

수격현상의 실제와 모델 적용성 평가

최계운*, ○곽한범**

1. 서 론

수격현상 또는 수격작용이란 관수로내에서 발생하는 과도흐름으로 인하여 발생되어지는 현상을 말한다. 일반적으로 관수로내에서 물의 흐름은 유량의 변화가 거의 없으며 물이 압축되지 않는다는 가정으로 해석되어지는 경우가 대부분이나 관로내 흐름상태에 따라서는 물이 불완전유체인 상태 즉 물이 압축되는 상태로 흐르는 경우가 있으며, 이와같이 물이 흐르는 도중 극히 짧은 시간에 정류상태에서 또 다른 정류상태로 변하는 흐름을 과도흐름이라 하며, 이와같은 과도흐름은 펌프의 급정지나 급가동, 밸브의 급폐쇄 등에서도 나타나게 되며, 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 저지 탱크, 체크 밸브, 완화장치, 스탠드 파이프등 이며 이들 수격방지 또는 완화 시설물들은 관로상 수격작용에 의하여 발생하는 압력의 급변화를 계산한 이후에 설계자의 판단에 의하여 설치되게 된다. 그러나, 지금까지 수격방지 또는 완화 시설물의 설계 반영은 설계자의 주관적인 판단에 크게 의존하고 있다. 여러 수격완화 또는 방지시설의 선정뿐만 아니라 선정된 시설의 크기 결정은 대부분의 경우 시행착오법에 의하여 되며, 최종 결정된 시설물의 크기도 과연 최적인가에 대한 의문이 남게 된다. 따라서, 본 논문에서는 관수로내에서 발생하는 수격현상과 이를 방지하거나 완화하는 시설물을 설계하는데 모델을 어떻게 사용하고 있는지에 관하여 적정성 여부를 검토하고자 한다. 적정성 검토를 위하여 사용되는 프로그램은 Kentucky 대학에서 개발되어 범용적으로 사용되고 있는 SURGE5.2를 사용하였다.

2. 밸브 개폐에 의한 수격현상과 모델의 적용

밸브조작에 의한 수격현상은 관 시스템을 운영하는 중에 발생될 수 있는 수격현상 중 발생 가능성이 가장 높으며 주로, 밸브의 급폐쇄 또는 급개방시에 수격현상이 발생된다. 밸브의 급폐쇄 또는 급개방시 사용 시간에 따라 발생하는 압력의 변화는 상당한 차이를 나타내며 일반적으로 폐쇄 또는 개방을 시키는 시간이 짧을수록 압력은 크게 나타난다. 밸브의 개폐에 의한 수격현상을 By-Pass를 가진 관로의 경우, 조압수조 및 스탠드 파이프가 설치되어 있는 경우, 공기실 또는 완화장치가 설치되어 있는 경우, 압력 릴리프 밸브 또는 공기변이 설치되어 있는 경우로 나누어 모델 적용성을 판단 하였다.

2.1 By-Pass관을 가진 관로내 유입밸브 폐쇄시

관로내에 발생되어지는 수격현상을 방지하기 위하여 By-Pass 관로가 이용될 수 있다. By-Pass관을 설치할 때 물을 송수하는 관로 시스템 구성과 수격현상으로 인하여 발생하는 압력의 크기 정도 등의 많은 변수에 따라 By-Pass 관의 설치 위치 및 관의 크기가 결정되어 진다. 이와같이 관로내에서 발생하는 수격현상을 By-Pass 관으로 방지하는 경우, 기존의 수격현상 해석용 프로그램을 단순히 적용함으로써 한번에 수격현상을 해결 하기는 쉽지 않으며 따라서 실제 프로그램을 적용하는데 있어서는 상당한 가정과 반복계산을 통해서만 수격현상을 방지할 수 있는 By-Pass 관의 크기를 결정할 수가 있다. 수격현상을 방지할 수 있는 적절한 By-Pass 관을 계산하기 위해서는 그림 1과 같은 절차를 걸쳐 적정 By-Pass 관이 결정되도록 상당한 계산을 실시할 수 밖에 없다.

