

집전계의 접촉부 신호계측 시스템을 이용한 접촉력 측정 Applicaton of Signal Processing Instrumentation for Measuring Contact Force in Current Collection Systems.

백인혁* 김정수** 조용현*** 최강윤***

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

ABSTRACT

A data acquisition and signal processing system for evaluating the current collection system is developed, and subsequently applied to the measurement and analysis of the contact force in the current collection system of the proposed Korean High Speed Railway. The measurement of the contact force is based on an algorithm that employs the relationship between the contact force, the strain due to the bending moment and the panhead inertia. For the contact forces in the frequency range of less that 50Hz, the panhead can the modeled as a rigid body in the inertia calculation. For higher frequencies however, the bending vibration modes of the panhead need to be accounted for as well.

1. 서론

고속전철의 성능을 평가하기 위하여 집전계의 성능을 종합적으로 검증할 수 있는 신호계측·처리 시스템을 개발 하였다. 열차주행시 전차선과 판토품은 접촉부에서 상호간에 기계적·전기적 작동이 끊임없이 수반되며 이러한 상호 작용이 집전시스템의 성능을 결정하므로 집전시스템 성능 평가의 핵심은 접촉부에서 전차선과 판토품 사이의 상호작용의 조화 특성 평가에 있다. 본 연구에서는 접촉력을 사용하여 집전성능을 평가하는 방법을 사용하였다. 접촉력은 단일 물리량을 직접 측정하는 방법으로서 집전성능 평가에 객관적 기준을 제시할수 있다. 또한 가선계의 마모와 밀접한 관계를 가지고 있으므로 마모예측에도 사용할 수 있다. 따라서 계측 시스템을 접촉부의 대표적인 물리량인 판토품과 가선계 사이의 동적 접촉력을 측정하는데 적용하였다.

개발된 계측시스템은 16채널의 접촉부센서 신호를 동시에 계측할 수 있고 전용시험기를 사용한 시험에서는 이중 12개를 실시간으로 모니터 할 수 있도록 하였으며 시간 및 주파수 영역에서 디스플레이가 가능하도록 구성되어있다. 또한 계측 데이터의 처리에 따라서 온라인과 오프라인 분석 방법의 선택이 가능하도록 하였다.

* 홍익대학교 기계공학과 대학원, 정회원

** 홍익대학교 기계공학과 조교수, 정회원

*** 한국 철도기술연구원, 정회원

2. 신호계측 및 처리 시스템

계측 시스템은 하드웨어와 소프트웨어로 나누어져 있다.

(1) 시스템 하드웨어 구성도

본 시스템의 하드웨어 구성도는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 세 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 데이터를 얻고자하는 실험장치(집진 시스템)에 센서를 부착한 다음 각각의 센서를 VXI 모듈에 맞게 채널별로 연결한다. 이렇게 한 다음 개인 서버(PC)에서 작업을 수행하면 된다.

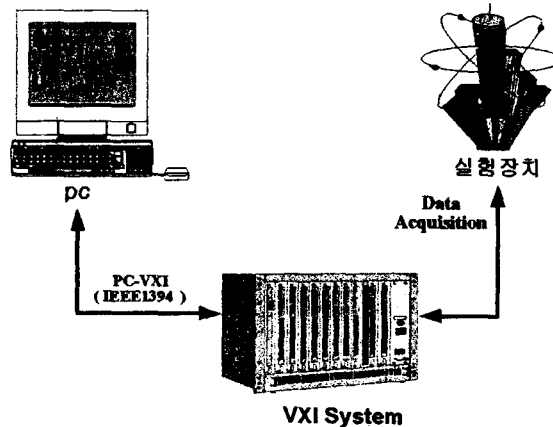


Fig. 1 시스템 Hardware 구성도

(2) 소프트웨어 및 신호계측

신호계측 및 처리 소프트웨어를 구성하는 VEE 프로그램은 그래픽 프로그래밍 환경이므로 상위레벨에서 함수 블럭들을 연결하는 것만으로 제어/계측 시스템 프로그래밍이 가능하고 사용자와의 MMI를 바로 즉석에서 디자인할 수 있으며, VEE프로그램의 최상위 구조는 Fig.2 와 같다.

