

터널 진동현식 변형률 게이지의 신뢰성 시험 연구

김학준¹ · 박 찬²

¹대전대학교 지반설계정보공학과

²한국지질자원연구원

Investigation on the Credibility of the Vibrating Wire Strain Gauges used for the Tunnel Instrumentation

Kim, Hak-Joon^{1*} and Park, Chan²

¹Daejeon University, Dept. of Geotechnical Design Engineering

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

진동현식 변형률 게이지는 습기가 많은 터널에서의 장기적 안정성이 우수하여 국내외 터널 현장에서 널리 사용되고 있다. 국내 터널 현장의 진동현식 게이지는 외국 제품도 일부 사용 되고 있으나 국내 게이지에 비하여 고가이어서 주로 국내에서 제작된 게이지가 이용되고 있다. 국산 진동현식 변형률 게이지는 상당히 많은 업체에서 제작되고 있으나 게이지의 신뢰성에 대해서는 검증이 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 실내시험을 통하여, 국내 터널 계측에 널리 사용되고 있는 2.5인치 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성을 검증하였다.

주요어 : 진동현식 변형률 게이지, 변형률 게이지 신뢰성, 터널 계측

Vibrating wire strain gauges are widely used for the tunnel instrumentation because of the long-term stability at humid environments. Domestic strain gauges are mainly used in Korea due to the high cost of the foreign strain gauges. The credibility of the domestic strain gauges is not properly proven even though strain gauges produced by many different companies are available in the markets. The purpose of this paper is to investigate the credibility of the 2.5" strain gauges by using a laboratory compression test.

Key words : vibrating wire strain gauge, credibility of strain gauge, tunnel instrumentation

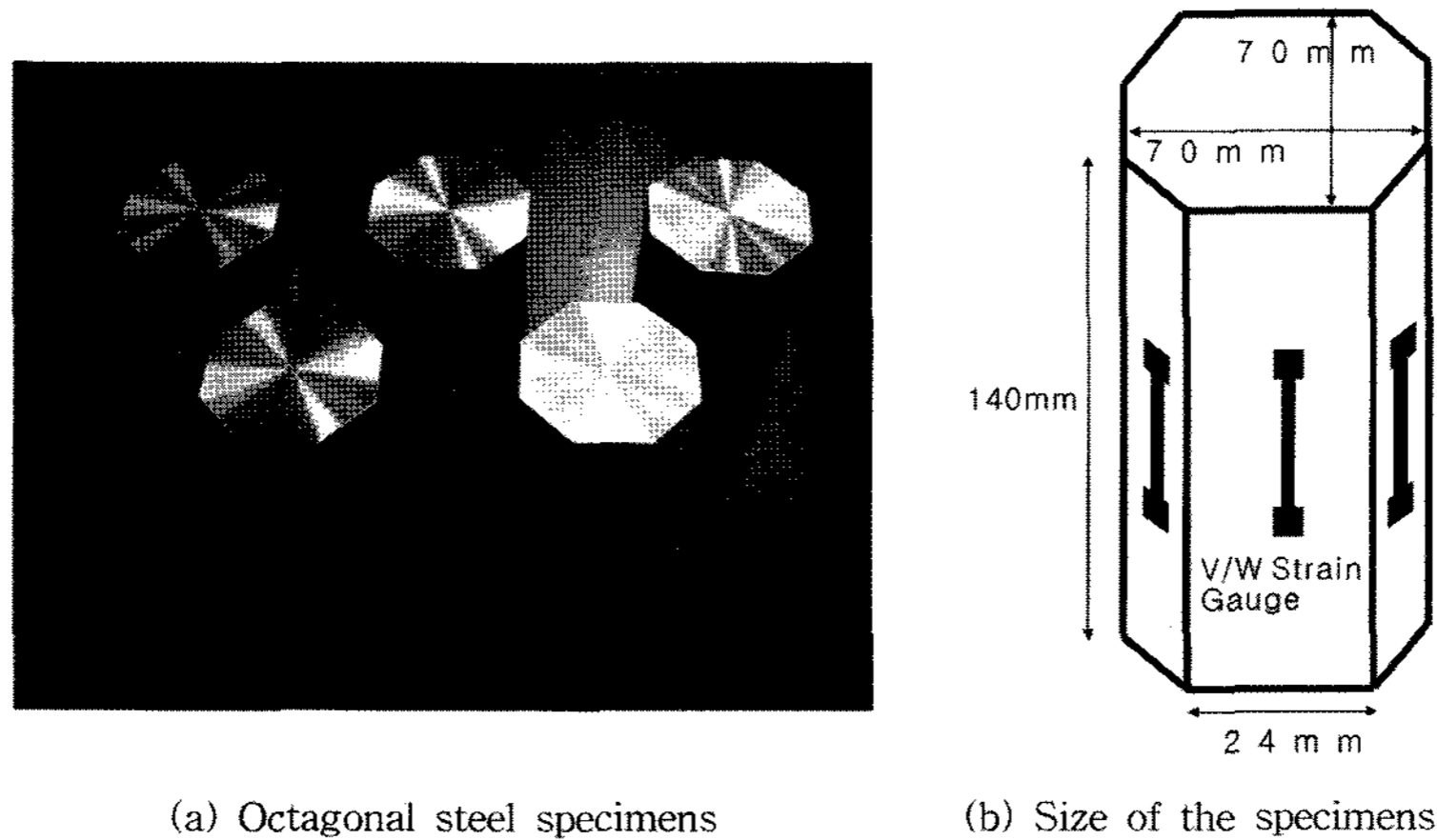
서 론

진동현식 변형률 게이지(Vibrating wire strain gauge)는 전기저항식 변형률 게이지에 비하여 비교적 고가임에도 불구하고 습기가 많은 터널에서의 장기적 안정성이 우수하여 국내외 터널 현장에서 널리 사용되고 있다. 진동현식 변형률 게이지의 장·단기적인 신뢰성은 외국 학자들의 연구에 의하여 충분히 검증되었다(Abramson과 Green, 1985; Bordes와 Debreuille, 1985; Choquet et al., 1999; McRae와 Simmonds, 1991).

