

철도구조물 상시계측시스템의 교정방안에 관한 연구

A Study on the calibration of health monitoring system installed in rail infrastructures

이준석¹, 최일윤¹, 이현석¹, 고동춘²

Jun S. Lee, Il-Yoon Choi, Hyun Suk. Lee, Dong Choon. Ko

Keywords : Calibration(교정), Gauge factor (교정상수), Measurement System(계측시스템)

Abstract

A health monitoring system becomes a very useful tool to obtain information on long term behavior of the important railway structures such as very long span and special type bridges. It can be also used to give a warning signal to the maintenance engineer when the structure shows abnormal behavior. However, due to long term use and temperature changes, the health monitoring system needs to be calibrated periodically. In this study, calibration and gauge factor readjustment process made for the health monitoring system installed in the railroad bridges and tunnel are reviewed and a few findings are updated. Future work will be concentrated on the long-term analysis of the measurement data and on the database structures so that the assessment of the structure is possible

1. 서론

철도교량 및 철도터널 등의 철도 노반구조물은 시공 정밀도 및 공용기간 등 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 설계시 예측한 이상적인 거동과는 다른 양상을 보이며 이를 대비한 구조물의 안전성 확보대책이 요구된다. 일반적으로 중요 구조물은 정기점검 및 정밀안전진단 등을 통하여 구조적 안전성 및 내하력 등을 확인하고 있으나 점검자의 주관, 재하시험 방법 및 계측기기의 상태에 따라 상이한 결과를 보일 수 있다. 따라서 국내 주요 교량 및 대표적인 구조물에

대하여는 상시계측시스템이 설치·운영되고 있으며(이준석 등, 2000) 외국의 경우에도 설치 예가 보고된 바 있다(Li 등, 2001). 그러나 상시계측시스템의 원활한 운영을 위하여는 계측센서의 적정 위치선정(Heo 등, 1997) 및 주기적인 교정이 필수적이며, 특히 전기저항식 센서를 채택하여 상시계측시스템을 구축하는 경우에는 적절한 검정 및 교정작업이 계측데이터의 정밀도를 향상시키는 필수조건이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 교량 및 터널 구조물에 설치되어 있는 계측센서, 현장계측실내 데이터 저장장치 및 중앙계측실내 데이터베이스에 대한 종합적인 검정방안과 이에 따른 교정작업을 중심으로 최근의 연구결과를 기술하였다.

