



## 다양한 복합소재를 적용한 지주구조의 유한요소 충돌 해석

김규동<sup>1</sup> · 이상열<sup>2</sup>

안동대학교 토목공학과 박사과정<sup>1</sup> · 안동대학교 토목공학과 조교수<sup>2</sup>

### Finite Element Crash Analysis of Support Structures Made of Various Composite Materials

Kim, Gyu-Dong<sup>1</sup> · Lee, Sang-Youl<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PH.D. Student, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

**Abstract:** This study performed a finite element crash analysis of support structures made of various composite materials for road facilities. The effects of different material properties of composites for various parameters are studied using the finite element commercial package for this study. In this study, the existing finite element analysis of composite post structures using the LS-DYNA program is further extended to compare dynamic behaviors against car crash of the structures made of various composite materials. The several numerical examples show the comparison of the nonlinear dynamic effects for different materials.

**Key Words:** Composites, Support structures, Car crash, Finite element analysis

#### 1. 서론

최근 건설 분야의 다양한 기술발전과 함께 고성능 소재의 적용에 대한 관심이 증대되고 있다. 그 중 복합소재(Composite materials)는 경량이면서 우수한 역학적 성질을 가지고 있고 뛰어난 성형성을 가지고 있어서 우주, 항공, 선박, 기계 등 현대산업의 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 그리고 동일한 물성과 질량을 가지면서 콘크리트와 강재와 달리 적층개수와 적층각도 등에 따라 상이한 구조적 성능을 발휘하게 되어 공진현상을 피하도록 설계할 수 있다. 이러한 복합소재의 역학적인 장점을 건설 분야에서도 활용을 하고자 국내·외로 다양한 연구개발이 수행되어 왔다. 한편, 최근 국내에서는 강결된 원형 지주에 관한 탑승

자 안전성 평가를 수행한바 있으나 지주 분리에 대한 역학적 규명이 부족하다(Kim et al., 2012). 기존 강재 지주의 경우, 차량과의 충돌시 발생하는 충돌에너지를 흡수하기 위하여 지주가 기초와 분리되는 충격분리형(Breakaway system) 구조에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 그러나 이러한 충격분리형 구조는 충격에 자동으로 분리되도록 하는 별도의 장치를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 복합소재의 경우, 구조성능의 목적에 따라 충격 흡수용 기둥구조에도 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다(Kim and Lee., 2014). 본 연구에서는 도로시설물이 설치되는 교통표지판 등의 지주 구조를 대상으로 다양한 복합소재를 적용하여 LS-DYNA 프로그램을 이용하여 비선형 동적해석을 수행하여 동적거동을 비교 검증하도록 한다. 또한, 차량 충돌과 같은 극한 충격을 받는 지주구조에 복합

**주요어:** 복합소재, 지주 구조, 실차 충돌, 유한요소해석

**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@anu.ac.kr

Received March 3, 2015 / Revised March 15, 2015 / Accepted March 18, 2015

소재를 적용하여 기존 일반강재와 비교한 동적성능향상 효과를 규명하고, 다양한 매개변수 해석을 통하여 향후 이와 같은 구조를 적극적으로 활용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 복합소재의 파괴기준

본 연구에서 사용하는 재료모델은 LS-DYNA에서 제공하는 재료모델 중 일반적인 복합소재의 모델이며 동적 비선형해석에 자주 사용하는 Mat54 enhanced composite damage를 사용하였다(Hallquis, 2001). 이 재료 모델은 Chang-chang의 파괴기준(Chang-chang failure criteria)을 따르며 이 파괴이론은 Hasin의 파괴이론의 수정된 형태이다. 연속적인 단층이 파괴가 일어날 경우 점진적인 파괴 거동을 구현하기 위해 파손 후 강도저하기법이 사용되었고, 4가지의 각 파괴별 파괴기준식은 식(1)~(4)와 같다. 섬유인장모드의 경우는 식이 0보다 크거나 같을 때 종방향, 횡방향 탄성계수와 포아송비가 0이 되면서 파괴가 일어나도 0보다 클 때는 탄성을 유지하고 파괴되지 않는다. 아래의 나머지 식도 섬유의 인장모드와 같이 적용된다. 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.

