

MEMS 무선 기울기 센서를 이용한 노출 배관 응력 추정

김택근*, 강인구*, 신동훈, 정태용, 남진현, 임시형†

국민대학교 기계자동차공학부, *국민대학교 기계설계대학원

Stress estimation of exposed gas pipeline using MEMS wireless tilt sensor

Tackkeun Kim*, In Goo Kang*, Dong Hoon shin, Tae Yong Chung, Jin Hyun Nam, Si-Hyung Lim†

ABSTRACT: Gas pipelines in bridges, roads and subway construction sections can undergo abrupt stress and vibration changes. To protect human life from any gas leakage accidents induced by the abrupt stress and vibration, the gas pipeline system needs to be continuously monitored. The estimation method of pipeline stress using MEMS wireless tilt sensor has been developed and its validity has been evaluated using a lab test bench.

Key words: MEMS(Micro electro mechanical system), gas pipeline(가스배관), tilt sensor(기울기 센서), stress(응력), wireless(무선)

기호 설명

- E : 탄성계수 [Pa]
- I : 단면관성모멘트 [m^4]
- M : 모멘트 [Nm]
- y_{max} : 배관의 중립축으로부터 최대 거리 [m]
- x : 배관의 길이방향 지점 [m]
- $f(x)$: 기울기 값을 보간 한 다항식

그리스 문자

- σ : 응력 [Pa]
- θ : 각도 [$^\circ$]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

가스 배관은 지하철, 교량구간, 도로공사구간 등에 의하여 복공관 및 가스관전용보에 와이어 로프로 매달려 장시간 노출되어 있다.⁽¹⁾ 따라서, 노출 가스 배관은 외부 하중 또는 진동으로 인한 가스 폭발 사고에 취약하다.⁽²⁾ 일부 도시가스 업체에서는 노출 가스 배관의 일부 취약 지점에서 스트레인게이지를 이용한 응력 측정 방법⁽¹⁾을 사용하고 있지만, 스트레인게이지의 부착이 용이하지 않고, 공사 구간이 길어 다수의 센서를 이용하기에 어려움이 있다. MEMS 기반의 무선 기울기 센서를 이용한 응력 추정 방법은 센서의 크기가 작고 무선 통신으로 선이 필요 없기 때문에 배관 표면에 간단하게 여러 개의 센서를 부착하여 응력을 추정 할 수 있다.⁽³⁾

본 논문에서는 MEMS 무선 기울기 센서를 이용한 응력 추정 방법을 개발 하였으며, 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 통한 구조해석, 실제 현장의 노출 가스 배관을 모델로 축소 제작한 테스트 벤치를 통하여 성능 검증을 수행하였다.

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4672

E-mail address: shlim@kookmin.ac.kr

2. MEMS 기울기 센서를 이용한 응력 추정 이론

2.1 응력 추정 방법

각 지점의 기울기 값을 안다면 배관의 각 지점에서 응력을 추정 할 수 있다. 기울기와 모멘트 그리고 응력은 다음과 같은 관계에 있다.⁽⁴⁾

$$M(x) = EI \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

$$\sigma(x) = \frac{M(x)y_{max}}{I} \quad (2)$$

기울기 센서를 통하여 측정된 각 지점의 기울기를 보간(Curve fitting) 하여 하나의 기울기 함수를 만든다.⁽⁵⁾ 그 기울기 함수를 미분 후 탄성계수와 단면관성모멘트 값을 곱한 값이 모멘트가 된다. 모멘트를 굽힘 응력 관계식 식(2)에 대입하면 그 지점의 응력을 추정 할 수 있다.

와이어로프로 지지된 노출 가스 배관을 Fig. 1에 나타내었다. 가스 배관의 표면에는 MEMS 기반의 무선 기울기 센서가 부착되어 있다. 기울기 센서는 일정 간격으로 부착시키되 센서의 간격이 반드시 일정할 필요는 없다. 위험 지역이라고 판단되는 지역에 대해서는 더욱 조밀한 간격으로 센서를 부착시킬 수 있다.

