

수리구조물이 부착된 관망에서의 천이류 해석에 대한 임펄스응답법과 특성선방법의 비교 연구

Comparison Impulse Response Method with Method of Characteristics
for Transient Analysis in a Pipeline System with hydraulic devices

송용석*, 장일**, 김상현***

Yong-Seok Song, Il Jang, Sang-Hyun Kim

요 지

관망 내에서 흐름의 연속 방정식과 운동량 방정식을 상 미분으로 전개하여 해석한 특성선 방법은 주로 가압 관망체계(Pressurized Pipeline System)에서의 부정류 해석(Unsteady Analysis)에 사용 된다. 그러나 이 특성선 방법은 천이류 해석을 위한 관망 재구성 과정에서 Courant수 조건의 만족을 위한 관의 재배열에 천문학적인 계산용량과 시간이 필요하다는 단점이 있다. 이는 현장 적용 시 압력과 전파속도의 불확실성과 연계되어 상당한 장해요소가 되고 있다. 이에 대안적인 방법으로서 임펄스응답법이 개발되었다. 이는 경계지점에서 복소수 유량에 대한 복소수 수두의 비율로써 정의된 관망에서의 수리임피던스를 역푸리에 변환에 적용하여, 주파수 영역의 수치를 시간 영역으로 변환하여 응답함수를 산출한 후, 산출된 응답함수와 구해진 경계지점에서의 유량과의 적분을 통하여 임의의 지점에서의 수두 및 유량을 계산하는 방법이다. 임펄스 응답법은 관 부속물관의 특성을 기술하는 수학적 표현의 난해함으로 인해 지금까지는 단일관에 대한 연구에만 국한되어 왔다. 본 연구에서는 임펄스응답법을 수리구조물이 부착된 관망에 적용하여 다양한 조건에서 천이류 분석을 시행하였다. 즉, 에어챔버 및 서지탱크와 같은 수리구조물을 각각에 대한 수리임피던스를 구하고, 가지관 및 통합 관성향으로 취급하여 수리구조물을 처리하였다. 그리고 이러한 결과를 특성선방법과 비교하여 그 적절성을 검증하였는데, 특성선 방법에 의한 모의 결과와 비교하였을 때, 일치하는 결과를 나타내었다. 임펄스 응답법에 의한 모의 결과에서 감쇄효과를 과대평가하는 경향이 관찰되었다. 이는 임펄스 응답법의 가정에 기인한 것으로서 난류 상태의 흐름에서 상당한 불일치를 가져올 수 있으나, 수리 구조물에 의한 수격압이 감쇄되는 과정에서 대부분 흐름이 층류 상태로 전환된다고 가정 할 때는 상당한 적용성이 있다. 본 연구는 수리구조물이 부착된 관망의 해석함에 있어서 임펄스응답법의 적용이 가능함을 보였고, 이는 보다 복잡한 관망에서의 천이류 해석이 가능함을 시사한다.

핵심용어 : 천이류, 임펄스응답법, 특성선방법, 수리구조물

1. 서 론

사회적으로 상수관로관리를 위한 다양한 접근과 시도가 국내외적으로 활발한 반면, 기술적인 진보는 사회적 요구를 부합하지 못하고 있다. 선진화된 관망 관리를 위한 절대 필요기술로는 관망 내의 수량과 수질을 부정류 가정하에서 해석할 수 있는 기술과 자료획득 및 제어 시스템으로 알려진 관망 감시기술이다. 이를 통해 획득된 수압이나 유량자료는 시간에 따라 변화하는 부정류 자료이다. 이를 해석할 수 있는 기술은, 원칙적으로 운동량 방정식과 연속 방정식 등의 해석 방정식

* 정회원·부산대학교 환경공학과 석사과정 E-mail : 20927@hanmail.net

** 정회원·부산대학교 환경공학과 석사과정 E-mail : hunglian@hanimail.net

*** 정회원·부산대학교 환경공학과 부교수 E-mail : kimsangh@pusan.ac.kr

을 시간상에서 기술하고, 해석된 결과를 확산 이송 방정식과 연립하여 풀어내어야 하나, 해석상의 난해함과 계산시간의 천문학적인 방대함, 해석을 위한 필요자료 자료획득의 부재, 관망의 위치나 부식상태 등의 부재에서 오는 불확실성 등으로 인하여 기술적인 접근이 제한되어 왔다(Roberson 등, 1995, 김상현 외, 2006). 이와 같은 이유로, 국내에서는 대부분의 관로내의 물 흐름과 관련된 해석은 정상류 해석모듈인 미국 환경청(USEPA)에서 개발한 EPANET2를 적용하는 수준을 벗어나지 못하였다.

