

소형지주에 충돌하는 차량의 속도변화 산정방법과 영향인자

Calculation Method and Influence Factor for Speed Change of a Vehicle Impacting Small Sign Post

고만기* · 김기동** · 전성민*** · 성정곤****

Ko, Man Gi · Kim, Kee Dong · Jun, Sung-Min · Sung, Jung-Gon

Abstract

Important factor in designing a breakaway sign support is the velocity change of the impact vehicle. It is measured from the crash test or can be calculated by 3-D Finite Element Analysis. It can also be calculated with relative ease utilizing energy and momentum conservation. In this paper a formula to calculate the velocity change of a car during the time of impact against a small sign is derived utilizing the energy and momentum balance. Using the formula, parametric studies were conducted to find that impact speed, separation force and Breakaway Fracture Energy(BFE) of the posts which represent the degree of fixedness to the foundation are the important factor to vehicle's speed change. It is shown that speed change is larger in the lower speed impact and to the posts with large separation force and BFE.

Key Word : Breakaway Sign Support, Momentum, Separation Force, Breakaway Fracture Energy

요 지

Breakaway 단부장치 설계에 중요한 요소가 충돌 차량의 속도변화이다. 이는 충돌실험이나 3차원 유한요소 해석을 통해서 구할 수 있으나 에너지와 운동량 보존의 법칙을 이용하여 비교적 간단하게 계산할 수도 있다. 본 논문에서는 에너지와 운동량 보존의 법칙에 기초한 지주와 소형차 충돌 시 속도변화를 계산하는 식을 유도하였다. 이를 이용한 민감도 분석을 통하여 지주 단부의 분리하중, 파괴에너지, 차량의 강도 와 충돌속도가 소형지주에 충돌하는 차량의 속도변화에 미치는 영향을 파악하였다. 지주 단부가 기초에 고정된 정도를 나타내는 분리력 및 분리파괴에너지(Breakaway Fracture Energy)가 클수록 속도변화가 크고 충돌속도의 크기가 작을수록 속도변화가 크게 나타났다.

핵심용어 : 분리지주, 운동량, 분리하중, 분리파괴에너지

1. 서 론

국내에는 도로변 안전시설의 범위가 가드레일, 중앙분리대, 교량난간, 충격흡수시설 정도로 제한되어있고 중요한 위험 요소인 도로변의 각종지주에 대한 안전 대책이 없다. 1988년부터 2004년 사이의 교통사고 통계(도로교통 안전관리공단, 2005)를 살펴보면 전체 교통사고 사망자는 2000년을 정점으로 지속적으로 감소하고 있으나 전주 및 표지판 지주로 인한 단독사고 사망자는 2002년 이후 증가하였고 전체 교통사고의 치사율은 3%인데 반해 지주 충돌사고의 경우 20%에 달하는 높은 치사율을 보이고 있어 대책이 절실하다.

모든 노면 시설물을 도로 위험거리 밖에 설치하는 것이 노면 안전에 가장 확실한 해법이 되겠으나, 표지판, 신호등, 조

명주 등의 시설물은 제 기능을 하기 위해서 도로변 가까이 위치해야 한다. 이러한 문제를 해소하기 위해서 미국에서는 1960년대 중반부터 Breakaway 단부장치가 개발되어 대부분의 도로변 표지판 지주나 조명주에 사용되고 있다. Breakaway 단부장치는 지주와 기초의 연결부를 강결하는 대신 풍하중에 대한 구조적 안전성은 확보하면서 충격하중 작용 시 연결부가 분리되어 소형차의 충돌에 대한 충격력, 또는 속도변화를 최소화시킴으로써 탑승자의 위험요인을 제거하는 개념으로, 여러 가지 특별한 장치가 고안되어 1975년부터 AASHTO (AASHTO, 1975)의 설계기준으로 채택되었다.

Breakaway 단부장치의 설계기준은 NCHRP Report 350 (TRB, 1993)에서 다른 안전시설과 마찬가지로 탑승자 안전지수인 OIV(Occupant Impact Velocity)의 제한치 5 m/sec (3 m/sec

*정회원 · 공주대학교 방재연구센터 · 건설환경공학부 교수(mgko@kongju.ac.kr)

