

성인 머리모형 임팩터의 FE 모델 개발

최지훈^{*1,2)} · 박부창²⁾ · 김종선²⁾

국립과학수사연구원 동부본원¹⁾ · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과²⁾

Development and Validation of FE Adult Headform Impactor for Pedestrian Protection

Jihun Choi^{*1,2)} · Buchang Park²⁾ · Jongsun Kim²⁾

¹⁾National Forensic Service Eastern Office, 260 Munmak-Gongdan-gil, Wonju-si, Gangwon 220-805, Korea

²⁾Department of Control & Dynamics, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

(Received 8 March 2011 / Revised 13 August 2011 / Accepted 14 September 2011)

Abstract : Head injury is one of the most common cause of deaths in car-to-pedestrian collisions. To reduce the severity of such injuries, many international safety committees have performed headform impact test for pedestrian protection. In this paper, an adult headform impactor model is developed based on the finite element (FE) method and validated through the numerical simulation. The skin material of headform impactor is known as polyvinyl chloride skin (PVC) and its material was assumed as viscoelastic. The viscoelastic parameters of headform skin are identified by a series of trial and error methods. The new developed FE adult headform impactor is verified by the drop test and FE JARI adult headform impactor provided by Madymo program.

Key words : EEVC(European Enhanced Vehicle-safety Committee, 유럽자동차안전도개선회), NCAP(New Car Assessment Program, 신차안전도평가), GTR(Global Technical Regulations, 세계기술기준), HIC(Head Injury Criteria, 머리상해지수), Headform(헤드폼), Viscoelastic(비점탄성)

1. 서론

우리나라의 자동차 등록대수가 2010년 말 기준으로 1,794만대를 넘었고 자동차가 증가함에 따라 교통사고도 크게 늘고 있는 추세이며 2010년 우리나라의 교통사고 통계를 참조하면 차대 보행자 사고는 총 53,518건으로 2,047명이 사망하고 51,381 명이 부상하였다. 사망한 보행자의 상해 부위를 보면 머리상해로 사망한 보행자가 1,360명으로 총 보행자 사망건수의 66.4%를 차지하고 있다.¹⁾ 이는 차대 보행자 사고 시 보행자의 머리 상해가 치사율에 큰 요인이 됨을 알 수 있다. 이에 차대 보행자 사고 시 보행자의 사망 및 상해를 줄이고자 유럽(EEVC), 일본

(Japan-NCAP) 및 세계기술기준(GTR) 등에서 엄격한 보행자 보호 기준을 마련되고 있는 실정이며 우리나라에서도 1999년부터 자동차안전도평가제도(Korea-NCAP)를 도입하여 시행중이다. 각국의 보행자 보호를 위한 충돌 안전기준은 다를 수 있으나, 보행자의 상해치 평가방법은 크게 유사하며 머리모형(Headform) 및 하지다리모형(Upper or Lower legform)충돌시험으로 나눌 수 있다.²⁾

특히, 머리모형 충돌시험은 자동차의 후드에 머리모형을 충돌하여 머리의 상해 정도를 나타내는 HIC값을 산출하는데, 일반적으로 HIC 값이 1000이하인 후드일수록 보행자에 대해 안전한 차량이므로 자동차 제작회사는 보행자 보호를 위해 이 HIC 규정 값에 만족하는 후드를 개발하고자 노력하고 있

*Corresponding author, E-mail: djihun@korea.kr

는 실정이다. 현재 우리나라의 자동차안전도평가제도는 교통안전공단 자동차성능연구소에서 머리모형(Head form) 및 하지다리모형(Upper or Lower legform)충돌시험을 통해 우리나라에서 생산된 모든 자동차 및 수입된 자동차에 대한 보행자의 상해치를 평가하고, 이 평가결과를 공개하고 있다.