국내 터널 현장의 진동현식 게이지는 외국 제품도 일부 사용 되고 있으나 국내 게이지에 비하여 4-5배가량

고가이어서 주로 국내에서 제작된 게이지가 이용되고 있다. 국산 진동현식 변형률 게이지는 상당히 많은 업체에서 제작되고 있으나 게이지의 신뢰성에 대해서는 검증이 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. Dunicliff (1999)는 계측기기 제조사가 계측기를 출고하기 전에 교정을 수행해야 함을 강조하였으며 남순성(1999), 우종태와 이송(2002)은 국내 계측기기에 대한 검교정이 제대로 수행되지 않는 문제점에 대하여 지적하였다. 한국구조물진단학회(2006)도 계측 센서의 제작시 만들어지는 검정표의 신뢰도 저하로 계산식에 적용되는 상수값이나 초기값 파악이 어려운 점과 현장점검 및 보정미비로 인한 계측 신뢰도의 문제점을 지적하였다. Abramson과

*Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr



(a) Octagonal steel specimens

(b) Size of the specimens

Fig. 1. Steel specimens used for the compression test.

Green(1985)은 계측의 최저가 낙찰 관행에서는 계측의 신뢰성을 유지하기 어려움을 지적하였는데 국내 터널 계측의 경우 일부 시공사를 제외하고는 기술력에 대한 평가 없이 최저가에 하도급을 주고 있는 실정이며 따라서 계측의 신뢰성이 의심된다.

본 연구에서는 실내시험을 통하여, 국내 터널 현장에서 널리 사용되고 있는 2.5인치(6.35 cm) 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성을 검증하고자 한다.

변형률 게이지 정밀도 실험

개요

변형률 게이지의 정밀도를 측정하기 위해서 국내 8개사(동아지반계측, 동우 지오시스템, 명성 지오시스템, 성진 지오텍, 세미시스, 에이스 인스트루먼트, 코리아 하이테크, GTC 등)와 국외 1개사의 2.5인치 진동현식 변형률 게이지에 대한 실내시험을 수행하였다. 실험에 사용된 게이지의 시중 가격은 국내산의 경우 28,000원~60,000원, 외국산의 경우 180,000원으로 다양하였다.

실험을 위하여 Fig. 1과 같은 금속 8면체 각주(SKD 11) 5개를 제작하고 교와(Kyowa) 전기저항식 게이지(길이 5 mm)를 부착한 후 압축시험기를 이용하여 금속 각주의 탄성계수를 Fig. 2와 같이 측정하였다. 교와 전기저항식 게이지는 이미 국내외의 많은 실내시험을 통하여 신뢰성이 검증되었으므로 진동현식 게이지에 대한 정밀도 실험의 기준값으로 사용하였다. 시료 No. 5는 다른 시료와 탄성계수의 차이가 있어 실험에 사용하지 않았다. Fig. 2에 의하면, No. 5 시료를 제외한 나머지 금

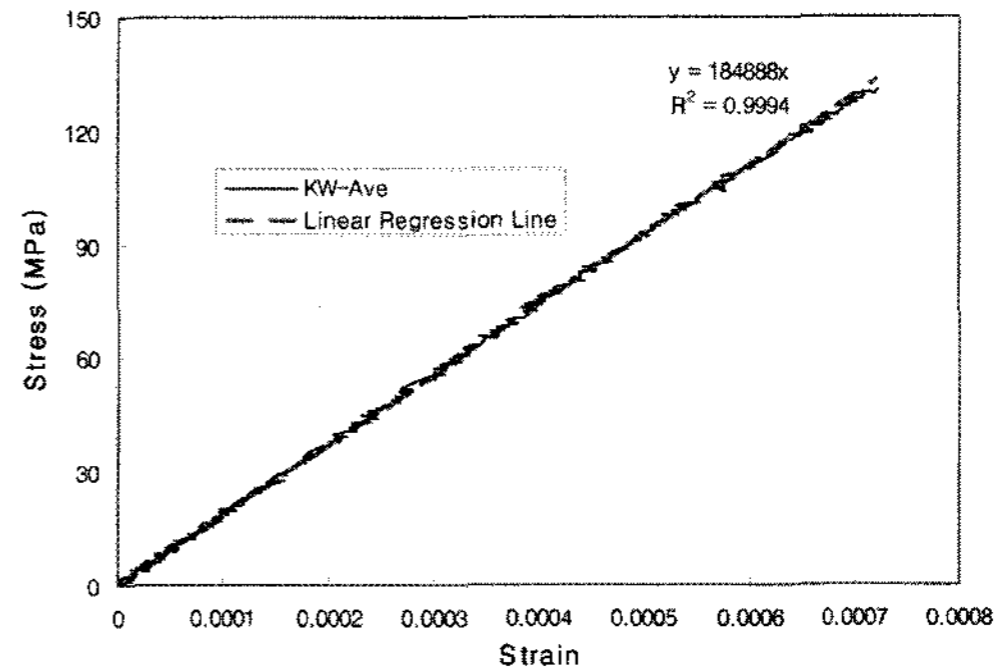


Fig. 2. Test results for the Kyowa strain gauges.