**정회원 · 공주대학교 방재연구센터 · 건설환경공학부 교수

***정회원 · 경동기술공사 구조부 · 사원

****한국건설기술연구원 도로연구부 · 수석연구원

추천)와 RA(Ridedown Acceleration)에 대한 제한치 20 g (15 g 추천)을 규정하고 있다. 이전의 NCHRP Report 230(J. D. Michle, 1981)은 충돌 속도가 32~92 km/h일 때 속도변화 ΔV 값을 4.5 m/sec이하로 할 것을 권하고 있다. 이렇게 충돌차량의 속도변화를 제한하는 것은 AASHTO 규정도 동일하다. 일반적으로 소형지주와 소형차가 충돌할 때 지주와 차량의 접촉시간이 매우 짧기 때문에 탑승자가 가상의 컴파트먼트 전면에 부딪히기 전에 접촉이 끝나므로 RA값은 큰 의미가 없고 충돌전후의 속도 변화를 구하는 문제가 중요하게 된다. 속도변화를 결정하기 위해서는 충돌실험을 실시하는 것이 가장 이상적이나 고가의 충돌실험 횟수를 줄이기 위한 사전 설계 방법으로 다른 해석 방법이 강구 되었는데 대표적인 것이 Owing (1987)의 해석 방법이다. 이는 에너지와 운동량 보존의 법칙을 이용하여 충돌과정의 속도변화를 계산하는데 전개 과정이 복잡한 반면 적절한 입력 자료가 확보되면 속도변화는 쉽게 계산할 수 있는 특징이 있다. 본 논문은 지주와 소형차 충돌 시 속도변화를 계산하는 식을 자세히 유도하고 이를 사용하기 위한 각종 상수의 결정 방법을 제안하며 최종적으로 유도된 식을 이용하여 민감도 분석을 실시하여 속도변화와 구조변수의 연관성을 보이기 위한 것이다.

2. 분리 단부 해석 (Owing 1987)

분리되는 단부를 갖는 지주의 차량 충돌 현상을 3단계로 구분하여 분석하면 다음과 같다. 첫 번째 단계는 차량의 변형이 발생하고 상대적으로 지주는 강체로 유지되는 단계로 정의된다. 이 단계는 충돌 하중이 분리기구의 파괴를 일으키기 시작하는 때까지 지속된다. 두 번째와 세 번째 단계는 분리기구의 파괴가 시작됨과 함께 시작된다. 두 번째 단계는 하단부의 파괴가 완전히 이루어지는 단계이고 세 번째 단계는 지주가 가속되어 지주의 회전과 이동이 일어나는 단계이다.

그림 1은 충돌하중과 하단부 전단력의 전형적인 시간이력을 나타낸다. 지주의 분리기구가 있는 바닥까지를 강체라고 가정하면 충돌하중과 지주 하단에서의 전단력은 시간 t_1 까지 동일하다. 시간 t_1 이후 지주 하단에서의 전단력은 하단이 분리되므로 감소하기 시작한다. 반면 충돌하중은 지주의 관성력에 의해 계속 증가한다. 전단력이 0으로 되어가는 것에서 알 수 있듯이 시간 t_2 에서 분리가 완결된다. 충돌하중은 지주가 가속되어 회전과 직선이동이 일어난 후 차량과 지주가 분리될 때까지 계속 작용할 것이다. 충돌하중 지속시간 t_3 는 차량이 지주와 접촉되어 있는 동안 차량의 이동 거리로부터 추정할 수 있다. 이 거리는 일반적으로 0.9~1.2 m이다. 이동거리를 1.2 m로 하고 차량의 충돌속도 $V_0(m/sec)$ 를 이용하면 t_3 는 다음 식으로 추정할 수 있다.

$$t_3 = 1.2 / V_0 \quad (1)$$

35 km/h의 충돌에 대해 이 시간은 0.124초이며 100 km/h 종방향의 충돌에 대해 이 시간은 0.043초이다. 이 시간은 차량의 종방향 내부공간이 0.6 m일 경우 운전자가 차량의 내부에 부딪히는 데 걸리는 시간과 같거나 적다. 일반적으로 승

