

■ 論 文 ■

한국형 보행자 사고재현 모형 개발에 관한 연구

Development of Korean Pedestrian Accident Reconstruction Model

이 수 범

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

류 태 선

(도로교통안전관리공단 교통사고종합분석센터)

목 차

- I. 서론
- II. 기존 보행자사고의 분석이론 검토
 - 1. 충돌시 보행자의 운동
 - 2. 보행자사고의 충돌속도 및 전도거리 분석모형
- III. 한국형 보행자사고 분석모형 구축
- 1. 사고자료의 수집 및 분류방법
- 2. 한국형 보행자사고 분석모형의 개발
- 3. 기존 분석모형과의 비교 분석
- IV. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : Pedestrian accident, Impact point, Actual accident data, Impact velocity, Vehicle damage, Injury scale of pedestrian, Throw distance, Reconstruction analysis

요 약

교통사고 중 차대보행자 사고의 원인분석은 차대차 사고에 비해 관련 연구가 미흡한 실정이다. 국내에서도 차대차 사고의 경우에는 실차충돌실험을 통해 많은 자료를 축적하고 이를 체계화하여 다각적인 방법으로 실제 교통사고에 적용하려는 노력이 있으나, 차대보행자 사고의 경우에는 아직 시작단계라고 볼 수 있다. 선진국에서는 차대보행자 사고에 대하여 더미를 이용한 실차충돌실험을 통해 많은 모형을 개발하였고, 이를 보행자사고의 정확한 원인분석을 위해 활용하고 있다.

국내에서는 차대보행자 사고의 해석과 관련된 모형이 개발되지 않아 외국의 모형을 그대로 활용하는 것이 일반적이다. 그러나 외국의 모형을 이용하게 되면 차량과 보행자의 체위특성이 다른 경우 왜곡된 결과가 도출될 가능성이 크게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 그 동안 수집된 보행자 사고자료를 이용하여 국내 실정에 적합한 차대보행자 충돌모형을 개발하였다. 그 결과 차량의 속도에 따라 외국의 모형과는 다소 상이한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 외국의 모형 중에서는 차량 및 보행자의 체위 특성이 유사한 일본의 모형과 가장 흡사한 것으로 나타났다. 이 연구 결과는 수십개의 자료를 이용한 것으로 장래에 보다 폭넓은 자료를 통하여 모형의 신뢰성을 높이는 노력이 필요하다고 판단된다.

A pedestrian accident is generally less fully understood than the 'typical' car-to-car collision. For this reason, the analysis of the pedestrian accident is, in many respects, more complicated and demanding. The purpose of this study is to identify clearly the impact point that is the main subject of struggle in pedestrian accidents. In order to develop the model, it is very significant to classify actual accident data including impact velocity, vehicle damage and injury scale of pedestrian. These data were collected from three local branches of RTSA(Road Traffic Safely Authority). The number of collected data were 34 cases and 61.7% of them were fatal accidents. In consequence of analyzing the data by statistical method, it revealed that there is correlation between impact velocity and throw distance. It, also shows that the impact velocity has strong linear correlation to vehicle damage and injury scale. Consequently, reconstruction analysis models of pedestrian accidents considering in local circumstances(such as the physical characteristics of pedestrians and vehicles) was developed. However, it is difficult to apply the result of this study to all sorts of pedestrian accidents, because the actual accident data which were used to develop the model were limited. To overcome this limitation, it is necessary to develop an analysis model applicable to diverse circumstances with a wide range of pedestrian accident data on a national basis.

1. 서론

2003년말의 우리나라 전체 자동차 등록대수는 1천 4백5십8만대로 전년대비 약 4.6%의 증가세를 보이고 있다²⁾. 또한, 2003년도 한 해 동안에는 24만734건의 교통사고가 발생하여 7천185명이 사망하고 37만6천 398명이 부상을 당하여³⁾, 사회경제적으로 막대한 손실을 초래하고 있다.

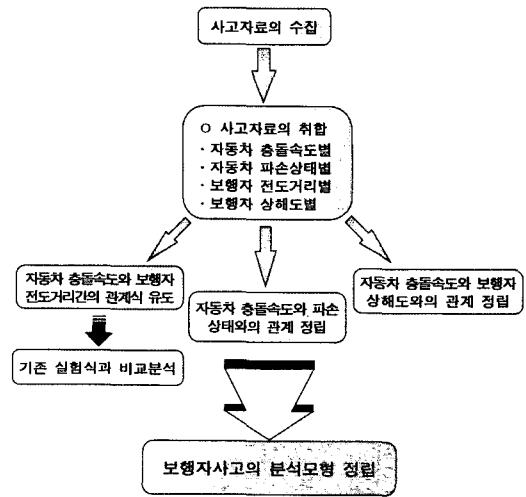
교통사고 중 특히 보행자사고는 지난 5년간 총 36만3천36건이 발생하여 1만7천558명이 사망하였으며 이는 전체 교통사고 사망자의 41.8%에 해당하는 수치이며 치사율은 4.8%로써 교통사고 유형 중 가장 높은 수치를 나타내고 있다. 이와 같은 교통사고 통계에서 나타나듯이 우리나라의 보행자사고는 차대차, 차량단독, 차대열차 등 다른 유형의 사고에 비해 매우 심각하나, 보행자 사고예방을 위한 연구가 선진 외국에 비해 낙후되어 있어 사고원인이 보다 과학적으로 규명되지 못하고 있는 실정이다.

보행자사고는 어느 지점에서 자동차와 보행자가 충돌하였는지가 제일 문제시 된다. 충돌위치가 불명확할 경우에는 차선의 방법으로 차량의 충돌속도를 구하여 충돌지점을 역추적하기도 하지만 물리적인 산출방법으로는 다양한 충돌사상에 대한 적용에 제약이 따르므로 이 방법 역시 명쾌한 사고해석에는 무리가 따른다.

따라서, 보행자 사고에 있어서는 과거 미국, 일본, 유럽에서 실험하여 유도된 공식을 여과 없이 그대로 적용하고 있어 한국 사람들의 체형 및 국산 자동차의 특성에 부합되는 실험식이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구는 실제 사고자료에서 나타나는 자동차 속도 및 파손상태, 보행자 상해도 등의 상관관계를 통해 실제 사고처리에 적용할 수 있는 모형을 개발하는 것을 주목적으로 하며, 실제로 발생한 보행자사고 중 충돌지점 또는 속도해석에 있어 명확하게 드러난 사고사태를 수집하고 각 사고에서 얻을 수 있는 차량 파손상태 및 보행자 상해정도 등을 취합하여 각 변수들간의 상관관계를 정의함으로써 실제 사고에 적용할 수 있는 방안을 강구하고자 한다.

