

열차 집전장치와 전차선 사이의 동적 접촉력 측정방법 개발

Development of a Measuring Method for Dynamic Contact Forces between a Pantograph and a Contact Wire

조용현* · 최강윤**

Yong Hyeon Cho, Kangyoun Choe

Key Words : Pantograph(팬터그래프, 집전장치), Contact wire(전차선), contact forces(접촉력), loss of contact(이선)

ABSTRACT

A new method of dynamic contact force measurement between a pantograph and a contact wire is proposed in this paper. The method does not require design modification of an original pantograph in order to install sensors such as load cells. Contact forces can be expressed as the sum of vertical shear forces at the support points and inertial forces. Using specially-designed strain gage rosettes, vertical shear forces at the supported points can be measured without noise mixing and thermal effects. In order to obtain contact forces from shear forces, 3 inertial force compensation methods are proposed and compared in this paper. By validation process, the new proposed measurement method is verified to be applicable to the on-line current collection test.

1. 서 론

열차의 집전장치 즉 팬터그래프는 전차선으로부터 전력을 공급받는 장치로 전차선과의 이선(Loss of contact)이 발생하게 되면 아크가 발생하여 전차선과 집전장치가 손상될 수 있고 더 나아가서는 열차로의 전력 공급에 차질을 빚을 수 있다. 이러한 이유 때문에 열차의 집전 성능은 열차의 속도 향상을 위해서 반드시 확보해야 할 성능 중의 하나로 인식되고 있다.

열차의 집전장치와 전차선 사이의 접촉력이 0이 되는 것은 이선이 발생한다는 의미하는 것이므로 접촉력을 평가하여 집전성능을 평가할 수 있다.

접촉력에 의한 이선 평가를 하기 위해서는 정확한 접촉력 측정이 필요한데 집전장치에는 고전압 대전류가 흐르게 되므로 전자기적 노이즈가 혼입될 수 있고, 접촉력 측정용 Load cell의 설치를 위하여 집전장치가 설계 변경되면 집전성능이 변할 수 있는 문제점이 있다.

또한, 집전장치에 부착할 수 있는 센서의 무게 및 공간 제약 때문에 제한된 수의 센서만을 사용할 수 있으므로 접촉력을 정확히 측정하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 접촉력 측정을 위하여 많은 연구가 세계적으로 진행되어 오고 있다. 프랑스, 독일, 이태리 등에서는 전용 Load cell을 사용하여 집전장치에 작용하는 접촉력을 측정하는 방법을 개발하였고[1], 일본에서는 집전판에 걸리는 전단 스트레인을 측정하여 접촉력을 측정하는 방법[2]을 개발한 바 있다.

국내에서도 연구가 진행되고 있는 상황인데 고속전철 기술개발사업을 통하여 Load cell을 접촉력을 측정하는 방법과 집전판 굽힘 스트레인으로 부터 접촉력을 추정하는 방법을 개발하고 있는 중이다. 본 논문에서는 고전압, 대전류 환경에서 노이즈 혼입을 막을 수 있고 팬터그래프의 설계 변경을 최소화하면서 접촉력을 측정할 수 있는 굽힘 스트레인 측정에 의한 접촉력 측정 방법에 대하여 서술해 보고자 한다.

2. 접촉력 측정 알고리즘 개발

2.1 집전장치에 작용하는 힘의 평형 관계

전차선과 접촉하는 집전장치 판헤드(Pan-head)에 작

* 한국철도기술연구원

E-mail : yhcho@krri.re.kr

Tel : (031) 457-1960, Fax : (031) 455-4868

** 한국철도기술연구원

용하는 힘은 fig 1과 같고, 이들의 평형 관계는 식(1)로 나타낼 수 있다.

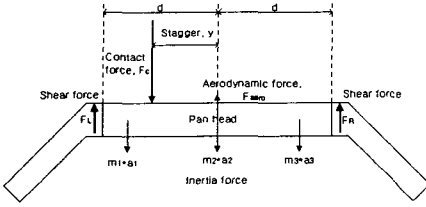


fig 1 Free-body diagram of pan-head

$$F_{\text{ertia}} - F_L - F_R = F_c - F_{\text{aero}} \quad (1)$$

여기서 F_{ertia} 는 관성력, F_L 과 F_R 은 판 헤드의 좌, 우측 지지점에서의 전단력, F_c 는 접촉력, F_{aero} 는 판 헤드에 작용하는 공력이다.

접촉력은 판 헤드에 작용하는 전단력에 관성력 및 공력을 보정하여 얻어지는 값임을 식(1)을 통해 알 수 있다.

