

## 후방추돌시 목상해를 고려한 승객거동해석 및 좌석설계

### Occupant Analysis and Seat Design to Reduce the Neck Injury for Rear End Impact

신문균\*, 박기중\*, 박경진\*\*  
Moon-kyun Shin, Ki-jong Park, Gyung-jin Park

#### ABSTRACT

Occupant injury in rear end impact is rapidly becoming one of the most aggravating traffic safety problems with high human suffering and societal costs. Although rear end impact occurs at relatively low speed, it may cause permanent disability due to neck injuries resulting from an abrupt moment, shear force, and tension/compression force at the occipital condyles. The analysis is performed for a combined occupant-seat model response, using the SAFE(Safety Analysis For occupant crash Environment) computer program. The computational results are verified by those from sled tests. A parameter study is conducted for many physical and mechanical properties. Seat design has been performed based on the design of experiment process with respect to five parameters : seat-back upholstery stiffness, torsional stiffness of the seat-back, headrest upholstery stiffness, the clearance between occupant's head and the headrest, and friction coefficient of the seat-back. An orthogonal array is selected from the parameter study. A good design has been found from the analysis results based on the orthogonal array. The results show that reductions of stiffness in seat-back upholstery and joint are the most effective for preventing neck injuries.

주요기술용어 : Rear end impact(후방추돌), Occipital condyles(후두과상돌기), ANOVA(분산분석), Orthogonal array(직교배열표), Flexion moment(굽힘모멘트), Extension moment(젓힘모멘트), Sled test(썰매실험)

---

\* 정회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 정회원, 한양대학교 기계산업공학부

#### 1. 서론

후방추돌은 매년 미국에서 전체 교통사고의 3분의 1을 차지하고 있으며, 후방추돌 사고 시 문체가 되고 있는 승객의 목 상해는 좌석의 안전성

에 크게 좌우되므로 후방추돌 시 좌석의 안전성 확보에 대한 관심과 연구가 집중되고 있다. 후방 추돌(rear end impact)은 대부분 저속에서 발생하며, 목과 몸통 사이 상대운동과 회전운동을 유발시켜 목 부분의 손상을 가져온다. 목 상태와 관련된 인자로는 크게 후두 과상 돌기(occipital condyles)에서의 모멘트, 전단력, 인장, 압축력을 들 수 있다. 또한 후방추돌 상황에서는 정면충돌과 달리 특별한 보호장구가 없으므로 좌석이 유일한 보호장구로 그 기능을 갖추고 있어야 한다. 좌석의 안전성능은 전,후방 충돌 시 승객의 목 부위의 상태에 크게 좌우되므로 각국은 자동차 좌석에 대한 안전기준을 제정하여 사고 시 승객자의 상태를 최소화하고자 노력하고 있다.<sup>(1-5)</sup>

지금까지의 후방 추돌에 대한 연구는 시험에만 의존해오고 있어 비용이나 시간 면에 있어서 많은 투자를 해야만 했다. 최근 들어 이러한 고가의 시험을 거치지 않고 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 승객거동해석이 많이 이용되고 있어 설계에서부터 시험까지 소요되는 시간과 비용을 줄이고 있다.<sup>(4,6-8)</sup>

본 연구에서는 공용(public domain)에서 구할 수 있는 승객거동해석 프로그램인 ATB(Articulated Total Body)를 보안하고, 기능이 추가된 SAFE(Safety Analysis For occupant crash Environment)를 이용해 저속 및 고속에서의 후방 추돌을 썰매시험의 결과에 유사하게 조절(tuning)함으로써 후방 추돌에 관한 승객거동해석 모델링을 완성하였다.<sup>(9)</sup>

또한 승객거동해석을 이용하여 얻어진 해석 결과를 토대로 후방추돌 상황에서의 승객의 거동을 분석하고, 상해 데이터와 더미의 움직임을 비교하여 상해 발생 경로와 상해 기구(injury mechanism)를 찾고자하였다. 그리고 상해 발생 데이터와 승객보호 관련 국내외 안전기준을 고려하여 목 상해(neck injury)를 감소시키기 위한 후방추돌시 좌석 설계 인자를 물리적, 역학적 인자라는 기본 개념으로 접근해 설계변수를 추출하였다. 승객의 목 상해에 영향을 주는 좌석의 설

계변수를 바탕으로 직교 배열표 해석을 하고, 이 결과에 대한 분산분석(ANOVA)을 수행하여 목 상해에 유의한 인자를 찾아 이를 최소화하는 설계 변수를 선정하여 좌석의 설계 기준과 설계 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 승객거동해석

### 2.1 썰매시험(sled test) 및 승객거동 해석 모델링

후방 추돌시 좌석의 승객보호 성능을 평가하기 위해 공압식 가속 추진기, 각종 가속도계, 고속 카메라 등의 각종 시험 장치로 구성된 충돌 모의 시험장비를 이용하여 좌석의 동적 성능평가 시험을 실시하였다. 좌석 등받이 강성과 탑승자 목 상해의 상관 관계를 파악하기 위하여 동일한 모델의 좌석을 충돌속도와 좌석 등받이 회전 강성(등받이 각도를) 변화시키면서 시험을 각각 5회 실시하였다. 등받이 회전 강성(각도) 변화에 대한 후방추돌 시험은 탑재된 인체모형의 거동과 하중에 대하여 좌석등받이가 일정 강성을 유지하도록 Fig. 2-1과 같이 등받이 뒷부분에 지지대(stopper)를 설치하여 등받이가 일정 각도 이상 넘어가지 않도록 유지하였다. 매 시험 때마다 다른 강성을 가진 좌석을 만들어 사용할 수 없기 때문에 이러한 방법으로 좌석의 등받이 강성을 제어하여 시험하였다.