모형 구축을 위한 자료는 2004년 2. 1일부터 3. 20일까지 49일간의 전국순회를 통해 얻어졌으며, 이



〈그림 1〉 연구수행 절차도

자료는 자동차 충돌속도별, 자동차 파손상태별, 보행자 전도거리별, 보행자 상해도별 이론적 또는 빈도의 일관성을 고려하여 모형구축에 이용되었다.

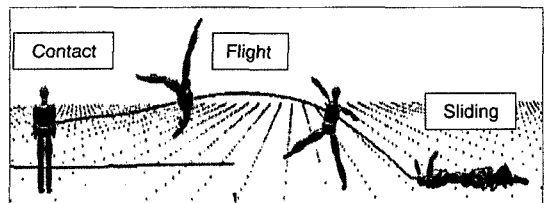
II. 기존 보행자사고의 분석이론 검토

1. 충돌시 보행자의 운동

1) 충돌시 보행자의 선회특성

충돌시 보행자는 다음과 같이 3단계⁴⁾를 거치며 최종 정지위치까지 이동하게 된다(〈그림 2〉).

접촉 또는 충돌단계(Contact phase)는 자동차와 보행자가 충돌하는 단계를 말하고, 선회 및 비행단계(Flight phase)는 보행자가 자동차와 충돌된 후 선회 및 비행하게 되는 단계를 말한다.



〈그림 2〉 충돌 후 보행자의 모션(motion)

2) 통계청 보도자료, www.nso.go.kr

3) 경찰청 보도자료, www.police.go.kr

4) Andreas Moser... et al., 2000년, 'Validation of the PC-Crash Pedestrian Model', SAE 2000-01-0847

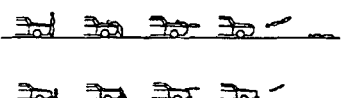
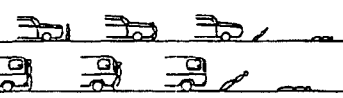

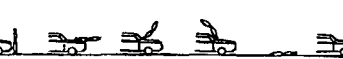
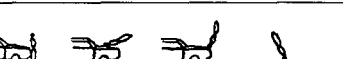
활주단계(Sliding phase)는 충돌 후 보행자가 노면에 떨어지면서 구르면서 최종 정지위치까지 이동하는 단계를 말한다.

즉, 보행자의 전도거리라 함은 접촉 또는 충돌단계(Contact phase), 선회 및 비행단계(Flight phase), 활주단계(Sliding phase)를 거치며 최종 정지하기까지의 총 이동거리를 말한다.

2) 충돌시 보행자 선회형태의 종류

충돌 후 보행자가 선회할 때 보행자는 선회형태에 따라 Eubanks와 Rusty Height는 다음과 같이 5가지의 유형⁵⁾으로 구분하였다.

〈표 1〉 Eubanks & Rusty Height의 충돌시 보행자 선회 형태유형

유형	형태
Wrap trajectory	 <ul style="list-style-type: none"> • 평균속도 30km/h내외, 40km/h이하 • 성인들에게서 많이 발생, 보통 제동감속
Forward Projection	 <ul style="list-style-type: none"> • 20km/h이하, 어린이일 경우에 흔히 발생
Fender Vault	 <ul style="list-style-type: none"> • 40km/h정도 · 자동차 가장자리 등에 접촉
Roof Vault	 <ul style="list-style-type: none"> • 평균속도 60km/h이상 • 충돌 후 보통 제동되어 감속
Somersault	 <ul style="list-style-type: none"> • 60km/h 이상, 충돌시 대개 제동

2. 보행자사고의 충돌속도 및 전도거리 분석모형

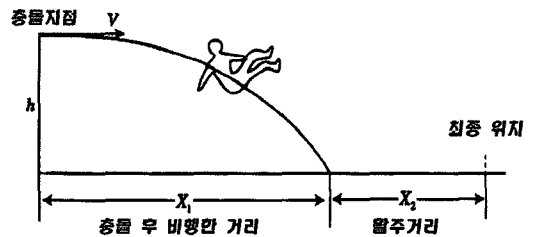
보행자사고의 충돌속도 및 전도거리에 관한 분석모

형은 1971년에 Schmidt와 Lagel에 의한 충돌속도 모형식을 시초로 하여 현재까지 다양한 접근 개념과 실험을 통해 여러가지 분석모형식이 발표되어 왔고, 또한 지속적인 수정보완 작업이 이루어지고 있다.

기존의 보행자사고 분석모형식은 크게 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫째는 운동방정식 즉, 물리식에 의한 보행자 충돌속도 및 전도거리의 계산방법과 둘째, 인체모형(dummy)과 실차를 이용한 실험데이터를 가지고 유도된 실험식을 들 수 있다.

1) 물리식에 의한 보행자 충돌속도의 계산

보행자의 무게는 자동차의 5% 정도로 매우 가볍기 때문에 정면충돌되면 보행자가 충돌한 차량의 충돌속도까지 순간적으로 가속되고, 차량의 제동에 의해 후드 위에서 거의 수평방향으로 이동되어 포물선운동을 하며



〈그림 3〉 충돌 후 보행자의 포물선운동 궤적

노면에 떨어져 활주하다가 마찰에 의해 정지하게 되는 가정에 따라 포물선 운동 및 운동에너지 방정식으로 사고차량의 최초 충돌속도를 산출할 수 있다.

수평방향의 운동은 등속도운동이며 수직방향의 운동은 중력에 의한 자유낙하운동이므로 수평방향의 이동거리를 X_1 , 수직방향의 비행 높이를 h 라 하면,

$$X_1 = v \times t, \quad h = \frac{g t^2}{2} \tag{1}$$

$$X_1 = v \sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{2}$$

자동차에서 낙하되어 전도된 보행자의 운동에너지는 노면과의 마찰에 의해 소실되고 최종적으로 정지하게 된다. 따라서 운동에너지 방정식을 적용한 전도된 거리

5) Jerry J. Eubanks & W. R. "Rusty" Haight, 1992년, "Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology", SAE 921591.

