

■ 論 文 ■

최적화방법을 이용한 보행자 충돌사고 재현기법 개발

A Method for Pedestrian Accident Reconstruction Using Optimization

유 장 석

(한양대학교 교통공학과 박사과정)

홍 을 표

(한양대학교 기계설계학과 박사과정)

장 명 순

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

박 경 진

(한양대학교 기계정보산업공학부 교수)

손 봉 수

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구배경 및 목적
 - 2. 연구범위 및 방법
- II. 이론적 고찰
 - 1. 보행자 선회특성
 - 2. 기존 분석모형의 문제점
- III. 최적화기법의 도입
 - 1. 최적설계기법
 - 2. 최적화모형
- 3. 모의충돌실험결과와 최적화 알고리즘의 조합
- IV. 최적화기법을 이용한 보행자 충돌사고 분석 기법개발
 - 1. 최적화모형의 정식화
 - 2. 설계변수범위설정
 - 3. 최적화수행결과분석
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words : Pedestrian, Reconstruction, Velocity, Optimization, VisualDOC

요 약

기존 보행자 충돌사고 분석모형식은 모형식에 따라 분석결과에 대한 오차가 크게 발생하여 실용성에 많은 문제점을 내포하고 있다. 본 연구는 충돌 후 보행자의 최종정지위치를 이용하여 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 최적화방법으로 분석하는 기법을 개발하였다. 충돌 후 보행자의 동역학적 선회특성에 대한 분석은 승객거동 해석 프로그램인 MADYMO를 이용하여 모의충돌실험을 통해 분석하였다. 모의충돌실험을 통해 분석된 보행자 가슴 및 머리부위의 최종정지위치와 실제사고에서 보행자 머리 및 가슴부위의 최종정지위치와의 차를 목적함수로, 차량충돌속도와 보행자 충돌위치를 설계변수로 정의하여 이를 최소로 수렴하는 최적화 모형식을 정식화한 후 최적설계 전문 소프트웨어인 VisualDOC2 프로그램을 이용하여 반응표면근사최적화기법으로 목적함수를 최소로 수렴하는 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 분석기법을 개발하였다. 최적화기법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 분석기법을 이용하여 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 분석한 결과, 기존 분석모형식에 비해 분석 오차가 매우 낮아 보다 정확하고 과학적인 분석기법인 것으로 연구결과 도출되었다. 따라서, 추후 보행자 충돌사고를 분석함에 있어 기존 분석모형식이 아닌 보행자 선회특성을 고려한 최적화기법을 이용하여 보다 신속하고 정확한 분석을 수행함으로써 사고당사간의 의견대립으로 인한 시간적, 경제적 비용의 최소화는 물론 사고관련자의 권익을 보호할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 한국과학기술재단 지정 첨단도로연구센터/최적설계신기술센터의 연구비지원으로 수행되었음.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

최근 5년간(1996년~2000년) 연평균 258,443건의 교통사고가 발생하여 연평균 11,064명이 사망하고 359,723명의 부상자가 발생하였다. 이중 보행자사고는 전체교통사고의 29.4%에 해당하는 연평균 75,905건이 발생하여 연평균 4,121명이 사망하고 77,057명의 부상자가 발생하는 결과를 초래 하였다.¹⁾ 이와 같이 보행자 교통사고는 인간의 생명과 직결되는 결과를 초래하여 치사율이 37.3%로 교통사고 중 가장 높음에도 불구하고 보행자사고 예방을 위한 연구가 선진외국에 비해 상당히 낙후되어 사고원인을 과학적으로 정확히 규명되지 못하고 있어 사고당사간에 끝없는 의견대립으로 사고처리를 위한 막대한 시간적, 경제적 손실은 물론 정신적인 고통으로 인한 피해가 심각한 실정이다.

보행자충돌사고의 경우 가장 중요한 사안은 자동차와 보행자가 어느 지점에서 얼마의 속도로 충돌하였는가에 대한 것이다. 보행자 충돌사고에서 차량충돌속도와 보행자충돌위치를 분석하기 위한 모형식은 이미 많은 전문가에 의해 개발되었으나 모형식을 적용하기 위한 자료수집의 정확성은 물론 모형식에 따라 분석결과에 대한 오차가 크게 발생하여 실용성에 많은 문제점을 내포하고 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 보행자 충돌사고시 자료수집의 정확성이 가장 높은 충돌 후 보행자의 최종정지위치를 이용하여 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 최적화방법을 이용하여 분석하는 보행자 충돌사고 재현기법을 개발하고자 한다.

2. 연구범위 및 방법

보행자 충돌사고시 차량충돌속도와 보행자충돌위치를 최적화방법을 이용하여 분석하는 기법을 개발하기 위해서는 우선적으로 충돌 후 보행자 선회특성을 알아야 한다.

