



# 원심펌프 관로계에 대한 임펄스 응답법 적용 연구

## Impulse response method for a centrifugal pump in pipeline systems

허지성·김현준·송용석·김상현\*

Jisung Hur·Hyunjoon Kim·Yongsuk Song·Sanghyun Kim\*

부산대학교 사회환경시스템공학부

Dept. Environmental Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

Method of characteristic(MOC) has been widely used as a transient analysis technique for pressurized pipeline systems. There are substantial studies using MOC for the water hammer triggered through instantaneous valve closures, pump stoppage and pump startup for pipelines systems equipped with a centrifugal pump. Considering restrictions of MOC associated with Courant number condition for complicated pipeline systems, an impulse response method(IRM) was developed in the frequency domain. this study implements the impact of centrifugal pump using transfer function in frequency domain approach. Using pump performance curve and the affinity law, this study formulated transfer functions which relate complex pressure head at upstream of pump system to that of downstream location. Simulations of simple reservoir-pump-valve system using IRM with formulated transfer function were similar to those obtained through MOC.

**Key words:** Centrifugal pump, Courant number, Impulse response method, Method of characteristics, Pipeline system

**주제어:** 원심펌프, Courant 수, 임펄스 응답법, 특성선 방법, 관로계

## 1. 서 론

수격현상은 주로 관로 내에서 밸브의 개폐 혹은 펌프의 시동·정지시에 관내 유체흐름이 급격히 변화하면서 발생한다. 급격한 상승압이 관내를 왕복하며 관로나 펌프 등의 관 구조물에 피해를 주기도 하고 대기압 이하의 압력이 형성되어 관내 공동현상을 일으켜 수주분리가 일어나게 하거나, 이로 인해서 발생된 음압이 관의 좌굴을 발생시키기도 한다(Wylie and Streeter, 1993).

수격압 발생시 관내 유체의 지배방정식은 시간 영역에서의 전통적인 방법인 특성선 방법으로 주로 계산되어져 왔다(Ghidaoui et al., 2005). 특성선 방법은 시간과 공간의 격자계를 구성해 주어진 초기 조건에서 시작하여, 시간의 진행에 따라 관내 수압과 유량을

계산하는 방법으로, 계산의 정확도를 확보하기 위해서 Courant 수 조건을 만족시켜야 한다(Ghidaoui and Karney, 1994). 관 구조물이 거의 없는 단순 관망에서는 계산상의 문제점이 없으나, 관이 복잡해지고 경계 조건으로써의 관 구조물도 많아질 경우 혹은 파 속도가 다양한 관의 복잡 관망의 경우에는 격자의 간격을 적절히 선정하기가 어려워진다. 공통의 시간간격 선정 시 어떤 파이프 분절에서는 Courant 수가 낮아져 보간을 해야 하는 문제가 생기고, 이는 수치적 오차를 발생시킨다(Shimada et al., 2007; Tijsseling and Bergant, 2007). 공간 격자의 간격을 작게 만들어서 정확도를 높이려고 할 경우에는, 시간 격자의 간격도 같이 감소시켜야 한다. 따라서 격자에서 시·공간의 분할 수가 상당히 증가하므로 계산시간이 비약적으로 늘어난다(Ghidaoui and Karney, 1997). 이와 같이 특성선 방법에서는 Courant 조건으로 인하여 정확도 감소, 계산시간

Received 23 June 2016, revised 16 August 2016, accepted 18 August 2016  
\*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

pp. 481-489  
pp. 491-500  
pp. 501-509  
pp. 511-519  
pp. 521-532  
pp. 533-543  
pp. 545-551  
pp. 553-559  
pp. 561-569  
pp. 571-577  
pp. 579-586  
pp. 587-596  
pp. 597-604  
pp. 605-612

증가 등의 문제가 발생한다. 대안적 방법인 임펄스 응답법은 주파수 영역의 전달함수를 통해 계산하기 때문에 관이나 관 구조물의 배치에 관한 공간 분할을 해야 할 필요성이 없다(Kim, 2005). 이는 *courant* 수의 제약조건에 영향을 받지 않는 것을 의미한다. 그러므로 IRM을 이용하면 관로 내 특정 지점에서의 수압·유량 변화를 보간 없이 짧은 계산시간 내에 계산할 수 있다. 9개의 절점으로 이루어진 특정 관망에서 MOC와 IRM의 계산시간을 비교한 결과 MOC의 최소 *courant* 수를 각각 0.75, 0.95로 설정하여 계산하였을 경우에 5초와 10초의 총 계산시간에서는 IRM의 계산 시간에 비해 평균적으로 100배 이상의 프로그램 계산 시간이 소요되었다. 또한 MOC에서는 총 계산시간을 2배 증가시키면 프로그램 계산 시간이 2배 소요되었으나, IRM에서는 총 계산시간을 2배 증가시켜도 프로그램 계산 시간이 최대 5% 정도 밖에 증가하지 않는 것이 확인되었다(Kim, 2007).

임펄스 응답법을 이용해 단순 관망에서의 수압과 유량 계산을 하여 특성선 방법과 비교한 연구로 시작해 (Suo and Wylie, 1989), 대안적 누수탐지 알고리즘을 개발한 연구가 있었고(Kim, 2005), 임피던스 행렬 방법으로 복잡 관망의 수격압 계산을 수행한 연구(Kim, 2007), 서지 탱크나 에어챔버가 설치된 관망의 부정류 계산을 수행한 연구가 있었으며(Kim, 2008), 임펄스 응답법과 유전 알고리즘을 사용하여 서지 탱크의 매개변수들을 최적화 하는 연구가 수행되었다(Kim, 2010). 복잡 관망에서의 누수나 관폐색 등을 종합적으로 탐지하는 알고리즘을 개발한 연구도 있었다(Kim, 2015). 하지만 아직 임펄스 응답법으로 펌프 관로계를 해석한 시도는 수행된 적이 없다.

