



강재 레일과 CFRP 기둥으로 이루어진 방호울타리의 최적화 설계

김정중¹ · 김승억²

세종대학교 건설환경공학과 겸임교수¹, 세종대학교 건설환경공학과 교수²

Design Optimization of Safety Barrier Consisting of Steel Rail and CFRP Post

Kim, Jung Joong¹ · Kim, Seung-Eock²

¹Adjunct Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Abstract: In this study a hybrid safety barrier system consisting of steel rail and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) post is considered. While CFRP post is selected for impact energy reflection due to its high strength, steel rail is selected for impact energy absorption due to its high ductility. A numerical model considering the elastoplastic behavior of steel is formulated to simulate the dynamic responses of the hybrid system subject to an impact load. A hybrid roadside guard rail system of steel rail and CFRP post is proposed and analyzed with a case study. The numerical model for the hybrid roadside guard rail system is used to find optimized design of the proposed hybrid system.

Key Words: hybrid system, roadside safety barrier, steel rail, CFRP post, dynamic analysis, reliability analysis, optimization

1. 서 론

교량이나 도로에 사용되는 방호 울타리의 구조적 성능 목표는 차량 충돌시 울타리의 제한된 범위 이내에서 충돌 차량을 적절한 속도와 각도로 도로상으로 되돌려 놓는 것이다. 국내의 경우 도로용 방호 울타리의 구조적 성능 기준으로 충돌속도 65 km/h, 충돌각도 15°로 충돌하는 14,000 kg의 차량을 충돌속도의 60% 이상, 충돌각도의 60% 이하로 울타리의 최대변위 0.3 m 이내에서 되돌려 놓을 것을 제안하고 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2009). 이러한 구조적 성능을 만족하기 위하여 도로용 방호 울타리는 충돌에너지를 적절히 흡수하고 저항하는 구조로 설계되어야 할 것이다.

동적으로 가해지는 에너지를 적절히 흡수하고 저항하는 구조는 내폭 구조물의 설계 (Altunc et al. 2011)

에 대한 기존의 연구에서 찾아 볼 수 있다 (Sheyka et al. 2011, Kim et al, 2012). 기존의 연구에서 에너지를 저항하고 흡수하는 구조로 각각 티타늄과 알루미늄이 제안되었고 (Sheyka et al. 2011), 더 큰 충격하중에 대하여 탄소섬유보강 폴리머 (CFRP)와 구조용강 (Steel)의 사용이 제안되기도 하였다 (Kim et al. 2011). 높은 인장강도를 가지지만 연성을 가지고 있지 않은 CFRP를 우수한 연성을 가지고 있는 구조용강과 결합함으로써, 충격하중에 의한 에너지를 CFRP의 강도로 저항하고 구조용강의 연성 변형으로 흡수할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 충격을 흡수하고 저항하는 복합 구조를 CFRP 기둥과 강재 레일로 구성된 도로용 방호 울타리에 적용하고 차량 충돌에 대한 동적 해석모형을 개발하였다. 충돌하중에 대한 강재와 CFRP 복합 구조의 탄소성 (elastoplastic) 거동이 고려되었다. 충돌하중의 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성 해석을

주요어: 복합구조, 도로용 방호 울타리, 강재레일, CFRP 기둥, 동적응답, 신뢰성 해석, 최적화

Corresponding author: Kim, Seung-Eock

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea.
 Tel: +82-3408-3291, Fax: +82-3408-4332, E-mail: sekim@sejong.ac.kr

투고일: 2013년 5월 3일 / 수정일: 2013년 5월 24일 / 게재확정일: 2013년 6월 11일

수행하였다. 세가지 치수의 H형 CFRP기둥에 대하여, 적절한 강재레일의 두께를 제안된 설계 신뢰성 지수를 가지도록 최적화 하였다.

