음향 전파 모델을 이용한 천연가스 배관용 타공사 모니터링 시스템의 개발

신승목†·서진호*·띤**·김상봉***

The Development of Third-Party Damage Monitoring System for Natural Gas Pipeline Using Sound Propagation Model

Seung-Mok Shin, Jin-Ho Suh, Hui-Ryong Yu, Sang-Bong Kim

Key Words: Third-Party Damage(타공사), Sound Propagation(음향전파), Pipeline(배관)

Abstract

In this paper, we develop real-time monitoring system to detect third-party damage on natural gas pipeline by using sound propagation model. Since many third-party incidents cause damage that does not lead to immediate rupture but can grow with time, the developed real-time monitoring system can execute a significant role in reducing many third-party damage incidents. The developed system is composed of three steps as follows: i) DSP based system, ii) wireless communication system, iii) the calculation and monitoring software to detect the position of third-party damage using the propagation speed of acoustic wave. Furthermore, the developed system was set at practical offshore pipeline between two islands in Korea and it has been operating in real time.

기호설명

t : sampling time

t_A : A지점까지 음파가 전파된 시간

t_B : B지점까지 음파가 전파된 시간

t_T : A에서 B지점까지 음파가 전파된 시간

x_A : C지점에서 A지점까지 실제 배관길이

x_B : C지점에서 B지점까지 실제 배관길이

β : decay factor

v : volume of element [m^3]

dx : thickness of element [m]

S : pipe area [m^2]

ξ : displacement of gas during the passage of a sound wave [m]

ρ : gas density[km/m^3]

c : 가스 내에서의 음속(sound speed)

γ : ratio of specific heats

R : universal gas constant [m^2K-1/(gm/gm.mole)]

T : absolute temperature [^{o}K]

M : molecular weight of the gas [gm/gm.mole]

k : wave number

λ : wave length [m]

† 부산시 남구 용당동 부경대학교 기계설계학과
E-mail : crackerm@dreamwiz.com
TEL : (051)620-1606 FAX : (051)621-1411
* 부산시 남구 용당동 부경대학교 기계공학부
** 베트남 호치민공과대학교 기계공학과

1. 서 론

배관의 안전성을 위해하는 요소는 매우 많으나, 문헌 및 각종 매체 등 여러 가지 종합하여 고려해보면 부식(corrosion), 지반침하(subsidence), 타공사(third-party damage)으로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서도 타공사에 의한 매설 가스배관의

손상은 사고 즉시 보고되지 않는 경향이 있어, 시간이 경과함에 따라 커다란 위험을 초래할 수 있다. 만약 그러한 손상부위가 보고되지 않고 보수없이 매설될 경우, 배관에 부식 등을 야기시켜 가스누설로 인한 가스폭발을 발생시킬 수 있다. 따라서 배관에 가해지는 충격을 실시간으로 감지하고자 하는 연구가 수행되어지고 있다.[1][2]

기술적인 측면에서 볼 경우, 미국의 GRI(Gas Research Institute)에서는 가속도 센서 및 수중음향기를 이용하였고, 일본에서는 배관의 방식전위의 변화량을 측정하여 배관에 가해지는 충격을 실시간으로 감지하는 연구가 진행되어지고 있다.

따라서 배관에 가해지는 충격을 실시간으로 모니터링하고 충격위치를 산출할 수 있는 한국형의 모니터링 시스템을 무선 데이터 통신을 이용하여 개발하는 것은 반드시 수행되어야할 개발 과제라고 할 수 있다.[7][8]

본 논문에서는 다음과 같은 시스템들을 설계 및 개발하였다. i) DSP 기반의 만족스러운 처리시간을 얻을수 있는 데이터 처리 시스템, ii) 마이크로프로세서 기반의 상용 모뎀을 이용한 무선통신 시스템, iii) 타공사에 의한 손상 위치를 감지하기 위한 계산 및 모니터링 소프트웨어

특히, 계산 및 모니터링 소프트웨어는 음향파의 전파속도와 데이터베이스 시스템의 알고리즘에 의해서 개발되었다.

마지막으로, 개발된 모니터링 시스템은 배관의 타공사 충격에 대한 민감한 감지를 통해서 시스템의 유효성을 증명하기위해 KOGAS의 발안 기지에서 현장 실험에 의해 시험되었고, 더욱이 개발된 시스템은 현재 율도와 영종도 두 섬 사이의 실제 해안 배관 부곡과 평택간의 실제 지하 배관에 설치되어 실시간으로 작동되고 있다.