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

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

(2)

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 압축모드는 다음과 같다.

$$\sigma_{22} < 0 \text{ 이면 } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 - 1$$

$$\begin{cases} \geq 0 & \text{failed} \\ < 0 & \text{elastic} \end{cases}$$

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

(4)

여기서, 1방향은 섬유 방향이고 2방향은 섬유와 수직하는 방향이다.  $\sigma_{11}$ 은 1방향 응력,  $\sigma_{12}$ 은 전단응력,  $\sigma_{22}$ 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  $\beta$ 는 인장 섬유 모드에서 전단항에 대한 가중치를 각각 의미한다.

## 3. 수치해석 예제

### 3.1 해석 모델

본 연구에서는 LS-DYNA 유한요소 프로그램을 이용하여 차량과 다양한 소재를 적용한 도로표지판의 지주를 속도 및 재료별로 충돌해석을 수행하여 동적 거동을 비교분석하였다. 지주는 일반적인 도로시설물 중 도로표지판을 모델링 하였고, 차량은 미국의 차량 충돌연구센터인 NCAC(National crash analysis ceanter)에서 제공하는 소형차인 Dodge-neon 모델을 적용하였다. 도로표지판의 지주는 총 높이 3,700mm이고 하부에서 부터 500mm까지는 땅에 매설이 되어있는 상태를 구현하기 위해서 6방향 모두 고정시키는 경계조건을 적용하였다. 강제지주의 경우 직경 101.6mm, 두께 4.0mm를 갖는 원통형 쉘 모델을 적용하였고, 복합소재지주의 경우는 강제지주의 체원과 동일하지만 두께만 4.0mm, 6.0mm, 8.0mm를 적용하였다. 지주의 상부에는 1,250mm×1,200mm의 표지판이 완전 부착되어 있는 것으로 가정하였고 두께는 4.0mm인 쉘 모델을 적용하였다(Kim and Lee, 2014).



Fig. 1 Example of Crash Model by using LS-DYNA Program

**Table 1. Material Properties of Composites for LS-DYNA**

Material	RO	EA (MPa)	EB (MPa)	$\nu_{AB}$	GAB (MPa)	GBC (MPa)	GCA (MPa)	XC	XT	YC	YT	SC
T700GF	1.57e-9	124,800	8,400	0.0205	4,205	4,205	4,205	1,447	2,165	198.5	48.8	154.4
T700SC	1.52e-9	55,920	54,400	0.043	4,199	4,199	4,199	710.1	910.1	703.2	772.2	131
S2 GLASS SC	1.85e-9	27,500	27,500	0.11	2,900	2,140	2,140	291	604	291	604	75

RO: Mass density( $t/mm^3$ )

XC, XT: Longitudinal compressive/tensile strength(MPa)

YC, YT: Transverse compressive/tensile strength(MPa)

Fig. 1은 충격분리장치가 설치되지 않은 강재지주와의 충격에 의한 차량 탑승자의 안전성 실험 및 LS-DYNA를 이용한 수치해석 모델링 예를 보여준다 (CompMechLab, 2006). Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 연구에 적용하고자 하는 LS-DYNA는 각종 차량충돌에 의한 차량 및 충돌체의 동적거동을 묘사할 수 있는데 적합한 프로그램임을 알 수 있다.