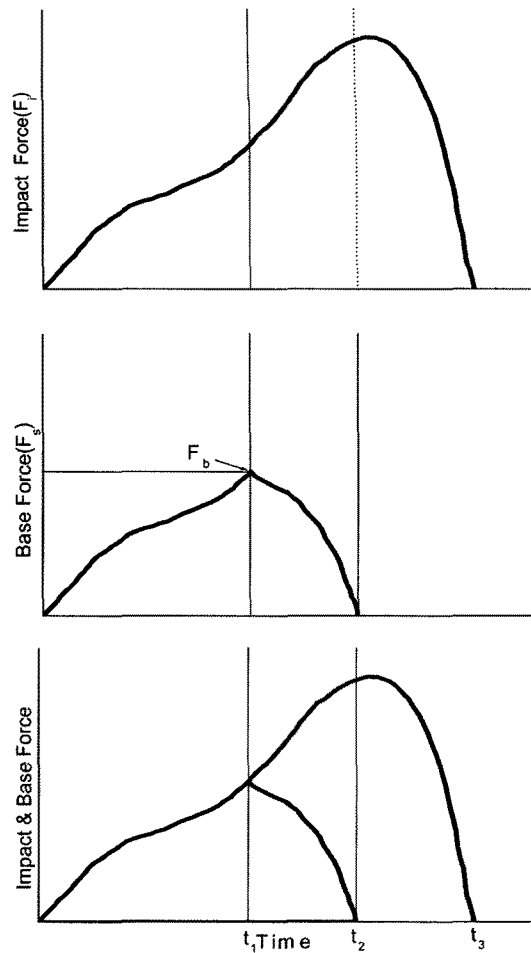


그림 1. 충격력과 Base Force에 대한 시간이력

객이 차량 내부에 부딪히기 전에 차량과 지주의 충돌이 종료됨을 의미하는 것이다. 이것은 Ridedown Acceleration (RA)이 0이며 Occupant Impact Velocity (OIV)가 충돌 중 차량이 얻게 되는 속도변화와 같다는 것을 의미한다. 따라서 OIV 즉, 충돌 중 차량에 발생하는 속도 변화는 운동량에 근거하여 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$M_v \Delta V = \int_0^{t_3} F_i dt \quad (2)$$

여기서, M_v = 차량의 질량, F_i = 충돌하중, ΔV = 속도변화, 3단계 방법을 이용한 충돌분석은 식(2)를 다음과 같이 3단계 적분으로 분리함으로써 표현될 수 있다.

$$M_v \Delta V = \int_0^{t_1} F_i dt - \int_0^{t_1} F_s dt + \int_0^{t_3} F_s dt \quad (3)$$

여기서, F_s = 지주하단의 전단력 지주하단의 하중은 시각 $t > t_2$ 인 경우 0이므로 위 식 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_v \Delta V = \int_0^{t_1} F_i dt + \int_{t_1}^{t_2} F_s dt + \int_{t_1}^{t_3} (F_i - F_s) dt \quad (4)$$

식 (4)의 오른쪽 세 항은 위 그림 1에서 설명한 각 3단계에서의 운동량 변화를 나타낸다.

2.1 단계 I

첫 번째 단계는 차량이 변형하나 지주는 강체로 남아 있는 단계이다. 이 단계에서 차량의 운동에너지는 차량을 변형시키는데 행해진 일에 의해 감소한다. 차량의 변형에 의한 일은 다음과 같다.

$$\int_0^x F_i dx = \frac{1}{2} M_V (V_0^2 - V_1^2) \quad (5)$$

여기에서 V_1 은 단계 I 종료 시점의 속도로 이 시간까지의 속도변화를 ΔV_1 이라 하면 $V_1 = V_0 - \Delta V_1$ 으로 쓸 수도 있다.

위 식에서, 적분 구간을 나타내는 x 는 하중이 그림 1의 분리 하중 F_b 와 같도록 하는데 필요한 변위로 정의된다. 단계 I을 정의하는 시간적분은 다음과 같다.

$$\int_0^{t_1} F_i dx = M_V (V_0 - V_1) = M_V \Delta V_1 \quad (6)$$

이 적분을 구하기 위해서는 차량의 변형특성을 알아야 한다. 이 특성에 근거하여 분리 하중에 도달하기 위해 행해진 일을 계산하고 이 값을 운동에너지의 변화와 같도록 할 수 있다. 이를 이용하면 ΔV_1 값과 단계 I에서의 운동량 적분을 구할 수 있다. 이 과정에 대해 좀 더 자세히 알아보고 단계 I에서의 적분 값을 추정하기 위해 차량의 하중-변형관계가 선형이라고 가정하면 하중 F_b 에 도달하기 위해 행해진 일은 다음과 같다.

$$\int_0^x F_i dx = \int_0^{(F_b/k)} kx dx = F_b^2/2k \quad (7)$$

여기에서, k = 차량의 강성(kg/m)

분리하중 F_b 에 도달하는 동안 차량의 운동에너지변화는 $\Delta V_1 = (V_0 - V_1)$ 과 충돌 속도 V_0 을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$0.5 M_V V_0^2 - 0.5 M_V [V_0 - \Delta V_1]^2 = 0.5 M_V [2\Delta V_1 V_0 - \Delta V_1^2] \quad (8)$$

식 (7)을 식 (8)과 같다고 하면 다음 식을 얻는다.

$$F_b^2/2k = 0.5 M_V [2\Delta V_1 V_0 - \Delta V_1^2] \quad (9)$$

식 (9)는 ΔV_1 에 관한 2차식이고 해는 다음과 같다.

$$\Delta V_1 = V_0 \left[1 - \sqrt{1 - F_b^2 / (M_V k V_0^2)} \right] \quad (10)$$

위 식의 근호 안에 있는 $F_b^2 / (k V_0^2 M_V)$ 의 값이 작은 경우, 식 (10)은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\Delta V_1 = V_0 F_b^2 / (2 M_V k V_0^2) \quad (11)$$

2.2 단계 II

단계 II는 지주 단부의 하중이 분리하중 F_b 에 이른 후 파괴가 완료되어 지주가 완전 분리되는 단계를 말한다. 단계 II의 운동량 변화를 나타내는 적분 식은 다음과 같다.

