

직교배열표를 이용한 에너지흡수 조향계의 해석 및 설계

Analysis and Design Considerations of Energy Absorbing Steering System Using Orthogonal Arrays

임재문*, 한선규**, 전원기**, 우덕현***, 박경진****
Jae Moon Lim, Sunkyu Han, Wongi Jeon, Durkhyun Wuh, Gyung-Jin Park

ABSTRACT

An occupant analysis code SAFE (Safety Analysis For occupant crash Environment) is utilized to simulate and improve the crash performance of an energy absorbing steering system. The safety standard FMVSS 203 is simulated and used for design evaluations. Segments and contact ellipsoids are utilized to model the body blocks and the components of the steering system with SAFE. Spring-damper elements and force-deflection characteristics are utilized to model the energy absorbing components such as the plate and the polyacetal molding. The plate absorbs the impact energy through tensile deformation. Whereas, the polyacetal molding absorbs the impact energy through compression. The body block test is carried out to validate the simulation model, and real component tests are performed to extract the force-deflection curves. After the model is validated, the parameter study is carried out to evaluate the crash performance of the energy absorbing components. A performance measure is defined for the parameter study. Using the results of the parameter study and managing the orthogonal arrays, optimum design values of energy absorbing components are determined to minimize the occupant injury.

주요기술용어 : Energy Absorbing Steering System(에너지흡수 조향계), Body Block Test(모형 몸체시험), Orthogonal Arrays(직교배열표), Force-Deflection Characteristics(힘-변형 특성), SAFE(Safety Analysis For occupant and Environment)

Nomenclature

SD : spring-damper

1. 서론

점차 대형화되어 가는 교통사고의 인명피해를 줄이기 위해 1970년대 초부터 선진국에서는 관련 법규를 제정하고 에어백(airbag), 에너지흡수 조향계(energy absorbing steering system), 안

* 정회원, 대우자동차(주) 상용차부문

** 삼성전기(주) 자동차부품연구소

*** 정회원, 삼성전기(주) 자동차부품연구소

**** 정회원, 한양대학교 기계산업공학부

전벨트(seat belt) 등과 같은 승객보호 장비를 연구개발 해오고 있다.¹⁻⁴⁾ 조향계는 안전벨트와 에어백이 없는 경우 운전자와 가장 먼저 충격을 일으켜 충격에너지를 직접 전달하므로써 심각한 상해를 유발시키므로, 운전자의 상해를 줄이기 위하여 에너지흡수 조향계에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.³⁻⁴⁾

본 연구의 목적은 에너지흡수 조향계의 충돌 특성을 검토하고 에너지흡수 성능을 개선시키기 위한 설계방법론을 개발하는 것이다. 에너지흡수 조향계의 충돌 성능은 승객거동해석 소프트웨어인 SAFE(Safety Analysis For occupant and Environment)⁵⁾를 이용하여 해석하고자 한다. SAFE는 다물체 동역학에 근거를 두고 있으며 ATB(Articulated Total Body)⁶⁻⁷⁾를 기반으로 개발된 것이다. 조향계는 강체요소와 조인트로 모델링하며, 에너지흡수 부품과 브라켓은 하중제거 및 재부하 과정(unloading and reloading process)을 고려한 힘-변형 특성을 갖는 스프링-댐퍼 요소로 모델링한다.⁸⁾ 또한, 조향주와 조향축(steering column and shaft) 및 에너지흡수 부품의 거동이 실제와 가깝도록 모델링한다. 해석 모델은 모형 몸체 시험(body block test) 결과와의 비교를 통해 검증하며, 완성된 모델을 통해 시험으로는 파악하기 어려운 조향계 단품들의 거동을 상세하게 파악할 수 있도록 한다.⁹⁾ 검증된 해석 모델을 이용하여 에너지흡수 부품의 강성 변화가 조향계의 거동과 에너지흡수 특성에 미치는 영향을 검토하고, 조향계의 충돌 특성을 개선시킬 수 있는 에너지흡수 부품들의 설계방안을 제시하고자 한다. 모형몸체에 작용하는 최대 하중은 FMVSS 203 규정¹¹⁾에 의해 제한되는 값이며 이를 감소시키기 위하여 하중곡선의 미분값들의 제곱합을 이용한 목적함수를 제안한다. 승객거동해석과 같이 비선형성이 강한 문제에서는 실험계획법을 이용한 설계가 효과적이므로,⁵⁾ 직교배열표(orthogonal arrays)를 이용하여 목적함수를 최소화하므로써 에너지흡수 조향계의 충돌 특성을 개선하고자 한다.

2. 에너지흡수 조향계의 모델링

에너지흡수 조향계는 조향휠(steering wheel)과 조향주(steering column)로 구성되어 있다. 림(rim)과 허브(hub)는 조향휠을 구성하는 주요 부품이며, 조향주는 상하축과 상하주의 4개의 부품으로 구성되어 있다. 상축(upper shaft)에는 조향휠이 장착되며, 하축(lower shaft)은 상축에서 전달받은 토크(torque)를 유니버설 조인트(universal joint)를 통하여 조향 기어 박스(steering gear box)에 전달하는 역할을 한다. 상주(upper column)는 상축과 볼베어링으로 연결되어 상축을 지지하며 브라켓으로 차량의 마운팅 프레임에 부착된다. 하주(lower column)는 하축을 지지하며 조향주가 움직이지 않도록 차량의 마운팅 프레임에 고정시켜 준다.

