충돌 해석을 이용한 능동형 보행자 보호 시스템의 성능 분석

박 종 선¹⁾ · 정 성 범²⁾ · 윤 용 원¹⁾ · 박 경 진^{*3)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 구조 및 기계시스템의 통합설계 사업단²⁾ · 한양대학교 기계공학과³⁾

Performance Analysis of an Active System for Pedestrian Protection Using Impact Analysis

Jong-sun Park¹⁾ · Seong-Boem Jeong²⁾ · Yong-won Yun¹⁾ · Gyung-jin Park^{*3)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Center of Novel Synthesis of Structural and Mechanical Systems, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

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

(Received 13 March 2013 / Revised 18 April 2013 / Accepted 26 April 2013)

Abstract : Although automotive safety technologies have been developed steadily, the efforts for pedestrian protection still seems to be insufficient. In a car-pedestrian accident, the structures such as the engine under a hood, the lower part of a windshield and the A-pillar are the major causes of fatal pedestrian injuries. Recently, there have been several studies on the active safety system to reduce the pedestrian injuries. The safety system consists of an active hood lift system and a pedestrian airbag. In this research, the safety performance of the active hood lift system and the pedestrian airbag is investigated by using the finite element method. The finite element model of the system is set up based on the head impact test, and the impact analyses are performed. The necessity and the usefulness of the safety system are verified.

Key words : Active system for pedestrian protection(능동형 보행자 보호 시스템), Active hood lift system(액티브 후드 리프트 시스템), Pedestrian airbag(보행자 에어백), Head injury criterion(머리상해지수)

1. 서 론

자동차가 국민의 보편적인 교통수단으로 대중화되면서 교통사고 또한 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 도로 교통공단의 통계 자료¹⁾에 따르면 2011년 발생한 교통사고로 인해 총 5,229명의 사망자가 발생했으며 이중 38.2%인 1,998명이 차대사람 사고에 의해 사망하였다. 이렇게 차대사람 사고의 사망이 높은 비율을 차지하고 있기 때문에 최근에는 차량 탑승자의 보호뿐만 아니라 보행자 보호에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 보행자를 보호할 수 있는 가장 보편적인 방법은 충돌이 발생했을 때 보

행자에게 전해질 수 있는 충격을 흡수할 수 있도록 자동차의 전면 구조물을 설계하는 것이다. Y. E. Jeon, J. W. Lee 등은²⁻⁵⁾ 보행자 상해를 줄이기 위해 후드, 범퍼 및 주변 구조물이 보행자의 충격을 충분히 흡수할 수 있도록 최적설계에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 기존 구조물의 재설계만을 통해서 상해지수를 줄이기에는 한계가 있을 뿐 아니라 탑승자의 안전까지도 위협할 수 있다는 문제점이 있다.

이러한 이유로 최근 보행자 상해를 줄이기 위해 새롭게 제안된 방법이 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백으로 구성된 능동형 보행자 보호 시스템이다. 이 시스템은 자동차의 기존 설계를 변경하지 않고 차대사람 사고의 상황에서 보행자를

*Corresponding author, E-mail: gjpark@hanyang.ac.kr

효과적으로 보호할 수 있다는 장점이 있다. 액티브 후드 리프트 시스템에 대한 연구로는 이근배,⁶⁾ K. Nagatomi⁷⁾ 등이 액티브 후드 리프트 시스템을 제작 및 실제 차량에 적용하여 상해지수가 저감되는 효과를 증명하였으며 S-Huang,⁸⁾ 신문균⁹⁾ 등은 액티브 후드 리프트 시스템의 최적 설계에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 보행자 에어백에 대해서는 아직까지도 진행된 연구가 미비한 상황이다.

