



저압확장과 검출을 통한 배관 누출 및 누출위치 예측

†하태웅 · 하종만* · 김동혁* · 김영남**

경원대학교 기계 · 자동차공학과, *한국가스공사 연구개발원, **바람과 소리(주)
(2007년 11월 2일 접수, 2007년 11월 28일 채택)

Leak and Leak Point Prediction by Detecting Negative Pressure Wave in High Pressure Piping System

†Tae Woong Ha · Jong Man Ha* · Dong Hyuk Kim* · Young Nam Kim**

Department of Mechanical · Automotive Engineering, Kyungwon University

*Korea Gas Cooperation R&D Division

**Flow & Noise

(Received November 2 2007, Accepted November 28 2007)

요 약

고압 가스 배관망의 안전관리는 매우 중요한 문제로 배관의 외적 손상으로 구멍이 생길 경우 발생하는 누출은 폭발 및 환경오염을 포함한 막대한 경제적 손실을 야기할 수 있다. 누출 검지를 위한 PLDS(Pipeline leak detection system)의 기술로 저압확장과 검지 기술이 적용되고 있으며 본 논문에서는 CFD++ 상용코드를 활용하여 배관 누출시 유동특성을 이론적으로 해석하여 저압확장과 발생 메커니즘과 음속으로 확장되는 전파특성을 규명하였다. 또한 긴 배관망에 적용하기 위한 1차원 해석 방법을 제시하고 신뢰성을 CFD해석 결과로 검증하였다.

Abstract -- The safe operation of high pressure pipe line systems is of significant importance. Leaks due to faulty operation from the pipelines can lead to considerable product losses and to exposure of community to dangerous gases. There are several leak detection methods, which have been recently suggested on pipeline network. The negative pressure wave detection technology, which has advantages of short time detection availability, accurate leaking location estimate capability and cost effective, is concentrated in this study. Theoretical analysis of the flow characteristics for leaking through a hole on the pipe wall has been performed by using CFD++, commercial CFD package. The results of 3-dimensional analysis near leaking hole confirm the occurrence of negative pressure wave and verify the characteristics of propagation of the wave which travels with speed equal to the speed of sound in the pipeline contents. For the application of long pipe line system. The method of 1-dimensional analysis has been suggested and verified with results of CFD++.

Key words : Leakage, Pipe network, Pipeline leak detection system, Negative pressure wave, Propagation

I. 서 론

세계적으로 액체나 천연가스과 같은 기체를 수송하기 위해 상당한 규모의 배관망이 구축되어 운용되고 있다. 우리나라도 전국적인 천연가스 수송을 위하여 2,511 km에 달하는 배관망이 구축되어 운영되고 있다. 이러한 대규모 배관망은 지름이 약 500 mm~900 mm의 비교적 큰 관이 지하에 매설되어 있으며 8.5~70 bar의 높은 압력으로 운영되고 있어 가스 배관망의 안전관리

가 매우 중요한 문제이다. 배관의 부식에 의한 손상이나 건설공사 시 건설기계 등에 의한 손상으로 구멍이 생길 경우 발생하는 누출은 인구 밀집지역일 경우 폭발 및 환경오염을 포함한 막대한 피해를 입힐 수 있으며 그에 따른 엄청난 경제적 손실을 야기할 수 있다. 따라서 누출 검지를 위한 PLDS(Pipeline leak detection system)를 구축하여 실시간으로 가스누출을 감시하고자 많은 기술적 방법들이 제시되고 실제 적용되고 있다.

지하 매설 가스 배관의 누출을 검지할 수 있는 기술로는 크게 3가지 부류로 구분해 볼 수가 있다. 첫째로는 생물학적 기술(biological methods)[1]인데 숙련된 인

