

극한지 파이프라인 안정성 평가를 위한 진동현식 변형률 게이지 연구

김 학 준*

대전대학교 건설안전방재공학과

Investigation on the Vibrating Wire Strain Gauges for the Evaluation of Pipeline Safety in Extreme Cold Region

Hak Joon Kim*

Daejeon University, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering

Received 12 December 2016; received in revised form 23 December 2016; accepted 28 December 2016

극한지에 매설된 파이프라인의 안정성 평가를 위해서는 진동현식 변형률게이지가 널리 사용되고 있다. 외국에서는 극한지용 변형률 게이지가 상용화되어 있으나 상당히 고가이므로 국내 기술에 의한 게이지 개발이 필요하다. 국내의 서미스터(thermistor)가 내장된 일반 진동현식 변형률 게이지와 본 연구를 위해 제작된 PT 100이 내장된 변형률 게이지의 온도 측정에 대한 신뢰성을 검증하였다. 기존 서미스터는 -15°C 이하의 저온에서는 신뢰성이 매우 떨어지므로 극한지에서는 PT 100의 사용이 권장된다. 또한 일반 진동현식 변형률 게이지의 경우 저온에서 변형률 측정의 오차가 증가하였으나 인코넬을 이용하여 제작된 진동현식 변형률 게이지는 저온에서 일반 게이지보다 더 높은 신뢰성을 보였다. 현재 진행 중인 연구를 통하여 신뢰성 있는 극한지용 변형률 게이지를 개발할 계획이다.

주요어: 진동현식 변형률 게이지, 파이프라인 안정성, 서미스터, PT 100

Vibrating wire (VW) strain gauges are widely used for the evaluation of pipeline safety in extreme cold region. The development of VW strain gauges for the low temperature environment is necessary because of the high cost of gauges sold in developed countries. Thermistors embedded in the regular VW strain gauges and PT 100 sensors embedded in the gauges specially manufactured for this study have gone through credibility tests for temperature measurements. The use of PT 100 is recommended at low temperature environments because thermistors have low credibility at temperatures below -15°C . Strain measurements using regular VW strain gauges also show low accuracies as temperature goes down. VW strain gauges manufactured using inconel give high credibility of strain measurements at low temperatures. More reliable VW strain gauges for the low temperature environment will be developed in the near future.

Key words: vibrating wire strain gauge, pipeline safety, thermistor, PT 100

서 론

극한지에 매설된 파이프라인(pipeline)은 침하, 동상 용기, 지진, 산사태 등의 지반공학적 요인들에 의하여 손상이 발생될 수 있으므로 이에 대한 별도의 평가 및 대책이 필요하다. 따라서 극한지에 파이프라인을 건설할 경우에는 변위 혹은 응력이 가장 많이 변할 것이 예상되는 지점에 계측기를 설치하고 있다. 진동현식 변형률 게이지는 파이프라인의 변

형률을 측정하는데 사용된다. 캐나다 등의 계측분야 선진국에서는 이미 -40°C 의 극한지에서 사용 가능한 게이지를 상용화하였으나 이들 게이지는 상당히 고가라는 문제점이 있다. 국내에서는 극한지용 계측기에 대한 수요가 없으므로 극한지용 계측기에 대한 개발이 전무한 실정이다. 그러므로 장거리의 파이프라인에서 경제적으로 계측을 수행하기 위해서는 국내 기술에 의한 게이지 개발이 필요하다. 본 연구에서는 국내에서 널리 사용 중인 2.5인치(6.35 cm) 진동현식 변

*Corresponding author: hakkim@dju.kr

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형률 게이지의 온도와 변형률 측정에 대한 저온에서의 신뢰성을 검증하고 극한지에서 사용 가능한 변형률 게이지의 개발 가능성을 검토하고자 한다.

극한지 파이프라인 계측

파이프라인 작용 하중

파이프라인에 작용하는 하중에는 유체에 의하여 생성되는 내부 압력, 지중에 매설된 파이프 위에 놓인 흙의 무게와 활하중, 열에 의한 파이프 팽창으로 발생하는 하중, 지진 등을 포함한 외부하중 등이 있으므로 이를 고려하여 설계해야 한다. 석유나 천연가스는 파이프를 통한 장거리 운송이 일반적이며 가압 펌프 혹은 압축기 감소를 통한 건설과 운용비용의 절감을 위하여 대부분 강철로 된 고압 파이프를 사용한다. 일반적으로 고압 파이프에 작용하는 외부 하중은 내부 하중보다 훨씬 작은 크기로 작용하게 되므로 매설된 파이프를 덮고 있는 흙 하중과 같은 외부 하중은 대부분 무시될 수 있다. 그러나 극한지에 매설된 파이프라인은 침하, 동상 융기(frost heave), 지진, 산사태 등의 지반공학적 요인들에 의해 발생하는 하중에 의하여 손상이 발생할 수 있으므로 이에 대한 별도의 평가 및 대책이 필요하다. 이러한 이유로 극한지에 파이프라인을 건설할 경우에는 변위 혹은 응력이 가장 많이 변할 것이 예상되는 지점에 계측기를 설치하고 있다.

정확한 계측 지점을 선정하기 위해서는 지역적인 지질, 산사태의 발생 범위와 심도 그리고 상대적 안정성 등에 대한 지식이 필수적이다. 일반적으로 계측을 수행한 후 예상보다 더 큰 응력이나 변위가 발생하는 경우에는 위험 완화를 위한 대책 공법이 적용된다.