* 인천대학교 토목공학과 교수

** 인천대학교 토목공학과 석사과정

이와같은 By-Pass 관을 사용하여 수격현상을 방지하는 경우 적절한 By-Pass 관을 결정하는 데에는 그림 1 에서 볼 수 있듯이 상당한 반복 계산을 실시할 수 밖에 없다. 이와같은 By-Pass 관을 사용하여 수격현상을 방지 또는 완화하고 있는 경우, 실제 적정성 실제 사용되고 있는 D정수장의 경우를 예를 들어 설명하여 보고자 한다. 그림 2는 실제 D 정수장 취수 펌프장에서부터 D 정수장까지의 By-Pass관이 없이 구성된 관로의 시스템을 도시하고 있다.

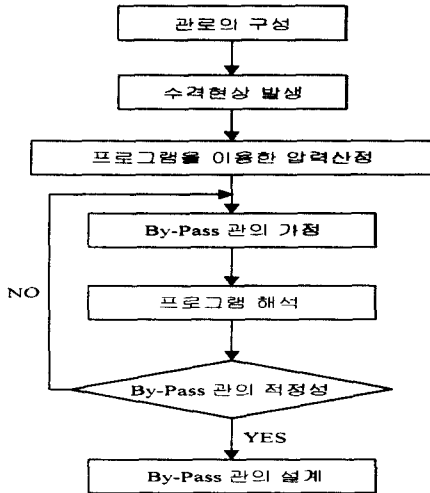


그림 1. By-Pass 관을 설치한 관로의 해석 절차

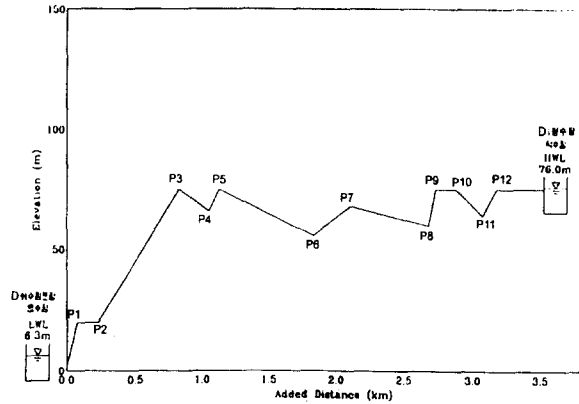


그림 2. D 취수펌프장에서부터 D 정수장까지의 관로 시스템

이와같은 관로상의 유입밸브가 급폐쇄 될 때 발생하는 수격현상을 방지 또는 완화하는 방안을 찾기 위하여는 우선적으로 관로상에 수격작용을 발생시켜 압력의 변화를 검토하여야 한다. 그림 3은 수격방지시설이 없는 상태에서 밸브를 급폐쇄하여 발생된 압력은 펌프 설치 지점에서 최대 453.5m의 수두가 발생하고 있다.

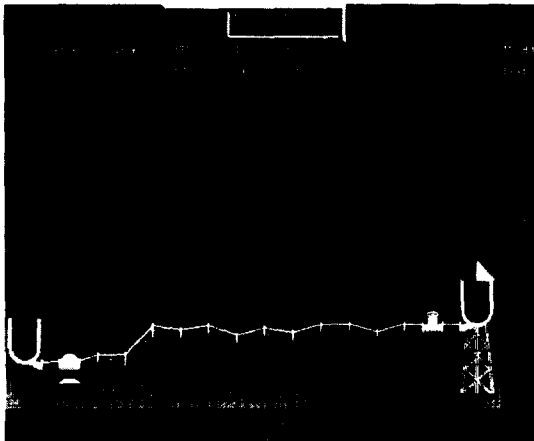


그림 3. 밸브의 급폐쇄로 인한 수격현상 (수격방지 시설물이 없는 경우)



그림 4. 밸브의 급폐쇄로 인한 수격현상 (By-Pass 관을 설치한 경우-저항계수:10000, 1개)

이를 완화시키기 위한 방안으로 그림 4~6과 같이 By-Pass 관을 설치하여 압력 완화를 도모하였다. 이와같은 경우 실제로 설치될 By-Pass 관을 설계하기 위하여는 이와같은 계산을 반복하여, 계산된 결과중에서 최적의 안을 선택할 수 밖에 없다. 이와같은 경우 상당한 계산시간을 요할뿐만 아니라 선정된 By-Pass 관이 최적이냐 할 수 있는지도 의문이 간다.

