

## 수격파를 이용한 배관 세정기 개발 연구

김홍식\*, 김윤제\*\*, 박광진\*\*\*

### A Study on the Development of the Water Hammering Cleaner System for Pipeline

H.-S. Kim\*, Youn J. Kim\*\* and K.-J. Park\*\*\*

**Key Words :** Piping system(배관), Water hammer(수격파), Differential pressure(차압), Scale(스케일), Cleaner(세정기)

#### Abstract

In order to develop the water hammering cleaner system for removing scale and slime in inner metal or non-metal piping wall, the flow characteristics are investigated by numerical and experimental methods. The air bubbles in the piping systems as a shock wave are formed and transferred with the water flow in the piping. The governing equations are derived from making using of three-dimensional Navier-Stokes equations with the standard  $k-\epsilon$  turbulence model and SIMPLE algorithm. Pressure distributions in the pipeline are calculated for different air supply pressures. Also, we prepared some experimental results of the pressure differences for various air supply times.

#### 1. 서론

산업 설비에 사용되고 있는 배관 내에는 이송되는 작동유체 내에 함유되어 있는 이물질로 인하여 다양한 성분의 스케일(scale)이 부착하게 된다. 이러한 스케일은 공급되는 작동유체의 품질을 악화시켜 제품의 균질도를 저하시키며, 배관의 노후 및 파손을 촉진시켜 이에 대한 유지/보수비용을 증가시키게 된다. 특히, 반도체 생산라인에 장착된 배관의 경우, 공업용수내에 함유된 이물질이 제품의 불량률에 직접적인 영향을 미치게 되므로 주기적인 배관세척을 통한 일정수준의 배관 청결도 유지가 요구된다. 또한 배관 세척을 위한 시공시간이 길어지게 되면, 이에 따른 라인 가동시간 단축이 불가피함으로 무엇보다도 시공시간이 짧으면서도 세척능력이 우수한 배관세척기술의 개발이 반드시 필요하다.

배관 내의 녹이나 스케일 등을 세정하기 위한 공법으로는 여러 가지가 있으나, 크게 나누어 물리적인 방법으로 세척하는 물리적 공법과 약품이나 과산화물을 이용하면서 물리적인 세척방법으로 세척이 곤란한 배관내부를 주로 세척하는 화학적 공법이 있으며, 경우에 따라서는 두 가지 방법이 복합적으로 사용되기도 한다. 이러한 배관 세척장치는 그 방법에 따라서 배관의 모재 자체를 부식시키던가 혹은 환경적으로 문제점을 내포하던지, 건물 배관시스템의 급수, 급탕이나 배수 등을 중단하고 세정작업을 수행하는 등 적용에 상당한 제약조건을 갖고 있는 것이 사실이다. 또한 화학적 공법으로는 청관제와 같은 약품을 배관에 투입하여 배관을 세척하는 기법으로 곡관까지 우수하게 침투되어 이물질을 제거하는 장점을 가지나 화학반응에 의존하므로 소

요 세척시간이 길고 약품의 유해성 문제가 존재한다.

여러 가지 배관세정장치의 제한적인 적용조건에 대해서 고압공기를 배관 내에 분사시켜 배관내의 유동상태를 난류화(亂流化)시켜 스케일이나 슬라임(slime)의 부착을 원천적으로 폐쇄시키는 방법이 주목을 받고 있다. 배관을 흐르던 유체에 갑자기 급격한 속도 변화를 줄 때 발생하는 햄머링(hammering) 현상은 작동 유체에 따라 공기, 가스, 유압, 스팀 햄머링 또는 수격작용(water hammering)등으로 분류할 수 있다. 일반적인 수격작용은 배관의 퇴수후 재급수시 배관내의 공기가 압축되어 굴곡부위에서 배관에 충격을 주어 배관의 파손 및 손상을 초래하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 수격작용을 이용한 배관의 세정 기법은 압축공기를 탱크에 저장한 후 솔레노이드 밸브를 이용하여 간헐적으로 압력파를 주입시킴으로서 관 벽에 부착한 철박테리아 및 기타 이물질을 분해해 제거시킴으로서 배관의 건전성을 확보하는 신기술이라 할 수 있다.