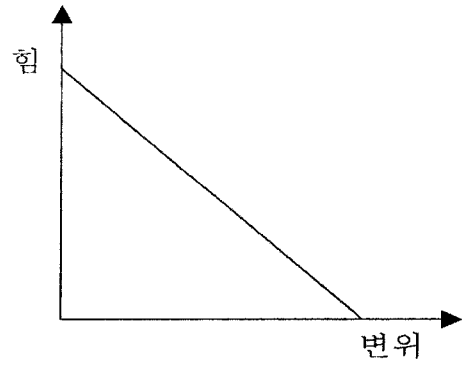


그림 2. 분리기초의 파괴모드

$$\int_{t_1}^{t_2} F_s dt \quad (12)$$

여기서 F_s 는 지주단부에 작용하는 하중(Base Force 그림 1)이다. 이 단계에서의 충돌차량이 잃게 되는 에너지(혹은 분리 기구가 얻게 되는 에너지)는 분리기구의 파괴특성에 의해 지배되는데 분리기구의 파괴모드는 그림 2와 같이 이상화할 수 있다.

하중-변형곡선 아래 부분의 면적은 분리 파괴에너지 (Breakaway Fracture Energy: BFE)라고 한다. BFE의 근사값은 다음 식으로 구한다.

$$BFE = 0.5 F_b D_{max} \quad (13)$$

여기서, D_{max} = 파괴 종료 전 지주 단부의 최대 변위, F_b = 분리 하중

BFE의 정확한 값은 하중-변위곡선의 형태에 의존한다. BFE의 정확한 값을 구하기 위해서는 실제 충돌실험이 필요하지만 연결부재의 크기에 따라 Charpy 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결정할 수 있다.

t_1 에서 t_2 시간 동안 지주의 관성과 기초의 전단력이 지주의 움직임을 제한하기 때문에 단계 II의 시간 적분(식 (12))을 구하는 것은 어려운 일이다. 지주의 속도는 t_1 에서는 0으로 가정한다. 적분을 구하기 위해서 지주단부의 속도시간이력이 필요하다. 시간 t_2 에서 지주단부의 속도가 다음과 같이 t_1 에서 차량속 V_1 의 m 배로 주어진다고 가정하자. 즉, $m = (t_2$ 에서 지주 단부의 속도) / (t_1 에서 차량 속도)라 하면

$$\frac{dD_{t_2}}{dt} = m V_1 \quad (15)$$

여기서 D_{t_2} 는 시간 t_2 에서 지주 단부의 변위이다.

임의의 시간 t 에서의 지주단부 속도는 다음에 주어진 표현과 같이 t_1 에서 t_2 사이에서 시간에 관한 선형 함수라고 가정하면

$$\frac{dD_t}{dt} = (t - t_1) / (t_2 - t_1) m V_1 \quad (16)$$

단계 II의 적분 식(12)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_2} F_s(t) dt = \int_0^{D_{max}} \left(F_s(D_t) / \frac{dD_t}{dt} \right) dD_t \quad (17)$$

한편 단계 II 에서 Base Support의 가속도가 a 로 일정하다 고하면 시간 t 에서 Base Support의 변위 $D_t = 0.5at^2$ 가 되고 $t = \sqrt{2D_t/a}$ 가 되어 $dD_t/dt = [(t-t_1)/(t_2-t_1)]mV_1 = [(\sqrt{2D_t/a} - \sqrt{2D_{t_1}/a})/(\sqrt{2D_{t_2}/a} - \sqrt{2D_{t_1}/a})]mV_1$ 가 된다.

한편, $D_{t_1} = 0$ 및 $D_{t_1} = D_{\max}$ 임을 고려하여 위 식을 식 (17)에 대입하여 단계 II에서 충돌차량의 운동에너지 손실량에 대한 식 (18)과 같은 적분 식을 얻게 된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} F_s dt = \frac{\sqrt{D_{\max}}}{mV_1} \int_0^{D_{\max}} \frac{F_s(D_t)}{\sqrt{D_t}} dD_t \quad (18)$$

만일 힘-변형 곡선이 그림 2와 같이 힘-변형 곡선이 삼각형인 경우에는 시간 t 에서의 Base Force를 식 (19)와 같이 표현할 수 있으므로

$$F_s(D_t) = F_b[1 - (D_t/D_{\max})] \quad (19)$$

식 (19)를 식 (18)에 대입하여 단계 II의 에너지 손실에 대한 다음과 같은 적분 식을 얻게 된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} F_s dt = (4F_b D_{\max})/(3mV_1) \quad (20)$$