X_2 는

$$\frac{1}{2} m v^2 = m \cdot g \cdot \mu \cdot X_2 \quad X_2 = \frac{v^2}{2g\mu} \quad (3)$$

자동차에서 낙하되며 미끄러진 보행자의 전체 이동 거리 X 는

$$X = X_1 + X_2 = v \times \sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{v^2}{2g\mu} \quad (4)$$

사고차량의 최초 속도 V 에 관해 위 식을 다시 정리하면,

$$V = \sqrt{2g\mu} \left(\sqrt{h + \frac{X}{\mu}} - \sqrt{h} \right) \quad (5)$$

2) 외국의 보행자사고 분석모형

기존 보행자사고의 분석모형에서는 보행자사고의 주쟁점사항을 해결하기 위해 자동차의 속도, 보행자의 이

동거리, 무게중심의 높이, 자동차 및 보행자의 무게, 보행자의 비상각도 등 여러 가지 요인들을 변수화하여 충돌속도와 보행자 전도거리간의 관계를 규명하기 위해 노력해왔으나 막대한 실험비용과 실험조건의 한계로 인하여 실제 사고사례에 적용하는데는 한계점을 보이고 있다. 우선 대부분의 모형이 외국에서 개발된 것이기 때문에 국내의 차량 및 보행자의 특성을 제대로 반영하기가 어렵다. 또한 자동차의 파손상태 및 보행자의 상해도 등에 대한 연구가 미흡하여 정확한 충돌 속도 및 전도거리를 산정하는데 어려움이 있다.

III. 한국형 보행자사고 분석모형 구축

1. 사고자료의 수집 및 분류방법

충돌지점 및 속도해석에 있어서 명확하게 드러난 사고자료는 대다수 충돌지점이 사고당사자 또는 목격자

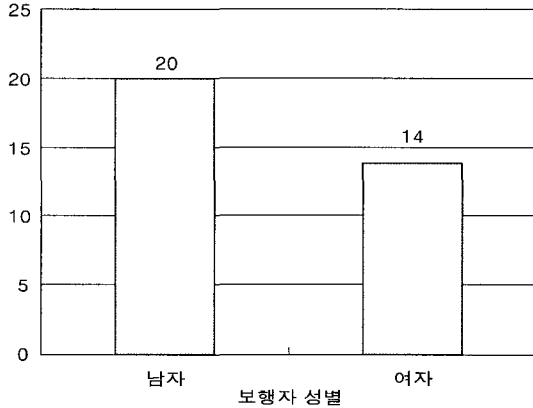
<표 2> 외국의 보행자사고 분석모형식

분석모형	
Schmidt & Nagel	$V_x = \sqrt{\mu^2(h) + e - \mu(h)}$ V_x : 충돌속도(m/s), μ : 보행자 노면마찰계수(0.2~0.7), h : 보행자 무게중심높이(m) e : $2 \times \mu \times g \times d$, g : 중력가속도(9.8 m/sec ²), d : 충돌 후 보행자 이동거리(m)
Stcherbatchef	$s = \frac{v^2}{2a_{car}} + \lambda a_{car} v$ v : 충돌속도 또는 사출속도(m/sec), s : 총 이동거리(m), λ : 상수값(0.3 s ³ /m) a_{car} : 평균 차량감속도(4~7 %)
Collins & Morris	$d = \frac{v\sqrt{h}}{7.97} + \frac{v^2}{254 f_p}$ v : 충돌속도(km/h), h : 보행자 무게중심의 높이(m), f_p : 보행자의 노면 마찰계수 (0.8)
Kuhnel	$s = 0.06408 a_{car} v + 0.3512 \frac{v^2}{a_{car}}$ v : 충돌속도 또는 사출속도(m/s), s : 보행자의 총 이동거리(m), a_{car} : 평균 차량감속도(%)
Searle	$V_{veh} = \frac{\sqrt{2\mu g d_i}}{\cos \phi + \mu \sin \phi} \quad V_{min} = \frac{\sqrt{2\mu g d_i}}{1 + \mu^2} \quad V_{max} = \sqrt{2\mu g d_i}$ V_{veh} , V_{max} , V_{min} : 보행자 충돌속도(m/sec), d_i : 이동거리(m) μ : 보행자의 노면마찰계수(0.66 또는 0.79), ϕ : 보행자 비행각도(°)
Limpert	$V_{mph} = 6.6\sqrt{8.4\mu^4 + \mu d_i} - 20\mu^2 \pm 2.5 \text{ mph}$ $V_{kph} = 10.62\sqrt{8.4\mu^4 + 3.3\mu d_i} - 32.2\mu^2 \pm 4 \text{ kph}$ v : 충돌속도(km/h), d_i : 충돌후보행자 이동거리(m), μ : 자동차 노면마찰계수: 0.7~1.2
Barzeley	$v = \sqrt{149 + 203d - 12}$ 여기서, v : 충돌속도(kph), d : 보행자 이동거리(m)
Dekra	$S = 2.5 + 0.38448v + 0.05858 \frac{v^2}{a_{car}}$ v : 충돌속도 또는 사출속도(projection velocity, m/sec), s : 보행자의 총 이동거리(m) a_{car} : 차량의 평균감속도(%)
林洋 (하야시 히로시)6)	$x_{전도거리} = 0.079 V + 0.0049 V^2 \text{ (km/h)}$ $x_{전도거리} = 0.285 V + 0.0636 V^2 \text{ (m/sec)}$ x : 전도거리(m), V : 충돌속도

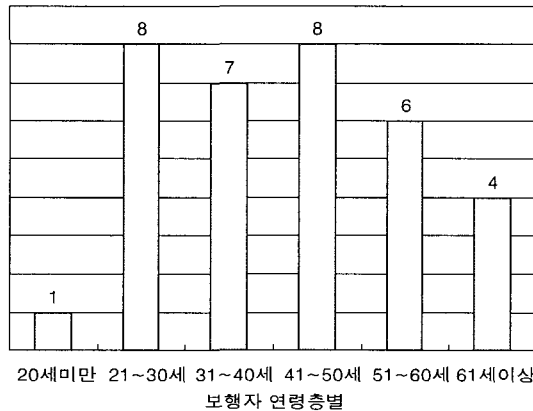
6) 林洋, 1992년, 自動車事故鑑定工學 pp.192~194.

