

누수탐지를 위한 천이류와 주파수분석 적용 연구

김형근 · 김현수 · 이미현 · 김상현[†]

부산대학교 환경공학과

(2005년 1월 11일 접수, 2005년 10월 25일 채택)

Application of Transient and Frequency Analysis for Detecting Leakage of a Simple Pipeline

Hyung-geun Kim · Hyun-soo Kim · Mi-hyun Lee · Sang-hyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT : Many techniques of leak detection in pipeline systems have developed based on the propagation wave speeds and wave attenuation. In this paper, the transient analysis methodology is used for calculating the wave speed in the plastic pipe and a frequency analysis methodology is developed for leakage detection in water pipe networks. Data acquisition system for pressurized pipeline system were designed and fabricated to obtain high frequency pressure data. The methodology properly handles the unavoidable uncertainties in measurement and modeling error. Based on information from head pressure test data, it provides leak prediction capability from the transient events with leakage.

Key Words : Leakage Detection, Frequency, Transient Analysis

요약 : 유체의 파속과 파형을 이용한 많은 누수탐지 기술들이 연구되고 있다. 본 연구에서는 파속을 계산하기 위해 천이류 방법을 이용하였고 누수지점의 탐지를 위해 주파수 분석방법을 개발하였다. 가압관망의 자료획득 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 고주파 수압자료를 획득하였다. 이들 방법론은 측정과 모의 과정에서 발생하는 오차로 인한 불확실성을 적절히 처리할 수 있으며, 수압 자료의 측정값을 근거로 누수의 예측지점을 추정할 수 있다. 본 연구에서 개발된 방법은 수압자료로부터 확보되는 정보를 기반으로, 누수가 동반된 천이현상에서 누수예측능력을 보여주고 있다.

주제어 : 누수탐지, 주파수, 천이류 해석

1. 서론

누수현상은 관로에서 발생하는 여러 가지 현상들 중의 한 가지로 관로내의 유체흐름해석이 전제되어야 정확한 해석이 가능하다. 누수탐지(leakage detection)에 부정류해석이 도입되면 정류 해석보다 정확한 지점에서의 시계열자료를 획득할 수 있다.^{1,2)} 그러나 부정류해석을 통한 누수탐지방법의 현장적용에는 아직까지 한계가 존재한다. 미지 지점에서의 누수현상을 이론적으로는 표현이 가능하나 그 지점을 탐색하는 방법에는 몇 가지 문제가 있다. 현재의 부정류 해석을 통한 누수지점의 탐지기법은 능동적 기법이 아닌 관로의 모든 지점에서의 누수현상을 해석해야 하는 역산 방식이다. 다시 말해서 관내에서의 미지 지점에 대한 누수탐지를 수행하기 위해서는 대수관망의 모든 지점에서의 누수에 관한 해석이 먼저 수행된 다음 그 자료와 실제 데이터간의 비교·분석을 통해 누수지점의 탐지를 하는 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 이 방법을 실제 관망에 적용하기 위해서는 방대한 자료의 분석이

필요함으로 많은 시간과 노력이 요구된다. 이런 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 신호처리기법(frequency analysis)을 누수탐지 기법에 도입하였다.

신호처리기법에서 가장 잘 알려진 푸리에변환을 이용하여 기존의 시계열자료에서 표현되지 못했던 관의 특성을 주파수자료로 변환하여 획득할 수 있다. 상수관망에서 누수가 일어나면 누수지점에 의해 파속의 변화가 일어난다. 이런 변화를 주파수분석을 통해 해석하여 누수지점을 찾아냄으로써 부정류해석의 단점을 보완할 수 있다. 이번 연구는 이와 같은 누수문제를 부정류해석(unsteady analysis)과 신호처리 기법을 이용해 그 위치를 알아내는데 그 목적이 있다.

2. 기본이론

2.1. 특성선방법의 지배방정식과 해석

일반적인 관로내에서 부정류해석을 위한 미분방정식으로 나타나는 운동량방정식과 질량보존 방정식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

[†] Corresponding author

E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2479

Fax: 051-514-9574

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQQ = 0 \quad (2)$$

여기서, R 은 $f/(2DA)$, H 는 수두, Q 는 유량, D 는 내부관경, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, a 는 충격파속도, g 는 중력가속도, A 는 관로단면적이다. 식 (1)과 식 (2)를 조합하여 유량 Q 와 수두 H 로 이루어진 특성방정식을 얻을 수 있는데 이 식은 천이상태에 대한 효율적인 수치 해석해를 구하는데 이용된다.¹⁻⁵⁾