Base의 힘-변형 곡선이 그림 2와 같이 삼각형인 경우에 임을 고려하면 단계 II의 운동량변화의 시간적분은 식 (21)과 같이 된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} F_s dt = 8BFE/(3mV_1) \quad (21)$$

따라서 단계 II의 운동량 변화(= 속도변화 $\times M_p$)는 BFE에 비례하고 완전 분리 때, 즉, $t = t_2$ 에서 지주단부의 속도 $\frac{dD}{dt} (=mV_1)$ 에 반비례함을 알 수 있다.

2.3 단계 III

단계 III은 지주가 분리되어 회전 및 직선운동을 하면서 차량과 분리되는 단계이다. 이 단계의 운동량변화를 나타내는 적분 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\int_{t_1}^{t_3} (F_1 - F_s) dt \quad (22)$$

위의 충격량은 분리된 지주의 회전과 직선운동 속도를 변화시키는데 질량이 M_p 인 지주의 무게중심에서의 최종 직선운동 속도 $\dot{X}_p (= \frac{dX_p}{dt})$ 는 직선운동량 보존에 관한 식 $\int_{t_1}^{t_3} (F_1 - F_s) dt = M_p \dot{X}_p$ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{X}_p = \left(\int_{t_1}^{t_3} (F_1 - F_s) dt \right) / M_p \quad (23)$$

또한, 지주의 회전운동에 대한 운동량 보존은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_3} D_0 F_1 dt - \int_{t_1}^{t_3} (D_0 + z) F_s dt = I_p \dot{\theta}_p \quad (24)$$

여기서

I_p = 지주의 질량관성모멘트 (Moment of Inertia)로 지주의 회전반경 (Radius of Gyration)을 R 이라하면 $I_p = M_p R^2$

$\dot{\theta}_p$ = 지주의 각속도

D_0 = 지주의 무게중심에서 충격점까지의 거리

$(D_0 + z)$ = 지주의 무게중심에서 지주의 밑단까지의 거리

z = 충격점에서 지주의 밑단까지의 거리

z 의 값은 보통 0.5 m이고 D_0 의 값은 근사적으로 지주 높이의 반으로 보면 된다. 여기서 기초의 전단력에 관한 모멘트 팔의 길이를 D_0 로 보아서, 즉 $D_0 + z$ 를 D_0 로 보고 지주의 각운동량을 계산해도 오차가 크지 않다. 이를 고려하고, 식 (23) 및 식 (24)를 이용하면 회전운동을 하는 지주 충격점의 단계 III 직후 속도는 다음과 같다.

$$V_i = \dot{X}_p + D_0 \dot{\theta}_p = (R^2 + D_0^2)/(M_p R^2) \int_{t_1}^{t_3} (F_1 - F_s) dt \quad (25)$$

충격점에서 지주의 속도가 자동차의 속도보다 더 빨라야만 차와 지주가 분리된다. 즉, 분리 시 지주의 속도 V_i 를 eV_2 (t_2 에서 차량속도 V_2 의 e 배로)라 가정하면 e 의 값은 항상 1보다는 커야 분리가 이루어지는 것이다. 현장 실험에서의 일반적인 e 값은 1.3이다. 식 (25)를 이용하면 단계 III의 운동량변화의 시간적분은 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_3} (F_1 - F_s) dt = eV_2 M_p [R^2/(R^2 + D_0^2)] \quad (26)$$

1 보다 큰 e 의 값 1.3은 운동량의 전달과정에서 충돌차량의 운동에너지가 손실되었음을 의미한다. 충돌차량의 힘-변형 곡선이 그림 3과 같다고 하자. 자동차의 찌그러짐이 지주가 기초로부터 분리되는 A점 이후에도 최대 힘을 나타내는 B점까지 계속된다. 충격력은 차량의 찌그러진 거리의 일부를 회복시키면서 감소된다. C점에서 지주는 자동차와 분리된다. 단계 II와 단계 III 동안 자동차에 의해 흡수된 에너지는 그림에서 사선부분과 같다. 이것은 단계 II와 단계 III 동안의 주된 에너지 소산 과정이다.