극한지 파이프라인 계측 사례

지하에 매설된 파이프라인은 사면 불안정(산사태 혹은 사면 포행), 영구동토와 관련된 불안정성, 지진(과도한 진동, 액상화) 등에 의한 지반 변위에 의하여 변형을 받기 쉽다. 이러한 변형은 파이프라인의 절단과 파이프라인 운용의 중단을 초래할 수 있다. 파이프라인에 손상이 발생할 경우에는 환경적인 피해와 사업의 중단을 포함하여 상당히 큰 위험이 발생할 수 있으므로 가능한 최소한의 비용을 사용하여

파이프라인의 구조적인 안정성을 지속적으로 계측하는 것이 바람직하다.

극한지에서의 계측 사례는 시베리아, 알래스카, 캐나다 북부 등 여러 국가의 다양한 프로젝트에서 보고되었다. 특히 극한지에서 지반공학과 연관된 파이프라인의 안정성 평가를 위한 계측 사례는 많은 연구자들에 의하여 발표되었다 (Slusarchuk et al., 1973; Doblanko et al., 2002; Palmer and Williams, 2003; JICA, 2004, Porter et al., 2004; Weir-Jones; 2012; Borda et al., 2013). Oswell (2011)은 캐나다의 북위 60° 지점에서 영구동토 지역 파이프라인의 설계, 건설, 운용에 대한 과거 40년에 걸친 사례를 제시하였다.

캐나다 지질조사국에서는 파이프라인과 동토의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다. 특히 1985년부터 가동하기 시작한 길이 869 km의 Norman Wells 파이프라인은 캐나다에서 최초로 동토 지역에 매설된 송유관이다. 캐나다 지질조사국의 Terrain Sciences Division에서는 파이프라인의 경로를 따라서 계측 프로그램을 수행하였다. 특히 동결 지반과 비동결 지반 사이의 융해에 의한 차별 침하나 동상 융기의 잠재성 그리고 융해되는 동토 사면의 안정성 확보에 설계의 중점을 두었다.

Geokon 사는 미국 서부 버지니아의 불안정한 사면 하부에 매설된 가스 파이프라인의 안정성을 평가하기 위하여 파이프라인의 2개 지점에 변형률 게이지를 Fig. 1과 같이 설치하였다(<http://www.geokon.com/pipelines>).

파이프라인 변형률 계측 방법

파이프라인에 직접적으로 사용되는 계측기는 진동현식 변형률 게이지이며 파이프의 변형률을 측정하는데 사용된다.



Fig. 1. VW-strain gagues installed along the bottom of slopes.

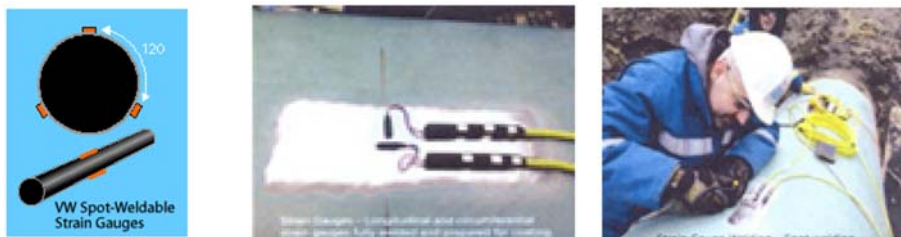


Fig. 2. VW-strain gagues installed in the pipeline.

각 계측 지점에는 Fig. 2와 같이 3개의 변형률 게이지가 120°씩 떨어져서 설치되고 파이프의 길이방향으로 변형률을 측정하도록 변형률 게이지 방향을 설정한다(Amaral et al., 2004). 3개의 게이지에 의하여 측정된 인장과 압축변형률의 분포가 파이프라인이 어떻게 변형되는가를 밝혀준다. 더욱 정확한 파이프라인 계측이 필요한 경우에는 90° 간격으로 4개의 변형률 게이지를 사용할 수도 있다.

파이프에 작용하는 응력의 초기값을 설정하기 위해서는 새로운 파이프 혹은 굴착에 의하여 응력이 완전히 사라진 파이프에 변형률 게이지를 부착하여야 한다. 3개의 측정값으로부터 파이프에 작용하는 최대 변형률이 계산된다. 변형률 게이지는 산사태와 같은 지반 변형이 파이프에 미치는 영향과 파이프에 적용된 대책 방안의 효과를 조사하는데 유용하게 활용될 수 있다.

파이프라인 안정성 평가 방법

산사태, 동결융해, 지진 등에 의하여 대규모의 지반변형이 발생할 수 있는 지역에서는 파이프라인의 소성변형을 발생시켜 허용응력한계에 해당하는 변형률을 초과하는 소성변형이 발생 가능하다. 이러한 파이프라인에 기존에 널리 사용된 허용응력설계법(allowable stress design)을 적용하면 상당한 비용이 추가되어야 한다. 변형률기반설계(strain based design)는 제한된 범위의 소성변형률(plastic strain)을 허용하여 Minnebruggen (2016)이 제시한 Fig. 3과 같은 경제적인 설계를 가능하게 한다. 이것은 하중이 변위제어형상을 보이고 최종 변형률이 제한적인 경우에 적합한 설계방법이다. 특히 금속 재료의 발전과 고 등급 강철파이프의 제작으로 취성파괴를 보이는 파이프는 거의 사라졌다. 따라서 파이프라인의 변형 파괴 양상과 큰 소성 변형률을 고려해야 한다.

