

진동신호를 이용한 타공사 조기 감시 기술 연구(Ⅰ)

조 성 호 · 전 경 수 · 박 경 완 · 조 용 범 · 이 선 업 · 고 영 태

한국가스공사 연구개발원
(1999년 11월 24일 접수, 1999년 12월 8일 채택)

Study on real time monitoring to detect third party damage using vibration signal

S.H. Cho · K.S. Jeon · K.W. Park · Y.B. Cho · S.Y. Li · Y.T. Kyo

R&D Center, Korea Gas Corporation

(Received 24 November 1999 ; Accepted 8 December 2000)

요 약

매설되어 있는 배관에 위험성을 초래하는 요소중 하나는 굴삭기와 천공기같은 타공사에 의한 것이다. 타공사에 의한 피해는 다른 원인에 의한 것보다 사고발생시 막대한 인명피해를 초래하기 때문에 안전관리가 매우 필요하다. 따라서 본 연구에서는 타공사를 조기에 감시하기 위해서 진동센서를 이용하여 타공사와 같은 충격신호를 감지할 수 있는지와 얼마만큼 떨어진 거리까지 전파할 수 있는지에 대하여 한국가스공사 배관에 적용하여 실험하였다. 그리고 감지된 신호의 충격위치를 알아보기 위하여 모의배관내에서의 실험을 수행하였다.

그 결과 가까운 거리에서 감지된 충격신호는 주된 신호가 고주파수 대역이며, 거리가 멀어질수록 고주파수 대역의 성분들은 소멸되어지고 저주파수 대역만이 남아 있게 된다. 또한 5.3km 떨어진 공급관리소에서의 실험을 통하여 40kg의 물체가 10cm, 5cm의 높이에서 자유낙하 하였을 때 진동센서(가속도계)를 통하여 감지 가능함을 확인하였다

Abstract - Third party damage is one of the causes intrimiting the safety of a buried pipelines and it is very important to detect third party damage on pipelines as soon as possible.

The purpose of this study is whether third-party damage can be detected by accelerometer sensor and how far the third-party damage signal can propagate. And a pilot experiment was carried out in order to find third-party damage location. As a result, the detected signal's spectrum is high frequency at short distances, as the distance is far, the signals in high frequency range are attenuated and those in low frequency range remain.

It was also proved that third-party damage within 5.3km distance can be detected by monitoring vibration signals.

Key words : third party damage, vibration signal, spectrum, gas station

1. 서 론

우리가 살고 있는 주거지의 지하에는 가스관, 상·하수도관, 송유관, 통신 및 전력 cable관, 각종 duct 및 저장탱크 등과 같은 수많은 지하구조물들이 존재하고 있으며, 경제 발전 및 인구증가에 따라 지하매설 구조물의 규모 및 개수도 나날이 증가하고 있다. 따라서 지하시설물과 연관된 안전사고가 빈발하고 있으며, 이와 같은 추세는 향후 계속하여 증가될 것으로 전망된다.

배관의 안전성에 위해를 주는 요소에는 크게 타공사(굴삭기, 천공기)에 의한 배관 파손, 지반침하 혹은 유동에 따른 배관 변형, 지하철 혹은 타 지하시설물로부터의 미주전류에 의한 전기부식이 있다. 이중 타배관의 준설이나 이설시 또는 건설작업시 타공사에 의한 가스배관 파손이 가장 직접적이며 대형사고로 이어질 가능성이 가장 높다.

한국가스안전공사의 통계에 의하면 1994년부터 1998년사이의 4년간 전체 가스사고 건수는 1,817건이며 이중 타공사 관련 사고는 122건으로 전체사고의 6.7%를 차지하고 있는 것으로 집계되고 있다. 그러나 사망률은 전체 295명중 101명으로 34.2%를 차지하고 있을 정도로 타공사 관련 가스사고는 대형사고로 이어지고 있다. 이 중에서도 사고로 1995년의 대구 지하철 공사 현장 폭발사고가 가장 대표적인 예이다.

한국가스공사에서 현재 운영하고 있는 배관은 '98년 말 현재 총 연장 1,482km에 이르고 있으며, 2002년까지 2,345km에 이를 전망이다¹⁾. 따라서 기존에 매설되어 있는 배관에 적용하여 타공사를 조기에 감지하기 위해서는 보통 10km~20km사이마다 있는 공급관리소에 센서를 설치하여 감지해야하는 전제 조건이 있다. 그러므로 공급관리소에 센서를 설치하고 이 신호를 증폭하여 신호처리를 거친후 중앙통제소에서 타공사에 의한 충격신호일 경우 알람을 울리는 시스템을 갖추어야 한다. Fig. 1에 이 기술의 개요도를 보여주고 있다.