한편, 충돌해석을 수행하기 위해서는 충돌하는 물체들 사이의 접촉조건이 적용되어야 한다. 본 연구에서 고려할 접촉조건은 차량-지주간의 접촉조건과 차량의 내부 부품들과의 접촉조건이 적용되어야 한다. 충돌해석에서의 접촉조건은 충격을 받는 Master물체와 충격을 가하는 Slave물체로 나누어진다. 본 연구에서는 지주가 Master, 차량이 Slave로 적용하였다. 일반적인 해석에서는 Master와 Slave가 접촉될 때 노드와 경계면 사이에 침투간섭이 발생하는데 이는 해석의 정확성에 큰 문제를 일으킨다. 본 연구에서는 차량의 내부 부품들과의 침투간섭을 방지하고 충돌시 여러 부품파트와 접촉이 발생할 수 있기 때문에 Automatic-single-surface를 적용하였다. 또한, 차량-지주간의 접촉조건도 적용해야 하며 본 연구에서는 Automatic-surface-to-surface 옵션을 사용하였다. 차량 바닥은 Rigid-wall 옵션을 사용하여 차량과 Rigid-surface의 경계조건을 적용하였고 바닥은 무한평면으로 가정하여 해석을 수행하였다. 본 해석을 위하여 사용한 도로포지판의 제원과 차량의 모델형상은 NCAC에서 제공하는 모델링을 적용하였다 (NCAC, 2000, Kim and Lee, 2014).

충돌해석에서 사용된 복합소재는 CFRP계열인 T700GF\_12k\_2510, T700SC\_12k\_2510 (Wade et al., 1998)와 GFRP계열의 S2\_GLASS\_SC(Xiao et al., 1998)을 사용하였다. 복합소재의 재료모델은 진술한 바와 같이 LS-DYNA에서 제공하는 Mat54의 enhanced composite

damage를 사용하였다. Table 2는 LS-DYNA 프로그램을 위한 복합 재료 물성 입력값을 보여준다. 복합재료와의 성능비교를 위해 사용한 강재는 SS400를 적용하였으며 Mat26 piecewise linear plasticity를 사용하였다. Mat26에서 제공하는 Cowper-symonds 구성방정식은 준정적 데이터를 동적 방정식으로 유도하여 재료 물성을 예측할 수 있는 구성 방정식이다 (Kim and Lee, 2014). Cowper-symonds 구성방정식을 적용함으로써 변형률 속도에 따른 경화도가 고려되어 강재의 비선형 동적거동의 정밀성을 더욱 향상시킬 수 있다. SS400 강종의 재료물성은 Table 2와 같다 (LSTC, 2007).

**Table 2. Material Properties of Steel**

Material	RO	E(MPa)	$\nu$	SIGY	C	P
SS400	7.89e-9	200,000	0.3	235	40	5

SIGY: Yield stress (MPa)

C, P: Constants in cowper-symonds

해석 Case는 Table 3과 같이 충돌속도, 지주의 두께, 충돌속도에 대한 매개변수해석을 수행하여 충돌 시간에 따른 지주의 내부에너지를 비교하였다.

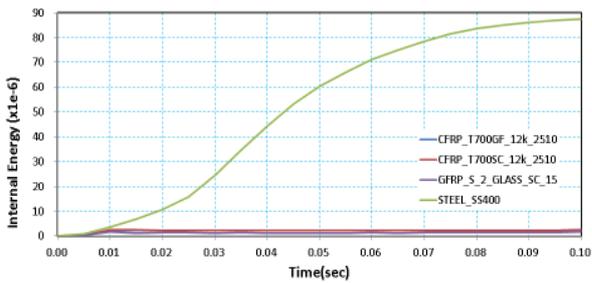
**Table 3. Vehicle Crash Cimulation Analysis Case**

Material	Thickness	Impact velocity
T700GF_12k_2510	4mm,	30km/h, 60km/h, 100km/h
T700SC_12k_2510	6mm,	
S2_GLASS_SC	8mm	
SS400	4mm	

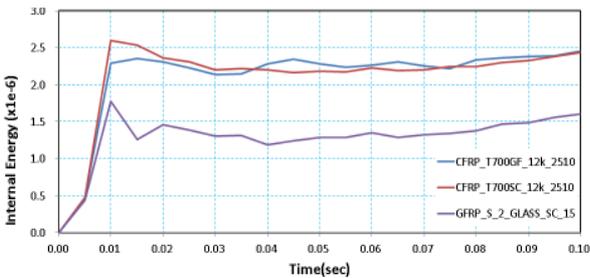
### 3.2 해석 결과

Fig. 2~4은 각각 지주의 두께(4mm, 6mm, 8mm), 충돌속도에 따른 내부에너지를 나타내며, Fig. 5~6은 GFRP계열의 S2\_GLASS\_SC가 적용된 지주와 강재지