다음에서는 구조물 상시계측용 계측센서 및 관련 시스템에 대한 검정 및 교정결과를 분석하고 교정계수

*1 정희원, 한국철도기술연구원 철도토목연구팀

*2 정희원, 철도청 시설서기관

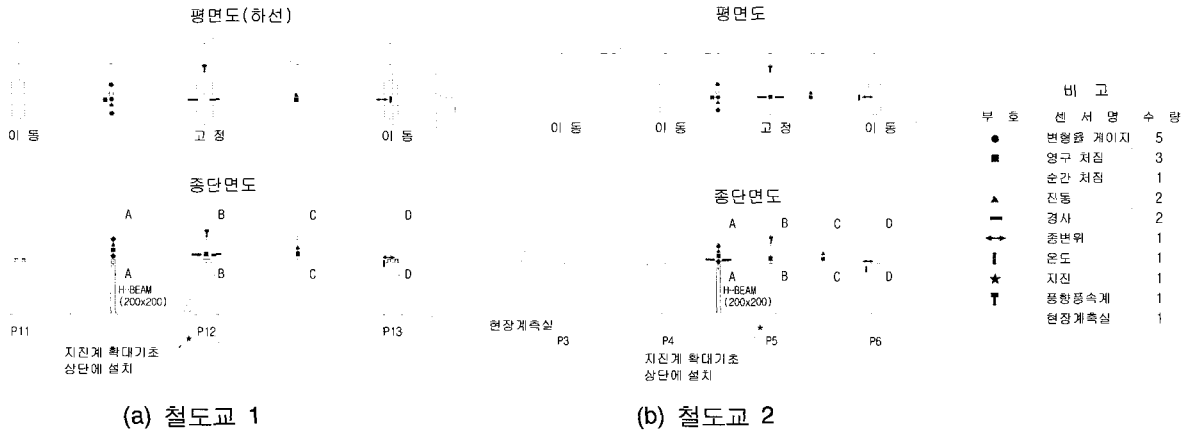


Fig.1 교량 계측센서 배치도

산정방안에 대하여 고찰하였다. 이를 위하여 박준오 등 (2002)에서 제안한 바 있는 검·교정장비를 이용하여 현실적으로 접근이 가능한 센서들에 대하여 교정 작업을 수행하였다. 박준오 등 (2002)에서는 1차 검정 작업 및 검정결과에 대해 기술한 바 있으며 본 연구에서는 각 센서에 대한 교정 후 2차 교정작업을 통한 결과를 중심으로 기술하였다. 연구결과, 고안한 감·교정 장치를 이용한 교정결과가 신뢰할 만한 수준에 이르렀음을 알 수 있었으며 일부 S/W적 오류와 인위적인 오류가 발생하여 이에 대한 조치를 수행하였다. 향후에는 동적 센서에 대한 동적 교정방안을 모색하여 좀 더 현실적인 검정 및 교정이 이루어져야 할 것이다.

2. 계측기 검·교정 및 분석

상시계측시스템 설치현장에서 1차검정을 실시한 자료로부터 계측기기의 교정식을 산정할 수 있으며 회귀분석을 통하여 다음의 식 (1)과 같은 형식의 1차원 방정식을 획득하였다. 이 식으로부터 a의 역수를 계측센서의 당초 교정계수인 식 (2)의 b와 곱하고, c와 같이 절편값이 있을 경우 이를 d와 가감하여 최종적으로 식(3)과 같은 값을 센서의 계수로 재입력하면 보다 정밀한 계측자료를 확보할 수 있게 된다.

$$Y = aX + c \tag{1}$$

$$Y = bX + d \tag{2}$$

$$Y = (b/a)X + c + d \tag{3}$$

따라서, 다음에서는 1차 검정결과로부터 획득한 식 (1)을 각 센서에 적용하고 2차 교정을 통하여 제안한 식 (1)의 효용성을 검증하였다. 한편, 제안한 검·교정 장비는 전기저항식 센서의 취약점을 극복하기 위하여 0.01mm 혹은 0.001mm 까지 정확하게 읽을 수 있는 마이크로미터를 채택한 후 이를 각 센서의 사양에 적합하도록 지그를 제작하여 교정시켰으며 자세한 내용은 박준오 등 (2002)을 참조할 수 있다.

2.1 영구처짐계

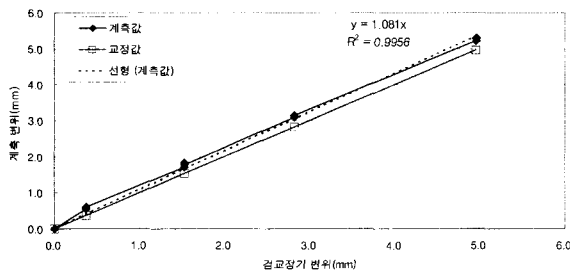
영구처짐계는 철도교의 장기적인 처짐을 조사하기 위하여 교량의 경간중앙에 설치하였으며, 수위차를 전기신호로 변환하는 방식을 채택하였다.

철도교 1의 영구처짐계에 대한 1차 검정 및 2차 교정 실험결과를 Fig.2에 도시하였다. 그림에서 범례의 교정값은 교정기에서 실제로 가한 값을 나타내며, Fig.2(a)와 같이 계측값은 교량내부에 설치된 영구처짐계의 계측센서로부터 현장계측실에서 수집된 값으로써 교정값과 일치하여야 하지만, 약간 상이한 형태를 보이고 있다. 또한, 계측값의 회귀분석 결과는 점선으로 도시하였으며 이때의 방정식을 도출하였다.

