

보행자 다리 하체 모형의 차량 충돌해석

김진곤[†] · 박용국 · 김정윤

대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Impact Analysis of a Pedestrian Lower Legform Model

Jin Gon Kim[†] · Yong Kuk Park · Jung Yun Kim

Faculty of Mechanical and Automotive Engineering in Catholic University of Daegu

Recently, the pedestrian protection regulations of Europe and Japan are becoming more stringent. However, it is difficult to evaluate the performance of protection because each regulation has different test conditions such as dummy, impact speed and so on. In this study, we construct a finite element model of pedestrian lower legform impactor prescribed in EEVC (European Experimental Vehicle Committee) W/G 10, and performed a impact analysis between the impactor and the front end module of vehicle. The simulations are carried out by using LS-DYNA3D, which is a well-known nonlinear dynamic simulation software. The analysis results according to various impact location show the impact characteristics of the lower legform.

Keywords : Pedestrian Lower Legform Impactor, Impact Analysis, Finite Element Analysis, Front End Module

1. 서 론

최근 차량에 대한 기존 안전 법규의 강화 및 차량 상품성에 큰 영향을 미치는 NCAP(New Car Assessment Program, 신차 평가 프로그램) 등의 시험으로 인하여 차량 탑승객의 상해는 점차 줄어드는 추세이다. 하지만 충돌 시 차체 변형 감소를 강조하는 OFFCAP(Offset NCAP) 등의 영향으로 차체가 강화되어 오히려 보행자의 상해는 늘어나는 추세이다. 한국도로교통안전공단(2005)의 보고서에 따르면 우리나라에서는 1992년부터 2001년까지 전체 교통사고의 30% 정도가 보행자 교통사고가 차지하는 상황이며, 보행자 사망률은 약 37%에 이르고 있다. 치사율은 머리부의 부상이 높지만, 부상자의 부상부위를 보면 다리부가 약 60%로 머리부 부상보다 훨씬 높은 수준이다.

보행자 보호를 위해 주요 국가들은 보행자의 상해감

소를 위한 세계기술기준을 제정하려는 노력을 기울이고 있다. 특히, 유럽 자동차 안전개선 위원회(EEVC)는 UN/ECE/WP 29에서 보행자 보호를 위한 세계기술기준을 제정하였다. 또한, 유럽 자동차 제조업 연합회(ACEA), 일본 자동차 제조업 연합회(JAMA) 및 한국 자동차 제조업 연합회(KAMA)와 2012년부터는 유럽에 수출하는 모든 새로운 차에 대하여 EEVC의 보행자 안전 기준을 따르도록 협의하였다. 이에 따라 현재 국내에서도 강화되는 보행자 안전 법규에 효과적으로 대응하기 위해 컴퓨터를 이용한 모의 충돌실험을 통한 차량의 보행자 안전설계에 많은 노력을 기울이고 있다[1~3, 5]

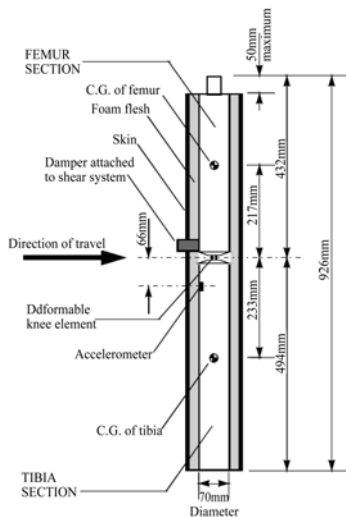
차량의 전장 모듈(Front End Module)부는 차량 충돌 시험에서는 차체가 과도하게 변형되지 않도록 부품들의 손상을 최소화하여 차량 수리비를 줄일 수 있도록 충격력을 제어할 수 있어야 하면서도, 매우 효과적으로 충돌

에너지를 흡수하여 승객 및 보행자의 안전성을 확보하여야 한다. 따라서, 많은 전장 모듈 제작 업체들은 충돌 시 구조의 강도적 측면과 보행자 보호라는 다소 상치되는 사항을 고려하여 모듈을 설계하여야 하는 어려움을 가지게 된다. 본 연구에서는 보행자 관련 차량 충격 설계에 필수적인 EVEC W/G 17(1998)에서 규정하는 실제 사고 시 차체 전면부와 접촉하는 다리 하체 모형과 차량 전장 모듈부와의 충돌 시 거동을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 이를 위하여, LS-DYNA3D(1999)를 이용하여 다리 하체 모형의 충돌 위치 및 범퍼 내부에 삽입되는 에너지 흡수재 등이 보행자에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 유한요소모델링 및 해석조건

