

광섬유센서를 이용한 쓰레기수송관로 유지관리 모니터링에 대한 연구

이준영^{*†} · 김채석^{**} · 김봉규^{**}

The Study about Control Monitoring of Fiber Optic Sensor on Vacuum Pipeline for Waste Collecting System

Joon Young Lee^{*†}, Chae Suk Kim^{**}, Bong Gyu Kim^{**}

Key Words : Vacuum Pipeline(수송관로), Waste(쓰레기), Temperature Sensor(온도센서), Strain Sensor(변형센서)

ABSTRACT

The most recent, Vacuum Pipeline for Waste Collecting System, to collect MSW(Municipal Solid Waste) efficiently, is used environmental preservative, to emit less air pollution, in New City. However, it is difficult to monitor broken pipe and filled mass of Waste, because Vacuum Pipeline is laid underground. Therefore, FBG, optical fiber sensor, is used to inspect the temperature change and longitudinal strain to take proper action for unusual situation. I have need to accumulate sensor data of district control. I hope to be used Vacuum Pipeline more than 30 years in New City

1. 서 론

신도시에 건설되는 쓰레기수송관로는 집하장, 수송관로, 투입구 등으로 구성되어 가정에서 발생하는 생활쓰레기중 가연성쓰레기, 음식물쓰레기를 자동으로 수거하는 시스템이다. 수송관로는 상수도관, 하수도관, 가스관 등과 같이 지하에 매설되어 있어 평소 존재의 가치를 느끼지 못하고 있으나 매일 매일 이용되는 사회기초시설이다. 지하에 매설된 쓰레기수송관로는 항상 지하수와 온도변화에 노출되어 있을 뿐만아니라 토압, 수압, 활하중, 지진 등의 각종 압력이 가해지는 상태로 있기 때문에 유지관리가 절대적으로 필요한 시설이다. 신도시에 설치되는 매설관의 우선순위는 압력영향에 따라 구분할 수 있으며 첫 번째, 중력만의 영향을 받는 우수관, 오수관의 배치가 필요하며, 두 째는 기계적 저압력을 이용하는 진공관인 쓰레기수송 관로를 배치하여야 한다. 세 번째로 고압력이 필요한 지역난방관, 상수도관, 중수도관, 가스관 순으로 배치하고, 마지막으로 관로 변형이 다소 여유롭고 플렉시블한 전기선로, 통신선로, 유선TV선관로가 배치되어야 한다. 지하관로중 우수관과 오수관의 역할이 중요하나 누수가 되어도 시

스템에 일시에 영향을 주지 않지만 진공압으로 가동되는 쓰레기 수송관로는 어떤 지점에서 문제 발생시 쓰레기와 지하수, 이물질 등이 혼입되거나 진공압력이 대기압상태로 높아질 경우 쓰레기 이송이 불가능시 지역주민들로부터 민원이 발생될 수 있다. 수송관로내 진공압이 파괴되지 않도록 철저한 감시가 필요하나 컴퓨터가 고도로 발달된 현재까지도 자동적인 원인 파악이 곤란하다. 또한 쓰레기는 송풍기의 가동과 원거리 투입구 배출밸브의 개폐에 따라 쓰레기가 이송되고 있는 것으로 판단하고 있으나 중간의 어느 지점에 문제가 발생되었는지 알 수 없다. 따라서 수송관내의 이상유무를 실시간으로 유지관리하기 위한 모니터링 시스템이 필요하다. 수송관로에 적합한 유지관리기법은 이상거동이 발생하였을 때 추출된 신호를 분석하여 관로상태를 평가하고 손상부를 탐지하기 위한 진문화 및 자동화에 의한 전문 감시체계로의 전환 필요성이 증대되고 있는 실정으로 광섬유계측(Fiber Optic Sensor)시스템⁽¹⁾을 구축하여 수송관로의 각종 부위에 설치된 센서를 통해 이를 감지하고, 그 후속조치로서 신속한 응급조치 및 보수·보강대책을 수립하기 위한 기초자료를 제시하여 광센서를 통한 정기적이고 장기적인 계측결과를 이용하여 관로의 노후 및 손상과정에 대한 분석 자료로 활용함으로써 쓰레기수송관로 성능보증 수명 30년을 그 이상으로 연장시킬 수 있어 유지관리비용을 절약할 수 있다