2.2 전단력 추정방법

판 헤드는 스프링에 의하여 지지받고 있어 판 헤드에 작용하는 전단력은 곧 지지 스프링에 작용하는 힘과 같다. 전단력은 Load cell 혹은 스트레인게이지를 사용하여 측정할 수 있다. Load cell로 접촉력을 측정하려면 Load cell을 집전장치에 삽입해야 하는데 이를 위해서는 집전장치의 설계 변경이 필요하다. 반면에 스트레인게이지를 사용하는 경우에는 설계 변경을 하지 않고도 전단력을 측정할 수 있어서 본 논문에서는 스트레인게이지를 사용하여 전단력을 측정하는 방법에 대하여 연구하였다.

판 헤드의 집전판에 작용하는 접촉력은 집전판을 소성 변형시킬만큼 높은 수준이 아니므로 집전판을 단순 지지 탄성 보(Simply supported elastic beam)로 가정할 수 있다. 탄성 보에 대하여 적용할 수 있는 모멘트와 전단력의 관계식으로부터 집전판에 작용하는 굽힘 스트레인과 전단력의 관계식을 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$F = \frac{\partial M}{\partial x} \cong \frac{\Delta M}{\Delta x} = \frac{k \Delta \epsilon}{\Delta x} = c \Delta \epsilon \quad (2)$$

여기서 M 은 지지점에서의 굽힘 모멘트, ϵ 은 집전판에 걸리는 굽힘 스트레인, k 는 모멘트와 스트레인 사이의 비례상수로 집전판을 Euler 보라고 가정하면 k 는 재료의 탄성계수와 단면계수의 곱으로 표현할 수 있으며, c 는 전단력과 스트레인의 사이의 비례상수로 k 와 마찬가지로 재료의 탄성과 기하학적 특성에 의하여 정해지는 값이다.

c 값은 정지 상태에서 집전판에 추를 올려 놓고 지지점

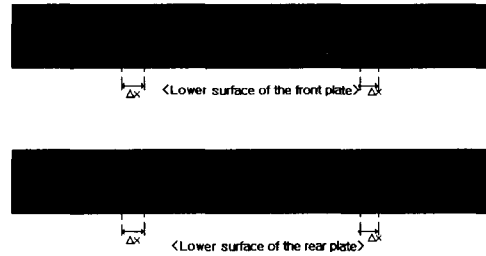
에서의 반력 즉 전단력과 굽힘 스트레인을 측정하여 얻을 수 있다. 집전판의 마모가 진행되면 비례상수 c 가 변하게 되므로 집전시험을 할 때에는 집전판의 주행거리가 1500 km 이내의 신품을 사용하는 것이 바람직하다.

식(2)를 이용하여 좌, 우측 지지점에서의 전단력은 식 (3), (4)와 같이 각각 쓸 수 있다.

$$F_L = c_L \Delta \epsilon_L \quad (3)$$

$$F_R = c_R \Delta \epsilon_R \quad (4)$$

식(3), (4)에 포함된 굽힘 스트레인의 변화를 측정하기 위하여 fig 2와 같이 스트레인 게이지 R1, R2는 하중이 작용하는 쪽으로 지지점에서 일정 거리만큼 떨어진 위치에 부착하고, 스트레인 게이지 R3, R4는 하중이 작용하지 않는 위치에 부착하였다.



(rectangle : strains, circles : accelerometers)

fig 2 Sensor installation for a contact force measurement

스트레인게이지 R1, R2에는 접촉력에 의한 기계적 스트레인 ϵ_m , 집전판 온도상승에 의한 열 스트레인 ϵ_{th} , 혼입되는 전자기적 노이즈 n 의 신호가 들어오고, 스트레인게이지 R3, R4에는 집전판 온도상승에 의한 열 스트레인 ϵ_{th} , 혼입되는 전자기 노이즈 n 의 신호가 들어오게 된다. 만약에 스트레인게이지 R1, R2, R3, R4를 fig 3에 나와 있는 것과 같이 Full 브릿지를 구성하게 되면 출력신호로 $(R1-R3) + (R2-R4)$ 를 얻게 되어 열스트레인과 전자기적 노이즈는 소멸되고 측정하기를 원하는 기계적 스트레인 ϵ_m 만 2배 확 대되게 된다.

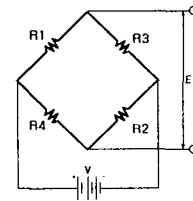


fig 3 Wheatstone bridge arrangement

열차가 집전을 하는 상태에서 집전장치 집전판에 작용하는 스트레인 R1, R2, R3, R4를 측정하여 식(3), (4)에 대입하게 되면 좌, 우측 지지점에서의 전단력을 바로 구할 수 있다.

