

PDB 시험에 대한 충돌 상호 안전성

장은지 · 김요셉 · 범현균* · 권성은

지엠대우오토엔테크놀로지

Compatibility for Proposed R.94 PDB Test

Eunji Jang · Joseph Kim · Hyenkyun Beom* · Sungeun Kwon

Vehicle Crash Test Team, GM Daewoo Auto & Technology Co., 199-1 Cheong Cheon-dong,
Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 15 September 2009 / Accepted 17 November 2009)

Abstract : Currently various safety tests are being performed in many countries with growing interest in vehicle safety. However the vehicles which have good safety performance in these tests could not secure the good performance in real car to car accident. So new test protocol using progressive deformable barrier (PDB) was proposed by EEVC in Europe, NHTSA in USA and some vehicle manufacturers, etc. The target of PDB test is to control partner protection in addition to self-protection on the same test. The proposal is to update current ECE R.94 frontal ODB test. So barrier, impact speed, overlap are changed to avoid bottoming-out in the test configuration. In this paper 3 different tests (R.94, EuroNCAP and PDB test) were carried out using current production vehicles with same structure. The results of these tests were compared to understand PDB test. As a result PDB test shows the highest vehicle deceleration and dummy injury because PDB offers a progressive increase in stiffness in depth and height. However vehicle intrusion was affected with rather test velocity than stiffness of deformable barrier. PDB deformation data is used for partner protection assessment using PDB software and it shows that the test vehicle is rather not aggressive.

Key words : Compatibility(충돌 상호 안전성), PDB(Progressive deformable barrier, 점진적 변형벽), EuroNCAP (유럽신차 안전도 평가 프로그램), ECE R.94(유럽 정면 충돌 시험 법규)

Nomenclature

PPDA: Partner Protection Assessment from Deformation

1. 서론

국내를 비롯하여 미국, 유럽, 호주 등 각 국에서는 정면 충돌, 측면 충돌, 지주 측면 충돌 등의 다양한 시험 방법으로 자동차 안전도를 평가하고 있다. 법규에 의한 규제 이외에 신차 안전도 평가 제도 (NCAP)라고 불리는 충돌 시험 등을 통해 자동차의

안전도를 평가하고 이에 대한 정보를 소비자에게 제공하여 자동차 제작사로 하여금 보다 더 안전한 자동차 개발을 유도하고 있다. 소비자는 자동차 구매 시 자동차 충돌 안전성에 대한 정보를 얻고 안전 의식을 고취시킬 수 있으며, 이는 궁극적으로 교통 사고로 인한 사상자를 감소시켜 사회적 부담 비용 감소로 이어질 수 있다.

그러나 현재 안전성 평가에서 뛰어난 안전 성능을 나타내는 자동차들이 실제 차 대 차 사고가 발생할 시 충돌 상호 안전성 (compatibility)^{1,2)}을 보장하지 못한다는 문제가 제기되고 있다. 이와 같은 결과는 현재의 안전성 평가 방법이 충돌차량 안전(self

*Corresponding author, E-mail: hyenkyun.beom@gmdat.com, Ph.D

protection) 만을 고려하기 때문이다. 즉 충돌차량의 성능을 향상시키기 위하여, 차량의 전면 부위의 강성을 강화시켜 왔다. 전면 부위 강성 강화는 충돌당하는 차량의 안전(partner protection)을 담보하지 못한 결과와 변형벽 bottom-out 현상은 실제 사고와 큰 차이를 보이고 있다. 이를 보완하기 위한 방법으로 써, PDB³⁾, FWDB⁴⁾ 등의 시험 방법이 연구 중에 있다. 현재 연구 추세는, self protection은 현재 성능을 유지하면서 partner protection은 충돌 공격성(aggressivity)을 감소시키는 시험 방법 고안으로 진행되고 있다. 실제 사고 사례 분석을 통한 충돌 상호 안전성 관련된 주요 문제는 poor structural interaction, stiffness mismatching 와 compartment strength를 들 수 있다. 위와 같은 현재의 충돌 시험 방법을 개선하기 위하여, 프랑스에 의해 PDB 시험에 대한 ECE R94 법규가 새롭게 제안된 상태이다.⁵⁾

