

■ 論 文 ■

퍼지수법을 활용한 보행자 충돌사고 재구성 해석

Reconstruction Analysis of Pedestrian Collision Accidents Using Fuzzy Methods

박 태 영

(홍익대학교 기계정보공학과 학사과정)

한 인 환

(홍익대학교 기계정보공학과 교수)

— 목 차 —

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| I. 서론 | 2. 두 번째 논리 규칙과 소속함수 |
| II. 보행자 충돌사고 유형과 해석 | V. 실제 사고사례 적용 및 유효화 |
| III. 보행자 충돌의 시뮬레이션 해석 | VI. 토의 및 결론 |
| IV. 퍼지 모델-소속함수 설정 | 참고문헌 |
| 1. 첫 번째 논리 규칙과 소속함수 | |

Key Words : 차량-보행자 충돌, 사고 재구성, 퍼지논리, 보행자 전도거리, 차량 속도
 Vehicle - Pedestrian Impact, Accident Reconstruction, Fuzzy Logic, Pedestrian Throw Distance, Vehicle Speed

— 요 약 —

보행자-차량 충돌사고 재구성을 위하여 본 논문에서는 사고 현장에서 수집이 용이한 정보들을 활용하여 차량의 충돌 속도를 정확하게 추정할 수 있는 퍼지 도구를 제시한다. 200건이 넘는 국내외 사고 및 실험 자료와 700건의 다중물체 시뮬레이션 결과에 근거하여 퍼지규칙과 소속함수들을 설정하였다. 개발한 퍼지도구는 4개의 소속함수와 2개의 논리적 규칙을 사용하여 보행자 선회 궤도 유형과 차량의 충돌 속도를 추론한다. 보행자 전도거리의 소속함수는 이와 같이 추론된 궤도 유형에 따라 달리 구성하였다. 작성된 퍼지 프로그램은 국내외 실제 사고 및 실험 데이터를 활용하여 그 결과를 검증하였으며 차량의 충돌속도에서 좋은 일치율을 보여주었다. 이는 본 연구를 통하여 개발한 퍼지도구의 정확성과 유용성을 입증하는 것이다.

In order to reconstruct vehicle-pedestrian collision accidents, this paper presents a fuzzy tool to estimate accurately the impact velocity of the vehicle using parameters which could be easily collectable at the accident scene. The fuzzy rules and membership functions were set up using number of over 200 domestic and foreign data from accidents and empirical tests and 700 data from multibody simulation experiments. The developed fuzzy tool deduces the category of pedestrian trajectory and impact speed of the vehicle using 4 membership functions and 2 logic rules. The membership function of throw distance was differently set according to the deduced category of trajectories. The implemented fuzzy program was validated through comparing with the domestic and foreign empirical data. The output results agree very well in impact velocities of vehicle resulting the accuracy and usefulness of the developed tool in the reconstruction analysis of vehicle-pedestrian collision accidents.

I. 서론

2008년 기준으로 국내 보행자 교통사고는 전체 교통사고 발생건수인 215,822건 중 약 21.9%를 차지하였으며, 사망자는 전체 교통사고 사망자 5,870명 중 35.1%를 차지하였다. 또한, 부상자는 338,962건 중 14.3%로 다른 유형의 사고에 비해 발생빈도와 치사율 등에서 매우 심각하다(교통사고 통계, 2009).

과거 30년 동안에 보행자 충돌 사고에 관한 400여 편의 연구 논문들이 발표되었다. 이들 중의 상당수는 보행자 사고에 관한 각종 통계, 사고 및 부상의 유형 그리고 차량의 특징적인 형상과 변형 등에 관한 내용들을 담고 있다. 물론, 이러한 논문들 중 일부는 보행자 충돌 사고의 수학적 모델 그리고 과학적 재구성에 관한 연구 결과들을 포함하고 있다. 이들은 단순한 통계식 혹은 실험식의 구성(Evans and Smith, 1999; Happer et al., 2000; Limpert, 1994; Limpert, 1998)으로부터 아주 복잡한 형태의 물리적 표현식(van Wijk et al., 1983; Moser et al., 2000; Wood, 1988)까지 다양한 형태로 제시되고 있다. 하지만 기존의 해석 연구 방법들은 사고 현장에서 측정이 쉽지 않은 차량 보닛의 각도, 보행자의 비행높이, 보행자의 속도, 선회궤도 등의 데이터들을 주로 사용하였다. 이런 이유로 전문적인 공학지식이 부족한 관련 실무자들의 과학적인 보행자-차량 사고 분석이 용이하지 않다. 또는 문헌에 소개되는 모형식을 그대로 적용하거나 물리적 계수만을 적당히 바꾸어서 보행자의 전도거리로부터 차량의 충돌 속도를 단순 추정하는 분석에 그치고 있는 상황이다. 최근, Vangi(2009)는 보행자 선회궤도를 분류하고, 정밀히 제어된 외부 실험데이터 등에 근거하여 제작된 퍼지 도구를 개발한 바 있다.

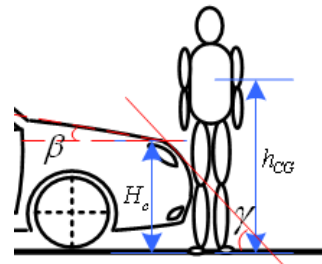
본 논문에서는 퍼지 이론을 활용하여 보행자 충돌사고에서 법정에서 가장 문제가 되고 있는 차량의 충돌속도를 정확하게 추론하는 방법을 제시한다. 퍼지 이론은 미국의 Zadeh가 처음 도입한 퍼지 집합 사고방식을 기초로한 이론으로 애매하고 불분명한 상황을 수학적으로 접근하는 시스템이다. 퍼지 추론 시스템은 입력, 퍼지화, 논리적 규칙, 비퍼지화, 출력으로 구성된다(McNeill and Thro, 1994). 실제 사고 현장에서 측정이나 추정이 비교적 용이한 변수들과 보행자의 인체적 특성을 고려해 전도거리, 차량 파손단계, 차량 정보, 보행자 키, 상해도 등에 관한 정보를 사용하여 차량의 보행자 충돌 속도를 추론하는 퍼지분석 도구를 개발하고 이를 국내외 실제 사고

및 실험 자료들을 대상으로 유효성을 검증한다. 한편, 개발과정에서 퍼지 도구의 유효한 소속함수를 결정하기 위하여 이러한 실제 사고 및 실험 자료들뿐만 아니라 시뮬레이션 데이터들도 일부 보완적으로 활용한다.