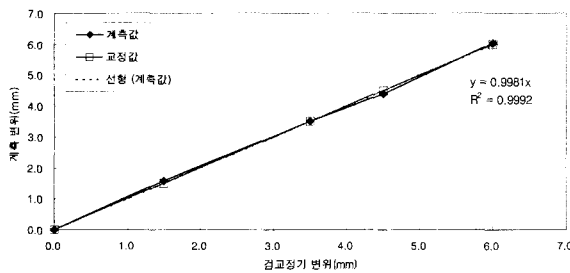
그림에서 알 수 있는 바와 같이 1차 검정시에는 비교적 일관된 형태의 오차가 발생하였으나 Fig.2(a)의 회귀분석식을 통한 2차 교정시 상관계수가 1에 근접하고 있음을 알 수 있고 1차 검정을 통한 교정작업이 의도한 바대로 수행되었음을 확인하였다.

한편 1차 검정은 하절기에, 2차 교정은 동절기에 수행하였으며 향후 온도변화에 대한 이력도 함께 고려하여야 할 것으로 판단된다.

철도교 2의 영구처짐계에 대한 검·교정 결과는 Fig.3에 나타내었다. Fig.3(a)에서 알 수 있는 바와 같이 계측시스템에 의한 계측값은 교정값에 비해 다소 크게 나타났으나 일관적인 양상을 보이고 있으며 교정상수에 문제가 있을 것으로 판단되었다. 교정작업을 거친 결과는 Fig.3(b)에 나타내었으며, 그림에서 계측변위가 4mm가 넘는 부분에 대하여는 교정자의 기기작동 오류에 기인한 원인에 의해 다른 경향의 데이터를 보이거나 전반적으로 교정결과가 개선되었음을 알 수 있다.

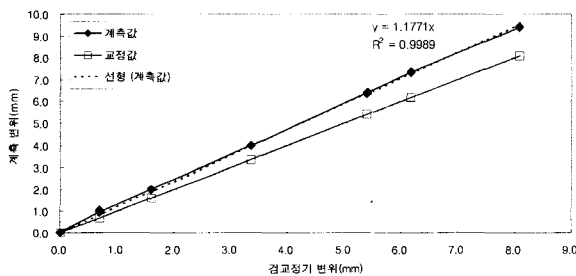


(a) 1차 검정

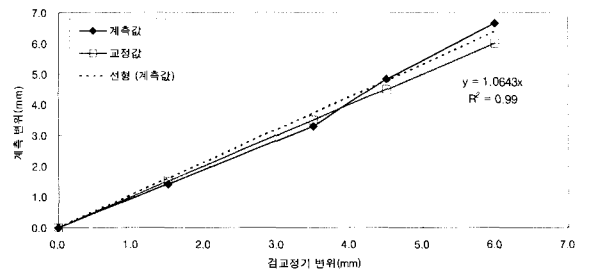


(a) 2차 교정

Fig.2 철도교 1의 영구처짐계 - 검·교정 결과



(a) 1차 검정



(b) 2차 교정

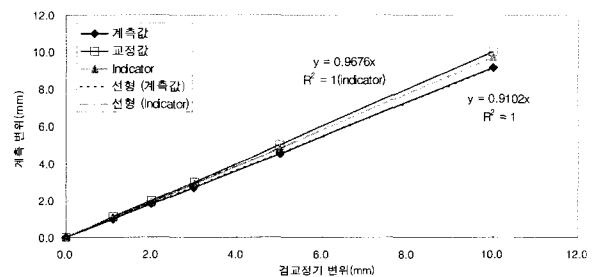
Fig.3 철도교 2의 영구처짐계 - 검·교정 결과

2.2 종변위계

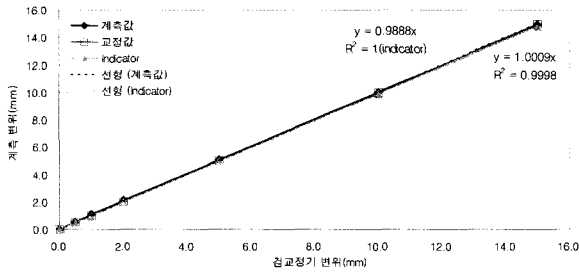
종변위계는 온도변화에 따른 교량상판의 종방향 거동을 파악하기 위하여 LVDT형식의 센서를 상판 끝단에 설치하였으며, 신호변환기 및 Indicator를 인근에 따로 설치하여 계측의 정밀도를 향상시켰다.

