

다양한 차량 충돌속도에 따른 복합재료 지주구조의 동적 거동 특성

이상열[†]

Dynamic Characteristics of Composite Support Structures with Different Car Crash Speeds

Sang-Youl Lee[†]

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

초 록: 본 연구는 도로시설물에 적용될 수 있는 복합재료 지주구조에 대하여 실차 차량 충돌 시뮬레이션을 통한 동적 특성을 다룬다. 다양한 차량 충돌 속도에 대한 서로 다른 복합재료 물성의 영향을 LS-DYNA 유한요소 프로그램을 사용하여 분석하였다. 본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램을 적용하여 기존의 강재 지주구조에 대한 유한요소해석을 다양한 복합재료로 구성된 지주구조로 확장하여 적용하였다. 탑승자 안전성 평가를 기반으로 다양한 매개변수에 대한 수치해석 결과는 지주와 차량에서 발생하는 내부에너지를 비교 분석하여 규명하였다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 충돌 해석(Crash analysis), 지주구조(Support structure), 충돌에너지(Crash internal energy)

1. 서 론

국내 고속도로 또는 국도변에는 가로등이나 표지판 지주 등과 같은 많은 도로시설물이 존재하고 있다. 이러한 교통시설물들은 차량과 도로 이용자가 안전하게 통행하기 위해 필수적인 시설물이나 차량 충돌 관점에서 볼 때 이러한 기둥 구조들은 차량운전자 관점에서는 위험 요소가 될 수 있다. 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 평가

를 수행한바 있으나 지주 분리에 대한 역학적 규명이 부족하다[1]. 또한, 이러한 충격 흡수를 차량보다는 지주에 전달되어 운전자의 안전을 최대한 보호할 수 있는 구조가 되어야 할 것이다[8].

기존 강재의 경우, 충격 흡수를 위하여 차량 충격시 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[6]. 복합소재의 경우, 구

조성능의 목적에 따라 충격 흡수용 기둥구조에도 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 도로 시설물의 설치되는 교통표지판 등을 설치하는 지주 구조를 대상으로 다양한 복합재료를 적용하여 LS-DYNA 유한요소 프로그램에 의한 실차 충돌시뮬레이션을 실시한다. 본 연구는 다양한 복합재료로 구성된 지주구조를 가정하여 다양한 진행 속도로 차량의 충돌 시 지주에서 발생하는 내부에너지를 기존 강재 지주의 경우와 비교 분석한다. 또한, 강재와 같은 충격분리 장치 없이도 차량 충돌시 지주가 분리되도록 적절한 복합재료를 제시하고 탑승자 관점에서 충격 흡수용 재료로서 적용 가능함을 검증하고자 한다.

2. 충돌 파괴 메커니즘

본 연구에서 적용한 복합재료 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 강도저하기법이 사용되었고, 4가지의 각 파괴별 파괴기준식은 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 나머지 식도 섬유의 인장모드와 같이 적용이 된다. 먼저 섬유의 인장모드의 경우는 다음과 같은 식을 적용한다[4].

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

$$E_{11} = E_{22} = G_{12} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0 \quad (1)$$

섬유의 압축모드는 다음과 같다.

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

$$E_{11} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0 \quad (2)$$

모재의 인장모드의 경우는 다음식과 같다.

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

$$E_{22} = \nu_{21} = 0 \rightarrow G_{12} = 0 \quad (3)$$

모재의 압축모드는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$E_{22} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0 \rightarrow G_{12} = 0 \quad (4)$$

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 은 1방향 압축강도, Y_T 은 2방향 인장강도, Y_C 은 2방향 압축강도, S_C 은 전단강도, 그리고 β 는 인장 섬유 모드에서 전단항에 대한 기중치를 각각 의미한다.

동적해석에서는 준정적해석과 다르게 관성력이 존재하는데 이는 충돌체에 추가적인 하중으로 작용한다. 동적 특성 시뮬레이션에서는 동적 마찰계수, 공기저항, 재료물성 변화 등이 고려되어야 한다. 이 중 재료 물성 변화는 동적 해석결과에 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 고속인장 실험을 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. Cowper-symonds 모델의 관계식은 다음과 같다[2].

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

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

여기서 σ_0 는 식(5)에서 보는 것과 같이 정적응력이고, C 와 p 는 Cowper-symonds 모델의 재료 상수들이다. 본 연구에서는 사용하는 강재(SS400)의 C 와 p 는 각각 40과 5를 사용하였다.

3. LS-DYNA 유한요소 해석

본 연구에서는 차량충돌의 경우 통상적으로 중저속 충돌이기 때문에 LS-DYNA 프로그램에서 지원하는 재료모델 중 전술한 Cowper-symonds 모델을 지원하는 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 재료모델을 적용하였다. 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[3]. 본 연구에서는 복합 재료의 동적 비선형 해석에 주로 사용하는 054 재료 모델을 사용하였다.