2. 시스템 구성 및 충격감지 알고리즘

2.1 하드웨어 구성

천연가스 배관에서의 음향파 속도는 약 421.3m/sec 이다. 그러므로 두 센서 사이에서의 충격 지점을 정밀하게 감지하기 위해서는 고속의 신호 처리 시스템이 필요하다.

Fig.1은 개발된 타공사 실시간 모니터링 시스템의 구성을 보여준다. 본 시스템은 i)무선 통신 시스템, ii)데이터 분석 및 모니터링 시스템, iii)데이터 수집 및 신호 처리 시스템으로 구성된다.

통신 시스템은 RS232C 방식의 무선 모듈과 마이크로프로세서를 이용하여 개발되었으며, 신호처리기인 데이터 수집 시스템과 PC 기반의 모니터링 시스템간의 통신 인터페이스에 이용한다. 데이터 수집 및 신호 처리 시스템은 DSP인 TMS320C32를 이용하여 개발되었다. 그리고, 두개의 가속도 센서가 타공사 충격 감지를 위해 이용된다.

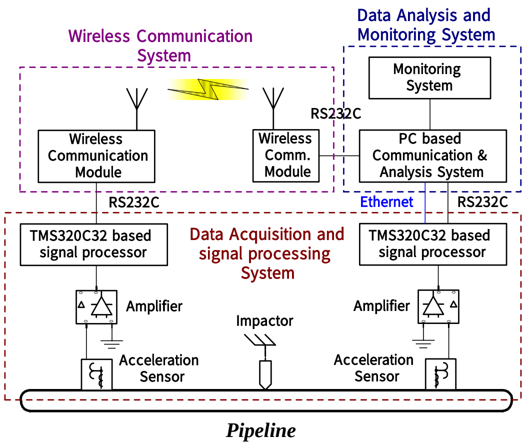

Fig.1 Schematic diagram of the developed system

데이터 수집 및 신호 처리 시스템은 Fig.1에서 보여주는 것과 같이 배관내의 매체를 통하여 전파되는 충격파 신호를 감지하는 기능을 가지고 있고, 무선 통신 시스템을 이용하여 감지된 신호를 전송한다. Fig.2는 개발된 TMS320C32 Board의 하드웨어 구성도를 나타낸다.

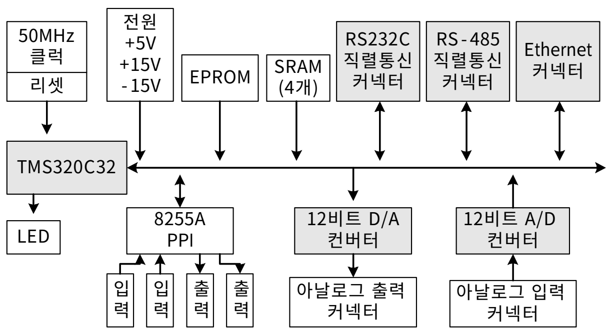

Fig.2 Hardware composition of TMS320C32 Board

2.2 소프트웨어 구성

본 시스템에서 개발된 신호처리기는 일정한 Sampling Time 간격마다 실시간으로 가속도 센서로부터의 신호를 입력받아서 데이터 처리한다.

신호처리기는 센서 데이터와 그 입력 시간 데

이터와의 관련 정보를 테이블화 하여 자체 저장하며, 또 그 테이블 데이터를 무선 통신 시스템을 통해 데이터 분석 시스템으로 전송하도록 하였다. Fig.3은 모니터링 PC에서의 소프트웨어 흐름도를 보여주고 있다.