〈표 3〉 자동차 파손단계별 파손부위

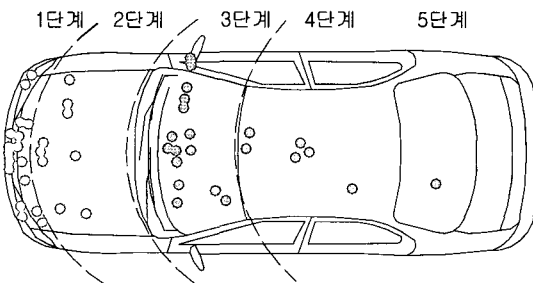
파손단계	자동차파손부위
1 단계	• 전면범퍼, 라디에이터그릴, 헤드램프 등의 손상
2 단계	• 후드의 손상
3 단계	• 프론트 A필라, 전면유리의 깨짐 손상
4 단계	• 루프의 손상
5 단계	• 후면유리 및 트렁크의 손상



〈그림 4〉 보행자의 성별 분석



〈그림 5〉 보행자의 연령층별 분류



〈그림 6〉 사고차량 파손부위 분포도

진술에 있어서 정확히 일치한다거나 사고차량에 의해 현장에 발생된 Skid mark가 보행자 충돌에 의해 변곡(crook)이 발생되어 충돌지점이라는 것이 육안확인인 가능한 사고자료들로서 표본수는 총 34건이다.

수집된 사고자료 〈표 5〉는 가해차량이 모두 승용차종이며 피해자인 보행자는 성인인 경우에 한하고, 충돌유형은 정면충돌로만 한정시켰다. 수집된 사고자료는 보행자의 성별과 연령, 상해도, AIS지수, 그리고 자동차의 종류, 충돌속도, 전도거리, 파손단계별로 각각 구분하였다.

보행자는 남자가 20명, 여자가 14명이었으며, 최연소는 18세였고 최연장자는 75세였다(〈그림 4~5〉).

자동차는 아토즈와 같은 경형승용차부터 그랜저급 대형승용차까지 다양했으며, 차량 전면부의 높이는 차종에 따라 다소 차이는 있으나 형상은 대개 Trapezoidal shape(사다리꼴형태) 이었다. 자동차가 보행자를 충돌하게 되면 보행자의 상해 뿐만 아니라 자동차의 파손도 뒤따르게 된다. 충돌속도가 저속일 경우에는 대개 자동차 전면부에 경미한 차체손상이 발생하고 속도가 높아질수록 보행자의 충돌 후 모션에 따라 후드, 전면유리, 루프, 후면유리 및 트렁크 등의 단계별 손상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 자동차의 파손상태를 자동차의 파손부위 빈도조사를 통해 다음과 같이 단계별로 분류하였다.

본 연구에서는 충돌속도를 명확하게 하기 위해 세가지 조건을 제시하고 그에 적합한 사고자료를 취합하였다.

- ① 운전자 급제동에 의한 skid mark가 충돌지점 전후에 발생한 사고
- ② 영업용차량(택시)에 장착된 타코미터에 의해 속도가 산출될 경우
- ③ 보행자의 상해도 및 자동차의 파손상태가 경미하여 자동차의 저속주행 사실이 상식적으로 납득되고, 사고관련자의 진술속도가 일치하는 경우

①의 경우에는 간단한 물리식에 의해서 계산할 수 있다. skid mark를 발생시킨 자동차의 제동 전 속도를 v_1 라 하고, 제동 후 속도를 v_2 라 하면, 속도 산출식은 다음과 같이 정리된다.

$$v_2(m/sec) = \sqrt{2 \mu g d} \tag{6}$$

$$v_2(km/h) = \sqrt{254 \mu d} \tag{7}$$

단, μ : 제동된 타이어의 마찰계수(≈0.8, 아스팔트

건조 노면), g : 중력가속도($\approx 9.8m/s^2$), d : skid mark의 길이 또는 제동거리(m)

식(6), 식(7)에서 skid mark의 길이, a 값은 사고현장에서 직접 측정을 통해 얻을 수 있는 자료이고, μ 값은 노면의 종류, 제동정도, 차종 등에 따라 다양하게 적용될 수 있다. 대개 μ 값은 건조한 아스팔트 노면에서 일반적으로 0.8을 적용하고 있다. ②의 경우는 영업용 차량에 장착된 타코미터(tachometer)를 이용하는 방법이다. 택시에 장착되는 타코미터는 대개 디지털식이며, 사고발생 시간과 그 시간 전후의 차량 운행기록상태를 비교하여 사고 당시의 속도를 추적할 수 있다. ③의 경우는 조사자의 판단과 사고관련자의 진술속도에 의존하여 속도를 추산하는 방법으로써 가장 비과학적이고 주관적인 방법이며 때에 따라서는 많은 오차가 발생할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 충돌속도 변수의 다양성을 확보하기 위해 자동차의 충돌속도가 사고정황 상 상식적으로 납득이 되는 사례 1건만을 포함시켰다.

보행자의 상해도 분류에 있어서는 사망 21명, 중상 13명으로 사망자가 대다수를 차지하고 있으며, 이때 자동차 충돌속도는 50km/h 이상인 경우가 많았다.

우리나라에서는 인명피해정도를 분류하는데 있어서 사망, 중상, 경상, 부상신고 등 4단계 분류를 사용하고 있다. 그러나 이러한 분류방법은 전적으로 병원진단서에 의존하여 구분하고 있기 때문에 경상 또는 부상신고 사고가 심한 중상사고로 처리되는 경우가 잦으며, 각 단계

<표 4> 우리나라와 미국의 인명피해 분류기준

인명피해정도	
한국의 분류	사망 30이내에 사망
	중상 3주 이상의 치료를 요하는 부상
	경상 5일 이상 3주 미만의 치료를 요하는 부상
	부상 신고 5일 미만의 치료를 요하는 부상
미국의 분류 (AIS)	AIS-7 Injured, Severity Unknown
	AIS-6 Maximum (Dead)
	AIS-5 Critical (Survival uncertain): 생존불확실, 전신 50%이상의 2~3도 화상
	AIS-4 Severe(Life-threatening, survival probable), 심각한 열상 및 박리, 뇌출혈 동반
	AIS-3 Serious (Not life-threatening) : 광범위한 타박상, 찰과상, 심한 열상
	AIS-2 Moderate : 보다 넓은 부위의 타박상, 박리, 열상
	AIS-1 Minor : 다발성 통증, 작은 부위의 열상, 타박상, 찰과상
	AIS-0 Not Injured

별 상해항목의 범위가 다양하여 본 연구에서 추구하고자 하는 충돌속도별 보행자 상해도 구분에 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 미국 자동차 진흥의학회(The Association for the Advancement of Automotive Medicine)에 의하여 개발된 AIS⁷⁾(Abbreviated Injury Scale)지수 구분기준에 근거하여 보행자의 상해도를 분류하였다(<표 4>).

