

# 고압 배관망에서 배관 손상에 의한 누출 및 관내 저압확장파의 전파 특성 해석

김왕연\* · 하태웅\*\* · 하종만\*\*\*

## Analysis of Propagation of Negative Pressure Wave Due to Leak Through Damaged Hole in High Pressure Piping System

Wang-Yeun Kim\*, Tae-Woong Ha\*\*, Jong-Man Ha\*\*\*

*Key Words: Leakage(누설), Pipe Network(배관망), Pipeline Leak Detection System(배관 누출 감지 시스템), Negative Pressure Wave(저압확장파), Propagation(전파)*

### 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 of pipeline network which have recently been suggested. 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 Fluent 6.3, commercial CFD package. The results of 3-dimensional analysis near leaking hole confirm the occurrence of negative pressure wave, and the results of 2-dimensional analysis verify the characteristics of propagation of the wave which travels with speed equal to the speed of sound in the pipeline contents. Characteristics of leakage and pressure in a pipe with a hole have been analyzed for the various pipe and hole sizes.

### 1. 서론

배관은 액체나 천연가스와 같은 기체를 수송하기 위한 주된 방법으로 지난 40여 년간 전 세계적으로 상당한 규모의 배관망이 구축되어 운영되고 있다. 우리나라도 전국적인 공급을 위하여 2,511 km에 달하는 배관

망이 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 있다. 따라서 가스 배관망의 안전관리가 매우 중요한 문제인데 배관의 외적 충격에 의한 손상으로 구멍이 생길 경우 발생하는 누설은 폭발 및 환경오염을 포함한 엄청난 경제적 손실을 야기할 수 있다. 따라서 누설 감시를 위한 배관 누출 감지 시스템(PLDS(Pipeline leak detection system))을 구축하여 실시간으로 가스누출을 감시하고자 많은 기술적 방법

\* 경원대학교 기계·자동차공학과 대학원  
\*\* 경원대학교 기계·자동차공학과, 교신저자  
\*\*\* E-mail: twha@mail.kyungwon.ac.kr  
한국가스공사 연구개발원

들이 제시되고 실제 적용되고 있다.

지하 매설 가스 배관의 누출을 감지할 수 있는 기술로는 크게 3가지 부류로 구분해 볼 수 있다. 첫째: 생물학적 기술(biological methods)<sup>(1)</sup> - 숙련된 인력 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. 둘째: 하드웨어에 근거한 기술(hardware-based methods) - 다양한 하드웨어 장치들, 즉 음향 센서, 가스 감지기, 음압 감지기 그리고 적외선 서모그래피와 같은 정밀한 장치들을 사용하여 보다 정확하고 정량적인 누출의 감지와 누출 위치를 추정하는 방법인데 시각적인 장치 이용기술<sup>(1-4)</sup>, 음향 장치 이용기술<sup>(5-7)</sup>, 샘플링 장치 이용기술<sup>(8)</sup>, 저압확장파 감지기술<sup>(9,10)</sup> 등이 있다. 셋째: 소프트웨어에 근거한 기술(software-based methods) - 누출에 따른 배관내의 물성치의 변화를 이론적으로 해석할 수 있는 다양한 컴퓨터 소프트웨어 패키지를 사용하여 결과를 예측하고 여러 가지 감지 센서로 부터의 측정 결과와 비교하여 배관의 누출과 누출위치를 감지하는 방법으로 유량 또는 압력 변화 이용기술<sup>(11)</sup>, 질량 또는 체적 균형 이용기술<sup>(12)</sup>, 역학적 모델에 근거한 시스템<sup>(13)</sup>, 압력 지점 분석(pressure point analysis, PPA) 기술<sup>(14)</sup> 등이 있다. 이 다양한 기술들은 각각의 장단점을 갖고 있으며, 각각의 기술들의 성능을 비교하기 위해서 누출 감지의 정밀도, 누출 위치의 감지 가능 여부, 다양한 운전 조건 하에서의 누출 감지 가능 여부, 24 시간 실시간 연속적인 모니터링 가능 여부, 허위 경보 발생의 빈도, 시스템 유지를 위해 요구되는 전문적 기술 수준, 초기 설치비용과 운영비 등 7개의 요소에 대하여 분석해 보면<sup>(1)</sup> 천연가스 배관망과 같이 광범위한 배관망의 누설 및 누설위치 예측 시스템을 위한 방법으로 적합한 것은 저압확장파 감지 기술로 판단된다. 이 방법은 누출의 발생으로 생긴 저압확장파가 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 정확도

가 높아져 상용화 제품의 기본 기술로 많이 활용되고 있다.