보행자 선회특성을 분석하는 방법은 폴 스케일 테스트, 키포넌트 테스트, 컴퓨터 시뮬레이션 테스트 등이 있다.²⁾ 이 중 충돌 후 보행자 선회특성을 분석하기 위한 최선의 방법은 실제보행자를 대상으로 한 충돌

실험 또는 보행자 더미를 이용한 폴 스케일 테스트를 수행하는 것이다. 그러나 실제 보행자를 대상으로 한 충돌실험은 인간의 생명과 직결되는 사안이므로 절대 불가하고, 보행자 더미를 이용한 폴 스케일 충돌실험은 경제적인 제약, 장소적인 제약 등 많은 제약요소가 따른다. 따라서, 위와 같은 제약요소를 최소화하고 연구효과를 극대화하기 위하여 보행자 선회특성에 대한 분석은 자동차 개발시 안전도평가를 위해 사용하는 승객거동해석 전문 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 MAThematical DYnamical Models(MADYMO)⁷⁾을 이용, 충돌 후 보행자의 동역학적 선회특성 및 비행특성을 컴퓨터 시뮬레이션 테스트 방법인 모의충돌실험을 통해 분석하였다.

보행자충돌사고의 70%~80%는 승용차에 의해, 충돌속도 30Km/h~40Km/h 범위 내에서 발생하는가 하면 보행자 충돌사고의 75%는 차량정면으로 보행자 측면을 충돌한다. 따라서, 본 연구범위는 승용차 대 보행자 충돌사고로서 차량정면으로 보행자 측면을 60Km/h 이하의 속도로 충돌하는 보행자충돌사고에 대한 분석기법을 연구하였다.

충돌 후 보행자 선회특성과 최적화기법을 이용한 보행자 충돌사고 분석기법을 개발하기 위하여 실제사고에서 보행자 머리 및 가슴부위의 최종정지위치와 모의충돌실험을 통해 분석된 보행자 가슴 및 머리부위의 최종정지위치와의 차를 목적함수로, 보행자 충돌시 차량충돌속도와 보행자 충돌위치를 설계변수로 정의하여 이를 최소로 수렴하는 최적화 모형식을 정식화하였다. 정식화한 최적화 모형식은 최적설계 전문 소프트웨어인 VisualDOC2 프로그램을 이용하여 반응표면근사최적화기법으로 목적함수를 최소로 수렴하는 차량충돌속도 및 보행자 충돌위치를 분석하는 최적화 방법을 이용한 보행자 충돌사고 분석기법을 개발하였다.

II. 이론적 고찰

기존 보행자 충돌사고분석모형은 김종혁의 5명에 의해 연구된 "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보행자 충돌 선회특성에 관한 연구⁵⁾"에서 정리된바와 같이 Schmidt & Nagel 모형¹¹⁾, Stcherbatchef 모형¹²⁾, Collins & Morris 모형¹³⁾, Limpert 모형¹⁴⁾, 하야시 히로시(林洋)의 모형¹⁵⁾ 등이 있으며, 기존 보행자 충돌사고 분석

모형식을 적용하여 충돌속도별(10Km/h~60Km/h) 충돌 후 보행자 이동거리에 대한 분석결과와 기존 분석모형식의 문제점을 요약하여 기술하면 다음과 같다.

1. 보행자 선회특성

보행자 선회특성을 분석하기 위한 모의충돌실험차량 모델링은 충돌 후 보행자 선회특성과 이동거리에 직접적인 영향을 미치는 차량 범퍼높이, 범퍼 리드 각(Lead Angle), 후드(Hood Edge) 높이, 후드길이, 보행자 충돌부위 등을 고려하여 3차원으로 차량전체 형상을 모델링하였다. 또한, 실제 보행자 더미 충돌실험 자료를 이용하여 차량전면의 힘-변형량(Force-Deflection, F-D)곡선에 대한 특성을 보정하며 모의충돌실험차량을 모델링하였다.

반면, 모의충돌실험용 보행자 더미를 모델링함에 있어 우리 나라 보행자 사망사고 발생률이 가장 높은 연령층은 만18세~만20세로써 평균신장은 171.4cm, 평균체중은 75.0Kg이다. 따라서, 모의충돌실험용 보행자 더미에 대한 모델링은 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 제작사에서 개발한 보행자 더미 중 우리 나라 보행자 사망사고 발생률이 가장 높은 연령층의 평균신장에 가장 유사한 신장 174.2cm, 체중 75.7Kg의 특징을 가진 보행자 표준 더미를 사용하였다.

모의충돌실험차량과 보행자 더미를 이용하여 컴퓨터 모의충돌실험을 수행한 결과, 보행자의 선회특성을 수평이동특성과 수직이동특성으로 구분하여 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 충돌후 보행자의 수평이동특성은 차량충돌속도가 30Km/h일 경우 7.9m, 60km/h일 경우 가슴부위는 26.9m, 머리부위는 26.7m이다.

