

차량형상과 충돌형태에 따른 보행자 거동 특성에 관한 연구

유 장 석^{*1)} · 박 경 진²⁾ · 장 명 순³⁾

인천경제자유구역청 교통팀¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾ · 한양대학교 교통시스템공학과³⁾

Pedestrians Trajectory Characteristic for Vehicle Configuration and Pedestrian Postures

Jangseok Yoo^{*1)} · Gyung-Jin Park²⁾ · Myungsoon Chang³⁾

¹⁾Incheon Free Economic Zone Authority, 994 Dongchun-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-130, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

³⁾Department of Transportation Engineering Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 15 March 2004 / Accepted 23 May 2005)

Abstract : Pedestrians involved in traffic accidents manifest unique trajectory characteristics depending on the collision speed, vehicle configuration, and pedestrian postures. However, the existing analytical models for pedestrian movements do not fully include the rotational characteristics of the pedestrians because they assume a two dimensional parabolic trajectory. This faulty assumption in the development of these models limits their applicability and reliability. This study investigated the pedestrians movement at collision by computer simulation. The simulations are carried out by using MADYMO, which is a special simulation software system for dynamic movement analysis. Vehicles and pedestrians are modeled and verified via real crash worthiness experiments. Simulations are performed for various collision speeds, vehicle configuration, and pedestrian postures. Since the simulation uses multi-body dynamics, it can express irregular phenomena of the bodies quite well. The results can be exploited for vehicle design and traffic accident reconstruction.

Key words : Pedestrians accident(보행자 교통사고), Pedestrians trajectory characteristics(보행자 거동특성), Kinematic contact(운동학적 접촉), Elastic contact(탄성접촉), 충돌속도(Collision speed)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 최근 10년 간(1992~2001) 연평균 약 26만 여건의 교통사고가 발생하여 연평균 약 1만 천 여명의 사망자와 연평균 약 36만 여명의 부상자가 발생하였다. 보행자 교통사고는 지난 10년 간 전체 교통사고의 30.6%인 882,462건이 발생하여 44,096명(37.7%)이 사망하고 897,898명(22.8%)의 부상자

가 발생하였다.¹⁾ 보행자 교통사고의 치사율은 37.7%로 교통사고 중 가장 높음에도 불구하고 보행자 교통사고 예방을 위한 교통공학적, 도로공학적인 대책은 물론 충돌시 보행자 부상을 최소화하기 위한 보행자 친화적 안전자동차 개발 등 보행자 교통 안전증진 위한 과감한 투자와 적극적인 연구에 대해 등한시 해 온 것이 우리의 현실이다.

보행자 교통사고로 인한 피해를 최소화하기 위한 방법에는 교통사고 차체를 발생하지 않도록 미연에 예방하는 방법, 사고후 부상자 피해를 최소화하기

*To whom correspondence should be addressed.
yoojangseok@hanmail.net

위해 보행자 친화적으로 안전차량을 개발하는 방법, 신속한 구호체계를 구축하는 방법 등이 있다.

본 연구의 목적은 컴퓨터 모의충돌실험을 통해 충돌차량형상에 따라, 보행자 충돌형태에 따라, 보행자 충돌속도에 따라 충돌 후 보행자 선회 및 운동 특성을 분석하여 충돌 후 보행자 부상을 최소화할 수 있는 보행자 친화적 안전차량 개발을 위한 학문적 기틀을 마련하여 보행자 교통안전증진에 기여하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

보행자 충돌특성을 분석하는 방법에는 실제 보행자를 대상으로 충돌실험을 수행하여 분석하는 방법, 풀 스케일 테스트방법, 컴포넌트 테스트방법, 컴퓨터 시뮬레이션 테스트 방법이 있다.²⁾ 이중 실제 보행자를 대상으로 충돌실험을 분석하는 방법은 보행자의 생명과 직결되는 사안으로 절대불가하고, 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 테스트방법과 보행자 신체 일부분을 개발하여 충돌실험을 수행하는 컴포넌트 테스트방법은 고가의 보행자 더미와 충돌 장비에 의한 경제적인 제약, 충돌실험 장소적인 제약 등 많은 제약요소가 내재되어 있다.

반면, 컴퓨터 시뮬레이션 테스트방법은 자동차와 보행자를 3차원으로 모델링하여 컴퓨터 모의충돌실험을 수행함으로써 실제 보행자를 대상으로 한 충돌실험과 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 충돌 실험에서 해석이 곤란한 여러 상황적 조건을 변화해가며 자유롭게 분석할 수 있는 장점을 지닌 테스트방법이다. 따라서, 본 연구에서는 경제적·장소적·상황적 제약 등을 최소화하고 연구효과의 극대화를 도모하기 위해 승객거동해석 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 MADYMO(MAThematical DYnamical Models)를 이용하여 충돌차량형상, 보행자 충돌형태, 보행자 충돌속도에 따른 보행자 거동특성에 대한 연구를 수행하였다.³⁾

컴퓨터 모의충돌실험차량 형상은 충돌 후 보행자 거동특성에 영향을 미치는 외적요소가 서로 다른 형태로 설계되었고 보행자 충돌실험에 이용된 승용차종을 선정하여 실험차량, A타입차량, B타입 차량으로 구분하여 모델링하였다. 보행자 모델은 측면

충돌 실험용(Side Impact) 성인 남자 멀티바디 휴먼 스탠딩 모델(Multi Body Human Standing Model)⁴⁾을 이용하여 충돌속도 10km/h에서부터 60km/h까지 10km/h의 단위로 변화해가며 충돌차량형상, 보행자 충돌형태, 충돌속도별에 따라 충돌 후 보행자 거동 특성 변화에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 보행자 거동특성 및 분석이론