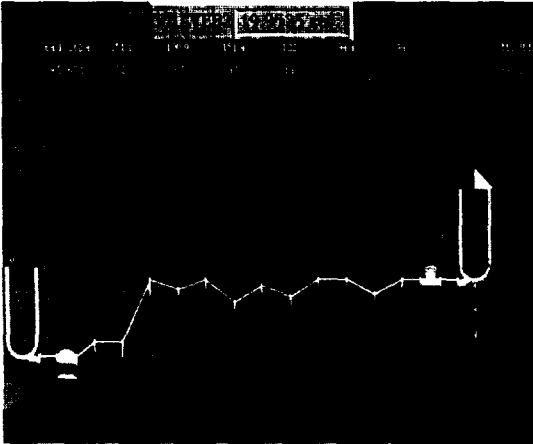


그림 5. 밸브의 급폐쇄로 인한 수격현상
(By-Pass 관을 설치한 경우-저항계수:20000, 1개)

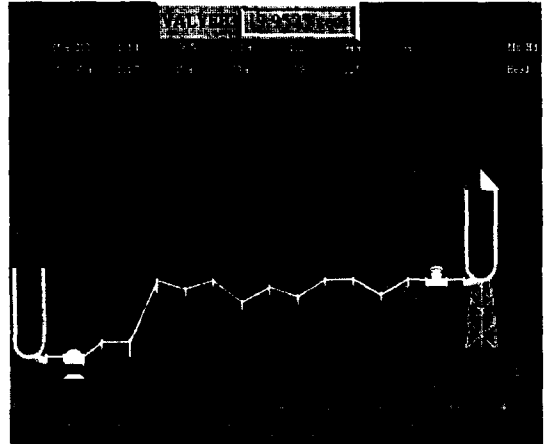


그림 6. 밸브의 급폐쇄로 인한 수격현상
(By-Pass 관을 설치한 경우-저항계수:10000, 2개)

2.2 외부적 수격완화 시설물이 설치된 관로내 밸브의 개폐시

외부적으로 설치될 수 있는 수격완화 시설물로서는 공기실, 스탠드 파이프, 완화장치, 조압수조등을 들 수 있다. 여러 가지 외부적으로 설치될 수 있는 수격완화 시설물 중 어느 것을 사용해야 하는 것은 계산을 통하여 결정하게 되는데 위에서 By-Pass 관을 계산하는 절차와 동일하게 반복 가정을 통하여 계산하게 된다. 또 적합한 수격완화 시설물을 찾기 위해서는 관로 시스템에 공기실, 스탠드 파이프, 완화장치, 조압수조 등을 하나씩 가정 설치하여 찾게 된다. 외부적 수격완화 시설물의 계산하는 데 있어 어려움을 알아보기 위해 실제 관로 시스템을 적용하여 보았는데 적합한 관로 시스템은 위에서 사용한 관로 시스템을 적용하였다.

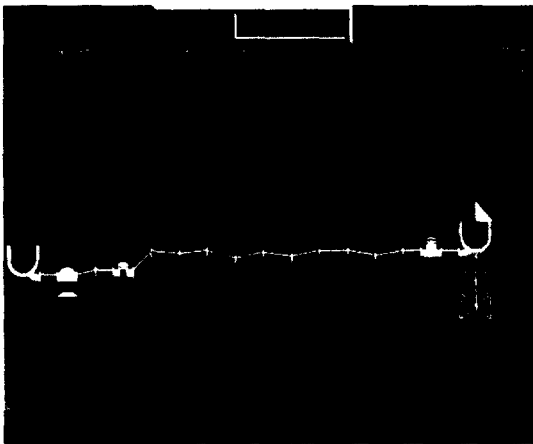


그림 7. 조압수조를 설치한 경우(P2 지점)

