

SB5-B 소형차 충돌속도의 상향 가능성 평가

김기동^{1*}, 고만기¹, 주재웅²

¹공주대학교 건설환경공학부, ²한국도로공사 도로교통연구원

Assessment on the Possibility of Increase of SB5-B Small Car Impact Velocity

Kee-Dong Kim^{1*}, Man-Gi Ko¹ and Jae-Woong Joo²

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

²Korea Expressway Corporation Research Institute

요 약 SMART Highway 종방향 배리어 상위등급 SB5-B 대형차 충돌조건을 만족하면서 120km/h의 소형차충돌속도를 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성이 조사되었다. 실험 충돌시험의 결과에 Calibrate된 입력 변수를 적용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 120km/h 소형차 충돌속도에 대한 차량의 종방향(longitudinal)과 횡방향(transverse) 속도변화가 THIV 한계를 만족시킬 수 있도록 다양한 배리어 모델이 개선되었고 이 과정을 통해 결정된 배리어 모델이 SB5-B 실험충돌시험을 통과하였다. 통과된 배리어 모델 slip block-out 날개의 각도를 변화시키면서 120km/h 소형차 충돌속도의 상향가능성을 유한요소해석(FEA)을 통하여 조사하고 실험차량 충돌시험을 수행하였다. 소형차충돌속도 130km/h에 대한 표준시험 여건이 갖추어 진다면 소형차 충돌속도 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성이 높은 것으로 조사되었다.

Abstract Satisfying the large car impact condition of the high level SB5-B for "SMART Highway" longitudinal barriers, the possibility of increase of the small car impact velocity from 120km/h to 130km/h was investigated. Through computer simulation using input parameters calibrated to full-scale crash test results, various longitudinal semi-rigid barrier models were improved such that for the small car impact speed of 120km/h the change of longitudinal and transverse velocities of the impact vehicle can satisfy the THIV limit. The barrier model determined through this process satisfied the performance assessment criteria for SB5-B impact conditions. Varying the wing angle of slip block-outs of the passed barrier model, the possibility of increase of the small car impact velocity was investigated by FEA and a full-scale crash test was conducted. It has been shown that the possibility to increase the small car impact speed to 130km/h is high if the test facility condition for 130km/h impact velocity is better equipped.

Key Words : FEA, Impact velocity, Longitudinal semi-rigid barriers, SB5-B Impact Condition

1. 서론

SMART Highway 사업은 미래의 변화에 효과적으로 대응할 수 있도록 고속도로의 안전성, 이동성, 그리고 편리성을 증진시키기 위하여 IT를 기반으로 하는 교통운영

기술, 도로상황을 인식하는 차량 지능화 기술, 그리고 높은 설계속도에 필요한 도로기술 등을 연구하는 사업이다. 본 연구는 높은 설계속도에 관한 도로기술 중에서 도로 설계속도의 증가에 상응하는 배리어 충돌조건과 배리어에 관한 것이다.

본 논문은 국토교통부 건설기술혁신사업(07-기술혁신-A01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kee-Dong Kim(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9306 email: kkkim@kongju.ac.kr

Received May 20, 2013

Revised June 3, 2013

Accepted June 7, 2013

SMART Highway의 종방향 배리어 상위 등급(SB5-B) 충돌조건으로 소형차에 대하여 900kg의 충돌차량, 120km/h의 충돌속도, 그리고 20°의 충돌각도가 사용되었고 대형차에 대해서는 14000kg의 충돌차량, 85km/h의 충돌속도, 그리고 15°의 충돌각도가 사용되었다. SB5-B 소형차 충돌속도는 "Criteria for high design speed facilities"[1]에 제시된 도로설계속도 140km/h에 대한 118km/h의 소형차 충돌속도를 고려하여 결정된 것이다.

도로안전시설(roadside safety features)의 실물 충돌 시험을 위한 충돌조건은 일반적으로 발생 가능한 최악의 조건(worst practical conditions)과 과도한 경제적인 부담 없이 활용할 수 있는 기술로 실현 가능한 성능 수준(performance level)을 고려하여 결정된다. 본 연구에서는 위의 SMART Highway 상위등급(SB5-B) 소형차 충돌조건이 현실 가능한 최악의 조건인지 검토하고 SB5-B 대형차 충돌조건을 만족하면서 120km/h의 소형차충돌조건을 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성을 조사하고자 하였다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 입력변수의 Calibration

본 연구에서는 실물 충돌시험의 결과에 calibrate된 주요 입력변수를 적용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하면서 종방향 속도(V_x)와 횡방향 속도(V_y) 변화가 Theoretical Head Impact Velocity(*THIV*) 한계값을 만족시킬 수 있도록 해석모델을 개선하고 SB5-B 소형차 충돌조건에 상향 가능성을 조사하였다. 종방향 반강성 배리어의 경우에 snagging과 pocketing이 방지되도록 Block-Out이 적절히 설계된다면 Post-impact Head Deceleration(*PHD*) 값이 설계를 좌우하는 중요한 변수로 작용하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 *THIV* 발생시간 t_T 에서의 차량 종방향 속도($V_x(t_T)$)와 횡방향 속도($V_y(t_T)$)의 합속도($\sqrt{V_x^2(t_T) + V_y^2(t_T)}$)로 정의되는 *THIV*를 주요 변수로 고려하여 배리어 모델을 개선하였다. 여기서, t_T 는 V_y 속도변화를 나타내는 V_y 곡선과 초기 충돌속도 사이의 면적이 0.3m이 되는 시간을 나타낸다.

