

타공사 감시를 위한 광섬유 가속도계의 개발

박호림* · 최재봉** · 김영진†

(2001년 1월 22일 접수, 2001년 7월 7일 심사완료)

Development of Fiber Optic Accelerometer for Third-Party Damage Detection

Ho-Lim Park, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

Key Words: Third Party Damage(타공사), Fabry-Perot Interferometer (Fabry-Perot 간섭계), Optical Fiber(광섬유), Accelerometer(가속도계)

Abstract

Recently, a number of underground pipelines have been drastically increased. The integrity of these buried pipelines, especially gas transmitting pipelines, is of importance due to an explosive characteristic of natural gas. The third party damage is known as one of the most critical factor which causes fatal accidents. For this reason, a number of systems detecting third party damage are under development. The major concern in the development of third party damage detection system is to transmit vibration signals out of accelerometer to signal conditioner and data acquisition system without any interference caused by noise. The objective of this paper is to develop a fiber optic accelerometer applicable to third party damage detection system. A fiber optic accelerometer was developed by use of combining principles of one degree of freedom vibration model and an extrinsic Fabry-Perot interferometer. The developed fiber optic accelerometer was designed to perform with a sensitivity of $0.06mV/g$, a frequency range of less than $6kHz$ and an amplitude range of $-200g$ to $200g$. The developed accelerometer was compared with a piezoelectric accelerometer and calibrated. In order to verify the developed accelerometer, the field experiment was performed. From the field experiment, vibration signals and the location of impact were successfully detected. The developed accelerometer is expected to be used for the third party damage detection system which requires long distance transmission of signals.

1. 서론

산업의 발달과 더불어 공공구조물이나 산업설비가 대형화되고 복잡해지면서 안전사고로 인한 피해 규모가 커지고 있다. 특히 가스배관이나 송유관과 같은 지하 매설물의 규모가 급격히 증가하고 있는데, 미국에서는 가스배관, 전화선과 같

은 지하 시설물의 총 길이가 3200만 킬로미터에 달한다. 국내에서는 1970년대부터 가스배관을 매설하기 시작하여 현재에도 꾸준히 배관을 증설하고 있을 뿐만 아니라 러시아로부터의 직송 천연가스관 건설도 기획 중에 있다. 이와 같은 시점에서 장거리 배관의 안전성 확보는 사회적 문제점으로 부각되고 있으며 건전성 평가를 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 통계^(2,3)에 의하면 장거리 배관의 손상은 배관내부의 압력변화나 부식으로 인한 것보다 배관주변 공사 중 굴착장비에 의한 직접적인 타격(타공사; Third-Party Damage)으로 인하여 더 많은 손상을 입고 있다. 이와 같이 타공사는 배관파손의 주요 원인일 뿐만 아니라 사고 발생시에는 막대한 경제적 손실

* 성균관대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

과 인명피해가 발생한다. 따라서 선진각국에서는 타공사로 인한 배관 파손을 방지하기 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

타공사 감시에는 센서를 배관에 부착하여 배관의 손상을 검출하는 방법과 타공사 현장을 시각적으로 감시하는 방법이 있다. 시각적 방법은 항공기나 인공위성을 이용하여 배관주변이나 매설부위를 직접 관찰하는 것으로서 신뢰성은 높으나 막대한 비용과 고정밀도의 이미지 처리기술이 필요하다. 센서 부착 방법은 배관의 진동이나 배관 내부의 압력변화를 진동센서를 이용하여 검출하는 것으로서 센서와 신호처리장치간의 거리가 길어지므로 일반적인 전기적 신호를 이용할 경우 잡음 유입 가능성이 큰 단점이 있다.