본 연구에서는 임펄스 응답법을 원심펌프가 포함된 관로계에 적용하는 기초단계로써, 상류 저수조에 연결된 짧은 흡입관을 통해 펌프가 설치되어 있는 간단한 관로계에서 펌프 토출측 하류 밸브의 급폐가 일어날 경우 밸브 개도의 변화에 따라 관내 수압이 어떻게 변하는지에 대하여 연구하였다. 다양한 *courant* 수 조건에서의 특성선 방법 결과들을 비교하였으며, 개발된 방법론의 검증에 위하여 2가지 가상적인 원심펌프 관로계에서의 임펄스 응답법 계산결과를 *courant* 수가 1일 때의 특성선 방법의 결과와 비교하였고, 밸브 급폐 상황과 완폐 상황에서 임펄스 응답법과 특성선 방법의 모의결과를 비교하였다.

## 2. 특성선 방법을 이용한 밸브 급폐 상황에서의 펌프 관로계 내 수압·유량 변화의 계산

관내 천이류 발생시의 1차원 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다(Wylie and Streeter, 1993).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA}$$

여기서, H는 수압, Q는 유량, a는 파속도, g는 중력 가속도, A는 관의 단면적, f는 마찰계수, t는 시간, x는 관의 1차원 좌표이다. 위의 식을 상미분방정식 형태로 풀이하기 위해서  $dx/dt = \pm a$ 라 두면 다음과 같은 특성방정식들을 얻을 수 있다.

$$H = C_P - B_P Q$$

$$H = C_M + B_M Q$$

여기서, CP, BP는 특성선 방법의 (+)특성선 방정식의 계수이고, CM, BM는 (-)특성선 방정식의 계수로써 모두 이전 시간 단계의 수압과 유량 값을 이용해 계산한다. 경계조건과 초기 조건이 주어진다면 다음 시간 단계에 대하여 수압과 유량 계산을 할 수 있다. 차분방정식의 해가 발산하지 않게 하려면 *courant* 수인  $\partial \Delta t / \Delta x$ 가 1보다 같거나 작아야 하는데(Anderson, 1995), 위의 특성선 방정식들의 유도는  $\Delta x = a \Delta t$ 를 가정한 것이다. 그러나 실제 복잡 관망에서는  $a \Delta t / \Delta x = 1$ 를 만족시키기 어렵고, *courant* 수가 1이 아닐 경우의 선형 보간은 다음과 같이 한다(Chaudhry, 2014).

$$Q_L = Q_C - \frac{a \Delta t}{\Delta x} (Q_C - Q_A)$$

$$Q_R = Q_C - \frac{a \Delta t}{\Delta x} (Q_C - Q_B)$$

$$H_L = H_C - \frac{a \Delta t}{\Delta x} (H_C - H_A)$$



$$H_R = H_C - \frac{a\Delta t}{\Delta x}(H_C - H_B)$$

여기서,  $Q_C, Q_L, Q_R, Q_A, Q_B$ 는 각각 C, L, R, A, B 지점의 유량이고,  $H_C, H_L, H_R, H_A, H_B$ 는 각각 C, L, R, A, B 지점의 수압이다.  $\Delta t$ 는 시간 간격이며  $\Delta x$ 는 공간 간격,  $a$ 는 파속도이다. Fig 1은 C점의 다음 시간 수압·유량의 계산을 위해서 보간을 하는 경우의 도식이다. 파이프 분절의 길이가 정확히  $\Delta x$ 라면 특성선 방정식을 그대로 이용해 A, B지점의 수압·유량 값을 계산할 수 있다. 그렇지 않을 경우에는 L지점과 R지점의 수압·유량의 계산을 위해서 C지점과 A, B지점의 수압·유량 값을 사용해 선형 보간한 값으로 다음 시간 계산을 수행함을 나타내고 있다.

펌프가 설치된 관로 시스템의 풀이과정을 특성선 방법에서 구현하기 위한, 펌프 성능곡선이 2차일 때의 상류 저수조의 아주 짧은 흡입관에 설치된 펌프 경계 조건은 다음과 같다(Wylie and Streeter, 1993; Abuiziah et al., 2013; Chaudhry, 2014).

$$\Delta H_P = a_2 Q_P^2 + a_1 Q_P + a_0$$

$$Q_P = \frac{1}{2a_2}(B_M - a_1 - \sqrt{(B_M - a_1)^2 + 4a_2(C_M - H_R - a_0)})$$

여기서,  $Q_P$ 은 펌프의 유량이고,  $\Delta H_P$ 는 펌프의 양정이며,  $H_R$ 은 저수조의 수위,  $B_M$ 과  $C_M$ 은 특성선방정식의 계수이다.

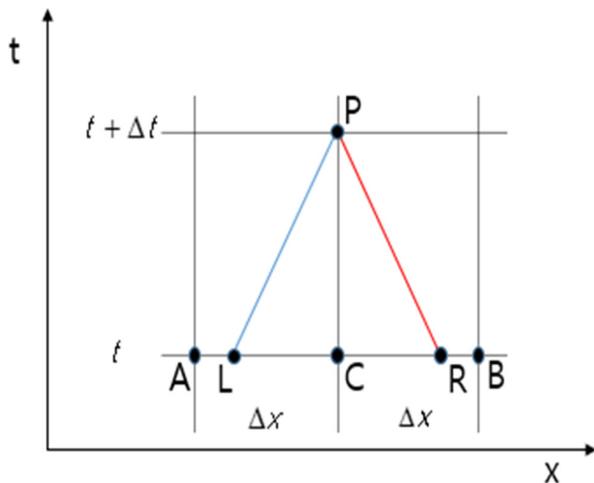


Fig. 1. Notation for interpolation

### 3. 임펄스 응답법을 이용한 원심펌프 관로계 해석

#### 3.1 천이류 지배방정식을 이용한 관로 내 수압·유량의 전달함수

주파수 영역에서 해석하기 위해 수압과 유량을 각각 평균값과 변화량으로 나누면 다음과 같이 나타난다.