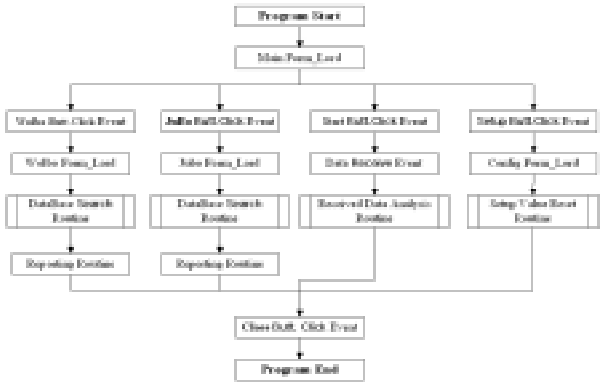

Fig.3 Flow chart of software in monitoring PC

2.3 충격위치 산출 알고리즘

실시간으로 충격위치 산출 방법으로서는 Fig.4와 같이 센서를 배관의 양쪽에 설치하고 충격신호의 속도 및 도달된 시간차를 이용하여 그 위치를 계산하는 알고리즘을 제안하였다.

먼저 충격 위치 산출 알고리즘을 개발하기 위해서 다음과 같이 몇 가지 가정을 하였다.

i) 가스배관내의 매질은 항상 동일

ii) 가스배관내의 매질은 균일 분포, 즉 신호 전달 속도가 일정

iii) 두 센서에서 수신하고 있는 데이터는 일정한 sampling간격으로 동기되어 처리되거나 동일한 clock특성을 갖는 신호처리기로 데이터 처리

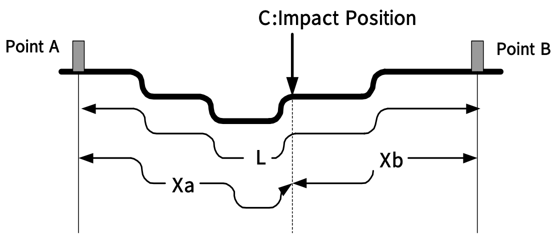

Fig.4 Pipeline description

여기서, t_A와 t_B의 시간차를 이용하여 충격파 발생의 위치를 추정해 낼 수 있는데, Fig.4와 같은 경우에는 x_A구간과 x_B구간은 배관의 형태상 차이점을 가지고 있어 x_A구간에서의 유체의 속도 v_A와 x_B구간에서의 유체의 속도 v_B는 다르므로 이 점을 고려하면 다음 식을 얻는다.

$$x_A = \frac{(v_A t_A - v_B t_B) + L}{2} \tag{1}$$

$$x_B = \frac{(v_B t_B - v_A t_A) + L}{2} \tag{2}$$

3. 음향파 감지 시뮬레이션

타공사에 의한 충격에 대한 음향 감지의 개념이 Fig.5에 보여지고 있다.

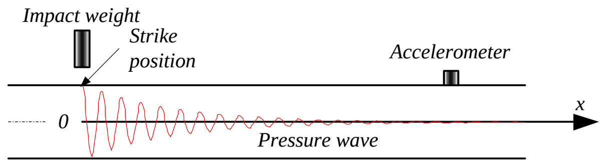

Fig.5 Mechanical transmission line

충격이나 구조물에 대한 작용들과 같은 순간적인 하중이 가해졌을 때, 순간적인 탄성 파형이 발생된다. 이 파형은 하중이 가해진 지점으로부터 구조물을 관통해서 전파되고, 전파 특성은 물질의 특성과 구조물의 형상에 의해 좌우된다. 제한된 탄성체에서는 전파의 유형이 수직파형과 전단파형이 존재하고, 기체나 액체에서는 물질 특성상 전단 응력을 운반하지 않기 때문에 전단파형은 없다. 탄성 에너지는 원천으로부터 전파되어 구조물을 관통해서 퍼져나가 버린다. 이와 같은 기하학적 퍼짐은 모든 지점에서 신호의 강도가 원천으로부터 멀어져 가면 갈수록 더욱 줄어들기 때문에 감쇠 계수로써 작용한다.

굴착기가 파이프에 충격을 가했을 때, 다음의 일련의 작용들이 발생한다.

① 도구로 강의 벽에 충격을 가한다.

② 탄성파가 파이프 벽에서 발생되어 음향파가 가스 내에서 시작된다. 강에 전달되는 탄성파는 매우 빠른 속도로 이동해 가고, 음향파는 그 뒤를 따라간다. 실험 분석에서 파이프 벽의 이동은 둘러싸인 주위 환경과의 상호작용에의해 매우 빠른 속도로 사라져 없어진다는 것을 보여주었다.