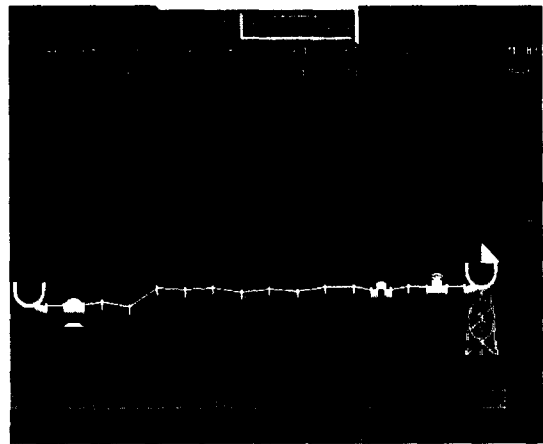


그림 8. 조압수조를 설치한 경우(P13 지점)

그림 7~그림 9는 그림 2에 표시된 P2 지점과 P13 지점에 각각 조압수조를 설치한 경우와 P2지점과 P13 지점에 동시에 조압수조를 설치한 경우의 압력변화를 나타내고 있다. 이것은 P2 지점에 임의로 가정하여 직경 12m인 조압수조를 설치하여 계산하고 다시 P2 지점을 없애고 P13 지점에 조압수조를 설치하여 계산하고 다시 P2 지점과 P13 지점에 조압수조를 크기를 가정하여 설치하여 계산하였다.

이 경우 P2 지점에 조압수조를 설치하는 경우가 가장 압력이 적게 걸리는 것으로 나타나 있다. 따라서 P2 지점에 조압수조를 설치하는 것이 적당하고 할 수 있다.

계산하는 가정을 보면 수격완화 시설물이 없는 관로시스템의 해석결과를 보고 가장 압력이 크게 발생하는 곳

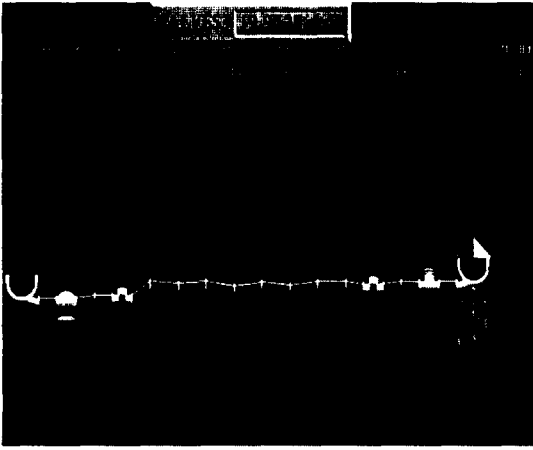


그림 9. 조압수조를 설치한 경우(P2, P13 지점)
우며 여러번의 가정 반복계산의 과정을 거쳐야만 한다.

그림 10~그림 12는 밸브의 급폐쇄로 인해 발생하는 수격현상을 완화하기 위해 P2 지점과 P13 지점에 각각 압력조절밸브를 설치한 경우와 P2 지점과 P13 지점에 동시에 압력조절밸브를 설치한 경우를 나타내고 있다

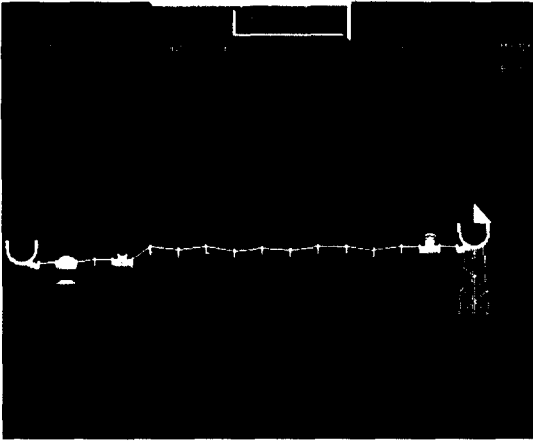


그림 10. 압력조절밸브 설치시(P2 지점)

