



복합소재 기둥 구조의 실차 충돌 해석에 의한 탑승자 안전성 평가

김규동¹ · 이상열²

안동대학교 토목공학과 석사과정¹ · 안동대학교 토목공학과 조교수²

Passenger Safety Assessment by Real Car Crash Simulation of Composite Post Structures

Kim, Gyu-Dong¹ · Lee, Sang-Youl²

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

ABSTRACT: This study carried out passenger safety assessment by real car crash simulation of composite post structures for road facilities. The effects of different material properties of composites for various parameters are studied using the LS-DYNA finite element program for this study. In this study, the existing finite element analysis of steel post structures using the LS-DYNA program is further extended to study dynamic behaviors of the structures made of various composite materials. The numerical results for various parameters are verified by comparing different models with displacements and stress distribution occurred in the post and car.

Key Words: Composites, Post structures, Crash simulation, Passenger safety

1. 서 론

도로시설물 중 가로등이나 표지판 지주 등은 차량과 도로 이용자가 안전하게 통행하기 위해 필수적인 시설물이다. 일반적으로 도로에서의 부대 시설물로 취급되어 풍하중에만 견딜 수 있도록 설계되고 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006). 그러나 차량 충돌 관점에서 볼 때 이들 기둥들은 도로 위에서는 위험 요소이다. 일반적으로 가드레일이 없는 구간에서 고정 지주와의 충돌은 충돌 에너지가 대부분 차량에 흡수되어 탑승자 안전에 심각한 문제를 일으킨다. 이를 해결하기 위해 최근 국내에서는 강결된 원형 지주에 관한 탑승자 안전성 평가를 수행한바 있으나 지주 분리에 대한 역학적 규명이 부족하다 (Kim et al., 2012). 또한, 이러한 충격 흡

수를 차량보다는 지주에 전달되어 운전자의 안전을 최대한 보호할 수 있는 구조가 되어야 할 것이다.

기존 강재의 경우, 충격 흡수를 위하여 차량 충격 시 지주가 기초와 분리되는 충격분리형 (Breakaway system) 구조에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 그러나 이러한 충격분리형 구조는 충격이 자동으로 분리되도록 하는 별도의 장치를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 한편, 최근 소재산업이 급격하게 발전하면서 다양한 구조성능을 만족시키는 복합소재가 개발되어 생산되고 있다 (Lee and Chang, 2010). 복합소재의 경우, 구조성능의 목적에 따라 충격 흡수용 기둥 구조에도 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 도로시설물의 설치되는 교통표지판 등의 기둥구조를 대상으로 복합소재를 적용하여 LS-DYNA 프로그램에 의한 실차 충돌시뮬레이션을 실시한다. 본 연구는 복합소재 기둥구조가 차량의 충돌 시 충격을 흡수하는 정도를 기존 강재와 비교하여

주요어: 복합소재, 기둥 구조, 충돌 해석, 탑승자 안전성

Corresponding author: Lee, Sang-Youl

Department of Civil Engineering, Andong National University, 388 Songchon-dong, Andong, Kyongsangbuk-do 760-749, South Korea

Tel: +82-54-820-5847, E-mail: lsy@andong.ac.kr

투고일: 2014년 6월 17일 / 수정일: 2014년 6월 20일 / 게재확정일: 2014년 6월 27일

탑승자 관점에서의 안전성 평가를 수행한다. 또한, 강재와 같은 충격분리 장치 없이도 차량 충돌시 지주가 분리되도록 복합소재가 충격 흡수용 재료로서 효과적으로 적용할 수 있음을 검증하는 것을 목적으로 한다.

2. 복합재료 모델

LS-DYNA 프로그램에서 복합재료에 대한 재료 물성 입력 조건은 다음과 같이 Solid 및 Shell 요소로 구분하여 적용이 가능하다. 충돌과 같은 비선형 동적해석시, Shell 요소의 경우 054/055 재료 모델이 주로 적용되며, Solid 요소의 경우는 162/162 모델을 주로 사용하고 있다(Hallquis, 2001).