Fig. 1은 교통 표지판 지주와 차량의 충돌 모델을 보여준다. 충돌해석에 적용하는 실제 소형차는 미국 차량 충돌 연구 센터인 NCAC(National Crash Analysis Center)에서는 제

공하는 차량 모델을 근간으로 모델링 하였다. 본 연구에서는 여러 차량 모델링 중 Dodge-Neon 모델을 승용차로 결정하였다. 승용차 모델의 대부분 물성치는 항복응력 400 MPa, 탄성계수 210,000 MPa인 강재로 되어 있다. Table 2는 승용

Table 1. Material models for composites in LS-DYNA

Material No.	Shell	Solid
022	Composite Damage	-
054/055	Enhanced_composite_damage	-
059	Shell_composite_failure_shell_mode	Solid_composite_failure_solid_mode
161	-	Composite_msc
162	-	Composite_msc_DMG



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

Table 3. Material Properties of Composites

Material	R_O	E_A (MPa)	E_B (MPa)	ν_{AB}	G_{AB} (MPa)	G_{BC} (MPa)	G_{CA} (MPa)	X_C	X_T	Y_C	Y_T	S_C
T700GF	1.57e-9	124,800	8,400	0.0205	4205.9	4205.9	4205.9	1447.9	2165	198.5	48.8	154.4
T700SC	1.52e-9	55,920	54,400	0.043	4199	4199	4199	710.1	910.1	703.2	772.2	131
S2 GLASS SC	1.85e-9	27,500	27,500	0.11	2900	2140	2140	291	604	291	604	75

R_O : Mass Density (t/mm^3)

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

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

차의 모델 정보를 나타낸다[9].

LS-DYNA 프로그램에 의한 충돌 해석에서는 충격을 받는 Master 물체와 충격을 가하는 Slave 물체로 나누어 지는데 가드레일의 차량 충돌의 경우를 예를 들면, 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-DYNA 프로그램에서는 AUTOMATIC SINGLE SURFACE라는 옵션이 이러한 침투를 막아주는 역할을 한다. 그러므로 본 연구에서는 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 연구에서는 차량 충돌 시뮬레이션에서 일반적으로 사용하는 정마찰, 동마찰 계수가 0.3이 사용되었다.

4. 수치해석 예제

본 연구에서는 수치 시뮬레이션을 위하여 차량의 바닥을 정의하기 위해 Rigid_wall 옵션을 사용하여 차량과 Rigid_surface의 경계조건이 부여되었으며 바닥은 무한 평면으로 가정되었다. Table 3은 수치해석을 위하여 적용된 복합재료의 재료 물성을 나타낸다. CFRP 계열의 2가지 종류 (T700GF, T700SC) 재료와 GFRP 계열(S2 Glass SC)의 재료가 적용되었다. 총 3가지 대표적인 복합재료에 대하여 충돌 수치해석을 실시하였으며, 기존 도로 표지판 지주에 적용되는 강재의 경우는 보편적인 SS400 강종을 적용하였다.

Fig. 2는 복합재료 재료에 대하여 차량 주행속도 변화에 따른 지주 충돌 시뮬레이션을 보여준다. Fig. 2는 0.03 sec에 대한 순간 충돌을 보여주고 있으며, 충격분리형은 고려하지 않았다. 복합재료 지주의 경우에는 충격분리형 시스템을 설치하지 않았음에도 불구하고 충돌 시 지주가 기초와 분리되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 구조물의 관점에서는 높은 취성적 거동으로 불리하다고 할 수 있으나,