속 각주 4개의 평균 탄성계수는 185GPa ($R^2 = 0.9994$)이었다.

진동현식 변형률 게이지 실험

금속시료의 균질성을 시험한 후 같은 회사에서 제조한 진동현식 변형률 게이지를 금속 각주 3개의 반대쪽 대칭되는 면(3set x 2 = 6개)에 부착한 후 압축시험기를 이용하여 실험을 수행하였다(Fig. 3 참조). 변형률은 양 반대쪽에 위치한 두 게이지의 평균값으로 결정하였는데 Choquet *et al.*(1999)도 같은 방법을 사용하여 시료의 변형률을 측정하였다.

하중의 크기는 예비실험을 통하여 금속 각주의 탄성영역을 확인한 후 약 50-100톤으로 결정하였으며 MTS사의 압축시험기를 이용하여 변위속도 제어 방식으로 금속시료에 하중을 가하였다. 진동현식 게이지의 측정 장치는 현장용으로 자료 획득 시 시간간격이 전기저항식 게이지의 측정 장치 보다 다소 크다. 따라서 변위 속도

는 전체 자료 획득 수를 고려하여, 전기저항식 게이지의 경우 4×10^{-3} mm/sec, 진동현식은 1.5×10^{-4} mm/sec의 속도로 하였다. 변형률 측정 속도는 전기저항식은 0.2초 간격, 진동현식은 40초 간격으로 진행하였다.

실험시의 시료에 작용하는 응력분포 및 변형률의 균질성을 평가하기 위해서 MIDAS 구조해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과중 대표적으로 50톤 하중 재하에서 금속각주의 변위 및 응력분포는 Fig. 4와 같으며 수치해석을 통해서 전기저항식 게이지와 진동현식 게이지의 길이 차이에 의한 변형률 오차는 거의 없음을 확인하였다. 즉, 변위 및 응력분포가 금속각주의 면과 면이 만나는 가장자리에 집중되지 않으며 각주의 하단부에서 상단부까지 변위가 일정하게 증가하므로 각주 중심부의 평균 변형률은 게이지 길이에 상관없이 일정하다.

각 진동현식 게이지를 이용해 산출한 금속시편의 탄성계수 및 교와 전기저항식 게이지와 비교하여 산정된 오차는 Table 1과 같으며 이 시험 결과의 응력-변형률 관계는 Fig. 5와 같다. 제조회사 명칭은 익명을 유지하기 위하여 영문 알파벳을 사용하였다. 시험 결과에 의하면 각 게이지의 전기저항식 게이지 시험 결과와의 오차는 1.3-22.0%의 범위를 보이고 있으며 외국사에서 제작한 I사 제품이 오차 1.3%로 가장 정확도(Accuracy)가 높고 B사 제품이 가장 정확도가 떨어졌다.

휴대용 측정 장치 오차 실험

현장에서 일반적으로 변형률 측정에 사용하고 있는

휴대용 측정 장치에 위한 계측 오차를 검토하기 위해서 별도의 시험을 수행하였다. 시험 방법은 금속 시료에 4개 회사의 진동현식 게이지를 부착한 상태에서 100 kN과 200 kN의 하중을 연속적으로 가한 후 외국산 실험실 로거와 두 개의 국내외 휴대용 측정 장치를 이용하여 변형률을 측정하고 그 결과를 Fig. 6과 같이 비교하였다. 시험 결과 휴대용 측정 장치에 의한 오차는 거의 없음이 확인되었다.