$$H = \bar{H} + h'$$

$$Q = \bar{Q} + q'$$

여기서,  $\bar{H}$ 는 수압의 평균값이고  $h'$ 는 수압의 변화량,  $\bar{Q}$ 는 유량의 평균값,  $q'$ 는 유량의 변화량이다. 위 식들을 식(1)과 (2)에 대입하고 난류 마찰항 부분을 이항정리하여 변화량 간의 곱을 소거한 후에, 시간에 대한 조화진동을 가정해 변수분리법을 이용, 미분방정식을 풀면 해는 다음과 같다. (Wylie and Streeter, 1993).

$$h' = e^{st}(C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x})$$

$$q' = \frac{Cs}{\gamma} e^{st}(C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x})$$

여기서,  $C = gA/a^2$ 는 용량계수이고,  $S = \sigma + i\omega$ 는 복소 주파수,  $\sigma$ 는 감쇠계수,  $\omega$ 는 주파수 값,  $\gamma^2 = Cs(Ls + R)$ 는 전파상수,  $L = 1/gA$ 은 유체의 관성계수이다.  $C_1 = (H_U - Z_C Q_U)/2$ 이고,  $C_2 = (H_U + Z_C Q_U)/2$ 이다.  $H_U$ 와  $Q_U$ 는 각각 관로 상류 지점에서의 복소수 수압과 복소수 유량이고,  $Z_C = \gamma/Cs$ 는 특성 임피던스이다.  $R$ 은 관로의 저항계수로써, 관로 내 유체 흐름이 층류일 경우에는  $R = 32\nu/gAD^2$ 이고, 난류일 경우에는  $R = nf\bar{Q}^{n-2}/2gDA^n$ 이다. 주파수 영역의 복소수 수압  $H$ 와 유량  $Q$ 는 다음과 같이 나타난다 (Covas et al., 2005).

$$h'(x, t) = H(x)e^{st}$$

$$q'(x, t) = Q(x)e^{st}$$

식(13), (14), (15), (16)을 이용해 복소수 수압  $H$ 와  $Q$ 를 계산할 수 있다.

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612

$$H(x) = H_U \cosh(\gamma x) - Z_C Q_U \sinh(\gamma x)$$

$$Q(x) = \frac{H_U}{Z_C} \sinh(\gamma x) + Q_U \cosh(\gamma x)$$

### 3.2 원심펌프 관로계 내의 밸브 급폐를 고려한 전달 함수

Fig 2는 간단한 저수조-펌프-밸브 관로계를 나타낸 것이다. 펌프 흡입관은 저수조 바로 옆에 붙어있고 매우 짧아서 해석에서는 고려해 주지 않아도 된다. 펌프 토출측 관의 끝부분에 유량 조절밸브와 저수조가 있으며, 주파수 영역에서의 관로 내 전달함수를 구해야 유량조절밸브를 닫는 상황에서의 관로 내 임펄스 응답을 구할 수 있다. 복소수 수압과 유량의 관계식을 구하기 위하여, 펌프의 성능곡선이 유량의 2차식이라고 가정하고 정격 회전수에서의  $H-Q$ 관계와 실제 운전상태에서의  $H-Q$ 관계가 각각 다음과 같다고 하면,

$$H_0 = a_{1,0} + a_{2,0} Q_0 + a_{3,0} Q_0^2$$

$$H = A_1 + a_2 Q + a_3 Q^2$$

여기서,  $H_0, Q_0, a_{1,0}, a_{2,0}, a_{3,0}$ 는 정격 회전수에서의 값들을 나타내고  $H, Q, a_1, a_2, a_3$ 는 실제 회전수에서의 값들을 나타낸다. 펌프의 상사관계를 이용하고, 식 (20)은 실제 운전상태의 회전수인  $\bar{\alpha}$ 의 ( $\bar{H}, \bar{Q}$ )에서도 성립해야 한다는 것을 이용하여 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\bar{H} + h'}{\bar{H}} = \left( \frac{a_{1,0}(\bar{\alpha} + \alpha')^2 + a_{2,0}(\bar{\alpha} + \alpha')(\bar{Q} + q') + a_{3,0}(\bar{Q} + q')^2}{a_{1,0}(\bar{\alpha})^2 + a_{2,0}\bar{\alpha}\bar{Q} + a_{3,0}(\bar{Q})^2} \right)$$

$$q' = \frac{A}{B} \alpha' + \frac{C}{BH} h'$$

$$h' = \frac{B\bar{H}}{C} q' + \frac{A\bar{H}}{C} \alpha'$$

여기서,  $A = 2a_{1,0}\bar{\alpha} + a_{2,0}\bar{Q}$ 이고,  $B = 2a_{2,0}\bar{\alpha} + 2a_{3,0}\bar{Q}$ 이고,  $C = a_{1,0}(\bar{\alpha})^2 + a_{2,0}\bar{\alpha}\bar{Q} + a_{3,0}(\bar{Q})^2$ 이다.

그리고,  $\bar{\alpha}$ 는 실제운전속도와 정격운전속도의 비율이고  $\alpha'$ 은 운전속도 비율의 변화율이다.

