Composites Research

Vol. 28, No. 5, 321-326 (2015)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2015.28.5.321
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

탄소섬유 복합재료-금속 하이브리드 팬터그래프 상부암 설계

전승우* · 한민구** · 장승환**† · 조용현*** · 박철민***

Design of CFRP-Metal Hybrid Pantograph Upper-arm

Seung-Woo Jeon*, Min-Gu Han**, Seung-Hwan Chang**†, Yong-Hyeon Cho***, Chul-min Park***

ABSTRACT: In this research, a parametric study was carried out to design a metal-carbon fiber reinforced plastics (CFRP) hybrid pantograph for weight reduction of high speed train (KTX). To design a light-weight and high-stiffness pantograph, some parts of the original steel upper arm was replaced by CFRPs with appropriate stacking sequences. For the parametric study, steel was replaced by aluminium considering structure stiffness and weight of hybrid upper-arm of a pantograph. Finite element analysis (FEA) was performed for checking the structure stiffness with varying design parameters. Static vertical load stiffness and weight changing ratio were derived from real CX-PG pantograph model analyses. From the FEA results, the geometries of high-stiffness, light-weight pantograph have been suggested.

초 록: 본 연구에서는 고속철도 경량화를 위해 금속-탄소섬유 복합재료 하이브리드 팬터그래프에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 강철로 구성된 기존 팬터그래프의 고강성 및 경량화를 구현하기 위하여 금속 상부암의 내부와 외부를 적절한 두께로 가공하고 그 후 복합재료를 적층한 금속-탄소섬유복합재료 하이브리드 상부암을 설계하였다. 하이브리드 상부암의 구조강성과 질량 등을 고려하여 적절한 금속을 강철과 알루미늄으로 결정하였다. 각 설계 파라메터의 변화에 따른 구조의 강성 변화를 확인하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 팬터그래프 CX-PG 모델에 접목시켜 실제 수직하중에 따른 강성과 질량 변화율을 도출하였다. 이러한 결과로부터 고강성, 경량화 팬토그래프 설계를 위한 적절한 형상조건을 제안하였다.

Key Words: 고속철도(KTX), 팬터그래프(Pantograph), 탄소섬유 복합재료(Carbon fiber reinforced plastics; CFRP), 상부암(Upper arm)

1. 서 론

기차는 자동차, 비행기, 선박 등의 여러 가지 이동수단 중 쉽고 편하게 이용할 수 있으며, 타 이동수단보다 비교적 안전하고 많은 인원을 수용할 수 있다는 장점을 갖는다. 비행기에 비해 속도가 낮지만 고속철도의 개발로 속도의 문제점을 극복하고 있다. 우리나라도 프랑스에서 장기간 운행으로 안전성과 성능이 입증된 TGV 시스템으로 고속철도의 기본 개념을 설계하여 1992년 6월부터 고속철도를 개발하였고, 2004년 4월부터 운영을 시작하였다. 하지만 소음 및 진동 그리고 속도 증가를 위한 경량화 등 초 고속화를 위해 해결해야할 여러 가지 문제점이 있다.

팬터그래프(Pantograph)란 철도의 외부에 설치되어 전차선(Contact wire)과 기계적 접촉을 통하여 철도 내부로 전력을 인입하는 집전장치이다[1]. 전력을 구동원으로 사용하고 있는 고속철도(KTX)는 팬터그래프의 기본 성능 중 하

Received 7 October 2015, received in revised form 26 October 2015, accepted 27 October 2015

*중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과
**중앙대학교 기계공학과
**†중앙대학교 기계공학과, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)
***한국철도기술연구원

나인 집전 성능(Current collection performance)의 확보가 필수적이다. 팬터그래프의 팬헤드(Pan head)와 전차선의 접촉에 의해 발생하는 집전 성능은 고속으로 달리는 상황에서 팬헤드에 가해지는 외력인 압상력과 진동에 의한 접촉면적의 변화에 영향을 받는다. 이로 인해 고속 주행 시 전차선과 팬헤드 간의 접촉 불안정으로 인해 전류 공급이 불안정해지며 속력을 내기가 어려운 문제가 있다[2-7].