†주저자:twaha@kyungwon.ac.kr

력 또는 훈련된 동물의 발달된 감각기관을 이용하여 시각적인 배관 검사, 누출에 따른 냄새 감지 또는 누출에 따른 소리를 감지하고 그 위치를 알아내는 방법이다. 이 방법은 특별한 기술과 장비가 사용되지 않는 원초적인 방법으로 사용된 인력이나 동물의 훈련 정도에 따라서 누출 감지의 정밀도가 다르며, 또한 광범위한 영역의 배관망을 24시간 동시에 감지하기 어렵고 비용이 많이 든다. 둘째는 하드웨어에 근거한 기술(hardware-based methods)이다. 다양한 하드웨어 장치들, 즉 음향 센서, 가스 검지기, 음압 검지기 그리고 적외선 서모그래피와 같은 정밀한 장치들을 사용하여 보다 정확하고 정량적인 누출의 감지와 누출 위치를 추정하는 방법인데 시각적인 장치(visual devices) 이용기술[1-4], 음향 장치(acoustic devices) 이용기술[5-7], 샘플링 장치(sampling devices) 이용기술[8], 음압파(negative pressure) 검지기술[9-10] 등이 있다. 셋째로는 소프트웨어에 근거한 기술(software-based methods)인데 누출에 따른 배관내의 물성치의 변화를 이론적으로 해석할 수 있는 다양한 컴퓨터 소프트웨어 패키지를 사용하여 결과를 예측하고 여러 가지 감지 센서로부터의 측정 결과와 비교하여 배관의 누출과 누출위치를 감지하는 방법으로 유량 또는 압력 변화(flow or pressure change) 이용기술[11], 질량 또는 체적 균형(mass or volume balance) 이용기술[12], 역학적인 모델에 근거한 시스템(dynamic model based system)[13], 압력 지점 분석(pressure point analysis, PPA) 기술[14] 등이 있다. 이 다양한 기술 중 천연가스 배관망과 같이 광범위한 배관망의 누출 및 누출위치 예측 시스템(PLDS)을 위한 방법으로 적합한 것은 음압파(negative pressure) 검지기술로 판단된다. 이 방법은 누출의 발생으로 생긴 저압확장파(음압파)가 배관 속을 흐르는 매질의 음속으로 전파되는 현상을 이용하는 방법으로 비교적 설치비용과 운전비용이 저렴하고 운전조건의 변화가 있어도 검출가능하며, 또한 누출과 거의 동시에 감지가 가능하며 최근 발달된 신호 필터링 기술을 적용함으로써 허위경보 발생 빈도가 낮아지고 누출위치의 예측 정확도가 높아져 상용화 제품의 기본 기술로 많이 활용되고 있다.

본 연구에서는 배관 시스템에서 임의의 위치에서 외적인 충격에 의해 배관 벽에 구멍이 발생했을 경우 구멍을 통한 누출이 발생되고 이때의 유동특성을 CFD상용 패키지인 CFD++를 사용하여 이론적으로 해석함으로써 구멍 누출에 의한 저압확장파의 발생 메커니즘을 규명하고 저압확장파의 전파특성으로부터 누출 위치의 예측 가능성을 분석해 보고자 한다.

II. 손상된 배관 벽을 통한 누출 발생 시의 유동특성해석

고압 배관에서 배관 벽에 갑작스런 구멍이 발생하여 누출이 발생되기 시작하면 구멍주위의 압력은 일시적으로 급격히 낮아지게 되고 이 낮아진 압력은 구멍을 중심으로 배관의 상류와 하류로 확장되어간다. 이와 같은 저압확장파의 전파특성을 이용하면 배관상의 임의의 위치에서 발생한 구멍 누출과 구멍의 위치를 거의 실시간으로 검출해 낼 수 있다. 즉 배관상의 일정거리 구간마다 압력센서를 설치하고 압력센서로부터 저압확장파가 검출된다면 그 구간내의 임의의 위치에 구멍이 발생하여 누출이 발생되고 있음을 알 수 있고 그 구간에 설치된 두 센서의 저압확장파 검출 시간차를 통하여 구멍의 위치를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 3D 및 2D CFD 해석을 통하여 누출 발생 시의 저압확장파 발생을 확인하고, 구멍위치의 예측을 위한 저압확장파 도달 시간을 계산하여 저압확장파의 전파 특성을 분석해 보고자한다. 또한 긴 배관 구간에서 누출 발생 시의 유동해석을 위한 1차원(1D) 해석기법을 제시하고, 2D CFD 해석 결과와 비교분석해 보고자 한다.

