

■ 論 文 ■

### 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보행자 충돌 선회특성에 관한 연구

Computer Simulation of Pedestrian Collision Trajectory for Various Velocities

**김 종 혁**

((주)한국종합기술개발공사  
도로공항부)

**박 경 진**

(한양대학교 기계공학과 교수)

**장 명 순**

(한양대학교  
교통시스템공학과 교수)

**유 장 석**

(한양대학교 교통시스템공학과  
박사과정)

**손 봉 수**

(한양대학교 첨단도로연구센터  
연구교수)

**홍 을 표**

(한양대학교 기계공학과  
박사과정)

#### 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구의 배경 및 목적
    - 2. 연구의 범위 및 방법
  - II. 기존연구고찰
    - 1. 보행자 충돌 실험 연구
    - 2. 보행자 충돌식의 문제점
  - III. 보행자 충돌 시뮬레이션시 고려사항
    - 1. 차량 모델링
    - 2. 보행자 모델링
    - 3. 차량과 보행자간의 접촉
  - IV. 동역학적 해석을 통한 보행자 충돌 선회특성 분석
    - 1. 실험식의 시뮬레이션
    - 2. 보행자 더미 모델 충돌 시뮬레이션
    - 3. 실험식 및 공과 보행자 충돌 시뮬레이션의 비교
  - V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 시뮬레이션, 보행자 교통사고, 충돌선회특성, 보행자 모델링, 보행자 충돌식

#### 요 약

차량과 보행자의 충돌시에는 충돌의 원인을 규명하는데 필요한 선회특성이 나타나게 된다. 지금까지의 연구에서는 보행자의 운동형태를 기초 물리학에서 유도된 공식으로 표현하였다. 그 결과 차량과 보행자의 다양한 변수에 대해 충분한 고려를 하지 못하였다. 그러한 한계를 극복하기 위하여 동역학적 시뮬레이션 프로그램인 MADYMO를 이용하여 다양한 조건하에서의 보행자 충돌 형태를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에서 차체와 보행자 더미는 강체, 조인트, 스프링으로 모델링하였다. 보행자 시뮬레이션은 차량의 속도별로 수행되었으며 그 결과를 이전의 기초 물리학 공식과 비교하였는데 이전의 공식은 보행자의 상태조건을 제대로 반영하지 못함을 알 수 있었다. 따라서, 보행자 충돌시에 차량과의 충돌현상에 대해 명확히 설명해 주는 동역학적 시뮬레이션을 사용하여야 한다.

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

2000년 한해 우리나라 전체 교통사고건수는 290,481건이다. 이중 보행자 교통사고건수는 72,932건으로 전체 사고의 25.1%를 차지하며, 보행자 사망자수는 3,890명으로 전체 사망자 10,236명의 38.0%를 차지하고 있다.

지난 10년간(1987년~1996년) 외국의 보행자 교통사고 사망자 비율을 보면 미국, 영국, 일본, 독일, 프랑스 등은 모두 30% 이내이다. 그러나, 같은 기간 동안에 우리나라의 보행자 교통사고 사망자 비율은 무려 50%에 이르렀다.

교통사고 통계에서 나타나듯이 우리나라의 보행자 사고는 차대차, 차량단독, 차대열차 등 다른 종류의 사고에 비해 매우 심각하며 지난 10년간 크게 감소하지 않았다. 반면에 보행자 교통사고 사망자 비율이 꾸준히 감소한 외국의 경우는 차량과의 충돌 실험 및 시뮬레이션을 통하여 그 현상을 규명하려 하였다. 차량에 부딪히는 보행자의 상해를 줄이기 위한 개선책으로 차량의 설계시 보행자와 충돌하는 부분의 설계에 많은 노력을 기울여왔다. 이러한 실험 및 시뮬레이션은 차량과 보행자와의 역학적 관계를 규명해 충돌순간 차량과 접촉하는 힘-변형량의 변화를 파악한 후 차량을 설계하도록 하는 지침을 만들어주었다. 그러나, 차량의 설계라는 목적을 갖고 수행되었기 때문에 차량과 충돌 이후에 나타나는 보행자의 선회특성을 규명하는데에는 많은 노력을 기울이지 못했다. 보행자의 충격력은 차량과 부딪힐 때의 1차 충격과 지면에 부딪힐 때의 2차 충격으로 나뉘어진다. 1차 충격 후 2차 충격때까지 이루어지는 보행자의 충돌선회특성은 보행자의 충격량을 규명해주기 때문에 매우 중요하다.

연구의 목적은 보행자 충돌 사고시 발생하는 보행자 충돌 선회특성을 동역학 시뮬레이션 프로그램인 MAtheMatical DYnamical MOdels(MADYMO)의 3차원 시뮬레이션 방법을 이용하여 차량의 속도별로 분석하는데 있다. 시뮬레이션을 이용하여 나타난 결과와 과거에 실험식으로 표현된 보행자 선회특성 산정방법을 비교하여 과거 산정식의 한계점을 밝히고 3차원 충돌 시뮬레이션으로 나타난 결과가 적합하다

는 것을 보여주는데 있다. 또한, 3차원 충돌 시뮬레이션은 보행자 교통사고분석시 차량과 충돌후 보행자 이동경로를 나타냄으로써 정확한 분석을 할 수 있게 해주며, 과도한 비용의 소요와 여러 가지 제약조건이 있는 보행자 더미(dummy) 실험의 한계를 극복하여 줄 것으로 기대한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

보행자 충돌 선회특성을 분석하기 위하여 TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek) Automotive에서 제공하는 동역학 시뮬레이션 프로그램인 MADYMO의 3차원 차량 모델과 보행자 더미 모델을 사용하여 시뮬레이션을 하였다.

차량 속도별 보행자 충돌 선회특성을 분석하기 위해 차량 속도를 10km/h~60km/h로 한정하여 10km/h 단위로 충돌 선회특성을 분석하였다. 교통사고보고서 검토결과 70km/h가 넘는 충돌속도는 매우 적으므로 시뮬레이션에서 제외시켰다. 보행자 충돌 형태는 보행자의 측면이 차량의 정면에 부딪히도록, 즉 차량과 보행자가 수직으로 위치하도록 하였다. 도로의 상태는 아스팔트 포장면을 기준으로 도로에 장애물이 없는 상태로서 충돌후 보행자가 노면에 닿았을 때 보행자-노면간 마찰계수는 0.6을 기준으로 하였으며, 직선 구간에서 시뮬레이션 하였다.