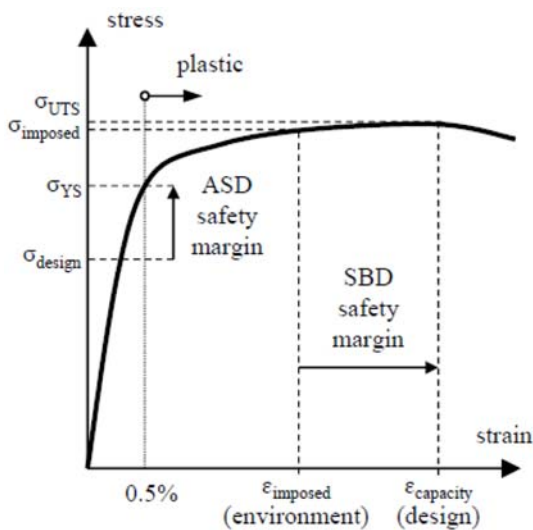


Fig. 3. Conceptual diagram of allowable stress and strain based designs for pipelines.

파이프라인의 압축변형률 한계(compressive strain limits)는 경험적 공식, 수치 해석, 실험 등에 의하여 결정될 수 있다. 임계좌굴 변형률(critical buckling strain)은 직경과 파이프라인 두께의 비율, 내부 압력, 그리고 응력-변형률 곡선 모양의 함수이다. Wilkie 등(2001)에 의하면 최대 종방향 압축 변형률은 파이프 벽의 국부적인 주름짐(wrinkling)이 발생하지 않는 범위까지이며, 최대 종방향 인장 변형률은 파이프 벽에 과도한 인장 항복이 발생하지 않는 범위까지이다. 캐나다의 노만웰즈(Norman Wells)-자마(Zama)파이프라인에서의 최대 종방향 인장 변형률은 0.5%, 내부 압력을 받고 있는 파이프의 최대 종방향 압축 변형률은 0.75%로 제한되었다. 하중의 상태에 따라서, 설계 최대값의 0.667-0.889의 설계 감소 인자(design reduction factors)가 적용되었다. 파이프라인의 안정성은 파이프 내부 내용물의 압력뿐만 아니라 외부 하중에 의해서도 결정되므로 설계 단계에서 이에 대한 검토가 있어야 된다. 휨과 압력을 받는 상태에서 파이프라인의 변형률 양상을 신뢰성 있게 연구하기 위해서는 Nazemi (2009), Spinelli et al. (2011), Zhang (2015) 등에 의해서 수행된 것과 같은 실험이 필요하다. 파이프라인에 대한 실내시험이나 실험 등을 토대로 지반 변위나 파이프라인 변형률에 대한 경보(alarm) 단계, 완화(mitigate) 단계, 위협(critical) 단계와 같은 한계 수준을 설정하여 필요한 경우 파이프라인의 안정성 유지를 위하여 적절한 조치가 취해져야 한다.

진동현식 변형률 게이지 온도 측정

국내 진동현식 게이지 사양과 문제점

국내 진동현식 변형률 게이지의 경우 일반적인 측정범위는 3,000 $\mu\epsilon$, 동작온도 $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$, 열팽창계수 12.2 $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 로 제시하고 있다. 국내에서는 극한지용 계측기에 대한 수요가 없으므로 -40°C 의 환경에서 사용할 수 있는 계측기에 대한 개발이 전무한 실정이다.

진동현식 변형률 게이지는 온도 변화에 따라 변형이 발생되므로, 변형률 게이지의 재질과 계측 대상물의 재질이 동일한 경우를 제외하고는 측정된 변형률은 온도를 고려하여 보정해 주어야 한다. 따라서 국내외에서 사용 중인 대부분의 진동현식 변형률 게이지는 온도 센서를 내장하여 온도 변화로 인한 게이지의 열팽창 계수를 보정할 수 있도록 하고 있다. 게이지가 열팽창계수가 다른 물질에 부착되는 경우 게이지에 의한 온도 영향을 교정하기 위해서는 식 (1)을 사용한다.

$$\text{Microstrain } (\mu\epsilon) = (R_1 - R_0)GF + (T_1 - T_0)(\alpha_g - \alpha_m) \quad (1)$$

식 (1)에서 R_1 은 현재 측정값, R_0 는 초기 측정값, T_1 은 현재 온도($^{\circ}\text{C}$), T_0 는 초기 온도($^{\circ}\text{C}$), α_g 는 게이지 물질의

열팽창계수, α_m 은 계측이 이루어지는 물질의 열팽창계수이다. 만약 게이지와 파이프라인의 재질이 동일할 경우에는 온도보정이 불필요하다.

국내에서 사용하고 있는 진동현식 변형률 게이지에는 주로 NTC 서미스터(negative temperature coefficient thermistor) 온도 센서가 내장되어 있는데 온도가 상승하면 저항값이 감소하는 특성을 이용하여 온도를 측정한다. 국내의 게이지 제조사에서는 변형률 게이지의 작동온도를 -20°C 로 명시하고 있으나 서미스터의 동작 범위는 일부 제조사를 제외하고는 대부분 제시하지 않고 있다. 일부 국내 회사에서는 서미스터의 동작 범위를 변형률 동작 범위보다 더 낮은 -40°C 로 제시하고 있으며 센서의 정확도는 대부분 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 명시되어 있다.

