

고속전철 기술개발사업 본선 시운전 집전시험계획

A Current Collection Performance On-line Test Plan in Korea High Speed Train Development Project

조용현,*

최강윤,**

백광선*

Yong Hyeon Cho,

Kangyoun Choe,

Kwangsung Baik

ABSTRACT

Current collection performance on-line tests for a Korean High Speed Train being developed in G7 project is scheduled to start in June, 2002. In this paper, preparatory efforts for measuring contact forces which is regarded as one of major measuring items in the test are introduced. Specifically speaking, review of frequencies related with contact force fluctuations, brief of contact force measuring algorithm, review of measuring instrument specifications and development of a data acquisition program are presented.

1. 서론

고속전철기술개발사업에서 개발하는 시제열차(이하 시제열차라고 함)의 성능을 확인하는 본선 시운전이 2002년 6월부터 시작될 예정이다. 집전 성능은 속도 향상에 영향을 미치는 주요 성능인자이므로 본선 시운전에서 여러 속도 단계별로 측정하려고 한다. 고속전철기술개발사업 본선 시운전에서는 집전 성능으로 이선롤과 전차선/팬터그래프 사이의 접촉력을 측정하려고 한다. 본 논문에서는 접촉력 측정 시험만으로 범위를 제한하여 집전시험계획을 소개하고자 하며, 접촉력 변동 관련 주파수 검토, 접촉력 측정 알고리즘, 계측 장비 검토, 데이터 취득프로그램 등에 대하여 기술하였다.

2. 접촉력 변동 관련 주파수 검토

시제 열차가 고속 주행을 하는 경우 이선에 직접 영향을 미치게 되는 전차선과 팬터그래프 사이의 접촉력은 여러 가지 요인에 의하여 변화하게 된다. 변화 요인들로는 가선계와 팬터그래프의 공진, 경간 및 드로퍼 통과에 의한 가진, 공력에 의한 가진, 전차선에서의 파동 전파 및 반사 등이 있다.

2.1 가선계 공진 주파수

KTX 가선계(경간 길이 54m, 경간 3개)를 대상으로 유한요소 해석 모델을 만들어 가선계의 탄성도(기계공학에서는 컴플라이언스라고도 함)와 모드 해석을 수행하였다. 그림 1에는 탄성도 해석 결과가 나와 있는데 경부고속철도 계약자가 제출한 KTX 가선계의 탄성도와 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 이것은 KTX 가선계의 유한요소 해석 모델이 정확하게 만들어졌다는 것을 의미한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

KTX 가선계는 전차선, 조가선, 드로퍼, 크랩프, 곡선당김금구 등의 여러 가지 부품으로 구성되어 있으므로 이들의 무게를 정확히 유한요소 해석 모델에 입력하게 되면 정확한 공진 주파수가 계산될 수 있을 것이다. 표 1에는 공진 주파수 해석 결과가 나와 있고 그림 2에는 대표적 진동모드인 1차 모드 형상이 나와 있다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 가선계의 공진 주파수는 고차 모드인 20차 모드까지 고려하여도 10 Hz 이하이므로 장력에 의한 강성 효과만을 고려한다면 가선계는 저주파 특성을 가진 구조물이라고 볼 수 있다.

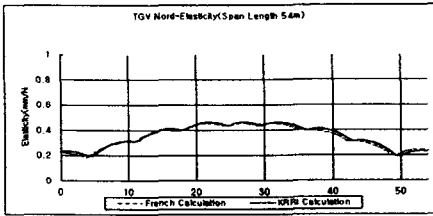


그림 1 KTX 가선계의 탄성도 해석 결과



그림 2 KTX가선계의 1차 진동mode($f = 1.03\text{Hz}$)

