

## 보행자-차량 충돌안전기준 매개변수 최적화 방법론 개발 및 적용

오 철<sup>1)</sup> · 김 범 일<sup>\*2)</sup> · 강 연 수<sup>2)</sup> · 윤 영 한<sup>3)</sup>

한양대학교<sup>1)</sup> · 한국교통연구원<sup>2)</sup> · 한국기술교육대학교<sup>3)</sup>

### Methodology for Optimizing Parameters of Vehicle Safety Regulation on Pedestrian Protection

Cheol Oh<sup>1)</sup> · Beomil Kim<sup>\*2)</sup> · Youn-Soo Kang<sup>2)</sup> · Younghan Youn<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Transportation System Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

<sup>2)</sup>The Korea Transportation Institute, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu Goyang-si, Gyeonggi 411-701, Korea

<sup>3)</sup>Mechatronics, Korea University of Technology and Education, Chungnam 220-708, Korea

(Received 21 March 2006 / Accepted 25 April 2006)

**Abstract** : Traffic accident involved with the vulnerable pedestrian is one of the significant concerns, which has higher possibility of fatality than any other accident types. Worldwide significant efforts have been made to establish a vehicle safety regulation, which is internationally agreed, in order to reduce pedestrian casualties in pedestrian-vehicle collisions. One of the key issues in deriving the regulation is how to effectively select the parameter values associated with the regulation. This study firstly develops a method to optimize parameter values. An optimizing problem in terms of maximizing safety benefits, which are life-saving effects by the regulation, is formulated. Extensive actual accident data analysis and simulations are conducted to establish several statistical models to be used in the proposed optimization procedure. A set of parameter values that can produce maximizing life-saving effects is presented as the outcome of this study. It is expected that the proposed method would play a significant role in determining parameters as a decision support tool toward ensuring better pedestrian safety.

**Key words** : Pedestrian(보행자), Vehicle safety regulation(충돌안전기준), Optimization procedure(최적화 방법론), Parameter(매개변수)

### 1. 서 론

우리나라의 자동차 등록대수 2005년도에 1500만대를 넘어섰다. 자동차 등록대수의 증가와 함께 교통사고도 크게 늘어, 2003년도에는 240,832건이 발생된 것으로 보고된 바 있다. 이 중 사망자수는 7,212명, 부상자수는 376,503명인 것으로 나타났다.<sup>1)</sup> 한편, 인구 10만명 당 사망자수 및 자동차 1만대 당 교통사고 발생건수는 OECD 국가들 중 가장

높은 것으로 조사되어 교통사고 예방 및 심각도 감소를 위한 각별한 노력이 필요하다. 이러한 노력의 일환으로 정부는 1999년부터 자동차안전도평가제도(NCAP)를 도입하여 시행 중에 있다. 지금까지의 자동차안전도평가는 주로 탑승자의 안전을 확보하기 위한 항목 위주로 구성되어 있었다. 반면에 탑승자에 비해 교통사고로 인한 치사율 및 상해정도가 보다 심각한 보행자의 보호를 위한 노력은 상대적으로 미흡하였다. 이를 극복하고자 보행자와 차량의 충돌 사고 시 보행자의 안전을 확보하기 위한 보

\*Corresponding author, E-mail: ksmilek@koti.re.kr

행자 충돌기준을 마련하고, 나아가 NCAP에 반영하기 위한 많은 연구가 국내·외에서 이루어지고 있으며, 보행자 보호를 위한 세계 기술기준의 제정이 진행 중이다.

본 연구의 목적은 보행자 보호를 위한 안전기준 및 NCAP의 근간이 되는 보행자의 상해 감소를 위한 보행자 안전기준의 매개변수를 최적화하는 방법론을 개발하고 적용 예를 제시하는 것이다. 이를 위해 기준 적용에 따라 감소하게 될 보행자 사망자수를 극대화하는 최적의 기준 관련 변수를 찾는 최적화 문제를 정립하였다.

기존의 보행자 관련 연구를 살펴보면 크게 차와 보행자가 충돌 시 보행자의 거동행태에 관한 연구와<sup>3-6)</sup> 차대 보행자 충돌 시 보행자의 상해 심각도를 감소시키기 위한 차체의 개발에 대한 연구<sup>7-11)</sup> 보행자 기준 도입에 따른 차량의 평가시스템 개발에 대한 연구들<sup>12)</sup> 구분될 수 있다.