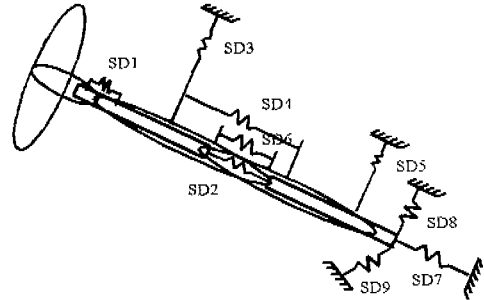


Fig. 1 A steering system model using spring-damper elements

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 조향휠과 조향주는 6개의 강체 요소로 구성되어 있고 에너지흡수 부품과 브라켓은 9개의 스프링-댐퍼 요소로 구성되어 있다. 스프링-댐퍼 요소는 하중제거과정과 재부하과정을 고려한 힘-변형 특성을 부여하므로써 에너지흡수 부품과 브라켓의 거동을 실제와 가깝게 나타낼 수 있도록 하였다. 에너지흡수 부품의 힘-변형 특성은 단품 시험을 통해 구하였다.⁹⁾ 모형 몸체는 질량과 관성을 갖는 하나의 강

체 요소로 모델링하였다.¹²⁾ 스프링-댐퍼 SD1은 상주와 상축을 연결하는 볼베어링 부위이며 상대 변위가 발생하지 않도록 힘-변형 특성을 부여하였다. 스프링-댐퍼 SD2는 상주와 상축을 연결하는 폴리아세탈몰딩(polyacetal molding)을 나타내며, 압축 변형을 통해 충돌에너지를 흡수한다. 스프링-댐퍼 SD4는 플레이트 벤드(plate bend)로 본 연구에 사용된 가장 중요한 에너지 흡수원이며 인장 변형을 하면서 충돌에너지를 흡수한다. 스프링-댐퍼 SD6는 상주와 하주가 압입 체결된 부분이며 압축 변형을 하면서 충돌에너지를 흡수한다. 스프링-댐퍼 SD7은 하축을 조향 기어 박스에 연결하는 고무 플랜지(rubber flange)를 나타낸다. 주요 에너지 흡수부의 힘-변형 특성은 Fig. 2에 나타내었다. 스프링-댐퍼 SD3, SD5, SD8, SD9는 조향계를 차량 구조물에 연결하는 브라켓을 나타낸 것이다

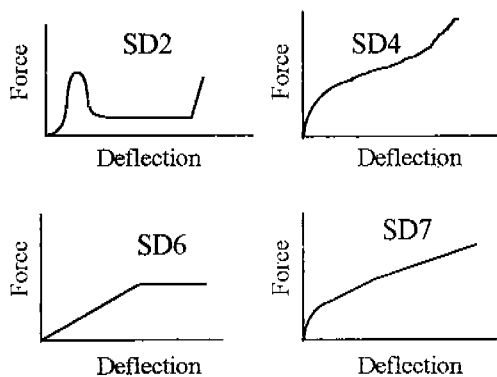


Fig. 2 Force-deflection characteristics of the energy absorbing parts

3. 모형 몸체 시험을 통한 해석 모델의 검증 및 완성

조향계의 충돌성능을 파악하고 해석 모델을 검증하기 위하여 모형 몸체 시험을 수행하였다. 모형 몸체 시험은 FMVSS 203 규정에 의해 24.14 km/h(15 mph)의 속도로 수행하였으며, 모형 몸

체에 작용하는 충격하중이 11,125 N(1,134 kgf)을 초과하지 않아야 한다. 모형 몸체 시험 결과와 SAFE 해석 결과를 일치시키기 위하여 힘-변형 특성의 보정계수(scale factor)를 조절하였으며, 주요 에너지흡수 부품의 힘-변형 곡선의 형상(경향)은 변경시키지 않도록 하였다. 보정계수는 힘-변형 곡선에서 힘 항목에 곱해지는 상수를 나타내며 힘-변형 곡선의 형상은 그대로 유지하고 강성의 크기만을 조절할 수 있게 해준다. 즉, 보정계수가 커지면 강성이 커지는 것을 의미하고 보정계수가 작아지면 강성이 작아지는 것을 의미한다. Fig. 3은 SAFE 해석 결과와 모형 몸체 시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 해석 결과와 시험 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 첫 번째 피크에서 모형 몸체에 작용하는 충격하중을 1이라 할 때 두 번째 피크에서의 충격하중은 0.826이고 끝 부분에서의 충격하중은 0.315이며, 필요에 의해 첫 번째 피크에서의 하중을 기준으로 정규화(normalization) 시켰으며 10,000 N 이하의 값을 갖는다. Fig. 4는 SAFE로 구한 주요 에너지흡수 부품의 시간에 따른 변형을 나타낸 것이며, Fig. 5는 에너지흡수 부품에 작용하는 하중을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 22 ms 부근에서 몰딩(SD2)과 컬럼압입부(SD6)가 파손되기 직전에 모형몸체에 작용하는 하중이 최대가 되며, 파손이 발생한 후에는 상주와 상축이 강제거동을 하면서 작용하는 하중이 감소하다가 강제거동이 끝날 부근에 다시 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 상주와 상축이 강제거동을 하는 구간인 22 ms와 45 ms 사이에서 스프링-댐퍼 SD4는 인장 변형을 하면서 충돌에너지를 흡수하며 상주와 상축이 급격하게 하주와 하축방향으로 강제거동 하는 것을 방지해준다. 두 번째 피크에서 발생하는 하중의 증가는 상하주 및 상하축의 급속접촉에 의해 발생한 것이며, 플레이트부(SD4)가 인장변형하므로써 급격한 강제거동을 방지하여 모형 몸체에 작용하는 하중이 급격하게 증가하지 않도록 한 것으로 판단된다.