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQQ = 0 \quad (3)$$

위의 식은 $dx/dt = \pm a$ 로 정의되어지는 C^+ 와 C^- 특성선(characteristic line)상에서만 유효하게 적용된다. 이러한 특성관계를 만족하기 위해서는 $\Delta x = \pm a \Delta t$ 의 관계가 성립되어야 한다.¹⁻⁵⁾

일단 초기조건과 시간-공간 축이 결정되면 식 (3)은 Fig. 1에서 보여지는 AP와 BP 선을 따라 적분되어진다. Fig. 1에서 미지점 P에 대한 2 개의 방정식은 다음과 같다.

$$Q_P = C_P - C_a H_P \quad (4)$$

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (5)$$

여기서 적분상수는 다음과 같다.

$$C_P = Q_A + C_a H_A - RQ_A | Q_A | \Delta t \quad (6)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - RQ_B | Q_B | \Delta t \quad (7)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (8)$$

여기서, 수두와 유량의 아래첨자는 그 지점의 수두와 유량을 의미한다(즉 P는 $t + \Delta t$ 의 지점, A와 B는 t 의 지점). 초기 조건에서 기지점 A점과 B점의 수두와 유량이 알려져 있다면 계산이 진행됨에 따라 미지의 시간 P($t + \Delta t$ 지점값)의 유량과 수두 값을 계산할 수 있다. 일반적으로 정류상태의 값들을 부정류상태의 초기 값으로 취함으로써 부정류상태의 계산이 진행되어 나간다.¹⁻⁵⁾

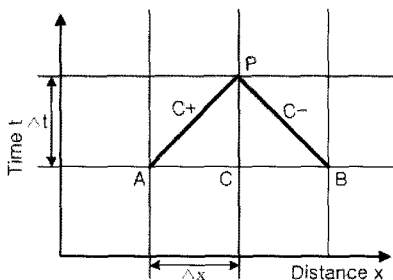


Fig. 1. Characteristic line on the time and space axis.

2.2. 누수탐지를 위한 신호처리기법 적용

기존의 여러 가지 관로 내 누수탐지기법에 신호처리기법을 적용시키려는 연구는 Mpesha 등⁶⁾에 의해 시도되었다. 본 연구에서는 신호처리기법분야에서 널리 사용되고 있는 고속 푸리에 변환을 부정류 해석기법에 적용시켜 관로내의 누수지점을 보다 용이하게 탐지하는데 초점을 맞추었다. 푸리에 변환으로 나타난 주파수 영역에서의 정보는 시간상의 시계열이 가지는 주기와 크기에 대한 스펙트럼 분석을 용이하게 해준다⁷⁾ 이는 상수관로에서 일어나는 다양한 압력신호가 수리구조물로부터 야기되는 여러 가지 반응을 보다 체계적으로 해석하게 해주기 때문이다.

2.2.1. 푸리에변환(Fourier Transform)

푸리에 변환은 시간영역에서 주파수 영역으로의 변환으로 잘 알려진 신호처리기법이다. 일반적인 신호는 시간에 연속적으로 나타난다. 컴퓨터에서 신호처리를 할 경우 컴퓨터의 연산은 순간순간의 값을 기준으로 하기 때문에 이산화(discretization)를 통해 연속적인 신호를 샘플링하여 사용해야 한다. 푸리에 변환은 복소함수를 이용하여 주파수 영역에서의 신호처리가 가능하게 한다.

2.2.2. 푸리에변환의 기본이론

비주기신호에 대한 주파수 해석 도구인 연속시간 푸리에 변환과 역변환을 정리하면 다음과 같다. 연속시간 비주기신호는 푸리에 변환 및 역변환 식으로부터 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (9)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (10)$$

또한 신호 $x(t)$ 의 푸리에변환을

$$X(j\omega) = \mathcal{F}[x(t)] \quad (11)$$

로, $X(j\omega)$ 의 역변환을

$$x(t) = \mathcal{F}^{-1}[X(j\omega)] \quad (12)$$

로 표현하기도 하고, 이들 푸리에변환과 역변환 쌍을

$$x(t) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} X(j\omega) \quad (13)$$

로 나타낸다.