Table 1. Material Models for Composites in LS-DYNA

Shell	022: Composite Damage
	054/055: Enhanced_composite_damage
	059_shell_composite_failure_shell_mode
Solid	059_solid_composite_failure_solid_mode
	161_composite_msc
	162_composite_msc_DMG

본 연구에서는 복합 재료의 동적 비선형 해석에 주로 사용하는 054 재료 모델을 사용하였다. 이 재료 모델은 Chang-Chang의 파괴기준(Chang-Chang Failure Criteria)을 따른다. 이 파괴이론은 Hansin의 파괴이론의 수정된 형태이다, 연속적인 단층이 파괴가 일어날 경우 점진적인 파괴 거동을 구현하기 위해 파손 후 강도저하방법이 사용되었고, 4가지의 각 파괴별 파괴 기준식은 식은 다음과 같다. 섬유인장모드의 경우는 식이 0보다 크거나 같을 때 종방향, 횡방향 탄성계수와 포아송비가 0이 되면서 파괴가 일어나도 0보다 클 때에는 탄성을 유지하고 파괴가 되지 않는다. 아래의 나머지식도 섬유의 인장모드와 같이 적용이 된다. 먼저 섬유의 인장모드의 경우는 다음과 같은 식을 적용한다.

$$\sigma_{11} > 0 \text{ 이면 } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_{11} = E_{22} = G_{12} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

(1)

섬유의 압축모드는 다음과 같다.

$$\sigma_{11} < 0 \text{ 이면 } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_{11} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

모재의 인장모드의 경우는,

$$\sigma_{22} > 0 \text{ 이면 } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_{22} = \nu_{21} = 0 \rightarrow G_{12} = 0$$

(3)

모재의 압축모드

$$\sigma_{22} < 0 \text{ 이면 } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

$$E_{22} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0 \rightarrow G_{12} = 0$$

(4)

여기서, 1방향은 섬유 방향이고 2방향은 섬유와 수직하는 방향이다. σ_{11} 은 1방향 응력, σ_{12} 은 전단응력, σ_{22} 은 2방향 응력, X_T 은 1방향 인장강도, X_C 는 1방향 압축강도, Y_T 는 2방향 인장강도, Y_C 는 2방향 압축강도, S 는 전단강도, 그리고 β 는 인장 섬유 모드에서 전단항에 대한 가중치를 각각 의미한다.

동적해석에서는 준정적해석과 다르게 관성력이 존재 하는데 이는 충돌체에 추가적인 하중으로 작용한다. 동적 특성 시뮬레이션에서는 동적 마찰계수, 공기 저항, 재료물성 변화 등이 고려되어야 한다. 이 중 재료 물성 변화는 동적해석결과에 있어서 가장 큰 영향을 미치는데 충돌 속도에 따라 경화도가 틀리기 때문이다. 특히 충돌체가 강재인 경우 변형률 속도에 따른 경화도가 고려되어야 하는데 이는 고속인장실험을 통해서 재료의 물성치가 얻어진다. 그러나 실험을 통해 구성 방정식을 얻기 위해서는 많은 고속인장실험을 실시해야 하는데 이는 막대한 비용이 든다. 일반적으로 이를 피라기 위해서 준정적실험데이터에서 동적특성을 유도할 수 있는 구성방정식을 사용하는데 Cowper-symonds 모델과 Johnson-Cook 모델이 있는데 이중 Cowper-symonds를 사용하였다. 이 재료 모델은 재료의 열 발생과 이로 인한 연화를 고려할 수 없기 때문에 중저속 충돌해석에 적합하다. 차량충돌의 경우 통상적으로 중저속 충돌이기 때문에 LS-DYNA에서 지원하는 재료모델 중 Cowper-symonds 모델을 지원하는 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 재료 모델을 사용하였다. Cowper-symonds 모델의 관계식은 다음과 같다(Cowper and Symonds, 1957).

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\epsilon}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{0}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] = \sigma_0 \quad (6)$$

여기서 σ_0 는 식(5)에서 보는 것과 같이 정적응력이 고, C와 p는 Cowper-symonds모델의 재료 상수들이다. 본 연구에서는 사용하는 강재(SS400)의 C와 p는 각각 40과 5를 사용하였다.

3. 탑승자 안전 평가 지수

차량이 충돌하는 경우, 탑승자의 안전성은 THIV와 PHD로 평가할 수 있다. 먼저, 탑승자 충격 속도 (THIV ; Theoretical Head Impact Velocity)란 차량이 차량방호 안전시설에 충돌할 때 탑승자의 충격에 대한 위험도를 평가하기 위한 지수들 중에 하나로서, 탑승자의 머리를 자유 비행하는 물체로 보고, 차량이 시설물과 충돌하여 머리가 차량 내부공간의 가상 면에 부딪칠 때까지 이동하는 속도를 의미한다. 우리나라는 유럽 CEN의 기준을 적용하고 있으며, 미국은 1993년에 만들어진 NCHRP 350 기준을 사용 중이다.