2.1 보행자 거동특성

2.1.1 보행자 거동이론

보행자 충돌은 크게 충돌단계, 선회·비행단계, 활주 또는 구름단계의 3단계 과정으로 발생한다. 충돌 후 선회·비행단계에서 보행자는 차량특성, 주행 특성, 보행자 신체특성, 충격력($F=mv$) 등에 따라 고유의 거동특성을 나타내며 비행한다.⁷⁾

충돌 후 보행자 거동은 충격력이 보행자 무게중심 위치보다 아래부분에 작용할 경우 보행자는 차량진행 반대방향으로 회전운동을 하며 선회·비행한다. 충격력이 보행자의 무게중심위치보다 윗부분에 작용할 경우 충돌 후 보행자는 차량진행방향으로 운동하며 차량 전면 지면에 낙하한다. 반면, 보행자 무게중심을 수평으로 충격할 경우 충돌 후 보행자는 충격력방향으로 직선운동을 한다.

2.1.2 보행자 거동유형

충돌 후 보행자 거동특성에 따라 Eubanks와 Rusty Height⁸⁾는 랩 트래젝터리(Wrap Trajectories), 포워드 프로젝션(Forward Projection), 펜더 벌트(Fender Vault), 루프 벌트(Roof Vault), 썸머셀트(Somersault) 등의 유형으로 구분하였다.

랩 트래젝터리의 선회특성은 충돌 후 보행자의 신체가 자동차 후드를 감싸며 선회운동을 한 후 노면에 낙하하여 활주 또는 구르면서 최종위치하는 거동특성을 말한다. 포워드 프로젝션 선회특성은 밴 또는 버스차량과 같이 차량전면이 박스형태로 이루어진 자동차가 보행자의 무게중심 위쪽부분을 충격하여 보행자가 차량 바로 앞 지면에 낙하하여 활주 또는 구르면서 최종위치하는 형태의 운동특성을 말한다.

펜더 벌트 선회특성은 차량전면 후드모서리 부분

으로 보행자를 충돌하여 보행자의 신체가 웬더 위로 이동하며 선회하는 형태이고, 루프 벌트 선회특성은 자동차의 주행속도가 60km/h 이상의 높은 속도로 충돌하여 보행자가 공중에서 회전운동을 하며 지붕 위로 넘어가는 선회특성을 말한다. 썸머셀트 선회특성은 자동차가 보행자의 무게중심 아랫부분을 60km/h 이상의 높은 속도로 충돌하여 보행자의 하체부분이 공중으로 튀어 오르며 급회전하는 거동특성을 말한다.

2.2 보행자 거동특성 분석모형

보행자 충돌속도와 충돌후 보행자의 비행거리를 분석하는 모형식에는 Table 1에서와 같이 Schmidt & Nagel 모형, Stcherbatcheff 모형, Collins & Morris 모형, Limpert 모형, Barzeley 모형, Searle 모형, 하야시 히로시(林洋)의 모형 등이 있다.

3. 컴퓨터 모의충돌실험 차량 및 보행자 모델링

3.1 차량 모델링

컴퓨터 모의충돌실험 차량을 모델링함에 있어 충돌후 보행자 거동특성에 영향을 미치는 차량 외적인 요소와 내적인 요소를 반드시 고려하여야 한다. 차량 외적인 요소에는 충돌속도, 중량, 범퍼높이, 전면 리드 각(Lead Angle), 후드(Hood Edge) 높이 및 길이 등이 있다.

컴퓨터 모의충돌실험 차량의 외적인 요소에 대한 모델링은 보행자 거동특성을 연구하기 위해 충돌실험에 사용되었던 미국 승용차량 중 차량형상 특징과 실험결과자료를 수집할 수 있는 차량을 선정하여 Table 2에서와 같이 실험차량, A타입 차량, B 타입차량으로 구분하여 3차원으로 모델링하였다.

보행자 충돌실험 형태는 차량전면으로 보행자의 정면, 후면, 측면을 충돌하는 실험을 속도별(10km~60km)로 각각 수행하였으며, 보행자 충돌위치는 차량전면 무게중심으로부터 오른쪽으로 0.4m, 0.5m, 0.35m의 위치를 각각 충돌하는 실험을 수행하였다.

차량 내적인 요소는 보행자와 직접 접촉하는 범퍼, 램프, 후드, 전면유리, 지붕 등의 차체강성을 나타내는 힘-변형량(Force-Deflection, F-D 곡선) 특성을 말한다. 컴퓨터 모의충돌실험차량의 힘-변형량

Table 1 Existing models of pedestrian movement in traffic accident

Name of Model	Formulation	Note
Schmidt & Nagel모형	$v(m/s) = \sqrt{f_{(h)}^2 + e} - f_{(h)}$	v : 충돌속도(m/s)
Stcherbatcheff 모형	$d = \frac{v^2}{2a} + 0.0091 va$	$f_{(h)}$: $5.6(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_a - h})$ h_a : 보행자 무게중심 비행높이(m) h : 보행자 무게중심높이(m) e : $2 \times f_p \times g \times d$
Collins & Morris 모형	$d = \frac{v \times \sqrt{h}}{7.97} + \frac{v^2}{254 \times f_p}$ (v : km/h, f_p : 0.8)	f_p : 보행자 노면마찰계수(0.2~0.7)
Limpert 모형	$v(km/h) = 10.62 (\sqrt{8.4 f_v^4 + f_v d}) - 32.2 f_v^2 \pm 4$	g : 중력가속도(9.8m/sec ²) d : 충돌후 보행자 이동거리(m)
Barzeley모형	$v(m/s) = \sqrt{149 - 203d} - 12$	a : 차량 감속도(4~7m/sec ²) d : 충돌후 보행자 이동거리(m)
Searle 모형	$v(m/s) = \frac{\sqrt{2f_p g d}}{\cos\theta + f_p \sin\theta}$ (f_p : 0.66 or 0.79, θ : 10°)	f_v : 자동차 노면마찰계수 : 0.7~1.2 θ : 보행자 비행각도(°)
하야시 히로시 모형	$D = d_1 + d_2$ $= v\sqrt{\frac{2h_a}{g}} + \frac{v^2}{2gf_p}$ (f_p : 0.6)	t : 낙하시간(sec) d_1 : 비행거리(m) $d_1 = v\sqrt{\frac{2h}{g}}$ d_2 : 활주거리(m) $d_2 = \frac{v^2}{2gf_p}$ m : 보행자의 질량(kg)