2.1. 배관 구멍 주위의 3차원 유동해석

배관 구멍을 통한 누출이 발생했을 때의 유동 특성을 알아보기 위하여 구멍 주위에 대한 3차원 유동 해석을 수행하였다. Fig. 1은 3차원으로 표현한 해석 대상 배관시스템으로 L과 D는 해석 대상 배관의 길이 및 관경, L_1 , L_2 는 누출 구멍의 위치, D_h 는 누출 구멍의 직경을 나타낸다. 배관의 직경(D)은 800 mm관을 선택하였고 누출 구멍 직경(D_h)은 20 mm와 80 mm로 설정하였다. 구멍은 편의상 배관구간(L)의 중앙($L_1=L_2=1/2L$)에 발생되는 것으로 하였으며, 배관 길이(L)는 6 m로 설정하였다. 배관내의 유동기체는 공기로 가정하고, 온도가 217 K, 배관 내 압력(P_{in})을 66 bar로 설정하였다.

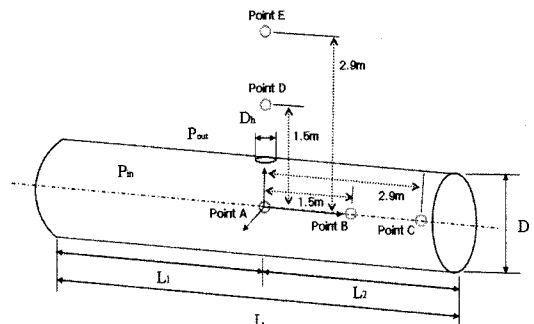


Fig. 1. 3D geometry of piping system with a hole.

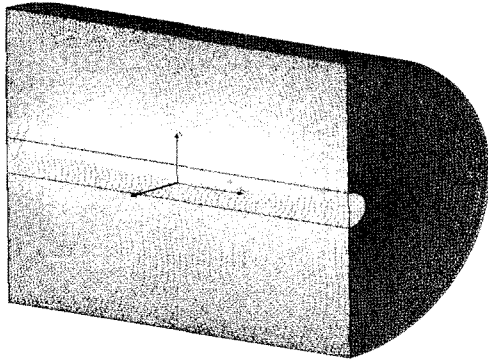


Fig. 2. 3D mesh generated by MIME.

구멍 외부는 매설 배관의 경우 흙으로 덮여 있으나 역시 공기로 가정하고 압력(P_{out})은 30 bar, 온도는 295 K로 가정하였다.

본 연구에서 수치해석을 위해 사용된 상용코드는 CFD++인데 Metacomp Technology사에 의해 개발된 상용코드로 유한체적법(Finite Volume method)을 기본으로 HLLC Riemann solver를 사용한다. 전처리 장치로는 MIME를 사용하며, $k-\epsilon$ 모델 등 다양한 난류 모델을 선택적으로 사용할 수 있다. 3D 해석 시 대칭경계 조건을 이용하여 구멍을 중심으로 반쪽만을 계산영역으로 설정하고 Fig. 2와 같이 해석을 위한 격자를 생성하였다. 배관 내부와 외부를 포함하여 1,980,731개의 4면체 격자를 생성하였고 변동압력을 관찰하기 위하여 배관 내부의 중심부를 따라서 3개의 관찰점(구멍위치(point A), 1.5 m 하류부(point B), 2.9 m 하류부(point C))과 배관 외부에 2개의 관찰점(구멍부 상단 1.5 m 위치(point D), 구멍부 상단 2.9 m 위치(point E))를 설정하였다. 압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 식과 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용한 비정상류 해석으로 density based solver를 사용하여 7×10^{-6} sec의 시간 간격으로 해석하였다.

2.2. 구멍을 갖는 배관 구간에 대한 2차원 및 1차원 유동해석

배관 벽의 갑작스런 파손으로 구멍이 생겼을 때 누출에 따른 저압확장파의 발생 및 전파 특성을 이론적으로 규명하고 누출의 위치를 검출할 수 있는 이론적 배경을 알아보고자 보다 긴 영역의 배관 구간에 대하여 2차원(2D) 및 1차원 유동해석을 수행하였다. 원형 단면을 갖는 배관내의 흐름은 축대칭으로 계산 영역 및 시간을 절약하기 위하여 2D로 가정할 수 있다. 따라서 2D 해석에서는 3D 해석 시 보다는 좀 더 긴 배관 구간($L = 20$ m)에 대하여 해석이 가능하므로 저압확장파의 전파 특성, 즉 누출 구멍으로부터 일정거리 위치까

