

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

밸브 특성 및 배관 직경이 수격현상에 미치는 영향

Effects of Valve Characteristics and Pipe Diameter on Water Hammer Phenomena

허진, 김태한, 문병환, 최해윤, 이광원, 노태선

한국전력기술주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

수격현상(water hammer)은 배관내 유동의 급격한 변화에 의하여 배관, 배관지지대 및 기기 등에 큰 동하중이 유발되는 것을 의미한다. 유동의 급격한 변화는 밸브의 갑작스런 개폐, 펌프의 급격한 시동/정지 등에 의하여 주로 유발된다. 본 논문에서는 수격현상 분석 대상의 선정에 활용하려는 목적으로 밸브 특성, 즉 차압 및 개방시간과 배관 직경의 변화가 수격현상에 미치는 영향을 분석하였다. Method of Characteristics(MOC)를 사용하여 분석한 결과 밸브 차압 및 밸브 개방시간은 유발되는 압력에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으나 배관 직경의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

Abstract

The water hammer phenomena mean that the dynamic loads are induced on the pipe, the pipe support and the equipments in the system due to the sudden change of the flow velocity inside the pipe. The sudden changes are mainly caused by the valve sudden on/off and pump sudden start/trip. To develop a selection criterion of the parts to be analyzed for the water hammer, the effects of the valve characteristics and pipe diameter on the water hammer are analyzed. The analyses using Method of Characteristics(MOC) show that the effects of the valve pressure difference and the valve opening time are very significant, but the effects of the pipe diameter are not dominant.

1. 서론

수격하중은 배관내 유동의 급격한 변화에 의하여 배관, 배관지지대 및 기기 등에 유발되는 큰 하중을 의미한다. 유동의 급격한 변화는 밸브의 개폐(on/off), 펌프의 급격한 시동/정지 등에 의하여 유발된다. 보통 수격현상(water hammer)은 급격한 유동변화에 대하여 배관내를 흐르는 물과 배관벽의 탄성을 고려한 현상으로 이에 의한 배관내의 비정상유동(unsteady flow)은 정상유동(steady flow)에 비하여 계통 내에 과도한 압력이나 소음, 캐비테이션(cavitation) 및 진동 등을 유발시키며, 이로 인하여 결과적으로 계통의 배관, 기기 및 배관지지대 등의 파손이나 기기의 성능저하를 초래하게 된다. 이러한 현상들은 원자력 발전소에서는 keep-full systems, 진공차단기(vacuum breaker), 기포탐지계통(void detection system), 배기계통(venting system)의 개선 및 운전원의 교육 등에 의하여 완화 시킬 수 있으나, 예측하지 못하였던 현상이 일어날 수도 있으므로 배관과 지지대 등의 설계 단계에서 첨두 압력(peak pressure) 또는 차압(pressure difference) 등의 압력 과도상태(pressure transients)를 예측하여 이를 완화시키는 것은 매우 중요하다.

수격현상에 의하여 발생하는 하중은 계통의 운전특성, 기기특성 및 배관 배치에 따라서 크게 좌우된다. 따라서 계통설계자 및 배관설계자는 계통을 분석하여 수격하중이 크게 발생할 수 있는 지역에서는 이를 완화시키는 설계를 하여야 한다. 즉 물의 압축성으로 인한 수격현상에 의하여 발생하는 압력파는 배관을 따라서 진행이 가능한 전 지역을 모두 왕복하며 이때 발생하는 동하중은 배관의 배치(routing)에 따라 큰 영향을 받으므로 가급적 수격현상의 발생을 억제하는 배관 배치 설계를 하여야 한다. 특히 계통내의 기포는 과도한 동하중을 유발시키므로 이의 발생을 최대한으로 억제하여야 할 것이다. 또한 운전원의 부적절한 운전에 의하여 큰 동하중을 유발할 가능성이 있으므로 이를 방지하도록 운전절차가 작성되어야 하며 운전원은 이 운전절차에 따라서 발전소를 운전하여야 한다.