II. 보행자 충돌사고 유형과 해석

보행자-차량 사고에서의 쟁점은 충돌당시 차량 속도와 보행자의 충돌위치, 그리고 최종 정지 위치이다. 이런 이유로 기존의 많은 연구들에서 차량의 속도, 보행자 전도거리를 추론하는데 중점을 두었다. 실제로 전도거리만으로도 충돌속도를 약식 추론하는 것은 가능하나 이는 다른 많은 변수들에 의해 비교적 큰 오차를 발생시키게 된다. 보행자의 보행속도, 충돌 방향, 노면 마찰, 차량 보닛각도 등 다양한 변수들이 사고 분석에 사용된다. 하지만 이러한 변수들은 실제사고에서 측정이 쉽지 않고 그 변수의 범위가 매우 넓다. 따라서 기존의 연구에서는 중요한 몇 가지 변수를 선택 활용하였다. 예를 들면 Vangi(2009)는 보행자 속도, h_{CG}/H_c 비율, 리드(lead) 각도, 차량 보닛의 각도와 같은 각 변수들이 충돌속도에 미치는 영향 정도를 나타내고, 두 개 이상의 변수를 함께 사용하였을 때 영향력을 다르게 평가하였다. Vangi(2009)가 평가한 변수들은 <그림 1>에서 알 수 있듯이 차량 전면의 측면각도 γ , 보행자 무게중심 높이와 차량 전면부 높이 비율, 보닛 각도 β 는 차량 보닛의 경사도를 나타낸다. 본 연구에서는 기존의 보행자-차량 사고 분석 모델에서 중요시되던 변수들에 중점을 두되 실제 사고 현장에서 비교적 측정이 용이한 변수들을 추가적으로 선택하여 활용하였다.

기존의 분석 모델들은 초기 접촉부터 최종 정지까지인 보행자 전도거리의 정확한 분석을 위해 충돌단계, 비행단계, 미끄럼 단계로 분류하였다(Han and Brach,



<그림 1> 보행자 충돌 해석 변수(Vangi, 2009)

2002). 충돌단계에서는 보행자와 차량이 접촉하는 단계로 차량 전면부와 1차 충돌 및 차량 후드나 전면 유리와 2차 충돌이 발생한다. 비행단계는 충돌 후 보행자가 차량과 분리되어 노면과 접촉하기 전까지 비행하는 단계로 포물선 궤도로 비행하는 것이 일반적이다. 미끄러짐 단계는 보행자가 노면과 접촉하는 순간부터 최종정지까지의 단계이다. 이 단계에서는 미끄러짐, 구름(Rolling), 텅킴(Tumbling) 등의 현상이 복합적으로 발생하게 된다. 또한 보행자의 비행단계에서 보행자의 선회궤도는 대략 5가지로 <표 1>과 같이 분류(Ravani, 1981)되며, 관련 연구에서 널리 인용되어왔다.

기존의 보행자 충돌 해석 모델들은 역학 이론적 방법, 시뮬레이션 분석 방법, 더미테스트의 3가지로 나뉜다. 이러한 기존 분석 모델들은 차량의 형상정보와 보행자 선회궤도 등을 수치해석적, 역학적으로 분석하였다. 이런 이유로 전문적인 공학 지식이 부족한 실무자들의 접

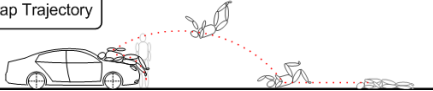

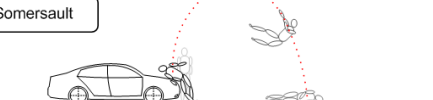
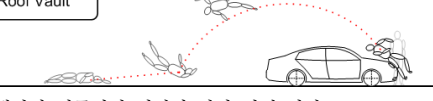

근이 어려웠다. 기존의 역학적 분석 모형식은 여러 연구를 통해 발표되었고, 현재까지도 분석이 진행중이다. 대표적인 예로 Han(2002)은 역학 해석적인 과정을 통하여 전도거리와 차량 충돌 속도 사이의 관계를 다소 복잡한 형태의 물리식으로 구하고 이를 단순화하여 식(1)과 같이 나타내었다. 식(1)에 보여지는 계수 A 와 B 는 기존의 다른 모형들에서처럼 고정적인 수치가 아니고 식(2)와 식(3)으로 정의되므로 관련 정보를 활용하면 직접 구할 수 있다. 한편, 특정 시기나 지역 혹은 특정 집단에 대한 실험결과나 사고 자료 DB를 활용하면 간편한 최적화 작업을 통해 적절한 계수들을 효과적으로 추정할 수도 있다.

$$v_{c0} = A \sqrt{s_p - B} \tag{1}$$

$$A = \frac{m_c + m_p}{\alpha m_c} \sqrt{\frac{2f_p g}{f_p^2 \sin^2 \theta + f_p \sin 2\theta + \cos^2 \theta}} \tag{2}$$

$$B = x_L + f_p h \tag{3}$$

<표 1> 충돌사고 보행자 선회궤도

<p>Wrap Trajectory</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 보행자의 신체가 차량 후드를 감싸는 형태 · 충돌 후 후드 또는 전면 유리와 2차 충돌 · h_{CG}/H_c 비율이 클 때 주로 발생
<p>Forward Projection</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 2차 충돌 없이 충돌 직후 보행자 선회시작 · h_{CG}/H_c 비율이 작을 때 주로 발생
<p>Somersault</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 충돌 직후 보행자가 높이 튀어 올라 선회 · 사고의 2%정도 발생, 고속 충돌에서 발생
<p>Roof Vault</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 보행자가 최종정지 위치가 차량 뒤에 위치 · 주로 60km/h 이상의 고속 충돌에서 발생
<p>Fender Vault</p>  <ul style="list-style-type: none"> · 차량의 펜더 부분에 접촉하여 이동 · 차량 옆면 또는 뒷면에 최종정지

컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 방법은 실제 더미를 이용한 실험을 통하여 분석하기 어려운 조건의 테스트를 수차례 반복할 수 있다. Konosu(2002)는 MADYMO(Mathematical Dynamic Models)와 JARI(Japan Automobile Research Institute) 인체 모듈을 이용하여 세 종류의 차량을 충돌속도, 30~65km/h 구간에서 제동의 변화를 주어 테스트하였다. 국내에선 김종혁(2002)이 MADYMO를 이용하여 충돌속도 10~60km/h 구간에서 두 가지 형태의 차량으로 시뮬레이션 하고, 기존 모델식과 이동거리를 비교하였다. 이외에도 보행자 충돌에 관한 시뮬레이션 해석에 관한 연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있다. 시뮬레이션을 통한 분석 방법 또한 기존의 분석모델들보다 훨씬 많은 변수와 물리적 계수들을 사용하여 충돌상황을 재현하므로 보다 과학적이고 정확한 재현 등의 장점은 있으나 현실적으로 수많은 변수 및 계수들의 추정이 쉽지 않을 뿐만 아니라 전문적인 공학 지식이 없는 경우 시뮬레이션 수행 과정 자체와 결과 등의 해석에 많은 어려움이 따른다.

본 연구에서는 퍼지 분석 도구에서 사용될 변수를 실제 사고 현장에서 비교적 측정이 용이한 전도거리, 차량과 손단계, 차량 정보, 보행자 키, 상해도 정보를 사용하여 도구를 만들었다. 또한 퍼지도구의 소속함수는 가능한 많은 양의 실제 데이터에 기반하여 설정되어야 하는데, 소속 함수에 맞는 대용량의 실제 보행자 충돌 실험 및 사고

데이터의 확보가 용이하지 않다. 국내외 실제 사고 데이터에서 부족한 차량 파손단계, 선회계도별 전도거리-속도 관계를 다음 장에서 서술하는 바와 같은 PC-Crash 시뮬레이션 작업을 통하여 부분적으로 보완 하였다.

III. 보행자 충돌의 시뮬레이션 해석

PC-Crash는 뉴톤 운동법칙에 기반한 충돌 모델을 적용하는 프로그램으로 차량 특성, 속도, 보행자 더미를 사용하여 다양한 시뮬레이션이 가능하다(Steffan, 2005). 본 연구에서는 약 700건의 시뮬레이션 결과를 DB로 구축하였고 퍼지도구의 소속함수 설정에 활용하였다. 시뮬레이션 수행시 차량과의 접촉부위, 보행자의 접촉부위, 보행자 속도 등에 따라 보행자의 선회계도, 최종 정지위치가 변하게 되는데, 이와 같은 상황은 실제 측정 에 많은 어려움이 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 보행자와 차량의 충돌 상황을 일치시켜 차량 전면부와 보행자 좌측면과의 충돌로 설정하였다. 차량의 충돌 속도는 10~70km/h구간에서 2.5km/h 간격으로 하였고, 전도거리 측정 방식으로 수행하였다.

실용성이 있는 시뮬레이션 해석을 위해서는 실제사고와 유사한 상황을 설정해 주는 것이 중요하다. 그러기 위해선 보행자, 차량, 도로면에 관한 많은 양의 변수가 필요하며, 이를 전부 입력하기엔 범위가 너무 넓기에 특정 변수는 <표 2>와 같이 대푯값을 사용하였고, 소속함수 설정시 데이터 비교를 위해 차량 정보, 보행자 정보, 차량 속도, 보행자-노면 마찰계수에 한해서 범위를 주어 시뮬레이션을 수행하였다.

보행자와 노면 마찰계수는 보행자의 옷가지, 모션 그리고 노면의 상태에 의해 복잡적으로 발생한다. 이에 대하여 국내외에서 여러 차례 실험이 진행되었고 그 결과를 <표 3>으로 요약하였다. 실험에 따른 마찰계수의 차이는 실험 방법의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 대표적인 예로 Hill의 경우는 차량에 더미를 올려놓고 감속하여, 실제 충돌 사고와 유사한 상황을 만들어 마찰계수를 측정하였다. 그에 반해 김민태(2009)는 연구에서 실험은 차량의 뒤에 실제 사람이 끌려가는 형태의 실험을 통해 측정하였다. 이와 같이 보행자-노면 마찰계수는 측정 방법에 따라 약 0.45~0.78의 범위를 나타낸다. 이에 근거하여 본 연구에서는 0.6, 0.7, 0.8의 3가지 마찰계수에 대하여 시뮬레이션 작업을 수행하였다. 또한, 차량의 특성은 전면부 형상과 보행자의 키 비율에 따른

<표 2> 시뮬레이션 입력 계수

User input parameters	
• 차량 정보	세단(전면부 높이 : 0.8m) SUV(전면부 높이 : 0.98m) Van(전면부 높이 : 1.13m)
• 보행자 정보	성인(남) : 키:1.72m, 체중:72.2kg 성인(여) : 키:1.59m, 체중:56.9kg 어린이 : 키:1.39m, 체중:35.7kg
• 보행자-노면 마찰계수	: 0.6, 0.7, 0.8
Default parameters	
보행자 반발계수	: 0.3
보행자-차량 마찰계수	: 0.2
노면 마찰계수	: 0.8(건조)
차량 감속도	: $7.85m/s^2$
도로 구배	: 0%

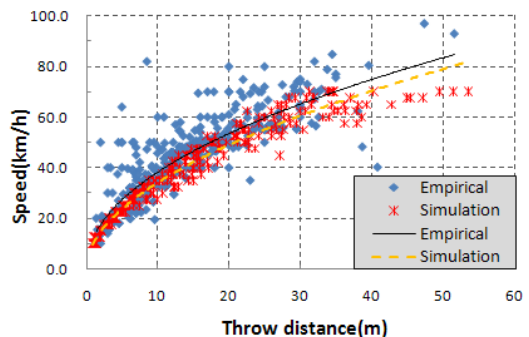
<표 3> 실험별 측정된 마찰계수(김민태등, 2009)

	마찰계수(아스팔트)
Northwestern U.	0.45~0.60
김민태	0.56~0.62
일본 林기술사무소	0.64~0.67
Hill	0.73~0.78

보행자의 선회계도와 전도거리 구별을 위해 세단(소나타), SUV(무쏘), Van(프레지오)로 차량을 구분하였고, 성인 남자, 성인 여, 어린이의 2008년 평균 신체 정보(문화체육관광부, 2009)를 더미 설정에 사용하였다.