2.1 다리 하체 충격 모형

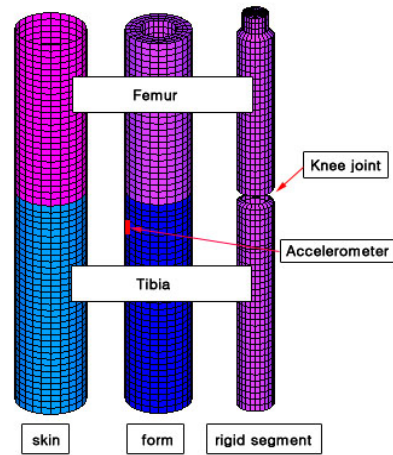
EVEC W/G 17에서 규정한 다리 하체 모형(lower leg-form impactor)은 <그림 1>과 같이 발포재(foam)로 덮여진 대퇴골(femur)과 경골(tibia)에 해당하는 두 강체가 변형하는 무릎 관절에 의해 연결된 구조로 이루어져 있다(1998). 길이는 926mm, 질량은 13.4kg, 지름은 70mm, 발포재의 두께는 25mm, 피부의 두께는 6mm이다. 경골에서 충격을 받는 반대편 66mm 아래 지점에 가속도를 측정하기 위한 가속도계가 부착되어 있고, 굽힘 각도와 전단변위를 측정하기 위한 변환기가 무릎관절에 부착되어 있다.



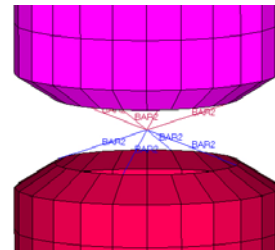
<그림 1> 다리 하체 충격 모형

<그림 1>과 같이 규정된 다리 하체 모형에 대해서 <그림 2>와 같이 유한요소모델링하였다. 피부는 셸요소(shell element), 발포체와 두 강체 부위는 솔리드요소(solid

element)로 모델링하였다. 무릎 조인트는 대퇴골과 경골을 연결해주는 것으로서 보요소(beam element)로 <그림 3>과 같이 모델링하였다. 발포재(foam)에 사용된 물성은 EuroSID 측면 충격 더미의 발포재로 쓰이는 LS-DYNA 3D의 material type 62번을 사용하였으며 그 값들은 <표 1>과 같다. 해석에 사용된 대퇴골과 경골의 물성은 <표 2>와 같다.



<그림 2> 다리 하체 모형의 유한요소모델링



<그림 3> 무릎 조인트부의 유한요소모델링

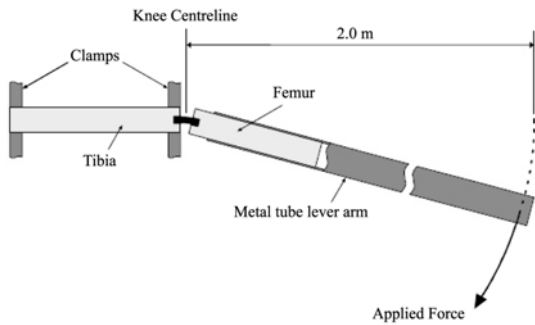
<표 1> 발포재의 물성치

항목	수치값
ρ (Mass density)	9.6e-11[ton/mm ³]
E_1 (Young's modulus)	1[MPa]
N_1 (Exponent in power law)	4
V_2 (Viscous coefficient)	1.5e-03
NU(Poisson's ratio)	0.05

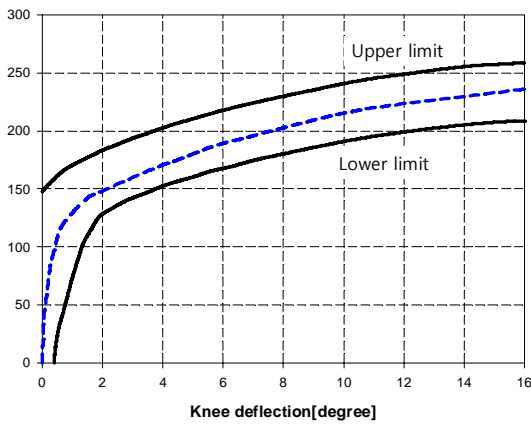
<표 2> 대퇴골과 경골의 물성

	Femur(대퇴골)	Tibia(경골)
Young's modulus	205[GPa]	
Mass density	8.7e-09[ton/mm ³]	2.914e-09[ton/mm ³]
Poisson's ratio	0.34	

상기 구축된 다리 하체 모형에 대한 유한요소모델의 검증을 위해서 <그림 4>와 같이 EEVC에서 규정한 하체 모형의 정적 굽힘시험과 동일한 조건에서 해석을 수행하였다. 해석은 무릎관절의 중심에서 2m거리에서 금속 튜브에 무릎의 변형각도가 16도가 될 때까지 하중을 가한다. 정적 굽힘해석결과 <그림 5>와 같이 하중과 무릎 각도의 변형량 사이의 관계가 규정된 요구치를 만족하는 것으로 나타났다.