2. 연구 방법

1. 동적해석모형

CFRP 기둥과 강재 레일로 구성된 도로용 방호 울타리의 충돌하중에 대한 동적해석을 위하여 동적해석 모형이 개발되었다.

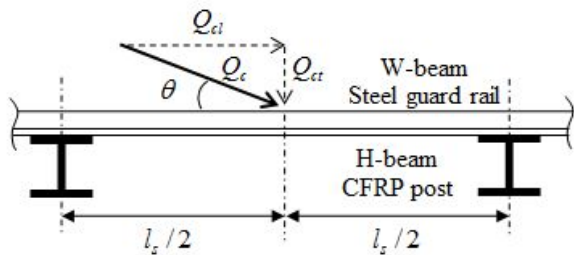


Fig. 1 Steel-CFRP Roadside Guard Rail System

Fig.1에 보인 CFRP 기둥과 강재 레일로 구성된 도로용 방호 울타리를 Fig.2의 질량-감쇠-스프링 시스템 (Biggs 1982, Chopra 2001)으로 모델링하였다.

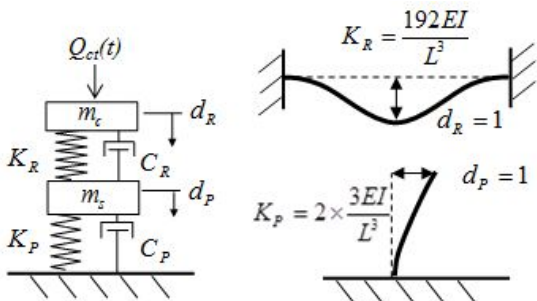


Fig. 2 Lumped Mass, Damper and Spring Modeling of the Proposed Steel-CFRP Roadside Guard Rail System

충돌하중을 흡수하는 구조용 강판의 탄소성 거동을 구현하기 위하여 Fig.3의 강재의 이상화된 탄소성 구성방정식을 사용하였다. 강판에 직렬로 연결된 CFRP 기둥은 충돌하중을 저항하는 구조로 고려되었으므로 선형탄성 구성방정식을 사용하였다. Fig.2에 보인 질량-감쇠-스프링 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같이 구성된다.

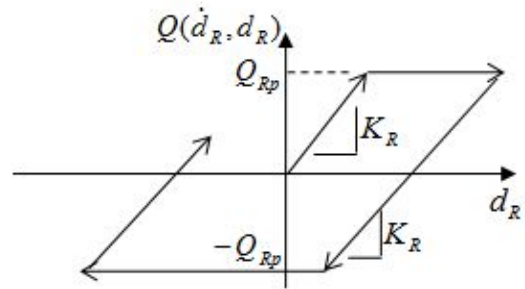


Fig. 3 Idealized Elastoplastic Model of Steel

$$\begin{bmatrix} M_R & 0 \\ 0 & M_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_R \\ \ddot{d}_P \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_R & -C_R \\ -C_R & C_P + C_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_R \\ \dot{d}_P \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} Q(\dot{d}_R, d_R)/d_R & -Q(\dot{d}_R, d_R)/d_R \\ -Q(\dot{d}_R, d_R)/d_R & Q(\dot{d}_R, d_R)/d_R + K_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_R \\ d_P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{ct} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 \ddot{d}, \dot{d}, d 는 각각 가속도, 속도, 변위를 나타낸다. M, C, K 는 각각 질량, 감쇠, 강성도를 나타낸다. $Q(\dot{d}_R, d_R)$ 은 변위속도에 따른 강재판의 저항력이다. 아래첨자 "R"과 "P"는 각각 강재판과 CFRP 기둥에 해당하는 물성치를 의미한다.