본 연구에서는 저압확장파 검출 기술의 이론적 배경인 배관 벽의 구멍을 통한 누출 발생 시 저압확장파의 발생 메커니즘을 이론적 유동해석을 통하여 규명하고 저압확장파의 전파특성 해석을 통한 누출 위치의 예측 및 영향인자(누출 구멍의 크기 및 배관 직경 등)에 따른 특성을 분석해 보고자 한다.

## 2. 배관 구멍을 통한 누출발생 시 유동특성해석

기체를 수송중인 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 검출해낼 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 CFD상용 패키지인 Fluent 6.3을 사용하여 흐름이 있는 배관의 벽에 구멍이 발생하여 누출이 일어날 경우에 대하여 구멍주변의 3차원 유동 해석을 수행하여 저압확장파의 발생 메커니즘을 확인하고, 구멍을 포함한 보다 긴 배관영역에 대한 2차원 해석을 수행하여 저압확장파의 전파 특성과 배관 내의 유동 특성을 해석해 보고자 한다.

Fig. 1은 2차원으로 표현한 해석 대상 배관시스템으로 L과 D는 해석 대상 배관의 길이 및 관경, L1, L2는 누출 구멍의 위치,  $D_h$ 는 누출 구멍의 직경을 나타내고,  $P_{in}$ 은 배관의 입구 압력,  $P_{out1}$ 과  $P_{out2}$ 는 배관출구와 구멍이 나있는 출구의 압력,  $Q_{in}$ 과  $Q_{out}$ 은 배관 입구 유량과 출구 유량,  $Q_{hole}$ 은 구멍을 통한 누출 유량을 나타낸다. 배관의 직경은 1,600 mm, 800 mm, 400 mm, 200 mm 관을 선택하였고 누출 구멍 직경은 각 배관경의 20%의 크기 범위내로 10 mm부터 2 배씩 증가시켜 20 mm, 40 mm, 80 mm, 160 mm, 320 mm로 설정하였다. 구멍은 편의상 배관구간의 중앙( $L1=L2=1/2L$ )에 발생되는 것으로 하였다. 배관 길이는 3차원 해석 시는 6 m, 2차원 해석 시는 20 m를 설정하였다. 배관 내부 유동해

석 조건으로 입구압력 60 bar, 출구 압력 59 bar, 구멍 외부는 공기로 가정하고 압력은 30 bar로 가정하였다. 배관내의 유동기체는 5°C 공기로 가정하였으며 메탄이 주성분인 LNG 가스(CH<sub>4</sub>(89.26%), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(8.64%), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(1.44%), 비중: 0.62, 정압비열: 2,067.6 J/kg k, 정적비열: 1,596.2 J/kg k, 점성계수: 0.00010142 poise)에 대하여도 해석하였다.

Fig. 1에 제시된 배관 해석 영역에 대하여 3차원 해석 시에는 육면체 격자를, 2차원 해석 시에는 사각형 격자를 Gambit을 사용하여 생성하였다. 각 해석에 대한 격자수를 결정하기 위하여 해의 수렴성을 검토하였는데, 한 예로 Fig. 2는 D=800 mm, P<sub>in</sub>=60 bar에 대한 2차원 해석 시의 정상상태 해석에 대한 결과로 300,000 개 이상의 격자수를 생성하여야 수렴된 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 본 해석에서는 3차원 해석 시 D=800 mm 관에 대하여는 306,842 개의 육면체 격자를 사용하였고, 2차원 해석 시 D=1600 mm 관에 대하여는 800,000 개, D=800 mm 관에 대하여는 302,400 개, D=400 mm 관에 대하여는 200,000 개, D=200 mm

관에 대하여는 180,000 개의 사각형 격자를 사용하였으며 누출이 발생하는 구멍 부근에는 보다 더 조밀한 격자를 생성하였다.