지 저압확장파가 도달되는데 걸리는 시간을 계산해 보고자 하였다. 2D 해석을 위하여 역시 CFD++를 사용하였으며 압력변동 및 저압확장파의 도달 시간을 관찰하기 위하여 배관 중심의 구멍위치에 관찰점 point A를 설정하였고 구멍으로부터 하류로 4 m 지점 및 8 m 지점에 관찰점 point B 및 point C를 각각 설정하였다. 배관내의 유동기체는 역시 공기로 가정하고, 온도가 217 K, 배관 내 압력(P_{in})을 60 bar로 설정하였으며 구멍 외부 압력(P_{out})은 30 bar, 온도는 295 K로 가정하였다.

수 km길이에 달하는 배관구간에서 배관 벽에 생긴 구멍을 통한 누출 발생 시 유동 특성을 해석하기 위해서 CFD++를 사용한 3D 및 2D 해석은 컴퓨터 메모리 용량의 한계로 불가능하다. 본 연구에서는 압축성 가스의 배관 흐름을 등은 가정에 근거하여 유도된 1차원 방정식[15]인 식 (1)과 식 (2)를 수치해석 기법을 사용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{c^2 \partial Q}{A \partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2fc^2 Q|Q|}{DA P} = 0 \tag{2}$$

여기서 $P(x, t)$ 는 압력, $Q(x, t)$ 는 질량 유량, A 는 파이프의 단면적, D 는 파이프 직경, c 는 소리의 등온 속도, f 는 마찰 계수(Fanning friction factor)이다. 이 지배방정식을 단순화하기 위해서 식 (1)에 A 를 곱하고, 식 (2)에 c 를 곱한 후 $cQ = q$, $PA = p$ 로 정의하여 다시 유도하면 식(3)과 식 (4)로 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2fcq|q|}{D p} = 0 \tag{4}$$

식 (3)과 식 (4)는 시간과 공간에 대한 1차 편미분방정식으로 시간분리법(time split method)을 사용한 수치해석을 위해 전진파동 식, 후진파동 식, 및 감쇠 식으로 분리하여 나타내면 식 (5)~식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(p+q) + c \frac{\partial}{\partial x}(p+q) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p-q) - c \frac{\partial}{\partial x}(p-q) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2fcq|q|}{D p} = 0 \tag{7}$$

수치해석 방법은 CFD++의 2D 해석 결과를 초기조건으로 사용하고, 식 (5)와 식 (6)으로부터 Fig. 3에 나

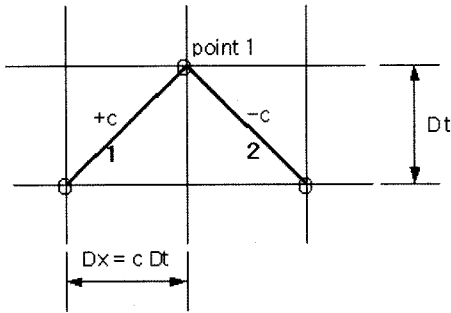


Fig. 3. Discrete stencil for 1D analysis.

타낸 point 1에 대한 p 와 q 를 계산한 후 식 (7)을 사용하여 동일 시간에서의 새로운 q 를 얻는 방법으로 진행하였다. $\Delta t = 7 \times 10^{-5}$ 을 사용하였으며, 전파속도인 c 는 일정한 값으로 가정하였다. 또한 마찰계수 f 는 식 (8)로 정의하였다. 1D 해석을 위한 배관 운전 조건은 2D 해석과 동일하게 설정하였다.

$$f = 0.079 \left(\frac{\rho U D}{\mu} \right)^{-0.25} \quad (8)$$

III. 해석 결과 및 저압확장과 전파 특성

Fig. 4는 3차원 해석 결과로 배관 벽에 구멍이 발생하여 누출이 시작된 후 0.0094초까지의 압력변동 결과를 보여주고 있다. 구멍을 통한 누출이 시작되면 구멍을 중심으로 저압 영역이 생성되어 배관의 상류와 하류로 전파되어가는 저압확장파의 발생을 확인할 수 있다. Fig. 5는 구멍이 열린 후의 유속에 대한 3차원 해석 결과로 구멍이 열리면 구멍 주위의 유체는 구멍으로 향하는 유속을 형성하고 구멍 밖으로 유출되는데 배관 외부에서의 유속이 배관 내부에서의 유속보다 빠름을 보이고 있다.