2. 신뢰성 해석

충돌하중에 의한 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성 해석을 수행 하였다 (Nowak 2000, Melchers 1999). 충돌하중의 크기를 확률분포로 가정하였고 CFRP 기둥과 강재 레일의 한계상태를 위반할 확률을 산정하였다. CFRP 기둥의 사용 목적은 가해진 충돌하중에 저항하는 것이므로 CFRP기둥에 작용하는 모멘트가 기둥의 저항 모멘트 강도를 초과해서는 안 될 것이다. 그러므로 CFRP 기둥에 대한 한계상태 방정식을 식 (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$G_p = M_p - M_a \quad (2)$$

식 (2)에서 G_p 는 기둥의 한계상태방정식이고 M_p 와 M_a 는 각각 CFRP 기둥의 저항모멘트와 기둥에 작용하는 모멘트이다.

강재 레일의 사용 목적은 가해진 충돌하중에 항복하여 강재의 연성으로 에너지를 흡수하는 것이다. 그러므로 강재 레일의 한계상태는 레일의 최대 변형에 의해 결정되어야 할 것이다. 설계 기준에서는 울타리의 최대변위를 0.3 m 이내가 되도록 울타리를 설계하도록 제안하고 있다. 이러한 기준을 적용하여 본 연구에서는 울타리의 변위에 의한 한계상태 방정식을 식

(3)과 같이 결정하였다.

$$G_R = \Delta_{lim} - \Delta_R \quad (3)$$

식 (3)에서 G_R 은 레일의 한계상태 방정식이고 Δ_{lim} 과 Δ_R 은 각각 최대변위에 대한 설계기준과 충돌에 의한 레일의 최대변위이다. 식 (3)과 식 (4)의 한계상태를 위반($G < 0$)할 확률을 결정하였다. 결정된 확률은 식 (4)의 신뢰성 지수와와의 관계를 이용하여 신뢰성 지수로 변환할 수 있다.

$$\beta = -\Phi(p) \quad (4)$$

식 (4)에서 Φ 는 누적 표준정규분포함수의 역함수이고 p 는 한계상태를 위반할 확률이다.

3. 최적화 설계

본 연구에서는 CFRP와 강재레일로 구성된 도로용 방호 울타리의 설계에 설계신뢰성 지수를 도입하여 강재레일의 두께를 최적화 하였다. 이는 차량 충돌시 가해지는 하중의 불확실성을 고려하여 주어진 충돌하중의 변동폭에 대하여 방호 울타리의 최대변위가 0.3m를 넘지 않도록 설계하기 위함이다. 최적화를 위한 목적 함수는 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \min obj &= \sqrt{(\beta_{target} - \beta)^2} \\ s.t \quad t_{min} &\leq t \leq t_{max} \quad \forall t \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 β_{target} 은 설계 신뢰성 지수이고 β 는 충돌하중의 변동폭에 대한 최대변위가 0.3m를 초과하지 않을 신뢰성 지수이다. t 는 강재레일의 두께이다. 일반적인 사용성 설계시 적용되는 신뢰성 지수는 2.0 ~ 3.0 정도이다.

3. 사례 연구

제안된 최적화 설계방법을 CFRP 기둥과 강재 레일의 방호 울타리에 적용하기 위하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 위한 CFRP와 강재의 물성치가 Table 1에 제시되었다.

Table 1. Mechanical Properties

Material	Properties			
	Density (kg/m ³)	E (GPa)	Strength (MPa)	Rupture strain
CFRP	1800	245	2500	-
Steel	7800	200	400	21%

차량충돌에 의한 충격하중은 Fig.4에 보인 삼각하중으로 모델링 하였다. 최대충돌하중의 크기는 80 kN으로 선정하였다.

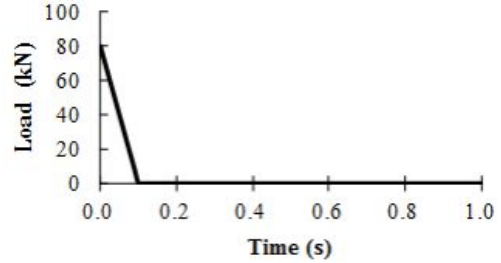


Fig. 4 Impact Load (Qmax = 80 kN and td = 0.1 sec)

CFRP 기둥의 경우 H형 단면을 사용하였다. 두 가지 규격에 대하여 충돌하중에 대한 동적해석을 수행하였다. CFRP 기둥의 규격은 Table 2에 제시된 두 가지 규격을 사용하였다.

