

폐쇄관로내에서의 공기발생원인과 영향

김 일 복*

1. 서 론

상수공급관로 또는 하수이송관로 등의 폐쇄관로내에서 진동과 소음이 심하게 발생되고 또한 배관부식이 급격히 진행되어 이로 인해 배관파손이 문제되는 펌프 및 관로시스템을 조사하고 원인분석을 한 결과 주요 원인이 폐쇄관로내에서의 공기에 의한 것임을 알 수 있었다. 이러한 폐쇄관로내에서 공기발생원인은 이미 잘 알려진 바와 같이 관로계통에 최초 충수시 형성되는 공기층의 공기와 물속에 용존된 공기가 일정하게 흐르는 유체(물) 속에서 압력이나 속도의 변화에 의해 용해되어 발생하는 공기, 관로내 부압상태에서의 공기유입, 공기밸브와 펌프흡입과정(vortex action)에서 관로계통으로 유입되는 공기 등이다.

이외에도 일정한 압력하에서 액체를 가열하거나 일정한 온도에서 압력을 낮게 변화시키면 기포(pocket of air)가 발생하는 원리에 의거 관로시스템에서도 상부로 가면 압력이 낮아져서 기포가 많이 발생되는데 이 기포는 공기(산소+질소)와 수증기가 공존하고 있다. 즉 압력이 낮아지면 기포의 부피가 증가하게 되므로 관로계통에서 상부로 갈수록 기포의 비율은 훨씬 크다. 따라서 일반적으로 폐쇄관로의 공기발생은 관로내의 유체(물)흐름이 있을 경우만 발생하는 것으로 알고 있지만 정지 상태에서도 앞에 언급한 현상에 의해 공기발생이 계속 일어나고 있으므로 송수관로나 상수관망에서 사용중지시와 야간시에 공기발생이 많아짐을 고려하여 폐쇄관로내 공기에 의한 영향 및 압력변동현상을 조사제시 하였다.

2. 공기발생원인

폐쇄관로내에 공기가 용존하는 것은 관로내의 물이 대기중의 공기와 접촉함으로써 침입되거나 보급수에 이미 용존되어 있는 공기가 물속에 완전히 용해된 상태로 관로내를 흐르다가 배관중의 공기상태가 어떤 온도와 압력하에서의 공기용해도 보다 크기 때문이다. 즉 이것은 그림 1.에서와 같이 정적인 상태에서 첫째, 일정한 압력에서 액체를 가열할 때 둘째, 일정한 온도에서 압력을 낮게 변화할 때 셋째, 배관시스템의 피에조수두에 따른 기포(pocket of air)변화 등이 있다. 이러한 공기의 역학적인 상태를 결정하는 법칙으로는 HENLY의 법칙, DALTON의 법칙, BOYLE의 법칙 등 3가지가 있다.

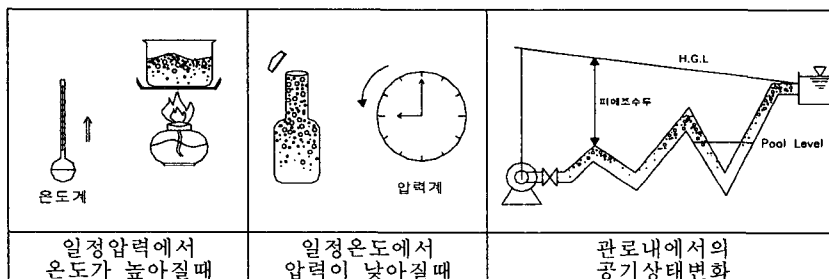


그림 1. 공기발생 및 변화개요도

- HENLY의 법칙: $X=P/H$
X: 어떤 온도에서의 기체의 용해도(mole-fraction)
P: 기체의 분압(atm)
H: HENLY상수 (기체의 종류와 온도에 관한 함수, atm/mole-fraction)
- DALTON의 법칙(분압법칙): $P= P_o+P_n+P_v$
P: 기포의 압력

Po, Pn, Pv : 산소, 질소, 수증기의 분압 · BOYLE법칙: $PV = P_1V_1 = P_2V_2$ P: 기체의 분압, V: 기체의 체적
동적상태가 아닌 정적상태에서도 폐쇄관로내에서 공기가 발생이 되고 관로누수시 공기층 형성이 급전 됨.

