

압력값 모니터링을 통한 배관 내 가스누출감지에 대한 실험적 연구

진경민* · 최규홍* · 이송규* · 정태용**† · 신동훈** · 황승식** · 오정석***

*국민대학교 대학원 기계공학과, **국민대학교 기계시스템공학부, ***한국가스안전공사
(2011년 10월 17일 접수, 2011년 12월 9일 수정, 2011년 12월 9일 채택)

An Experimental Study on Detection of Gas Leakage Position by Monitoring Pressure Values at City Gas Pipeline

Kyoung-Min Jin*, Gyu-Hong Choi*, Song-Kyu Lee*, Tae-Yong Chung**†,
Donghoon Shin**, Seung-Sik Hwang**, Jeong-Seok Oh***

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Kookmin University,*

***Dept. of Mechanical Engineering, Kookmin University, ***Korea Gas Safety Corporation*

(Received 17 October 2011, Revised 9 December 2011, Accepted 9 December 2011)

요 약

도시가스 배관망의 안전관리 및 위험예측은 매우 중요한 문제로 인식되고 있으며 가스 누출지점을 실시간으로 감지함으로써 안전사고 예방을 위한 노력은 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 가스누출 시, 압력변화에 따른 상관관계(correlation)를 통해 실시간 누출지점감지를 목적으로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 총 378 m의 배관에 5개의 누출밸브를 설치하여 실험하였고, 시뮬레이터를 통해 누출지점을 감지함으로써 실제 누출지점과 비교해 보았다. 실험결과, 실험을 통한 누출지점과 실제 누출지점은 6 m 내의 차이를 보였으며 향후, 본 기술의 적용이 필요한 위험구역에서의 실증을 통한 상용화가 수반되어야 할 것이다.

주요어 : 센서 네트워크, 도시가스 배관망, 안전 모니터링, 상관관계, 시뮬레이터

Abstract — Gas pipeline safety management and risk prediction are recognized as a very important issue. And the effort to prevent accidents is essential. So, in this study, it was studied through correlation of pressure changes for leak point detection in real-time. It experimented by installing the five leakage valves in the pipe of 378 m and compared the actual leak points with simulation results. The results showed that experimental leak points and the actual leak points have differences within the 6 m. And this technology has to be commercialized by the demonstration in dangerous zone.

Key words : Sensor networks, Urban gas pipelines, Safety monitoring, Correlation, Simulator

1. 서 론

도시가스는 상하수도, 전기 및 통신과 같이 현대의 도시기능을 위해 필수적인 요소로, 그 공급을 위한 배관망은 마치 혈관과 같이 도시 곳곳을 연결하는 네

트워크로 구성되어 있다. 그러나 가스는 누출 시 대형사고의 위험성을 수반하고 있으므로 도시가스 배관망의 유지관리는 안전을 위하여 매우 중요하다 [1]. 실제로 가스의 누출 및 폭발에 의한 사고는 국내에너지 관련 재난 및 사고의 통계에서 큰 부분을 차지하고 있다 [2]. 국내에서는 천연가스를 각 지역의 도시가스업체로 공급하는 고압공급망의 유지관리를 포함한 운영은 가스공사가 맡고 있으며, 각 도시가스업체는 공급받은 가스를 해당 지역에 분배하는 중압공급

†To whom corresponding should be addressed.
Kookmin Univ., Jeongneung 3-dong, Seongbuk-gu,
Seoul, 136-702, Korea
Tel : 02-910-5036; E-mail : tychung@kookmin.ac.kr

망에 대한 유지관리를 담당하고 있다. 중압도시가스 공급망은 유동인구가 많고 공사가 빈번한 도시 지역을 관통하여 설치된다는 점에서 매우 엄격한 안전관리가 필수적이다. 따라서, 각 도시가스 공급업체들은 사고예방과 더불어 안정적인 도시가스의 공급을 위하여 국가 GIS 시스템을 기반으로 한 지형, 지반정보와 기본적인 운전상황 모니터링을 포함하는 배관망관리 시스템을 운영하고 있다 [3]. 현재는 원격으로 측정된 다양한 운전상황 모니터링 정보를 활용하여 전체 또는 일부의 도시가스배관에 대한 실시간 누출감지기술개발이 활발히 연구되고 있는데 소프트웨어를 이용한 방법으로는 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)를 통해 압력, 유량 등 배관망의 운전상황정보를 수집하고 이를 프로그램을 통해 분석하는 방법이다 [4,5]. 여러 센서에서 얻어진 결과와 소프트웨어적인 분석결과를 비교하여 배관망의 안전유무, 누출위치탐지 등 여러 용도에 사용되고 있다 [6-9].