Table 2. The Properties of CFRP Posts for Case Study

Type	Properties			
	M_p (kN-m)	I (10 ⁻⁶ m ⁴)	A (10 ⁻³ m ²)	h (m)
Type 1	209.4	6.2	1.63	0.148
Type 2	690.3	22.2	4.74	0.161

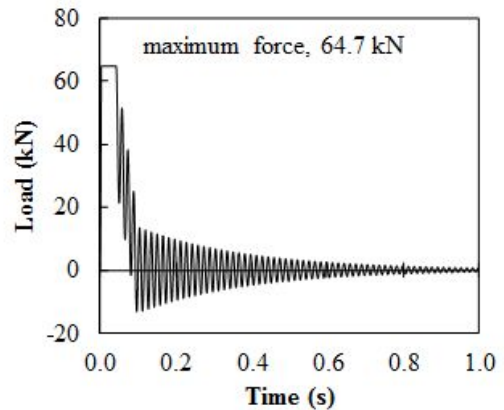


Fig. 5 Force Evolution on Steel Rail for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 26 mm

강재 레일은 두께 2.4 mm부터 4.0 mm 까지의 W형 단면을 사용하여 차량 충돌시 강재레일의 최대변위와 CFRP 기둥에 작용하는 최대하중을 산정하였다. Fig. 5부터 8은 CFRP기둥 "type 1"에 대하여 강재 레일 두께 2.8 mm에 대한 강재레일에 작용하는 하중, 변위, CFRP 기둥의 하중, 변위에 대한 동적응답을 예로 나타내었다. Fig. 5에서 강재 레일은 64.7 kN의 충

돌하중에 항복 후 더 이상의 하중을 받을 수 없음을 보여준다.

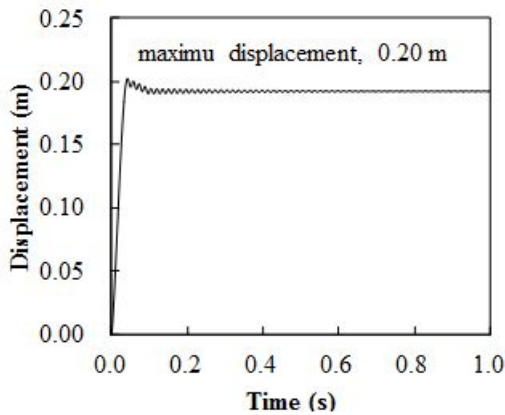


Fig. 6 Displacement Evolution of Steel Rail for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 26 mm

Fig. 6에서 강제 레일은 최대변위 0.2m까지 변형되었으며, 항복 후 잔류변형이 발생하였음을 보여준다.

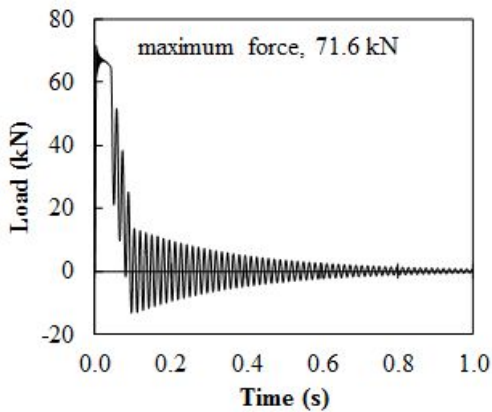


Fig. 7 Force Evolution on CFRP Post for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 26 mm

Fig. 7은 충돌하중 작용에 따른 두 개의 CFRP 기둥에 작용하는 하중의 시간에 따른 변화를 보여준다. Fig. 8은 충돌하중 작용에 따른 CFRP 기둥의 변위를 보여 주는데, 최대변위 1.2 mm로 강재레일의 변위에 비하여 매우 작음을 알 수 있다.