* (주)유신코퍼레이션 기전부 이사 (ibok@yooshin.co.kr)

3. 실제 관로시스템조사와 결과

위와같은 현상으로 발생된 공기에 의해 폐쇄관로 내의 소음과 진동, 관로파손 등의 현상이 나타난 실제 운영되고 있는 펌프 및 관로시스템 2개소를 조사한 결과 공기의 영향이 매우 크다는 것이 확인되었다.

(1)호형가압장의 송수관로시스템

- 펌프시스템: 1.11m³/min×51m×2대(1대 예비) : 편흡입볼류트형 모터펌프
- 관로시스템: 호형가압장→(포두면분기) →도화면: φ200×11,760m
- 현상: 포두면 분기지점 하부관로에서 관로의 파손발생 및 펌프기동시 진동이 심함

(2)와부정수장의 회수관로시스템

- 펌프시스템: 25m³/min × 18m × 2대(1대 예비) : 수중입축사류형 모터펌프
- 관로시스템: 회수조 내 집수정 → 착수정 : φ600 × 360m
- 현상: 펌프의 정지 및 기동시 진동이 심하고 곡관 기초지지볼트의 이완

위 2개소의 원인분석을 위한 압력변동 시뮬레이션은 미국 캔터키대학에서 개발된 SURGE5를 이용하여 실제 펌프 및 관로시스템에서 발생되고 있는 현상이 단순히 수충격에 의한 즉 관로내의 밸브 차단, 펌프의 정지 등의 유속변화에 의해 소음 진동이 발생되는 것인지, 아니면 관로내 형성된 공기에 의한 소음 진동인지를 비교 검토하였으며 이중 어느것이 실제관로에서 일어나는 현상과 동일한가를 검증하였다.

이 과정에서 기존 설치된 관로시스템의 문제점 및 개선사항이 발견되었으며 이중 대표적인 것은 그림 2.와 그림3.처럼 펌프의 장시간 가동중지시 동수구배의 변경에 따른 공기층형성과 요즘 많이 사용되고 있는 그림 4.의 수중펌프의 수직관로내(H.W.L과 전동밸브사이) 에서의 공기층(수주분리) 형성 등으로서 이때 형성된 공기층의 영향은 관로내에서 유속의 급격한 변화를 초래하고 공기가 압축 팽창하면서 그림 5.와 같이 매우 심각한 부압 및 상승압이 발생되어 심한 경우 관로파손의 주요원인이 되고 있었다.

3-1 호형가압장송수관로 시스템

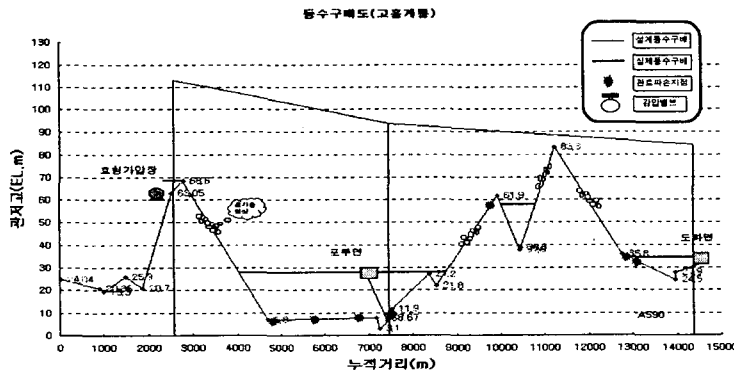


그림 2. 장시간가동중지시 동수구배의 변경상태

송수관로 설계상에서는 펌프가동 시에는 충분한 동수구배가 형성되는 것으로 되어 있지만 실제운전시와 장시간 운전중지시의 동수구배는 그림 1.과 같이 Pool Level로 변경이 되어 공기층이 형성되는데 이것은 관로의 누수와 배수지에서의 누출이 있으므로 발생하는 것으로서 이때 펌프가 기동이 되면 관로에 형성된 공기층으로 인해 관로가 파손되고 있음을 확인할 수 있었다.