둘째, 충돌 후 수직이동특성은 충돌속도가 30Km/h일 경우 충돌 후 0.6초에 보행자 무게중심의 높이가 최고점에 달한 후 1.02초에 노면에 낙하하여 1.7초에 보행자가 최종위치에 완전히 정지한 반면, 충돌속도가 60Km/h일 경우 보행자는 공중에서 한바퀴이상을 회전하며 0.58초에 보행자의 무게중심이 최고점에 달하고 1.52초에 지면에 낙하하여 2.0초에 완전히 정지하였다.

이와 같이 충돌 후 보행자는 충돌속도에 따라 고유의 선회특성을 나타내며 비행·활주한 후 최종정지한다.

2. 기존 분석모형의 문제점

기존 보행자 충돌사고 분석모형식은 충돌 후 보행자 이동거리, 보행자 노면마찰계수, 보행자 무게중심높이, 차량 감속도 등의 변수를 이용하고 있다. 이와 같은 변수를 이용하여 분석하는 기존 분석모형식의 문제점을 정리하면 첫째, 충돌 후 보행자는 충돌속도에 따라 특유의 회전운동과 포물선운동을 병행하며 선회·비행함에도 불구하고 기존 분석모형식은 충돌속도별 선회특성을 고려하지 않고 충돌 후 보행자는 충돌속도에 관계없이 단지 2차원 포물선운동만을 하며 비행하는 것으로 가정하여 모형식을 개발하였다.

둘째, 기존 분석모형식을 이용하여 충돌속도별 보행자 이동거리를 분석한 결과, 충돌속도가 높을수록 충돌 후 보행자 이동거리에 대한 분석편차가 분석모형식에 따라 최소 2.43m, 최고 15.2m가 발생하여 분석오차가 최대 68.3%가 발생하는 문제점을 내포하고 있다.

셋째, 기존 분석모형식을 이용하여 차량충돌속도를 분석하기 위해 사용하는 충돌 후 보행자 이동거리는 보행자 충돌위치와 최종정지위치에 대한 정보를 정확히 수집할 수 있을 때만이 분석이 가능하다. 그러나, 보행자 충돌위치에 대한 정보는 주로 목격자에게 의존하고 있는 실정이다. 보행자 충돌사고의 경우 충돌에서부터 보행자가 최종정지하기까지 소요되는 시간은 약 0.8초~약1.5초 이고²³⁾, 보행자에게 충격력이 가해지고 차량속도가 급격히 변화하는 시간은 약 0.2초인데 반해, 인간이 무엇이 일어날 것인가를 예견하고 발견하기까지는 약 0.2초가 소요되고, 무엇이 일어날 것인가를 예견치 않고 이를 발견할 때까지는 2초 정도가 소요 된다.¹⁴⁾ 따라서, 사고상황을 정확히 목격하고 진술한다는 것은 매우 회박하므로 목격자의 진술내용에 대한 신빙성이 저하됨에도 불구하고 보행자충돌위치에 대한 정보를 목격자에게 의존하여 분석해야만 하는 문제점을 내포하고 있다.

III. 최적화기법의 도입

1. 최적화 기법

최적화기법은 설계변수(design variable)와 목적함수(cost function)의 최소값(minimum)이나 최대값(maximum)을 찾아내는 기법으로 함수의 미분 값

을 이용하는 방식인 민감도법과 같은 수학적 방법과 이차근사법, 반응표면근사최적화기법(Response Surface Approximation Optimization)등과 같은 근사함수를 이용하는 방법이 있다.

최적화방법 중 수학적 방법은 비선형계획법을 이용하여 비선형성을 가지는 함수를 반복적으로 선형화 함으로써 최적해에 접근하는 방식이다. 따라서, 보행자 선회특성과 같이 비선형성이 심하고 노이즈가 심한 경우에는 민감도를 구하기 어렵고, 구하였다하더라도 부정확한 경우가 많으므로 민감도를 이용하는 경우 결과에 대한 신뢰성이 낮다는 단점이 있다.

근사함수를 이용하는 방법 중 이차근사법은 설계변수의 함축함수(implicit function)를 테일러 급수(Taylor series)의 2차 항까지 전개하여 명시함수형태(explicit function)의 근사함수로 변형시켜 설계변수의 이동범위제한(move limit)을 만족하며 반복 진행함으로써 최적해를 분석하는 알고리즘으로 이에 대한 성능 및 유용성은 이미 기존 연구를 통하여 확인되었으나, 근사함수를 보정함에 있어 항상 모든 항들을 보정하여야 하기 때문에 함수의 계산회수가 많다는 단점이 있다.

반면, 이차근사법과 유사한 방식인 반응표면근사최적화기법은 근사함수의 보정에 있어 모든 항을 보정해 나가는 것이 아니라, 상수항, 일차항, 이차항 순서로 단계적으로 항들을 보정해 나가면서 최적화를 수행하는 변형된 이차근사법의 형태를 취하고 있어 함수 계산이 어렵고 해석 시간이 긴 문제에 적용하기 적합한 알고리즘으로 비선형성이 강한 보행자자동해석과 같은 분야에 적합하다. 따라서, 본 연구에서는 보행자 충돌위치 및 차량 충돌속도에 대한 최적해를 도출하기 위해 Vanderplaates에 의해 제안된 반응표면근사최적화기법(Response Surface Approximation Optimization)을 이용하였다.