이에 따른 연구로 Cho 등[8]은 팬터그래프의 집전성능을 향상시키기 위한 팬터그래프 파라메터 연구를 진행했다. 운동방정식을 세워 팬터그래프 각 부품을 변수화 하여 집전성능에 영향을 미치는 부분을 파악하고 최적의 질량, 스프링상수, 감쇠계수 등을 선정했다. 고속철도 외부에 설치되어 있는 팬터그래프의 형상에 따라 공력소음 및 공력저항 등이 발생하는데 Jeong 등[9]은 팬터그래프의 공력저항 및 공력 소음 저감을 위해 상부암(Upper arm)과 하부암(Lower arm)의 단면 형상을 변환하는 최적화 연구를 진행하였다. 연구결과, 기존의 원형 단면의 형상에서 타원으로 변환함으로써 공력저항을 3.9%, 공력소음을 1.63 dB 저감시켰다. Kang 등[10]은 공력저항 및 공력소음을 감소시키기 위해 팬터그래프 전/ 후면에 쐐기 형태와 뿔 형태 두 가지 타입의 커버를 제작하여 시속 250 km/h와 400 km/h로 풍동 해석을 진행하였다.

현재의 고속철도 속력을 증가시키기 위해서는 진동 및 외력을 잘 견딜 수 있는 경량/고강성 구조를 가진팬터그래프 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 비강성 및 비강도가 우수한 섬유강화복합재료를 적용하여 기존 구조보다 가볍고 강성이 높은 팬터그래프를 설계하고자 다양한 적층방법과 적층각도에 대한 파라메트릭 연구와 관련 유한요소 해석을 진행하였다.

2. 구조 및 재료

2.1 팬터그래프의 구조

팬터그래프는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 전차선과 열차의 집전 기능을 하는 팬헤드와 구조적 기능을 하는 상부암과 하부암, 상부암과 하부암을 연결해 주는 조인트(Joint) 그리고 열차와 팬터그래프를 연결하는 베이스(Base)로 구성된다[11].

상부암과 하부암은 가늘고 긴 부재 형태를 가지기 때문에 굽힘 거동에 취약한 단점이 있으므로, 이를 극복하기 위해 금속 파이프에 고강성 탄소섬유 복합재료를 적용하여 경량/고강성 구조를 위한 설계를 제안하였다.

강철로 구성되어 있는 기존 상부암 파이프는 원뿔대의 형태이고 질량은 15.6 kg[11], 파이프만의 질량은 8.7 kg이며, 길이는 1500 mm이다. 조인트 부근의 외경은 93 mm이고, 팬헤드 측 외경은 67 mm이며, 두께는 3 mm이다. 개선할 상부암은 복합재료의 적용 용이성을 위해 원뿔대에서

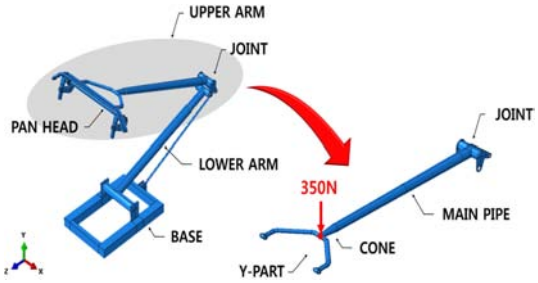

Fig. 1. Structure of a pantograph

원통으로 단순화하였으며, 원통의 외경과 두께는 원뿔대 형태의 기존 상부암 파이프와 같은 처짐량을 갖는 원기둥의 외경(87 mm)과 두께(3 mm)로 결정하였다.

2.2 재료 및 구성

팬터그래프 상부암에 금속과 함께 적용시킬 탄소섬유복합재료(CFRP)는 고강성 탄소섬유/에폭시 프리프레그(URN300; SK chemical, Korea)이며, 주요 기계적 물성을 Table 1에 제시하였다.

