

# 광섬유센서를 이용한 쓰레기 이송관로의 장기 계측시스템 구축을 위한 실험적 연구

김행배<sup>1</sup>, 송재호<sup>2\*</sup>

## Experimental Study for Establishment of Long-term Monitoring System using Fiber Optical Sensor for Pipeline System for Waste Transportation

Haeng-Bae Kim<sup>1</sup>, Jae-Ho Song<sup>2\*</sup>

**Abstract:** Recently, the pipeline system for waste transportation has been increasingly constructed as new solution for the waste collection and disposal system by constantly increasing domestic waste which issued as social problem. The pipeline system is constructed through long distance, so proper long-term monitoring system is necessary which available to detect the damage location for the effective maintenance. In this paper, the experimental study is carried out to evaluate the applicability of optical strain gauge sensor based on FBG for the long-term monitoring system. Three test parameters such as pressure leaking, blockage and deformation are considered as typical damages for real-scale pipeline test specimen. In order to measure flexural and volumetric strain and temperature, three FBG sensors are installed at each monitoring sections. From the test results, this study suggested effective methods of sensor installation and arrangement. Also the sensor spacing for the design of monitoring system using FBG sensor is derived by the correlation of distances from deformation between sensor responses.

**Keywords:** Pipeline system, Optical strain gauge sensor, FBG, Long-term monitoring system, Sensor spacing

### 1. 서 론

최근 지속적으로 증가하는 생활폐기물의 배출과 처리가 사회적인 문제로 대두되고 있으며, 기존의 다양한 문제점을 해결할 수 있는 생활폐기물의 새로운 수거 및 운반 방식으로 쓰레기 관로이송시스템이 부각되고 있다. 쓰레기 관로이송시스템은 60년대 스웨덴에서 개발된 후 전 세계적으로 활발히 적용이 되고 있는 실정이며, 최근 국내에서도 신도시를 중심으로 관로이송시스템을 이용한 생활폐기물 자동집하시설의 적용이 빠르게 전파되고 있다(Choi, 2010).

이러한 쓰레기 관로이송시스템은 지중에 매설되어 설치되는 것이 일반적이며, 설치된 이송관로는 시간이 경과함에 따라 여러 요인들에 의해 손상이 발생될 수 있다. 대표적인 이송관로의 손상으로는 이송관로 파손에 의한 압력누출, 관로 내부 막힘현상과 지반상태 변화로 인한 관로의 이송관로의 변형발생 등을 꼽을 수 있다. 이러한 이송 관로의 구조적 변화는

관로이송시스템의 정상적인 운영을 어렵게 할 수 있기 때문에 상시적인 장기 계측시스템을 적용하여 이송관로 상태를 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 특히 이송관로의 손상으로 인하여 쓰레기 등의 생활폐기물의 이송 및 집하에 문제가 발생할 경우 사용자인 다수의 시민이 겪게 되는 불편은 매우 크기 때문에 신속한 정상화가 요구된다. 이를 위해서는 긴 연장을 갖는 이송관로에서 문제가 발생된 위치를 즉각적으로 파악할 수 있는 적절한 계측기술을 적용하는 것은 필수적이라 할 수 있다(Chung, 2010).

본 연구에서는 광섬유 변형률 센서를 이용한 쓰레기 관로 이송시스템의 장기 계측시스템의 적용성을 검토하고 이를 통해 최적의 센서설치 및 배치방법을 도출하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 실제 규모수준의 모형 관로이송시스템에서 실험조건으로 설정된 이송관로 손상유형에 따른 센서응답을 측정하고 이를 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 광섬유 변형률 센서를 이용한 계측기술 검토

구조물에서 변형률을 측정하기 위하여 사용되어 오던 전형

<sup>1</sup>정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: jhsong@kumoh.ac.kr

Professor, Civil Engineering Department, Kumho National Institute of Technology

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

적인 센서인 스트레인 게이지(strain gauge)는 설치된 위치에 대한 지점정보만 제공하기 때문에 이송관로와 같이 측정 구간이 긴 파이프라인(pipeline) 구조물에 적용하기 위해서는 현실적으로 많은 어려움이 존재한다. 측정구간이 긴 경우에는 수많은 게이지가 필요할 뿐 아니라 이를 동시에 측정하는 것도 어렵기 때문에 그에 대한 효과적인 대안으로 광섬유 변형률센서를 적용하는 것을 검토할 수 있다. 광섬유 변형률센서는 분해능이 우수하고, 광섬유 케이블을 이용하기 때문에 센서 케이블 배선을 최소화할 수 있을 뿐 아니라 매우 긴 측정구간에서도 데이터의 측정 및 전송이 용이하다.

광섬유 변형률센서는 광섬유에 송신된 광원의 변화특성을 측정하는 원리를 이용하며, 어떠한 변화특성을 이용하여 이를 변형률로 환산하는지에 따라 그 종류를 구분할 수 있다. 대표적인 광섬유 변형률센서로는 분포형 광섬유 변형률센서(DTSS)와 격자형 광섬유 변형률센서(FBG)가 있으며, Photo1과 같이 이 두가지 센서는 모두 계측목적에 따라 파이프라인 구조물의 계측센서로서 적용실적을 보유하고 있다(Nikles et al., 2005).

분포형 광섬유 변형률센서의 경우에는 광섬유 케이블에 입사한 빛의 산란효과를 이용한 센서기술로 광섬유 케이블 자체를 센서로 활용할 수 있어 측정구간이 매우 긴 구조물에 활용성이 뛰어나며, 온도측정에 의한 오일, 가스 파이프 등의 누출여부를 감지하는 용도로 널리 활용되고 있다. 반면, 격자형 광섬유 변형률센서의 경우에는 Fig. 1과 같이 광케이블에 일정한 격자를 새겨넣고 온도 및 변형에 따른 격자간격 변화에 의한 파장변화를 이용한 센서기술로 주로 대형구조물의 미소 변형률 및 온도를 정밀하게 계측하는 용도로 널리 활용되고

있다. 특히 상대적으로 정밀도가 우수하고 동적측정이 가능하여 파이프의 이음부 등의 누출, 폐색감지용으로 응용된 사례가 많다(Nikles et al., 2005). FBG의 Bragg 파장길이는 다음 식(1)과 같다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 광섬유 코어의 유효 굴절률이며,  $\Lambda$ 는 격자간격이다(Takashima et al., 2004).