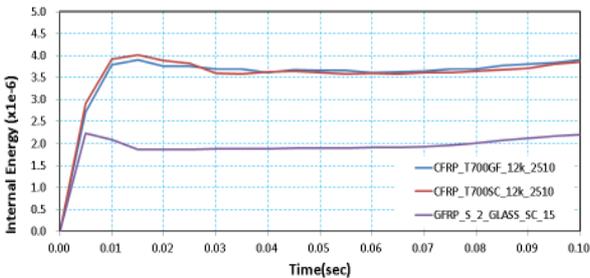
주에 대해서 0.025sec일때 차량의 주행 속도변화에 따른 충돌형상을 보여준다. 강제지주의 경우 Fig. 2의 (a)와 Fig. 5와 같이 충격분리장치를 설치하지 않음으로 인해서 충돌시 연성거동으로 대부분의 충격에너지가 차량에 그대로 전달되어 매우 높은 내부에너지가 발생함으로 인해서 차량의 파손이 심하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 탑승자의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 반면, 복합소재가 적용된 지주의 경우에는 Fig. 2의 (b), (c), (d)와 Fig. 6과 같이 취성거동을 보이면서 충격분리장치를 설치하지 않았음에도 충돌시 지주의 단부가 취성 파괴 되는 현상으로 차량의 파손정도가 강제지주-차량 간의 충돌에 비해 적고 충돌로 인해 발생하는 충돌에너지가 차량에 적게 전달되어 적은 내부에너지를 발생되었다. 그 중에서 GFRP 계열의 복합소재로 구성된 지주의 경우가 가장 작은 내부에너지를 발생시킨 것으로 분석되었다.



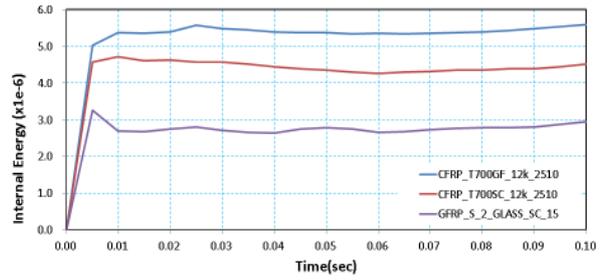
(a) 30km/h (Comparison of steels and composites)



(b) 30km/h (Comparison of composites)

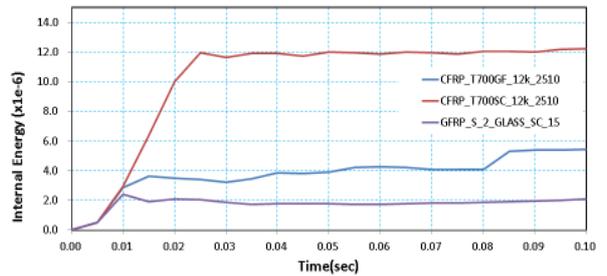


(c) 60km/h (Comparison of composites)

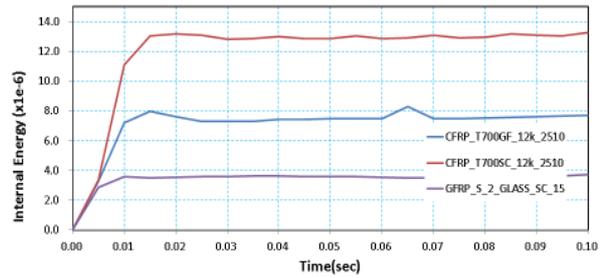


(d) 100km/h (Comparison of composites)

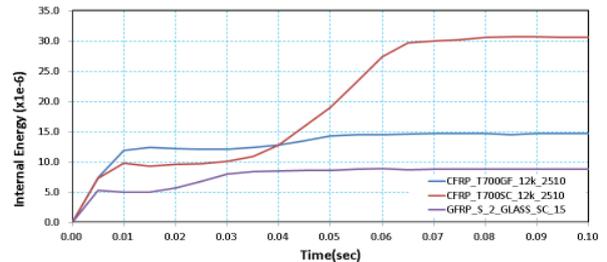
Fig. 2 Internal Energy for Different Velocities (Thickness=4.0mm)