본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용하여 능동형 보행자 보호 시스템의 효용성을 알아보는 것을 목적으로 한다. 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백이 장착된 차량의 머리상해지수(Head Injury Criterion, HIC) 감소 효과를 확인하기 위해 성인 머리모형 충격 시뮬레이션을 시행한다. 대상 차종은 중형 승용차량으로 능동형 보행자 보호 시스템 미 장착 차량, 액티브 후드 리프트 시스템이 장착된 차량, 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백이 모두 장착된 차량으로 총 3가지 경우에 대하여 유한요소 모델을 생성한다. 그리고 각 차량에 대하여 동일한 충격지점과 충격조건에서 성인 머리모형이 충돌하는 상황을 모사한다. 이 때 충격지점은 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백의 설치로 인해 머리상해지수 감소 효과가 기대되는 후드 끝 부분과 창유리 하단, A필라 영역으로 선정한다. 머리상해지수를 산출 한 후 각 시스템의 설치 유, 무에 따른 머리상해지수의 변화를 알아본다. 본 연구에서 제시하는 해석 기법의 신뢰성은 동일 조건하에서 진행된 실차 시험의 결과 데이터와의 비교를 통해 검증한다. 이때의 충격조건은 신차 안전도평가(Korean New Car Assessment Program, KNCAP)¹⁰⁾에서 제시하는 보행자 안전성 평가시험의 성인 머리모형 충격시험을 따른다. 상용 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA¹¹⁾를 이용하여 머리모형의 충돌해석을 수행한다.

2. 보행자 안전 기준

2.1 보행자 안전 평가 기준

자동차의 안전성 확보를 위해 각국에서는 안전 기준을 제정하여 시중에 판매되는 자동차에 대한 최소한의 안전도를 법규로 규정하고 있다. 유럽경

제위원회에서는 전 세계 자동차안전기준을 통합하기 위해 세계기술규정(Global Technical Regulation, GTR) 제정을 위한 노력을 기울이고 있다. 이 가운데에 보행자 보호를 위한 노력은 비교적 최근부터 이루어지고 있는데 2008년 GTR No.9¹²⁾으로써 보행자 안전규정이 마련되었으며 국내에서도 2013년부터 보행자 보호에 대한 내용을 포함한 자동차안전기준 제 102조의2¹³⁾가 시행되고 있다.

뿐만 아니라 유럽, 일본 등 여러 나라에서는 신차 안전도평가(New Car Assessment Program, NCAP)를 통해 자동차의 안전 등급을 객관적으로 평가하기 위해 노력하고 있다. 우리나라에서도 1999년부터 신차안전도평가(KNCAP)를 도입하여 국내에서 판매되는 자동차들의 정면충돌, 측면충돌 등을 비롯하여 보행자 안전성을 평가하고 있다. 보행자에 대한 평가 항목은 2007년에 보행자 머리 상해지수 평가를 시작으로 다음 해인 2008년에는 다리 상해에 관한 항목이 추가되었다.

2.2 보행자 머리상해지수 평가

국내 신차안전도평가에서는 시험자동차 평가영역 표시를 위해 횡단경계선(Wrap Around Distance, WAD)을 1,000mm, 1,350mm, 1,700mm, 2,100mm로 표시하고 1,000 ~ 1,700mm 영역은 어린이 머리모형 평가영역, 1,700mm ~ 2,100mm 영역은 성인 머리모형 평가영역으로 한다. 이때 사용되는 성인 머리모형은 지름 165mm, 질량 3.5kg이며 충격각도는 지면침조라인에 대하여 65°이다. 머리모형이 자동차와 첫 번째 접촉이 있을 때 속도를 40km/h가 되도록 하여 충격 시의 머리상해지수(HIC)를 산출한다. 여기서 머리상해지수는 식 (1)과 같은 수식에 의해 계산된다.

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

t_1, t_2 은 충격 중 15ms 이하의 간격을 갖는 임의의 두 순간을 의미한다. a 는 머리모형의 중심에 설치된 3축 가속도계로부터 측정된 가속도의 합성가속도 값이다. 이때 Table 1과 같이 머리상해지수의 범위에 따라 보행자 보호 정도를 우수(Good), 보통(Marginal), 미흡(Poor)의 3단계로 구분하고 있다.

Table 1 HIC (Head Injury Criterion)

	Good	Marginal	Poor
HIC	below 1,000	over 1,000 below 1,350	over 1,350

3. 능동형 보행자 보호 시스템의 충격 해석

3.1 해석 모델 생성

액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백이 장착된 차량의 머리상해지수 감소효과를 확인하고 능동형 보행자 보호 시스템의 성능을 평가한다. 이를 위해 능동형 보행자 보호 시스템 미 장착 차량, 액티브 후드 리프트 시스템이 장착된 차량, 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백이 모두 장착된 차량, 총 3가지 차량에 대하여 머리모형 충격 해석을 실시한다.