③ 가스내의 음향파는 먼 거리를 전파하며 전형적인 흡수와 벽에서의 손실 메커니즘에 의해 감쇠된다. 음향파가 전파됨에 따라 파이프의 외벽에 가해질 수 있는 응력과 변형이 발생한다. 그것은 전파되는 진동 파형이 통과함으로 인해

파이프 벽이 반응하는 것이다. 이 진동 파동의 통과는 가속도 센서에 의해 감지될 수 있다.

3.1 음원(Sound Source)

음원은 무게 m인 강철공이 높이 h에서 배관위로 떨어뜨려짐으로써 발생된다. 이것은 파이프에서 음성 충격을 발생시키게 되고, 그 때 배관을 따라 몇몇 지점들에서 그것은 측정되게 된다. 높이 h가 높아질수록 충격 에너지도 더욱 커진다. 이 충격은 가스내에 청음기를 이용하여 측정될 수 있는 음향 진동을 만든다.

충격 무게에 의해 발생된 음향 진동은 다음 형식으로 나타내어질 수 있다.

$$p(t,0) = p_0 e^{-\beta t} e^{jwt} \tag{3}$$

여기서, $w = 2\pi f$

3.2 배관을 통한 전송과 평면 파동 방정식

3.2.1 평면 파동 방정식

제어량 ABDC를 고려하면 이 제어량은 Fig.6에서 보여주는 것과 같이 음파의 통과 동안 A'B'D'C' 로 변한다. 이 요소의 부피는 다음과 같이 된다.

$$v + dv = Sdx\left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \tag{4}$$

또는 ,

$$\frac{dv}{v} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tag{5}$$

$$dv = Sdx\frac{\partial \xi}{\partial x} \tag{6}$$

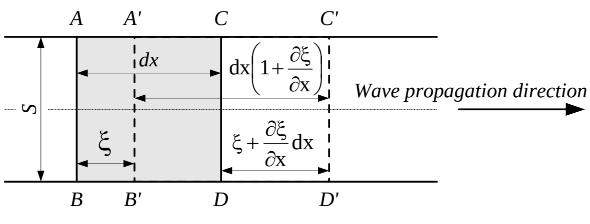

Fig.6 Displacement of gas during the passage of sound wave

용적율(bulk modulus) K[Pa]는 그 상관관계에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$dp = p = -K\frac{dv}{v} \tag{7}$$

여기서 dp는 압력변화이다. 음향 진동(음성 진동)이기 때문에 dp를 p로 한다. 따라서 음성 진동은 변위 ξ를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p = -K\frac{dv}{v} = -K\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\rightarrow \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -K\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \tag{8}$$

뉴턴의 제2법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$-S\left(\frac{\partial p}{\partial x}dx\right) = (\rho S dx)\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{9}$$

또는,

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \rightarrow -\frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{10}$$

식 (8)과 (10)로부터

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{11}$$

여기서,

$$c \equiv \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

단열 조건을 가정한 이상적인 가스에서 음속은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \tag{12}$$

만약 e^{jwt}를 시간 종속적이라고 가정하면, 그 때 파동 방정식 (11)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\frac{w^2}{c^2}p = -k^2 p \tag{13}$$

여기서, $k = \frac{w}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$

e^{jwt}에 시간 종속적인 파동 방정식 (13)의 일반해는 다음과 같다.

$$p = Ae^{j(wt-kx)} + Be^{j(wt+kx)} \tag{14}$$

여기서, A항과 B항은 각각 왼쪽과 오른쪽을 이동하는 것이고, kx는 x의 거리가 떨어져있는 두 위치 사이에서의 파동의 위상 변화를 나타낸다. 파동이 x의 거리를 이동하는 동안 진행하는 파동의 위상은 kx에 의해 변화된다. 해 (14)를 구하기 위해서는 두 가지의 경계 조건이 주어져야 한다.

3.2.2 흡수율(Absorption Coefficient)

송수관에서는 두 가지의 초기감쇠작용이 있다.

① 부피가 커지는 현상인 전형적인 흡수작용은

열전도 손실과 점성 손실, 그리고 회전 이완 손실을 포함한다. 이 흡수율은 주파수의 제곱에 좌우된다.

② 송수관 벽에서의 손실. 이 흡수율은 주파수의 제곱근에 좌우된다.

