

밸브의 급폐쇄로 인한 수격현상 발생 영향인자의 민감도 분석

최 계 윤*, ○곽 한 범**, 이 동 희**

1. 서 론

일반적으로 관수로내에서 물은 압축되지 않는다는 가정으로 해석되어지는 경우가 대부분이나 관로내 흐름상태에 따라서는 물이 압축되는 경우가 있다. 이와같은 압축현상은 물이 흐르는 도중 극히 짧은 시간에 정류상태에서 또 다른 정류상태로 변하는 과도흐름 상태에서 많이 발생되며, 이와같은 과도흐름은 펌프의 급정지나 급가동, 밸브의 급폐쇄 등에서도 나타나게 되고, 이에 의하여 발생하는 큰 압력변화를 수격현상 또는 수격작용이라 한다. 관로에 발생되어지는 수격현상에 대한 연구는 국내에서 활발하게 이루어지지 않고 있으나 관수로내 각종 시설물들을 파괴하여 상당한 피해를 야기시키는 원인이 되고 있다. 이와 같은 피해를 가져오는 수격현상을 방지하기 위하여 관로상에 여러 수격방지 시설물을 설치하게 되며, 이때 설치되는 시설물로는 서지 탱크, 체크 밸브, 수격완화장치, 스탠드 파이프등이며 이들 수격방지 또는 완화 시설물들은 관로상 수격작용에 의하여 발생하는 압력의 급변화를 계산한 이후에 설계자의 판단에 의하여 설치되게 된다.

지금까지의 수격현상 및 시설물에 대한 연구 중 Halliwell (1963)이나 Watters, Jeppson과 Flammer (1976)은 파이프의 재질에 따른 수격현상의 변화에 대하여 파이프의 재질에 따라 파속이 변하게 되고 탄성이 큰 파이프와 PVC 및 플라스틱 파이프에서는 파속이 감소하여 최대수두가 감소하는 것으로 밝히고 있다. 또 Simpson과 Wylie (1991)는 수주분리 현상에 대하여 연구하였는데 수주분리 현상은 초기 속도변화에 따라 그 양상이 크게 달라지며 초기 속도를 크게 하는 경우에 수주분리 현상으로 인하여 발생하는 수두가 크게 나타난다는 연구결과를 발표하였다. Barbarossa (1959), Ruus (1969)나 Chaudhry, Sabban과 Fowler (1985)등은 서지탱크의 안정성에 관한 연구를 하였으며, Holley (1969)은 실험실에서 서지탱크가 있는 경우와 없는 경우를 비교 실험하였으며, Wood (1970)는 완화장치를 이용한 수격완화에 대하여 발표하였다.

이와 같은 수격현상을 완화하기 위하여는 수격완화 시설물을 관로사이에 설치하는 경우가 일반적이인데 수격완화 시설물을 계산하여 설치하는데는 많은 시간과 설치비용이 소요된다. 수격완화 시설물외에 수격현상에 영향을 주는 영향인자들의 적절한 사용을 통하여서도 수격완화 효과를 얻을 수가 있다. 따라서 관로 설계시 수격현상에 영향을 주는 영향인자들의 민감한 정도에 대한 연구가 요구된다.

2. 수격현상 영향인자 민감도 분석

수격현상에 민감한 인자를 결정하기 위하여 수격현상에 영향을 주는 인자들을 변화시키면서 최대수두 변화를 비교하였다. 민감도 분석에 사용된 관로는 단일 관로로 구성하였으며 일반 구성도는 그림 1과 같다. 영향인자로는 관로의 직경과 관로의 길이, 관로내 파속, 관로의 초기유속, 관로의 마찰계수, 밸브의 완전폐쇄시간을 선정하였다. 이와같은 영향인자들의 최대압력수두의 변화율을 이용한 민감도는 그림 2에 나타나 있다.