머리모형 충격 해석을 위하여 중형 승용차량 모델을 선정하였다. 선정된 중형 승용차량의 유한요소 모델은 Fig. 1에 나타내었다. 해석 시간을 최소화하기 위하여 머리모형의 충격 거동에 영향을 미치는 후드, 엔진구조물, 범퍼 등의 전면 구조물로만 구성된 차량 모델을 사용하였다. 유한요소 모델은 228개의 부품과 105,237개의 요소로 이루어져 있으며 모델의 무게는 345.819kg이다.

해석에 사용된 성인 머리모형은 EASi-CRASH에서 개발한 모델이며 질량은 4.5kg, 11,682개의 요소로 이루어져 있다.¹⁴⁾ 머리모형은 크게 4부분으로 나누어져 있는데 엔드 플레이트(end plate)에 부착된 가속도계로부터 머리모형이 충돌했을 때의 합성 가속도를 측정하여 머리상해지수를 계산한다.

Fig. 1 Finite element model of a mid-size car

Fig. 2 Finite element model of an adult head form

3.2 액티브 후드 리프트 시스템

액티브 후드 리프트 시스템은 보행자와 자동차가 충돌하였을 때 범퍼에 부착된 센서를 통해 보행자를 감지한다. 그리고 Fig. 3과 같이 후드 윗부분 양쪽 끝단에 설치된 액츄에이터가 후드를 들어 올려 후드 아래의 엔진, 배터리 등과 같은 구조물과의 공간을 확보하는 역할을 한다. 이로 인해 보행자의 머리가 후드에 충돌하였을 때 충분한 변형 공간을 확보하고 보행자 머리의 상해를 줄일 수 있는 장치이다. 이때 사용되는 액츄에이터는 크게 화약 방식과 스프링 방식 두 가지로 분류할 수 있다. 화약 방식의 액츄에이터는 전개 시간이 빠르지만 일회용이라는 단점이 있으며, 스프링 방식의 액츄에이터는 전개 시간은 느리지만 반영구적 사용이 가능하다. 본 연구에서는 화약 방식의 액츄에이터를 사용한다. 센서가 보행자와의 충돌을 감지하면 액츄에이터 내부의 화약이 폭발하여 리프터를 위로 솟구치게 함으로써 후드를 100mm만큼 들어 올려 보행자를 보호하는 구조물이며 완전히 전개되는데 약 30ms의 시간이 소요된다.

Fig. 3 Simulation model of active hood lift system

작동 후 액츄에이터 내부에 존재하는 가스의 잔류압력이 보행자의 머리가 후드에 충돌했을 때 적당한 완충작용의 역할을 한다. 유한 요소 모델에서는 액츄에이터 내부의 가스에 대한 잔류압력을 모사하기 위하여 스프링 요소를 사용한다. 제작사가 제공한 성능 조건을 참고하여 스프링 상수는 0.002 kN/mm로 정의한다. 그리고 머리모형이 자동차 후드와 충돌하는 순간이 액티브 후드 리프트 시스템이 완전히 전개된 상태라 가정하고 시뮬레이션을 수행한다. 액츄에이터는 자동차 전면의 가운데 지점을 기준으로 x방향으로 1,250mm, y방향으로 700mm 지점에 설치된다.

3.3 보행자 에어백

보행자 에어백은 차대사람 사고의 상황에서 액티브 후드 리프트 시스템으로 보호할 수 없는 창유리 하단부와 A필라와의 충돌을 보호하기 위한 시스템이다.

보행자 에어백은 Fig. 4(a)와 같이 쿠션, 인플레이터, 하우징, 브라켓 등으로 구성되어 있다. 보행자 에어백의 쿠션은 폴딩(folding)된 상태로 하우징에 결합된다. Fig. 4(b)는 후드 아랫면에 에어백이 설치된 모습을 나타내고 있다. 액티브 후드 리프트 시스템의 전개가 완료된 후, 후드와 자동차 창유리 사이의 공간으로 에어백이 전개되어 창유리 하단부와 A필라를 덮게 된다. 본 연구에서 사용한 보행자 에어백 모델의 경우 완전히 전개되는데 50ms가 소요되며 운전석이나 조수석에 설치되는 일반적인 종류의 에어백과 달리 벤트홀이 없이 제작되어 150ms의 시간 동안 높은 압력을 유지할 수 있도록 설계되었다.