2. 한국형 보행자사고 분석모형의 개발

1) 자동차 충돌속도와 보행자 전도거리의 관계

<표 5>의 사고자료에서 보행자 전도거리와 보행자 충돌속도를 매개변수로 하여 그래프로 나타내면 <그림

<표 5> 실제 사고자료의 분류

구분 번호	보행자 구분	차종	충돌 속도 (kph)	전도 거리 (m)	파손 단계	상해도	AIS 지수
1	여, 18세	소나타3	40	14	2	중상	3
2	여, 22세	프린스	40	18	2	중상	3
3	여, 52세	매그너스	42	11	2	중상	3
4	여, 50세	그랜저	42	12	2	중상	3
5	남, 46세	엑센트	30	6.8	2	중상	2
6	남, 50세	크레도스	50	15	3	사망	6
7	남, 40세	크레도스	53.9	21	3	사망	6
8	남, 54세	소나타3	60	17	3	사망	6
9	남, 45세	크레도스	65	21	3	사망	6
10	남, 33세	소나타3	50.1	19.1	3	사망	6
11	남, 30세	소나타3	55	27	3	사망	6
12	남, 27세	소나타3	60	19.1	3	사망	6
13	남, 32세	소나타3	62	27	3	사망	6
14	남, 35세	소나타3	104	50	3	사망	6
15	남, 38세	소나타3	110	60	3	사망	6
16	남, 75세	EF소나타	95.2	56	3	사망	6
17	여, 47세	EF소나타	63	30	3	중상	5
18	여, 49세	EF소나타	71	33	3	중상	5
19	여, 63세	프라이드	50	20	3	사망	6
20	여, 61세	아토즈	50	17	3	중상	5
21	여, 58세	엑센트	60	19	3	중상	5
22	남, 38세	EF소나타	68	22	4	사망	6
23	남, 33세	EF소나타	70	30	4	사망	6
24	남, 28세	아반테	61	20	4	사망	6
25	남, 31세	아반테	64.1	30	4	사망	6
26	남, 25세	EF소나타	72	25	4	사망	6
27	남, 30세	EF소나타	75	30	4	사망	6
28	남, 42세	소나타3	65	30	4	사망	6
29	여, 23세	마티즈	70	32	4	중상	5
30	여, 26세	프라이드	77	35	4	중상	5
31	여, 54세	누비라	50	16.9	4	중상	4
32	여, 48세	프라이드	60	18	4	중상	4
33	여, 68세	소나타2	70	34	4	사망	6
34	남, 52세	그랜저	60	30	5	사망	6

7) *Committee on Medical Aspect of Automotive Safety: Rating the severity of tissue damage. I. The Abbreviated Injury Scale. J.A.M.A., 215: 227-280, 1971.

*조이현 외 3명, 1989년, 'AIS 및 ISS 분류에 의한 새로운 의상환자 표시법', 대한정형외과학회지, 제24권 제3호

7)과 같으며, 각 변수값이 증가할수록 비례하여 증가하는 우상향분포를 보여주고 있다.

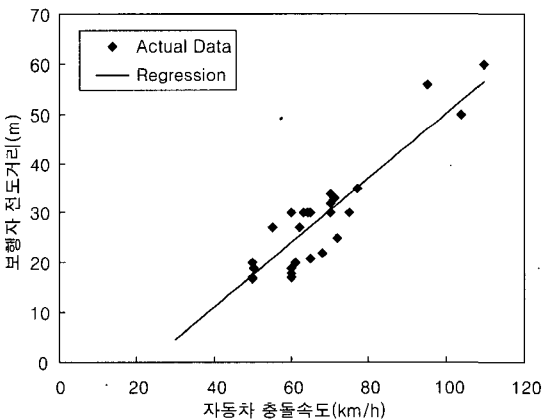
사고자료에서 보행자 전도거리(Y, m)를 종속변수로 하고, 보행자 충돌속도(X, km/h)를 독립변수로 하여 다음과 같은 회귀식을 유도하였다.

$$Y = 0.6473X - 14.8048 \quad (8)$$

(단, X는 30~110km/h)

$$X = 1.3388Y + 28.1191 \quad (9)$$

회귀분석에서 결정계수 $R^2 = 0.867$ 은 평균적으로 충돌속도별 보행자 전도거리의 변화가 위 식에 의해 86.7% 정도 설명될 수 있다는 것을 수치적으로 나타내고 있다. 위 식에 대한 분산분석(ANOVA)에서 회귀에



〈그림 7〉 자동차 충돌속도별 보행자 전도거리와의 관계

〈표 6〉 회귀분석 결과

회귀분석 통계량 (Regression Statistics)	
다중 상관계수 (Multiple R)	0.931
결정계수 (R Square)	0.867
조정된 결정계수(Adjusted R)	0.863
표준오차(Standard Error)	4.407
관측수	34

〈표 7〉 분산분석(ANOVA) 결과

구분	자유도	제곱합	제곱평균	F비	유의도
회귀	1	4039.427	4039.427	207.947	0.000
잔차	32	621.607	19.425		
계	33	4661.034			

구분	계수	표준 오차	t 통계량	유의도
Y 절편	-14.805	2.893	-5.117	0.000
X 절편	0.647	0.045	14.420	0.000

대한 유의한 F값(회귀관계에 대한 P-값)과 회귀식의 각 절편의 P-값은 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

2) 자동차 파손단계별 충돌속도 및 전도거리와의 관계

〈그림 6〉과 같이 자동차가 보행자를 정면충돌하게 되면 충돌 후 보행자의 모션에 따라 특징적인 파손상태가 나타나게 된다. 즉, 보행자 충돌속도가 증가함에 따라 자동차는 전면범퍼, 후드, 전면유리, 루프, 후면유리 및 트렁크 등 전면부에서 후면부쪽으로 단계적인 파손이 이루어지게 된다. 즉, 보행자의 충돌 후 운동상태는 다음과 같이 단계적으로 구분될 수 있다.