이와 같은 단점을 보완한 것이 광섬유를 이용한 방법으로서 신호 전송시 감쇠를 줄이고 외부 잡음의 유입 가능성을 배제할 수 있으므로 원거리 전송에 효율적으로 적용될 수 있다. Marty⁽⁴⁾ 등은 광강도형 가속도 센서를 개발하였는데 마이크로 머시닝 기술을 이용하는 관계로 구성이 복잡하고 제작비용이 높은 단점이 있다. Dinev⁽⁵⁾ 등은 x, y 방향의 가속도를 동시에 검출하는 가속도 센서를 개발하였으나 센서구조의 특성상 신호 검출부에 광섬유를 사용하지 않아 신호의 장거리 전송에 어려움이 있다. Chen⁽⁶⁾ 등은 마이켈슨 간섭계를 이용한 광섬유 가속도 센서를 개발하였으나 선형성을 유지하는 구간이 적어 $10\text{Hz} \sim 150\text{Hz}$ 주파수 영역의 신호만을 검출할 수 있다.

이상의 연구에서 개발된 센서들은 제작과정이 복잡하고 고가일 뿐 아니라 제한조건이 많아 현장에서의 타공사감시에 사용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 타공사감시에 요구되는 주파수 범위의 진동신호를 측정할 수 있는 광간섭형 광섬유센서를 개발하고 모의배관 실험 및 현장실험을 통하여 센서의 효용성을 검증하고자 한다.

2. 광섬유 가속도계의 원리

2.1 광섬유 가속도계의 구성

Fig. 1은 광섬유 가속도계의 구성을 나타낸 것으로서 Fabry-Perot 간섭계와 1자유도 진동모델을 이용하여 구성하였으며 기본적인 원리는 다음과 같다.

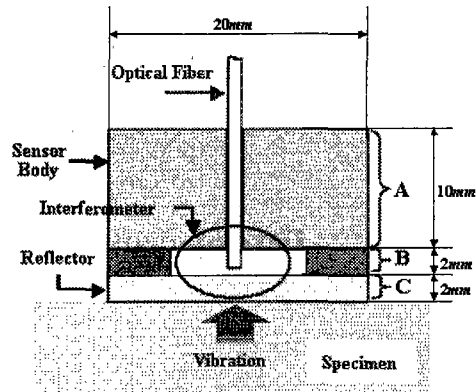


Fig. 1 A schematic illustration of the fiber optic accelerometer

광섬유 가속도계는 센서의 진동특성을 결정하는 진동계와 이러한 진동을 측정하는 간섭계로 이루어지며 센서의 재료물성치와 형상에 의한 진동 특성을 광간섭현상을 이용하여 측정하게 된다.

기저부에서 발생된 진동신호가 가속계의 몸체에 전달되어 광섬유 끝단과 반사면 사이의 상대변위를 발생시킨다. 이때 발생된 상대변위가 빛의 간섭현상을 유발하여 반사되는 빛의 광강도를 변화시킨다. 간섭계에서 반사된 광신호는 광섬유를 통하여 광검출기(photo-detector)로 전달되어 전기신호로 변환된다. 광섬유 가속도계의 초기 위상을 적절히 조절하면 측정된 전압에서 진동으로 인한 가속도의 크기를 선형적인 관계로 구할 수 있다.

2.2 1자유도 진동모델

본 연구에서 개발한 가속도계는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 3부분으로 구성된다. A부분은 일반 강으로 이루어져 있으며 진동계에서 질량의 역할을 하고 B부분은 아크릴로 이루어져 스프링역할을 한다. C부분은 표면이 금으로 코팅된 강으로 구성되며 광섬유 끝단의 빛을 반사하는 역할을 한다. 이러한 구조의 가속도계는 Fig. 2와 같은 1자유도 진동모델로 표현할 수 있으며 재료물성치와 센서형상으로부터 센서의 고유진동수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{k}{M}\right)} \quad (1)$$

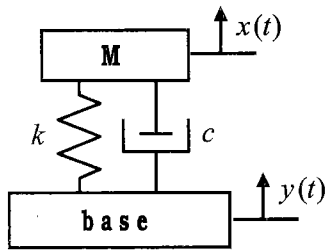


Fig. 2 A single degree of freedom model for a seismic acceleration transducer

가속도계의 질량(M)과 스프링상수(k)는 다음과 같은 식에서 구할 수 있다.

$$M = V_A \cdot \rho_A \tag{2}$$

$$k = \frac{E_B A_B}{L_2} \tag{3}$$

여기서, V_A 는 A부분의 부피, ρ_A 는 A부분의 밀도, E_B 는 아크릴의 탄성계수, A_B 는 아크릴의 단면적, L_2 는 아크릴의 두께를 나타낸다.

