

**상수관망의 맞춤형 부정류해석 및 부정류피해 최소화 방안**  
**Customized unsteady analysis and minimization of damage due to unsteady**  
**flow in water distribution system**

권혁재\* / 유민규\*\*  
Kwon, Hyuk Jae / Yoo Min Kyu

.....  
**요 지**

본 연구에서는 두 지역의 실제 상수관망에 대해서 부정류해석을 수행하였고 각각의 상수관망에 필요한 부정류피해 최소화방안을 제시하였다. 첫 번째 대상지역은 베트남 호치민으로 148개 절점과 162개의 파이프를 이루어진 소블럭 상수관망이며 두 번째 대상지역은 파주시 광탄면으로 512개 절점과 527개의 파이프를 이루어진 세 개의 소블럭 상수관망이다. 두지역의 상수관망은 지형적면이나 규모면에서 다른 모습을 하고 있기 때문에 부정류해석 시 발생가능한 피해유형이 틀린 것으로 나타났다.

호치민의 경우 배수지의 높이가 낮고 도시 내 표고차가 없어서 관망 내 평균수압이  $1\text{kg/cm}^2$ 을 약간 상회하는 수준으로 수압이 낮고 수압차 역시 작다. 따라서 상수관망에서 일어날 수 있는 소요수량의 변화나 소화전 사용과 같은 작은 변화에도 역류발생이 빈번히 일어나는 것으로 나타났으며 역류발생이 잦은 파이프를 선정할 수 있었다. 상당히 많은 파이프에서 단기간 역류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 짧은 기간에 발생하는 변화에 대한 단기간 역류는 교차연결(Cross-Connection)의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 역류발생이 빈번히 일어나는 파이프 주위에 check valve나 역지밸브등의 설치를 통해 역류로 인한 피해를 최소화할 수 있다.

파주시 광탄면 지역의 소블럭 집합으로써 고저차가 많은 지역이다. 배수지 밸브개폐 시 발생가능한 수충격에 대한 시뮬레이션과 펌프장정지로 인해 발생할 수 있는 수충격에 발생 시뮬레이션을 수행하였고 관망내에서 자주 발생하는 밸브개폐로 인한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 광탄의 경우 수충격 발생위험 지점은 배수지 근처로 나타났고 수격압이 최대  $2.5\text{kg/cm}^2$ 에서  $3.0\text{kg/cm}^2$ 까지 발생 가능한 것으로 나타났고 밸브개폐시간이 1-2초 지연되어도 상당히 큰 수격압을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 수충격압이 크게 발생할 수 있는 지역에 수충격피해 최소화를 위해 surge tank와 같은 장치를 설치해야 한다. 또한 발생가능한 수격압의 크기를 통계적기법을 통해 확률밀도함수로 나타낼 수 있었다. 이 결과는 앞으로 상수관망의 설계나 운영에서 수충격피해 방지 장치 및 설비를 시공할 때 장치의 규모나 용량을 결정할 때 유용한 정보가 될 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 상수관망, 부정류, 수충격, 역류**

\* 청주대학교 이공대학 토목공학과, 조교수, E-mail: [hjkwon@cju.ac.kr](mailto:hjkwon@cju.ac.kr)  
\*\* 청주대학교 이공대학 토목공학과, 석사과정, E-mail: [y mk6860@naver.com](mailto:y mk6860@naver.com)

## 1. 서론

최근 국내 상수관 파열이 빈번히 발생함에 따라 관 파열 원인이 단순 노후화인지 다른 이유인지에 따른 원인 규명이 필요하게 되었다. 국내뿐만 아니라 캐나다의 경우 연 평균 82,000,000달러를 파열된 파이프 교체 및 수리에 사용하고 있으며 미국의 경우 총 연장 1,400,000km의 파이프에서 연 평균 230,000번의 파이프 파열사고가 발생했다(Kirmeyer et al, 1994). 본 연구에서는 부정류해석 프로그램(Kwon, 2005)을 이용하여 실제 존재하는 베트남 호치민시 상수관망과 파주시 광탄면 GT1-1블럭 상수관망을 부정류 해석하여 피해 취약지점을 선정하고 피해 최소화방안을 제시하였다.