국내의 진동현식 변형률 게이지는 극한지 사용이 어려우나 극한지에서 사용 가능한 계측기는 Bridge Diagnostics사와 같은 선진국의 계측회사에 의하여 상용화되어 있다. 그러나 상당히 고가이므로 국내 기술에 의한 극한지용 변형률 게이지 개발이 필요하다.

진동현식 게이지 온도 신뢰성 실험

측정된 변형률을 온도를 고려하여 정확하게 보정하기 위해서는 온도 측정의 신뢰성이 매우 중요하다. Jang et al. (2015)은 변형률 게이지에 내장된 온도 센서의 정확도를 항온 항습 챔버를 이용하여 검증하였다. 실험 결과, 게이지의 정확도는 대체적으로 -15°C 까지는 평균적으로 최소 0.64°C (B사-국산), 최대 1.75°C (C사-국산), 평균 1.14°C 의 오차를 보였다. 그러나 -15°C 에서 -20°C 사이 구간부터 오차가 증가하기 시작하여 -40°C 구간에서는 평균 12.18°C 의 매우 큰 오차를 보였다. 2개사의 외산 게이지의 경우 -15°C 까지는 평균 0.74°C 와 0.77°C 정도의 매우 높은 정확도를 보였으나 $-15^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 구간에서는 16.77°C 와 16°C 로 D사-국산의 17.35°C 를 제외하고는 정확도가 국산 게이지보다 더 저조하였다. 변형률 게이지의 온도 센서 검증 결과 게이지 제조사에서 제시한 온도 측정의 정확도($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 혹은 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)를 모든 온도 구간에서 만족하는 게이지는 없었으며 온도가

영하로 하강할수록 게이지의 신뢰성이 저하됨을 확인할 수 있었다. 따라서 변형률 게이지 온도 센서의 정확도 향상에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 결론지었다.

본 연구에서는 먼저 8각형 각주(한 변 길이: 28.99 mm)의 금속 시편(SKD 11)에 기존에 온도 센서로 널리 사용되는 서미스터가 내장되어 있는 국내외의 변형률 게이지와 본 연구를 위하여 PT 100 센서를 내장하여 제작된 변형률 게이지를 대칭되게 부착하였다. 이 시료를 항온항습기($400 \times 400 \times 400\text{ mm}$) 내부에 위치시킨 후 온도를 $+30^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 까지 10°C 간격으로 하강시킨 후 변형률 게이지 센서와 디지털 온도계를 비교하면서 변형률 게이지의 온도를 Fig. 4와 같이 측정하였다. 실험에는 PT 100 3개, 국내 서미스터 6개, 외산 서미스터 4개가 사용되었다. 실제 온도 측정에 사용된 디지털 온도계는 독일의 Greisinger사에서 제작된 GMH 3710 모델이며 0.03°C 의 정밀도를 갖는다.

온도 신뢰성 실험 결과, 각 온도별로 측정된 온도 센서의 오차는 Table 1과 같다. 실험 결과에 의하면, 국내산 서미스터의 경우 대체적으로 -10°C 까지는 제조사에서 제시한 정확도($\pm 1^{\circ}\text{C}$)를 만족하고 있으나 외산 서미스터는 제조사의 정확도($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)를 만족하지 못하고 있다. 특히 서미스터의 경우 -20°C 경과부터 오차가 증가하기 시작하여 -40°C 에서

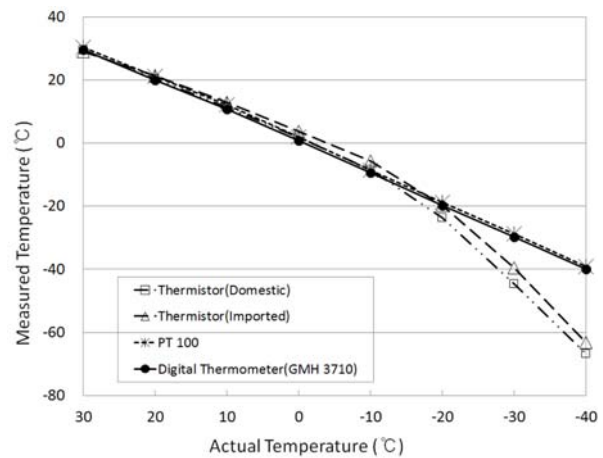


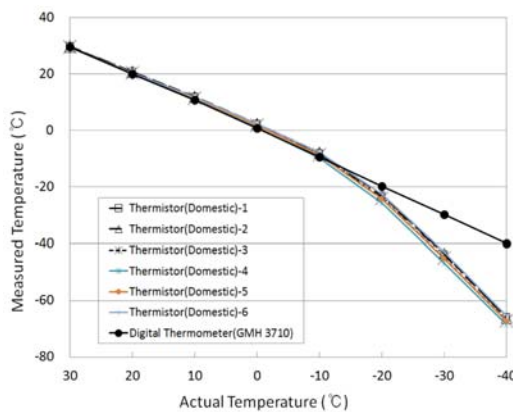
Fig. 4. Comparison of measured temperatures to actual temperatures.

Table 1. Temperature differences ($^{\circ}\text{C}$) measured from the thermohygrostat test.