실내시험 결과 논의

시험 결과에 의하면 외국사에서 제작한 I사의 진동현

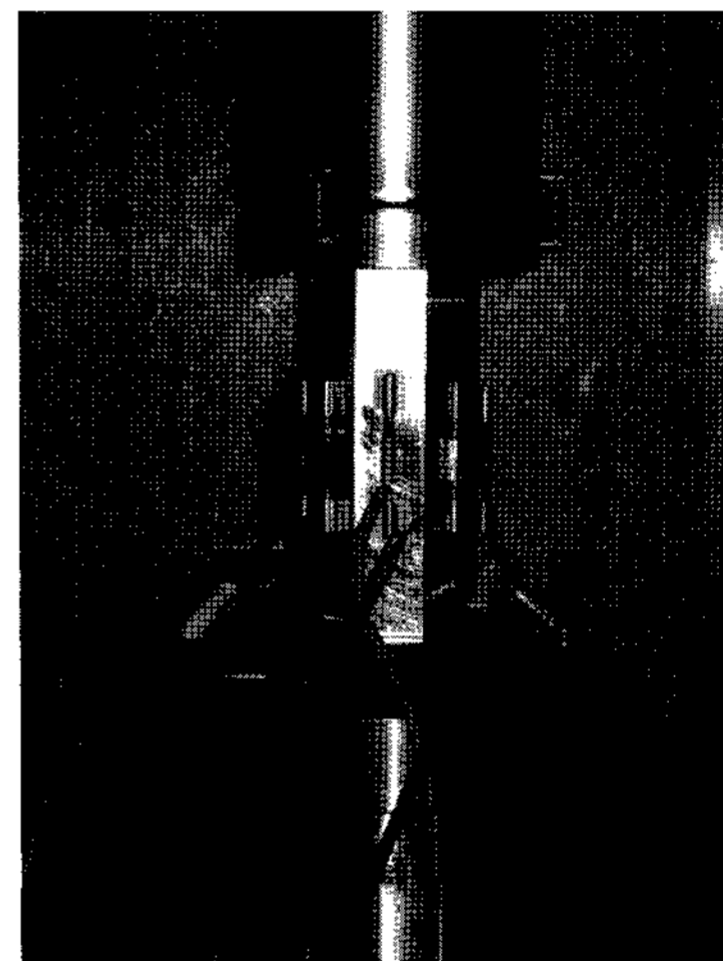


Fig. 3. Compression test using vibrating wire strain gauges.

Table 1. Elastic modulus of the specimens obtained from various strain gauges and percentages of the errors compared to Kyowa strain gauges.

Company Name	Young's Modulus (GPa) (Error%)					
	No.1	No.2	No.3	Ave.	Standard devi. (Range of errors)	R ²
A	194 (4.9)	194 (4.5)	201 (7.8)	196 (5.8)	3.8 (3.3)	0.9999
B	231 (20.0)	232 (20.4)	249 (25.7)	237 (22.0)	10.0 (5.7)	0.9996
C	227 (18.6)	226 (18.0)	229 (19.3)	227 (18.7)	1.8 (1.3)	0.9999
D	210 (11.9)	198 (6.6)	208 (11.0)	205 (10.0)	6.3 (5.3)	0.9998
E	213 (13.1)	217 (14.7)	209 (11.4)	213 (13.1)	4.1 (3.3)	0.9999
F	212 (12.9)	225 (17.7)	226 (18.1)	221 (16.3)	7.5 (5.2)	0.9998
G	189 (2.3)	192 (3.8)	194 (4.7)	192 (3.7)	2.4 (2.4)	0.9999
H	239 (22.8)	234 (21.0)	214 (13.7)	229 (19.1)	13.3 (9.1)	0.9995
I(Imported)	174 (-6.3)	187 (1.2)	202 (8.5)	187 (1.3)	14.1 (14.8)	0.9999