<표 2>의 계수 값들을 사용하여 보행자의 선회계도를 Wrap과 Forward유형으로 구분하여 시뮬레이션 한 결과, 데이터의 분포는 특정 범위를 가지며 속도가 증가함에 따라 분포의 범위가 넓어지는 형태를 가진다. 또한 선회계도가 Forward유형일 때 Wrap유형 보다 속도에 따른 전도거리가 높게 측정됨을 알 수 있었다.

<그림 2>는 실제사고 데이터와 세단형 차량 시뮬레이



<그림 2> 시뮬레이션 결과-세단차량

선 결과를 비교한 것으로, 시뮬레이션에서 충돌 속도의 분포가 실제사고 데이터에서 충돌 속도에 비해 다소 아래쪽에 분포하지만 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 시뮬레이션 결과들이 유용성이 있다고 판단하여 퍼지 소속함수 설정에 필요한 대용량 데이터 보원에 활용하였다.

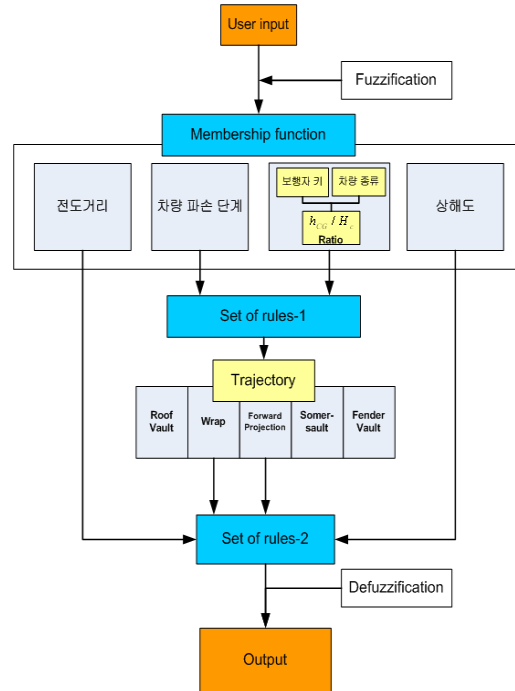
IV. 퍼지 모델-소속함수 설정

〈그림 3〉과 같이 기존의 퍼지 추론 시스템 기본 5단계에서 논리적 규칙 부분을 2단계로 나눔으로서 논리적 규칙의 설정을 간소화 시키고, 더불어 보행자의 선회케도를 판별할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Matlab을 사용하여 퍼지 도구를 작성하였다.

소속함수는 전도거리, 차량 파손단계, h_{CG}/H_c 비율, 보행자 상해도의 4가지로 분류한다. 우선 보행자 선회케도를 판별하기 위하여 차량 파손 단계와 h_{CG}/H_c 비율을 사용하였다. 이 두 소속함수를 첫 번째 논리 규칙(Set of rules-1)에 대응시켜 보행자 선회케도의 소속함수를 추론한다. 본 연구에서 보행자 선회케도는 전술한 5가지 분류 중 드물게 발생하는 Roof Vault와 Somersault, 보행자의 최종 정지 위치가 차량 옆면 또는 후면에 위치하는 Fender Vault를 제외하고 Wrap과 Forward의 유형만을 추론하도록 한다. 하지만 Wrap과 Forward를 판단하기 애매한 경우를 고려하여 그 중간 단계인 Wrap-Forward, Wrap으로 판단하기에는 파손단계가 높은 경우를 고려하여 Wrap-over의 총 4단계로 분류하였다. 두 번째 논리 규칙(Set of rules-2)에는 직접적인 속도 추론을 위하여 전도거리, 보행자 선회케도, 상해도를 대응시켜 속도를 추론한다. 논리적 규칙은 퍼지 추론 시스템에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 직접법(If-then)을 사용하여 식(4)와 같은 방법으로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{If } X = A_1 \text{ and } Y = B_1 \text{ and } \dots \text{ then } Z = C_1 \\ \text{If } X = A_1 \text{ and } Y = B_2 \text{ and } \dots \text{ then } Z = C_2 \\ \vdots \end{aligned} \quad (4)$$

비퍼지화 단계서는 최종적으로 논리적 규칙을 통해 도출된 속도 소속함수를 무게 중심법을 사용하여 정량적인 속도 값으로 출력하게 된다.



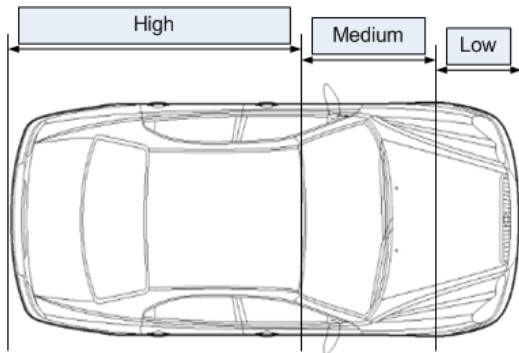
〈그림 3〉 퍼지 추론 순서도

1. 첫 번째 논리 규칙과 소속함수

첫 번째 논리 규칙은 보행자의 선회케도를 판별하는 부분으로 대응되는 소속함수는 차량의 파손단계, h_{CG}/H_c 비율이다. 보행자의 선회케도를 판별 할 수 있는 근거는 목격자의 진술을 제외하면 차량의 파손단계, 보행자의 무게중심과 차량 전면부 높이의 비율이 있다. 본 연구에서는 차량 파손단계 소속함수를 3단계, h_{CG}/H_c 비율 소속함수를 3단계로 분류하여 총 논리 규칙은 9개로 구성된다.

1) 차량 파손단계 소속함수

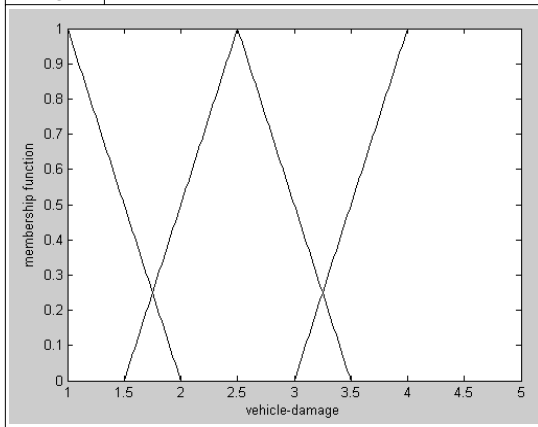
차량 파손단계는 보행자가 차량의 어느 부분과 접촉하였는지를 나타내며, 이를 토대로 보행자의 선회케도를 예측할 수 있다. 차량 파손부위는 사고현장에서 비교적 용이하게 구분할 수 있다. 국내에서 분류된 차량 파손 5단계(이수범 등, 2005)에서 4~5단계의 파손은 높은 속도에서 비교적 드물게 발생하며, 후드 부분의 손상은 Wrap과 Forward 두 선회유형에서 발생 할 수 있으므로, 선회케도 판단을 위해 총 3단계로 〈그림 4〉, 〈표 4〉와 같이 분류하였다.



