

승객 상해를 최소화하는 충돌특성곡선의 결정 및 반응표면법을 이용한 충돌 부품의 최적설계

Determination of Crash Pulse to Minimize Injuries of Occupants and Optimization of Crash Components Using Response Surface Method

홍을표*, 신문균*, 박경진**
Eulpyo Hong, Munkyun Shin, Gyungjin Park

ABSTRACT

Traditional occupant analysis has been performed with a pre-determined crash pulse which is produced from a test and the involved components are designed based on the analysis results. The method has limitations in that the design does not have much freedom. However, if a good crash pulse is proposed, the body structure can be modified to generate the crash pulse. Therefore, it is assumed that the crash pulse can be changed to improve the occupant crash performance. A preferable crash pulse is determined to minimize the occupant injury. A constraint is established to keep the phenomena of physics valid. The response surface method (RSM) is adopted for the optimization process. An RSM in a commercial code is utilized by interfacing with an in-house occupant analysis program called SAFE (Safety Analysis For occupant crash Environment). Design of involved components is carried out through optimization with the RSM. The advantages of the RSM are investigated as opposed to other methods, and the results are compared. Also, the design under the new crash pulse is compared with that from the pre-determined pulse.

주요기술용어 : Crash pulse(충돌특성곡선), Response surface method(반응표면법), Design of experiment (실험계획법), Gradient-based optimization(민감도 기반 최적설계)

Nomenclature

* 회원, 한양대학교 대학원
** 회원, 한양대학교 기계산업공학부

F : force, kgm/s²
m : mass, kg
a : acceleration, m/s²
v : velocity, m/s

1. 서론

충돌을 고려한 차량의 설계 과정은 먼저 차체를 설계하고, 실차 실험이나 차체충돌해석을 통해 얻어지는 차량의 충돌특성곡선과 부품의 힘-변형 특성을 구하고, 이를 이용하는 승객거동해석을 통해 승객보호장구를 설계하는 순차적인 방식으로 설계를 수행하게 된다.¹⁻⁴⁾ 차량의 설계가 순차적으로 이루어지는 이유는 승객보호장구의 설계를 위한 승객거동해석은 차체충돌해석을 통하여 얻어지는 차량의 충돌특성곡선을 필요로 하기 때문이다. 이러한 특성 때문에 승객거동해석은 주어진 충돌특성곡선 하에서 승객의 상해를 줄이려는 수동적인 설계만을 수행하여 왔다. 이러한 방식으로 설계된 승객보호장구는 충돌특성곡선이라는 제한조건에 의해 성능의 제한을 가지게 된다. 그러나, 만약 승객의 상해를 감소시킬 수 있는 충돌특성곡선을 설계 초기 단계에서 찾을 수 있다면, 이러한 충돌특성곡선을 이용하여 승객보호장구를 설계함으로써 안전도 측면에서 차량의 성능은 크게 향상될 수 있게 될 것이다.

충돌 시 차량의 감속도는 승객의 운동을 발생시켜 보호장구나 차량 내부의 부품들과의 충돌에 의해 상해를 유발시킨다. 본 연구에서는 이러한 감속도의 형태를 반영하는 충돌특성곡선과 승객의 상해 사이의 상관관계를 이용하여 감속도의 형태를 설계변수로, 승객의 상해를 목적함수로 하여 이를 최소화하는 최적화 문제를 정식화하고, 이를 통하여 승객의 상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 결정하는 연구를 수행하였다. 또한, 이렇게 얻어진 충돌특성곡선을 이용하여 승객보호장구들을 설계하고, 원래의 충돌특성곡선 상태에서의 승객의 상해의 차이를 살펴보았다.

승객거동해석은 다물체 동역학, 열역학 및 탄소성역학 등의 이론을 이용하여 에어백, 안전벨트 및 에너지흡수 조향계와 같은 승객보호장구와 승객간의 상호 거동의 관찰을 통하여 승객의 안전도를 평가하는 분야이다.¹⁻³⁾ 승객거동해석을 통

하여 얻어진 결과들을 이용하여 충돌 시 승객의 상해를 줄이기 위한 승객보호장구 설계를 위해 기존에는 민감도를 이용하는 최적화 기법 (gradient-based method)이나, 직교 배열표를 이용하는 실험계획법(design of experiment)을 적용하는 방법이 주로 적용되어 왔다.⁴⁻⁶⁾ 민감도를 이용한 최적설계는 수렴성이 뛰어나고, 많은 예제들을 통하여 성능이 검증된 설계방법이다. 또한 직교 배열표를 이용하면, 이산설계공간에서 공학적인 설계가 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나, 승객거동해석과 같은 충돌현상은 전반적으로 비선형성이나 요동(oscillation)이 심하고, 인자들간의 교호작용이 강하게 작용하고 있기 때문에 민감도를 기반으로 하는 최적설계의 방법이나 직교 배열표를 이용하기 힘들거나, 매우 세심한 주의를 필요로 한다.⁸⁻⁹⁾ 승객거동해석이 가지는 특징들 때문에 발생하는 설계 방법들의 한계를 극복하기 위하여, 민감도 값을 구하지 않고 함수값만을 가지고 최적설계를 수행할 수 있고, 인자들간의 교호작용을 고려할 필요가 없는 반응표면법의 사용이 유리하다고 사료된다.⁹⁻¹⁰⁾

승객거동해석을 이용한 보호장구의 설계에 반응표면법을 적용하기 위하여, 반응표면법을 이용한 최적설계 모듈을 내장하고 있으면서, 외부 해석 프로그램과 연계를 통해서 최적설계를 수행할 수 있는 VisualDOC⁷⁾과 승객거동해석 소프트웨어인 SAFE(Safety Analysis For occupant crash Environment)⁴⁾를 사용하였다.

2. 승객 상해지의 최소화를 위한 감속도 형태의 결정

차체충돌해석은 비선형 유한요소해석을 통해 차량의 충돌과 관련된 주요 부재들의 충돌에너지 흡수특성 및 승객의 생존공간이 충분히 확보될 수 있는지를 검증하기 위해 개발과정에서 사용된다. 또한 개발중인 차량의 시제품이 만들어지기 전에 차량의 감속도 특성과 부품의 힘-변형 특성을 얻어내고, 이를 승객거동해석에 이용함으로써,

차량개발 초기 단계에서부터 승객보호장구를 개발하는 것이 가능하게 해준다.¹⁻²⁾

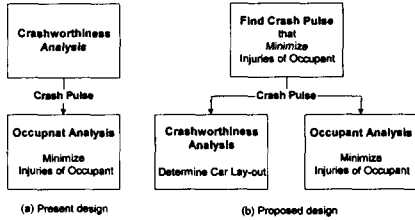


Fig. 1 Comparison of ordinary design process and proposed design process

기존의 설계에서는 그림 1(a)와 같이 순차적인 설계과정의 반복을 통해 최종제품이 결정되므로, 최종제품을 설계하는데 많은 시간이 소요된다. 또한 차체충돌해석을 통하여 결정된 충돌특성곡선을 이용하여 승객보호장구의 설계를 수행하기 때문에 충돌 시 승객의 보호에 대한 성능의 제한을 가지게 된다. 그러나, 승객의 상해와 충돌특성곡선의 형태와의 상관관계를 이용하여 승객의 상해를 최소화할 수 있는 감속도의 형태를 먼저 결정하고, 이를 이용한 승객거동해석을 통한 승객 보호장구를 설계하면 승객의 상해를 크게 감소시킬 수 있다. 또한 동시에 이러한 감속도의 형태를 표현해 낼 수 있는 차체를 설계함으로써 설계의 효율을 높이고 설계에 필요한 시간을 단축할 수 있게 되어 그림 1(b)와 같은 설계 방법을 이용하여 차량을 설계할 수 있게 된다. 이러한 설계 방법을 사용하고자 하는 경우에는 충돌특성곡선의 결정이 선행되어야만 하기 때문에, 본 연구에서는 승객의 상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 찾아내는 문제를 정식화하였다.