보행자 거동 행태에 대한 연구로는 김중혁<sup>3)</sup>은 보행자 충돌선회특성에 대한 연구에서 Madymo를 이용하여 다양한 조건하에서의 보행자 충돌 형태를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

박선호<sup>4)</sup>는 SUV차량의 다리(Lower Legform)와 범퍼의 충돌에 대해서 시험조건에 변화에 따른 해석을 실시하여 상해치의 경향을 분석하여, 충격속도가 증가할수록 Legform의 운동에너지가 증가하여 상해치가 나빠지며, Legform의 본넷 쪽으로 기울어질수록 무릎이 변형되기보다는 Legform이 전체적으로 기울어지는 거동을 나타내는데 유리하므로 상해치가 좋아지는 경향을 보이는 것으로 보고하였다. 다리 높이는 상해치가 커다란 영향을 미치지 않는다는 결론을 내렸다. Jikuang Yang<sup>5)</sup>은 보행자 사고 자료를 이용하여, 차량의 속도와 머리충격속도, 머리충격각도, HIC, 날아간 거리에 대한 관계식을 정립하였다. 또한, 충격속도, 충격시간, 충격각도, WAD 등은 차량의 형상, 충돌속도, 보행자의 키에 의해 많은 영향을 받는다는 연구결과를 얻었다. 윤영환<sup>6)</sup>은 국내 차량형상에 따른 보행자 머리 및 다리의 상해값을 해석하였다. 유장식<sup>7)</sup>은 충돌 후 최종정지 위치를 이용하여 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 최적화방법으로 분석하는 기법을 개발하였다.

차대 보행자 충돌 시 보행자의 상해 심각도를 감소시키기 위한 차체의 개발에 대한 연구로 이재완<sup>8)</sup>은 보행자 보호를 위한 자동차 후드 및 범퍼 구조물을 개발 시 성능을 평가하기 위한 방법으로 직교배열표의 각 경우를 실험과 시뮬레이션 혼합하여 차대 보행자 사고 시 보행자 상해감소를 위한 자동차의 후드 및 범퍼 구조물을 설계하였다. 이근배<sup>9)</sup>는 머리상해를 저감시킬 수 있는 active hood lift 매커니즘을 개발하여 child headform에 대해서 실험한 결과, 머리 상해치가 상당히 감소됨을 입증하였다. Kaoru Nagatomi<sup>10)</sup>는 차대 보행자 충돌시 보행자 머리 상해를 줄이기 위한 팝업 후드 시스템(pop-up hood system)을 개발하였다. 이 시스템은 범퍼에 센서를 부착하여 충돌시 엔진 후드 후면부분이 약 10mm 들어 올려진다. 팝업 후드 시스템(pop-up hood system) 설치 결과 HIC 값이 약 30%가 줄어 들었다. Christoph Kerkeling<sup>11)</sup>은 후드 디자인에 대한 검토를 통해 유럽과 일본의 보행자 보호규정을 적합한 방안을 제시하고자 하였다.

보행자 기준 도입에 따른 차량의 평가시스템 개발에 대한 연구에는 Yuji Ono<sup>12)</sup>는 J-NCAP하에서의 보행자 머리 보호 평가를 수행하였다. AIS4를 기준으로 하여 5단계 평가 시스템을 구축하였다. 평가적도는 차량 본넷의 충격지점을 15부분으로 구분하여 각 부분별로 평균점수가 총점이 된다. 점수 스케일은 HIC 650과 HIC 2000의 sliding scale를 이용하였다. 총 23대 차량에 대해 실험한 결과 레벨 3이 7대, 레벨 2가 13대, 레벨 1이 3대이며, 레벨 4, 5에 만족하는 차량은 없었다.

전술한 바와 같이 보행자-차량 충돌 시에 보행자의 상해를 줄이기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 본 연구의 주요 내용인 보행자-차량 충돌 기준을 구성하는 매개변수의 최적값을 도출함에 있어 보행자 사망자수 감소를 고려한 접근은 없었다. 기존의 궁극적인 목적이 보행자의 상해감소라는 것에 비추어 볼 때 본 연구에서 처음으로 시도하는 접근법은 그 의의가 크다고 할 수 있다. 아울러 본 연구에서는 보행자 머리 상해에 초점을 맞추어 성인의 머리를 보호하기 위한 기준 관련 변수를 연구의 범위로 설정하였음을 밝혀둔다.

본 연구의 2장에서는 보행자 사고 관련 일반현황과 보행자 충돌기준에 대한 배경을 제시하며 3장에서는 최적변수를 찾기 위해 제안된 방법론을 설명하고, 이를 구현하기 위해 필요한 여러 가지 모형들의 개발에 관한 내용을 4장에 제시하였다. 5장에서는 개발된 모형을 활용한 실제 적용사례를 설명하며 마지막 6장에서는 연구결과를 요약하여, 본 연구의 한계 및 향후 연구과제에 대한 논의를 하였다.