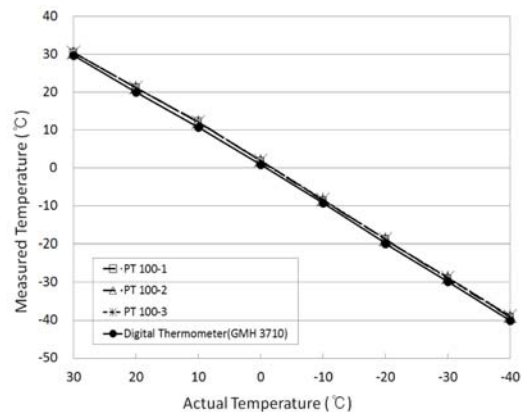
| Setting temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Actual temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Thermistor (Domestic) | Thermistor (Imported) | PT 100 |
|--|---|-----------------------|-----------------------|--------|
| 30 | 29.68 | 0.12 | 0.74 | -0.72 |
| 20 | 20.07 | -0.41 | -1.25 | -1.13 |
| 10 | 10.82 | -0.65 | -2.21 | -1.25 |
| 0 | 0.88 | -1.00 | -2.85 | -1.02 |
| -10 | -9.28 | -0.80 | -3.59 | -0.78 |
| -20 | -19.74 | 4.01 | 0.02 | -1.04 |
| -30 | -29.84 | 14.70 | 9.68 | -1.01 |
| -40 | -40.02 | 26.74 | 23.14 | -0.95 |

Table 2. Properties of thermistor and PT 100.

| | Thermistor | Pt 100 |
|------------------------------|--------------|-------------------|
| Operating range | -100~300°C | -250~850°C |
| Accuracy | High, 0.1°C | Very High, 0.03°C |
| Linearity | Low | High |
| Thermal response | Medium | Slow |
| cost | Low~Moderate | High |
| Noise problems | Low | Medium |
| Long term stability | Medium | High |
| Cost of measuring instrument | Low | High |



(a) Thermistor(Domestic)



(b) PT 100

Fig. 5. Precision of thermistor and PT 100 sensors.

는 국산 26.74°C, 외산 23.14°C의 매우 큰 오차를 보였다. 그러나 본 연구를 위하여 PT 100 센서를 이용하여 제작된 극한지용 변형률 게이지의 경우 거의 전체 온도 측정 구간에서 온도 측정의 정확도($\pm 1^\circ\text{C}$)와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Tong (2001)은 온도 측정에 널리 사용되고 있는 서미스터와 PT 100 센서의 특징을 Table 2와 같이 제시하였다. 서미스터는 일반적으로 특정 온도구간에서만 신뢰성을 보이는데 이것은 서미스터의 온도와 저항의 관계가 비선형적이기 때문이다. Fig. 5(a)와 Jang et al. (2015)의 연구결과를 종합하면 국내산 서미스터는 +30°C ~ -15°C까지는 비교적 높은 정확도(accuracy)를 유지하지만 -15°C ~ -40°C 구간에서는 정확도가 매우 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 6개 서미스터의 정밀도(precision)는 양호하므로 이 구간의 정확한 온도 측정을 위해서는 측정 장비의 보정이 필요하다. 외산 서미스터도 국내산 서미스터와 유사한 실험 결과를 보인다.

PT 100은 0°C에서 100 Ω의 저항을 가지므로 붙여진 이름인데 서미스터보다 일반적으로 더 높은 정확도를 가지며 장기적인 안정성이 우수하다. 특히 온도와 저항의 관계가 높은 선형을 보이므로 넓은 온도 범위에서 정확한 온도를 측정할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 5(b)에 의하면 PT 100

은 +30°C ~ -40°C의 전체 구간에서 우수한 정확도와 정밀도를 보이고 있다. 그러나 PT 100은 게이지와 측정 장비의 비용이 비싸다는 단점이 있다. 국내 진동현식 변형률 게이지의 경우 온도 측정이 +30°C ~ -10°C 정도의 구간에서 수행되고 있으며 국내의 서미스터 측정 장비는 이 정도의 범위에서 정확한 온도 측정이 가능하도록 측정 장비가 보정되어 있으므로 온도 측정의 신뢰성이 큰 문제가 되지 않았다. 그러나 상온부터 -40°C의 극한지 환경까지 넓은 온도 구간에서 신뢰성 있는 온도 측정을 위해서는 PT 100 센서가 내장된 진동현식 변형률 게이지의 사용이 권장된다.

PT 100 센서 내구성 실험

PT 100이 내장된 변형률 게이지는 파이프라인과 함께 흡속에 매설되어야 하므로 습도에 대한 내구성을 실험하였다. 실험 방법은 조립토의 함수비를 5%, 10%, 15%, 20%로 유지한 상태에서 진동현식 변형률 게이지를 흡속에 매립한 후 습기를 유지하도록 비닐 랩으로 밀봉한 상태에서 항온항습기 내부에 위치시켰다. 다음에 온도를 +30°C ~ -40°C까지 10°C 간격으로 하강시킨 후 변형률 게이지 센서와 디지털 온도계를 비교하면서 PT 100이 내장된 변형률 게이지의 온도를 측정하였다. Fig. 6은 대표적으로 함수비 15%에서의

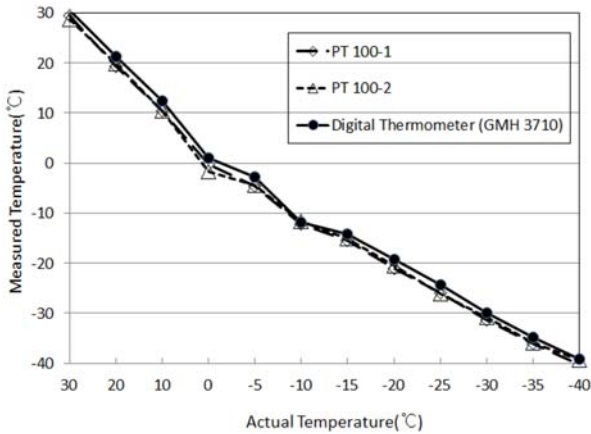


Fig. 6. Measured temperatures using PT 100 at the 15% water content in the soil.