2.3 관성력 측정방법

집전장치의 동적 거동을 살펴보기 위하여 집전장치를 단순 질량-스프링-댐퍼로 모델링하고 스프링 위에 놓인 판 헤드는 단순 질량으로 본다. 열차가 주행할 때에 집전장치가 전차선에 의하여 받는 가진 주파수는 고속선에서 1 ~ 30 Hz 사이에 있다. 반면에 고속전철의 집전판 예를 들어 한국형 고속전철에 사용될 집전판의 1차 굽힘 진동모드는 약 100 Hz 에 있으므로 판 헤드를 단순 질량으로 가정하는 것이 일반적으론 타당하다고 생각한다.

관심의 주파수 내에 판 헤드의 공진이 없다면 판 헤드를 단순 질량으로 볼 수 있고 여기에 가속도를 곱하면 판 헤드에 작용하는 관성력을 얻을 수 있다.

$$F_{\text{inertia}} = \sum m_i a_i \quad (5)$$

여기서 m_i 는 판헤드의 등가질량, a_i 는 등가질량이 갖는 가속도이다.

판 헤드가 병진 운동만을 한다면 한 점에서의 가속도를 측정하고 이를 판 헤드 질량에 곱하여 관성력을 구할 수 있고, 판 헤드가 병진운동과 회전운동을 함께 한다면 판 헤드 양 지지점에서의 가속도를 측정하여 판 헤드 질량의 절반에 곱하고 이를 합하여 관성력을 구할 수 있을 것이다.

판 헤드가 굽힘 모드의 운동을 하게 되면 가속도계를 좌측, 중앙, 우측에 각각 설치하여 가속도를 측정하고 이들 가속도를 사용하여 관성력 보정을 하는 것이 바람직할 것이다.

2.4 공력 측정 방법

집전장치가 고속으로 주행하게 되면 양력을 받게 되는데 일반적으로 양력은 속도의 제곱에 비례한다. 300 km/h로 주행하는 경부고속철도의 경우 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력 중에서 양력이 차지하는 비중은 전체의 약 60%가 된다. 이러한 공력의 대부분은 집전장치에 달려 있는 양력판과 양력 날개에 의해 생기는 것이다. 하지만 집전판에 의한 양력은 그 크기가 작아 무시할 만한 수준이라고 한다[2].

집전판을 전차선과 약 10cm 정도 떨어져 있도록 철사로 고정된 상태에서 열차가 주행할 때에 집전판에 작용하는 힘은 fig 4와 같이 나타낼 수 있고 이들 사이의 평형 관계식은 다음과 같다.

$$(F1 + F2) - (T1 + T2) = F_{\text{aero1}} - F_{\text{inert}} \quad (6)$$

여기서 (T1+T2)는 집전판을 묶은 철사에 걸리는 장력이고, (F1+F2)는 스프링 밑에 설치되어 있는 Load cell에 의하여 측정된 힘이다.

집전판이 철사에 묶여 있으므로 집전판의 운동이 구속되어 되어 관성력이 작을 것이므로 이를 무시하면 집전판에 의한 양력은 식(6)으로부터 힘 (F1+F2)에서 (T1+T2)를 빼면 구할 수 있음을 알 수 있다.

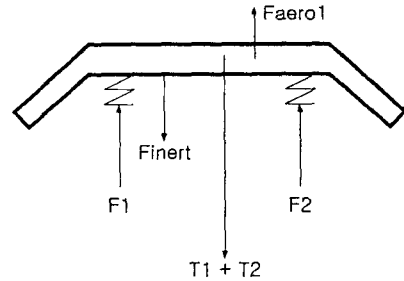


fig 4 Forces applied to the current collection plate during an aerodynamic test.

열차의 주행속도가 바뀌게 되면 양력의 방향도 변할 수 있으므로 집전판에 의한 양력을 측정하는 것이 바람직하겠으나 외국 문헌에서도 집전판에 의한 양력은 미미한 수준이라고 하므로 본 논문에서는 집전판에 의한 양력을 무시하였다.