## 2. 교통사고 일반현황 및 보행자 충돌기준

### 2.1 교통사고 일반현황

우리나라의 교통 발생건수는 급격한 자동차의 증가와 함께 1970년 이후 계속 증가추세를 보이고 있다. 발생 빈도건수의 계속 증가를 보이고 있지만, 인구 10만 명당 발생건수 및 사망자, 부상자수는 감소하고 있다.<sup>1)</sup>

자동차 1만 대당 사망자수는 03년도에 우리나라의 경우 4.1명으로, 일본(1.1명), 영국(1.1명), 독일(1.2명), 캐나다(1.5명), 프랑스(1.7명)에 비해서는 2.4배~3.7배정도 높다. 특히, 차대보행자 사망자는 전체 교통사고 사망자의 40.2%를 차지하고 있다. 보행자 사망자 비율은 일본(30.9%), 영국(21.9%), 독일(12.3%), 캐나다(12.6%), 프랑스(10.3%), 미국(11.1%)이다. 이는 우리나라의 보행자 사망자 비율이 다른 선진국들에 비해 높음을 알 수 있다.<sup>2)</sup>

차 충돌한 후 차량의 본넷에 보행자의 머리가 부딪칠 때의 속도를 나타낸다. 또한 충격각도는 보행자가 차체에 부딪칠 때의 각도를 의미한다. HIC(Head Injury Criteria)은 식 (1)에 의해 계산되는 값으로 머리의 상해정도를 계량화한 지표이다.

$$HIC = \left[ \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

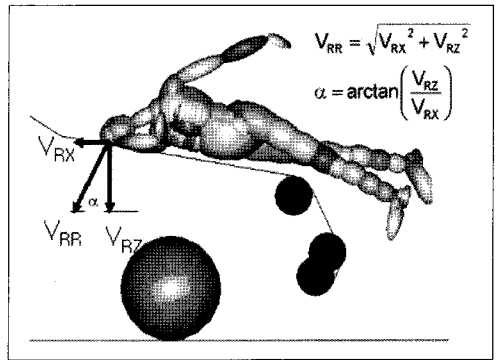


Fig. 2 충격속도, 충격각도

본 연구에서 검토한 보행자 보호를 위한 기준은 편의상 유럽, 일본, 세계기술기준(Global Technology Regulation)로 구분될 수 있다. 유럽은 보행자 보호를 위한 기준이 2003년도에 제정하였다. 유럽의 기준은 1,2단계로 나뉘어져 있으며, 1단계는 2005년 하반기부터 기준이 신차에 대해 적용된다. 한편, 일본에서는 국토교통성이 보행자 보호를 위한 안전기준을 제정하였는데, 이는 IHRA의 연구를 기초로 하여 2005년도 하반기부터 신차에 대해서 우선적으로 머리 부분에 적용이 된다.

현재 유럽과 일본이 보행자 충돌기준을 하나로 통합하고 전 세계적으로 공통의 법규를 제정하기 위해 세계기준기준(GTR) 제정을 준비 중에 있다. Table 1에서는 세계기술기준(GTR), Euro-NCAP, 및 J-NCAP이 제시하고 있는 성인 보행자 충돌안전기준 현황을 정리하였다.

각 국에서 제시한 충돌안전기준을 살펴 보면 충돌속도는 40km/h로 동일하며, 충격속도는 35km/h, 40km/h로 두 가지(안)이 존재한다. 충격각도는 GTR(안)과 Euro-NCAP에서는 65°로 동일한 반면 일본의 경우에는 차종(Sedan, SUV, 1-Box)에 따라 충격각

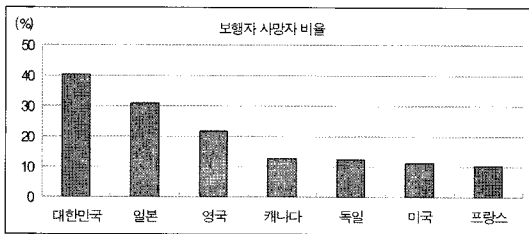


Fig. 1 OECD국가와의 보행자 사망을 비교

### 2.2 보행자 충돌안전기준

본 연구에서 다루는 기준변수는 충격속도, 충격각도, HIC값의 세 가지이다. 이들은 보행자와 차량의 충돌 시 충돌속도에 의해 결정되는 변수로서 충돌속도는 차량과 보행자가 부딪칠 때의 속도를 말하며, 충격속도는 보행자의 다리와 차량의 범퍼가 1

도를 (65°, 90°, 50°)달리하고 있다. HIC값은 GTR(안)은 본넷 영역의 1/3은 1,000, 2/3은 1,700이며, Euro-NCAP은 1,000 ~ 1,700이다. 일본의 경우는 650 ~ 2,000으로 범위가 넓게 설정하였다.

