점을 두고 있다.¹⁻²⁾ 데이터의 축적이 많이 되어 있고 숙련된 엔지니어

어가 모델을 구성하여 해석한다면 비록 강제 모델을 사용하더라도 승객과 차량내부와의 2차 충돌현상을 실제와 가깝게 나타낼 수 있는 해석결과를 구할 수 있다.¹⁻²⁾ 또한, 승객거동해석은 유한요소해석에 근거한 차체충돌해석보다 해석시간이 매우 짧으므로, 많은 함수 계산을 필요로 하는 최적설계와 같은 설계 기법의 적용도 비교적 용이하다.²⁻⁵⁾

해석결과를 설계에 반영시키는 과정에서 적절한 설계 기법을 어떻게 적용하는가가 매우 중요하다. 승객거동해석을 통한 보호장구의 설계 개선에는 최적화기법과 실험계획법을 이용하는 방안이 일반적으로 적용된다.²⁻⁵⁾

본 논문에서는 직교배열표를 이용하는 동시에 최적설계기법의 개념을 일부 도입하여, 초기 설계를 개선시킬 수 있는 승객보호장구의 설계 방안을 개발하고자 한다.^{3, 5-7)} 직교배열표를 이용하는 방안은 두 가지로 구분하여 반복설계 알고리즘(iterative design algorithm)을 개발한다. 각각의 알고리즘은 두 단계(level)로 구성되며, 설계변수의 공차와 잡음인자의 변동(variance)에 따른 성능의 변동을 최소화할 수 있는 강건설계(robust design)를 구현하고자 한다.^{6, 8)} 승객거동해석 소프트웨어는 SAFE를 사용한다.⁹⁾

2. 목적함수의 정의

정면충돌시의 승객의 상해치에 대한 기준은 FMVSS 208, 자동차 안전기준 시행 세칙 등에 규정되어 있으며, 시속 48 km의 속도(30 mph)로 차량을 고정벽(barrier)에 충돌시켰을 때 인체 모형(dummy)에서 측정된 머리와 가슴 및 대퇴부의 상해치를 제한하고 있다.¹⁰⁻¹¹⁾ 머리 상해치를 나타내는 HIC는 1000으로 제한되어 있으며 식 (1)에 HIC를 구하는 식을 나타내었다. 가슴 상해치와 관련하여 흉부의 가속도가 3 msec 이상 연속적으로 중력가속도의 60배를 초과하지 않고, 대퇴부에 작용하는 하중은 10,000 N(1020 kgf)을 초과하지 않도록 규정하고 있다.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

여기에서, $a(t)$ 는 중력가속도의 배수로 표시되는 머리의 합성가속도(resultant acceleration)이며, t_1 과 t_2 는 충돌 시에 36 msec 이하의 간격을 갖는 임의의 두 순간을 나타낸다.

승객의 상해치를 감소시키기 위하여 설계에 이용되는 목적함수는 일반적으로 HIC, 3 msec 동안의 가슴의 최대가속도 값 및 대퇴부에 작용하는 하중에 적절한 가중치를 부여하여 식 (2)와 같이 다목적함수로 구성한다.^{2, 4)} 이는 각각의 상해치들이 인체에 미치는 영향이 다른 것을 나타내고자 한 것으로 판단된다.

$$F_{obj}(x) = 0.6 \times \left(\frac{HIC}{1000} \right) + 0.35 \times \left(\frac{C_{3msec}}{60} \right) + \frac{0.05}{2} \times (F_{Femur}^L + F_{Femur}^R) \quad (2)$$

식 (2)에 나타낸 HIC의 경우 식 (1)과 같은 형태로 적분되므로, 큰 피크를 갖는 가속도 곡선의 시간 간격이 좁을 경우 HIC가 감소할 수도 있다.¹²⁾ 이것은 달리 설명하면 머리, 가슴의 가속도 곡선과 대퇴부에 작용하는 하중 곡선의 특성이 바람직하지 않은 형태로 변경되는 것을 의미한다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 가속도 곡선이나 하중 곡선의 미분 값의 제곱 합을 이용하는 것이 제안되고 있다.⁹⁾ 이에 대한 목적함수는 식 (3)과 같이 나타내었으며, 최적조합을 결정할 때 인자들의 효과를 적절하게 반영하기 위하여 상용로그를 취하였다.