(가) 전처리

전처리 분석방법은 VEE프로그램에서 실시간으로 데이터를 채취 및 저장하면서 분석하는 방법이다. 장점은 실험 진행도중 일어나는 문제를 제때 파악할 수 있고, 실험도중 발생하는 문제에 빨리 대처할 수 있다. 그러나 단점은 후처리 분석방법보다 좀더 정확한 분석을 할 수 없고, 데이터의 가공 또한 할 수 없다.

한 예로서 판토품그래프에 부착된 스트레인 게이지와 가속도계의 신호를 시간 및 주파수 영역에서 동시에 현시한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

(나) 후처리

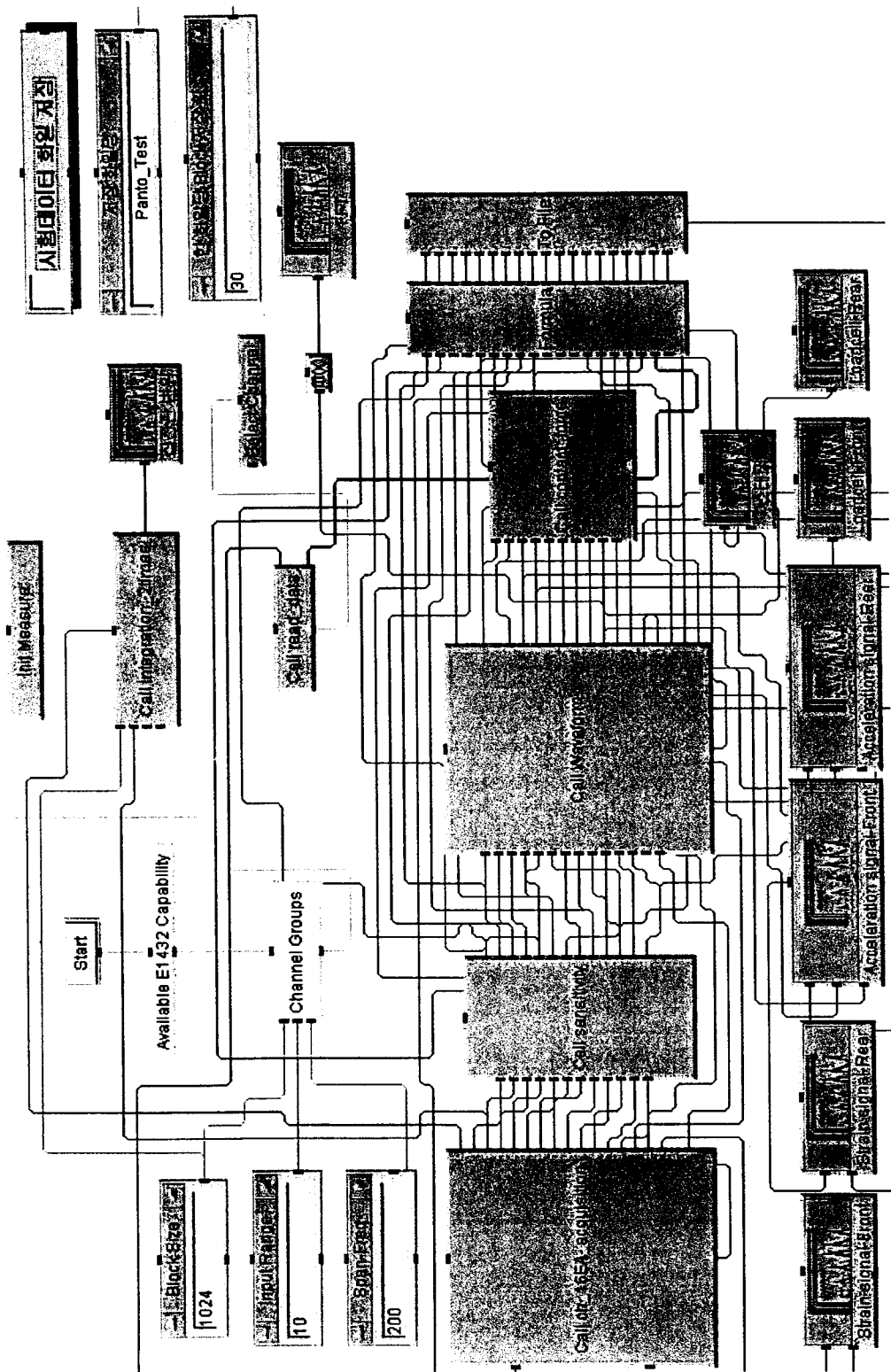


Fig. 2 VEE-UIS 구조

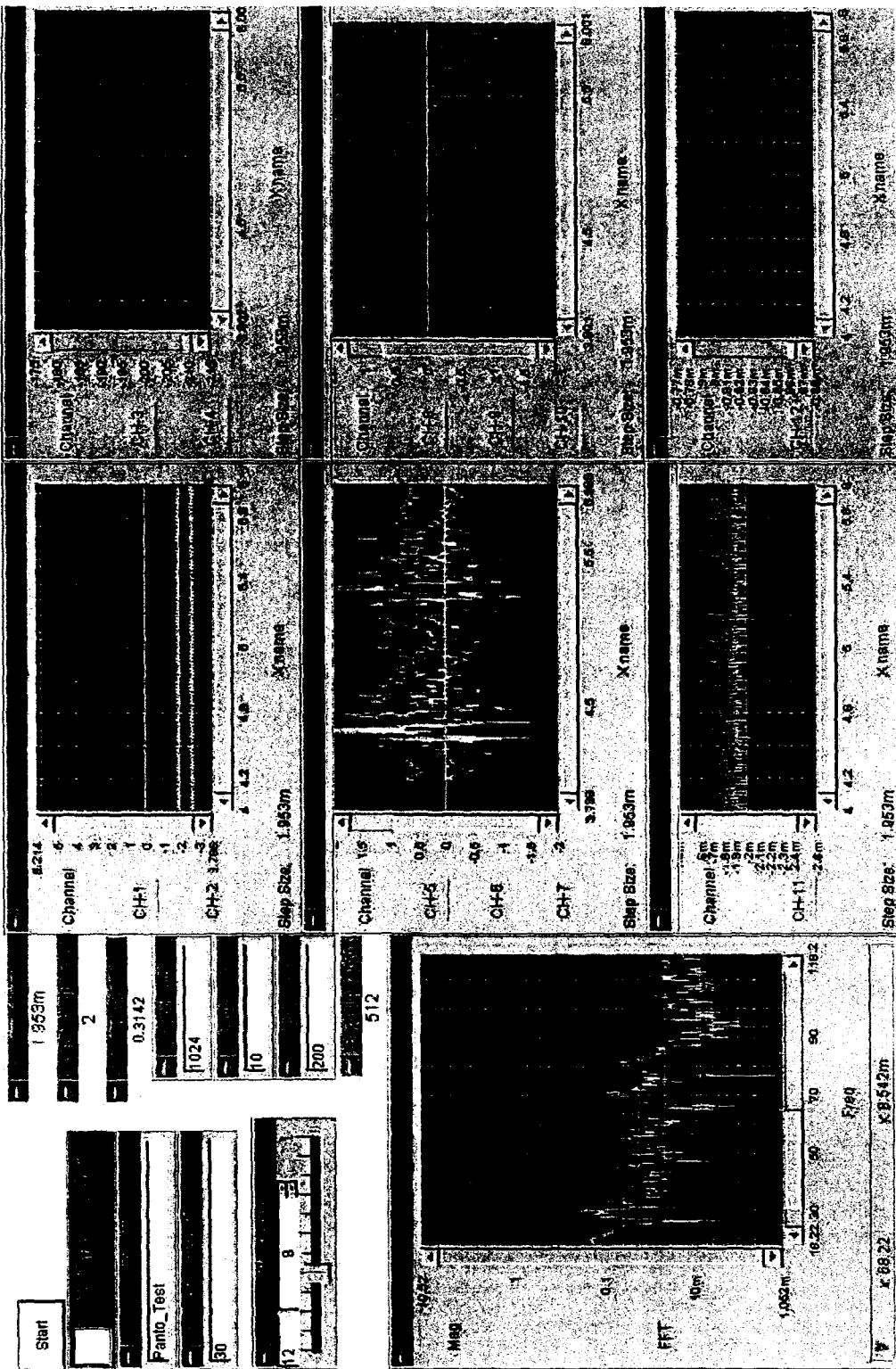


Fig. 3 전체 Display 화면

