

판토히라프의 동적 접촉력 측정에 관한 연구

On Dynamic Contact Force Measurement of the Pantograph

° 백인혁* 김정수** 조용현*** 최강윤***

Baek, In-Hyuk Kim, Jung-Soo Cho, Young-Hyeon Choe, Kang-Youn

ABSTRACT

A method for accurate measurement of the contact force in the current collection system of the high-speed railway is developed. In order to measure the contact force with minimal modifications to the pantograph, strain gauges are attached to the bottom of the contact strip. An algorithm for deriving the magnitude and stagger of the contact force from the bending strain measurements is devised. For the sample pantograph, the static contact forces are measured to within $\pm 5\%$ error for the magnitude and $\pm 2\text{cm}$ error for the stagger. For dynamic contact force measurement, it is found that the contact strip can be regarded as a rigid body for the contact frequency of less than 15 Hz.

Key Words: Pantograph, Static Contact Force, Dynamic Contact Force, Stagger, Bending Strain.

1. 서론

고속전철의 개발선진국은 각국의 상황에 맞는 고유의 가선계를 개발하였고 그 가선계에 적합한 판토히라프를 최적화 하여왔다. 집전시스템의 성능은 열차의 최대속도와 열차동력의 크기를 결정하는 주요 요소로서 고속전철의 성능과 안전성 확보에 필수적인 기술이다. 이러한 집전시스템의 신뢰성을 확보하기 위해서는 집전 성능 시험을 통한 검증이

필수적이라고 할 수 있다. 집전계의 접촉성능을 평가하는 대표적인 지표로서 접촉력은 단일 물리량을 직접 측정하는 방법으로서 집전성능 평가에 객관적 기준을 제시할수 있다. 본 연구에서는 팬헤드를 개조하지 않고 접촉력을 측정하는 방법으로서 스트레인 게이지를 이용하여 접촉력에 의해 발생하는 팬헤드 하부의 굽힘 변형률(bending strain)을 측정한후 접촉력을 예측하는 방법을 개발하였다. 가선계와 움직이는 판토히라프 사이의 접촉력은 팬헤드의 상부에서 작용하나 스트레인은 팬헤

* 홍익대학교 기계공학과 대학원, 정희원

** 홍익대학교 기계공학과 조교수, 정희원

*** 한국 철도기술연구원, 정희원

드의 하부에서 측정하므로 팬헤드의 상하방향 운동에 의한 관성력을 고려해 주어야 한다. 즉, 실제 접촉력은 팬헤드의 가속도를 측정하여 계산된 관성력을 측정된 스트레인으로부터 도출된 전단력에 더하여 구할수 있다.

2. 접촉력 측정

2.1 정적 접촉력 측정

팬헤드의 굽힘 변형을 측정하기 위하여 각각의 습판(contact strip)의 하부에 2개의 스트레인 게이지 도합 4개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험 set의 구성도는 Fig. 1과 같다. 정적하중이 작용할 때 팬헤드는 정지상태에 있으므로 팬헤드의 관성력은 고려할 필요가 없다.

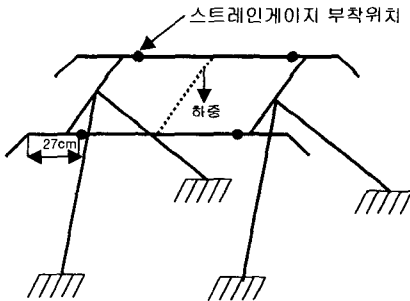


Fig. 1. 정적 접촉력 측정 시스템

가선과 판토가 접촉하는 최대 편위가 습판 중앙으로부터 ± 20 cm이므로 게이지를 습판 중앙으로부터 ± 21 cm 위치에 부착하였다. 실제로 팬헤드는 카본 strip이 steel보에 접촉된 일정한 범위의 곡률을 갖는 구조이나 단일 재질의 균일한 보 모델이 제공하는 스트레인과 접촉력에 의한 모멘트 사이의 관계식을 사용하여 스트레인과 모멘트 사이의 비례계수를 실험적으로 도출하고 스트레인 실험값

로부터 계산된 모멘트로부터 접촉력을 예측하는 방법을 사용하였다.