FEA(Finite Element Analysis)는 충돌해석에 광범위하게 사용되고 있는 3-D 비선형 동적 해석프로그램인 LS-DYNA[2]를 사용하여 수행되었다. 차량 모델은 미국의 National Crash Analysis Center(NCAC)에서 공개한 Geo Metro Model[3]이 사용되었다. Table 1에 Geo Metro 차량 해석모델의 형상과 구성요소가 나타나 있다. 배리어

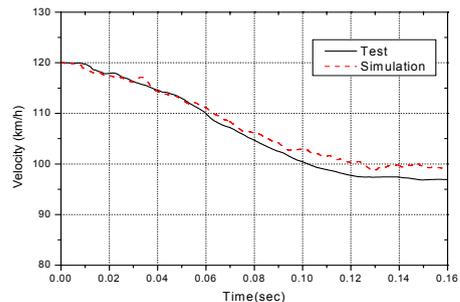
의 모든 구성요소에 탄성-완전소성 응력-변형을 관계가 적용되었다. 지주를 제외한 강재 재료모델은 245Mpa의 항복강도와 210,000Mpa의 탄성계수가 적용되었다. Post와 지반의 재료특성은 정적 지주강도 시험의 하중-변위 관계에 calibration을 통하여 결정되었다. 보, 지주, 그리고 Block-Out의 모델에 사용된 해석요소의 수는 mesh refinement 과정을 통하여 결정되었다. FEA에 적용된 차량과 배리어 모델의 주요 입력자료와 보다 자세한 Calibration 과정은 참고문헌[4]에 나타나 있다. Fig. 1에는 Test와 FEA결과가 나타나 있는데 이 그림으로부터 FEA가 차량 횡방향 속도 V_x 와 종방향 속도 V_y 를 상당히 정확하게 예측한다는 것을 볼 수 있다.

[Table 1] Vehicle(Geo Metro) of FEA model

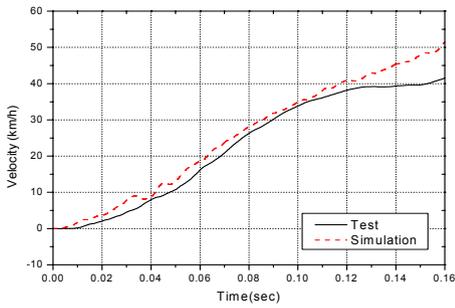


Element Type	Number of Elements
Solid	1,209
Beam	2
Shell	191,980
기타	8
Total	193,199

Fig. 2에 나타나 있는 다양한 배리어 모델에 대하여 FEA를 수행하여 SB5-B 소형차 충돌조건을 만족시킬 수 있는 배리어 설계를 조사하고 최적 모델을 결정한 후에 최적 모델을 이용하여 SB5-B 소형차 충돌조건에 상향 가능성을 조사하였다.

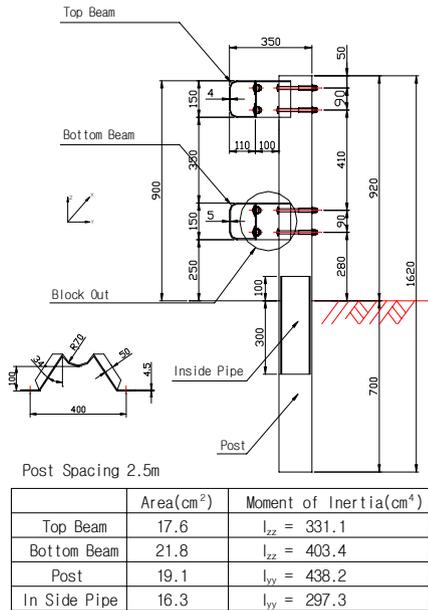


(a)

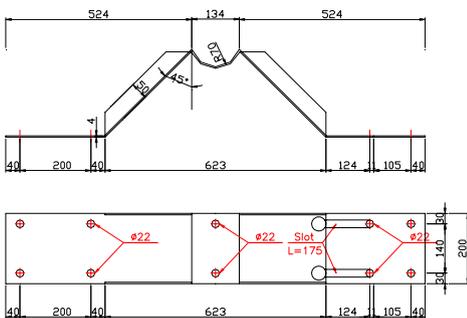


(b)

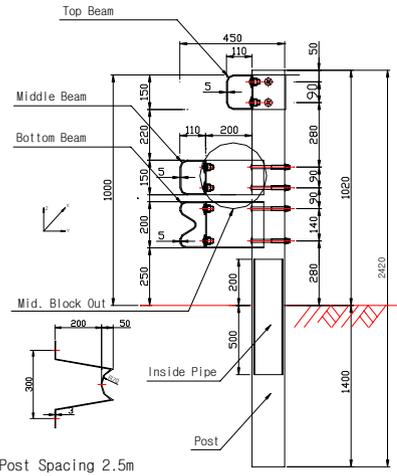
[Fig. 1] Comparison of test and simulation:
(a) Longitudinal velocity variations;
(b) Transverse velocity variations.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 2] Sections and section properties of barrier models:
(a) M1; (b) Slip Block-out of M6; (c) M5.

3. SB5-B 등급 반-강성 배리어 결정

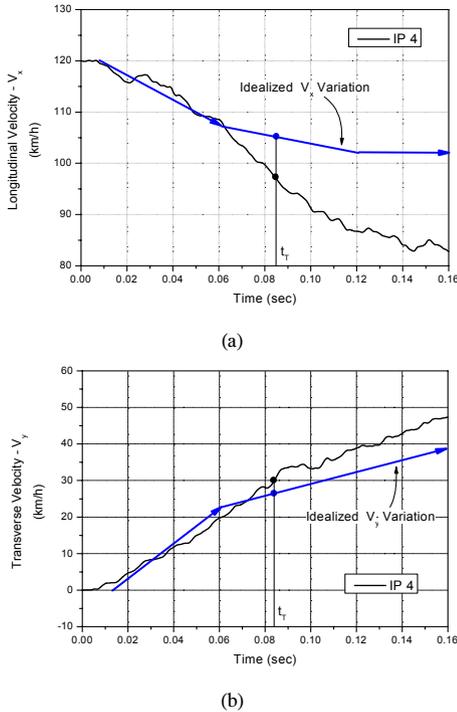
3.1 배리어 모델 1(M1)

배리어 모델 1에 대하여 Computer Simulation을 이용하여 성능평가를(탑승자 안전도, 구조적 적절성, 충돌 후 차량거동, 횡 변위 제한조건) 수행하였다. 배리어 모델 1(M1)은 SB5-B 대형차 충돌조건과 최대 횡 변위 조건 (1m)을 만족시킬 수 있도록 예비설계 과정을 통해서 결정되었다.