실제 사고 상황에서는 보행자와의 충돌이 감지되면 액티브 후드 리프트 시스템이 먼저 전개된 후 에어백의 전개가 시작된다. 하지만 본 연구에서는 액티브 후드 리프트 시스템의 전개가 완료된 상황이라 가정하였기 때문에 에어백은 0ms부터 전개를 시작한다. 이때의 인플레이터 압력은 390kPa이다. 그리고 에어백과 하우징을 연결하는 4개의 테더를 설치하여 보행자 에어백이 창유리 하단부와 A필라 영역으로 흔들림 없이 전개되도록 설계하였다.

(a) Components

(b) Installation

Fig. 4 Pedestrian airbag

Table 2 Simulation condition of pedestrian airbag

Inflator pressure	390kPa
Tether	4EA
Fabric density	$7.12 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$

4. 성인 머리모형 충격 해석

4.1 성인 머리모형 충격 해석

능동형 보행자 보호 시스템의 머리상해지수 감소 효과를 확인하기 위해 충격지점을 Fig. 5와 같이 총 13개 지점으로 정의한다. 창유리 하단과 A필라 영역의 9개 지점과 후드 윗부분과 4개 지점은 각각 보행자 에어백과 액티브 후드 리프트 시스템에 의한 상해지수 감소 효과를 알아보기 위해 선정하였다.

후드 위에 위치한 충격 지점 중 HP4는 액티브 후드 리프트 시스템의 액츄에이터가 설치되는 위치로써 액츄에이터 위에 머리모형이 충돌하였을 때 머리상해지수의 감소를 다른 충격 지점과 비교하기 위해 선정하였다. A필라 위의 충격 지점인 P1과 P9은 일반적으로 차량에서 보행자 머리 상해에 가장

Fig. 5 Impact points

Table 3 Simulation results

	Impact point	HIC		Reduction ratio of HIC
		Without protection system	With protection system	
Wind-shield & A-pillar	P1	8441	456.1	94.6%
	P2	4082	586.8	85.6%
	P3	2528	582	77.0%
	P4	2133	686.4	67.8%
	P5	2599	769.6	70.4%
	P6	2701	739.5	72.6%
	P7	2789	633.5	77.3%
	P8	4098	602.6	85.3%
	P9	8077	577	92.9%
Hood	HP1	1108	458.5	58.6%
	HP2	1166	359.1	69.2%
	HP3	1266	405.8	67.9%
	HP4	5132	704.3	86.3%

취약한 지점이기 때문에 보행자 에어백을 사용함으로써 충분히 보호될 수 있는지 검증하기 위해 정의하였다. 머리모형 충격 해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 수행했으며 각 지점의 머리상해지수는 Table 3에 나타내었다. 보행자 에어백과 액티브 후드 리프트 시스템이 모두 장착된 차량을 이용하여 각 충격 지점 별로 능동형 보행자 보호 시스템 미 장착 차량에 대한 머리상해지수 감소율을 계산하였다.

능동형 보행자 보호 시스템이 장착되지 않은 차량에서는 모든 충격지점에서 1,000 이상의 머리상해지수를 보였다. 특히 단단한 구조물과 직접적으

로 충돌이 일어나는 A필라와 후드 윗부분에 위치한 HP4 지점에서는 5,000 이상의 높은 상해지수가 산출되었다. 창유리 하단부의 경우, 창유리 뒷면에 위치한 크래쉬 패드의 영향으로 충분한 변형 공간을 확보하지 못하여 높은 상해지수가 산출되었다.

하지만 능동형 보행자 보호 시스템이 장착된 차량에서는 모든 충격 지점에서 1,000 이하의 상해지수가 나타났다. 액티브 후드 리프트 시스템에 의해 보호되는 후드 영역 중, HP4에서는 아래에 위치한 액티브 후드 리프트 시스템의 액추에이터의 영향으로 가장 높은 상해지수가 산출되었다. 하지만 액티브 후드 리프트 시스템을 설치함으로써 머리모형과 앞 바퀴 펜더(fender)와의 충돌을 방지하였고 미 장착 차량에 비해 86.27%의 머리상해지수 감소율을 보였다. Fig. 6은 HP1에서 보호 시스템 미 장착 차량과 장착 차량에 머리 모형이 충돌하였을 때 머리 모형의 가속도 그래프이다. 머리 모형과 후드 외판의 1차 충돌이 발생하고 후드가 변형됨에 따라 엔진구