배관 벽의 구멍을 통한 누출이 발생할 경우의 유동 특성을 해석하기 위하여 각각의 해석조건에 대하여 우선 구멍이 발생하기 전 관 입구와 출구의 압력차에 의한 정상상태의 유동 해석을 수행하고 이후 배관 벽에 구멍이 열리도록 하여 구멍을 통한 누출이 시작된 이후의 유동특성 해석인 비정상상태의 해석을 수행하였다. 정상상태의 해석은 k-epsilon 난류 모델을 사용한 압력 기반 해석기(pressure based solver)를 사용하였으며 이 해석 결과는 구멍이 없는 배관내의 유동특성으로 구멍이 열려 누출이 시작된 후의 유동특성 해석인 비정상상태의 해석을 위한 기초해석이다. 비정상상태의 해석을 위해서는 밀도 기반 해석기(density based solver)를 사용하였으며 계산 시간 간격은 0.001 초로 하였다.

### 3. 해석 결과 및 저압확장과 전파 특성

Fig. 3은 L=6 m, D=800 mm 관에 P<sub>in</sub>=60 bar, P<sub>out1</sub>=59 bar의 운전조건으로 공기가 흐를 때의 3차원 정상상태 해석 결과로 압력분포를 보여주고 있다. 이 관에 갑작스런 외부 충격에 의하여 D<sub>h</sub>=80 mm 구멍이 발생한 경우 구멍 주위의 압력을 P<sub>out2</sub>=30 bar로 가정하여 유동 변화를 3차원 해석한 결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나있다. Fig. 4는 구멍이 발생한 후 0.0085 초 사이의 압력변화를 보여주고 있는데 구멍을 중심으로 저압영역이 생성되어 흐름의 상류와 하류로 전파되어 가는 저압확장과 발생을 확인할 수 있다. Fig. 5는 유동을 나타내는 속도벡터 결과로 구멍 주변에서 구멍으로 유출이 일어나는 유동 특성을 보여주고 있다.

배관에 구멍이 발생하였을 경우 누출 특성과 저압확장과 전파 특성을 영향인자인 D 및 D<sub>h</sub>에 대하여 알아보기 위해서 배관길이 L=20 m를 사용하여 2차원 해석을 수행하였다. Fig. 6은 D=400 mm 관에서 5°C 공기가 입구압력 60 bar, 출구압력 59 bar로 흐를 때 갑작스런 D<sub>h</sub>=80 mm 구멍이 날 경우의 비정상상태 2차원 해석 결과이다. 구멍발생 후 0.025 초까지의 압력변동을 보여주고 있는데 Fig. 4의 3차원 해석 결과와 유사한 저압확장과 전파 특성을 보여주고 있다.

Fig. 1에 나타낸 세 관찰점에서의 압력변동을 Fig. 7에 나타내었다. 관찰점 1은 구멍으로부터 상류로 19m

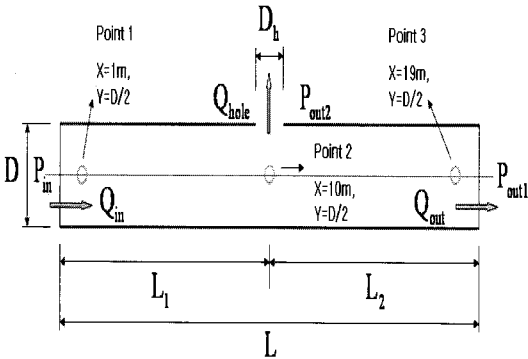


Fig. 1 Piping system for analysis

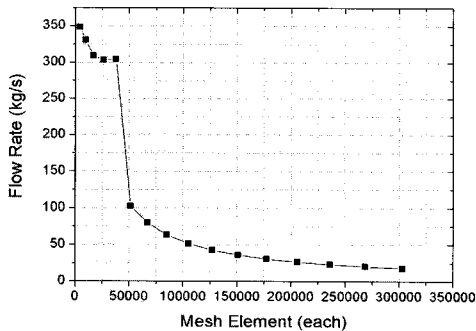


Fig. 2 Grid dependency(D=800mm, L=20m, P<sub>in</sub>=60 bar, P<sub>out</sub>=59bar)