〈그림 4〉 차량 파손단계별 파손부

〈표 4〉 차량 파손단계별 파손부

Phase	Damage of vehicle
Low	파손 흔적 없음, 전면 범퍼 및 후드, 펜더의 앞쪽 부분 손상
Med	후드, 펜더 및 전면유리 손상
High	루프, 후면유리, 트렁크 손상



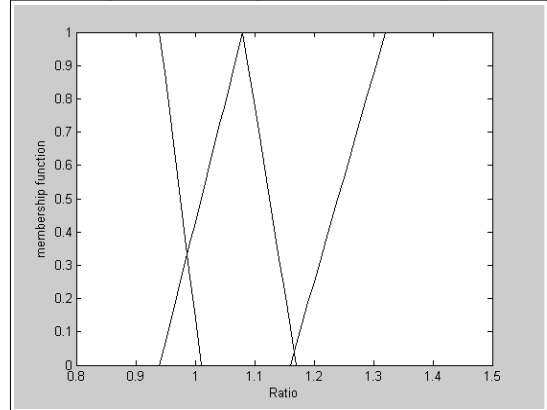
차량 파손단계를 5단계로 구분하면 후드 부분에서 보행자의 키에 의해 Wrap인지 Forward인지 모호한 상황이 발생하므로 보행자의 키에 의해서 발생 할 수 있는 후드 앞부분까지의 파손을 Low단계로 설정하고, 드물게 발생하는 차량 후드와 후면유리, 트렁크의 파손을 High 단계로 분류하였다.

2) h_{CG}/H_c 비율 소속함수

h_{CG}/H_c 비율은 보행자 무게중심 높이/차량 전면부 높이 비율로서 3종류의 차량(세단, SUV, Van)의 전면부 높이와 3가지의 인체정보(성인남자, 성인여자, 어린이)의 무게중심 높이를 이용하여 소속함수를 설정하였다. 무게중심은 키의 2/3지점으로 동일하였으며, h_{CG}/H_c 비율이 1보다 크면 Wrap유형의 충돌이 발생할 가능성이

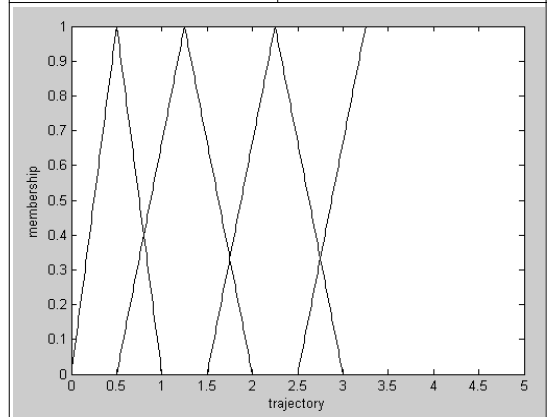
〈표 5〉 h_{CG}/H_c 비율의 소속함수 설정

Phase	h_{CG}			
	H_c	Child 0.92m	Adult (Female) 1.06m	Adult (Male) 1.14m
Low	Van 1.13m	0.8	0.9	1.0
Med	SUV 0.98m	0.9	1.1	1.2
High	세단 0.80m	1.2	1.3	1.4



〈표 6〉 선회궤도 소속함수 범위

Forward	0~1.5
Forward-Wrap	1.0~2.0
Wrap	1.5~3.0
Wrap-over	2.25~5.0



높고, 1보다 작으면 Forward 유형이 발생할 가능성이 높다는 점을 기준으로 논리 규칙 설정에 활용하였다. 3 단계로 분류한 소속함수의 범위가 〈표 5〉에 보여진다.

3) 선회궤도 소속함수

첫 번째 논리 규칙에 의하여 도출되는 결과인 선회궤도 소속함수는 Forward와 Wrap유형으로 구별하였으나 Forward와 Wrap유형으로 구분하기 모호한 충돌을 Forward-Wrap유형으로 그리고 Wrap유형의 충돌이

지만 파손단계가 4~5단계로 높을 경우를 고려해 Wrap-over유형을 추가하여 총 4단계 분류하였다. <표 6>에 나타나는 것처럼 분류기준은 차량 파손단계에 가중치를 두고 설정하였다.

2. 두 번째 논리 규칙과 소속함수

두 번째 논리 규칙은 차량의 충돌 속도를 추론하는 부분으로서 전도거리, 보행자 선회궤도, 상해도 소속함수가 대응 된다. 본 연구에서는 첫 번째 논리 규칙에서 판별된 보행자 선회궤도인 Wrap과 Forward 두 가지 유형에 따라 전도거리로 분류하였다. 전도거리 7단계, 선회궤도 4단계, 상해도 4단계로 분류하여 총 112개의 논리 규칙으로 구성된다.

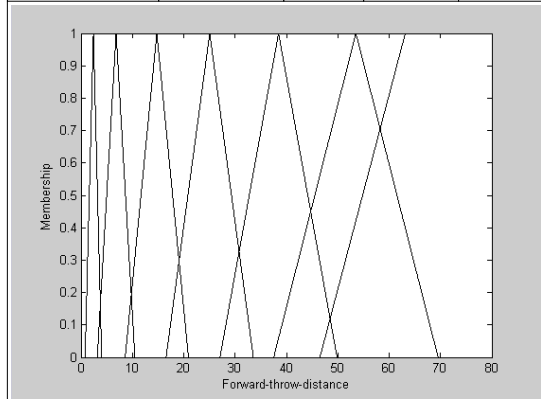
1) 전도거리 소속함수

각 선회유형별 전도거리는 총 7단계로 구성하였고 소속함수를 설정하기에는 실제사고 데이터가 충분하지 않으므로 보행자 선회궤도 정보가 포함된 국내의 실제사고 데이터와 시뮬레이션 데이터를 함께 사용하였다.