외부 하중이 작용 시 배관은 처짐이 일어나며 센서에 의해 측정된 기울기를 보간 할 수 있다. 이 때 측정된 기울기는 같은 방향에 대해서만 3차식으로 보간 해야 한다. 또한 각 구간에 4개 이상의 기울기 센서가 필요하다. 이것을 Fig. 1에 나타내었다. 구간 1과 구간 2는 처짐 발생 시 같은 기울기를 나타내는 지점이다. 집중 하중이 배

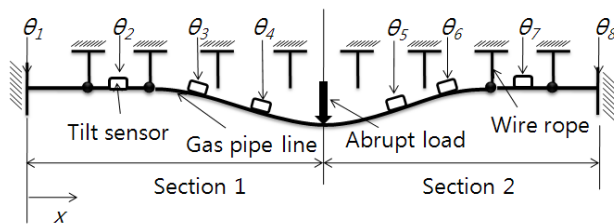


Fig. 1 Schematic of exposed gas pipeline setting with wireless tilt sensor.

관 길이방향의 중앙에 가해졌을 시 하중이 가해지는 지점을 중심으로 양단의 각도 변화 값은 대칭이 되며, 전체 배관에 대하여 하나의 식으로 나타낼 수 있다. 하지만 하중이 가해지는 지점이 중간이 아니라면 같은 기울기가 발생하는 지점에 대해서만 하나의 식으로 나타낼 수 있다. 따라서 하나의 식으로 보간 시 높은 오차가 발생한다. 보간 시 더 높은 차수로 보간 하면 정확도가 높아 질 수 있으나 그 차이가 미비하고 기울기를 측정해야 하는 지점이 늘어나기 때문에 3차식으로 보간 하는 것이 유리하다.

2.2 유한요소 프로그램을 이용한 배관해석

2.2.1 유한 요소 모델링

상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 기울기를 통한 응력 추정 방법을 검토하여 보았다.

자중에 의한 분포하중과 1 m 지점에 집중 하중이 복합적으로 작용한 배관을 Fig. 2에 나타내었다. 배관의 양단은 고정되어 있으며 1 m 지점에 98.5 N으로 집중하중을 가하였다. 한 절점의 거리를 다르게 선정 한 이유는 기울기 센서의 위치가 일정할 필요가 없다는 것을 검토하기 위해서 이다. 정확한 응력 추정 값을 얻기 위해서는 같은 기울기를 갖는 구간에 대하여 4개 이상의 기울기 센서가 필요하므로 Fig. 2와 같이 집중하중이 주어지는 양쪽에 각 4개의 절점을 갖도록

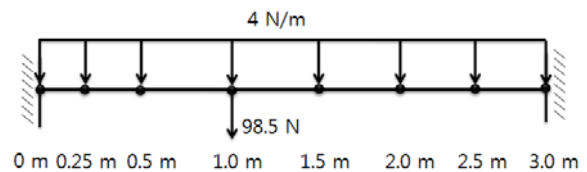


Fig. 2 Distributed and concentrated loads acting on an exposed gas pipeline.

Table 1 Material properties of the gas pipeline used in FEM analysis.

Outer diameter	Inner diameter	Young's Modulus (E)	Density (ρ)
0.034 m	0.0275 m	3.5 GPa	1300 kg/m ³

모델링 하였다. 해석에 사용된 실제 배관의 물성치는 Table 1과 같다.

2.2.2 유한요소 프로그램을 이용한 검토

기울기 센서를 통한 응력 추정 방법을 검토하기 위하여 ANSYS 구조해석을 통해 얻어진 각 절점의 기울기 값을 응력 추정 방법에 넣어 계산한 응력값과 ANSYS 구조해석을 통해 직접 얻은 등가응력 값을 비교하여 보았다.

ANSYS 구조해석을 통하여 얻은 8개의 절점의 기울기 값을 기울기가 같은 구간에 대하여 3차식으로 보간 하였다. 보간된 다항식은 다음과 같다.

$$f(x) = -0.0151x^2 + 0.6012x - 0.3562 \quad (3)$$

$$f'(x) = -0.0152x^2 - 0.1488x + 0.3938 \quad (4)$$

식(3)은 0~1 m 지점, 식(4)는 1~3 m 지점의 기울기 값을 보간 한 값이다. 이렇게 얻어진 3차식을 미분을 한 후 Table 1에의 물성치를 이용하여 식(2)로 각 절점의 응력 값을 추정하였다. 계산 과정은 상용 수치해석 프로그램인 MATLAB을 이용하였다. ANSYS를 이용한 응력 해석 결과값과 응력 추정 방법을 이용한 응력의 비교 값을 Table 2에서 비교하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

노출 가스배관의 응력 추정 방법을 검토하기 위하여 테스트 벤치를 제작하였다. 전체 프레임

Table 2 Stress comparison.