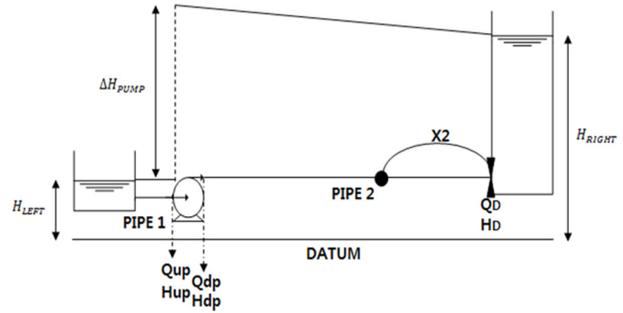


Fig. 2. Schematic diagram of centrifugal pump pipeline system with short suction line

원심펌프 경계조건의 복소수 수압과 복소수 유량간의 관계식을 구하였으므로 펌프 경계조건 상·하류간의 전달함수 관계를 구하면 된다. 펌프 회전수의 변화는 없어  $\alpha' = 0$ 이 되고,  $Q_{up} = Q_{dp}$ , 즉 펌프 상류와 하류에서 유량의 변화량이 같다고 가정하면 펌프의 상하류간의 복소수 수압 관계는 다음과 같이 된다.

$$H_{dp} = H_{up} + \frac{B\bar{H}}{C} Q_P$$

여기서,  $H_{up}$ 는 펌프 상류지점의 복소수 수압이고,  $H_{dp}$ 는 펌프 하류지점의 복소수 수압, 그리고  $Q_P$ 는 펌프의 복소수 유량이다.

### 3.3 임펄스 응답법을 이용한 수압 변화 계산

임피던스는 관로 내 어떤 지점의 복소수 수압과 복소수 유량의 비로 정의한다(Wylie and Streeter, 1993).

$$Z_x = \frac{H_x}{Q_x}$$

여기서,  $Z_x$ 는  $x$  지점에서의 임피던스,  $H_x$ 는  $x$  지점에서의 복소수 수압,  $Q_x$ 는  $x$  지점에서의 복소수 유량이다. 밸브 지점의 관로 내 임피던스를 구하고, 그 임피던스를 바탕으로 전달함수를 이용하여 관로 내의 유량변화와 수두변화를 구할 수 있다. 하류 밸브 지점의 임피던스는 다음과 같다.

$$\gamma_{Dh} = \frac{H_D}{Q_D} = Z_D = \frac{Z_{dp} - Z_c \tan h(\gamma I)}{1 - (Z_{dp}/Z_c) \tan h(\gamma I)}$$

여기서,  $Z_D$ 는 밸브 지점의 임피던스이고,  $Z_{dp}$ 는 펌프



하류 지점의 임피던스이다. 식(26)를 역푸리에 변환 하여 대상 관로 시스템의 임펄스 응답을 구할 수 있다.

$$g_D = \frac{1}{\pi} Re \left[ \int_0^{\infty} Z_D \cdot d^{i\omega t} d\omega \right]$$

여기서,  $g_D$ 는 밸브 지점에서의 수압 임펄스 응답이다. 이와 같은 방법으로 밸브 지점의 유량변화에 대한 관로 내 모든 지점의 수압, 유량의 임펄스 응답을 구할 수 있다. 이제 입력신호를 구해주면 밸브 지점의 유량 변화에 대한 모든 지점에서의 출력신호를 구할 수 있다.

$$\Delta q_{D(t)} = -Q_{D0} + \frac{\tau^2 q_{D0}^2(O) \Delta t}{2h_{D0}} + \sqrt{\left( q_{D0} - \frac{\tau^2 q_{D0}^2 \gamma_{D0}(O) \Delta t}{2h_{D0}} \right)^2 - q_{D0}^2 + \frac{\tau^2 q_{D0}^2 (h_{D0} + \Delta h'_D)}{h_{D0}}}$$

여기서,  $H_{d0}$ ,  $q_{d0}$ 는 각각 밸브를 닫는 경우 밸브 지점의 참고상태 수압, 유량이다.  $\tau$ 는 오리피스 방정식의 무차원 변수로써 밸브의 개도상태를 0에서 1까지의 값으로 나타낸다.  $\Delta h'_0$ 는  $\Delta h_D(t)$ 를 구하기 위한 합성곱에서의 전 시간 단계의  $\Delta h$ 를 의미하고,  $\gamma_{D0}(O)$ 는 참고상태에서의 밸브 지점의 수압 임펄스 응답이다. 이제 입력신호(28)과 임펄스 응답(27)를 합성곱 하면 Fig 2의 관로계 내 밸브의 유량 변화에 대한 출력신호로서의 수압 변화를 구할 수 있다(Oppenheim, 1999).

$$\Delta h_D(t) = \int_0^t g_D(t-\tau) \Delta q(\tau) d\tau$$

위 과정과 동일한 방식으로 관로 내 모든 지점에서의 유량과 수압 변화를 구할 수 있다.

### 4. 적용 및 결과

Fig 3과 같은 관로계에서, 개발한 펌프 관로계의 전달함수 식이 임펄스 응답법에서 유효하게 적용되는지 확인하기 위한 수치 실험을 수행하였다. 원심펌프는 주로 난류 조건에서 쓰이므로 2가지 난류 조건에서의 계산결과를 비교하였다. 주요 흐름 조건은 Table 1과 같다. 0.1102m<sup>3</sup>/s 유량의 수자원을  $\Delta H=10m$ 인 곳으로  $L=100m$ ,  $D=0.4m$ 의 스테인리스 관으로 운반하는 조건 1의 펌프 관로 시스템을 선정하였다. 관 지름과

관 두께의 비는 약 30이다. 정격 회전수로는 실제 운전 회전수의 110%를 사용했다. 레이놀즈 수는 349362이고 마찰계수는 0.0145, 파속도는 1268m/s이다. 마찰계수 선정에는 무디 선도를 이용하였다(Munson et al., 2006). 펌프 성능곡선은 실제 운전상태의 양정과 토출량 기준(각각 정격 양정과 토출량에 10/11을 곱한 값)으로 산정하였으며, 실제 운전상태의 펌프 성능곡선은 Fig.4.(a)와 같다. 먼저 *courant* 수에 따른 특성선 방법 계산 결과의 차이를 확인해보기 위하여 조건 1의 관로계에서 가장적인 *courant* 수 조건을 만들어 *courant* 수 1.0, 0.75, 0.4에서의 밸브 급폐(0.01초)시 관로 내 수압 모의 결과를 비교해보았다. Fig 5에서 y축의 값은, 최대 수격압인  $\Delta Va/g$ 로 수압 변화량을 나누어서 정규화한 값이다. Fig. 5.(a)에서 볼 수 있듯이 보간을 하지 않을 경우, *courant* 수가 1보다 더 많이 작으면 작을수록 수압 모의 결과의 정확도가 더 떨어진다. 보간을 한 수압 모의 결과는 Fig. 5.(b)에 나와 있으며, 간단한 관로계에서도 상당한 결과의 차이가 나타난다는 것을 알 수 있다.