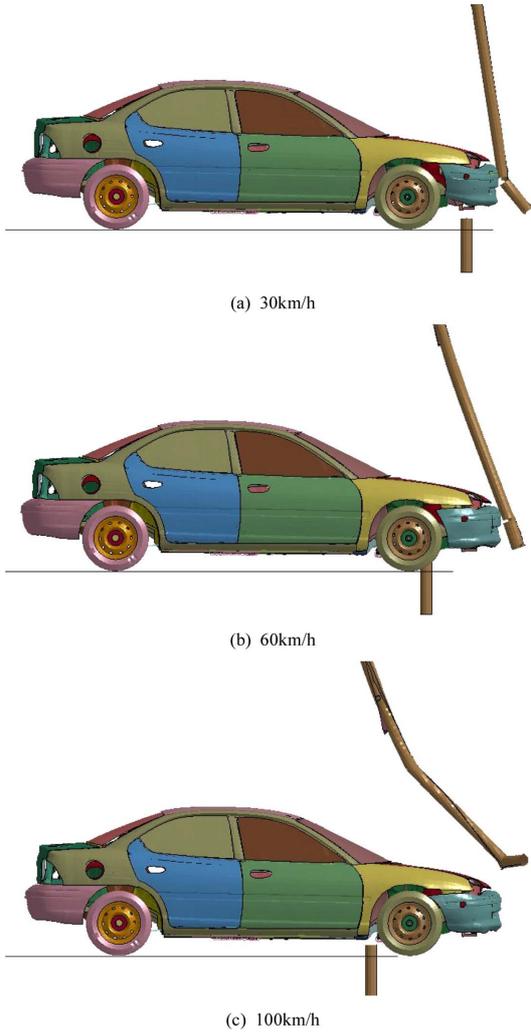


Fig. 2. Crash Simulation for Different Velocities (GFRP).

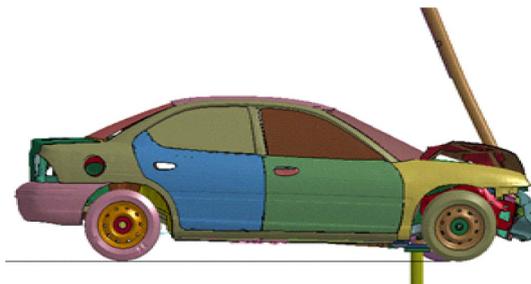


Fig. 3. Crash Simulation for 100 km/h (SS400).

탑승자의 안전을 기준으로 판단하였을 경우에는 보호 성능이 우수한 것으로 분석된다. 강재지주의 경우에는 Fig. 3 과 같이 연성적 거동에 의하여 차량이 파손되면서 탑승자의 안전에 위협을 가져오는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 4 mm 두께의 기존 강재 및 3가지 복합재료에 대하여 속도변화에 따른 표지판 지주에서의 내부에너지를 비교한 것이다. 강재 지주의 경우 Fig. 4(a)와 같이 충격분리 시스템을 설치하지 않음으로 인하여, 충돌 시 연성거동의

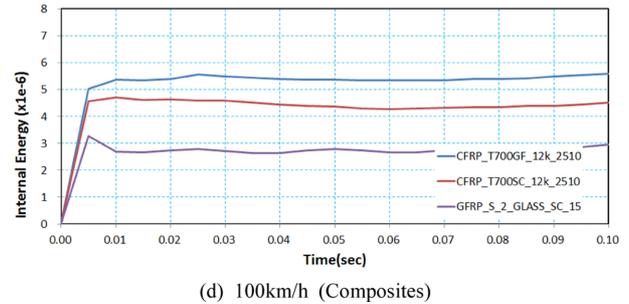
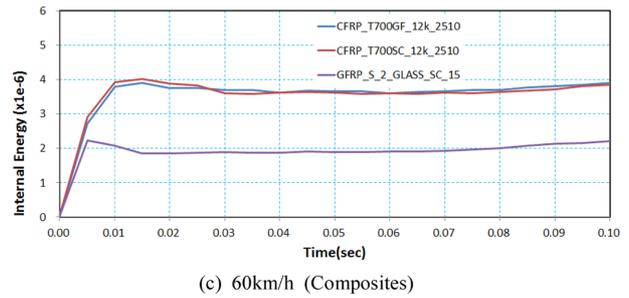
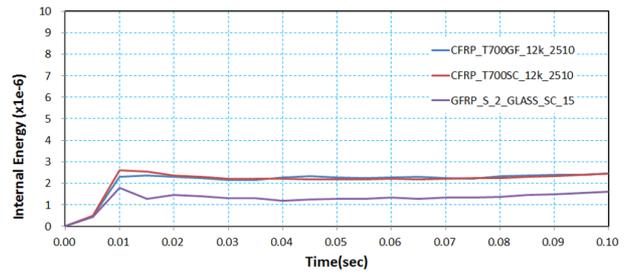
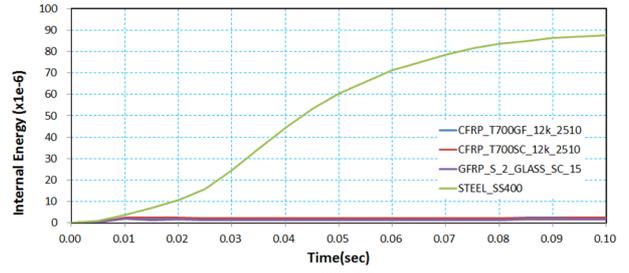


Fig. 4. Internal Energy for Different Velocities (Thickness = 4 mm).