반응표면근사최적화기법은 다음과 같은 과정으로 최적화를 수행한다. 먼저 몇 개의 초기함수 값을 이용하여 목적함수에 대한 근사함수를 생성한 후 생성된 근사함수의 최적해를 도출, 근사함수의 최적해와 목적함수를 비교하여 수렴여부를 검토한 후 최적화를 계속할 것인지를 결정한다. 만약 근사함수의 최적해가 목적함수를 수렴하면 최적화는 종료되지만, 수렴하지 않는 경우에는 근사최적해의 함수 값을 이용하여 목적함수를 수렴할 때까지 계속해서 반복하여 최

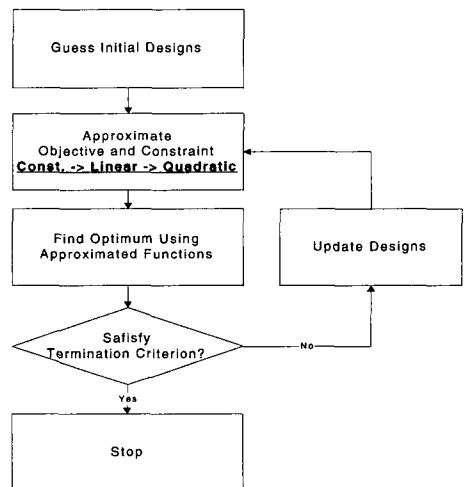
적화를 수행한다. 이와 같은 반응표면근사최적화기법에서 사용하는 근사함수식을 테일러 급수 전개이론을 적용하여 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$F(X) = F(X^0) + \nabla F(X^0)\delta X + \frac{1}{2} \delta X^T [H(X^0)]\delta X + \dots \quad (1)$$

위 식에서 F(X)는 임의의 설계점 X⁰에서 목적함수 또는 구속조건 함수이다. 즉, 최적화를 위한 설계변수(충돌속도와 충돌위치)들의 초기상태이고, F(X⁰)는 X⁰에서의 F에 대한 함수 값이며 ∇F(X⁰)는 함수 [F(X⁰)]의 변화량(gradient)으로 F(X⁰)를 1차 미분한 결과 값이다. H(X⁰)는 헤시안 행렬(hessian matrix)을 표시하며 F(X⁰)에 대한 2차 미분한 결과 값이다. X에 대한 변화량을 나타내는 δX는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta X = X - X^0 \quad (2)$$

이와 같이 반응표면근사최적화기법은 최적화 과정에서 각각의 단계에서 변화량 값을 보정해 나가는 것이 아니라 위 식(1)을 이용하여 완전한 최적화를 수행하므로 함수계산의 수를 줄일 수 있는 장점이 있어 비선형성이 심해 민감도 해석이 어려운 분야에서 사용하는 기법이다. <그림 1>은 반응표면근사최적기법을 이용하여 최적화를 수행하는 과정이다.¹⁹⁾



<그림 1> 반응표면근사법의 최적화 수행과정

2. 최적화모형

충돌 후 보행자의 최종정지위치를 이용, 차량충돌 속도와 보행자 충돌위치에 대해 최적화를 수행하기 위한 최적화 모형식은 식(3)과 같다. 즉, 차량충돌 속도와 보행자충돌위치를 설계함수로 하고 모의충돌실험을 통하여 얻어진 보행자 머리 및 가슴부위의 최종 위치와 실제 보행자의 머리 및 가슴부위의 최종정지 위치와의 차를 목적함수로 정의하여 이를 최소화하는 최적화모형식을 정식화하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } v_i, x_i, y_i \\ & \text{To minimize } (x_{f,r} - x_{f,s})^2 + (y_{f,r} - y_{f,s}) \quad (3) \end{aligned}$$

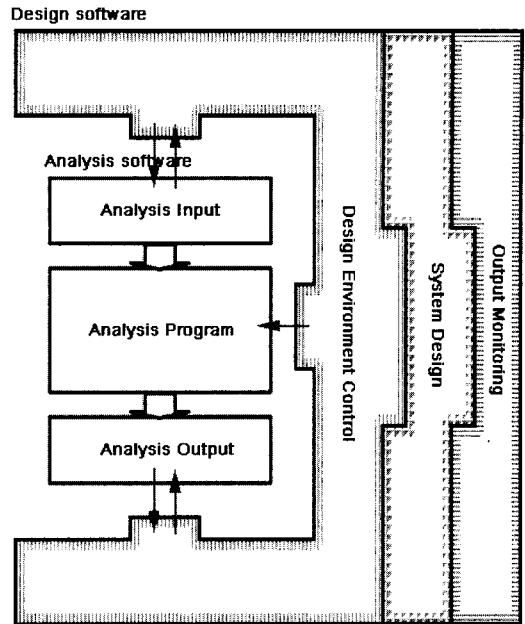
Subject to

$$\begin{aligned} v_{il} & \leq v_i \leq v_{iu} \\ x_{il} & \leq x_i \leq x_{iu} \\ y_{il} & \leq y_i \leq y_{iu} \end{aligned}$$