보행자와 차량의 충돌 시뮬레이션은 정지해 있는 보행자가 차량과 충돌하는 것으로 나타내었는데 보행자 더미 모델은 충분한 실험을 통하여 최적화되었기 때문에 보행자가 차량과 접촉하는 부위의 차량 특성값과 보행자가 노면과의 접촉하는 특성을 정의해 주었다. 이 값을 구하기 위하여 보행자가 차량과 접촉하는 부분을 계속적인 시뮬레이션을 통해 차량 속도별로 달리 프로그래밍 해주고 차량의 특성값 및 노면의 특성을 입력하여 최적의 시뮬레이션 조건을 구할 수 있었다. 이렇게 구한 여러 조건을 가지고 충돌 속도별로 시뮬레이션에 적용한 결과 보행자의 충돌 선회특성을 얻을 수 있었다.

기존 연구에서 계산된 실험식을 통해 얻은 충돌거리 값을 동역학적 시뮬레이션 방법을 이용하여 기존의 결과와 실제 보행자 더미를 사용한 충돌 선회특성 시뮬레이션 결과와 비교를 할 수 있도록 하였다.

## II. 기존연구고찰

### 1. 보행자 충돌실험 연구

#### 1) Schmidt, D.N.와 Nagel, D.A.의 연구

Schmidt, D.N. and Nagel, D.A.(1971)은 차량의 충돌실험을 통해 충돌순간의 속도는 보행자의 충돌후 이동거리와 관계가 있음을 밝혀내었다. <그림 1>에서 보면 보행자가 차량에 충돌한 후 날아간 이동거리는 충돌후 공중에서 지면까지의 낙하거리와 지면에 충돌한후 미끄러진 거리의 2단계로 설명하였다. 이들은 보행자의 무게중심 높이와 노면마찰계수를 변수로 사용하였다.

$$V_x = \sqrt{\mu^2 \times h + e - \mu \times h}$$

$V_x$  : 충돌속도(m/s)

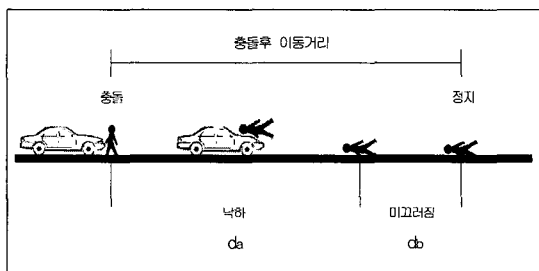
$\mu$  : 보행자의 노면마찰계수

$h$  : 보행자의 무게중심 높이(m)

$d_t$  : 날아간 거리(m)

$e$  :  $2 \times \mu \times g \times d_t$

$g$  : 중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)



<그림 1> 충돌후 보행자의 이동특성 - Schmidt, D.N.와 Nagel, D.A.

#### 2) Stcherbatchef, G. 등의 연구

Stcherbatchef, G.등(1975)은 성인 및 유아의 더미를 사용하여 10km/h~40km/h의 속도로 충돌 실험을 한 결과 보행자의 이동거리는 충돌속도 및 차량의 감속도와 연관이 있음을 알아내었다. 충돌후 보행자가 날아간 거리는 차량의 제동거리보다 항상 길다고 보았으며 실험식을 유도하였다.

$$\text{날아간거리 } d = \frac{V_e^2 - V_i^2}{2a} + kV,$$

$$k = \lambda \times a, \lambda = 0.03(\text{실험치}), V = dt$$

$$a = \frac{V_e - V_i}{t}, \quad t = \frac{V_e - V_i}{a}$$

$$d = V_i t + \frac{1}{2} a t^2 = \frac{V_e^2 - V_i^2}{2a}$$

$V$  : 차량 충돌속도(m/s)

$a$  : 차량 감속도(m/s<sup>2</sup>)

$V_i$  : 초기속도(m/s)

$V_e$  : 나중속도(m/s)

$t$  : 시간(sec)

#### 3) Collins, James C.와 Morris, Joe L.의 연구

Collins, James C.와 Morris, Joe L.(1979)은 보행자가 날아간 거리를 충돌속도와 보행자의 무게중심높이로 구하였다. 이들은 2차방정식을 응용하여 속도를 가정하면 원래의 공식에서 요구하는 값을 얻을 수 있다고 하였다.

$$d = \frac{V \sqrt{h}}{7.97} + \frac{V^2}{254 \mu} \quad (\text{m})$$

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = \frac{1}{254 \mu} \quad B = \frac{\sqrt{-h}}{7.97} \quad C = -d$$

$d$  : 날아간 거리(m)

$V$  : 속도(m/s)

$h$  : 보행자 무게중심의 높이(m)

$\mu$  : 보행자의 노면 마찰계수

#### 4) Rudolf Limpert의 연구

Rudolf Limpert(1989)는 차량속도 57km/h~64 km/h의 범위에서 실험을 한 결과 충돌 속도와 이동거리와의 관계식에서 충돌속도는 차량의 감속도에 영향을 받는다고 보고 다음과 같은 실험식을 제시하였다. 여기서는 마찰계수의 범위를 0.7~1.2를 적용하였다.

$$V = 6.6 \sqrt{8.4a^4 + a \cdot d_t - 20a^2}$$

$V$  : 충돌속도(mph)

$d_t$  : 충돌지점에서부터 보행자 최종정지위치까지의 거리(ft)  
 $a$  : 차량 감속도(ft/s<sup>2</sup>)

$x_1$  : 튕겨나간 거리(m)  
 $g$  : 중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)  
 $h$  : 튕겨나간 보행자의 지상으로부터의 높이(m)  
 $m$  : 보행자의 질량  
 $\mu$  : 보행자의 노면 마찰계수

5) 하야시 히로시의 연구

하야시 히로시(1992)는 보행자의 충돌후 선회특성을 <그림 2>와 같이 포물선 운동으로 보고 보행자 충돌 속도 공식을 실험식으로 만들었다.

$$x_1 = Vt$$

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

$$x_1 = V\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

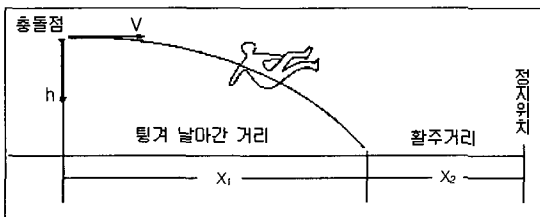
$$\frac{1}{2}mV^2 = mg\mu x_2$$

$$x_2 = \frac{V^2}{2g\mu}$$

$$x = x_1 + x_2 = V\sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{V^2}{2g\mu}$$

$$V = \sqrt{2g\mu} \left( h + \frac{x}{\mu} - \sqrt{h} \right)$$

$V$  : 충돌속도(%)  
 $t$  : 낙하시간(sec)



<그림 2> 충돌후 보행자의 이동특성 - 하야시 히로시

2. 보행자 충돌식의 문제점

보행자 충돌 실험식은 대부분 차량과 충돌하는 보행자의 충돌속도를 구하기 위하여 대부분 보행자의 날아간 거리, 보행자의 노면 마찰계수, 보행자의 무게 중심 높이, 차량의 감속도등을 주요 입력자료로 사용하고 있다.