다음 단계로, 밸브 급폐 상황(급폐시간=0.01초)의 관 중앙지점, 관 끝지점 수압변화를 임펄스 응답법으로 계산하고, 특성선 방법에서의 모의 결과와 비교하였다. 특성선 방법에서의 *courant* 수는 1.0이다. 관 길이나 파속도 등을 고려한 임펄스 응답법에서의 최대 주파수 범위는 600rad/s로 설정하였으며 이산 역푸리에 변환을 위한 샘플의 개수는 65536개로 선정했다. Fig 6은 임펄스 응답법과 특성선 방법의 모의결과를 비교한 도식이며 밸브 급폐 상황에서의 수압변동 모의 결과, 임펄스 응답법의 결과는 특성선 방법의 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

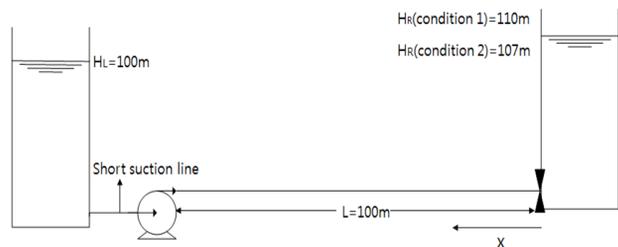


Fig. 3. Reservoir-Pump-Valve System

Table 1. Flow condition of 1st system and 2nd system

	D(m)	Q(m <sup>3</sup> /s)	RE	H	f
1st	0.4	0.1102	349362	10	0.0145
2nd	0.2	0.01257	79681	7	0.0195

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612

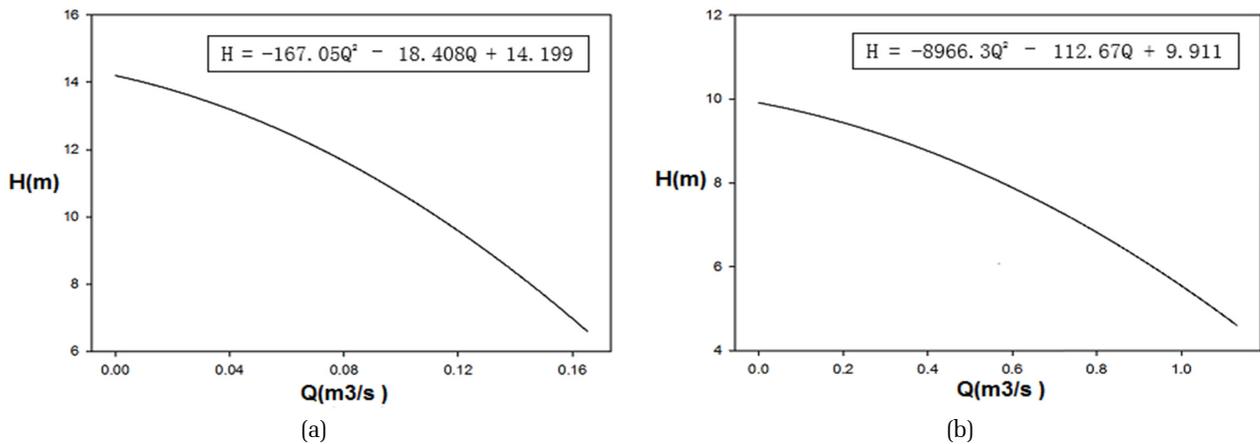


Fig. 4. Performance curve of 1st pump and 2nd pump

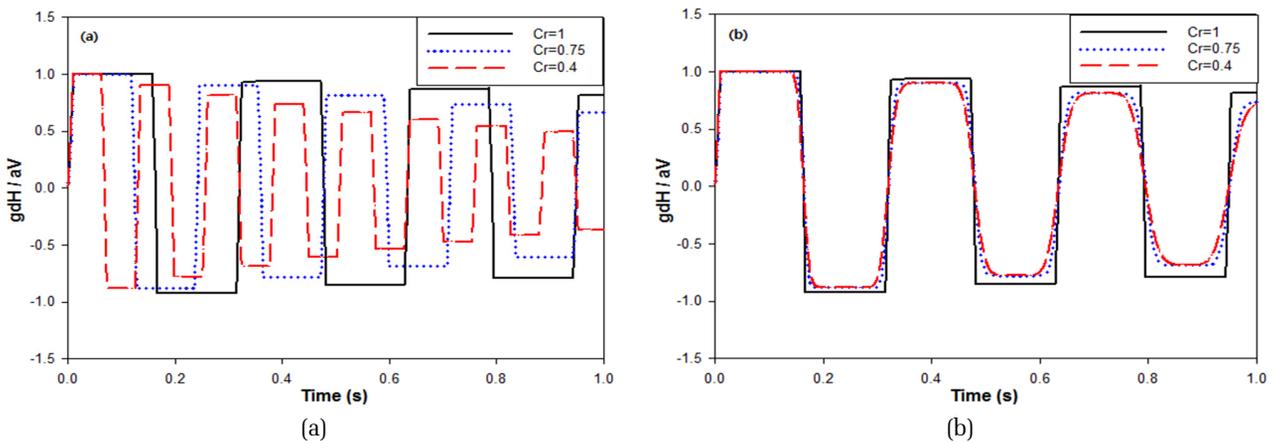


Fig. 5. Comparison of MOC calculation results in three Courant number conditions (a) with no interpolation; (b) using interpolation - downstream valve location ( $x=0$ ), 0.01sec instantaneous valve closure