썰매시험(sled test)에서는 목 하중과 모멘트의 측정을 위해 각종 센서가 장착된 Hybrid III 50% 더미를 사용하였고, 안전띠는 미착용 상태로, 머리 지지대는 목 상해를 쉽게 입을 수 있는 조건인 최 하단으로 고정하였다. 또한, 등받이 각도 변화에 대한 썰매시험 속도는 자동차 안전기준 제91조(FMVSS 301) 시험 시 추돌된 차량(struck vehicle)의 속도에 준 하는 33km/h로 시험하였다.<sup>(10)</sup> 후방 추돌 시 발생하는 충돌 파형을 구현하기 위하여 실제 후방 추돌 파형과 유사한 미터링 핀을 사용하였다. Fig. 2-2는 이 충돌 파형으로 만들어진 썰매(sled)의 가속도 그래

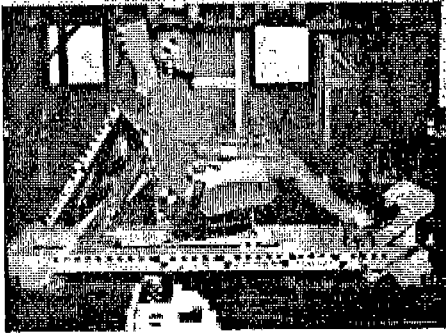


Fig. 2-1 Sled test setup with stopper

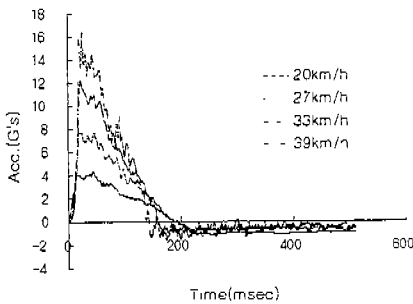


Fig. 2-2 Acceleration for the sled test in rear end impact

프이다.<sup>(3)</sup>

후방추돌 모델링을 위한 승객거동해석에서는 승객을 Hybrid III 50% 더미를 사용하여 모델링 하였으며, 이 더미는 공용에서 구할 수 있는 GEBOD를 이용하여 생성시켰다.<sup>(11,12)</sup> 이 Hybrid III 더미는 머리, 목, 흉부, 골반 및 수족 등을 나타내는 18개의 강체 요소를 조인트로 연결하여 되어있다.<sup>(4)</sup>

썰매시험에서의 좌석의 회전강성 제어할 목적으로 스토퍼를 사용한 것을 모델링하기 위하여 Fig2-3에서 처럼 차량과 등받이 사이를 스프링-댐퍼로 연결하였으며, 등받이와 쿠션은 스프링 상수와 댐핑을 가진 핀 조인트로 연결하였다. 또한, 등받이와 머리 받침대는 둘 사이의 상대적 회

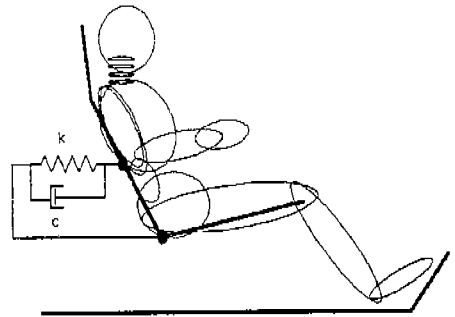


Fig. 2-3 A modeling for a joint stiffness of the seat

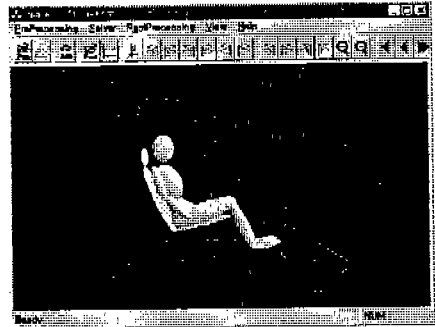


Fig. 2-4 Occupant analysis modeling for the rear end impact

전을 막기 위하여 잠김 핀 조인트를 사용하였다.<sup>(4)</sup> Fig. 2-4에서는 승객거동해석 모델링을 나타내고 있다.

## 2.2 승객거동해석 결과

앞 절의 모델링 내용을 토대로 썰매시험(sled test)을 모델링 및 해석하였다. 우선 해석 결과가 중요한 의미를 지니기 위해서는 해석이 시험 결과와 얼마나 잘 일치하는지가 중요하다. 따라서 해석을 위한 모든 입력 데이터들은 실험과 유사한 결과가 나오도록 해석 과정에서 조절(tuning)하였다. 해석 과정에서 입력 데이터를 조절하는 이유는 그 입력 데이터들이 단품 시험을 통해서 나온 결과일 지라도 시험 상황, 장비, 여건이 인체모형(dummy)을 앉힌 썰매 시험과 다를 수밖에 없기 때문이다. 이때 어떤 입력 데

이터를 바꾸어 주어야하는 가가 해석에 있어서 가장 중요할 뿐만 아니라 어려운 일이기도 하다.

Fig. 2-5에서는 해석모델의 검증을 위하여 시험 결과와 해석 결과를 비교한 그래프의 형태와 크기가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 해석 결과에서 머리 가속도, 몸통 가속도, 목 모멘트 등 모든 부분에 있어 최대 값이 나타나는 시간이 시험 결과보다 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 실제 좌석(seat)과 더미 사이의 동적 특성과 승객거동해석상에서의 강체 요소들의 동적 특성이 차이가 있어 해석 결과가 시험 보다 선행되어지는 것으로 파악된다. 따라서 이런 시간적인 차이는 시간 축으로 평행 이동시킨다면 아주 잘 일치한다고 말할 수 있을 것이다.

### 2.3 해석결과 분석 및 고찰

해석 결과를 설계에 반영시키기 위하여 먼저 인체모형(dummy)의 충돌 상황에 있어서 거동을 살펴보고 상해 발생 기구(injury mechanism)를 찾아내어야만 한다. 기존의 연구에서는 시험에서 얻어진 변환 데이터나 고속필름 등을 통해서 결과를 분석하였으나, 본 연구에서는 승객거동해석을 통해서 더미의 거동을 분석하고, 상해 데이터와 더미의 움직임을 비교해 상해 발생과정을 찾아보고자 한다

Fig. 2-6에서의 가속도 데이터에서 볼 수 있듯이 더미의 관성은 충돌 시작에서부터 약 40ms정도 더미의 운동을 지연시킨다. 더미가 운동하기 시작하는 점에서 차량(vehicle)은 최고 속도의 약 60%에 달하며, 그 결과 더미는 좌석 등받이에 부딪힌다. 대부분의 등받이 형상은 머리가 머리 받침대에 부딪히기 전에 몸통이 등받이에 먼저 부딪힌다. 이로 인하여 머리와 몸통사이에 좌석으로 인한 반동(rebound)이 시작되는 시간의 차이를 가져오며, 이러한 머리와 몸통사이의 반동 시작 시간의 차이로 인한 상대적 운동이 목 상해를 유발하는 주요한 원인이다.<sup>(4)</sup>