M1 모델에 충돌위치(Impact Point)를 변화시키며 SB5-B 소형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 수행하였다. 첫 번째 충돌위치(IP1)는 Post에서 우측으로 0.65m 이격된 지점이고 두 번째부터 다섯 번째 충돌위치(IP2~IP5)는 IP1에서 0.5m씩 순차적으로 우측으로 이동된 지점이다. 충돌위치에 상관없이 t_T 에서 종방향 차량 이동 거리는 약 2.5m로 나타났다.

THIV가 가장 크게 나타나는 Critical Impact Point(CIP)는 지주에서 2.15m 만큼 이격된 IP4 이고 IP4에 대한 THIV는 37.0km/h로 나타났다. CIP에 대한 THIV 기준(33km/h)을 만족시키기 위하여 충돌초기에 차량 횡변위를 감소시킬 필요가 있다. 충돌초기의 작은 횡

변위는 t_T 근처에서 V_x 에 미치는 지주의 영향을 줄이고 충돌초기의 V_y 기울기를 증가시킬 것이다. 또한 t_T 근처에서 V_y 기울기가 증가하지 않도록 지주 횡방향 강성의 영향을 최소화 할 필요가 있다.



[Fig. 3] Simulation results for M1: (a) Comparison of V_x variation of IP4 and Idealized V_x Variation ; (b) Comparison of V_y variation of IP4 and Idealized V_y Variation

M1 모델에 대하여 SB5-B 대형차 충돌조건을 적용하여 simulation을 수행하였다. 차량모델은 NCAC에서 공개하고 있는 유럽 표준 EN-1317 시험 차량 모델 HGV 16ton을 사용하였다. 차량 질량은 HGV 16ton 모델에 무게중심(CG)이 변하지 않도록 질점질량을 감소시켜서 14ton으로 수정하였다. SB5-B 대형차 충돌조건을 적용한 M1 모델의 Simulation에 의한 최대 횡변위는 1.19m로 나타났고 충돌차량이 하단 보를 밟고 지나가면서 구조적으로 매우 불안정한 거동을 보였다. 대형차 충돌조건에 대한 횡변위 제한조건을 고려하여 횡변위를 0.8m로 가정하고 Olson Model을 이용하여 대형차 충돌시 발생하는 횡방향력을 산정하면 19.0ton으로 나타난다. 대형차 충돌시 발생하는 횡방향력 보다 배리어 극한강도를 크게 만들기 위하여 보 단면적을 증가시키며 Failure Mechanism을 적

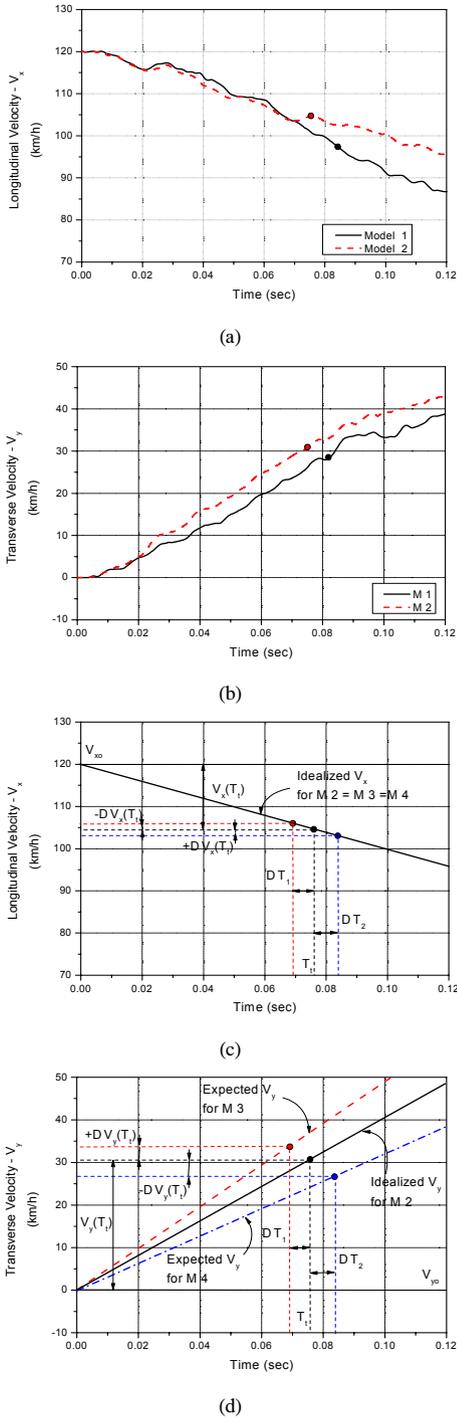
용하면 상,하 단 보의 두께가 7mm이상 되어야 배리어 극한강도가 19.0ton이상이 된다. 또한 상,하단 보 두께를 7mm로 증가시킨다면 CIP에 대한 소형차 충돌시 차량 횡변위를 감소시킬 수 있다고 판단된다. 충돌초기의 작은 횡변위는 Fig. 3(a)와 같이 t_T 근처에서 V_x 증가를 방지할 수 있고 Fig. 3(b)와 같이 충돌초기의 V_y 기울기를 증가시킬 수 있기 때문에 소형차 충돌위치 변화에 대한 THIV 편차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 배리어모델 2(M2)

