

# 신형 하부다리 모형 시험 결과에 영향을 미치는 오차 인자 분석

이용훈\* · 김한승\*\* · 장성재\*\*

## Tolerance Factor Analysis of Flexible Pedestrian Legform Impactor Test

Yonghoon Lee\*, Hanseung Kim\*\*, Sungjae Jang\*\*

Key Words : Tolerance Factor Analysis(오차 인자 분석), Flexible Pedestrian Legform Impactor(신형 하부다리 모형)

### ABSTRACT

The flexible pedestrian legform impactor(Flex-PLI) consisting of a flexible femur and tibia will be tested for pedestrian protection by global technical regulation(GTR) within the next couple of years as a replacement for the existing transport research laboratory(TRL) legform impactor. In this study, a computer aided engineering(CAE) model was used to perform the effect analysis of each injury with regard to the changes in tolerance factors with the baseline results without tolerance. The tolerance factors were the height of impactor from ground reference line, initial velocity of impactor and rotation of impactor.

### 1. 서론

차량과 보행자의 충돌 사고 시 보행자의 부상을 줄이기 위하여 보행자 보호 법규(Global Technology Regulation)에서는 새롭게 출시되는 신차의 보행자 보호 성능에 대한 기준을 제정하였다<sup>(1)</sup>. 보행자 보호 법규에서 보행자 보호 성능을 평가하는 방법으로는 Fig. 1과 같이 성인 및 어린 아이 머리모형(Head form) 상해 평가와 상부 및 하부 다리모형(Leg form) 상해 평가가 있다<sup>(2)</sup>. 하부 다리모형의 상해를 평가할 경우 TRL(Transport Research Laboratory)<sup>(3)</sup>에서 제작된 임팩터가 사용되고 있는데 2015년부터는 기존 TRL 임팩터 보다 생체 충실도가 우수한 Flex-PLI(Pedestrian Legform Impactor)<sup>(4)</sup>를 하부다리 모형 상해 평가에 사

용할 계획이다.

Flex-PLI의 상해를 줄이기 위하여 수행된 선행 연구를 살펴보면, 범퍼 구조물과 차량 전방 디자인 형상이 각기 다른 차량에 Flex-PLI를 충돌시키고, 범퍼 유형과 디자인에 대한 Flex-PLI의 상해를 비교 분석한 연구가 수행되었다<sup>(5)</sup>. 또한 차량 전방 구조물 중 로우 범퍼 스티프너와 범퍼 빔 사이의 거리, 에너지 업소버의 공간을 변화시킴에 따라 Flex-PLI의 상해를 비교 분석하였다<sup>(6)</sup>. 나아가 직교 배열표를 사용하여 후드 앞 끝 단까지의 높이, 후드 앞 끝 단과 범퍼 빔 사이에 차량 전후 방향 거리 등이 변경될 때 Flex-PLI의 상해 변화를 분석하여 Flex-PLI의 상해 변화에 영향을 미치는 인자를 분석하였다<sup>(7)</sup>. 또한 시험 오차 변수인 하부 다리 모형의 속도 변화를 고려함과 동시에 Flex-PLI의 상해를 최소화하는 강건 최적설계가 수행되었다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션 차량 해석 모델을 이용하여 Flex-PLI와 차량이 충돌될 때 발생하는 시험 오차 인자들이 Flex-PLI의 상해 변화에 미치는

\* GM Korea Company, Corresponding Author

\*\* GM Korea Company

E-mail : yonghoon.a.lee@gm.com

영향도를 분석한다. 나아가 시험 오차 인자들의 변화가 컴퓨터 시뮬레이션 차량 해석 모델로부터 해석된 결과와 실차로부터 측정된 결과 사이에 존재하는 차이를 줄이는 상관 인자(Correlation Factor)로 사용될 수 있다는 것을 제시한다.