Table 1 성인 충돌안전기준 비교

구분	충돌속도 (km/h)	충격속도 (km/h)	충격각도 (°)	HIC
GTR(안)	40	35	65	1/3:1,000 2/3: 1,700
Euro-NCAP	40	40	65	1,000 ~ 1,700
J-NCAP	40	35	Sedan/SUV/I-Box (65/90/50)	650 ~ 2,000

### 3. 방법론

본 연구에서는 최적의 기준변수 도출 문제를 기준 적용에 따른 보행자 사망자수 감소분을 최대화하는 최적화 문제로 정립하였다. 이를 위해 기준 매개변수들로 구성된 보행자 사망자수 추정 모형을 개발하였다. 국내 도로, 교통 및 차량 특성을 최대한 반영하기 위하여 실제 국내 교통사고 자료를 수집하고 분석하여 모형을 개발하였다.

제안된 방법론의 기본 원리는 충돌속도를 독립변수로 사용하는 보행자 사망자수 감소분 추정 모형을 개발하고, 이를 극대화하는 충돌속도를 도출한

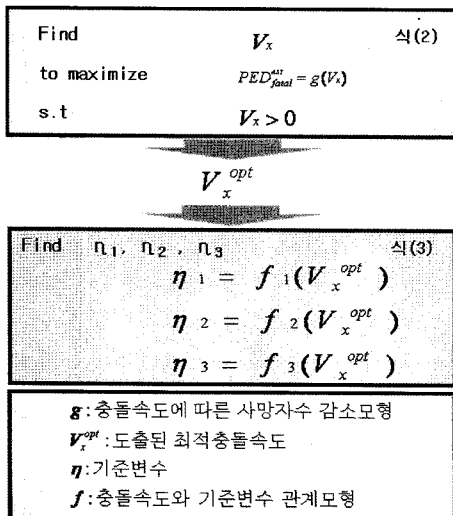


Fig. 3 기준변수 도출 방법론

다. 기준 변수는 충돌속도에 따라 결정되므로 충돌속도와 기준변수간의 관계 모형을 이용하여 최적의 기준 변수를 산출한다. 이를 위해 충돌속도와 기준 변수간의 관계를 모형화하는 작업이 수반되어야 한다. 보행자 감소분( $PED_{fatal}^{est}$ )을 최대화 될 때의  $V_x$ 을 도출하고 이를 이용하여 기준 변수를 찾는 과정은 다음 식(2) 및 식(3)과 같다.

위의 식(2)와(3)에 대한 해법을 찾기 위한 단계별 절차는 Fig. 4와 같다.



Fig. 4 최적변수 도출 흐름도

- step 1 : 충돌속도에 따른 보행자 사망자 감소 모형 개발
- step 2 : 충돌속도와 기준변수(충격속도, 충격각도, HIC) 관계 모형 개발
- step 3 : 보행자 사망자수 감소를 최대화하는 충돌 속도 산출
- step 4 : step3에서 산출된 충돌속도와 step2에 구축된 관계식을 이용하여 최적변수를 도출

### 4. 모형개발

#### 4.1 보행자 사망자수 감소모형

##### 4.1.1 모형의 배경

보행자 사망자수 감소모형은 전체 교통사고 사망자 중 보행자의 머리상해 감소를 위한 충돌안전기준 도입으로 인해 감소하게 될 사망자수를 추정하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서 제안된 방법론은 순차적 top-down 방식으로 사망자수 감소분을 추정

하는 것으로서 도식화하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 표시한 바와 같이 Step 1 ~ Step 4는 기존의 교통사고 통계분석 자료 (1)을 이용하여 추정 가능한 거시적인 변수 값을 이용하여 수행이 가능하다. 그러나 기준에서 포함된 변수를 활용하여 사망자수 감소를 추정하기 위한 핵심 단계인 Step 5를 수행하기 위해서는 별도의 사고분석을 통한 모형개발이 필수적이다. 즉, Step 5의 수행을 위해서는 우선적으로 개별 보행자-차량 충돌사고의 재현을 통해 충돌속도를 추정하고 보행자의 상해정도를 조사해야 한다. 또한, 보다 자세한 parametric 분석을 위해서는 충돌속도를 독립변수, 보행자의 사망 여부를 종속변수로 구성되는 모형의 개발이 필요하다. 또한, Step 5의 수행을 위해서는 HIC 값의 변화에 따른 보행자의 사망여부를 추정할 수 있는 수리적 모형이 필요하다.

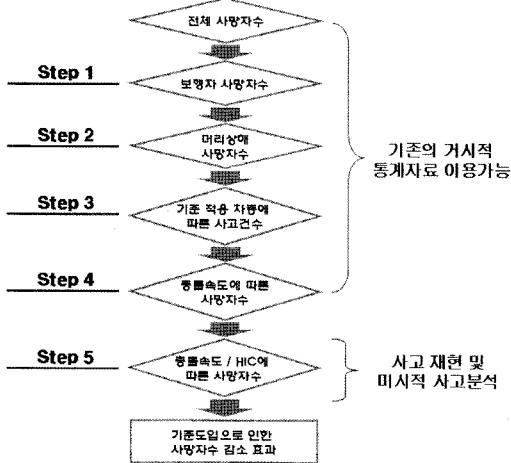


Fig. 5 보행자 사망자수 감소분 추정 단계

Fig. 3에서 도식화한 보행자 사망자수 감소분 그룹추정 방법론을 수식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$PED_{fatal}^{est} = T_p \times R_H \times R_{VT} \times R_{V_{Th}} \times \frac{Pr(F | V_x \leq V^{Th}) \times Pr(S | HIC \leq HIC^{Th})}{Pr(F | HIC \leq HIC^{Th})} \quad (4)$$