많은 공학자들 및 자동차 제작회사는 신차종의 생산 시 교통안전공단 자동차성능연구소에서 실시하는 보행자 안전기준을 맞추고, 시험 비용을 절감하기 위한 노력으로 차량의 후드나 범퍼 등을 설계 시 유한요소법(Finite element method)을 널리 이용하고 있다.⁷⁻⁹⁾ 특히, 유한요소법을 이용한 머리모형 모델 개발에 관한 연구를 살펴보면 Costin Untaroiu 등은 실제 충돌시험에 사용되는 성인 머리모형을 단순화하여 머리모형의 표피(Skin) 재질인 점탄성(Viscoelastic) 변수들은 최적화하여 FE 머리모형을 개발하였다.⁶⁾

Clifford C. Chou 등은 코를 제거시킨 Hybrid III 머리모형 표피의 점탄성 변수들에 관한 영향력을 파악하고 시험과 시뮬레이션을 통해 FE 머리모형을 개발하였다.⁸⁾

이화원은 머리모형의 표피 재질인 점탄성 변수들의 영향력과 동 변수들의 최적화된 값을 구해 Hybrid III 50% Dummy의 코를 제거한 4.54 kg의 FE 머리모형을 개발하였다.⁹⁾

윤영한 등은 EEVC의 실제 충돌시험에 사용되는 2.5 kg FE 어린이 머리모형을 개발하여 자동차의 Bullbar에 충돌시험과 시뮬레이션을 통해 개발된 FE 어린이 머리모형을 검증하였다.¹⁰⁾

상기 언급된 연구에서 개발된 FE 머리모형은 어린이 FE 머리모형을 제외하고, 모두 실제 충돌시험에 사용되는 머리모형과 형상 및 크기가 다른 상태이며 실제 충돌시험에 사용되는 성인 머리모형의 FE모델 개발에 관한 연구는 별로 없는 상태이다.

본 연구에서는 교통안전공단 자동차성능연구소에서 보행자 안전도 평가에 사용되는 성인 머리모형의 PVC 표피 재질의 특성을 파악하고 실제 성인 머리모형의 낙하시험(Drop test) 및 검증된 마디모(Madymo)¹¹⁾ 프로그램에서 제공하는 FE JARI 성인 머리모형 모델과 비교·검토한 후, 일반 구조해석용

프로그램인 ANSYS/LS-DYNA¹²⁾를 이용하여 FE 성인 머리모형 모델을 개발하는 것이 목적이다.

2. 머리모형(Headform)

2.1 머리모형의 충돌시험

머리모형의 충돌시험은 Fig. 1에서 보듯이 유럽과 우리나라의 충돌시험 조건은 같으며 WAD (Wrap Around Distance)길이가 1000~1700 mm일 경우, 어린이 머리모형(Child headform)을 자동차 후드의 지표면에 대해 50°의 각도로 충돌시키고, WAD 길이가 1700~2100 mm일 경우, 성인 머리모형(Adult headform)을 자동차 후드의 지표면에 대해 65°의 각도로 충돌시키며, 각각의 머리모형으로 최소 9곳을 충돌시키고, 충돌속도는 40 km/h로 설정하고 있다.^{3,4)}

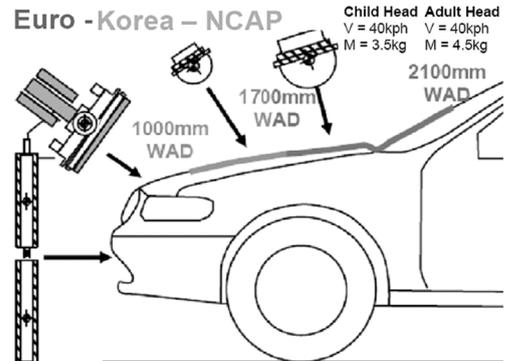


Fig. 1 Methods of impact test for Europe and Korea^{3,4)}

2.2 머리모형의 개발 배경²⁾

머리모형은 사체(PMHS : Post Mortem Human Subject), 보행자 더미(Pedestrian dummy) 및 Hybrid III Head 모델을 기반으로 실제 사람머리와 유사하게 개발되었다. 현재도 많은 연구자에 의해 사람의 머리와 생태학적(Biofidelity)으로 유사하게 개발하기 위해 여러 가지 연구와 시험이 진행 중이다.