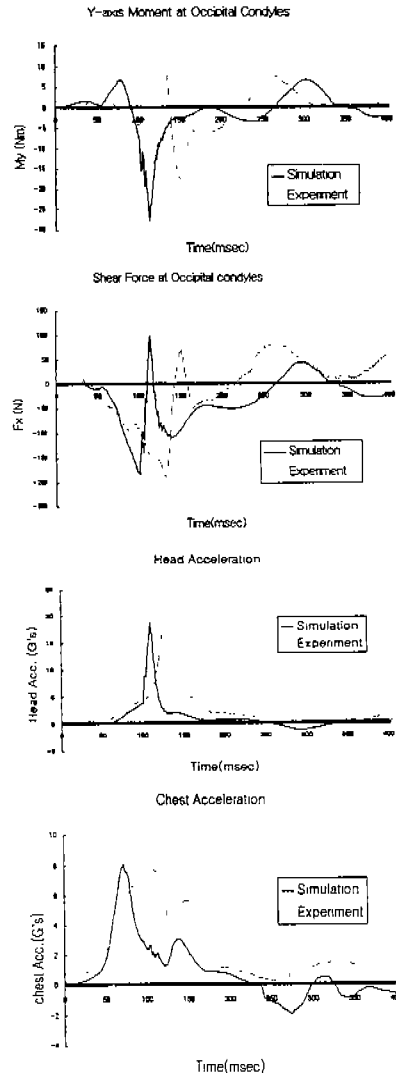


Fig. 2-5 Comparison of occupant analysis with sled test

Fig. 2-7에서는 승객거동해석을 통한 더미의 거동을 보여주고 있다. 충돌 후 시간이 지남에 따라 더미는 서서히 등받이를 향해 움직인다. 몸통이 등받이와 먼저 부딪히면서 반동되고, 그 다음 머리가 머리 받침대에 부딪히면서 앞으로 반동된다. 마지막으로 반동된 더미가 제자리를 찾아 원상 회복되고 있다.

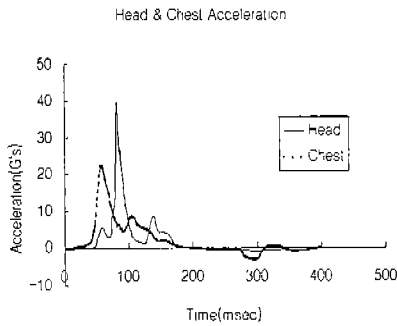


Fig. 2-6 Acceleration of occupant in rear end impact

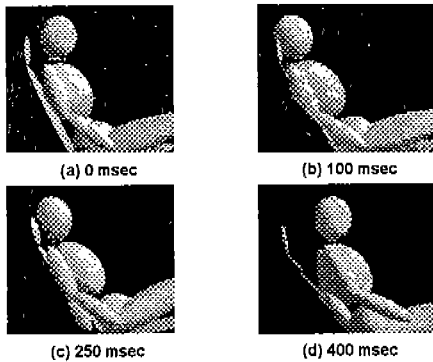


Fig. 2-7 Dummy-seat interaction(head and chest motion)

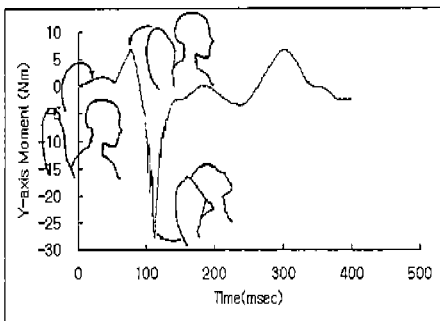


Fig. 2-8 Extension moment and dummy motion

이러한 시간에 따른 더미의 거동을 살펴보면 후방추돌에서의 더미의 거동을 예측해 볼 수 있으며, 더미의 거동을 다음과 같은 4단계로 구분할 수 있다.

▶ 단계 1 (0~60 milliseconds) : 추돌 속도나 상황에 따라서 약간의 시간적 차이가 있지만 추돌이 시작된 후 약 35~40msec 정도 동안은 관성에 의해서 더미는 거의 움직임이 없는 상태로 있다. 이 시간이 지나고 나면 더미의 몸통과 머리는 서서히 뒤로 이동하기 시작한다. 이때 좌석의 기하학적 형상 때문에 몸통은 머리보다 약간 먼저 등받이와 부딪힌다.

▶ 단계 2 (60~90 milliseconds) : 이 시간은 머리와 몸통의 상대적 운동이 가장 심하게 차이를 보이고 있다. 먼저 등받이에 부딪힌 몸통은 등받이의 강한 강성에 의해 앞으로 강하게 반동되지만 머리는 추돌 초기에 머리 받침대와 상대적으로 먼 거리 때문에 아직도 접촉하지 못하고 뒤로 움직이고 있다. 머리와 몸통 사이의 이러한 상대적 운동의 차이로 목에서의 굽힘 모멘트와 전단력이 상당히 증가해 상해 가능성이 높아진다.

▶ 단계 3 (90~300 milliseconds) : 머리가 머리 받침대에 강하게 부딪히면서 앞으로 반동되고 좌석의 등받이는 최대로 뒤로 넘어지게 된다. 목에서는 굽힘 모멘트와 앞쪽 전단력이 증가하게 되고 더미는 등받이를 타고 오르는 현상이 발생하게 된다. 특히 이런 상황에서는 안전벨트를 착용했을 지라도 차체보다 상대적으로 뒤로 이동해 있기 때문에 안전벨트가 제구실을 하지 못한다. 또한 좌석 등받이가 뒤로 넘어지기 때문에 승용차의 앞문과 뒷문사이의 B-필라에 걸려있는 벨트 고리(D-ring)에 비해 등받이와 더미는 상대적으로 뒤에 있게 되고 불안정하게 되어 더미의 반동을 제어할 수 없게 된다. 또한 안전 벨트 미착용 시 등받이를 타고 오르는 현상(ramping up)으로 인한 차량의 지붕이나 뒷좌석 승객 또는

다른 뒤쪽 내장재와의 2차 충돌 가능성도 크다.