2.1 감속도 형태 결정을 위한 문제의 정식화

차량의 충돌특성곡선을 결정에 앞서, 차량에 충돌이 발생하는 경우의 상황을 물리적인 특성을 고려하여 먼저 살펴보았다. 차량에 충돌이 발생하는 경우, 충돌과 관련된 물리적인 법칙을 만족해야만 한다. 운동하는 물체는 뉴턴(Newton)의

운동 법칙을 따르기 때문에, 차량의 운동 역시 뉴턴의 운동법칙에 의해 표현될 수 있다.

$$F \cdot dt = d(mu) = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot dt \quad (1)$$

여기에서 F 는 힘, m 은 질량, t 는 시간, 그리고 v 는 속도이다. 여기에 차량에 가해지는 충격량을 고려해 보면¹⁵⁾

$$\int F dt = \int m \frac{dv}{dt} dt = m \int \frac{dv}{dt} dt \quad (2)$$

$$\therefore \int F dt = m \int a dt$$

$$\left(\because m \text{ is constant, } \frac{dv}{dt} = a \right)$$

서로 다른 차량 Model 1과 Model 2에 동일한 충격을 가하는 경우, 각각의 차량은 아래와 같이 선형 운동량 보존 법칙을 만족하여야만 한다.

$$\text{For Model 1 } \int_0^t F^{Model1} dt = m^{Model1} \int_0^t a^{Model1} dt \quad (3)$$

$$\text{For Model 2 } \int_0^t F^{Model2} dt = m^{Model2} \int_0^t a^{Model2} dt$$

일반적으로, 차량의 충돌에 의한 에너지의 흡수 특성은 차량이 가진 부품들의 적당한 배치를 통하여 제어하게 된다. 이런 관점에서 차량을 구성하는 부품들을 더하거나 빼지 않기 때문에 차량의 질량은 거의 일정하다.

결국 동일한 충격을 받는 질량이 같고, 부품의 배치가 서로 다른 두 차량이 선형운동량법칙을 만족하기 위해서는 식 (4)를 만족해야만 한다.

$$\therefore \int_0^t a^{Model1} dt = \int_0^t a^{Model2} dt$$

$$\therefore \int_0^t F^{Model1} dt = \int_0^t F^{Model2} dt \quad (4)$$

$$m^{Model1} = m^{Model2}$$

즉, 동일한 충격을 받는 질량이 동일한 두 차량은 식 (4)와 같이, 충돌 시 시간에 대한 감속도의 적분값이 일정해야만 한다. 이는 두 차량의 감속도 그래프의 면적이 질량배치와는 상관없이 항상 일정해야 한다는 것을 나타낸다.

그리고, 차량에 정면충돌이 발생하게 되면 차량에서는 급격한 속도의 감소가 진행되며, 차량에 후방충돌이 발생하는 경우에는 차량이 전방으로 가속되게 된다. 감속도의 형태를 결정함에 있

어서도 이러한 상식에서 벗어나지 않는 감속도의 형태를 얻을 수 있도록 하는 구속조건이 역시 필요하다. 이렇게 감속도가 일정한 형태를 가질 수 있도록 하는 설계변수의 범위를 지정해 주어 감속도 형태가 상식적인 형태를 유지할 수 있도록 설계변수에 상-하한을 지정해 주었다.

정의하고자 하는 문제가 승객의 상해를 최소화 하는 감속도의 형태를 결정하는 최적화 문제이기 때문에 목적함수로 승객의 상해정도를 사용하였다. 목적함수로 정의되는 승객의 상해정도는 차량의 충돌 상황에 따라 적당한 상해치를 사용하여 정의한다.¹⁸⁾

승객의 상해를 최소화하는 감속도 결정 문제는 물리적인 법칙에 위배되지 않는 영역에서, 감속도의 형태를 설계변수로 하고, 승객의 상해를 목적함수로 하는 최적화 문제로 정의될 수 있다. 따라서 최적화 문제를 식 (5)와 같이 정식화하였다.

Determine	Crash Pulse	
Minimize	Injuries of Occupant	
Subject to	Side Constraints	
	Conservation of Linear Momentum	(5)

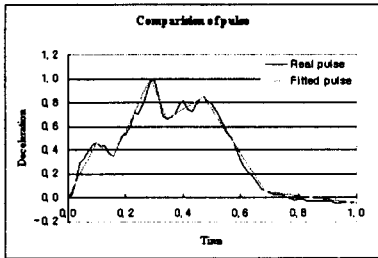


Fig. 2 Comparison of real pulse with fitted pulse

충돌특성곡선은 승객거동해석을 위한 입력 데이터이다. 충돌특성곡선은 시간에 대한 감속도의 불연속적인 값들이며, 이런 데이터들은 경우에 따라 90개에서 900개 까지 데이터들을 포함하기 때문에, 이런 모든 점들을 설계변수로 선정한다는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 설계변수의 선정을 위하여 그림 2와 같이 데이터들의 선형보간(linear spline)을 이용하여 나머지 점들에서의 감속도를 결정하는 방법을 사용하여 승객거동해석의 입력 데이터를 정의해 주고, 이 때 사용되는

선형보간을 위해 필요한 시간과 그에 대한 감속도 값들을 설계변수로 선정하였다.

이상에서 선정된 설계변수와 목적함수, 구속조건들을 모두 고려하면, 감속도 형태의 결정하기 위한 최적화 문제는 식 (6)과 같이 정식화될 수 있다.

Determine	$t_i, a_i, i = 1, n$	
Minimize	Injuries of Occupant	
Subject to	$t_{ij} \leq t_i \leq t_{i+1}, a_{ij} \leq a_i \leq a_{i+1}$	
	$\int_0^t a dt = const.$	(6)

여기서 t_i 는 선형보간의 기반이 되는 점들에서의 시간, a_i 는 가속도를 나타낸다.