Pearsall<sup>(1)</sup>은 관내 압력파의 전파속도는 유체의 체적탄성계수나 밀도에 영향을 받으므로 액체의 성질이나 관로의 재질에 따라 다르며, 특히 공기나 기체 입자가 많이 포함된 하수의 경우 수격현상에 의한 압력파의 전파속도는 깨끗한 물의 경우보다 훨씬 작다는 것을 실험적으로 보였다. Watters 등<sup>(2)</sup>은 관로의 재질에 따른 수격현상의 크기 변화에 따른 연구를 실시하여 PVC관로나 플라스틱 관로의 경우 압력파의 전파속도가 감소되어 수격현상에 의한 최대압력 수두가 감소한다고 발표하였다. Simpson과 Wylie<sup>(3)</sup>는 관재료의 탄성특성이나 관로내 물의 수주분리에 따른 수격현상의 특성변화에 대하여 연구결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 수격현상의 배관 내 유동특성을 파악하고, 수격파의 변화에 따른 배관에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

#### 2. 이론적 배경

\* 성균관대학교 대학원, unique1@netian.com

\*\* 성균관대학교 기계공학부, yjk@skku.ac.kr

\*\*\* (주)아세아 유니온

## 2.1 지배 방정식

관로의 수격현상을 해석하기 위하여는 관로내 흐름을 나타내는 연속방정식과 운동량방정식을 사용하지만 수격현상 해석시에는 관망내 부동류 흐름이나 부동류 흐름 해석과는 달리 수격현상에 의하여 상·하류로 전파되는 압력파의 전파속도를 포함한 식을 사용한다. 연속방정식과 운동량 방정식을 이용하여 압력강하( $\Delta p$ )와 음속( $c$ )에 대한 식을 구하면 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

관로의 방향을  $x$ 방향으로 정하고, 비정상 상태에 대해  $x$ 축 방향의 운동량 방정식을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum F_x = \sum_{cs} v_x \rho \vec{V} \cdot \vec{A} + \frac{d}{dt} \int_{cv} v_x \rho dV \quad (1)$$

여기서,

$$\sum F_x = pA - (p + \Delta p)A \quad (2)$$

$$\sum_{cs} v_x \rho \vec{V} \cdot \vec{A} = V\rho(-VA) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_{cv} v_x \rho dV \\ &= \frac{d}{dt} [V\rho(L-ct)A] = -V\rho cA \end{aligned} \quad (4)$$

식(2)-(4)를 운동량 방정식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$PA - (p + \Delta p)A = -\rho V^2 A - \rho VcA \quad (5)$$

이 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta p = -\rho V^2 - \rho Vc \quad (6)$$

액체의 경우 음속  $c$ 가 속도  $V$ 보다 훨씬 크기 때문에 식(6) 우변의 첫째 항은 두 번째 항에 비해 무시할 수 있으므로 흔히 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta p = \rho Vc \quad (7)$$

여기서, 연속 방정식을 적용하면 압력파의 전파속도를 구할 수 있게 된다. 연속 방정식은 다음과 같다.

$$0 = \sum_{cs} \rho \vec{V} \cdot \vec{A} + \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho dV \quad (8)$$

위 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 &= \rho(-VA) \\ &+ \frac{d}{dt} [\rho(L-ct)A + (\rho + \Delta\rho)ctA] \end{aligned} \quad (9)$$

정리하면,

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{V}{c} \quad (10)$$

$$c = \frac{V}{\Delta\rho/\rho} \quad (11)$$

정의로부터  $E_v = \Delta p / (\Delta\rho/\rho)$  이므로

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta p}{E_v} \quad (12)$$

식(11)과 (12)를 이용하여  $\Delta\rho/\rho$ 를 소거하면 다음을 얻을 수 있다.

$$c = \frac{VE_v}{\Delta p} = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \quad (13)$$

여기서,  $\rho$ ,  $p$ ,  $V$ 는 각각 밀도, 압력, 속도이며,  $E_v$ 는 유체의 체적탄성계수를 나타낸다.

## 2.2 수치해석 모델 및 방법

해석모델은 90°배관과 직관에 공기 주입 시간을 0.1초에서 0.4초까지 다르게 주입하고 압력은 3bar, 7bar로 주입할 때, 직관과 90°배관에서의 압력 분포를 고찰하였다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 약 2만개의 격자를 도시하고 있다. 출구에는 압력조건과 종속변수 구배가 0인 Neumann 조건을 사용하였다.

연속방정식과 Navier-Stokes 방정식은 유한 체적법으로 이산화하였으며, 정상해를 구할 때 다른 방법에 비해 계산시간이 비교적 적게 소요되는 SIMPLE 해법을 이용하여 해를 구하였다.