본 논문에서는 충돌 상호 안전성을 측정하기 위한 시험 방법 중 하나로 제시된 점진적 변형벽을 이용한 정면 충돌 시험(PDB)을 소개하고 제안된 시험 방법에 따라 당사에서 수행한 시험 결과와 현재 유럽 법규(ECE R.94) 시험⁶⁾ 및 신차 평가 프로그램(EuroNCAP) 정면 충돌 시험⁷⁾ 결과와 비교하여 그 시험 특성을 살펴보고자 한다.

2. 정면 충돌 시험 개요

2.1 점진적 변형벽(PDB) 정면 충돌 시험

점진적 변형벽 정면 충돌 시험은 Fig. 1과 같이 60 kph의 속도로 차량을 견인하여 차량의 50%를 점진적 변형벽에 걸쳐 충돌시키는 시험이다. 이는 현재 시행되고 있는 ECE R.94 유럽 법규 정면 충돌 시험과 EuroNCAP 정면 충돌시험에서 발생하는 bottoming-out 현상을 개선한 것으로 ECE R.94 시험 방법에서 변형벽과 속도, offset 양을 변경하여 실제 차 대 차 사고에 좀 더 가까운 시험을 할 수 있도록 개선하였다. 각각의 시험 방법은 Table 1에 비교하였다. 변형벽은 Fig. 1과 같이 형상과 크기 및 별집 구조물의 물리적 특성 등을 변경하여 기존 시험의 문제점으로 지적된 차량이 콘크리트 벽에 직접 충돌되는 bottoming-out 현상을 방지하였다. 기존의 ECE R.94 변형벽과 점진적 변형벽(PDB)의 크기 차이는 Fig. 2에

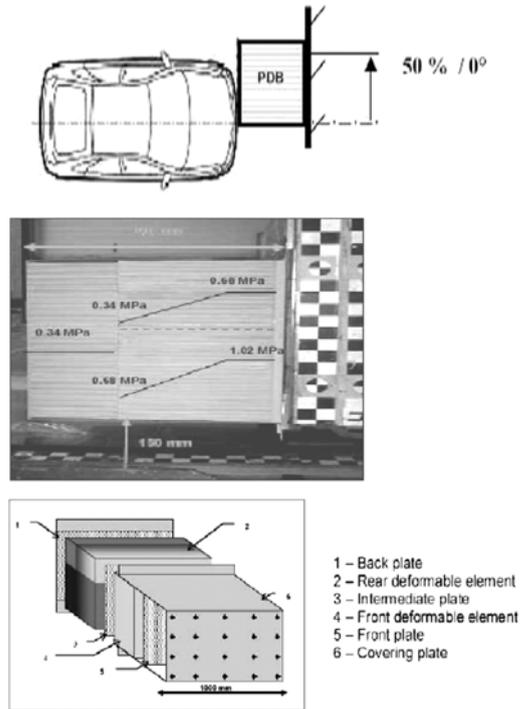


Fig. 1 PDB test configuration and PDB barrier v.8.0

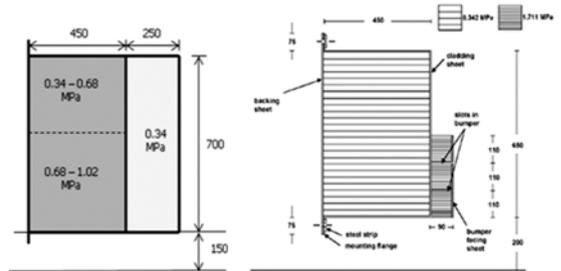


Fig. 2 Comparison PDB (left) old version with ODB for ECE R.94 (right)