* : 인천대학교 토목공학과 교수

** : 인천대학교 토목공학과 석사과정

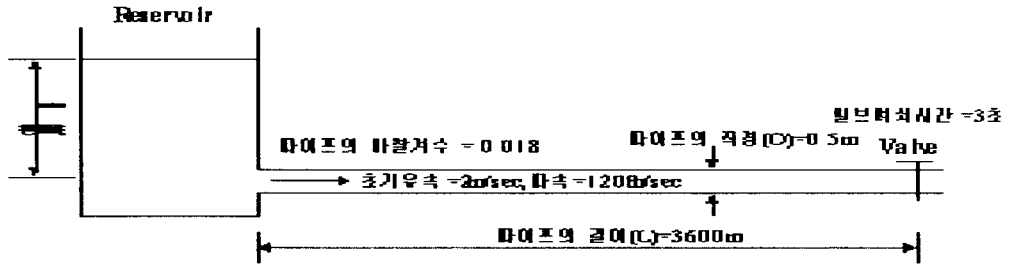


그림 1 민감도 분석을 위한 관로의 구성도

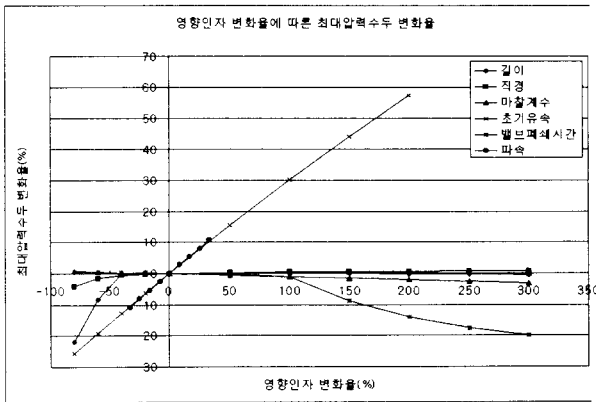


그림 2 영향인자들의 변화율에 따른 최대압력수두의 변화율
 나타나고 있다. 이것은 초기유속과 파속이 수격현상으로 인하여 나타나는 최대압력수두 변화에 매우 민감한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

3. 밸브의 폐쇄속도에 따른 민감도 분석

앞장에서 볼 수 있듯이 밸브의 폐쇄 시간에 따라서 나타나는 최대압력수두는 크게 변할 수 있다. 본 장에서는 밸브폐쇄 속도에 따른 최대압력수두의 변화를 살펴보고 어떻게 밸브를 폐쇄 하는 것이 수격현상에 영향을 적게 주는 지를 살펴보고자 한다. 우선적으로, 밸브의 폐쇄속도를 그림 3에서 보는 것과 같이 각 Case로 나누어 설정하고 그때 나타나는 최대압력수두를 살펴보았다. 각 Case별로 나타나는 최대압력수두는 그림 4와 그림 5에 나타나 있다.

그림 4~5에서 볼 수 있듯이 밸브의 폐쇄시간을 길게 할 경우에는 최대압력수두가 많이 낮아질 수 있음을 알 수 있다. 밸브를 폐쇄 할 경우 급격하게 닫는 다면 충분한 시간의 여유를 가지고 닫는 것이 수격현상으로 인한 피해를 예방할 수 있는 한 방법이다.

밸브의 폐쇄를 어떻게 운영하는 것이 좋은지는 그림 4~5에서 볼 수 있듯이 밸브의 폐쇄시간에 약간의 차이가 발생한다. 그림 6은 밸브가 완전히 닫히는 시간을 3초와 6초로 한 경우인데 나타나는 최대압력수두 차는 작지만 그 중에서도 Case 4의 경우에 최대압력수두가 가장 적게 나타나고 있으며 그 다음으로는 Case 7이 적게 나타나고 있다. 3초와 6초인 경우처럼 상당히 짧은 시간에 밸브를 닫을 경우에는 밸브의 폐쇄를 후반부에 많은 부분을 닫는 것이 최대압력수두를 낮추는데 더 효과적인 것으로 볼 수 있다. 그림 4는 장기간으로 완전히 닫히는 시간을 장기간으로 한 경우인데 이 경우에는 Case 1이 가장 적게 나타나고 있다. 이것은 밸브의 폐쇄 시간이 어느 이상이 되면 동일

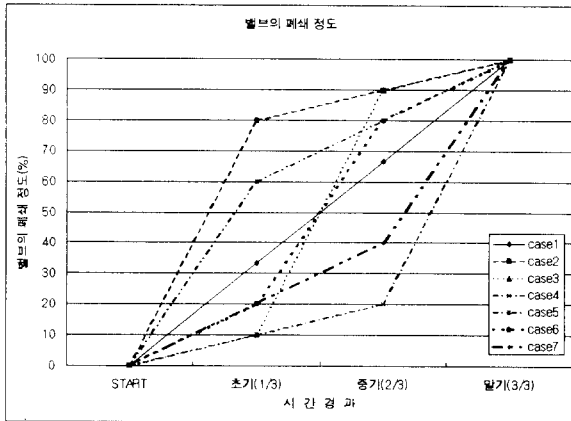


그림 3 밸브의 폐쇄 정도

해서는 파속을 감소시키거나 파속을 증가시킬 경우 초기유속을 같이 증가시키게 되면 최대압력수두가 낮아지게 된다.

