

차세대 고속열차(HEMU-400X)의 팬터그래프 시스템에 대한 공력특성 연구

Experimental Studies on Aerodynamic Characteristics of Pantograph system for HEMU-400X

이영빈* 노주현* 광민호* 이재호* 김규홍† 이동호**
Yeongbin Lee Joohyun Rho Minho Kwak Jaeho Lee Kyu Hong Kim Dong-Ho Lee

ABSTRACT

This paper describes on aerodynamic characteristics of pantograph system for Next generation high speed train(HEMU-400). The pantograph which supports electric power is located on the roof. Because of this, it generate high drag, severe acoustic noise and vibration which induced unstable flow due to complex configuration. Therefore, the design of high efficient pantograph needs to increase operational speed. In this research, wind tunnel tests were performed to design a high efficient pantograph system using 1/4 scaled model which were KTX-II pantograph, single arm pantograph and periscope type pantograph with square cylinder shape panhead and optimized shape panhead. For real operational condition, flow directions were adapted by rotation of pantograph. From this results of wind tunnel, it is checked that the pantograph with optimized panhead and single arm type or periscope type has better aerodynamic performance. In addition, lift control device and spoiler in pantograph were tested to investigate the validity of application.

1. 서 론

고속열차는 친환경적인 교통수단으로 현재 우리의 대표적인 교통수단으로 이용되고 있다. 고속열차의 연구는 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 고속열차의 속도는 현재 우리나라의 KTX나 KTX-II의 경우 300km/h에서 운용되고 있으며, HEMU-400X는 400km/h의 최대속도를 목표로 개발 중에 있다. 그러나 열차의 속도가 400km/h 이상의 속도에 직면하게 되면 많은 공기역학적 문제를 수반하게 된다. 이러한 공기역학적 문제는 구조적인 진동과 소음과 같은 불안정성과 공기역학적 항력증가가 대표적이다.[1,2] 특히 열차가 고속화를 지향함에 따라 열차 지붕에 위치해 직접 유동과 접하게 되는 팬터그래프 시스템이 특히 공기역학적으로 심각한 문제를 야기하고 있다. 팬터그래프 시스템은 열차의 동력을 공급하기 위해 가선과 팬헤드와의 일정한 간격을 유지하여야 하는 압상력을 가지고 있어야 하고 심각한 공력소음과 복잡한 형상으로 진동이 발생하기 때문에 항력 또한 작아야 한다. 그렇기 때문에 많은 철도연구자들은 팬터그래프 주위의 공기역학적 특성과 이러한 문제에 대해 연구를 수행하고 있다.[3,4,5] 일반적인 팬터그래프 시스템은 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 팬터그래프의 구성요소는 매우 많으며 구조 또한 복잡하다. 그렇기 때문에 각 구성품의 공기역학적 특성을 분석하고 어떤 구성품이 가장 중요한지를 찾기 힘들어 이에 대한 자세한 연구가 필요하여 본 연구에 앞서 선행연구로 수행되었다.[6,8,9]

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교, 항공우주신기술연구소, 교수
E-mail : aerocfd1@snu.ac.kr
TEL : (02)880-8920

** 정희원, 서울대학교, 항공우주신기술연구소, 교수
* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

선행 연구를 살펴보면, 팬헤드 부분이 표 1에서와 같이 고속열차 팬터그래프 시스템의 공기역학적 특성을 결정하는데 가장 중요한 파트임을 알 수 있으며 선행연구 결과 또한 이를 뒷받침하고 있다. 선행 연구에서는 [8,9] 팬헤드 형상을 전산해석을 통해 외란에 강건한 최적형상을 찾고 풍동실험을 통해 검증이 수행하였다.

본 연구에서는 공기역학적 효율이 더 높은 팬터그래프시스템을 제안하기 위해 팬헤드를 지지하는 암에 대해 다양한 모델과 팬헤드의 압상력의 미세조절을 위한 양력조절판과 스포일러에 대해 풍동실험을 수행하였다.