Table 2 Modeling data of the vehicle for simulation

구분	실험차량	A타입 차량	B타입 차량
축거	2.92m	2.72m	2.67m
중량	1814.3kg	1542.2kg	1406.2kg
범퍼 하단높이	0.39m	0.26m	0.38m
범퍼상단높이	0.5842m	0.48m	0.51m
전면유리 각	40°	32°	67°
후드길이	1.4605m	1.52m	1.42m
범퍼 리드 각	63°	63°	67°
충돌위치	오른쪽 0.40m	오른쪽 0.50m	오른쪽 0.35m

특성은 무게 72.57kg의 스탠딩 보행자 더미 측면을 52km/h의 속도로 충돌실험한 동영상자료 및 결과자료를 이용하는 방법을 선택하였다. 즉, 충돌실험을 통해 분석된 보행자 거동특성 및 이동거리특성 등의 결과와 컴퓨터 모의충돌실험을 통해 분석된 거동특성 및 이동거리 결과가 유사해질 때까지 반복해서 컴퓨터 모의실험차량의 요소별 F-D특성을 보정하며 컴퓨터 모의충돌실험차량 내적인 요소를 설정하였다.

컴퓨터 모의충돌실험 차량의 요소별 힘-변형량 특성을 보정(Tuning)함에 있어 차체에 작용하는 힘-변형량 조절계수(Scale Factor)를 조절하는 방법을 선택하였다. 힘-변형량 조절계수를 조절하는 방법은 모델링 차량 차체강도에 임의의 값을 곱하여 실제 충돌실험결과와 동일한 결과가 나오도록 보정하는 방법이다.

3.2 보행자 모델링

컴퓨터 모의충돌실험용 보행자 모델은 MADYMO 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램에서 사용하는 보행자 모델 중 실제 충돌실험에서 사용한 보행자 모델과 가장 유사하고 또한 한국 보행자 교통사고 사망자의 신체적 특징과 가장 유사한 멀티바디 스탠딩 휴먼 모델(Multi Body Standing Human Model)을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 실험용보행자 모델특성은 Table 3, Fig. 1에서와 같이 총 52개의 타원체(Ellipsoid)로 구성된 신장 174.2cm, 몸무게 75.7kg의 측면충돌 실험용 남성 멀티바디 스탠딩 휴먼 모델(Multi Body Standing Human Model)이다. 컴퓨터 모의충돌실험에 이용된 보행자 모델의 머리와 가슴부위의 무게중심높이는 지상으로부터 각각 1.61m, 1.24m이다.

Table 3 Characteristic of pedestrian models

구분	보행사망자 신체 특징	컴퓨터 모의충돌실험용 보행자 모델
종류	25세~59세 (백분위수 75%)	Multi Body Standing Human Model
성별	남성	남성
체중	73.7kg	75.7kg
신장	174.2cm	174.2cm
용도	-	측면충돌실험용

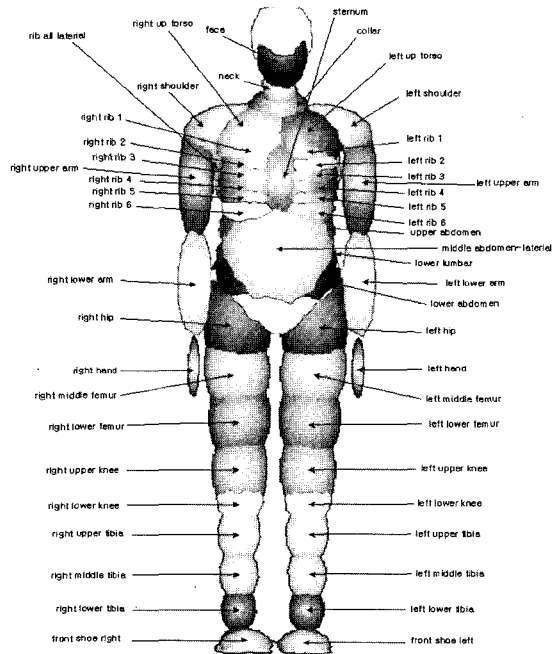


Fig. 1 Multi body standing human model(A model in MADYMO)

4. 다물체동역학적 보행자 거동특성분석

충돌차량형상, 보행자 충돌형태, 보행자 충돌속도 등 충돌 외적인 요소가 충돌후 보행자의 거동특성에 미치는 영향을 충돌속도 10km/h~60km/h까지 10km/h 단위로 변화해가며 컴퓨터 모의충돌실험을 통해 분석하였다.

4.1 차량형상별

충돌차량 형상에 따라 충돌후 보행자의 거동특성을 컴퓨터 모의충돌실험을 통해 분석한 결과, 충돌후 보행자의 거동특성, 수평 및 수직이동특성은 다음과 같다.