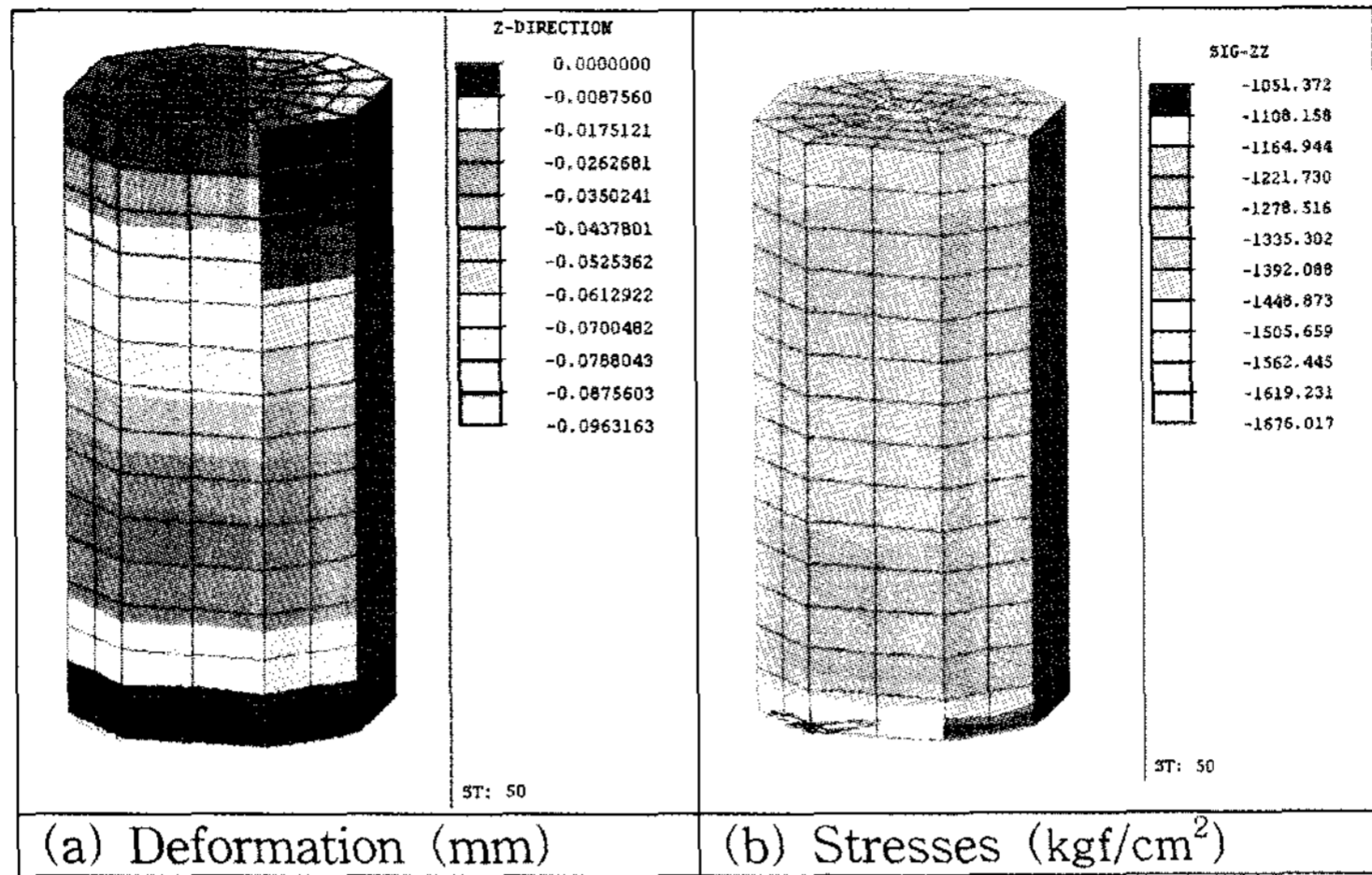


Fig. 4. Calculated displacements and stresses at the specimen for 50ton loading.

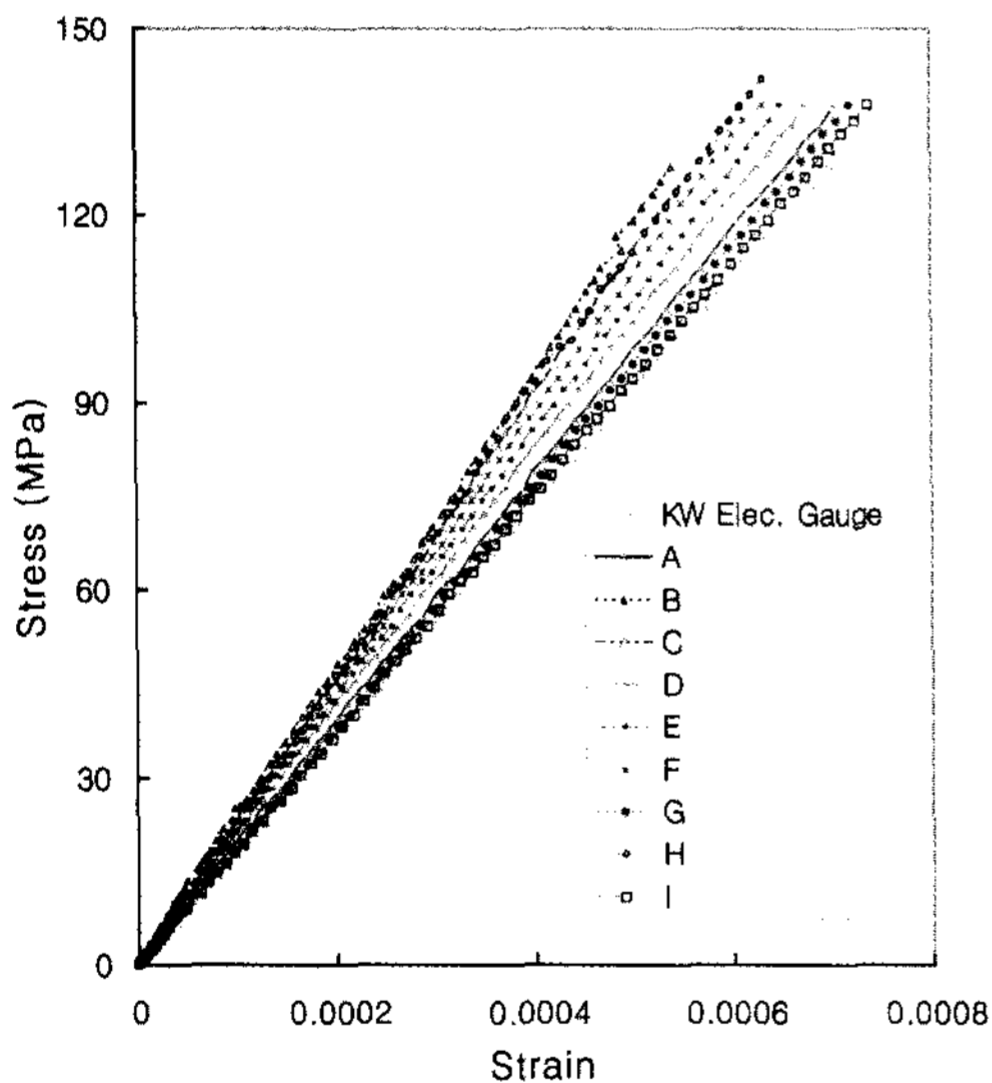


Fig. 5. Stress-strain relationship for the steel specimens measured using various strain gauges.

식 게이지가 오차 1.3%로 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다. 그러나 게이지의 신뢰성이 높기 위해서는 참값에 가까운 정도를 의미하는 게이지의 정확도뿐만 아니라 반복 측정되는 측정값의 흩어진 정도를 의미하는 정밀도(Precision)도 매우 중요하다.