철도교 1의 1차 검정 결과, 교정기에서 가한 교정값과 현장계측실내 계측값간의 차이가 발생하였다.

이는 계측데이터가 현장계측실로 전송되는 과정에서 전기적 신호변환에 따른 오류인 것으로 파악되었으며 Fig.4(a)와 같이 종변위계 인근의 Indicator 값을 비교하면 계측기 자체의 오류가 아님을 알 수 있다. 2차 교정전에 회귀분석값을 이용하여 오류를 제거하였으며 Fig.4(b)에 나타낸 바와 같이 2차 교정시 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 철도교 2의 경우에도 같은 종류의 계측기기 및 S/W를 사용하였으므로 동일한 현상이 발견되었고 같은 교정과정을 거쳐 계측현장에 적용하였다.



(a) 1차 검정

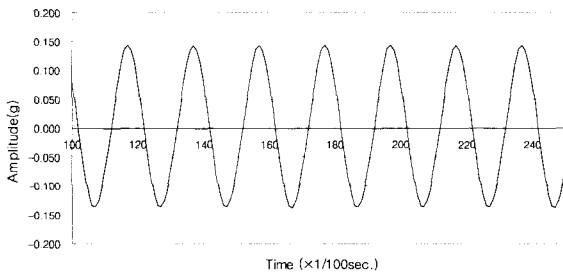


(b) 2차 교정

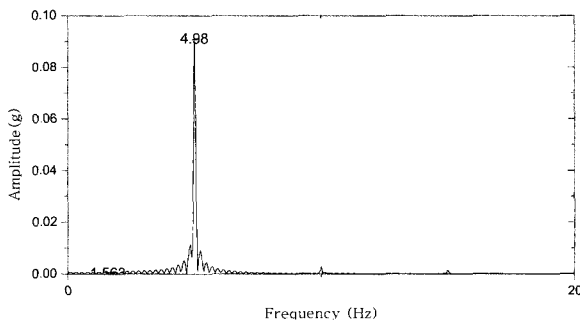
Fig.4 철도교 1의 종변위계 - 검 · 교정 결과

2.3 가속도계

가속도계는 열차주행시 교량의 동적 거동을 파악할 목적으로 설치되어 있으며, 센서로부터 초당 100Hz로 샘플링하고 하나의 파일에는 16초간의 데이터 즉, 1600개의 계측 데이터가 저장된다. 1차 검정시에는 가진진폭에 비해서 응답진폭이 약간 작게 계측되는 현상이 나타났으나, 2차 교정시에는 좀 더 정밀한 가진기(shaker)를 사용하여 교정을 실시하였고 Fig.5와 같은 만족할만한 결과를 확인하였다.



(a) 가진실험 데이터



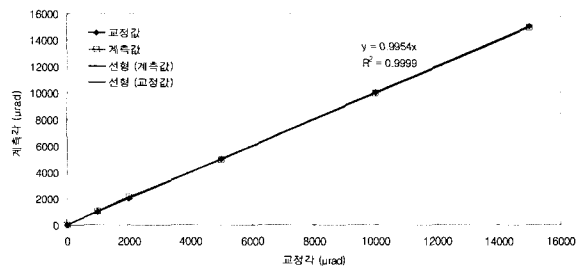
(b) FFT분석결과 (가진주파수 : 5Hz)