$$F_{obj}(x) = 0.6 \times \log_{10} \left[\int \left(\frac{dA_{Head}}{dt} \right)^2 dt \right] + 0.35 \times \log_{10} \left[\int \left(\frac{dA_{Chest}}{dt} \right)^2 dt \right] + \frac{0.05}{2} \times \log_{10} \left[\int \left(\frac{dF_{Femur}^L}{dt} \right)^2 dt + \int \left(\frac{dF_{Femur}^R}{dt} \right)^2 dt \right] \quad (3)$$

여기에서, A_{Head} 는 머리의 가속도 곡선을 나

타내고, A_{Chest} 는 가슴의 가속도 곡선을 나타낸다. F_{Femur}^L , F_{Femur}^R 는 각각 좌우측 대퇴부에 작용하는 하중을 나타낸다. 단, 가속도 곡선과 하중 곡선의 미분 값은 유한차분법으로 구한다. 이와 같이 정의된 목적함수를 최소화하면 HIC 등과 같은 상해치를 감소시킬 수 있으며 가속도 곡선이나 하중 곡선도 바람직한 형태로 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

3. 직교배열표를 이용한 반복 설계 알고리즘

직교배열표를 이용하는 방안은 두 가지로 구분하여 반복 설계 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘 1은 최적화기법중 SLP(Sequential Linear Programming)에서 사용하는 이동 한계(move limit)의 개념을 도입하여 범위가 작게 정의된 설계 영역을 순차적으로 이동시키면서 설계 개선안을 구하는 방안이다.⁷⁾ 알고리즘 2는 기존의 연구에서 제안된 개념을 이용한 것이며,³⁾ 설계 영역을 설계 변경이 가능한 범위내에서 넓게 잡고 이를 순차적으로 좁혀나가면서 개선된 설계를 구하는 방안이다.

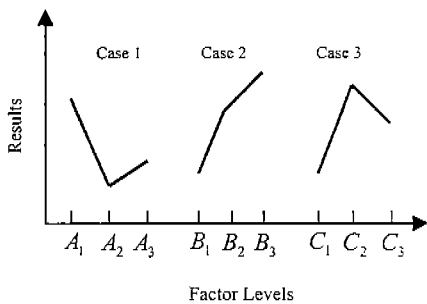


Fig. 1 Plot of factor effects

각각의 알고리즘은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 초기 설계 결과를 중심으로 나타나는 일반적인 경향을 이용하여 새로운 설계 영역을 구성하고자 하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 최적해가 존재할 것으로 기대되는 곳은 Case 1의 경우에는

A_2 부근이며 Case 2의 경우에는 B_1 부근이고 Case 3의 경우에는 C_1 부근이다. 따라서, 다음 반복진행에서 새로운 설계 영역은 A_2 , B_1 , C_1 와 같은 값을 중심으로 다음의 알고리즘과 같이 재구성된다. Case 3과 같은 경우에는 C_3 부근도 가능성이 있으나 본 연구에서는 이를 제외시켰다.

알고리즘 1

- Step 1 : 초기 설계 값을 중심으로 상한 값과 하한 값의 범위를 작게 잡고, 1단계로 $L_{36}(3^{13})$ 직교배열표를 이용하여 설계 개선 여부를 검토한다.
- Step 2 : 설계가 개선되지 않은 경우 Fig. 1의 경향을 이용하여 Case 1과 같은 경우에는 설계 영역을 그대로 유지한다. Case 2와 같은 경우에는 B_3 를 제외시키고, B_1 보다 작은 B_0 를 설정하여 B_0 , B_1 , B_2 로 설계 영역을 재구성한다. Case 3도 Case 2와 동일하다.
- Step 3 : 2단계로 $L_{18}(3^7)$ 직교배열표를 이용하여 설계변수들의 공차에 따른 강건성을 검토하며 평균과 표준편차를 합한 값이 초기 설계 값보다 작으면 만족하는 것으로 한다.