본 실험에서는 FBG(Fiber Bragg Grating)⁽²⁾센서를 이용

* 한국토지주택공사

** 한국토지주택공사

† 교신저자, E-mail : jhun@lh.or.kr

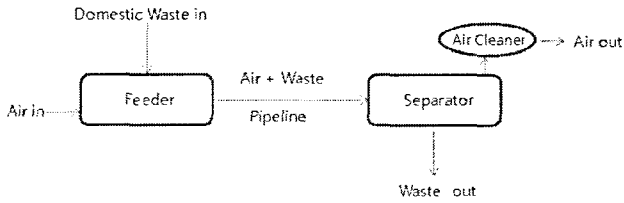


Fig. 1. Basic elements of waste collection system

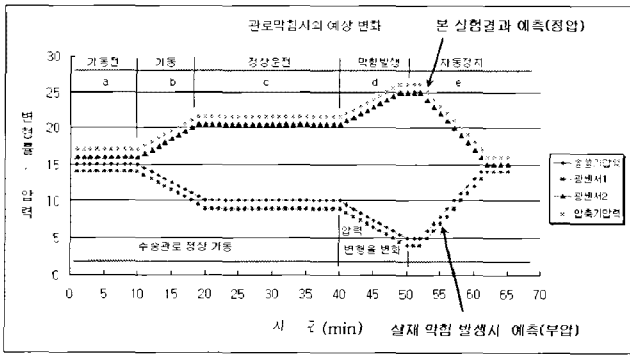


Fig. 2 transforming curve of pipe clogged

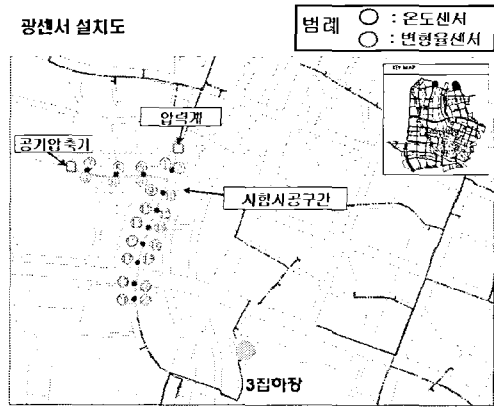


Fig. 3 Pipe-line and FBG sensor



Fig. 4 Sensor attached on pipe

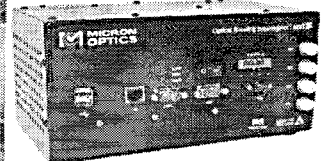


Fig. 5 SM125 Field Module

하여 수송관로에 가하여진 압력변화, 온도변화 및 외부 충격을 통하여 변화현상을 추정하는 실증실험을 실시하였다. 쓰레기수송관로시스템은 Fig. 1과 같다

2. 실험장치 및 방법

2.1 수송관로에 부착된 sensor의 변화예측

수송관로에 막힘현상이 발생시 송풍압력 및 수송관로의 변형으로 인한 광섬유센서의 변화를 상기 Fig. 2와 같이 구간별로 나타낸 것이다.

가동전 a구간은 송풍기가 정지 상태이므로 대기압 및 광섬유센서에 변화가 없으며 b구간은 송풍기 가동시작으로 수송관로의 압력 낮아지며 광섬유센서 압축응력이 발생되고 정상운전구간인 c구간은 공기 유입량과 배출량이 같아져 수송관로 내부 압력이 평형을 이루어 수송관로 압력안정, 광섬유센서 변화량 안정이 된다. 막힘 발생되는 d구간은 유입공기량 감소, 송풍기쪽 수송관로 압력이 낮아지고 공기 흡입구 쪽 압력이 높아지며 광섬유센서 1에서 압축변형이 측정(예측)되고 광섬유센서 2에서 인장변형이 발생 된다. 따라서 e구간은 송풍기압 증가로 인한 자동정지 상태로 압력 원상태 복원된다. 송풍기를 정지 및 가동하여, 광섬유센서의 변화량을 관찰하면, 광섬유센서의 변화가 발생하지 않는 지점 이전 부분 관로에서 막힘이 발생 했다는 것을 알 수 있으며 또한 온도 변화도 동일하게 예측할 수 있으며, 상기 a~e까지의 현상을 이용하면 막힘, 누수 등의 구간을 찾아낼 수 있다.