이러한 연구와 기술을 바탕으로 본 연구에서는 압력값 모니터링을 통한 가스배관망 내의 누출 감지를 위해 실험용 배관망을 구성하고 누출 조건별 실험을 통해, 가스누출 시, 배관 내에서의 누출지점을 신속, 정확하게 감지하기 위한 실험적 연구를 하였다.

2. 연구 조건 및 이론

2-1. 연구 조건

본 연구에서는 주거단지 및 산업현장에서 직접 사용하고 있는 배관망을 설계하여 압력센서와 유량계를 설치하였고, 누출지점은 임의의 지점을 지정밸브로 설치하여 원하는 시간에 원하는 양만큼 누출량을 조절할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1과 Table 1은 실제연구에 사용되었던 배관망의 계략도와 실험조건이다.

배관은 직선배관 300 m, 지류배관 81 m로 총길이

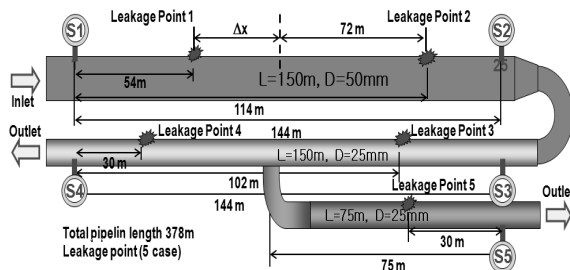


Fig. 1. Pipeline for experiment.

381 m로 구성되어 있다. 배관 관경은 각각 0.05 m (0-150 m), 0.025 m(150-381 m)이며, 배관 내에 압력센서 설치 위치와 누출지점은 Table 1과 같다. 또한, 실험에 사용된 작동유체공기를 공기 압축기와 정압기를 통해 인입압력과 속도를 각각 0.2[Bar]와 $a=340[m/s]$ 로 일정하게 유지시켰다.

따라서, 본 연구에서는 실제 이론 데이터와 실험을 통한 실험 데이터를 비교함으로써 배관 내 가스누출 지점 감지에 관한 연구를 하였다.

2-2. 주요 기술 이론

상기된 바와 같이 본 연구에서는 가스배관망 안전 상황모니터링을 통한 실시간 누출지점의 감지를 중점적으로 연구하였다. 또한 “Labview(version 6.1)”라는 프로그램을 사용하여 시뮬레이터를 설계하였다. 따라서 본 연구에서의 이론적 설명은 Fig. 2에 나타난 “Labview(version 6.1)” 설계를 바탕으로 설명하고자

Table 1. Pipeline of experimental conditions.

Total pipeline length : 381 m			
straight pipeline : 300 m			
branch pipeline : 81 m			
sensor 1 (S1)	3 m	leakage point 1	57 m
sensor 2 (S2)	147 m	leakage point 2	117 m
sensor 3 (S3)	153 m	leakage point 3	189 m
sensor 4 (S4)	297 m	leakage point 4	261 m
sensor 5 (S5)	303 m	leakage point 5	273 m

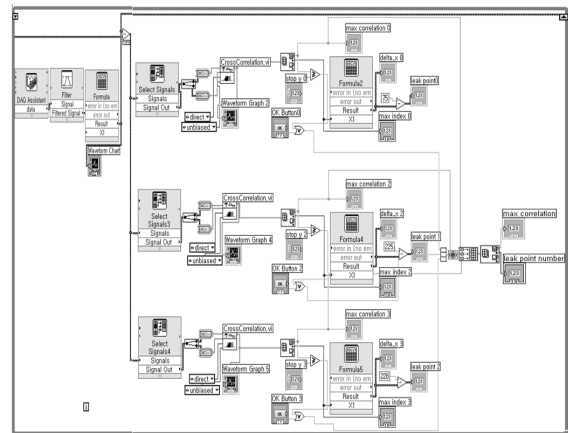


Fig. 2. “Labview” design in the simulator.

한다.