위에서 정의된 감속도 형태의 결정을 위한 최적화 문제를 실제예제에 적용해 보고, 정식화된 문제의 적합성과 사용상의 유용성에 대해 살펴보았다. 실제 충돌에서 자주 발생하는 에어백이 있는 차량의 정면충돌과 좌석만을 안전장구로 가지는 후방추돌에 대하여 적용하고, 충돌해석에서 유용성을 가지는 반응표면법을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

2.2 에어백을 가지는 차량의 정면충돌

에어백을 가지는 정면충돌에서의 차량 감속도의 형태를 결정하기 위하여 그림 3와 같은 8개의 점에 대한 1차 스플라인 곡선(1st order spline curve)으로 근사화 하고, 8개의 점들의 시간과 감속도의 크기를 설계 변수로 선정하였다.

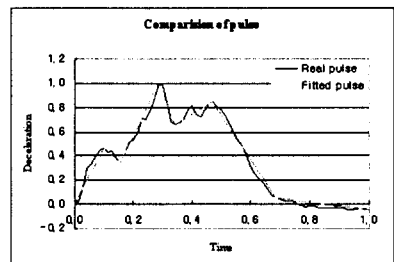


Fig. 3 Comparison of pulse for front-end impact

정면충돌의 경우 승객의 상해를 정의하는 기준

으로 머리상해도(Head Injury Criterion ; HIC), 가슴상해도(Chest Severity Index ; CSI), 그리고 대퇴부 하중(Femur Load)등이 안전법규에 의해 제한되어 있다. 이번 예제에서는 정면 충돌에서 승객의 상해를 표현하는 중요한 요소인 HIC 값을 목적함수로 하는 최적설계로 정의하였다. HIC는 FMVSS 208에 의해 승객안전도 해석에서 사용하도록 규정되어 있으며, 식 (7)에 의해 정의된다.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (7)$$

여기서 $a(t)$ 는 중력가속도의 배수로 표시되는 머리의 합성가속도(resultant acceleration)이며, t_1, t_2 는 충돌 시에 36 ms 이하의 간격을 갖는 임의의 두 순간을 나타낸다.¹⁸⁾

Table 1 Side constraints of front-end impact

Point	Time Point		Deceleration	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
2	0.047	0.170	0.366	0.494
3	0.179	0.330	0.258	0.385
4	0.340	0.415	0.873	1.000
5	0.425	0.566	0.557	0.685
6	0.575	0.755	0.732	0.860
7	0.858	1.000	0.000	0.112

Table 2 Optimum design of front-end impact

Point	Initial		Optimum	
	Time	Real pulse	Time	real pulse
1	0.000	-0.003	0.000	-0.003
2	0.071	0.459	0.071	0.527
3	0.143	0.344	0.286	0.332
4	0.286	1.000	0.286	0.932
5	0.357	0.663	0.357	0.595
6	0.500	0.850	0.500	0.782
7	0.714	0.051	0.786	0.043
8	1.000	-0.048	1.000	-0.048

이상에서 정의된 설계 변수들과 목적함수를 이용하여, 마찬가지로 선형 운동량 보존법칙을 만족하고, 표 1과 같이 상-하한을 가지는 설계변수를 가지는 최적화 문제는 식 (8)과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Determine} && t_i, a_i \quad i = 1, 6 \\
 & \text{Minimize} && HIC \\
 & \text{Subject to} && t_{ij} \leq t_i \leq t_{i,\mu} \quad i = 1, 6 \\
 & && a_{ij} \leq a_i \leq a_{i,\mu} \quad i = 1, 6 \\
 & && \int_0^{0.14} a dt = \text{const.}
 \end{aligned} \quad (8)$$

위에서 정의된 최적화 문제를 반응표면법을 이용하여 최적해를 구해보면 표 2에서 표시된 설계 변수의 위치에서, 표 3과 같은 목적함수의 최적값을 얻을 수 있다. 표에서 보여진 것과 같이 HIC값은 기존의 감속도 형태에 비해 6.15%의 설계 개선이 이루어진 것을 알 수 있다.

이렇게 얻어진 최적값들은 그림 4와 같은 형태의 감속도 형태로 표현된다. 결과들을 살펴보면, 승객에게 적은 피해가 발생하도록 하기 위해서는 첫번째 피크(peak)값과 두 번째 피크값의 크기가 작아져야 하고, 또한 이 둘 사이의 간격이 넓어져야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 전체적인 형태를 살펴보면 감속도의 형태가 사다리꼴의 형태가 되어 가는 것을 알 수 있다.

Table 3 Comparison objective of initial and optimum value

	HIC	Remark
Real pulse	1.000	1
Optimum	0.938	-6.15 %

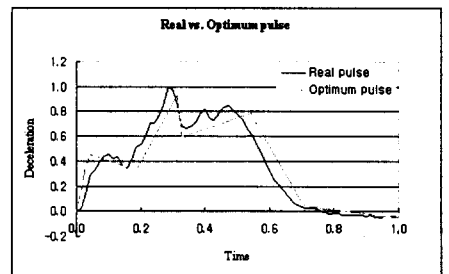


Fig. 4 Comparison of deceleration curve for initial real pulse and optimum pulse

2.3 좌석만을 가지는 차량의 후방추돌

후방 추돌로 인해 자동차가 갑자기 전방으로 가속을 받게 되면 좌석과 함께 몸은 전방으로 이

동하지만, 머리는 목 이외에 아무런 지지도 받지 못하기 때문에 몸통에 비해 상대적으로 천천히 움직이게 된다. 이러한 목의 상대 회전 운동은 목 부분의 손상을 가져온다. 이번 예제에서는 여러 목 상해들 중에서 상대적으로 임계값이 낮아 쉽게 상해가 발생할 수 있는 목의 젓힘 모멘트(extension moment)를 목적함수로 사용하기로 한다.

후방 충돌 역시 정면 충돌과 마찬가지로 감소도의 형태를 그림 5과 같은 11개의 점에 대한 1차 스플라인 곡선(1st order spline curve)으로 근사화 하고, 또한 선형운동량보존법칙을 만족하는 구속조건과 표 4과 같은 설계 변수의 상-하한을 가지는 식 (9)와 같은 문제로 정의하였다.