한 속도로 단계 되면 최대압력수두를 낮추는데 좋은 효과를 얻는다는 것을 의미한다.

4. 파속 변화에 따른 민감도 분석

파속변화에 따른 민감도를 분석하기 위하여 초기유속을 변화시키면서 최대압력수두의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 그림 6과 같다. 파속이 일정할 경우 초기유속이 증가하면 초기유속의 영향에 따라 최대압력수두가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또 파속이 증가할수록 최대압력수두가 크게 나타나며 파속이 클수록 초기속도에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 압력수두를 낮추기 위

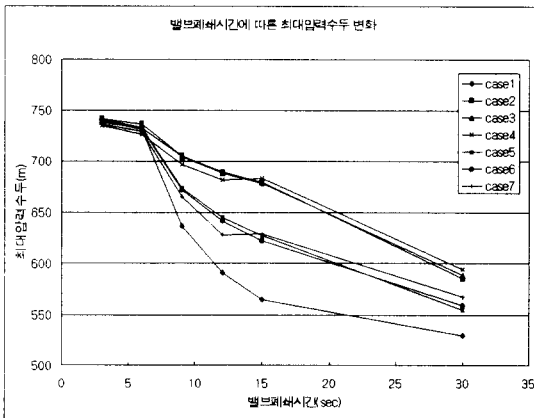


그림 4 장기 밸브폐쇄 정도에 따른 최대압력수두 변화

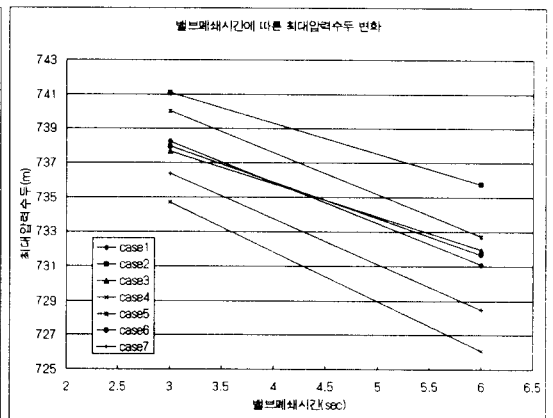


그림 5 단기 밸브폐쇄 정도에 따른 최대압력수두 변화

또 길이변화와 직경변화에 대하여 변화가 어떻게 발생하는지를 알아보기 위해 관로 길이가 가장 긴 경우와 짧은 경우를 비교하고 직경이 큰 경우와 작은 경우를 비교한 결과는 그림 7~8과 같다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 관로의 길이가 길어지더라도 발생하는 최대압력수두는 파속이 큰 경우에 압력수두가 크게 발생된다. 그림 8에서는 관로의 직경이 변하더라도 파속이 큰 경우에 압력수두가 크게 발생됨을 알 수 있다.

5. 초기유속 변화에 따른 민감도 분석

초기유속변화에 따른 민감도를 분석하기 위해 초기유속을 변화시키며 초기유속/파속비에 따른 최대압력수두의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 그림 9와 같다.

또 길이변화와 직경변화에 대한 변화를 알아보기 위해 관로 길이가 가장 긴 경우와 짧은 경우를 비교하고, 직경이 큰 경우와 작은 경우를 비교하였다. 그 결과는 그림 10~11과 같다. 초기유속이

큰 경우에는 파속 증가에 대해 민감하게 반응하게 되며 나타나는 최대압력수두가 크게 나타나게 된다. 초기유속에 영향을 미치는 것으로는 관로의 직경이 있는데 동일 유량의 경우 관로의 직경이 작아지게 되면 초기유속이 증가하게 됨으로 최대압력수두가 증가하게 된다. 따라서 최대압력수두를 낮추기 위해서 동일 유량의 경우 관로의 직경을 되도록 크게 함으로서 그 효과를 얻을 수 있다.