Fig. 6은 Fig. 1에 나타난 5개의 관찰점에 대한 압력

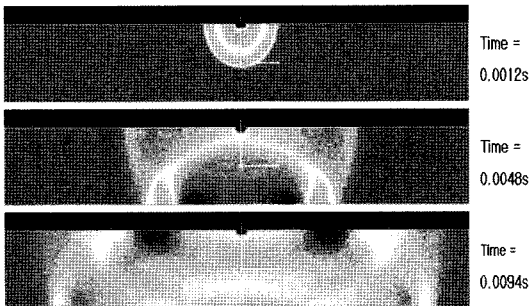


Fig. 4. 3D results ($D = 800$ mm, $D_h = 80$ mm) of negative pressure generation and propagation near a hole with time step.

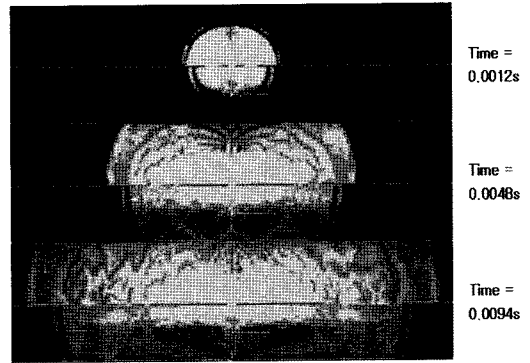


Fig. 5. 3D results ($D = 800$ mm, $D_h = 80$ mm) of velocity profile near a hole with time step.

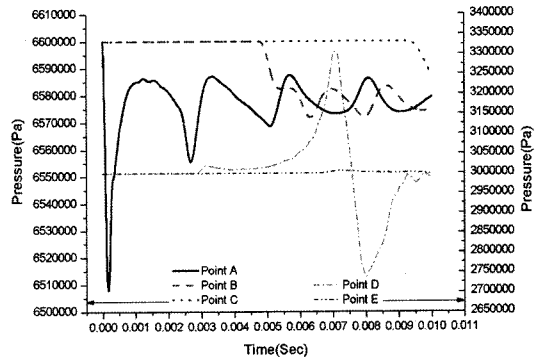


Fig. 6. 3D results ($D = 800$ mm, $D_h = 80$ mm) of pressure profile at 5 points of Fig. 1.

변동의 3차원 해석 결과를 보여주고 있다. 구멍의 중심 위치(point A)에서는 누출의 시작과 거의 동시에 원래 배관의 압력인 66 bar보다 낮은 압력으로 변동이 일어나며 시간이 갈수록 66 bar 보다 낮은 평형 압력 상태로 수렴해감을 볼 수 있다. Point B에서는 0.0048초 후부터 저압확장파가 도달되어 압력변동을 보이며, Point C는 0.0094초 후에 도달되는 것을 알 수 있다. Point B와 Point C는 구멍 중심으로부터 각각 1.5m와 2.9m 떨어져 있음으로 각 구간에 대한 저압확장파의 전달 속도를 계산해 보면 각각 312 m/s와 308.5 m/s로 이는 217 K 공기의 음속인 297.3 m/s에 5% 오차 범위 내가 되어 누출에 따라 발생한 저압확장파는 유체 매질의 음파 속도로 전파된다고 판단할 수 있다. 배관 밖의 지점인 point D와 point E 점에서의 압력 변화를 보면 배관 내부와는 반대로 구멍으로부터 누출 되는 고압 유체의 영향으로 일시적으로 압력이 상승하는 변화를 보이며 역시 누출 지점으로부터 떨어진 거리에 따라 상승압력파의 도달 시간이 길어짐을 볼 수 있다. 일반적으로 LNG 가스관은 지하에 매립됨으로 흠으로 들