M2 모델은 M1 모델의 상,하단 보 두께를 기존의 4mm, 5mm에서 각각 7mm로 증가시킨 모델이다. Fig. 4(a)에 나타나 있는 IP4의 M2 모델과 M1 모델의 V_x -시간 이력을 비교하여 보면 충돌초기에는 기울기가 유사하지만 t_T 근처에서는 M2 모델의 기울기가 M1 모델 보다 크게 감소하는 것을 알 수 있다. M2 모델의 경우 보의 횡방향 강성이 M1 모델 보다 크게 증가하여 충돌초기에 차량 횡변위가 크게 감소하게 된다. 따라서 t_T 근처에서 V_x 에 미치는 지주 영향이 작아지게 되어 M2 모델의 V_x 기울기가 M1 모델 보다 상당히 감소하게 된다. 결론적으로 충돌위치에 상관없이 보 강성 증가로 인하여 M2 모델의 t_T 와 $V_x(t_T)$ 가 M1 모델 보다 작게 나타난다.

Fig. 4(b)에 나타나있는 M1 모델과 M2 모델의 IP4에 대한 V_y -시간 이력을 비교하여보면 전체적으로 M2 모델의 V_y 기울기가 M1 모델의 기울기 보다 상당히 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 보 강성이 증가하면 배리어 전체 강성도 증가하기 때문에 지주 횡방향 강성이 V_y 를 주로 지배하는 시간(IP1의 충돌초기와 IP4의 t_T 근처)에서도 M2 모델의 V_y 기울기가 M1 모델 보다 상당히 크게 증가하였다. 따라서 보 강성이 증가된 M2 모델은 IP에 상관없이 V_y 기울기가 증가되기 때문에 M1 모델 보다 t_T 가 단축되고 $V_y(t_T)$ 는 증가하게 된다. 결론적으로 M2 모델의 THIV(34.6km/h)는 M1 모델 보다 상당히 감소하였다.

SB5-B 소형차 충돌조건에 대하여 M2 모델의 보 두께를 변화시켜서 THIV 한계값이 만족될 수 있는지 보 강성의 영향이 더 조사 되었다. 모델의 변화로 인해 발생하는 $V_x(t_T)$ 의 감소(- $\Delta V_x(t_T)$)와 $V_y(t_T)$ 의 증가(+ $\Delta V_y(t_T)$)로 인하여 THIV가 감소하기 위해서는 식(1)이 만족되어야 한다.



[Fig. 4] Simulation results for IP4: (a) V_x variation of M1 and M2; (b) V_y variation of M1 and M2; (c) Idealized V_x variation; (d) Idealized V_y variation.

식(1)을 $\Delta V_x(t_T)/\Delta V_y(t_T)$ 와 $V_y(t_T)/V_x(t_T)$ 의 항으로 정리하면 식(2)와 같다. 식(2)에서 부등호 우측의 두 번째 항이 항상 양수이기 때문에 이항을 무시하고 일반적으로 나타나는 횡방향 속도에 대한 종방향 속도의 비 $V_y(t_T)/V_x(t_T) = 2$ 를 대입하면 $THIV$ 가 감소하기 위해서는 $\Delta V_x(t_T)/\Delta V_y(t_T)$ 가 최소 2이상 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

$$\sqrt{V_x^2(t_T) + V_y^2(t_T)} > \frac{V_x(t_T) + \Delta V_x(t_T)}{\sqrt{(V_x(t_T) - \Delta V_x(t_T))^2 + (V_y(t_T) + \Delta V_y(t_T))^2}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta V_x(t_T)}{\Delta V_y(t_T)} > \frac{V_y(t_T)}{V_x(t_T)} + \frac{\Delta V_x(t_T)^2 + \Delta V_y(t_T)^2}{2V_x(t_T)\Delta V_y(t_T)} \quad (2)$$

Fig. 4(c)에 M2 모델에 대한 이상화된 V_x -시간 이력 이 나타나 있고 Fig. 4(d)에는 M2 모델에 대한 이상화된 V_y -시간 이력과 보 두께를 M2 모델 보다 증가시켰을 경우(M3)에 예상되는 V_y -시간 이력의 비교가 나타나 있다. M1 모델 보다 보 두께가 증가된 M2 모델의 경우에 V_x 기울기가 M1 모델과 유사하였기 때문에 M2 모델 보다 보 두께가 증가된 M3 모델의 경우에도 V_x 기울기가 M2 모델과 유사할 것으로 예상된다. M1 모델 보다 보 두께가 증가된 M2 모델의 V_y 기울기는 전체적으로 M1 모델 보다 증가하기 때문에 M3 모델의 경우에도 V_y 기울기가 M2 모델 보다 증가하고 t_T 도 단축될 것으로 예상된다. M3 모델의 경우에 보 두께 증가로 인한 $THIV$ 변화를 파악하기 위하여 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)의 V_x -시간 이력과 V_y -시간 이력에 삼각형의 닮음비를 적용하면 $\Delta V_x(t_T)$ 와 $\Delta V_y(t_T)$ 의 비가 식(3)과 같이 표현될 수 있다. 식(3)으로부터 $V_x(t_T)/V_y(t_T)$ 이 1/2 정도인 일반적인 경우에 V_y 기울기(혹은 ΔT_1)가 증가할수록 M3 모델에 대한 $\Delta V_x(t_T)/\Delta V_y(t_T)$ 가 1/2 보다 작아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 $THIV$ 가 감소되기 위해서는 앞에서 설명한 바와 같이 일반적인 $V_y(t_T)/V_x(t_T)$ 에 대해서 $\Delta V_x(t_T)/\Delta V_y(t_T)$ 가 2 보다 커야 하기 때문에 보 두께를 M2 모델 보다 증가시켜서 $THIV$ 를 감소시키는 것은 현실적으로 어려울 것으로 판단된다.