3 접촉력 측정 알고리즘 검증

3.1 전단력 추정

스트레인 게이지를 fig 2와 같이 부착한 상태에서 추를 집전판에 올려 놓고 스트레인의 변화를 살펴 보았다.

fig 5에는 15 kg의 추를 여러 가지 편위(Stagger)위치에 올려 놓고 스트레인을 측정하여 얻은 값이 나와 있다. 추를 올려 놓는 위치에 따라서 좌, 우측에 위치한 스트레인 신호는 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 한편, 좌 우 스트레인 신호를 합한 값은 어떤 위치에서나 모두 같게 나와야 하지만 추의 위치에 따라서 다름을 알 수 있다. 추가 ± 20 cm의 편위 위치에 있을 때에 비하여 중앙의 위치에 있을 때에 스트레인 신호가 15% 줄음을 알 수 있다. 이는 집전판이 균일보가 아니기 때문에 본 논문에서 제안하는 방법이 갖는 오차 요인이 된다. 추를 여러 가지 편위 위치에 올려 놓고 측정된 스트레인 신호들의 평균치를 구하여 이를 추의 무게에 대한 스트레인 측정값으로 취하였다.

추의 무게를 증가시켜 가면서 이상과 같은 절차에 따라서 시험하여 얻은 결과가 fig 6에 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이 스트레인 측정값과 추의 무게는 선형 관계를 가지고 있다. fig 6에는 또한 측정치를 1차식으로 fitting을

한 결과가 나와 있는데 그림으로부터 이들의 차이가 추의 무게가 15kg일 때 5%까지 생김을 알 수 있었다.

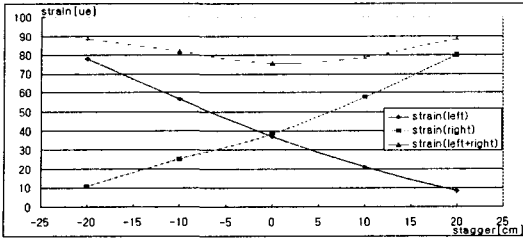


fig 5 strain signals with a 15kg of weight loaded at various stagger positions.

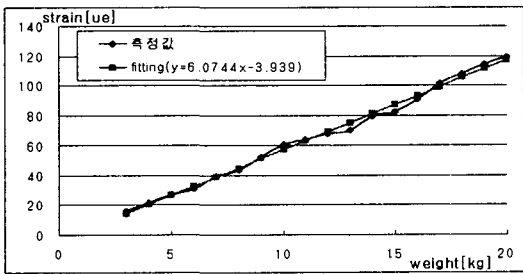


fig 6 averaged strain signals with various weights(3~20 kg) loaded at various stagger positions

전단력의 추정 오차를 검토하기 위하여 fitting 값과 추정값의 차이가 비교적 큰 15 kg의 조건에 대하여 검토해 보았다. 추를 집전판에 여러 가지 편위 위치에 가한 상태에서 측정된 스트레인을 fitting 식에 대입하여 추의 무게를 추정된 결과가 table 1에 나와 있다. 추 무게의 추정값과 실제값의 차를 추정 오차는 집전판 중앙에서 최대 11% 정도를 가지고 있음을 알 수 있다.

table 1 forces estimated based on measured strains

stagger [cm]	-20	-10	0	10	20	remark
strain [ue]	89	83	77	81	92	applied load : 15 kg
force [kg]	15.3	14.3	13.3	14.0	15.8	
% error	2	-5	-11	-7	5	

3.2 동적 접촉력 측정

열차에 탑재되는 집전장치를 대상으로 가진을 줄 수 있는 장치를 fig 7과 같이 만들어 산업선 구형 전기기관차에

탑재되는 집전장치를 대상으로 가진 시험을 수행하였다.



fig 7 dynamic test rig

5에서 30 Hz까지의 주파수로 sweep 가진을 하면서 얻은 측정 결과가 fig 8에 나와 있다. fig 8의 상단 그림은 전단력 추정 결과를 표시하고 있고, 하단 그림은 집전판의 가속도를 표시한다. 이 때 가진력은 중심에서 좌측으로 60 mm 떨어진 위치에 주었다. 가진력이 좌측으로 편향되어 있으므로 좌측의 전단력 신호가 우측의 전단력 신호에 비하여 크게 나타남을 fig 8을 통해 알 수 있다.

관성력 보정은 table 2에 나와 있는 3 가지 방법을 사용하여 수행하였다.

table 2 inertia force compensation methods

method	inertia force	remark
1 mass compensation	$m \cdot A_2$	m : mass of collection plate
2 mass compensation	$m/2 \cdot (A_1 + A_3)$	
3 mass compensation	$m/3 \cdot (A_1 + A_2 + A_3)$	

(A1, A2, and A3 mean left, middle, right accelerometers, respectively)

가진 주파수가 7, 12 Hz일 때의 동적 접촉력 추정치와 가진력(입력)을 비교해 보면 fig 10, 11과 같다.