전체 흡수율은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \alpha_{\beta} + \alpha_w = \frac{a}{P_0} f^2 + \frac{b}{\sqrt{P_0}} \sqrt{f} \qquad (15)$$

식 (15)을 포함하면 식 (14)의 해는 다음과 같이 된다.

$$p = (Ae^{j(wt - kx)} + Be^{j(wt + kx)})e^{-\alpha x} \qquad (16)$$

3.2.3 경계조건(Boundary Conditions)

식 (16)의 해를 완성하기위해, 경계 조건들은 A와 B항을 계산할 필요가 있다. 보통 경계들은 실제 시스템 파라메터(parameter)로부터 얻어진다. 시뮬레이션의 목적에서 충격원 으로부터 배관은 반 무한대라고 가정할 수 있다.

따라서, 경계 조건들은 다음과 같다.

$x = 0$ 에서 $\quad p = p(t, 0)$

$x = \infty$ 에서 $\quad p = 0$

3.2.4 해(Solution)

해는 다음과 같이 주어진다.

$$p = p_0 e^{-\beta t} e^{j(wt - kx)} e^{-\alpha x} \qquad (17)$$

충격원으로부터 5060m 떨어진 지점에서의 음향 진동의 결과는 Fig.7에 주어진다.

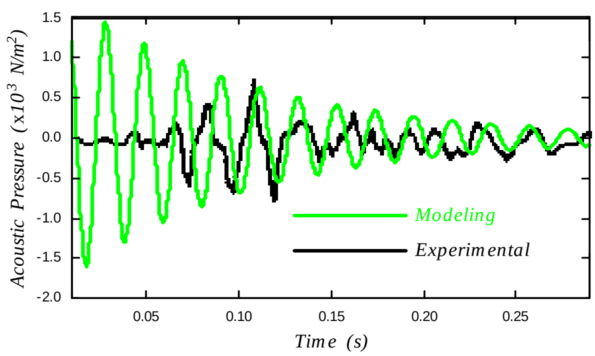

Fig.7 Acoustic pressure at the position of 5060m from Source

충격원으로부터 10km, 15km 떨어진 곳에서 측정한 음향 진동의 시뮬레이션 결과가 Fig.8에서 보여지고 있다.

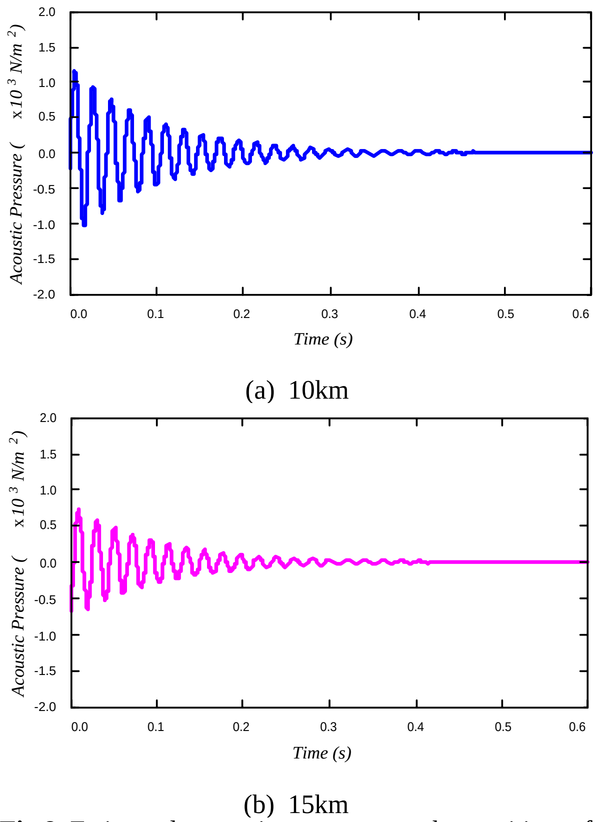

Fig.8 Estimated acoustic pressure at the position of 5km, 10km, and 15km from source

4. 실험 결과

Fig.10은 센서가 부착되는 외부로 드러나 있는 배관의 전체적인 모습을 나타내고 있다. 실제 배관의 총 길이는 약 360m이다.