나타내었고 PDB가 160mm 더 깊다. 본 논문의 시험을 수행한 이후 새로운 version의 PDB가 다시 제시되었고 이는 Fig. 3과 같이 기존의 PDB보다 90mm 더 깊어졌으며 stiffness 또한 변경되었다. 이 시험의 차량 분석을 통하여 승객의 안전성을 컨트롤하고 변형벽의 분석을 통해서 충돌 차량의 승객 보호를 위한 평가를 할 수 있게 된다.⁸⁾

2.2 유럽 법규 정면 충돌 시험

EEVC barrier를 56kph의 속도로 차량의 40% 겹쳐

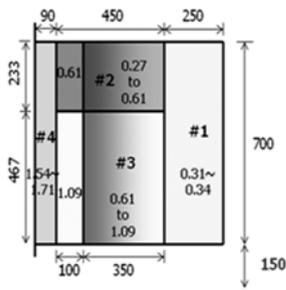


Fig. 3 New PDB version

충돌하는 시험이다. 성인 승객의 안전도를 평가하기 위해 50th percentile Hybrid3 인체모형을 운전석과 조수석에 위치시키고 인체모형 내에 장착된 센서를 통해 상해치를 측정한다.

2.3 유럽 신차 안전도 평가 프로그램

유럽 신차 안전도 평가 프로그램(EuroNCAP) 정면 충돌 시험은 앞 절의 유럽 법규와 동일한 방법으로 시험하며, 충돌 속도만 64kph 증가하여 시험한다.

3. 충돌 시험 결과 비교 분석

본 논문에서는 시험을 수행한 세 양산 차량의 플랫폼이 동일하고 엔진 및 미션 등의 크기 차이가 적어 기본 structure가 유사하므로 차량의 자세한 specification은 무시하였고 시험 방법에 따른 개괄적인 차이에 분석의 중점을 두었다. Test1은 유럽 정면 충돌 법규 시험(ECE R94)이고 test2는 EuroNCAP 정면 충돌, test3은 PDB 시험이다. 시험 차량의 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test conditions for vehicle and barrier

	Test1 (ECE R.94)	Test2 (EuroNCAP)	Test3 (PDB)
Test speed (kph)	56	64	60
Overlap(%)	40	40	50
Barrier	EEVC	EEVC	PDB
Stiffness	Lower	Lower	Higher
Actual test speed	56.4 km/h	64.5 km/h	60.3 km/h
Test weight	1301kgf	1314kgf	1301kgf
Condition	A	A'	A

3.1 차량 데이터 비교 분석

시험 결과 중 차량의 특성을 나타내는 B-Pillar에서의 가속도, 속도, 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 가속도 그림에서 test1과 test2의 B-Pillar x 감가속도는 유사한 거동을 보이며, 이는 동일 변형벽을 사용하기 때문으로 보인다. test1, test2와 PDB 시험 결과를 보면, 차량의 감가속도 차이가 상당히 크며, 이는 점진적 이동벽 특성이 차량의 가속도에 영향을 미친 것으로 생각된다. 속도 곡선은 가속도 곡선을