▶ 단계 4(300 milliseconds 이상) : 충돌된 차량의 속도 변화가 마무리 된 후 충돌 전 단계로 회복되는 단계로 약하지만 단계 1의 운동과 비슷하다.

이상으로 4단계에 걸친 충돌 후 시간과 더미의 거동을 살펴보았다. Fig. 2-8에서는 후방 충돌에서 목 상해에 결정적인 영향을 준다고 보고 있는 후두과상돌기(occipital condyles)에서의 모멘트의 변화와 그때의 더미의 운동을 그래프와 그림으로 나타내고 살펴보았다.

의 상대 운동에 의하여 목에 하중과 머리의 젖힘에 의한 목 상해를 입게된다. 이러한 목 상해의 주요인자는 저속 후방충돌에서의 후두과상돌기에서의 젖힘 모멘트(extension moment)에 의한 목 상해가 가장 일반적으로 잘 알려져 있는 휩레쉬(whiplash) 상해이다.

휩레쉬의 정확한 정의는 없으며, 후방충돌 사고에서 가장 빈번히 발생하는 약한 조직(soft tissue)인 목 상해를 표현하기 위하여 사용된다. 휩레쉬는 1928년 Crow에 의해 처음 사용되었으며, 낮은 속도지만 손잡이(base)에서 높은 입력 에너지를 가진 회초리가 끝에서 높은 속도의 운

Table 3-1 Classification of neck injury

Neck injury	
Classification by neck motion	Flexion, extension, compression, flexion+compression, flexion+rotation, extension+compression, lateral flexion
Classification by injury form	Hard tissue (vertebrae)      Fracture
	Soft tissue (muscles, ligament, disc)      Sprains Strains Whiplash
	Nervous damage      General paralysis, partial paralysis

### 3. 목 상해를 고려한 좌석의 설계

#### 3.1 목 상해 및 안전도 기준

목 상해의 종류에는 운동에 따른 분류와 상해 형태에 따른 분류로 나눌 수 있다. 사람의 머리는 해부학적으로 굽힘(flexion), 젖힘(extension), 회전(rotation) 등의 운동이 가능하며, 순간적인 심한 운동에 의해 상해가 발생할 수 있다.

후방충돌에 의한 상해의 형태로는 목의 골절에서부터 신경 손상에 이르기까지 다양한 형태로 나타날 수 있다. Table 3-1에서는 목 상해의 종류를 분류별로 나타내고 있다.<sup>(3)</sup>

대부분의 후방충돌시 탑승자는 몸통과 머리와

등을 만들어 내는 것처럼 목이 반응하는 것으로 휩레쉬는 목의 인대와 근육의 심하게 늘어나서 척추의 통증, 두통, 언어장애 등의 다양하고 복합적인 증세로 나타난다.<sup>(11)</sup> 해부학적 측면의 상해 척도 중 가장 많이 사용되는 AIS(Abbreviated Injury Scale)는 차량사고와 관련된 인명 상해를 다루는 미국의료협회(Association for the Advancement of Automotive Medicine)에서 제정한 평가기준이다.

Table 3-2에서와 같이 AIS는 0~6등급으로 7등급으로 나누어지며, 각 등급은 기본적으로는 치사정도(Threat-to-Life)를 기준으로 하고 있어 정량적인 의미보다는 상대적인 상해의 심각도

(injury severity)를 의미한다.<sup>(2-3)</sup>

목 상해 기준은 1960년대 중반 Merz와 Patrick에 의해 젓힘 모멘트(extension moment)과 굽힘 모멘트(flexion moment)에 대하여 제안되었다.<sup>(5)</sup> 또한 최근 에어백의 압력으로 인한 목 상해와 인명 사고가 빈번해지자 Table 3-3와 같이 모멘트와 각 축에 대한 하중을 바탕으로 에어백 전개 압력감소를 위해 FMVSS208에 새로이 추가된 압력감소 에어백(depovered airbag)에 대한 목 상해기준이 만들어졌다.<sup>(30)</sup>

### 3.2 좌석의 등받이 역할과 성능요건

좌석 등받이의 역할은 첫째, 정면 충돌 시 뒷좌석에 있는 짐 등이 앞좌석 승객 쪽으로의 침입을 방지하고, 둘째, 후방추돌 및 정면충돌 시 척추와 목을 보호하면서 승객을 후방으로 움직이지 못하게 하며, 셋째, 측면충돌 및 전복 사고 시에도 안전띠와 함께 승객을 보호한다. 그러나 현재의 좌석설계에서는 좌석의 질량효과만 고려되어 승객으로 인한 관성력은 무시되었기 때문에 후면추돌시 등받이가 승객을 보호하기에 부적합한 것으로 사료된다.<sup>(3)</sup>

후방추돌에 대한 승객 보호는 두 가지 유형의 승객 보호 요건이 있다. 첫째, 저속 후방추돌 시에는 좌석 등받이의 지그재그형 스프링에 의해 몸통이 반동됨을 고려해야 하며, 둘째, 고속 후방추돌 시에는 등받이는 높은 감속도로부터 승객을 보호하는 역할과 좌석의 붕괴로 인한 승객이 좌석으로부터 이탈하여 내장재와 부딪히는 2차 충돌사고에 의한 상해를 방지해야 한다. 이러한 2가지 주요 요건을 충족시키는 설계방법은 어렵다. 왜냐하면 좌석의 등받이 강성이 크게되면 저속 후방추돌 시에 과도한 탄성반응을 일으키게 되고, 강성을 작게 하면 고속추돌 시에 좌석이 붕괴되어 승객이 차량 내장재와 2차 충돌을 하기 때문이다. 따라서 좌석 등받이의 강성을 적절하게 함으로써 휩래쉬(whiplash)로 인한 상해로부

Table 3-2 Abbreviated Injury Scale(AIS)

A I S	Severity
0	None
1	acute strain, no fracture or disc
2	ruptured disc w/o neuro ; vertebral fracture(body or process)
3	ruptured disc w/o neuro ; vertebral fracture(arch)
4	incomplete cord syndrome
5	Critical
6	virtually unsurvivable

Table 3-3 Injury criterion for depovered airbag

Classification	Injury criterion
Ext. bending moment( $M_E$ )	57 N · m
Flexion bending moment( $M_F$ )	190 N · m
Axial tension force( $F_Z$ )	3,300 peak N
Axial compression force(- $F_Z$ )	4,000 peak N
Fore/aft. shear force( $F_X$ )	3,100 peak N

터 보호받을 수 있다.<sup>(3,13,14)</sup>

### 3.3 좌석의 상해 인자연구 및 설계변수의 선정

상해 인자연구(parametric study)의 목적은 후방추돌 시 목에서의 모멘트와 하중에 영향을 주는 인자들(parameters)을 찾아내고, 그 인자들의 특성을 파악해 목 상해 가능성을 최소화할 수 있는 좌석을 설계하고자한다. 후방추돌 시는 전방충돌과는 달리 승객은 좌석에만 의존할 수밖에 없다. 따라서 좌석의 거동이 승객의 운동을 이끌어 내고 구속한다. 이런 좌석의 거동에 영향을 주는 물리적, 역학적 인자라는 기본 개념으로 접근해 보고자 한다.