실험 결과를 보여주고 있으며 함수비와 상관없이 측정된 온도가 정확함을 보여준다.

진동현식 변형률 게이지 변형률 측정

국내 진동현식 게이지 현황

국내의 기후 여건상 -40°C의 극한지 환경에서 사용할 수 있는 진동현식 변형률 게이지는 국내의 업체에 의하여 제작되지 못했다. 국내의 게이지 제조사에서는 변형률 게이지의 작동온도를 일반적으로 -20°C ~ +80°C로 명시하고 있으며 일부 회사에서는 -29°C ~ +105°C로 제시하고 있다. 그러나 상온에서의 국내 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성 연구는 Kim and Park (2008)에 의하여 수행되었고 영하 온도에서 측정되는 변형률에 대한 신뢰성 연구는 Shin et al. (2016)에 의하여 일부 진행되었으나 아직 미흡한 상태이다.

온도 변화에 따른 국내 변형률 게이지 신뢰성 실험

극한지 모사가 가능한 실험 환경(최저 -40°C)에서 압축시

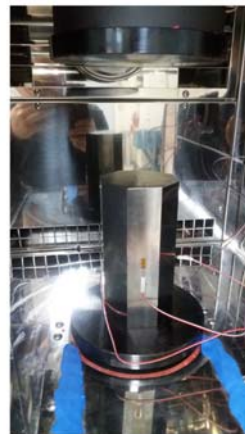
험이 가능한 동결셀 압축시험기를 이용하여 국내 진동현식 변형률 게이지의 신뢰성을 검증하였다. 실험에 사용된 동결셀 압축시험기의 상세한 제원은 Kim (2016)에 의하여 제시되었다.

실험 방법은 먼저 한 면의 길이가 28.99 mm인 8면체 각 주로서 높이는 140 mm인 금속 시편(SKD 11)에 4개의 교와 (Kyowa) 전기저항식 게이지(길이 5 mm)를 대칭되게 부착한 후 Fig. 7(a)와 같은 동결셀 압축시험기를 이용하여 5개의 온도구간(20, 10, 0, -10, -20°C)에서 하중을 가하여 변형률을 측정하였다. 최저 실험온도를 -20°C까지로 제한한 이유는 국내 진동현식 변형률 게이지의 동작온도를 고려한 것이다. 측정된 변형률과 시료에 가한 응력을 이용하여 시료의 탄성계수를 산출하였다. Fig. 7(b)는 탄성계수 시험을 위하여, 전기저항식 변형률 게이지를 부착한 강철 시료가 동결셀 압축시험기 내부에 놓인 상태를 보여주고 있다. 시료에 가한 하중을 시료의 단면적(40.96 cm²)으로 나누어 응력으로 환산하면 0, 7.3, 14.5, 21.7, 29.0, 36.2 MPa에 해당된다.

다음 단계로 4개사(국산-3개사, 외산-1개사)의 진동현식 변형률 게이지(각 제조사별: 2setx2개 시료=4개)에 대하여 5개의 온도구간(20, 10, 0, -10, -20°C)에서 탄성계수를 산정한 후 전기저항식 변형률 게이지로 측정된 탄성계수와 비교하였다. 진동현식 변형률 게이지에서 측정된 탄성계수의 오차를 산정한 결과는 Table 3과 같으며 실험결과는 Fig. 8과 같다. Table 3에 제시된 전기저항식 변형률 게이지의 탄성계수는 4개 시료의 평균값이며 4개사의 진동현식 변형률 게이지에서 구한 오차는 실험에 사용된 각 금속시편별로 전기저항식 게이지에서 구한 탄성계수값과 비교하여 구한 값이다. Table 3에 의하면 C사 국산을 제외하고는 국내산 게이지의 신뢰성이 외국 유명회사에서 제조한 게이지보다 더 높았다. 그러나 온도가 하강할수록 게이지의 오차가 더 커지며 -20°C에서는 6.2~39.8%까지 상당히 큰 오차를 보였다. 따라서 -40°C 극한지 환경에서는 국내에서 제작된 일반



(a) Compression testing machine



(b) Test specimen with gauges

Fig. 7. Low temperature compression testing machine and a test specimen.