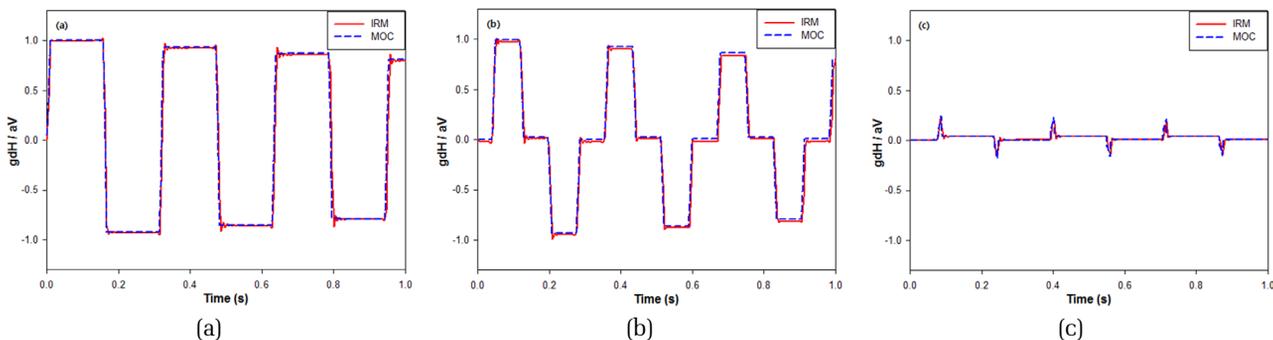


Fig. 6. Simulation results of IRM and MOC in two location (a) downstream valve ( $x=0$ ); (b) middle of pipeline ( $x=50m$ ); (c) next to pump ( $x=1m$ ) - 1st condition, 0.01sec instantaneous valve closure

다른 유속, 관경 조건에서도 임펄스 응답법의 수압 모의 결과가 특성선 방법과 일치하는지 확인하기 위하여 기타 조건들은 동일하게 유지하고 유량과 관경 그리고 양정의 변화만 주기 위한 두번째 조건을 선정하였다. 두번째 조건으로  $0.01257m^3/s$ 의 유량을  $\Delta H=7m$ 인

곳으로  $L=100$ ,  $D=0.2m$ 의 스테인리스 관으로 운반하는 펌프 관로 시스템을 선정하였다. 두 번째 조건의 레이놀즈 수는 79681이며 마찰계수는 0.0195이다. 관경과 관 두께의 비는 일정하게 유지하고, 파속도는  $1268m/s$ 로 동일하다. 실제운전 회전수와 정격 회전수

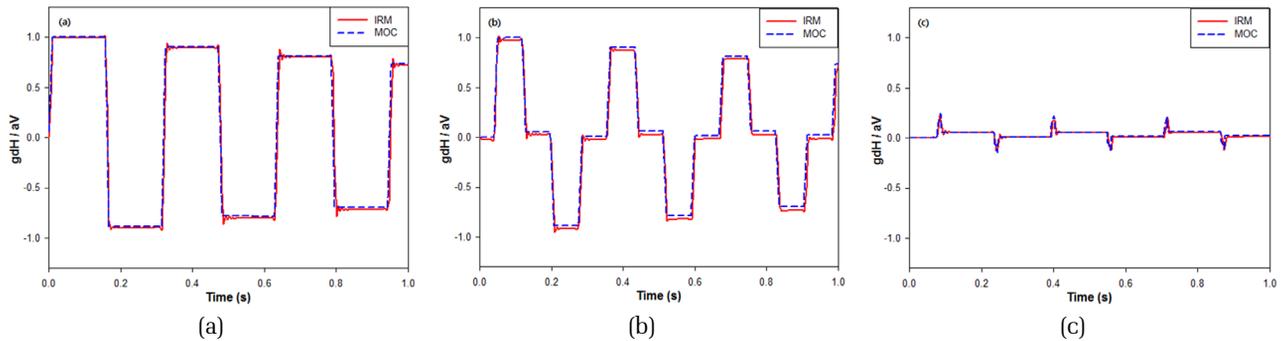


Fig. 7. Simulation results of IRM and MOC in two location (a) downstream valve (x=0); (b) middle of pipeline (x=50m); (c) next to pump (x=1m) - 2nd condition, 0.01sec instantaneous valve closure

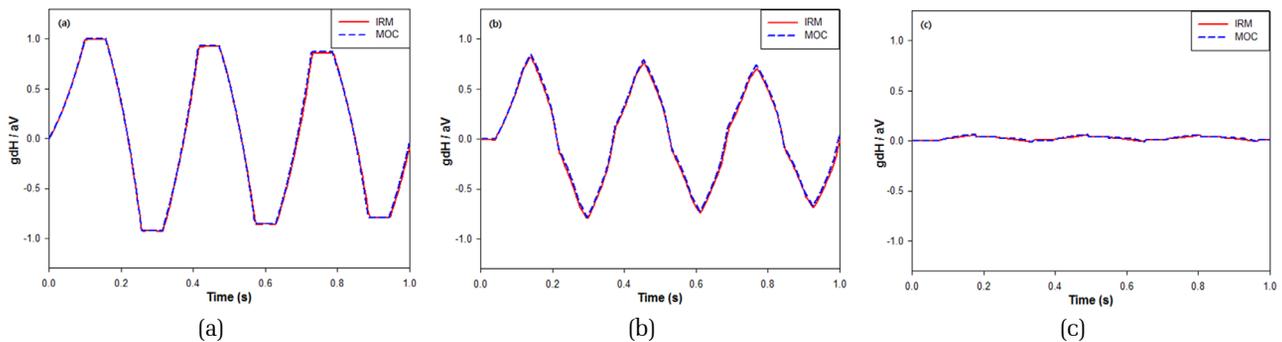


Fig. 8. Simulation result of IRM and MOC in two location (a) downstream valve (x=0); (b) middle of pipeline (x=50m); (c) next to pump (x=1m) - 1st condition, 0.1sec valve closure