Determine $t_i, a_i \quad i = 1, 9$
 Minimize Extension Moment
 Subject to $t_{i,j} \leq t_i \leq t_{i,w} \quad i = 1, 9$
 $a_{i,j} \leq a_i \leq a_{i,w} \quad i = 1, 9$
 $\int_0^{0.511} a dt = const.$ (9)

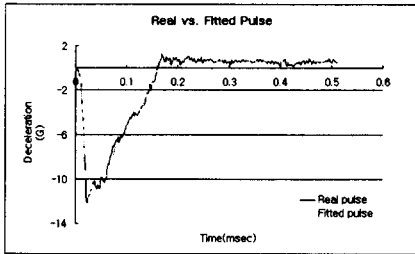


Fig. 5 Definition of design variables for rear end impact

Table 4 Side constraints of rear end impact

Point	Time Point		Deceleration	
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound
2	0.001	0.015	-0.700	-0.500
3	0.018	0.030	-13.500	-10.500
4	0.032	0.045	-11.500	-8.500
5	0.050	0.065	-11.500	-8.500
6	0.078	0.088	-7.500	-5.000
7	0.091	0.101	-7.500	-5.000
8	0.108	0.118	-5.500	-3.000
9	0.121	0.129	-5.500	-3.000

위에서 정의된 최적설계문제를 반응표면법을 이용하여 최적화해 보면 그림 6과 같은 감속도의 형태와 표 5와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 5 Comparison objective of initial and optimum value

	Extension Moment(Nm)	Remark
Real pulse	13.426	/
Optimum	11.672	-13.07 %

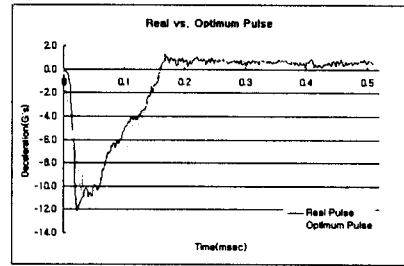


Fig. 6 Comparison deceleration curve

결과들을 살펴보면, 목적함수의 값이 13.07% 감소한 것을 볼 수 있다. 즉, 승객에게 피해를 적게 주기 위해서는 첫번째 피크(peak)값의 크기가 작아야 한다는 사실을 알 수 있다. 또한 충돌 초기에 감속도의 형태가 삼각형 형태의 예리한 모양보다, 사다리꼴 형태를 취함으로써, 전체 가속도의 평균이 작을수록 상해를 적게 입힌다는 사실을 알 수 있다.

이번 절에서는 최적화 방법을 이용하여 승객의 상해를 감소시킬 수 있는 충돌특성을 구하기 위하여 충돌특성곡선을 설계변수로, 승객의 상해를 목적함수로 가지고, 선형운동량보존법칙과 설계 변수의 상-하한을 구속조건으로 가지는 최적화 문제를 정의하였다. 또한 예제들을 통하여 본 연구에서 정의된 충돌특성곡선을 결정하는 정식화된 문제를 이용하여, 승객의 상해를 최소화 할 수 있는 충돌특성곡선 결정해 보았다. 이렇게 구해진 충돌특성곡선 이용하여 승객보호장구를 설계함으로써 승객의 상해를 효율적으로 감소시킬 수 있을 것이다. 다음 절에서는 얻어진 충돌곡선을 이용하여 충돌 부품의 설계방법을 살펴보고, 얻어진 충돌특성곡선과 기존의 충돌특성곡선을 이용하여 승객보호장구를 설계하고, 이 두 결과를 비교해 보았다.

3. 반응표면법을 이용한 충돌 부품의 설계

3.1 충돌부품의 설계 방법

다물체 동역학을 이용한 승객거동해석은 자동차 충돌 시 승객의 거동을 관찰하고 이에 따른 상해치를 감소시키기 위하여 에어백, 안전벨트 등과 같은 승객보호장구를 설계하는데 목적이 있다.¹⁻³⁾ 이렇게 승객거동해석을 통하여 얻어진 해석결과를 설계에 반영시키는 과정에서 적절한 설계기법을 어떻게 적용하는가는 매우 중요한 문제이다. 해석결과를 설계에 적용하는 방법은 여러 가지가 있지만, 기존에는 보호장구를 설계하기 위하여 민감도를 이용하는 최적설계와 직교배열표를 이용하는 실험계획법이 많이 사용되어 왔다.⁵⁻⁶⁾

이상의 방법들은 여러 공학적 문제들에서 적용되어 왔고, 또 좋은 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 직교배열표를 이용하는 경우 설계변수의 조합에 대해 일부실시법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 이산공간에서 공학적인 설계결과를 얻을 수 있다.¹¹⁾ 민감도를 이용하여 최적설계를 수행하는 수학적 최적화 방식은 민감도 값을 쉽게 구할 수 있다면, 수렴성이 좋고, 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.¹²⁾ 그러나, 충돌해석의 경우 비선형성이 매우 강하고, 연속성에 대한 증명이 불충분하기 때문에 기존의 방법들을 사용하는데 몇 가지 어려움이 존재하고 있다.⁵⁻⁶⁾

3.1.1 민감도를 이용한 최적설계

민감도를 기반으로 하는 최적설계는 비선형계획법이라는 수학적인 방법에 의하여 주어진 문제의 최적값을 찾는 방법이다. 이 경우 비선형성을 가지는 함수의 선형화를 반복함으로써 최적값에 접근하게 된다. 민감도를 이용한 최적설계는 수렴성이 좋고, 수치적인 최적해를 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

3.1.2 직교배열표를 이용한 설계

설계변수(인자; factor)의 수가 많은 경우에 큰 그물을 쳐서 주효과와, 기술적으로 없을 것 같은 2인자 교호작용 및 고차의 교호작용을 회생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 짤 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표(orthogonal arrays)이다.¹⁰⁻¹¹⁾ 직교배열표를 이용하는 경우 설계변수의 조합에 대해 일부실시법을 사용하므로 최소한의 해석 횟수로 이산공간에서 공학적인 설계결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 인자간의 교호작용을 무시할 수 있거나 각 인자간의 교호작용을 예상할 수 있는 경우에는 인자수 및 수준수가 많을지라도 직교배열표를 이용하면 비용을 절감하면서 좋은 설계값을 얻을 수 있다.

3.1.3 반응표면법을 이용한 설계

그러나, 승객거동해석에서의 목적함수는 전반적으로 설계변수에 대하여 함축성(implicit)이 매우 크고, 또한 비선형성이 아주 심하므로, 민감도 계산에 큰 어려움이 다르고 구한다 할지라도 부정확해질 우려가 있다.⁵⁻⁶⁾ 따라서 민감도를 이용하여 얻은 결과값 역시 부정확해질 확률이 높다. 또한 인자들간의 교호작용이 강하게 작용하고 있기 때문에, 기존의 민감도를 이용한 최적 설계 방법이나, 직교배열표를 이용하여 충돌 부품을 설계하기 위해서는 세심한 주의가 필요하다.

위의 두 가지 설계방식 이외에도 여러 가지 설계 방식들이 승객보호장구 설계에서 사용되어왔다. 그 중에서 근사함수를 구하는 개념을 이용하여 함수값만 계산하고 미분값의 계산이 필요 없는 이차근사법이라 불리는 방법에 관해서도 연구되었다.^{5-6,8)} 이차근사법은 설계변수의 함축함수(implicit function)를 테일러 급수(Taylor series)의 2차 항까지 전개하여 명시함수형태(explicit function)의 근사함수로 변형시켜 설계변수의 이동범위제한(move limit)을 만족하면서

반복 진행함으로써 최적해를 탐색하는 방식이다. 이 방법은 Vanderplaates¹²⁾에 의해 제안되었으며, 그에 대한 성능 및 유용성은 이미 기존의 연구들을 통하여 확인된 바 있다.⁸⁻⁹⁾

본 연구에서 사용된 반응표면법은 이차근사법의 근사함수를 이용하는 접근방식을 계승하고 있다. 따라서 이차근사법이 가지는 미분값 계산이 필요하지 않고 함수계산의 수를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 이차근사법에서 근사함수를 갱신함에 있어 항상 모든 항들을 갱신하는 방식과 달리, 반응표면법은 그림 7와 같이 정보를 획득할 수 있는 용이한 방법을 사용하여, 상수항 만을 갱신하여 최적화를 수행하고, 더 이상 개선이 진행되지 않는 경우 선형 항목을 갱신하고, 마지막으로 헤시안 행렬을 갱신하는 방식을 사용한다.¹²⁾ 반응표면법이 이렇게 변형된 이차근사법의 형태를 취하고 있기 때문에 함수 계산이 어렵고, 시간이 많이 걸리는 문제들에서 이 알고리즘은 매우 강력한 도구로써 사용될 수 있다.