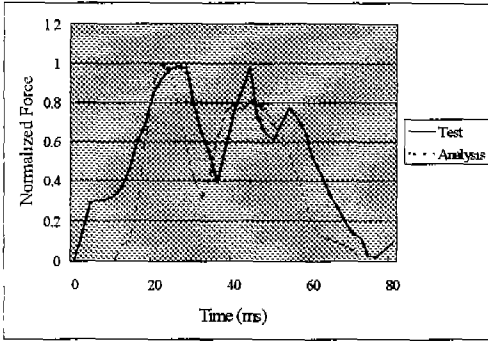


Fig. 3 Comparison of the test and the analysis results

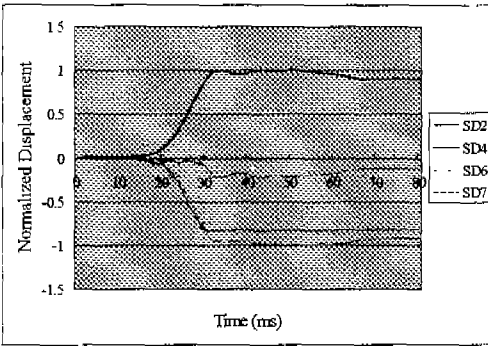


Fig. 4 Displacements of the energy absorbing parts

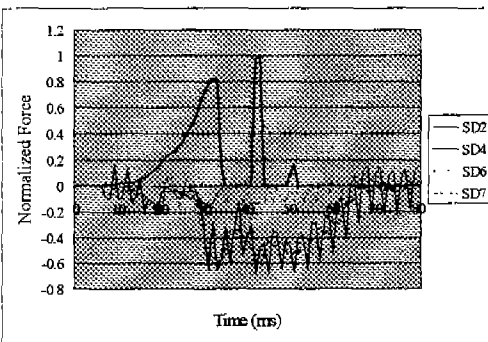


Fig. 5 Forces of the energy absorbing parts

모형 몸체와 조향계의 거동을 Fig. 6에 나타내었다. 모형 몸체와 조향계의 접촉은 0 ms에 시작하며 80 ms에서 모형 몸체가 조향계로부터 분리된다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 모형 몸체와 조향계가 중복되게 보이는 것은, 모형 몸체와 조향계가 접촉한 후 모형 몸체가 조향휠로 침투 (penetration)하면서 발생한 현상에 의한 것이다. 본 연구에서 사용한 SAFE와 같이 다물체 동역학에 근거한 승객거동해석 소프트웨어는 이와 같이 침투하는 현상을 이용하여 변형량을 예측하고 접촉력(contact force)을 계산한다.^{1-2, 5-7)} 즉, 모형 몸체와 조향휠 사이에서 발생한 침투길이 (penetration length)를 변형량이라고 가정하여, 조향계의 힘-변형 특성으로부터 모형 몸체에 작용하는 충격하중을 구할 수 있다. 조향계에는 반대방향을 갖는 동일한 크기의 반작용력(reaction force)이 작용하여 이 힘이 조향계의 물딩과 컬럼압입부를 파손시켜 상주와 상축이 강제거동을 할 수 있게 한다.⁵⁻⁷⁾

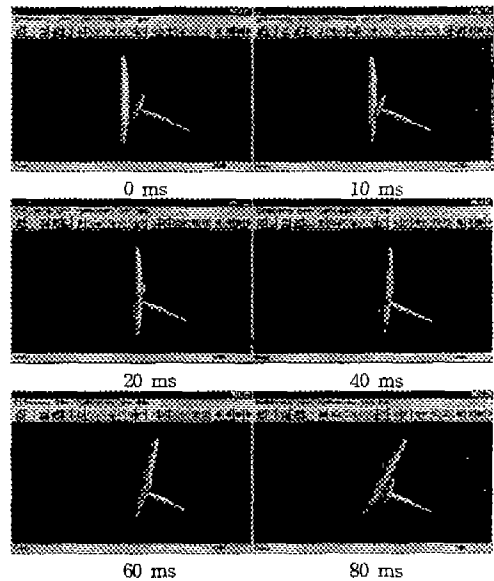


Fig. 6 Behavior of the body block and the steering system

4. 에너지흡수 부품의 강성 변화에 따른 조향계의 거동 고찰

힘-변형 곡선의 보정계수 값을 조정하여 스프링-댐퍼 SD2, SD4, SD6, SD7의 강성을 변화시켰으므로, 에너지흡수부의 강성 변화가 조향계의 충돌 성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 강성의 변화는 30 % 범위내에서 15 %씩 증가시키거나 감소시켰으며, 스프링-댐퍼의 강성에 따라 모형 물체에 작용하는 하중곡선을 Fig. 7에서 Fig. 10에 나타내었다. 각각의 그림에서 DN15와 DN30은 강성을 각각 15 %와 30 % 감소시킨 것이며 UP15와 UP30은 15 %와 30 % 증가시킨 것이고 ORG는 초기 강성값에 따른 결과를 나타낸 것이다.