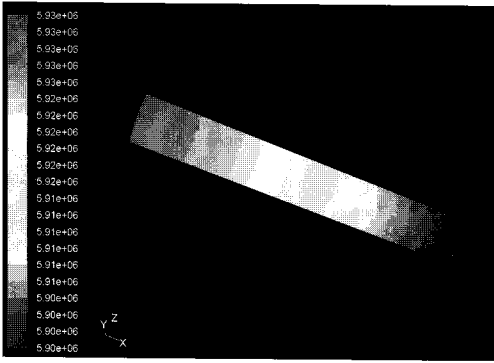


Fig. 3 Pressure distribution of 3D steady state analysis

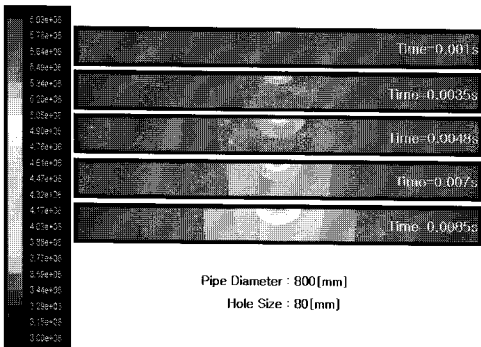


Fig. 4 Generation of negative pressure wave near hole of 3D transient analysis

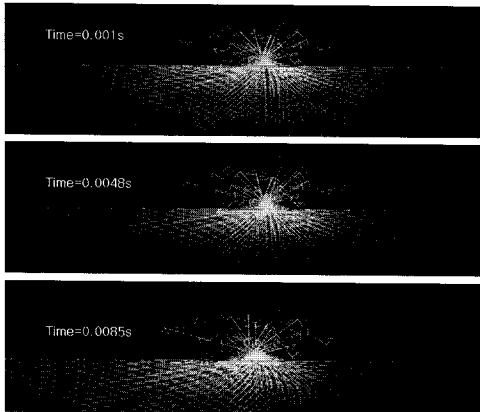


Fig. 5 Velocity profile near hole of 3D transient analysis

지점이며, 관찰점 2는 구멍 바로 아래 지점, 관찰점 3은 구멍으로부터 하류로 19m 지점으로 구멍이 열리기 전(time=0)의 정상상태에서는 배관 입구부( $P_{in}=60$  bar)와 출구부( $P_{out}=59$  bar)의 압력차가 1 bar이므로 입구부에서 하류 쪽으로 갈수록 압력이 낮아진다. 구멍

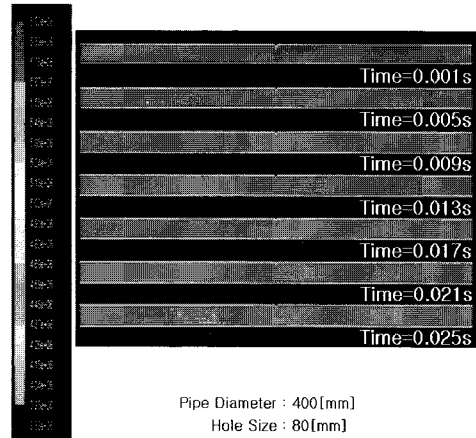


Fig. 6 Pressure result of transient analysis for  $D=400$ mm  $D_h=80$  mm,  $P_{in}=60$  bar,  $P_{out}=59$  bar

이 열리게 되면 구멍 위치에서의 압력(point 2)은 급격히 낮아지며 변동파형(저압확장파)을 이루고 일정 시간이 지나면 새로운 평형 압력을 유지하게 된다. 구멍으로부터 19m 상류지점(point 1)에서의 압력 변동을 보면 0.0281 초 후에 저압확장파가 도달됨을 알 수 있고, 19m 하류지점(point 3)에서는 0.0258 초 후에 저압확장파가 도달됨을 보이고 있다. 관측점으로부터 구멍의 위치를 파악하기 위해서는 이 저압확장파의 전파 속도를 알아야하는데 저압확장파의 도달 시간으로부터 걸보기 전파 속도를 계산해 보면 상류로 전파되는 속도는 320.28 m/s, 하류로 전파되는 속도는 348.83 m/s이다. CFD 해석 결과 배관 내에는 5C 공기가 평균 유