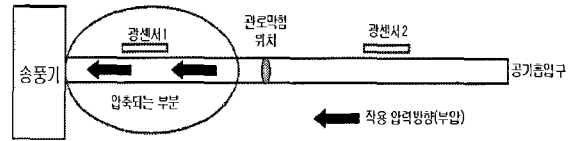


Fig. 6 Actual Effect by Blocking in pipeline

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 쓰레기 수송관로는 관경 500mm, 길이 500m이며, 지중에 매설된 쓰레기수송관로 양끝을 막고 광섬유센서 22개(strain센서 11개, 온도센서 11개)를 설치하였으며 실험장치의 전체적인 field는 Fig. 3에 나타나 있다.

수송관로에 Fig. 4와 같이 strain센서와 온도센서를 수송관로 길이방향으로 같은 지점에 설치하고 방수처리 후 지중에 매설한 측정용 계측장치는 Fig. 5와 같으며 software는 ENLIGHT sensing Analysis이다. 광섬유센서는 백만분의 1의 미세한 변형률을 측정하며 ppm(parts per million)으로도 표기한다.

2.3 실험방법

매설한 수송관로 기밀성 실험을 위해 공기압 3kgf/cm² 상시 가압 후, 다시 공기압을 제거한 후, 단계별 1분 지속가압 (0.2kgf/cm², 0.4kgf/cm², 0.6kgf/cm²)시 수송관로에서 발생하는 변형을 실시간으로 측정하여, 가압에 따른 수송관로의 내부압력을 수송관로의 정상운전 상태인 0.2kgf/cm² 이상으로 가압하게 되면, 수송관로의 미세변형으로 인하여 광섬유센서는 변형량을 나타내며, 이 데이터를 근거로 수송관로의 변

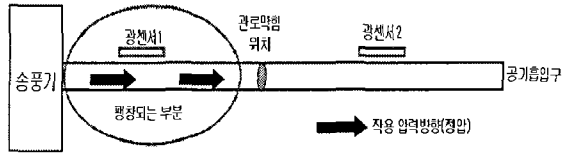


Fig. 7 Simulation Effect by Blocking in pipeline

형 및 파손발생 유무 등의 변형을 측정한다.

Fig. 6과 같이 쓰레기 수송관로 운전 시 쓰레기의 크기로 인하여 수송관로 막힘 현상이 발생할 경우가 있으며, 막힘현상이 발생하면 수송관로는 송풍기의 과다압력 흡입으로 인하여 막힘현상이 발생한 부분을 경계로 수송관로 자체에 부압이 발생하게 된다.

본 실험에서는 Fig. 7와 같이 수송관로의 막힘현상을 모의하기 위하여, 부압이 아닌 정압을 작용시켜, 정압 시 발생하는 수송관로의 변형을 측정한다. 광센서의 미세한 변형률은 밀폐관의 정압시 인장변형과 부압시 압축변형을 PPM단위로 측정할 수 있으므로 공기압 계측이 현장에서 편리한 정압으로 계획하였다

밀폐된 수송관로에 air compressor로 수송관로의 진공압력이 최대 $-0.5 \sim -0.6 \text{Kgf/cm}^2$ ($-5,000 \sim -6,000 \text{mmAq}$)인 점을 감안 막힘시 예상되는 관압변화에 의한 관로변형 유효 감지여부를 확인하기 위하여 0.2kgf/cm^2 , 0.4kgf/cm^2 , 0.6kgf/cm^2 의 공기압을 순차적으로 가압하여 파장변화를 모니터링 한다. 시공 중인 수송관로의 한쪽 끝을 밀폐하고, 다른 한쪽은 compressor와 연결하고 광섬유센서 및 계측장비의 초기화 및 데이터를 저장 준비하였다. compressor를 작동시켜 수송관로의 내부압력을 가압조건에 의거 가압을 실시하고, 가압시 발생하는 수송관로의 팽창거동을 광섬유 sensor로 계측하고 가압 유지시간은 60분 이상으로 광섬유센서의 파장데이터를 사용하여 수송관로의 팽창거동 계측 가능 유무를 확인한다.