본 연구에서는 충격신호가 얼마만큼 떨어진 거리까지 감지할 수 있는지와 이 신호의 충격 위치를 파악하고자 진동센서를 이용하여 활배관 및 모의배관 실험을 통한 연구를 수행하였다.

2. 충격신호의 전파 특성 및 감쇠특성

굴삭기와 천공기등의 충격신호가 배관에 가해지면, 배관의 표면에 탄성파(elastic wave)가 발생하고 이로 인하여 가스에 음향파(acoustic wave)가 발생하게 된다. 그러나 탄성파는 매설되어 있는 배관의 경우, 토양과의 상호관계에 의해서 급속히 빨리 사라져 버린다. 반면에 음향파는 가스를 따라 멀리 전파해 나간다. 음향파가 가스를 통해 전파해감에 따라 배관표면에 응력을 발생시켜 변위가 나타나므로 배관

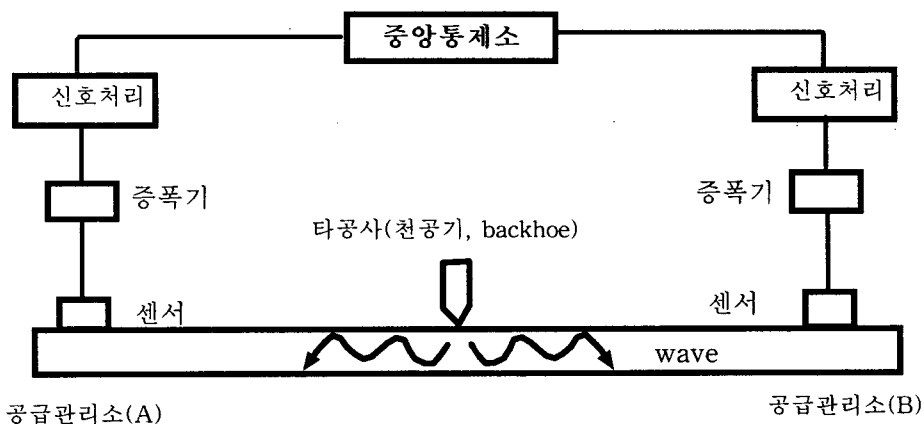


Fig. 1. Third-party damage detection system

표면에서 가속도계와 같은 진동센서를 이용하여 이를 감지할 수 있다.

음향파는 전파되어 가면서 신호의 크기가 에너지의 손실 및 분산에 의해 감소하게 된다. 배관과 같은 원형 duct내에서의 감쇠의 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 열전달 손실, 점성 손실등 전형적인 감쇠에 따른 것으로 흡음계수는 주파수의 제곱에 비례한다. 두 번째는 duct 벽면의 손실에 의한 것으로 주파수의 제곱근에 비례한다. 따라서 전체 흡음계수는 첫 번째와 두 번째를 합한 것으로 식(1)에 나타나 있다²⁾.

$$a_T = a_\beta + a_\omega = \frac{af^2}{P_0} + b\sqrt{f/P_0} \quad (1)$$

a_T : 전체 흡음계수(dB/m)

a_β : 열전달, 점성손실에 의한 흡음계수 (dB/m)

a_ω : 벽면 손실에 의한 흡음계수(dB/m)

P_0 : duct 내 압력

a, b : 물성치에 따른 계수

식(1)에서 보는 바와 같이 흡음계수는 duct의 내압에 반비례하므로 duct내 압력이 높으면 높을수록 음향파의 전파되는 거리는 증가하게 된다.

3. 현장 실험

충격신호의 거리별 신호특성 및 신호전파 도달거리를 알아보기 위하여 충격을 가하는 위치로부터 0.36km와 5.3km 떨어져 있는 거리에서 실험을 수행하였다.

3.1. 실험 1

1) 실험방법 : 0.36km 떨어진 거리

배관의 양쪽끝이 노출된 곳의 한곳에서는 타공사와 같은 충격신호를 가하고 상대 쪽 끝은 Fig. 2와 같이 용접부위 위의 피복이 없는 곳 위에 센서(가속도계)를 부착한다. 그리고 센서의 신호를 증폭하기 위한 증폭기를 연결한 후 신호를 저장하기 위한 μ -Musics라는 신호저장장치와 신호를 monitoring하고 분석하기 위하여 FAMOS라는 S/W를 사용하였다.