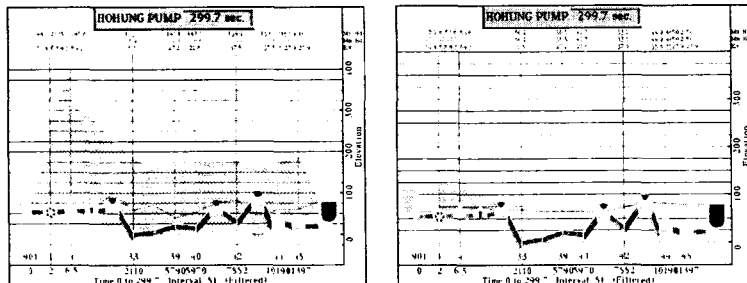
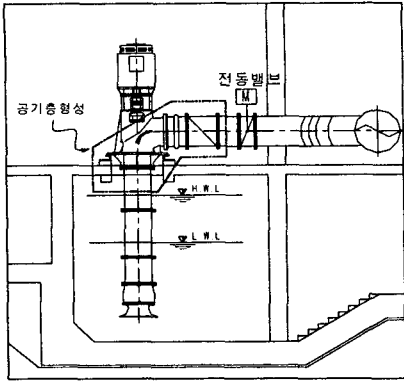


그림 3. 관로내 공기층 유무에 따른 압력변동(A)

시뮬레이션결과는 그림3.과 같이 공기가 있는 상태(왼쪽)에서 펌프를 기동하였을 때는 상승압과 부압이 심하게 발생되었으며 특히, 부압이 크게 발생되어 관접합부의 파손 및 압력변동에 따른 진동 등이 오랜기간 반복적으로 발생되어 관로 파손의 원인이 되었다.

3-2. 외부정수장의 회수관로시스템

현재 펌프형식이 수증입축형 사류펌프로서 펌프정지 후 재가동시 그림4.에 표시된 부분인 수직관로 내에



흡입 된 공기가 배기되지 않아 수직관로와 전동밸브사이에서 부압 및 상승압이 심하게 발생되어 이 현상의 영향이 전동밸브 개도시 주관로까지 과급되어 전체 관로시스템에서 부압 및 상승압이 발생되고 있다. 따라서 프라이밍작업을 하던지 흡입된 공기를 즉시 배기할 수 있는 공기변시설이 필요하다. 여기서 공기를 제거하거나 프라이밍이 완전할 경우에는 그림 5.(왼쪽)와 같이 압력변동상태가 양호하고 효과면에서도 시뮬레이션실시결과 관로측에서 발생하는 상승압 및 부압의 변화를 매우 효과적으로 완화시켜주고 있다. 즉 공기층에 흡입된 공기가 펌프기동시 유입되는 물에 의해 압축 팽창하면서 발생된 심한 압력변동에 의거 소음과 진동이 발생되고 있음이 확인되었다.

그림 4. 입축형수증펌프 설치도

펌프가 가동을 시작한 후 토출밸브가 서서히 열릴 때 발생하는 관로내 압력변동을 시뮬레이션실시한 결과 그림 5.와 같이 공기층이 있을 경우(오른쪽) 매우 심각한 압력변동이 야기되었다.