(a) 30km/h (Comparison of composites)

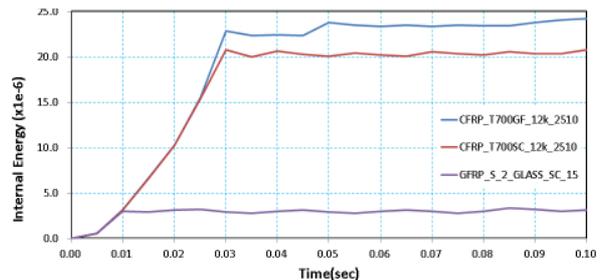


(b) 60km/h (Comparison of composites)

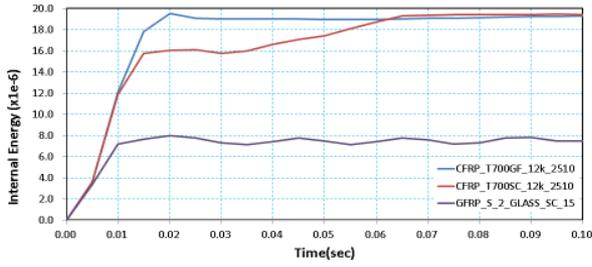


(c) 100km/h (Comparison of composites)

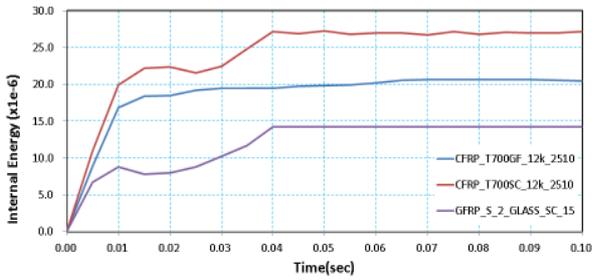
Fig. 3 Internal Energy for Different Velocities (Thickness=6.0mm)



(a) 30km/h (Comparison of composites)

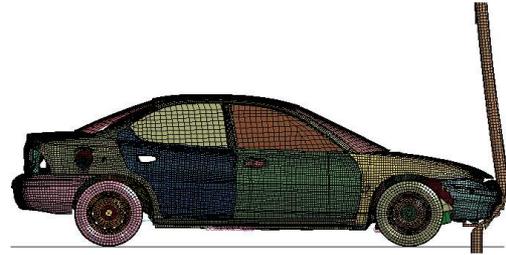


(b) 60km/h (Comparison of composites)

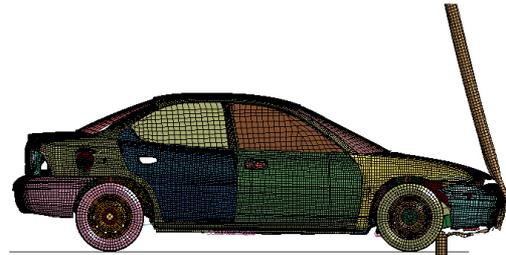


(c) 100km/h (Comparison of composites)

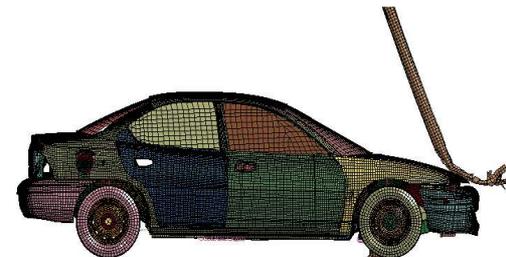
Fig. 4 Internal Energy for Different Velocities (Thickness=8.0mm)