- v_i : 차량 충돌속도
- x_i, y_i : 보행자 충돌위치
- v_{il}, x_{il}, y_{il} : 각 함수의 low bound
- v_{iu}, x_{iu}, y_{iu} : 각 함수의 upper bound
- $x_{f,r}$: 실제 보행자 최종정지위치(x 방향)
- $y_{f,r}$: 실제 보행자 최종정지위치(y 방향)
- $x_{f,s} = x_{f,s}(v_i, x_i, y_i)$: 모의충돌실험을 통하여 분석된 보행자 최종낙하위치(x 방향)
- $y_{f,s} = y_{f,s}(v_i, x_i, y_i)$: 모의충돌실험을 통하여 분석된 보행자 최종낙하위치(y 방향)

3. 모의충돌실험결과와 최적화 알고리즘의 조합

모의충돌실험을 통해 도출된 보행자의 최종정지 위치를 이용하여 최적화를 수행하기 위해서는 최적화 알고리즘과 모의충돌실험 결과를 조합하는 과정이 선행되어야 한다. 과거에는 모의충돌실험을 통해 분석된 결과를 최적화 알고리즘과 조합하기 위하여 연구자가 직접 프로그램을 작성하였으나, 최근에는 모의 충돌 시뮬레이션 소프트웨어와 직접 연결하여 최적화를 수행하는 기능을 가진 소프트웨어들이 많이 개발되었다. 따라서, 본 연구에서는 후자인 모의충돌 시뮬



〈그림 2〉 충돌실험결과와 최적설계알고리즘의 조합과정

레이션 소프트웨어의 입/출력 파일에 접근하여 분석 데이터를 교환함으로써 자동적으로 최적화를 수행할 수 있고 또한, 본 연구에서 선택한 반응표면근사최적화 알고리즘을 가지고 있는 최적설계 전문 소프트웨어인 VisualDOC을 사용하였다. 즉, 보행자 충돌해석 프로그램과 최적설계 프로그램을 〈그림 2〉에서와 같은 과정으로 조합하여 최적화를 수행하였다.⁸⁾

IV. 최적화기법을 이용한 보행자 충돌사고 분석기법 개발

1. 최적화모형의 정식화

차량 충돌속도 및 보행자 충돌위치를 분석하기 위한 최적화 모형의 정식은 〈표 1〉에서와 같이 실제 보행자의 최종정지위치는 더미충돌실험 자료를 이용하여 충돌상황을 모델링한 후 모의충돌실험을 수행한 결과를 이용하였고, 모의충돌실험에 의한 충돌 후 보행자의 최종정지위치는 임의의 충돌속도로 모의충돌실험을 수행하여 충돌 후 보행자 가슴 및 머리부위의 최종정지위치특성을 이용하여 최적화를 위한 모형식을 정식화하였다. 즉, 시속 60Km의 속도로 주행하던 자동차가 보행자를 충돌한 경우에 대하여 모의충돌실험을

〈표 1〉 최적화 모형정식

가슴 (Sternum)	$1000 \cdot (26.9 - x_{f,s})^2 + 10000 \cdot (1.8 - y_{f,s})^2$
머리 (Head)	$1000 \cdot (26.7 - x_{f,s})^2 + 10000 \cdot (2.1 - y_{f,s})^2$

수행한 결과, 보행자의 최종정지위치 특성은 가슴부위는 충돌지점으로부터 x축으로 26.9m, y축으로 1.8m 이고 머리부위는 x축으로 26.7m, y축으로 2.1m 이 동한 후 최종정지하였다. 이와 같이 보행자와 차량이 60Km/h의 속도로 충돌한 사고에 대하여 모의충돌실험을 수행한 결과 보행자 머리와 가슴부위의 최종정지위치를 실제 사고에서 보행자의 최종위치로 설정하였고 또한, 임의의 속도로 모의충돌실험을 실시하여 분석된 보행자 가슴 및 머리부위의 최종정지위치와의 차를 최소화하는 차량충돌속도와 보행자충돌위치를 분석하기 위한 최적화 모형식을 〈표 1〉과 같이 정식화하였다.

최적화를 수행함에 있어 식(3)의 모형식을 이용하는 경우 최적해(Optimum)로 접근해 갈수록 목적함수의 값이 0(zero)으로 가까워진다. 이 경우 컴퓨터의 수치해석 오차보다 작은 값이 발생하여 최적화를 제대로 수행하기가 어려워 질 수 있다. 따라서, 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 〈표 1〉에서와 같이 함수식 앞에 x축에 대해서는 1000을, y축에 대해서는 10000을 각각 곱하여 최적화정식을 보정하였다.