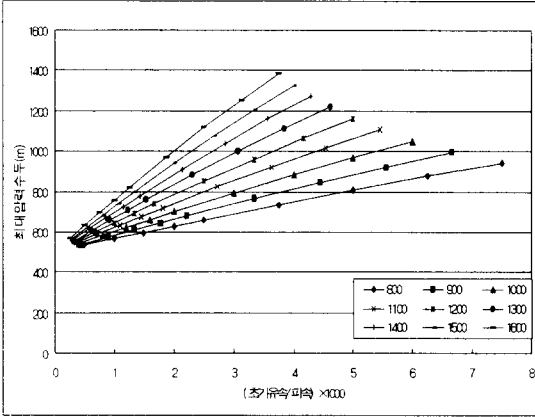


그림 6 파속변화에 따른 최대압력수두 변화

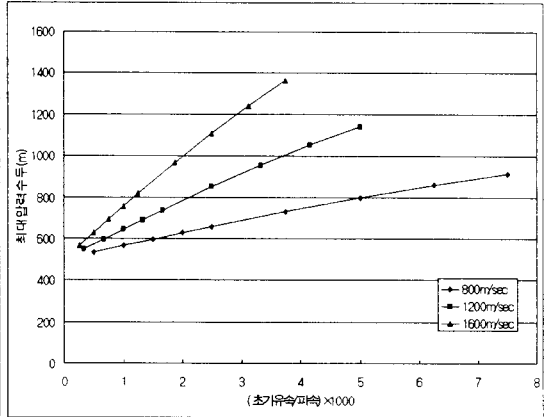


그림 7 7.2km 관로내 파속변화에 따른 최대압력수두변화

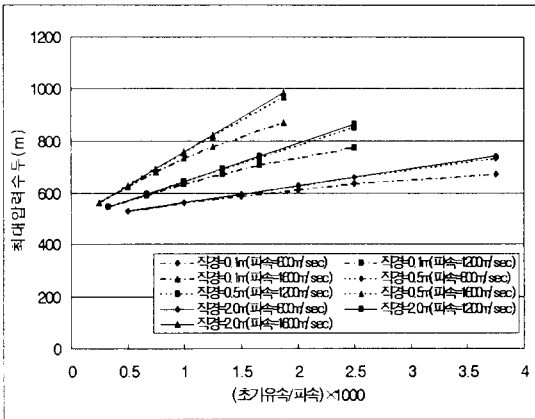


그림 8 직경 및 파속변화에 따른 최대압력수두 변화

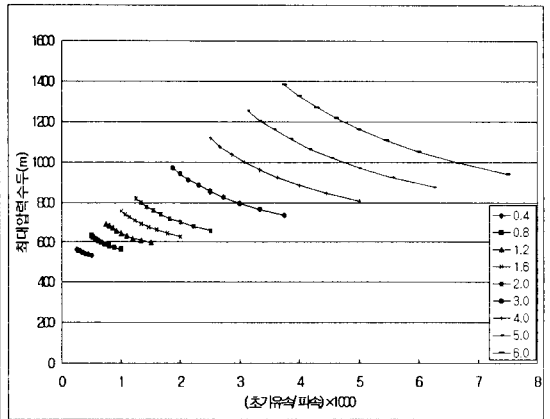


그림 9 초기유속 변화에 따른 최대압력수두 변화

6. 관로 길이 변화에 따른 민감도 분석

관로길이 변화에 따른 최대압력수두의 변화는 관로의 길이가 짧은 경우에 발생하게 된다. 관로 길이가 짧을 경우 다른 영향인자가 관로 길이 변화에 따른 최대압력수두에 영향을 주는지를 알아 보았다. 그 결과는 그림 13~15와 같다.

그림 13~15에서 볼 수 있듯이 관로의 길이가 긴 경우 마찰계수, 초기유속, 직경 값이 각각 큰 경우에 최대압력수두가 급격하게 감소하게 되는데 이것은 관로내 마찰손실로 인한 손실수두가 관로 길이가 길어짐으로 인하여 크게 되어 최대압력수두에 영향을 주기 때문이다.