<그림 4> 다리 하체 모형 정적 굽힘시험 조건



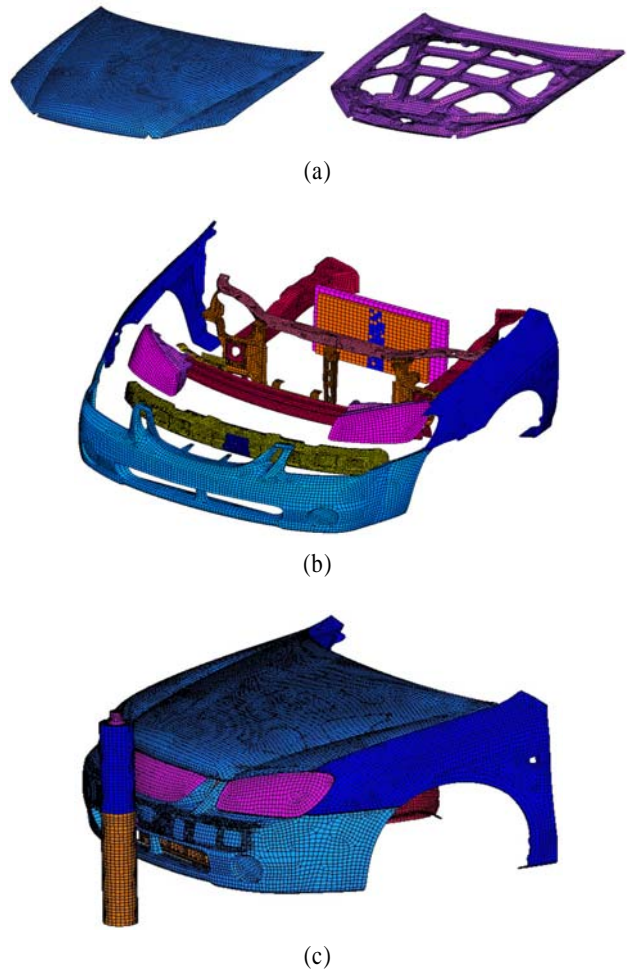
<그림 5> 하체모형 굽힘시험 결과

2.1 차량 전면부 유한요소모델링 및 해석조건

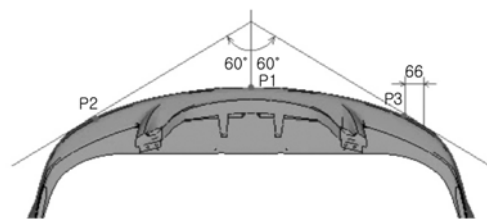
본 연구에서 사용된 차량에서 고려된 부분은 차량의 전면부위로서 <그림 6>과 같이 유한요소모델링하였다. 사용된 전체 유한요소의 개수는 85,988개이고, 이 중에서 셀요소는 47,739개이고 솔리드요소는 38,249개로 구성되어 있다. 해석에 사용된 재료들은 SGARC390, SGARC340, SPCD, SPFC780, BKV30으로 총 5개이며, 처음 4개는 강판이고 마지막 BKV30은 플라스틱이다.

차량 충돌해석을 위하여 <그림 7>과 같이 EEVC에서 규정한 범퍼와 다리 하부 임팩터 모델의 충돌시험 조건

을 적용하였다. 차량은 정상적인 주행위치에 있고 편평한 지지대 위에 튼튼하게 고정된 상태로 가정하였다. 범퍼 코너 사이의 외곽선을 3등분하여 중간에서 한 번, 범퍼의 외부 1/3위치에서 두 번, 즉 부상을 가장 일으키기 쉬운 지점에서 해석을 시행하였다. 본 연구에서는 중간 부분에 고정시킨 후 충돌해석을 수행하였다. 충격방향은 첫 충돌 순간 임팩터 모델의 수직축으로 수평면에서 차량의 수평 수직면에 평행하도록 하였다. 범퍼와 첫 충돌 순간 하부 임팩터 모델과의 충돌속도는 11.1m/s이다.