Fig.5 철도교 2의 가속도계 - 검 · 교정 결과

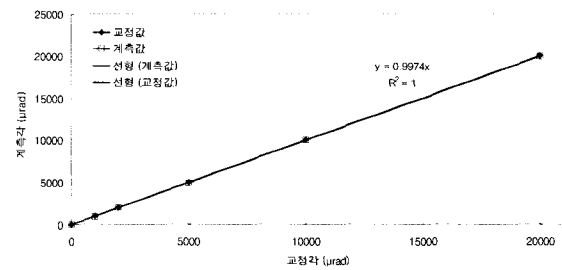
2.4 교량경사계

교량 경사계는 주형의 꺾임각을 측정할 목적으로 설치되었으며, 1차 검정결과 통신상의 문제점이 발견되어 안정화를 위한 H/W를 추가하였고 이를 토대로 2차 교정을 실시하였다. 교정은 0.001mm 용 micrometer를 채택한 교정기를 이용하여 일정한 경사각을 가하고 현장계측실에 저장되는 데이터를 수집하는 과정을 반복하였다. 따라서 열차주행에 따른 동적 경사각의 변화량보다는 정적 경사각의 추이를 확인하고 정밀도를 향상시키는 데 주력하였다.

Fig.6은 철도교 1 및 2의 종방향 경사계 교정결과를 나타내며 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가해진 교정값과 획득한 계측값은 일치하고 따라서 계측센서 뿐만 아니라 시스템의 신뢰성을 확인할 수 있다.



(a) 철도교 1의 경사계



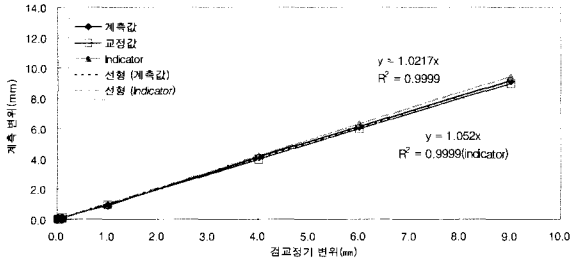
(b) 철도교 2의 경사계

Fig.6 철도교 1 및 2의 경사계 - 교정 결과

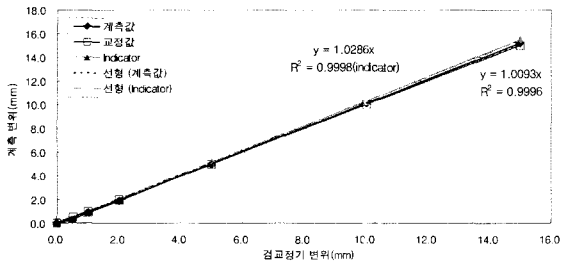
2.5 순간처짐계

순간처짐계는 종변위계와 동일한 형식의 LVDT를 사용하여 열차주행에 따른 교량의 처짐을 측정하며 따라서 종변위계용 교정기를 적용하여 검 · 교정을 실시하였다. 실험결과, Fig.7(a)에 나타난 바와 같이 LVDT 연결부의 Indicator값과 현장계측실의 데이터 중 일부가 상이한 현상이 발생하였으며, 회귀분석 작업을 거쳐 만족할 만한 교정결과를 획득하였다.

철도교 2의 경우에도 동일한 계측장비와 교정기를 적용하였으며 Fig.7과 유사한 형태의 교정결과를 얻을 수 있었다.



(a) 1차 검정



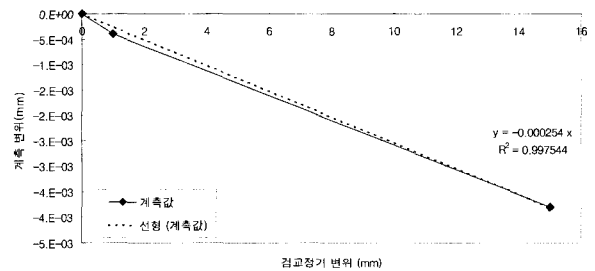
(b) 2차 교정

Fig.7 철도교 1의 순간처짐계 - 검 · 교정 결과

2.6 터널용 내공변위계

터널용 내공변위계는 압력계의 원리를 응용하여 라이닝의 변위에 따른 압력수두의 변화를 전기신호로 바꾸는 과정을 채택하였으며, 1차 검정시 교정값과 계측값 사이에 커다란 차이가 발생한 것을 확인하였다.