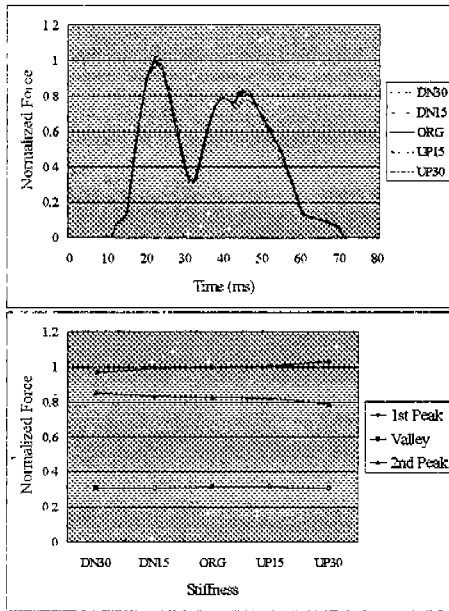


Fig. 7 Parameter study results of the spring-damper SD2

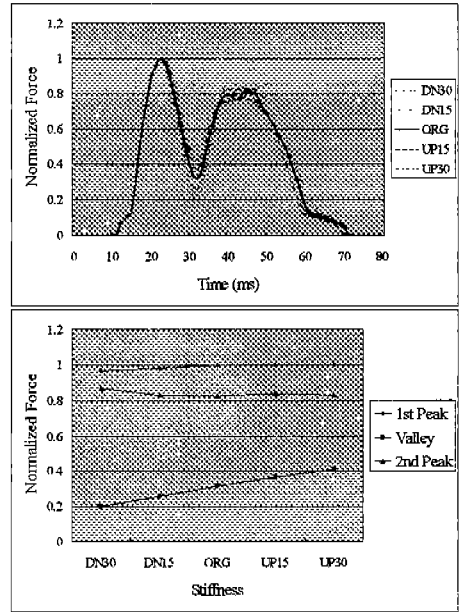


Fig. 8 Parameter study results of the spring-damper SD4

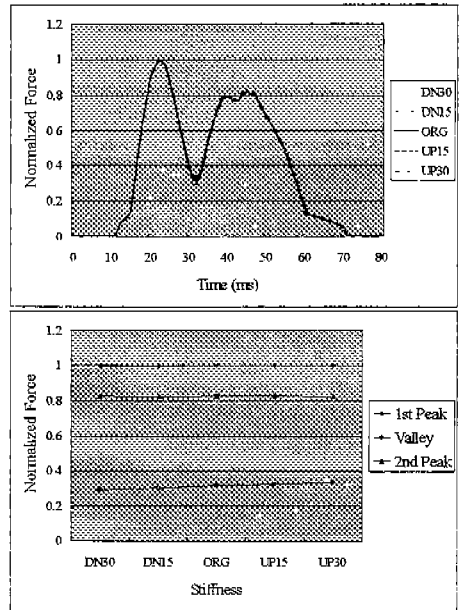


Fig. 9 Parameter study results of the spring-damper SD6

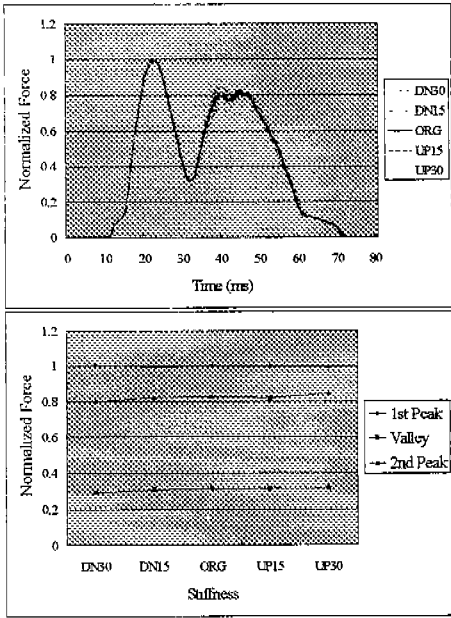


Fig. 10 Parameter study results of the spring-damper SD7

Fig. 7에 나타낸 것과 같이, 스프링-댐퍼 SD2의 강성을 증가시키면 첫 번째 피크에서 모형물체에 작용하는 하중은 증가하고 두 번째 피크에서의 하중은 감소한다. 스프링-댐퍼 SD4의 경우에는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 강성을 증가시키면 첫 번째 피크에서의 하중은 증가하고 끝 부분에서의 하중도 증가한다. 두 번째 피크에서의 하중은 감소하는 경향을 보이다 약간 증가하는데, 이는 끝 부분에서의 하중의 증가가 영향을 미친 것으로 판단된다. 스프링-댐퍼 SD6의 경우도 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 SD4와 유사한 경향을 갖지만 다른 에너지흡수 부품에 비해서는 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 스프링-댐퍼 SD7의 경우에는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 강성을 증가시키면 첫 번째 피크에서의 하중은 감소하고 두 번째 피크에서의 하중은 증가하며 끝 부분에서의 하중도 증가한다. SD2와 SD7이 서로 상반되는 경향을 갖는 것을 알 수 있으며, SD7이 유연(soft)해지면 SD7의 자체변형이