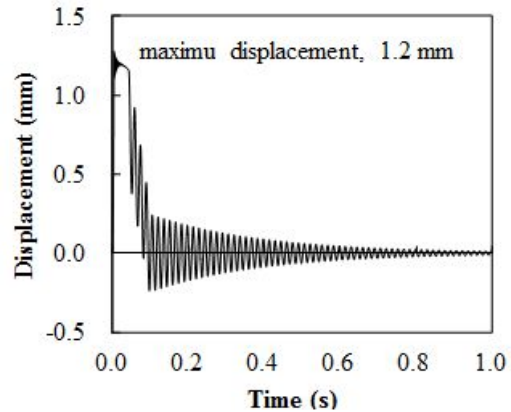


Fig. 8 Displacement Evolution of CFRP Post for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 26 mm

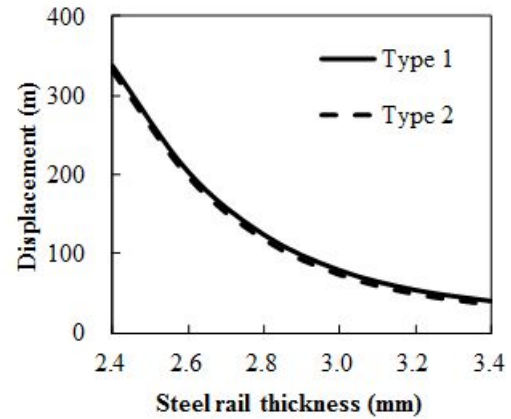


Fig. 9 The Maximum Displacement of Steel Rail with Ewspect to Steel Rail Thickness

Table 2에 제시된 두 가지 규격의 CFRP 기둥에 대하여 강제 레일의 두께에 따른 최대변위를 Fig. 9에 보였다. Fig. 9를 살펴 보면, 비록 저항 모멘트가 확연히 다른 두 종류의 CFRP 기둥을 사용하였지만 강제 레일의 최대 변위에 대하여 CFRP 기둥의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러므로 최적화 설계를 위한 결과는 "type 1" CFRP 기둥에 대해서만 계산하였다. 충돌하중의 크기가 30%의 변동폭을 가지는 정규분포로 가정하여 신뢰성 지수를 산정하였다.

4. 결과 및 토의

식 (3)의 한계상태 방정식을 이용하여 230%의 변동폭을 가지는 80 kN의 충돌하중에 대한 신뢰성 지수를 산정하였다. Table 2의 "type 1" CFRP 기둥에 대하여 W형 강재판의 두께에 따른 신뢰성 지수를 산정하여 Fig. 10에 보였다.

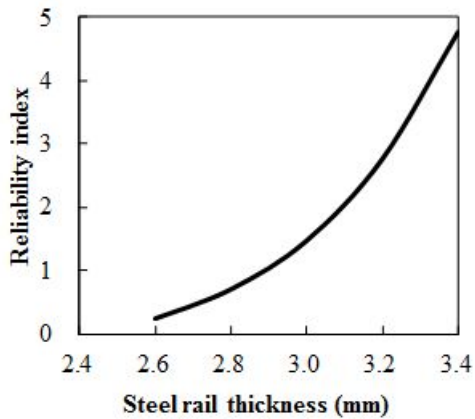


Fig. 10 Reliability Index for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and Various W-Rail Thickness about 80 kN Impact Load with Normal Variation of 30%

최적화 설계를 위한 목적함수는 설계신뢰성 지수 2.0에 대하여 식 (5)를 사용하여 결정하였고 Fig. 11에 보였다.