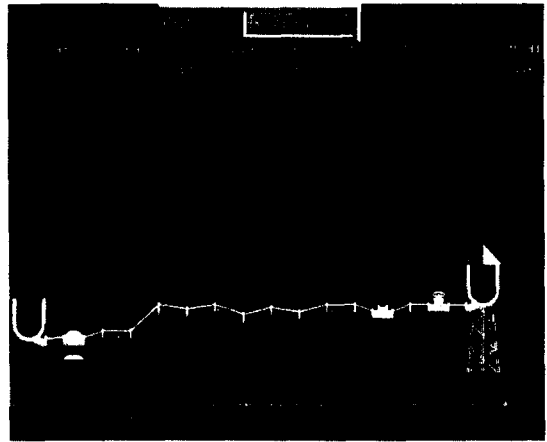


그림 11. 압력조절밸브 설치시(P13 지점)

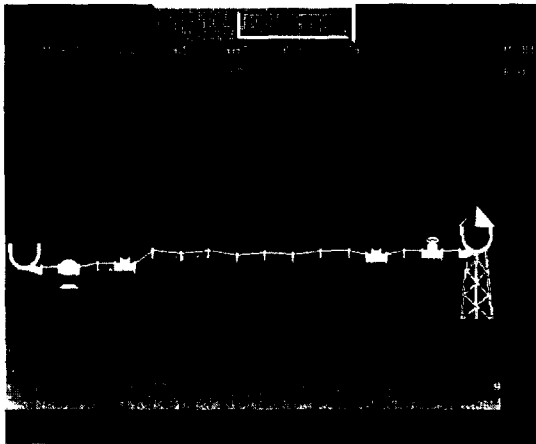


그림 12. 압력조절밸브 설치시(P2, P13 지점)

을 찾아 그 곳에 임의대로 가정하여 조압수조 또는 그 외의 외부적 수격완화 시설물을 설치하여 계산하고 다시 크기 및 위치를 조정하여 계산을 여러번 실시하여 가장 적합하다고 생각되는 시설물을 결정하게 되어 선정된 시설물이 최적이라 할 수 있는지 의문이 간다.

2.3 밸브 및 공기변이 설치된 관로내 밸브의 개폐시 수격현상을 완화하기 위하여 설치되는 밸브 및 공기변을 설치함으로써 수격현상을 완화시킬 수가 있다. 이 수격완화 시설물은 관로내에 설치하여 수격현상을 완화시키는 역할을 하게 된다. 이 경우 설치되는 밸브 및 공기변은 각 지점에 발생하는 압력에 따라 설치되는 위치나 크기가 달라지게 된다. 적합한 밸브 및 공기변의 위치 및 크기를 결정하기 위해서는 기존의 수격현상 해석 프로그램의 단순한 적용으로는 매우 어려

그림 10, 11, 12에서 볼 수 있듯이 적합한 시설물의 위치 및 크기에 따라 발생하는 압력은 차이를 나타내고 있다. 따라서 가장 적합한 위치와 크기를 결정하기 위하여는 반복적인 계산이 수행되어야 한다. 계산결과 P2 지점보다 P13 지점에 설치하는 것이 압력의 크기가 작으므로 시설물은 P13 지점에 설치하도록 하였다. 이러한 계산 과정은 임의대로 사용자가 가정하는 것으로 여러번의 가정과 반복계산을 해야 하므로 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또 시설물의 설치 지점은 그 중에 가장 좋다고 생각되는 지점을 정한 것이므로 가장 적합하다고는 할 수 없다.

3. 펌프에 의한 수격현상과 모델의 적용

펌프에 의한 수격현상은 밸브 제어에 의한 수격현상과 마찬가지로 관로 시스템에 수격현상이 발생할 수 있는 원인 중 가장 큰 원인으로 알려져 있다. 펌프에 의한 수격현상 일반적으로 펌프를 가동시나 정전으로 인한 갑작스러운 정지시에 발생하는 경우가 많다. 펌프의 갑작스러운 작동이나 정지시에 발생하는 수격현상을 완화하기 위해 설치하는 수격완화 시설물로 체크밸브가 있으며 또 밸브에서와 마찬가지로 외부에 설치되는 시설물이 있고 내부에 압력조절밸브를 설치하는 경우도 있다. 펌프에서 발생하는 수격현상을 완화하기 위한 시설물의 설치시 시설물의 크기와 설치 위치등이 적합해야만 수격현상을 완화 할 수 있게 된다. 기존의 수격해석 프로그램을 적용하여 적합한 시설물을 설계하기 위하여는 다른 경우와 마찬가지로 많은 가정과 반복계산을 통하여야 한다.