경량/고강성 하이브리드 상부암을 설계하기 위해 강철-복합재료 하이브리드 구조와 알루미늄-복합재료 하이브리드 구조로 설계를 수행하였다. 복합재료를 각각 금속파이프의 내부와 외부에 두 가지 방식으로 적용하여 총 네 가지의 하이브리드 구조 설계를 진행했다(Fig. 2). 위에서 언급했듯이 복합재료 적층의 편의 상 모든 모델은 원통 형태로 단순화 하였다. 강철-복합재료 하이브리드 구조의 경우 높은 재료강성을 고려하여 강철의 두께를 기존 3 mm에서 1 mm으로 줄였으며, 알루미늄-복합재료 하이브리드 구조의 경우 강성이 강철에 비해 약 30%의 값이므로 두께를 3 mm로 정했다.

URN300의 적층순서는 열차의 운행 상 발생하는 팬터그래프의 굽힘진동을 고려하여 $[\pm5]_{nT}$로 고정하였다.

Table 1. Material properties

URN300 [12]			
E_{11} (GPa)	380	ν_{12}	0.28
E_{22} (GPa)	5.1	ν_{23}	0.47
E_{33} (GPa)	5.1	ν_{13}	0.28
G_{12} (GPa)	5.5	ρ (kg/m^3)	1,580
G_{23} (GPa)	4.6	t (mm)	0.25
G_{13} (GPa)	5.5		
ALUMINIUM (6061-T6) [13], [14]			
E (GPa)	68.9	ν	0.3
ρ (kg/m^3)	2,700	σ_{yield} (MPa)	275.79
STEEL (Carbon Steel)			
E GPa)	210	ν	0.3
ρ (kg/m^3)	7,850		

Fig. 2. Four types of hybrid pantographs for the parametric study

3. 구조 설계

3.1 파라메트릭 연구: 구조강성 및 질량

앞서 언급한 네 가지 하이브리드 구조들에 대한 파라메트릭 연구를 진행하여 각 조건에 대한 강성과 질량 을 도출하고 변화 경향을 파악했다. 질량은 재료의 밀도와 부피로 도출하였으며, 강성은 아래와 같이 영계수와 단면에 관한 2차 관성 모멘트의 곱으로 나타냈다[15].

$$EI_{TOTAL} = E_C I_C + E_M I_M \tag{1}$$

$$I = 0.25 \times \pi \times (r_{OUT}^4 - r_{IN}^4) \tag{2}$$

식 (1)에서 아래 첨자 C는 복합재료를 의미하며, M은 강철 또는 알루미늄이다. 식 (2)에서 아래 첨자 OUT과 IN은 외부 반지름과 내부 반지름을 의미한다.

Fig. 3에 URN300을 내부와 외부에 적층시킨 하이브리드 모델인 URN300(외부) + 강철과 URN300(외부) + 알루미늄의 적층 수에 따른 강성과 기존 강철 메인파이프의 강성을 나타내었다. 기존 강철 파이프는 원뿔대 형태이므로 단면에 관한 2차 관성모멘트의 값이 위치마다 변화하기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 기존 원뿔대 형태와 같은 처짐량을 갖는 지름 87 mm의 원통으로 대체하여 단면에 관한 2차 관성모멘트를 도출하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 기존 강철-파이프의 구조강성은 약 147×10^9 N·mm^2

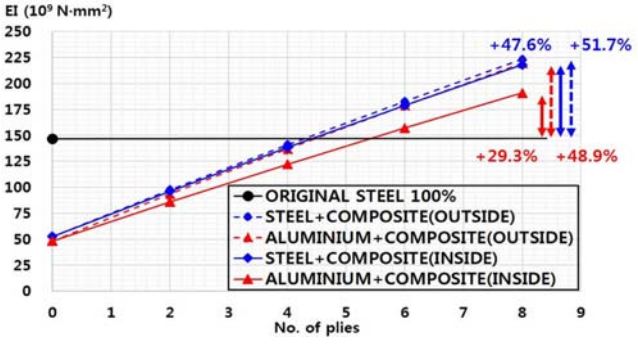

Fig. 3. Structural stiffness of various types of hybrid pantographs

이다. 밸런스 적층방식 사용과 구조강성의 획기적인 증가를 고려하여 복합재료 적층수를 결정하였다. 계산결과, 기존 구조의 강성보다 높은 강성 값을 가지는 외부 적층 모델들은 URN300 + 강철 하이브리드 모델의 경우 8 Ply일 때 약 51.7%의 강성 증가율을 갖는 것을 확인하였으며, URN300 + 알루미늄 하이브리드 모델은 8 Ply일 때 약 48.9%의 강성증가율을 갖는다. 내부 적층 기준으로 기존 강철 파이프 보다 높은 구조강성을 가지기 위해서는 강철과 알루미늄 하이브리드 두 모델 각각 적층 수 8 Ply일 때 URN300 + 강철 하이브리드 모델은 약 47.6%, URN300 + 알루미늄 하이브리드 모델의 경우 29.3%의 강성 증가율을 보였다(Fig. 3).