증가되어 물덩이 파손되는 것을 지연시키기 때문이다. 이상에서 보는 것과 같이 첫 번째 피크에서의 모형 물체에 작용하는 하중을 감소시키기 위해서는 SD2, SD4, SD6의 강성을 감소시키고 SD7의 강성은 증가시켜야 되며, 두 번째 피크에서는 SD2의 강성은 증가시키고 SD7의 강성은 감소시켜야 되는 것을 알 수 있다. 또한, 첫 번째 피크와 두 번째 피크에서 모형 물체에 작용하는 하중을 감소시키기 위한 것이 서로 상반되는 결과를 초래하기 때문에 두 값을 모두 감소시키는 것은 용이하지 않은 것으로 판단된다.

5. 목적함수의 정의

모형 물체에 작용하는 충격하중을 최소화하고 에너지흡수 부품을 효과적으로 설계하기 위해서는 목적함수를 적절하게 정의할 필요가 있다.^{5,13)} 3절에서 언급한 것과 같이 모형 물체에 작용하는 최대 하중이 FMVSS 203에서 상해치를 나타내는 지수이며 최소화해야 할 대상이 된다. 상해치를 감소시키기 위하여 최소화해야 할 목적함수로써 하중곡선에서 나타나는 두 개의 피크를 이용할 수 있지만, 4절에 나타낸 것과 같이 에너지흡수 부품의 강성변화에 따라서 초기설계에 의한 결과를 중심으로 하중곡선의 피크가 전후로 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서, 피크를 목적함수로 이용하는 것보다는 하중곡선과 관련된 것을 이용하는 것이 바람직할 것이다.

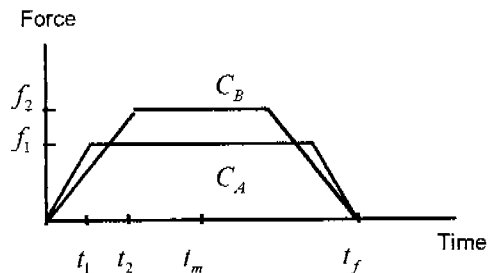


Fig. 11 The idealized force-time curves

Table 1 Summation values of the derivatives

	Curve C_A	Curve C_B
From 0 to t_m	$\left \left(\frac{f_1}{t_1} \right) \times t_1 + 0 \times (t_m - t_1) \right = f_1$	$\left \left(\frac{f_2}{t_2} \right) \times t_2 + 0 \times (t_m - t_2) \right = f_2$
From t_m to t_f	$\left \left(-\frac{f_1}{t_1} \right) \times t_1 + 0 \times (t_m - t_1) \right = f_1$	$\left \left(-\frac{f_2}{t_2} \right) \times t_2 + 0 \times (t_m - t_2) \right = f_2$
Total	$2f_1$	$2f_2$

본 논문에서는 하중곡선을 구간별로 나누어 구한 미분값들의 제곱합을 목적함수로 이용하고자 한다. 충돌상황에서 승객에게 전달되는 충격량 또는 운동량을 이상화시킨 두 개의 곡선을 Fig. 11에 나타내었으며, 이 곡선들이 갖는 면적은 동일하고 시간 t_m 을 중심으로 좌우 대칭 형태를 갖는다고 가정하자. Fig. 11에 나타낸 것과 같이 곡선 C_A 가 곡선 C_B 보다 최대하중이 작기 때문에 바람직한 형태의 충격량 곡선이라고 볼 수 있다. Fig. 11에 나타낸 곡선을 구간별로 나누어 미분값을 구하고 이를 전체 구간에서 합하면, Table 1에 나타낸 것과 같이 곡선 C_A 는 $2f_1$ 이며 곡선 C_B 는 $2f_2$ 이다. 즉, $f_1 < f_2$ 이므로 곡선 C_A 의 미분값들의 합이 곡선 C_B 보다 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상에 주목하여, 하중곡선의 미분값들의 합을 감소시킬 수 있도록 설계변수들의 값을 정하면, 초기설계보다 작은 피크를 갖는 하중곡선이 구해질 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 초기에 구한 충격하중곡선이 C_B 와 같은 형태인 경우에 C_A 와 같은 형태로 변경시키기 위해서 식 (1)에 나타낸 것과 같이 하중곡선의 미분값들의 제곱합을 이용하고자 한다. 식 (1)에서 미분에 제곱을 취한 것은 부호에 의한 영향을 제거하기 위한 것이다.