난류모델로는 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 이것은 난류에너지( $k$ )로부터 특성속도를, 점성 소산율의 크기( $\epsilon$ )를 이용하여 간접적으로 특성길이(characteristic length)를 구하는 모델이다.

배관 벽면 근처에서의 속도, 압력 변화는 벽면에 수직하여 일차원적으로 일어나며, 압력 변화와 체적력은 아주 작으나 전단력은 상대적으로 크다고 가정하였다. 또한, 전단력과 속도벡터는 같은 방향이고, 난류 에너지의 생성과 소산은 균형을 이루며, 난류 길이는 선형적으로 변한다고 가정하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 2에 도시한 것처럼 물이 수격과 세정기에서 나와 유량계와 체크밸브(check valve)를 지나 실험 대상인 녹슨 배관을 통과하여 다시 세정기로 유입되도록 구성하였다. 배관내의 흐름을 제한하던가 혹은 조절하기 위해 필요한 곳에 밸브를 설치하였다.

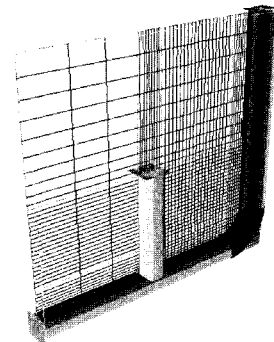


Fig. 1 Grid systems (20,000 cells).

수격과 세정기 실험장치에 급수펌프를 설치하였으며, 흐름에 고압을 적용하였을 경우 흐름 방향으로의 역류(reverse flow)를 방지하기 위해서, 또한 세정기로의 흐름을 방지하기 위해서 체크밸브를 사용하였다. 실험대상인 배관은 녹이 있지 않은 배관과 녹슨 배관을 여러 개 제작하여 플랜지(flange) 형식으로 교체할 수 있도록 제작하였으며, 녹이 있지 않은 배관과 비교하였다.

유량은 유량 제어밸브로 제어하고 흡입관에 설치된 오리피스 유량계로 측정하였으며, 압력은 배관에 정압공을 만들어 측정하였다. 배관의 압력분포를 확인하기 위해서 입구 및 출구에 범위가 0~10 kg/cm<sup>2</sup>인 차압계(PDCR 130 7WL, Druck)를 사용하였다. 또한, 유량을 확인하기 위해 유량 범위가 0~20 l/min인 유량계(BLUE-WHITE F-450)를 부착하였다. 실험 결과 자료는 오실로스코프(LeCroy 9314M)를 이용하여 구하였다.

## 4. 결론

### 4.1 수치해석 결과

수치해석시 유량은 일정하게 하고 압축공기 주입을 시간에 따라 다르게 하며 수행하였다.

Fig. 3은 4m/s의 물이 흐르는 배관에 7bar의 압력을 가하였을 때, 시간 변화에 따른 압력 변화를 해석한 결과이다.

Fig. 3a)는 배관에 압력이 가해진 0.1초 후의 압력 변화를 나타낸다. 결과 그림으로 볼 때 공기 압력에 의해 물이 들어오는 배관 입구까지 영향이 있음을 알 수 있다. 따라서, 물 배관 입구와 공기 배관 입구의 압력이 거의 같은 압력을 보이고 있다. b)는 0.2초 후의 압력 변화를 나타낸다. 순간적으로 배관내 작동유체의 흐름을 막는 압력벽이 생기는 것을 볼 수 있다. 따라서 일시적인 역압력이 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 3c)에서는 b)에서의 압력벽이 배관내 작동유체 압력에 의하여 배관 뒤로 이동하는 것을 볼 수 있다. d)는 압력벽이 거의 보이지 않고, 작동유체의 압력에 지배를 받아 흐르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 4m/s의 물이 흐르는 배관에 3bar의 압력을 가하였을 때, 압력 변화를 해석한 결과이다. Fig. 4a)는 압력이 가해진 0.1초 후의 압력 변화를 나타내는데, 유입되는 공기압력에 의해 작동유체 배관 입구까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 0.2초 후에 압력 변화를 살펴보면 (Fig. 4b) 참조), 작동유체의 흐름을 막는 압력벽이 7bar 때보다 두껍게 생기는 것을 볼 수 있고, 압력은 낮지만 7bar 때 나타난 역압력은 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 공기 압력이 7bar 일때에는 압력이 크기 때문에 단순한 압력벽 만을 만드는 것이 아니라 그 이상의 큰 수격과 충격이 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 4c)에서는 b)에서 보여진 압력벽이 빠르게 압력 회복을 하며 배관 출구로 나감을 알 수 있다. d)에서는 관 내의 압력이 작동유체의 지배를 받아 흐르고 있음을 알 수 있다.