이상의 광섬유 변형률센서의 종류별 성능비교는 Table 1과 같다(Zou et al., 2004; Zou et al., 2006). Table 1에서와 같이 DTSS는 분포형 센서로 장거리 측정구간에 편리하게 시공하여 적용할 수 있으나, 동적측정이 어렵고 측정거리 증가시 감쇠에 의한 오차가 발생할 수 있으며 근본적으로 FBG와 비교했을 때 분해능이 낮은 특징이 있다. 한편, FBG센서의 경우에는 상대적으로 분해능이 높고 파장설계를 통해 일정구간을 분포형으로 배치가 가능하며, 관로 시공 후 설치가 가능하고 취약구간에 집중적으로 센서를 설치할 수 있을 뿐 아니라 광케이블 단락시에도 유지관리가 상대적으로 간편한 장점을 가지고 있다. 또한, FBG가 DTSS센서에 비하여 경제적으로도 우수한 것으로 알려져 있다.

한편, 본 연구의 실험대상인 쓰레기 이송관로는 가스 혹은 송유관과는 달리 파손에 따른 관로의 온도변화는 상대적으로 작은 것으로 알려져 있으며, 이송관로의 손상을 감지하기 위해서는 온도와 더불어 정밀한 변형률 계측이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 FBG센서를 생활폐기물 관로이송시스템의 계측센서로 선정하고 이를 이용한 실험적 연구를 수행하였다.

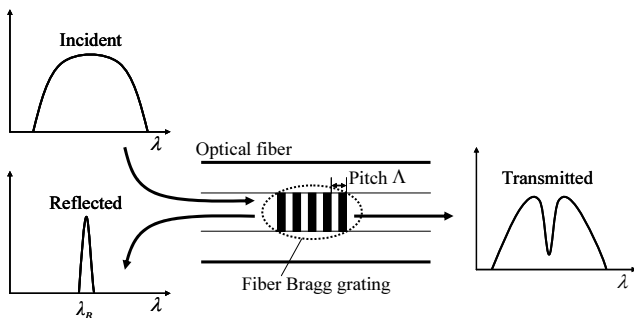


Fig. 1 Conceptual diagram of Fiber Bragg Grating



Photo 1 Application examples of fiber optical sensors

## 2.2 모형 관로이송시스템의 손상모사 실험

### 2.2.1 실험개요

본 연구에서는 FBG센서의 장기 계측시스템으로 활용가능성을 평가하기 위하여 약 520m 길이의 실물 모형 관로이송시스템에 FBG센서를 설치하고 손상모사 실험을 실시하였다. 실험변수는 다음 Table 2와 같이 쓰레기 이송관로에 발생할

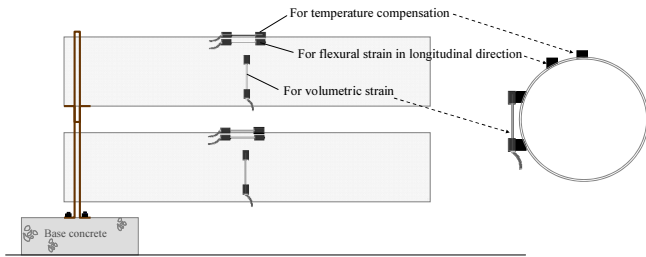
Table 1 Comparison of specifications of FBG and DTSS sensors

Item	FBG sensor	DTSS sensor
Accuracy	$\pm 1\mu\epsilon$	$\pm 30\mu\epsilon$
Resolution	0.1m	1m
Length range	point sensor	30km
Acquisition time	10sec	0-20 min.
Configuration	Multiple fibers	Single fiber
Temperature accuracy	$\pm 0.4^\circ\text{C}$	N/A
Temperature & strain	Multiple fibers	Multiple fibers

수 있는 대표적 손상유형으로 압력누출, 관로막힘과 관로변형의 총 3가지의 조건으로 설정하였으며, 손상유형과는 별도로 정상상태에서의 이송관로의 거동을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 각각의 실험의 목적에 대응한 FBG센서 설치 개념도는 Fig. 2와 같다.

**Table 2** Damage types as test variables

Variables	Monitoring items
Normal	Strain at the normal condition
Leakage	Volumetric strain by changing of internal pressure
Blockage	Volumetric strain by changing of internal pressure
Deformation	Flexural strain by pipeline deformation

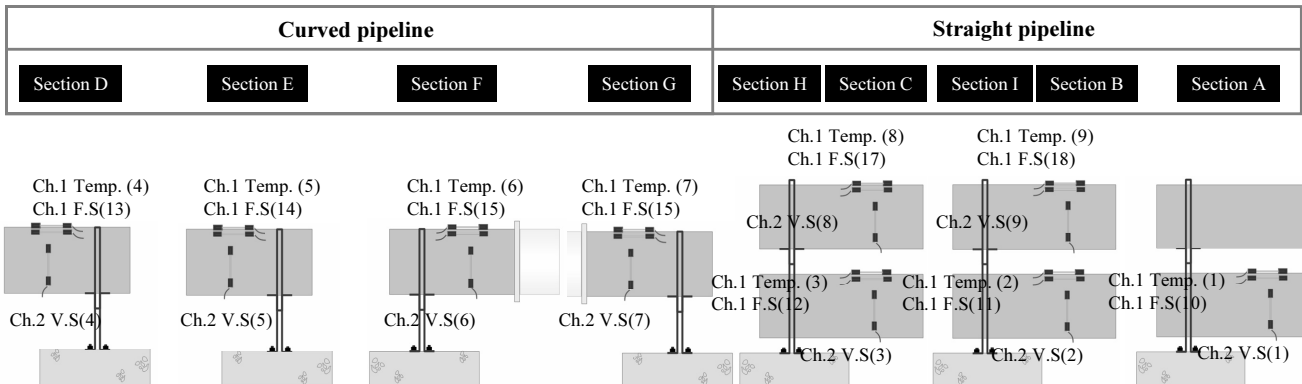
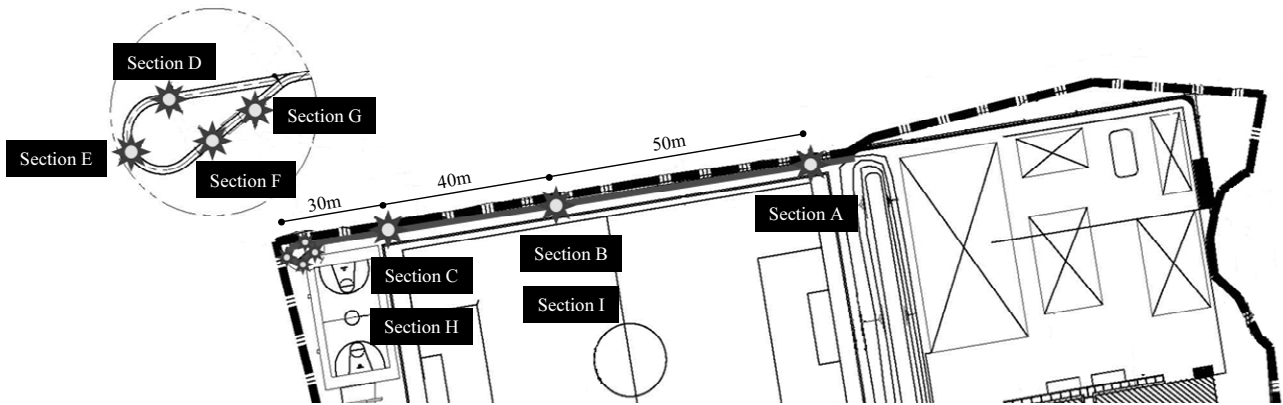