알고리즘 2

- Step 1 : 초기 설계 값을 중심으로 상한 값과 하한 값의 범위를 설계 허용 범위 내에서 넓게 잡고, 1단계로 $L_{36}(3^{13})$ 직교배열표를 이용하여 설계 개선 여부를 검토한다.
- Step 2 : Case 1의 경우에 $A_1 \sim A_2$ 구간을 2등분하여 구한 값인 A_0 와 기존의 A_2 , A_3 로 새로운 영역을 구성한다. Case 2와 같은 경우에는 B_3 를 제외시

키고 $B_1 \sim B_2$ 구간을 2등분하여 B_0 를 구하고 B_1, B_0, B_2 로 설계 영역을 재구성한다. Case 3과 같은 경우에는 Case 1과 유사하게 $C_2 \sim C_3$ 구간을 2등분한 곳을 C_0 로 정하고 C_1, C_2, C_0 로 설계 영역을 재구성한다.

Step 3 : 알고리즘 1과 동일함.

4. 정면충돌 시의 승객보호장구의 설계 예 및 고찰

4.1 정면충돌의 모델링 및 해석결과

다물체 동역학을 이용한 승객거동해석 소프트웨어로 차량 충돌 현상을 해석함에 있어서 가장 중요한 사항은 충돌 시험 시의 상황을 적절하게 모델링하여 입력하는 것이다.¹⁾ 차량의 충돌 특성은 고정벽 시험(barrier test)에서 구한 차량의 시간에 따른 감속도(deceleration) 데이터를 입력하고 차체와 승객 및 에어백, 조향계 등은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 질량과 부피가 있는 강체, 평면, 스프링-댐퍼 등으로 모델링하였다.^{1, 3, 9, 13)} 승객은 Hybrid III 인체모형(dummy)을 이용하였으며, 안전벨트는 여러 개의 기준점을 연결시켜 정확성을 향상시킨 하니스 모델(harness model)을 이용하였다.^{9, 13)}

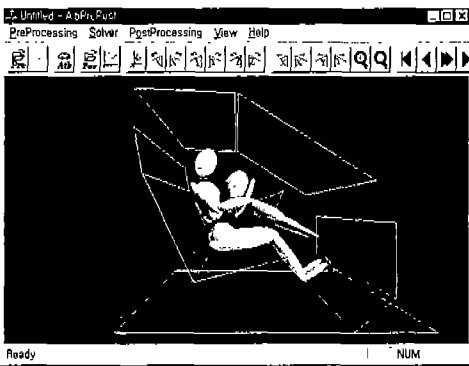


Fig. 2 Simulation model for the frontal impact

해석 모델의 타당성은 Table 1에 나타난 것과 같이 실차 시험 결과와 비교하여 검토하였다.⁹⁾ 대퇴부에 작용하는 하중은 좌우측을 개별적으로 비교하지 않고 합한 값으로 비교하였다. 대퇴부에 작용하는 하중은 좌우측에서 개별적으로 측정되는 값이 측정시마다 달라질 수 있지만 두 값을 합한 것은 일정할 것으로 판단되었기 때문이다. Table 1에 나타난 것과 같이 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 이 해석 결과를 초기 설계 값에 의한 결과로 정하였다.

Table 1 Analysis and test results for the frontal impact

	HIC	Chest Acceleration (G)	Femur Load (kgf)
Analysis	314.62	50.82	477.59
Test	314.00	-	472.80
Error (%)	0.20	-	1.00

4.2 설계 예 및 고찰

설계변수와 잠음인자의 초기치를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타난 것과 같이, 설계 변수는 인플레이터(inflator)로부터 에어백으로의 질량흐름율(mass flow rate), 에어백의 부피(volume), 점화시기(firing time), 가스 방출구 면적(vent hole area), 안전벨트의 변형을(strain) 및 무릎판(knee bolster)의 강성(stiffness)과 같이 6개로 구성하며 기존의 연구를 감안하여 선정하였다.²⁻⁵⁾ 잠음인자는 충돌 파형(crash pulse), 조향계 또는 에어백의 장착 각도의 변동, 설계 변수의 공차 등으로 선정하였다.