2. 설계변수의 범위설정

모의 충돌실험을 통해 분석된 보행자의 최종정지위치를 이용, 최적화 모형식을 정식화한 후 반응표면근사 최적화기법으로 실제 차량충돌속도와 보행자충돌위치를 분석하기 위하여 설계변수인 차량충돌속도(v)와 보행자 충돌위치(x축 위치, y축 위치)의 초기 값 및 설계변수범위(Lower Bound, Upper Bound)를 〈표 2〉에서와 같이 변화해 가며 연구를 수행하였다. 즉, 최적화를 위한 초기 충돌속도(V)는 ± 5 Km/h 단위로 변화해가며 분석하였고, 최적화 범위는 최소(Lower Bound) 20Km/h에서부터 최대(Upper Bound) 90Km/h까지의 범위에 대해서 최적화를 수행하였으며, 보행자 충돌 x축의 위치는 설계변수인 초기위치와 Lower Bound는 모의충돌실험위치(2.0m)에서부터 ± 0.5 m단위로,

〈표 2〉 설계변수범위 및 모의충돌실험범위 설정

case	구분	Design Variable		
		Lower	Initial	Upper
1	V(속도, Km/h)	55	65	70
	x-pos(m)	1.5	2.5	3.0
	y-pos(m)	0.5	1.5	2.0
2	V(속도, Km/h)	50	70	80
	x-pos(m)	1.0	3.0	4.0
	y-pos(m)	0.0	1.5	2.0
3	V(속도, Km/h)	45	75	90
	x-pos(m)	0.5	3.5	5.0
	y-pos(m)	0.0	2.0	3.0
4	V(속도, Km/h)	50	55	65
	x-pos(m)	1.0	1.5	2.0
	y-pos(m)	0.6	0.8	1.2
5	V(속도, Km/h)	40	50	70
	x-pos(m)	0.5	1.0	2.5
	y-pos(m)	0.4	0.6	1.4
6	V(속도, Km/h)	30	45	75
	x-pos(m)	0.0	0.5	3.0
	y-pos(m)	0.2	0.4	1.6
7	V(속도, Km/h)	20	40	80
	x-pos(m)	0.0	0.5	2.5
	y-pos(m)	0.0	0.2	1.8

Upper Bound는 초기위치로부터 ± 0.5 m 단위로 변화해가며 0.0m~5.0m 범위에 대하여 최적화를 수행하였다.

반면, 보행자 충돌 y축 위치에 대해서는 설계변수의 초기 값뿐만 아니라 Lower & Upper Bound 모두 모의충돌실험조건(1.0m)으로부터 ± 0.2 m단위로 변화해가며 0.0m~3.0m 범위에 대하여 최적화를 수행하였다.

이와 같이 설계변수의 범위를 충돌속도에 대해서는 최대 90Km/h까지로 한 이유는 보행자가 이용할 수 있는 도로의 최대속도는 현재 80Km/h 이하이기 때문이고, 보행자 충돌 x축의 범위를 최대 5m로 한 것은 현행 횡단보도의 기본 폭이 4m인 점과 보행자 충돌사고시 횡단보도 여부에 대한 논란의 대상이 되는 보행자 충돌사고는 대부분 횡단보도와 근접한 거리(약 1m~2m)에서 발생한 사고이므로 5m이상에 대해서는 고려하지 않았다.

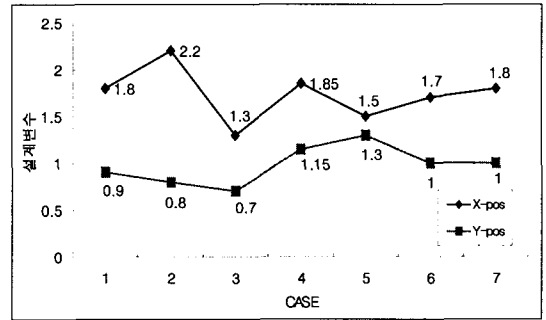
한편, 보행자 충돌 y축 범위는 x축 범위에 비해 중요

성이 크지 않은 것으로 판단하여 1차로의 기본 폭인 3.0m까지만 을 고려하여 분석하였다.