2.3 간섭계

간섭 센서는 고전 광학 이론에서 제안되었던 간섭계들을 이용한 것으로 광섬유가 가지고 있는 고유한 기계적 특성과 간섭계로서의 센서특성을 함께 나타낸다. 일반적으로 간섭계 센서로는 Mach-Zehnder 간섭계, Michelson 간섭계 및 Fabry-Perot 간섭계가 이용되고 있으며, 이 중 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 센서의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. Fabry-Perot 간섭계는 다중광 간섭계로서 코어 부분에 부분반사면(semi-reflective surface)을 형성시켜서 반사 또는 투과된 빛의 간섭무늬를 얻게 된다. Fig. 3은 광섬유 가속도계에서 광간섭현상이 발생하는 부분을 보여주는 것으로 광원에서 발생된 빛은 광섬유를 통과하여 일부는 광섬유 끝단에서 반사되고 나머지는 투과되어 반사면에서 반사되어 광섬유로 돌아오며 이러한 현상이 반복적으로 발생되면서 간섭을 일으킨다. 공기층에서의 빛의 손실을 고려할 때 반사되어

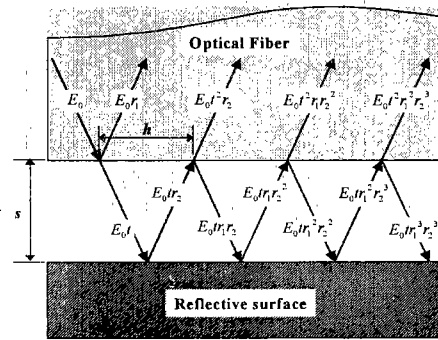


Fig. 3 Fabry-Perot interferometer of the fiber optic accelerometer

광섬유로 돌아오는 광강도(E_R)는 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$E_R = E_0 r_1 + E_0 t^2 a \sum_{n=1}^{\infty} r_1^{n-1} r_2^n \frac{e^{ni\phi}}{a + nh} \tag{4}$$

($n = 1, 2, 3, \dots, \infty$)

여기서, E_0 는 광원의 강도, r_1 은 광섬유의 반사계수, t 는 광섬유의 투과계수, r_2 는 반사면의 반사계수, a 는 광섬유 코어 반경을 나타낸다. ϕ 는 위상차로 다음과 같이 표시된다.

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} s \cdot \cos \theta = \frac{4n\pi}{\lambda_0} s \cdot \cos \theta \tag{5}$$

여기서, λ_0 는 진공에서의 빛의 파장, s 는 광섬유와 반사면 사이의 거리, n 은 매질에서의 빛의 굴절률로 여기서는 Fabry-Perot cavity를 구성하는 물질의 굴절률에 해당하며, θ 는 빛의 입사각으로 Fabry-Perot 반사면의 법선과 이루는 각도를 의미한다.

h 는 광섬유의 개구수(NA; Numerical Aperture)와 광섬유와 반사면 사이의 거리로부터 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$h = 2s \cdot \tan(\sin^{-1}(NA)) \tag{6}$$

가장 민감도가 높은 부분에 광섬유 가속도계의 초기 위상을 고정하고 위상변화가 작은 범위에서 발생한다고 가정하면 위상변화와 광강도는 다음과 같은 선형적인 관계를 갖는다.

$$\Delta E_R = C_1 \cdot \Delta \phi \tag{7}$$

위상과 변위의 관계는 Intrinsic인 경우 매질인 광섬유가 변형을 받을 때 생기는 빛의 위상변화를 고려해야 하나 Extrinsic인 경우 감지구간에서의 매질이 광섬유가 아닌 공기이므로 일반적인 위상관계식인 식 (5)의 양변에 증분을 취하여 구할 수 있다.