알고리즘 1을 이용하는 경우, 설계 변수들의 이동 한계는 초기 설계 값의 5% 정도로 하였으며, 설계 변수의 특성에 따라 적절하게 선정하였다. 알고리즘 2는 전체 설계 영역을 초기 설계 값의 30% 범위로 한정시켰으며, 이 범위 내에서 상한 값 또는 하한 값에 접근하면 설계 영역을 더 이상 이동시키지 않았다. 잠음인자인 충돌 파

형의 경우 1 수준은 원래 과형보다 13 % 정도 작은 값을 가지며, 3 수준은 20 % 정도 큰 피크 값을 갖도록 구성하였다. 조향계의 장착 각도는 초기 값에서 상하로 5 도씩 변동을 주었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 알고리즘 1을 이용하여 구한 결과를 나타내었다. Fig. 3에는 설계 변수들의 이력을 나타내었으며, Fig. 4에는 목적함수와 주요 상해치에 대한 이력(history)을 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 첫 번째 반복 진행부터 세 번째까지는 초기 설계보다 좋지 않은 결과를 주지만, 네 번째부터는 일정한 값으로 접근하면서 목적함수 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 설계 영역이 안정된 결과를 주는 구간으로 이동하면서 생긴 현상으로 판단된다.

Table 2 Initial values of design variables and noise factors

Factors	Initial Values
Inflator(Mass Flow Rate)	1 (Scale Factor)
Airbag(Volume)	60 liter
Airbag(Vent Hole Area)	36 cm ²
Airbag(Firing Time)	29 msec
Belt(Strain)	1.0 (Scale Factor)
Knee Bolster(Stiffness)	1.0 (Scale Factor)
Crash Pulse	24 G (Peak Value)
Steering System(Angle)	26 Degree

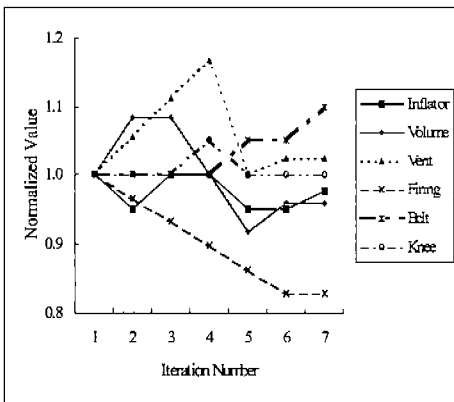


Fig. 3 Histories of design variables (Algorithm 1)

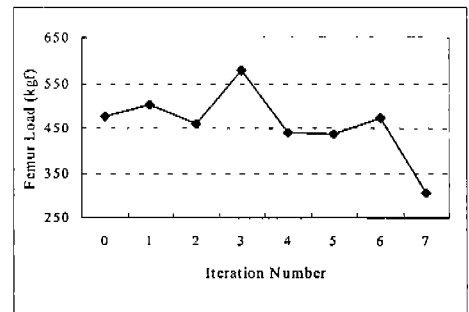
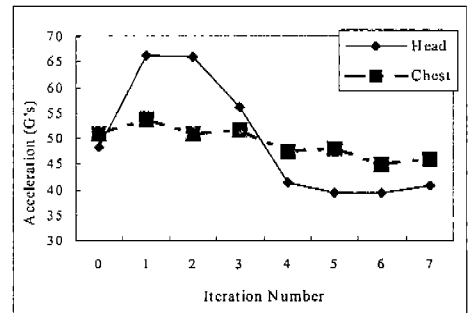
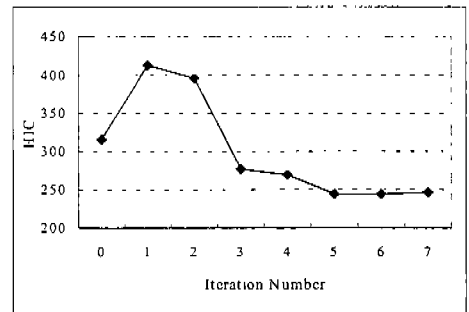
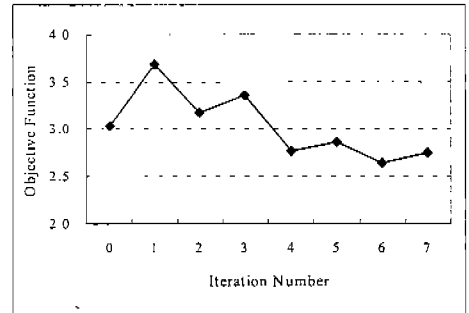