위와 같은 방법으로 보행자 충돌 선회특성을 분석한 결과 얻어진 실험식을 보면 대부분 물리학에서 사용되는 2차 포물선 방정식을 사용하여 차량과 충돌후 이동하는 보행자는 대부분 차량의 앞부분으로 떨어진다고 보고 공식을 유도하고 있다. 그러나, 이러한 실험은 제한된 조건을 가지고 얻어진 실험식이기 때문에 결과에 많은 오차를 가지고 있다. 이것을 증명하기 위하여 동일한 변수를 적용할 수 있는 실험식을 가지고 <표 1>에 각 실험식간의 비교된 결과를 나타내었다.

높은 속도(70km/h) 이상에서는 실험된 결과가 거의 없기 때문에 제외하였다. 보행자-노면 마찰계수 0.6을 적용하여 얻어진 결과 그 값에 많은 차이가 발생하였다. 실험식에서는 동일한 속도에서 이동거리의 차이가 최소 0.37m(차량속도 20km/h일 경우)에서 최대 15.20m(차량속도 60km/h일 경우)까지로 최소 8.4%에서 최대 68.3%의 오차를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 같은 조건하에서도 실험식을 이용한 결

<표 1> 실험식에 의한 충돌후 보행자 이동거리

충돌공식	충돌속도(km/h)						비고
	10	20	30	40	50	60	
	이동거리(m)						
Schmidt & Nagel	0.67	2.63	5.92	10.51	16.41	23.63	
Stcherbatcheff	1.42	4.77	10.06	17.27	26.40	37.47	차량 감속도 5.5%
Collins	1.54	4.40	8.57	14.05	20.84	28.95	
Limpert	3.85	7.53	11.22	14.90	18.58	22.27	차량 감속도 6.96%
하야시 히로시	Collins의 공식을 그대로 사용						

주) 충돌속도와 이동거리만으로 계산 가능한 공식에 적용 보행자-노면 마찰계수는 0.6

과 그 값이 다르게 나타날 수 있으며 이는 보행자 충돌 선회특성을 실험적으로는 단순히 일반화할 수 없다는 것으로 보여지는 것이다. 그러므로, 시뮬레이션을 통한 보행자 선회특성 분석을 통하여 매 경우에 따라 다르게 나타나는 보행자 선회 특성을 분석하는 것이 더욱 적절할 것으로 판단된다.

### III. 보행자 충돌 시뮬레이션시 고려사항

#### 1. 차량 모델링

보행자 충돌 시뮬레이션을 위한 차량의 모델링은 충돌속도 10km/h~30km/h와 40km/h~60km/h의 두 가지 형태로 차량을 구분하여 모델링하였다.

즉, 시뮬레이션에 사용된 차량은 보행자와 충돌하는 과정에서 보행자의 신체와 차량이 접촉하는 부분을 중심으로 전면범퍼, 후드, 차량앞유리, 지붕 등 차량의 외관만을 모델링하였다. 보행자의 선회특성에 직접적으로 영향을 미치는 차량 앞부분의 높이는 지면에서부터 차량의 후드 끝부분까지 68cm, 범퍼의 윗부분까지는 55cm이다.

시뮬레이션에 사용된 차량의 주행특성은 보행자와 충돌후 등감속 운동을 하여 식(2)에 의해 도출된 거리를 활주한 후 정지하였다.

$$a = f \times g \quad (\text{감속도} = \text{마찰계수} \times \text{중력가속도}) \quad (1)$$

차량의 이동거리

$$D = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (2)$$

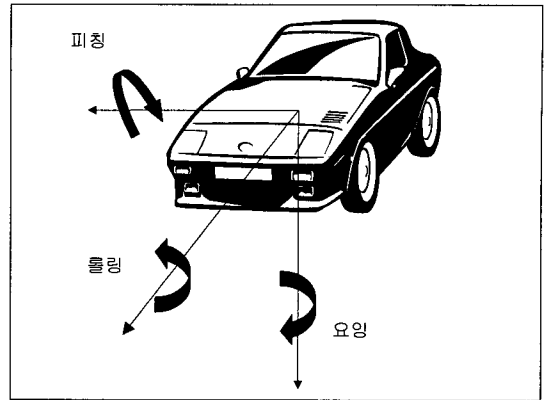
$v_0$  : 초기속도(%)

$g$  : 중력가속도(9.8%)

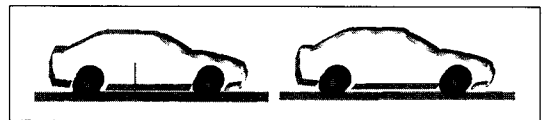
$t$  : 시간(sec)

또한 차량은 감속 할 때 차량자체의 운동으로 발생 되는 롤링, 요잉, 피칭운동은 없는 조건으로 하였다. 이유는 <그림 3>에서와 같은 방향으로 발생되는 차량의 운동특성이 매우 미묘한 것으로 판단하여 보행자 충돌시 선회특성에 거의 영향을 미치지 않으므로 충돌 시뮬레이션 조건에서 제외시켰다.

앞에서 가정된 사실을 가지고 차량의 속도별로 차



<그림 3> 차량의 운동현상



<그림 4> 충돌시뮬레이션 차량 형태

량을 시뮬레이션 한 것이 <그림 4>이다. 속도별로 차량을 다르게 모델링한 것은 시뮬레이션 시간을 줄이기 위하여 저속에서는 지붕에 대한 모델링이 안된 좌측의 실험차량을, 고속에서는 보행자가 지붕에 접촉할 것으로 판단하여 우측에서와 같이 지붕에 재료를 보완하여 차량을 모델링하였다.