좌석의 거동을 특성 짓는 물리적, 역학적 인자로는 좌석의 구조적 강성 또는 변형을 하지 못하

게 하는 저항체와 좌석의 각 요소의 위치 등을 포함할 수 있을 것이다. 이러한 커다란 범주 속에서 좌석의 구조적 변경없이 좌석의 물리적, 역학적 특성을 결정지을 수 있는 인자를 찾기 위하여 썰매시험(sled test)과 승객거동해석을 통해 얻어진 승객과 좌석 거동에 관한 결과를 분석하고, 공학적 지식을 바탕으로 초기 좌석 등받이 각도, 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 좌석 등받이 강성, 좌석 등받이 조인트 회전 강성, 좌석 등받이와 더미 사이의 마찰계수, 머리 받침대의 강성으로 여섯 개의 인자들을 선택하였다. 그러나 초기 좌석의 등받이 각도는 승객의 목 모멘트나 하중에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되어지만 썰매 시험에서 25° 로 고정시켰고, 승객의 습관에 많이 좌우된다고 판단되어 인자 연구에서 제외하였다.

이렇게 좌석 설계인자의 선택이 끝나고 나면 각 인자들의 물리적 변화가 승객의 안전도에 어떤 영향을 미치는고, 또 각 인자 상호간의 간섭이나 거동을 승객거동해석을 통하여 알아보았다.

이러한 독립적인 인자들은 각각 후방추돌에 있어서 좌석의 구속을 정의하는 중요한 특성치를 표현해 주고 있다.

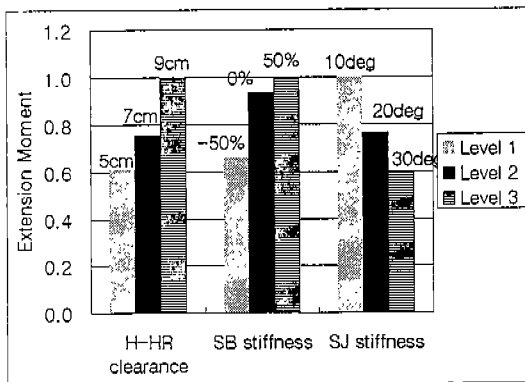


Fig. 3-1 Sensitivity of the design variables

좌석의 인자들이 결정되고 나면 이런 인자들이 더미의 거동에 어떠한 영향을 주는지를 알아보아야 한다. 따라서 더미의 거동도 좌석의 인자에

종속된 변수로서 표현할 수 있다. 충돌 조건에 따라 더미에 상대적으로 중요한 상해가 있을 수 있지만 후방 추돌에서는 머리-목-몸통의 운동이 상해의 가장 큰 영향을 주고 있다. 따라서 머리의 가속도, 목 회전각, 목 전단력, 목 모멘트 등에 영향을 미치는 변수들 선택하였다. 각각의 선택된 좌석의 독립 변수들은 승객거동해석 프로그램의 입력 값으로 더미의 거동을 표현한 종속 변수들은 해석 수행이후의 출력 값이 되어 후방 추돌에서 승객의 상해를 최소화할 수 있는 좌석의 인자들을 결정하고 그 결과를 알아보려 한다.

Fig. 3-1에서 볼 수 있듯이 앞에서 선정한 설계인자들 중에서 승객거동해석을 통한 인자 분석을 바탕으로 한 결과 후방추돌시 목 젖힘 모멘트가 가장 결정적인 영향을 미치는 좌석의 설계인자는 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 좌석 등받이 강성, 좌석 등받이 조인트 회전강성인 것으로 나타났다. Fig. 3-1에서의 그래프는 각 항목의 최대값으로 정규화(normalize)하였으며, 수준은 막대 그래프 위에 표시되어 있다. 머리와 머리 받침대 사이의 거리가 가까우면 머리가 뒤쪽으로 이동하는 거리가 짧아 머리와 몸통사이의 상대 운동의 차이를 적게 하여 목에서의 젖힘 모멘트를 줄일 수 있다. 하지만 더미의 운동 에너지 흡수 없이 머리가 머리 받침대에 부딪힘으로 해서 목에서의 전/후 전단력이나 굽힘 모멘트(flexion moment) 등을 증가시키는 것을 볼 수 있다. 좌석의 등받이 강성은 몸통이 좌석과 부딪히면서 등받이가 몸통을 밀어내는 현상과 관련이 있다. 좌석의 등받이 강성이 크면 몸통이 좌석 등받이에 의해서 반동되는 양은 커지고 그 순간 머리는 목 이외에 아무런 구속력도 없는 상황이 된다. 이렇게 됨으로써 머리와 몸통사이의 상대 운동의 차이가 커지게 되어 목에서의 젖힘 모멘트를 증가시킨다. 또한 좌석 등받이 조인트 회전 강성은 후방추돌 직후 더미의 몸통이 뒤로 밀리면서 좌석 등받이에 부딪히는 운동에너지를 등받이가 붕괴되면서 흡수하게 된다. 이로 인해 몸통과 목의 상대적 운동의 차이가 있더라도 그 운동이 변화되는 에너



지가 감소하게 되어 목에서의 상해는 줄어들게 된다.

머리 받침대의 강성은 단순히 머리의 반응에만 영향을 주는 인자이다. 이는 머리의 가속도반응을 제어하는데 효과를 보일 수 있다.