차량이 구조물에 접하는 순간 차량은 병진(竝進) 운동을 하기 때문에 차량과 탑승자의 머리는 같은 평면상에서 일정속도 V_0 를 갖는다고 가정할 수 있다. 또한, 충돌이 진행되는 동안 충돌 차량은 평면상에서만 운동한다고 가정할 수 있다. 차량이 전복되지 않는 한 차량의 Rolling, Pitching, Yawing은 시설의 성능 평가에 있어 주된 관심사항이 아니며, 극단적인 수직 운동은 육안 혹은 필름 분석으로 합격 여부를 판단할 수 있다. 미국의 경우는 NCHRP 350에서 충돌시 탑승자 안전기준으로 탑승자 충격속도(Occupant Impact Velocity, OIV)와 탑승자 감가속도(Occupant Ridedown Acceleration, ORA)를 규정하고 있다. 또한, 비교 검토 목적으로 THIV와 PHD를 제시하고 있다. THIV는 우리나라와 유럽 CEN기준의 THIV와 계산절차가 같으나 PHD는 유럽 CEN 기준의 PHD와 다른 산정방안을 사용하고 있다.

한편, 탑승자 가속도 (PHD ; Post-impact Head Deceleration)는 차량의 1차 충돌로 인해 발생하는 2차 충돌 후에, 즉 탑승자가 차량 내부공간의 가상 면에 부딪친 후에 머리가 받게 되는 가속도 중에서 최대값을 의미한다. 탑승자의 머리가 차량 내부의 벽에 부딪힌 후 차량의 충돌이 끝날 때 까지 벽에 밀착되어 있다고 가정한다면, $t > T$ 이후의 차량이 받는 가속도를 탑승자의 머리가 받는다고 볼 수 있다. 따라서, PHD는 충돌 후 ($t > T$)로 계측된 \ddot{x}_c , \ddot{y}_c 의 10ms

(millisecond) 평균 가운데 최대값을 구하여 사용한다.

전술한 바와 같이 미국의 경우, PHD는 유럽 CEN의 PHD와 다른 산정방안을 사용하고 있다. 우리나라와 유럽 CEN의 PHD는 종방향과 횡방향의 10ms 평균가속도를 먼저 결정한 다음에 산정되는 합 평균가속도의 최대치로 정의되는 반면에 미국 NCHRP 350의 PHD는 종방향과 횡방향 가속도의 합 가속도를 먼저 결정한 다음에 산정되는 10ms 평균 합가속도의 최대치로 정의하는데 유의한다.

4. 수치해석 예제

4.1 해석 모델

Fig.1은 교통 표지판 지주와 차량의 충돌 모델을 보여준다. 충돌해석에 적용하는 실제 소형차는 미국 차량 충돌 연구 센터인 NCAC(National Crash Analysis Center)에서는 제공하는 차량 모델을 근간으로 모델링 하였다. 본 연구에서는 여러 차량 모델링 중 Dodge-Neon 모델을 승용차로 결정하였다. 승용차 모델의 대부분 물성치는 항복응력 400MPa, 탄성계수 210,000MPa인 강재로 되어있다. Table 2는 승용차의 모델 정보를 나타낸다.

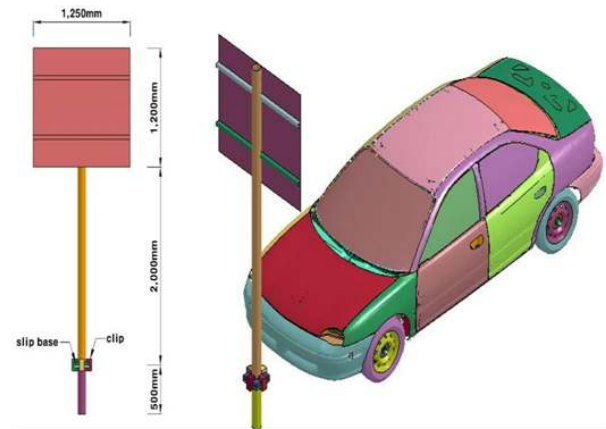


Fig. 1 Crash Simulation Model

Table 2. Properties of a Car Model

Elements	Shell	267786
	Solid	2852
	Beam	122
	etc.	8
	SUM	270768
Weight(ton)		1.3
Yield stress(MPa)		400
Elastic modulus(MPa)		210000