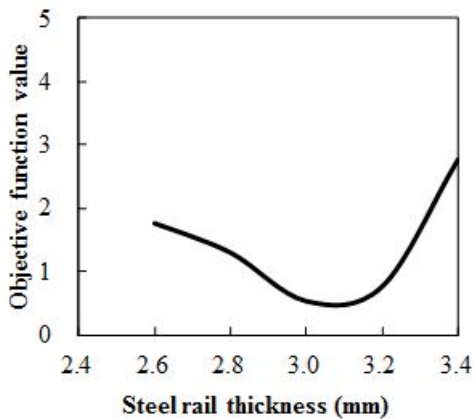


Fig. 11 Objective Function for Optimization

Fig. 11에서 보인 것처럼 강재레일의 두께 3.1 mm 를 사용하였을 설계신뢰성 지수 2.0을 달성할 수 있음을 알 수 있다. 결과적으로 변동폭 30%인 충돌하중의 크기 80 kN에 대하여 방호울타리의 최대변위가 0.3 m를 초과하지 않도록 신뢰성 지수 2.0으로 강재레일의 두께가 결정되었다.

Fig. 12부터 Fig. 15는 CFRP기둥 "type 1"에 대하여 최적화 된 강재 레일 두께 3.1 mm에 대한 강재레일에 작용하는 하중, 변위, CFRP 기둥의 하중, 변위에 대한 동적응답을 나타내었다. Fig. 12에서 강재레일은 77.2 kN의 충돌하중에 항복 후 더 이상의 하중을 받을 수 없음을 보여준다.

Fig. 13에서 강재 레일은 최대변위 0.063m까지 변형되었으며, 항복 후 잔류변형이 발생하였음을 보여준

다. 설계기준 0.3m를 고려하였을 때 과도한 설계로 보일 수 있으나 충돌하중의 변동폭을 30% 고려하였음을 인지할 필요가 있다.

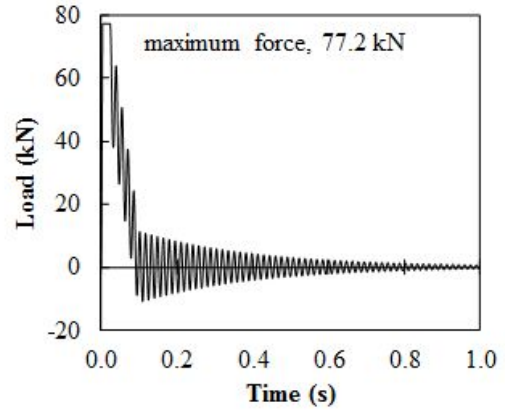


Fig. 12 Force Evolution on Steel Rail for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 31 mm

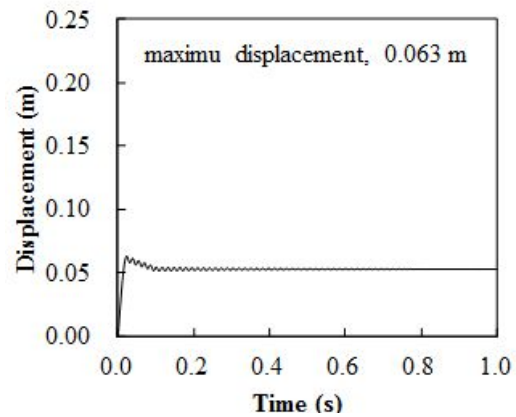


Fig. 13 Displacement Evolution of Steel Rail for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 31 mm

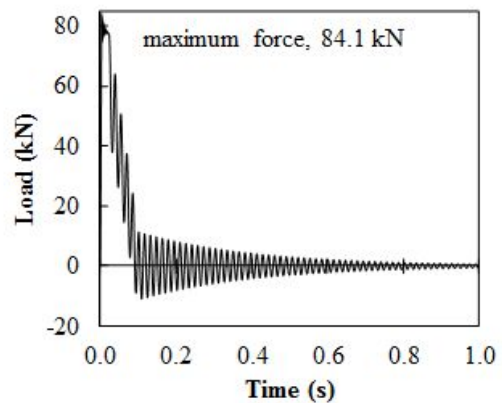


Fig. 14 Force Evolution on CFRP Post for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 31 mm

Fig. 14는 충돌하중 작용에 따른 두 개의 CFRP 기둥에 작용하는 하중의 시간에 따른 변화를 보여준다. Fig. 15는 충돌하중 작용에 따른 CFRP 기둥의 변위를 보여 주는데, 최대변위 1.5 mm로 연전히 강재레일의 변위에 비하여 매우 작음을 알 수 있다.