이상의 분석결과를 요약하면 충돌과정에 차량에 발생하는 속도변화는 다음과 같다.

$$\Delta V_1 = V_0 - V_0 \sqrt{1 - F_b^2 / (KM_V V_0^2)} \quad (27)$$

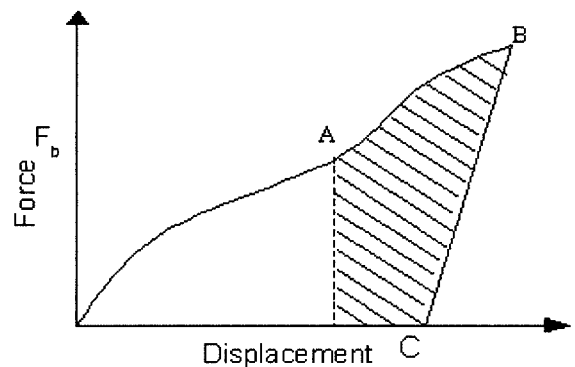


그림 3. 충돌차량의 힘 변위

$$\Delta V_2 = (8BFE)/[3m(V_0 - \Delta V_1)M_V] \quad (28)$$

$$\Delta V_3 = e(V_0 - \Delta V_1 - \Delta V_2)(M_p/M_V)[R^2/(R^2 + D_0^2)] \quad (29)$$

3. 민감도 분석

본 절에서는 2절에서 유도한 충돌 단계 별 속도 변화에 대한 식 (27), (28), (29)를 이용하여 1) 지주의 BEF를 무시하고 F_b 만을 고려할 때 $\Delta V(= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3)$ 의 충돌속도 별, 지주분리 단부장치의 유무 즉, Breakaway 단부 혹은 강결 지주 여부에 따른 변화, 2) BEF와 F_b 을 모두 고려하였을 때의 $\Delta V(= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3)$ 의 충돌속도 별, 지주분리 단부장치의 유무 즉, 분리되는 단부 혹은 강결 지주 여부에 따른 변화, 3) 분리지주에서 차량강성을 달리했을 때 $\Delta V(= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3)$ 의 충돌속도 별 변화를 살펴봄으로써 분리력과 분리파괴에너지 그리고 차량의 강성이 ΔV 에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 여기서 충돌속도는 120 km/h까지 1 km/h 간격으로 하였고 속도계수 식 (15)에 설명된 $m = 0.5$, 식(26)에 설명한 분리 시 지주속도와 지주파괴 후 차량의 속도 비 $e = 1.27$, 식 (26)에 설명한 $[R^2/(R^2 + D_0^2)] = 0.4$ 로 하였다.

자동차의 강성은 Application of Mechanics to Roadside Safety (Owing, 1987)에서 지주의 분리기구 검토에 사용된 값 27,000 kg/m을 사용하였다.

본 연구에 사용된 지주의 분리력 및 BFE(Breakaway Fracture Energy)는 Breakaway Sign Support 설계에 관한 연구결과(전성민, 2008; 고만기, 2008)를 이용하였다. 분리력 F_b 는 분리지주와 강결지주로 나누어 분리지주의 경우는 Simulated Charpy 테스트를 통해 얻은 분리력이 4,592 kg임을 감안하여 4,600 kg을 사용하여 계산하였고 강결지주는 LS-DYNA 시뮬레이션을 통해 얻은 x 방향의 힙시간 그래프를 통하여 얻은 분리력 7,500 kg을 사용하였다. BFE는 분리지주의 경우 74 kg·m, 강결지주의 경우 6,300 kg·m을 이용하였다.

Case 1)

지주의 BFE를 무시하고 F_b 만을 고려할 때 $\Delta V(= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3)$ 를 충돌속도 별로 계산하여 그림 4, 그림 5에 나타내었

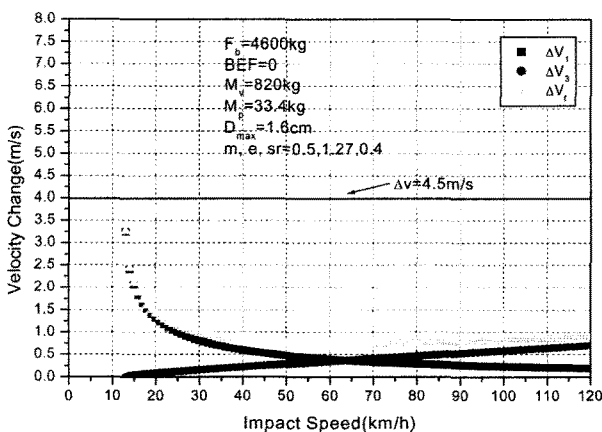


그림 4. 분리력 4,600 kg (분리 지주)에 대한 충돌속도 별 (BFE 무시)