4.1.1 선회특성

충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자 선회특성을 분석한 결과 Fig. 2에서와 같이 충돌속도가 10km로 저속일 경우 보행자와 1차 충돌위치인 차량의 범퍼높이가 높은 실험차량과 B타입차량은 충돌후 보행자는 운동특성의 변화없이 충돌차량 전면 지면에 낙하하며 최종정지하지만, 범퍼의 높이가 비교적 높은 A차량의 경우는 10km/h 미만의 저속충돌이라 하더라도 충돌후 보행자는 고유의 선회특성을 나타내며 비행한다.

보행자의 충돌속도가 20km/h 이상인 경우 차량형상에 관계없이 충돌후 보행자는 충돌속도가 증가에 비례하여 불규칙한 비선형형태의 선회특성을 나타내며 병진운동, 종회전운동, 횡회전운동 등을 병행하며 선회·비행한다.

특히, 자동차의 충돌속도가 40km/h 이상의 높은

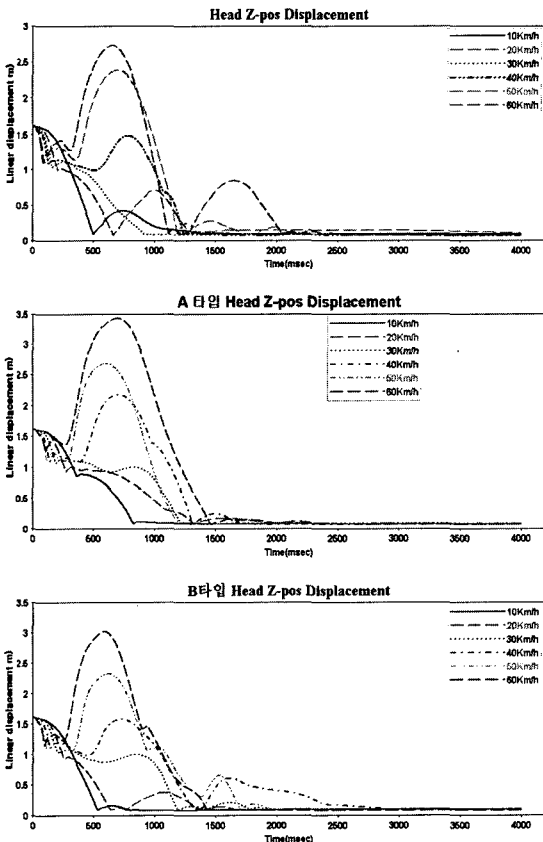


Fig. 2 Vertical moving distance and trajectory for a vehicle configuration T

속도로 보행자를 충돌한 경우 충돌후 보행자는 공중에서 한바퀴 이상 회전운동을 하며 다차원 선회특성을 나타내며 비행한다.

차량형상에 따른 충돌후 보행자의 거동특성은 차량의 범퍼높이가 낮은 A타입 차량, B타입 차량, 실험차량 순으로 충돌후 보행자가 공중으로 높게 튀어 오르는 선회특성을 나타낸다.

4.1.2 수평 및 수직 이동특성

충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자의 수평이동거리변화특성은 Table 4에서와 같이 차량형상에 관계없이 충돌속도가 증가할수록 충돌후 보행자의 수평이동거리는 증가하지만 충돌속도 30km/h 이하에서는 범퍼의 높이가 낮을수록, 충돌속도 40km/h 이상에서는 차량의 중량이 높을수록 수평이동거리가 증가한다.

충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자의 수직 상방향 이동특성에 가장 영향을 많이 미치는 차량형상은 Table 5에서와 같이 범퍼높이가 가장 낮은 A타입 차량이다.

4.2 보행자 충돌형태별

보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자 수평 및 수직 이동특성, 선회특성 등에 미치는 영향을 자동차 전면으로 보행자 정면, 측면, 후면을 충돌하는 경우에 대해 다음과 같이 연구하였다. 보행자 충돌형태별 보행자 운동특성을 연구함에 있어 현재까지 컴퓨터 모의충돌실험용 정면충돌 보행자 더미와 후면충돌 보행자 더미가 개발되어 있지 않아 측면충돌실험용 보행자 모델을 이용하여 연구하였다.

4.2.1 선회특성

보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자 거동특성을 연구한 결과 Fig. 3에서와 같이 측면충돌의 경우 충돌속도가 10km/h로 저속일 때 충돌후 보행자는 단순운동특성을 나타내며 충돌차량 전면 지면에 낙하하지만, 충돌속도 20km/h 이상에서는 충돌속도에 관계없이 충돌속도 증가에 비례하여 불규칙한 비선형형태의 선회특성을 나타내며 병진운동, 종회전운동, 횡회전운동 등을 병행하며 선회·비행한다.