표 1. 팬터그래프에 작용하는 공기역학적 힘 분포[6]

Subpart	F_x	F_y	F_z [kgf]
(1) Lower arm	5.3	0.0	12.5
(2) Strut rod	4.2	0.0	7.2
(3) Upper arm	3.2	0.0	-9.2
(4) Balance rod	0.8	0.0	-2.7
(5) Plunger	12.8	0.0	0.0
(6) Panhead	94.5	0.0	13.5

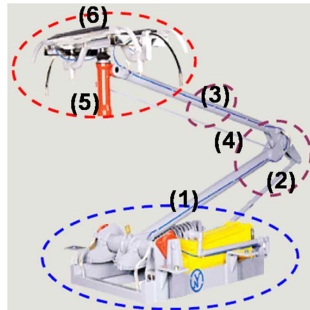


그림 1. 고속열차의 팬터그래프시스템

2. 본 문

2.1 실험 방법 및 조건

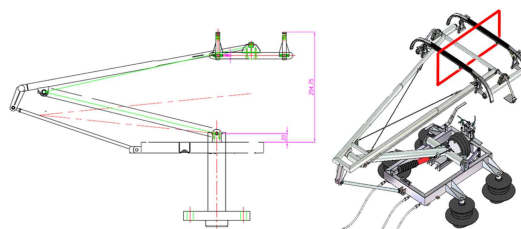


그림 2. 풍동시험모델(1/4 스케일)

본 연구에서 사용된 실험모델은 현재 KTX-II에 사용되는 모델로서 1/4스케일로 제작되었으며 기본형상의 팬헤드와 최적형상의 팬헤드로 교체할 수 있도록 설계제작되었다.[그림 2] 실험모델은 높이가 275mm이며, 무게는 5.5kg이며 열처리된 철과 알루미늄합금으로 제작되었다.



그림 3. 풍동시험모델(1/4 스케일)

팬헤드를 지지하는 암(arm) 부분은 다음과 같은 형식으로 제작되었다. 기본형상의 경우 double upper arm과 single lower arm으로 구성되며, single upper arm과 single lower arm 타입과 에어포일형상인 periscope type(잠망경)타입으로 그림 3과 같이 제작되었다.

팬터그래프의 압상력을 조절하기 위한 에어포일(양력조절판) 및 스포일러 모델은 다음 그림 4, 5와 같다. 에어포일의 경우 형상과 크기는 다음과 같고, 일반적으로 그림 4의 우측 그림에서와 같은 형상은 normal 상태를 나타내며, 그림 4의 좌측 그림은 개선된 에어포일의 뒤집힌 reverse상태를 나타내고 있다.

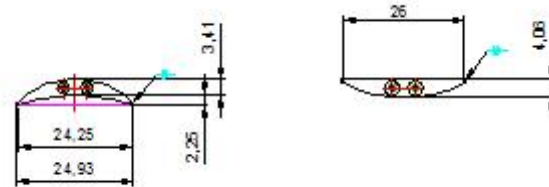


그림 4. 에어포일의 형상(좌:airfoil#2, 우:airfoil#1)

스포일러는 실제 모델을 기준으로 하여 장착각 15도, 20도, 25도, 30도에 대해 실험을 수행하였고, 모델의 크기는 17.5mm×28mm(size1), 17.5mm×24mm(size2), 17.5mm×20mm(size3), 17.5mm×16mm(size4), 17.5mm×12mm(size5)이다.



그림 5. 에어포일(좌) 및 스포일러(우)가 장착된 풍동시험모델(1/4 스케일)

풍동 실험은 예비실험으로 서울대 풍동실의 아음속풍동에서 수행되었다. 시험부의 크기는 0.96m(높이)×1.35m(너비)×2.4m(길이)이며 75m/s일 때 0.2% 난류도를 갖는다. 실험모델의 blockage ratio는 약 8%이다. 포항공대 풍동실의 폐쇄회로 풍동에서 수행되었다. 시험부의 크기는 1.5m(높이)×1.8m(너비)×4.6m(길이)이며 75m/s일 때 0.2%난류도를 갖는다. 실험모델의 blockage ratio는 약 2.5%이다. 데이터 측정에는 LABView가 탑재된 다목적 DAQ 시스템을 이용하였다. 공력측정은 2축로드셀을 이용하였으며 예비실험 10회, 본실험 8회로 총 18회에 걸쳐 재현성과 정확도를 확인하며 실험을 수행하였다.

2.2. 실험 결과 및 분석

다음 그림 6 ~ 9은 팬헤드를 지지하는 암(Arm)의 형상에 따른 양력(압상력)과 항력의 비교 실험결과를 나타내고 있다. 유동방향이 정방향일 때, 압상력은 기본형상 팬헤드는 별다른 차이를 보이지 않았다. 이것은 팬터그래프 시스템에서 압상력을 발생시키는 것은 팬헤드가 주요적이기 때문이다. 그러나 전체 팬터그래프 시스템의 항력에 대해서는 암의 형태에 따라 속도가 증가할수록 현격한 차이를 갖는 것을 알 수 있다. 더블암의 경우 복잡한 형상으로 인해 가장 많은 항력을 발생하고 싱글암, 잠망경타입암의 순으로 항력이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 정방향의 경우 팬헤드를 지지하는 암이 유동에 팬헤드보다 먼저 영향을 받기 때문이며 그렇기 때문에 팬헤드를 지지하는 암의 형태가 간단할수록 항력이 감소함을 알 수 있다. 이것으로 미루어 보아 공력소음을 예상하여 보면, 잠망경타입이 가장 공력소음이 작게 발생될 것으로 예상된다.