표 1 KTX 가선계의 고유진동수

진동모드	주파수[Hz]	진동모드	주파수[Hz]	진동모드	주파수[Hz]	진동모드	주파수[Hz]
1	1.03	6	2.42	11	4.52	16	5.61
2	1.14	7	3.12	12	4.80	17	5.94
3	1.21	8	3.40	13	5.00	18	6.34
4	2.08	9	3.61	14	5.26	19	6.69
5	2.28	10	4.19	15	5.55	20	7.09

2.2 팬터그래프 서스펜션 공진 주파수

그림 3에 나와 있는 시험 장비를 사용하여 G7 팬터그래프(시제 2)를 대상으로 수행되었던 추중시험에서 얻은 결과 즉 추중 진폭이 그림 4에 나와 있다. 그림 4에 실선은 추중 진폭의 해석 결과이고 점선은 실측치이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 팬터그래프 서스펜션의 공진 주파수는 10 Hz 이하라는 것을 알 수 있다.

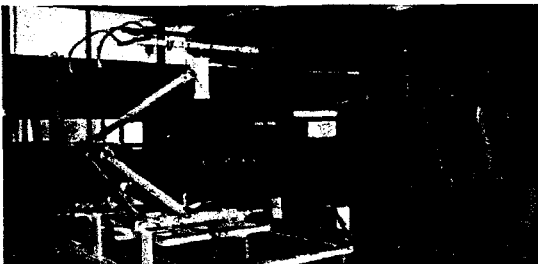


그림 3 G7 팬터그래프(시제 2 추중시험)

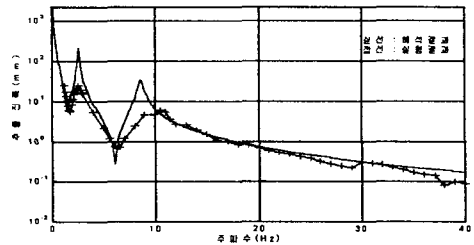


그림 4 추중 진폭 시험 결과(시제 2 대상)

2.3 팬터그래프 집전판 공진 주파수

집전판에 작용하는 접촉력의 일부를 이루고 있는 관성력을 측정하기 위해서는 집전판의 동적 거동을 알 필요가 있다. G7 팬터그래프에 부착된 집전판을 임팩트 헤머, 가속도계, 다이내믹 어날라이저를 사용한 임팩트 시험을 통해 공진 모드를 찾아 본 결과가 그림 5와 6에 나와 있다. 시험 결과에서 볼 수

있듯이 G7 집전판은 138 Hz, 189 Hz에서 굽힘 모드 공진이 있다는 것을 알 수 있다. 약 130 Hz 이하의 가진 주파수에서는 집전판이 강체 운동을 하게 되고, 130 Hz 이상에서는 굽힘모드 변형을 할 수 있다는 점을 관성력 측정 알고리즘 설계시 고려해야 할 것이다. 시험 결과에서 한 가지 특이한 점은 집전판의 굽힘 모드가 2개 나오는 것인데 이는 팬터그래프에 길이가 다른 2개의 집전판이 설치되어 있고 이들이 강봉(Steel bar)으로 서로 연결되어 있어 진동 모드가 결합되어 있기 때문이라고 추정된다.