특히, 충돌속도가 40km/h 이상의 높은속도로 보행자를 충돌하였을 경우 충돌후 보행자는 공중에서

차량형상과 충돌형태에 따른 보행자 거동 특성에 관한 연구

Table 4 Longitudinal movement by vehicle configuration (Unit : m)

구분	충돌속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	차량형상별 이동거리 최대편차	차량형상별 이동거리 최대변화율
	이동거리(m)								
머리	실험차량	2.61	6.06	9.03	11.99	18.69	22.38	19.77	88.33%
	A타입차량	3.30	7.04	11.58	12.80	15.90	18.47	15.17	82.1%
	B타입차량	2.65	6.08	9.86	11.75	17.80	20.52	17.87	87.1%
	A	0.69	0.98	2.55	1.05	2.79	3.91	4.60	-
	B	20.9%	13.9%	22.0%	8.2%	14.9%	17.5%	23.3%	-
가슴	실험차량	2.84	6.09	8.68	11.95	18.49	22.02	19.18	85.1%
	A타입차량	3.68	7.12	11.28	12.48	15.74	18.18	14.5	79.8%
	B타입차량	3.04	6.09	9.50	11.77	17.40	20.37	17.33	85.1%
	A	0.84	1.03	2.60	0.71	2.75	1.65	4.68	-
	B	22.8%	14.5%	23.1%	5.7%	14.9%	17.4%	24.4%	-

주) A : 차량형상에 따른 수평이동거리 최대편차, B : 차량형상에 따른 수평이동거리 최대편차율

Table 5 Vertical movement by vehicle configuration (Unit : m)

구분	충돌속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	차량형상별 이동거리 최대편차	차량형상별 이동거리 변화율
	이동거리(m)								
머리	실험차량	1.61	1.61	1.61	1.61	2.38	2.72	1.11	40.8%
	A타입차량	1.61	1.61	1.61	2.17	2.68	3.42	1.81	52.9%
	B타입차량	1.61	1.61	1.61	1.61	2.32	3.01	1.40	46.5%
	C	-	-	-	0.56	0.36	0.70	0.70	-
	D	-	-	-	25.8%	13.4%	20.5%	38.7%	-
가슴	실험차량	1.24	1.24	1.24	1.35	1.97	2.34	1.10	47.0%
	A타입차량	1.24	1.24	1.31	1.89	2.36	3.11	1.87	60.1%
	B타입차량	1.24	1.24	1.26	1.38	1.99	2.69	1.45	53.9%
	C	-	-	0.07	0.54	0.39	0.77	0.77	-
	D	-	-	5.3%	28.6%	16.5%	24.8%	41.2%	-

주) C : 차량형상에 따른 수직이동높이 최대편차, D : 차량형상에 따른 수직이동높이 최대편차율

Table 6 Longitudinal movement by pedestrian posture (Unit : m)

구분	충돌속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	보행자충돌 형태별 이동거리 최대편차	보행자충돌 형태별 이동거리 변화율
	이동거리(m)								
머리	측면충돌	2.61	6.06	9.03	11.99	18.69	22.38	19.77	88.3%
	정면충돌	2.58	5.19	9.00	13.69	18.59	26.47	23.89	90.3%
	후면충돌	4.10	4.68	8.90	13.81	20.61	26.53	22.43	84.6%
	E	1.52	1.38	0.13	1.82	2.02	4.15	4.12	-
	F	37.1%	22.8%	1.4%	13.2%	9.8%	15.6%	17.3%	-
가슴	측면충돌	2.84	6.09	8.68	11.95	18.49	22.02	19.18	87.1%
	정면충돌	2.86	5.59	9.33	13.76	18.64	26.11	23.25	89.1%
	후면충돌	3.73	5.06	8.67	14.11	20.85	26.73	23.00	86.1%
	E	0.89	1.03	0.66	2.16	2.36	4.71	4.07	-
	F	23.9%	16.9%	7.1%	15.3%	11.3%	17.6%	17.5%	-

주) E : 보행자 충돌형태에 따른 이동거리 최대편차, F : 보행자 충돌형태에 따른 이동거리 최대변화율

Table 7 Vertical movement by pedestrian posture (Unit : m)

구분	충돌속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	보행자충돌 형태별 이동거리 최대편차	보행자충돌 형태별 이동거리 편차율
	이동거리(m)								
머리	측면충돌	1.61	1.61	1.61	1.61	2.38	2.72	1.11	40.8%
	정면충돌	1.61	1.61	1.61	2.02	2.63	3.02	1.41	46.7%
	후면충돌	1.61	1.61	1.61	2.26	2.93	3.29	1.68	51.1%
	G	-	-	-	0.65	0.55	0.57	0.57	-
	H	-	-	-	28.8%	18.8%	17.3%	33.9%	-
가슴	측면충돌	1.24	1.24	1.24	1.35	1.97	2.34	1.10	47.0%
	정면충돌	1.24	1.24	1.24	1.73	2.36	2.80	1.56	55.7%
	후면충돌	1.24	1.24	1.24	1.87	2.61	3.01	1.77	58.8%
	G	-	-	-	0.52	0.64	0.67	0.67	-
	H	-	-	-	27.8%	24.5%	22.3%	37.8%	-

주) G : 보행자 충돌형태에 따른 수직이동높이 최대편차, D : 보행자 충돌형태에 따른 수직이동높이 최대편차율

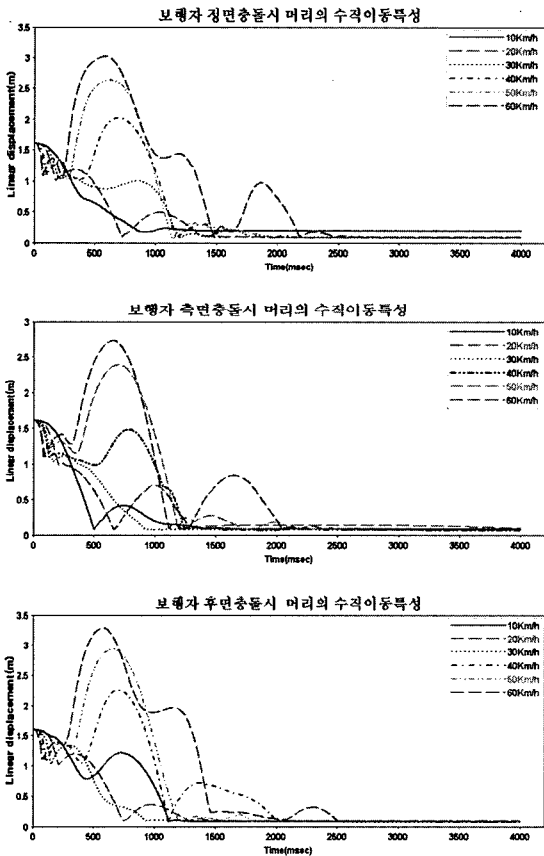


Fig. 3 Vertical moving distance and trajectory of a pedestrian posture

한바퀴 이상 회전운동을 하며 다차원 선회특성을

나타내며 비행한다.