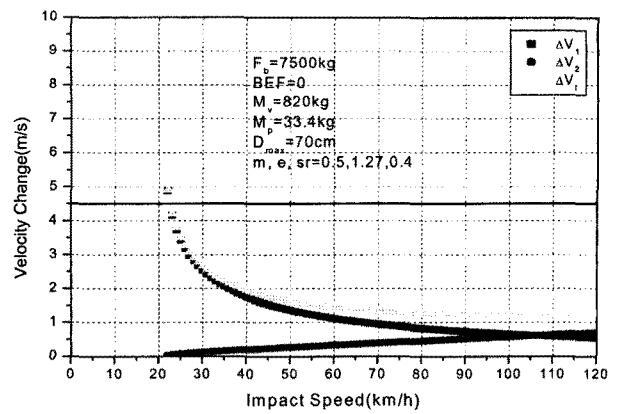


그림 5. 7,500 kg(강결지주)에 대한 충돌속도 별 (BFE 무시)

다. 그림 4는 분리 지주에 관한 것이고 그림 5는 강결지주에 관한 것이다. 4,600 kg의 분리력을 갖는 곡선은 14~120 km/h 구간에 걸쳐 부드러운 형상을 보이나 7,500 kg의 곡선에서는 20 km/h에서 첨점을 보인다. 이것은 20 km/h이하의 속도로 충돌하는 경우 승용차가 정지하기 때문이다. NCHRP230은 충돌 속도가 20~60 mile/h(32~92 km/h)일 때 ΔV 값을 4.5 m/sec 이하로 할 것을 권하고 있다. 4,600kg의 분리력(F_b)에서 ΔV 의 최대값은 12 km/h의 충돌에서 3.45 m/sec으로 권장치를 넘어서지는 않고 있다. 그러나 7,500 kg의 분리력(F_b)에서는 충돌속도 21 km/h에서 ΔV 값이 5 m/s로 권장치를 상회하고 있다.

Case 2)

지주의 BFE와 F_b 를 고려하여 $\Delta V(= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3)$ 를 충돌속도 별로 계산한 것이 그림 6, 그림 7에 나타내었다. 그림 6은 분리 지주에 관한 것이고 그림 7은 강결지주에 관한 것이다. $F_b = 4,600$ kg과 $F_b = 7,500$ kg의 경우 모두 저속에서 첨두 값을 보이고 있다. 그러나 $F_b = 4,600$ kg의 분리력으로 계산된 ΔV 의 첨두값은 충돌속도 12 km/h에서만 10.5 m/sec로 첨두값을 보이는 반면 $F_b = 7,500$ kg의 분리력으로 계산된 ΔV 는 충돌속도가 60 km/h에 이르기까지 권장치인 4.5 m/s를 크게 상회하여 그 위험성을 보여주고 있다.

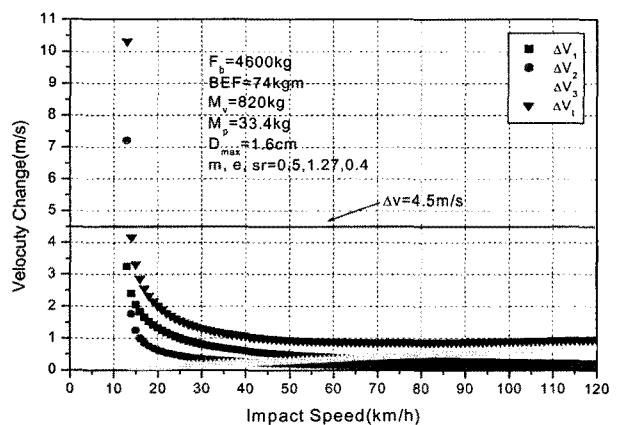


그림 6. 분리력 4,600 kg(분리 지주)에 대한 충돌속도 별 (BFE 고려)

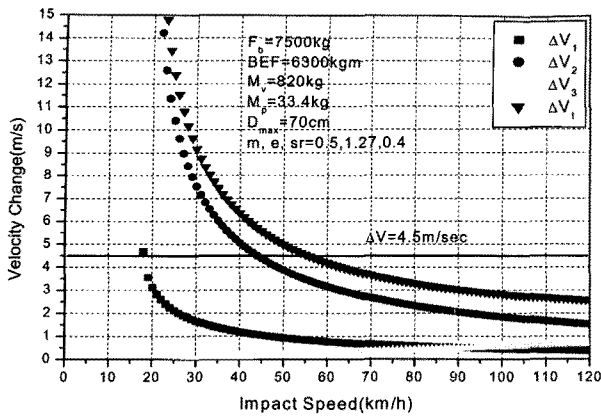


그림 7. 7,500 kg (강결지주)에 대한 충돌속도 별 (BFE 고려)