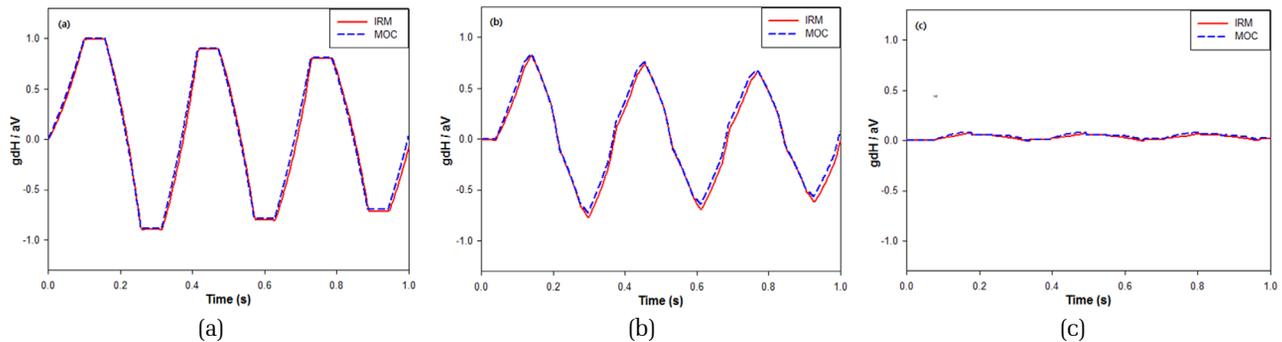


Fig. 9. Simulation results of IRM and MOC in two location (a) downstream valve (x=0); (b) middle of pipeline (x=50m); (c) next to pump (x=1m) - 2nd condition, 0.1sec valve closure

의 비도 조건 1과 동일하게 설정하였다. 최대 주파수 범위와 이산 역푸리에 변환을 위한 샘플의 개수도 동일하게 선정하였다. 조건 2의 펌프 성능곡선은 Fig.4.(b)와 같다. 밸브 급폐 상황의 수압변화를 임펄스 응답법으로 계산하고, 특성선 방법에서의 모의 결과와 비교하였다. Fig 7은 2번째 조건에서의 두 방법의 수압 계산 결과를 보여주고 있는데, 임펄스 응답법의 수압 모의 결과는 특성선 방법과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

완화된 조건인 0.1초와 0.5초의 완폐시간에서도 임펄스 응답법 수압 계산 결과와 특성선 방법의 계산 결과를 비교하였다. Fig 8, Fig 9, Fig 10, Fig 11은 밸브 완폐 조건에서의 수압 모의 결과이다. 임펄스 응답법과 특성선 방법의 계산 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 미세한 차이의 원인은, 두 가지가 있다. 먼저, 특성선 방법에서는 시간에 따라 오리피스 방정식의  $(C_{DA})_t / (C_{DA})_r$ 가 선형적으로 감소하는 형태로 밸브 개도의 변화를 나타내지만 임펄스 응답법에서는

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 545-559

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612

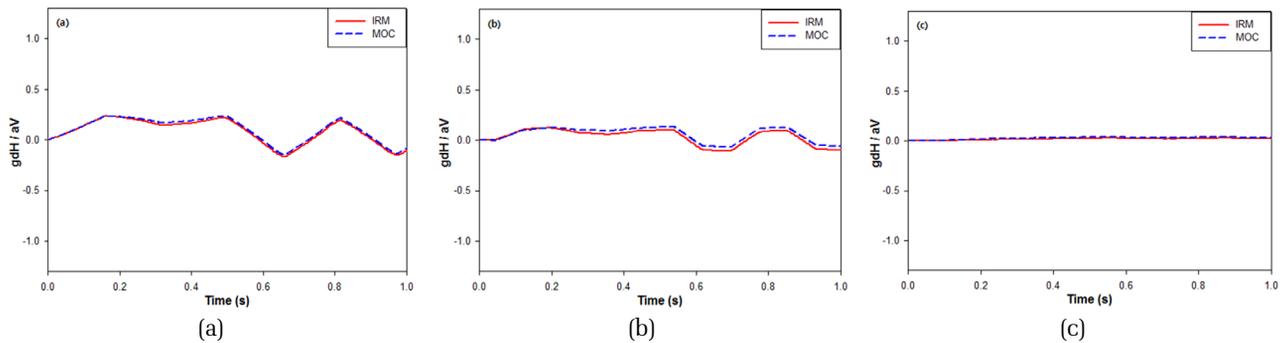


Fig. 10. Simulation results of IRM and MOC in two location (a) downstream valve ( $x=0$ ); (b) middle of pipeline ( $x=50m$ ); (c) next to pump ( $x=1m$ ) - 1st condition, 0.5sec valve closure

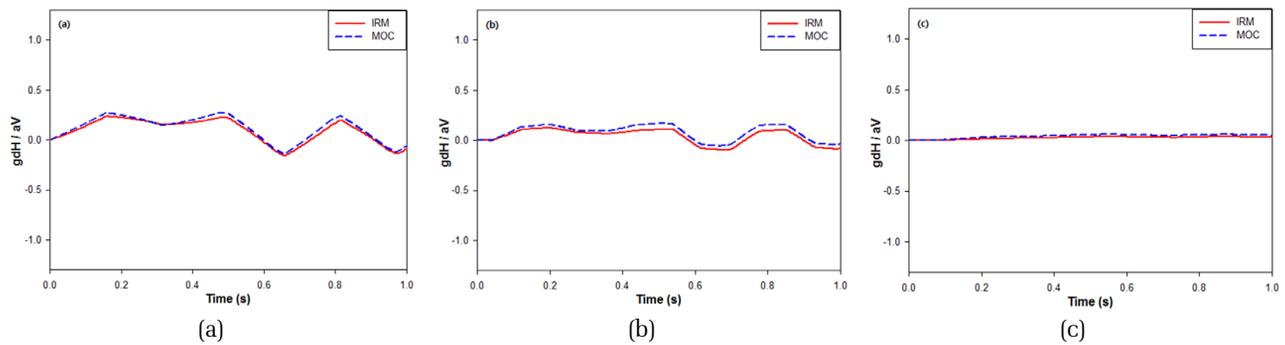


Fig. 11. Simulation results of IRM and MOC in two location (a) downstream valve ( $x=0$ ); (b) middle of pipeline ( $x=50m$ ); (c) next to pump ( $x=1m$ ) - 2nd condition, 0.5sec valve closure