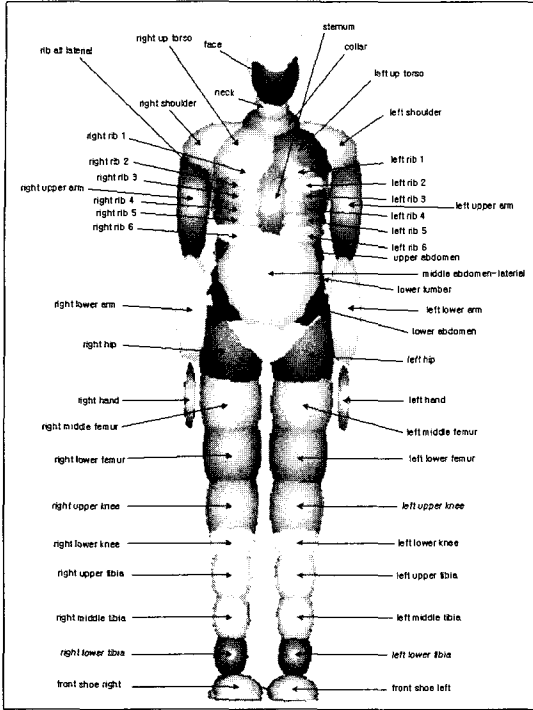
#### 2. 보행자 모델링

보행자에 대한 모델링은 키 174.2cm, 몸무게 75.7kg의 특징을 지니고 있는 Pedestrian 표준 dummy를 사용하였다.

<그림 5>는 보행자 더미의 전면/후면부 형태이며 이 모델은 총 52개의 타원면(Ellipsoid)으로 이루어져 있고 시뮬레이션을 위한 보행자 더미의 위치는 차량에 수직으로 세워져 놓여있는 것으로 설정하였다.

#### 3. 차량과 보행자간의 접촉

차량과 보행자가 충돌할 때 두 모델은 서로 임의의 부분을 접촉한다. MADYMO에서는 이러한 접촉을 묘사하기 위해 여러 가지 방법을 사용하고 있다. 여기서 사용된 방법은 차량의 특성 및 보행자의 특성값을 제대로 적용하기 위한 것이다.

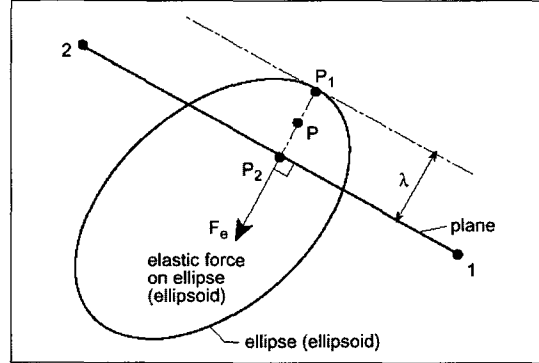


〈그림 5〉 보행자 더미

보행자 더미의 경우 힘-변형량(Force-Deflection)의 관계가 수많은 실험을 통해 얻어져 보행자 더미 모델에서는 일정한 힘이 가해지면 얼마간의 변형이 있다는 고유값이 검증되어 온 반면에 차량의 값은 각 차량마다 다르다. 따라서 여기서 사용된 시뮬레이션 차량은 여러 번의 충돌 시뮬레이션을 통해 보행자 더미와 부딪힐 때 생기는 힘-변형량의 관계가 최적으로 도출되어 시뮬레이션이 일정한 형태로 나타나는 값을 사용하였다.

1) 면-타원면(PLANE-ELLIPSOID)의 접촉

지면과 차량의 바퀴 또는 보행자가 지면에 접촉시 사용하는 접촉은 〈그림 6〉과 같다. 보행자와 지면이 접촉하여 양쪽에 하중이 재하될 때 생기는 침입량  $\lambda$ 가 발생하였을 경우 보행자와 지면의 초기 접촉 지점은  $P_1$ 이다.  $P_2$ 는 접촉면에서의  $P_1$ 의 진행방향이고 접촉면에서의 접촉점이다. 〈그림 6〉은 보행자가 지면에 접촉될 때의 탄성 접촉력을 나타내고 있다. 힘이 가해지는 방향으로 일정하게 충격력이 발생하여 보행자와 지면 양쪽의 접촉지점에 변화가 생기고 최대 접촉이 생겼을 경우 지면의 접촉이 진행되는

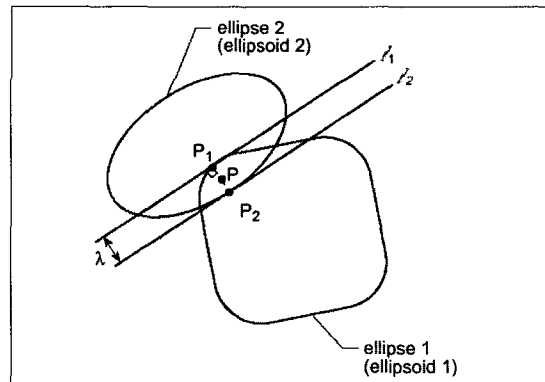


〈그림 6〉 탄성하중일 경우 타원면-면(Ellipsoid-Plane)의 접촉

방향으로 충격력의 변화에 따라 탄성력이 생긴다. 탄성력  $F_e$ 는 지면에 수직으로 작용하여 보행자가 지면에 충돌하는 힘이 커질수록 탄성력이 커지게 되는 것이다.

2) 타원면-타원면(ELLIPSOID-ELLIPSOID)의 접촉

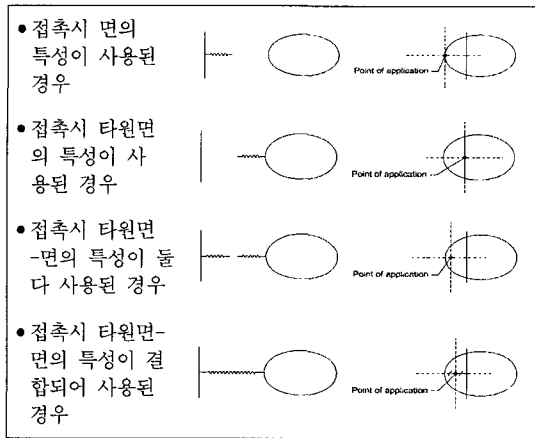
차량과 보행자가 충돌할 때 사용하는 원리는 〈그림 7〉과 같다. 〈그림 7〉에서  $l_1$ 은 보행자와 접하는 면이고  $l_2$ 는 보행자와 평행하고 차량에 접하는 면이다.  $l_1$ 과  $l_2$ 사이의 거리는  $\lambda$ 이고 변형량은 최소거리  $\lambda_0$ 로 나타난다. 이러한 변형량을 찾기 위하여 여러번의 시뮬레이션 단계를 거쳐  $\lambda$ 값을 찾아낼 수 있다. 접촉하는 힘은 접하는 면에 수직으로 작용을 하며 힘의 작용점 P에서의 접촉력은 보행자의 충격 강도에 따라 다르게 나타난다. 그러므로, 보행자의 충격강도가 변형량을 결정지으며 보행자의 특성을 정확히 고려하여 적절한 시뮬레이션이 가능하다.