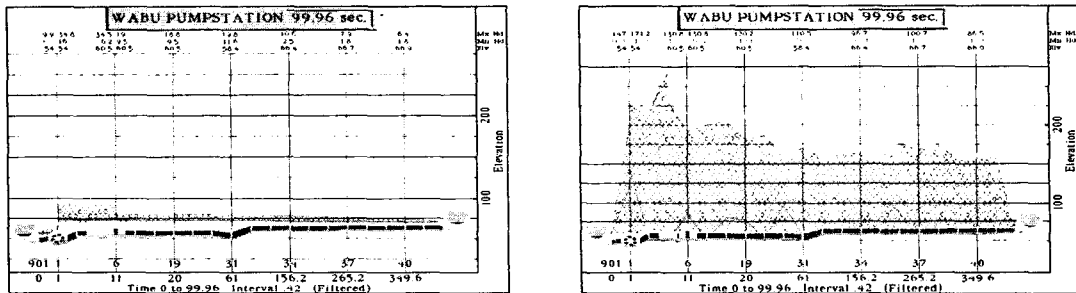


그림 5. 관로내 공기층 유무에 따른 압력변동(B)

4. 폐쇄관로에서의 공기 영향과 대책

먼저 폐쇄관로 내에서 공기에 대한 영향을 전반적으로 정리하면 다량의 공기가 관로 내에 체류하고 있으면 공기층이 형성되어 동적인 상태에서 유로감소와 유량이 저하되고 심한 경우 물의 흐름이 차단된다.

또한 Y.Dvir(1997)는 물속에 혼합된 공기(Bubble)는 압력파의 속도를 감소시키는데 강관에서 공기의 함유율

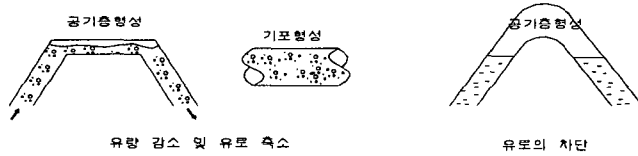


그림 6. 폐쇄관로내 공기의 영향

또한 배관 내의 공기에 있는 산소로 인해 내부부식이 발생하여 배관수명을 단축시킨다. 이외에도 펌프 흡입부 쪽에서 공기가 혼입될 경우 펌프에서의 캐비테이션 현상을 야기시켜서 펌프 임페라가 파손된다. 따라서 폐쇄관로 내의 공기제거를 위해서는 여러 가지 대책이 있으나 첫째, 관로시스템 설계시 관로에서 공기층이 생기지 않도록 면밀한 검토가 필요하고 둘째, 구조적으로 공기층이 불가할 경우 공기를 제거할 수 있는 공기변의 설치나 프라이밍을 할 수 있는 시설을 설치한다. 셋째, 배관의 유속이 0.5m/sec 이상으로 하여 기포가 체류하지 못하도록 관경결정시 유속을 고려하고 관로의 들출부나 최상부에서 공기를 제거하여야 한다.

이러한 폐쇄관로 내의 공기대책은 BC 31년 Vitruvius에 의해 이러한 현상을 제거하였고 많은 기술자와 수관리자들이 일찍이 1900년경부터 이 문제 해결을 위한 연구를 하였다. 그리하여 수동으로 공기를 제거하는 에어탱크를 설치하였으나, 자동이 아니므로 대형 관로시스템에서 여러 문제가 발생되었다. 그러나 최근 100년전부터 자동 공기변이 발달되어 오늘날 대부분의 관로시스템에 설치되어 사용중이다.

현재 사용중인 자동공기변은 여러 가지 형태가 있으나 크게 구분하여 1Stage, 2Stage, 3Stage로 구분할 수 있는데 1Stage는 배기나 흡기 구멍이 1개인 것, 2Stage는 흡기와 배기용으로 크기가 다른 구멍이 2개가 있는 것, 3Stage는 배기구멍의 Slam 현상을 방지하기 위해 2Stage에 크기가 다른 작은구멍이 1개 더 있는 것으로서 아래와 같이 각각의 공기변을 사용했을 때 수충격 현상을 비교하여 보았다.