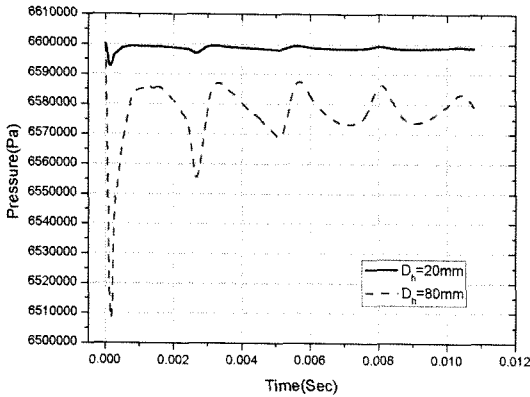


Fig. 7. 3D results ($D = 800$ mm) of pressure profile at point A on different hole sizes.

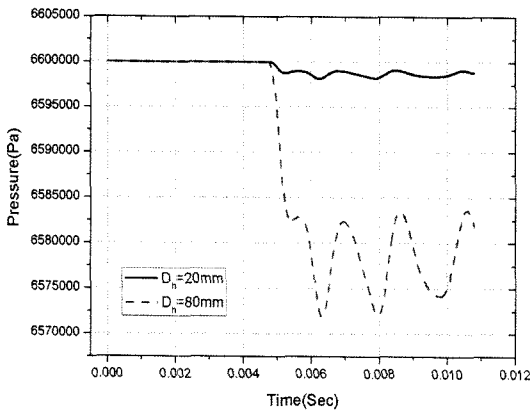


Fig. 8. 3D results ($D = 800$ mm) of pressure profile at point B on different hole sizes.

러싸여 있어 실제 배관 시스템에서는 누출 외부의 유동 특성 보다는 누출이 일어나는 배관 내부에서의 유동 특성이 더 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 역시 3D 해석 결과로 같은 운전 조건에서 구멍의 직경이 20 mm인 경우와 80 mm인 경우에 대하여 point A와 point B 위치에서의 압력변동을 보여주고 있다. 구멍의 크기가 커지면 저압확장파의 진폭이 커지며 수렴해가는 평형 압력이 더 낮아짐을 알 수 있으며, 구멍의 크기는 저압확장파의 전파속도와는 무관함을 알 수 있다.

Fig. 9는 배관 직경 $D = 400$ mm, 구멍 크기 $D_h = 80$ mm인 경우에 대한 2D 해석 결과로 구멍이 열린 후 0.031초까지의 압력변동을 보여주고 있다. 구멍을 중심으로 하류부만 나타난 것으로 저압확장파의 발생 및 전파특성이 3D 해석 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 앞 절에서 설명한 1D 해석 방법의 신뢰성을 검증하기 위해서 배관 직경 800 mm, 구멍 크기

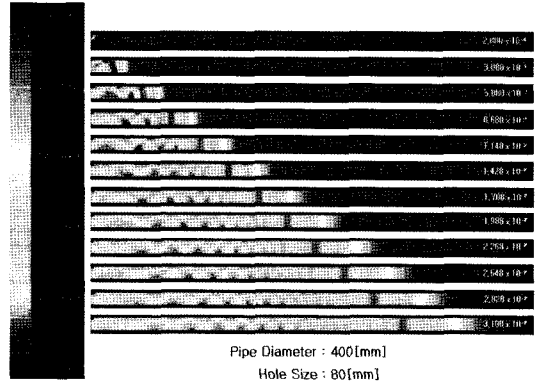


Fig. 9. 2D results ($D = 400$ mm, $D_h = 80$ mm) of negative pressure generation and propagation near a hole with time step.

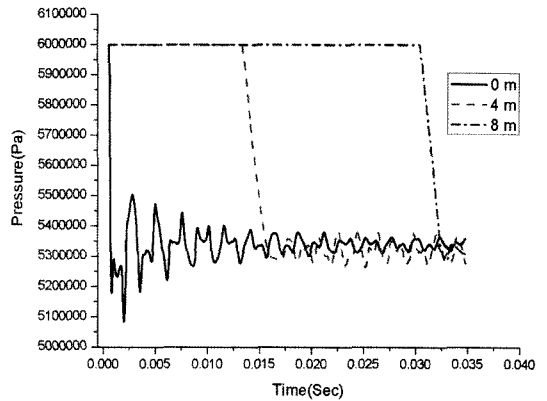


Fig. 10. Comparison of the results on 2D and 1D analysis (2D result).