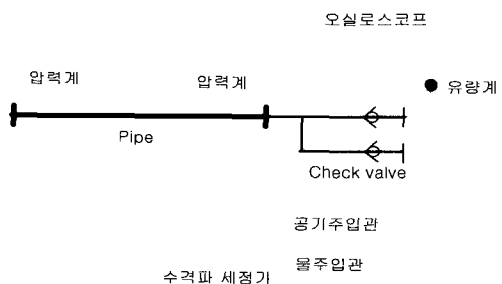


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

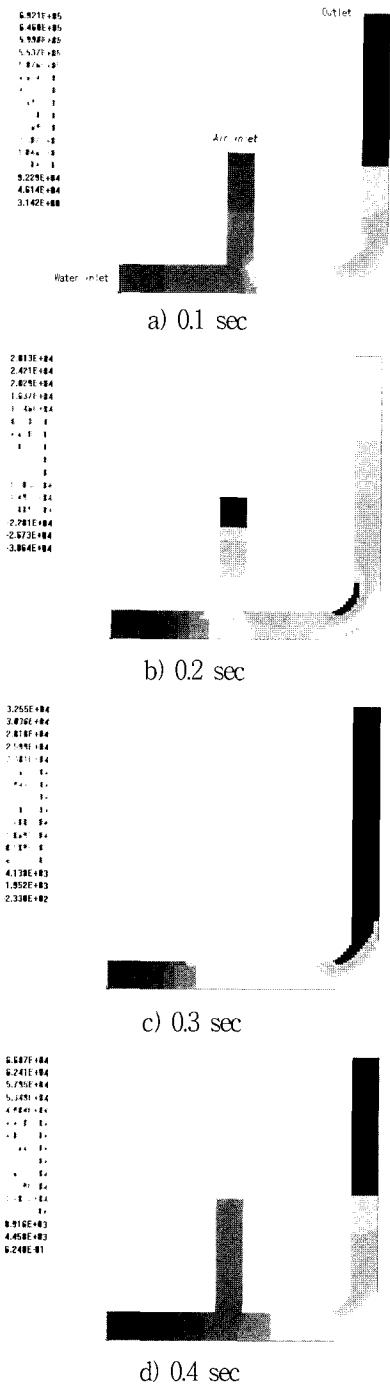


Fig. 3 History of pressure distributions with 7bar.

따라서, 위의 결과를 유추해 보면 배관의 유속에 따라 수격파의 압력을 적절하게 조절하면 더욱 효과적인 세정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 4.2 실험 결과

산업용 플랜트 및 일반 건물 배관에서의 수격과 세정장치의 설치 타당성을 고찰하기 위해 20초 동안 0.5~3초 간격으로 고압 공기를 0.5~6초로 변화시키면서 배관 입/출구에서의 압력차를 측정하였다. Fig. 5는 공기를 1kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 각각 0.5초와 3초 간격의 주기로 20초 동안 주입하였을 때의 차압을 나타낸다. 주기가 0.5초이고, 공기 주입시간이 0.5초일 경우에는 가장 높은 차압을 나타냈다. 따라서 스케일이 가장 많이 있는 상태로

스케일 계가 원활히 되지 않은 상태임을 추정할 수 있다. 하지만 주기를 일정하게 0.5초로 유지하면서 공기 주입시간을 1초로 늘렸을 때에는 차압이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉, 스케일이 많이 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 계속해서 공기 주입시간을 6초까지 늘리면서 주입해 보니 차압은 작게 감소하지만, 지속적으로 차압이 발생하고 있음을 알 수 있다.

또한, 주기가 3초일 경우에는 공기를 0.5초 동안 주고 3초 후에 다시 0.5초동안 주입하는 것을 20초 동안 반복하는 것을 말하는 것인데, 처음에는 차압이 거의 발생하지 않았지만 두 번째 주입부터 급격한 압력차이를 나타내었다. 주기가 0.5초 일 때와 유사하게 감소하지만 처음과 마지막 공기주입시간을 제외하고는 주기가 0.5초 일 때 보다 차압 발생이 작음을 알 수 있었다.