수격하중의 발생이 의심스러운 지역의 선정에는 특별한 기준이 존재하지 않으며 과거에 발전소 가동중이나 시운전중에 실제로 수격이 발생한 사례와 설계자 및 운전원의 경험 등에 의하여 선정되어지고 있는 상황이다. 수격하중 발생가능 지역을 올바르게 선정하기 위해서는 여러 공정 변수들이 수격현상에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하여야 한다. 대표적인 변수는 밸브 양단의 차압, 밸브 개방시간 및 배관 직경을 예로 들 수 있으며, 해석모델에 따라서 이러한 변수들의 영향정도는 다른 것으로 알려져 있어 분석대상을 선정하는 일반적인 기준을 만들기는 어려울 것으로 판단되나 본 논문에서는 가장 간단한 모델 즉 밸브가 급속히 개방되는 모델에 대하여 밸브 양단의 차압, 밸브 개방시간에 따라서 수격하중이 어떻게 달라지는가를 분석하였다. 발전소의 계통을 실제 모델로 한 분석도 수행하여 보았으나 계통이 복잡하면 이로 인한 여러 효과가 복합적으로 작용하여 분석에 어려움이 있었다. 따라서 본 논문에서는 그림 1 과 같이 가장 간단하며 수격하중이 크게 발생하는 모델을 선정

하여 분석을 수행하였다. 본 논문의 결과와 추후 수행되어질 다른 모델들에 대한 결과를 종합하면 계통 내의 각 배관 및 기기 등에서 수격현상의 발생여부를 판단하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 해석방법

2.1 수격해석방법

수격현상은 일반적으로 Method of Characteristics(MOC)라 불리는 방법에 의하여 해석이 수행된다. 이 방법은 1967년 Streeter[1]에 의하여 제안된 이후 가장 널리 사용되는 검증된 방법이며 원자력발전소에서도 여러 계통에 대하여 적용되어진 바 있다[2][3]. 그러나 이 방법은 단상유동에 대해서는 쉽게 적용이 가능하나 이상유동에 대해서는 적용에 다소 어려움이 있으며 현재에도 계속적으로 해석모델이 고안되고 있으나 이상유동의 일부 모델에 대해서만 제한적으로 사용이 가능한 상황이다. 따라서 90년대에 원자력발전소의 이상유동에 의한 수격현상에 대하여 RELAP 이나 TRAC 등의 전산코드에 의한 해석이 시도되었으나 관련자료에 의하면 RELAP 이나 TRAC 등은 수격현상과 같은 짧은 시간에 일어나는 유동에 대해서는 잘 예측하지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 수격에 영향을 미치는 여러 변수들의 영향을 알아보기 위해 MOC방법에 의하여 계산을 수행하였다.

수격현상의 지배방정식은 Mach number 가 매우 작을 때 운동량(momentum) 및 질량 보존에 의하여 다음과 같이 각각 단순화 시킬 수 있다.

운동량 방정식

$$gH_x + V_t + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad \text{-----} \quad (1)$$

연속 방정식

$$H_t + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad \text{-----} \quad (2)$$

V 는 유속, H 는 수두, f 는 Darcy-Weisbach friction factor이며, D 는 배관의 직경, a 는 압력파의 전달속도로 음속과 유사한 값이다. 위의 식은 MOC 방법을 이용하면 다음과 같은 식으로 정리된다.

At C⁺

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad \text{-----} \quad (4)$$

At C⁻

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{-----} \quad (6)$$

위의 C⁺와 C⁻에 적용되는 식과 배관 양단의 경계조건을 적용하면 분석이 가능하게 된다. 발전소 각 계통의 배관 양단에 적용되는 경계조건은 매우 다양하다. 상세한 내용은 참고문서 1 과 4 를 참조하기 바란다.