## 2. 베트남 호치민 소블럭 상수관망

Fig. 1은 호치민시 소블럭 상수관망의 위치를 보여주고 있다. 본 상수관망을 이용하는 인구는 약 5,000명으로 용수공급은 Thu Duc 정수장에서 받고 있다. 주거형태는 2~3층의 주택지역으로 대부분 옥상 물탱크를 사용하는 간접급수 방식으로 수돗물을 공급하고 있다. 본 연구대상인 상수관망은 국내의 높은 해발고도를 갖는 배수지와는 달리 다소 낮은 해발고도 15m의 배수지를 갖고 있으며 약  $0.125\text{km}^2$ 의 면적에  $0.009292\text{m}^3/\text{sec}$ 의 유량을 공급하고 있다. 본 상수관망은 직경이 5~20cm로 보통 10cm의 직경이 많이 매설되어 있으며 관 재질은 대부분 PVC관과 PE관으로 나타났다. 호치민 상수관망은 총 162개의 파이프, 1개의 배수지, 그리고 148개의 절점으로 이루어졌다.

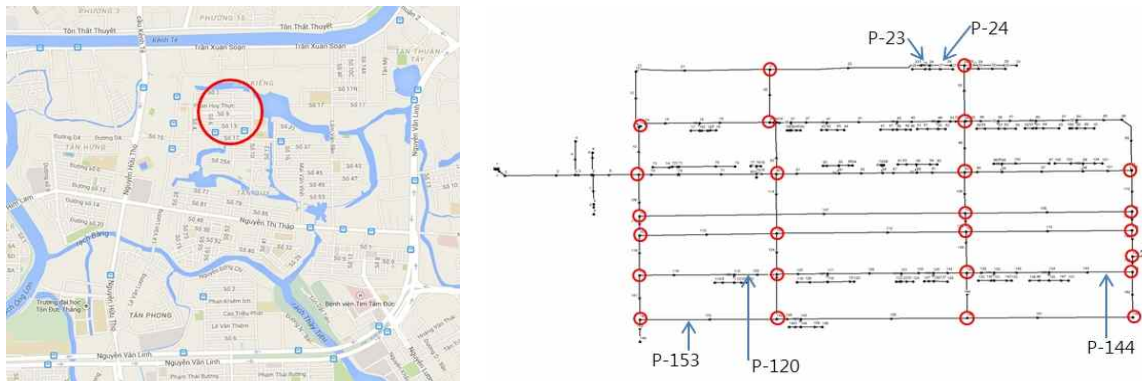


Fig. 1. Ho chi minh small bloc water distribution system

부정류해석 프로그램(Kwon, 2005)을 이용하여 두 가지 경우로 해석하였다. 첫 번째는 배수지에서 나토는 유량이 밸브를 통해 3초 동안 서서히 선형적으로 닫혔다가 3~6초 동안 다시 밸브가 서서히 선형적으로 열려 6초 후에는 밸브가 완전 개방되어 정류흐름이 되는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 부정류해석을 위한 기본적인 조건으로  $\Delta t=0.0008\text{sec}$ ,  $\Delta x=1\text{m}$ ,  $c=1250\text{m/sec}$ 로 하여 20초 동안 해석되도록 하였다. 그리고 Darcy-Weisbach 마찰계수는 모든 관에 대하여 0.04를 적용하였다. 부정류 해석 결과 전체 파이프 중 120, 153, 22, 26, 101, 110, 119, 140, 144, 153번 파이프에서 짧게는 1~2초 길게는 3초간 역류가 발생하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 부정류해석 결과의 예로써 배수지 유량변화로 발생한 P-120의 역류와 J-20의 수격압을 보여주고 있다.