3. 실험결과

쓰레기수송관로에 온도센서 및 strain센서를 각각 11개소에 Fig. 8과 같이 측정하였다. 밀폐된 수송관로에 air compressor를 이용하여 순차적으로 정상운전 압력이하 0.2kgf/cm^2 , 정상운전 압력 0.4kgf/cm^2 , 막힘 발생시 순간압력 0.6kgf/cm^2 공기압을 가압한 결과 1번 온도센서의 온도가 -10 micro strain 까지 변화하였으나 배관이 노출된 구간으로 외기 온도에 민감하게 반응하고 있으며 2번 strain센서는 시간에 따라 변형율이 -6 micro strain 로 측정되었다.

매설된 관로에 부착된 3번 온도센서는 변화가 없었으나 4번 strain센서는 매설구간으로 센서가 차량진입으로 인한 급격한 변형이 발생되었으며 압력에 의한 파장변화의 변형정도가 1 micro strain 이하로 noise 정도로 판단된다. 5번 온

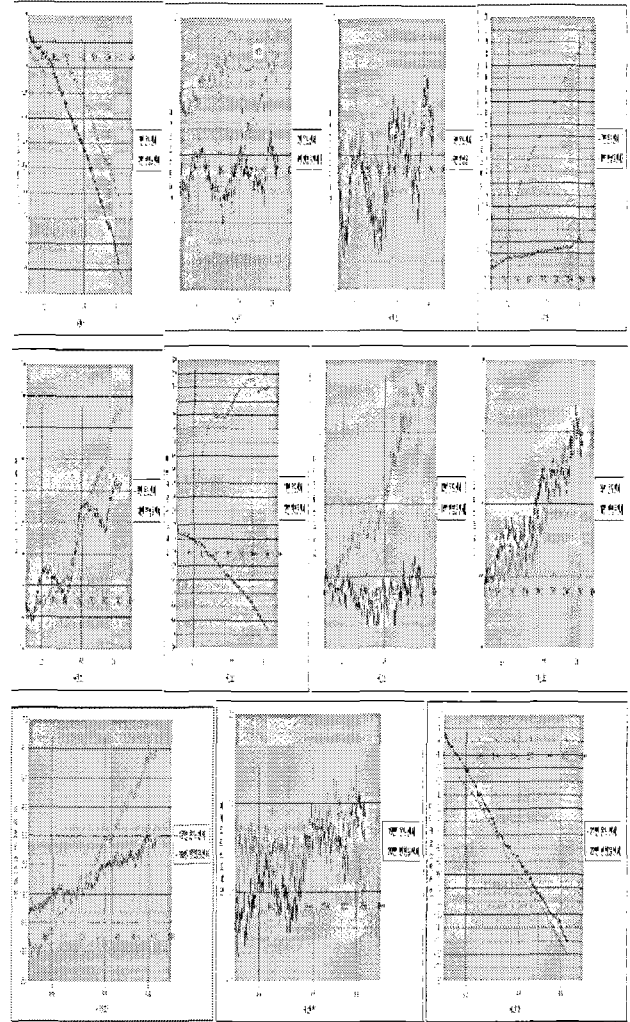


Fig. 8 temp. and strain sensor point No. 1~22

도센서와 6번 strain센서는 매설구간으로 압력에 의한 파장변화 경향 없으며 변형정도가 1 micro strain 이하를 보여주고 있다. 노출된 구간인 7번 온도센서는 변화가 없으며 배관이 외기 온도에 민감하게 반응하지 않고 아무런 경향이 나타나지 않았고, 8번 strain센서는 시간에 따라 변형율이 20 micro strain 까지 변화폭이 증가되었다. 