2.2 분석모델 및 가정

본 논문에서 밸브 차압, 밸브 개방시간 및 배관 직경이 수격현상에 미치는 영향을 분석하기 위해 계산에 사용된 모델은 그림 1 과 같다. 대형 수조의 하부로부터 배관이 분지되며 이 배관은 위쪽으로 약간 경사져 있고 끝 단은 막혀 있다. 수조와 배관사이에는 격리밸브가 존재하며 이 밸브는 초기에는 닫혀 있으나 갑자기 개방된다. 그림 1 의 H 값을 변화시켜 배관 양단의 압력차이를 조정하게 된다. 그림 1 과 같이 배관의 끝 단에는 공기층이 형성되어 있다. 배관은 위로 경사져 있으나 수평 배관에 공기층이 존재하는 경우로 가정하여 해석을 수행하였다. 배관의 경사에 따라서 실제로는 압력이 약간 달라질 수 있으나 갑작스런 밸브의 개방에 의한 수격현상에 의하여 발생하는 대단히 큰 압력에 비하면 상당히 미미한 값으로 배관의 경사에 의한 영향은 무시될 수 있을 것으로 판단된다. 격리밸브가 갑자기 개방되면 수격현상에 의하여 발생하는 압력과는 배관양단을 계속적으로 왕복하여 공기층이 있는 배관의 끝단에 대단히 큰 압력을 유발시킨다. 밸브 하류 끝단이 막힌 배관에서 밸브 개방시 배관내에 형성된 공기층은 일반적으로 수격에 의한 하중값을 크게 하므로 밸브차압, 배관직경이나 밸브 개방시간에 따른 하중값의 변화를 보다 명확히 볼 수 있다.

MOC 방법에 의한 수격해석을 위한 계통의 모델은 입구수조(inlet reservoir), 밸브를 포함한 단순한 배관망(piping network)으로 구성된다. 배관계 내에 수평 배관의 끝 부분에 포집된 공기층의 체적은 배관 전체 체적의 20% 정도에 해당된다고 가정한다.

3. 결과 및 고찰

그림 1의 격리밸브가 급속히 개방되었을 때 배관계에 발생하는 하중은 밸브 차압, 밸브 개방시간 및 배관 직경등에 영향을 받을 것이 예상된다. 따라서 해석은 다음의 조건에 대하여 각각 수행되었다.

밸브차압(Δp) : 2167 psi, 1301 psi, 434 psi, 43 psi

밸브 개방시간 : 0.1 초, 1 초, 3 초, 5 초

배관직경(D) : 3.5 ft, 3 ft, 2 ft, 1 ft

위의 각각의 조건에 대하여 최대 첨두압력(maximum peak pressure)은 공기층이 있는 배관의 끝부분에서 발생하였다.

표 1과 표 2는 배관직경이 각각 3.5 ft 및 1 ft인 배관에 발생하는 최대 첨두압력을 보여주고 있다. 일반적으로 밸브차압이 클수록 또한 밸브 개방시간이 짧을수록 배관에 큰 첨두압력이 발생하는 것을 보여주고 있다. 배관 직경도 영향을 미치기는 하나 그 영향은 앞의 두 변수에 비하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그림 6부터 그림 9까지에서 보다 명확히 보여준다.

그림 2와 그림 3은 밸브차압이 2167 psi, 배관직경은 3.5 ft일 때 밸브개방시간이 각각 0.1 초와 5 초인 경우에 대하여 밸브가 개방된 이후 5 초간 최대압력이 발생하는 부위에서의 압력천이를 나타낸 그래프이다. 밸브가 급속히 개방되면 발생하는 압력파가 음속으로 입구수조와 배관 끝단을 계속적으로 왕복하게 되므로 압력천이는 최고첨두압과 최저첨두압을 교대로 보여주게 되며 첨두압력은 밸브개방초기에 최대이며 압력파의 왕복이 반복되면 배관의 저항이나 소리발생과 같은 에너지 손실로 인하여 시간이 경과할수록 서서히 감소하게 된다. 따라서 설계에는 최대 첨두압력 및 구조물과의 공진을 피하기 위하여 압력천이 주파수 등이 필요하다. 압력천이 주파수는 주로 배관의 길이에 크게 영향을 받게 되며 본 논문의 모델에서는 배관의 길이가 고정되어 있으므로 이에 대한 분석은 수행되지 않았으며 주로 최대 첨두압력에 여러 변수들이 미치는 영향에 대하여 분석이 수행되었다. 밸브 개방시간이 5 초인 경우에는 최대 첨두압력이 5000 psi 미만이나 0.1 초인 경우는 5 초인 경우보다 약 3 배 정도(17033 psia)의 압력이 발생하는 것을 보여준다. 따라서 밸브 개방시간이 5 초 이상인 경우에는 수격에 의하여 발생하는 압력은 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 원자력발전소에 서 사용되는 밸브들을 분석하여 보면 흔히 사용되는 모터구동밸브(motor operator valve :