먼저, 압력센서를 통해 압력 신호값을 받고 샘플링을 위해서 샘플링 시간을 설정한다. 본 연구에서는 1 kHz, 2000 sample (2초)로 설정하였다. 다음으로 필터과정을 통해 Fig. 3과 같이 노이즈를 최소화 시킨다.

그리고 암페어[A] 단위의 전기신호를 바[bar] 단위의 압력값으로 변환 시킨다. 그 다음에 각각의 압력값을 미분한다. 여기서, 미분을 하는 이유는 “상관관계(correlation)” 함수를 사용하기 위한 것이다. 미분을 적용시키면 압력값이 일정할 때는 미분값이 “0” 근사값을 나타내고 가스누출이 시작되면 압력값이 떨어지는 동시에 미분값은 음수값을 나타낸다. “상관관계(correlation)” 함수는 누출 시 두 신호의 미분값을 이용한다.

다음 단계는 5개의 센서신호 중에서 원하는 임의의 구간의 센서신호 2개를 선택한다. 본 연구에서는 “sensor 1-2” 구간, “sensor 3-4” 구간, “sensor 3-5” 구간 이렇게 3구간으로 나뉘고 이는 5개의 누출지점을 기준으로 해서 나뉘었다. 그리고 상관관계(correlation) 라는 함수를 사용하는데 이 함수는 “select signal” 함수를 통해 선택된 2개의 신호 사이에서의 상호유사성을 나타내는 방법으로 식 (1)과 같이 정의할 수 있다 [10].

$$R_{s_1s_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t)s_2(t+\tau)dt \quad (1)$$

식 (1)과 같이 t에 대한 정적분을 수행한 결과, 상관계수 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 는 시간지연 τ 의 함수로서 나타나게 된다. 상관계수 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 는 비슷한 거동을 하는 두 신호간의 시간차 Δt 를 결정하는데 매우 유용하다. 이것은 일반적으로 시간지연 τ 가 신호의 시간차와 비슷한 지점($\tau \approx \Delta t$)에서 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 의 최대값이 나타나기 때문이다. 인접한 두 압력센서신호의 상관계수 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 를 이용하여 두 압력신호의 시간차를 결정하면, 이를 통해 압력교란의 시작 위치를 추정할 수 있다. 만약, 교란이 거리 L만큼 떨어진 두 압력센서의 외부에서 생성되어 전파된 것이라면 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 의 최대값은 $\tau = \pm L/a$ 의 지점에서 나타날 것이다. 반대로 압력교란이 두 센서의 내부에서 생성된 것이라면 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 의 최대값은 $-L/a < \tau < +L/a$ 의 지점에서 나타날 것이며 누출의 가능성을 의미한다. 상관관계(correlation)를 통해 상관계수 $R_{s_1s_2}(\tau)$ 가 최대일 때의 시간지연 τ 값을 통해서

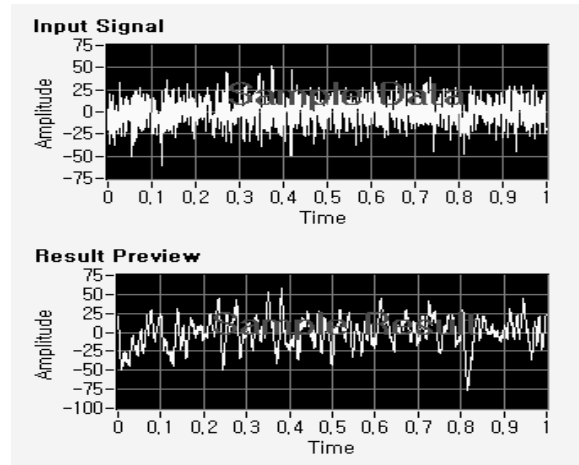


Fig. 3. Filter process.

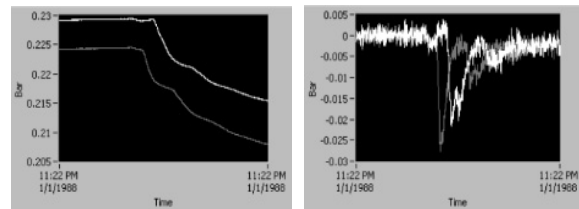


Fig. 4. Pressure values and the differential value.

Table 2. Symbols.