이는 급작스런 정전 이후 현장계측실 장비의 재가동시 광센서 교정계수의 초기화가 제대로 이루어지지 않았기 때문인 것으로 파악되었으며, 2차 검정을 통하여 터널 내공변위계의 적정성 및 일관성을 확인하였다. 터널의 계측센서 배치는 Fig.9와 같다.



(a) 1차 검정

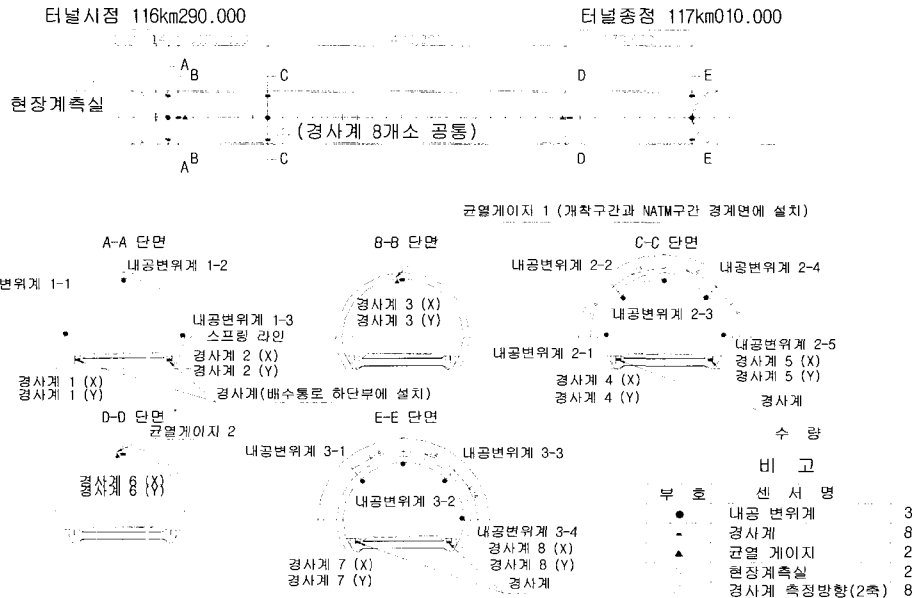


Fig.9 터널 계측센서 배치도

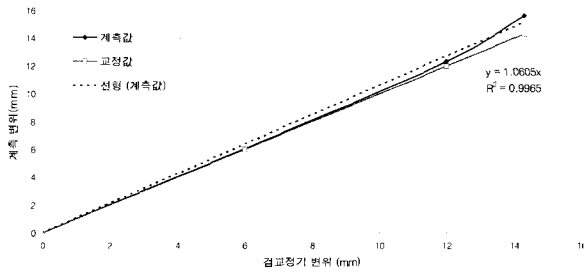
3. 결론

본 연구에서는 토목구조물용 상시계측시스템의 계측센서, 관련 S/W 및 송수신모듈에 대한 검정 및 교정방안에 대하여 고찰하였다. 일반적으로 계측기기 자체의 검정은 계측센서 제작업체의 교정기를 이용하여 저항값 등을 측정함으로써 실시할 수 있으나, 본 연구에서는 계측센서 뿐만 아니라 데이터 레코더 및 관련 DB 등을 종합적으로 검토할 수 있는 방법을 구현하였다. 이를 위하여 매설형 센서 및 접근이 불가능한 개소를 제외한 나머지 센서에 대하여 자체 제작한 교정기를 이용하여 2차에 걸친 검·교정을 실시함으로써 센서 자체의 교정뿐만 아니라 계측시스템 전체의 안정화를 도모하였다.

본 연구를 통하여 획득한 결론은 다음과 같다.

- 각종 센서 및 데이터 저장장치를 종합적으로 분석할 수 있는 교정장치를 고안하였으며, 이를 기존 상시계측시스템에 적용하여 검정 및 교정작업을 수행하였다.
- 일반적으로 계측기기의 오류는 계측기기 자체보다 관련 S/W 및 통신 중 신호변환에 의한 경우가 많은 것으로 파악되었다.
- 일부 센서의 경우, 센서 교정계수가 제대로 입력되지 않음으로 인한 오류가 발생하였으며 경사각 변환 등에 따르는 수치적 오류도 발견되었다.