MOV) 등을 포함한 대다수의 밸브들의 개방시간은 비교적 커서 수격현상을 고려하지 않아도 되는 것을 알 수 있다. 그러나 솔레노이드 밸브(solenoid valve)나 공기압 구동 밸브(pneumatic valve)와 같이 밸브 개방 시간이 아주 짧은 경우나 역지 밸브(check valve)와 같이 밸브 개방 시간이 1 초 이하인 경우는 수격현상을 고려하여야 할 것이다. 그림 4 와 그림 5 는 밸브 차압이 2167 psi, 배관 직경은 1 ft 일 때 밸브 개방시간이 각각 0.1 초와 5 초인 경우의 압력천이를 나타낸 그래프이다. 이 경우에는 배관직경이 작아짐으로 인하여 압력의 크기는 약간 감소한 경향을 보여주고 있으나 압력추이는 배관 직경은 3.5 ft 의 경우와 유사하다. 밸브 개방시간이 0.1 초인 경우는 대단히 큰 압력(13708 psia)이 발생하는 것을 알 수 있으며 5 초인 경우는 배관 직경이 3.5 ft 일 때와 유사한 결과(4382 psia)를 보여 준다.

그림 6 에서 그림 9 까지는 표 1 과 표 2 의 결과를 각 변수들에 대한 영향을 비교하기 위해 그래프로 나타낸 것이다. 그림 6 은 배관 직경이 3.5 ft 일 때 각각의 밸브 차압 조건에서의 밸브 개방시간의 변화에 따른 최대 첨두압력을 나타낸 것이다. 밸브 개방시간이 5 초에서 3 초로 줄어들면 최대 첨두압력은 약간 증가하나 밸브 개방시간이 이보다 더 줄어들게 되면 급격히 증가하는 현상을 보여준다. 이러한 현상은 특히 비교적 높은 밸브차압 조건에서 현저하게 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 7 은 밸브차압이 2167 psi 일 때 각각의 밸브 개방시간 조건에서의 배관 직경의 변화에 따른 최대 첨두압력을 나타낸 것이다. 밸브 개방시간이 5 초 및 3 초일 경우는 배관 직경의 변화에 대하여 최대 첨두압력은 거의 변화가 없으나 밸브 개방시간이 작아지면 약간의 변화를 보여주고 있다. 그러나 이것은 그림 6 이나 그림 9 의 밸브 개방시간이나 밸브 차압의 영향에 비하면 상대적으로 작다고 판단된다. 그림 8 은 밸브 차압이 2167 psi 일 때 각각의 배관직경 조건에서의 밸브 개방시간의 변화에 따른 최대 첨두압력을 나타낸 것이다. 밸브 개방시간이 0.1 초일때에는 밸브 직경의 변화에 따라 최대 첨두압력에 약간의 영향을 보여준다 5 초로 되면 거의 동일하다. 그림 9 는 밸브 직경이 3.5 ft 일 때 각각의 밸브 개방시간 조건에서의 밸브 차압의 변화에 따른 최대 첨두압력을 나타낸 것이다. 밸브 차압이 증가하면 최대 첨두압력 결과는 따라서 증가하며 이 경향은 밸브 개방시간이 작을수록 증가율은 높아진다.

4. 결론

본 논문에서는 간단한 모델을 이용하여 밸브 하류 끝단이 막힌 배관에서 밸브 개방시 밸브 차압, 밸브 개방시간 및 배관 직경이 수격현상에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 상기의 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 밸브 차압과 밸브 개방시간은 최대 첨두압력에 대단히 큰 영향을 미친다. 따라서 수격현상 분석대상의 선정시 우선적으로 밸브 차압 및 밸브 개방시간을 고려하여야 한다.

- 2) 배관 직경의 영향은 밸브 차압과 밸브 개방시간의 영향에 비하면 상대적으로 작다.
- 3) 밸브 개방시간이 커질수록 수격현상에 의하여 발생하는 동하중은 상대적으로 작아질 것이 예상되므로 계통내에서 밸브 개방시간이 작은 특성을 갖는 밸브에 대하여 우선적으로 수격현상을 고려 하여야 한다.
- 4) 밸브 차압이 매우 작은 경우에는 수격현상에 의한 하중은 작다. 따라서 이 경우에도 계통내에서 밸브 차압이 큰 밸브에 대하여 우선적으로 수격현상을 고려 하여야 한다.