Fig. 4 Design histories for the objective function and the injury characteristics (Algorithm 1)

네 번째 이후의 반복 진행에서 각각의 강건성을 검토한 결과 일곱 번째 반복 진행에서 상해치 지수 IC의 평균이 0.432, 표준편차 0.012로 수렴

조건을 만족하였다.

Fig. 5와 6에 알고리즘 2를 이용하여 구한 결과를 나타내었다. Fig. 5에는 설계 변수들의 이력을 나타내었으며, Fig. 6에는 반복진행에 따른 목적함수와 주요 상해치에 대한 이력을 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 것과 같이 알고리즘 2를 이용하는 경우에 목적함수 값은 초기부터 감소하지만 상해치중 중요도가 높은 HIC가 감소되지 않고 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 첫 번째 반복 진행에서 결정된 설계 변수들의 조합이 가슴과 대퇴부의 상해치와 관계된 특성치는 개선시켰지만 머리의 상해치와 관계된 특성치는 개선시키지 못한 것을 알 수 있다. 다섯 번째 반복 진행에서 초기 설계보다 개선된 설계를 구했으며, 상해치 지수 IC의 평균은 0.418이며 표준편차는 0.011이므로 강건성을 만족시킨다.

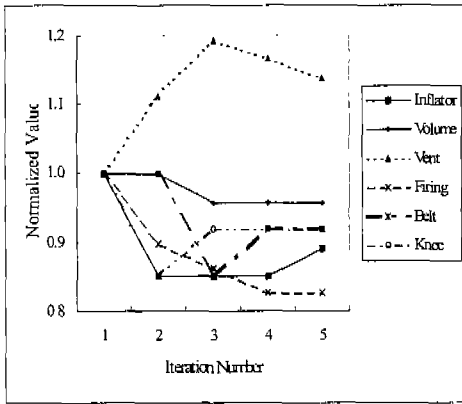


Fig. 5 Histories of design variables (Algorithm 2)

알고리즘 1과 2를 이용하여 결과를 초기 값과 비교하여 Table 3에 나타내었으며, 머리와 가슴의 가속도 곡선 및 대퇴부에 작용하는 하중 곡선을 Fig. 7에서 Fig. 10에 나타내었다. Table 3에 나타낸 것과 같이, 알고리즘 1을 이용하는 경우에 상해치 지수 IC는 초기 설계보다 16.9 % 개선되며, HIC는 27.4 %, 가슴의 최대가속도는 10.4 %, 대퇴부에 작용하는 하중은 55.8 % 개선된다. 알고리즘 2를 이용하는 경우에 상해치 지

수 IC는 초기 설계보다 19.2 % 개선되며, HIC는 38.0 %, 가슴의 최대가속도는 10.5 %, 대퇴부에 작용하는 하중은 3.0 % 개선된다.