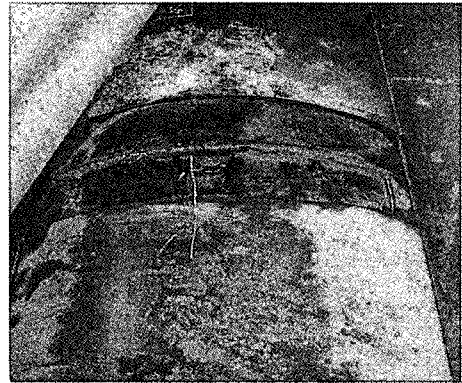


Fig. 2. Sensor on pipeline.

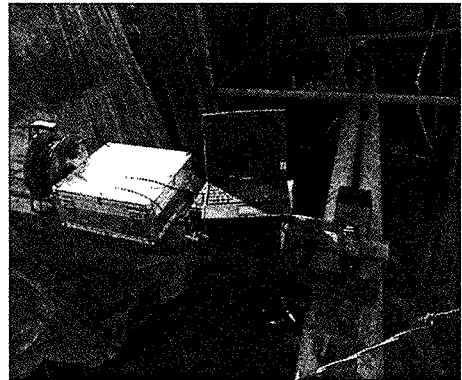


Fig. 3. Amplifier and Data recorder.

충격을 가한 곳에서부터 센서가 설치된 곳까지의 총 거리는 0.36km이고 가압된 압력은 50 kg/cm²이다. 충격은 4kg추와 1kg의 스펀너로 충격을 가하여 충격신호를 감지할 수 있는지와 감지된 신호의 특성을 분석하기 위해 주파수분석을 수행하였다.

2) 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 4kg추를 가지고 4회 가격을 하였을 때 0.36km떨어진 거리에서 감지된 신호이고 Fig. 5는 스펀너로 5회 가격하였을 때 감지된 신호이다.

타격하는 물체에 따라 어느정도의 차이는 있으나 주파수성분의 변화에는 주된 변수가 아님을 알 수 있었다.

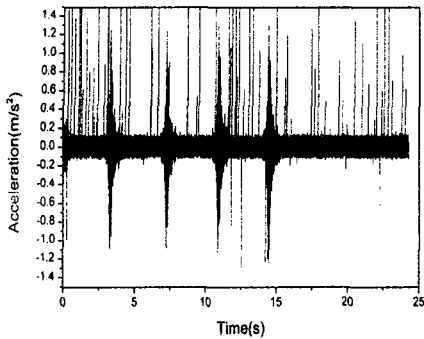


Fig. 4. Detected impact signal(4kg weight)

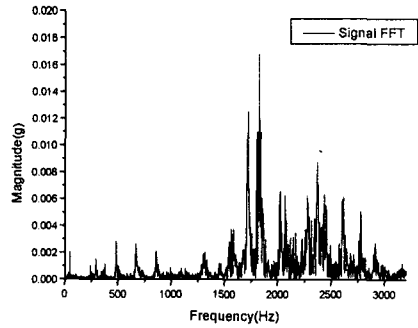


Fig. 6. Spectrum of detected signal (4kg weight)

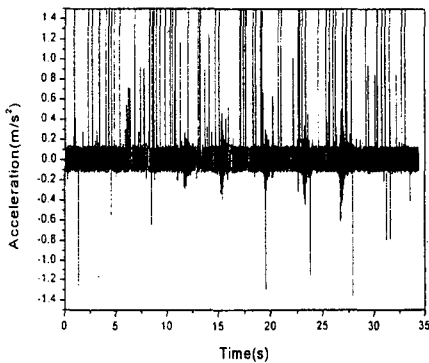


Fig. 5. Detected impact signal (wrench)

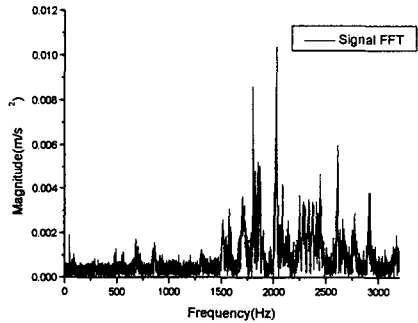


Fig. 7. Spectrum of detected signal (wrench)