등받이와 더미사이의 마찰 계수는 더미가 등받이를 타고 올라 머리가 머리 받침대와 접촉할 수 없게 할 수도 있다. 이렇게 되면 머리 받침대가 없는 것과 같이 되어 머리가 뒤로 심하게 젖혀져 목에서의 하중이 증가한다. 또한 마찰계수가 작을 때 추돌 속도 커지면 더미가 좌석을 넘어서 뒤쪽으로 이탈해 지붕이나 뒤쪽 내장재와 2차 충돌을 일으켜 큰 상해를 일으킨다.

### 3.4 직교 배열표를 이용한 좌석

#### 설계방안 제시

승객거동해석의 결과를 설계에 반영시키는 것이 중요하다. 컴퓨터 해석 결과를 설계과정에 직접 반영시키는 방법으로 최적 설계방법이 우수하다. 그러나 승객거동해석은 시간영역에서 동적인 해석을 하므로 민감도 계산 등이 필요한 최적화 방법이 대단히 어렵고, 또한 시간영역에서 비선형이 커서 민감도 계산 결과가 전반적인 설계 경향을 나타내기도 어렵다.<sup>(11)</sup> 이를 극복하기 위해 반응 표면법(Response Surface Method) 등이 응용된 예도 있다.<sup>(15,16)</sup> 반응 표면법은 연속공간에서 설계 값을 구하므로 이산공간에서 해를 구하는 설계시 응용에 어려움이 존재한다. 따라서 승객거동해석 결과를 통해 수학적인 최적값은 구할 수 없더라도 현재의 값보다 개선된 설계 값을 이산공간에서 구하려 할 경우, 해석 비용이 저렴하고 수렴성에 문제가 없는 통계적인 방법을 이용하는 것이 훨씬 효과적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 후방추돌에서의 좌석의 설계방안 제시를 위해서 실험계획법(design of experiments)에 사용되는 직교 배열표를 이용하고자 한다. 직교 배열표는 인자의 수가 많은 경우에 주효과(main effect)와 기술적으로 있을 것

같은 2인자 교호작용(interaction)을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 2인자 교호작용 및 고차의 교호작용을 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 구성할 수 있도록 만들어 놓은 표이다. 즉, 직교 배열표는 설계변수의 수가 많지 않고 함수의 수학적 성격이 까다롭거나 함수계산이 고가인 경우 효과적으로 사용할 수 있다.<sup>(17,18)</sup>

후방추돌의 경우에 일반적으로 목에서의 상해가 가장 심각한 것으로 알려지고 있다. 따라서 승객 보호의 초점을 목에서의 상해 값을 줄이는데 두어야 한다. 목 상해는 목의 젖힘 모멘트, 굽힘 모멘트, 전단력, 인장/압축력 등으로 표현되어진다.

Table 3-4 Levels of design variables

D.V. Level	A	B	C	D	E
1	5cm	-50%	0.3	10°	-50%
2	7cm	0	0.45	20°	0
3	9cm	50%	0.6	30°	50%

※A : Head-Headrest clearance

B : Seatback stiffness

C : Friction coefficient

D : Joint stiffness

E : Headrest stiffness

특히 젖힘 모멘트는 임계상해 값이 낮을 뿐만 아니라 실제 후방 추돌시 승객 상해의 대부분이 젖힘 모멘트에 의해 영향을 받고 있다. 후방추돌에서의 좌석설계는 각 실험 조건에 대한 젖힘 모멘트의 최대치가 작아지도록 하는 설계변수의 수준을 결정하는 것이다. 따라서 목적함수는 추돌시 목에서의 젖힘 모멘트( $M_E$ )의 최대값(peak value)으로 하여 설계문제를 다음과 같이 표현할 수 있다.

*Find A,B,C,D,E*

*To minimize  $M_{E,peak}(A,B,C,D,E)$*

일반적인 경우 설계 변수 전부를 가지고 최적화를 한다는 것은 비용이 많이 들고, 비효율적이다. 따라서 목적 함수의 값을 줄이기 위한 효과적인 설계변수를 선택해야 한다. 따라서 3.2절에서 제시한 좌석의 인자 특성을 고려해 목 상해에 영향을 주는 설계변수를 선정하였다. 따라서 좌석의 설계 변수로는 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 좌석 등받이 강성, 좌석 등받이 조인트의 회전 강성, 등받이와 더미와의 마찰계수, 머리 받침대의 강성으로 선정하였다.

각각의 설계변수와 수준을 Table 3-4에 나타내었다. 머리와 머리 받침대 사이의 거리는 5cm, 7cm, 9cm로 2cm 간격으로 하고, 좌석 등받이 강성과 머리 받침대의 강성은 보정 계수(scale factor)를 이용하여 현재 값의 50%를 감소시키거나 증가시켰다. 또한 등받이 조인트 회전 강성은 추돌 후 등받이가 붕괴되는 각도를 초기 각도 25°를 기준으로, 10°, 20°, 30°로 10° 간격으로 증가하도록 조인트 불성치 입력 부분의 스프링 상수와 댐핑 계수를 변화시켜 붕

괴 각도를 제어하고, 마찰계수는 현재값 0.45에서 좌석의 표면 재료에 따라 가능하다고 판단되어지는 값으로 0.15의 가감으로 선정했다.

설계변수가 5개이고 수준이 3인 경우이므로 여러 가지 방법의 직교 배열표를 이용할 수 있지만, 본 논문에서는 3수준의 열들(열번호2~8)간의 교호작용이 3수준의 다른 열들에 고르게 나누어져 있는 혼합 직교 배열표  $L_{18}(3^5)$ 을 사용하여 18회의 실험으로 최적 수준을 결정할 수 있다. 따라서 각 설계변수들 간의 교호작용은 무시할 수 있으므로 본 연구에서도 교호작용(interaction)은 고려하지 않았다.

직교 배열표  $L_{18}(3^5)$ 에 의하여 Table 3-5와 같이 설계변수와 수준을 구성하고 목에서의 젖힘 모멘트의 최대 값의 결과를 나타내었다. 그리고 이 표에 근거하여 최적 수준을 구하기 위한 각 인자 수준별 해석과 제곱합 결과를 Table 3-6에 표시하였다. 여기서 목에서의 젖힘 모멘트를 최소화하는 각 설계변수의 수준이 최적해가 된다. 즉, 직교 배열표의 설계변수행렬을 이용한 최적해는 [A1B1C3D3E1]로 구해진다. 이 최적 수준의 인자에 의해 승객거동해석에서 젖힘 모멘트 값은 11.68이 얻어진다. 이는 현재 모델 값인 15.6보다 25.2%의 향상을 보인다. 따라서 이는 각 인자들의 교호작용을 무시할 수 있는 가상 모델이다.