관로내의 부정류를 해석하는 방법에는 다양한 방법이 존재하나, 대체적으로 시간상해석방법인 특성선방법이 널리 이용되고 있다. 특성선 방법은 부정류 해석을 위한 관망 재구성 과정에서 Courant수 조건의 만족을 위한 재배열에 천문학적인 계산용량과 시간이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 특성선 방법의 근본적인 문제를 해결할 수 있는 방법이 임펄스 응답법이다(Suo and Wylie, 1989).

2. 연구방법

2.1 특성선 방법

천이문제를 해석하는 방법 중에는, 특성선 방법(Method of Characteristic)이 계산상의 정확도와 편리성으로 가장 유용하게 사용되어진다(Roberson 등, 1995). 특성선 방법은 운동량방정식과 연속방정식의 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변형하는 방법으로 계산진행시간이 같아야 하는 단점이 있지만, 편미분 방정식을 정확하고 편리하게 해석할 수 있는 특성을 가지고 있다. 관수로에서 천이흐름을 표현하는 연속방정식과 운동량방정식은 임의의 승수를 사용하여 특성선 ($dx/dt = \pm c$)에 대한 전미분 형태로 나타낼 수 있고, 이를 그림 1에서 보여지는 AP선과 BP선을 따라 적분하면, 그림 1에서의 미지점 P에 대한 방정식을 식 (1)과 (2)와 같이 도출할 수 있다.

$$H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_P | Q_A | \quad (1)$$

$$H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + RQ_P | Q_B | \quad (2)$$

여기서, H 및 Q 는 한 지점에서의 압력수두 및 유량을, 특성임피던스는 $B = a/gA$, 저항계수는

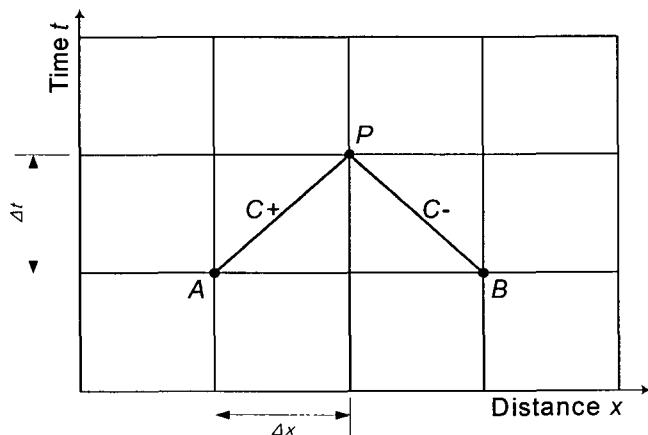


그림. 1 시간 축과 공간 축을 이용한 특성선의 해석

$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2}$ 을 의미한다. 또한 g 는 중력가속도, D 는 직경, A 는 단면적, f 는 압력파의 전달속도, Δx 및 Δt 는 계산과정의 필요한 시간차분 및 공간차분을 나타낸다.

2.2 임펠스 응답법

관수로에서 천이흐름을 표현하는 연속방정식과 운동량방정식으로부터 정상 반복흐름과 선형화된 마찰항의 가정으로부터 유도를 하면, 복소수 수압과 유량을 거리의 함수로 표현하면 다음과 같이 표현된다(Suo and Wylie, 1989).

$$H(x) = H_U \cosh \gamma x - Z_C Q_U \sinh \gamma x \quad (3)$$

$$Q(x) = -\frac{H_U}{Z_C} \sinh \gamma x + Q_U \cosh \gamma x \quad (4)$$

여기서 H 는 상류부를 의미하고, γ 는 전달계수, Z_C 는 특성 임피던스를 나타낸다.