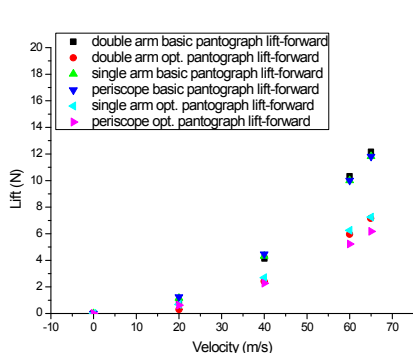


그림 6. 압 타입별 양력 비교(정방향)

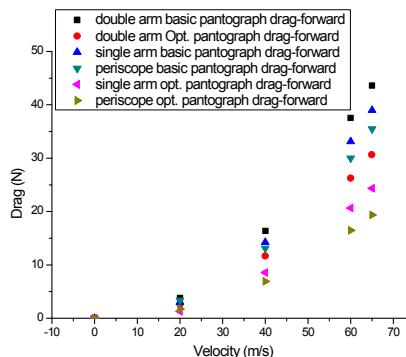


그림 7. 압 타입별 항력 비교(정방향)

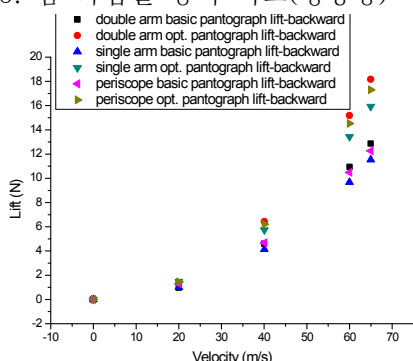


그림 8. 압 타입별 양력 비교(역방향)

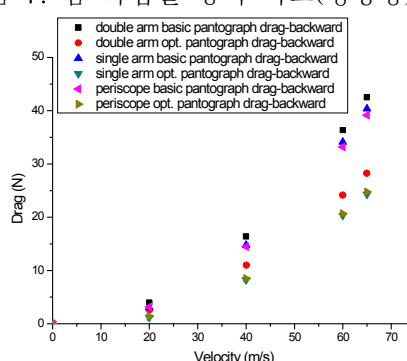


그림 9. 압 타입별 항력 비교(역방향)

역방향인 경우, 압상력은 기본 팬헤드 형상을 가진 팬터그래프의 경우 압의 형태에 따라 약간의 차이를 갖는다. 하지만 이것은 팬헤드의 영향보다는 압이 발생하는 양력특성 때문이다. 즉, 더블암과 싱글암을 비교하여 보면, upper arm이 유동에 노출되는 면적이 double upper arm이 single upper arm보다 더 넓기 때문에 양력이 더 크게 발생하는 것이다. 최적화된 형상의 팬헤드를 가진 팬터그래프의 경우 양력특성이 기본형상 팬헤드를 가진 팬터그래프보다 나쁜 특성을 갖는다. 다시말해, 양력이 크게 발생하는 것은 그만큼 양력을 제어하기 힘들고 외란에 노출되었을 경우 더 큰 힘이 작용한다는 것을 의미한다. 그러나 팬헤드의 형상이 정방향에 대해 최적화된 것이기 때문에 문제가 되지 않으며, 단지 기본형상 팬헤드와 비교하기 위한 데이터를 위해 실험을 수행한 것이다. 전체 팬터그래프 시스템의 항력에서는 정방향에서의 경우와 마찬가지로 더블암, 싱글암, 잠망경타입 순으로 나타났다. 그러나 정방향에서 나타난 각 형상별 차이는 나타나지 않았는데 이것은 유동이 암보다는 기본형상이나 최적화형상을 가진 팬헤드에 먼저 영향을 주기 때문에 팬헤드의 형상에 따른 차이가 더 주요적이기 때문이다.