게이지의 정확도와 정밀도를 검토하기 위해서 정확도가 가장 높은 I사와 국내에서 제작된 C사와 G사의 시험 결과를 Table 1과 Fig. 7을 이용하여 비교하였다. C사와 G사의 게이지 오차는 각각 18.7%와 3.7%로 I사의 1.3%에 비해서 더 크나 각 게이지들의 오차 범위는 각

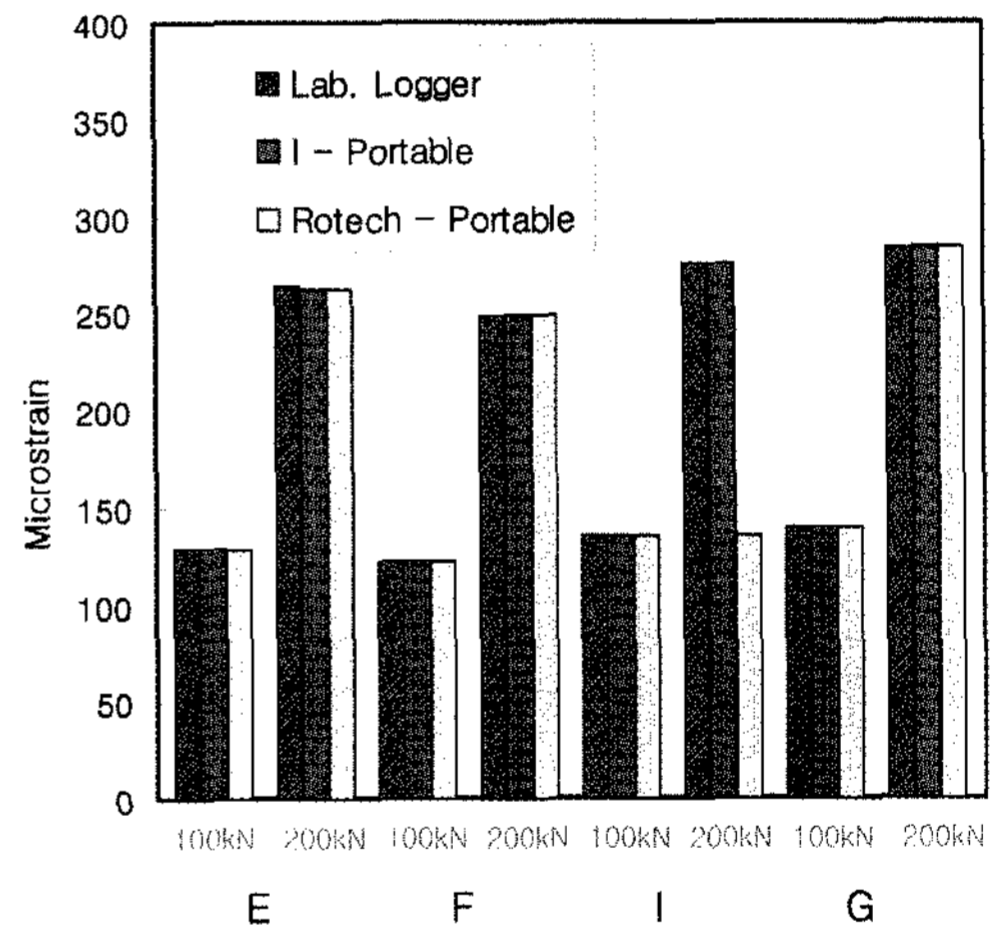


Fig. 6. Effect of the readout instruments for the strain measurements.

각 1.3%와 2.4%로 14.8%의 I사에 비해서 정밀도가 더 높음을 보여주고 있다. I사의 진동현식 게이지의 경우 게이지간의 오차 범위가 14.8%(-6.3~8.5%)로 정밀도가 매우 떨어지고 있다. 따라서 평균적으로는 기준 값에 가깝더라도 개개의 변형률 측정값의 오차가 크므로 게이지의 신뢰성이 문제가 될 수 있으며 게이지 상수의 조정에 의한 보정도 어렵다.

대부분의 국산 게이지의 경우 정확도는 양호하지 못한 편이지만 정밀도는 B사와 H사의 제품을 제외하고 대체로 5% 내외로 양호하다. 따라서 이러한 경우에는 게이지 측정시 사용하는 게이지 상수를 조정하면 쉽게 정확한 값을 얻을 수 있다. 국내 2.5인치 진동현식 게이