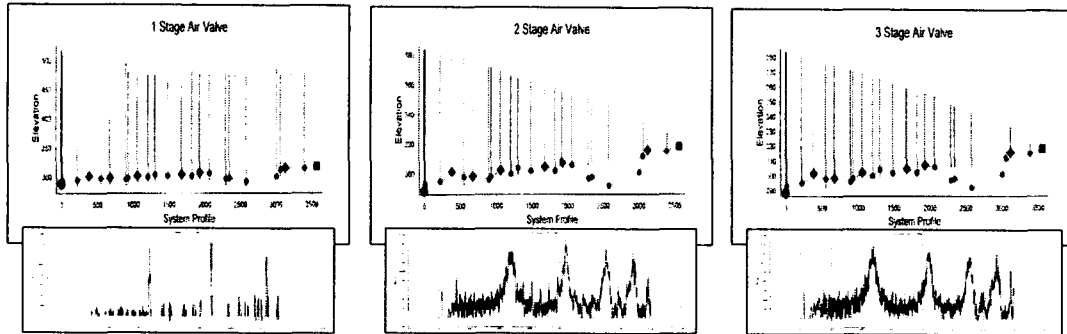


그림 7. 공기변형태에 따른 압력변동비교(공기변 압력변동곡선포함)

위 그림은 수충격발생시 공기변을 설치하여 수충격을 완화시키는 관로시스템을 기준으로 하였으며 여기서 2Stage와 3Stage를 사용시 관로전체에서의 압력변동은 거의 같지만 그림 아래쪽과 같이 공기변에서의 압력변동 곡선은 3Stage가 초기반응이 빠르고 1Stage의 경우 수충격 발생시 매우 위험한 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

이와 같이 폐쇄관로 내에서는 정지시나 유동시에 항상 공기가 유입되거나 자체적으로 발생하고 있음을 확인하였고 이로 인한 공기층의 형성과 기포 등으로 인해 관로에 소음, 진동, 부식 등의 현상이 나타나고 있었다. 즉 폐쇄관로는 인간이 숨을 쉬는 것과 같이 공기를 흡입하고 이것을 또한 배출시켜야 하는 기능이 매우 중요하다. 그러나 많은 폐쇄관로시스템에서 이러한 공기의 유입과 배출에 대한 중요성 인식이 매우 낮은 것이 현실이다. 따라서 공기층의 형성과 그 영향에 대한 조사결과를 토대로 폐쇄관로내 공기를 제거하기 위해 적합한 공기변의 선정과 필요개소를 정확히 파악하여 설치하는 것이 필요하고 관로내 존재하는 공기로 인한 관로의 경제적 손실을 검토하여 관로송수효율을 높여야 한다. 즉 관로내의 공기를 제거할 경우 만관으로 흐르지만 공기를 제거하지 않을 경우 평균적으로 볼 때 만관흐름이 형성되지 못하고 있음을 알 수 있으며 여기서 공급유량의 감소, 펌프가동시간증가, 관경의 비효율적사용 등의 경제적 손실과 폐쇄관로내 공기에 의한 파이프 및 부속류의 부식촉진에 따른 사용수명의 단축 등 문제점을 개선하여야 한다. 또한 준부정류해석(수관망)과 난류유동해석(수충격) 등 폐쇄관로의 모델해석시 공기의 영향을 반드시 검토하고 이에 대한 대책 및 방안을 제시하여야 하며 특히, Falvey(1985)는 관로의 길이가 길거나 사이폰형상인 경우(그림2.)와 수중펌프, 펜스톡 등의 수직관로일 경우(그림4.)에는 공기에 대한 대책이 매우 중요함을 강조하였고 앞에서 조사된 2개소 외에 다른 펌프장 및 관로시스템의 수격현상 시뮬레이션을 실시한 결과 폐쇄관로 내에서의 공기 발생원인과 영향에 대한 대책강구의 필요성을 확인할 수 있었다.

=====
 참고문헌: · HENRY T. FALVEY(1980) AIR-WATER FLOW IN HYDRAULIC STRUCTURES P39,66 · Y.DVIR(1997) FLOW CONTROL DEVICE P346 · A.R.D. THORLEY(1991) FLUID TRANSIENTS IN PIPELINE SYSTEM P201~212 · E. BENJAMIN WYLIE and VICTOR L. STREETER(1983) FLUID TRANSIENT P9~13