여기서,

- $PED_{fatal}^{est}$ : 기준 도입으로 인해 감소될 보행자 사망자수
- $T_p$ : 전체 보행자 사망자수

- $R_H$ : 보행자 사망자 중 머리상해 비율
- $R_{VT}$ : 기준 적용 차종 비율
- $R_{V_{Th}}$ : 보행자 충돌사고 중 충돌속도 ( $V_x$ )가  $V_{Th}$  이하인 비율
- $Pr(F | V_x \leq V^{Th})$ : 기준의 충돌속도( $V_x$ )를  $V^{Th}$  로 설정한 경우 보행자 사망확률
- $Pr(S | HIC \leq HIC^{Th})$ : 기준의 HIC 값을  $HIC^{Th}$  으로 설정한 경우 보행자 생존 확률 ( $1 - Pr(F | HIC \leq HIC^{Th})$ )

#### 4.1.2 보행자 사망확률모형( $Pr(F | V_x)$ )

Binary logistic regression을 이용하여 보행자 사망 확률 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 종속변수가 1을 취하는 경우는 보행자의 사망확률이 1임을 의미한다. logistic regression 모형의 구조는 식 (5)와 같다.

$$P(F_i = 1 | X_i) = \frac{\exp[f(X_i, \beta)]}{1 + \exp[f(X_i, \beta)]} \quad (5)$$

여기서,

- $F_i$ : 보행자-차량 충돌사고  $i$ 의 보행자 사망 ( $F_i = 1$ ) 또는 생존( $F_i = 0$ ) 여부를 나타내는 종속변수
- $X_i$ : 보행자 사망에 영향을 미치는 독립변수
- $f(X_i, \beta)$ :  $X_i$ 와 파라미터  $\beta$ 로 구성된 함수

보행자 사망 모형개발을 위해 SPSS를 사용하였다. 독립변수로는 보행자 충돌안전 기준의 근간이 되는 충돌속도 ( $V_x$ )를 사용하였다. 따라서 SPSS를 이용하여  $V_x$ 의  $\beta$ 와 상수(constant)를 이용한 보행자 사망확률을 예측하는 모형을 개발하였다. 통계적 모형개발 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 충돌속도 기초통계량

Mean	50.10 kph
Std. Error of Mean	2.28
median	45.00
Mode	40.00
Std. Deviation	24.14
Min	4.00
Max	103.00

개발된 모형의  $\beta$ 는 모두 통계적으로 유의하였으며, Chi-square 값 역시 47.526으로 나타나 충돌 속도를 기반으로 한 보행자의 사망확률모형은 주어진 자료를 잘 설명하는 것으로 분석되었다. 아울러, 개발된 모형의 보행자 사망사고의 분류능력(classification performance)은 0.5의 소속도(membership)를 cutoff threshold로 적용하였을 때, 77.2%로 비교적 높게 나타났다. 충돌속도에 따른 보행자 사망확률모형은 식 (6)과 같다. 모형 구축을 위해 적용된 로지스틱 회귀분석 결과는 Table 3에 정리하였다.

$$P(F_i = 1 | X_i) = \frac{1}{1 + \exp[-(-5.433 + 0.095 V_x)]} \quad (6)$$

Table 3 logistic regression 분석 결과

Statistic	$V_x$	Constant
Wald Statistic	25.352	27.591
Standard Error	0.019	1.034
$\beta$	0.095	-5.433
Significance	0.000	0.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Correct classification rate: 77.2%</li> <li>• -2 log likelihood: 84.045</li> <li>• Model Chi-square: 47.526</li> <li>• Nagellerke R-square: 0.515</li> </ul>		

#### 4.1.3 HIC기반 생존확률모형 (Pr(S | HIC))

보행자 사망자수 감소분을 추정 과정 중 Step 5에서 필요로 하는 HIC 값의 변화에 따른 보행자 사망 확률모형을 구축하는 내용을 소개한다. 기존의 관련연구<sup>13)</sup>에서 도식화하여 제시한 HIC 값과 머리상해에 의한 사망확률을 본 연구의 목적을 위해 정식화하는 과정을 수행하였다.