2.2.3. 고속 푸리에변환(Fast Fourier Transform)

푸리에 변환은 시간영역과 주파수 영역에서 모두 이산적

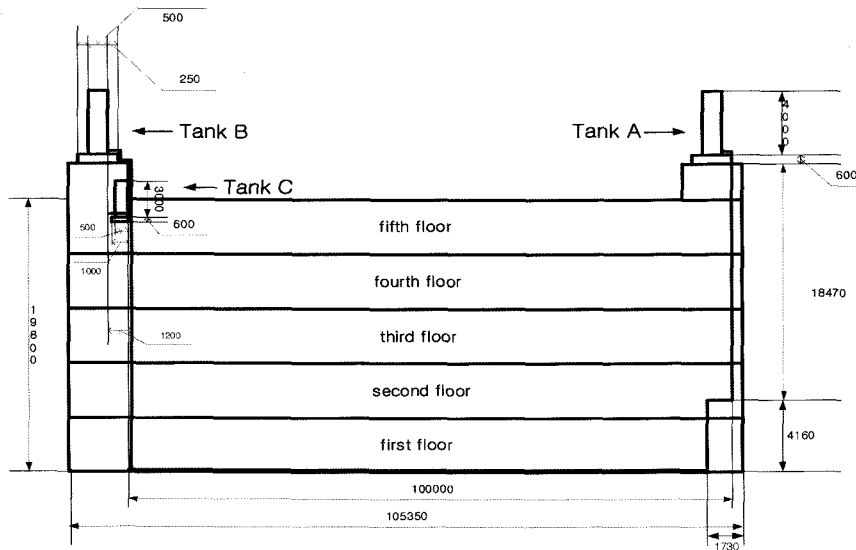


Fig. 2. Schematic view of unsteady experimental station (length unit: mm).

성질을 갖는 유일한 변환이고, 유한구간 수열에 대해서 정의된다. 비록 그것이 계산 가능한 변환이기는 하지만 직접적인 계산은 비효율적이고, 특히 수열의 길이 N 이 클 때에는 더욱 비효율적이다. 1965년에 Cooley와 Tukey는 푸리에 변환 연산 중에 수행할 계산의 양을 실질적으로 줄이는 과정을 보여 주었다.⁸⁾ 이로 인하여 디지털 신호처리 분야를 포함한 여러 분야의 신호처리 분야에서 푸리에 변환을 사용하게 되었다. 또한 다른 효율적인 알고리즘이 개발되는 계기가 되었다. 이러한 모든 효율적인 알고리즘들은 총체적으로 고속 푸리에 변환으로 알려지게 되었다.

아래의 식 (14)와 같은 이산 푸리에 변환식은 W^N 의 계산 외에 N^2 회 곱셈을 해야 하는데 고속푸리에 변환에 따르면 약 $(N/2)\log_2 N$ 회의 복소곱셈만으로도 충분히 정확한 결과값을 나타낼 수 있다. 그 원리는 N 이 N_1, N_2 로 인수분해 될 때 식 (14)의 계산이 식 (15)과 식 (16)과 같이 낮은 차 변환으로 2단계로 분해·실행할 수 있기 때문이다.

$$F_k = \sum_{m=0}^{N-1} f_m W^{km} \quad (W = e^{2\pi i/N}) \quad (14)$$

$$\phi_{k_1 m_2} = W^{k_1 m_2} \sum_{m_1=0}^{N_1-1} f_{N_2 m_1 + m_2} W^{N_2 k_1 m_1} \quad (15)$$

$(k_1 = 0, \dots, N_1 - 1; k_2 = 0, \dots, N_2 - 1)$

$$F_{k_1 + N_1 k_2} = \sum_{m_2=0}^{N_2-1} \phi_{k_1 m_2} W^{N_1 k_2 m_2} \quad (16)$$

$(k_1 = 0, \dots, N_1 - 1; k_2 = 0, \dots, N_2 - 1)$

특히 N 이 2의 거듭제곱 2^n 이면 $N = N_1 \times 2$ 또는 $2 \times N_2$ 로 하는 분해를 거듭 적용함으로써, 최종적으로 곱셈횟수를 $N(n-2)/2$ 정도로 감소시킬 수 있다. 이밖에 한 쪽 인수를 3, 4, 5, 6, 8 등으로 한 여러 가지 변법들이 알려져 있다.⁸⁾

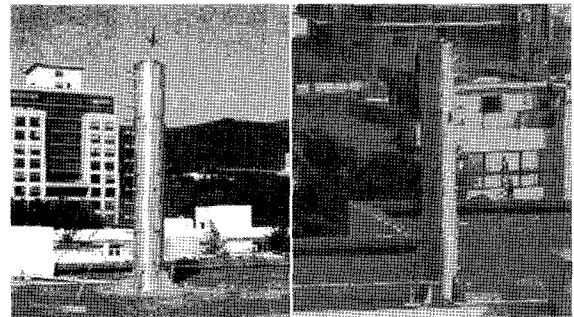


Fig. 3. Pictures of reservoir A and reservoir B.