외부 적층 기준 적층수가 8 Ply일 때 URN300 + 강철 하이브리드 모델은 약 50.6%의 경량화 효과를 얻고 URN300 + 알루미늄 모델의 경우 약 50.6%의 경량화 효과를 얻었다. 내부 적층 후보군의 경량화 효과는 8 Ply 적층 시 URN300 + 강철의 경우 약 49.4%의 경량화 효과를 얻고, URN300 + 알루미늄은 약 49.4%의 경량화 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다(Table 2).

내부 적층 모델일 경우 금속 파이프들은 외경과 내경이 고정되기 때문에 부피가 변화하지 않으므로 질량이 변화하지는 않는다. 하지만 외부 적층 모델의 경우 적층 수에 따라 내부에 있는 금속 파이프의 외경이 감소하기 때문에 미소하지만 부피의 감소가 존재하고 이에 따라 질량이 감소한다. 이는 굽힘 강성 역시 마찬가지이다. 하지만 내부와 외부 모델들의 질량차는 미소하다.

내/외부 적층모델 중 구조강성이 증가하며, 경량화 효과가 있는 경우들을 정리하여 Table 3에 제시하였다.

그러나 내/외부 적층 후보군 중 고속철도의 운행 중에 발생하는 고전압에 따른 팬터그래프의 아크(Arc) 문제와 태양광, 수분, 온도 등 장시간 환경노출에 의해 발생하는 문제 등을 고려하여 내부 적층모델을 최종 선정하였다.

3.2 유한요소해석

파라메트릭 연구를 통해 결정된 금속-복합재료 하이브리드 팬터그래프의 성능 추세를 활용하여 팬터그래프에 적용될 복합재료의 최종 사양을 결정하기 위해 유한요소해석을 수행하였다.

파라메트릭 연구를 통해 도출한 복합재료 6 Ply 이상 내

Table 2. Structural mass of hybrid pantograph according to the types of composite application and the number of composite plies

	2 Ply	4 Ply	6 Ply	8 Ply
STEEL + URN300(OUTSIDE)	3.5 kg	3.7 kg	4.0 kg	4.3 kg
Aluminium + URN300(OUTSIDE)	3.5 kg	3.8 kg	4.1 kg	4.3 kg
STEEL + URN300(INSIDE)	3.5 kg	3.8 kg	4.1 kg	4.4 kg
Aluminium + URN300(INSIDE)	3.5 kg	3.8 kg	4.1 kg	4.4 kg

Table 3. EI & mass data of satisfied models

STEEL +URN300(OUTSIDE)	6 Ply : 182.67 × 10^9 N·mm^2, 4.0 kg 8 Ply : 223.05 × 10^9 N·mm^2, 4.3 kg
Aluminium +URN300(OUTSIDE)	6 Ply : 178.71 × 10^9 N·mm^2, 4.1 kg 8 Ply : 219.19 × 10^9 N·mm^2, 4.3 kg
STEEL +URN300(INSIDE)	6 Ply : 178.68 × 10^9 N·mm^2, 4.1 kg 8 Ply : 217.80 × 10^9 N·mm^2, 4.4 kg
Aluminium +URN300(INSIDE)	6 Ply : 157.11 × 10^9 N·mm^2, 4.1 kg 8 Ply : 190.74 × 10^9 N·mm^2, 4.4 kg