Table 3. Elastic moduli (GPa) of specimens obtained from gauges and their error rates (%).

| Temp. (°C) | Strain Gauges | A-Domestic | B-Domestic | C-Domestic | D-Imported |
|------------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 20 | 220.6 | 215.1(1.9) | 222.2(2.1) | 288.0(32.3) | 237.8(4.5) |
| 10 | 220.0 | 216.2(3.1) | 220.1(0.4) | 289.9(31.2) | 239.9(11.6) |
| 0 | 220.4 | 217.5(0.3) | 222.4(1.2) | 293.9(33.7) | 239.3(6.9) |
| -10 | 216.3 | 218.2(2.2) | 226.3(4.7) | 295.8(36.9) | 241.7(10.2) |
| -20 | 212.8 | 221.7(6.2) | 230.6(7.9) | 298.9(39.8) | 244.7(13.9) |

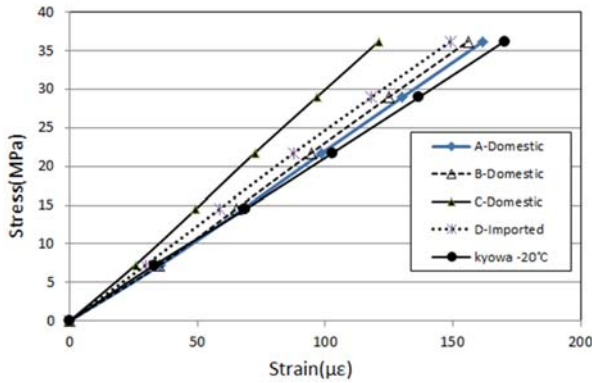


Fig. 8. Test results of vibrating wire strain gauges compared with Kyowa strain gauges in -20°C.

진동현식 변형률 게이지를 사용할 경우 상당히 큰 측정 오차가 발생될 수 있다.

극한지용 변형률 게이지 신뢰성 실험

저온에 강한 인코넬(Inconel) 재료를 사용하여 극한지용 진동현식 변형률 게이지를 제작하였으며 극한지(-40°C) 조건 하에서 제작된 게이지에 대한 신뢰성을 검증하였다. 인코넬은 니켈을 주재료 하여 15%의 크롬, 6-7%의 철, 2.5%의 티탄, 1% 이하의 알루미늄, 망간, 규소를 첨가한 내열합금이다. 극한지용 진동현식 변형률에 대한 실험(2setx2=4개)은 30°C ~ -40°C 범위에서, 국내 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성 검증과 동일한 방법으로 수행하였다.

전기저항식 변형률 게이지에서 얻어진 탄성계수를 기준으로 측정된 탄성계수의 오차율을 산정한 결과는 Table 4, 실험결과는 Fig. 9와 같다. Table 4에 의하면 상온에서는 극한지용 변형률 게이지의 오차가 C사-국산을 제외하고는 더 크게 나왔으나 저온으로 갈수록 오차가 감소함을 확인할 수 있었다. 특히 -20°C에서는 기존의 변형률 게이지가 6.2~39.8%까지 상당히 큰 오차를 보였으나 극한지용 변형률 게이지는 3.5%의 낮은 오차율을 보였다. Fig. 9도 온도가 하강함에 따라 극한지용 변형률 게이지의 오차율이 감소하는 것을 보여준다. 현재 극한지용 변형률 게이지 개발을 위한 연구가 계속 진행 중이며 향후 이러한 연구를 통하여 극한지용 변형률 게이지의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Elastic moduli (GPa) of specimens obtained from VW gauges for low temperatures and their error rates (%).

| Temp. (°C) | Strain Gauges | VW Gauges for low temp. | error rates (%) |
|------------|---------------|-------------------------|-----------------|
| 30 | 222.7 | 206.3 | 7.4 |
| 20 | 224.2 | 203.2 | 9.4 |
| 10 | 221.4 | 206.5 | 6.7 |
| 0 | 219.9 | 207.8 | 5.5 |
| -10 | 216.6 | 210.4 | 2.9 |
| -20 | 211.8 | 204.3 | 3.5 |
| -30 | 212.8 | 216.9 | 1.9 |
| -40 | 209.2 | 202.4 | 3.3 |

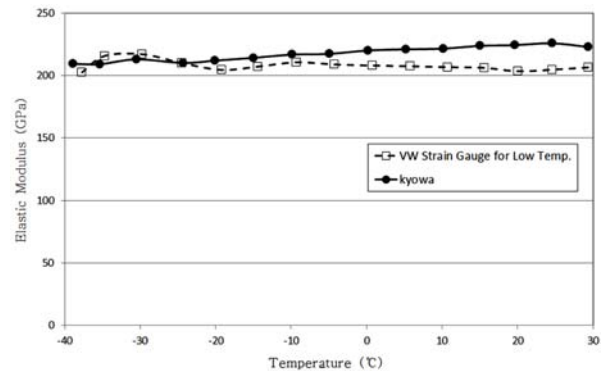


Fig. 9. Test results of VW strain gauges for low temperatures compared with Kyowa strain gauges.

결 론

본 연구에서는 온도 변화에 따른 국내외의 진동현식 변형률 게이지에 대한 신뢰성 검증을 통하여, 극한지 환경에서 사용할 경우의 국내 진동현식 변형률 게이지의 문제점과 개선방안을 제시하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과와 같다.

1. 서미스터가 내장된 국내 진동현식 변형률 게이지의 경우 +30°C ~ -15°C 정도의 구간에서는 비교적 높은 정확도를 보이나 -15°C ~ -40°C 구간에서는 정확도가 매우 떨어진다. 따라서 상온부터 -40°C의 극한지 환경까지의 넓은 온도 구간에서 신뢰성 있는 온도 측정을 위해서는 PT 100 센서가 내장된 진동현식 변형률 게이지의 사용이 권장된다.

