

# 천이류에 대한 역지밸브의 거동



권혁재 |

청주대학교 토목환경공학과 전임강사  
hjkwor@cju.ac.kr

## 1. 서론

상수도관에 대한 연구는 많은 어려운 연구과제들 중 하나일 것이다. 이는 지표면 밑에 매설된 관의 부식이나 침식의 정도를 측정하기 힘들며 또한 부정류(unsteady flow) 혹은 천이류(transient flow)에 의한 갑작스런 압력변화의 해석이 필요하기 때문이다. 실제 상수관의 설계에서 상수관의 정상수압을 2배 이상 고려하여 설계함으로써 수직압(water hammer pressure)의 영향을 최대한 반영하는 것이 사실이다. 상수도관망에서 갑작스런 압력변화가 일어나거나 혹은 소방전(hydrant)의 사용과 같은 갑작스런 필요유량이 생긴다면 압력이 급상승하거나 급저하 되며 이러한 갑작스런 변화는 원치 않는 악영향을 상수도관망 시스템에 미치게 된다. 이런 변화가 빠르게 일어날수록 좋지 않은 영향들, 예를 들면 과도한 수압의 급상승이나 역류(backflow)등이 더 자주 그리고 더 빨리 일어날 수 있다. 특히, 고지대나 산지가 많고 도시 내에서도

표고차가 큰 것이 특징인 한국의 도시들은 이러한 현상의 발생 가능성이 크다고 볼 수 있다.

조사에 의하면 미국의 경우 일 년 평균 약 7,000km의 파이프가 교체되며 새로 축조되는 파이프는 약 21,000km라고 한다. 이중에 100km당 일 년에 평균 16번의 파이프 파열이 발생한다(Kirmeyer et al. 1994). 캐나다의 경우, 일 년에 평균 1.6억 달러를 파열된 파이프 교체 및 수리에 사용하고 있으며 파이프 파열로 인해서 버려지는 물 값은 약 6.5억 달러이다(National Research Council Canada, 1995). 이러한 사고의 원인들 중에 상수도관망에서 천이류의 영향에 대한 이해 부족을 한가지로 꼽을 수 있다.

상수도관망 시스템은 많은 곳에 물을 전달하며 특히 고지대나 높은 빌딩에도 손쉽게 전달하여 시민들은 물 공급에 대한 고민 없이 생활하게 된다. 그러나 상수도관망에는 지역적으로 고저차가 큰 곳에서 큰 압력차가 발생할 수 있으며 이러한 압력차는 갑작스런 물의 필요나 특별한 물 사용 패턴에서도 발생할 수 있다. 예를 들면 갑작스런 파이프의 파열이나 화재로 인한 소방전의 개방으로 인해서 나타날 수도 있다. 이러한 갑작스런 필요유량의 변화는 천이류를 발생시키고 상수도관망에 과도한 부압(negative pressure) 또는 역류(back flow)등과 같은 많은 부작용을 만들게 된다.

## 2. 역류와 교차연결(cross connection)

역류란 원하지 않는 물의 역방향 흐름 혹은 다른 성분의 상수도관망 시스템으로의 침투를 의미한다. 역류의 원인으로는 크게 Backpressure와 Backsiphonage를 들 수 있다. Backpressure는 흔히 하류부의 압력이 더 커진 상태를 의미한다. 수압의 저하 원인으로는 (1)물의 사용량이 급변할 때 (2)소화전을 열었을 때 (3)배수관이 사고로 인해 파열/파괴 되었을 때 (4)고저차가 심한 급수 지역일 때 (5)배수관에 직접 연결된 가압 펌프가 가동 중일 때 등이다. Backsiphonage는 상류부에 부압(negative pressure)이 발생한 경우이다. 이러한 경우 역류가 발생할 수 있으며 이를 막기 위한 역지밸브가 설치되어야 한다.