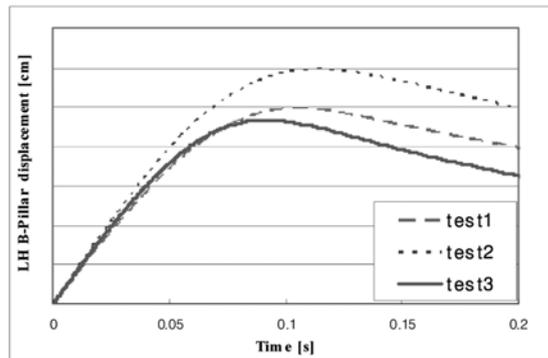
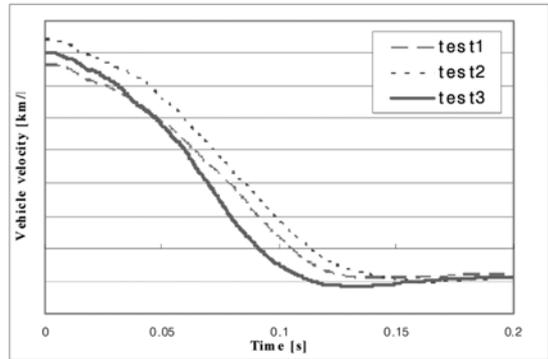
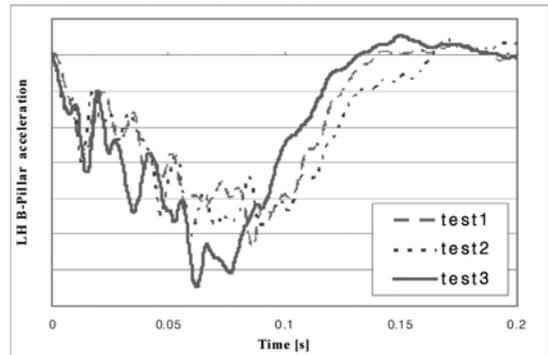


Fig. 4 Comparison of LH B-Pillar pulses

초기속도 조건을 주고 적분하여 계산하였으며, test1과 test2는 감속도 경향이 유사한 반면, 앞의 두 시험과 PDB 시험의 감속도 경향은 큰 차이를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 변형벽의 강성과 깊이가 증가 때문인 것으로 판단된다. 즉, test1, 2에서 뒤 쪽 변형벽의 stiffness가 0.34MPa로 고정되어 있는데 반해 test3에서는 뒤 쪽 변형벽의 윗 부분이 0.34MPa ~ 0.68MPa로, 아랫부분이 0.68MPa ~ 1.02MPa로 EEVC 변형벽보다 상대적으로 크면서 점진적으로 stiffness가 증가하는 PDB 변형벽에 충돌하였기 때문인 것으로 보인다. 차량의 변위는 두 가지 요인에 의하여 결정된다. 고정 벽면이 아니고 변형 벽면이기 때문에 변형벽의 변형량과 차체 변형량의 합으로 볼 수 있다. test1과 test2 차량의 변위 차이는 충돌 속도에 의한 차이이며, 변형벽은 변형 상태는 큰 차이가 없다. 이는 test3의 변위가 가장 적은 이유이다. 즉 PDB 변형벽의 변형량이 강성 증가로 인하여 상대적으로 test1, test2에 비해 적기 때문에 전체적인 차량의 변위가 test1, test2 보다 적게 나타나고 있다.

Fig. 5에서 차량의 yawing angle 변화를 살펴보면 50ms까지는 yawing angle 변화가 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 50ms 이후 test1, 2와 test3의 yawing angle 증가 경향이 확연히 다르게 나타나기 시작하고 100ms 이후로는 속도가 다른 두 시험 차량의 차이가 발생된다. 120ms 이후 시험 속도가 가장 빠른 test2- EuroNCAP의 yawing angle이 급격하게 증가한다. 50ms에서 angle 증가 경향이 크게 두뉘어 나타나는 것은 차량과 변형벽의 충돌 부분부류로 나이 10% 가량 차이가 있었기 때문으로 차량