**Fig. 2** Conceptual diagram of sensor installation

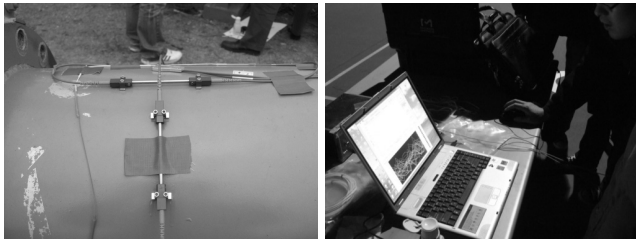
FBG센서는 Fig. 2와 같이 단면별로 길이방향 및 체적방향 변형률을 측정하기 위한 변형률센서와 온도를 측정하기 위한 온도센서 3개의 조합으로 설치하였으며, Fig. 3과 같이 총 9개 대표단면을 선정하여 총 27개의 FBG센서가 설치되었다. 손상 모사실험을 위해 사용된 센서 및 장비는 Table 3과 같다.

**Table 3** Technical specification of interrogator and sensor

Items	Specifications	
Interrogator	Model	sm125-500
	Channel no.	4 ch
	Sample rate	2Hz
	Temp. range	0~50°C
	Application	Fiber optic only
	Manufacturer	Micron optics(USA)
FBG sensor	Model	ST-310
	Type	FBG
	Range	±2,000µε
	Temp. range	-20 ~ 80°C
	Resolution	±0.5µε
	Manufacturer	FBG Tech(Korea)



**Fig. 3** Monitoring sections and sensors arrangement



(a) Sensor installation (b) Data acquisition system

Photo 2 Pipeline monitoring system using FBG sensor

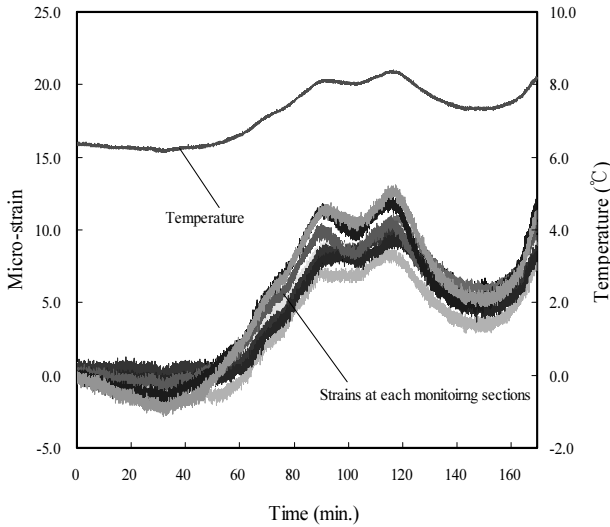


Fig. 4 Test results of normal operation condition

FBG센서로는 FBG tech社의 제품을 사용하였으며, 측정용 데이터로거는 Micron optics社의 제품을 사용하였다.

한편, 데이터로거로부터 1Hz의 샘플링 속도로 수집된 데이터는 데이터로거와 연결된 측정용 노트북에서 실시간으로 측정결과를 확인하였으며, 채널별로 측정된 파장변화를 변형률로 바로 환산할 수 있도록 개발된 전용 소프트웨어를 이용하여 계측하였다. FBG센서 설치와 데이터측정 전경은 Photo 2와 같다.

## 2.2.2 실험결과

### 2.2.2.1 정상 시운전 실험

정상 시운전 실험은 일반적인 상태에서 관로에 발생하는 거동특성을 파악하기 위한 실험이다. 이 실험에서는 관로 내부에 공기압이 순환작용하는 것 외에는 별도의 외력은 작용하지 않는 조건이며, 유일한 외력 조건으로는 온도의 영향으로 인한 관로의 변형을 고려할 수 있다. 정상 시운전 실험의 결과는 다른 실험에서 발생하는 변형률의 크기와 비교를 통해 본 실험에서 적용한 FBG센서가 각 실험조건에서의 이상현상을 감지할 수 있는가를 확인할 수 있는 기준자료로 활용된다.

정상 시운전 실험결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서와 같이 정상 시운전 실험은 약 3시간에 걸쳐 진행되었다. 실험기간동안 온도변화는 약 2°C가 발생하였고, 변형률은 길이방향으로 최대 10.5 $\mu\epsilon$ 이 발생하였다. 측정결과는 FBG센서 자체의 온도보상을 완료한 결과이기 때문에 여기서 계측된 변형률은 외기온도 변화로 인해 강제로 제작된 관로자체의 온도변형 및 시운전으로 인한 진동 등에 의한 변형률로 이해할 수 있다. 한편, 본 실험대상인 모형 이송관로는 지상에 노출되어 있지만, 일반적으로 지중에 설치되는 실제 이송관로는 온도변화에 대한 영향이 실험조건보다는 작을 것으로 예상된다. 하지만, 이송관로를 장기계측하는 경우 센서자체의 온도보상과 더불어 관로의 온도변형과 손상에 의한 변형을 구분하기 위해서는 반드시 온도센서의 설치가 필요하다.