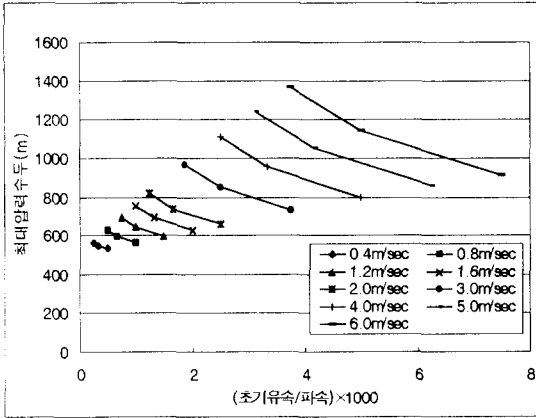


그림 10 7.2km 관로내 (초기유속/파속) 비에 따른 최대압력수두 변화

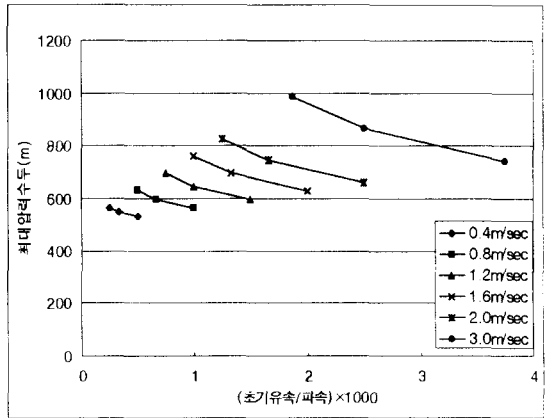


그림 11 관로 직경변화시 (초기유속/파속) 비에 따른 최대압력수두 변화

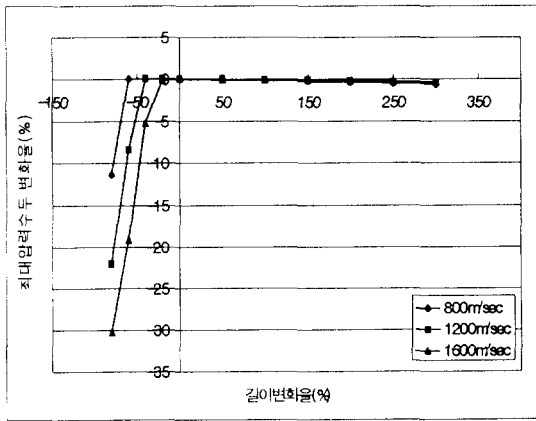


그림 12 파속 및 관로 길이 변화에 따른 최대압력수두 변화

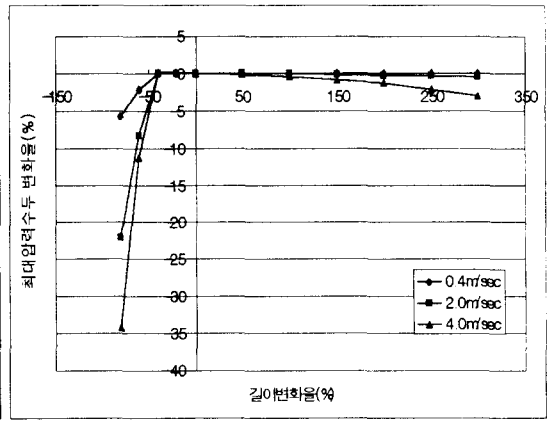


그림 13 초기유속 및 길이변화에 따른 최대압력수두 변화

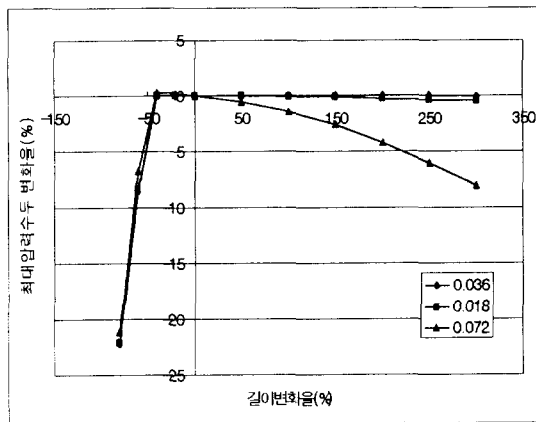


그림 14 마찰계수 및 관로 길이변화에 따른 최대압력수두 변화

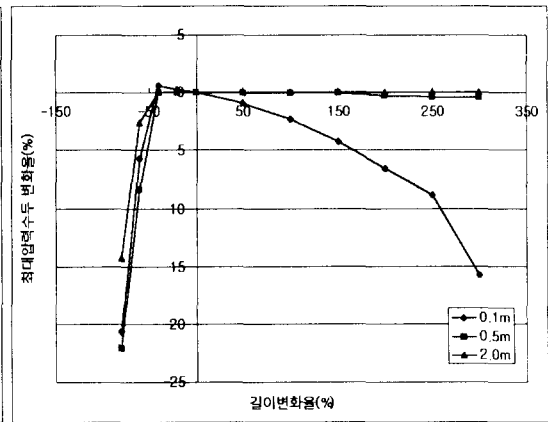


그림 15 관로 직경 및 관로 길이변화에 따른 최대압력수두 변화

7. 결 론

관로의 수격현상을 발생시키는 영향인자들을 변화시키며 영향인자들의 민감도를 분석한 결과 직경, 마찰계수는 최대압력수두의 변화에 민감하지 않은 것으로 나타났으며 관로의 길이의 경우 관로의 길이를 짧게 할수록 민감하게 반응하지만 길이가 길어지면 그 민감하지 않은 것으로 나타났다. 관로의 길이가 짧을 경우 파속 변화에 따라서 최대압력수두가 차이가 크게 발생하며 마찰계수, 초기유속, 직경을 크게 할 경우 관로의 길이가 길어지면 마찰손실 수두로 최대압력수두가 낮아지는 효과를 얻을 수가 있다.

최대압력수두 변화에 민감하게 영향을 주는 것으로 초기유속과 파속, 밸브폐쇄시간이 있으며 밸브의 폐쇄시간은 급격하게 닫는 경우에는 최대압력수두 변화율이 작게 나타나지만 시간이 길어지면 변화율이 커지면서 수두 상승량이 감소하는 것으로 나타났다. 초기유속과 파속은 변화율에 따른 최대압력수두의 변화율이 매우 크게 나타났으며 이것은 초기유속과 파속이 수격현상으로 인하여 나타나는 최대압력수두 변화에 매우 민감한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

밸브의 폐쇄 시간에 따라서 나타나는 최대압력수두는 크게 낮아질 수가 있는데 밸브의 폐쇄시간을 길게 할 경우 그 효과가 크게 나타나고 있다. 또 밸브의 폐쇄 시간을 매우 짧게 할 경우 후반부에 폐쇄 비율을 높일 경우가 압력수두가 낮아지는 효과를 얻을 수 있다. 폐쇄 시간이 길어지면 닫는 속도를 일정하게 할 경우 압력수두를 낮추는 효과를 얻을 수 있다.