유동방향에 대해 정방향과 역방향에 대해 결과를 종합하여 보면, 정방향인 경우 팬헤드를 지지하는 암이 팬헤드보다 먼저 영향을 미치기 때문에, 항력은 팬헤드를 지지하는 암의 형상이 주요적이다. 그러나 압상력은 팬헤드가 주요적으로 발생하기 때문에 팬헤드의 영향이 주요적이다. 역방향인 경우, 정방향의 경우와 달리 유동이 팬헤드를 지지하는 암보다 팬헤드에 먼저 영향을 주기 때문에 팬헤드의 형상에 따라 압상력과 항력 발생이 결정됨을 알 수 있다.

다음 그림 10~11 팬헤드의 압상력을 조절하기 위한 에어포일의 형상에 따른 결과를 나타내고 그림 12~16은 스포일러의 사이즈에 따른 각도별 양력비교 그래프이다. 본 연구에서는 실험모델(1/4스케일)의 한계로 인해 정성적인 특성에 대해 알아보았다. 에어포일은 팬터그래프의 각 부재들과 다른 유동영역에 있기 때문에 압상력을 조절하기 위한 부품으로 사용되고 있다. 에어포일의 경우 normal상태인 경우 캠버가 음이기 때문에 음(-)의 압상력을 발생하고 reverse 상태인 경우 양(+)의 압상력을 발생한다. 개선된 에어포일(airfoil#2)의 경우 형상에 따른 캠버가 에어포일#1에 비해 더 크다. 실험결과 에어포일을 장착한 경우, normal 상태인 경우 음의 압상력을 발생하고 reverse 상태인 경우 양의 압상력이 발생함을 확인하였다. 에어포일#2의 경우는 에어포일#1에 비해 캠버가 크지만 normal 상태일때 윗

면의 형상이 오목하게 들어갔지만 앞전에서 박리를 유도함에 따라 음의 압상력을 발생하는데 큰 효과를 나타내지 못하고 있음을 확인하였다. 스포일러의 경우, 고정된 장착각에 따른 사이즈에 따른 압상력을 비교하여 보면, 사이즈가 커짐에 따라 더 큰 압상력을 발생함을 확인하였다.