이상의 결론을 활용하면 원자력 발전소의 복잡한 계통에서 밸브 개방시의 수격현상 발생 가능성이 상대적으로 높은 지역을 선정하는데 도움이 될 수 있다. 추후 수행해야 할 연구과제는 배관 및 기기배치가 상이한 여러가지 다른 모델들에 대한 분석을 수행하여 현재 도출된 결과를 재차 확인하고 분석 대상의 선정기준을 보다 구체적으로 개발하여 설계의 기본자료로 활용하여야 할 것이다.

참고 문헌

1. E. B.Wylie, V.L. Streeter, L. Suo, "Fluid transient in systems", Prentice hall, 1993
2. M.L. Goel and J.M. Francisco, "Transient Pressure (Waterhammer) Loads in CANDU Emergency Coolant Injection (ECI) System" paper presented at the International Symposium on Multi-Phase Fluid Transients, The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, CA, 1986 December 7-12, published in ASME FED - Vol. 41.
3. A. Lai, K.F. Hau, M.L. Goel, and E.J. Mistele, "Experimental and Analytical Studies of Waterhammer in a Piping Network", paper presented at the 16th Annual Nuclear Simulation Symposium, Saint John, New Brunswick, 1991 August 26.
4. PTRAN Program Users Manual, Report No. 87-003, 1987 November, AECL.

약어

| | | |
|-----|---|--------------------------------|
| a | = | velocity of sound |
| A | = | pipe flow area |
| D | = | pipe diameter |
| f | = | Darcy-Weisbach friction factor |
| g | = | gravitational constant |
| H | = | head |
| P | = | pressure |

Q = flow
 t = time
 V = fluid velocity
 ρ = fluid density
 x = distance along pipe axis

표 1. 최대 침투압력 (D=3.5 ft)

| | 0.1초 | 1초 | 3초 | 5초 |
|---------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| $\Delta p=2167$ psi | 17033 psia | 11269 psia | 5618 psia | 4458 psia |
| $\Delta p=1301$ psi | 12572 psia | 9442 psia | 4764 psia | 3665 psia |
| $\Delta p=434$ psi | 6484 psia | 5725 psia | 3294 psia | 2102 psia |
| $\Delta p=43$ psi | 315 psia | 312 psia | 239 psia | 174 psia |

표 2. 최대 침투압력 (D=1 ft)

| | 0.1초 | 1초 | 3초 | 5초 |
|---------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| $\Delta p=2167$ psi | 13708 psia | 10321 psia | 5464 psia | 4382 psia |
| $\Delta p=1301$ psi | 10312 psia | 8327 psia | 4589 psia | 3582 psia |
| $\Delta p=434$ psi | 4940 psia | 5358 psia | 3073 psia | 1986 psia |
| $\Delta p=43$ psi | 229 psia | 231 psia | 192 psia | 152 psia |