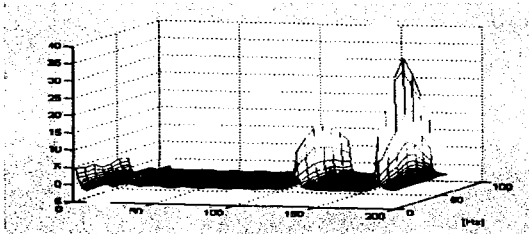


그림 5 집전판 공진 모드 형상

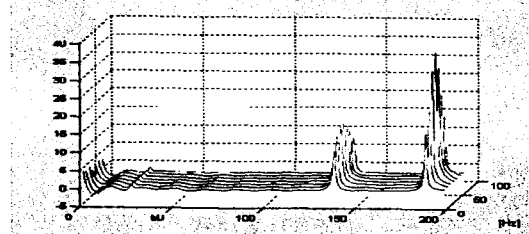


그림 6 집전판 공진 주파수

2.4 경간 및 드로퍼 통과 주파수

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 가선계의 탄성도는 곡선당김금구 위치와 경간 중앙 위치에서 차이가 있으므로 팬터그래프가 동일한 접촉력으로 전차선을 습동하더라도 수직 변위의 변화가 생기게 된다. 또한, 전차선은 그림 7과 같이 사전이도(Presag)가 있어 팬터그래프가 전차선과 접촉하면서 고속으로 주행하면 이러한 사전이도에 의하여 팬터그래프의 수직 변위는 변화하게 된다. 열차가 주행하면서 생기는 이러한 가진의 주파수를 경간 및 드로퍼 통과 주파수라고 한다.

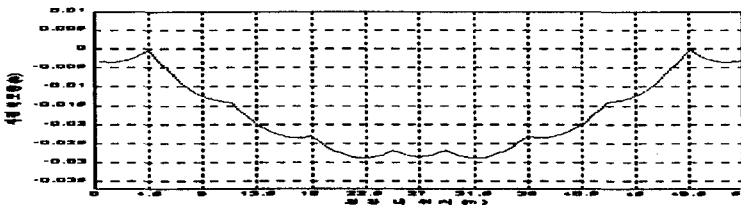


그림 7 전차선 사전이도(Presag)

경간 통과 주파수는 경간길이, 열차의 주행 속도에 따라서 변하게 되는데 시제 열차가 350 km/h로 경간 길이 40.5~63m의 가선계를 주행하게 되는 경우 경간 통과 주파수는 1.5 ~ 2.4 Hz가 된다. 마찬가지로, 드로퍼 통과 주파수도 드로퍼 간격, 열차의 주행 속도에 따라서 변하게 된다. 다음 식은 드로퍼 간격 사이에 그림 7과 같이 사전이도가 있을 때 접촉력 변동을 해석적으로 유도한 식이다[1].

$$|F_1| = \frac{2\rho gL}{\pi} \left| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p} \right|_{\omega=\omega_0} \cdot \beta \quad (1)$$

여기서, ρ 는 선밀도, g 는 중력 가속도, L 은 드로퍼 간격, Z_p 는 팬터그래프의 기계적 임피던스, Z_t 는 전차선의 기계적 임피던스, v 는 열차 주행 속도, c 는 전차선의 파동전파속도를 나타내고,

$$\beta = \frac{v}{c} = 0.79, \quad (2)$$

$$\omega_0 = 2\pi\beta \frac{c}{L} \quad (3)$$

이다.

시제 열차가 350 km/h로 드로퍼 간격 6.75, 4.5m의 가선계를 주행하게 되는 경우 드로퍼 통과 주파수는 식(3)으로부터 14.4, 21.6 Hz가 됨을 알 수 있다.

2.5 공력 관련 주파수

열차가 터널을 진출입하게 되면 순간적으로 공력 변화가 생기게 되므로 고주파 성분의 공력 변화가 생길 수 있다. 팬터그래프에 작용하는 공력 중에서 100 Hz 이하의 공력은 정상 상태의 접촉력을 유발하나 이 보다 높은 주파수의 공력은 접촉력 변동을 유발한다고 한다[2]. 고주파 성분의 공력을 유발할 수 있는 터널 등과 같은 인자들이 집전에 미치는 영향을 평가하기 위하여 100 Hz의 필터링을 고려할 필요가 있다.