기존 연구<sup>14)</sup>에서 제시한 HIC 값과 사망확률의 mapping 자료를 이용하여 모형 구축을 위한 자료를 구성하고 regression을 이용하여  $\beta$  값을 추정하였다. 보행자 사망자 수 감소분 추정을 위해 필요한 HIC에 따른 보행자 생존확률은  $\Pr(S | HIC) = 1 - \Pr(F | HIC)$ 으로 얻어질 수 있다. 이는 식 (7)과 같다.

$$P(F_i = 1 | X_i) = \frac{1}{1 + \exp[-(-6.162 + 0.00419 \times HIC)]} \quad (7)$$

## 4.2 충돌속도와 기준변수 관계 모형

### 4.2.1 자료수집

실제 보행자 사고 자료로부터 기준 변수를 직결 얻을 수 없으므로 충돌속도에 따른 사망자 모형을 개발한 후, 충돌속도와 기준변수간의 관계 모형은 시물레이션을 이용하여 구축하였다.

차대보행자 사고에서 보행자의 상해에 가장 큰 영향을 주는 변수는 충돌속도이다. 충돌속도에 의해 보행자의 거동 유형이 다양해진다. 보행자의 거동해석은 TNO의 Madymo를 이용하였다.

본 연구에서는 차종을 Sedan, SUV, 1-BOX으로 구분하여, 각 차종별로 두 대의 차량을 시물레이션에 이용하였다. 보행자 모델은 성인모델을 사용하였다. 충돌속도는 10km/h ~ 100km/h 사이에서 충돌 속도를 10km/h 단위로 변화시키며 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션을 통해서 충돌속도에 따른 충격속도, 충격각도, HIC 값을 도출하였다.

Table 4 실험변수

구분	입력변수
차종	총 : 6대 차량 - Sedan : 2대, SUV : 2대, 1-BOX : 2대
보행자모델	성인모델
충돌속도	10km/h ~ 100km/h(10km/h 단위)

### 4.2.2 회귀분석을 이용한 관계 모형 개발

Madymo 시물레이션을 통해 나온 데이터를 이용하여 충돌속도에 따른 머리의 충격속도, 충격각도, HIC값과의 관계식을 회귀분석기법을 적용하여 수식화 하였다. ESV Conference에 발표된 기존 연구의 결과<sup>5)</sup>와 함께 본 연구에서 구축된 모형식을 Table 5에 제시하였다. 아울러 모형 구축과 관련된 통계량을 Table 6에 정리하였다. t-값, 유의수준,  $R^2$  등을 고려할 때 충격속도와 HIC 모형에는 지수모형이, 충격각도에 대해서는 2차모형이 통계적으로 적합한 것으로 분석되었다.

충돌속도가 증가함에 따라 충격속도와 HIC 값은 증가하는 반면 충격각도는 감소하는 것으로 분석되었다. Fig. 6의 모형 비교에서 쉽게 알 수 있듯이, 기존의 ESV 모형이 전반적으로 충돌속도에 따른 기준 변수 값을 높게 추정하는 것으로 나타났다.

Table 5 충돌속도와 충격속도, 충격각도, HIC 관계식

구분	모형	모형식	비고
충돌속도-충격속도	2차 모형	$y = 3.837 + 0.486x - 0.003x^2$	식 (8)
	지수 모형	$y = 10.811 \times \exp(0.022x)$	식 (9)
	ESV	$y = 0.0012x^2 + 0.735x + 6.7085$	식 (10)
충돌속도-충격각도	2차 모형	$y = 79.624 - 1.262x + 0.007x^2$	식 (11)
	지수 모형	$y = 66.458 \times \exp(-0.013x)$	식 (12)
	ESV	$y = -0.6333x + 82.856$	식 (13)
충돌속도-HIC	2차 모형	$y = -163.145 + 3.348x + 0.457x^2$	식 (14)
	지수 모형	$y = 10.579 \times \exp(0.069x)$	식 (15)
	ESV	$y = 876x^2 - 85.102x + 1801.9$	식 (16)

Table 6 t값, 유의수준, 결정계수

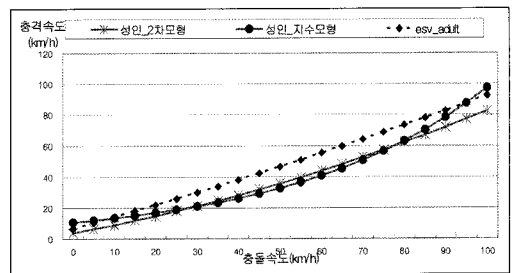
구분	모형	t	Sig.	R <sup>2</sup>	adjust R <sup>2</sup>	
충돌속도 vs. 충격속도	2차 모형	충격속도	2.381	0.021	0.89	0.89
		충격속도 <sup>2</sup>	2.067	0.043		
		상수	0.683	0.497		
	지수 모형	충격속도	23.046	0.000	0.90	0.90
		상수	14.771	0.000		
	ESV				0.93	
충돌속도 vs. 충격각도	2차 모형	충돌속도	-5.830	0.000	0.69	0.68
		충돌속도 <sup>2</sup>	3.770	0.000		
		상수	13.758	0.000		
	지수 모형	충돌속도	-8.463	0.000	0.59	0.59
		상수	9.616	0.000		
	ESV				0.83	
충돌속도 vs. HIC	2차 모형	충돌속도	0.150	0.881	0.68	0.67
		충돌속도 <sup>2</sup>	2.315	0.024		
		상수	-0.306	0.761		
	지수 모형	충돌속도	11.433	0.000	0.69	0.69
		상수	2.683	0.009		
	ESV				0.55	