관망시스템이 그림 2와 같은 시스템이라면, 수압반응함수와 전이함수사이에 다음과 같은 푸리에르 전환 관계가 성립되는데, 만약 하류부의 밸브로부터 유량 임펠스가 주어지면, 밸브와 에어챔브 사이의 밸브로부터 거리 x 만큼 떨어진 지점의 수압반응은 식 (5)과 같이 나타난다.

$$r_{x_3 h} = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^\infty (Z_{D3} \cosh \gamma x_3 + Z_C \sinh \gamma x_3) e^{iwt} dw \right] \quad (5)$$

여기서, Re 는 실수부를 의미하며, D_3 에서의 임피던스는 $Z_{D3} = \frac{Z_{U3} - Z_C \tanh \gamma l_3}{1 - (Z_{U3}/Z_C) \tanh \gamma l_3}$ 을, U_3 에서의 임피던스는 $Z_{U3} = \frac{-Z_C \tanh \gamma l_1}{(Z_C/Z_{D2}) \tanh \gamma l_1 + 1}$ 을, U_2 (에어챔브)에서의 임피던스는 $Z_{U2} = Z_A = \frac{i n \overline{H_A}}{\overline{Vw}}$ 을, D_2 에서의 임피던스는 $Z_{D2} = Z_{U2} - (R + iwl)_2 l_2$ 을 나타낸다. 또한 에어챔브와 저수지 사이의 밸브로부터 거리 x 만큼 떨어진 지점의 수압반응은 다음과 같이 나타난다.

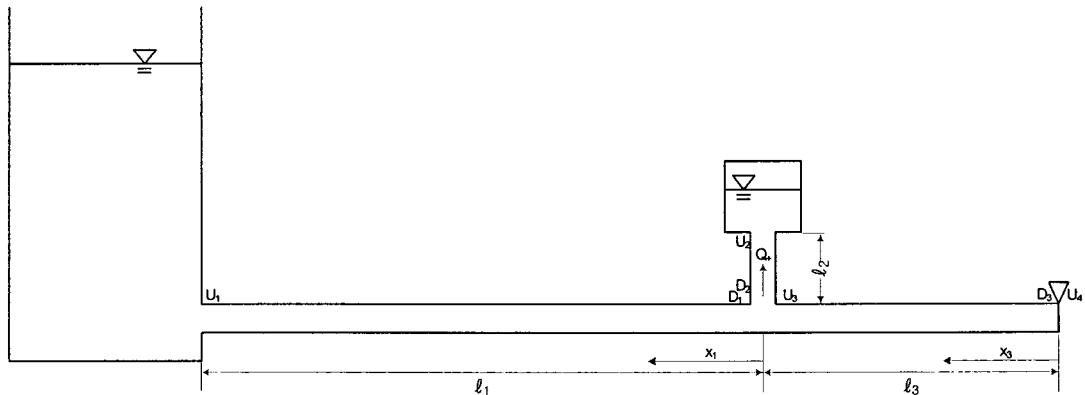


그림. 2 수리구조물(에어챔브)이 부착된 관망시스템

$$r_{x_1 h} = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[\int_0^\infty \left\{ K_1 \cosh \gamma x_1 + \sinh \gamma x_1 \cdot \left(-\frac{Z_C}{Z_{D2}} K_1 + K_2 \right) \right\} e^{iwt} dw \right] \quad (6)$$

여기서, $K_1 = Z_{D3} \cosh \gamma l_3 + Z_C \sinh \gamma l_3$, $K_2 = Z_{D3} \sinh \gamma l_3 + Z_C \cosh \gamma l_3$ 을 의미한다.

밸브에서의 유량 펄스를 $\Delta q_{D3}(t)$ 라고 가정하면, 수압반응과 합성곱(convolution)하여 밸브에서 일정거리가 떨어진 곳에서 수압을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h_{x3} = \int_0^t r_{x_3 h}(t-\tau) \Delta q_{D3}(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$\Delta h_{x1} = \int_0^t r_{x_1 h}(t-\tau) \Delta q_{D3}(\tau) d\tau \quad (8)$$

여기서, 밸브에서의 경계조건 $\Delta q_{D3}(t)$ 은, $\Delta q_{D3}(t) = (C_d A)_t \sqrt{2g \Delta h_{D3}(t)}$ 의 형태로 개입된다.