2. 수분에 대한 내구성 시험 결과, PT 100 센서는 흙의 함수비와 상관없이 극한지 환경에서 온도 측정의 높은 신뢰성을 보였다.

3. 국내 진동현식 변형률 게이지의 경우 온도가 하강할수록 게이지의 변형률 측정에 대한 신뢰성이 저하되며 -20°C에서는 6.2~39.8%까지 상당히 큰 오차를 보였다. 따라서 -40°C 극한지 환경에서는 국내에서 제작된 일반 진동현식 변형률 게이지를 사용할 경우 상당히 큰 오차가 발생할 수 있다.

4. 저온에 강한 인코넬을 이용하여 제작된 극한지용 변형률 게이지는 -20°C 온도 구간에서의 변형률 측정에서 3.5%의 낮은 오차율을 보였다. 그러나 상온에서 다소 신뢰성이 떨어지는 문제가 있다. 현재 극한지용 변형률 게이지 개발을 위한 연구가 계속 진행 중이며 향후 이러한 연구를 통하여 극한지용 변형률 게이지의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2016년 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 플랫폼 연구사업인 “최저 온도하 장거리 배관 건전성 평가기술 개발”(과제번호: 16IFIP-B067108-04)의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Amaral, C. S., Filho, B. G. S., Musman, J. V. R., and Gomes, M. G. F. M., 2004, Field stress monitoring in pipelines submitted to ground movement, SEM X International Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics, Society for Experimental Mechanics.
- Borda, C., Nikles, M., Rochat, E., Grechanov, A., Naumov, A., and Velikodnev, V., 2013, Continuous real-time pipeline deformation, 3D positioning and ground movement monitoring along the Sakhalin-Khabarovsk-Vladivostok Pipeline, Pipeline Technology Conference, 1-15.
- Doblanko, R. M., Oswell, J. M., and Hanna, A. J., 2002, Right-of-way and pipeline monitoring in permafrost -The Norman Wells Pipeline experience, Proceedings of the International Pipeline conference, Calgary, Alberta, Canada, 605-614.
- Geokon, 2016, Projects, Pipelines, Retrieved from <http://www.geokon.com/pipelines>
- Jang, E. G, Kim, B. J., and Kim, H. J., 2015, Evaluation of credibility of the temperature sensor embedded in the vibrating wire strain gauges using a thermohygrostat, Proceedings of the Fall Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 151-152 (in Korean).
- JICA, 2004, Review of large scale northern pipeline test facilities. Final Report. Prepared for Geological Survey of Canada. Prepared by J. I. Clark & Associates. Report No. R-03-019 v3.0, 21p.
- Kim, H. J. and Park, C., 2008, Investigation on the credibility of the vibrating wire strain gauges used for the tunnel instrumentation, The Journal of Engineering Geology, 18(2), 153-158 (in Korean).
- Kim, H. J., 2016, Making a low temperature compression testing machine and its application plan, Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 213-214 (in Korean).
- Minnebruggen, K. V., 2016, Experimental-numerical study on the feasibility of spirally welded pipes in a strain based design context, PhD. Thesis, Dept. of Electrical Energy, Systems and Automation, Ghent University, Belgium, 192p.
- Nazemi, N., 2009, Behavior of X60 line pipe under combined axial and transverse loads with internal pressure, MSc. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Uni. of Windsor, 225p.
- Oswell, J. M., 2011, Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons, Canadian Geotechnical Journal, 48(9), 1412-1431.
- Palmer, A. C. and Williams, P. J., 2003, Frost heave and pipeline upheaval buckling, Canadian Geotechnical Journal, 40(5), 1033-1038.
- Porter, M., Logue, C., Savigny, K. W., Esford, F., and Bruce, I., 2004, Estimating the influence of natural hazards on pipeline risk and system reliability, Proceedings of the International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2587-2595.
- Shin, C. Y., Hwang, S. W., Jang, E. G., and Kim, H. J., 2016, Investigation of credibility of vibrating wire strain gauges using a low temperature compression testing machine, Proceedings of the Fall Conference of the Korean Society of Engineering Geology, 109-110 (in Korean).
- Slusarchuk, W. A., Watson, G. H., and Speer, T. L., 1973, Instrumentation around a warm oil pipeline buried in permafrost, Canadian Geotechnical Journal, 10(2), 227-245.
- Spinelli, C. M., Demofonti, G., Fonzo, A., Lucci, A., Ferino, J., Di Biagio, M., Flaxa, V., Zimmermann, S., Kalwa, C., and Knoop, F. M., 2011, Full scale investigation on strain capacity of high grade large diameter pipes, Steel Pipes, Special Edition 3R, 14-26.
- Tong, A., 2001, Improving the accuracy of temperature measurements, Sensor Review, 21(3), 193-198.
- Weir-Jones, I., 2012, Vancouver firm's monitoring technology reduces risks, decreases operating costs for pipelines & utilities, Pipelines Today, 6(2), 22-26.
- Wilkie, S. A., Doblanko, R. M., and Fladager, S. J., 2001, Northern Canadian pipeline deals with effects of soil movement, Oil & Gas Journal, 99(20), 62-66.

Zhang, L., 2015, Numerical simulations of full scale tests investigation effect of fault movement on buried pipeline, MSc. Project, Delft University of Technology, Netherlands, 142p.

김학준

대전대학교 공과대학 건설안전방재공학과

300-716 대전시 동구 용운동 96-3

Tel: 042-280-2574

E-mail: hakkim@dju.ac.kr