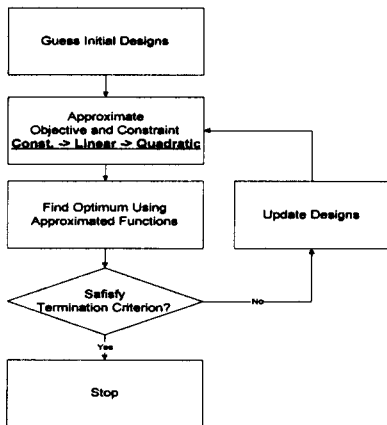


Fig. 7 Flow diagram of response surface method

이 방식은 실험계획법에서 다루어지고 있는, 실험계획을 통해 설계 변수들의 위치를 먼저 결정하고 이들 여러 설계점들에서의 결과를 이용하여 해석과 설계를 수행하는 반응표면법과는 차이를 보이고 있다. 하지만 Vanderplaates에 의해 제안된 본 연구에서 사용된 반응표면법 역시 많

은 연구들에 의해 그 성능과 유용성이 확인되고 있다.

반응표면법은 연속 설계 공간에서 근사함수를 이용하는 접근방식을 사용하고 있기 때문에 구해지는 최적값이 매우 정확하거나 수학적인 최적값을 구하지는 못하는 단점이 있고, 얻어진 결과값의 공학적인 사용 가능성도 부족한 경우가 존재할 수 있다. 하지만, 승객거동해석에서 반응표면법을 이용함으로써, 목적함수로 사용되는 승객의 상해치는 설계변수에 대하여 함축성(implicit)이 매우 크고 또한 비선형성이 매우 심한 특성을 가지기 때문에 설계상의 한계를 가지고 있는 기존 설계 방식들보다 쉽게 사용할 수 있고, 더 나은 결과로 접근할 수 있다.

3.2 반응표면법을 이용한 충돌 부품 설계

승객거동해석에서의 반응표면법의 유용성을 평가하기 위하여, 실험계획법과 민감도를 이용한 최적설계의 최적해를 비교하였다. 실험계획법을 이용한 결과와의 비교를 위하여 표준 직교배열표를 이용한 설계를 수행하고, 분산분석을 통해 얻어지는 최적 결과값과 교호작용의 정도를 측정하였다. 문제에 따라 설계 변수의 수나 수준들에 대해 적합한 표준 직교배열표를 선택하여 실험을 수행하였다. 그리고, 민감도를 기반으로 하는 최적설계문제에서는 구속조건을 가지는 문제의 경우 MFD법(Modified Feasible Direction Method)을 사용하였고, 구속조건을 가지지 않는 문제에서는 BFGS법(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno method)을 사용하였다.¹⁶⁾

3.2.1 VisualDOC과 SAFE의 인터페이스

승객거동해석을 위해 SAFE(Safety Analysis For crash Environment)를 이용하였다. SAFE는 데이터의 축적이 많고, 숙련된 엔지니어가 사용하는 경우 실제와 가까운 해석결과를 얻을 수 있고, 해석시간이 짧으므로 반복적인 해석을 필

요로 하는 최적설계와 같은 설계기법에 적용하는데 용이하다고 할 수 있다.⁴⁾

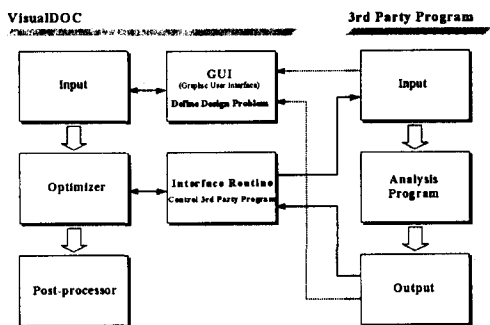


Fig. 8 Third Party program interface of VisualDOC

SAFE와 같이 기존에 존재하는 해석 소프트웨어를 이용하여 최적 설계를 수행하는 경우, 설계자가 소스 코드에 접근하기 힘들거나, 접근조차 허용되지 않는 경우가 많다. VisualDOC은 이런 해석 프로그램과의 연결을 통한 최적설계를 수행할 수 있도록 사용자에게 그래픽 사용자 인터페이스(GUI ; Graphic User Interface) 방식을 제공하는 소프트웨어로, 기존의 일반적인 최적설계를 목적으로 사용되었던 DOC(Design Optimization Control)¹⁶⁾과 DOT(Design Optimization Tools)¹⁷⁾에서 사용되었던 최적화 모듈(optimization library)에 기반을 두고 있다.

이러한 기능을 이용하여 승객거동해석에 반응 표면법과 민감도를 이용한 최적설계를 위하여, VisualDOC과 SAFE와 연결하여 사용하는 방법을 선택하였다.

3.2.2 정면 충돌시 승객보호장구 설계

차량에 에어백이 장착된 경우에는 에어백과 안전벨트가 상호간에 많은 영향을 미치므로 이와 관련하여 설계변수를 선택하였다. 에어백의 설계 변수는 질량흐름율(mass flow rate)과 기체 방출구의 면적(vent hole area) 및 인플레이터의

점화시간(firing time)이며, 안전벨트와 무릎판(knee bolster)의 강성을 설계변수로 선정하였다.