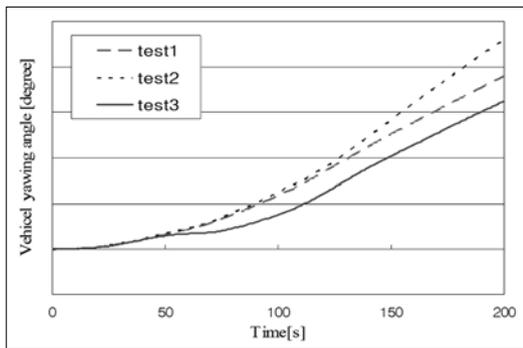


Fig. 5 Comparison of vehicle yawing angle

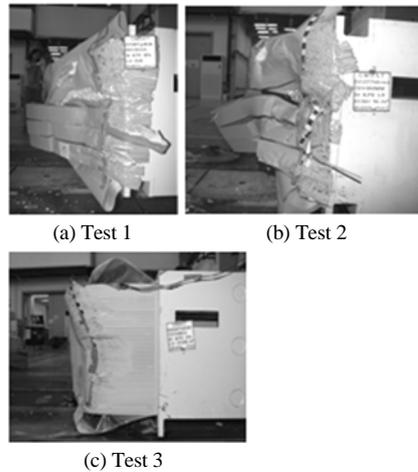


Photo. 1 Comparison of barrier deformation

의 50%가 겹쳐 충돌되는 test3의 경우에서 angle 변화는 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 또한 test3에서 사용된 PDB 변형벽의 큰 stiffness 특성과 무관하지 않은 것으로 보인다.

시험 후 변형벽의 변형된 모습은 Photo.1에 나타내었다. test1과 test2의 변형벽은 bottoming out 이 발생되었으나 test3의 변형벽은 약 380mm 정도의 두께가 남아 있음을 볼 수 있다.

3.2 인체 모형 상해치

차량에 착석시킨 50th percentile Hybrid3 인체 모형의 상해치 결과는 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 이는 유럽 정면 충돌 법규 시험에서 규제하고 있는 상해치를 기준으로 하였다.

위의 결과를 통해 운전석의 경우에는 인체 상해치 가운데 chest compression과 VC, knee slider injury를 제외하고는 test3- PDB TEST에서 전반적인 Injury가 높은 경향이 나타났다. 또한 조수석에서는 PDB TEST에서 전반적으로 Injury가 증가된 경향이 나타났다. Fig. 6에서와 같이 약 104ms에는 test3에서 다른 시험 모드에서는 나타나지 않았던 인체 모형의 머리 bottoming out 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 시험으로부터 restraint system이 sensing 되어있어 barrier 강성이 커진 test3에 대응하지 못하고 다른 현상을 보인 것이라 판단되며, 이 결과는 향후 PDB test가 법규화된다면, 에어백 개발 시 반드시 고려되어야 함을 의미한다.

Table 2 50th%-ile hybrid3 driver injury

		Test1 [%]	Test2 [%]	Test3 [%]
HPC (36ms)		100.00	141.16	196.42
3ms head resultant		100.00	106.30	132.68
Neck bending moment (InExtension, Nm)		100.00	340.24	779.15
Chest	THCC	100.00	146.04	119.65
	VC	100.00	378.95	152.63
Femur	LH (kN)	100.00	1117.65	2729.41
	RH (kN)	100.00	448.98	387.76
TCFC	LH (kN)	100.00	52.00	88.00
	RH (kN)	100.00	72.15	206.33
TI	LH	Upper	100.00	76.67
		Lower	100.00	132.00
	RH	Upper	100.00	119.44
		Lower	100.00	108.00
Knee slider	LH (mm)	100.00	3714.29	1828.57
	RH (mm)	100.00	2409.09	818.18

Table 3 50th%-ile hybrid3 passenger injury

		Test1 [%]	Test2 [%]	Test3 [%]
HPC (36ms)		100.00	81.53	203.47
3ms head resultant		100.00	94.32	132.69
Neck bending moment (In extension, Nm)		100.00	42.86	113.83
Chest	THCC	100.00	80.76	102.73
	VC	100.00	92.31	146.15
FFC	LH (kN)	100.00	200.00	250.83
	RH (kN)	100.00	285.71	140.00
TCFC	LH (kN)	100.00	97.03	200.99
	RH (kN)	100.00	55.94	125.17
TI	LH	Upper	100.00	188.46
		Lower	100.00	72.73
	RH	Upper	100.00	103.70
		Lower	100.00	161.54
Knee slider	LH (mm)	100.00	3000.00	3766.67
	RH (mm)	100.00	4000.00	0.00