전도거리 소속함수는 10~80km/h의 속도 범위에서 추론속도의 세분성과 논리 규칙의 개수를 고려하여 속도 구간을 10km/h로 분류하여 구간별 전도거리 정규분포

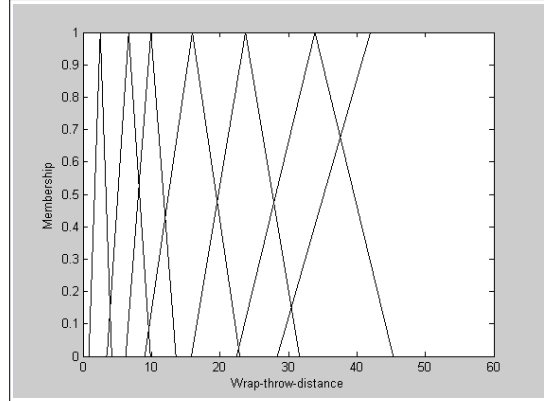
<표 7> Forward유형 전도거리 소속함수 범위

Phase	Speed (km/h)	Min (m)	Mean (m)	Max (m)
Low	10~19.9	0.8	2.4	4.0
Med-low	20~29.9	3.2	6.8	10.5
Medium	30~39.9	8.6	14.8	20.9
Med-high	40~49.9	16.6	25.1	33.6
High-low	50~59.9	27.1	38.5	49.9
High	60~69.9	37.5	53.5	69.6
Very-high	70~79.9	46.5	63.2	79.8



<표 8> Wrap유형 전도거리 소속함수 범위

Phase	Speed (km/h)	Min (m)	Mean (m)	Max (m)
Low	10~19.9	0.9	2.5	4.2
Med-low	20~29.9	3.5	6.7	9.8
Medium	30~39.9	6.2	9.9	13.6
Med-high	40~49.9	9.0	16.0	22.9
High-low	50~59.9	15.9	23.7	31.6
High	60~69.9	22.5	33.9	45.3
Very-high	70~79.9	28.4	42.0	55.6



의 $\pm 2\sigma$ 값(Min, Max)과 산술평균(Mean) 값을 사용하여 이등변삼각형 형태의 소속함수로 나타내었다. <표 7>과 <표 8>은 선회궤도 유형별 전도거리 소속함수의 범위와 그래프를 나타낸 것이다.

2) 보행자 상해도 소속함수

보행자 상해도는 미국 자동차의학협회의 상해 분류법인 AIS지수를 사용하여 소속함수 범위를 나타설정 하였다. 상해도는 <표 9>와 같이 AIS지수를 3단계로 분류하였다.

3) 차량 속도 소속함수

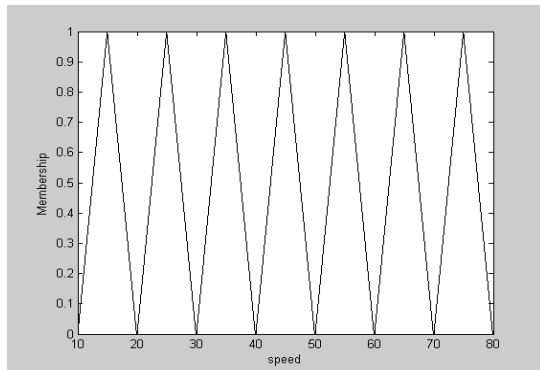
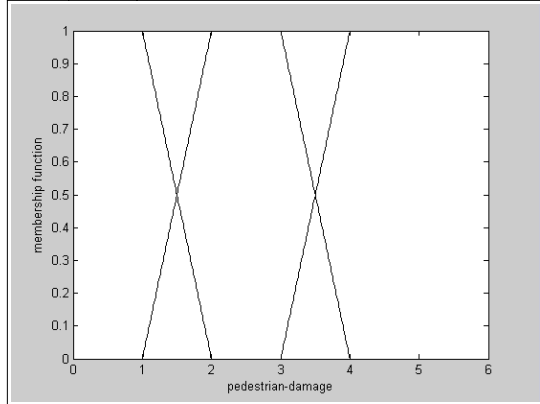
차량 속도 소속함수는 전도거리 소속함수 설정시 10km/h의 단위로 나눈 속도 구간으로 설정하였으며, <그림 5>에서 보는 것처럼 전부 7단계의 속도 구간으로 하였다.

V. 실제 사고사례 적용 및 유효화

퍼지추론의 유효성 검사는 국내의 사고 데이터와 비교를 통해 이루어졌으며, 34개의 국내 데이터(이수범 등, 2005)중 본 연구에서 계획한 10~80km/h속도 구간에 적합한 31개의 데이터를 활용하였다. 한편, 317건의 외국 데이터(Han and Brach, 2002)에서 보행자

〈표 9〉 상해도 소속함수 분류기준

Low	AIS-0	Not Injured
	AIS-1	상해가 가볍고 특별한 대책 필요 없는 정도(경미)
Med	AIS-2	생명에 지장은 없으나 치료 필요(경도)
	AIS-3	생명의 위험은 적으나 충분한 치료를 필요(중등도)
High	AIS-4	생명에 위험은 있으나 의학적 치료 가능(고도)
	AIS-5	의학적 치료 불확실하고, 구명 가능성 불확실(고도)
	AIS-6	원인 및 증상을 알 수 없어 분류 불가능(불명)
	AIS-7	원인 및 증상을 알 수 없어 분류 불가능(불명)

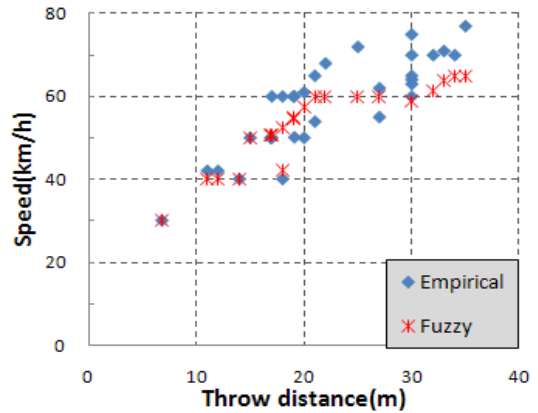


〈그림 5〉 차량 속도 소속함수 그래프

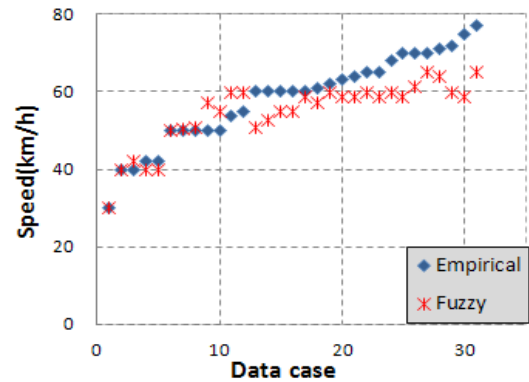
선회궤도가 포함된 198건의 데이터에 한해서 비교가 이루어졌다.

〈그림 6〉에서 국내 사고 데이터와 퍼지추론 차량 충돌 속도 값들의 분포는 보행자 전도거리에 따라서 유사한 추세를 보인다. 그러나 거의 동일한 보행자 전도 거리에 대해서 퍼지추론은 상이한 차량 충돌 속도를 제대로 추정하여 실제 사고 값과 잘 일치하는 것들을 볼 수 있다. 이러한 기능이 기존의 단순 사고 모형식들로는 가능하지 않은 부분일 것이다.

〈그림 7〉은 각개의 사고 케이스별로 발생된 추론속도와 실제 사고 속도를 비교한 것인데, 전반적으로 좋은 일치를 보여주고 있으나 차량 속도가 60km/h 이상 고속일 때 오차가 다소 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 보행자



〈그림 6〉 전도거리-차량충돌속도 비교(국내)

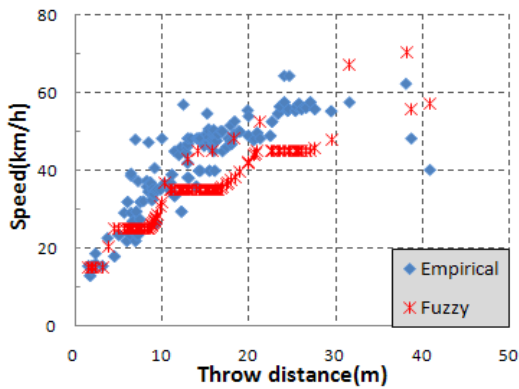


〈그림 7〉 사건별 차량충돌속도비교(국내)

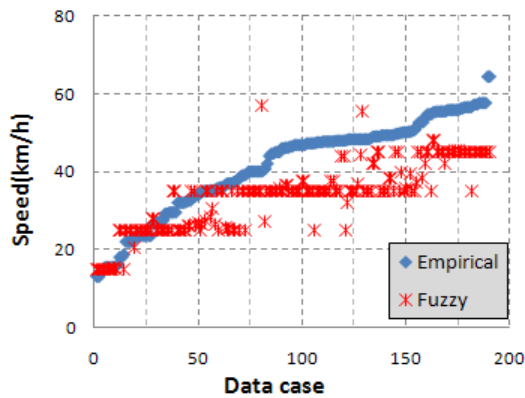
의 노면과 충돌 후 가질 수 있는 다양한 거동이나, 노면과의 마찰계수, 차량 전면의 충격 부분 등에 대하여 추가적인 소속함수를 설정할 수 있다면 감소시킬 수 있을 것이다. 또한, 보행자나 차량에 대한 보다 상세한 정보, 그리고 Somersault나 Roof Vault, Fender Vault 선회유형에 대한 추가적인 판별과 각 선회궤도의 특성을 고려하여 논리 규칙을 수정한다면 더욱 좋은 성능을 보여줄 수 있을 것이다.

국내 사고 데이터 전체에 대하여 절대 오차 평균 5.4km/h이며, 최대 16.2km/h의 오차를 보인다. 4개의 데이터만이 10km/h이상의 절대오차를 보이며, 43.8%의 추론 값이 절대 오차 범위 5km/h안에 포함되어 있다. 대략 87% 추론 값이 절대 오차 범위 10km/h안에 포함된다. 퍼지추론 속도는 실제 충돌속도들과 상당히 근접하지만 전반적으로 다소 낮게 추론되는 추세를 보이고 있어 실제 사고 현장에의 적용이 가능하다고 여겨진다.

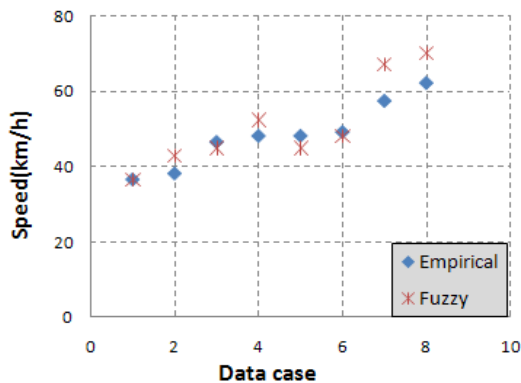
198건의 외국 보행자 사고 및 실험 데이터에 대하여 퍼지추론 속도를 구하여 비교한 결과가 〈그림 8〉에 보여



〈그림 8〉 전도거리-차량충돌속도 비교(외국)



〈그림 9〉 Wrap 사건별 차량충돌속도비교(외국)



〈그림 10〉 Forward 사건별 차량충돌속도(외국)

진다. 국내 사고결과 분석과 거의 유사한 패턴을 보이거나 오차는 보다 크게 나타난다. 본 연구에서 확보한 외국 데이터에는 차량 파손단계, 보행자 상해도에 관한 정보가 포함되어있지 않다. 그러므로 선회계도 정보를 기반으로

파손단계를 대푯값으로 사용하였다. 파손단계는 Forward유형 선회계도일 경우 전면범퍼 손상정도인 1, Wrap의 경우 전면유리 손상정도인 3으로 대푯값을 입력하고 상해도는 입력하지 않았다. 그 결과 절대 오차 평균 8.5km/h, 오차는 최대 23.1km/h까지 발생하였다. 퍼지 추론 값의 94.4%의 데이터가 절대 오차범위 15km/h 이내에 포함되며, 대략 53%의 데이터가 10km/h 범위 내에 포함되었다.