4.2 수평 및 수직이동특성

보행자 충돌형태별 수평이동특성을 연구한 결과 Table 6에서와 같이 충돌속도 30km/h 이하에서는 보행자 측면, 정면, 후면충돌 순으로, 충돌속도 40km/h 이상에서는 후면, 정면, 측면충돌 순으로 충돌후 보행자의 이동거리가 증가한다. 즉, 보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자의 수평이동특성은 충돌속도 30km/h 이하에서는 측면충돌, 40km/h 이상에서는 후면충돌이 가장 많은 영향을 미친다.

보행자 충돌형태별 수직이동특성은 Table 7에서와 같이 충돌속도 30km/h 이하로 저속충돌인 경우 충돌후 보행자의 수직이동은 발생하지 않는 반면, 충돌속도 40km/h 이상에서는 충돌속도가 증가할수록 수직이동거리는 증가한다.

보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자의 수직이동특성에 미치는 영향은 보행자 후면충돌, 정면충돌, 측면충돌 순으로 높게 나타났다.

4.3 충돌속도별

보행자 충돌사고의 75%는 차량 전면으로 보행자의 측면을 충돌한다. 따라서, 승용차량 전면으로 보행자 측면을 충돌 할 경우 충돌속도에 따라 충돌후 보행자의 거동특성에 미치는 영향을 충돌속도 10km/h ~ 60km/h까지 10km 단위로 변화해가며 연구하였다.

4.3.1 선회특성

충돌속도에 따라 충돌후 보행자의 선회특성에 미치는 영향을 연구한 결과 Fig. 4, Fig. 5에서와 같이 충돌속도가 10km/h로 저속일 때 충돌후 보행자는 단순운동을 나타내며 충돌차량 앞에 낙하하여 최종 위치 하지만, 충돌속도가 40km/h 이상에서는 충돌

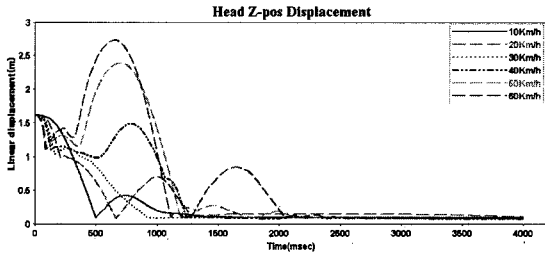


Fig. 4 Vertical trajectory of head and sternum for various speed

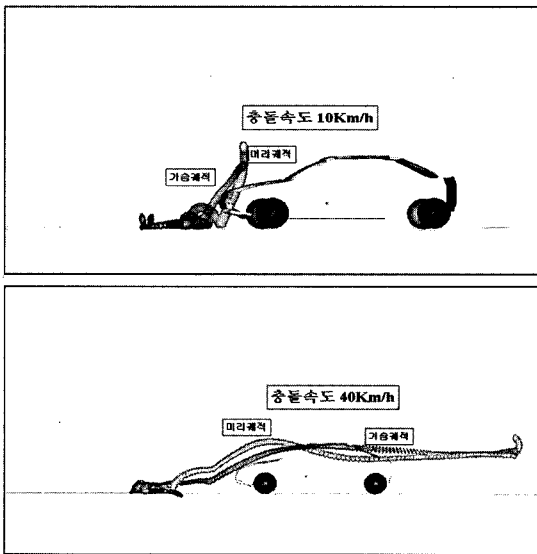


Fig. 5 Schematic view of trajectories of pedestrians for various speed

속도가 높아질수록 충돌후 보행자는 다차원형태의 선회특성을 나타내며 병진운동, 종회전운동, 횡회전운동 등을 병행하며 선회·비행한다.

충돌속도가 높을수록 충돌후 보행자가 다차원거동특성을 나타내며 선회·비행한다는 것은 충돌속도에 따라 보행자에 작용하는 충격도가 증가하여 보다 결력한 운동으로 인한 부상의 심각도가 증가함을 의미한다. 따라서, 충돌시 보행자 부상의 심각도를 최소화하기 위해 차체강도와 차량형상을 보행자 친화적으로 최적화한 안전차량을 연구·개발하여야 할 것이다.

4.3.2 수평 및 수직이동특성

충돌속도에 따라 충돌후 보행자의 수평이동거리 특성을 자동차 진행방향을 x방향으로 기준하여 연구한 결과 Table 5, Fig. 6에서와 같이 충돌속도 증가에 비례하여 수평이동거리 또한 증가한다. 즉, 충돌속도에 따라 충돌후 보행자 수평이동 거리에 미치는 영향은 머리부위 최대 88.3%, 가슴부위 최대 85.1%이다.

반면, 충돌속도에 따라 충돌후 보행자 y방향 이동거리특성은 Fig. 7에서와 같이 충돌후 선회·비행·낙하하는 과정에서 충돌속도에 관계없이 불규칙한 특성을 나타내며 이동한다.