Chest Injury는 Fig. 7과 같고 test2, test3에서는 chest contact⁹⁾이 발생되며 이는 test3에서 10ms 정도 빨리 일어난다. PDB TEST에서의 barrier 특성 차이가 충돌 중 steering column movement 차이로 나타나고 이는 ODB TEST와 상이한 인체 모형의 거동을 야기하는 것을 고속 카메라로 촬영한 동영상을 통해 확인할 수 있다. 고속 카메라 촬영 영상 분석을 통해 얻은 인체 모형 머리 거동 차이는 Fig. 8과 같다.

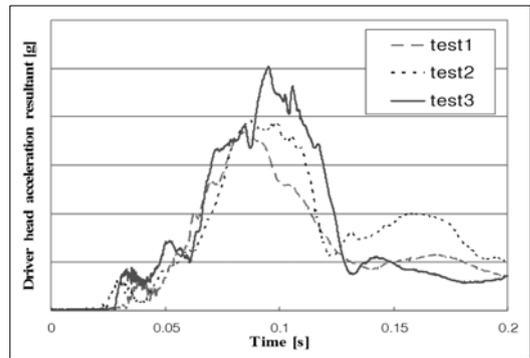


Fig. 6 Comparison of driver head injury

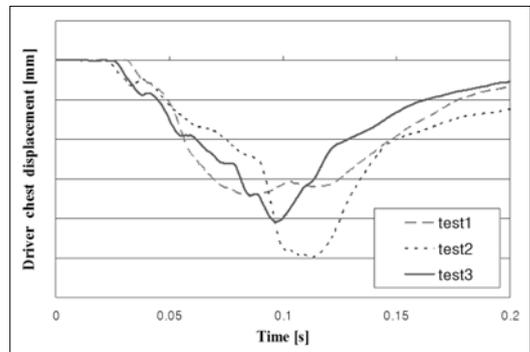
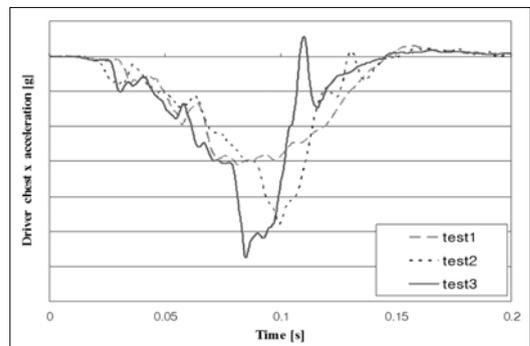