0.36km 떨어진 곳에서 감지된 충격신호의 주파수 성분을 알아보기 위하여 주파수 분석을 수행하였다. Fig. 6는 4kg추로 충격을 가했을 때 감지된 충격신호의 주파수 성분을 나타내고 있다. Fig. 6에서 보는바와 같이 주된 주파수 성분은 1.5kHz~3.0kHz임을 알 수 있다. 또한 충격을 가한 물체에 따라 주파수 성분이 달라질 수 있는지를 알아보기 위하여 스페너로 충격을 가했을 때의 주파수 분석을 수행하였다. Fig. 7은 스페너로 충격을 가했을 때, 주파수 분석을 수행한 그림이다. Fig. 7에서 보듯이 스페너로 타격하였을 때의 감지된 충격신호의 주된 주파수 성분도 4kg 추로 충격을 가했을 때 감지된 충격신호의 주된 주파수성분과 마찬가지로 1.5kHz~3.0kHz임을 알 수 있다. 따라서

3.2. 실험 II

1) 실험방법 : 5.3km 떨어진 거리

A관리소에서 B관리소까지의 거리가 총 5.3km이고 운영압력은 53kg/cm²인 활배관에 직접 적용하여 실험을 수행하였다.

A관리소에서 B관리소로 가는 배관위에서 Fig. 8과 같은 40kg물체의 추를 사람이 10cm, 5cm의 높이에서 자유낙하시켜 타공사와 같은 충격신호를 발생시킨후 5.3km 떨어진 B관리소의 배관위에 Fig. 9와 같이 센서 2개를 설치하여 충격신호를 감지하였다. 감도에 따라 신호의 감지 능력이 어떠한 가를 알아보기 위하여

센서를 2개 설치하였다. 첫 번째 센서의 감도는 3.16V/g ($g=9.8m/s^2$)이고 두 번째 센서의 감도는 10V/g이다.

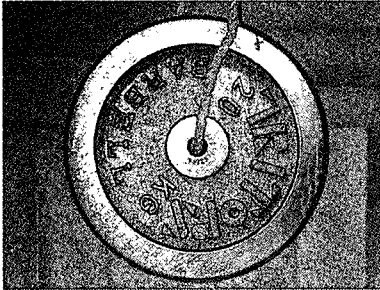


Fig. 8. 40kg weight.

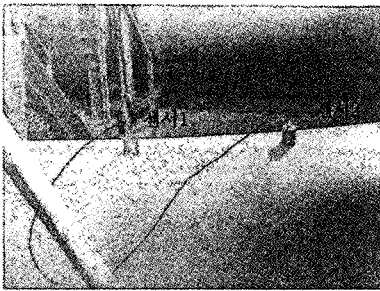


Fig. 9. Sensors on pipeline.

2) 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 40kg의 물체를 10cm의 높이에서 3회 자유낙하 시켰을 때 첫 번째 센서에서 감지된 신호이다. 신호의 크기는 각각 19.5mg, 20.4mg, 26.8mg이다. Fig. 11은 두 번째 센서에서 감지된 신호이다. 신호의 크기는 각각 26.3mg, 26.9mg, 31.0mg이다. Fig. 12는 40kg의 물체를 5cm의 높이에서 떨어뜨렸을 때 첫 번째 센서에서 감지된 신호이다. 신호의 크기는 각각 10.5mg, 16.8mg, 15.1mg이었다. Fig. 12는 두 번째 센서에서 감지된 신호이다. 신호의 크기는 각각 13.3mg, 21.6mg, 21.1mg이다.

10cm와 5cm에서 떨어뜨린 충격신호의 크기는 예상한 대로 충격에너지가 클수록 감지된 충격신호가 크다. 또한 센서의 감도를 높일수록 같은 신호지만 신호의 크기를 증폭시킬 수 있다.

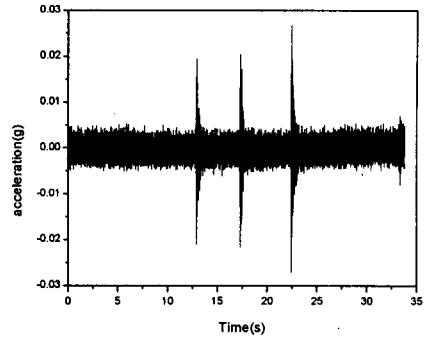


Fig. 10. Detected signal at a sensor1 (10cm height).