한편, 충돌속도에 따라 충돌후 보행자 수직이동특성은 Table 9에서와 같이 충돌속도 40km/h 이하에서는 충돌후 보행자가 수직상방향으로 튀어 오르는 운동특성은 발생하지 않으나, 40km/h 이상에서는 충돌속도가 증가할수록 수직이동높이 또한 증가한다. 충돌속도에 따라 보행자 머리 수직이동높이 특성에 미치는 영향은 머리부위 최대 40.8%, 가슴부위 최대 47.0%이다.

Table 8 Horizontal movement for various collision speeds (Unit: m)

구분	충돌속도 (km/h)	충돌속도 (km/h)						이동거리 최대편차	이동거리 최대편차율
		10	20	30	40	50	60		
머리	x방향	2.61	6.06	9.03	11.99	18.69	22.38	19.77	88.3%
	y방향	-0.18	-0.46	0.65	0.44	2.43	2.43	-	-
가슴	x방향	2.84	6.09	8.68	11.95	18.49	22.02	19.18	85.1%
	y방향	0.12	-0.10	0.78	0.69	2.12	0.54	-	-

Table 9 Vertical movement for various collision speeds (Unit : m)

구분	충돌속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	이동거리 최대편차	이동거리 최대편차율
	이동거리(m)								
머리		1.61	1.61	1.61	1.61	2.38	2.72	1.11	40.8%
가슴		1.24	1.24	1.24	1.35	1.97	2.34	1.1	47.0%

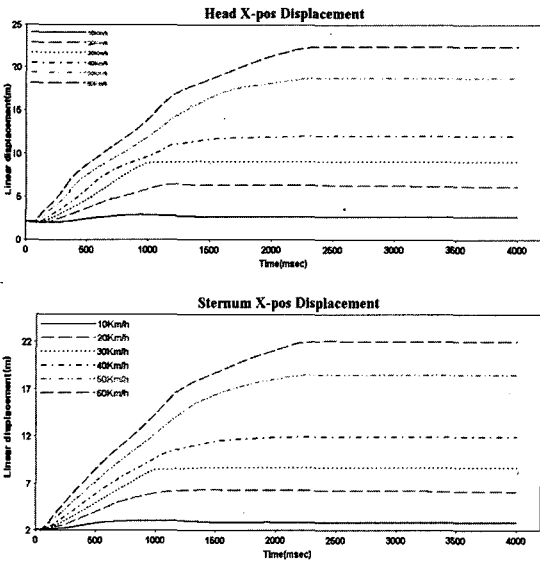


Fig. 6 Horizontal movement of the head and sternum for various collision speeds

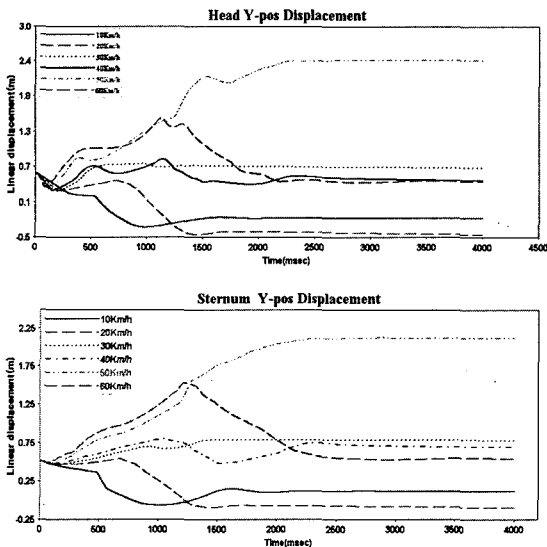


Fig. 7 Vertical movement of the head and sternum for various collision speeds

5. 결론

충돌차량형상, 보행자 충돌형태, 보행자 충돌속도가 충돌후 보행자 거동특성 및 이동특성에 미치는 영향을 컴퓨터 모의충돌실험을 통해 연구한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자 선회특성은 범퍼의 하단높이가 0.39m, 0.38m로 높은 실험차량과 B타입차량의 경우 충돌속도가 10km/h로 저속일 때 보행자는 단지 충격력이 작용한 방향으로 운동하며 지면에 낙하하지만, 범퍼 높이가 0.26m로 낮은 A타입차량은 충돌속도에 관계없이 그리고 실험차량과 B타입 차량은 충돌속도가 20km/h이상인 경우 충돌속도가 증가에 비례하여 불규칙한 비선형형태의 선회특성을 나타내며 병진운동, 종회전운동, 횡회전운동 등을 병행하며 선회·비행한다. 특히, 충돌속도가 40km/h 이상의 높은속도인 경우 충돌후 보행자는 공중에서 한바퀴 이상 회전운동을 하며 다차원 선회특성을 나타내며 비행한다.
- 충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자의 수평이동거리는 충돌속도 30km/h 이하에서는 범퍼의 높이가 낮을수록, 충돌속도 40km/h 이상에서는 차량의 중량이 높을수록 수평이동거리가 증가한다. 또한, 충돌속도가 높을수록 그리고 경차량일수록 충돌후 보행자의 수평이동거리 차이가 많이 발생한다.
- 충돌차량형상에 따라 충돌후 보행자의 수직 이동특성에 가장 많은 영향을 미치는 차량형상은 범퍼높이가 가장 낮은 A타입 차량이다.
- 보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자 거동특성은 측면충돌의 경우 충돌속도가 10km/h로 저속일 때 충돌후 보행자는 단순운동특성을 나타내며 충돌차량 전면 지면에 낙하하지만, 충돌속

도 20km/h 이상에서는 충돌속도에 관계없이 충돌속도 증가에 비례하여 불규칙한 비선형형태의 선회특성을 나타내며 선회·비행한다.