$$F_{objective}(x) = \int \left(\frac{df}{dt} \right)^2 dt \quad (1)$$

6. 직교배열표를 이용한 최적설계

승객거동해석은 비선형성이 매우 강하므로 해석적인 방법(analytical method)에 의한 최적설계가 용이하지 않기 때문에 실험계획법(design of experiments)을 이용하여 에너지흡수 부품의 설계 개선안을 구하고자 한다.⁵⁾ 식 (1)에 나타낸 하중곡선의 미분값의 제곱합을 최소화 하기 위하여 직교배열표를 이용하였으며, Table 2에 나타낸 것과 같이 4개의 설계변수와 5개의 수준(level)을 갖는 직교배열표를 구성하였다. 설계변수는 스프링-댐퍼 SD2, SD4, SD6, SD7의 힘-변형 함수의 보정계수이다. Table 2에서 1, 2 수준은 강성을 각각 30%, 15% 감소시킨 것이며 3수준은 강성을 변화시키지 않은 것이다. 4, 5 수준은 강성을 각각 15%, 30% 증가시킨 것이다. 이 직교배열표에 의한 해석결과 및 하중곡선의 미분값의 제곱합을 Table 2에 같이 나타내었다. 설계변수의 최적수준은 Table 2에 나타낸 결과의 후처리를 통하여 Table 3과 같이 구성하였다.

Table 3에서 각각의 값들은 Table 2에서 각 설계변수를 각각의 수준끼리 합하여 구한 것이다.¹¹⁾ 예를 들어, 첫 번째 수준에서의 SD2의 값은 Table 2에서 첫 번째 수준에 해당되는 값들을 모두 더해서 구성되었다. 설계변수의 최적수준은 최소값을 갖는 각각의 수준으로 결정되므로, SD2는 1 수준, SD4는 5 수준, SD6는 5 수준, SD7은 1 수준이 최적수준이 된다. 결정된 최적수준을 이용하여 해석한 결과를 구하면 하중곡

Table 2 Analysis results using orthogonal arrays

Trial Number	Design Variables				Normalized Forces			$\int \left(\frac{df}{dt} \right)^2 dt$
	SD2	SD4	SD6	SD7	1st Peak	2nd Peak	Valley	
1	1	1	1	1	0.951	0.878	0.153	1.134
2	1	2	2	2	0.964	0.855	0.233	1.055
3	1	3	3	3	0.967	0.852	0.310	0.983
4	1	4	4	4	0.975	0.864	0.379	0.943
5	1	5	5	5	0.982	0.868	0.440	0.878
6	2	1	2	3	0.963	0.870	0.185	1.188
7	2	2	3	4	0.968	0.858	0.261	1.066
8	2	3	4	5	0.974	0.841	0.334	0.985
9	2	4	5	1	0.991	0.827	0.374	0.915
10	2	5	1	2	0.998	0.830	0.388	0.918
11	3	1	3	5	0.979	0.926	0.216	1.234
12	3	2	4	1	0.994	0.812	0.251	1.025
13	3	3	5	2	0.999	0.830	0.329	0.989
14	3	4	1	3	1.001	0.826	0.345	0.964
15	3	5	2	4	1.010	0.826	0.405	0.923
16	4	1	4	2	0.990	0.827	0.202	1.139
17	4	2	5	3	0.989	0.825	0.284	1.034
18	4	3	1	4	0.993	0.824	0.300	1.019
19	4	4	2	5	1.005	0.814	0.365	0.966
20	4	5	3	1	1.029	0.777	0.410	0.883
21	5	1	5	4	0.981	0.899	0.238	1.174
22	5	2	1	5	0.986	0.888	0.258	1.132
23	5	3	2	1	1.006	0.784	0.290	0.971
24	5	4	3	2	1.024	0.799	0.359	0.946
25	5	5	4	3	1.043	0.779	0.419	0.916

Table 3 Evaluation of the orthogonal arrays for the summation of the derivatives

DV Level	SD2	SD4	SD6	SD7
1	4.992	5.868	5.167	4.929
2	5.072	5.312	5.102	5.047
3	5.135	4.948	5.113	5.084
4	5.041	4.734	5.007	5.125
5	5.139	4.518	4.990	5.195

선의 미분값의 제공합은 0.864이고, 첫 번째 피크에서 모형 물체에 작용하는 하중은 0.987이며 두 번째 피크에서의 하중은 0.839이고 골 부분에서의 하중은 0.425이다. 즉, 하중곡선의 미분값의 제공합은 13.6 % 감소하였고 첫 번째 피크에서의 하중은 1.3 % 감소하였지만, 두 번째 피크에서의 하중은 1.58 % 증가하였고 골 부분에서의 하중은 34.9 % 증가하였다. 일반적으로 하중곡선의 피크가 하나인 문제에서는 초기설계보다 개선된 결과를 구할 수 있으나,^{5,14)} 이와 같이 피크가 두 개인 문제에서는 골 부분이 미치는 영향에 의해 그다지 개선된 결과를 구하지 못한 것을 알 수 있다. 설계변수들의 최적조합에 의한 결과가 초기설계보다 그다지 개선되지 않은 경우에는 직교배열표상에서 적절하다고 판단되는 설계변수들의 조합을 선택하여 사용할 수 있다.^{5,11)} 4절에 나타난 설계변수의 강성변화에 따른 결과를 반영하면, Table 2에서 하중곡선의 미분값의 제공합이 감소한 것 중에서 3번째의 설계변수들의 조합을 선택할 수 있다. Table 2에 나타난 것과 같이 하중곡선의 미분값의 제공합은 1.7 % 감소하고 첫 번째 피크에서의 하중은 0.967로 3.3 % 감소하며 골 부분에서의 하중은 1.6 % 감소한다. 두 번째 피크에서의 하중은 0.852로 3.2 % 증가하지만 첫 번째 피크보다 작은 값을 가지므로 크게 문제되지는 않으리라고 판단된다.