Fig. 7 Comparison of driver chest injury



Photo. 2 Motion capture of driver head

3.4 차량 변형량

시험을 통해 측정된 차량의 변형량은 Fig. 9, Table 4와 같다. 시험 결과, 전반적인 intrusion 양은

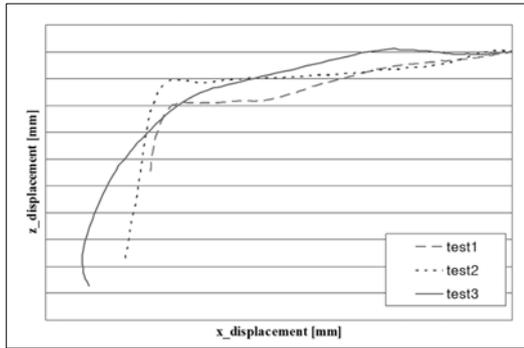


Fig. 8 Comparison of driver head trajectory

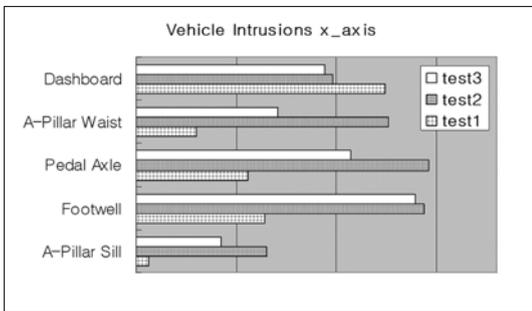


Fig. 9 Comparison of vehicle intrusions

Table 4 Vehicle intrusion data

	Test1 [%]	Test2 [%]	Test3 [%]
A-pillar sill	100.00	1083.33	708.33
Footwell	100.00	225.00	217.97
Pedal axle	100.00	260.71	190.89
A-pillar waist	100.00	4200.00	2360.00
Dashboard	100.00	79.03	75.81

속도가 가장 높은 test2에서 가장 크게 나타났다. 이는 충돌한 변형벽의 stiffness가 차량의 감속에 큰 영향을 미쳐 test3에서 가장 큰 감속 경향이 나타났던 결과와 다르게 intrusion에 있어서는 속도의 영향이 크게 작용된 결과로 볼 수 있다.

4. PDB Software

Partner protection의 평가는 barrier deformation data 분석으로 이루어진다. 시험 후 3D Laser Scanner 장비로 얻어진 변형된 barrier shape CAD data를 PDB Software에 입력하면 PPAD(Partner Protection Assessment from Deformation), AHOD(Average height of

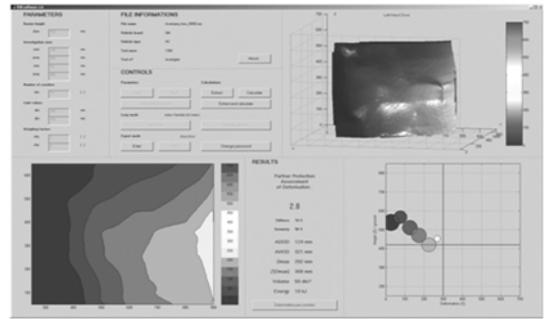


Fig. 10 Example of PDB software output

deformation)과 ADOD(Average depth of deformation), barrier에 의해 흡수된 energy 등 Fig. 10과 같은 output을 얻을 수 있다.⁸⁾ 현재 정확한 Criteria가 마련되지는 않은 상태이나 PDB software를 통한 barrier 분석으로 현 양산 차량의 partner-protection 수준을 살펴볼 수 있다. PPAD는 barrier의 변형정도를 스캔한 데이터를 50mm 간격으로 14단계로 나누어, 각각의 변형 영역에 대하여 면적 평균 수평 변형량(X)과 수직 변형(Z)를 구하여 각 영역의 투영 면적으로부터 식 (1), (2)와 같은 계산식을 통해 구한다. 결과적으로 X 값이 기준 값보다 증가하면, 변형벽의 평균 변형량이 증가함을 의미하고, 충돌 차량의 강성이 크을 알 수 있다. 또한 Z값이 기준값보다 증가하면, 변형중심의 높이가 증가하여 차대차 충돌에서 차량 전면부의 강성 부조화가 발생하여 상대 차량에 공격성을 보이게 된다. 결국 X,Z값의 증가는 R 값의 증가를 유발하게 되고, PPAD값도 증가하여 공격성 정도가 증가하게 된다. 그러므로 Fig. 11에서와 같이 PPDA 값이 1에 가까울수록 차량은 상대차량에 비 공격적이고, 12에 가까울수록 공격적이다. PDB 분석 결과 Test3 시험 차량의 PPAD 값은 2.7로 나타나 non aggressive 하다는 것을 알 수 있었다.

$$R = \sum_{i=1}^{14} \left(\frac{Z_i}{Z_{lim}} \right)^4 \times \left(\frac{X_i}{X_{lim}} \right)^2 \times S_i \quad (1)$$

X : 각 영역의 면적평균 변형(mm)

Z : 각 영역의 면적평균 높이(mm)