로 매우 높은 내부에너지가 발생함을 알 수 있다. 이러한 경우 탑승자의 안전에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 반면, CFRP 및 GFRP의 복합재료 계열은 취성적 거동을 보이며 충격 분리 시스템을 설치하지 않았음에도 충돌순간 지주가 기초와 분리되는 현상을 보여서 적은 내부에너지가 발생하였다. 이러한 경향은 Fig. 5와 같은 8 mm 두께의 지주인 경우에도 유사하게 나타났다. Fig. 4~5로부터 GFRP 계열의 복합재료로 구성된 지주의 경우가 가장 작은 내부에너지를 발생함을 이러한 차이는 차량 진행 속도가 느린 경우에는 크지만, 진행속도가 빠를수록 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 차량 진행속도가 빨라질수록 순간충돌 충격이 커지기 때문에 취성 파괴가 더욱 유발되기 때문으로 분석된다.

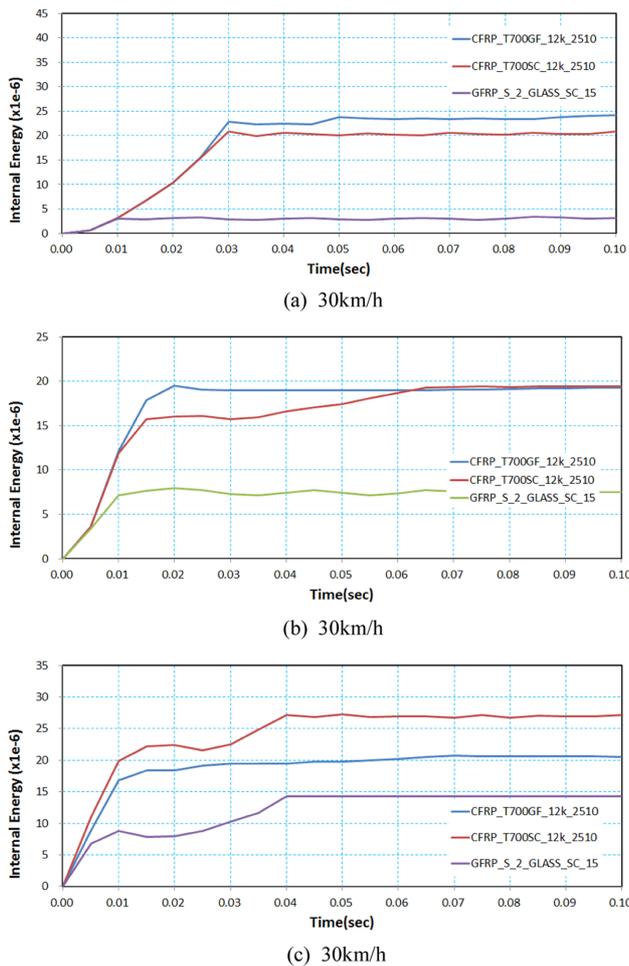


Fig. 5. Internal Energy for Different Velocities (Thickness = 8 mm).

수치해석 결과 GFRP 복합재료 지주의 경우가 가장 작은 내부에너지를 발생하여 충돌 시 탑승자 관점에서 안전성이 가장 높을 것으로 예상되나, 구조물로서의 사용성 측면에서는 취약할 수 있으므로 본 연구범위에서 벗어나지만 강풍 또는 돌풍 등의 외적하중에도 지탱할 수 있는지에 대한 추가 분석이 필요할 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 복합재료를 적용하여 탑승자 안전 관점에서의 충격분리형 장치가 설치되지 않는 지주를 제안하였으며, 실제 차량 충돌 시뮬레이션을 통하여 기존 충격분리형 강재지주와 비교하여 탑승자의 안전성 평가를 수행하였다. 또한, 고등 유한요소 동적 비선형 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 실제 차량 충돌 속도를 30 km/h, 60 km/h, 그리고 100 km/h로 변화하면서 해석을 수행하였다.

충돌해석 결과 복합재료 지주구조는 기존의 강재지주에 비해서 충격에너지를 차량에 작게 전달하여 탑승자의 안전성이 매우 향상되는 것으로 나타났다. 복합재료 지주의

경우는 취성 파괴가 일어나기 때문에 강재와 같은 충격분리장치를 설치할 필요 없이 탑승자의 안전성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 저속 충돌시에는 GFRP 계열의 복합재료 지주가 충돌 순간 취성파괴 거동으로 차량 탑승자 안전성 측면에서 유리한 것으로 나타났다. 그러나, 탑승자의 안전성 뿐만 아니라 사용성 측면에서 내구성 등을 확보한다는 측면에서 GFRP 계열보다는 CFRP 계열의 복합재료 지주가 바람직 할 수 있으나, 단가적 측면에서는 GFRP 지주가 현실적 대안으로 제시할 수 있다. 따라서, 차량 탑승자 관점에서의 안전성과 도로시설물로서의 사용성을 모두 충족시킬 수 있는 합리적인 복합재료 단면 설계 및 최적화 해석 기법에 대한 후속연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

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

REFERECNES

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