단순보 모델에 기초한 굽힘 스트레인 ϵ 과 모멘트 M 사이의 관계식은 아래와 같다.

$$\epsilon = -\frac{t}{EI} M = kM \quad (1)$$

여기서 k 는 ϵ 와 M 사이의 비례계수라 부르기로 하며 팬헤드의 단면 특성에 의해서 결정된다. 또한 편위 S 를 갖는 접촉력 F 가 Fig. 2와 같이 습판에 작용할 때 지지력과 접촉력 사이에는 관계식(2)와 같고 최대 모멘트는 식(3)과 같다.

$$F_1 = \frac{d+S}{2d} F, \quad F_2 = \frac{d-S}{2d} F \quad (2)$$

$$M_{\max} = \left(\frac{d^2 - S^2}{2d} \right) F \quad (3)$$

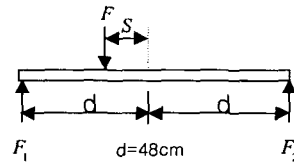


Fig. 2. 팬헤드 정역학 선도

따라서, 굽힘스트레인과 접촉력에 의한 모멘트 사이의 관계식을 사용하여 스트레인과 모멘트 사이의 비례계수를 실험적으로 도출하고 예측된 모멘트로부터 접촉력을 예측하는 방법을 사용하였다.

스트레인 게이지의 측정값으로부터 접촉력 F 및 편위 S 를 산출하는 과정은 다음과 같다. 스트레인 게이지로부터 측정값 S_1 과 S_2 를 구한후 스트레인 선도를 아래와 같이 구성한다.

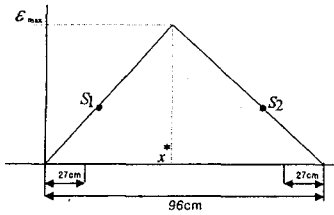


Fig. 3. 스트레인 선도

Fig. 3의 y축으로부터 ϵ_{max} 를, x^* 로부터 편위 S를 구한다. 또한 ϵ_{max} 와 M_{max} 사이의 비례계수 k를 미리 구한다.

임의의 접촉력 편위 S와 크기 F를 스트레인 게이지 값을 사용하여 도출하기 위하여 스트레인 게이지 측정값으로부터 스트레인 선도를 구성하고 계산된 ϵ_{max} 에 k_{avg} 를 곱하면 M_{max} 의 값을 구할 수 있다. 이렇게 산출된 M_{max} 와 스트레인 선도로부터 유도된 과정을 요약하면 아래 Fig. 4와 같다.

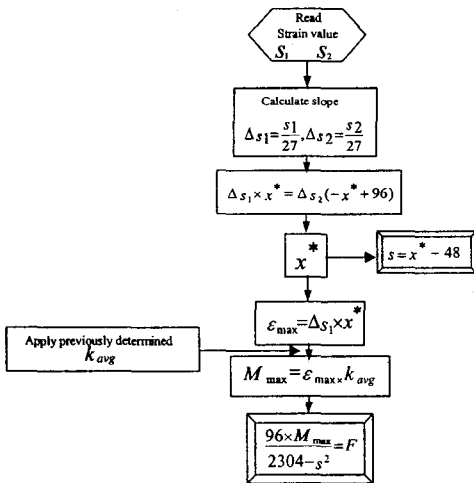


Fig. 4. F와 S를 결정하기 위한 Flowchart

그리고, 앞에서 언급한 비례계수 도출과정을 정리하면 다음과 같다.

(i) 주어진 편위 S와 크기 F를 갖는 하중을 팬헤드에 가하고 이에 따른 스트레인 값을 측정한다.

측정된 스트레인 S_1 및 S_2 로부터 Fig. 3를 통하여 ϵ_{max} 를 구한다.

(ii) 주어진 S와 F로부터 M_{max} 를 계산한다.

비례계수 $k = M_{max} / \epsilon_{max}$ 를 계산한다.

(iii) 다양한 편위 S와 크기 F를 갖는 하중을 적용하여 상응하는 비례계수를 도출하고 평균값 k_{avg} 를 구하여 사용한다.

정적실험은 편위를 바꾸어 가면서 3.22~13.22 kg 하중을 0~21 cm의 편위를 갖도록 팬헤드에 적용하였다. Fig. 5은 접촉력의 크기의 오차, Fig. 6는 편위 오차분포를 나타낸 것이다. 접촉력의 오차는 $\pm 5\%$ 이내이고 편위오차는 ± 2 cm내외임을 확인하였다.

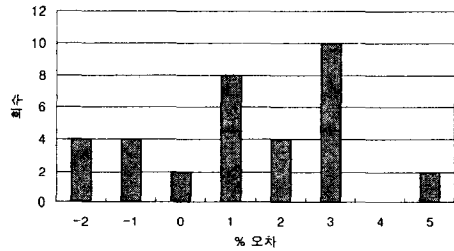


Fig. 5. 접촉력 %오차

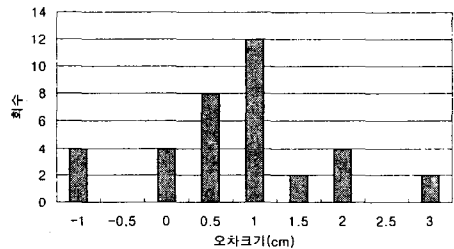


Fig. 6. 편위 오차

2.2 판토티라프 동특성 및 동적 접촉력 측정

건본 판토티라프의 동특성을 도출하고 접촉력 측정시 고려해야 할 주파수 범위를 결정한 후 동적 접촉력 측정시험을 수행하였다.