부적층 조건을 참고하여 하이브리드 팬터그래프의 모델링을 수행하였다. 하이브리드 팬터그래프의 파이프 부분을 제외한 모든 부분의 형상과 크기를 기존 CX-PG와 동일하게 유지하였다. 용접 구조물로 제작된 강철 팬터그래프와는 달리 금속-복합재료 하이브리드 팬터그래프를 구성하기 위해서는 하이브리드 구조로 설계된 메인 파이프와 조인트부의 접합이 필요하다. 기존 조인트부의 작동 시 타 부품과의 간섭을 고려하여 외부치수를 유지한 채 접착을 하기 위해 Fig. 4에서 제시된 바와 같이 유한요소해석을 통해 길이 50 mm, 두께 3.5 mm인 접착 조인트 부를 제안하였다. 이 조인트 부 내부에 하이브리드 메인파이프를 접착하기 위해 메인파이프의 외경을 주어진 조건에서 가장 큰 치수인 80 mm로 결정하였다.

전체적인 팬터그래프 CX-PG 모델의 3차원 모델링을 위해 NX-UG 7.5를 사용하였고 유한요소해석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.12-1을 사용하여 처짐 해석을 진행하였다.

처짐해석을 위한 하중조건으로 Fig. 1에서 나타냈듯이 콘과 Y-Part가 닿는 부분에 수직하중 350 N을 가했고, Fig. 5와 같이 조인트에 경계조건을 부여하였으며, 이는 기 수행된 상부암 수직하중 실험 조건과 동일한 경계조건이다. 모델링의 타당성을 위해 처짐량–실험값과 기존 강철 모델링의 해석 값을 Fig. 5에 비교하였다. 처짐 해석과 실험값의 오차는 약 1.0%로 매우 작았다. 이는 기존 강철 팬터그래프 상부암의 모델링 및 해석이 적절함을 의미한다.

금속 재질이 알루미늄일 경우 조인트부에서 과도 변형이 일어나므로 조인트 중앙 부분의 두께를 기존 3 mm에서 7.5 mm로 늘려 이를 보완하였다. 또 각 파트는 실제로도 모두 용접되어있는 상태이므로 각 파트 모델링을 타이(Tie) 조건으로 구속 조건을 주어 결합하였다. 동시경화 접착법(Co-cure bonding)을 가정하여 복합재료와 금속파이프도 타이 조건으로 결합하였다.

위와 같은 하중조건, 경계조건, 구속조건들을 통해 팬터그래프의 최대 처짐량 해석을 도출하였다(Fig. 6). 이는 강철 + URN300의 해석 결과이고 처짐 모습을 20배 과장하여 나타낸 것이다. 타 모델들의 해석 결과들을 처짐량과 하중의 관계를 이용하여 후보군들의 구조 강성을 Fig. 7에 제시하였으며, Fig. 8에는 각 조건에 따른 상부암 전체의 질량을 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에서 제시한 바와 같이, 전체 상부암의 처짐 해석은 메인파이프만 다뤘던 파라메트릭 연

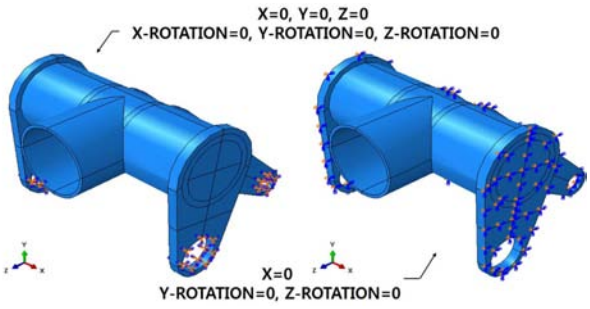

Fig. 4. Boundary condition of pantogrpah (FEA)