3.1 체크 밸브를 이용한 수격현상 방지시

펌프가 갑자기 정지하게 되면 펌프로 인하여 올라가 있던 물의 수두가 점차적으로 떨어지면서 상류와 하류로 물의 압력이 전달되게 된다. 이 경우 체크 밸브가 없다면 물의 모든 압력이 펌프에 미치게 된다. 그렇게 되면 펌프가 파괴되며 이로 인하여 펌프장이 침수되는 사고가 발생하게 된다. 체크 밸브가 설치되어 있다면 펌프가 정지됨과 동시에 체크 밸브가 점차적으로 닫히게 되어 물의 압력을 막아주게 된다. 이 체크밸브의 닫히는 시간에 따라 발생하는 압력이 차이가 있게 되는데 이 경우를 각각의 폐쇄 시간에 따라 계산하였으며 결과는 그림 13~그림 16과 같다.

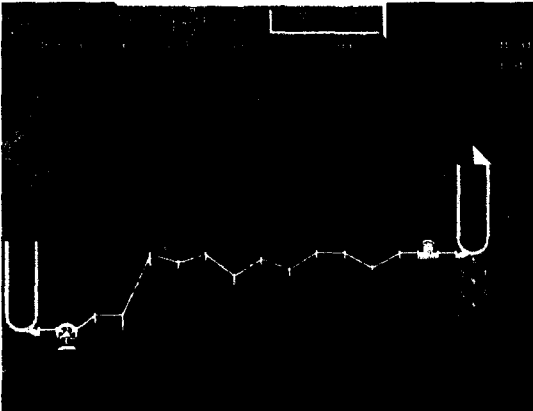


그림 13. 펌프의 급정지에 의한 압력발생
(체크밸브가 없는 경우)

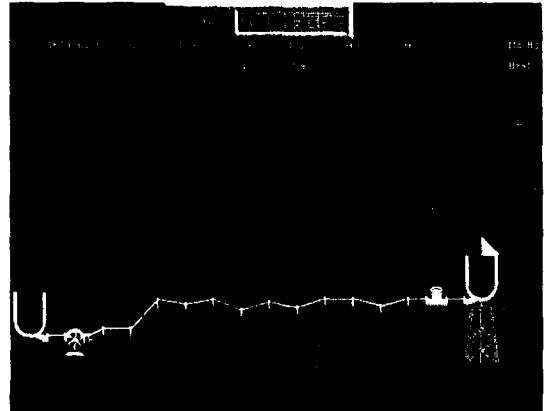


그림 14. 펌프의 급정지에 의한 압력발생
(체크밸브의 폐쇄시간이 10초인 경우)

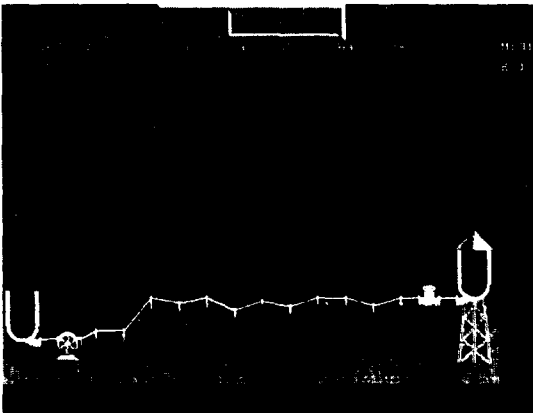


그림 15. 펌프의 급정지에 의한 압력발생
(체크밸브의 폐쇄시간이 20초인 경우)