2.2.1 판토티라프의 동특성

판토티라프는 편리상 집전이 이루어지는 팬헤드와 팬헤드를 지지하는 기구부로 나눌수 있다. 먼저 기구부의 동특성을 살펴보기 위하여 팬헤드의 중앙부에 5~25 Hz 주파수 대역에서 sine sweep 가진력을 가하고 팬헤드의 가속도와 가진력 사이의 전달함수를 Fig. 7에 도시하였다. 건본 판토티라프의 주요 공진 주파수는 4 Hz, 8.4 Hz에서 관측되었다. (4 Hz 성분은 별도의 충격시험을 통하여 계측)

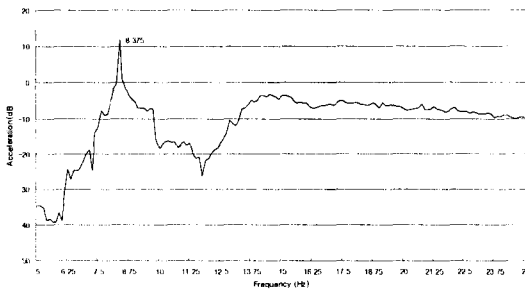


Fig. 7. 팬헤드의 가속도 전달함수

4 Hz 성분은 팬헤드의 고무 suspension spring과 연결된 기다란 연결 링크의 회전 모드이고, 8.4 Hz 성분은 고무 suspension spring 위에 부착된 팬헤드 질량의 상하병진 모드로 사료된다.

25 Hz 이하에서는 팬헤드부의 구조 진동이 관측되지 않았고 주요 진동은 모두 판토티라프 기구부의 동특성에 기인하는 것을 알 수 있다. 25 Hz 이상의 주파수 대역에서는 팬헤드의 구조진동이 판토티라프의 접촉특성을 결정하는 주요 인자가 될수 있으므로 팬헤드를 판토티라프로부터 떼어내고 팬

헤드만을 대상으로 충격가진 실험에 의한 전달함수를 구하였다.

Fig. 8은 200 Hz 주파수 대역에서 충격가진에 대한 팬헤드의 대표적인 가속도와 속도 전달함수를 나타낸 것이다.

아래 그림에서 보듯이 공진 주파수는 33.5 Hz(팬헤드에 부착된 날개의 고유진동수로서 접촉력에 미미한 영향을 갖는다.), 44 Hz, 73 Hz, 161 Hz에

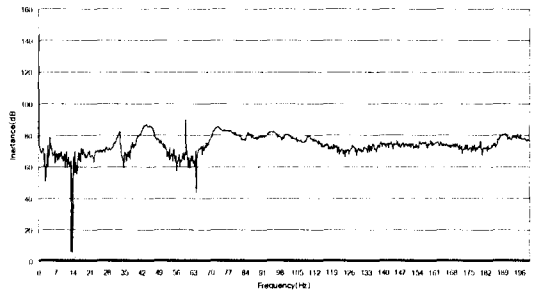


Fig. 8. 팬헤드 가속도 전달함수

서 관측되었다. 60 Hz와 180 Hz의 날카로운 피크는 전력 노이즈에 기인한다.

2.2.2 동적 접촉력 측정

팬헤드의 상부에 작용하는 접촉력과 팬헤드 하부의 스트레인으로 부터 도출된 전단력 사이에는 팬헤드의 가속도에 의한 관성력 만큼의 차이가 존재하게 되므로 관성력을 측정하여 전단력을 보정해 주어야만 실제 접촉력을 구할 수 있다. 접촉력이 팬헤드 구조진동모드와 비교하여 저주파 성분을 가질 때(팬헤드의 첫 번째 고유진동수인 44 Hz의 1/3이되는 약 15 Hz이하의 주파수 대역을 의미) 팬헤드를 강체로 간주하고 관성력을 측정할 수 있다. 즉 1개의 가속도계를 팬헤드의 편리한 위치에 부착하여 가속도를 구한 후 팬헤드 질량과 곱하여 관성력을 산출한다. 이 경우에 실제 접촉력 F_c 는 굽힘 스트레인으로 부터 도출된 전단력 F 를 다음과 같이 보정하여 구한다.

$$F_c = F + m_H * a_H \quad (4)$$

여기서는 m_H 는 팬헤드의 질량을 a_H 는 측정된 가속도를 나타낸다.