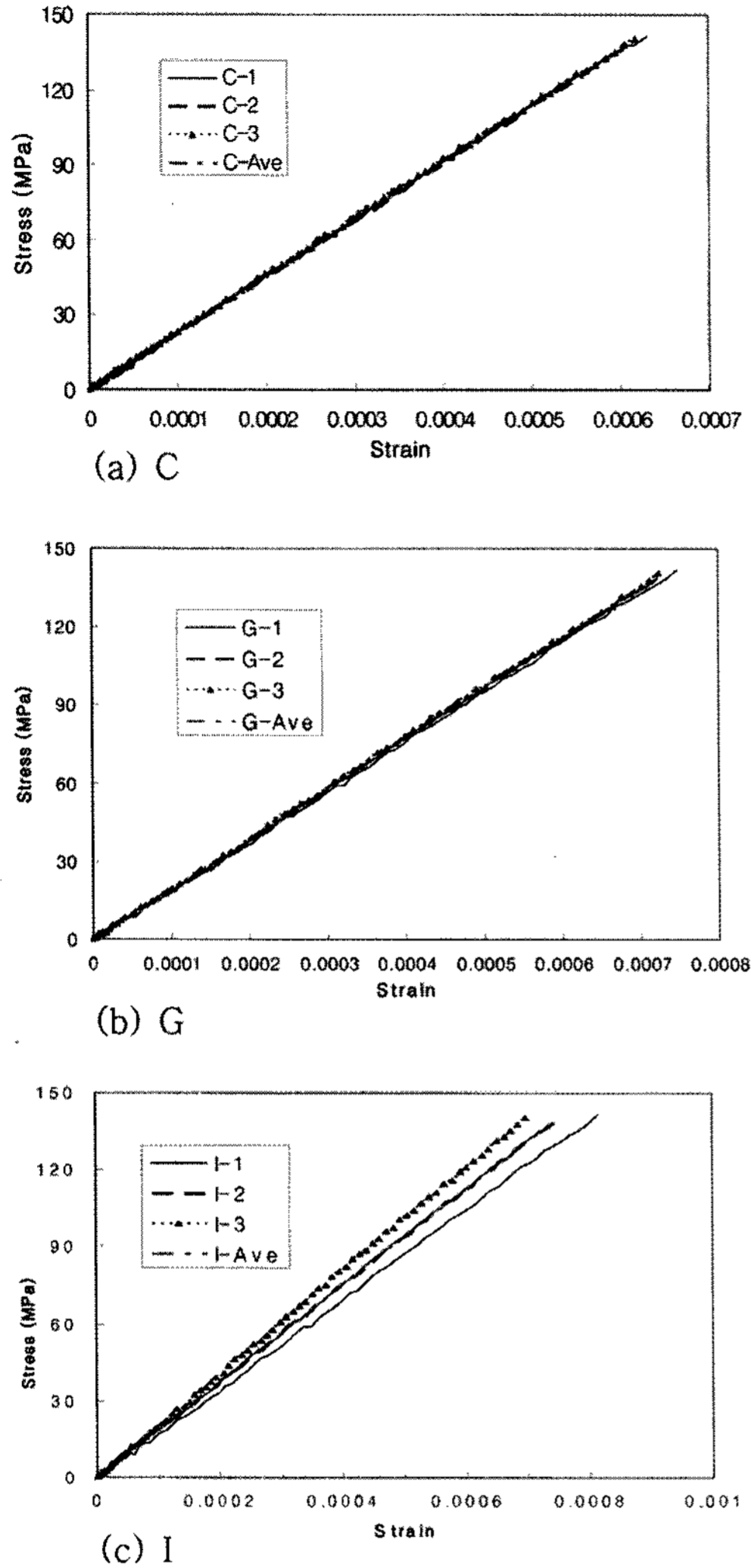


Fig. 7. Precision comparison for the domestic and foreign vibrating wire strain gauges.

Table 2. Gauge factors suggested to minimize the errors.

Company Name	Gauge factor
A	0.36849
B	0.30514
C	0.31803
D	0.35207
E	0.33981
F	0.32735
G	0.37673
H	0.31622
I(Imported)	0.38611