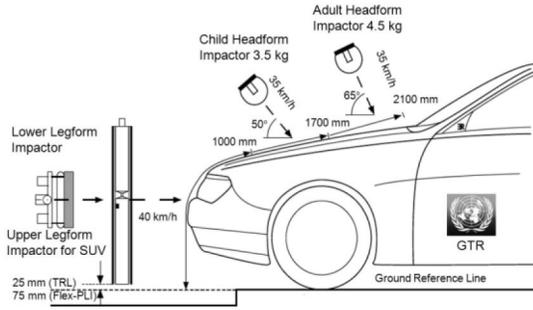


Fig. 1 Pedestrian protection procedure according to global technical regulation (GTR pedestrian safety No.9)

## 2. 하부다리 모형 특성

### 2.1 하부다리 모형의 구조

TRL-PLI는 Fig. 2 (a)에 나타난 것처럼 스킨으로 덮힌 대퇴부와 정강이로 구분된다. 대퇴부와 길이는 432 mm 정강이의 길이는 494 mm 이며 총 길이는 926 mm, 총 질량은 약 13.4 kg 이다. 반면에 신형 하부다리 모형인 Flex-PLI는 Fig. 2 (b)에 나타난 것처럼 대퇴부, 정강이, 무릎으로 분류된다. 또한 차량과 충돌 시 다리 모형의 거동을 보다 현실적으로 구현하기 위하여 대퇴부와 정강이를 여러 개의 파트들로 구성하고 각 파트들을 조인트로 연결하였다. 나아가 차량과 충돌되는 대퇴부, 무릎, 정강이 영역을 합성 고무 시트 (Synthetic rubber sheet)와 네오프렌 시트 (Neoprene sheet)로 피부조직 (Flesh)을 구성하였다. Flex-PLI의 대퇴부 길이는 339 mm, 무릎의 길이는 185 mm, 정강이의 길이는 404 mm 이며 총 길이는 928 mm이다. Flex-PLI의 총 질량은 약 13.5 kg 이다<sup>(5)</sup>.

### 2.2 하부다리 모형 시험 방법

유럽 신차 평가 프로그램의 시험 프로토콜에 차량과 충돌하기 전 Flex-PLI의 높이는 지면으로부터 75 mm 위에 위치하도록 하며, 초기속도는 40 km/h (11.1

m/s)이다<sup>(9)</sup>. 향후 보행자 보호 법규에서도 동일한 방법으로 하부다리 시험이 수행될 것으로 예측된다. 시험시 Flex-PLI의 공중투하지점 (Release point)은 두 가지 방식으로 구분되는데 그 중 Fig. 3 (a)는 자유비행 방식, Fig. 3 (b)는 탄도학을 기초로 하는 방식이다. 자유비행 방식은 중력가속도의 영향을 보상하기 위하여 높이 ( $h$ )를 식 (1)을 통해 계산한다.

$$\text{Fall dau to Gravity } h = \frac{gd^2}{2v^2} \quad (1)$$

만약 중력가속도가 9.81 m/s<sup>2</sup>이고 초기속도가 11.1 m/s 이면 높이는 식 (2)와 같이 자유비행거리 ( $d$ )에 의해 결정된다.

$$\text{Fall dau to Gravity } h = 0.03981d^2 \quad (2)$$

탄도학을 이용한 방식을 적용할 경우에는 발사각도 ( $\phi$ )와 충돌 각도 ( $\theta$ )를 고정할 경우, 자유비행거리와 충돌 각도를 고정할 경우로 구분하여 높이를 계산한다. 먼저 발사각도를 고정하고 충돌 각도가 0° 인 경우 발사 초기속도 ( $u$ )는 식 (3)에 의해 계산되며, 자유비행거리와 높이는 식 (4)와 식 (5)로부터 계산된다.

$$u = \frac{v}{\cos(\phi)} \quad (3)$$

$$d = \frac{v^2 \tan(\phi)}{g} \quad (4)$$

$$h = \frac{v^2 \tan^2(\phi)}{2g} \quad (5)$$

자유비행거리를 고정하고 충돌 각도가 0° 인 경우 발사 초기속도 ( $u$ )는 식 (6)에 의해 계산되며, 높이와 발사각도는 식 (7)과 식 (8)로부터 계산된다<sup>(9)</sup>.

$$u = v \left(1 + \frac{gd^2}{v^4}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$d = \frac{gd^2}{2v^2} \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{gd}{v^2}\right) \quad (8)$$