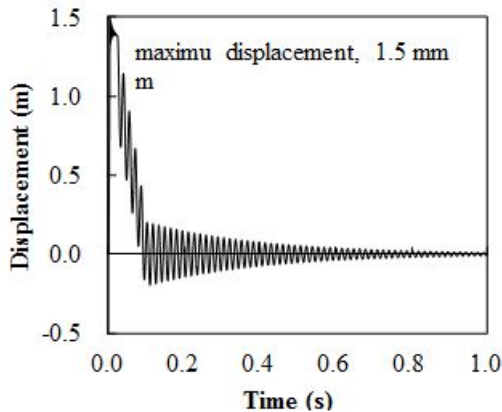


Fig. 15 Displacement Evolution of CFRP Post for Safety Barrier Consisting of CFRP Post "type 1" and W-Rail Thickness of 31 mm

본 연구에서는 CFRP 기둥의 강성도의 산정에 있어서 지반의 탄성을 고려하지 않았다. 이러한 경우 교량용 방호 울타리로 고려할 수 있을 것이나 평면 도로용 방호 울타리의 설계에 있어서 지반의 탄성도를 고려해야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 CFRP 기둥과 강재관으로 이루어진 도로용 방호 울타리가 제안되었다. 이에 대한 재료의 탄소성 거동을 고려한 동적 해석모형이 개발되었다. 충돌하중의 불확실성을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 강재레일의 두께를 제안된 설계 신뢰성 지수를 가지도록 최적화 하는 방안이 사례연구와 함께 소개 되었다. 향후 충격흡수와 저항에 최적화된 강재관과 CFRP 기둥의 설계에 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

저자는 2012년도 교육과학기술부의 재원에 의한 한국연구재단의 지원 (NO. 2011-0030842)과 2010년도 지식경제부의 재원에 의한 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원(No. 20124030200050)에 감사드립니다.

References

- Altunc, A. B., Kim, J. J., Al-Haik, M., and Reda Taha, M. M. (2011), "Reliability-Based Design of Blast-Resistant Composite Laminates Incorporating Carbon Nanotubes," *Comp. Struct.*, Vol. 93, pp. 2042-2048.
- Biggs, J. M. (1982), *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, Inc, New York, NY.
- Chopra, A. K. (2001), *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Kim, J. J. and Noh, H. C. (2012), "Design optimization of blast resistant CFRP-steel composite structure based on reliability analysis," *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc*, Vol. 3, No. 4, pp. 10-16.
- Sheyka, M. P., Kim, J. J., Altunc, A. B., and Reda Taha, M. M. (2011), A Reliability-Based Energy Approach for Design Optimization of Blast Resistant Composites, Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 17-20, Denver, CO.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), Concordance of car crushing test for roadside safety facilities.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., and Ramsay, J. (2007), "Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview," *J. Struct. Eng. ASCE*, Vol. 7, pp. 76-91.
- Nowak, A. S. and Collins, K. (2000), *Reliability of Structures*, McGraw-Hill, New York, NY.
- Melchers, R. E. (1999), "Structural Reliability Analysis and Prediction," Second Edition, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Park, H., Lee, K., Lee, S. W., and Kim, K. (2006), "Dynamic Analysis of Nonlinear Composite Structures under Pressure Wave Loading," *J. Comp. Mat.*, Vol. 40, pp. 1361-1383.