### 5. 적용

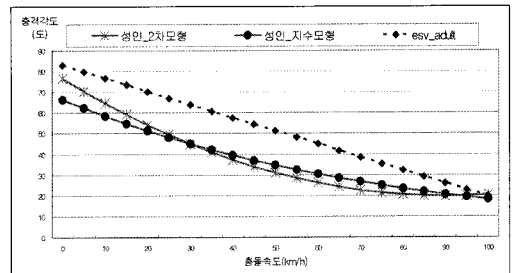
#### 최적 매개변수 도출

본 연구에서 개발된 보행자 사망자수 감소 모형은 식 (4)와 같이 충돌속도와 HIC와의 이루어진 함수식으로서, 식 (15)를 적용하여 충돌속도만의 함수로 변환한다. 변환된 식 (17)로부터 충돌속도를 최대화하는 값을 도출한다. 도출된 충돌속도를 이용하여 충돌속도와 기준변수(충격속도, 충격각도, HIC)와의 관계식 (9), (11), (15)에 대입하여 각 기준변수들의 값을 산출한다.

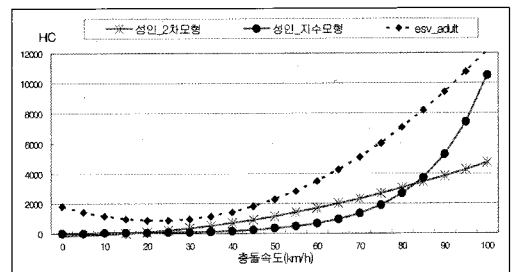
- 보행자 사망자 감소 모형



(a) 충돌속도-충격속도



(b) 충돌속도-충격각도



(c) 충돌속도-HIC

Fig. 6 충돌속도와 기준변수와의 관계식

$$\begin{aligned}
 PED_{fatal}^{est} &= T_p \times R_H \times R_{VT} \times \Pr(F | V_x \leq V_x^{Th}) \times \Pr(HIC \leq HIC^{Th}) \\
 &= 2,896 \times 0.713 \times 0.790 \times 0.75 \\
 &\quad \times \left( \frac{1}{1 + \exp(5.433 - 0.0095 \times V_x)} \right) \\
 &\quad \times \left( 1 - \frac{1}{1 + \exp(6.162 - 0.00419 \times HIC)} \right) \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PED_{fatal}^{est} &= 2,896 \times 0.713 \times 0.790 \times 0.75 \times \left( \frac{1}{1 + \exp(5.433 - 0.0095 \times V_2)} \right) \\
 &\times \left[ 1 - \frac{1}{1 + \exp(6.162 - 0.00419 \times (10.579 \times \exp(0.069 \times V_2)))} \right]
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

식 (17)에서  $PED_{fatal}^{est}$  을 극대화 하는 충돌속도는 65.4km/h가 되며, 이를 이용하여 산출된 충격속도, 충격각도, HIC값은 각각 45.58km/h, 27.03°, 964.37이다.

최적의 기준변수 산출을 위한 충돌속도는 65.4 km/h로서, 기존의 GTR(안), Euro-NCAP, JNCAP의 40km/h 보다 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 수집한 국내 보행자-차량 충돌사고가 비교적 높은 수준의 충돌속도에서 발생한 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, ESV 모형을 적용한 경우 38.15km/h의 충돌속도를 얻게 되어 기존의 기준들에서 설정한 40km/h와 근사한 값을 갖게 된다. Table 7에 기존의 기준들에서 제시하는 값과 본 연구에서 도출한 값을 비교하였다.

본 연구에서 제시한 기준 변수값은 보행자의 안전 측면만을 고려한 것이다. 이는 기존의 충돌속도 40km/h를 적용한 기준의 경우 보다 매우 엄격한 수준의 기준이 될 수 있다. 현재의 기술수준으로는 달성이 불가능 할 수도 있다. 따라서 현장에 바로 적용 가능한 보다 현실적이고 효과적인 기준을 개발하기 위해서는 차량기술의 현재 수준을 충분히 반영해야 할 것이다. 본 연구에서 제시한 값은 향후 보행자 안전을 위해 궁극적으로 달성해야 할 기준 변수 값으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