$$\Delta \phi = \frac{4n\pi}{\lambda_0} \cos \theta \cdot \Delta s \tag{8}$$

식 (8)의 우변에서 Δs 를 제외한 나머지 항은 모두 상수이므로 이를 상수 C_2 로 가정하면 식 (7)과 식 (8)에서 다음 식이 성립한다.

$$\Delta E_R = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta s \tag{9}$$

따라서, 반사되는 빛의 강도를 측정하여 광섬유 끝단과 반사면 사이의 상대변위를 구할 수 있다.

2.4 광섬유 가속도계의 측정원리

광섬유 가속도계의 스프링 역할을 하는 아크릴은 위상변화와 반사된 빛의 강도가 선형성을 유지하는 구간에서 탄성거동을 유지한다. 따라서 가속도계의 자체 질량에 의한 아크릴의 두께 변화(ΔL_{1g})는 1g가 작용할 때의 광섬유 끝단과 반사면 사이의 거리변화에 해당된다.

$$\Delta L_{1g} = L \cdot \epsilon_{1g} = L \frac{M \cdot g}{A_B \cdot E_B} \tag{10}$$

여기서, L 은 아크릴의 두께, ϵ_{1g} 는 1g가 작용할 때 아크릴의 변형률, M 은 가속도계의 질량, g 는 중력가속도, A_B 는 아크릴의 단면적, E_B 는 아크릴의 탄성계수를 나타낸다.

따라서, 가속도의 크기 (\bar{a})는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{a} = \frac{\Delta s}{\Delta L_{1g}} \tag{11}$$

식 (9)와 식 (11)을 이용하면 반사된 빛의 강도와 가속도의 크기의 관계를 다음과 같은 식으로 정량화할 수 있다.

$$\Delta E_R = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta L_{1g} \cdot \bar{a} = C \cdot \bar{a} \tag{12}$$

여기서, C 는 이론적으로 계산된 상수들의 곱으로서 광섬유 가속도계의 민감도를 나타낸다.

2.5 광섬유 가속도계의 개발

광섬유 가속도계의 간접계 구성에 사용된 단일 모드 광섬유와 가속도계 본체에 사용된 재질인 SM45C와 아크릴의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 이론적으로 계산된 광섬유 가속도계의 고유진동수(f_n)는 35.7kHz이고 연필심 부러트림시험(Pencil Lead Break Test)에서 구한 감쇠고유진동수(f_d)는 31.9kHz이므로 본 논문에서 개발한 가속도계의 감쇠비는 0.44이며 진동수비가 0.2보다 작은 구간에서 진폭비는 1과 3%미만의 오차를 갖는다. 따라서 개발된 광섬유 가속도계는 6kHz이하의 진동신호를 선형적으로 측정할 수 있다.

Fig. 4는 식 (4)에 광섬유의 반사계수 0.05, 반사면에서의 반사계수 0.94를 대입한 결과로서 위상변화에 따른 광강도의 변화를 나타낸다. 이 결과에 기초하여 식 (12)에서 구한 광섬유 가속도계의 민감도는 0.072mV/g 이다.

Table 1 Material property

Material property		Value
Optical fiber	Mode Type	Single mode
	Numerical Aperture	0.1
	Operating wavelength	1310 nm
	Core diameter	8.3 μm
	Mode field diameter	9.5± 0.5 μm
Steel	Cladding diameter	125.0± 2.0 μm
	Density (ρ_A)	7800 kg/m ³
Plexi-glass	Young's modulus	200 GPa
	Density	1180 kg/m ³
	Young's modulus (E_B)	6.3 GPa