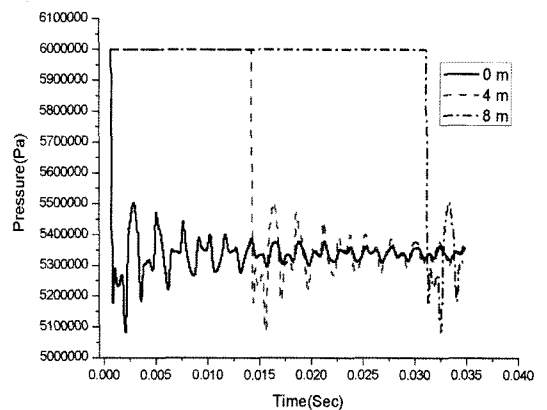


Fig. 11. Comparison of the results on 2D and 1D analysis (1D result).

80 mm, 관 내부 압력 60 bar, 구멍 외부 압력 30 bar인 경우에 대한 1D 해석결과와 CFD++를 사용한 2D 해

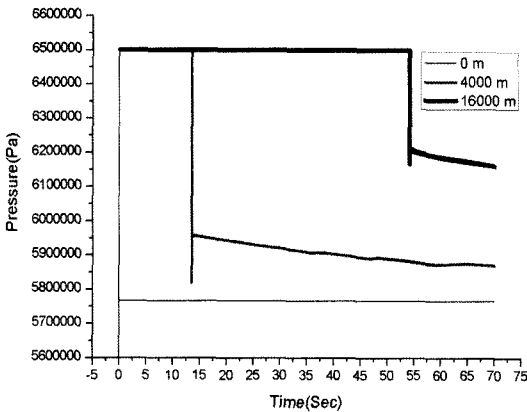


Fig. 12. 1D results of pressure profile at different points.

석 결과를 각각 보여주고 있다. 구멍이 열린 후 구멍위치(point A)와 구멍으로부터 4 m(point B) 및 8 m(point C) 떨어진 위치에서의 압력변화를 해석한 것으로 2D와 1D의 해석 결과를 비교해 보면 저압확장파의 진폭을 제외하면 수렴해가는 평형 압력이나 저압 확장파의 전파시간이 거의 일치하고 있음을 볼 수 있어 1D해석의 결과를 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

1차원 해석의 목적이었던 긴 배관망에의 적용을 위해서 배관 직경 $D=800$ mm, 배관 내 압력 $P_{in}=66$ bar, 구멍 외부의 압력 $P_{out}=30$ bar, 배관 길이 $L=20,000$ m에 대한 해석 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 구멍 위치와 4000 m 및 16000 m 떨어진 위치에서 누출 시작 후 시간 경과에 따른 압력변화를 보이고 있는데 저압 확장파의 도달 시간이 4000 m에서는 13.6초, 16000 m에서는 54.3초로 각 구간에서의 평균 전파속도가 294.3 m/s이 된다. 이는 온도가 217 K인 공기의 음속인 약 297.3 m/s의 속도와 매우 근접한 결과로 저압확장파가 음속으로 전파됨을 확인할 수 있다. 이와 같이 손상된 배관 구멍으로부터 누출이 발생될 때 저압확장파가 생성되고 이 저압확장파가 음속으로 전파되는 전파특성을 이용하면 긴 배관 시스템에서의 누출을 검지할 수 있다. 즉, 배관상의 일정거리 구간마다 압력센서를 설치하고 압력센서로부터 저압확장파가 검출된다면 그 구간내의 임의의 위치에 구멍이 발생하여 누출이 일어나고 있음을 검지할 수 있으며 그 구간에 설치된 두 센서의 저압확장파 검출 시간차를 통하여 구멍의 위치를 예측할 수 있다.