신형 하부다리 모형 시험 결과에 영향을 미치는 오차 인자 분석

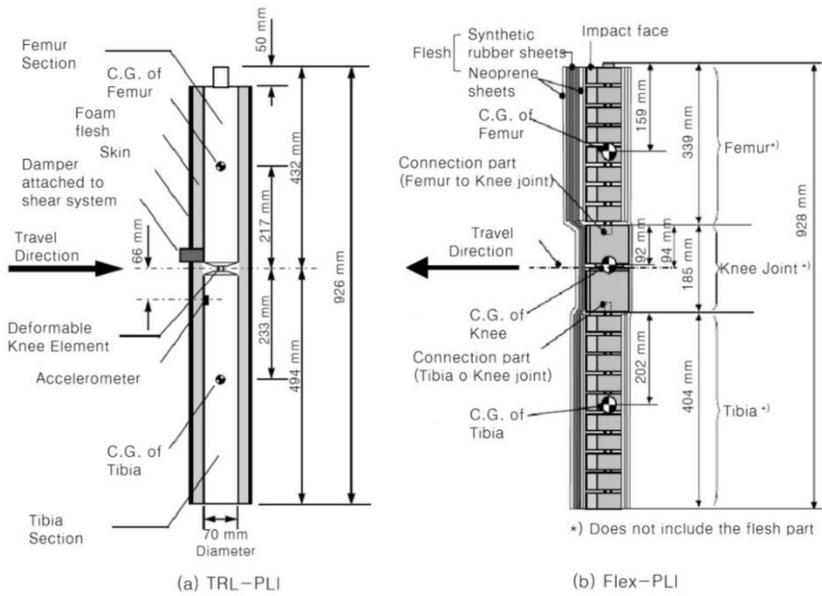


Fig. 2 Side section view of lower legform impactors (Kinsky et al, 2011)

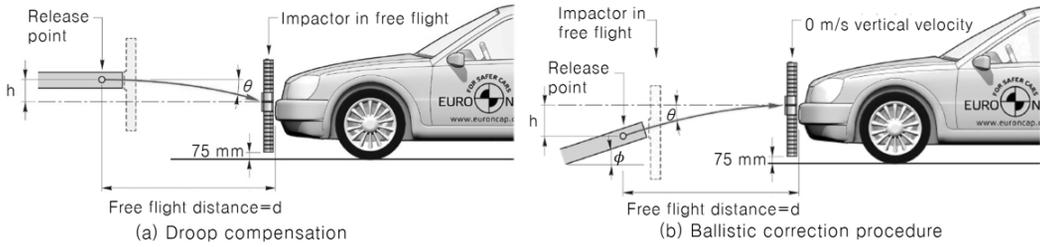


Fig. 3 Legform to bumper test (Euro NCAP testing protocol, Version 7.1.1)

상대적으로 Flex-PLI의 무릎 및 정강이 상해 변화

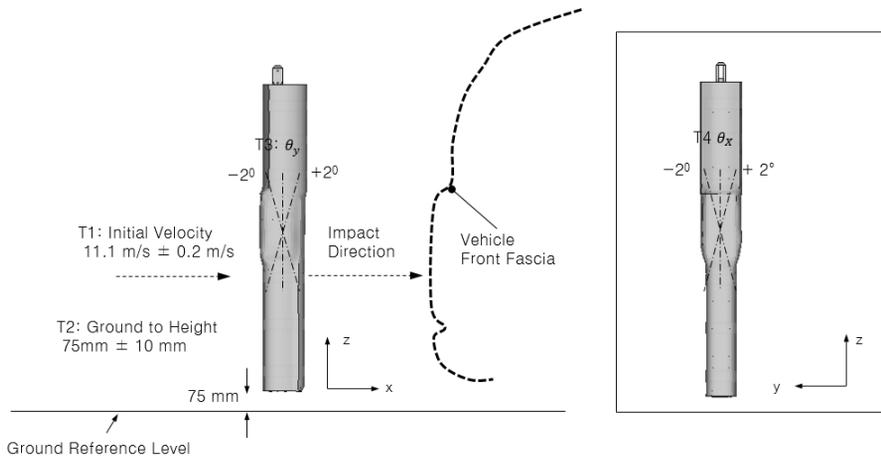


Fig. 4 Tolerance factors for parameter study

에 영향을 미치는 시험 오차 인자들은 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 검증하는데 유용하게 사용되는 상관 인자임을 제시하였다.