$$\frac{\Delta V_x(t_T)}{\Delta V_y(t_T)} = \frac{V_x(t_T)}{V_y(t_T)} \cdot \frac{t_T - \Delta T_1}{t_T} \quad (3)$$

M1 모델 보다 보 두께가 감소한다면 대형차 충돌조건에 대하여 구조적 적절성이 취약해지고 횡변위가 증가될 것이다. 또한 소형차 충돌조건에 대해서도 지주와 보의 강성 차이가 M1 모델 보다 커지기 때문에 IP에 따른 THIV의 차이와 지주에서 상당히 떨어진 IP에 대한 THIV가 M1 모델 보다 증가할 것이다. 따라서 보 두께를 증가시키거나 감소시키는 방법으로 SB5-B 충돌조건을 만족시키는 배리어를 개발하는 데에는 한계가 있다고 판단된다.

V_x 기울기를 변화시키지 않고 V_y 기울기를 감소시켜서 THIV를 감소시킬 수 있는지 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에 나타나 있는 M4 모델에 대하여 예측되는 V_x -시간 이력과 V_y -시간 이력을 이용하여 검토하였다. M4 모델은 V_y 기울기가 감소할수록 THIV가 결정되는 시간 t_T 가 증가하고 $V_y(t_T)$ 는 감소하며 $V_x(t_T)$ 는 증가하게 된다. M3 경우와 반대로 M4모델은 V_x 기울기가 변화하지 않으면서 V_y 기울기가 감소되기 때문에 항상 M2 모델에 비하여 THIV가 줄어든 것이다. M2 모델에 비하여 V_x 기울기를 유사하게 유지하며 V_y 기울기를 감소시키기 위한 효과적인 방법은 M2 모델의 보와 지주의 강성을 그대로 유지하며 V_x 기울기 변화에 민감하게 작용하지 않는 Block-Out을 M2 모델 보다 유연하게 조정하는 것이다. 보와 지주의 연결의 구속정도를 나타내는 Block-Out의 강성을 M2 모델 보다 작게하면 배리어의 전체 강성이 작아지고 V_y 기울기가 감소 될 것으로 예측된다. Block-Out의 강성을 M2 모델 보다 작게할 때 대형차 충돌조건에 대한 최대 횡변위가 크게 증가되지 않고 IP 변화에 따라 V_x 기울기 차이가 크게 나타나지 않도록 유의할 필요가 있다. Block-Out의 길이와 Block-Out이 보를 지지하는 길이를 증가시키면 Block-Out의 강성이 감소되고 보의 순경간이 감소되어 IP의 변화에 따른 V_x 기울기의 차이가 줄어들 것으로 예측된다.

3.3 배리어모델 4(M4)

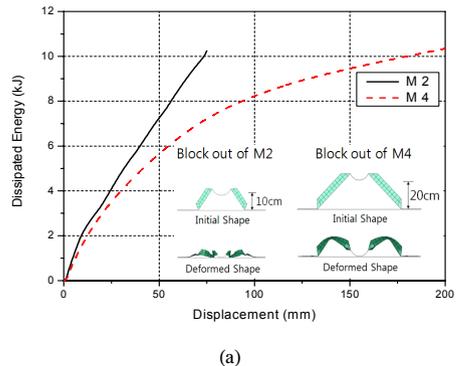
M4 모델은 M2 모델에 대하여 하단 Block-Out의 길이를 증가시키고 지지 길이를 확대시킨 모델이다. M4 와 M2 모델에 적용된 Block-Out의 형상과 에너지 소산능이 Fig. 5(a)에 나타나 있다.

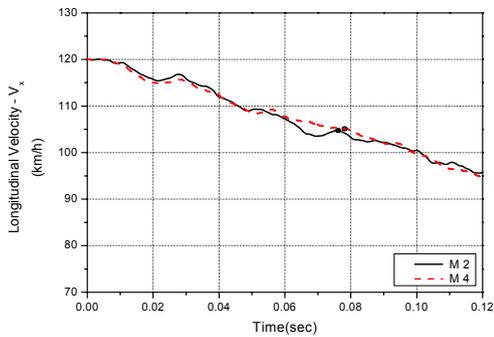
Fig. 5(b)에 나타나 있는 M2 모델과 M4 모델의 V_x -시간 이력을 비교하여 보면 M4 모델의 V_x 기울기가 M2 모델의 V_x 기울기와 대체적으로 유사하였다. Fig. 5(c)에

는 M2와 M4 모델에 대한 V_y -시간 이력이 나타나 있는데 M4의 V_y 기울기가 M2 모델 보다 작게 나타났고 M4 모델의 t_T 가 M2모델 보다 지체되었다. V_x 기울기가 유사한 경우에 보다 큰 t_T 를 갖는 M4 모델의 $V_x(t_T)$ 가 M2 모델 보다 크게 나타났고 V_y 기울기가 작은 M4 모델의 $V_y(t_T)$ 는 M2 모델 보다 감소하였다. 따라서 예상한 바와 같이 M4 모델의 THIV(33.1km/h)는 M2 모델 보다 감소하였다.