후처리 분석방법은 VEE프로그램에서 저장한 데이터를 가지고 분석하는 방법으로서, 전처리 분석 보다 훨씬 정확하고 구체적으로 분석 할 수 있으며, Matlab의 m-file을 실행해서 오프라인 상에서 수행 할 수 있다.

3. 판토티그래프의 동특성

판토티그래프의 팬헤드에 작용하는 실제 접촉력과 알고리즘을 통하여 구한 정적 접촉력 사이에는 관성력만큼의 차이가 발생하므로 보정을 해주어야 한다. 관성력 보정 방법은 해당되는 경우에 따라 다르다. 가선계로부터 팬헤드에 가해지는 접촉력의 주요 주파수 성분이 팬헤드의 굽힘 진동모드와 비교하여 저주파인 경우는 팬헤드를 강체로 간주하여 관성력을 구할 수 있으며, 이때는 1개 혹은 2개의 가속도계를 사용하여 팬헤드의 가속도를 측정하면 된다. 그러나 접촉력의 주요 주파수 성분이 팬헤드의 구조진동 고유진동수에 근접하는 경우에는 강체로 간주할 수 없으므로 팬헤드 굽힘진동에 의한 관성력을 계산해 주어야만 하고 이때에는 여러개의 가속도계를 사용한 관성력 산출 알고리즘을 개발하여야만 한다.