Table 6 Matrix experiment and observed Extension Moment

Expt. No.	Columns Number and Factor Assigned						HIC
	1 A	2 B	3 C	4 D	5 E	6 e	
1	1	1	1	1	1	1	0.720
2	1	2	2	2	2	2	0.785
3	1	3	3	3	3	3	0.734
4	1	4	4	4	4	4	0.702
5	1	5	5	5	5	5	0.781
6	2	1	2	3	4	5	0.668
7	2	2	3	4	5	1	0.678
8	2	3	4	5	1	2	0.772
9	2	4	5	1	2	3	0.721
10	2	5	1	2	3	4	0.643
11	3	1	3	5	2	4	0.748
12	3	2	4	1	3	5	0.763
13	3	3	5	2	4	1	0.609
14	3	4	1	3	5	2	0.708
15	3	5	2	4	1	3	0.636
16	4	1	4	2	5	3	0.816
17	4	2	5	3	1	4	0.856
18	4	3	1	4	2	5	0.720
19	4	4	2	5	3	1	0.934
20	4	5	3	1	4	2	0.577
21	5	1	5	4	3	2	1.000
22	5	2	1	5	4	3	0.780
23	5	3	2	1	5	4	0.639
24	5	4	3	2	1	5	0.674
25	5	5	4	3	2	1	0.760

Table 7 One-Way table for extension moment

Number of row	Factor	Level Means					Means
		1	2	3	4	5	
1	A	0.745	0.696	0.693	0.781	0.771	0.737
2	B	0.790	0.772	0.695	0.748	0.679	0.737
3	C	0.714	0.732	0.682	0.763	0.793	0.737
4	D	0.684	0.705	0.745	0.747	0.803	0.737
5	Error	0.732	0.747	0.815	0.667	0.724	0.737

먼저 직교배열표를 이용하여 설계를 수행하였다. 실험을 위해서 표 6과 같은 직교 배열표, $L_{25}(5^6)$ 을 사용하였다. 이 결과들을 이용하여 표 7과 같은 일원표를 작성하여 이를 검증하여 최적수준 $A_3B_5C_3D_1E_4$ 에서 최적 목적 함수의 값 0.69를 얻을 수 있었다. 이 결과는 위의 행렬실험에서 얻어진 결과들에 비해 좋지 못한 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경우에는 각 인자들간의 교호작용이 존재하고 있기 때문이다. 따라서, 교호작용이 존재하는 인자들에 대한 교호

작용을 고려해 주어야 하지만 교호작용이 발생하고 있는 인자들을 찾기가 쉽지 않다.

다음으로, 위의 실험계획법과 같은 설계변수를 사용하고, 1수준과 5수준에서의 설계변수의 값을 각각 설계변수의 상-하한으로 하는 최적설계 문제를 정의하고, 민감도를 이용하는 최적설계 방법과 반응표면법을 이용하여 최적설계를 수행하고, 그 결과를 비교하였다.

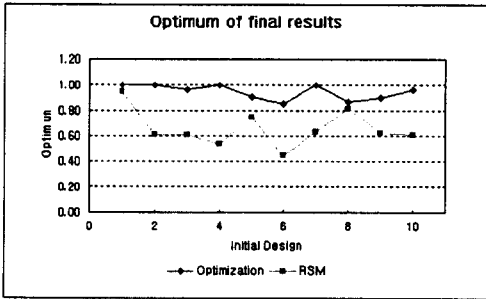


Fig. 9 Optimum design variables of seat design

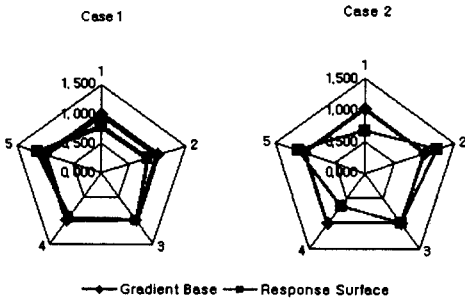


Fig. 10 Optimum design variables of seat design

그림 9는 설계 변수들의 초기 위치에 따른 초기 목적 함수값과 민감도를 이용한 최적설계와 반응표면법을 이용하여 얻어진 각각의 최적값들을 비교한 그래프로 초기 설계값에 대해 정규화된 그래프이다. 그림 9에서 보여지는 것처럼 민감도를 이용하는 최적설계를 수행한 경우, 초기 값에 따라서 매우 심한 결과값의 변화가 있다는 사실을 알 수 있다. 또한, 심한 경우에는 설계의 개선이 없는 경우도 존재한다. 이것은 민감도의 계산 과정에서 부정확한 민감도가 얻어졌기 때문이라고 생각된다. 이러한 사실은 그림 10을 살펴

보면, 더 정확히 알 수 있다.

직교배열표와 민감도를 이용한 최적설계, 반응표면법을 이용한 설계 방법들에서 얻어진 목적함수의 최적값을 살펴보면, 표 8과 같이 반응표면법을 이용한 경우 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 또, 민감도를 이용한 최적설계의 경우와 직교배열표를 이용한 경우에도 개선된 값들을 얻을 수 있었지만, 직교배열표의 경우에는 교호작용이 고려되지 못한 상태에서 이루어진 설계이고, 민감도를 이용하는 경우에는 민감도의 정확한 계산이 이루어지지 못한 상황에서, 특정한 초기값에서만 발생하는 특수한 결과값이다.

Table 8 Optimum values for each design methods

Design Method	Design Variables					HIC
	A	B	C	D	E	
Orthogonal Array	1.150	1.000	1.000	0.700	1.150	1.000
Gradient Method	1.000	0.868	0.966	1.049	0.900	0.991
RSM	0.700	0.962	0.966	0.700	1.142	0.687

3.2.3 목 상해를 고려한 좌석설계

전·후방 충돌 시 승객의 목 부위의 상해는 좌석의 안전성능에 따라 크게 좌우된다. 특히 후방 충돌 상황에서는 정면충돌과 달리 특별한 보호장구가 없으며, 좌석이 유일한 보호장구이기 때문에, 좌석은 승객보호장구로서의 기능을 갖추고 있어야 한다. 후방충돌은 대부분 저속에서 발생하지만, 목과 몸통사이의 상대운동을 유발시켜 목 부분의 손상을 가져온다. 목 상해는 목의 젓힘 모멘트, 굽힘 모멘트, 전단력, 인장/압축력 등으로 표현되어진다. 특히 젓힘 모멘트는 임계 상해 값이 낮은 뿐만 아니라, 실제 후방 충돌 시 상해의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 젓힘 모멘트를 줄이는데 목적을 두고 설계를 수행해야 한다.⁽¹³⁾

설계 변수의 선정을 위하여 좌석의 인자 특성을 고려하여 목 상해에 큰 영향을 미치는 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 좌석 등받이 강성, 좌석 등받이 조인트의 회전강성, 등받이와 더미의 마찰계수, 머리 받침대의 강성을 설계변수로 선정하였다.

Table 9 Factors and their levels

Level	Factors (Design Variables)				
	A	B	C	D	E
	Head-Headrest Clearance	Seatback Stiffness	Friction Coefficient	Joint Stiffness	Headrest Stiffness
1	5 cm	-50%	0.30	10°	-50%
2	7 cm	0	0.45	20°	0
3	9 cm	50%	0.60	30°	50%

Table 10 Matrix experiment and observed Extension Moment

Expt. No.	Columns Number and Factor Assigned								Extension Moment (Nm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	13.357
2	1	1	2	2	2	2	2	2	15.278
3	1	1	3	3	3	3	3	3	14.034
4	1	2	1	1	2	2	3	3	18.434
5	1	2	2	2	3	3	1	1	15.788
6	1	2	3	3	1	1	2	2	11.829
7	1	3	1	2	1	3	2	3	16.964
8	1	3	2	3	2	1	3	1	11.731
9	1	3	3	1	3	2	1	2	18.218
10	2	1	1	3	3	2	2	1	13.220
11	2	1	2	1	1	3	3	2	20.188
12	2	1	3	2	2	1	1	3	12.054
13	2	2	1	2	3	1	3	2	12.103
14	2	2	2	3	1	2	1	3	14.308
15	2	2	3	1	2	3	2	1	19.767
16	2	3	1	3	2	3	1	2	14.700
17	2	3	2	1	3	1	2	3	12.916
18	2	3	3	2	1	2	3	1	16.043

직교배열표를 이용한 설계를 위하여 아래와 같이 설계 변수의 수준을 표 9과 같이 정하고, 실험을 위해서는 표 10와 같은 직교배열표, $L_{18}(3^5)$ 을 사용하였다.