매설구간인 9번 온도센서는 4 micro strain 정도로 변화하였으며, 10번 strain센서는 시간에 따라 6.5 micro strain 으로 변화하였다. 배관이 노출된 11번 온도센서는 온도가 -7 micro strain 까지 변화하였으나 외기 온도변화에 특징을 찾을 수 없었다. 12번 strain센서는 시간에 따라 변형율이 12 micro strain 으로 변화하였다. 13번은 변화하는 경향이 없었으며, 14번 strain센서는 시간에 따라 3 micro strain 으로 변화하였다. 매설구간으로 압력에 의한 strain센서 변화와 온도센서의 온도와 변형율은 서로 상관관계가 없어 보였다. 매설구간인 15번 온도센서는 2 micro strain 변화하였으며, 16번 strain센서는 시간에 따라 2 micro strain 변화하였다. 매설구간인 17번 온도센서는 3 micro strain 양호하게 변화하였으며, 18번 strain

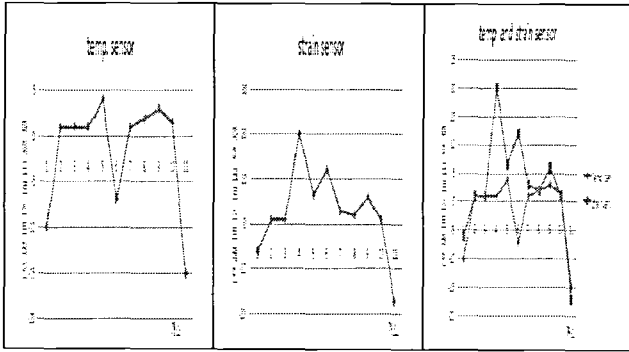


Fig. 9 temp. and strain sensor

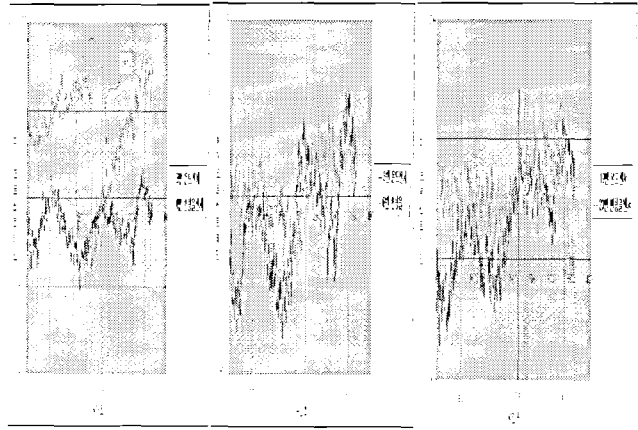


Fig. 12 bad section(temp. sensor No. 3, 5, 19, strain sensor No. 4, 6, 20)

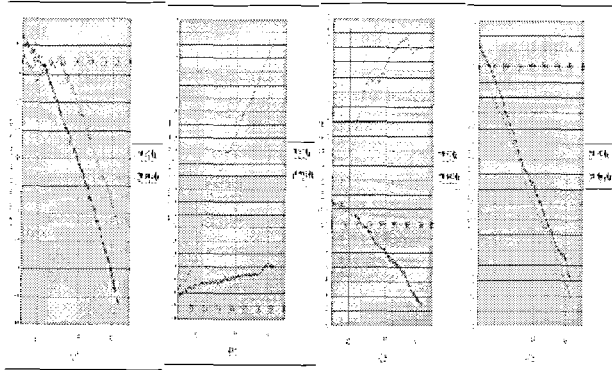


Fig. 10 exposed section (temp. sensor No. 1, 7, 11, 21, strain sensor No. 2, 8, 12, 22)