2.6 반사파에 의한 가진 주파수

팬터그래프가 전차선을 습동하면서 주행하면 전차선의 횡방향 파동이 팬터그래프를 중심으로 전·후방으로 전파하게 된다. 전·후방으로 전파된 파동은 드로퍼 크랩프 등과 같은 경점에 의해 반사되어 다시 팬터그래프로 돌아오게 된다. 팬터그래프가 주행하게 되면 전방에서 반사되어 돌아오는 파동은 파동전파속도에 열차의 주행속도를 더한 속도로 들어오고, 후방에서 반사되어 돌아오는 파동은 파동전파속도에 열차의 주행속도를 뺀 속도로 들어오게 된다. 그러므로 전방에서 반사되어 돌아오는 반사파가 후방에서 반사되어 돌아오는 반사파에 비하여 접촉력 변동에 미치는 영향이 크다. 전방에서 반사되어 돌아오는 반사파에 의한 접촉력 변동을 해석적으로 구한 식이 다음에 나와 있다[1].

$$|F_2| = \frac{2\rho g L}{\pi} |\gamma_R| \left| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p} \right|_{\omega=\omega_0} \cdot \left| \frac{Z_p}{Z_t + Z_p} \right|_{\omega=\omega_{wv}} \cdot \frac{(1+\beta)\beta}{1-\beta} \quad (4)$$

여기서, ω_0 는 식(3)과 같고, γ_R 은 파동 반사 계수로 입사 파동의 진폭 대 반사 파동의 진폭 비를 나타내며,

$$\omega_{wv} = 2\pi \frac{(1+\beta)\beta}{1-\beta} \frac{c}{L} \quad (5)$$

이다.

반사파에 의한 접촉력의 변동 즉 식(4)의 계산 값과 드로퍼 사이의 사전이도에 의한 접촉력의 변동 즉 식(1)의 계산 값이 그림 8에 나와 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 주행속도가 파동전파속도에 가까이 갈수록 반사파에 의한 접촉력 변동이 커짐을 알 수 있다. 이는 식(4) 안에 $(1+\beta)/(1-\beta)$ 즉 도플러 계수가 들어 있기 때문이다.

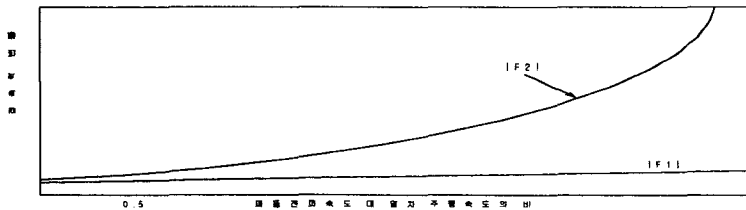


그림 8 주행속도가 미치는 접촉력 변동

KTX 가선계(전차선 장력 20kN)를 350 km/h로 주행하게 되면 ω_0 는 21 Hz, ω_{wv} 는 183 Hz가 되고, 300 km/h로 주행하게 되면 ω_0 는 18.5 Hz, ω_{wv} 는 97 Hz가 된다. 따라서 반사파에 의한 접촉력 변동을 충분히 측정하려면 최대 183 Hz까지의 신호를 받을 필요가 있다.

2.7 주파수 검토 결과

고속에서는 반사파에 의한 영향이 접촉력을 변동시키는 주요 요인 중의 하나가 되므로 관심의 주파수를 350 km/h로 주행하는 경우에는 190 Hz까지로, 300 km/h로 주행하는 경우에는 100 Hz까지로 잡는 것이 바람직할 것으로 보인다. 350 km/h로 주행하게 되는 경우에는 관심의 주파수 내에 팬터그래프 집전판의 굽힘 공진모드가 존재하므로 집전판에 가속도계를 3개씩 부착하여 관성력을 측정하는 것이 바람직

직할 것으로 보인다. 또한, 터널 등을 지날 때에 발생하는 공력이 접촉력 변동에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해서는 측정 결과에 대하여 100 Hz로 Low pass 필터링을 해 보는 것도 필요할 것으로 보인다. 이상과 같이 접촉력 변동을 측정·분석하기 위해서는 접촉력 측정 관련 신호들을 1 kHz 이상으로 샘플링하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