(1) G7 판토티그래프 팬헤드의 동특성

판토티그래프는 편리상 집전이 이루어지는 팬헤드와 팬헤드를 지지하는 기구부로 나눌 수 있다. 먼저 팬헤드의 동특성을 알아보기 위하여 팬헤드를 판토티 기구부로부터 분리시킨 자유지지조건에서 충격가진 실험을 수행하였고 팬헤드의 가속도와 가진력 사이의 전달함수를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서는 200Hz 주파수 대역에서 138Hz, 188Hz에 두 개의 진동모드가 존재하는 것을 보이고 있다. 가진 위치를 바꾸어 가면서 모드 응답을 측정한 결과 두 진동모드 모두 팬헤드의 중앙에서 큰 응답을 보이고 양 끝에서 작은 응답을 보이는 굽힘모드로 판단된다.

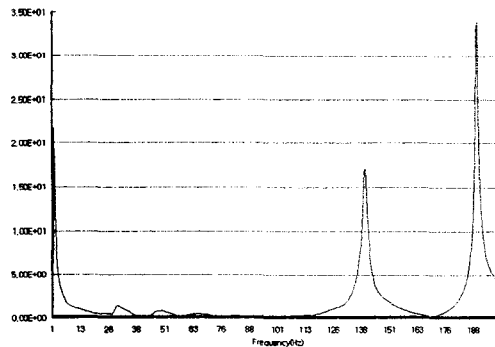


Fig. 4 팬헤드 가속도 전달함수(자유지지)