이상의 결과를 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 머리와 머리 받침대 사이의 거리는 가까워야 한다.
2. 등받이의 강성은 현재보다 작아야 한다.
3. 등받이와 더미와의 마찰 계수는 커야 한다.
4. 등받이 조인트 회전 강성은 작아야만 한다.
5. 머리 받침대의 강성은 작아야 한다.

Table 3-5 Matrix experiment with  $L_{18}(3^5)$

No.	Column No.								$M_E$ (peak)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.936
2	1	1	2	2	2	2	2	2	15.582
3	1	1	3	3	3	3	3	3	14.112
4	1	2	1	1	2	2	3	3	12.152
5	1	2	2	2	3	3	1	1	13.426
6	1	2	3	3	1	1	2	2	20.776
7	1	3	1	2	1	3	2	3	14.504
8	1	3	2	3	2	1	3	1	20.09
9	1	3	3	1	3	2	1	2	12.25
10	2	1	1	3	3	2	2	1	15.974
11	2	1	2	1	1	3	3	2	11.858
12	2	1	3	2	2	1	1	3	18.718
13	2	2	1	2	3	1	3	2	18.326
14	2	2	2	3	1	2	1	3	17.248
15	2	2	3	1	2	3	2	1	11.858
16	2	3	1	3	2	3	1	2	14.896
17	2	3	2	1	3	1	2	3	13.034
18	2	3	3	2	1	2	3	1	16.366
	e	A	e	B	C	D	E	e	274.106

Table 3-6 Sum of squares for the variables

D.V.	A			B			C			D			E		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	12.9	12.2	14.5	12.9	15.6	14.1	12.9	15.6	14.1	12.9	15.6	14.1	12.9	15.6	14.1
	15.6	13.4	20.1	12.2	13.4	20.8	20.8	12.2	13.4	20.8	12.2	13.4	13.4	20.8	12.2
	14.1	20.8	12.3	12.3	14.5	20.1	14.5	20.1	12.3	20.1	12.3	14.5	12.3	14.5	20.1
	16.0	18.3	14.9	11.9	18.7	16.0	11.9	18.7	16.0	18.7	16.0	11.9	18.7	16.0	11.9
	11.9	17.2	13.0	11.9	18.3	17.2	17.2	11.9	18.3	18.3	17.2	11.9	17.2	11.9	18.3
	18.7	11.9	16.4	13.0	16.4	15.0	16.4	14.9	13.0	13.0	16.4	14.9	14.9	13.0	16.4
(1) total	89.2	93.8	91.1	74.1	96.9	103.1	93.7	93.3	87.1	103.9	89.6	80.7	89.5	91.7	92.9
(2) sum of (1)	274.1			274.1			274.1			274.1			274.1		
(3) square of (1)	795	879	830	548	939	1062	877	870	759	1079	802	650	800	841	863
	3	6	7	9	4	9	7	4	0	1	3	5	6	4	1
(4) sum of (3)	25055.4			25511.7			25071.8			25319.3			25050.8		
(5) (4)/6	4175.90			4251.95			4178.64			4219.88			4175.13		
(6) (5)-CT	1.78			77.83			4.52			45.76			1.01		

Table 3-7 ANOVA table for the extension moment

Variables	S	D.O.F	V	F <sub>0</sub>	F(0.05)
A	1.781008444	2	0.890504222	0.587055927	5.79
B	77.83188311	2	38.91594156	25.65494196	5.79
C	4.521349778	2	2.260674889	1.490327119	5.79
D	45.76092578	2	22.88046289	15.08371439	5.79
E	1.012688444	2	0.506344222	0.333802321	5.79
Error(e)	7.584492222	5	1.516898444		
Total	138.4923478	15			

중요 변수는 Table 3-7의 F검정을 통한 분산 분석표에서 볼 수 있듯이 설계변수[B, D]로 좌석 등받이의 강성과 등받이 조인트의 회전 강성이 목의 젖힘 모멘트에 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 등받이의 강성이 커지면 몸통의 반동(rebound)이 커지게 되며, 이로 인하여 머리와 몸통간의 상대적 운동 차이가 심하게 되어 목에서의 젖힘 모멘트가 증가하게 된다. 또한 등받이 조인트 회전강성은 더미가 뒤로 밀리면서 좌석에 부딪힐 때 더미와 함께 넘어지므로 해서 더미의 운동 에너지를 좌석의 붕괴 에너지로 변화시키는 에너지 흡수가 이루어지기 때문에 더미에서의 목

상해가 줄어들게 된다.

Table 3-8에서는 최적 수준의 조합으로 이루어진 재해석결과와 현재 값과의 비교를 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 목에서의 젖힘 모멘트는 약 25%정도 감소하고 있으며, 설계변수에 포함되지 않은 다른 상해치 값들이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 목적함수를 젖힘 모멘트에 대해서만 고려했을 지라도 설계에 반영된 설계변수들의 수준에서 좌석이 더미의 에너지를 흡수해 더미에 미치는 에너지가 감소해 더미의 모든 상해치가 줄어든다고 사료된다. 이는 젖힘 모멘트만을 목적함수로 사용하는 방법에

Table 3-8 Results of Design

	Design		
	Before	After	Comparison
Extension Moment(Nm)	15.6	11.7	25.2%Down
Flexion Moment(Nm)	-45.3	-23.9	47.2%Down
Shear Force(N)	511.6	285.2	44.3%Down
Head Acc. (G's)	39.5	29.5	25.4%Down
Chest Acc. (G's)	22.3	20.7	7.2%Down

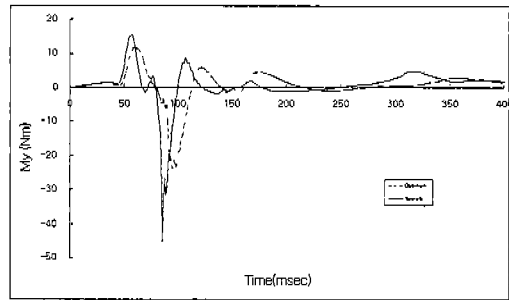


Fig. 3-2 Moment of the sample and the design result

타당성을 부여한다고 할 수 있다. 물론 특정한 경우 다른 상해치는 직교 배열표 해석에서 고려하지 않았으므로 증가할 개연성은 있다. 이 경우에는 Eq. 3-1을 다른 상해치 둘을 고려한 다목적 함수로 치환할 수도 있다. Fig. 3-2에는 직교 배열표를 이용해 구한 최적 수준의 조합으로 이루어진 값과 현재 좌석 설계 값과의 목에서의 젖힘 모멘트 곡선을 승객거동해석한 결과이다. 직교 배열표를 이용해 구한 최적 수준의 조합에서 젖힘 모멘트와 굽힘 모멘트의 최대 값이 모두 줄어들었음을 알 수 있다.