<그림 6> 차량 전면부의 유한요소모델링

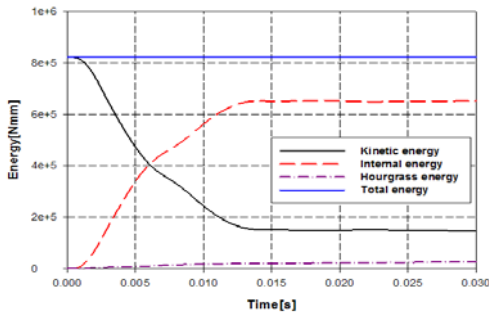


<그림 7> 다리 하부 임팩터의 범퍼 충돌 조건

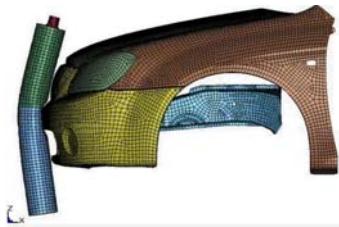
3. 임팩터 모델의 충돌거동 분석

3.1 초기 해석결과

범퍼 중앙부인 P1지점에 충돌해석을 수행한 결과의 수치해석상의 신뢰성을 확인하기 위해 <그림 8>과 같이 시간에 따른 에너지 분포를 살펴보았다. 비선형 충돌해석용 외연 적분(explicit time integration) 프로그램이 통상적으로 권고하는 hourglass energy가 전체 변형 에너지의 5% 미만이므로 해석결과의 안정성에 대해서 수치적인 문제점은 없다고 판단된다. <그림 9>는 다리 하부 임팩터 모델과 범퍼가 충돌할 때의 변형모습을 보여주고 있다.



<그림 8> 시간에 따른 에너지 분포



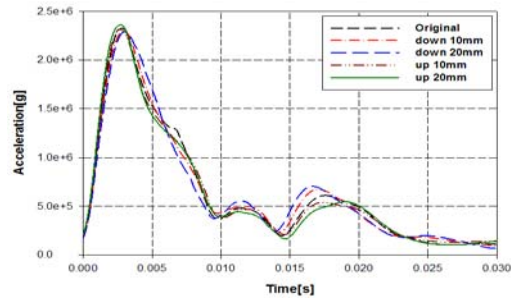
<그림 9> 다리 하부 임팩터의 범퍼 충돌 시 변형

3.2 다리 하체 모형의 위치에 따른 결과

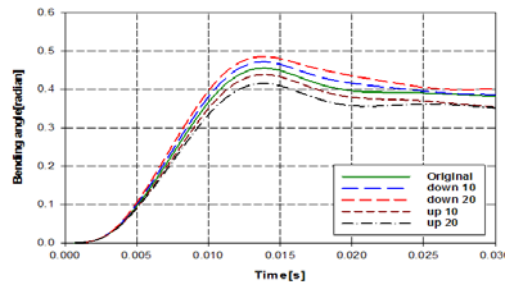
범퍼와 하체 모형의 충돌 위치에 따른 영향을 살펴보고자 하체 모형의 위치를 초기 해석안의 위치에서 위/아래 방향으로 각각 10mm와 20mm씩 이동하면서 총 5가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

<그림 10>~<그림 13>는 각각 시간에 따른 가속도, 굽힘각도 및 전단변위를 비교한 그림들이다. 하체 모형의 위치가 높아질수록, 즉 충돌위치가 낮아질수록 하체 모형이 받는 가속도의 크기가 감소함을 알 수 있다. 굽힘각도는 위치가 높아질수록 작아짐을 확인할 수 있었다. 이는 무릎 관절부에 얼마나 직접적으로 충돌하느냐에 따라서 결과치가 변하는 것으로 판단된다. 전단변위는 하체 모형의 위치가 높아질수록 커지는 경향을 보였다. 그 원인은

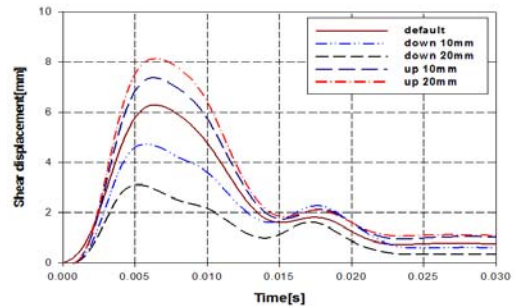
로는 충돌위치가 낮아지면 범퍼가 경골과 충돌하고 높아질수록 대퇴골과 동시에 충돌하기 때문인 것으로 보인다.