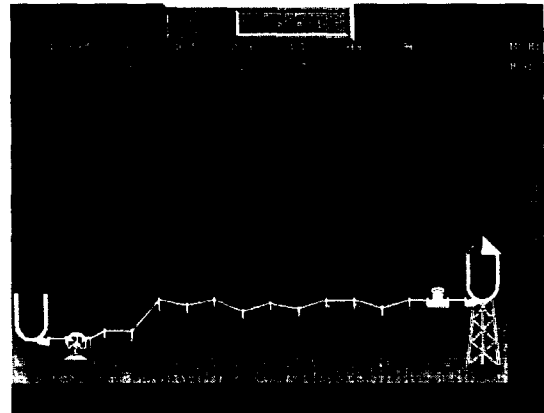


그림 16. 펌프의 급정지에 의한 압력발생
(체크밸브의 폐쇄시간이 30초인 경우)

위의 4개의 그림을 볼 때 체크밸브가 서서히 폐쇄되어 20초에 완전히 폐쇄되는 경우가 가장 적합한 폐쇄 시간으로 판단된다. 그러나 이 경우 역시 적합한 폐쇄시간을 찾기 위해 여러번의 반복과 가정을 실시해야 하므로 시간이 많이 소요되었으며 더 많은 가정을 해야 하는 어려움이 있다.

3.2 외부적 수격완화 설비를 이용한 수격현상 방지시

외부적 수격완화 설비로는 조압수조, 스탠드 파이프, 공기실, 완화장치 등이 있다. 여러 가지 외부적 수격완화 시설 중 관로내 수격완화에 적합한 시설물을 찾는 것은 쉬운 일은 아니다. 기존 수격해석 프로그램을 이용하여 가정과 반복계산을 함으로써 적합한 시설물에 접근하게 되며 이 경우 각 지점마다 조압수조를 설치하고 계산을 한 뒤에 가장 압력이 적게 나타나는 지점을 결정한 뒤 조압수조의 크기를 결정하면 된다. 이 계산은 여러 위치에 조압수조를 설치, 제거하여 계산을 실시해야 하며 크기 결정시에도 가정에 의한 반복계산을 해야 하므로 많은 시간이 필요하게 된다. 또 설치된 조압수조는 가정에 의한 계산을 실시하여 사용자가 가장 안전하다고 생각되는 위치와 크기이므로 오차가 크게 나타날 수도 있으므로 최적의 시설물이라고는 할 수 없다.

3.3 압력조절밸브 이용한 수격현상 방지시

압력조절밸브는 관로 외부에 설치되는 조압수조, 스탠드 파이프, 공기실 등과 달리 관로내에 설치되는 시설물이라고 할 수 있다. 압력조절밸브를 관 외부가 아닌 내부에 설치함으로써 더 좋은 수격완화의 결과를 가져 올 수 있다. 이와 같은 경우를 계산할 때도 위의 경우와 마찬가지로 적절한 위치를 먼저 계산을 통하여 찾고 그 위치에서 압력조절밸브의 크기를 가정하여 계산을 반복함으로써 적합한 압력조절밸브를 결정하게 된다. 이러한 계산은 많은 시간을 필요로 하게 되며 최적의 시설물을 찾는 것은 상당히 어렵게 된다.

4. 기타 수격현상과 모델의 적용

4.1 수주분리에 의한 수격현상

수주분리는 관내에 밸브의 급작스러운 폐쇄 또는 펌프의 급기동 및 급정지시 수증기압 이하로 압력이 떨어져 공기가 발생하는 공동현상이 발생한 뒤 이 공기로 인하여 물의 진후단이 분리 되는 현상을 말한다. 수주분리가 일어날 경우 관이 상승하는 부분에 모이게 되고 급작스럽게 압축되므로 인하여 관에 상당한 압력을 미치게 되어 파괴를 유발하게 된다. 수주분리로 인한 수격현상은 액체와 기체가 같이 존재하는 수격현상으로 그 해석이 상당히 어렵다. 따라서 수격현상을 해석할 때 수격완화 시설물이 없는 관로의 해석의 경우에 있어 입력되는 자료에서 액체와 기체의 입력자료가 동시에 입력되지 못하기 때문에 기존 모델로 이를 해석하는 것은 거의 불가능하다.