S : 각 영역을 평면에 투영한 면적(cm²)

Z lim = 420mm corresponding to average longitudinal height I Europe

X lim = 300mm corresponding to Mark4 and deformation of the progressive deformable element

$$PPDA = \frac{0.52}{10} R^{0.55} \quad (2)$$

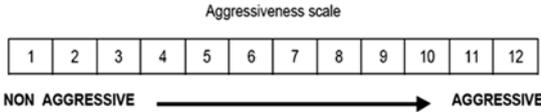


Fig. 11 Aggressiveness scale

5. 결론

본 연구에서는 차량 충돌 시의 상호 안전성을 평가하기 위한 점진적 변형벽 정면 충돌 시험의 선행적 수행을 통해 그 결과를 분석하고 기존에 수행하여왔던 유럽 법규 시험과 유럽 신차 안전도 평가 프로그램 정면 충돌 시험과 비교하여 그 특성 차이를 살펴 보았다.

- 1) 기존의 변형벽과는 다르게 고정벽에 가까워질수록 stiffness가 증가하며 결과적으로 큰 stiffness를 갖는 점진적 변형벽을 이용한 정면 충돌 시험에서 차량이 상대적으로 빠르게 감속되는 경향을 볼 수 있었다. 이는 기존의 시험에서 차량이 고정벽에 bottoming out 되어 차 대 차 사고 재연에 어려움이 있었던 한계를 극복하여 충돌 시 상호 차량의 안전 성능을 개선하기 위한 방향을 제시할 수 있도록 한 의미가 있다.
- 2) 정면 충돌 시험에서 차량의 빠른 감속은 차량에 착석되어 있는 인체 모형의 상해치kinematics에 큰 영향을 미친다. 유럽 법규에서 규제하고 있는 인체 모형 상해치를 기준으로 비교해 본 결과 몇 가지 injury를 제외한 거의 대부분의 상해치가 차량의 감속 경향이 크게 나타나는 점진적 변형벽 시험에서 가장 크게 나타났다. 상대적으로 큰 속도를 갖는 시험 모드에서 발견되지 않았던 운전석 인체모형의 머리 bottoming out 현상 또한 발

생됨을 알 수 있었다. 이는 현재의 구속 장치 시스템이 PDB 시험에 대한 고려 없이 개발된 상태이기 때문이며, 향후 PDB 시험을 고려한 구속 장치 개발이 필요하다.

- 3) 차량의 변형량에 있어서는 대부분의 data가 속도와 연관성 있게 나타나 충돌 시 속도가 높을수록 차량의 변형이 크게 일어남을 확인하였다.
- 4) PDB software를 이용하여 test3의 barrier deformation을 분석한 결과 PPAD 2.7로 non-aggressive하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2008년 11월 정기 학술대회 발표내용(pp.1596-1601)을 수정하여 재출판한 것임.

References

- 1) Car Crash Compatibility and Frontal Impact Final Report, EEVC, 2007.
- 2) E. Faerber, EEVC Approach to Develop Test Procedure(S) for the Improvement of Crash Compatibility Between Passenger Cars, ESV 07-0331, 2007.
- 3) PDB Test Protocol-V.2.3, 2006.
- 4) FWDB-TRL-Test Protocol-V3.0, 2007.
- 5) ECE-TRANS-WP29-GRSP-2007-17e, Regulation No. R94.
- 6) ECE R94 Test Protocol, 2003.
- 7) EuroNCAP Frontal Impact Testing Protocol, V4.2, EuroNCAP, 2008.
- 8) PDB SoftV_1.0 User Guide, UTAC.
- 9) J. Kim, K. H. Lim, H. K. Beom and S. E. Kwon, "The Study on the Chest Contact with a Wheel according to Patterns of Driver Chest Acceleration Pulse Shape in the Frontal Sled Test," KSAE 30th Anniversary Conference Proceedings, Vol.3, pp.1153-1158, 2008.