역지밸브란 관수로에서 한쪽 방향으로만 흐름이 생기도록 하며 역류가 생길시 또는 생기기 전에 흐름을 차단하는 밸브를 말한다. 역지밸브는 Check valve 혹은 Non-return valve 라고도 한다. 관수로흐름, 특히 상수도관은 흐름의 방향이 일정해야만 한다. 그러나 상수도관망시스템에 여러 가지 이유로 인해서 압력의 변화가 생기게 되고 흐름의 방향이 바뀔 수 있다. 상수관의 경우 하류부의 흐름이 역류하는 경우는 반드시 피해야 할 상황으로 여겨지며 반드시 흐름을 차단하거나 밖으로 배출하여 절대로 상류부로 역류하지 못하도록 해야 한다. 지난 기록을 보면 역류로 인해서 생긴 인명피해가 많

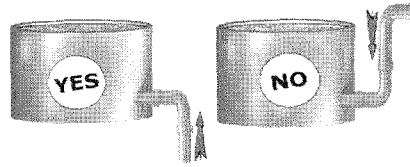


Fig. 2. Direct and indirect cross connection  
 있던 것을 알 수 있다. 이러한 문제들을 인식하고 미국에서는 건물이나 운동장, 화단, 호스등의 교차연결(cross-connection)에 설치 혹은 부착이 의무화 되어있다. Fig. 1은 정상시의 배수관 흐름과 역류를 설명하고 있다.

Cross-connection 이란 “음용수공급 시스템과 음용수로 적합하지 않은 다른 물질사이의 실제연결 혹은 잠재적 연결”로 규정하고 있다 (1999, FCCCHR USC). Fig. 2에서 볼 수 있듯이 왼쪽은 직접교차연결 그리고 오른쪽은 간접교차연결이며 두 곳 모두 역류방지장치가 필요하다. 미국에서는 현재 직접과 간접교차 모두에 역류방지장치(backflow prevention assembly)를 설치하고 있다.

역류방지 장치의 종류에는 크게 다섯 가지가 있다.

- (1) Air Gap Separation
- (2) Reduced Pressure Principle Assembly
- (3) Double Check Valve Assembly
- (4) Pressure Vacuum Breaker/Spill-Resistant Vacuum Breaker
- (5) Atmospheric Vacuum Breaker