### 2.3 하부다리 모형 상해 평가 기준

하부다리 모형 시험이 완료되면 무릎 및 정강이의 상해를 측정하여 Flex-PLI의 경우 무릎 스프링 (Knee spring)을 통해 내측 측부 인대인 MCL (Medial Collateral Ligament) 신장량 (Elongation)을 측정하고, 나아가 무릎 와이어 케이블을 이용하여 ACL과 PCL의 (Anterior/Posterior Cruciate Ligament) 신장량을 측정함으로써 무릎의 상해를 평가한다. 또한 스트레인 게이지를 이용하여 80 mm 간격으로 정강이 굽힘 모멘트인 TBM (Tibia Bending Moment)을 측정함으로써 정강이의 상해를 평가한다. 보행자 보호 법규와 유럽 신차 평가 프로그램에서 제시하는 Flex-PLI의 정강이 및 무릎 상해 평가 기준을 Table 1에 정리하였다. 수치적으로 상해 기준을 살펴보면 정강이 굽힘 모멘트가 340 Nm 이하, 내측 측부 인대 신장량이 22 mm 이하, 앞쪽과 뒤쪽 십자인대의 신장량이 13 mm 이하이다<sup>(10)</sup>. 반면에 유럽 신차 평가 프로그램에서 우수한 성능으로 평가되기 위한 상해 기준은 굽힘 모멘트가 282 Nm 미만, 내측 측부 인대 신장량이 19 mm 미만, 앞쪽과 뒤쪽 십자인대의 신장량이 10 mm 미만이다<sup>(11)</sup>.

## 3. 하부다리 모형 시험 오차 인자 분석

### 3.1 오차 인자 선정

하부다리 모형이 차량 범퍼에 충돌되는 시험을 수행할 때 발생할 수 있는 시험 오차 인자는 크게 네 가지이다. 첫 번째 오차 인자는 하부다리의 초기속도이며 오차범위는 ± 0.2m/s 이다. 두 번째 오차 인자는 지면으로부터 하부다리의 높이이며 오차 범위는 ±10 mm 이다. 세 번째 및 네 번째 오차 인자는 하부다리의 회전 각도( $\theta_y$ ,  $\theta_x$ )이며 오차 범위는 ± 2° 이다<sup>(9)</sup>. 각 오차 인자의 최대 및 최소 값을 Table 2에 정리하였다.

### 3.2 오차 인자 분석

네 가지의 시험 오차들이 Flex-PLI의 무릎 및 정강이 상해에 미치는 영향도를 평가하기 위하여 Table 3

과 같이 총 8가지 경우에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 차량 모델을 이용하여 해석을 수행한 뒤 그 결과를 시험 오차가 반영되지 않은 기본 모델의 해석 결과를 기준으로 정규화하여 비교하였다. 사용된 차량 모델은 경차, 소형차, 스포츠 다목적 차량으로 총 세 가지이다. Fig. 5와 Fig. 6은 Flex-PLI의 초기 속도 변화와 Flex-PLI의 지면으로부터의 높이 변화에 따른 각각의 상해 변화를 나타내고, Fig. 7과 Fig. 8은 Flex-PLI의 각도 변화에 의한 각각의 상해 변화를 나타낸다. 결과들을 살펴보면 운동에너지를 증가시키는 초기속도의 변화보다 지면으로부터의 Flex-PLI의 높이가 기존보다 10 mm 낮아질 때 세 가지 유형 차량 모두에서 Flex-PLI의 상해가 증가하였으며, 반대로 높이가 10 mm 높아질 때 상해가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 Flex-PLI의 높이가 낮아지면서 범퍼 빔과 로우 범퍼 스티프너와 충돌되는 센서의 위치가 변하고 상대적으로 Flex-PLI의 높이가 낮아지면서 Flex-PLI의 정강이 영역인 하단부의 굽힘량이 증가되기 때문이다. 또한 Flex-PLI의 회전각도( $\theta_y$ )의 변화도 상대적으로 Flex-PLI의 상해 변화에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 회전각도( $\theta_y$ )가 기존보다 +2° 일 때 내측 측부 인대와 앞쪽과 뒤쪽 십자인대의 변화가 크다는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Proposed acceptable levels of lower leg injury risks in GTR and Euro NCAP (good performance)

Legform	Flex-PLI		
	A/PCL	MCL	TBM
GTR	≤ 13 mm	≤ 22 mm	≤ 340 Nm
Euro NCAP	< 10 mm	< 19 mm	< 282 Nm

Table 2 Minimum and maximum values of tolerance factors

Tolerance factor level		1(min)	2	3(max)
T1	Velocity (m/s)	10.9	11.1	11.3
T2	Height (mm)	65.0	75.0	85.0
T3	$\theta_y$ (degree)	-2.0	0.0	+2.0
T4	$\theta_x$ (degree)	-2.0	0.0	+2.0