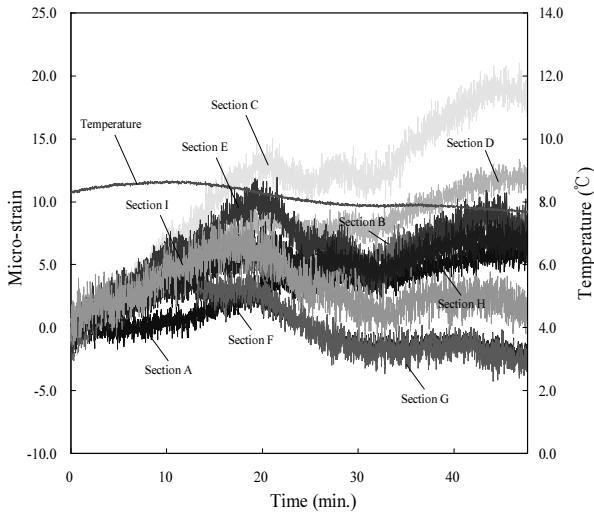
### 2.2.2.2 압력누출실험

압력누출 실험은 시험관로에 설치된 압력밸브를 개폐하여 압력누출을 모사한 실험으로서 압력누출에 따른 온도변화를 확인하고 관로에 발생하는 길이 및 체적방향의 변형률을 측정하는 것을 목적으로 한다. 압력누출 상황은 약 30분간 모사되었으며 실험결과는 Fig. 5와 같다.

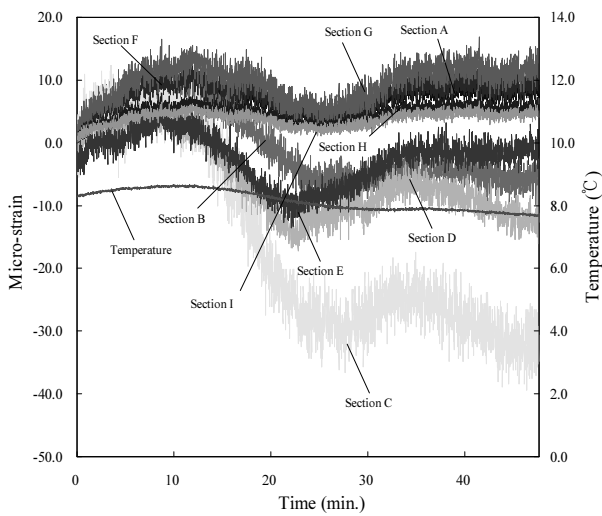
Fig. 5(a)는 section 별로 길이방향의 변형률과 온도를 도시한 것이며, Fig. 5(b)는 section 별로 체적방향의 변형률과 온도를 도시한 결과이다. Fig. 5(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 실험 중 발생한 온도변화는 약 0.8°C로서 압력누출로 인해서는 이송관로에 온도변화가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 또한, 압력누출을 발생시킨 압력밸브와 4m 이격되어 가장 가까운 위치의 section C에서 가장 큰 변형률이 계측되었으며, 길이방향으로는 약 21.2 $\mu\epsilon$ , 체적방향으로는 약 37.4 $\mu\epsilon$ 의 변형률이 측정되었다. Fig. 5의 계측결과는 모두 온도보상이 완료된 데이터로서 압력밸브와 약 36m 떨어진 section B에서도 길이방향으로는 약 9.7 $\mu\epsilon$ , 체적방향으로는 10.7 $\mu\epsilon$ 의 변화가 감지되었지만, 그 이상 떨어진 단면에서는 압력누출에 의한 변형률 변화가 매우 작게 측정되었다.

가장 큰 변형률이 발생한 section C의 결과인 Fig. 5(c)에서 알 수 있듯이 압력누출로 인하여 길이방향으로는 인장변형률, 체적방향으로는 압축변형률이 발생하는 것으로 나타났으며, 그 외의 section에서도 길이방향으로는 인장, 체적방향으로는 압축의 경향이 발생하였다.

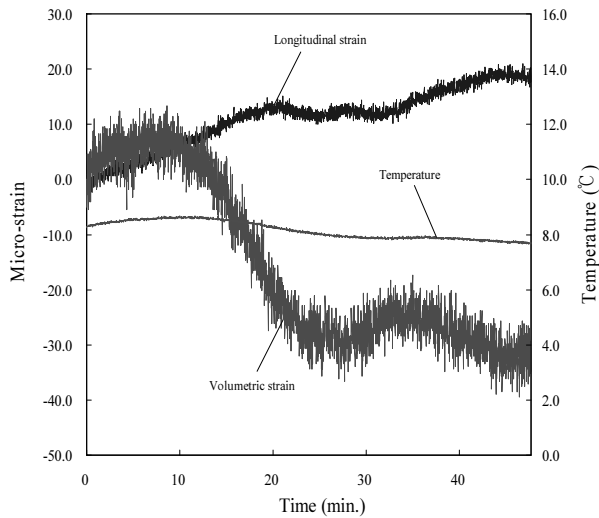
이상의 결과에서 알 수 있듯이 이송관로의 손상으로 인해 관로 내 압력이 누출되는 경우 진공압력만으로 가동되는 쓰레기 이송관로는 송수관, 송유관 및 가스관과 달리 그로 인한 온도변화가 크지 않아 온도측정만으로는 압력누출 현상을 감지하기 어려울 것으로 판단되며, 이를 위해 체적방향으로의 변형률을 측정하는 센서를 고려하는 것이 타당하다.