- ① 자동차와 보행자의 접촉단계
- ② 자동차 후드 위로 보행자가 얹히는 단계
- ③ 자동차 전면유리에 보행자의 두부가 충격되는 단계
- ④ 자동차 루프 앞쪽에 보행자가 부딪히거나 루프 위로 얹히는 단계
- ⑤ 자동차 후면유리 또는 트렁크 위로 보행자가 떨어지는 단계

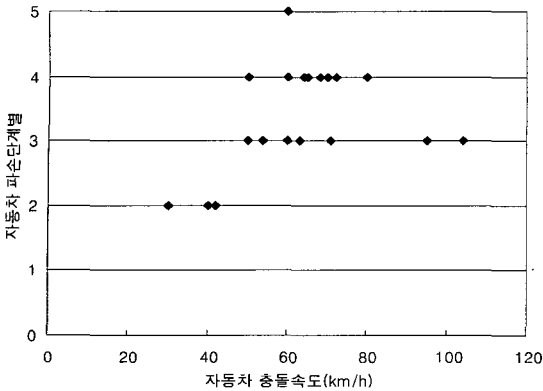
자동차의 충돌속도가 저속일 경우 보행자는 'Forward projection' 형태의 운동을 취하기 때문에 대개 ①, ②단계만을 거치지만, 충돌속도가 높을 경우에는 ③, ④, ⑤ 단계까지 운동을 하기 때문에 Flight Phase가 길어지게 되고, 전면유리 또는 루프 앞쪽에 두부가 충격되면서 상해도가 깊어지게 되므로 〈표 5〉에서 보는 바와 같이 4 단계 이후에서는 사망자가 많아지게 된다.

〈그림 8〉은 자동차의 충돌속도별 파손단계를 나타낸 것이다. 충돌속도별 차량파손단계의 구분은 60km/h, 100km/h 내외의 구간에서 단계별 구분이 모호해지고 있으나, 대략 속도가 높아질수록 파손단계도 비례하여 높아지고 있다.

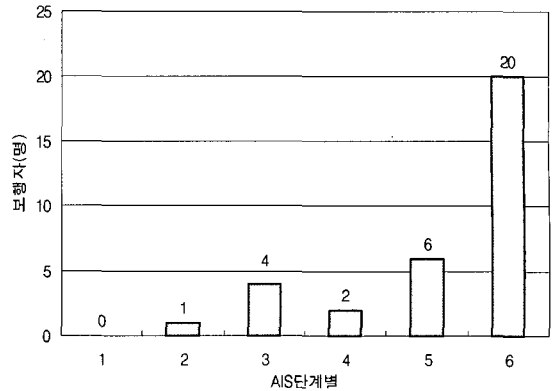
〈그림 9〉는 보행자 전도거리별 자동차 파손단계를 나타낸 것으로써 대체로 파손단계가 높아질수록 전도거리가 증가하였으나, ③단계에서 예외적으로 최대 전도

〈표 8〉 자동차 파손단계, 충돌속도, 전도거리의 관계 요약

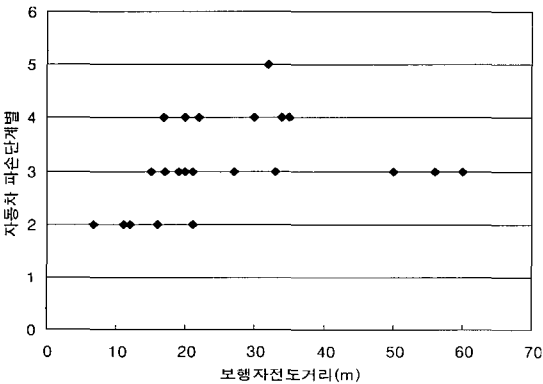
자동차 파손단계	충돌속도(km/h)	전도거리(m)
2 단계	30~40 km/h	7~20m
3 단계	50~70km/h, 100km/h내외	15~30m, 50~60m
4 단계	50~80 km/h	17~35m
5 단계	60 km/h ~	30m ~



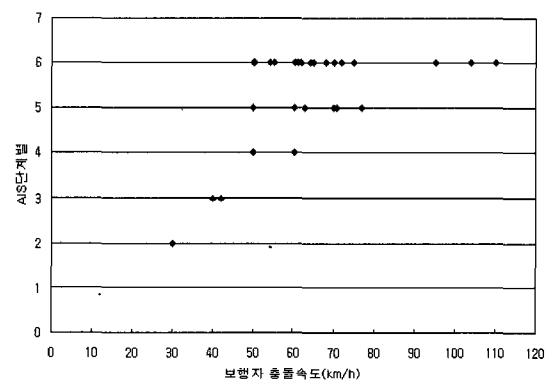
〈그림 8〉 자동차 충돌속도별 차량파손단계의 구분



〈그림 10〉 AIS단계별 보행자의 분포



〈그림 9〉 보행자 전도거리별 자동차 파손단계의 구분



〈그림 11〉 충돌속도별 AIS단계의 분포

거리가 발생하였다.

충돌속도별 전도거리별 파손단계의 구분을 종합하면 충돌속도가 높아질수록 차량파손단계도 높아지며 전도거리 역시 비례하여 상승하고 있으나 충돌속도가 100km/h 내외의 고속에서는 전도거리는 증가하나 차량파손단계는 ③단계를 벗어나지 못하고 있다. 이는 고속 진행하는 차량에 충돌하는 보행자는 전면유리에 강하게 부딪히면서 사출각(Projection angle)이 커지게 되고, 이때 차량 루프 위로 강하게 튀어오르면서 차체와의 접촉가능성이 저하된 것으로 판단된다. 이러한 운동상황은 Roof Vault 형태라 할 수 있으며, 대개 60km/h 이상의 속도에서 발생한다고 알려져 있다.

3) 보행자 상해도별 충돌속도와의 관계

AIS지수별 실제 사고자료의 보행자 분포는 〈그림 10〉과 같다. 'AIS 2~5' 단계까지는 각각 1명, 4명, 2명, 6명이며, 사망단계인 'AIS 6'(사망) 단계에 가장 많은 20명의 보행자가 분포하고 있다.

〈표 9〉 사고자료의 AIS 지수구분별 속도범위 요약

AIS구분 \ 계	계	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6
	명	34	0	1	4	2	6
속도범위 (km/h)	-	0	30	40	50~60	50~80	50~110

AIS지수 단계별로 자동차의 충돌속도를 보면, 충돌속도 30km/h, 40km/h, 50km/h까지는 'AIS 2, 3, 4' 단계로 충돌속도와 비례하여 상해도가 커지고 있으나, 충돌속도 50km/h 이상에서는 AIS 4~6까지 다양하게 분포하고 있다(〈그림 11〉).