이상의 설계결과가 제시하는 것은 후방추돌시 승객의 목 상해를 줄이기 위한 좌석설계에 있어서 좌석의 등받이 강성을 현재보다 작게 해서 몸통의 반동을 줄이고, 좌석 등받이 조인트 강성과 댐핑을 승객의 운동에너지를 충분히 흡수해 붕괴되지 않게 함으로써 상해를 현재의 좌석보다 상해를 줄일 수 있는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

후방추돌에서는 정면 충돌과는 달리 승객의 목 상해가 매우 큰 비중을 갖게 되고, 유일한 보호장구라 할 수 있는 좌석의 특성이 이 목 상해에 커다란 영향을 주고 있다. 따라서 좌석의 올바른 설계는 후방 추돌에 있어서 목 상해 감소를 위해 매우 중요하다. 이를 위하여 썰매 시험과 승객거동해석을 통해 후방 추돌 및 목 상해 특성에 관

해 이해하고 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 썰매 시험을 수행하고 이를 바탕으로 후방 추돌 상황을 SAFE로 모델링한 후 승객거동해석을 수행하여 후방 추돌시 목 상해 원인을 알아보고 특성을 파악했다. 또한 지금까지 실험에만 의존해오고 있는 후방추돌 상황을 해석 모델링을 완성함으로써 실험 비용 절감 효과를 가져다 줄 것으로 기대한다.

(2) 승객거동해석을 이용한 인자 연구를 수행하여 후방 추돌 시 목 상해에 가장 큰 영향을 주는 좌석의 설계 인자는 머리와 머리 받침대 사이의 거리, 등받이 강성, 등받이 조인트 회전 강성인 것으로 나타났다.

(3) 좌석의 설계를 위하여 좌석의 물리적, 역학적 인자와 관련된 설계변수를 설정하고 직교 배열표를 이용한 실험 계획법 및 분산분석을 사용하여 지배적인 설계변수로서 등받이의 강성, 등받이의 조인트 회전을 결정하였다.

(4) 설계변수의 수준은 머리와 머리 받침대 사이의 거리는 가까운 것이, 등받이의 강성과 등받이 조인트 회전 강성은 약한 것이, 머리 받침대 강성은 약한 것이, 마찰계수는 큰 것이 목 상해 감소를 위해 좋은 것으로 나타났고, 이러한 수준의 선택으로 현재의 상해 값보다 목의 젖힘 모멘

트가 약 25%정도 향상됨을 보았다.

(5) 향후 본 연구의 결과를 토대로 좌석 구조물의 설계에 대한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 윤경환, 이재완, 박형원, 등, "후방추돌시 좌석 등받이 강도와 탑승자 목 상해의 상관관계에 대한 연구", 한국자동차공학회 No. 98380127.
2. 정재구, "자동차 사고시의 승객 상해에 관한 고찰", 한국 자동차 공학회 추계학술대회, 1992.
3. 이재완, "후방추돌시 좌석 등받이 강도와 목 상해 상관관계에 대한 실험적 연구", 한양대학교 석사학위 청구논문, 1998.
4. 임재문, "차량충돌시 승객거동해석을 위한 소프트웨어의 개발 및 관련 부품의 설계방안 제시", 한양대학교 박사학위 청구논문, 1997.
5. H. Mertz, L. Patrick, "Strength and Response of the Human Neck", SAE Paper No. 710855, 1971.
6. 박경진, 박영선, 이주영, 정근섭, 서명원, 위인혁, "승객 거동해석의 시뮬레이션에 관하여", 한국자동차공학회지, 제14권, 제6호, pp.88-98, 1992.
7. P. Wu, I. Shanmugavelu, S. Mondeau, R. Kant, "Improved Seat & Manniken Models to Study Rear Impact Protection", 1998.
8. K. H. Digges, J. H. Morris, and A. C. Malliaris, "Safety Performance of Motor Vehicle Seats", SAE Paper No. 930348, 1993.
9. 박경진, 윤경환, 임재문, 최우석, 신문균, 도성희, 박기종, "전산응용안전도해석기술-승객 거동 해석-", 제5회 G7 차세대자동차 기술 WORKSHOP, 자동차부품연구원, 1997.
10. 49CFR, Part 571, FMVSS, DOT, NHTSA, USA.
11. John D. States, "Soft Tissue Injuries of the Neck", SAE Paper No. 790135, 1979.
12. GEBOD User's manual, AL/CF-TR-1994-0051, 1994.
13. Charles Y. Warner, Charles E. Stother, Michael B.J omes, and Robin L. Decker, "Occupant Protection in Rear-end Collision: II. The Role of Seat Back Deformation in Injury Reduction", SAE Paper No. 912914.
14. P. Prasad, A. Kim, D.P.V. Weerappuli, V. Roberts, D. Schneider, "Relationships Between Passenger Car Seat Back Strength and Occupant Injury Severity in Rear End Collisions : Field and Laboratory Studies", SAE Paper No. 973343, 1997.
15. Bennett, J. A. and Park, G. J., "Automotive Occupant Dynamics Optimization", Shock and Vibration, Vol. 2, No. 6, pp. 471-479, 1995.
16. Park, Y. S., Lee, J. Y., Lim, J. M., and Park, G. J., "Optimum Design of a Steering Column to Minimize the Injury of a Passenger", International Journal of Vehicle Design, Vol. 17, No. 4, pp. 398-414, 1996.
17. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 1996.
18. 이권희, "연속 및 이산 설계 공간에서의 구조물에 대한 강건최적설계", 한양대학교 박사학위 청구논문, 1996.