Fig.10 The practical pipeline and the setup accelerometers

충격이 양쪽 모두의 데이터 수집 및 신호 처리 시스템에서 감지되었을 때, 2.3절에서 보여주었던 알고리즘을 이용함으로써 시간 테이블 데이터로

부터 충격 위치를 계산해 낼 수 있고, A 지점과 B 지점에서의 충격 감지 시간과 시간차 및 A 지점으로부터 충격 지점까지의 거리를 소프트웨어를 통해서 볼 수 있다. 실험은 A 지점으로부터 180m 떨어진 지점에서 10Kg 무게의 물체를 2.5m 높이에서 자유낙하 시켜 배관에 충격을 가하는 것으로 시행되었다. 실험 결과, 2.3절의 (1)식에서 각각의 매개 변수들은 다음과 같이 정의되고

t_A = 7.852 sec, t_B = 7.842 sec

L = 360 m, $v_A = v_B$ = 340 m/s

x_A 는 다음과 같이 계산된다.

$$x_A = \frac{(v_A t_A - v_B t_B) + L}{2} = 181.7 \text{ m}$$

본 실험에서 충격 지점 산출 오차는 1.7m이고, 이 오차는 배관의 전체 길이의 0.5% 이하이다.

5. 결 론

본 논문에서는 DSP TMS320C32 기반의 신호처리기, 무선 통신, 데이터 베이스 시스템을 이용하여 천연가스 배관의 타공사 실시간 감지 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템을 이용하여 배관의 상태정보를 실시간으로 모니터링 할 수 있고, 타공사를 감지 할 수 있으며 그리고 배관에 가해지는 충격의 위치를 산출해 낼 수 있다는 것을 모의 실험을 통해 증명하였다.

시뮬레이션의 결과에서는 음향 진동이 충격 위치로부터 15km 이상 떨어진 거리에 까지도 도달 할 수 있다는 것을 보여주었다. 그러므로, 15km 이상의 거리에서도 개발한 시스템을 이용하여 충격을 감지할 수 있다고 사료되며, 본 시스템의 적용성을 더욱 넓혀갈 수 있다고 판단된다.

현재 개발된 시스템은 한국 가스 공사 경인지사의 율도 기지와 영종도 기지간의 배관과 충청지사의 부곡과 평택간의 배관에 설치되어 있는 상태에서 성공적으로 동작해 오고 있다. 이로써 본 시스템의 실제 적용 효과를 증명하였다.

앞으로 개발된 시스템에 대한 현장 적용성을 더욱 넓게 확대하여 나가는 것이 과제이다.

참고문헌

(1) Shin S.M., Yoo H.R., Im J.S., Kim S.B., 2002, "Development of Third-Party Damage Monitoring System for Natural Gas Pipeline", The fifth International Conference on Science and Technology, April 25-26, Hochiminh City University of Technology, hochiminh, Vietnam

(2) R&D Center, Korea Gas Corporation, 2000, "A study on the real-time monitoring to detect third-party damage on subsea pipelines in Masan Bay", Research Report.

(3) Park S.S., et. al., 2000, "Development of real time monitoring system for third party damage detection using wireless data communicating", Journal of KIGAS, Vol.4, No.3.

(4) Leis B.N., FranciniR.B., Mohan R., Rudland D.L. and Olson R.J., 1998, "Pressure- Deplacement Behavior of Transmission Pipelines Under Outside Forces Toward a Serviceability Criterion for Mechanical Damage", Proceeding of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.Ⅱ pp. 60-67

(5) Leis B.N., Francini R.B., Stulen F.B. and Hyatt R.W., 1998, "Real-time monitoring to detect third-party damage", In Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.34-38.

(6) Tohyama Mikio and Koike Tsunehiko , 1998, "Fundamentals of Acoustic Signal Processing", Academic Press.

(7) Francini R.B., Leis B.N., Narendan V.K., and Stulen F.B., 1997, "Real Time Monitoring to Detect Third-Party Damage: Phase Ⅱ GRI(Gas Research Institute), Chicago, IL.

(8) Francini R.B., Hytatt R.W., Leis B.N., Narendan V.K., Pape D. and Stulen F.B., 1996, "Real Time Nonitoring to Detect Third-Party Damage",GRI(Gas Research Institute),Chichago, IL.

(9) Brodetsky Igal and Savic Michael, 1993, "Leak monitoring system for gas pipelines", In Proceedings of IEEE Acoustic, Speech, and Signal Processing, Vol.3, pp.17-20.

(10) Krautkramer J. and Krautkramer H., 1990, "Ultrasonic Testing of Materials", 4th Edition, Springer-Velarg.