7. 직교배열표에 의한 설계 결과 고찰

Table 3으로부터 각각의 설계변수가 하중곡선의 미분값의 제공합에 미치는 영향을 파악할 수 있으며 이를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 보는 것과 같이 스프링-댐퍼 SD4가 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며 하중곡선의 미분값의 제공합을 감소시키기 위해서는 SD4의 강성을 증가시켜야 되는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 12에서 보는 것과 같이 피크가 두 개인 하중곡선의 경우에는 각각의 피크와 골 부분에서

설계변수가 미치는 영향을 파악하는 것이 용이하지 않다.

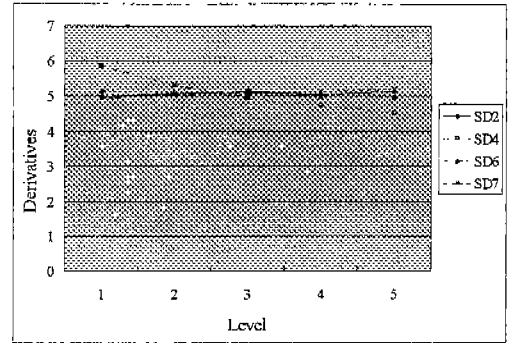


Fig. 12 Design variable effects for the summation of the derivatives

피크와 골부분에서 각각의 설계변수가 미치는 영향을 검토하기 위하여 Table 2에 나타난 결과를 토대로 Table 4에서 Table 6을 구성하고 이를 Fig. 13에서 Fig. 15에 나타내었다. Table 4는 첫 번째 피크를 이용한 것이고 Table 5는 두 번째 피크를 이용한 것이며 Table 6은 골 부분에서의 하중을 이용한 것이다. Fig. 13과 Fig. 14에 나타난 것과 같이 첫 번째 피크와 두 번째 피크에 대한 경향이 서로 상반되는 것을 알 수 있다. 즉, 첫 번째 피크를 감소시키면 두 번째 피크가 증가하고 두 번째 피크를 감소시키면 첫 번째 피크가 증가한다. 첫 번째 피크를 감소시키기 위해서는 SD2, SD4, SD6의 강성을 감소시키고 SD7의 강성은 약간 증가시켜야 된다. 두 번째 피크를 감소시키기 위해서는 SD2, SD4의 강성을 증가시키고 SD7의 강성은 감소시켜야 되는 것을 알 수 있다.

이것은 4절에서 구한 결과들과 잘 일치하고 있는 것을 보여준다. 골부분에서는 Fig. 15에 나타난 것과 같이 SD4의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며 SD4의 강성이 증가하면 골부분의 하중이 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 4 Evaluation of the orthogonal arrays for the 1st peak

DV Level	SD2	SD4	SD6	SD7
1	4.839	4.864	4.929	4.971
2	4.894	4.901	4.948	4.975
3	4.983	4.939	4.967	4.963
4	5.006	4.996	4.976	4.927
5	5.040	5.062	4.942	4.926

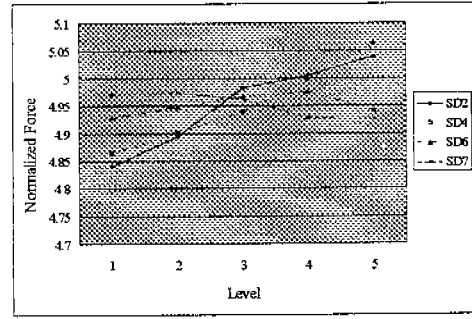


Fig. 13 Design variable effects for the 1st peak

Table 6 Evaluation of the orthogonal arrays for the valley

DV Level	SD2	SD4	SD6	SD7
1	1.515	0.994	1.444	1.478
2	1.542	1.287	1.478	1.511
3	1.546	1.563	1.556	1.543
4	1.561	1.822	1.585	1.583
5	1.564	2.062	1.665	1.613

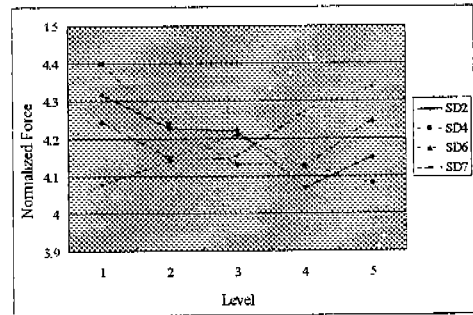


Fig. 14 Design variable effects for the 2nd peak

Table 5 Evaluation of the orthogonal arrays for the 2nd peak

DV Level	SD2	SD4	SD6	SD7
1	4.317	4.400	4.246	4.078
2	4.226	4.238	4.149	4.141
3	4.220	4.131	4.212	4.152
4	4.067	4.130	4.123	4.271
5	4.149	4.080	4.249	4.337