(a) 30km/h

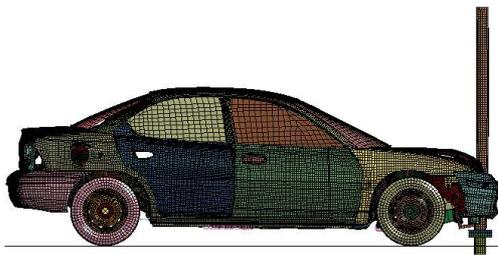


(b) 60km/h

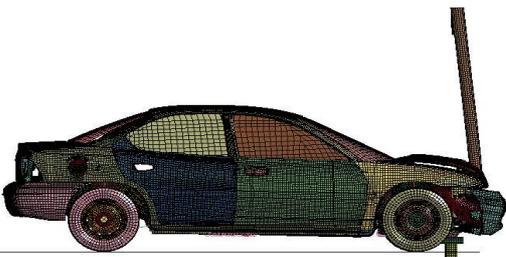


(c) 100km/h

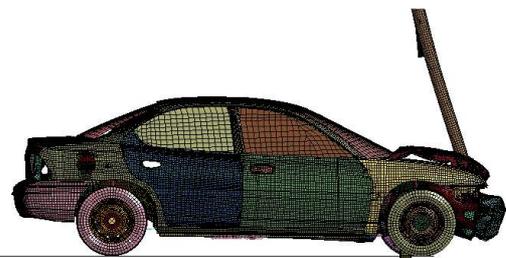
Fig. 6 Crash Simulation for Different Velocities (S2\_GLASS\_SC)



(a) 30km/h



(b) 60km/h



(c) 100km/h

Fig. 5 Crash Simulation for Different Velocities (SS400)

## 5. 요약 및 결론

기존의 강재지주는 연성거동을 하기 때문에 차량과의 충돌시 충돌에너지의 대부분이 차량에 흡수되어서 탑승자의 안전성에 문제가 있기에 외국에서는 충격분리형 지주가 많이 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램을 적용하여 차량-지주 간의 충돌해석을 수행하였으며 다양한 복합소재 및 기존의 강재지주를 적용하여 동적거동을 비교 분석하였다.

실차 충돌해석 결과로부터 연성파괴 되는 기존의 강재지주보다 복합소재를 적용한 지주가 취성파괴로 인하여 별도의 충격분리장치 없이도 충돌 시 보호성능 및 구조적 성능 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 또한, 복합소재 중 GFRP 계열의 충돌 시 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. CFRP 계열보다 GFRP 계열이 재료단가 측면에서도 경제적이기 때문에 건설

용으로는 GFRP 계열을 현실적인 대안으로 제시할 수 있다. 다만, 향후 보다 다양한 복합소재를 적용한 충돌해석의 수행이 필요하며, 실제 실험을 통해서 충격 흡수용 재료로서 적합한 복합소재를 결정해야 할 것이다. 또한, 지주의 단부가 취성 파괴로 인해 파괴된 지주와 차량이 충돌하는 2차 피해가 고려되어야 할 것이다.

### 감사의 글

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

### References

- CompMechLab FE modeling of the crash-test for energy-absorbing composite lighting columns (2006), "CompMechLab Research Projects website page (<http://www.eng.fea.ru/research/projects/project-19.html>)," St.Petersburg, Russia.
- Hallquist, J. O. (2001), "LS-DYNA Theoretical Manual," Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- 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.
- Kim, G. D., and Lee, S. Y. (2014), "Passenger Safety Assessment by Real Car Crash Simulation of Composite Post Structures," *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 5, No. 2, pp.15-20.
- 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.
- LSTC, "LS-DYNA keyword user's manual(version 971)," 2007.
- NCAC Public Finite Element Model Archive, (2000), "FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center website page([www.ncac.gwu.edu](http://www.ncac.gwu.edu))," Washington, D.C.
- Reid, J. D. and Sicking, D. L. (1998), "Design and simulation of a sequential kinking guardrail terminal," *Int. J. Imp. Eng.*, Vol. 21, pp. 761-772.
- Wade, B., University of Washington, Seattle, WA, 98195-2400., Feraboli, P., Osborne, M., The Boeing Company, Seattle, WA., "Simulating laminated composite using LS-DYNA material model MAT54 part I:[0] and [90] ply single-element investigation".
- Xiao, J. R., Gama, B. A., and Gillespie, J. W. (2007), "Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading," *Journal of Composite Structures*, 78, pp. 182-196.