전단력 즉 관성력을 보정하지 않은 힘은 가진력과 위상은 다르지만 그 형태는 매우 유사하다. fig 10, 11을 보면 가진력과 전단력의 크기 차이는 관성력을 보정함으로써 매꾸어짐을 알 수 있다. 즉 접촉력은 전단력과 관성력을 모두 고려해야만 보다 정확히 추정할 수 있다.

7 Hz 가진력이 작용하는 경우에는 table 2에 나와 있는 여러 가지 관성력 보정방법을 쓰더라도 접촉력 추정 결과가 큰 차이를 보이지 않으나, 12 Hz 가진력이 작용하는 경우에는 관성력 보정방법에 따라서 접촉력 추정 결과가 차이가 난다. 이는 산업선 탑재용 집전장치의 집전판의 옆에 달린 Horn이 유연하여 12 Hz 가진에서 흔들리기 때문에 집전판은 더 이상 강체 수직 운동만을 하지 않기 때문이다. 이런

경우에는 한 개의 가속도 신호로만 관성력을 보정하게 되면 관성력을 보정하지 않은 경우 보다도 오히려 악화된 결과를 얻게 됨에 주의해야 한다.

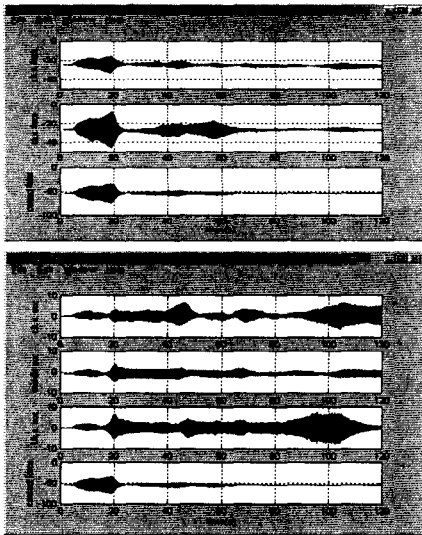


fig 8 test results obtained when a force is applied at 60 mm left stagger position

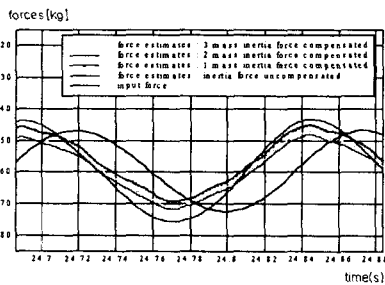


fig 10 comparison between force estimates and an applied force whose frequency is 7 Hz.

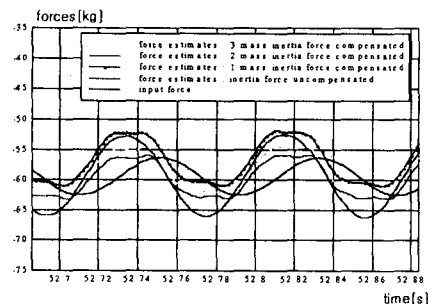


fig 11 comparison between force estimates and an applied force whose frequency is 12 Hz.

산업선 구형 전기기관차의 최대 주행 속도는 80 km/h이고 경간 지지점과 1번 드로퍼 사이의 거리는 2.5m 이므로 최대 가진 주파수는 대략 9 Hz 미만이 될 것으로 예상된다. 그러므로 구형 전기기관차를 대상으로 한 집전시험에서는 fig 10의 결과보다는 fig 9의 결과를 적용하는 것이 타당할 것으로 보이며 관성력 보정을 위하여 집전판의 중심에 한 개의 가속도계를 붙여서 관성력을 보정하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

이상과 같이 관성의 주파수에 따라서 사용하는 관성력 보정 방법은 달라지게 되므로 반드시 관성의 주파수 검사와 진동시험을 거쳐 관성력 보정 방법을 결정해야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 열차에 탑재된 집전장치가 집전을 하는 상태에서 동적 접촉력을 측정할 수 있는 측정방법을 제안하였다. 스트레인게이지를 full bridge로 구성하여 집전판에 작용하는 전단력을 구하고, 여기에 관성력을 보정을 하여 동적 접촉력을 얻는다.

본 논문에서 제안한 방법을 사용하면 스트레인 센서를 통해 들어오는 노이즈와 고온에서의 센서 비선형 거동에 영향을 받지 않고 접촉력을 측정할 수 있다.

후 기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동 주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되고 있는 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- (1) 독일 DEC 열차서운전 관련 기술자문보고서, 1999
- (2) 池田 充, "架線・パンタグラフ間の接觸力測定手法の研究," RTRI Report Vol. 14, No.6, 2000.6
- (3) Michel Cabiroi, "Pantograph/OHL interaction SNCF engineering studies and concepts developed," RAIL INTERNATIONAL, 2000. 9.