4.2 터어빈에 의한 수격현상

터어빈에 의해 발생하는 수격현상은 터어빈을 작동하는 경우와 전기부하의 허용 또는 기각시에 발생하게 된다. 이 경우 모델에 적용할 경우 펌프의 경우와 비교할 때 보다 전기부하의 허용 또는 기각 등의 많은 자료가 필요하게 된다. 그러나 기존의 수격해석 프로그램은 입력자료의 구성시 터어빈의 특성자료를 입력할 수 없으므로 해석하는 것이 거의 불가능하다.

5. 수격현상의 모델 적용성과 한계성

위에서 살펴 본 것과 같이 수격현상은 여러 가지 경우에 발생됨을 알 수 있다. 각각의 수격현상을 원인으로 나누어 그 수격현상을 완화시키는 각각의 시설물을 계산하는데 있어 실제 수격해석 프로그램을 사용하여 계산하였다. 계산을 실시하면서 기존 프로그램에 한계성이 있음을 알 수 있으며 시설물을 설계함에 있어서 시설물의 설치 위치와 크기 등을 가정하여 반복계산을 실시해야 하는 어려움이 있으며 또 많은 시간이 필요로 하게 된다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 수격현상이 관로 시스템에서 발생하는 경우와 수격현상을 실제 모델에 적용함에 있어서의 적용성과 한계성을 파악하였다.

첫째로, 밸브의 급폐쇄 및 급개방에 의해 수격현상이 발생하게 되며 이 경우 수격방지 또는 수격완화 시설물은 By-Pass 관을 사용한 경우, 외부적인 수격완화 시설물을 사용한 경우, 밸브 또는 공기변을 사용한 경우로 나누어 모델을 적용하여 시설물을 설계하였다. 수격방지 또는 완화 시설물을 계산하는 과정은 사용자가 임의대로 가정하여 시행착오를 거쳐 반복계산을 실시하여야 했다. 따라서 시간이 많이 소요되었을 뿐만 아니라 최적의 시설물인지에 대한 의문이 간다.

둘째로, 펌프의 급시동 및 급정지에 의해 수격현상이 발생하게 되며 이 경우 수격방지 또는 수격완화 시설물은 체크밸브를 사용한 경우, 외부적인 수격완화 시설물을 사용한 경우, 압력조절밸브 사용한 경우로 나누어 모델을 적용하여 시설물을 설계하였다. 이 경우에도 밸브의 급폐쇄 및 급개방에 의한 수격방지 또는 수격완화 시설물을 설계하는 경우와 마찬가지로 사용자가 임의대로 가정하여 시행착오를 거쳐 반복계산을 실시하여야 했다. 따라서 시간이 많이 소요되었으며 최적의 시설물인지에 대한 의문이 간다.

셋째로, 수주분리로 인해 수격현상이 발생되며 또 터어빈의 전기부하의 기각 또는 허용시에 수격현상이 발생하게 된다. 이 경우는 기존 모델로 적용하는 것은 거의 불가능 했다.

따라서, 향후 수격완화 시설 또는 방지 시설의 종류 및 용량 등을 결정하는 최적 설계를 위한 프로그램이 개발되어 광역상수도뿐만 아니라 각종 상수도 시설에서 수격작용을 방지할 수 있는 시설결정에 크게 이바지하기를 기대한다.

참 고 문 헌

- BHRA Fluid Engineering, 4th International Conference on Pressure Sures, Bath, England, 1983.
- Chaudhry, M. H., Applied Hydraulic Transient, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
- Streeter, V. L., "Waterhammer Analysis of Pipelines", J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 90, No. HY4, 1964.
- Streeter, V. L., and Wylie, E. B., Hydraulic Transients, McGraw-Hill, New York, 1967.
- Watters, G. Z., Analysis and Control of Unstead Flow in Pipelines, 2nd ed., Butter-worth, Woburn, Mass, 1984.
- While, E. B., & Streeter, V. L., Fluid Transients, Feb Press, Ann Arbor, Michigan, 1984
- 김경엽, 수격현상계산에 의한 펌프장 에어챔버의 설계도표 개선 및 응용, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1986.
- 이영범, 대형 펌프 관로계에서의 수격현상에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문, 1989.
- 최계운, 곽한범, 권영식, 김일복, 관로내 수격작용의 해석 및 응용, 수공학 workshop 교재, 1998.