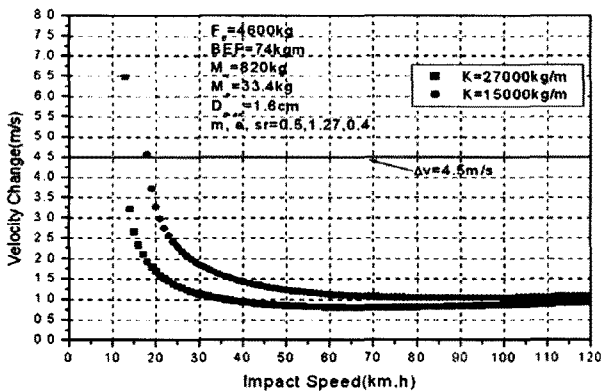


그림 8. 차량강성에 따른 충돌속도별 ΔV

Case 3)

차량 강성이 ΔV에 미치는 영향을 알아보기 위해서 4,600 kg의 분리력 (F_b)와 74kgΔV(= ΔV₁ + ΔV₂ + ΔV₃)m의 BFE로 ΔV를 계산하였다. 차량의 강성은 15,000 kg/m와 27,000 kg/m를 이용하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 같은 충돌속도에서 차량 강성이 큰 차의 ΔV가 강성이 작은 차의 ΔV에 비하여 작은 값을 보이는데 충돌속도가 100 km/h 이상이 되면서 그 차이는 미미해진다.

4. 결 론

분리 단부장치 설계에 중요한 요소가 충돌 차량의 속도변화이다. 이는 충돌실험을 통해서 구할 수 있으나 에너지와 운동량 보존의 법칙을 이용하여 계산할 수도 있다. 본 논문에서는 에너지와 운동량 보존의 법칙에 기초한 지주와 소형차 충돌 시 속도변화를 계산하는 식을 유도하였다. 이를 이용한 파라메트릭 스타디를 실시하여 지주단부의 분리하중, 파괴에너지, 차량의 강도와 속도변화의 연관성을 파악하였다. 민감도 분석에 사용한 중요한 변수는 분리 장치를 갖는 지주와 강결된 지주의 분리력 및 분리파괴에너지 (BFE)이다. 이 변수는 Breakaway Sign Support 설계에 관한 연구(전성민,

2008, 고만기 등, 2008)의 펜듈럼 실험과 LS-DYNA 시뮬레이션을 기반으로 한 것이다. 분리력은 분리지주와 강결지주로 나누어 분리지주의 경우는 Simulated Charpy 테스트를 통해 얻은 분리력이 4,592 kg임을 감안하여 4,600 kg을 사용하였고 강결지주는 LS-DYNA 시뮬레이션을 통해 얻은 x 방향의 힘 시간 그래프를 통하여 얻은 7,500 kg을 사용하였다. BFE는 분리지주의 경우 74 kg·m, 강결지주의 경우 6,300 kg·m을 이용하였다. 민감도 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 지주의 BFE를 무시하고 분리력만 고려할 때, 분리 단부를 갖는 지주에서 ΔV의 최대값은 12 km/h의 충돌에서 3.45 m/sec로 권장치를 넘어서지는 않았으나 강결지주에서는 충돌속도 21 km/h에서 ΔV값이 5 m/s로 권장치를 상회하였다.
- (2) 지주의 BFE와 분리력을 동시에 고려할 때, 분리 단부 장치가 있는 경우나 강결된 경우나 저속에서 침투값을 보였다. 그러나 분리 지주의 경우 ΔV는 충돌속도 12 km/h에서만 10.5 m/sec로 침투값을 보이는 반면 강결지주의 경우 ΔV는 충돌속도가 60 km/h에 이르기까지 권장치인 4.5 m/s를 크게 상회하여 그 위험성을 보여주었다.
- (3) 같은 충돌속도에서 차량 강성이 큰 차의 ΔV가 강성이 작은 차의 ΔV에 비하여 작은 값을 보이는데 충돌속도가 100 km/h 이상이 되면서 그 차이는 미미해진다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원(06 교통핵심 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

고만기, 김기동, 전성민, 성경곤 (2008) 분리식 지주 단부장치에 이용되는 인덴티드 타입 볼트의 분리파괴에너지, 한국방재학회 논문집 제출, 한국방재학회.
 도로교통안전관리공단 (2005) 2005년판 교통사고 통계분석.
 전성민 (2008) Breakaway Sign Support 설계에 관한 연구, 석사학위논문, 공주대학교.
 AASHTO (1975) Roadside Design Guide, Washington D.C..
 AND R. Owings (1987) Application of Mechanics to Roadside Safety. FHWA-TS-87-228, FHWA, Washington D.C.
 J. D. Michle (1981) Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features. NCHRP Report 230, Transportation Research Board, Washington, D.C.
 TRB (1993) Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features. NCHRP Report 350, Transportation Research Board, Washington, D.C.

© 논문접수일 : 2008년 07월 24일
 © 심사의뢰일 : 2008년 07월 28일
 © 심사완료일 : 2008년 08월 05일