L	length between two sensors	[m]
Δt	time step	[s]
τ	time constant	[s]
Δx	length from L/2 point	[m]

Δx 를 구한다. Δx 를 구하는 공식은 식 (2)와 같다.

$$\Delta x = a\tau_{max}/2 \quad (a = 340m/s) \quad (2)$$

Δx 를 구한 뒤, Δx 와 각 구간의 중간지점과의 차이로 실제 누출지점값을 구할 수 있다.

2-3. 누출지점감지

누출지점감지를 위해 사용된 시뮬레이터의 메커니즘을 살펴보면, Fig. 5의 시뮬레이터의 첫 번째 그래프(pressure)는 배관에 설치된 5개의 압력센서의 압력값을 나타내고, 다음의 세 개의 그래프는 각각 “sensor 1-2”, “sensor 3-4”, “sensor 3-5” 사이의 구간 별 상관계수 “correlation” 값을 나타낸다.

또한, 아래 확대시켜 놓은 부분에서 “max correlation”과 “leak point number”는 각각 세 구간 사이에서의

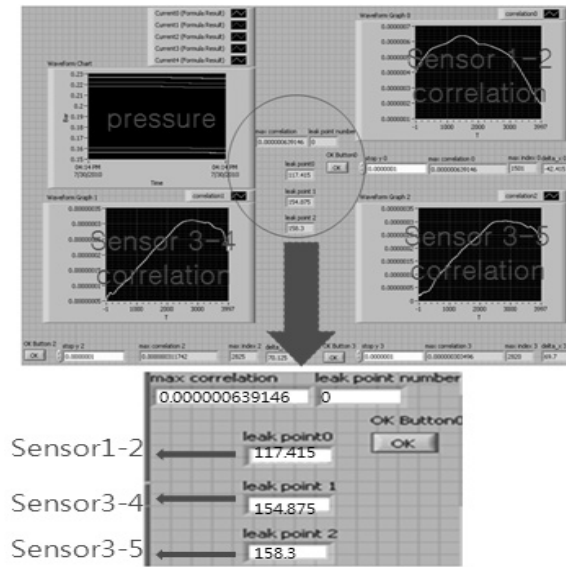


Fig. 5. Simulator.

최대 상관계수값과 그때의 구간을 의미한다. 최종적으로, 아래 실험을 통해 구한 누출지점은 “leak point 0”에 나타난 117.415 m 지점임을 알 수 있다. 여기서, “leak point 1, 2”에 나타난 값은 무시하게 된다.

3. 결과값 비교

실험은 2-3에 서술된 방식으로 Table 1의 조건에 따라 5 case의 누출지점에 대해서 실험을 진행하였다. 누출량은 case 별로 총 유량(4.8 m³/s)의 5%(0.24 m³/s), 10%(0.48 m³/s)의 유량을 각각 누출 시켰으며, 누출량은 유량계를 통해 수동으로 직접 밸브를 조절하여 맞추었다.

Table 3은 각 case 별 누출지점과 누출량을 보여주며 Fig. 6과 Fig. 7은 각각 실제 누출지점과 실험 누출지점의 차이가 가장 크게 발생한 case 2-1과 가장 작게 발생한 case 3-1의 시뮬레이터 모습이다.

case 2-1의 경우, 가스 누출과 동시에 센서의 압력값이 떨어지고 각 구간의 상관계수 그래프가 Fig. 6과 같이 나타난다. 또한, “sensor 1-2” 구간에서 상관계수값이 “0.00000063946”으로 가장 크게 나왔으며 “leak point 0” 값에 따라 누출지점이 117.8 m 라는 것을 확인할 수 있다. case 3-1의 경우도 마찬가지로 가스누출이 발생되면 각 센서의 압력값이 떨어지는 동시에 Fig. 7과 같이 각 구간의 상관계수 그래프가 나타난다. case 3-1 경우, “sensor 3-4” 구간에서 상관계수값이

Table 3. Leakage conditions.