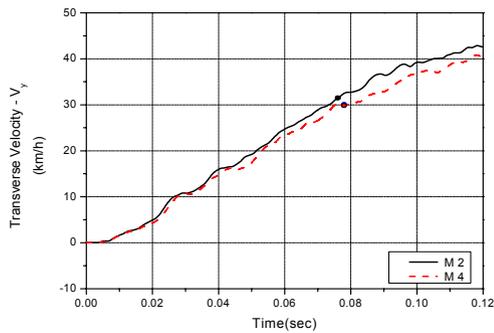
M4 모델 보다 THIV를 더 감소시키기 위해서 V_x 기울기를 변화시키지 않고 V_y 기울기를 더 감소시킬 수 있도록 Block-Out의 길이를 더 증가시킨다면 보 무게로 인하여 Block-Out의 아래방향 비틀림이 발생할 수 있고 배리어 설치 폭의 제약이 있는 경우에는 적용하는데 어려움이 있을 수 있다. 따라서 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 나타나 있는 것과 같이 M4 모델 보다 V_x 기울기를 전체적으로 감소시키고 충돌초기의 V_y 기울기를 증가시키면서 t_T 근처의 V_y 기울기를 감소시키는 방안(M5)이 고려되었다. 이 방안이 의도한 바와 같이 이루어진다면 M4 모델 보다 $V_x(t_T)$ 와 $V_y(t_T)$ 가 모두 감소하고 결과적으로 THIV가 상당히 작아질 것으로 예상된다.

2개의 보가 사용된 M4 모델에 대하여 보 면적만을 증가시킨다면 충돌초기와 t_T 근처의 V_y 기울기가 모두 증가할 수 있기 때문에 전체 보 면적을 증가 시키면서 승용차 충돌하중을 주로 받는 보의 면적을 감소시키기 위하여 3개의 보를 고려할 수 있다. 승용차 충돌하중이 집중되는 보의 면적을 M4 모델 보다 감소시킨다면 대체적으로 t_T 근처의 V_y 기울기를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한 전체 보 면적이 M4 모델 보다 증가된다면 충돌초기에 Yaw 각도 변화가 커지게 되어 V_x 기울기가 작아질 수 있을 것으로 예측된다.





(b)



(c)

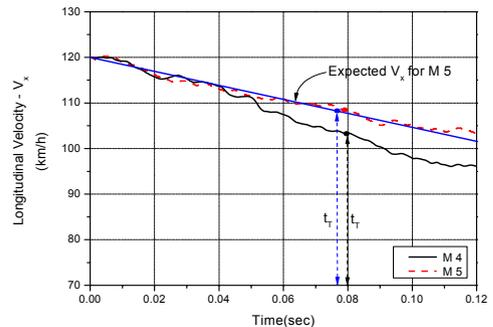
[Fig. 5] Simulation results for IP4: (a) Block-Out shapes and capacities of energy dissipation for M2 and M4; (b) V_x variation of M2 and M4; (c) V_y variation of M2 and M4.

3.4 배리어 모델 5(M5)

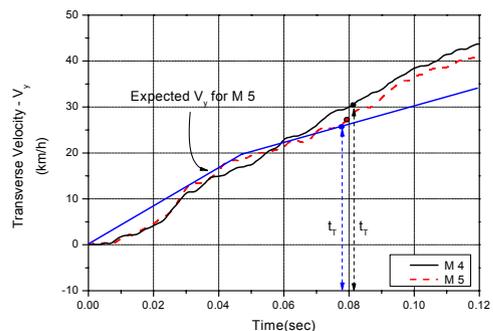
M5 모델에는 배리어 전체 강성이 M4 모델 보다 증가 되도록 M4 모델의 2개의 보 보다 면적이 15% 증가된 3개의 보가 사용되었고 승용차 충돌하중이 집중되는 하단 보에 대해서 M5 모델에 M4 모델 보다 11% 작은 면적이 사용되었다. 승용차 충돌하중을 주로 받는 보에 사용되는 M5 모델의 Block-Out은 M4 모델의 하단 보에 사용된 Block-Out과 유사하게 결정되었다. 중간 보의 변형이 하단 보에 비하여 작게 나타나도록 중간보와 중간보 Block-Out은 하단보와 하단보 Block-Out 보다 작은 강성을 갖게 하였다. 그리고 상단보의 Block-Out은 M4 모델 보다 큰 강성을 갖도록 하였다. 3개의 보에 대한 보면적의 상대비와 Block-Out 강성의 상대비는 여러번의 시뮬레이션을 통하여 의도한 V_x 기울기와 V_y 기울기를 얻도록 결정되었다.

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 살펴보면 M5 모델이 V_x 기울기가 M4 모델 보다 전체적으로 작게 나타나고 V_y 기울

기는 충돌초기에 증가하고 t_T 근처에서 작게 나타났다. 따라서 IP4를 제외하고 예상한 바와 같이 M5 모델의 THIV(32.2km/h)가 M4 모델의 THIV와 THIV 한계값(33km/h) 보다 작게 나타났다. IP4에 대한 M5 모델의 V_x 와 V_y 기울기는 M4 모델의 기울기와 유사하게 나타났다. IP4의 경우 IP가 지주에서 상당히 떨어져 있기 때문에 충돌초기에 다른 IP 보다 하단보의 영향이 크게 나타난다. 따라서 충돌초기에 전체 강성 증가로 인한 V_x 기울기 감소와 V_y 기울기 증가가 나타나지 않았다. 그리고 t_T 근처에서 지주의 영향이 크게 나타나 하단보의 면적이 감소되었음에도 불구하고 V_y 기울기의 감소가 나타나지 않았다. 지주의 영향이 크게 나타난 것은 하단보의 면적이 감소하였고 보와 Block-Out의 연결이 강(Stiff)하게 유지되어서 t_T 근처에서 상대 횡변위의 차이가 크게 발생하였기 때문으로 판단된다.



(a)



(b)

[Fig. 6] Simulation results for IP1: (a) V_x variation of M4 and M5; (b) V_y variation of M4 and M5.