(2) G7 판토티그래프 기구부의 동특성

G7 판토티그래프의 주요 compliance는 플런저 스프링과 팬헤드 스프링에 기인한다. 먼저 플런저 스프링에 기인한 저주파영역의 공진주파수를 구하기 위하여 집전판 중간 지지부에 초기변위, 충격가진 등의 다양한 가진력을 가하고 가속도, 변위 응답 등을 살펴보았다. Fig. 5의 초기변위에 의한 가속도 응답을 보면 플런저 스프링에 의한 공진주파수는 1.7Hz로 나타난다. 이 값은 개발될 한국형 고속전철이 시속 350km/h의 최고속도를 가지고 질주할 때 1경간(63m)을 주행하는데 소요되는 시간의 역수에 해당되는 1.54Hz와 가까운 수치이다. 다음

팬헤드 스프링에 기인하는 팬헤드의 상하방향 공진주파수를 알아보기 위하여 팬헤드스프링의 바로 위에서 가진력과 가속도를 측정하였다. Fig. 6에 나타난 대로 주요 공진주파수는 6Hz이나 15.5Hz, 27.5Hz등 다른 주파수 성분 또한 두드러지는데 팬헤드 스프링 체결부의 동특성에 기인하는 것으로 사료된다.

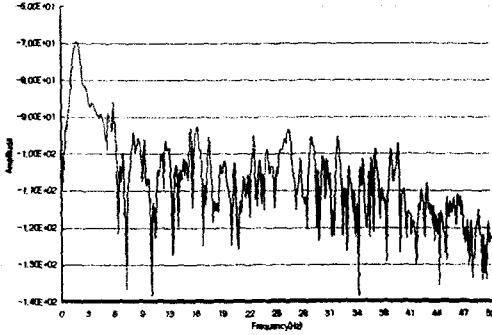


Fig. 5 중간지지부 상하방향 진동

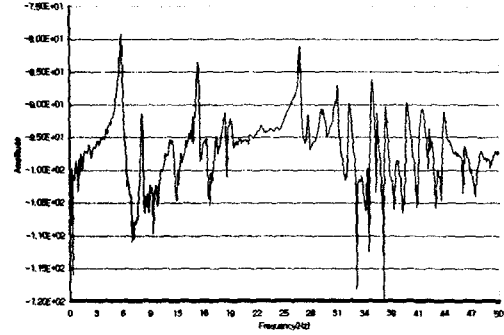


Fig. 6 팬헤드 상하방향 진동

4. 접촉력 측정

접촉력과 굽힘 변형을 사이의 비례계수식을 구하기 위하여 G7 판토그래프 팬헤드 하부 2개의 위치에 스트레인 게이지를 부착하였다. 습판이 2개이므로 도합 4개의 위치에 full-bridge회로를 구성하여 스트레인 게이지를 부착하였으며 모두 16개의 스트레인 게이지가 사용되었다. 가선과 판토가 접촉하는 최대 편위가 습판 중앙으로부터 ±20cm이므로 게이지를 습판 중앙으로부터 ±21cm위치에 부착하였다. G7 판토그래프 팬헤드의 치수는 Fig. 7과 같다.

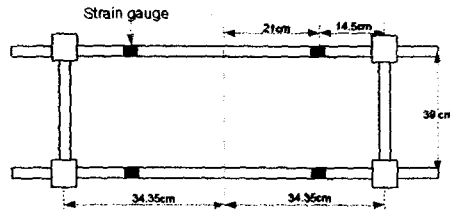


Fig. 7 팬헤드 치수

실제 팬헤드는 카본 strip이 steel보에 부착된 형태의 일정한 범위의 곡률을 가지는 구조이나 접촉력 측정 알고리즘에는 단일 재질의 균일보 모델로 가정 하였다. 이경우에 스트레인과 모멘트 사이에는 아래와 같은 선형적인 관계가 성립된다.