<그림 10> 시간에 따른 가속도 비교



<그림 11> 시간에 따른 굽힘각도 비교

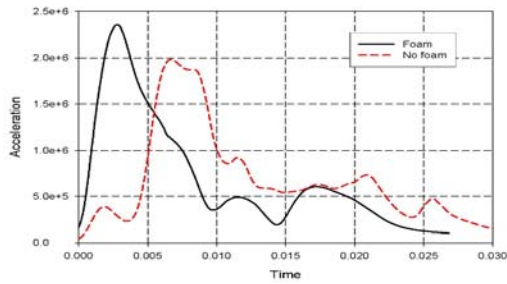


<그림 12> 시간에 따른 전단변위 비교

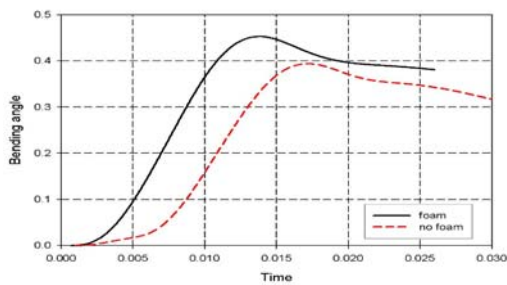
3.3 충격 흡수재에 의한 영향

다음으로, 충돌 시 차량에 가해지는 충격을 흡수하기 위해 범퍼 내부에 삽입되는 에너지 흡수재가 다리 하체 모형에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 에너지 흡수재의 유무에 따른 충돌해석 결과를 비교하였다. <그림 13>~<그림 15>는 각각 시간에 따른 가속도, 굽힘각도 그리고 전단변위의 변화를 비교한 그림들이다. 가속도, 굽힘각도 그리고 전단변위 모두 에너지 흡수재가 들어갈 때 다리 하체 모형에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 에너지 흡수재가 없는 경우 각 값의 피크

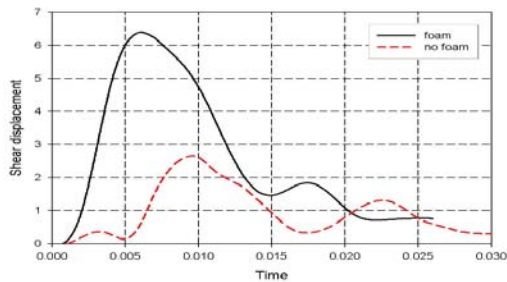
치가 발생하는 시간이 다소 지연되는 것을 알 수 있다. 이 결과는 차량의 엔진부를 포함한 전체 차량 모델을 고려할 경우는 또 다른 결과가 나올 수 있으므로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



<그림 13> 시간에 따른 가속도 비교



<그림 14> 시간에 따른 굽힘각도 비교



<그림 15> 시간에 따른 전단변위 비교

5. 결 론

본 연구에서는 보행자 관련 차량 충격설계에 필수적인 EEVC W/G 17에서 규정하는 실제 사고 시 차체 전면과 접촉하는 다리 하체 모형의 유한요소모델을 구성하였다. 구성된 다리 하체 모형의 유한요소모델을 이용하여 차량의 전면부와 충돌 시 하체 모형이 받는 충격에 의한 거동을 수치적으로 살펴보았다. 해석결과로부터 차량의 범퍼부 형상에 따른 충격위치, 에너지 흡수재 등이 충돌 시 보행자에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며, 보행자 안전을 위해 다양한 설계 개선의 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 강대민, 안승모, 안정오; “차 대 보행자 충돌시 사고해석 모델개발”, 한국자동차공학회지, 18(3) : 104-109, 2010.
- [2] 김광덕, 장내웅; “유럽 보행자 보호 Lower Legform Test 대응을 위한 Bumper System 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 1220-1225, 2001.
- [3] 박동규; “보행자보호 Lower Legform 충격의 해석 대 시험 상관성 개선에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 12(4) : 1515-1522, 2011.
- [4] 신동한, 김광훈, 손 권; “한국인 체형을 가진 보행자와 차량의 충돌해석”, 한국정밀공학학회지, 24(5) : 110-117, 2007.
- [5] 유장석, 박경진, 장명순; “차량형상과 충돌형태에 따른 보행자 거동 특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회지, 13(4) : 8-18, 2005.
- [6] European Enhanced Vehicle-Safety Committee; “Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Affected by Passenger Cars,” *EEVC Working Group 17 Report*, 1998.
- [7] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Use's Manual Ver. 950, 1999.