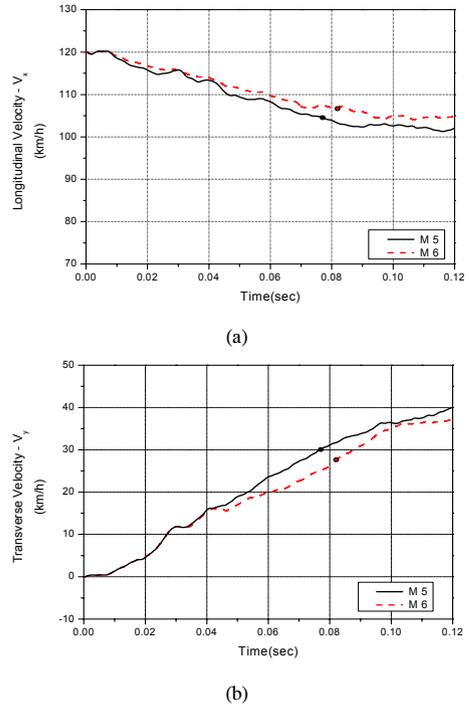
IP4의 경우에 IP가 지주에서 상당히 떨어져 있기 때문에 전체 보 면적을 유지하고 하단 보 면적을 증가시켜서

충돌초기의 V_y 기울기를 증가시키기는 쉽지 않다. 그리고 하단보 면적의 증가는 t_T 근처에서 V_y 기울기를 증가시켜서 $THIV$ 가 증가될 것이다. 또한 전체 보 면적을 유지하면서 하단보 면적을 M5 모델 보다 감소시킨다면 t_T 근처에서 지주의 영향이 더 크게 나타나 $THIV$ 가 증가하게 될 것으로 예상된다. 따라서 IP4에 대하여 $THIV$ 를 감소시키기 위하여 충돌초기에 V_x 와 V_y 기울기를 M5 모델의 기울기와 유사하게 유지하고 t_T 근처에서는 V_x 와 V_y 기울기를 M5의 기울기보다 감소시키는 방안(M6)이 고려되었다.

차량이 지주에 접근하는 쪽의 보와 Block-Out의 연결을 충돌초기에 M5 모델의 연결과 유사하게 유지하고 t_T 근처에서 유연하게 거동하게 한다면 IP4에 대하여 충돌초기에 M5 모델과 유사한 V_x 와 V_y 기울기를 유지할 수 있고 t_T 근처에서 상대 횡변위를 감소시켜 V_x 와 V_y 기울기를 M5 모델 보다 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 차량이 지주에 접근하는 쪽의 보와 Block-Out의 연결을 Slip 형으로 구성한다면 충돌초기에 M5 모델의 연결과 유사한 거동이 나타나고 t_T 근처에서 유연한 거동이 이루어 질 수 있다고 예상된다.

3.5 배리어모델 6(M6)

M6 모델은 차량이 지주에 접근하는 쪽의 보와 Block-Out의 연결이 초기 충돌하중에 의한 변형으로 인하여 Slip이 발생하는 비대칭 Block-Out이 적용된 모델이다. IP4에 대한 M5 모델과 M6 모델의 V_x -시간 이력 비교가 나타나 있는 Fig. 7(a)와 V_y -시간이력 비교가 나타나 있는 Fig. 7(b)를 살펴보면 IP4에 대하여 충돌초기에 M6 모델의 V_x 와 V_y 기울기가 M5 모델과 유사하고 t_T 시간 근처에서 M5 모델 보다 감소하는 것을 알 수 있다. M6 모델의 IP4에 대한 $THIV(30.6\text{km/h})$ 가 $THIV$ 한계값 보다 7% 작게 나타났고 $THIV$ 가 가장 크게 나타난 IP3에 대해서도 $THIV$ 가 한계값 보다 4% 작게 나타나 M6 모델이 SB5-B 소형차 충돌조건을 성공적으로 만족하였다. Simulation을 통하여 성능이 검증된 M6 모델에 대하여 실물차량 충돌시험이 수행되었다. M6 모델의 SB5-B 소형차 충돌조건에 대한 $THIV$ 는 29.9km/h 로 나타나 한계값(33km/h) 보다 9% 작게 나타났고 PHD 는 한계값(20g) 보다 상당히 작은 10.5g 이었다. 보다 자세한 실물충돌시험 결과는 참고문헌[4]에 나타나있다.

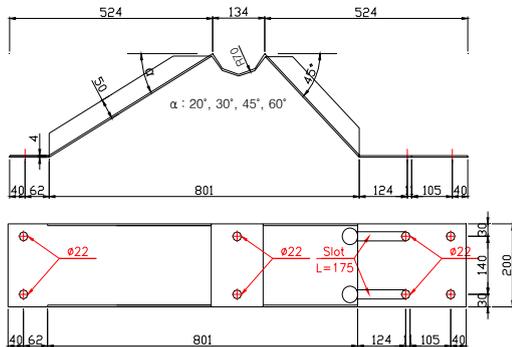


[Fig. 7] Simulation results for IP4: (a) V_x variation of M5 and M6; (b) V_y variation of M5 and M6.