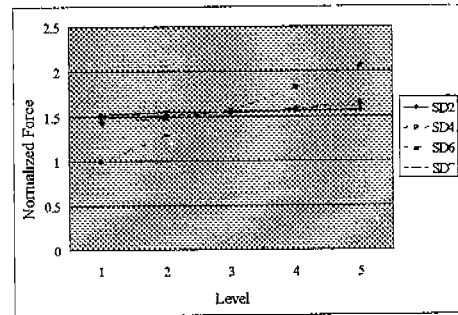


Fig. 15 Design variable effects for the valley

Fig. 12에서 Fig. 15에 나타낸 것과 같이 하중 곡선의 미분값의 제공함은 두 개의 피크가 작아 지며 감소되었다기 보다는 끝부분의 하중이 증가 하므로써 감소되었다고 할 수 있다. 즉, SD4의

강성의 변화는 두 개의 피크와 골 부분에 모두 영향을 미치지만, 특히 골부분에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, 골 부분에서의 하중이 증가하므로써 SD4의 강성을 증가시켜도 두 번째 피크에서의 하중이 크게 증가시키지 않은 것을 알 수 있다. 이상에서 본 것과 같이 하중곡선의 피크를 감소시키기 위해서 각각의 설계변수가 미치는 영향을 검토하면, 전체적으로는 SD4가 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며, 첫 번째 피크에서는 SD2, 골 부분에서는 SD4, 두 번째 피크에서는 SD7이 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

8. 결론

승객거동해석 소프트웨어인 SAFE를 이용하여 에너지흡수 조향계의 충돌특성을 검토하였으며 이를 개선시키고자 하였다. FMVSS 203 규정에 의한 모형물체시험과 해석결과의 비교를 통해 해석모델을 완성하였으며, 조향계의 상하축과 상하주의 거동이 실제와 일치하였다. 모형물체에 작용하는 충격하중을 감소시키기 위한 목적함수로써 하중곡선의 미분값의 제곱합을 제안하였으며, 에너지흡수 부품을 최적화시키기 위하여 직교배열표를 이용하였다. 에너지흡수 부품의 강성의 변화가 조향계의 충돌 특성에 미치는 영향과 직교배열표에 의한 설계변수의 영향을 검토한 결과, SD4(플레이트 밴드)가 조향계의 전체적인 충돌특성에 미치는 영향이 가장 크고, 부분적으로는 첫 번째 피크에서 SD2, 두 번째 피크에서 SD7, 골 부분에서 SD4가 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 조향계와 같이 충격하중곡선이 두 개의 피크를 갖는 경우에는 골 부분에서의 하중의 크기를 증가시켜, 미분값의 제곱합을 감소시키므로써 조향계의 충돌특성을 개선시키려고 하는 것을 알았다. 향후 연구 과제로는 골 부분에서의 영향이 피크 부분에 미치지 않도록 설계변수들을 비연성화(decoupling)시킬 수 있는 방안을 검토하여야 할 것이다.

참고 문헌

1. 박경진, 박영선, 이주영, 정근섭, 서명원, 위인혁, "승객거동해석의 시뮬레이션에 관하여", 한국자동차공학회지, 제14권, 제6호, pp. 29-35, 1992.
2. 신문균, 박경진, 이완익, 김형중, 정근섭, "승용차 충돌시 승객해석을 위한 모델링의 예", 한국자동차공학회지, 제14권, 제2호, pp. 88-98, 1992.
3. Y. S. Park, J. Y. Lee, J. M. Lim and G. J. Park, "Optimum Design of a Steering Column to Minimize the Injury of Passenger", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 17, No. 4, pp. 398-414, 1996.
4. J. D. Horsch, D. C. Viano and J. Decou, "History of Safety Research and Development on the General Motors Energy-Absorbing Steering System", SAE Paper No. 912890, 1991.
5. J. M. Lim, "Software Development for the Occupant Crash Analysis and Recommendations for the Related Part Design", Ph.D. Thesis, Hanyang University, 1997.
6. J. T. Fleck and F. E. Butler, "Validation of the Crash Victim Simulator", Report No. DOT HS-806 279, 1981.
7. L. A. Obergefell, T. R. Gardner, I. Kaleps and J. T. Fleck, "Articulated Total Body Model Enhancements". Report No. AAMRL-TR-88-043, 1988.
8. J. T. Wang and K. H. Lin, "A CAL3D Steering system Impact Model", SAE Paper No. 880650, 1988.
9. 박경진, 임재문, 최우석, 한선규, 전원기, "안전도규정(FMVSS 203)을 만족하기 위한 에너지흡수 조향계의 해석 및 설계방안", 삼성전기 자동차부품 사업부.

최종보고서, 1997.

10. 49CFR, Part 571, FMVSS 203, "Impact Protection for the Driver from the Steering Control System", DOT, NHTSA.
11. M.S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, 1989.
12. SAE J944 JUN80, "Steering Control System - Passenger Car - Laboratory Test Procedure", SAE Recommended Practice.
13. S.K. Han, "Analysis and Design of Energy Absorbing Steering System to Satisfy Safety Standard", M.S. Thesis, Hanyang University, 1997.
14. 임재문, 박경진, "정면충돌시 직교배열표를 이용한 승객보호장구의 설계", 한국자동차공학회 춘계학술대회초록집, pp. 814-819, 1998.