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

또한 모멘트와 하중사이에 아래와 같은 관계식이 존재하므로 스트레인과 하중사이 또한 선

형적인 관계가 성립한다.

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

이러한 선형관계의 비례계수를 먼저 구하기 위하여 편위 및 하중을 바꾸어 가면서 팬헤드 하부에 부착된 스트레인 게이지로부터 스트레인 값을 읽어들이며 이때 발생하는 스트레인과 하중사이의 선형성을 확인한다. 선형성이 확인되면 스트레인과 모멘트 사이의 선형적인 비례관계를 이용하여 다양한 편위 및 하중에 따른 스트레인 선도를 구성한다. 이 스트레인 선도로부터 최대 굽힘 스트레인 값과 모멘트와 하중 사이의 관계식을 이용하여 최대 굽힘 모멘트를 구한 다음 스트레인과 하중 사이의 관계식을 이용하여 비례계수를 도출하였다.

다양한 편위와 하중을 적용하여 비례계수의 평균값을 구하고, 이를 평균단면계수라 부르기 로 한다.

계측된 스트레인 값으로부터 평균단면계수를 이용하여 모멘트를 구한후 하중을 예측한다. 측정된 스트레인 값으로부터 접촉력의 크기 및 편위를 예측하는 알고리즘을 요약하면 Fig. 8과 같다. 이렇게 도출된 접촉력은 일정한 값을 가지게 되며 정적 접촉력이라고 부르기 로 한다.

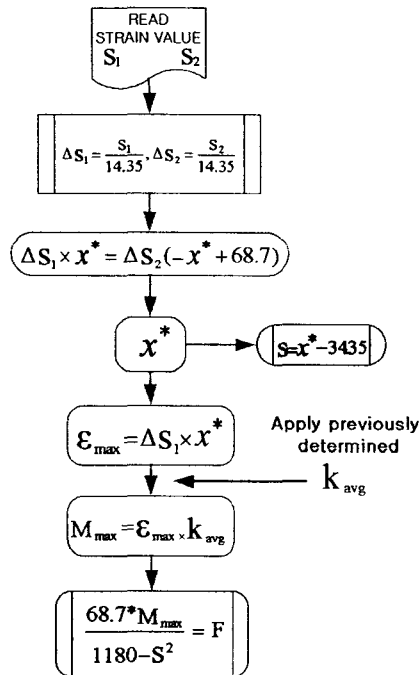


Fig. 8 F와 S를 결정하기 위한 Flowchart¹⁾

개발된 알고리즘을 사용하면 계측된 스트레인 값으로부터 접촉력의 크기 및 편위를 도출할 수 있다. 일단 접촉력을 바꾸어 가면서 스트레인 값을 측정하였다. 단일재질의 균일한 보 모

1) 2001년 춘계 소용진동 공학회

텔에 기초한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 계측된 스트레인과 가해진 하중사이의 선형성을 확인하였다. Fig. 9는 편위를 바꾸어가면서 계측된 스트레인과 하중 사이의 관계를 예시한 것이다.

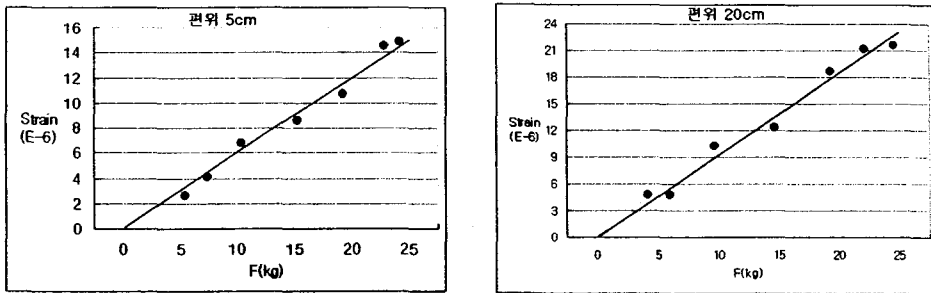


Fig. 9 편위에 따른 하중과 스트레인관계

팬헤드가 상하방향으로 움직일 때 팬헤드의 상부에 작용하는 접촉력과 하부의 측정된 스트레인으로 부터 도출된 정적 접촉력 사이에는 팬헤드의 가속도에 의한 관성력 만큼의 차이가 존재하게 되므로 관성력을 측정하여 보정해 주어야만 한다. 이러한 동적 접촉력 측정에서는 유효 주파수 범위에 따라서 관성력의 측정 방법이 달라진다.