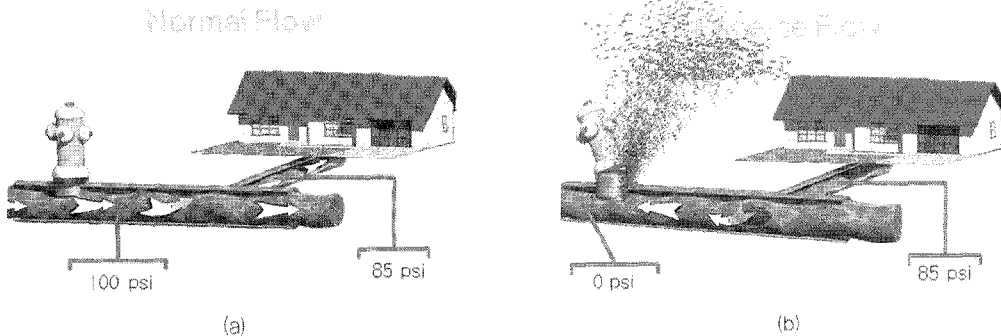


Fig. 1. (a)Normal flow and (b)reverse flow

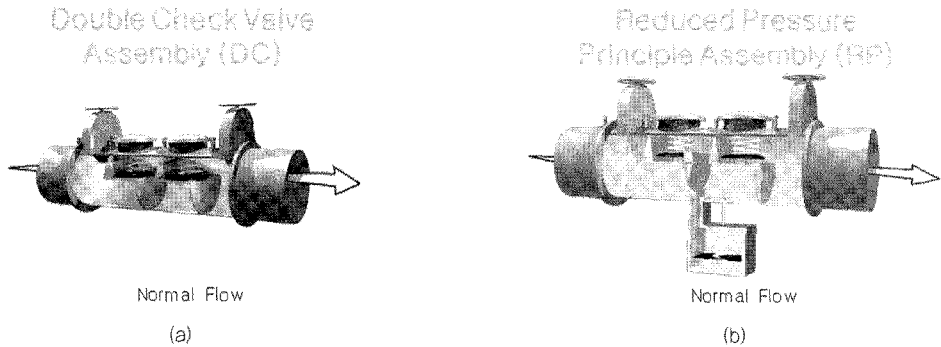


Fig. 3. (a)Double check valve and (b)reduced pressure principle assemblies

Fig. 3은 가장 널리 사용되고 있는 DC와 RP를 보여주고 있다.

DC와 RP는 역지밸브를 두 개 혹은 두 개의 역지밸브 사이에 배출밸브(relief valve)를 장착한 역류방지장치(backflow prevention assembly)의 한 종류이다. 두 개 혹은 세 개의 밸브가 연이어 장착된 이유는 장치의 내부 특성상 이물질이 스프링이나 디스크사이에 끼기 쉽고 스프링의 이탈이 쉽게 일어나므로 한 개의 역지밸브가 제 기능을 상실할 경우를 대비하여 두 개 내지 세 개를 연결한 것이다. 그러나 이런 복잡한 형상은 많은 에너지 손실을 발생시키며 이에 대한 충분한 연구가 필요하다.

### 3. 수격압 발생실험

Fig. 4와 같이 총길이 84.73m의 직경 5.08cm(2inch) 아연도금강관(Galvanized iron pipe)을 수평으로 설치하였다. 파이프의 개폐를 위해서 상류와 하류 끝에 차단밸브(shutoff valve)를 설치하였으며 파이프의 시작과 끝에서 빠르게 밸브를 닫음으로 인해서 수격압이 발생하게 된다. 압력의 측정을 위해서 압력센서(transducer)를 하류 끝으로부터 각각 21.33m(하류부 센서)과 64.37m(상류부 센서) 떨어진 곳에 설치하였다. 본 실험은 파이프 흐름에서 천이류에 대한 역지밸브와 역류방지장치(backflow prevention assembly)의 거동특성

을 알아보기 위해서 수행되었다. 따라서 하류로부터 45.59m되는 곳에 역지밸브를 설치하여 수격압에 대한 반응과 그로 인한 압력변화를 알아보았다. 실험의 초기조건은 관내 압력수두가 84.31m(120psi)이고 유량은 0.000789m<sup>3</sup>/s(12.5gpm)이다. 압력센서의 데이터 전송율(transfer rate)은 4000Hz이고 본 실험에 사용된 파이프 내 파속(wave speed)은 1351.79m/s로 나타났다.

### 4. 수격압과 역지밸브

Fig. 5는 하류부와 상류부에 설치된 압력센서로부터 측정된 수격압의 유동을 보여주고 있다. 먼저 하류 끝과 상류 끝에 설치된 밸브의 빠른 폐쇄로 하류부에서는 압력이 상승하게 되고 상류부에서는 하강하게 된다. 그리고 0.06초에서 0.071초 사이에