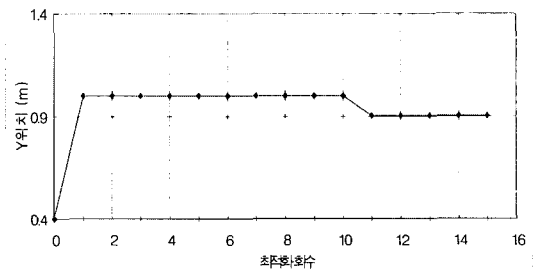
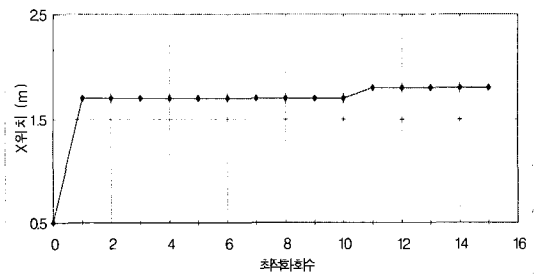
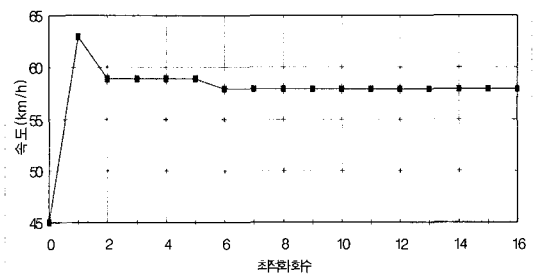
3. 최적화수행결과분석

시속 60Km의 속도로 주행중인 자동차가 보행자를 충돌한 사고에 대하여 차량충돌속도 및 보행자 충돌 위치를 분석하기 위하여 정식화한 최적화모형식을 최적화 전문 소프트웨어 프로그램과 조합한 후 설계변수를 <표 2>에서와 같이 변화해 가며 반응표면근사 최적화기법으로 최적화를 수행한 결과 <표 3>, <그림 3>, <그림 4>, <그림 5>에서와 같이 차량충돌속도는 57Km/h ~61Km/h로 분석되었고, 보행자 충돌위치는 x축 1.3m ~1.85m, y축 0.7m~1.15m로 분석 되었다. 즉, 최적화의 목적함수인 충돌속도 60Km/h, x축 위치 2.0m, y축 위치1.0m에 대한 최대편차가 충돌속도의 경우 최대 3Km/h, 최소 1Km/h가 발생하였고, x축의 경우 최대 0.7m, 최소 0.15m, y축의 경우 최대 0.3m, 최소 0.15m가 발생한 반면, 기존 보행자 충돌사고 분석모형식을 이용하여 충돌 후 보행자 이동거리를 분석한 결과, 모형식에 따라 편차 값이 최대 15.2m (충돌속도 60Km/h를 기준)가 발생하였다. 즉, 컴퓨터 모의충돌실험과 최적화방법을 이용하여 개발한 분석기법이 기존모형식에 의한 분석방법보다 분석결과

의 정확도가 매우 높은 것으로 연구결과 도출되었다. 따라서, 추후 보행자 충돌사고를 분석함에 있어 기존 분석모형식이 아닌 보행자 선회특성을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션 최적화기법을 이용하여 보다 과학적으로 신속하고 정확한 분석을 수행함으로써 당사자간의 의



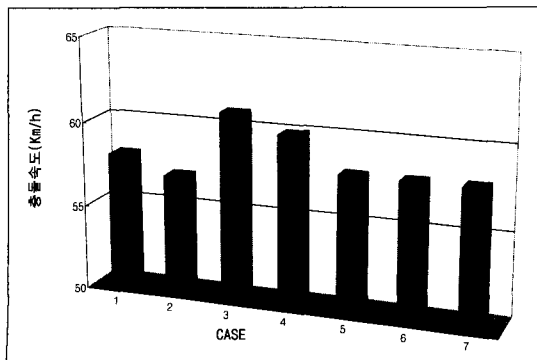
<그림 4> 보행자 충돌위치 최적화수행 결과



<그림 5> 충돌속도 및 충돌위치 분석결과

<표 3> 최적화수행결과

구분 \ case	1	2	3	4	5	6	7
V(속도, Km/h)	58	57	61	60	58	58	58
x-pos(m)	1.8	2.2	1.3	1.85	1.5	1.7	1.8
y-pos(m)	0.9	0.8	0.7	1.15	1.3	1.0	1.0



<그림 3> 충돌속도에 대한 최적화수행 결과

견대립으로 인한 시간적, 경제적 비용과 정신적 고통을 최소화하고 또한, 사고관련자의 권익을 보호할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 결론

실제 시속 60Km/h의 속도로 주행 중인 보행자가 충돌한 경우, 충돌 후 보행자의 최종정지위치특성을 모의충돌실험을 통해 분석한 결과와 임의의 속도로 모의충돌실험을 통해 분석한 보행자의 최종정지위치특성을 이용, 최적화이론을 도입하여 충돌당시 차량 충돌속도와 보행자충돌위치를 분석한 결과, 차량충돌속도는 57Km/h~61Km/h, 보행자 충돌위치는 x축 1.3m~1.85m, y축 0.7m~1.15m로 분석되었다. 따라서, 최적화의 목적함수인 차량충돌속도 60Km/h, x축 2.0m, y축 1.0m에 대한 편차가 충돌속도의 경우에는 최대 3Km/h, 최소1Km/h 가 발생한 반면 x축에 대해서는 최대 0.7m, 최소0.15m, y축에 대해서는 최대 0.3m, 최소 0.15m로 기존분석모형에 의해 분석된 결과에 비해 정확도가 매우 높은 것으로 연구결과 도출되었다. 따라서, 승용차와 보행자가 충돌한 사고를 분석함에 있어 기존 분석모형식이 아닌 모의충돌실험 통한 보행자 선회특성과 최적화 모형식 $[1000*(x_{f,r}-x_{f,s})^2 + 10000*(y_{f,r}-x_{f,s})^2]$ 을 이용하여 반응표면근사최적화분석기법으로 분석함으로써 보다 신속하고 정확하며 과학적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