3. 접촉력 측정 방법

3.1 접촉력 측정 관련식

그림 9에는 팬터그래프가 집전을 하면서 주행하는 경우에 집전판에 작용하는 힘들을 그린 자유 물체도가 나와 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 접촉력 F_c 는 집전판의 서스펜션 위치에 작용하는 전단력과 관성력 그리고 집전판의 양력에 의하여 힘의 평형을 이루고 있으므로 다음과 같은 힘의 평형식을 구할 수 있다.

$$F_L + F_R - \sum m_i a_i = F_c - F_{aero} \quad (6)$$

여기서 전단력 F_R , F_L 은 스트레인 게이지를 사용하여 구하려고 하고, 등가 질량 m_1 , m_2 , m_3 은 팬터그래프의 동특성시험을 통해 미리 구하며, a_i 는 가속도로 관심의 주파수 내에 굽힘 공진모드가 존재하므로 3개의 가속도계를 부착하며, 집전판 양력 F_{aero} 은 사전에 공력 시험을 통해 측정한다.

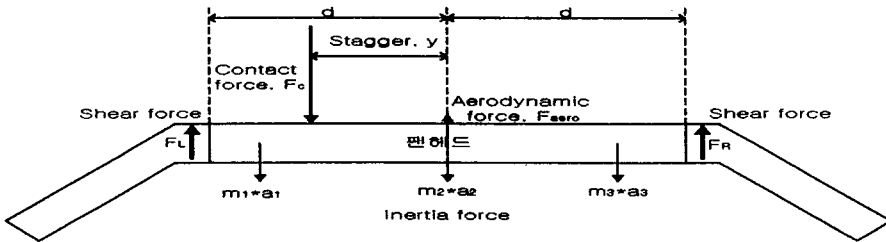


그림 9 집전판의 자유 물체도

3.2 센서 설치 위치

접촉력을 측정하기 위한 센서의 설치는 그림 10과 같다. 전단력을 측정하기 위하여 스트레인게이지(그림에서 사각형으로 표시)를 사용하고, 관성력을 측정하기 위하여 가속도계(그림에서 원으로 표시)를 사용한다. 일반적으로 전단력을 측정하기 위하여 90도 스트레인 게이지 로제트를 측면에 부착하나 집전판의 경우에는 측면의 높이가 낮아 이를 부착할 수 없어 집전판 아랫면에 단축게이지를 4장씩 총 16장을 부착하여 전단력을 측정한다. 부착 방법을 설명하자면 R_1 , R_2 는 서스펜션 스프링 사이에 부착하고, R_3 , R_4 는 서스펜션 스프링 바깥에 부착하고 (R_1 - R_3), (R_2 - R_4)가 될 수 있도록 Full Bridge를 구성하여 전단력을 측정한다. 이렇게 Full bridge를 구성함으로써 Single active gage에 비하여 아크 등으로 인해 발생하는 잡음을 상쇄할 수 있고, 같은 접촉력이 작용하더라도 더 큰 신호를 얻을 수 있다.