- 4) 보행자 충돌형태별 수평이동특성은 충돌속도 30km/h 이하에서는 보행자 측면, 정면, 후면충돌 순으로, 충돌속도 40km/h 이상에서는 후면, 정면, 측면충돌 순으로 충돌후 보행자의 이동거리가 증가한다.
- 5) 충돌속도에 따라 보행자 선회특성에 미치는 영향은 충돌속도가 10km/h로 저속일 때 충돌후 보행자는 단순 직선운동을 하며 차량 앞 지면에 낙하하지만, 충돌속도가 40km/h 이상에서는 충돌속도가 높을수록 충돌후 보행자는 공중에서 한 바퀴 이상 회전하며 다차원형태의 선회특성을 나타내며 선회·비행한다. 즉, 충돌속도에 따라 보행자에 작용하는 충격도가 증가하여 보다 격렬한 운동으로 인한 부상의 심각도가 증가한다.

이상과 같이 보행자 충돌속도, 충돌차량형상, 보행자 충돌형태에 따라 충돌후 보행자의 수평 및 수직이동거리, 거동특성 등에 많은 영향을 미치는 것으로 연구되었다.

인간이 사회·경제·문화 활동을 위한 행위가 이루어지는 한 보행자 교통사고는 계속해서 발생할 것이다. 보행자 교통안전 증진을 위한 방법에는 불필요한 통행을 최소화하거나 불완전한 통행형태를 안전한 통행형태로 전환하여 사고를 미연에 방지하는 적극적인 방법과 사고후 부상을 최소화하는 부상통제(Injury Control) 통한 인명피해를 최소화하는 방법이 있다. 전자의 방법은 가장 이상적인 방법이지만 현실적으로 불가능한 방법이다. 따라서, 사고후 보행자 인명피해를 최소화하기 위한 방법의 일환으로 자동차 형상을 보행자의 동역학적 선회·비행특성을 고려하여 최적의 차량형상이 설계·개발되어야 할 것이며 또한, 보행자 부상의 심각도를 최소화하기 위한 보행자 친화적 첨단안전차량을 연구·개발하여야 할 것이다.

후 기

이 연구는 한양대학교 첨단도로연구센터 및 한국

과학재단지정 최적설계 신기술 센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) The National Police Agency, "Traffic Accidents Statistics," 2001.
- 2) J. S. Yoo, "Reconstruction Analysis of Collision Speed and Position for Pedestrian Accident Using Response Surface Method," Ph.D. Thesis, Hanyang University, Korea, 2003.
- 3) TNO Automotive, MADYMO Theory Manual, 1999.
- 4) TNO Automotive, MADYMO User's Manual, 1999.
- 5) L. B. Fricke, "Traffic Accident Reconstruction," Northwestern University Traffic Institute, 1990.
- 6) J. M. Lim, J. W. Choi and G. J. Park, "Automobile Side Impact Modeling Using ATB Software," International Journal of Crashworthiness, Vol.2, No.3, November, 1997.
- 7) J. J. Eubanks, W. R. Rusty Haight, "Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology," SAE 921591, 1992.
- 8) D. N. Schmidt and D. A. Nagel, "Pedestrian Impact Case Study," Proceedings of the 15th Conference Association for Automotive Medicine, 1971.
- 9) G. Stcherbatcheff, "Simulation of Collisions Between Pedestrians and Vehicles Using Adult and Child Dummies," SAE 751167, 1975.
- 10) J. C. Collins and J. L. Morris, Highway Collision Analysis, Thomas Publishing, 1979.
- 11) R. Limpert, Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Edition, The Michie Company, 1989.
- 12) M. E. Barzeley and G. W. Lacy, "Scientific Automobile Accident Reconstruction," Matthew Bender Publishing, 1991.
- 13) J. A. Searle, "The Trajectories of Pedestrians, Motorcycle, Motorcyclists, etc. Following a Road Accident," SAE 811622, 1981.
- 14) H. Hayashi, "Traffic Accident Investigation Engineering," 1992.

- 15) U. P. Hong and G. J. Park, "Determination Of Crash Pulse and Optimization of Crash Components Using Response Surface Method," *Journal of Automobile Engineering*, Vol.217, No.3, March. 2003.
- 16) J. A. Bennett and G. J. Park, "Automotive Occupant Dynamics Optimization," *Shock and Vibration*, Vol.2, No.6, 1995.
- 17) J. K. Yang and P. Lovsund, "Development and Validation of a Human-Body Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian Collision," *IRCOBI Conference*, 1997.
- 18) J. V. Wijk, J. Wismans, J. Maltha and L. Wittebrood, "MADYMO Pedestrian Simulations," *SAE 830060*, 1983.
- 19) K. Martin, "Pedestrian Vehicle Accident Simulation Through Dummy Tests," *SAE 751165*, 1975.
- 20) H. B. Pritz and J. M. Pereira, "Pedestrian Hip Impact Simulator Development and Hood Edge Location Consideration on Injury Severity," *SAE 831627*, 1983.
- 21) E. G. Jassen and J. S. H. M. Wismans, "Experimental and Mathematical Simulation of Pedestrian-Vehicle and Cyclist-Vehicle Accident," *European Experimental Vehicle Safety Committee*, 1985.
- 22) K. Mizuno and J. Kajzer, "The Compatibility of Mini Cars in Traffic Accidents," *European Experimental Vehicle Safety Committee*, 1998.
- 23) *International Road Traffic Accident Database*, OECD, 1998.
- 24) G. Klaus-Peter, "Step to Approach to a Standardized Full Scale Pedestrian Test Methodology," *SAE 830058*, 1983.