설계 변수의 최적값을 구하기 위하여 표 10의 값들로부터 후처리 과정을 통하여 표 11의 일원표와 표 12의 분산분석표를 구성하고, 여기에서, A, B, C, D, E 의 최적수준에서 19.335의 목적함수의 최적값을 얻을 수 있다.

Table 11 One-Way table for extension moment

Number of row	Factor	Level Means			Mean
		1	2	3	
1	A	14.689	15.371	15.095	15.052
2	B	17.147	14.705	13.304	15.052
3	C	15.448	15.327	14.380	15.052
4	D	12.332	15.917	16.907	15.052
5	E	14.738	14.996	15.422	15.052

Table 12 ANOVA table for extension moment

Number of row	Factor	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F ₀
1	A	1.415	2	0.708	1.798
2	B	45.394	2	22.697	57.648
3	C	4.106	2	2.053	5.215
4	D	69.527	2	34.763	88.296
5	E	1.433	2	0.717	1.820
6	Error	1.969	5	0.394	1.000

Table 13 Analysis of Error

	0.611	Predicted	10.987
$1/\sigma_0$		Experiment	19.335
$\sqrt{\sigma_0}$	0.241	Error	8.349
$2\sigma_0$	0.981		

또한, 표 10에서 얻어진 실험의 결과값들을 오차분석과 분산분석을 통하여 표 13와 표 14을 구성하였다. 표 13는 행렬실험에서의 오차분석을 통하여 최적값의 95% 신뢰 구간에서의 허용 오차범위의 값을 표시하였다. 그리고 표 14에서는 표 12의 분산분석을 통하여 얻을 수 있는 최적수준에서의 추정된 최적 목적 함수값과 실제 실험을 통하여 얻어지는 최적 함수값을 비교하였다. 이렇게 구해진 두 결과값의 차이가 표 13에서 구한 허용오차범위를 벗어나 있기 때문에 표 10를 이용한 행렬 실험과 후처리 과정을 통하여 얻어진 목적함수의 최적값은 교호작용의 영향을 크게 받고 있기 때문에 정확한 결과값을 얻기 위해서는 설계단계에서 교호작용의 영향을 고려해 주어야만 한다는 사실을 알 수 있다.

조향계의 설계에서와 마찬가지로 최적설계 결과값과 수렴된 변수의 위치 등을 비교 대상으로 선정했다.

그림 11는 초기값들에 대한 결과를 나타낸 도표이고, 그림 12는 초기 설계값을 1로 하여, 최적 설계값을 초기 설계값에 대한 비율을 표시한 그래프로 조향계의 예제에서와 마찬가지로 각각의 축 A, B, C, D, E는 각각 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 좌석 등받이 강성, 좌석 등받이 조인트의 회전강성, 등받이와 더미의 마찰계수, 머리

받침대의 강성에 대한 설계 변수들의 값을 표시한다. 이전의 조향계의 설계에서와 마찬가지로 후방추돌에서 역시 반응표면법을 이용한 최적화에서 더 나은 결과들이 고르게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 설계 변수의 변화를 살펴봐도 조향계와 거의 동일한 양상을 보이고 있다.

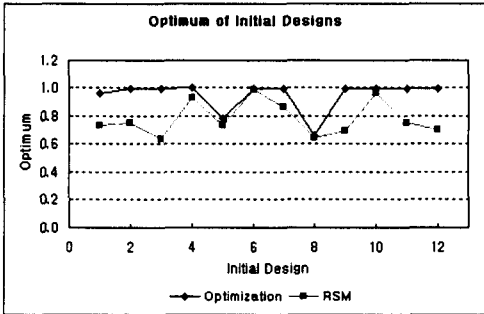


Fig. 11 Optimums of seat design for initial designs

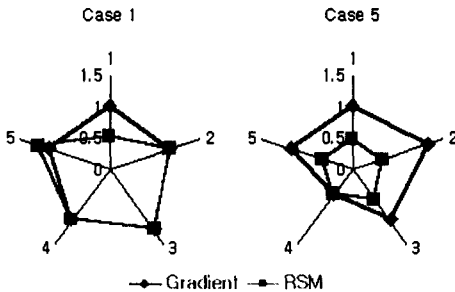


Fig. 12 Optimum design variables of seat design

Table 15 Optimum values for each design methods

Design Method	Design variable					Me (Nm)
	A	B	C	D	E	
Orthogonal Array	-5.000	1.500	0.300	70.000	1.500	11.731
Gradient Method	-5.000	0.500	0.600	70.000	1.250	11.446
RSM	-2.396	0.500	0.600	70.000	0.591	11.250

이 경우 각각의 설계 방법들을 통하여 얻어진 설계 결과를 살펴보면, 표 15에서와 같이 민감도를 이용한 최적설계에서 가장 좋은 설계결과를 얻을 수 있었지만, 이는 초기설계의 배치에 의해

우연히 얻어진 결과이기 때문에 좋은 결과라고 하기는 힘들다. 따라서, 이 경우에도 교호작용이 크고 민감도 계산이 힘든 어려움이 존재하므로 반응표면법의 이용이 더 유용하다고 할 수 있다.

위의 정면 충돌과 후방 추돌의 두 가지 예제들에서 알 수 있는 것처럼, 승객거동해석은 교호작용이 크게 작용하고 있기 때문에 직교배열표를 이용하여 승객보호장구를 설계하기 위해서는 초기단계에서 교호작용을 고려해야 하는데 인자들 간의 교호작용에 관한 정보가 불충분한 경우 사용에 무리가 따르고, 민감도를 이용하는 최적설계방법은 비선형성이 강한 승객거동해석에서는 정확한 민감도 계산이 어렵기 때문에 설계에 사용하기 힘들다는 사실을 파악할 수 있었다. 충돌해석의 강한 비선형성과 교호작용이 큰 특징들을 고려한다면, 승객거동해석을 이용하는 승객보호장구를 위해서는 반응표면법을 사용하는 것이 유리하다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 감속도의 형태에 따른 승객 상해 정도의 차이

이번 연구에서는 먼저 승객상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 결정하고 이를 이용하여 승객보호장구 및 충돌 부품을 설계하는 방식을 이용하여 승객의 상해를 효율적으로 감소시킬 수 있는 설계방법을 제안하였다. 즉, 먼저 2절에서 승객상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 결정하는 문제를 정식화하였고, 3절에서는 승객거동해석을 통하여 승객보호장구를 설계하는 과정에서 반응표면법의 이용을 제안하였다.