〈그림 7〉 타원면-타원면(Ellipsoid-Ellipsoid) 간의 접촉

3) 힘-변형량의 보정

차량과 보행자가 충돌을 할 때 발생하는 힘과 변형량의 관계를 규명하는 데에는 여러 가지 방법이 있으나 기존의 시물레이션에서 사용된 방법은 차량의 각 부분에 진자운동을 하는 추를 이용하여 실험을 하는 것이다. 보행자 더미의 몸체 부분과 동일한 일정한 무게의 추를 차량의 각 부분에 떨어뜨려 그 변형량을 측정하여 차량에 충격하였을 때 보행자 더미의 강도에 따른 힘-변형량의 관계를 분석한다. 이러한 힘과 변형량과의 관계를 찾아야만 접촉시 일어나는 충격량을 산정하여 계산할 수 있는 것이다. 이렇게 얻은 값을 차량 및 보행자 더미에 입력하여 해당 하중이 재하될 때 항상 일정한 변형이 일어나도록 한다. <그림 8>은 보행자와 차량의 접촉시 타원면 또는 면중에서 어느 특성을 적용할 것인가에 따라 다르게 충격력이 적용된다는 것을 보여주고 있다. 이러한 접촉면의 특성에 따라 다르게 시물레이션을 한 결과 일정하지 않은 값이 발생하면 다시 여러 번의 시물레이션을 하여 보행자의 하중이 차량에 일정하게 재하될 때까지 보정하였다.



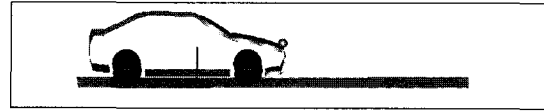
<그림 8> 접촉시 특성에 따른 하중 재하 특성

IV. 동역학적 해석을 통한 보행자 충돌 선회특성 분석

1. 실험식의 시물레이션

1) 포물선 운동을 하는 공의 시물레이션

기존 포물선 운동을 이용한 실험식을 시물레이션



<그림 9> 차량과 공과의 충돌순간

하기 위해 가상의 공을 선택하여 무게는 보행자 더미와 같은 75.7kg, 지름은 20cm로 하였다. 즉, 공을 보행자 더미와 같은 무게로 설정하여 실험식에서 나타난 보행자의 포물선 운동과 동일한 운동을 하도록 하기 위함이다.

보행자 더미의 무게중심이 차량과 접촉하는 지점은 차량의 후드 앞부분이므로 공의 무게중심도 차량의 후드 앞부분에 부딪히게 하였다. 기존의 실험식에서는 대부분 보행자의 무게에 대한 고려가 없었고 보행자의 충격량 및 변형량을 고려하지 않은 강체간의 충돌로 적용해 산정된 식이기 때문에 시물레이션에서도 역시 강체간의 충돌로 가정하여 하였다.

<그림 9>는 모델링된 차량에 공을 올려놓고 시물레이션을 실행하는 충돌순간 공의 위치이며 충돌후 공은 전방으로 포물선 운동을 그리며 날아가게 된다.

2) 차량속도/시간에 따른 Ball의 선회특성

차량의 속도에 따른 공의 선회특성을 시물레이션하여 나타난 결과를 보면 수평이동특성 및 수직이동특성이 나타나는데 속도가 증가함에 따라 공의 수평 및 수직이동특성이 커짐을 알 수 있었다. 수직이동특적 분석시 공의 위치가 0이 되는 지점이 보행자 충돌현상과 비교하면 보행자가 처음 떨어진 위치로 볼 수 있다.

3) 공의 이동거리

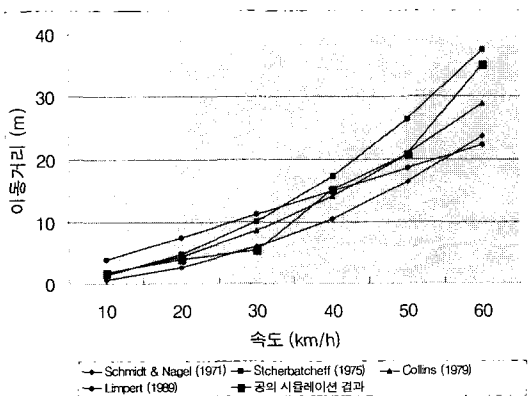
공의 수평 및 수직이동거리는 포물선 운동을 가지며 불규칙적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 실험식과 같이 공과 차량의 충돌현상을 강체충돌로 가정하고 시물레이션한 결과 실험식에서 수평이동거리로 나타난 충돌후 이동거리가 <표 2>와 같이 나타났다.

<표 2> 공의 수평이동거리

속도(km/h)	10	20	30	40	50	60
이동거리						
수평이동거리 (m)	1.80	4.00	5.40	15.20	20.80	35.20

4) 공의 이동거리로 나타난 실험식의 특징

차량과 충돌하는 공은 충격력을 가지고 앞으로 튕기게 된다. 실험식에서 그러했듯이 차량과 충돌하는 보행자는 항상 포물선운동을 따르는 선회특성을 가져왔다. 따라서, 공이 차량과 부딪혀 튕겨 나가는 시뮬레이션은 차량과 충돌하는 보행자의 운동특성을 표현해 주고 있다. 하지만, 공을 시뮬레이션한 결과는 실험식에서 나타난 것과 동일하지 않게 나타났다. <그림 10>에서 보여지듯 실험식과 일부의 속도에서 비슷한 결과가 나타날 뿐 전체가 동일한 결과가 나오지는 않았다. 이것은 보행자 충돌현상을 단지 강제간의 충돌운동으로 가정하고 속도별로 동일한 실험식을 도출한다면 충분히 잘못된 값을 만들어낼 수 있다는 것을 의미한다.



<그림 10> 기존 실험식과 공의 시뮬레이션 결과의 비교

2. 보행자 더미 모델 충돌 시뮬레이션

1) 차량의 속도/시간에 따른 보행자 선회특성

차량의 속도별로 보행자 충돌 시뮬레이션을 한 결과 차량의 속도가 10km/h~60km/h일 경우 시뮬레이션 시간에 따른 보행자의 선회특성이 도출되었다. 보행자의 선회특성은 보행자의 몸통부위에 위치센서를 놓은 후 충돌 후 나타나는 선회특성을 시뮬레이션 하였다. 그러므로, 초기 보행자의 위치값을 정한 후 이후의 이동특성을 나타내었다.