(a) Without active hood lift system

(b) With active hood lift system

Fig. 6 Acceleration of head form on HP1

조물과의 2차 충돌에 의해 최댓값이 생기는 것을 알 수 있다. 하지만 액티브 후드 리프트 시스템이 설치된 차량에서는 후드와 엔진 구조물 사이의 빈 공간이 변형되는 동안 충격을 흡수하기 때문에, 1차 충돌이 발생한 직후 가속도가 급격하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 1차 충돌에서는 상승한 후드의 각도로 인해 액티브 후드 리프트 시스템이 없는 차량보다 다소 높은 가속도가 발생하며, 약 35msec가 지난 후 변형된 후드에 의한 2차 충돌이 발생한다는 점을 알 수 있다.

창유리 하단과 A필라 영역에서도 보행자 에어백에 의해 머리상해지수가 크게 감소한다. 보행자 에어백의 가운데 부분보다 양쪽 끝 지점에서 작은 값의 머리상해지수가 산출되었다. 이는 보행자 에어

(a) Impact point : P1

(b) Impact point : P5

Fig. 7 Acceleration of head form with pedestrian airbag

Fig. 8 Comparison of airbag deployment

백이 테더로 인해 후드 아래에 고정되어 있기 때문에 에어백의 가운데 영역은 머리 모형이 충돌했을 때도 흔들림 없이 고정되어 있다. 반면 에어백 양쪽 끝은 테더의 영향을 적게 받아 머리 모형과 충돌했을 때 에어백이 흔들리면서 추가적으로 충격을 흡수하게 된다. 머리상해지수가 최소인 충격 지점과 최대인 충격 지점인 P1과 P5의 머리 모형 가속도 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. P1 충격 지점의 가속도

는 P5의 그래프에 비해 진동을 하면서 긴 시간동안 충격을 흡수하고 있다는 것을 알 수 있는데 이로 인해 머리상해지수의 차이가 발생한 것으로 보인다.

4.2 해석 결과의 검증

유한 요소 해석을 통해 산출한 머리상해지수를 실차 시험 데이터와 비교함으로써 제안한 해석 방법의 유용성을 검증한다. 먼저 해석과 실차 시험에서 보행자 에어백의 전개 과정을 비교해 보았을 때 전개가 시작되는 시점에는 큰 차이가 보인다. 해석 과정에서는 해석 시간의 문제로 인해 에어백 내부의 압력은 모든 지점에서 동일하다는 가정을 하였다. 때문에 전개 초반에 인플레이터로부터 가스가 빠져 나가는 모습을 모사할 수는 없었다. 하지만 전개가 진행됨에 따라 실제 전개되는 모습과의 차이를 줄여가며 창유리 하단부와 A필라를 덮게 된다. Table 4는 능동형 보행자 보호 시스템 미 장착 차량에서 해석과 시험 결과로 얻은 머리상해지수를 나타내고 있다. 자동차의 유한 요소 모델이 후드 아래의 엔진 구조물, 창유리 뒤쪽의 구조물을 모두 표현하지 못하고 있기 때문에 다소 큰 오차가 발생한 것으로 보인다. 하지만 해석과 시험 모두 후드 가운데 영역에서 최솟값을 보이며 후드 끝 쪽으로 갈수록 높은 상해지수가 산출된다. A필라와 창유리 영역에서도 A필라 부근에서는 높은 값을 가지고 가운데 지점으로 갈수록 상해지수가 낮아진다. 해석과 시험 결과에서 오차는 존재하지만 비슷한 경향성을 띄며 머리상해지수가 변한다는 것을 알 수 있다.

그리고 Table 5는 보행자 에어백을 설치한 차량의 해석과 실차 시험에서 얻은 머리상해지수를 나타내고 있다. 머리모형이 차량과 직접 충돌하지 않고 에어백과 충돌하기 때문에 차량 모델에 대한 영향은

Table 5 HIC with active protection system

Impact point	HIC	
	Simulation	Experiment
P1	456	581
P2	587	532
P5	770	522

Fig. 9 Simulation and experiment on impact point P5

적게 받는 것으로 보여진다. 산출된 머리상해지수를 보면 시험은 충격 지점에 관계없이 어느 정도 일정한 값을 보였지만 해석에서는 충격 지점에 따라 큰 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 해석상의 오차가 8.83%가 발생한 P5 지점에 대한 해석과 시험의 사진을 나타내고 있다.