이는 취합된 사고자료의 표본수가 작고, 병원에서 발행된 진단서만을 기준으로 AIS지수를 산정하여 표본의 중첩구간이 많아지게 된 것으로 사료되며, 사고분석에 있어서 객관적 자료로 채택되기 위해서는 초동조사 시 담당의사와의 상담을 통해 AIS지수를 명확히 하고 표본수에 있어서는 적정수준 이상이 되도록 조사가 이루어져야 될 것으로 판단된다.

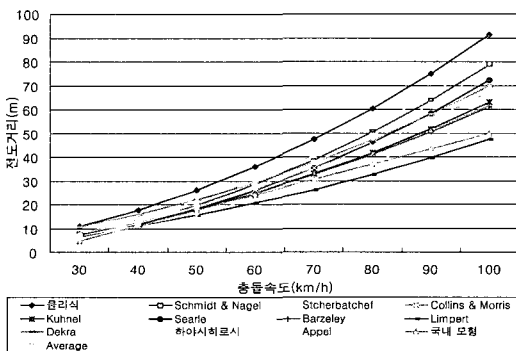
3. 기존 분석모형과의 비교 분석

각 분석모형에 의해 나타나는 충돌속도별 보행자 전도거리는 <표 10>과 같이 정리된다. 포물선 방정식을 이용한 물리적 분석모형은 자동차 전면부의 기하학적 특성과 충돌 후 보행자의 선회특성을 고려하지 않아 다른 분석모형보다 과도하다 싶을 정도로 전도거리가 길게 나타나고, 기타 분석모형들은 충돌속도가 높아질수록

<표 10> 분석모형의 충돌속도별 전도거리의 비교 (단위 : m)

충돌속도 분석모형	30 kph	40 kph	50 kph	60 kph	70 kph	80 kph	90 kph	100 kph
물리식	10.85	17.62	25.96	35.87	47.36	60.43	75.07	91.28
Schmidt & Nagel	7.11	12.57	19.66	28.32	38.55	50.37	63.75	78.71
Stcherbatchef	8.19	14.01	21.37	30.28	40.73	52.72	66.25	81.33
Collins & Morris	8.19	12.89	18.58	25.24	32.90	41.53	51.15	61.76
Kuhnel	7.55	12.23	18.00	24.85	32.79	41.81	51.91	63.10
Searle	6.48	11.53	18.03	25.97	35.31	46.13	58.40	72.11
Barzeley	7.90	12.59	18.20	24.80	32.39	40.96	50.52	61.06
Limpert	7.30	11.03	15.44	20.52	26.27	32.69	39.79	47.55
Dekra	10.79	15.81	21.97	29.25	37.66	47.20	57.88	69.68
하야시 히로시	6.79	11.02	16.23	22.42	29.59	37.74	46.88	56.99
Appel	6.89	12.24	19.13	27.55	37.49	48.97	61.98	76.52
국내 모형	4.61	11.09	17.56	24.03	30.51	36.98	43.45	49.93
Average	7.72	12.89	19.18	26.59	35.13	44.79	55.59	67.50
Standard deviation (1)	1.73	2.03	2.83	4.04	5.67	7.72	10.20	13.15
Standard deviation (2)	2.20	1.27	1.14	1.81	3.27	5.53	8.58	12.43
Standard deviation (3)	1.54	0.05	0.94	1.14	0.65	0.54	2.42	5.00

* Standard deviation (1) : 각 분석모형들간의 표준편차.
 Standard deviation (2) : 국내 모형과 평균값간의 편차
 Standard deviation (3) : 국내 모형과 '하야시 히로시' 분석모형간의 편차



<그림 12> 각 분석모형의 충돌속도별 전도거리의 비교

수록 전도거리에 있어서 점차 많은 차이를 보이고 있으며, 그 중 'Stcherbatchef'과 'Limpert' 분석모형이 충돌속도 100kph에서 33.78m의 가장 많은 차이를 보이고 있다(<그림 12>).

국내 사고자료에 의한 경험모형은 대체로 'Limpert' '하야시 히로시', 'Barzeley', 'Collins & Morris' 분석모형 등과 유사하게 나타났으며, 70kph 이상의 고속충돌에서는 'Limpert', '하야시 히로시' 분석모형과 수치상 가장 유사하게 나타났다. 또한, <표 10>에서 보는 바와 같이 60kph 이상의 고속충돌일수록 각 분석모형간 표준편차는 많은 차이를 보였으며, 국내 분석모형과 평균값과의 표준편차는 각 분석모형간 표준편차보다 비교적 낮게 나타났다.

표준편차의 비교를 통해서 국내 경험모형과 일본의 '하야시 히로시' 분석모형이 가장 유사한 것으로 판단된다. 이는 '하야시 히로시' 분석모형의 실험차량이 차체중량 780kg(1192cc), 620kg(790cc), 910kg(1299cc)의 국산 경·소형차량에 해당되고, 차량 전면부는 국산 자동차와 유사한 Trapezoidal shape가 주종을 이루었으며, 보행자 인체모형(Dummy)에 있어서도 국내 표준체형과 유사하게 설정되어, 자동차 전면부의 기하학적 특성에 따른 보행자의 선회특성이 국내 보행자사고와 유사하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

IV. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 기존 보행자사고 분석모형의 자동차 전면부 기하구조에 따라 달라지는 보행자 선회특성의 한계, 보행자 신체조건에 따른 적용상의 문제, 자동차 파손상태 및 보행자의 상해도 등에 대한 연구 미흡, 또한 국산차종 및 국내 보행자의 특성에 맞는 분석모형의 부재 등의 문제점을 해소하기 위해 한국형 보행자충돌모형을 개발하였다.

본 연구를 수행하기에 앞서 전국을 순회하여 보행자 사고사례 70건을 수집하였으며, 그 중에서도 충돌지점 또는 충돌속도가 명확히 드러난 34건의 사고사례를 선별하였다.

사고자료를 수집하여 충돌속도 30~110km/h의 범위에서 보행자 전도거리를 종속변수(Y)로 하여 회귀분석한 결과, 충돌속도별 자동차의 파손단계는 30~80km/h 까지 2~5단계까지 비례하여 상승하다가 100km/h 내외의 범위에서는 3단계 파손형태가 나타났다. 이는 차

속이 높아질수록 보행자가 전면유리와 부딪힐 때 점차 큰 사출각(Projection angle)으로 반사되면서 루프와의 접촉가능성이 적어졌기 때문인 것으로 사료된다.