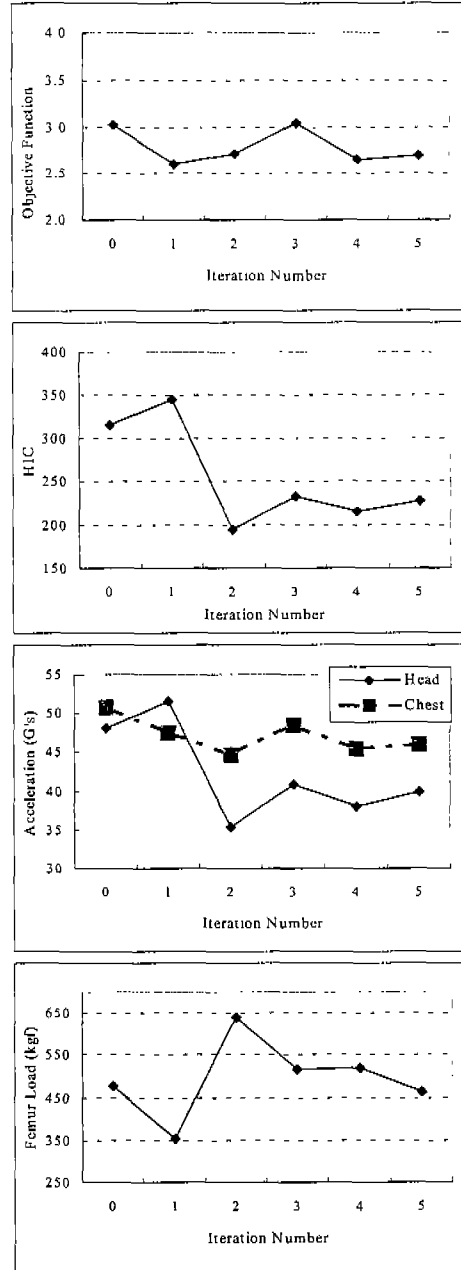


Fig. 6 Design histories for the objective function and the injury characteristics (Algorithm 2)

Fig. 7과 8에 나타낸 것과 같이 머리와 가슴의 가속도 곡선을 개선시키는 것은 알고리즘 1과 2가 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 대퇴부에 작용하는 하중 곡선의 경우에는, Fig. 9와 10에 나타낸 것과 같이 알고리즘 1이 보다 효과적인 것을 알 수 있다.

Table 3 Initial and final results for the frontal impact

	HIC	Chest Acceleration (G)	Femur Load (kgf)	IC
Initial	314.62	50.82	477.59	0.497
Algorithm 1	246.94	46.05	306.59	0.425
Algorithm 2	227.78	46.01	463.60	0.417