파속이 일정할 경우 초기유속이 증가하면 초기유속의 영향에 따라 최대압력수두가 크게 증가하는 것으로 나타났으며 초기유속이 파속으로 발생하는 최대압력수두에 크게 영향을 줄 수 있다. 또 초기유속이 큰 경우에는 파속 증가에 대해 민감하게 반응하게 되며 나타나는 최대압력수두가 크게 나타났다. 초기유속에 영향을 미치는 것으로는 관로의 직경이 있는데 동일 유량을 보낼 경우 관로의 직경이 작아지게 되면 초기유속이 증가하게 되므로 최대압력수두가 증가하게 된다. 따라서, 최대압력수두를 낮추기 위해서는 관로의 직경을 되도록 크게 함으로서 그 효과를 얻을 수 있다.

지금까지 알아본 것과 같이 수격현상에 영향을 주는 인자들의 민감도를 판단하여 적절히 사용하게 되면 수격완화 시설물 설치이전에 발생하는 최대압력수두를 줄일 수가 있으며 적절한 수격완화 시설물을 설계할 수가 있게 된다. 본 연구와 동시에 수격완화 시설물의 최적설계에 관한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Simpson, A. R., and Wylie, E. B. (1991). "Large water-hammer pressures for column separation in pipelines." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp. 1310-1316.
2. Halliwell, A. R. (1963). "Velocity of a water-hammer wave in an elastic pipe." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 89, HY4, pp. 1-21.
3. Chaudhry, M. H. (1986). "Applied hydraulic transient." Van Nostrand Reinhold, New York.
4. Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1984). "Fluid transient." Feb Press, Ann Arbor, Michigan.
5. Watters, G. Z., Jeppson, R. W., and Flammer, G. H. (1976). "Water hammer in PVC and reinforced plastic pipe." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, HY7, pp. 831-843.
6. 최계운, 박한범, 권영식, 김일복 (1998). "관로내 수격작용의 해석 및 응용." 수공학 workshop 교재.