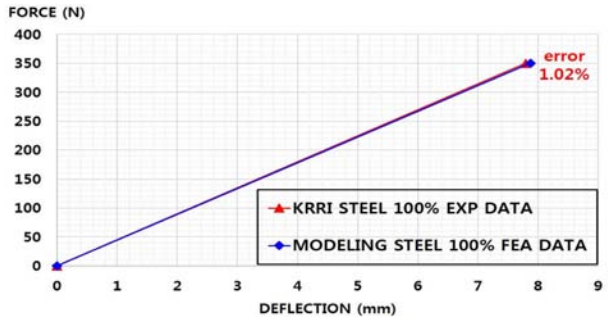

Fig. 5. Experimental and analyzed stiffness of a existing pantograph

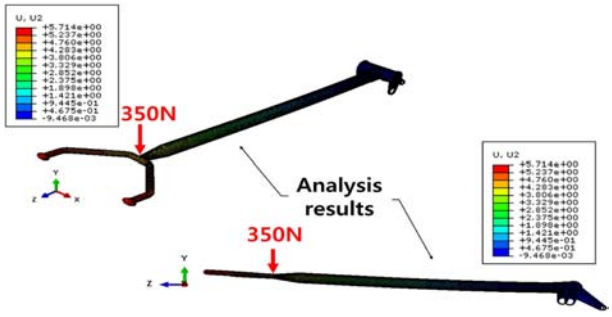

Fig. 6. Analysis results of deflection of hybrid pantograph (steel +composite)

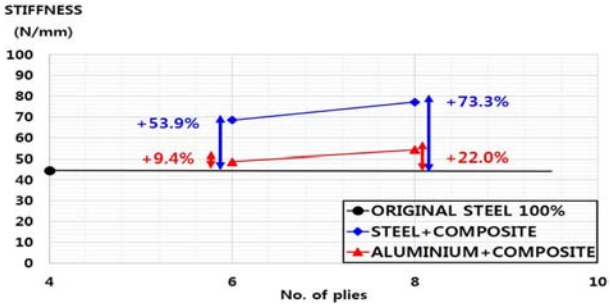

Fig. 7. Stiffness of hybrid pantograph according to the number of composite plies