LS-DYNA 프로그램에 의한 충돌 해석에서는 충격을 받는 Master 물체와 충격을 가하는 Slave 물체로 나누어 지는데 가드레일의 차량 충돌에서는 가드레일이 Master, 차량이 Slave가 된다. 일반적인 차량의 충돌 시뮬레이션에서는 Master와 Slave가 접촉될 때 노드와 경계면 사이에 침투 간섭이 발생하는데 이는 해석의 정확성에 큰 문제를 일으키게 된다. LS-DYNA에서는 AUTOMATIC SINGLE SURFACE라는 옵션이 이러한 침투를 막아주는 역할을 한다. 그러므로 본 과업에서는 차량과 가드레일 전 부분에 있어서 이 옵션이 사용되었다. 한편, 차량과 가드레일의 접촉과 관련해서는 Master와 Slave간의 접촉 요소를 결정해 주어야 하는데 LS-DYNA 프로그램에서는 AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE 옵션이 사용되어 접촉 문제를 해결한다. 이때, Master와 Slave 사이에서는 정마찰과 동마찰 계수를 결정해야 하는데 본 시뮬레이션에서는 차량 충돌시뮬레이션에서 일반적으로 사용하는 정마찰, 동마찰 계수가 0.3이 사용되었다.

한편, 차량의 바닥을 정의하기 위해 Rigid_wall 옵션을 사용하여 차량과 Rigid_surface의 경계조건이 부여되었으며 바닥은 무한 평면으로 가정되었다. Table 3은 적용된 GFRP의 재료 물성을 나타낸다. Steel의 경우는 SS400 강종을 적용하였다.

Table 3. Material Properties of GFRP

R_0	$E_A(\text{MPa})$	$E_B(\text{MPa})$	ν_{AB}	$G_{AB}(\text{MPa})$	$G_{BC}(\text{MPa})$
1.85×10^{-9}	27500	27500	0.11	2900	2140
$G_{CA}(\text{MPa})$	X_C	X_T	Y_C	Y_T	S_C
2140	604	291	604	291	75

R_0 : Mass Density(t/mm^3)

X_C, X_T : Longitudinal compressive/tensile strength(MPa)

Y_C, Y_T : Transverse compressive/tensile strength(MPa)

4.2 해석 결과

Fig.2는 차량의 속도 변화에 따른 복합재료 기둥의 내부에너지의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 차량 주행속도가 기둥의 내부에너지 변화에 미치는 영향은 크다는 것을 알 수 있다. 특히 100km/h의 경우는 내부에너지의 최대치가 중·저속의 경우보다 상대적으로 매우 크게 나타나고 있음에 유의해야 한다.

Fig.3~4는 강재 및 GFRP 기둥에 대하여 차량 주행 속도 변화에 따른 기둥 충돌 시뮬레이션을 보여준다. 강재의 경우는 0.03sec에 대한 순간 충돌을 보여주고 있으며, 충격분리형 지주로 설계하였다(Schmidt et al., 2010). 반면, GFRP 기둥의 경우에는 충격분리형 지주

를 설치하지 않았음에도 불구하고 충돌 시 지주가 기초와 분리되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 구조물의 관점에서는 높은 취성적 거동으로 분리하다고 할 수 있으나, 탑승자의 안전을 기준으로 판단하였을 경우에는 보호 성능이 우수한 것으로 분석된다.