5. 결론

자동차의 전면 구조물을 재설계하지 않고 액티브 후드 리프트 시스템과 보행자 에어백의 설치를 통해 머리상해지수 저감 효과를 확인하였다. 능동형 보행자 보호시스템에 대한 해석 기법을 제안하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 신차안전도평가에서 정의하는 성인 머리모형 평가 방법에 의거하여 머리모형 해석을 수행하였다.
- 2) 능동형 보행자 보호 시스템이 장착된 차량은 미

Table 4 HIC without active protection system

Impact point	HIC	
	Simulation	Experiment
HP2	1166	842
HP4	5132	4789
P1	8441	6764
P2	4082	3405
P5	2599	2851

장착 차량보다 보행자 보호에 대해 뛰어난 성능을 보였다. 액티브 후드 리프트 시스템에 의해 보호를 받는 후드 위의 4개 충격 지점에서는 평균 70.5%의 머리상해지수 감소율을 보였으며 보행자 에어백에 의해 보호 받는 창유리 하단과 A필라 영역에서는 평균 80.3%의 머리상해지수 감소율을 보였다.

- 3) 능동형 보행자 보호 시스템을 장착하면 머리상해지수가 크게 감소할 수 있을 뿐만 아니라 차량 구조물의 재설계 없이 간단한 방법으로 설치 가능하기 때문에 보행자 보호를 위한 효과적인 수단으로 보여진다.
- 4) 해석 결과를 실차 시험 데이터와 비교함으로써 제시된 해석 기법의 유용성을 검증하였다. 에어백 전개과정에서는 전개 형상에서 다소 차이가 있었지만 전개가 완료된 후에는 해석과 실험에서 큰 차이점을 발견할 수 없었으며, 머리상해지수 값에서도 충격 지점에 따라 비슷한 경향성을 보이는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 연구비지원(12PTSI-C054118-04)으로 수행된 연구임. 본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었음. (No. R32-2009-000-10022-0)

References

- 1) Road Traffic Authority, Traffic Accident Statistical Analysis, 2011.
- 2) Y. E. Jeon, H. I. Moon, Y. S. Kim and H. Y. Kim, "Crumple Zone Design and Upper Leg-form Impactor Analysis for Pedestrian Protection," Transactions of KSAE, Vol.20, No.3, pp.126-132, 2012.
- 3) J. W. Lee, K. H. Yoon, Y. S. Kang, K. T. Park and G. J. Park, "Hood and Bumper Structure Design Methodology for Pedestrian Regulation," Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.162-170, 2005.
- 4) T. L. Teng and V. L. Ngo, "Optimization of Bonnet Thickness with Respect to Pedestrian Safety," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.224, No.12, pp.1513-1526, 2010.
- 5) Q. Liu, Y. Xia and Q. Zhou, "Design Analysis of a Sandwich Hood Structure for Pedestrian Protection," The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), pp.15-18, 2009.
- 6) K. B. Lee, H. J. Jung and H. I. Bae, "The Study on Developing Active Hood Lift System for Decreasing Pedestrian Head Injury," The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), pp.18-21, 2007.
- 7) K. Nagatomi, K. Hanayama, T. Ishizaki, S. Sasaki and K. Matsuda, "Development and Full-scale Dummy Tests of a Pop-up Hood System for Pedestrian Protection," The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), pp.6-9, 2005.
- 8) S. Huang and J. Yang, "Optimization of a Reversible Hood for Protecting a Pedestrian's Head during Car Collisions," Accident Analysis and Prevention, Vol.42, No.4, pp.1136-1143, 2010.
- 9) M. K. Shin, K. T. Park, K. B. Lee, H. I. Bae and G. J. Park, "Design of the Active Hood Lift System Using Orthogonal Arrays," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.123-131, 2006.
- 10) Korea New Car Assessment Program, <https://www.car.go.kr/jsp/kncap/introduction.jsp>, 2013.
- 11) Livemore Software Technology. Co (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual, 2012.
- 12) Global Technical Regulation No.9, UNITED NATIONS, 2009.
- 13) Vehicle Safety Standards, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011.
- 14) Oasys LS-DYNA Environment Software, http://www.oasys-software.com/dyna/en/fe-models/humanetics_dummies.shtml, 2013.