3. 실험방법 및 고찰

3.1. 부정류 실험장치

Fig. 2는 본 연구를 위해 설치한 부정류 실험장치의 정면도이다. 수조 A에서 이어진 관은 2층까지 수직으로 내려오다가 건물의 구조적 문제로 한 번 굴절된 후 다시 지상으로 수직으로 연결된다. 이렇게 수조 A에서 나온 관은 지면과 평행하게 건물의 반대편 모서리 부근까지 이어진 후 수조 B(북쪽 6층의 수조)와 수조 C(보조수조)를 향해 수직으로 올라간 다음 연결된다. 실험에 사용된 관은 20 mm 스테인리스 관으로 총 연장길이 151.286 m, 최대 수평직선길이 89.7 m, 최대 수직직선길이 18.47 m로 구성되어 있다. 수조 A와 B에는 16개의 밸브가 설치되었고, 수조 C에는 11개의 밸브가 설치되었다.

Fig. 3은 지상에서 23.23 m 높이에 설치되어있는 수조 조질을 위한 수조 A와 B의 모습을 보여준다. 펌프나 콤프레샤 등을 이용해서 수두를 유지할 경우 기계들로 인한 교란 등을 고려해야 하는 등 복잡한 과정이 필요한 반면 자연 수두를 이용하는 이 방법은 다른 방법들에 비해 월등히 안정적인 결과를 가져올 수 있다. 각 수조는 지름 50 cm, 높이 4 m의 원기둥 모양으로 기상현상에 영향을 받지 않게 하기 위해

수조의 세 방향에 지지대를 만들었다. 수조의 재질은 부식을 방지하기 위해 스테인리스로 되어있고, 수두차이를 만들기 위한 40 mm 구경의 수두조절밸브 16개가 매 0.25 m마다 설치되어 있다. 실험에 사용된 유체인 물은 옥상에 설치되어 있는 상수도 저장탱크에서 실험 수조 A로 연결되어 있는 관로를 통해 직접 공급받고 있다. 수조 A와 B는 관경 20 mm의 스테인리스 관으로 연결되어있고, 수두차이를 더욱 크게 만들기 위해 추가로 설치되어 있는 보조수조 C와도 연결되어 있다. Data Logger System은 건물의 외벽에 부착되어 있으며 실험으로부터 얻어진 아날로그 자료는 Data Logger System에서 디지털 자료로 변환된다. Data Logger System은 National Instruments의 DAQ Card- 6024E를 사용하였고 주요 사양은 Table 1과 같다.

관망 실험 장치를 통해 먼저 정류 실험을 수행하였다. 정류 실험을 수행한 이유는 부정류 실험을 모의하기 전에 수두차이에 의한 유량 값의 변화, 마찰수두의 변화 등의 자료를 얻기 위함이었다. 정류 실험결과 설치된 부정류 실험장치는 실험수행을 위한 모의조건을 충분히 만들 수 있고, 또한 실험결과로부터 얻을 수 있는 자료의 안정성을 획득할 수 있었다.

Table 1. General information of data logger system

Used BUS	PCMCIA (Personnel Computer Memory Card International Association)
Analog Input	16 SE / 8 DI
Input Resolution	12 bits
Max Sampling Rate	200 kS/s
Input Range	$\pm 0.005 \pm 10$ V
Analog Output	2 EA
Output Resolution	12 bits
Output Rate	10 kS/s
Output Range	± 10 V
Digital I/O	8 EA
Counter/Timers	2 / 24-Bit
Triggers	Digital

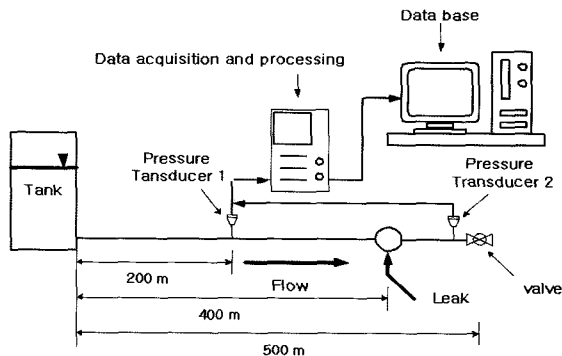


Fig. 4. Experimental apparatus.

Fig. 4는 누수실험 장치의 기본 개략도이다. 관의 종류는 가교화 폴리에틸렌(XL) 관이고 관경은 20 mm(내경)이다. 가교화 폴리에틸렌 관은 폴리부텐-1에서 추출되는 폴리오레펜 계열의 수지인 폴리부틸렌을 원료로 만든 파이프로, 재질이 반투명한 백색으로 실험 수행 시 관 속에 기포가 포함되어 있는 지 파악할 수 있었다. 실험 수행 시 기포의 유무는 파속(wave speed)에 많은 영향을 주기 때문에 중요하다. 또한 밸브의 빠른 작동 시 나타나는 음압으로 인한 누수 지점에서 공기의 파이프내의 유입을 육안으로 확인할 수 있어 기포로 인한 시행착오를 감소시켰다. 관로의 연장은 100 m이며 관망에서의 유량은 2.1×10^{-4} m³/s이고, 밸브 부근에 센서가 설치되어 있다. 누수는 관말밸브로부터 25 m지점에 만들어져 있으며 누수량은 9.17×10^{-7} m³/s이다.

3.2. 100 m 관망실험에서 누수가 없는 경우

100 m 관망의 경우는 마찰수두의 영향과 음압(negative pressure)으로의 급격한 변화에 의해 파손을 입을 가능성을 동시에 고려하여, 수조의 수두높이를 1 m로 유지하며 실험을 수행하였다. Fig. 5는 실험 장치를 통해 얻어진 자료를 가지고 도식화한 그래프 2개와 부정류 해석 프로그램인 부정류 해석을 통해서 모의한 그래프가 함께 나타나있다. 실험 수행 시 측정주기를 6 milli-sec과 8 milli-sec으로 나누어 실험을 한 이유는 높은 주파수의 신호가 실험에 포함되어 있는지 알아보기 위함이었다. 결과에서 보듯이 6 milli-sec와 8 milli-sec의 결과가 동일함을 알 수 있다. 누수가 없을 경우에는 초기수압반응이 약 15 m까지 올라간 후 규칙적인 주기로 진동을 반복한 후 다시 정상상태로 수렴하는 것을 알 수 있다. 정상상태까지 돌아오기까지는 약 20초의 수렴시간이 관측되었다.

실험결과를 모의한 결과와 비교해 보면 첫 수두는 실제 데이터보다 약간 큰 18 m 부근까지 상승하였다. 하지만 두 번째 피크에서는 비슷한 수치 차이를 보이다가 앞의 결과와 비슷하게 시간이 갈수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 부정류해석(Unsteady Analysis: UNA)의 기본적인 관망해석 목적이 주철관, 스테인리스관 등의 금속관 해석을 위해 개발된 것에 반해, 이번 실험에 쓰인 관(pipe)은 플라스틱 관이라, 압력파가 생기면 금속과 플라스틱의 탄성력 차이에 의해 관 모양의 변형이 일어나기 때문에 압력파의 영향이 신속히 감소된다고 판단된다. 100 m 관로의 누수실험의 경우에는 관의 길이가 짧기 때문에 단면변형에 의한 변화 역시 상대적으로 심각함을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

Fig. 5의 자료를 식 (14), (15), (16)에 관련된 신호처리 기법을 이용하여 주파수(Hz)영역으로 변환시켜 보면 Fig. 7을 얻을 수 있다.

Fig. 6은 누수가 없을 경우의 실험 결과들과 부정류해석(UNA)을 이용한 모의 결과를 이용해서 신호 처리한 그래프이다. 지배 주파수는 0.85 Hz로 이 주파수를 이용하여 파속을 계산하면 340 m/s 이다.

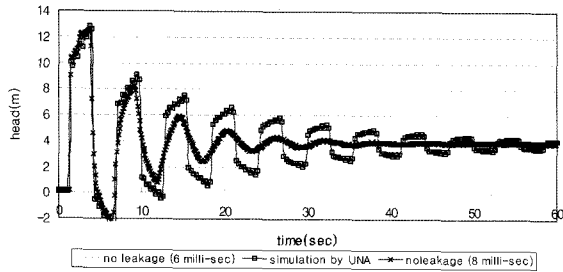


Fig. 5. Head pressure graph in the case of non-leakage event.

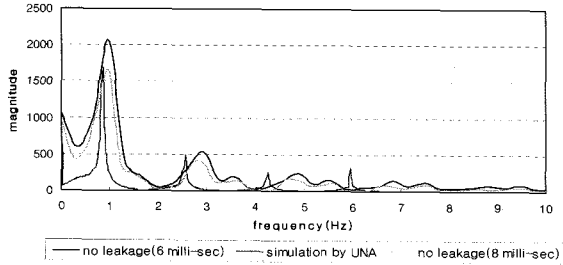


Fig. 6. Fast Fourier transform of the non-leakage event.

Table 2. Experimental condition in case of leakage event

conditions	leak condition
pipeline length	100 m
pipe internal diameter	20 mm
pipe thickness	3 mm
flow rate	$2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
leakage rate, leak location	$9.17 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, 25 m
head	1.0 m
number of sensor	1 EA
experimental time	30 seconds
sampling frequency	6, 8 milli-second
unsteady flow generation	Valve operation

3.3. 100 m 관망실험에서 누수가 있는 경우

누수가 존재하는 관망의 실험도 누수부재의 실험과 마찬가지로 마찰수두의 영향을 고려해서 수두높이를 1.0 m로 유지하여 실험을 수행하였다. Table 2는 누수존재 실험에 대한 조건을 나타내고 있다. 누수 실험을 하는 도중 음압이 걸릴 경우 누수지점을 통하여 관 밖의 공기가 관로로 유입되는 현상을 실제로 육안으로 확인하였다. 따라서 공기가 파이프로 유입되는 경우의 실험을 우선적으로 실시하였다.

공기가 유입되었을 경우의 실험은 각각의 실험별로 다소 상이한 결과를 보여주었다. 이는 공기가 파이프로 들어가면서 파속도에 영향을 주게 되고 이로 인해 파의 거동에까지 영향을 준 것이라고 판단된다. 이에 대한 대안으로 누수지점에 작은 장치를 만들어 누수 시, 공기대신 파이프로 물이 유입되게 실험 장치를 다시 제작하여 실험을 반복 수행하였다. Fig. 7은 누수 실험 시 공기대신 물이 관속으로 투입되도록 만든 장치이다. 누수 관 주위를 감쌀 수 있는 작은 상자를 만든 후, 상자 속에 물을 가득 채워 음압에 의한 공기 유입을 막을 수 있도록 설계되었다.

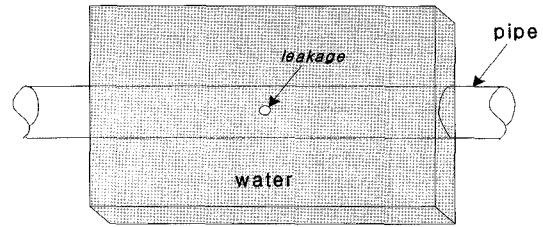


Fig. 7. Experimental apparatus for the leakage event.

누수 시 공기대신 물이 유입된 경우는 반복된 실험에 대해 동일한 수압변화를 관측할 수 있었다. 현장에서 일어나는 실제 누수는 음압이 나타날 경우 공기가 관로 속으로 들어가는 것이 대부분일 것이므로 먼저 물이 들어가는 과정을 이론적으로 명확히 규명한 다음 공기가 들어가는 기작을 규명하는 것이 적절하다. Fig. 8은 누수 시 공기가 유입된 실험 자료를 도식화한 것이다. 공기가 유입되는 경우에는 누수가 없을 경우와는 다르게 첫 수두가 약 11 m까지 올라간 후, 불규칙적인 주기의 진동을 4~5회 반복한 후 정상상태로 돌아가는 것을 알 수 있다. 정상상태로 돌아오기까지는 약 8 초의 수렴시간을 보여준다. 두 그림 사이에 유사한 특성과 상이한 특성이 동시에 존재함을 알 수 있다. 이것은 관로내의 공기가 유입되는 현상은 이상흐름(2 phase flow)의 원인이 되어, 밸브 개폐나 펌프 작동 등의 부정류의 발생조건이나 매립 혹은 대기상 노출 등의 경계조건에 극도로 민감하고, 상당한 정도의 불확실성이 실험조건에 개입된다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 누수 시 공기 대신 물이 유입되는 실험조건을 결과를 도식하고 있다. 공기가 유입된 경우와 같이 첫 수두는 약 12 m 정도까지 올라간다. 그 후부터는 두 가지 경우 모두 일정한 패턴을 가지고 변화함을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9의 자료를 신호처리 기법을 이용하여 주파수(Hz)영역으로 변환시켜 보면 Fig. 10과 Fig. 11을 얻을 수 있다.

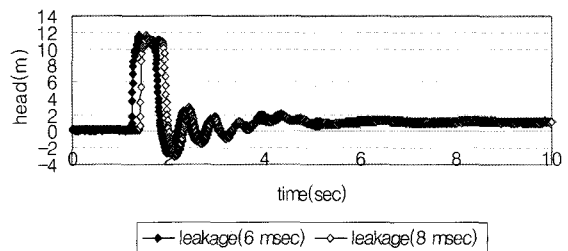


Fig. 8. Results of leakage event in leak to air condition.

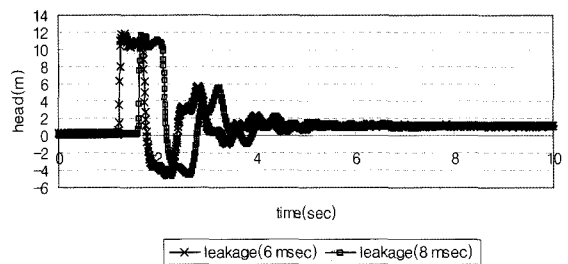


Fig. 9. Results of leakage event in leak to water condition.

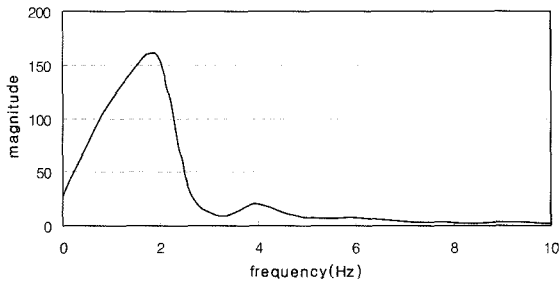


Fig. 10. Frequency analysis in the air condition.

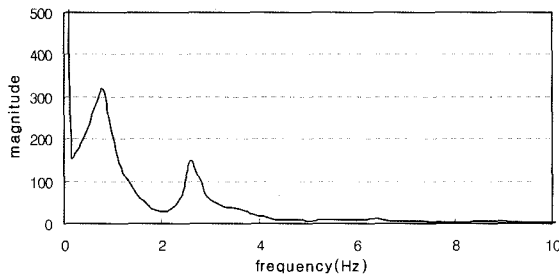


Fig. 11. Frequency analysis under water condition.

Fig. 10은 누수 발생시의 음압에 의하여 공기가 관로 속으로 유입되었을 때의 결과를 주파수 분석을 통하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 가장 지배적인 주파수는 1.96 Hz로 누수가 없을 경우의 지배 주파수인 0.85 Hz와 상이함을 알 수 있다. 또한 같은 방법의 다른 실험결과와 주파수 분석결과와도 미소한 차이를 보였다. 이는 음압이 발생하여 유입된 공기의 양과 형상이 불규칙하기 때문에 나타나는 현상이라고 판단된다.

Fig. 11은 누수 발생시의 음압에 의하여 물이 관로 속으로 투입되었을 때의 결과(Fig. 9)를 주파수 분석을 통하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 가장 지배적인 주파수는 0.8146 Hz로 누수가 없을 경우의 지배 주파수인 0.85 Hz와 거의 비슷함을 알 수 있다. 여기서 나타난 0.0354 Hz의 차이는 두 실험이 서로 개별적으로 이루어졌기 때문에 일어난 약간의 파속도 변화에 의한 결과라고 사료된다. 0.0354 Hz차이로 인한 파속도의 차이는 약 12 m/s로 나타났다. 두 번째 피크점의 주파수는 2.6067 Hz로 누수와 관련된 주파수라고 판단된다. 수차례 반복해서 수행한 실험도 유사한 결과를 보였다. 이는 음압이 발생하여 들어간 물이 공기와는 다르게 관로 속의 유체와 같은 밀도를 포함해 각각의 실험 수행 때마다 비슷한 결과를 가져왔다고 판단된다.

3.4. 100 m 관망실험에서의 누수위치 산정

Fig. 12는 Fig. 6 와 Fig. 10 그리고 Fig. 11의 주파수 크기(amplitude)분석 결과를 정규화(normalize) 하여 종합적으로 도식한 것이다. 누수가 없을 경우의 반응과 음압으로 인해 관로 속으로 물이 들어간 반응은 파속이 일치함을 알 수 있다. 반면에 공기가 관로 속으로 들어간 경우는 다른 2개의 그래프와는 많이 상이한 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 피크지점(0.8146 Hz)은 누수가 없을 때와 같이 전체 관로에서의 압력과 움직임을 나타내는 주파수이고, 두 번째의 피크

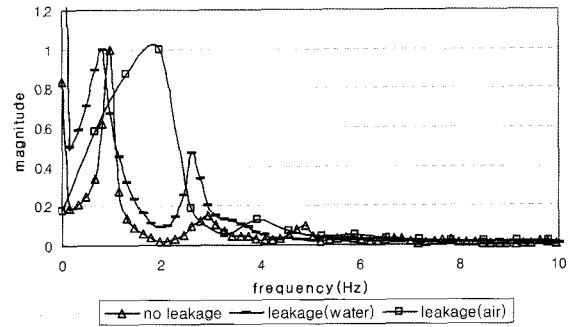


Fig. 12. Normalized results of frequency analysis.

지점(2.6067 Hz)은 누수에 의해 반사되어 나가는 압력파를 나타내는 것이다. 따라서 두 번째 피크지점을 역산을 통해 누수위치를 추정해 보면 밸브로부터 31 m지점에 누수가 발생됨을 추정할 수 있다. 원래 누수지점은 밸브로부터 25 m 지점이었다. 실제결과와 분석을 통하여 계산된 결과 사이에 6 m의 오차가 나타났다. 이는 샘플링 주기로 인한 에러와 관의 단면 변형에서 나타나는 에러 이외에도 실험 과정에서 밸브개폐 등의 불확실성이 포함되어 나타난 결과이다. 현장에서 일어나는 누수의 경우 급격한 압력변화가 일어나면 관로 속으로 주로 공기가 들어가는 경우가 상당수일 것으로 예상된다. 따라서 추후의 연구과제로 공기유입현상과 누수탐지를 병행하는 것이 유효할 것으로 판단된다.

4. 결론

1) 관망에서 관로 내 유체의 거동을 이해하기 위해 부정류 해석을 적용하였다. 부정류 수압신호를 고주파로 확보하기 위해 자료획득 및 저장 시스템이 구축되었고 밸브 작동에 의한 부정류가 도입되어 실험을 수행하였다.

2) 누수에 의해 추가적으로 발생한 파를 분석하여 누수위치를 알 수 있다는 기본 전제하에 실험을 수행 하였고 실험 결과가 그 가정의 사실을 일정 범위 내에서 검증해주고 있다. 시간상에서 분석을 통한 다른 방법과 달리 빈도 상에서 수행하는 수압분석법이 제안되었고 그 잠재성도 확인되었다. 관의 점탄성(Visco-Elasticity)의 차이로 인한 오차가 발생하였으나 이는 추후연구과제로 판단된다.

3) 음압의 발생으로 인해 관로 외부의 물이 관로 속으로 들어가는 경우의 누수탐지는 성공적으로 결과가 나오고 있지만, 관로 내 공기가 들어가는 누수의 경우는 완전한 이론적 해석이 부재하다. 그러나 대부분의 관망에서 부압의 문제는 상대적으로 미소한 것으로 예상됨으로 본 연구의 결과도 상당한 정도의 적용성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 실제 관망의 대부분을 차지하고 있는 복합관망의 경우로 실험을 확대하여 보다 현실성 있는 연구로 발전해 나가야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2004년도 및 2005년도에 Brain Busan 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Roberson, J., Cassidy, J., and Chaudhry, M. H., Hydraulic engineering, Boston Graphics, Inc.(1993).
2. Wylie, E. B. and Streeter, V. L., Fluid transients in systems, Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J(1993).
3. Brunone, B. and Ferrante, M., "Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients," *J. Hydraulic Research.*, **39**(5), (2001).
4. Chaudhry, M. H., Applied hydraulic transients, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York(1987).
5. Karney, B. and McInnis, D., "Efficient calculation of transient flow in single pipe network," *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, **118**(7) 1014~1030(1992).
6. Mpesham, W., Sarah, L. G., and Chaudhry, M. H., "Leak detection in pipes by frequency response method," *J. Hydraulic Engineering*, **127**(2), 134~147(2001).
7. Vinay, K. I. and John, G. P., "Digital signal processing using MATLAB," Thomson-Engineering, pp. 139~190(1999).
8. Press, W., Teukdsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., "Numerical Recipes in FORTRAN," (2d), Cambridge University Press(1994).