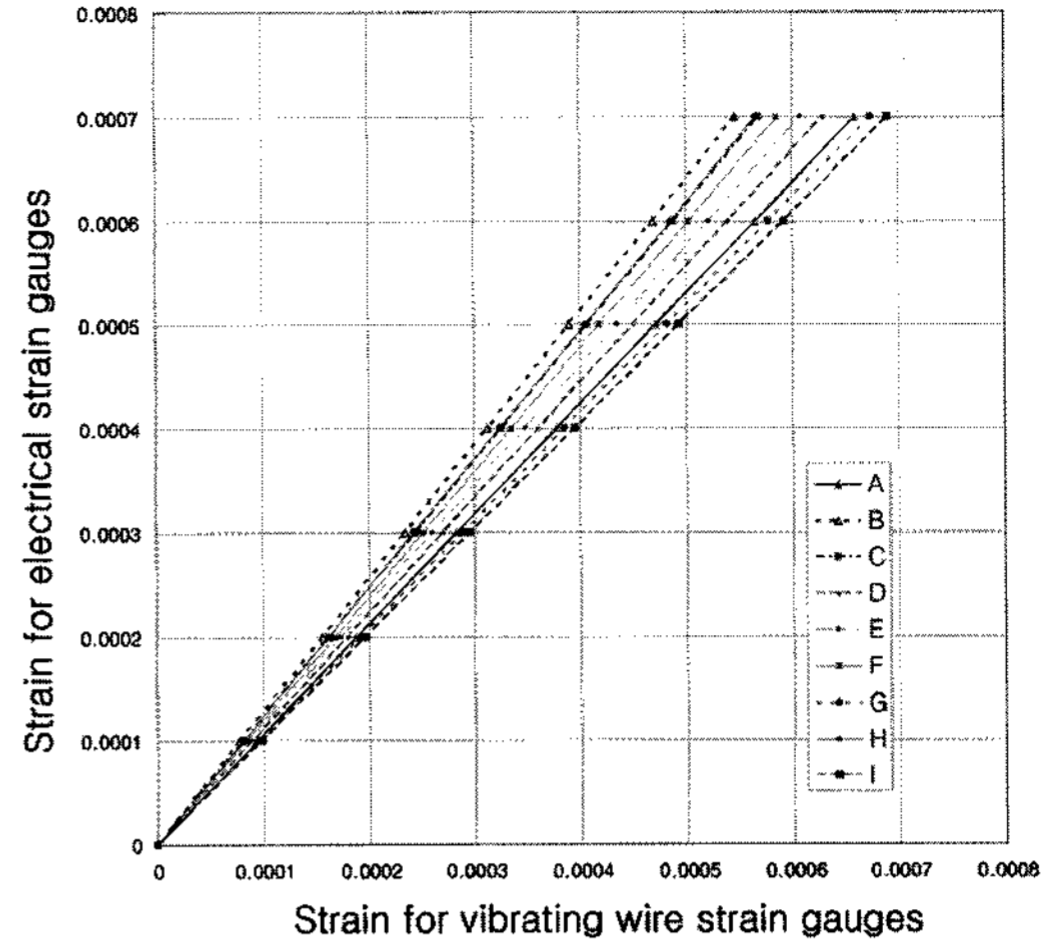


Fig. 8. Comparison of strain measured by vibrating wire strain gauges and electrical strain gauges.

지에 일반적으로 사용되고 있는 게이지 상수(Gauge factor)는 0.39102이지만 각 회사별로 Table 2와 같은 게이지 상수를 사용하면 오차를 최소화 할 수 있다는 결론을 얻었다. 마지막으로 본 실험에서는 각 회사별로 3set (6개)의 게이지를 이용하여 실험을 수행하였으므로 실험 결과에 오차가 포함될 수 있으며 더 많은 수의 게이지를 이용할 경우 실험 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

전기저항식 게이지와 진동현식 게이지로 측정된 변형률의 상관관계는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에 의하면 실험에 이용된 모든 진동현식 게이지가 변형률을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 즉 전기저항식 변형률 게이지에 의한 변형률을 기준으로 설정했을 때 B사의 게이지를 사용하는 경우에는 같은 지반하중을 받더라도 평균 22%의 변형률이 적게 측정되므로 실제보다 더 안정하게 계측되는 문제점이 있다. 따라서 국내 터널 계측의 신뢰성을 높이기 위해서는 게이지에 대한 검증 실험이 가능한 공신력 있는 기관에 의한 게이지 검증절차를 거친 후 현장 계측을 수행하는 장치가 법규적으로 정립되어야 할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 실내시험을 통하여, 국내 터널 현장에서 널리 사용되고 있는 2.5인치(6.35cm) 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국내외 진동현식 변형률 게이지의 신뢰성을 검증하기 위한 실내시험 결과 국산 게이지는 일부사 제품을 제외하고 정밀도는 대체로 양호하나 정확도가 문제가 된다. 이러한 정확도는 게이지 상수의 보정으로 해결 가능하므로 실험 결과 및 수정된 게이지 상수를 계측기 제조사에 통보하고 재검증할 것을 제안할 예정이다.

2. 국외산 게이지는 정확도는 양호하나 정밀도는 좋지 못하였다. 6개의 게이지가 실험에 사용되었으므로 실험 결과에 오차가 포함될 수 있으며 더 많은 수의 게이지를 이용할 경우 실험 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 현장 측정장치 영향에 의한 계측 오차는 없음을 확인하였다.

4. 실험에 이용된 모든 진동현식 게이지가 변형률을 과소평가하고 있으며 일부 게이지의 경우 평균 22%까지 변형률이 적게 측정된다. 따라서 국내 터널 계측의 신뢰성을 높이기 위해서는 게이지에 대한 검증 실험이 가능한 공신력 있는 기관에 의한 게이지 검증절차를 거친 후 현장 계측을 수행하는 장치가 법규적으로 정립되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2007년 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호: C105A1020001-07A050200230)"연구사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 남순성, 1999, 국내 터널 계측관리의 문제점 및 대책, 터널기술, 대한터널협회, pp. 98-103.
 한국구조물진단학회, 2006, 지하구조물 안전계측 이론과 실무, 구미서관, 446p.
 우종태, 이송, 2002, 터널 유지관리 계측의 실태 및 개선방안, 한국구조물진단학회 논문집, V.6, No.3,

pp.14-21.

- Abramson, L. W. and Green, G. E., 1985, Reliability of strain gauges and load cells for geotechnical engineering applications, Reliability of Geotechnical Instrumentation, Transportation Research Record 1004, pp. 13-19.
 Bordes, J. L. and Debreuille, P. J., 1985, Some facts about long-term reliability of vibrating wire instruments, Reliability of Geotechnical Instrumentation, Transportation Research Record 1004, pp. 20-26.
 Choquet, R., Juneau, F., Debreuille, P. J., and Bessette, J., 1999, Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, pp. 49-54.
 Dunicliff, J., 1999, Systematic approach to planning monitoring programs using geotechnical instrumentation: An update, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, pp. 19-30.
 McRae, J. B. and Simmonds, T., 1991, Long-term stability of vibrating-wire instruments: One manufacturer's perspective, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Vol. 1, pp. 283-293.

2008년 5월 13일 원고접수, 2008년 6월 13일 게재승인

김학준

대전대학교 공과대학 지반설계정보공학과
 300-716 대전시 동구 용운동 96-3
 Tel: 042-280-2574
 E-mail: hakkim@dju.ac.kr

박찬

한국지질자원연구원
 대전시 유성구 과학로 92
 Tel: 042-868-3245
 E-mail: chan@kigam.re.kr