보행자의 초기 위치는 원점에서 거리 2.4m, 높이 1.25m의 값을 가지고 있다. 보행자의 초기 위치를 선정할 때 고려된 사항으로는 다음과 같다.

- 보행자와 차량과의 충돌은 시뮬레이션이 시작됨과 동시에 일어난다. 이것은 차량이 시뮬레이션 시작과 동시에 감속하기 때문이다.
- 보행자가 지면에 접촉해 있는 상태도 일종의 탄성력이 가해지는 현상이기 때문에 보행자의 초기 위치는 지면에 거의 근접하게 하였다.
- 차량과 충돌시 보행자의 위치는 지면에 닿은 상태로 이것을 평형위치라고 하며 여러번의 시뮬레이션을 통해 최적의 평형위치를 찾을 수 있었다.

차량과 충돌후 보행자의 선회특성은 2차원적으로 보면 수평이동선회특성 및 수직이동선회특성으로 나타나는데 보행자의 수평이동선회특성은 충돌후 보행자의 이동거리로 나타나고 수직이동선회특성은 충돌후 보행자가 얼마나 수직방향으로 많이 이동했는가를 나타낸다. 그러므로, 보행자의 수평이동선회특성 뿐만 아니라 수직이동선회특성도 시뮬레이션 결과로 얻는 것이 중요하다.

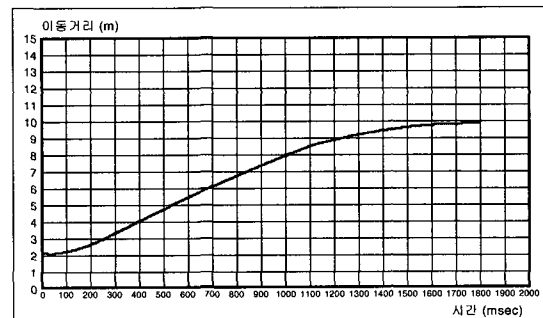
충돌후 보행자의 선회특성을 차량속도 30km/h와 60km/h일 경우의 예를 들어 나타내었다.

(1) 차량속도 30km/h일 경우 보행자의 선회특성

차량속도 30km/h일 경우 충돌하는 보행자는 차량의 위로 완전히 들리어 공중에서 한바퀴 회전한 후에 지면에 닿게 된다.

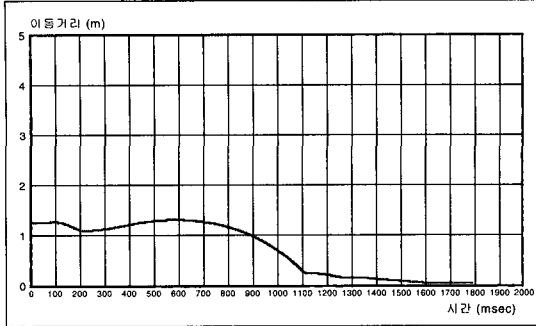
수평이동선회특성을 보면 보행자는 충돌후 수평거리 7.9m를 이동하여 정지하게 되며 수직이동선회특성을 보면 0.6초에 최고정점에 달하게 되고 1.02초에는 지면에 닿으며 1.7초에는 완전히 정지하게 된다.

보행자의 충돌후 선회특성은 <그림 11>과 <그림 12>에 나타나 있다.

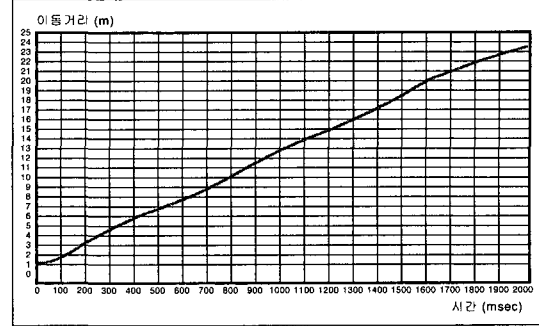


<그림 11> 차량속도 30km/h 경우 보행자의 수평이동특적

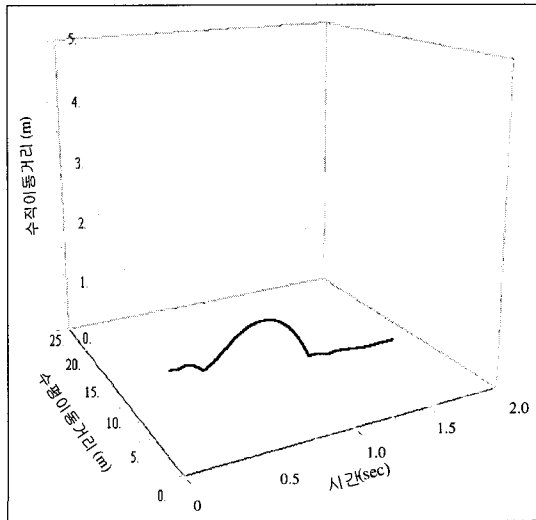




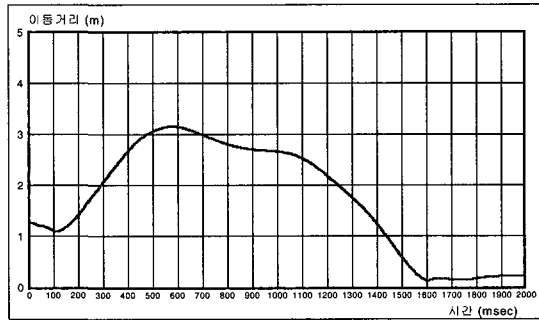
〈그림 12〉 차량속도 30km/h 경우 보행자의 수직이동계적



〈그림 14〉 차량속도 60km/h 경우 보행자의 수평이동계적



〈그림 13〉 차량속도 30km/h 경우 보행자의 3차원 선회 특성



〈그림 15〉 차량속도 60km/h 경우 보행자의 수직이동계적

차량속도 30km/h일 경우 보행자의 충돌후 선회 특성을 3차원 그래프로 표현하면 〈그림 13〉과 같다. 30km/h일 경우 보행자가 차량에 충돌한 후 나타나는 수직축의 곡선계적은 보행자가 공중에서 포물선 운동을 하는 것을 나타낸다. 규칙적이지 않은 포물선 운동이 일어나는 것은 보행자가 차량에 충돌한 후 공중으로 튕기면서 무게중심의 영향을 받기 때문이다. 보행자는 지면에 충돌한 후 반발력이 적어 지면에서 끌리기만 할 뿐 다시 튕기지는 않는다.