2.3 머리모형의 구조 및 종류

Fig. 2와 같이 머리모형의 구조는 구(Sphere), PVC 표피(PolyVinyl Chloride skin), 엔드 플레이트(End plate), 3축 가속도계 및 스틸 플레이트(Steel plate)로

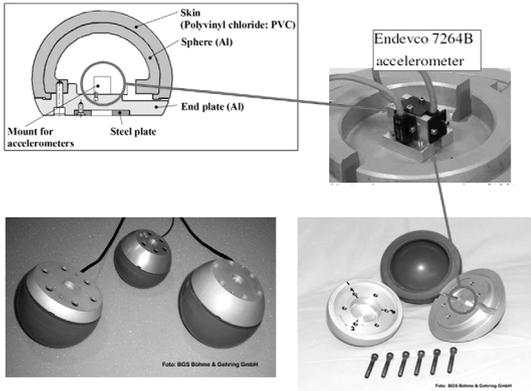


Fig. 2 Structure of headform

구성되어 있으며 구는 머리의 내부, PVC 표피는 두피에 해당되며 머리모형의 3축(x, y, 및 z) 가속도를 측정할 수 있는 Endevco 7264dB 가속도 센서가 엔드 플레이트에 설치되어 있으며, 이 가속도를 측정하여 HIC값의 계산이 가능하다.

머리모형의 종류는 크게 성인 머리모형(Adult headform)과 어린이 머리모형(Child headform)으로 나누어지고, Table 2에서 보듯이 유럽과 우리나라의 머리모형은 크기 및 무게가 같고, 본 연구에서는 Fig. 3같이 유럽과 우리나라의 보행자 범규에 해당하는 무게가 4.5 kg, 지름이 165 mm인 성인 머리모형에 대한 FE 모델을 개발하고자 한다.

Table 1 Types of headform^{3,4)}

	EEVC		JARI(Korea)	
	Child	Adult	Child	Adult
Weight (kg)	3.5	4.5	3.5	4.5
Diameter (mm)	130	165	130	165

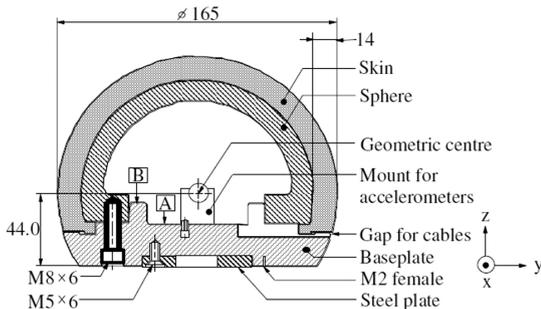


Fig. 3 Structure of adult headform

3. 성인 머리모형의 FE 모델 개발

Fig. 2에서 보듯이 머리모형의 구조에서 구(Sphere)와 엔드 플레이트(End plate)의 재질은 알루미늄(Aluminium)이며 스틸 플레이트(Steel plate)는 스틸(Steel)로 구성되어 있는데, PVC 표피(Skin) 재질은 점성(Viscosity)과 탄성(Elastic)의 두 가지 성질을 가지고 있는 점탄성(Viscoelastic) 재질로 알려져 있다.^{6,8,9)} 위의 알루미늄과 Steel의 물성치는 쉽게 얻을 수 있으나, 상기 마디모 프로그램내의 FE 머리모형에서 표피부분에 해당하는 점탄성 재질은 암호화(Encrypted) 되어 있어,¹¹⁾ 점탄성 재질의 물성치를 파악하는데 어려움이 있다.

3.1 점탄성(Viscoelastic) 재질의 특성

PVC 표피의 점탄성 특성은 비선형(점성과 탄성)이고 시간에 의존적(Time dependent)이므로 재질의 특성을 파악하는 것은 매우 어렵다. 아래 식은 점탄성 특성을 나타내는 식이며,

$$\therefore G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty})e^{-\beta t}$$

where, $G(t)$: Relaxation modulus

G_0 : Short time shear modulus

G_{∞} : Long time shear modulus

β : Decay factor

K : Bulk modulus

$$\therefore E = 9K G_0 / (3K + G_0)$$

$$\nu = (3K - 2G_0) / (6K + 2 G_0)$$

머리모형의 FE Model를 개발하기 위해 G_0 , G_{∞} , β , K 의 값을 적절히 선택하여, 영계수(E : Young's Modulus)와 포아송 비(ν)를 결정할 수 있다.