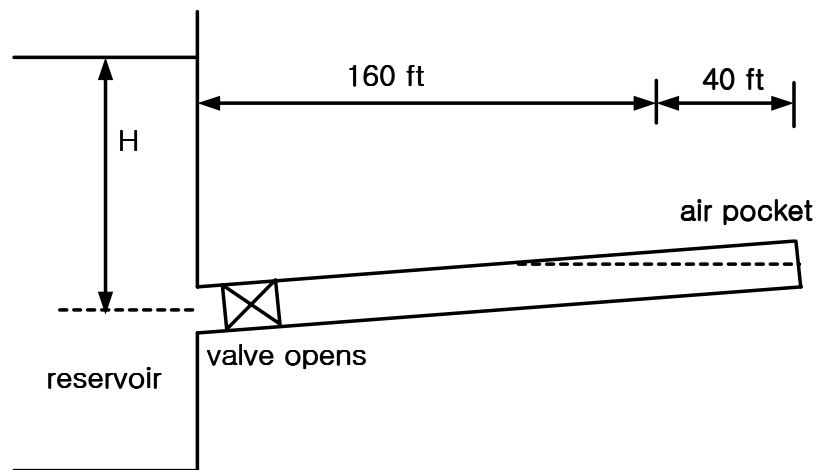


그림 1. 계산 모델 개략도

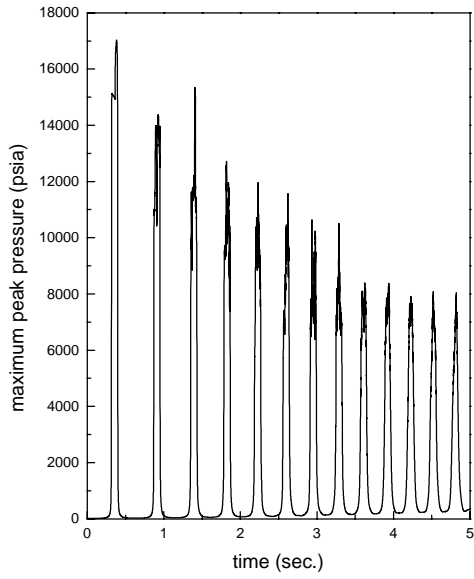


그림 2. 침두압력 대 시간
 ($\Delta p=2167$ psi, $D=3.5$ ft,
 밸브개방시간 : 0.1 초)

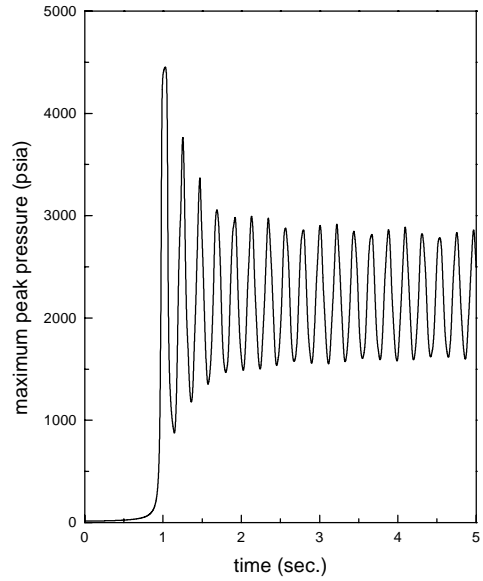


그림 3. 침두압력 대 시간
 ($\Delta p=2167$ psi, $D=3.5$ ft,
 밸브개방시간 : 5 초)

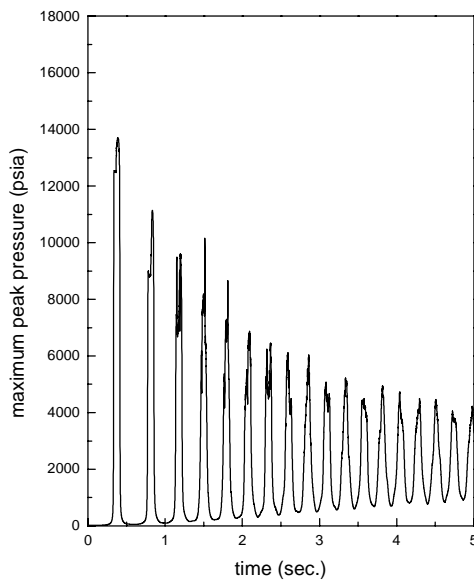


그림 4. 침두압력 대 시간
 ($\Delta p=2167$ psi, $D=1$ ft,
 밸브개방시간 : 0.1 초)

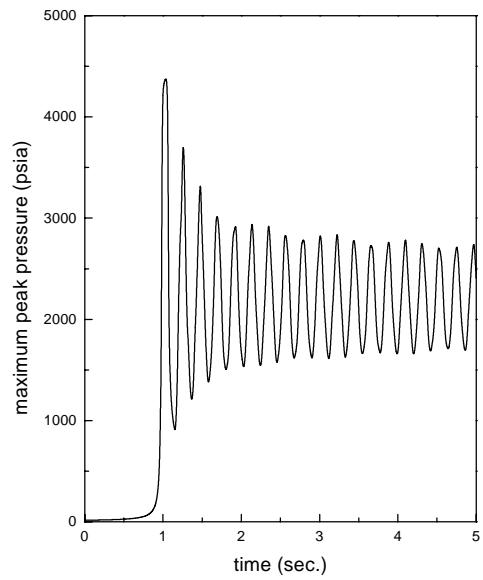


그림 5. 침두압력 대 시간
 ($\Delta p=2167$ psi, $D=1$ ft,
 밸브개방시간 : 5 초)