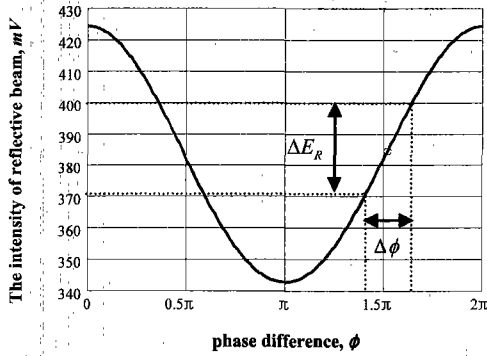


Fig. 4 The relationship between interferometer output and the phase difference

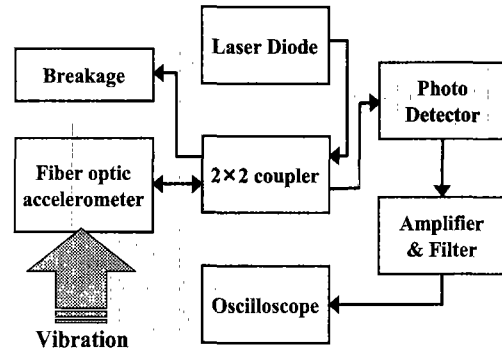


Fig. 5 A schematic diagram of fiber optic accelerometer measuring system

따라서 개발된 가속도계는 일반적인 계측장비와의 호환성을 위하여 52dB를 증폭할 수 있는 전치증폭기가 요구된다. 광섬유 가속도계로 측정 가능한 가속도의 크기는 초기위상을 민감도가 가장 높은 부분에 설정하고 위상변화와 광강도가 선형성을 유지하는 구간을 고려했을 때 ± 200g가 된다.

3. 실험

3.1 실험장치

Fig. 5는 개발된 광섬유 가속도계 측정장치의 개략도이다. 가속도계에 사용된 광원은 파장이 1310nm, 최대출력이 3mW이고 피복과 자켓이 있는 광섬유를 통하여 출력되는 레이저 다이오드(Lightron, LLD3F-HP-FFP-NF)를 이용하였다. 입사된 빛은 3dB의 연결손실을 갖는 양방향 연계기(Fovice, SMSC0202-15050A1A4)를 통해 1:1로 분할하였다. 분할된 두 경로중 한 쪽은 광섬유 가속도계로 연결하였으며 나머지 한 쪽은 파단(breakage)시켜 재반사되는 빛이 없도록 하였다. 간섭계를 거친 빛은 다시 양방향 연계기를 거쳐 포토디텍터(EPITAXX, ETX100RFC2)를 통해 전기신호로 변환된다. 이렇게 변환된 신호는 측정하고자 하는 주파수 대역인 100Hz~5kHz의 대역형 여파기(KROHN-HITE, Model 3200(R))에서 필터링된 후 증폭기(SRS, Model SR560)에서 40dB 증폭되어 오실로스코프(LeCroy, LC334A)로 측정된다.

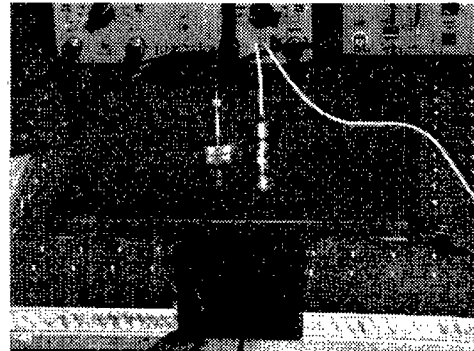


Fig. 6 A photograph of experimental set-up for sensor calibration

3.2 실험방법

3.2.1 검증실험

개발된 광섬유 가속도계의 성능을 검증하기 위하여 상용화된 압전형 가속도계(B&W, Model 12100)와 비교하였다.

Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 길이 200mm, 넓이 200mm, 두께 10mm인 평판에 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계를 영구자석을 이용하여 고정하고 평판의 아래 부분에 설치한 스피커를 이용하여 평판을 1.4kHz의 정현파로 가진하였다.