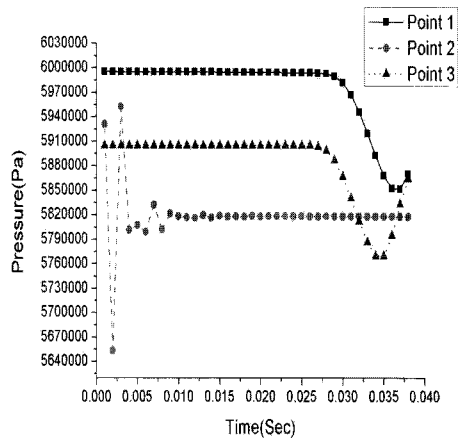


Fig. 7 Pressure variation at 3 different location

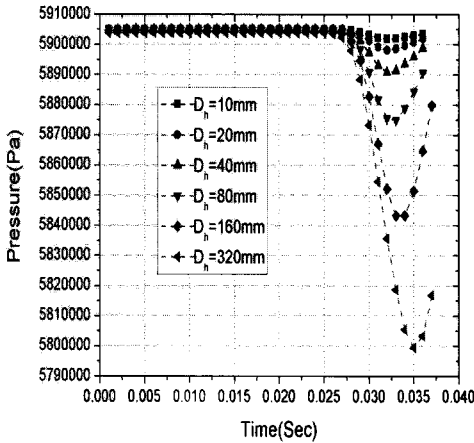


Fig. 8 Effect of hole diameter on the propagation of negative pressure wave(D=1600 mm)

속 14 m/s로 흐름을 알 수 있었으며, 따라서 실제 저압확장파의 전파속도는 상류로 전파될 때는 334.28 m/s, 하류로 전파될 때는 334.83 m/s이 된다. 이는 5C 공기 속을 흐르는 음파의 전파속도인 334 m/s와 매우 근사한 값으로 저압확장파는 음속으로 전파되는 특성이 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 구멍 크기에 따른 저압확장파의 전파 특성을 보여주고 있는데, D=1600 mm 관에 구멍으로부터 19m 하류에 설치된 관측점 3에서의 변동 압력을 나타내고 있다. 구멍 크기에 상관없이 저압확장파의 도달 시간이 일정함을 알 수 있으며 구멍의 크기가 클수록

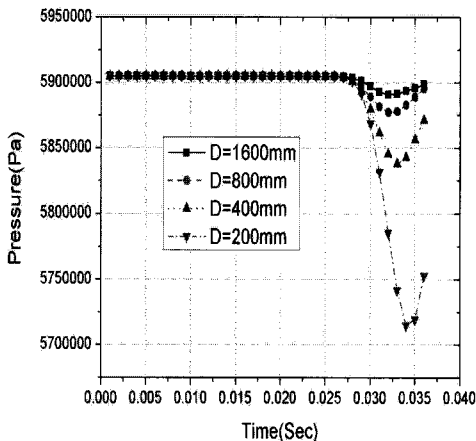


Fig. 9 Effect of pipe diameter on the propagation of negative pressure wave(D\_h=40 mm)