(a) Longitudinal strains at monitoring sections



(b) Volumetric strain at each sections



(c) Strain at section C

Fig. 5 Results of pipeline leakage test

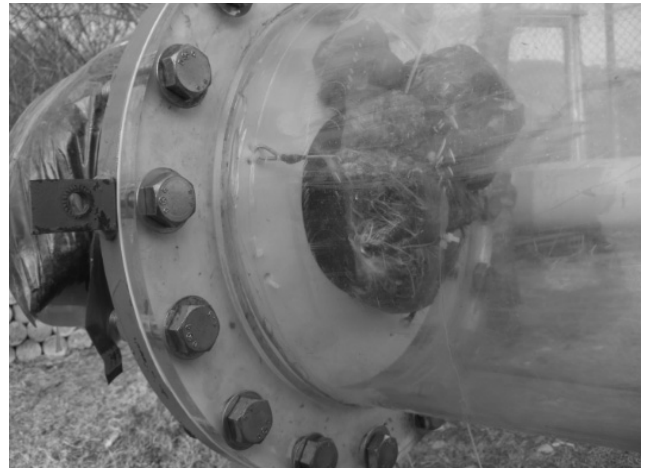


Photo 3 Simulation of pipe blockage by the waste

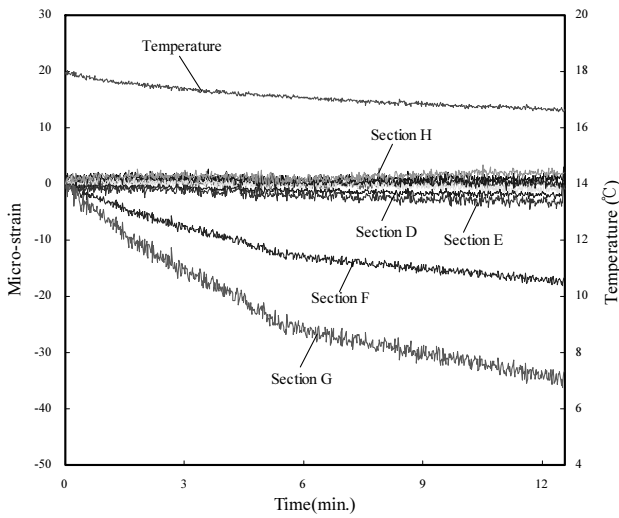
### 2.2.2.3 관로폐색실험

관로폐색실험은 photo 3과 같이 모형 이송관로 중 내부 이송상황을 육안으로 확인할 수 있도록 관로 일부 1m 길이를 아크릴로 구성하고 기존 관로와 아크릴 관로 사이에 투입된 쓰레기 폐기물이 걸려서 막힐 수 있도록 거름망이 부착된 특수 가스켓을 설치하여 관로폐색을 모사하였다.

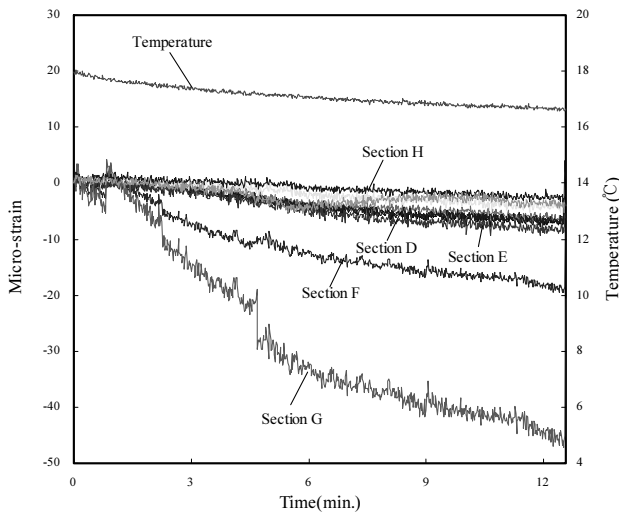
인위적으로 발생시킨 관로폐색 후 발생한 변형을 측정결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 각각 관로폐색에 따른 길이방향과 체적방향의 변형률 변화를 온도와 함께 나타낸 결과로 폐색된 위치와 가장 근접한 단면순으로 큰 변형률이 측정되었다. 폐색된 위치와 약 0.5m 이격되어 가장 근접한 위치인 section G에서는 길이방향으로 약  $36.2\mu\epsilon$  이 측정되었으며, 체적방향으로는  $47.2\mu\epsilon$ 의 변형률이 측정되었다.

관로폐색의 경우에는 압력누출실험결과와는 달리 길이방향과 체적방향으로 모두 압축변형률이 발생하였으며, 폐색된 위치에서 약 6m 이격된 section E에서부터는 약  $10\mu\epsilon$  이하의 변형률이 측정되어 감지가능한 거리가 압력누출에 비하여 짧게 나타났다.

실험결과에서와 같이 관로 폐색시 길이방향의 변형률보다는 체적방향의 변형률 변화가 크게 관측되었기 때문에 이를 바탕으로 관로폐색 감지를 위해서는 체적방향으로 센서를 부착하는 것이 효과적인 것으로 판단할 수 있다. 한편, 본 실험에서는 관로폐색을 약 10분 정도 유지하여 관찰하였지만, 실제로는 관로의 폐색정도 및 지속시간에 따라 이송관로에 발생하는 현상은 본 실험의 결과와는 상이할 수 있을 것이며 관로 일부가 완벽히 폐색되는 경우 추가적인 쓰레기가 주변에 계속 축적되어 관로에 변형을 크게 야기시킬 것으로 예상된다. 또한, 관로폐색실험 중에는 발생한 온도변화는 약  $1^{\circ}\text{C}$ 로서 관로폐색으로 인한 이송관로에 온도변화가 거의 발생하지 않기 때문에 이러한 현상을 감지하기 위해서는 변형률을 측



(a) Longitudinal strain



(b) Volumetric strain

Fig. 6 Results of pipeline blockage test

정하는 것이 보다 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

#### 2.2.2.4 변형실험

이송관로 변형실험은 유압잭을 이용하여 이송관로를 4단계로 5mm씩 변위를 발생시켜 총 20mm의 변형을 유발시켰다. 이송관로 변형은 Fig. 7과 같이 section C를 기준으로 1.4m, 4.5m, 6.4m, 10.9m, 15.9m, 20.9m 및 35.5m의 이격거리별로 총 7개의 위치에서 변형을 발생시켰으며, section C에 설치된 센서를 기준으로 이격거리에 따른 변형률 응답크기를 검토하였다.