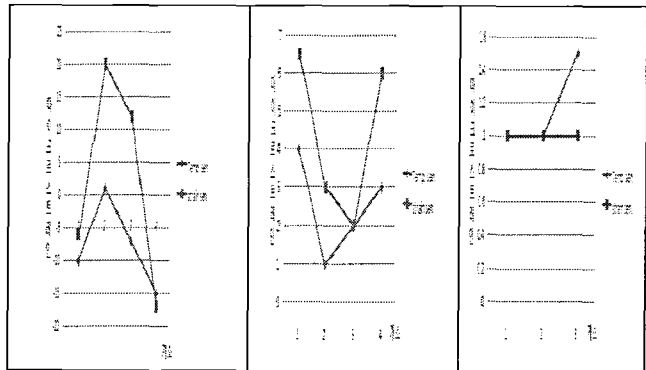


Fig.13 exposed section Fig.14 good section Fig.15 bad section

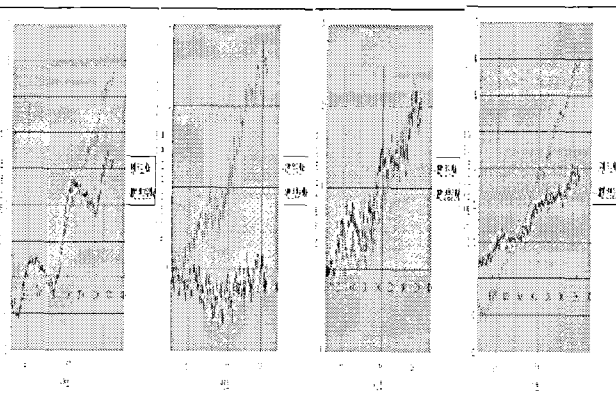


Fig. 11 good section(temp. sensor No. 9, 13, 15, 17, strain sensor No. 10, 14, 16, 18)

sensor는 시간에 따라 6 micro strain 변화하였고, 압력에 의한 파장변화 경향 양호하였다. 매설구간인 19번 온도센서는 1.5 micro strain 양호하게 변화하였으며, 20번 strain센서는 변형정도가 1 micro strain 이하로 noise 수준으로 압력에 의한 파장변화 경향이 없었다. 노출된 구간인 21번 온도센서는 -15 micro strain까지 변화하였으며 22번 strain sensor는 변형율이 -17 micro strain으로 변화되었다.

또한 Fig. 9와 같이 온도센서 3, 5, 7, 13, 15, 17, 19는 측정값이 일정함을 보여주고 있으나 온도센서 1, 9, 11, 21은

많은 차이를 보여주고 있다. strain센서 4, 6, 16, 20은 측정값이 일정함을 보여주고 있으나 strain센서 2, 8, 10, 12, 14, 18, 22는 많은 차이를 보여주고 있어 계속한 결과가 상호 불일치하는 결함이 있음을 알 수 있었다. 온도센서와 strain센서의 상호 연관되어 작동한 센서는 3, 4, 5, 6, 15, 16, 19, 20, 21, 22로 전체 22개중 45% 정도만 일치성을 보여주고 있다.

60분 동안 압력을 0.2kgf/cm²씩 증가시켜 측정된 결과에 따라 실험구간을 3구간으로 나누어 보면 Fig. 10과 같이 지중에 매설되지 않은 노출구간 4개소는 실제 배관에 가한 압력변화와 상관없이 외부영향에 따라 압력과 온도가 변화되었다. Fig. 11과 같이 실제 배관에 가한 압력변화와 유사한 측정결과가 나타난 양호한 구간으로 4개소가 있으며, Fig. 12와 같이 압력변화가 미미한 불량구간 3개소로 측정되었다. 노출구간을 제외한 구간에서 파장변화가 다르게 나타났으며, 토피고 1.5~3m 구간의 차량이동에 따른 충격감지는 2 micro strain의 실시간 변형이 측정되었다. 노출구간은 태양열 등의 온도변화에 의한 외부 환경요인에 따른 높은 변화량이 발생하여 판단이 곤란하였으며 불량구간이 나온 이유는 배관이 서로 완충 부위가 없이 연속적으로 접속되어 변화량

이 큰 부위의 변형이 변화량이 작은 부위에 영향을 주었으며, 또한 토압에 의한 마찰력이 작용하여 관변형이 다르게 발생되었다.