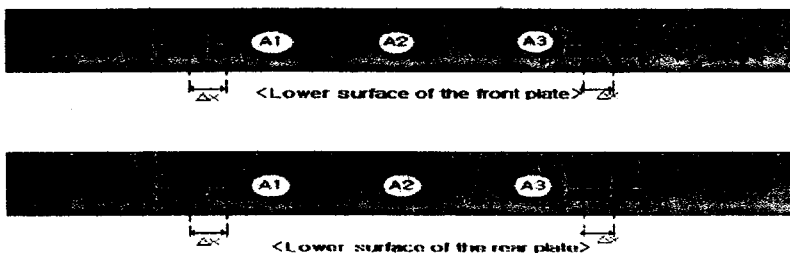


그림 10 집전판에서의 센서 설치 위치

4. 집전시험용 데이터 전송 시스템

4.1 측정 환경 및 데이터 전송방식

집전을 하는 상태에서 접촉력을 측정하려면 고전압, 대전류가 흐르는 팬터그래프로부터 신호를 받아야 하므로 데이터를 취득하는 일반 환경과 센서가 부착된 고전압 환경을 물리적으로 분리해야 한다. 이러한 기능을 담당할 수 있는 장비를 집전시험용 데이터 전송시스템이라 하는데 신호 취득 도중에 잡음의 혼입 방지를 위하여 프랑스, 독일, 일본에서는 집전시험용 데이터 전송 방식으로는 Spread spectrum telemetry 혹은 광전송식 Optical fiber 등을 사용하고 있다. G7 본선 시운전에서는 과거 집전 시험에 사용된 실적이 있는 제품을 사용할 예정이다.

4.2 센서 및 브릿지 앰프 사양

집전판에 부착하는 스트레인게이지로는 잡음 혼입을 막기 위하여 무유도형 게이지를, 가속도계로는 역시 잡음의 혼입을 막을 수 있는 스트레인 게이지형 가속도계를 사용한다.

신호를 처리하는 브릿지 앰프의 형식으로 직류 방식과 교류 방식이 있다. 직류 방식을 사용하게 되면 전원 주파수와 같은 잡음이 혼입된 경우에 신호와 잡음을 함께 증폭하여 측정 결과에 오차를 유발할 수 있는 문제점이 있으나 교류 방식을 사용하게 되면 DC 성분의 잡음은 제거할 수 있고 전원 주파수를 포함하지 않도록 설계할 수 있다고 한다[3, 4]. 따라서 G7 본선시운전에서는 교류 브릿지 앰프 방식을 선정하였다.

4.3 채널수

접촉력을 측정하기 위한 채널수는 스트레인게이지용으로 4채널, 가속도계용으로 6채널이 필요하다. 접촉력을 측정하면서 집전판의 온도, 팬터그래프 하부 기구의 운동을 감시하기 위하여 필요시 RTD와 가속도계가 부착되어야 하므로 16채널의 데이터 전송 시스템을 구비한다.

4.4 샘플링 주파수

고속 주행 시험시 발행하게 될 접촉력 변동의 여러 가지 요인들을 분석하기 위하여 채널별로 1 kHz로 샘플링하는 것이 필요하다.

5. 데이터 취득 프로그램

5.1 프로그램 언어

집전시험용 데이터 취득 장치로 사용할 HP VXI를 제어할 수 있는 데이터 취득용 프로그램을 HP VEE(ver. 5.0)로 작성하였다.

5.2 기능

- 데이터 취득 채널 수 : 16 채널까지 조정 가능
- FFT 기능 : 신호를 받으면서 원하는 채널의 데이터에 대한 FFT 수행 가능
- 데이터 현시 및 감시 : 취득하고 있는 데이터의 변화 추이를 볼 수 있는 그래프 현시
- 데이터 저장 : 저장이 필요할 경우 PC Hard 디스크에 저장
- 파일의 크기 지정 : 한 파일이 지나치게 커지는 것을 막을 수 있게 한 파일에 저장되는 줄 수를 지정할 수 있음
- Set-up 기능 : 센서에 공급되는 Volt 설정, 샘플링 주파수 설정, 데이터 블록사이즈 등

5.3 취득 프로그램 구조

취득 프로그램의 최상위 레벨 구조와 User Interface Window가 그림 11, 12에 나와 있다.