광섬유 가속도계에서 측정된 신호는 100Hz~5kHz의 대역형 여파기를 사용하여 필터링하고 40dB 증폭하여 AC성분만을 측정하였다. 두 센서

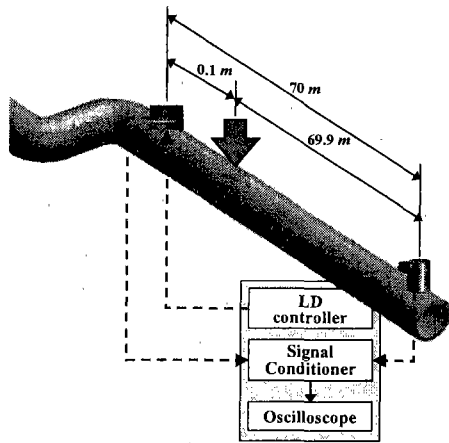


Fig. 7 A schematic diagram of field experiment set-up

에서 측정된 가속도의 크기를 비교하여 광섬유 가속도계를 보정한 후 평판에 1kg의 쇠팅을 5cm 높이에서 자유낙하시켜 충격을 주고 이로 인해 평판에 발생한 신호를 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계에서 동시에 측정하였다.

3.2.2 위치표정실험

본 연구에서는 개발된 광섬유 가속도계를 이용하여 배관에서 충격으로 인한 진동신호를 검출하여 충격위치를 검출하는 실험을 수행하였다. 위치표정실험에 앞서 측정된 대상 배관에서의 탄성파 속도는 2200m/s로 나타났다.

현장실험은 경기도 인천시에 위치한 소래대교 하부에 설치되어 현재 도시가스를 공급중인 가스 배관에서 수행하였다. 실험배관은 소래대교를 따라 설치된 총연장 1.84km의 중저압가스배관(KS D 3507)으로써 관경은 500mm, 두께는 7.9mm이다. 위치표정 실험에 앞서 탄성파의 속도를 검증하기 위한 실험을 수행한 결과 모의배관에서의 탄성파 속도와 유사한 값이 측정되었다. 실험은 70m 거리의 직관을 대상으로 하였으며 Fig. 7과 같이 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계를 70m 간격으로 설치하고 압전형 가속도계로부터 69.9m 떨어진 지점에서 망치로 가격하여 배관에 충격을 가하였다. 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계에 필요한 실험 장치와 데이터 저장을 위한 오실로스코프(Fluke, ScopeMeter 196)는 압전형 가속도계와 가까운 위치에 설치하고 실험을 수행하였다.

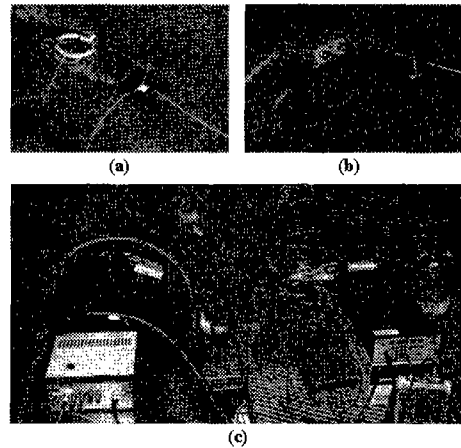


Fig. 8 A photograph of field experiment set-up
 (a) Fiber optic accelerometer.
 (b) Piezoelectric accelerometer.
 (c) Signal conditioner and oscilloscope.

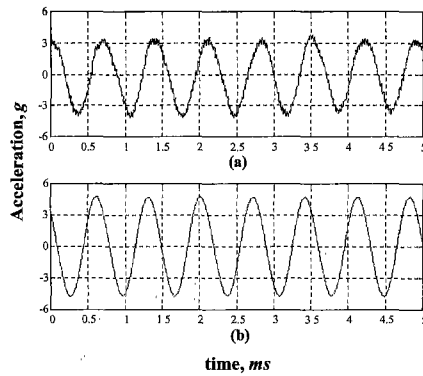


Fig. 9 Comparison of dynamic response between two different accelerometers at 1.4kHz
 (a) Fiber optic accelerometer.
 (b) Piezoelectric accelerometer.