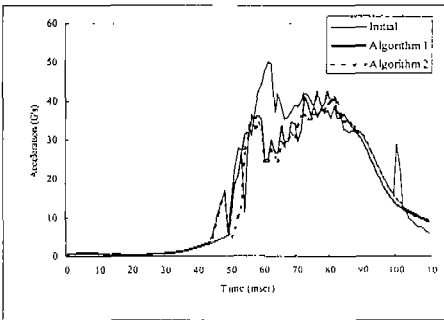


Fig. 7 Head acceleration curves of the initial and the final results

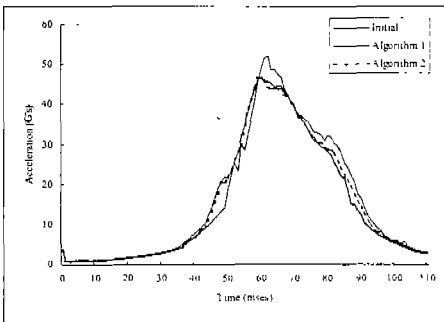


Fig. 8 Chest acceleration curves of the initial and the final results

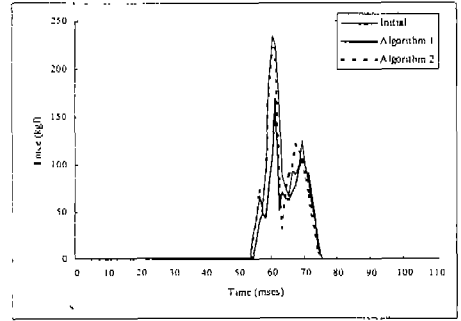


Fig. 9 Left femur load curves of the initial and the final results

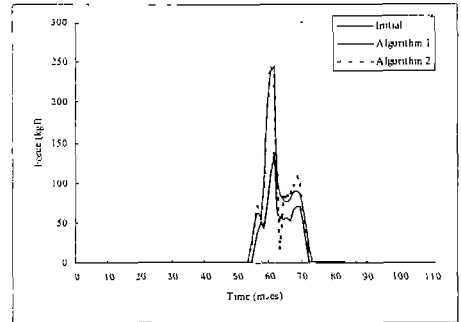


Fig.10 Right femur load curves of the initial and the final results

5. 결론

다물체 동역학에 근거한 승객거동해석 소프트웨어인 SAFE와 직교배열표를 이용하여 승객의 안전도를 향상시킬 수 있는 두가지 설계 방안을 개발하였다. 알고리즘 1은 설계 초기 값에서 상하 5% 정도로 이동 영역을 정하고, 이 설계 영역을 이동시키는 방안이다. 알고리즘 2는 설계 변경 가능한 한도 내에서 설계 영역을 정하고 이를 순차적으로 좁혀 나가는 방안이다. 목적함수는 각각의 알고리즘에서 2 단계로 구분하여 사용하였다. 첫 번째 단계에서는 머리와 가슴의 가속도 곡선 및 대퇴부에 작용하는 하중 곡선의 미분값의 제곱 합으로 다목적함수로 구성하였다. 이와 같이 구성된 목적함수는 반복 진행 횟수가 증

가할수록 곡선의 피크를 보다 완만하게 하는 것을 알 수 있었다. 두 번째 단계에서는 수렴조건으로 HIC, 가슴의 최대가속도 값 및 대퇴부에 작용하는 하중으로 구성된 상해치 지수 IC의 평균과 표준편차를 검토하여 강건설계 여부를 판단하였다. 각각의 알고리즘은 머리와 가슴의 상해치를 감소시키는 데에는 큰 차이가 없으며, 알고리즘 1은 대퇴부의 상해를 감소시키는 경우에 효과적인 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Prasad, P. and Chou, C. C., "A Review of Mathematical Occupant Simulation Models, Crashworthiness and Occupant Protection in Transportation Systems", ASME, AMD-Vol. 106, BED-Vol. 13, pp.95-112, 1989.
2. Bennet, J. A. and Park, G. J., "Automotive Occupant Dynamic Optimization", Shock and Vibration, Vol. 2, No. 6, pp. 471-479, 1995.
3. 박영선, 이주영, 박경진, "직교배열표를 이용한 승용차의 에어백의 설계", 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제2호, pp. 62-76, 1995.
4. Hou, J. F., Tomas, J. and Sparke, L., "Optimisation of Driver-Side Airbag and Restraint System by Occupant Dynamics Simulation", 39th Stapp Car Crash Conference Proceedings, P-299, SAE Paper No. 952703, 1995.
5. Narwani, G. and Subbian, T., "Optimization of Passenger Airbags Using Occupant Simulator", SAE Paper No. 930240, 1993.
6. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 1996.
7. Rao, S. S., "Engineering Optimization: Theory and Practice", John Wiley & Sons, 3rd Edition, 1996.
8. Kunjur, A. and Krishnamurthy, S., "A Multi-Criteria Based Robust Design Approach", <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/Krishnamurthy/papers/robust.html>, 1997.
9. 임재문, "차량충돌시 승객거동해석을 위한 소프트웨어의 개발 및 관련 부품의 설계방안 제시", 한양대학교 박사학위 청구논문, 1997.
10. 49CFR, Part 571, FMVSS 208, "Occupant Crash Protection", DOT, NHTSA, USA.
11. "자동차 안전기준 시행 세칙", 1993, 건설교통부.
12. 임재문, 김창환, 박경진, "구와 원환체를 이용한 에어백의 모델링 및 비정상위 치시의 승객 거동 해석", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제1호, pp.96-109, 1996.
13. Obergefell, L. A., Gardner, T. R., Kaleps, I. And Fleck, J. T., "Articulated Total Body Model Enhancements", Report No. AAMRL-TR-88-043, 1988.