이송관로 변형실험 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서와 같이 약 1시간에 걸쳐 수행된 실험기간 중 발생된 온도변화는 약 1°C 수준으로 관로의 휨변형에 의한 온도변형은 다른 실험

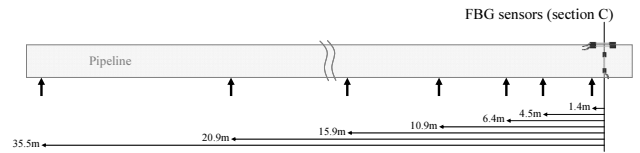


Fig. 7 Loading positions for pipeline deformation

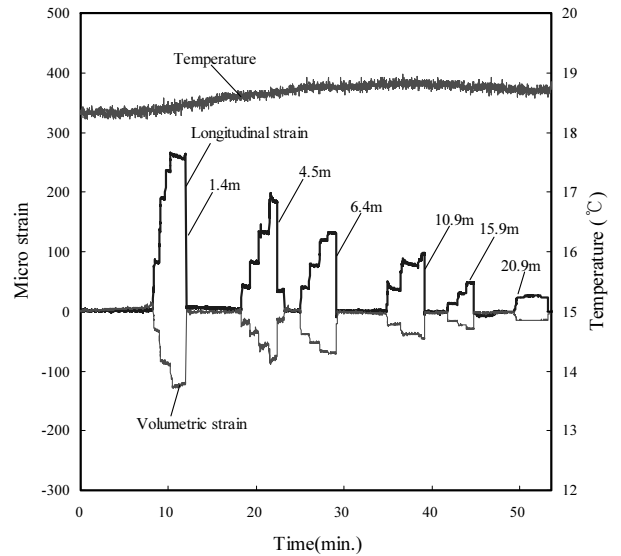


Fig. 8 Results of pipe deformation test

과 마찬가지로 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 측정된 온도데이터는 측정결과 온도보상으로만 사용되었다. 이송관로에 발생된 변위로 인하여 관로에는 길이방향과 체적방향으로 모두 변형률이 측정되었으며, 길이방향의 변형률이 상대적으로 더 크게 발생하는 것으로 나타나 이송관로에 발생하는 변형을 감지하기 위해서는 관로의 길이방향으로 센서를 설치하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.

한편, section C에서 1.4m 이격된 위치에서 변위를 발생시킨 경우가 당연히 가장 큰 변형률이 발생하였으며, 가장 작은 변위인 5mm에 대해서는 길이방향으로 최대 약 82.9 $\mu\epsilon$ , 체적방향으로는 32.1 $\mu\epsilon$ 의 변형률이 측정되었다. 가장 큰 변위인 20mm에 대해서는 길이방향으로 최대 약 264.8 $\mu\epsilon$ , 체적방향으로는 최대 약 126.6 $\mu\epsilon$ 의 변형률이 측정되어 변형률센서를 이용하여 변형에 의한 이송관로의 변화는 명확하게 감지할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 약 20m 이상 떨어진 지점에 발생시킨 5mm의 변위에서는 길이방향 및 체적방향의 변형률이 모두 5 $\mu\epsilon$  이하로 측정되어 감지가 어렵지만 20mm의 변위에 대해서는 길이방향으로 약 27.3 $\mu\epsilon$ , 체적방향으로 약 15.6 $\mu\epsilon$ 의 변형률 변화가 감지되었다. 반면, 35.5m 이격된 위치에서 변위를 발생시킨 경우에는 section C에서 변형률 변화가 감지되지 않아 본 이송관로 변형실험 결과를 바탕으로는 센서로

부터 최대 20m 떨어진 위치에서 약 20mm 수준의 변위가 발생 할 경우 이를 센서에서 감지할 수 있는 것으로 확인되었다.

### 2.3 결과분석

#### 2.3.1 FBG센서의 적용성 고찰

본 연구의 대상인 쓰레기 관로이송시스템은 정형화된 형태가 아닌 생활폐기물을 이송하기 때문에 송수관, 송유관 및 가스관과 관로 손상시 발생하는 응답이 상이하다. 특히 쓰레기 관로이송시스템에서의 이송관로는 특성상 내부에 진공압력만이 존재하고 투입된 쓰레기도 이송시 관로 내부 면적을 점유하는 비율이 높지 않고 점유율도 투입된 종류별로 상이하기 때문에 다른 관로시스템과 유사한 조건으로 손상시의 거동을 이해하는 것은 무리가 있다. 본 연구에서의 실험결과에서 알 수 있듯이 이송관로의 온도변화만을 계측해서는 이송관로의 상태를 파악하는데 한계가 있으며, 온도와 더불어 관로 자체에 발생하는 변형률을 정밀하게 측정하는 것이 쓰레기 관로이송시스템을 장기적으로 모니터링하는 것이 적합한 계측방법일 것이다. 이러한 관점에서 FBG센서는 분포형 센서에 비해 상대적으로 높은 정밀도를 확보한 센서로서 그 적용이 가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서 적용된 FBG센서는 0.5 $\mu\epsilon$ 의 분해능을 갖는 변형률계로서, 쓰레기 이송관로 표면에 길이 및 체적방향으로 각각 부착 설치하여 이송관로 손상에 의해 발생하는 변형률을 측정할 목적으로 적용되었다. 본 연구에서 설정한 이송관로의 대표적인 손상유형인 관로파손에 의한 내부 압력누출, 투입물의 비정상적인 이송에 의한 관로폐색 그리고 지반변형 및 외부충격에 의한 관로변형의 3가지 현상에 대한 변형률

**Table 4** Summary of pipeline leakage test results

Section	Distance from valve	Longitudinal strain	Volumetric strain
C	4m	21.2	37.4
D	29m	13.4	17.2
E	33m	11.5	13.5
B	36m	9.7	10.7

**Table 5** Summary of pipeline blockage test results

Section	Distance from blockage	Longitudinal strain	Volumetric strain
G	0.5m	36.2	47.2
F	1.5m	18.1	19.6
E	6.0m	4.4	9.3
D	10.0m	2.7	7.5
H	25.0m	1.1	3.7

측정 실험결과를 정리하면 Table 4~Table 6과 같다.

Table 4에서 알 수 있듯이 압력누출 현상의 경우 체적방향으로 설치된 센서에서 해당 현상으로 인한 관로의 변형이 보다 크게 계측되어 압력누출에 의한 변형은 관로의 길이방향보다 체적방향으로 센서를 설치하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 그리고, 관로폐색 실험결과인 Table 5에서도 체적방향으로 설치된 센서에서 보다 큰 변형률값이 측정되어, 실제 운영시 이송관로가 여러 요인에 의해 막힐 경우 체적방향으로 설치된 센서에서 그 영향을 감지하는 것이 보다 효과적일 것으로 예상할 수 있다. Table 6의 변형실험에서는 길이방향의 변형률이 크게 발생되어 이송관로에 변위가 발생할 경우를 감지하는데는 길이방향의 센서가 보다 효과적인 것을 알 수 있다.