Node	Von Mises stress (FEM) (Pa)	Stress estimation (Pa)	Error (%)
0 m	21,193,000	21,193,900	0.0042
0.25 m	12,306,000	12,307,230	0.0010
0.5 m	3,532,100	3,532,812	0.0201
1.0 m	13,675,000	13,679,050	0.0296
1.5 m	8,117,100	8,117,101	0
2.0 m	2,105,800	2,105,824	0.0011
2.5 m	4,358,500	4,358,486	0.0003
3.0 m	11,276,000	11,275,828	0.0015

Table 3 Material properties of the gas pipeline used in a lab test bench.

Outer diameter	Inner diameter	Young's Modulus (E)	Density (ρ)
0.016 m	0.014 m	68.9 GPa	2700 kg/m ³

은 Fig. 3과 같이 알루미늄 프로파일로 제작 하였으며 구조물의 길이는 3 m, 폭 0.25 m 높이 1 m 이다. 배관의 재료는 짧은 구간에서 비교적 큰 각도를 발생시키기 위하여 알루미늄(Aluminum 6063)을 사용 하였으며 물성치는 Table 3과 같다.

기울기 측정을 위하여 Fig .4와 같이 0.5 m 지점마다 기울기 센서를 부착하였다. 기울기 센서를 통하여 추정된 응력과 실제 배관의 응력을 비교하기 위하여 0.5 m 지점마다 스트레인게이지를 설치하여 응력 비교가 가능하도록 하였다.



Fig 3. Experimental test bed.

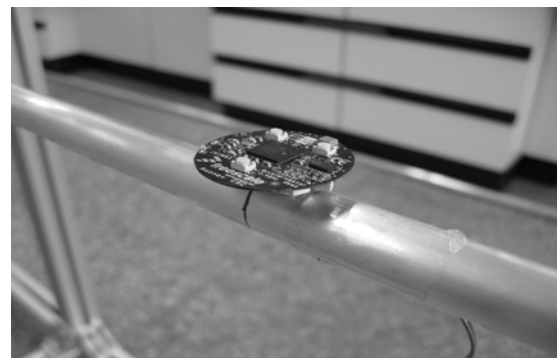


Fig 4. MEMS wireless tilt sensor attached on a pipeline.

3.2 실험방법

양단이 고정되어 있는 3 m 배관의 1.5 m 지점에 1.8 kg 무게의 추를 매달아 집중하중으로 17.5 N을 가하였다. 무선 기울기 센서를 통하여 얻어진 기울기 값을 응력 추정 방법에 적용하여 응력을 추정된 후 ANSYS 및 스트레인게이지를 이용하여 측정된 응력 값과 비교하였다.

기울기 신호는 30 Hz로 측정 하였으며 100개의 데이터에 대해 이동평균필터를 사용하였다.

4. 실험결과

Fig. 5는 배관 길이에 따른 응력 분포를 측정 방법에 따라 나타내고 있다. 사용된 데이터는 총 10회 실험한 데이터의 평균값을 이용하였다. 이때 각 지점의 응력 비교값은 Fig. 6에 나타내었다. 오차 막대는 총 10회 실험 중 측정된 데이터 값의 범위를 나타낸다.

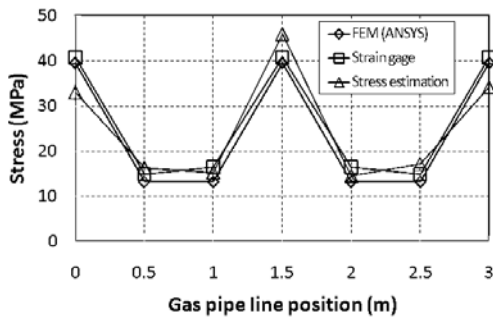
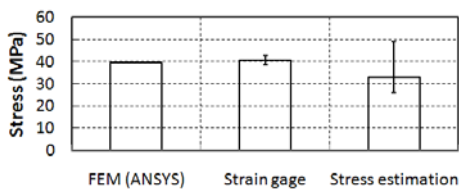
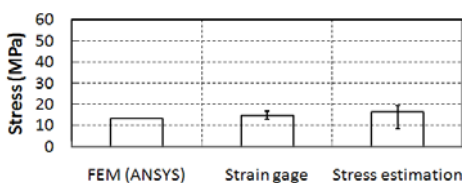


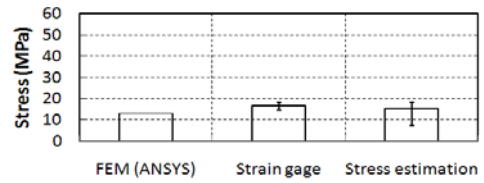
Fig. 5 Stress vs gas pipeline position.