본 연구에서 고안한 각종 교정기기는 고려대상 센서의 정밀도에 따라 0.01mm 혹은 0.001mm용 micrometer를 채택하였으며 따라서, 제작한 장비의 정밀도를 높이고자 노력하였다. 그러나 교정기기 자체의 오류도 무시할 수 없을 것으로 예상되며 향후 관련기관의 인증이 필요할 것으로 판단된다. 이와 아울러, 교정자의 개인적인 오류를 최소화할 수 있는 기법의 개발도 요구된다. 한편, 본 연구에서는 온도 변화 등에 따른 상시계측시스템의 추이분석 및 동적 센서의 특성을 분석할 수 있는 기법이 적용되지 못하였으며, 향후 이에 대한 연구가 계속될 예정이며 본 연구를 통하여 고안되고 제시한 각종 교정기기 및 교정방안 등은 국내에서 운영중인 각종 상시계측시스템의 안정적인 데이터 확보를 위한 한 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

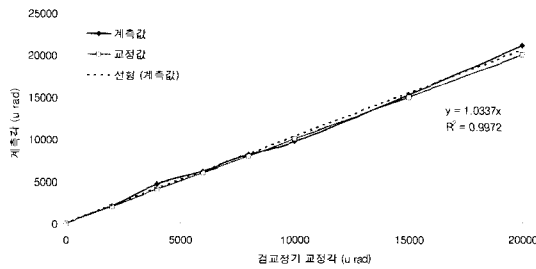


(b) 2차 교정

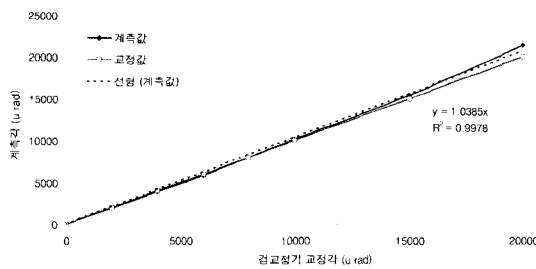
Fig.8 터널 내공변위계 - 검·교정 결과

2.7 터널용 경사계

터널용 경사계는 노반의 이상침하 및 변형을 파악할 목적으로 설치되었으며, 1차 검정시 S/W의 오작동으로 인한 계측오류가 발생하였다. 이는 계측 알고리즘 개발시 오류로 추정되는 급작스런 경사각의 발생을 억제하기 위하여 일정수준 이상의 경사각에 대하여는 자가진단을 하도록 조치했기 때문이며 교정기기로부터 일정 수준 이상의 경사각을 가하면 S/W가 정지하는 현상을 발견하였다. 따라서, 이에 대한 수정을 거쳐 2차 교정시에는 Fig.10과 같이 개선된 결과를 획득하였다.



(a) 경사계 1X



(b) 경사계 1Y

Fig.10 터널 경사계 - 교정 결과

참 고 문 헌

1. 박준오, 이준석, 최일윤, 민경주, "철도교 상시계측시스템의 교정 및 교정상수 설정에 관한 연구", 한국철도학회논문집, Vol. 5, pp.148-157, 2002.
2. 이준석 외, "고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가시스템 개발(Ⅲ)", 한국철도기술연구원, 2000.
3. 최일윤, "정적응답을 이용한 교량구조물의 손상평가기법", 한양대학교 토목공학과 박사학위논문, 2002. 12.
4. Heo, G., Wang, M.L. & Satpathi, D., "Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge", Soil Dyn. & Earth. Eng., Vol. 16, pp.497-502, 1997.
5. Lee, J. W., Kim, J.D., Yun C.B., Yi, J. & Shim J., "Health-monitoring method for bridges under ordinary traffic loadings", J. Sound & Vib., Vol. 257, pp.247-264, 2002.
6. Li, Z.X, Chan, T.H.T. & Ko, J.M., "Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data", I. J. Fatigue, Vol. 23, pp.45-64, 2001.