한편, 모든 실험의 경우에 있어서 손상발생에 따른 이송관로 자체의 온도변화는 크지 않기 때문에 거의 무시할 수 있지만 외부온도 변화에 의해 발생하는 이송관로의 온도변형은

**Table 6** Summary of deformation test results

Displacement	Distance from deformation	Longitudinal strain	Volumetric strain
5mm	1.4m	82.9	32.1
	4.5m	41.6	16.5
	6.4m	41.3	12.3
	10.9m	19.9	10.8
	15.9m	6.2	6.2
	20.9m	2.3	1.3
10mm	1.4m	189.4	66.3
	4.5mm	80.7	36.3
	6.4m	77.8	34.2
	10.9m	36.9	21.8
	15.9m	12.4	15.9
	20.9m	10.3	6.5
15mm	1.4m	236.9	87.9
	4.5m	135.1	67.3
	6.4m	118.4	52.1
	10.9m	79.6	31.2
	15.9m	29.2	22.1
	20.9m	22.9	14.4
20mm	1.4m	264.7	126.6
	4.5m	192.8	16.5
	6.4m	132.1	36.3
	10.9m	87.5	67.3
	15.9m	49.1	79.6
	20.9m	27.3	12.3

반드시 고려하여야 한다. 외부온도 변화에 따른 이송관로에 발생하는 변형은 식(2)와 식(3)과 같은 열팽창식을 이용하여 고려할 수 있다.

$$l = l_0(1 + \beta\Delta T) \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \Delta l / l_0 = \beta\Delta T \quad (3)$$

여기서,  $l$ 은 최종변화길이,  $l_0$ 은 초기길이,  $\beta$ 는 선팽창계수로 강재의 경우  $1.1 \times 10^{-5}$ 이며,  $\Delta T$ 는 온도변화,  $\epsilon_t$ 는 온도변화에 따른 변형률이다.

즉, 이송관로에 손상이 발생하게 되면 센서에서 측정된 변형률  $\epsilon_a$ 값은 초기상태 대비 온도차에 의한 변형  $\epsilon_t$ 과 손상에 의해 변형률  $\epsilon_d$ 이 모두 반영된 측정결과가 측정되며, 여기서 온도영향을 소거하기 위해서는 식(4)와 같이 온도에 의한 변형률 성분을 제거한 값을 고려해야 한다.

$$\epsilon_d = \epsilon_a - \epsilon_t \quad (4)$$

여기서  $\epsilon_a$ 는 측정된 겉보기 변형률이다.

식(4)에서 강재로 제작된 이송관로가 1°C의 온도변화로 인한 변형률을 계산하면 약 10 $\mu\epsilon$ 으로 계산할 수 있다. 본 연구의 실험결과에서 실험 중 발생한 온도변화 1°C에 대한 변형성분을 제외하면, 압력누출실험의 경우 section C와 section D, 관로폐색실험의 경우 section G와 section F에서만 손상이 발생 시 신뢰성 있게 감지가 가능할 것으로 판단된다. 변형실험의 경우 20mm에 대해서는 20m 이상의 거리에서도 이송관로 변형을 감지할 수 있는 것으로 나타났다.

한편, 우리나라는 계절에 따라 일교차가 20°C 이상 발생하는 경우도 있으며, 이 경우 온도변형만으로도 약 200 $\mu\epsilon$ 의 변형이 발생할 수 있다는 것을 시사한다. 그러나, 실제로는 대부분 이송관로가 지중에 설치되어 일교차가 전술한 수준만큼 크게 발생하지 않을 뿐 아니라 온도변화는 손상과 달리 완만하게 발생하는 현상이기 때문에 실시간 보상알고리즘을 통해 온도변형을 측정결과에서 소거가 가능하며 이를 위해서는 측정주기를 짧게 적용할 수 있고, 동적으로도 측정이 가능하여 이송관로에 발생한 충격도 감지할 수 있도록 장기 측정시스템에 FBG센서를 적용하는 것은 합리적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이상의 실험결과를 바탕으로 이송관로 측정을 위한 최적 센서배치를 검토하기 위하여 변형실험 결과를 이용하여 변형발생 위치로부터 이격된 거리와 변형률과의 상관관계를 Fig. 9와 같이 추가로 분석하였다. Fig. 9에서와 같이 변형이 발생한 지점에서 거리가 멀어질수록 센서에서 측정되

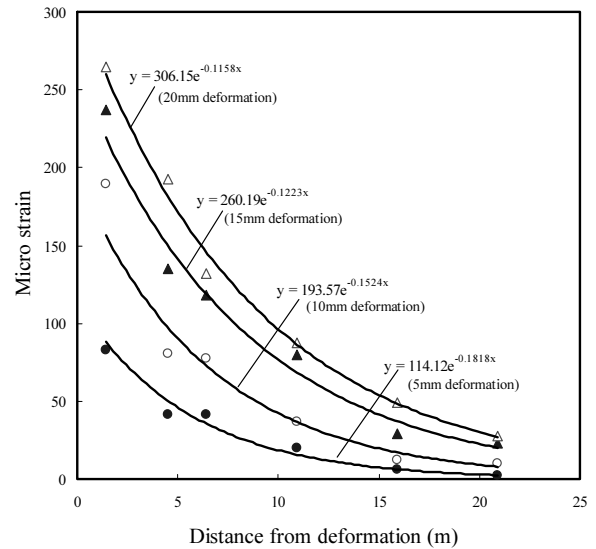


Fig. 9 Correlation between distance and strain of deformation test

Table 7 Summary of correlation between strain and distance

Displacement	Trend line analysis	R <sup>2</sup>
5mm	$y = 114.12e^{-0.1818x}$	0.9859
10mm	$y = 193.57e^{-0.1524x}$	0.9626
15mm	$y = 260.19e^{-0.1223x}$	0.9728
20mm	$y = 306.15e^{-0.1158x}$	0.9962

는 응답변형률은 지수함수 관계로 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 위의 분석결과를 정리하면 Table 7과 같고 이를 통해 발생한 변위의 크기 및 위치에 따른 센서에서 측정되는 변형률을 예상하여 적절한 센서배치를 설계할 수 있다. 본 연구에서는 압력누출과 관로폐색과 같은 현상은 발생한 위치에서 매우 근접한 위치에 설치된 센서에서만 그로인한 응답이 측정될 수 있으므로, 압력누출 및 관로폐색이 빈번하게 발생할 수 있는 곡관부에는 센서를 설치하도록 하고, 직관부에서는 20 mm에 대한 관로변형을 감지할 수 있는 성능을 기준으로 센서 간 간격을 40 m로 설정하였다.