Table 3 Parameter study matrix for 4 tolerance factors

신형 하부다리 모형 시험 결과에 영향을 미치는 오차 인자 분석

	T1	T2	T3	T4
1	1	2	2	2
2	3	2	2	2
3	2	1	2	2
4	2	3	2	2
5	2	2	1	2
6	2	2	3	2
7	2	2	2	1
8	2	2	2	3

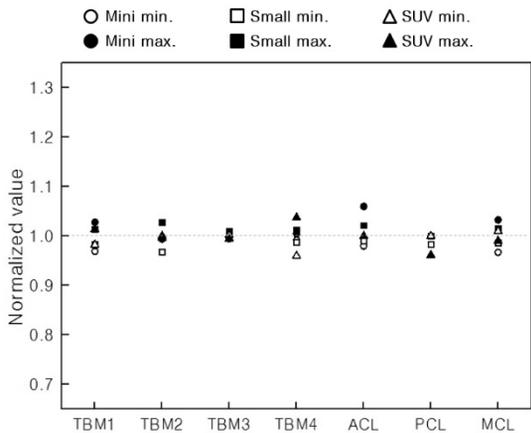


Fig. 5 Normalized values for Flex-PLI injury risks with impactor velocity change

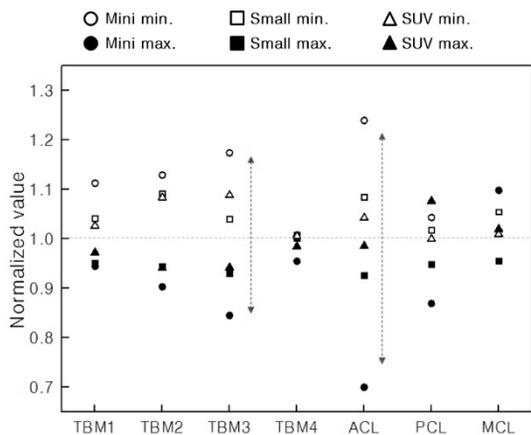


Fig. 6 Normalized values for Flex-PLI injury risks with impactor height change

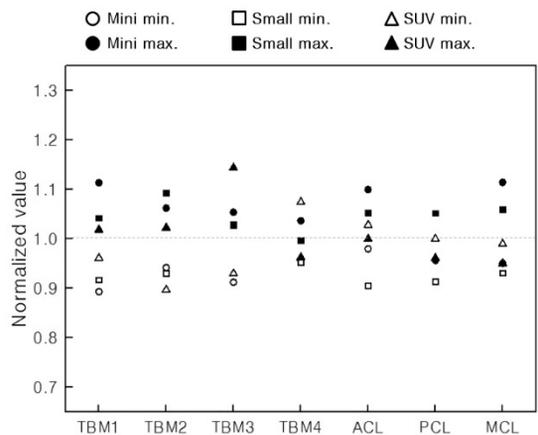


Fig. 7 Normalized values for Flex-PLI injury risks with impactor Angle( $\theta_y$ ) change

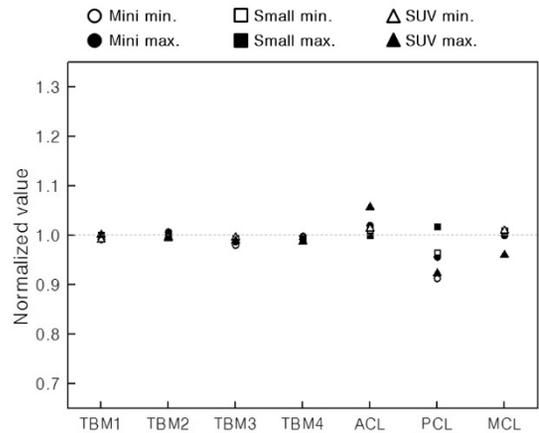


Fig. 8 Normalized values for Flex-PLI injury risks with impactor Angle( $\theta_x$ ) change

앞서 시험 오차 인자들이 Flex-PLI의 상해 변화에 영향을 미치는 정도를 분석하므로 Flex-PLI 높이 변화와 회전각도( $\theta_y$ )가 상해 변화에 미치는 영향도가 크다는 것을 밝혀내었다. 이와 같은 결과들은 컴퓨터 시뮬레이션 차량 모델을 검증할 때도 유용한 상관 인자로 사용될 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 경차와 소형차에 Flex-PLI가 충돌될 때 앞쪽 십자인대의 신장량의 변화를 나타낸다. 실선으로 표기된 컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과는 실차 시험으로부터 측정된 결과보다 십자인대의 신장량이 크게 측정되었다. 도출된 결과들 사이에 존재하는 차이를 줄이기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 적용된 재료, 두께 등을 수정하는 방법도