6. 결론

팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력은 집전 성능을 평가하는 데에 사용되는 주요 측정항목으로 정확한 측정을 위해서는 데이터 샘플링 주파수를 주의 깊게 정해야 한다. 접촉력 변동과 관련이 있는 여러 가지 요인들을 검토해 본 결과 반사파를 제외한 나머지 요인들은 22 Hz 까지 고려하면 되지만 고속 주행시 영향을 크게 미치는 반사파에 의한 접촉력 변동은 183 Hz까지 고려해야 함을 알 수 있었다. 또한, 터널 등을 지날 때에 발생하는 공력이 접촉력 변동에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해서는

측정 결과에 대하여 100 Hz로 Low pass 필터링을 해 보는 것도 필요할 것으로 보인다. 이상과 같이 접촉력 변동을 측정·분석하기 위해서는 접촉력 측정 관련 신호들을 1 kHz 이상으로 샘플링하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

접촉력은 집전판에 작용하는 전단력, 관성력, 공력과 힘의 평형 관계를 이루게 되므로 힘의 평형식으로부터 접촉력을 구할 수 있다. 전단력은 무유도형 스트레인게이지의 신호를 받아 구하고, 관성력은 스트레인게이지형 가속도계의 신호를 받아 구한다. 스트레인게이지는 Full Bridge 회로를 구성시킴으로써 잡음을 상쇄시키고, S/N비를 개선할 수 있게 하였다.

집전을 하는 상태에서 접촉력을 측정하려면 고전압, 대전류가 흐르는 팬더그래프로부터 신호를 받아야 하므로 데이터를 취득하는 일반 환경과 센서가 부착된 고전압 환경을 물리적으로 분리해야 한다. 이러한 기능을 담당할 수 있는 장비를 집전시험용 데이터 전송시스템이라 하는데 신호 취득 도중에 잡음의 혼입 방지를 위하여 프랑스, 독일, 일본에서는 집전시험용 데이터 전송 방식으로는 Spread spectrum telemetry 혹은 광전송식 Optical fiber 등을 사용하고 있다. G7 본선 시운전에서는 과거 집전 시험에 사용된 실적이 있는 제품을 사용할 예정이다.

측정 데이터는 HP VXI를 사용하여 취득하고 이를 PC에 저장하려고 한다. VXI를 제어하기 위하여 HP VEE로 데이터 취득 프로그램을 작성하였다. 데이터 취득 프로그램은 편리한 User Interface Window를 가지고 있으며 측정 전에 VXI의 Set-up을 할 수 있고 측정을 하면서 측정 결과를 감시할 수 있다.

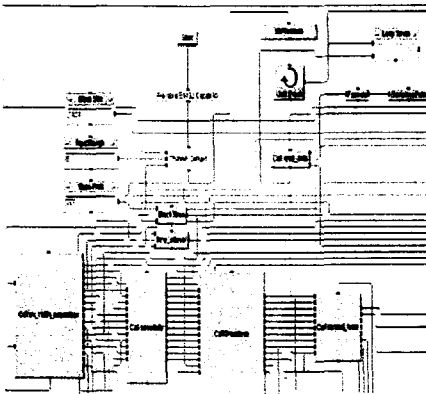


그림 11 취득 프로그램의 구조

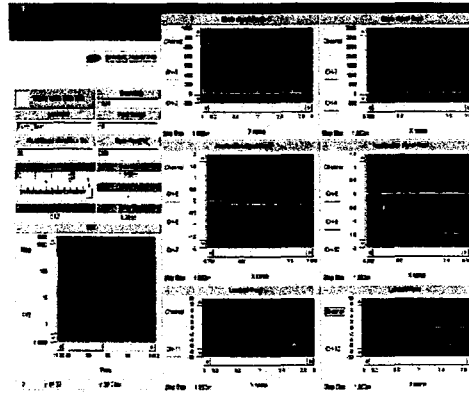


그림 12 취득 프로그램의 User Interface화면

[참고문헌]

1. Mitsuo ABOSH, Kaatsushi MANABE, "Contact Force Fluctuation between Catenary and Pantograph," RTRI REPORT Vol. 13, No. 7, 1999.7
2. Mitsuru IKEDA, Takayuki USUDA, "Study of the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire," RTRI REPORT Vol. 14, No. 6, 2000.6
3. Karl Hoffmann, "An Introduction to Measurements using Strain Gages," Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
4. 일본 메이세이전기(주) 브릿지 앰프 관련 기술검토서