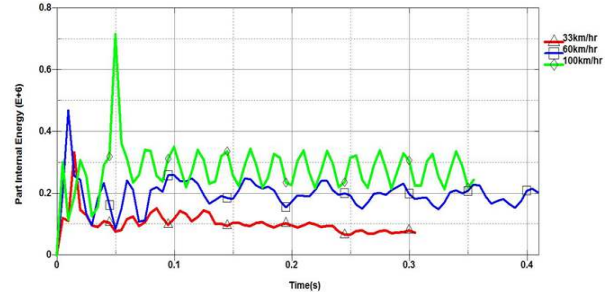


Fig. 2 Variation of Internal Energy for Different Velocities



(a) 33km/h



(b) 60km/h



(c) 100km/h

Fig. 3 Crash Simulation for Different Velocities (SS400, time=0.03sec)

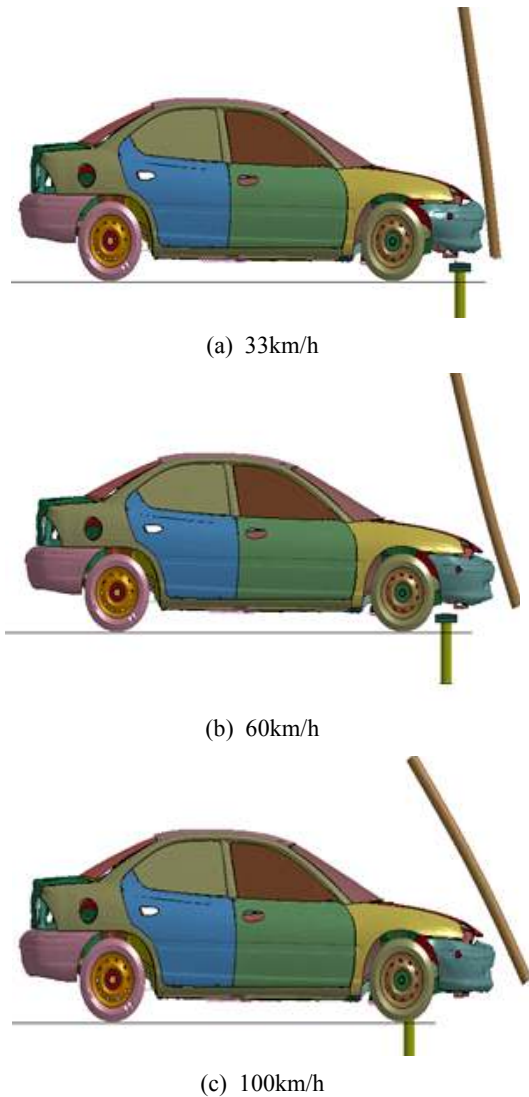


Fig. 4 Crash Simulation for Different Velocities (GFRP, time=0.03sec)

Fig.5는 차량 속도변화에 따른 탑승자의 충돌속도 (THIV)를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, GFRP의 경우는 차량이 충돌하는 동시에 취성적 거동으로 지주가 분리되어, 차량 및 탑승자에게 주는 충격이 미미함을 알 수 있다. 특히 100km/h의 고속 주행의 경우에는 강제 지주는 허용기준(33)을 초과하고 있으나, GFRP 지주는 허용 기준 이내로 안전하게 나타났다.

Fig.6은 차량 속도변화에 따른 탑승자의 가속도 (PHD)를 비교한 것이다. 앞의 경우와 유사하게, GFRP의 경우는 차량이 충돌하는 동시에 취성적 거동으로 지주가 분리되어, 차량 및 탑승자에게 주는 충격이 미미함을 알 수 있다. 100km/h의 고속 주행의 경우에는 강제 지주는 허용기준(20)을 크게 초과하고 있으나, GFRP 지주는 허용 기준 이내로 안전하게 나

타났다. 따라서, 탑승자의 안전성만을 기준으로 판단하였을 경우에는 기존 강제 기둥보다 GFRP 기둥이 매우 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