Table 7 성인 충돌안전기준 비교

구분	충돌 속도 (km/h)	충격 속도 (km/h)	충격각도 (°)	HIC	
모형	ESV	38.15	36.50	58.70	1302.51
	모형	65.4 (지수)	45.58 (지수)	27.03 (2차)	964.37
GTR(안)	40	35	65	1/3: 1,000 2/3: 1,700	
Euro-NCAP	40	40	65	1,000 ~ 1,700	
J-NCAP	40	35	Sedan/SUV /I-Box (65/90/50)	650 ~ 2,000	

## 6. 결론

본 연구에서는 보행자 보호를 위한 NCAP의 근간이 되는 보행자의 머리 상해 감소를 위한 충돌안전 기준의 매개변수를 최적화하는 방법론을 처음으로 개발하고 적용 예를 제시하였다. 이를 위해 실제 교통사고 자료 및 시뮬레이션 자료의 분석 및 모형개발을 병행하여 수행하였다. 보행자 사망자 감소를 최대화할 수 있는 충돌속도를 산출하고, 이를 기반으로 기준의 주요 변수인 충격속도, 충격각도, HIC 값을 도출하였다.

보행자 성인 머리를 대상으로 연구를 수행하였으며, 보행자 사망확률모형, 충돌속도와 기준 변수 관계모형 등을 개발하고, 제안된 방법론에 적용하였다. 결과물로 얻어진 충돌속도는 65.4km/h, 충격속도는 45.58km/h, 충격각도는 27.03°, HIC값은 964.37인 것으로 확인되었다.

현시점에서 보다 현실적이고 효과적인 기준의 개발 및 현장 적용을 위해서는 본 연구의 주요 관심사였던 보행자의 안전 측면뿐만 아니라 현재의 차량기술에 대한 검토(technical feasibility)도 함께 고려해야 함을 밝혀 둔다. 본 연구 결과는 향후 보행자의 안전을 극대화하기 위해 궁극적으로 달성해야 하는 벤치마크 값으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

보행자 안전을 위한 기준의 변수를 최적화하기 위한 새로운 접근 방법을 제시한 본 연구가 갖는 의의는 대단히 크다고 할 수 있다. 그러나 연구결과와 신뢰성 향상을 위해서는 국내 교통사고 자료 수집 및 관리체계의 지속적인 개선을 통해 보다 정확하고 자세한 자료의 수집이 용이해야 할 것이다. 아울러 다양한 모형개발 및 시뮬레이션을 통해 연구결과를 보다 일반화하기 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 건설교통부의 국가교통핵심사업으로 수행된 과제임.



References

- 1) 도로교통안전관리공단, 2004년판 교통사고 통계분석, 도로교통안전관리공단, 2004.
- 2) 도로교통안전관리공단, OECD회원국 교통사고 비교, 도로교통안전관리공단, 2005.
- 3) 김종혁, “컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보행자 충돌 선회특성에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제20권 제2호, pp.81-92, 2002.
- 4) S. Park, “Numerical Analysis on the Variation Effect of Initial Condition for Lower Legform-to-Bumper Impact in Pedestrian Protection for SUV,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.640-644, 2005.
- 5) J. Yang, “Correlation of Different Impact Conditions to the Injury Severity of Pedestrians in Real World Accidents,” 19th International Technical Conference, Enhanced Safety of Vehicle, pp.277-284, 2005.
- 6) 윤영한, 국내 차량형상에 대한 보행자 머리 및 다리의 상해값 분석, Maymo User Meeting, TNO Automotive Korea Ltd., 2005.
- 7) 유장석, “최적화방법을 이용한 보행자 충돌 사고 재현기법 개발”, 대한교통학회지, 제20권 제3호, pp.105-113, 2002.
- 8) J. Lee, “Hood and Bumper Structure Design Methodology for Pedestrian Regulation,” Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.162-170, 2005.
- 9) K. Lee, “The Study on Developing Active Hood Lift Mechanism for Decreasing Pedestrian Head Injury,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.706-710, 2005.
- 10) K. Nagatomi, “Development and Full-scale Dummy Tests of a Pop-up Hood System for Pedestrian Protection,” 19th International Technical Conference, Enhanced Safety of Vehicle, pp.212-216, 2005.
- 11) C. Kerkeling, “Structural Hood and Hinge Concepts for Ppedestrian Pprotection,” 19th International Technical Conference, Enhanced Safety of Vehicle, pp.379-389, 2005.
- 12) Y. Ono, “Introduction of pedestrian head protection performance test in J-NCAP,” 19th International Technical Conference, Enhanced Safety of Vehicle, pp.235-244, 2005.
- 13) D. N. Schmidt and D. A. Nagel, “Pedestrian impact case study,” Proceeding of 15th Conference Association for Automotive Medicine, 1971.
- 14) H. J. Mertz, P. Prasad and A. L. Irwin, “Injury Risk Curve for Children and Adults in Frontal and Rear Collisions,” SAE 97318, 1997.