Fig. 8은 실제 가스배관에 부착된 가속도계와 실험장치의 사진이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 검증실험

Fig. 9는 평판을 1.4kHz의 정현파로 가진하였을 때 두 가속도계의 응답으로서 Fig. 9(a)는 광섬유

가속도계에서 측정된 신호, Fig. 9(b)는 압전형 가속도계에서 측정된 신호를 나타낸다. 신호처리장치의 차이로 두 신호사이에 약간의 위상차이가 있으나 모두 1.4kHz의 주파수성분의 신호가 측정됨을 알 수 있다. 압전형 가속도계와 광섬유 가속도계에서 측정된 가속도의 크기는 2.4dB차이가 발생하였다. 두 센서간의 가속도 크기의 차이는 광섬유 가속도계 제작시 광섬유 끝단과 반사면의 거리를 이론적으로 계산한 값과 정확히 일치시키지 못했기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서 광섬유 가속도계를 이용한 가속도 크기의 정확한 측정을 위해서는 실험을 통한 센서 보정이 요구된다. 본 연구에서 광섬유 가속도계의 민감도는 실험결과 40dB 증폭시 6.0mV/g로 계산되었다.

Fig. 10은 충격실험을 수행하여 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계에서 전압으로 측정된 신호를 앞서 수행한 보정실험에서 구한 민감도를 이용하여 가속도 크기로 변환한 결과로서 충격으로 인한 진동신호를 두 센서에서 동시에 검출한 것을 알 수 있다. Fig. 11은 두 센서에서 측정된 신호의 주파수 분석결과로서 유사한 주파수의 응답이 측정됨을 알 수 있다.

개발된 광섬유 가속도계의 성능은 센서 특성상 정확히 압전형 가속도계와 일치하지는 않으나 정현파와 충격파에서 모두 동일한 주파수의 신호를 측정할 수 있는 것으로 실험결과 검증되었다.

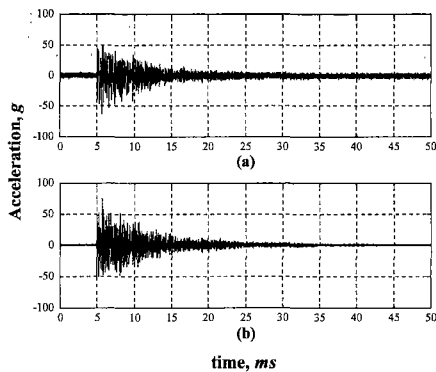


Fig. 10 Comparison of vibration signals for the impact experiment
(a) Fiber optic accelerometer.
(b) Piezoelectric accelerometer.

4.2 위치표정실험

Fig. 12는 현장실험시 광섬유 가속도계와 압전형 가속도계에서 측정된 신호를 나타낸다.

배관에 충격을 가하기 전에 주위 환경이나 잡음 등에 의한 진동은 약 0.1g로 측정되었다. 이 값의 두 배를 문턱값(threshold)으로 설정하여 두 센서에서 측정된 시간차를 구한결과 32ms로 측정되었다. 이 시간차는 10회 측정된 시간차의 평균값으로 매 실험 시 유사한 값이 측정되었으며 측

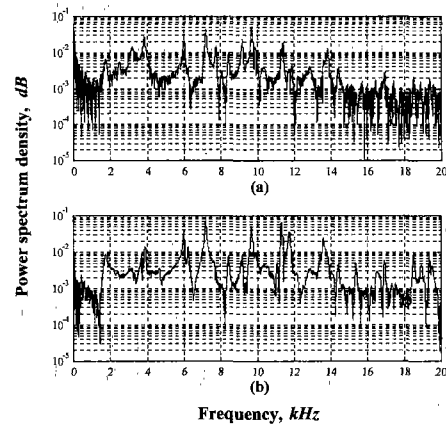


Fig. 11 Comparison of frequency response of vibration signals from the impact experiment
(a) Fiber optic accelerometer.
(b) Piezoelectric accelerometer.