4. 형차 충돌속도 130km/h 평가

IP3에 대한 M6 모델의 130km/h 소형차 충돌속도를 적용한 FEA에 의한 $THIV$ 가 33.8km/h 로 $THIV$ 한계 (33km/h)를 초과하였으나 초과된 값이 0.8 로 많이 크지 않기 때문에 130km/h 의 소형차 충돌속도를 만족시킬 수 있는 배리어 개발이 가능하다고 판단되었다. M6 모델의 다른 구성요소는 변화시키지 않고 Block-Out 날개 각도만을 변화시키면서 M6 모델의 $THIV$ 를 감소시킬 수 있는지 조사하였다. M6 모델의 Block-Out 날개와 보가 이루는 각도는 45° 로 좌우측이 동일하다. Slip hole이 없는 Block-Out 날개의 각도를 감소시킨다면 Slip 기능은 유지되면서 Block-Out 강성은 감소된다. 이러한 Block-Out 강성의 감소는 전체 시스템 강성을 감소시키거나 보의 강성 변화에는 영향을 주지 않기 때문에 차량 횡방향 속도-시간 이력의 기울기가 전체적으로 감소되고 차량 종방향 속도 변화는 크지 않을 것으로 예상되었다. Block-Out 날개각도 변화에 대한 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 8의 Block-Out 날개각도 20° , 30° , 그리고 60° 경우에 대해서 IP를 변화시키며 FEA를 수행하였다. 다양한 slip

Block-out 날개 각도를 적용한 모델에 대한 130km/h 소형차 충돌속도를 적용한 FEA에 의한 THIV가 Table. 2에 나타나 있다. 이 표로부터 날개각도가 감소함에 따라 THIV가 감소함을 알 수 있다. 날개각도가 20°인 경우에 최대 THIV가 IP3에서 32.2km/h로 나타났다. 이러한 결과로부터 120km/h의 SB5-B 소형차 충돌속도를 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성이 커진 것을 알 수 있다.



[Fig. 8] Wing angles of Slip Block-Out wing

30°의 Block-out 날개각도가 적용된 수정 M6모델에 대하여 충돌속도 130km/h, 충돌차량 질량 900kg, 충돌각도 20°를 적용한 실물충돌 시험이 수행되었다. Fig. 9에 수정 M6에 대한 실물충돌시험 형상이 나타나 있다. 실물충돌시험의 THIV는 33.9km/h이고 PHD는 19.1g로 나타났다. THIV가 한계값을 0.9km/h 초과하였는데 그 이유는 다음과 같은 사실 때문인 것으로 판단된다. 130km/h의 충돌속도가 국내에서 처음으로 적용되었기 때문에 아스팔트나 콘크리트 포장면이 아닌 Fig.9에 보이는 것과 같이 포장이 없는 성토부에서 충돌시험이 실시될 수밖에 없었다. 포장면과 타이어의 일반적인 마찰계수와 다른 거동이 나타났고 충돌속도와 충돌각도가 계획된 값보다 크게 나타나 THIV에 부정적인 영향을 준 것으로 판단된다. 20°의 날개각도에 대한 FEA의 THIV가 32.2km/h이고 30°의 날개각도에 대하여 여건이 좋지 않은 실물충돌시험에 의해서도 THIV가 33.9km/h인 점을 고려할 때 130km/h에 대한 표준시험 여건이 갖추어 진다면 120km/h의 SB5-B 소형차 충돌속도를 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 보다 자세한 해석결과와 실물충돌 시험결과는 참고문헌[5]을 참조할 수 있다.

[Table 2] THIV of Various Slip Block-Out wing angles for Impact velocity 130km/h

Slip Block-Out Wing angle	THIV(km/h)
20	32.2 < 33.0
30	33.0 < 33.0
45	33.8 > 33.0
60	34.1 > 33.0



[Fig. 9] Full-scale crash test using the small car impact speed of 130km/h

5. 결론

본 연구에서는 SB5-B 대형차 충돌조건을 만족하면서 120km/h의 SB5-B 소형차 충돌속도를 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성을 조사하고자 하였다. 실물차량 충돌 시험에 calibrate된 입력변수를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 120km/h의 SB5-B 소형차 충돌속도에 대한 차량의 종방향과 횡방향 속도변화가 THIV 한계를 만족시킬 수 있도록 다양한 배리어 모델이 개선되었고 이 과정을 통해 결정된 배리어 모델이 SB5-B 실물충돌시험을 통과하였다. 통과된 배리어 모델 slip Block-out 날개의 각도를 변화시키면서 120km/h 소형차 충돌속도의 상향가능성을 FEA를 통하여 조사하고 실물차량 충돌시험을 수행하였다. 소형차충돌속도 130km/h에 대한 표준시험 여건이 갖추어 진다면 소형차 충돌속도 130km/h로 상향시킬 수 있는 가능성이 높은 것으로 조사되었다.

References

[1] Fitzpatrick, Kay, "Criteria for High Design Speed Facilities", texas transportation institute, 2007.

- [2] LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Calif., 2007.
- [3] NCAC, Public Finite Element Model Archive. National Crash Analysis Center(www.ncac.gwu.edu), Washington, D.C., 2011.
- [4] K.D. Kim, M.G. Ko, D.S. Kim, J.W. Joo and D.Y. Jang, "Design of High-Performance Longitudinal Flexible Barrier Using Vehicle Velocity-time History", Journal of KOSHAM, Vol. 12, No. 3, pp. 157-167, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.3.157>
- [5] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, "Development of Road Safety Technologies for SMART Highway", 2nd Report, Korea, 2012.

주재웅(Jae-Woong Joo)

[정회원]



- 1994년 2월 : 전남대학교 기계공학과(공학사)
- 1996년 8월 : 전남대학교 기계공학전공(공학석사)
- 2009년 8월 : 명지대학교 교통공학전공(공학박사)
- 2000년 10월 ~ 현재 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

<관심분야>
교통공학(교통안전)

김기동(Kee-Dong Kim)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 오클라호마 주립대 토목구조전공(공학석사)
- 1995년 5월 : 텍사스주립대(오스틴) 토목구조전공(공학박사)
- 1997년 10월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
교통안전, 구조공학, 내진공학

고만기(Man-Gi Ko)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 농공학과(공학사)
- 1988년 8월 : 오클라호마 주립대 토목공학전공(공학석사)
- 1992년 12월 : Texas A&M 토목공학전공(공학박사)
- 1998년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
교통안전, 교량공학