### 3. 결론

1) 본 연구에서는 쓰레기 관로이송시스템에 효과적으로 적용가능한 광섬유 변형률 센서를 이용한 장기 측정시스템을 검토하기 위하여 실험규모 모형 관로이송시스템에 광섬유 FBG센서를 설치하고 대표적인 관로손상 유형인 압력누출, 관로폐색 및 관로변형 현상을 모사한 후 이송관로의 온도와 변형률을 측정하는 실험을 수행하였다. 실험결



과 압력누출과 관로폐색의 경우 이송관로의 체적방향으로 센서를 설치하는 것이 해당현상을 감지하는데 효과적으로 나타났으며, 변형의 경우에는 이송관로의 길이방향으로 센서를 측정하는 것이 효과적으로 나타났다. 또한, 실험결과 손상에 의한 이송관로의 온도변화는 크지 않아 손상감지를 위해서는 변형률 측정이 필수적인 것을 확인하였다.

- 2) 압력누출의 경우 최대 약 37 $\mu\epsilon$ 의 체적방향 변형률이 측정되었고, 이송관로 자체의 온도변형을 제외하면 약 20m 이격된 거리까지 압력누출로 인한 미소 관로변형을 감지할 수 있었다. 관로폐색의 경우에는 최대 약 47 $\mu\epsilon$ 의 체적방향 변형률이 측정되었지만, 관로가 폐색된 지점에서 2m 이내의 위치에서만 신뢰성 있는 응답측정이 가능할 것으로 결과가 나타났다. 변형실험의 경우 변형발생 지점에서 20m 이상 떨어진 거리에서도 5~20mm의 관로변형으로 인한 변형률이 감지되었지만, 관로자체의 온도변형을 제외하면 20m의 이상의 거리에서는 15mm 수준의 변형이 발생해야 감지가 가능한 것으로 나타났다.
- 3) 쓰레기 이송관로의 장기 계측시스템으로 FBG센서를 설치하여 압력누출, 관로변형 및 관로폐색을 감지하기 위해서는 압력누출과 관로폐색에 취약한 곡관부에 체적방향으로 FBG센서를 설치하고, 관로변형에 대해서는 직관부에 길이방향으로 센서간 간격을 40m 수준으로 설치하는 것이 바람직하다고 도출되었다. 또한, 이송관로에 발생하는 변위의 크기 및 위치에 따라 센서에서 측정되는 변형률을 예상하여 적절한 센서배치를 설계할 수 있도록 변형발생 위치로부터의 이격거리와 변형률과의 상관관계 분석을 추가로 수행하여 지수함수 형식의 상관관계식을 도출하였다.
- 4) 본 연구에서 수행된 실험 및 결과는 실제규모로 제작된 모형 이송관로에 대하여 제한된 조건으로 모사 실험을 수행한 것으로 모든 관로이송시스템에 일괄적으로 연구 결과를 적용하기에는 한계가 있다. 그러나, 본 연구는 광섬유

FBG형식의 센서를 활용한 쓰레기 관로이송 시스템의 장기 계측시스템의 요구조건과 이송관로에 발생될 수 있는 손상에 대한 거동을 분석한 결과를 바탕으로 계측시스템을 제안한 것으로 향후 보다 다양한 규모, 형식 및 실험변수를 적용한 추가실험 및 분석을 통해 보다 합리적인 계측시스템의 설계를 지원할 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- Choi, H. S. (2010), Settlement of the Pipeline Blockage for a Refuse Collection System, Thesis of Master degree, Graduate School of Industry Hanyang University, 2010.
- Chung, W. (2010), Optimization of Waste Pneumatic Transportation System by Results of Facility Diagnosis, *Journal of Fluid Machinery*, Korean Society of Fluid Machinery, 13(5), 54-57.
- Nikles, M., Briffod, F., Burke, R., and Lyons, G. (2005), Greatly Extended Distance Pipeline Monitoring using Fibre Optics, *Proceedings of OMAE05*, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 12-17, Halkidiki, Greece, ASME, 539-546.
- Takashima, S., Asanuma, H., and Niitsuma, H. (2004), A prototype of a Fiber-Optical Downhole Measurement System of Pressure, Temperature and Flow, *Proceeding of 2004 SEG Annual Meeting*, 10-15 October, Denver, Colorado, Society of Exploration Geophysicists, 123-125.
- Zou, L., Bao, X., Afshar V. S., and Chen, L. (2004), Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber, *Optics Letters*, 29(13), 1485-1487.
- Zou, L., Bao, X., Yang, S., Chen, L., and Ravet, F. (2006), Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors, *Optics Letters*, 31(18), 2698-2712. Geophysicists, 123-125.

Received : 02/12/2016

Revised : 02/19/2016

Accepted : 02/22/2016

**요 지 :** 최근 지속적으로 증가하는 생활폐기물의 배출과 처리가 사회적인 문제로 대두됨에 따라 새로운 폐기물의 수거 및 운반방식으로 쓰레기 이송관로시스템이 최근 부각되고 있다. 이러한 이송관로시스템은 긴 연장을 갖기 때문에 이송관로에 문제가 발생할 경우 즉각적으로 해당 위치를 파악하여 조치할 수 있는 적절한 장기계측시스템을 적용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 FBG 광섬유 변형률 센서를 이용한 계측시스템의 적용성을 검토하고, 이를 이용한 최적의 계측시스템을 도출할 수 있는 자료를 확보하기 위한 실험적 연구로서, 이송관로에 발생할 수 있는 대표적인 손상유형으로 압력누출, 관로변형 및 관로폐색의 3가지 현상을 실제규모의 모형 이송관로실험체에 모사한 후 관로에 설치된 FBG센서로부터 응답을 측정하였다. 실험결과를 바탕으로 실험변수로 적용한 각각의 손상유형에 따른 효과적인 센서설치 방법과 배치방법을 도출하였다. 특히 관로변형실험 결과는 변형발생지점으로부터의 센서와의 거리에 따른 응답 상관관계를 통해 센서배치간격을 산출하여 FBG 센서를 이용한 계측설계를 수행하였다.

**핵심용어 :** 이송관로시스템, 광섬유 변형률 센서, FBG, 장기계측시스템, 센서배치간격