	누출 지점	누출량
case 1-1	57 m	0.24 m ³ /s (5%)
case 1-2	57 m	0.48 m ³ /s (10%)
case 2-1	117 m	0.24 m ³ /s (5%)
case 2-2	117 m	0.48 m ³ /s (10%)
case 3-1	189 m	0.24 m ³ /s (5%)
case 3-2	189 m	0.48 m ³ /s (10%)
case 4-1	261 m	0.24 m ³ /s (5%)
case 4-2	261 m	0.48 m ³ /s (10%)
case 5-1	273 m	0.24 m ³ /s (5%)
case 5-2	273 m	0.48 m ³ /s (10%)

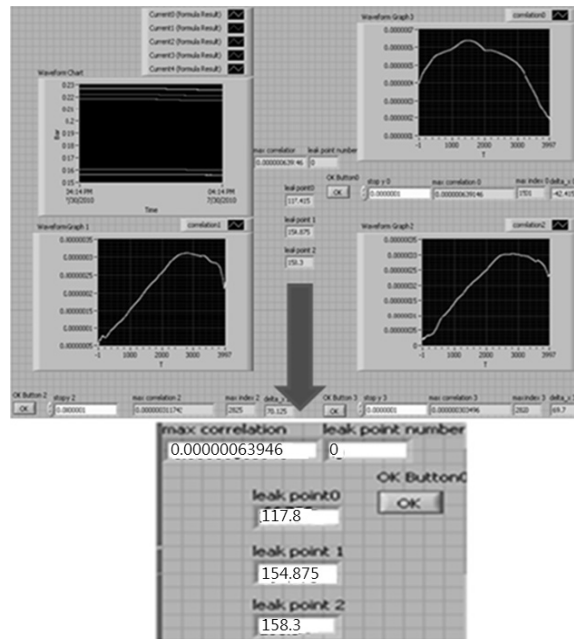


Fig. 6. Running the simulator [case 2-1].

“0.000000395899”으로 가장 크게 나왔으며 “leak point 1” 값에 따라 누출지점이 183.5 m 라는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 실제 누출지점(이론값)과 실험을 통해 구한 누출지점(실험값)의 차이를 확인할 수 있었다.

case 2-1의 경우, 이론값과 실험값의 차이가 0.8 m로 매우 정확한 실험결과를 도출하였으며, case 3-1의 경우, 이론값과 실험값의 차이는 5.5 m로 나타났다. 여기서 발생된 누출지점차이(실제-이론)는 압력센서를 통해 받는 압력 데이터 신호의 노이즈에 의한 영향으로 사료되며 누출량에 따른 영향은 없었다. Fig. 8은 5 case의 누출지점차이를 그래프로 나타낸 것으로, 각 case 별, 실제 누출지점을 기준으로 누출지점차이값을

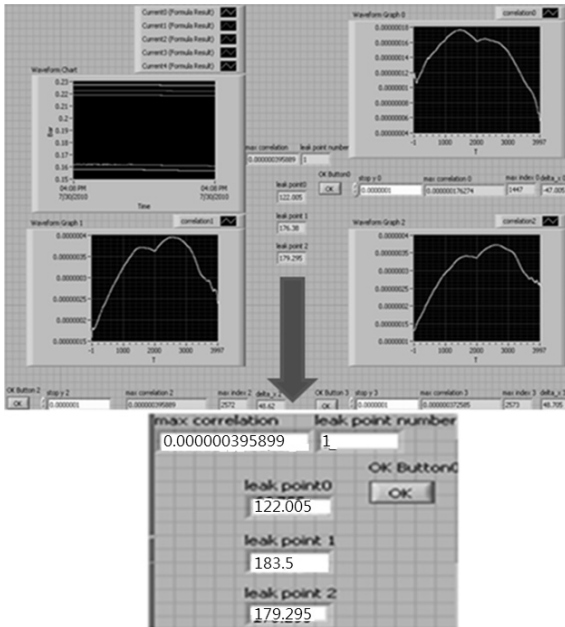


Fig. 7. Running the simulator [case 3-1].

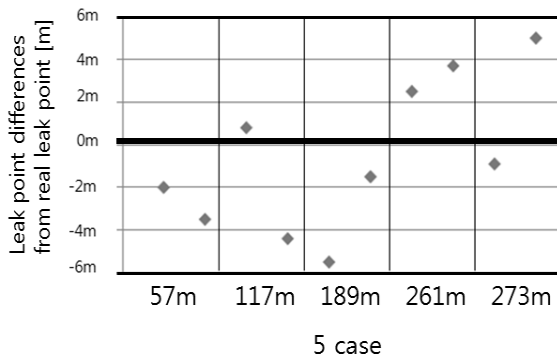


Fig. 8. Leak point difference.