있지만 앞서 분석된 시험 오차 인자들의 변화를 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 적용하는 방법도 있다. 즉, Flex-PLI의 높이를 +10mm 증가시키고 회전각도( $\theta_0$ )를  $-2^\circ$ 로 수정하여 해석을 수행한다면 표기된 점선과 같이 해석된 앞쪽 십자인대의 신장량이 감소할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

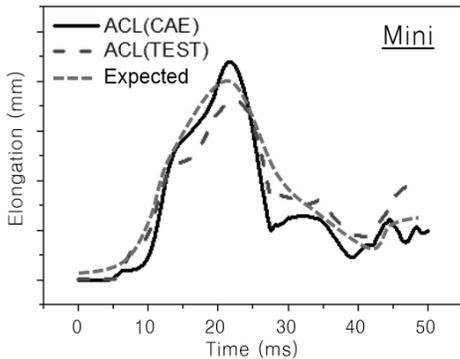


Fig. 9 ACL elongation result comparison (Mini car)

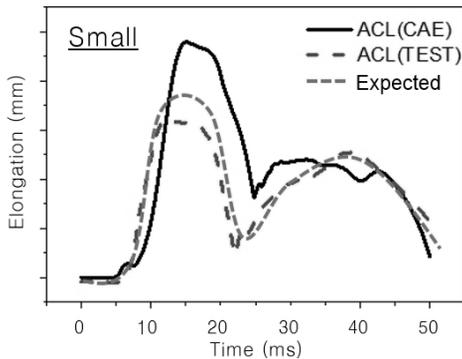


Fig. 10 ACL elongation result comparison (Small car)

#### 4. 결론

본 연구에서는 세 가지 유형의 컴퓨터 시뮬레이션 차량 해석 모델을 이용하여 Flex-PLI와 차량이 충돌될 때 발생하는 시험 오차 인자들이 Flex-PLI의 상해 변화에 미치는 영향도를 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 네 가지 시험 오차 인자들의 최대 및 최소값 변화에 의한 Flex-PLI의 상해 변화를 분석한 결과 높이 변화와 회전각도( $\theta_0$ )가 Flex-PLI의 무릎 및 정강이 상해 변화에 미치는 영향도가 크다는 것을 발견하였다.

- 2) 상대적으로 Flex-PLI의 무릎 및 정강이 상해 변화에 영향을 미치는 시험 오차 인자들은 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 검증하는데 유용하게 사용되는 상관 인자임을 제시하였다.

#### 참고문헌

- (1) Economic Commission for Europe. (2009). Global Technical Regulation Pedestrian Safety, No.9.
- (2) Carhs. (2013). Safety companion, Pedestrian Protection, pp. 74.
- (3) Transport Research Laboratory. (2002). Pedestrian Legform Impactor User Manual.
- (4) Shah. C., Harn. W., Zhou. H., Kleessen. C., Zhu. F. and Kant. R. (2011). A New Advancement in Pedestrian Safety Finite Element FE Modeling of The Flex-PLI GTR. 22th ESV Conference, Paper Number 11-0237.
- (5) Kinsky. T., Friesen. F. and Buenger. B. (2011). The Flexible Pedestrian Legform Impactor and it's Impactor on Vehicle Design. 22nd ESV Conference, Paper Number 11-0328.
- (6) Choi. C. and Pardede. V. (2011). Reduction of Pedestrian Injury Risks in Injury Mechanism of FlexPLI. KSAE Annual Conference, pp. 1948-1954.
- (7) Ji. S. H., Shin. J. H., Kang. H. M. and Kim. J. H. (2012). A Study on Flexible PLI for Pedestrian Protection. KSAE Annual Conference. pp. 7-21.
- (8) Lee. Y. H., Joo. Y. J., Park. J. S., Kim. Y. S. and Yim. H. J. (2014). Robust Optimization of Frontal Structures for Minimizing Injury Risks of Flex Pedestrian Legform Impactor. International Journal of Automotive Technology, Vol.15, No.5, pp.757-764.
- (9) European New Car Assessment Program. (2013). Pedestrian Testing Protocol, Version 7.1.1.
- (10) Economic Commission for Europe. (2012). Global Technical Regulation Pedestrian Safety, Proposal for Amendment 2.
- (11) European New Car Assessment Program. (2012). Assessment Protocol Pedestrian Protection, Version 7.1.1.