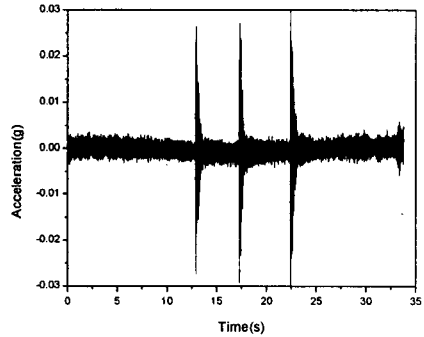


Fig. 11. Detected signals at a sensor2 (10cm height).

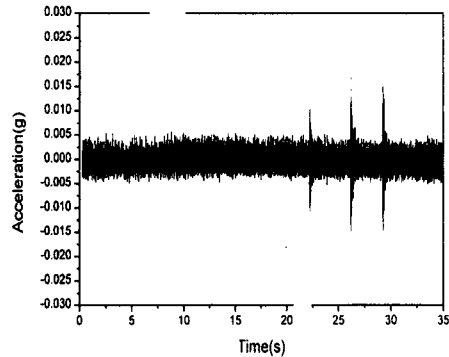


Fig. 12. Detected signals at a sensor1 (5cm height).

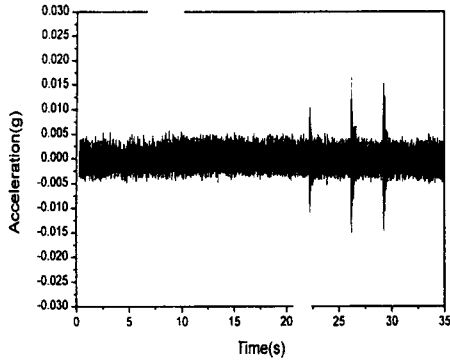


Fig. 13. Detected signals at a sensor2 (5cm height).

감지된 신호의 주파수 성분을 알아보기 위하여 주파수 분석을 수행하였다. Fig. 14는 신호를 주파수 분석한 결과이다. 감지된 신호의 주된 주파수 성분은 200Hz~400Hz임을 알 수 있다. 360m 떨어진 거리에서 감지된 충격신호의 주된 주파수 성분은 1500Hz~3000Hz의 고주파수 대역이었다. 그러나 5.3km 떨어진 곳에서의 충격신호의 주된 주파수는 200Hz~400Hz의 저주파수 대역이다. 위의 사실로부터 충격신호는 거리를 따라 전파되면서 고주파수 성분은 감소되어 사라지며 저주파수의 성분만이 존재하게 된다는 것을 알 수 있다.

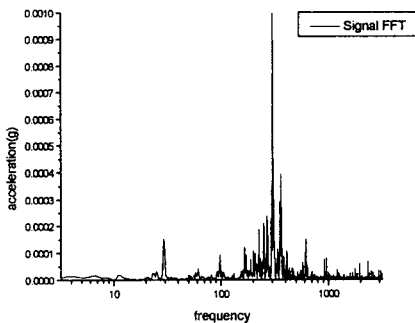


Fig. 14. Spectrum of detected signal (5.3km)

4. 충격위치 탐지 고찰

4.1. 이론적 고찰

타공사의 충격위치를 알기 위해서는 Fig. 15와 같이 센서를 배관의 양쪽에 설치하고 충격신호의 속도 및 도달된 시간차를 알면 파악할 수 있다.

충격을 가한 위치 C에서 A센서까지의 거리를 x_1 , C에서 B센서까지의 거리를 x_2 라하면 x_1, x_2 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$x_1 = \frac{v \cdot (t_1 - t_2) + D}{2}$$

$$x_2 = \frac{v \cdot (t_2 - t_1) + D}{2} \quad (2)$$

v 는 매질내에서의 음향파의 속도이고 t_1 은 음향파가 A센서에 도달하는데 걸리는 시간이고 t_2 는 B센서에 도달하는데 걸리는 시간이다.

4.2. 모의배관내 실험

충격을 가한 위치를 구하기 위하여 모의배관에서 실험을 하였다. 모의배관은 8kg/cm²의 공기로 가압하였다. 모의배관의 총거리(D)는 203m이고 충격을 가한위치(C)로부터 B센서까지의 거리는 56.5m, A 센서까지의 거리는 146.5m이다.