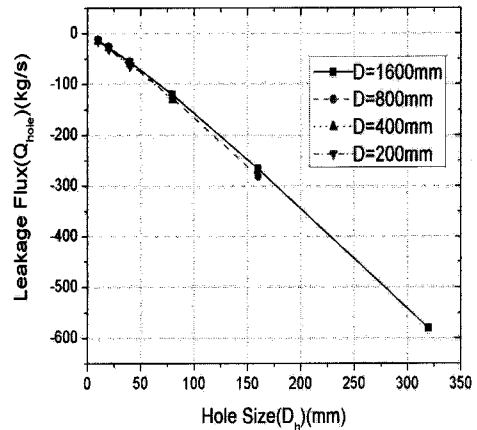


Fig. 10 Leakage flux through hole for various hole size

저압확장파의 진폭이 큼을 보이고 있다. Fig. 9는 동일한 크기의 구멍에 대하여 배관 크기에 따른 저압확장파의 전파 특성을 보여주고 있는데 관측점 3에서의 변동 압력을 나타내고 있다. 배관의 크기에 상관없이 저압확장파의 도달 시간이 일정함을 알 수 있으며 배관의 크기가 작을수록 저압확장파의 진폭이 큼을 보이고 있다. 이것은 구멍 크기가 일정할 때 배관 크기가 작아지면 배관의 단면적에 대한 구멍 단면적의 비가 커져 더 큰 압력저하가 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 구멍이 발생한 경우 입구부 및 구멍에서의 누출 유량 결과를 보여주고 있다. 여기서 유입유량은 양(+)수로 누출유량은 음(-)수로 정의되었다. P<sub>in</sub>=60 bar, P<sub>out1</sub>=59 bar, P<sub>out2</sub>=30 bar로 동일한 흐름조건에서 구멍 크기를 증가시키면 누출유량은 증가하게 되며 같은 구멍 크기일 경우 배관 직경이 작을수록 누출 유량이 약간 커지는 경향이 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 11은 유입 유량 결과로 구멍이 열리면 열리기전의 유량인 정상상태(steady state)의 유량보다 더 많은 유량이 유입된다. 이는 구멍을 통한 유출이 발생하기 때문으로 구멍 크기가 커질수록 증가함을 보이고 있다.

Fig. 12는 배관 내의 유동 유체가 공기와 LNG일 경우에 대하여 저압확장파의 전파특성을 비교하여 보여주고 있다. LNG는 주성분이 메탄(89.26%)으로 해석 시 편의상 메탄으로 가정하였다. D=800 mm관에 D<sub>h</sub>=20 mm 구멍이 뚫린 경우로 P<sub>in</sub>=30 bar, P<sub>out1</sub>=29 bar, P<sub>out2</sub>=10 bar의 운전조건에 대한 해석 결과로 관측점 3(point 3)에서의 변동 압력을 보여주고 있다. LNG의 경우 저압

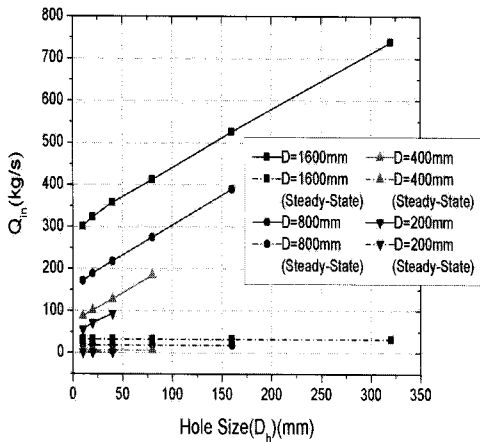


Fig. 11 Inlet flowrate for various hole size

확장파가 더 빨리 도달됨을 보이고 있는데 이는 LNG에서의 음속이 공기에서보다 빠르기 때문이며, LNG의 경우 변동압력 진폭은 더 작은 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 고찰

유체의 흐름이 있는 배관에서 배관 벽에 갑작스런 구멍이 발생하여 구멍을 통한 누출이 일어날 경우 배관 내 유동 특성의 변화를 해석하기 위하여 Fluent 6.3을 사용한 3차원 및 2차원 해석을 수행하였다. 구멍 주변에 대한 3차원 해석 결과 구멍으로부터 누출이 발생되면 구멍을 중심으로 갑작스런 압력 저하가 일어나며 이 저하된 압력과(저압확장파)는 배관의 상류 및 하류로 전파됨을 확인하였다. 20m의 배관 구간에 대한 2차원 해석 결과로부터 저압확장파는 배관 속을 흐르는 유체의 음의 전파 속도로 전달됨을 확인하였다. 따라서 구멍위치로부터 동일한 거리만큼 떨어져 있는 상류지점과 하류지점에 저압확장파의 도달 시간은 유체의 흐름속도와 반대방향으로 전파되는 구멍의 상류 지점에 도달되는 시간이 더 길림을 알 수 있었다. 동일한 운전조건에서 구멍의 크기가 클수록 저압확장파의 압력진폭이 커지며 동일한 구멍 크기에 대하여는 배관 직경이 작을수록 더 큰 압력진폭을 보였다. 또한 구멍 크기를 증가시키면 누출유량은 증가하게 되며 같은 구멍 크기일 경우 배관 직경이 작을수록 누출 유량이 약간 커지는 경향을 보였다. 구멍으로부터 누출이