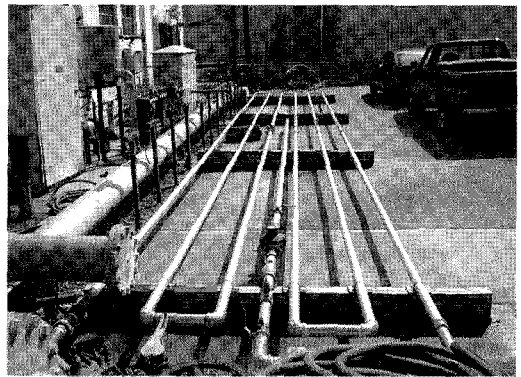


Fig. 4. Plan view of experimental setup

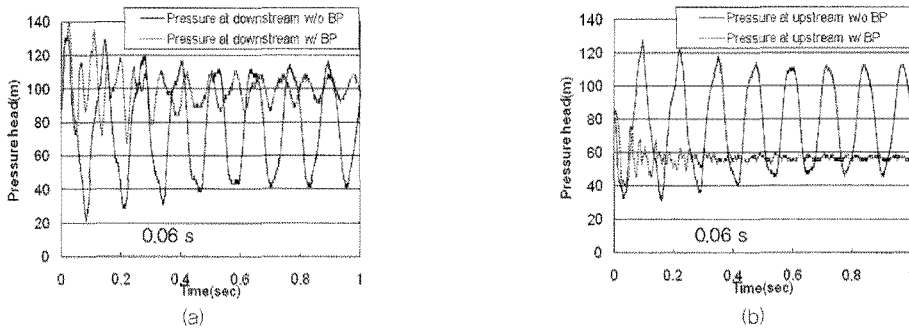


Fig. 5. Pressure oscillations at (a)downstream & (b)upstream w/ and w/o check valve

역지밸브가 닫혔으며 하류부에 생긴 높은 압력파가 상류부에 전달되기 전 이었다. 따라서 수격압의 유동이 모두 사라진 후에도 하류부는 초기압력수두(84.31m)보다 압력이 높은 상태로 상류부는 압력이 낮은 상태가 유지된다.

점선은 역지밸브가 설치된 경우 수격압의 유동을 나타내고 있으며 실선은 역지밸브가 없을 경우 수격압을 나타내고 있다. 역지밸브는 내부의 복잡하고 독특한 형상 때문에 수격압을 크게 감쇠시키는 것으로 나타났다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 하류부의 압력유동에서 0.06초에 압력상승부가 있으며 상류부의 압력유동에서는 압력하강부가 존재한다. 이것은 역지밸브의 디스크가 닫히는 시점에 역지밸브 설치 지점은 흐름의 방향이 바뀐 것을 의미한다. 따라서 역지밸브의 디스크가 닫히면서 하류부는 다시 압력의 상승이 일어나고 상류부에서는 압력의 하강이 일어나게 된다.

본 연구에서는 특성선법(the method of characteristics)모형을 사용하여 수치해석을 수행

하였다. 수치해석을 위해서는 역지밸브에 대한 경계 조건이 필요하며 역지밸브의 닫히는 속도와 닫히는 위치의 순간유량의 변화를 가지고 간단한 경계조건을 만들었다. 수치계산이 시작되고 0.06초가 되었을 때 역지밸브가 위치한 곳의 유량에 대해  $Q=0.0515 \times t - 0.00365$ 라는 경계조건을 수치해석 모형에 사용하였다. 그리고 시간이 0.071초를 지나면 유량은 0이 된다고 가정하였다. 특성선법의 사용을 위해서 공간격자의 크기는 0.6759m 그리고 시간격자의 크기는 0.0005초를 사용하여 Courant Number가 정확히 1이 되게 하였다. 천이류 수치해석에 사용되는 총 에너지 손실계수는 0.3을 사용하였다 (Kwon, 2005). 수치해석에서 차단밸브의 닫히는 속도에 대한 경계조건은 밸브의 닫히는 속도를 측정하고 그 시간동안 유량이 선형적으로 변한다고 가정하였다. 즉, 상류 끝 차단밸브는 0.031초 그리고 하류 끝 차단밸브는 0.0215초 만에 닫혔다. 따라서 하류부의 유량  $0.000789\text{m}^3/\text{s}$ 가 0.0215초 동안 선형적으로 감소한다고 가정한다. 그리고