3.2 머리모형의 자유낙하 시험(Drop test)²⁾

머리모형으로 충격시험을 하기 전에 Fig. 4에서 보듯이 머리모형을 높이가 376 mm 되는 지점에서 강체 바닥에 자유 낙하시켜 얻은 가속도 값이 성인 머리모형의 경우 225~275 g 값이 되도록 우선 교정(Calibration) 과정을 거쳐야만 한다.

따라서, 머리모형의 낙하시험을 통한 가속도 값의 범위가 225~275 g 되도록 머리모형의 PVC 표피의 점탄성 특성인 G_0 , G_{∞} , β , K 값을 시행 착오법

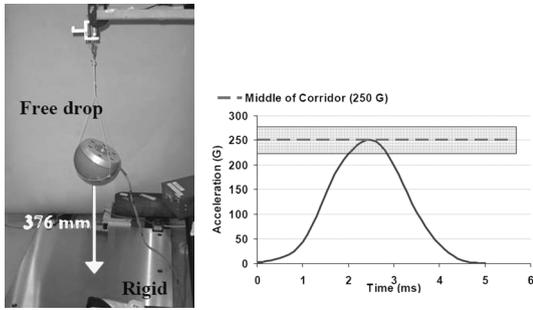


Fig. 4 Drop test of headform

(Trial and error)으로 구해야만 한다.

3.3 FE 머리모형의 검증(Validation)

시행 착오법으로 구한 머리모형의 PVC Skin의 점탄성 특성인 G_0 , G_∞ , β , K 값을 Table 2에 정리하였고, 또한, Fig. 5에 개발된 FE 성인 머리모형을 도시하였으며 FE 성인 머리모형과 실제 충격시험 사용되는 JARI 성인 머리모형을 Table 3에 비교 하였다.

상기 개발된 FE 성인 머리모형의 자유낙하 시뮬레이션 가속도 값과 실제 충격시험에 사용되는 성인 머리모형의 자유낙하 시험 및 검증된 마디모의 JARI 성인 머리모형의 자유낙하 시뮬레이션의 가속도 값을 Fig. 6에 상호 비교하였다.

Table 2 Characteristic of PVC skin

G_0 (MPa)	G_∞ (MPa)	β (1/s)	ρ (kg/m ³)	K (MPa)
4.9	1	66.67	1100	460

Table 3 Comparison of JARI headform and developed FE headform model¹³⁾

Parameters	Actual (JARI)	FE model
Mass (kg)	4.5	4.52
Diameter (mm)	165	165
Drop test	225~275 g	243.64 g
Inertia (kg·m ²)	0.0075~0.02	0.011~0.012