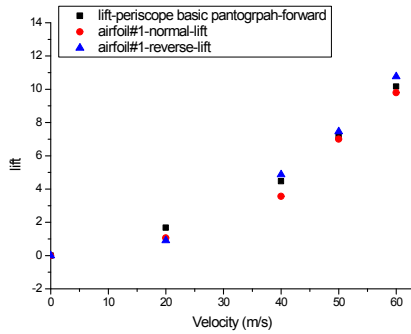


그림 10. Normal airfoil 양력비교

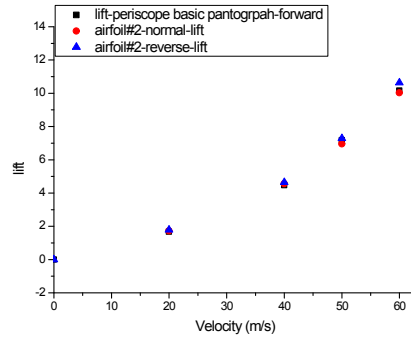


그림 11. Modified airfoil 양력비교

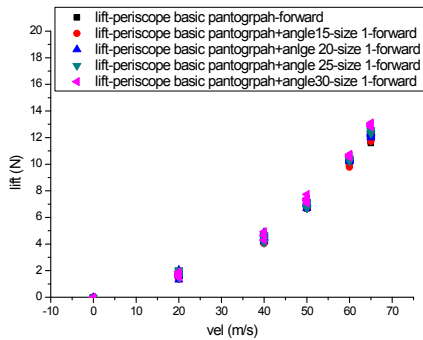


그림 12. 스포일러 1의 각도별 양력비교

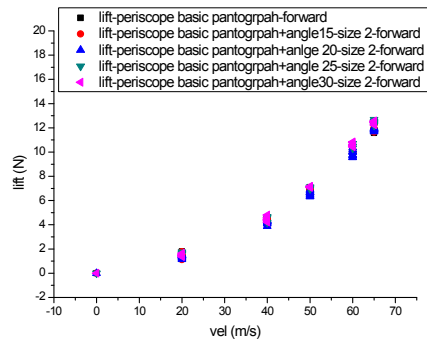


그림 13. 스포일러 2의 각도별 양력비교

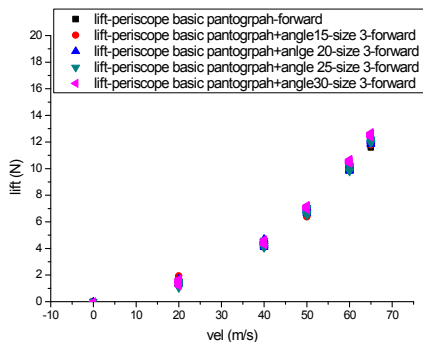


그림 14. 스포일러 3의 각도별 양력비교

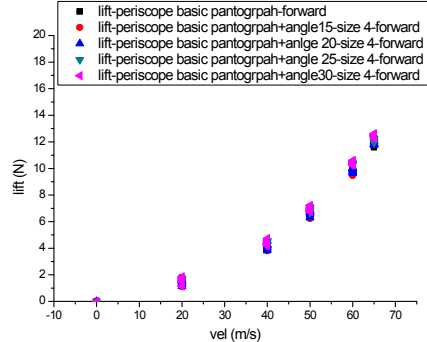


그림 15. 스포일러 4의 각도별 양력비교

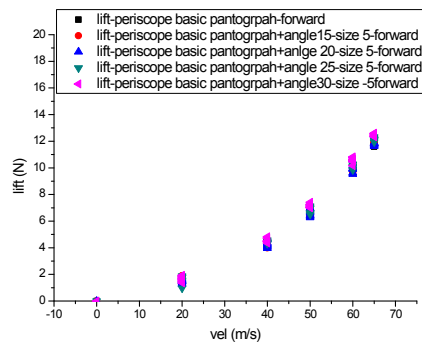


그림 16. 스포일러 5의 각도별 양력비교

본 기초 연구를 통해 에어포일과 스포일러에 대한 실험결과 정성적인 공기역학적 경향을 확인하였으며, 이를 통해 앞으로 에어포일과 스포일러를 팬터그래프시스템에 적용가능함을 확인할 수 있었다. 앞으로 이에 대한 상세 연구 또한 필요할 것으로 생각된다.

3. 결론

본 연구에서는 차세대고속전철(HEMU-400X) 팬터그래프 시스템 개발을 위한 기초연구로 팬터그래프를 구성하는 다양한 요소의 형상에 따른 공기역학적 특성을 풍동실험을 통해 알아보았다. 실험결과 팬헤드를 지지하는 암의 형태에 따라 공력특성이 차이가 있음을 확인하였으며, 팬헤드를 지지하는 암이 간단한 형상을 가질수록 팬터그래프시스템의 공기역학적 효율을 증가시킬 수 있음을 본 기초연구를 통해 알 수 있었다. 따라서 고속전철의 고속화를 위한 팬터그래프를 설계 시 전체 팬터그래프의 공력성능을 좌우하는 팬헤드의 최적설계와 이를 지지하는 구성요소의 적절한 요소 선택이 필요하다. 그리고 양력 조절판과 스포일러에 대한 정성적인 공기역학적 경향을 통해 팬터그래프에 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 BK21, 차세대고속전철사업, NSL(S10801000121-08A0100-12110)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hisung Lee, Dae-seop Moon, 2005, *Next Generation of Korea Train Express (KTX): Prospect and Strategies*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 255-262.
2. Joseph A. Schetz, 2001, *Aerodynamics of High-Speed Trains*, Annual meeting. Rev. Fluid Mech., Vol. 33, pp. 371-414.
3. T.Kitagawa, K. Nagakura, 2000, *Aerodynamic Noise Generated by Shinkansen Cars*, J of Sound and Vibration, Vol. 231(3), pp. 913-924.
4. B Schulte-Werning, 2003, *Research of European railway operators to reduce the environmental impact of high-speed trains*, Proc. Instn Mech. Engrs, Vol 217. Part F: J. Rail and Rapid Transit. pp. 249-257.
5. Jaeho Hwang, Dongho Lee, 2001, *Investigation on Severe Aerodynamic Load Condition about Pantograph*, KSME conference paper, pp. 1-6.
6. K. R. Chung, S.H. Park, 2001, *Structural Design Verification and Design Optimization of Pantograph for Korean Very High Speed Train*, KSNVE conference paper. pp. 1229-1234.
7. Mitsuru Ikeda, Takehisa Takaishi, 2004, *Perforated Pantograph Horn Aeolian Tone Suppression Mechanism*, QR of RTRI, Vol. 45, No. 3, pp. 169-174.
8. J. Rho, S. Jeong, D. Lee, 2007, *Robust Design Optimization of the Pantograph Panhead Shape on high Speed Train*, KSME conference paper, Vol. 10, pp. 1-4.
9. 노주현, 이영빈, 광민호, 김규홍, 이동호, 최적 팬헤드 형상을 가진 팬터그래프 축소모델의 3차원 공력특성에 대한 실험적 연구, 한국철도학회 추계학술대회, 2009.11.19~2009.11.20