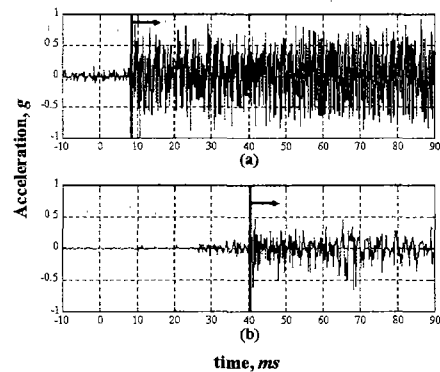


Fig. 12 The signals obtained from field experiment
(a) Fiber optic accelerometer.
(b) Piezoelectric accelerometer.

정된 신호의 중심주파수 성분은 300Hz~400Hz로 나타났다. 배관에서 전파하는 탄성파의 속도는 모의배관실험에서 2200m/s로 측정되었으며 현장 실험에서 구한 시간차와 모의배관실험에서 구한 속도를 이용하여 충격위치를 계산하면⁽³⁾ 압전형 가속도계로부터 70.2m 지점에서 충격이 발생한 것으로 계산된다. 따라서 충격위치의 오차는 0.3m, 비율로는 0.5%이다.

본 연구에서 개발된 가속도계는 EFPI 간섭계와 1자유도 진동모델을 이용하여 구성되었으므로 가속도계의 질량을 변화시키면 측정주파수 범위를 손쉽게 변화시킬 수 있고 전자기적 외란이나 환경에 의한 영향을 최소화하여 신호를 장거리 전송할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 EFPI 간섭계와 1자유도 진동모델을 이용한 광섬유 가속도계를 개발하고 상용화된 압전형 가속도계와의 비교를 통한 검증실험과 실제 가동중인 중저압가스배관에서 타공사를 모사하기 위한 충격실험을 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 광섬유를 이용한 가속도계를 개발하였다. 개발한 광섬유 가속도계는 6kHz 이하의 주파수영역에서 최대 $\pm 200g$ 크기의 가속도를 측정할 수 있으며 민감도는 0.06mV/g이다.

(2) 개발한 광섬유 가속도계를 이용하여 가스배관에 대한 타공사감시 시스템을 개발하였다.

(3) 타공사감시 시스템에 대한 현장실험을 수행한 결과 충격위치를 70m의 거리에서 0.3m이내의 오차에서 검출하였다.

후 기

본 논문은 한국과학기술평가원(STEPI)의 연구

비 지원으로 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터에서 수행한 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김형식, 김우식, 홍성호, 방인완, 오규환, 1999, "매설 천연가스 배관의 응력에 미치는 제반하중의 영향," 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제8호, pp. 1261~1269.
- (2) Leewis, K. and Shires, T. M., 1999, "Managing third party damage," *International Conference on Advances in welding technology*.
- (3) 조성호, 전경수, 박경완, 조용범, 이선엽, 고영태, 2000, "진동신호를 이용한 타공사 조기 감시 기술 연구(I)," 한국가스학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 1~8.
- (4) Marty, J., Malki, A., Renouf, C., Lecoy, P. and Baillieu, F., 1995, "Fiber-Optic Accelerometer Using Silicon Micromachining Techniques," *Sensors and Actuators A*, pp. 470~473.
- (5) Petko, D., Dinev, 1996, "Two Dimensional Fiber-Optical Accelerometer," *American Institute of Physics*, Vol. 67, No. 1, pp. 288~290.
- (6) Chen, C., Ding, G., Zhang, D. and Cui, Y., 1998, "Michelson Fiber-Optic Accelerometer," *American Institute of Physics*, Vol. 69, No. 9, pp. 3123~3126.
- (7) 전병선, 김정진, 박현철, 황운봉, 박위상, 1996, "광섬유 센서를 이용한 복합적충부의 진동제어," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), pp. 321~324.