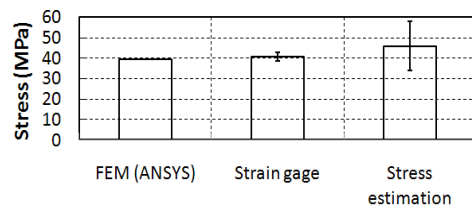
(a) Stress comparison at 0 m



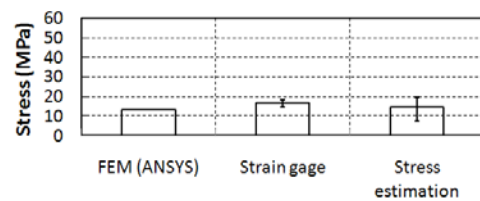
(b) Stress comparison at 0.5 m



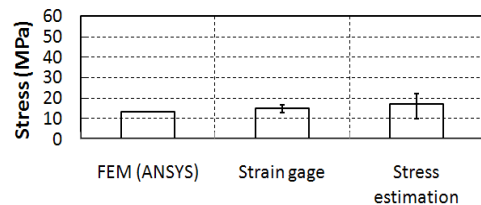
(c) Stress comparison at 1.0 m



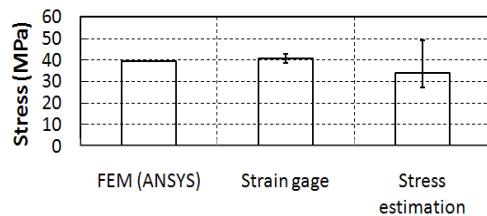
(d) Stress comparison at 1.5 m



(e) Stress comparison at 2.0 m



(f) Stress comparison at 2.5 m



(g) Stress comparison at 3.0 m

Fig. 6 Stress comparison at various gas pipeline position.

실험 결과 MEMS 기반의 무선 기울기 센서를 이용하여 추정된 응력과 스트레인게이지를 통하여 측정된 응력 사이에 평균 13.2%의 오차를 갖는다. 오차의 가장 큰 원인은 무선 기울기 센서가 $\pm 0.5^\circ$ 의 노이즈(noise)를 갖기 때문이다. 응력 추정 방법을 검토하기 위하여 제작한 테스트 벤치(test bench)의 경우 실험실 내에서 사용하도록 제작되었기 때문에 크기의 제약을 받는다. 3 m 길이의 배관은 길이가 짧기 때문에 처짐이 크게 발생하지 않는다. 따라서 $\pm 0.5^\circ$ 의 노이즈는 응력을 추정하는데 큰 변수로 작용하게 된다.

5. 결론

본 논문에서는, MEMS 무선 기울기 센서를 이용한 노출가스배관의 응력 추정 방법의 개발에 관한 것으로 실제 현장의 노출 가스 배관을 모델로 축소 제작한 테스트 베드를 통하여 성능을 확인해 보았다. 그 결과 평균 13.2% 오차범위의 정확도를 얻을 수 있었다.

본 연구의 내용을 확장하여 배관의 길이가 늘어나고 안전계수를 고려한다면 지하철 및 도로 공사 구간 현장에서 쉽게 적용 가능하다. 본 연구 내용을 현장에 적용 한다면 비교적 저렴한 비용에 효과적으로 노출 가스 배관에 대한 안전 모니터링이 이루어 질 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국가스안전공사 주관, 에너지·자원 기술 개발 위탁사업(과제번호 : 2007 - M-CC-23-P-03-3-010-2007)의 연구비지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Hong, S. K., 2003, Development and Application of Exposed Gas pipeline Monitoring System, Report of Korea Gas Corporation.
2. Jung, H. K., 2008, The best suited Application of Risk Based Inspection, Proceedings of the KIGAS, pp. 83-88.
3. Kim, T. K., 2008, Stress safety monitoring system of exposed gas pipeline using wireless tilt sensor array, Proceedings of the KIGAS, pp. 131-136.
4. Shigley, J. E., 2005, Mechanical Engineering Design, 7th ed., McGraw-hill, Korea, pp. 173-212.
5. Hibbeler, R. C., 2005, Mechanics of materials, 5th ed., Prentice Hall, pp. 569-585.