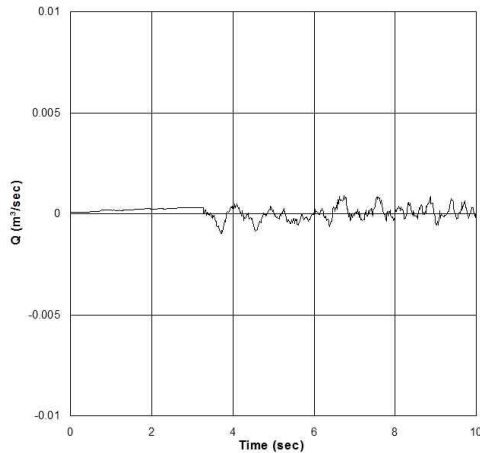


Fig 2. Back flow at P-120 according to change of demand

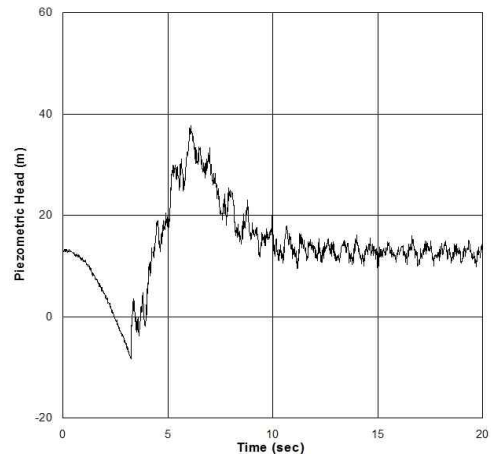


Fig. 3. Pressure oscillation at J-20 according to change of demand

### 3. 파주시 광탄면 GT 1-1블럭 상수관망

Fig. 4는 광탄 GT 1-1블럭 상수관망의 위치를 보여주고 있다. 본 상수관망은 문산정수장의 용수를 공급받아 해발고도 84m의 광탄 배수지를 이용하여 수용가에 0.020865m<sup>3</sup>/sec의 유량을 공급하고 있다. 관 재질은 대부분 덕타일 주철관(DCIP)로 C값은 90을 나타내고 있으며 총 527개의 파이프, 1개의 배수지, 1개의 펌프, 그리고 512개의 절점으로 이루어졌다.

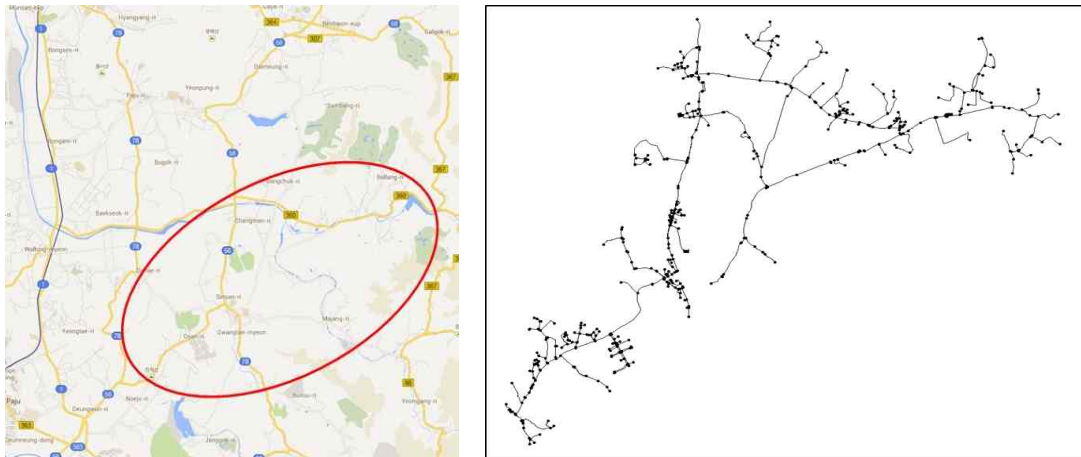


Fig. 4. Kwang tan GT1-1 bloc water distribution system

부정류해석의 시나리오는 배수지에서 나오는 유량이 밸브를 통하여 0.5초 동안 서서히 선형적으로 단혔다가 0.5~1초 동안 다시 밸브가 서서히 선형적으로 열려 1초 후에는 밸브가 완전 개방되어 정류흐름이 되는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 부정류해석을 위한 기본적인 조건으로  $\Delta t = 0.0008\text{sec}$ ,  $\Delta x = 1\text{m}$ ,  $c = 1250\text{m/sec}$ 로 하여 10초 동안 해석되도록 하였다. 그리고 Darcy-Weisbach 마찰계수는 모든 관에 대하여 0.052를 적용하였다. Fig. 5는 부정류해석 결과의 예로써 유량변화로 발생한 J-1과 J-6의 압력변화를 보여주고 있다.