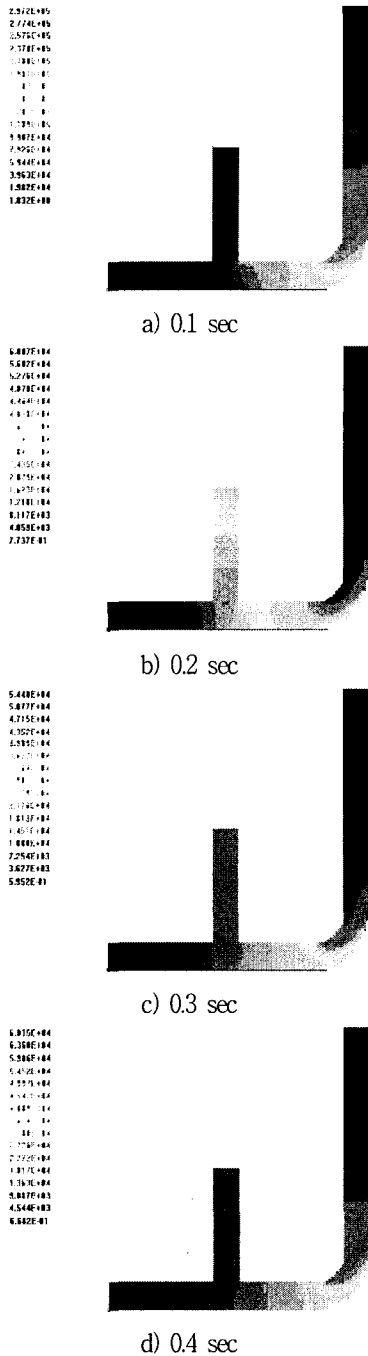


Fig. 4 History of pressure distributions with 3bar.

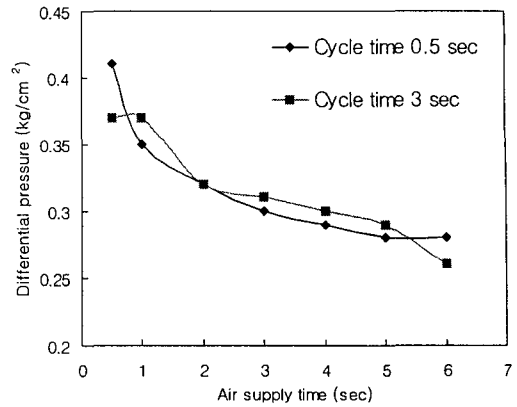


Fig. 5 Differential pressures for various air supply times.

## 5. 결론

본 연구에서는 수격현상을 이용하여 배관 내부를 세정하는 유동특성을 실험과 수치적 방법을 이용하여 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

수치해석시 유량은 일정하게 하고 압축공기의 주입 시간을 다르게 하여 수행한 결과 배관내 작동유체의 유속에 따라 수격과 압력을 적절하게 조절하면 더욱 효과적인 세정이 가능함을 알 수 있었다.

주기가 0.5초일 경우에는 초기에 가장 높은 차압을 나타냈지만, 공기 주입시간을 1초로 늘렸을 때 차압이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있었다. 공기 주입시간을 6초까지 늘리면서 주입할 때 차압은 작게 감소하였지만, 지속적으로 차압이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

주기가 3초일 경우에는 처음에는 차압이 거의 발생하지 않았지만 두 번째 주입부터 급격한 압력차이가 발생하였다. 따라서 향후에는 수격과의 발생주기와 배관의 기하학적 형상 등과의 연계성에 대한 최적 연구가 요구된다.

## 후기

본 연구는 성균관대학교 기술혁신센터(TIC)와 두뇌한국 21(BK 21)사업 핵심분야인 "고효율 차세대 에너지 기기 설계 사업팀"의 지원하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Pearsall, I. S., "The Velocity of Waterhammer Waves Symp. on Surges in Pipelines", Proceedings, Institute of Mechanical Engineering, Vol. 108, (1966), Part 3E.
- [2] Watters, G. Z., Jeppson, R. W. and Flammer, G. H., "Water Hammer in PVC and Reinforced Plastic Pipe", Journal of Hydraulics Division, ASCE 102(HY7), (1976), pp. 831-843.
- [3] Simpson, A. R. and Wylie, E. B., "Large Water-Hammer Pressures for Column Separation in Pipelines Journal of Hydraulics Division, ASCE 117(10), (1991), pp. 1310-1316.
- [4] John, A. R. and Clayton, T. C., "Engineering Fluid Mechanics", Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, (1997).