모의배관에 충격을 가한후 센서 A,B에서 신호를 감지하였다. Fig. 16은 센서B와 센서A에서 감지된 신호이다. 센서A와 센서B에 도달된 신호의 시간차는 0.2632초이다. 식(2)의 음향파 속도(v)는 식(3)을 통해서 구할 수 있다²⁾.

$$v = \sqrt{\gamma RT/M} \quad (3)$$

γ : 비열비

R : 일반기체상수(J/mol. · K)

T : 온도(K)

M : 분자량(mol)

따라서 공기의 온도가 15 °C일 때의 공기의 음향파 속도(v)는 340m/s이다. 충격위치는 식(2)에 대입하여 구해보면 $x_1=146.2m, x_2=56.8m$ 이다. 따라서 실측치와의 오차는 0.3m이다.

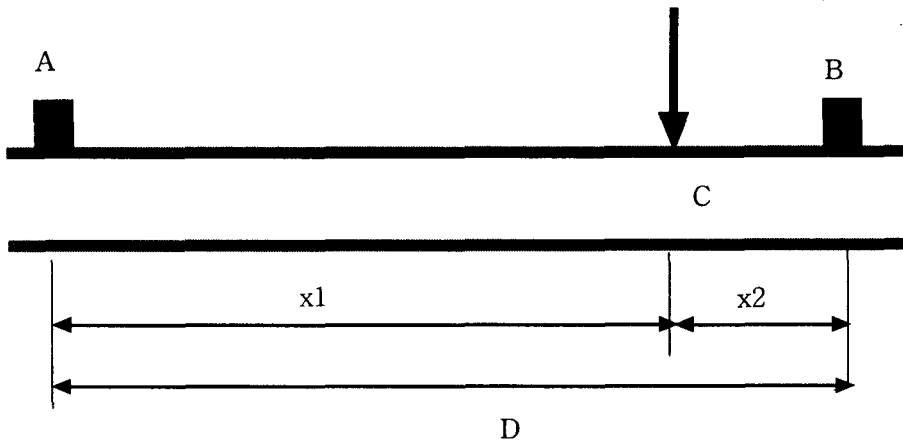


Fig. 15. Third-party damage location

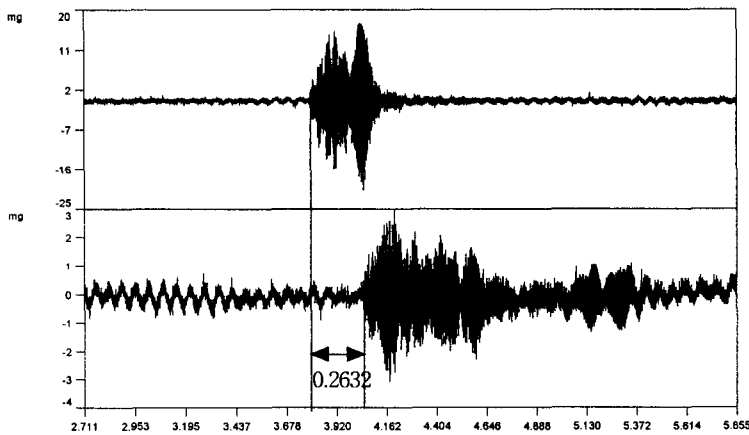


Fig. 16. The detected signals at the sensor A, B

5. 결 론

진동신호를 이용한 타공사 조기 감시 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 굴삭기와 천공기등의 충격신호가 배관에 가해지면, 배관의 표면에 탄성파(elastic wave)가 발생하고 이로 인하여 가스에 음향파(acoustic wave)가 발생하게 된다. 그러나 탄성파는 토양과의 상호관계에 의해서 급속히 빨리 사라져 버리고 음향파가 가스를 따라 멀리 전파해 나간다.

2) 가까운 거리에서 감지된 충격신호는 주된 신호가 고주파수 대역이며, 거리가 멀어질수록

고주파수 대역의 성분들은 소멸되어지고 저주파수 대역만이 남아 있게 된다.

3) 현장적용 실험을 통하여 40kg의 물체가 10cm, 5cm의 높이에서 자유낙하 하였을 때 5.3km까지 가속도계를 통하여 감지 가능함이 확인되었다.

4) 모의배관 실험을 통하여 센서 두 개를 이용하여 감지된 신호의 시간차를 구하면 타공사의 충격위치 구할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 한국가스공사, "공급배관 안전성 향상을 위한

조성호 · 전경수 · 박경완 · 조용범 · 이선엽 · 고영태

배관 상시 감시 기술 개발”, 98-KD-PI-계 획-187-00. 2. GRI, " Real-time monitoring to detect third-party damage", GRI-96/0077