이상과 같이 보행자 선회특성과 최적화기법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 분석기법이 기존 보행자 충돌분석 모형식에 비해 분석오차율이 낮아 보다 정확하고 과학적인 분석기법인 것으로 연구결과 도출되었다. 따라서, 추후 보행자충돌사고분석은 기존 분석모형식이 아닌 보행자 선회특성과 최적화기법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션분석기법을 통해 보다 신속·정확히 분석·규명함으로써 사고당사간의 의견대립으로 인한 시간적, 경제적 비용의 최소화화 사고관련자의 권익을 보호할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 경찰청(2001), 교통사고통계.
2. 사단법인 한국자동차공학회(1996), "자동차 기술 핸드북", 기초, 이론편, p.363.
3. 경찰청(2000), 교통안전시설실무편람.
4. 교통신문(1999), 최신교통법전.
5. 김종혁·박경진·장명순·유장석·홍을표(2001), "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보행자 충돌 선회 특성에 관한 연구" 대한교통학회, 제40회 학술발표회 논문집2.
6. 홍을표·신문균·박경진(2001), "승객 상해를 최소화하는 충돌특성곡선의 결정 및 반응표면법을 이용한 충돌 부품의 최적설계", 자동차공학회, 한국자동차공학회논문집, Vol.9, No.2, pp.116~129.
7. 산업자원부 기술표준원(1997), "국민표준체위조사".
8. 홍을표·박철민·박경진(2001), "최적설계 관점에서 설계소프트웨어 성능비교에 관한 연구", 한국자동차공학회, 한국자동차공학회논문집, Vol.9, No.2, pp.116~129.
9. TNO Automotive(1999), "MADYMO User's Manual".
10. Lynn B. Fricke(1990), Traffic Accident Reconstruction, Northwestern University Traffic Institute.
11. Schmidt D. N. and Nagel, D. A.(1971), "Pedestrian Impact case study", Proceedings 15th Conference Association for Automotive Medicine.
12. Stcherbatcheff, G., etal., "Simulation of Collisions Between Pedestrians and Vehicle Using Adult and Child Dummies", SAE paper No,751167.
13. Collins, James C. and Morries, Joe L.(1979), Highway Collision Analysis., Thomas Publishing.
14. Limport(1989), Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, 4th Edition, The Michie Company.
15. 하야시 히로시(林洋)(1992), 교통사고감정공학.
16. Klaus-Peter Glaeser, Bundesanstalt fuer Strassenwesen, Cologne. "Step to Step Approach to Standardized Full Scale Pedestrian Test Methodology," SAE #830058.

17. Bennett, J. A., Park, G. J.(1995), "Automotive Occupant Dynamics Optimization," Shock and Vibration, Vol.2, No.6, pp. pp.471~479.
18. Park, Y. S., Lee, S. H., Park, G. J.(1994), "A Study of Direct vs. Approximation Methods in Structural Optimization," Structural Optimization, Vol.10, No.1, pp.64~66.
19. VisualDOC Manual 2.0(1998), Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO.
20. Vanderplaats, G. N.(1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill, New York.
21. Arora, J. S.(1989), "Introduction to Optimum Design," McGraw-Hill, International Edition.
22. Ravani, B., Brougham, D. and Mason, R. (1981), "Pedestrian Post-Impact Kinematic and Injury Patterns," SAE Technical Paper, #811024.
23. Jeery J. Eubanks and W. R. Rusty Height (1992), "Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology.
24. Martin Kramer, "Pedestrian Vehicle Accident Simulation Through Dummy Tests", SAE #751165.
25. Klaus-Peter Glaeser, "Step to Approach to a Standardized Full Scale Pedestrian Test Methodology", SAE #830058.
26. Stcherbatcheff, G., etal., "Simulation of Collisions Between Pedestrians and Vehicle Using Adult and Child Dummies", SAE paper No.751167.

✉ 주 작 성 자 : 유장석

✉ 논문투고일 : 2002. 2. 1

논문심사일 : 2002. 3. 20 (1차)

2002. 4. 23 (2차)

2002. 5. 10 (3차)

2002. 6. 3 (4차)

심사판정일 : 2002. 6. 3

✉ 반론접수기간 : 2002. 10. 30