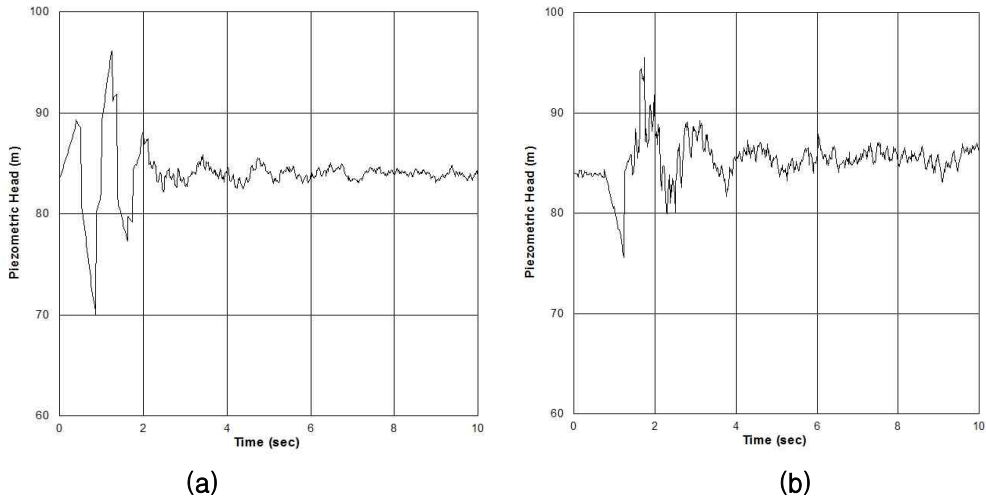


Fig. 5. Pressure oscillation at (a) J-1 (b) J-6 according to sudden change of demand

#### 4. 수격압의 통계적 특성

호치민시와 광탄의 상수관망을 대상으로 부정류해석을 수행하였다. 많은 시나리오를 통하여 발생 가능한 형태의 부정류 및 피해유형을 예측하였고 이 결과를 토대로 수격압의 통계적 특성을 분석하였다. Fig. 6과 같이 호치민시와 광탄의 경우 수격압의 크기를 확률밀도함수로 나타내었다. 그 결과 그림에서 보는 바와 같이 Gumbel분포를 따르는 것으로 나타났다. 이러한 통계적 분석방법은 향후 상수관망의 운영관리는 물론 설계에 반영하여 관두개 산정등에 적용할 수 있을 것이다.