하류 밸브 지점에서의 수압변화를 합성곱 하여 점진적으로 더해나가는 과정을 추가적으로 이용하기 때문에 밸브 폐쇄 시간이 길어짐에 따라 미세한 차이가 생길 수 있다는 점이다. 특성선 방법과 임펄스 응답법에서의 밸브의 개도 변화 계산 과정을 더 정밀하게 구현하면 모의 결과의 일치 정도를 향상시킬 것으로 예상된다. 둘째로, 하류 밸브 지점에서보다 관 중앙 지점에서의 MOC와 IRM의 계산 결과 차이가 조금 더 나는 이유는 하류 밸브 지점에서의 임펄스 응답을 구할 때는 전달 함수를 이용한 전진 계산만 하면 되지만, 관 중앙 지점에서의 임펄스 응답을 구할 때에는 후진 계산까지 해야 되기 때문이다. 이 두 가지 원인에 대한 연구는, 현존하는 수압이나 유량 센서의 정밀도를 고려하면 유용성이 높지는 않을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 임펄스 응답법 상에서 원심펌프의 경계조건을 구현하는 일련의 과정을 수행하였다. 수행된 연구결과의 적정성은 가상적인 관망에서 특성선

방법과 임펄스 응답법의 거동을 비교함으로써 평가되었다. 저수조-원심펌프-밸브 관로계에 임펄스 응답법을 적용하여 관로 하류의 유량조절밸브를 폐쇄하는 상황에서, *courant* 수와 같은 격자 생성의 제약조건 없이 관로 내부 지점의 수압계산을 할 수 있었다. MOC에서의 특성방정식을 이용한 시간 영역에서의 계산을 대신하여, 펌프 성능곡선을 바탕으로 간단한 원심펌프 관로 내 밸브 폐쇄 상황에서 주파수 영역에서의 전달 함수를 구하였다. 유도한 전달함수를 이용하여 임펄스 응답 함수를 만들었고, 임펄스 응답 함수를 이용하여 관로 내부 지점의 수압변동을 모의 한 결과 두 가지 펌프 관로계 그리고 밸브 급폐 조건, 완폐 조건 모두에서 전통적 방법인 특성선 방법의 계산 결과와 상당히 일치함을 확인할 수 있었다. 향후 펌프 정지, 펌프 시동 등의 상황에 대한 임펄스 응답법 적용 연구가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 한국연구재단 기본연구(NRF-2013R1A1



2058980)와 환경부 "차세대 에코이노베이션 기술개발 사업(RE201606133)"으로 지원 받은 과제입니다.

## References

- Abuiziah, I., Oulhaj, A., Sebari, K., Abassi Saber, A., Ouazar, D., Shakameh, N. (2013). Modeling and controlling flow transient in pipeline systems: Applied for reservoir and pump systems combined with simple surge tank, *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires.*, 1, 12-18.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. McGraw Hill, New York.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
- Covas, D., Ramos, H., Almeida, A. B. (2005). "Impulse response method for solving hydraulic transients in viscoelastic pipes", *XXXI IAHR Congress*(Vol. 1, pp. 676-686). Seoul, Korea, IAHR.
- Ghidaoui, M. S., Karney, B. W. (1994). Equivalent differential equations in fixed-grid characteristics method, *Journal of Hydraulic Engineering.*, 120, 1159-1175.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., Axworthy, D. H. (2005). A Review of Water Hammer Theory and Practice, *ASME Applied Mechanics Reviews.*, 58, 49-76.
- Karney, B. W., & Ghidaoui, M. S. (1997). Flexible discretization algorithm for fixed-grid MOC in pipelines, *Journal of Hydraulic Engineering.*, 123, 1004-1011.
- Kim, S. H. (2005). Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method, *Journal of Hydraulic Engineering.*, 131, 2001-2007.
- Kim, S. H. (2007). Impedance matrix method for transient analysis of complicated pipe networks, *Journal of Hydraulic Research.*, 45, 818-828.
- Kim, S. H. (2008). Impulse response method for pipeline systems equipped with water hammer protection devices, *Journal of Hydraulic Engineering.*, 143, 961-969.
- Kim, S. H. (2010). Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm, *Journal of Mechanical Science and Technology.*, 24, 629-636.
- Kim, S. H. (2016). Impedance Method for Abnormality Detection of a Branched Pipeline System, *Water Resources Management.*, 30, 1101-1115.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. (2006). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. John Wiley and Sons (Asia) Pte Ltd.
- Oppenheim, A. V. (1999). *Discrete-time signal processing*, 3rd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Shimada, M., Brown, J., & Vardy, A. (2007). Estimating friction errors in MOC analyses of unsteady pipe flows, *Computers & fluids.*, 36, 1235-1246.
- Suo, L., Wylie, E. B. (1989). Impulse response method for frequency-dependent pipeline transients, *Journal of Fluids Engineering.*, 111, 478-483.
- Tijsseling, A. S., Bergant, A. (2007). *Meshless computation of water hammer*. Department of mathematics and computer science, University of technology.
- Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1993). *Fluid transient in systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

pp. 481-489

pp. 491-500

pp. 501-509

pp. 511-519

pp. 521-532

pp. 533-543

pp. 545-551

pp. 553-559

pp. 561-569

pp. 571-577

pp. 579-586

pp. 587-596

pp. 597-604

pp. 605-612