IV. 결론 및 고찰

배관에서 배관 벽에 갑작스런 구멍이 발생하여 구멍

을 통한 누출이 일어날 경우 배관 내 유동 특성의 변화를 해석하기 위하여 CFD++를 사용한 3차원 및 2차원 해석을 수행하였다. 또한 긴 배관망에 적용하기 위하여 1차원 해석 방법을 제시하고 CFD++의 2D 해석 결과와 비교하였다. 구멍 주변에 대한 3차원 해석 결과 구멍으로부터 누출이 발생되면 구멍을 중심으로 갑작스런 압력 저하가 일어나며 이 저하된 압력파(저압확장파)는 배관의 상류 및 하류로 전파됨을 확인 하였으며 이 저압확장파는 배관 속을 흐르는 유체의 음의 전파속도로 전파됨을 확인하였다. 또한 동일한 운전조건에서 구멍의 크기가 클수록 저압확장파의 압력진폭이 커지며 더 낮은 평형 압력으로 수렴됨을 보였으며 저압확장파의 전파속도는 구멍의 크기에 무관하였다. CFD++의 2D 해석 결과는 1D 해석 결과와 일치하였으며 1D 해석법을 긴 배관망에 적용하여 누출 및 누출이 일어나는 구멍의 위치를 산출하였다. 본 연구 결과는 배관내의 유속이 없는 경우에 대한 것으로 실제 배관 시스템은 압력차에 의한 배관 내 유속이 있어 저압확장파의 전파 속도가 유속의 영향을 받을 것으로 판단이 된다. 실제 배관 시스템과 같이 배관 내 유속이 있는 경우의 배관 누출에 따른 유동 특성 해석을 현재 진행하고 있다.

감사의 글

이 논문은 2006년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제임.

참고문헌

- [1] Zhang, J., "Designing a Cost Effective and Reliable Pipeline Leak Detection System", *Pipes and Pipeline International*, **42**(1), 20-26, (1997)
- [2] Weil, G.J., "Non Contact, Remote Sensing of Buried Water Pipeline Leaks Using Infrared Thermography", *Water Resources Planning and Management and Urban Water Resources*, pp. 404-407, (1993)
- [3] Graf, F.L., "Using Ground - Penetrating Radar to Pinpoint Pipeline Leaks", *Materials Performance*, **29**(4), 27-29, (1990)
- [4] Brodetsky, I. and M. Savic, "Leak Monitoring System for Gas Pipeline", *Proceedings - ICASSP, IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, **3**, pp. 111. 17-111. 20, (1993)
- [5] Lee, M.R. and J.H. Lee, "Acoustic Emission Technique for Pipeline Leak Detection", *Key Engineering*

- Materials*, **187**(2), 887-892, (2000)
- [6] Reason, J., "Acoustic Leak Detection Provides Early Warning of Piping Failure", *Power*, **131**, 63-64, (1987)
- [7] Surgeon, M. and M. Wevers, "Modal Analysis of Acoustic Emission Signal from CFRP Laminates", *NDT&E International*, No. 32. 311-322, (1999)
- [8] Sivathanu, Y., "Natural Gas Leak Detection in Pipelines", Technology Status Report, En'Urga Inc., West Lafayette, IN, (2003)
- [9] Furness, R.A., "Modern Pipeline Monitoring Techniques - Part 1 Real Time Computer Models", *Pipes and Pipelines International*, **30**(3), 7-11, (1985)
- [10] De. Freitas, R.D.G, A.L. Maitelli, and A.O. Salazar, "An Wavelet Approach to Pipeline Leak Detection by Pressure Analysis", Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 3, art. No. 51219, pp.101-104, (2004)
- [11] Mears, M.N., "Real World Applications of Pipeline Leak Detection", Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II, pp. 189-209, (1993)
- [12] Liou, C.P., "Pipeline Leak Detection Based on Mass Balance", Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II, pp. 175-188, (1993)
- [13] Griebenow, G. and M. Mears, "Leak Detection Implementation: Modeling and Tuning Methods", *American Society of Mechanical Engineers, Petroleum Division*, **19**, 9-18, (1999)
- [14] Diane, J., PHD. Hovey, J. Edward, and P.E. Farmer, "Pressure Point Analysis Leak Detection Methodology, Performance & Application", EFA Technologies Inc., Prepared for Presentation at the AICHE Spring Meeting, (2002)
- [15] Benkherouf, A. and A.Y. Allidina, "Leak Detection and Location in Gas Pipelines", *IEE Proceedings D : Control Theory and Applications*, **135**(2), 142-148, (1988)