이번 절에서는 기존의 충돌특성곡선과 승객의 상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 이용하여 각각 승객 보호장구를 설계하고, 결과를 비교해 보았다. 이를 통하여 제안된 설계방식의 유용성을 검증해 보고, 이 결과를 표 16에서 설계 전의 초기 충돌특성곡선에서의 승객 상해 정도에 대해 정규화하여 나타내었다.

에어백을 가지는 정면충돌의 경우, 먼저 승객의 상해를 최소화하는 충돌특성을 2.2 장에서 결정하였다. 이렇게 결정된 충돌특성곡선에서는 승객의 상해, 즉 HIC값이 초기 충돌특성곡선에서보다 6.15% 감소한 것을 알 수 있었다. 또한 초기 충돌특성곡선과 최적 충돌특성곡선을 이용하여 각각 반응표면법을 이용하여 승객 보호장구를 설계한 경우, 그 설계 결과가 표 16과 같이 크게 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

또한 후방 추돌의 경우에도 정면 충돌과 같이, 초기 충돌특성곡선에서보다 최적 충돌특성곡선에서 개선된 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

Table 16 Optimum values for each crash pulse of frontal and rear end impact

	Initial Pulse		Optimum Pulse	
	Before	After	Before	After
Frontal Impact	1.000	0.613	0.938	0.425
	-	-38.75%	-6.15%	-57.53%
Rear Impact	1.000	0.930	0.869	0.838
	-	-7.01%	-13.07%	-16.21%

5. 결론

기존의 순차적인 승객거동해석과는 다르게 승객거동해석에서의 입력이 되는 충돌특성곡선을 먼저 결정하고 이를 이용하여 충돌부품을 설계함으로써, 승객의 상해를 크게 감소시킬 수 있는 설계방식을 제안하였다. 그리고, 이를 위해 충돌특성곡선과 승객의 상해가 가지고 있는 관계를 이용하여 승객의 상해를 최소화하는 충돌특성곡선을 결정하는 문제를 정식화하였다. 충돌특성곡선을 결정하기 위해서 승객의 상해정도를 목적함수로 하고, 선형운동량보존법칙 등의 구속조건을 가지는 최적화 문제를 정식화하고, 이를 직접 정면 충돌과 후방 추돌에 대해 적용해 보았다. 또 이렇게 얻어진 충돌특성곡선을 이용하여 승객보호장구를 설계하고, 이렇게 얻어진 보호장구의

성능을, 초기의 충돌특성곡선을 이용하여 설계된 승객보호장구의 성능과 비교하여 보았다.

또한, 충돌해석이 가지는 특징들 때문에 사용하기 어려웠던 기존 설계방식들을 대신하여 반응표면법을 이용하는 방식을 제안하고, 그 유용성을 검증해 보았다. 충돌해석은 전반적으로 비선형성이 강하고, 인자들간의 교호작용이 크게 작용하고 있기 때문에 기존의 민감도를 이용한 최적설계나 직교배열표를 이용하여 충돌부품을 설계하는 경우 몇 가지 어려움이 존재한다. 이러한 부품 설계과정에서 반응표면법을 이용하여 충돌부품들을 설계를 수행해 보고, 그 결과를 민감도를 이용한 최적설계 방법과 직교배열표를 이용한 설계를 통해 얻어진 결과와 비교해 보았다. 승객 보호장구 설계의 예를 통해서 반응표면법을 이용하는 경우, 민감도를 이용한 최적화 방식보다 비선형성의 영향이 작고, 교호작용을 고려하지 않은 직교배열표를 이용한 실험계획법에서 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다는 사실을 확인하였다. 이런 예제들을 통하여 비선형성이 강하고, 교호작용이 심한 충돌해석을 통한 충돌부품설계에서 반응표면법의 유용성을 확인하였다.

향후에는 차체와 충돌특성곡선과의 관계를 관찰하고, 이를 이용하여 본 논문에서 제시한 최적화 문제를 통해 얻어진 충돌특성곡선을 갖는 차체를 설계하는 방법에 대해 연구하고, 이를 승객 거동해석을 이용한 충돌부품의 설계과정과 연결하여 충돌해석의 두 분야의 통합설계방안에 대한 연구가 이루어져야 하겠다.

후 기

이 연구는 교육부 지원 BK21 사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1) P. Parasad and C. C. Chou, "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) J. T. Fleck and F. E. Butler, "Validation of the Crash Victim Simulator", Report No. DOT HS-806 279, 1981.
 - 3) L. A. Obergefell and T. R. Gardener, I. Kaleps and J. T. Fleck, "Articulated Total Body Model Enhancements", Report No. AAMRL-TR-88-043, 1988.
 - 4) 임재문, "차량충돌시 승객거동해석을 위한 소프트웨어의 개발 및 관련 부품의 설계방안제시", 한양대학교 박사학위 청구논문, 1997.
 - 5) J. A. Bennett, G. J. Park, "Automotive Occupant Dynamics Optimization," Shock and Vibration, Vol. 2, No. 6, pp.471-479, 1995.
 - 6) Y. S. Park, J. Y. Lee, J. M. Lim, G. J. Park, "Optimum Design of a Steering Column to Minimize the Injury of Passenger," International Journal of Vehicle Design, Vol. 17, No. 4, 1996.
 - 7) Visual DOC Manual 1.0, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO, 1998.
 - 8) Y. S. Park, S. H. Lee, G. J. Park, "A Study of Direct vs. Approximation Methods in Structural Optimization," Structural Optimization, Vol. 10, No. 1, pp.64-66, 1994.
 - 9) 박영선, 박경진, 이완익, "최적설계시 이차근사법 수치성능 평가에 관한 연구", 대한기계학회논문집 Vol. 16, No. 2, pp. 263-247, 1992.
 - 10) Phadke, S. Madhav, "Quality Engineering Using Robust Design", Prantice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1989.
 - 11) 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 서울, 1991.
 - 12) G. N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill book company, New York, 1984.
 - 13) 신문균, 박기종, 박경진, "후방추돌시 목상해를 고려한 승객거동해석 및 좌석 설계", 한국자동차공학회논문집, 12월, 제 7권, 제9호, pp.182-194, 1999.
 - 14) 신문균, 홍성우, 박경진, "안전도를 고려한 전동 틸트/텔레스코픽 조향주의 해석 및 설계", 대한기계학회논문집, 6월, 제24권, 6호, pp.1479-1490, 2000.
 - 15) Charles, Kittel, "Berkeley physics course MECHANICS", Vol. 1, McGraw-Hill Inc, New york, 1973.
 - 16) DOC Users Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO, 1995.
 - 17) DOT Users Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO, 1995.
 - 18) 자동차 안전기준 시행세칙, 건설교통부, 1993.