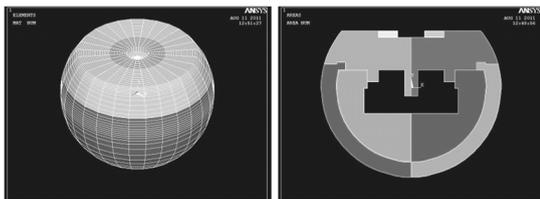


Fig. 5 Section and model of developed FE adult headform

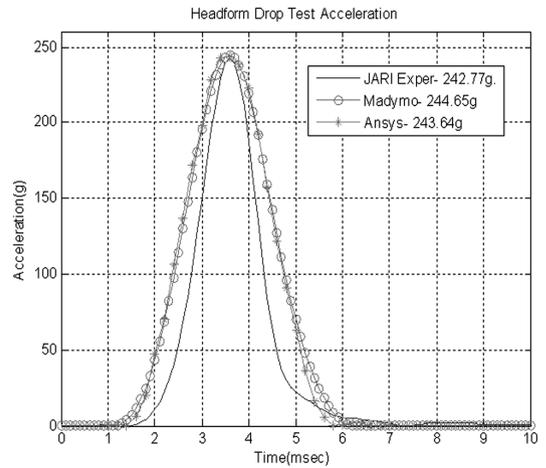


Fig. 6 Comparison of acceleration for drop test

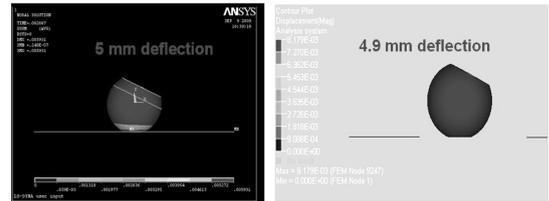


Fig. 7 Comparison of displacement for drop test simulation

Fig. 6에서 보듯이 ANSYS/LS-DYNA로 새로 개발된 FE 성인 머리모형의 자유낙하 시뮬레이션 가속도 값과 실제 머리모형의 자유낙하 및 마디모 JARI 성인 머리모형의 자유낙하 시뮬레이션의 가속도 피크값(peak value)이 유사하고, 자유낙하 가속도 캘리브레이션 범위인 225~275 g를 만족하며 Fig. 7에서 보듯이 개발된 FE 성인 머리모형 및 마디모 JARI 성인 머리모형의 자유낙하 시뮬레이션에 의한 변형량도 유사함을 알 수 있다.

또한, Fig. 8~10에서 보듯이 가로×세로가 300×300 mm인 Steel plate에 수직으로 검증된 마디모의 JARI 성인 머리모형을 20, 30, 40 km/h로 충격한 시뮬레이션 결과와 개발된 FE 머리모형을 같은 조건으로 충격한 시뮬레이션 결과를 비교해 보면, Steel plate의 변형량, 머리모형의 가속도 및 HIC값의 오차가 최대 3.6% 이내로 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 ANSYS/LS-DYNA 프로그램으로 개발한 FE 성인 머리모형이 실제 머리모형과 유사하게 모델링 되었음을 알 수 있다.

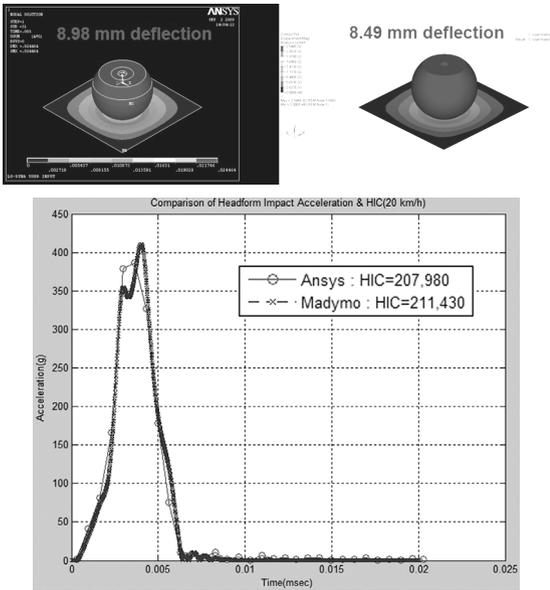


Fig. 8 Comparison of displacement, acceleration and HIC (for 20 km/h)

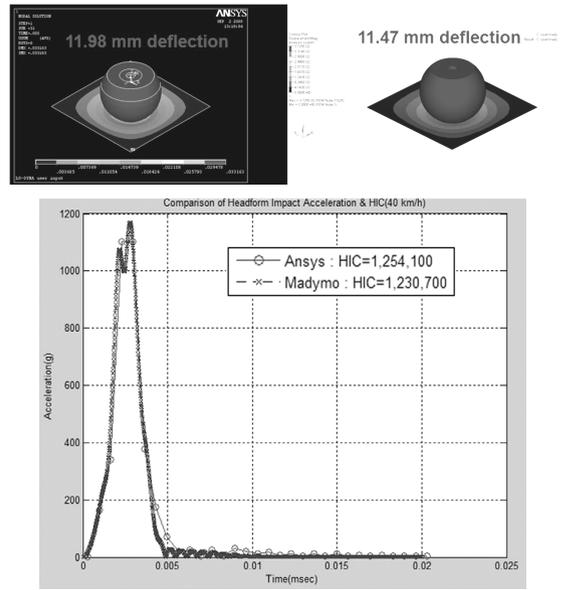


Fig. 10 Comparison of displacement, acceleration and HIC (for 40 km/h)