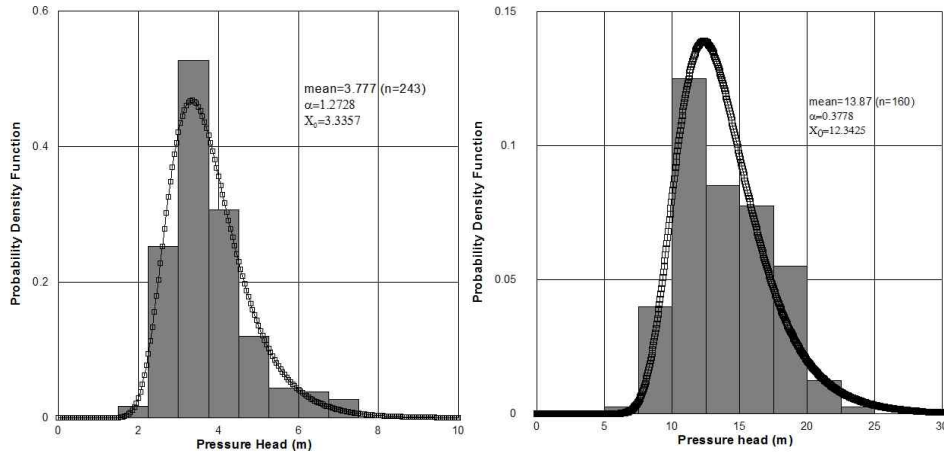


Fig. 6. Probability Density Function at (a) and (b) according to Pressure head

#### 5. 결론

본 연구에서는 베트남 호치민 상수관망과 광탄 GT1-1블럭 상수관망에 대해 부정류해석을 통한 피해 취약지점을 찾을 수 있었다. 호치민시 소블럭의 경우 표고가 낮은 관계로 위압수두가 낮고 압력차가 매우 작다. 또한 압력변화에 민감하여 역류발생이 쉽게 일어나고 부정류로 인한 순간적 역류 발생빈도가 빈번한 것으로 나타났다. 광탄 GT 1-1블럭의 경우 배수지 근처는 물론 관망 내 모든 절점에서 수충격압 발생가능성이 높게 나타났다.

호치민의 경우 배수지의 높이가 낮고 도시 내 표고차가 없어서 관망 내 평균수압이  $1\text{kg/cm}^2$ 을 약간 상회하는 수준으로 수압이 낮고 수압차 역시 작다. 따라서 적정한 유속이 나오지 않고 있으

며 실제 수격압의 발생 시 큰 압력파고는 형성되지 않을 것으로 예상된다. 하지만 평상시 수압차가 작기 때문에 상수관망에서 일어날 수 있는 소요수량의 변화나 소화전 사용과 같은 작은 변화에도 역류발생이 빈번히 일어나는 것으로 나타났으며 역류발생이 잦은 파이프를 예측할 수 있었다. 짧은 기간에 발생하는 변화에 대한 시뮬레이션 결과 상당히 많은 파이프에서 단기간 역류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 짧은 기간에 발생하는 변화에 대한 단기간 역류는 관로 하류부의 음용수로 부적절한 물의 공급이 일어날 수 있기 때문에 교차연결(Cross-Connection)의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 역류발생이 빈번히 일어나는 파이프 주위에 check valve나 역류방지밸브(Backflow Prevention Assembly)의 설치를 통해 역류로 인한 피해를 최소화할 수 있다.

두 번째 대상지역은 과주시 광탄면 지역의 소블럭 집합으로써 배수지의 표고가 84미터 이상으로 고저차가 많은 지역이다. 대상지역에는 고지대 주민을 위한 가압펌프장이 한곳 있으며 적절한 수압차를 보이고 있어서 역류발생 기회는 적다고 할 수 있다. 따라서 배수지 밸브개폐 시 발생 가능한 수충격에 대한 시뮬레이션과 펌프정지로 인해 발생할 수 있는 수충격에 발생 시뮬레이션을 수행하였고 관망내에서 자주 발생하는 밸브개폐로 인한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 광탄의 경우 수충격 발생위험 지점은 배수지 근처로 나타났고 수격압이 최대  $2.5\text{kg/cm}^2$ 에서  $3.0\text{kg/cm}^2$ 까지 발생 가능한 것으로 나타났다. 밸브 개폐시간에 따른 발생 수격압을 비교한 결과 개폐시간이 1-2초 지연되어도 상당히 큰 수격압을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 수충격압이 크게 발생할 수 있는 지역에 수충격 피해 최소화를 위해 surge tank와 같은 장치를 설치해야 한다. 발생가능한 수격압의 크기를 통계적기법을 통해 확률밀도함수로 나타낼 수 있었다. 이 결과를 통해 광탄 상수관망과 호지민시 상수관망에서 발현가능성이 높은 수격압의 크기를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 이 결과는 앞으로 상수관망의 설계나 운영에서 수충격피해 방지 장치 및 설비를 시공할 때 장치의 규모나 용량을 결정할 때 유용한 정보가 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 EI사업”으로 지원받은 과제임 (GT-11-G-02-001-2).

## 참고문헌

1. Kirmeyer, G., W. Richards, and C. D. Smith (1994). An Assessment of Water Distribution Systems and Associated Research Needs. Denver, CO: AWWARF
2. Kwon, H. J. (2005). “Transient flow in water distribution system.”, Thesis of doctor of philosophy, University of Southern California, Los Angeles, CA.