(2) 차량속도 60km/h일 경우 보행자의 선회특성

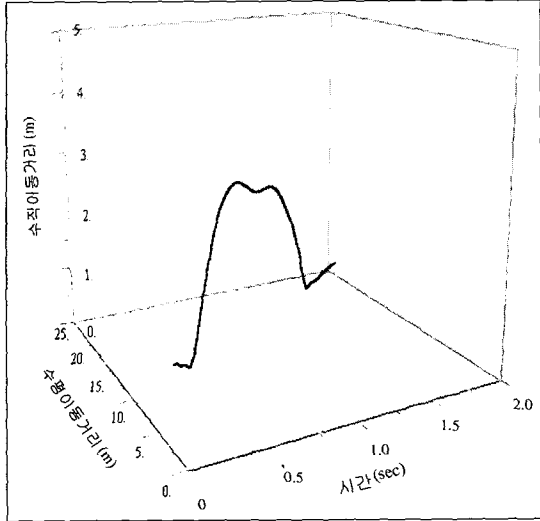
차량속도 60km/h일 경우 충돌하는 보행자는 차량의 위로 완전히 들리어 공중에서 90° 회전한 후에

머리부터 지면에 닿게 된다.

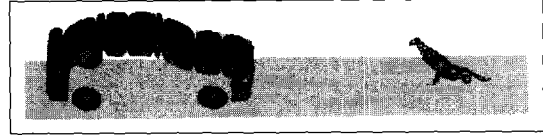
수평이동선회특성을 보면 보행자는 충돌후 수평거리 24.50m를 이동하여 정지하게 되며 수직이동선회특성을 보면 0.58초에 최고정점에 도달하게 된다. 보행자는 무게중심에 따라 회전하며 회전운동이 끝나면 더미의 팔과 다리가 정지한 차에 다시 부딪히고 1.52초부터는 지면에 닿으며 2.0초 이후에는 완전히 정지하게 된다.

보행자의 충돌후 선회특성은 〈그림 14〉와 〈그림 15〉에 나타나 있다.

차량속도 60km/h일 경우 보행자의 충돌후 선회특성을 3차원 그래프로 표현하면 〈그림 16〉과 같다. 충돌후 보행자의 공중에서의 궤적은 가장 불규칙적인 2차 포물선의 형태를 가진다. 차량과 충돌후 보행자는 공중에서 회전운동을 할 때 무게중심을 따라 이동하는 곡선궤적을 가지기 때문에 불규칙적으로 나타난다. 지면에 충돌한 후에는 지면과 부딪히는 부위가 충돌 속도에 비해 반발력이 그리 크지 않아 수직운동 궤적이 크게 나타나지 않으며 약간의 수평방향 운동을 하는 형태로 나타난다.



〈그림 16〉 차량속도 60km/h 경우 보행자의 3차원 선회 특성



〈그림 17〉 차량속도 50km/h일 경우 보행자의 최종정지 위치

량속도 40km/h와 50km/h에서는 포물선 운동에 근접하게 접근을 하는 것처럼 보이지만 이 결과를 3차원으로 시뮬레이션으로 보면 보행자는 충돌후 선회운동시 보행자의 초기위치에서 그대로 포물선 회전을 하는 것이 아니라 변형된 형태의 포물선 운동을 하는 것을 볼 수 있다. 〈그림 17〉은 차량속도 50km/h일 경우 충돌후 보행자의 최종정지위치를 나타낸다. 초기 위치와는 다르게 보행자는 충돌후 회전운동을 하여 옆으로 누운 형태의 수직인 위치가 되었다.

2) 동역학적 보행자 충돌 시뮬레이션 결과

(1) 충돌후 보행자 이동거리

동역학적 해석을 고려하여 실제 보행자 더미의 시뮬레이션을 해본 결과 보행자 충돌후 이동거리는 〈표 3〉과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 속도별로 일률적으로 동일한 실험식을 적용한 결과와는 달리 보행자와 차량이 충돌을 할 때 속도별로 다른 변수를 적용하였고 충돌시 차량과 보행자가 접촉하는 현상에 중점을 두어 시뮬레이션을 하였기 때문에 포물선 운동으로 나타난 실험식과는 다른 결과를 나타내었다.

하지만, 충돌속도가 높아질수록 충돌후 이동거리가 증가한다는 결과는 기존의 실험식과 같은 결론을 얻었다.

〈표 3〉 동역학적 해석에 따른 보행자의 충돌후 이동거리

차량과의 충돌속도(km/h)	10	20	30	40	50	60
보행자 이동거리(m)	0.60	3.90	7.90	14.00	16.46	24.50

(2) 충돌후 보행자 선회특성

차량과 충돌후 나타나는 보행자의 선회특성은 실험식에서 포물선 운동으로 정해진 것과는 달리 실제로는 일정한 규칙이 없는 형태의 운동으로 나타났다. 예를 들어, 2차원 평면 시뮬레이션의 결과를 보면 차

(3) 시간에 따른 보행자의 선회특성

차량에 충돌하는 보행자의 선회특성이 시간에 따라 어떻게 달라지는지를 차량속도 30km/h와 60km/h의 결과를 예를 들어 나타내었다. 〈그림 18〉에 보면 차량속도에 따라 보행자의 충돌후 이동형태가 시간대별로 다른 형태를 가지는데 속도가 높을수록 차량의 각 부분에 부딪히는 시간이 빨라져 차량과 분리되는 시

시간 (msec)	차량속도 30km/h	차량속도 60km/h
0		
300		
600		
900		
1200		
1500		
1800		
2000		

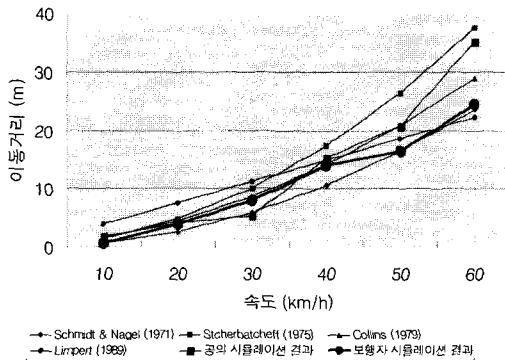
〈그림 18〉 30km/h와 60km/h일 경우 보행자의 선회특성

간이 더 빨라진다. 따라서, 30km/h일 때는 보행자가 1.5초에 이미 지면에 떨어졌으나 60km/h일 때는 아직 지면에 닿지 않은 상태이다.

### 3. 실험식 및 공과 보행자 충돌 시뮬레이션의 비교

차량의 속도에 따라 실험식과 공, 보행자 충돌 시뮬레이션으로 비교 가능한 충돌후 이동거리를 비교하였다.