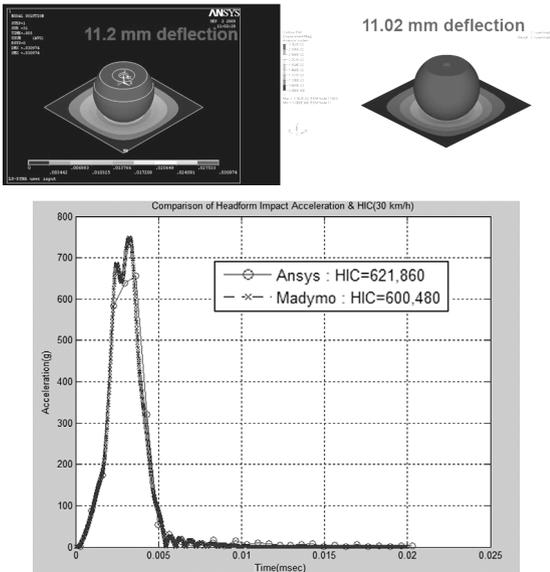


Fig. 9 Comparison of displacement, acceleration and HIC (for 30 km/h)

4. 결론

본 연구에서는 교통안전공단 자동차성능연구소에서 보행자 안전도 평가에 사용되는 성인 머리모형의 PVC 표피 재질인 점탄성 특성을 파악하고 실

제 성인 머리모형의 낙하시험 및 검증된 마디모 프로그램에서 제공하는 FE JARI 성인 머리모형 모델과 비교·검토한 후, 일반 구조해석용 프로그램인 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 실제 성인 머리모형과 유사한 FE 성인 머리모형 모델을 개발하였다. 새로 개발된 FE 성인 머리모형 모델은 자동차의 보행자 안전도 평가에 대한 유한요소해석에 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있다고 사료된다.

References

- 1) 경찰청, 교통조사통계, 2010.
- 2) EEVC Working Group 17 Report, Improved Test Methods To Evaluate Pedestrian Protection Afforded By Passenger Cars, 2002.
- 3) European Car Assessment Programme Pedestrian Test Protocol, Ver.5.3, June 2011.
- 4) 자동차안전도평가지침 등에 관한 규정, 국토해양부 고시 제2009-102호, 2009.
- 5) J.-H. Lim, J.-M. Lim and H.-I. Bae, "Development of Pedestrian Protection Analysis Technique," Proceedings of Workshop on Automobile Structural Strength, Recycle, Manufacturing Technologies, Materials and Safety, KSAE,

- pp.131-139, 2000.
- 6) C. Untaroiu, J. Shin and J. Crandal, "Development and Validation of Headform Impactor Finite Element Model with Application to Vehicle Hood Design for Pedestrian Protection," 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006.
 - 7) W.-B. Lee and S.-J. Kang, "A Study on Light Weight Hood Design for Pedestrian Safety," Transactions of KSAE, Vol.15, No.1, pp.106-115, 2007.
 - 8) C. C. Chou, S. D. Barbat, N. Liu, G. F. Li, F. Wu and Y. Zhao, "Additional Notes on Finite Element Models of Deformable Featureless Headform," SAE 970164, 1997.
 - 9) H. W. Lee, "The Development of an Finite Element Headform Model," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1058-1063, 1998.
 - 10) Y.-H. Yoon, J.-E. Yang, J.-S. Lee and J.-G. Kim, Development and Validation of FEM Child Headform for Pedestrian Protection, Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1336-1341, 2003.
 - 11) Madymo 7.1 User Manual, December 2008.
 - 12) ANSYS/LS-DYNA User Manual, 2005.
 - 13) Y. Matsui, A. Sasaki, A. Wittek, Taka&Jin, M. Tanahashi, K. Niimura and Y. Ozawa, "Development of JAMA-JARI Pedestrian Child and Adult Head-form Impactors," 18th ESV Paper 443, 2003.