보행자 상해도는 미국 자동차진흥의학회(The Association for the Advancement of Automotive Medicine)에서 개발된 AIS(Abbreviated Injury Scale)에 따라 8단계로 분류하였으며, 충돌속도와 비례하여 AIS지수도 높아졌으나 50km/h 이상의 속도에서는 남녀노소에 따라 AIS 4~6까지 다양하게 나타났다.

이외에도 Eubanks & Rusty Height에 의한 충돌 후 보행자 선회운동의 5가지 유형에 관한 연구자료를 인용하여 사고 후 차량과 보행자의 정지상태 및 예상 운동상태 등을 참고하여 보행자 충돌속도의 범위를 좁히고자 하였다.

본 연구결과를 토대로 보행자사고의 충돌지점을 규명하기 위한 절차는 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 사고차량을 조사하여 자동차 파손단계를 구분하고 충돌속도의 범주를 예측한다.

둘째, 보행자 상해도를 AIS지수화하여 충돌속도의 범주를 예측한다.

셋째, 사고 후 자동차 정지위치 및 보행자 최종 위치, 자동차 파손상태를 근거로 하여 Eubanks & Rusty Height의 보행자 선회운동의 5가지 유형 중 어느 유형의 사고인지 파악하고 충돌속도를 예측한다.

넷째, 위 과정에서 얻어진 충돌속도를 10km/h 내외의 오차범위로 좁히고, 실제 사고자료에서 얻어진 경험식에 근거하여 보행자의 전도거리를 산정한다.

현재 국내에서는 보행자사고를 재현 및 분석함에 있어서 별도의 검증절차 없이 여러 가지 외국의 분석모형을 혼용하고 있으며, 때에 따라서는 분석모형간의 오차가 재판부의 혼란을 가중시키고 있다.

본 연구에서는 국산차종과 국내 보행자들의 실제 사고자료를 바탕으로 새로운 분석모형을 제시하여, 보행자사고의 주쟁점사항인 충돌지점 규명에 해법을 제시했다는 데 큰 의미를 두고 있다.

그러나, 본 연구에서는 시간적 제약에 의해 수집된 표본이 작아 자동차 파손 및 보행자 상해도에 있어 단계별 적절한 수렴구간을 산정하기가 난해하여 충돌속도의 범위를 좁히는데 그쳤으며, 남녀노소 구분없이 성인만을 대상으로 하여 사고에 대한 보행자의 신체적 특이성을 적절히 반영할 수 없었고, 또한 사고차량들의 차종이 단일화되지 않아 자동차 전면부의 기하구조에 따

라 달라지는 보행자 선회특성의 한계를 극복하지 못했다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 우선 사고조사 전문가와 관계기관의 업무협조를 통해 연간 수행연구과제로 채택하여 전국단위로 조건에 맞는 적절한 자료를 수집하고, 사고자료의 차종별, 보행자의 성별·연령별·신체조건별·이동상태별, 도로의 노면상태별 분류작업을 통해 다양한 상황에 적절히 적용될 수 있는 분석모형을 개발해야 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 장영채(2002), "02. 도로교통 사고비용의 추계와 평가", 도로교통안전관리공단 교통과학연구원.
2. 유장석(2002), "최적화기법을 이용한 보행자 충돌속도와 충돌위치 재현 연구", 한양대학교 박사학위논문.
3. 도로교통안전관리공단 교통사고종합분석센터 통계자료, "2001~2003년판 교통사고통계분석".
4. Andreas Moser., et al.(2000), 'Validation of the PC-Crash Pedestrian Model', SAE 2000-01-0847.
5. Jerry J. Eubanks & W. R. "Rusty" Haight (1992), "Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology", SAE 921591.
6. Schmidt D. N. & Nagel, D. A.(1971), "Proceeding Impact Case Study".
7. Stcherbatchef, G., et al., "Simulation of Collisions Between Pedestrian and Vehicle Using Adult and Child Dummies", SAE #751167.
8. Collins, James C. and Morris, Joe L., 1979, "Highway Collision Analysis", Thomas Publishing.
9. Kuhnel A.-Der Fahrzeug-Fußgängerunfall und seine Rekonstruktion, TU Berlin, Dissertation 1980.
10. Searle J. A.-The Physics of Throw Distance in Accident Reconstruction, SAE #930659.
11. Eubanks, J. J.(1986), "Fall and Slide Quadratic", IAARS.
12. Eubanks, J. J., Pedestrian/Bicycle Accident Reconstruction Course, Handout material, Texas A&M, Boise State University, Canadian

- Police College.
13. Wood, D. P. and Riordain, S. O.(1989), Impact Speed From Bicycle, Motorcycle and Rider Throw Distance. Proceedings of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference VI, University of New Brunswick.
 14. Fricke, L.B.(1990), Vehicle-Pedestrian Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute, Topic#877 and Traffic Accident Volume 2.
 15. Clark, W. Phd., Personal Communications.
 16. Limpert, R., Motor Vehicle Accident Reconstruction and Analysis, 2nd Edition, The Michie Company.
 17. Galli, A., Personal Communications.
 18. 林伴(1992), 自動車事故鑑定工學, pp.192~194.
 19. Tony L. Baker.(2000), Vehicle-Pedestrian Collision Investigation Manual, IPTM.
 20. Jerry. J. Eubanks and Paul F. Hill(1998), "Pedestrian Accident Reconstruction and Litigation".
 21. Rudolf Limpert(1989), "Motor Vehicle Accident Reconstruction Analysis 4th Edition", p.663.
 23. Committee on Medical Aspect of Automotive Safety : Rating the severity of tissue damage (1971). The Abbreviated Injury Scale. J.A.M.A., pp.215 : 227-280.
 24. 조이현 외 3명(1989), 'AIS 및 ISS 분류에 의한 새로운 외상환자 표시법', 대한정형외과학회지, 제 24권 제3호.

✉ 주 작 성 자 : 이수범

✉ 논문투고일 : 2005. 6. 17

논문심사일 : 2005. 8. 17 (1차)

2005. 9. 1 (2차)

심사판정일 : 2005. 9. 1

✉ 반론접수기한 : 2006. 2. 28