노출된 구간의 온도센서 1, 7, 11, 21와 strain센서 2, 8, 12, 22의 상호 연관성을 Fig. 13과 같이 분석한 결과 온도센서 진폭은 0~15 micro strain이며 strain센서의 진폭은 -15~20 micro strain으로 크게 변화하고 있다. 밀폐된 구간의 양호한 온도센서 9, 13, 15, 17와 strain센서 10, 14, 16, 18의 상호 연관성을 Fig. 14와 같이 분석한 결과 온도센서 진폭은 2~3 micro strain이며 strain 센서의 진폭은 1~4.5 micro strain를 나타내고 있다. 밀폐된 구간의 불량한 온도센서 3, 5, 19와 strain센서 4, 6, 20의 상호 연관성을 Fig. 15와 같이 분석한 결과 온도센서 진폭은 1~1.5 micro strain이며 strain센서의 진폭은 1 micro strain으로 변동이 없게 나타난 것을 살펴보았을 때 양호하게 보였으나 압력을 0.2kgf/cm²씩 증가하였어도 거의 변화가 없었다.

4. 결 론

본 실험에서는 관로의 온도변화와 길이변형이 컸다. 관로는 시운전시 다양한 이유에서 단면별로 최대 약 35micro strain의 변형률이 발생하는 것으로 관찰되었으며, 이러한 결과를 토대로 관로에 발생하는 이상현상을 모니터링 하기 위해서는 변형률 이력을 별도로 관측하는 프로그램이 개발되어야 할 것으로 판단된다. 최적센서 설치방안을 도출하면 직관에 설치간격은 약 45m, 설치위치는 직관외부 중앙 45도 하단면에 3개(온도, 길이, 직경) 설치, 곡관 설치위치는 곡관외부 중앙 45도 하단이 적당하며, 45m 이상의 직관부나 곡관부에서는 중간에 센서를 하나 더 두어야 할 것으로 판단된다. 관로에 발생할 수 있는 직경방향 변형, 길이방향 변형, 온도변

화의 이상현상 원인을 다음과 같이 총 6 가지로 구분하고 실험결과를 바탕으로 각각의 현상을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 관로연결부 누기로 인한 압력감소 : 길이방향 변형률, 온도 변형률
- 2) 가동시 외부공기 흡입 및 4계절별 외부온도 변화 : 길이방향 변형률, 온도 변형률
- 3) 조대쓰레기로 인한 관로막힘시 압력 증가 : 길이방향 변형률, 직경방향 변형률, 온도 변형률
- 4) 쓰레기이송시 관로의 마찰 및 충격력 전달 : 길이방향 변형률, 직경방향 변형률
- 5) 관로파손시 지하수 등 유입 : 길이방향 변형률, 직경방향 변형률, 온도 변형률
- 6) 기타 부등침하 등으로 발생된 관로변형 : 길이방향 변형률, 직경방향 변형률

쓰레기수송관로가 도로에 매설되어 차량통과시 일시적인 충격에 따라 Strain이 민감하게 되므로 목적신호 이외의 간섭신호를 배제시키는 방법 및 목적신호를 증폭시키는 방법등의 연구가 필요하며, 광케이블 감지기는 도로상 특정한 지역에서 작업을 하고 적재과중 차량의 통과 여부 등을 모니터링할 수 있다. 또한 GIS의 기초자료로 이용할 수 있는 장점도 있다. 현재 광케이블 감지기에 대한 측정기준과 해석방법이 정립되어 있지 않아 이 분야에 보다 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 김유성의 4, 2008, “광섬유센서 케이블을 이용한 분포개념의 온도 및 변형률 계측기법의 활용”, 광해방지기술, vol. 2, No. 1, pp. 28~40.
- (2) 문형열, 2005, “광섬유를 이용한 지중 매설관거 유지관리 모니터링에 대한 연구”, 금오공과대학교 석사학위논문, pp. 30~32.