보여준다. 누출지점차이는 6 m 내로 나타남을 확인할 수 있다. 또한, Table 4는 실험을 진행한 5 case에 대한 누출지점, 누출량 및 실제 누출지점과 실험 누출지점의 차이값을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스배관망 안전상황 모니터링을 통한 실시간 누출지점의 감지를 목표로 임의의 두 지점 사이에서의 압력값과 “상관관계(correlation)”라는 함수를 통해 누출지점을 감지하였다.

- 1) case 2-1의 경우, “sensor 1-2” 구간에서 최대 상관계수값 “0.00000063946”이 나타났으며, “leak

Table 4. Comparison of actual data and the experimental data.

	실제 누출 지점	실험 누출 지점	누출량	누출지점차이 실제-이론
case 1-1	57 m	55 m	0.24 m ³ /s (5%)	2 m
case 1-2	57 m	53.5 m	0.48 m ³ /s (10%)	3.5 m
case 2-1	117 m	117.8 m	0.24 m ³ /s (5%)	0.8 m
case 2-2	117 m	112.6 m	0.48 m ³ /s (10%)	4.4 m
case 3-1	189 m	183.5 m	0.24 m ³ /s (5%)	5.5 m
case 3-2	189 m	187.5 m	0.48 m ³ /s (10%)	1.5 m
case 4-1	261 m	263.5 m	0.24 m ³ /s (5%)	2.5 m
case 4-2	261 m	264.7 m	0.48 m ³ /s (10%)	3.7 m
case 5-1	273 m	272.1 m	0.24 m ³ /s (5%)	0.9 m
case 5-2	273 m	278 m	0.48 m ³ /s (10%)	5 m

point 0” 값에 따라 누출지점이 117.8 m라는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 누출지점차이(이론값-실험값)는 0.8 m로 도출 되었다.

- 2) case 3-1의 경우, “sensor 3-4” 구간에서 최대 상관계수값 “0.000000395899”이 나타났으며, “leak point 1” 값에 따라 누출지점이 183.5 m라는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 누출지점차이는 5.5 m로 도출 되었다.

결국, 기존 목표에 맞춰 경제적, 인명적 피해와 손실을 예방하고 최소화하기 위한 노력이 이루어졌으며, 향후, 누출지점차이를 줄이기 위해서 압력센서를 통해 받는 압력 데이터 신호의 노이즈를 줄이기 위한 노력이 필요할 것이다. 더 나아가, 본 기술의 적용이 필요한 위험 구역에서의 실증을 통한 상용화가 수반되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국민대학교 교내연구 지원사업(2011년) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2011

4010100070)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. H.E. Emara-Shabaik, Y.A. Khulief and I. Hussaini, "Simulation of transient flow in pipelines for computer-based operations monitoring", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 44, 257-275, (2004).
2. C.Y Cho, S.P Jang, J.H Nam, S.H Lim, D.H shin, T.Y Chung, "Development of pipeline network analysis model for operation monitoring of city-gas supply networks", *The Korea Society for Energy Engineering*, 486-493, (2008).
3. 하종만 "배관망 해석의 이해와 활용", *유체기계저널*, 6, 90-98, (2003).
4. K. Fukushima, R. Maeshima, A. Kinoshita, H. Shiraishi and I. Koshijima, "Gas pipeline leak detection system using the online simulation method", *Comp. & Chem. Eng.*, 24, 453-456, (2000).
5. S. Wang, H. Yang and H. Liu, "Design of the gas pipes monitoring system based on Compact PCI", *Comp. Meas. & Cont.*, 14, 358-359, 370, (2006).
6. L. Billmann, and R. Isermann, *Leakd detection methods for pipelines*, *Automatica*, 23, 381-385, (1987).
7. W. J. Turner, and N. R. Mudford, *Leak detection, timing, location and sizing in gas pipelines*, *Mathematical and Computer Modelling*, 10, 609-527, (1988).
8. S. Belsito, P. Lombardi, P. Andreussi, and S. Barerjce, *Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural network*, *AIChE Journal*, 44, 2675-2688, (1998).
9. A. C. Caputo, and P. M. Pelagagge, *An inverse approach for piping networks monitoring*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, 497-505, (2002).
10. R. Jamal, and H. Pichlik, *LabVIEW. Applications and Solutions*, Prentice Hall, New Jersey, (1999).