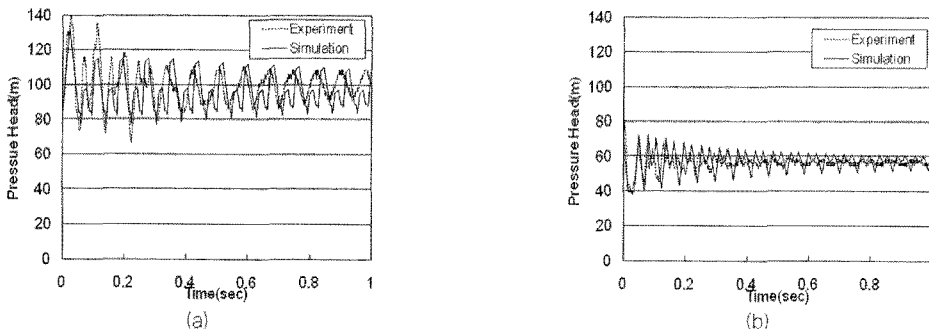


Fig. 6. Results of simulation and experiment at (a)downstream and (b)upstream

0.0215초 후에 하류부 끝의 유량은 0이 된다.

Fig. 6은 실험결과와 수치해석 결과를 보여주고 있다. 계산 초반부는 일치도가 높은 것으로 나타났으며 특히 상류부에서 조금 더 일치도가 높았다. 그러나 계산 후반부에서는 약간의 shifting이 일어나는 것을 볼 수 있으며 이것은 공간격자의 크기를 줄임으로써 해결될 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 실험결과에서 에너지 감쇠가 더 빨리 더 크게 일어났다. 이러한 현상은 현재의 수치모형이 역지밸브의 다양한 부품들의 상호작용이나 에너지 감쇠 메카니즘에 대한 역지밸브의 자세한 효과 등이 고려되지 못해서 나타난 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 천이류에 대한 역지밸브의 거동특성을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 총 길이 84.73m의 직경 5.08cm 아연도금강관을 설치하여

수격압을 인위적으로 발생시켰으며 파이프 중간에 역지밸브를 설치하고 압력변위를 측정하였다. 실험 결과를 통하여 수치해석 모형에 사용 될 역지밸브의 경계조건을 찾아냈으며 실험결과와 수치해석결과를 비교하였다. 역지밸브가 설치된 경우 수격압은 상류부와 하류부에서 최대압력파고의 약 55.79% 그리고 47.27%가 감소되었다. 역지밸브는 역류가 발생하기 전에 스프링에 연결된 디스크가 빠른 속도로 닫히게 설계되었으며 이런 복잡한 내부형상은 큰 에너지감쇠를 유발하게 된다. 또한 역지밸브가 닫힐 때도 큰 에너지 감쇠효과를 나타냈다. 현대인들에게 건강이란 주제는 개개인의 삶에서 가장 중요한 관심사 중에 하나가 되었다. 특히 마시는 물의 중요성은 특별히 강조하지 않아도 모든 사람들에게 그 중요성이 충분히 인식되어 있다. 따라서 상수관망의 역류와 교차연결에 대한 지속적인 관심과 연구가 앞으로 중요할 것으로 생각되며 피할 수 없는 교차연결이라면 그에 대한 역류방지 대책도 더욱 깊이 있게 연구되어야 할 것이다. 🍷

## 참고문헌

1. Kwon, H. J. (2005). "Transient flow in water distribution system." Thesis of doctor of philosophy, University of Southern California, Los Angeles, CA.
2. National Research Council Canada (1995). Water Main Breaks Data on Different Pipe Materials for 1992-1993.
3. Kirmeyer, G., W. Richards, and C.D. Smith. (1994). An Assessment of Water Distribution Systems and Associated Research Needs. Denver, CO: AWWARF
4. USC Foundation for Cross-Connection Control and Hydraulic Research (1999). Manual of cross-connection control (9th edition). University of Southern California, Los Angeles, CA.