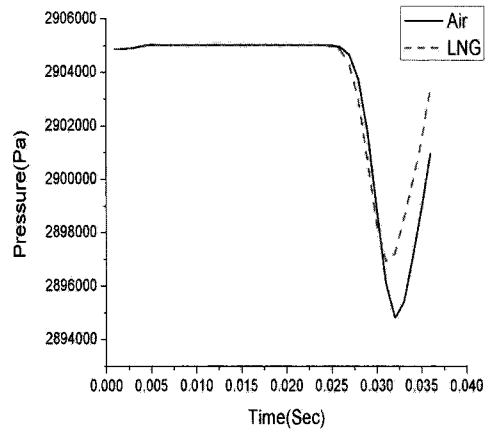


Fig. 12 Comparison of propagation of negative pressure wave between air and LNG

발생되면 유입 유량이 구멍이 열리기 전의 정상상태 유량보다 더 많은 유량이 유입됨을 알 수 있었다. 구멍 누출로부터 발생된 저압확장파의 전파속도는 구멍의 크기나 배관의 크기와는 무관하며, 단지 배관 내를 흐르는 유체의 매질과 관계가 있어 LNG의 경우가 공기의 경우보다 전파속도가 더 빠름을 보였다.

본 연구 결과는 배관망에서 누출을 감지하기 위한 저압확장파 감지 기술의 이론적 배경이 된다. 배관의 일정 구간마다 설치된 압력센서를 통하여 저압확장파가 감지되면 그 배관구간의 어느 위치에선가 누출이 발생되고 있음을 예측할 수 있으며, 양단의 압력센서에 저압확장파의 도달시간 차이로부터 구멍 발생 위치를 계산해 낼 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 2006년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제임.

#### 참고문헌

- (1) Zhang, J., 1997, "Designing a Cost Effective and Reliable Pipeline Leak Detection System," Pipes and Pipeline International, Vol. 42, No. 1, pp. 20~26.
- (2) Weil, G.J., 1993, "Non Contact, Remote Sensing of Buried Water Pipeline Leaks Using Infrared

- Thermography," Water Resources Planning and Management and Urban Water Resources, pp. 404~407.
- (3) Graf, F.L., 1990, "Using Ground - Penetrating Radar to Pinpoint Pipeline Leaks," Materials Performance, Vol. 29, No. 4, pp. 27~29.
- (4) Brodetsky, I. and Savic, M., 1993, "Leak Monitoring System for Gas Pipeline," Proceedings-ICASSP, IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, Vol. 3, pp. 111. 17~111. 20.
- (5) M. R. Lee and J. H. Lee, 2000, "Acoustic Emission Technique for Pipeline Leak Detection," Key Engineering Materials, Vol. 187, No. 2, pp. 887~892.
- (6) Reason, J., 1987, "Acoustic Leak Detection Provides Early Warning of Piping Failure," Power 131, pp. 63~64.
- (7) Surgeon, M. and Wevers, M., 1999, "Modal Analysis of Acoustic Emission Signal from CFRP Laminates," NDT&E International, No. 32. pp. 311~322.
- (8) Sivathanu, Y., 2003, "Natural Gas Leak Detection in Pipelines," Technology Status Report, En'Urga Inc., West Lafatette, IN.
- (9) Furness, R.A., 1985, "Modern Pipeline Monitoring Techniques - Part 1 Real Time Computer Models," Pipes and Pipelines International, Vol. 30, No. 3, pp. 7~11.
- (10) De. Freitas, R.D.G., Maitelli, A.L. and Salazar, A.O., 2004, "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.
- (11) Mears, M.N., 1993, "Real World Applications of Pipeline Leak Detection," Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II, pp. 189~209.
- (12) Liou, C.P., 1993, "Pipeline Leak Detection Based on Mass Balance," Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II, pp. 175~188.
- (13) Griebenow, G. and Mears, M., 1999, "Leak Detection Implementation: Modeling and Tuning Methods," American Society of Mechanical Engineers, Petroleum Division, Vol. 19, pp. 9~18.
- (14) Diane, J., Hovey, PHD., Edward, J. and Farmer, P.E., 2002, "Pressure Point Analysis Leak Detection Methodology, Performance & Application," EFA Technologies Inc., Prepared for Presentation at the AICHE Spring Meeting.