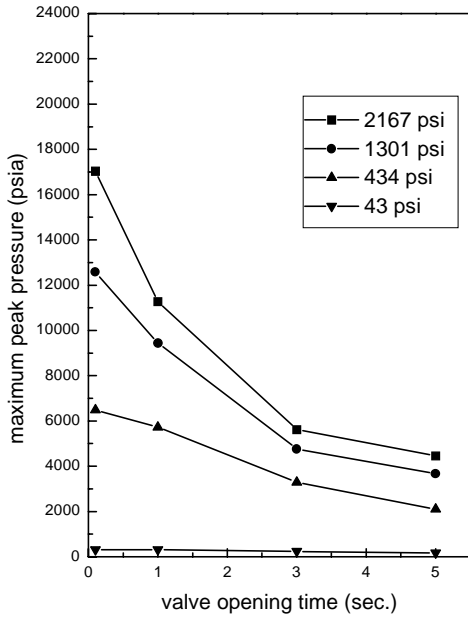


그림 6. 최대 첨두압력 비교
(D=3.5 ft)

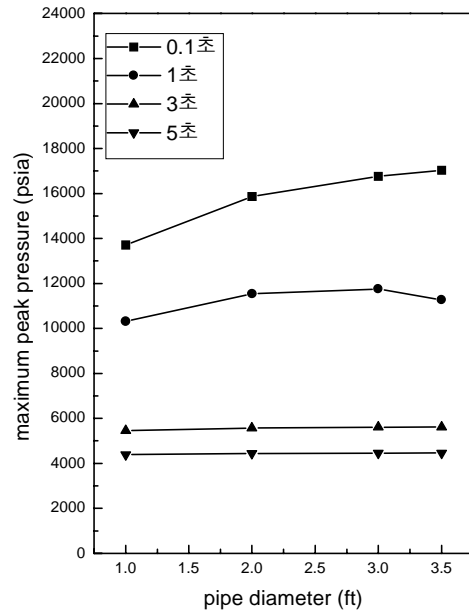


그림 7. 최대 첨두압력 비교
($\Delta p=2167$ psi)

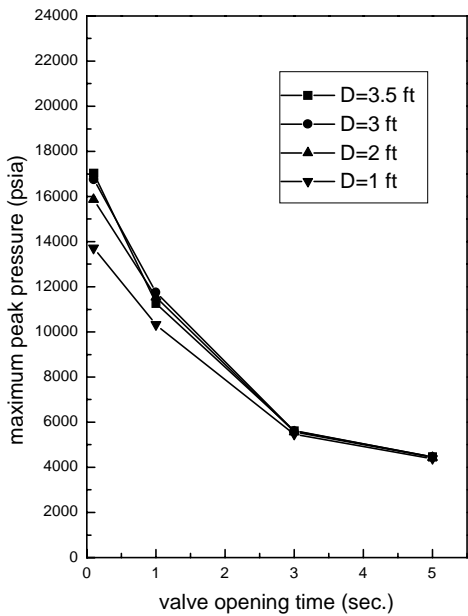


그림 8. 최대 첨두압력 비교
($\Delta p=2167$ psi)

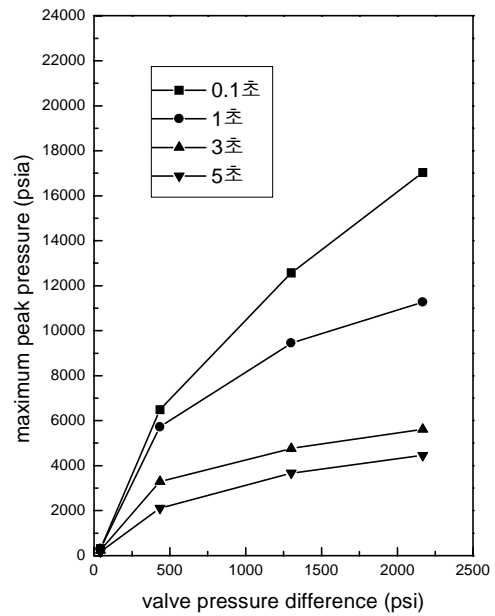


그림 9. 최대 첨두압력 비교
(D=3.5 ft)