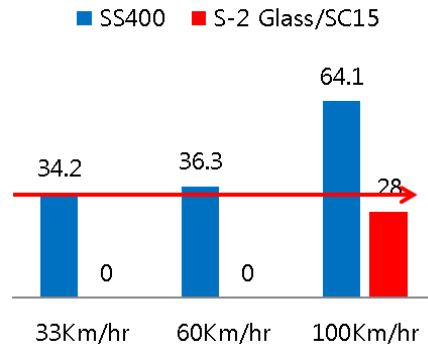


Fig. 5 THIV for different velocities

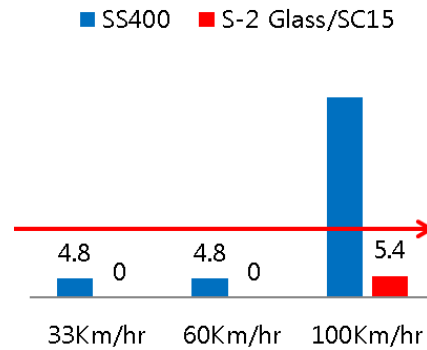


Fig. 6 PHD for Different Velocities

5. 요약 및 결론

기존의 강제 기둥은 연성거동을 하기 때문에 차량과의 충돌 시 충돌에너지의 대부분이 차량에 흡수되어서 탑승자의 안전성에 문제가 있기에 외국에서는 충격분리형 지주가 많이 연구가 되고 있다. 본 연구에서는 복합소재(GFRP)를 적용한 충격분리형 장치가 설치되지 않는 지주를 제안하며, 차량 충돌 시플레이션을 통하여 기존 충격분리형 강제지주와 비교하여 탑승자의 안전성 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 고등 유한요소 동적 비선형 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 실제 차량 충돌 속도를 33km/h, 60km/h, 그리고 100km/h로 변화하면서 해석을 수행하였다. 또한, 탑승자의 안전성을 고려하기 위해 LS-DYNA에서 충돌 시 x, y, z방향의 각속도와 가속도를 구한 뒤 TRAP 프로그램을 이용해서 탑승자 충돌속도(THIV)와 가속도(PHD)를 구해서 탑승자의 안전성을 검토하였다.

충돌해석 결과 복합재료 지주구조는 기존의 강재지주에 비해서 충격에너지를 차량에 작게 전달하여 탑승자의 안전성이 매우 향상되는 것으로 나타났다. 복합재료 지주의 경우는 취성 파괴가 일어나기 때문에 지주분리장치를 설치할 필요 없이 탑승자의 안전성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 차량의 무게중심센서에서의 각속도와 가속도로 탑승자 충돌속도와 가속도를 비교해본 결과 강재 지주는 PHD에 대하여 33km/hr, 60km/hr의 경우를 제외하고는 모두 기준값을 초과했지만 복합재료 지주는 기준 값을 모두 만족하여 탑승자의 안전성이 좋다고 판단된다. 그러나, 보다 다양한 복합소재를 적용하여 충격 흡수용 재료로서 가장 적합한 복합소재를 선택해야 할 것이며, 복합소재의 특성에 적합한 기둥 구조의 단면 상세 설계가 필요할 것으로 판단된다. 또한 복합재료 지주 구조물의 취성 파괴에 따른 2차 피해에 대한 고려가 필요하며, 차량의 지주구조물 충돌시 정면 충돌과 더불어 충돌방향에 따른 탑승자의 충격속도 변화에 대한 분석도 후속연구로서 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A1014722).

References

- Arens, S. W., D. L. Sicking, R. K. Faller, J. D. Reid, R. W. Bielenberg, J. R. Rohde, and K. A. Lechtenberg. (2009), Investigating the Use of a New Universal Breakaway Steel Post. MwRSF Research Report TRP-03-218-09. Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln.
- Cowper, G. and Symonds, P. (1957), Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams, Brown Univ. Applied Mathematics Report, Report No. 28.
- Hallquist, J. O. (2001), "LS-DYNA Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- Jones, R. M. (1999), Mechanics of Composite Materials (2nd ed.), Taylor & Francis Inc., New York.
- Johnson, G. R. and Cook, W. H. (1985), "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strain, Strain Rates Temperatures and Pressures", Engineering Fracture Mechanics, 21(1), pp.31-48.
- Kim, K. D., Ko, M. G., Kim, D. S., Joo, J. W., and Jang, D. Y. (2012), "Design of High-Performance Longitudinal Flexible Barrier Using Vehicle Velocity-time History", *Journal of KOSHAM*, Vol. 12, No. 3, pp. 157-167.
- Lee, S. Y. and Chang S. Y. (2010), "Dynamic Instability of delaminated composite structures with various geometrical shapes." *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 1, pp.1-8.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2006), Specification for Road Signal.
- NCAC Public Finite Element Model Archive, (2000), "FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center website page(www.ncac.gwu.edu)", Washington, D.C.
- Schmidt, J. D., D. L. Sicking, R. K. Faller, J. D. Reid, R. W. Bielenberg, and K. A. Lechtenberg. (2010), Lechtenberg. Investigating the Use of a New Universal Breakaway Steel Post—Phase 2. MwRSF Research Report TRP-03-230-10. Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln.