

# 단일관망에서 누수효과를 고려한 천이류 분석 및 실험

## Transient Analysis and Experiment Considering Unsteady Friction and Leakage in a Pipeline System

이미현\*, 송용석\*\*, 김상현\*\*\*

Mi-Hyun Lee, Yong-Sok Song, Sang-Hyun Kim

---

### Abstract

The current paper focuses the analysis of leakage detection in water pipeline systems by means of the transient analysis. In order to obtain pressure variation for evaluation the existing methodology, an extensive experimental process has been carried out in a single pipeline system. Several experimental tests were performed with and without a leakage in the system. Using the unsteady friction and improved unsteady friction factors, reasonable match between the computed and measured pressure were presented on the condition of the flow situations. The transient method attempts to estimate the leakage in water pipelines using observed pressure data collected during transient events on the system.

*Key words* : Leakage detection, Transient analysis, Unsteady flow experiment

---

## 1. 서 론

국내의 상수관망은 누수로 인해 상당한 비용손실을 야기하고 있으며 이것을 제어하기 위해서 관수로에서 누수의 위치를 파악하고 예측할 수 있는 기술의 확보는 중요한 연구과제이다. 관수로에서 누수의 발생은 관수로의 부식, 시공상의 부실접합, 구조적인 문제 등으로 인해 발생하게 된다. 이러한 누수 탐지 기술은 국내외 연구자를 중심으로 계속해서 개발되고 있으나(Brunone 과 Ferrante, 2001; Liggett 과 Chen, 1994) 현장에 적용 가능한 기술은 미개발 상태이다.

본 연구에서는 누수를 표현하기 위한 방법으로 부정류 모델(김상현 외, 2003)을 도입하였다(Chaudry, 1987; Wylie 와 Streeter, 1993). 실제 관망실험장치를 통한 누수실험을 통해서 부정류 모델의 관수로에서의 수격압 모의 상태를 알아보고, 실험결과와 부정류 모델에 의한 결과 간의 차이를 줄이기 위해 부정류 모델에 개선된 부정류 마찰항을 도입하였다. 두 결과간의 일치 여부를 바탕으로 누수량에 대한 실제관망누수실험의 압력파와 부정류 모델에 의해서 얻어진 압력파에서의 변화를 분석하였다.

## 2. 관수로 부정류 해석

부정류 해석을 수행할 시 천이류 마찰항에 의한 마찰손실을 무시하였을 때 실험에 의해서 얻은 측정데이터와 수치모의실험에 의한 데이터사이에 상당한 불일치가 나타난다(Bergant 외,

---

\* 이미현.부산대학교 환경공학과 석사과정·E-mail : mh@hanmail.net

\*\* 송용석.부산대학교 환경공학과 석사과정·E-mail : 20927@hanmail.net

\*\*\* 김상현.부산대학교 환경공학과 부교수·E-mail : kimsangh@pusan.ac.kr

2001). 따라서 마찰손실에 대한 영향을 정확하게 고려하는 것은 향상된 누수 실험의 결과를 얻기 위한 사전작업으로 상당히 중요한 것이다.

마찰항은 유사정상상태(quasi-steady)를 나타내는  $f_q$ 와 부정류상태(unsteady)를 나타내는  $f_u$ 의 합으로서 표현되어진다.

$$f = f_q + f_u = \frac{fV^2}{2gD} + \frac{kDA}{Q|Q|} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + a \text{sign}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 Darcy-Weisbach 마찰계수를,  $V$ 는 파이프 단면을 지나가는 유체의 평균유속을,  $D$ 는 파이프 내경을 나타낸다. 식 (3)의  $f_u$ 는 일시적인 국부가속도항인  $1/A(\partial Q/\partial t)$ 과 일시적인 전달가속도항인  $1/A(a\partial Q/\partial x)$ 과의 합이다(Ramos와 Covas, 2003). 여기서  $\text{sign}(Q)$ 는 식 (2)와 같다.

$$\text{sign}(Q) = \{+1 \text{ for } Q \geq 0 \text{ and } -1 \text{ for } Q < 0\} \quad (2)$$

Brunone 마찰계수  $k$ 는 경험적으로 혹은 분석적으로 예측되어질 수 있다. Vardy 와 Brown의 진단감쇄계수  $C^*$ 를 이용하는  $k$ 의 분석적인 정의는 식 (19)와 같다.

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2}; \quad C^* = \begin{cases} 0.0476 & \text{for laminar flow} \\ 7.41 & \\ \frac{7.41}{Re^{\log(14.3/Re^{0.05})}} & \text{for turbulent flow} \end{cases} \quad (3)$$

$$f = f_q + f_u = \frac{fV^2}{2gD} + \frac{1}{gA} \left( k_{v1} \frac{\partial Q}{\partial t} + k_{v2} a \text{sign}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (4)$$

식 (4)은 개선된 식으로서  $k_{v1}$ 항은 국부가속도항과 관련된 항으로 파의 상의 이동을 나타내고  $k_{v2}$ 항은 전달가속도항과 관련된 항으로 압력파의 모양에 상당한 영향을 준다. 다른 초기의 정상상태에 대해서 계수  $k_{v1}$ 과  $k_{v2}$ 는 수치실험적인 결과와 실험결과간의 일치정도에 따라 예측되어진다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 부정류 실험장치

Fig 1은 설치된 부정류 실험장치의 정면도이다. 실험에 사용되어지는 유체인 물은 옥상에 설치되어 있는 상수도 저장탱크에서 실험 수조 A로 연결되어 있는 관로를 통해 직접 공급받고 있다. 수조 A와 D는 관경 20 mm의 스테인리스 관으로 연결되어있고, 수두차이를 더욱 많이 만들기 위해 추가로 설치되어 있는 보조수조 C와도 연결되어 있다. 관 중간에 설치된 수조 B는 실험 시 저해요소의 발생을 억제하여 단일관망과 같은 효과를 내도록 하기 위해서 설치되었다.

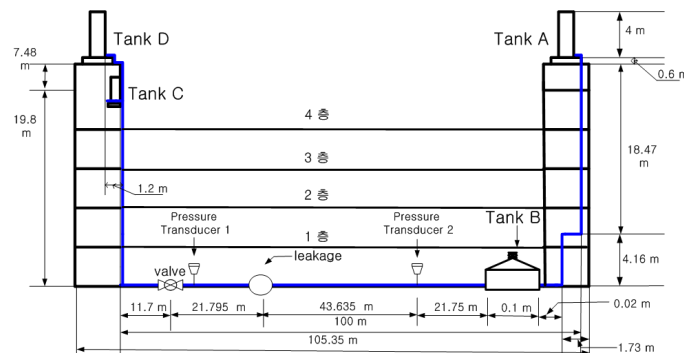


Fig 1. Experimental setup simulating the leak.

실험에 사용된 관은 20 mm 스테인리스 관으로써 총 연장길이 155.86 m, 최대 수평직선길이 87.28 m로 구성되어있다. 수압계는 두 개가 설치되었는데, 하나는 관중밸브에서 전방 0.5m에 설치되었고 나머지 하나는 관중밸브로부터 65.585 m에 설치되었다.

### 3.2 실험방법

누수실험을 위해 건물 옥상에 설치된 두 수도조절탱크의 수도차이를 50 cm로 하여 양쪽에 수도차이를 두었다. 측정결과 정상상태에서의 유량은  $69.9083 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 유속은  $V_0$  는 0.22 m/s를 나타내었다. 과속도  $a$  는 1293 m/s<sup>2</sup>으로써 일반적인 스테인리스관에서의 과속도를 나타내었다. 실험의 재현성을 위해 같은 조건의 실험을 2번씩 반복 수행하고 동일결과를 확인하였다.

누수실험 전 정상상태에서의 압력데이터를 획득하였고, 누수량을 임의로 조정하여 누수량의 증가에 따른 누수데이터를 획득하였다. 누수량은 정상상태 유량의 5 %, 11 % 19 %가 되도록 하였다. 누수유량은 직접 대기로 방출되는 누수를 유량측정용기를 이용하여 측정하였으며, 5 %일 때는  $3.416 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 11 %는  $7.76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , 19 %일 때는  $13.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 측정되었다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 부정류 마찰항에 대한 실험결과와 UNA결과 비교

Fig 2는 누수가 없는 정상상태에서의 수격압에 대한 압력과 그림으로 실험에 의해서 측정된 데이터와 UNA(김상현 외, 2003)를 이용해 모의실험한 것을 비교한 것이다. 부정류 해석에 의한 모의실험은 부정류 마찰항을 고려하지 않을 경우(Reference model)와 식 (1)의 부정류 마찰항(Unsteady friction model)과 그리고 식 (4)의 부정류 마찰항(Improved Unsteady friction)을 사용하였을 경우를 각각 비교하였다.

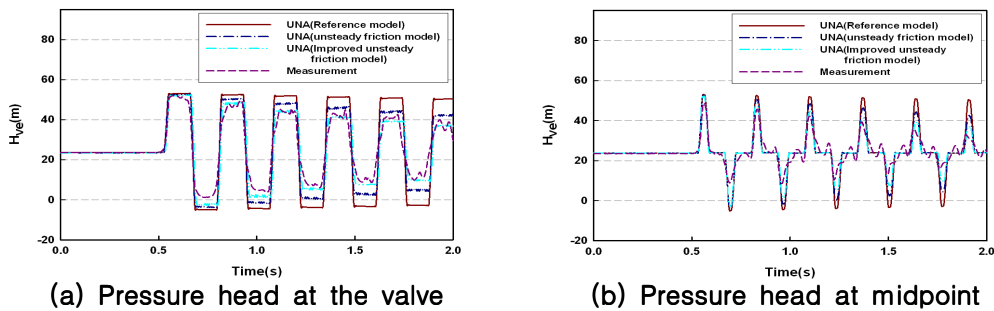


Fig 2. Comparison of pressure head due to unsteady friction (No leakage)

Fig 2를 분석을 통해 실험결과와 가장 일치하는 것은 개선된 부정류 마찰항을 사용하였을 경우인 것을 알 수 있다. 식 (20)을 이용한 부정류 마찰항이 가장 일치하는 이유는  $k_{v1}$  과  $k_{v2}$  을 추가함으로써 실험데이터에 대한 부정류 모델의 오차가 줄어들었기 때문이다.  $k_{v1}$  의 값에 따라 압력파의 상이동이 일어나고,  $k_{v2}$  의 값을 변화시키면 압력파의 진폭이 조절된다. 일반적으로 두 항의 관계는  $k_{v1} \approx 10\%k_{v2}$  로써  $k_{v1} < k_{v2}$  로써 나타난다(Ramos 와 Covas, 2003).

#### 4.2 실측치와 UNA결과에서 누수로 인해 발생한 압력파의 변화 분석

수격압하에서 누수에 대한 압력파 그래프를 분석하는데 있어서 전체압력과 모두를 해석하는 것보다 처음에 발생하는 반향파를 정밀분석하는 것이 보다 정확한 결과해석을 가능하게 해준다.

Fig 3의 (a)는 누수가 없을 때의 실측치와 UNA에 의해서 수치모의한 결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 결과는 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 누수가 발생하기 전의 압력파 그래프가 정상상태가 되었음을 확인할 수 있고 UNA가 실제 관망에서의 천이류의 발생에 의한 변화를 모델링의 정확성을 확보할 수 있었다.

Fig 3의 (b)는 누수를 5 %발생시켰을 때의 실측치와 UNA에 의한 결과를 비교한 그림이다. 누수가 없을 때와 비교해서 그래프에서의 큰 변화는 없는 것으로 판단되어진다. 실험장치의 크기가 상당히 큰데 비해 5 %의 누수량은 매우 적은 양이기 때문에 누수에 의해서 발생하는 미미한 변화가 실험장치에서 발생하는 오차에 의한 영향으로 인하여 상쇄됨으로써 실험결과에서 뚜렷한 변화를 발견할 수 없었다. UNA의 결과와 비교해서 전체적인 모양은 일치하지만 완전한 일치를 나타내지는 못하고 있다.

Fig 3의 (c)는 누수를 11 % 발생시켰을 때의 실측치와 UNA에서 구한 결과를 비교한 그림이다. 두 결과 모두에서 누수가 없을 때와 비교해서 수두감쇄가 발생하였다는 것을 알 수 있다. 0.6 초에서 두 결과의 수압값이 감쇄하여 일치하는 값을 나타내고 있다.

Fig 3의 (d)는 19 %의 누수량에 대한 실측치와 UNA의 결과이다. 누수량 11 % 일 때와 유사한 변화를 나타내고 있다. 즉, 누수의 양이 많아짐에 따라 누수량에 비례하여 수두감쇄가 발생하고 그 변화는 누수량이 많을 때 확연하게 나타난다. 누수량이 적을 때는 실측치와 UNA의 그래프에서 누수량에 따른 공통된 변화를 감지할 수 없었으나 누수량이 증가함에 따라 두 그래프의 일치도가 증가한다. 19 %에서의 실측치와 UNA의 결과를 비교하면 첫 반향파의 초기부분에서 발생하는 피크가 두 결과 모두에서 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 피크가 짧은 시간 후에 다시 감소하는 형태를 보이고 있다. 이러한 피크의 발생과 감소의 관찰은 관에서 누수의 발생 유무를 파악하는 근거가 될 수 있다.

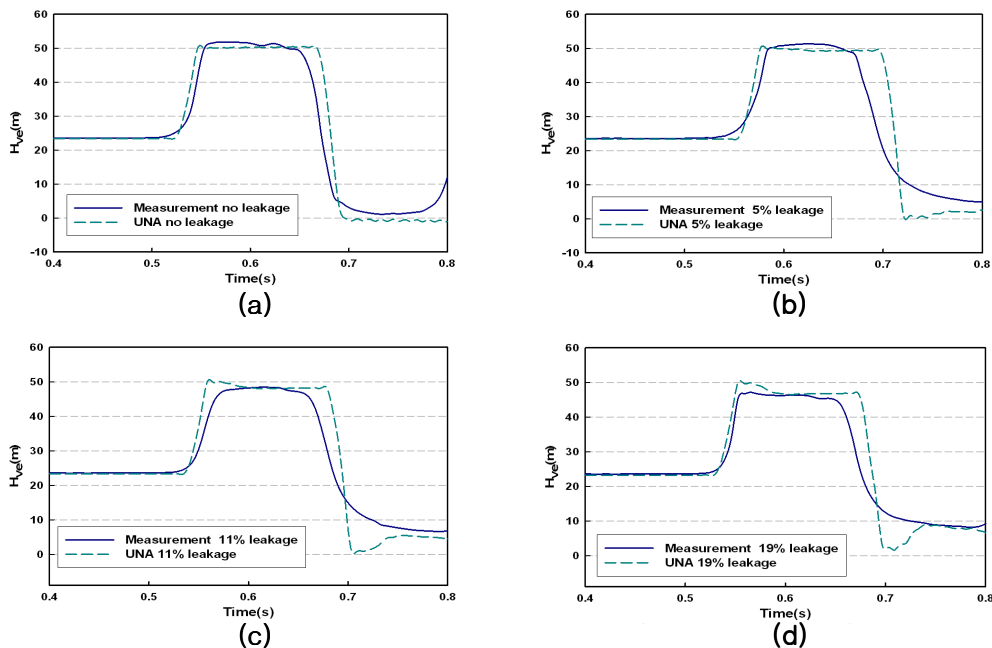


Fig 3. Comparison of measurement and UNA on leakages.

(a) No leakage, (b) 5% leakage, (c) 11% leakage, (d) 19% leakage

## 5. 결 론

1. 천이류를 기반으로 하는 누수탐지는 실험에 의한 실측치와 수격압 모델의 결과와의 일치률 바탕으로 하는 분석법이다. 따라서 정확한 실측치를 바탕으로 수격압 모델의 결과를 부정류 마찰항을 이용해 개선함으로써 두 결과가 일치하도록 하였다. 부정류 마찰항은 Brunone 모델과 이것에  $k_{v1}$  과  $k_{v2}$  항이 추가되어진 개선된 모델을 이용하였다. 후자를 이용하였을 때 더 일치함을 확인할 수 있었다.

2. 실측치와 개선된 부정류 마찰항을 이용하였을 때 누수가 없을 때와 누수량을 정상상태의 5%, 11%, 19%로 변화시켰을 때 각각의 변화를 분석하였다. 누수량 5%에서는 누수에 의한 변화가 실측치와 수격압 모델 두 결과 모두에서 뚜렷한 변화가 관찰되지 않았다. 11% 누수량에서는 누수에 의해 수두감쇄가 일어남으로써 변화가 조금씩 관찰되었다. 19% 누수량에서는 더 많은 수두감쇄가 나타나고 압력파의 모양에서도 변화가 관찰되었다. 또한 실측치와 수격압 모델의 일치정도가 누수량이 증가함에 따라 더 일치하는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 실험에 의한 데이터를 이용해 부정류 모델의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 더욱이 개선된 부정류 마찰항의 이용에 의해 모델의 오차를 줄일 수 있었고 이를 통해서 누수를 발생시켰을 때 실측치와 부정류 모델에 의한 결과사이의 상당한 일치를 얻을 수 있었다.

부정류 실험장치를 이용해 정상상태에 대해 5%, 11%, 19%의 누수량을 가하여 얻은 실험결과와 개선된 부정류 모델을 사용하여 5%, 11%, 19%의 누수에 대한 시뮬레이션 결과의 비교분석을 통하여 누수의 유무와 누수량 증가에 따른 변화를 도출할 수 있었다.

## 감 사 의 글

본 연구는 BK21의 지원에 의해 이루어졌습니다.

## 참 고 문 헌

1. 김상현, 김봉기, 조임영, 이현동, (2003) "관로시스템의 천이류 해석에 의한 부정류 마찰항 고려 방법에 대한 비교 연구", 대한환경공학회, Vol. 25(5), pp. 602-608.
2. 김상현, 조임영, 이현동, (2003) "관로내의 염소농도 변화 특성의 모의를 위한 수질모형의 개발과 비교", 대한상하수도학회, Vol. 17(2), pp. 268-276.
3. Bergant A., Simpson A. R., and Vitkovsky J. (2001) "Developments in unsteady pipe flow friction modelling." *Journal of Hydraulic Research* Vol. 39, NO. 3, pp. 249-258..
4. Brunone B., Ferrante M., (2001) "Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients" *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 39, No. 5 pp. 539-548.
5. Chaudhry M. H., (1987) "Applied hydraulic transients." 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
6. Liggett J. A., Chen L. C., (1994) "Inverse transient analysis in pipe networks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 934-955.
7. Ramos H., Covas D., (2003) "Surge damping analysis in pipe systems :modelling and experiments." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No.4, pp. 413-425.
8. Wylie. E. B., Streeter V. L., (1993) "Fluid transients in systems." Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J.