접촉력이 팬헤드의 구조진동모드와 비교하여 저주파 성분을 가질 때 (G7 판토품라프에서는 50 Hz이내) 팬헤드를 강제로 간주하고 관성력을 측정할 수 있다. 즉 1~2개의 가속도계를 팬헤드의 편리한 위치에 부착하여 가속도를 구한 후 팬헤드 질량과 곱하여 관성력을 산출한다. 이 경우에 실제 접촉력 F_c 는 굽힘 스트레인으로 부터 도출된 정적접촉력 F 를 다음과 같이 보정하여 구한다.

$$F_c = F + m_H * a_H \quad (3)$$

여기서 m_H 는 팬헤드의 질량을 a_H 는 측정된 가속도를 나타낸다.

접촉력이 무시할 수 없는 고주파 성분을 포함하는 경우 주요 주파수 성분이 팬헤드의 첫번째 공진주파수에 가까워 질수록 (판토품라프의 경우 약 130Hz)위에 기술한 관성력의 측정 오차가 증가하게 되므로 보다 정확한 관성력을 구하기 위해서는 여러 개의 가속도계를 사용하여 팬헤드의 운동을 보다 세밀하게 측정하고 관성력을 추정하여야만 한다.

5. 결론

신호계측 및 측정시스템의 하드웨어를 구성하고 소프트웨어를 개발 하였다. 개발된 신호계측 및 처리시스템을 판토품라프 전용시험기를 사용한 동특성 및 접촉력 시험에 적용하였다.

(1) 신호계측 및 처리 시스템

집전성능 평가를 위하여 HP VEE 프로그램을 이용한 데이터 수집 및 처리 시스템을 개발 하여 판토품라프에서 발생하는 다양한 물리적인 신호의 수집·처리에 적용하였으며, 현재 4

개의 스트레인 게이지 신호와 6개의 가속도신호, 2개의 로드셀 신호를 수집·처리할 수 있도록 설정되었다. 또한, G7 판토히라프를 대상으로 가속도와 스트레인 측정을 수행하였고 여러 개의 가속도 및 스트레인 신호를 시간대역과 주파수대역에서 온라인으로 동시에 처리하는 기능을 검증하였다.

(2) 판토히라프 실험

판토히라프 전용시험기를 사용하여 실험을 수행 하였으며, G7 판토히라프의 고유주파수 성분을 구하였다. 4개의 스트레인 게이지와 6개의 가속도 신호를 동시에 수집·처리하였다. 판토히라프 기구부의 suspension 스프링에 의한 고유주파수는 매우 낮음이 확인되었으며, 팬헤드 굽힘진동의 고유주파수 성분은 130Hz 이상임을 확인되었다. 따라서 접촉력의 주요 주파수 성분이 50Hz미만인 경우에 팬헤드를 강체로 간주하여 동적 접촉력을 측정해도 무방할 것이다. 그러나 접촉력이 무시할 수 없는 50Hz 이상의 주파수 성분을 가지는 경우 정확도를 높이기 위해서는 팬헤드의 굽힘진동이 관성력 계산에 포함되어야한다.

6. 참고문헌

- [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
- [5] 김정수, 박진근, 박성훈 "고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발" 홍익대 G7과제 보고서 pp. 721~764.
- [6] 김정수,백인혁 2001, "판토히라프의 동적 접촉력에 관한 연구" 소음진동학회 춘계논문집 pp. 780~785.