본 연구의 퍼지 도구는 선회계도를 Forward와 Wrap유형으로 자동 판별하여 소속함수로 활용한다. 선회계유형별 데이터 비교는 〈그림 9〉와 〈그림 10〉에 보여진다. 〈그림 9〉에 보여지는 190건의 Wrap유형에서는 퍼지추론 속도는 여전히 낮게 추정되는 경향을 보인다. 또한, 퍼지 추론 속도가 부분적으로 계단 형태를 가지는 것은, 외국 데이터 비교에는 상해도의 정보가 포함되지 않았고, 단순히 보행자의 전도거리와 선회계도 정보만을 가지고 추론되었기 때문이며, 소속함수의 활용을 위한 충분한 데이터가 있다면 계단 형태는 상당부분 해소되고 퍼지 추론속도의 오차는 더욱 감소 할 것으로 판단된다. 〈그림 10〉에서 Forward유형의 비교는 단지 8건으로 충돌속도가 55km/h 이상에서 실제 데이터보다 높게 추론되었다. 차량의 파손단계와 보행자 신체 정보에 관한 데이터를 활용하여 보행자의 선회계도를 정확히 판단하면 더욱 개선될 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 차대 보행자 충돌사고에서 비교적 추정이나 추정이 용이한 정량, 정성적인 사고 정보들에 근거하여 차량의 충돌속도를 정확하게 추론하는 퍼지도구를 제시하였다. 보행자 충돌 사고 및 실험, 시뮬레이션 데이터를 활용하여 4가지 소속함수의 범위를 설정하였고, 데이터 분석을 통해 퍼지 논리 규칙 설정에 참고하였다. 국내 사고 데이터 31건에 대하여 절대오차 평균 범위 5.4km/h, 외국 198건의 데이터에 대하여 절대오차 평균 범위 8.5km/h의 결과를 얻었다. 차량 파손 단계, 보행자 상해도에 관하여 충분한 분량의 데이터가 있다면 소속함수와 논리 규칙들의 수정 그리고 세부적인 선회계도 판별을 통해 오차 범위를 더욱 감소시킬 수 있다.

퍼지 도구는 소속함수 설정과 논리적 규칙에 따른 활용 범위가 넓지만, 퍼지도구의 소속함수 설정을 위해서는 대용량의 관련 정보들이 필요하다. 그러므로 사고 현장에서 차량의 파손단계, 보행자 상해도 등에 대한 정보들이 체계적으로 수집되어 적절한 규모의 DB가 구축된

다면, 이에 근거하여 지역이나 계절 혹은 특정 그룹 별로 효과적이고 정확한 퍼지 도구의 설계 제작이 가능하게 될 것이다. 또한, 본 연구를 통하여 개발한 보행자 충돌 사고 해석을 위한 퍼지 도구는 사고 현장에서 부가적인 정보의 추가 획득을 통하여 기존 분석 모형들보다 실용적이고 정확한 분석을 가능하게 할 수 있을 것으로 여겨진다. 보행자 충돌 사고 현장에서 획득이 용이하지만, 다소 불확실하고 정성적인 형태에 불과한 정보들에 근거하여서도 상당히 정확한 추정결과를 제시하는 퍼지도구는 불확실성을 고려하는 사고 재구성 조사와 연구 혹은 관련 소송 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 경찰청 교통안전담당관실(2009), “교통사고 통계”, 경찰청.
 2. Evans, A.K. and Smith, R.(1999), “Vehicle Speed Calculation from Pedestrian Throw Distance”, Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol. 213, No. 5, pp.441~447.
 3. Happer, A., Araszewski, M., Toor, A., Overgaard, R. and Johal, R.(2000), “Comprehensive Analysis Method for Vehicle/Pedestrian Collisions”, SAE Paper 2000-01-0846.
 4. Limpert, R.(1994), Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Ed., The Michie Company.
 5. Limpert, R.(1998), Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Ed., The Michie Company, Suppl.
 6. Van Wijk, J., Wisman, J., Maltha, J., and Wittebrood, L.(1983), “MADYMO Pedestrian Simulations”, SAE Paper 830060.
 7. Moser, A., Steffan, H., Hoschopf, H. and Kasanicky, G.(2000), “Validation of the PC-Crash Pedestrian Model”, SAE Paper 2000-01-0847.
 8. Wood, D. P.(1988), “Impact and Movement of Pedestrians in Frontal Collisions with Vehicles”, Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol. 202, pp.101~110.
 9. Vangi, D.(2009), “A Fuzzy Approach to Reconstructing Vehicle-Pedestrian Collisions”, Vehicle System Dynamics, Vol. 47, No. 9, pp.1117~1121.
 10. McNeill, F.M. and Thro, E.(1994), Fuzzy Logic: A Practical Approach, AP Professional, Boston.
 11. Ravani, B., Brougham, and Mason, R.T.(1981), “Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology”, SAE Paper 921591.
 12. Han, I. and Brach, R.M.(2002), “Impact Throw Model for Vehicle-Pedestrian Collision Reconstruction”, Journal of Automobile Engineering (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D), Vol. 216, No. 6, pp.443~453.
 13. Konosu, A.(2002), “Reconstruction Analysis for Car - Pedestrian Accidents Using a Computer Simulation Model”, JSAE Review 23, pp.357~363.
 14. 김종혁·박경진·장명순·유장석·손봉수·홍을표 (2002), “컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보행자 충돌 선회특성에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제20권 제2호, 대한교통학회, pp.81~92.
 15. Steffan, D.(2005), PC-Crash Operating Manual, Macinnis Engineering Associates.
 16. 김민태(2009), “인체와 노면간의 마찰계수에 대한 실험적 연구”, 아주대학교 석사학위 논문.
 17. 문화체육관광부(2009), “2009년도 국민체력 실태 조사 결과 보고서”, 문화체육관광부.
 18. 이수범·류태선(2005), “한국형 보행자 사고재현 모형 개발에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제23권 제6호, 대한교통학회, pp.103~113.
- ☞ 주 작성자 : 박태영
 ☞ 교신저자 : 한인환
 ☞ 논문투고일 : 2010. 12. 17
 ☞ 논문심사일 : 2011. 1. 20 (1차)
 2011. 2. 1 (2차)
 ☞ 심사판정일 : 2011. 2. 1
 ☞ 반론접수기한 : 2011. 6. 30
 ☞ 3인 익명 심사필
 ☞ 1인 abstract 교정필