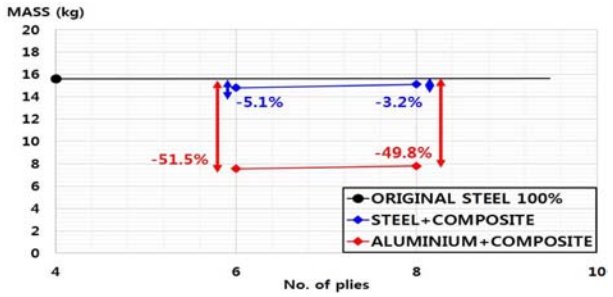

Fig. 8. Mass of hybrid pantograph according to the number of composite plies

구와 같이 적층수를 늘릴수록 강성이 증가하고 경량화 효과가 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 강철 팬터그래프의 경량화 효과와 강성증가 효과를 얻기 위해 탄소섬유 복합재료를 적용하여 팬터그래프의 금속-복합재료 하이브리드 상부암을 설계하였다. 금속의 종류(강철, 알루미늄)와 적용위치(내/외부)에 따라 총 네 가지의 하이브리드 상부암 모델을 검토하였다. 기존의 원뿔대 형태의 메인파이프를 복합재료 적층상의 문제로 인해 원통 형태로 전환하였다. 파라메트릭 연구를 통해 복합재료의 적층순서를 변경하며 각 모델의 강성과 질량을 도출하였고, 기존 강철 모델과 비교하여 강성 증가율과 경량화 효과를 확인하였다. 네 가지 후보군들 중 파라메트릭 연구를 통해서 강성 증가율과 경량화 효과가 우수한 것으로 결정된 후보 중 열차의 다양한 운행조건을 고려하여 내부 적층모델을 선택하여 실제 팬터그래프(CX-PG) 상부암 형태의 수직하중 처짐 해석을 진행했다. 처짐 해석결과, 내부 8 Ply 적층 시 URN300 + 알루미늄의 구조 강성은 약 22.0%가 증가하며, 질량은 49.8% 감소하였다. URN300 + 강철의 경우 구조 강성은 73.3% 증가하고, 질량은 3.2% 감소하여 전반적으로 매우 우수한 기계적 성능을 가짐을 알 수 있었다. 이 연구 결과는 팬터그래프 상부암 경량화 및 강성 증가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 상부암의 전체적인 기계적 성질을 증가시키기 위해선 차후 메인파이프 이외 파트인 조인트 및 Y-Part 등의 경량화 및 강성 최적화 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 동시에, 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원(2014년 엔지니어링전문인력양성사업, 과제번호 : N0001075)을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Han, J.H., Kim, T.M., and Kim, J.T., “The Effects of Noise Reduction by the Change of Penhead Shape in Pantograph,” Proceeding of the 2012 Autumn Conference on Noise and Vibration Engineering, Wonju, Korea, October. 2012, pp. 447-453.
2. Rho, J.H., Kwak, M.H., Kang, H.M., Jung, J.H., Jeong, S.K., and Lee, D.H., “Robust Design Optimization of the Pantograph Panhead Shape on High Speed Train,” Proceeding of the 2007 Autumn Conference on Mechanical Engineering, Pyeongchang, Korea, October. 2007, pp. 1-4.
3. Lee, Y.B., Kwak, M.H., Kim, K.H., and Lee, D.H., “Experimental Analysis on Aerodynamic Drag of HEMU-400X as Variations of Pantograph Cover Configurations,” Proceeding of the 2011 Autumn Conference on Railway, Jeju, Korea, October. 2011, pp. 88-93.
4. Cho, Y.H., and Choe, K.Y., “Development of a Measuring Method for Dynamic Contact Forces between a Pantograph and a Contact Wire,” Proceeding of the 2002 Spring Conference on Noise and Vibration Engineering, Gwangju, Korea, June. 2002, pp. 281-285.
5. Cho, T.H., Kim, Y.W., and Kim, C.W., “Wind Tunnel Test for the Pantograph System of High Speed Train by Using 1/2 Scaled Down Model,” Proceeding of the 2013 Spring Conference on Aeronautical and Space Science, Jeongseon, Korea, April. 2013, pp. 93-96.
6. Kim, J.W., Park, I.K., Jang, J.H., Wang, Y.Y., and Han, C.S., “A Modeling and Contact Force Analysis of the Catenary-pantograph System for a High-speed Rail Vehicle,” *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 13, No. 6, 2003, pp. 474-483.
7. Lee, S.K., Yang, W.S., Koh, H.I., and Park, J.H., “Analysis of Aerodynamic Noise Generation from Pantograph Using Panhead Models of Simple- Geometry and Its Reduction,” *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 6, 2012, pp. 531-536.
8. Cho, Y.H., and Lee, K.W., “Improvement of the Current Collection Peformance of the Pantograph for the Electric Locomotive,” Proceeding of the 2007 Spring Conference on Precision Engineering, Gwangju, Korea, June. 2007, pp. 839-840.
9. Jeong, S.M., Lee, S.A., Choi, W.S., Lee, Y.B., and Kim, K.H., “Study of High Speed Train Pantograph Arm Shape of for Aerodynamic Drag and Noise Reduction Using Numerical Simulation,” Proceeding of the 2014 Spring Conference on Mechanical Engineering, Busan, Korea, May. 2014, pp. 303-304.
10. Kang. H.M., Kim, C.W., Cho, T.H., Kim, D.H., Yoon, S.H., and Kwon, H.B., “Investigation for the Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Pantograph With Cover,” *Journal of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol. 17, No. 3, 2012, pp. 18-24.
11. Antunes, P.C., *Development of Multibody Pantograh and Finite Element Catenary Models for Application to High-speed Railway Operations*, Master Thesis, Lisboa Technical University, POR-

TUGAL, 2012.
12. Cho. H.K., Seo, J.K., Kim, B.J., Jang, T.S., Cha, W.H., Lee, D.G., and Myung, N.H., "Development of a Composite Spacecraft Structure for STSAT-3 Satellite Program," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 38, No. 7, 2010, pp. 727-736.
13. Hong. J.H., Yoo, S.H., and Chang, S.H., "Design and Performance Evaluation of Carbon Fiber/Epoxy Composite-aluminum Hybrid Wheel for Passenger Cars," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 6, 2013, pp. 386-391.
14. Han M.G., and Chang S.H., "Failure Analysis of a Type III Hydrogen Pressure Vessel under Impact Loading Induced by Free Fall," *Journal of Composite Structures*, Vol. 127, No. 1, 2015, pp. 288-297.
15. Cho, D.H., *Design and Manufacture of the Composite Automotive Driveshaft*, Ph.D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, 2000.