접촉력 측정을 하기 위한 첫번째 단계로 가속도계, 로드셀, 스트레인 게이지가 부착된 견본 판토품을 sine sweep(5~30 Hz, 30~100 Hz) 및 random(5~20 Hz) 가진하였고 가진력, 가속도 및 스트레인을 계측하였다. 스트레인 게이지 부착 위치는 Fig. 1과 동일하고 가속도계 및 로드셀의 위치는 Fig. 9에 나타나있다.

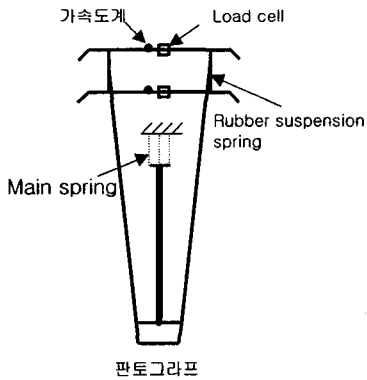
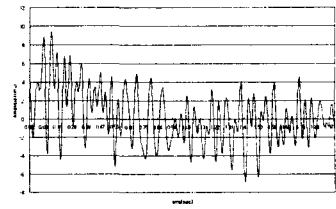


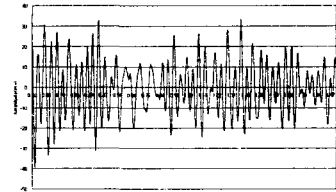
Fig. 9. 동적 접촉력 측정 위치

팬헤드 상부에 작용하는 로드셀의 접촉력은 팬헤드 하부의 스트레인 게이지로부터 유도된 접촉력과 가속도계로부터 유도된 관성력의 합으로 표현된다.

스트레인 게이지의 추종성을 알아보기 위해 Fig. 10은 5~20 Hz random 파의 경우 로드셀을 통하여 측정된 접촉력과 스트레인 게이지에서 측정된 스트레인 파형을 도시하였고 Fig. 11에는 24 Hz sine파와 접촉력 및 스트레인 파형을 도시하였다.

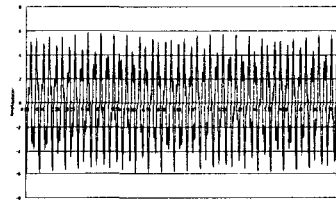


force vs time

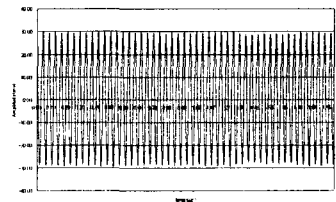


strain vs time

Fig.10. 접촉력 및 스트레인 파형(5~20 Hz random)



force vs time



strain vs time

Fig.11. 접촉력 및 스트레인 파형(24 Hz sine)

3. 결론

스트레인 게이지를 통한 접촉력 측정 알고리즘을 개발하고 정적 접촉력 및 동적 접촉력을 계측하였다. 또한 동적 접촉력 해석에 필요한 판토품의 동특성을 실험적으로 도출하였다. 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 정적 접촉력 측정시 하중과 편위를 각각 $\pm 5\%$, $\pm 2\text{ cm}$ 이내의 오차를 가지고 측정할 수 있을 것으로 예상된다.
- 15 Hz 미만의 저주파 대역에서는 판토품의 공진주파수가 기구부의 동특성에 기인하며 팬헤드의 구조진동은 15 Hz 이상에서만 고려할 필요가 있다. 접촉력의 주요 성분이 15 Hz 미만일 것으로 예측되므로 팬헤드를 강제로 간주하여 판성력을 계산하여도 무방할 것으로 생각된다.
- 판토품 스트레인 게이지를 이용한 동적 접촉력 측정에서는 부분적인 결론을 얻었고 현재 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.D.Hyun, Y.S.Choi(1991). "Numerical Analysis of Dynamic Response of Catenary/Pantograph System in High-Speed Train " Proceedings of the KSME, Spring, 1991(1).
- [2] J.S.Kim, B.D.Choi(1999), "A Study on Dynamic Characteristics of Catenary System" ,Journal of KSNVE, Vol.9, No.4, pp. 312~323.
- [3] S.H.Park, J.S.Kim, S.Hur, J.H.Kyung, D.H.Song "Vibration Response of TGV-K Catenary System Subject to External Forces" Proceedings of The KSNVE, May, 1999, pp. 448~454.
- [4] 정대현, 최연선 1991, "고속전철 Catenary / Pantograph계의 동특성 해석" 성대 논문집 제42집 No.1 pp. 377-390