충돌후 나타나는 보행자의 이동거리는 <그림 19>에서 보이는 것과 같은 형태를 가지고 있었다. 보행자 충돌 시뮬레이션 결과는 실험식의 결과처럼 속도가 10km/h 단위씩 증가함에 따라 이동거리가 급격히 증가하지는 않았으며 일부 실험식에서 나타난 결과에서처럼 너무 낮은 이동거리를 보이지도 않았다.



<그림 19> 실험식, 공, 보행자 충돌 시뮬레이션의 비교

## V. 결론

보행자 충돌 선회특성을 분석하기 위한 이전의 방법은 차량에 부딪히는 보행자의 무게나 충돌지점에 대한 고려를 하지 않고 보행자를 강체로 설정하여 속도에 따라 동일한 실험식을 적용하였다. 그러나, 보행자가 차량에 부딪히는 동안에는 충돌 부위 및 속도에 따라 탄성력이 달라지는 물체로 운동을 한다. 차량이 보행자의 몸체 각 부분에 부딪힐 때 서로 다른 충격력이 가해짐으로써 이에 대한 반발력으로 보행자의 운동행태가 나타나고 속도 및 접촉지점에 따라 선회특성이 달라지게 되는 것이다.

이러한 보행자의 선회특성을 설명하기 위하여 동역학적 시뮬레이션을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 차량과 충돌 후 보행자가 날아가는 수평방향 이동거리는 기존의 실험식에서와 같이 강제충돌 현상으로 표현하기에는 적절하지 않다. 따라서, 보행자 충돌 선회특성 분석에 동역학적 시뮬레이션을 적용한 결과가 차량과 보행자간의 충돌현상을 적절히 나타내어 더욱 더 타당한 결과를 얻을 수 있다.
- 2) 보행자의 충돌 선회특성을 3차원 분석한 결과 속도별로 나타나는 보행자의 충돌후 선회특성이 기존의 실험식에서 보여지는 것과 같이 동일한 형태의 포물선 운동으로 변화하지는 않는 것으로 나타났다. 충돌후 보행자의 선회특성은 속도별로 다른 형태를 가지고 나타나므로 시뮬레이션을 통한 방법은 보행자 선회특성의 고유한 형태를 설명하고 있다.
- 3) 시뮬레이션에 사용된 변수값은 제한된 가정에서 출발하여 현실에 적절하도록 여러 변수들의 값을 반복하여 반영한 결과이므로 실제 실험에서 나타난 값을 적용하진 못하였다. 향후 이러한 보행자 충돌 선회특성에 관한 실험이 실시된다면 각 변수들에 대한 값을 실제로 대입해보고 시뮬레이션 결과와의 비교를 할 수 있을 것이다.
- 4) 보행자의 충돌후 선회특성을 규명하는 것은 향후 교통사고분석시 보행자의 충돌상황에 대해 알 수 있게 해준다. 보행자 교통사고시 사고후 자료로 충돌후 보행자의 최종정지위치를 알 수 있는데 이는 차량과의 충돌속도, 보행자의 초기위치, 보행자의 무게, 차량의 무게, 강도 등 여러 요소에 따라 달라진다. 그러나, 기존의 사고분석시에는 최종정지위치만으로 판단하여 이러한 사고관련 요소들에 대하여 분석하지 못하였다. 시뮬레이션에서는 위의 변수를 모두 고려하였을 경우 속도에 따른 보행자 선회특성을 분석하였으므로 향후 보행자 교통사고분석에서 보행자의 최종정지위치만으로는 분석하기 어려운 차량과의 충돌속도 및 초기 충돌위치를 밝히는 데 도움을 줄 것이다.

## 참고문헌

1. 경찰청(2001), "교통사고통계".
2. 교통안전공단(1996), "교통사고조사분석".
3. 박경진 · 박영선 · 이주영 · 정근섭 · 서명원 · 위인혁 (1992), "승객거동 해석의 시뮬레이션에 관하여".

- 한국자동차공학회지, Vol.14, No.6, pp.29~35.
4. 신문균 · 박경진 · 이완익 · 김형준 · 정근섭(1992), "승용차 충돌시 승객 해석을 위한 모델링의 예", 한국자동차공학회지, Vol.14, No.2, pp.88~98.
  5. 임재문, 최중원, 박경진(1996), "ATB 소프트웨어를 이용한 측면충돌시 승객거동해석 모델링의 확립 및 분석", 한국자동차공학회논문집, 제4권 제6호, pp.85~96.
  6. 하야시 히로시(1992), 교통사고감정공학.
  7. Collins, James C. and Morris, Joe L.(1979), "Highway Collision Analysis", Thomas Publishing.
  8. Jassen. E. G., Wismans J. S. H. M.(1985), "Experimental and Mathematical Simulation of Pedestrian-Vehicle and Cyclist-Vehicle Accident", European Experimental Vehicle Safety Committee.
  9. Jerry J. Eubanks, W. R., "Rusty" Haight (1992), "Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology", SAE paper No. 921591.
  10. Koji Mizuno, Janusz Kajzer(1998), "The Compatibility of Mini Cars in Traffic Accidents", European Experimental Vehicle Safety Committee.
  11. Lynn B. Fricke(1990), "Traffic Accident Reconstruction", Northwestern University Traffic Institute.
  12. OECD(1998), "International Road Traffic Accident Database".
  13. Pritz. H. B., Pereira. J. M.(1983), "Pedestrian Hip Impact Simulator Development and Hood Edge Location Consideration on Injury Severity", SAE paper No. 831627.
  14. Rudolf Limpert(1989), "Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Edition", The Michie Company.
  15. Schmidt, D. N and Nagel, D. A.(1971), "Pedestrian Impact case study", Proceedings 15th Conference Association for Automotive Medicine.
  16. Stcherbatcheff, G., et al.(1975), "Simulation of Collisions Between Pedestrians and Vehicles Using Adult and Child Dummies", SAE paper NO. 751167.
  17. TNO Automotive(1999), "MADYMO User's Manual".
  18. TNO Automotive(1999), "MADYMO Theory Manual".
  19. Van Wijk. J., Wismans. J., Maltha. J., Wittebrood. L.(1983), "MADYMO Pedestrian Simulations", SAE paper No. 830060.
  20. Yang. J. K., Lovsund. P.(1997), "Development and Validation of a Human-body Mathematical model for Simulation of Car-Pedestrian Collision", IRCOBI Conference.

✉ 주 작 성 자 : 김종혁

✉ 논문투고일 : 2001. 12. 21

논문심사일 : 2002. 3. 8 (1차)

2002. 3. 21 (2차)

심사판정일 : 2002. 3. 21

✉ 반론접수기간 : 2002. 8. 30