3. 연구 결과

본 연구는 그림 2와 같이 저수지와 밸브 및 수리구조물이 부착된 관망시스템으로서, 모의를 위한 관망은 재질은 스테인리스관이고, 직경(D)이 0.02m, 두께(e)가 0.003m이고, 에어챔브와 직경(D_A)은 2m, 에어챔브 내 공기의 부피(V)는 4m³이다. 또한 저수지와 에어챔브 연결지점사이의 길이(ℓ_1)는 100m, 관의 연결지점과 에어챔브 사이의 길이(ℓ_2)는 0.5m, 관 연결지점과 밸브 사이의 길이(ℓ_3)는 50m이다. 급폐시간(t_c)은 0.001초로 설정하였다.

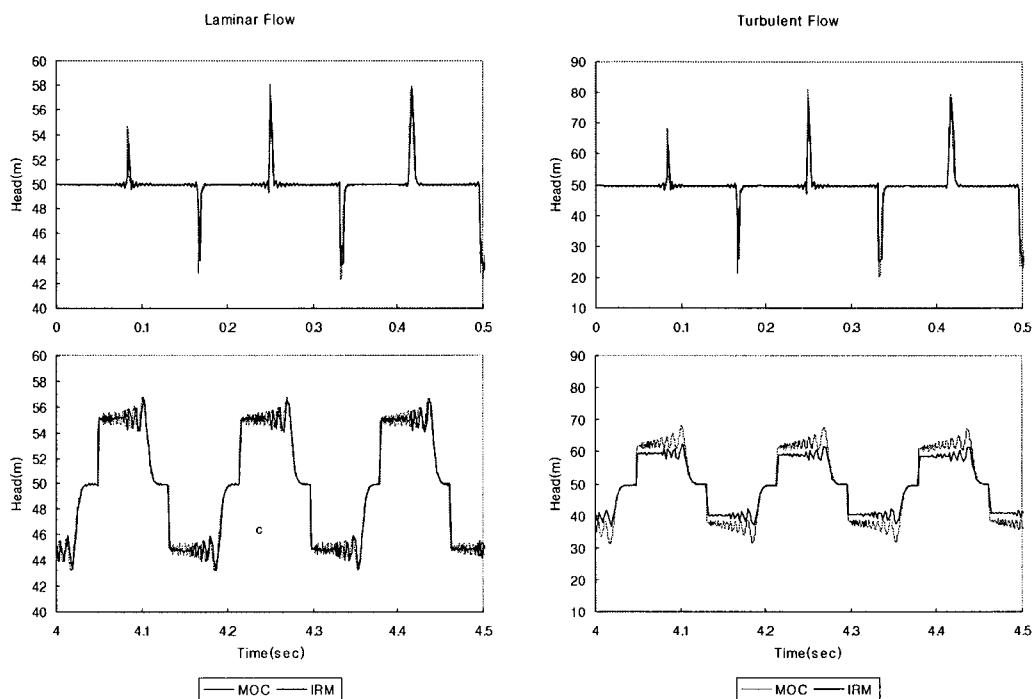


그림. 3 층류($Re=1470$)에서의 비교

그림. 4 난류($Re=5882$)에서의 비교

그림 3은 임펄스 응답법과 특성선 방법의 모의 결과를 Re 수가 1470인 층류에 대하여 비교한 것이다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 특성선 방법에 의한 결과와 임펄스 응답법에 의한 모의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 Re 수가 5882인 난류에 대한 모의 결과를 비교한 것이다. 수압반응의 초기에는 두 방법에 의한 모의 결과가 거의 일치함을 보여준다. 그러나 시간이 지남에 따라 점차 차이가 증가함을 알 수 있다. 즉, 임펄스 응답법에 의한 모의 결과가 특성선 방법에 의한 모의 결과 보다 감쇄효과를 과대평가하는 경향이 있음을 보여준다. 두 방법에 의한 파형의 변하는 거의 일치함을 알 수 있는데 이는 차후 추가 연구에 의해 보완될 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

기존의 특성선방법을 이용하여 수리구조물이 부착된 관망 내의 부정류를 해석하였다. 그러나 특성선방법은 근본적으로 관망 재구성 과정에서의 천문학적인 계산용량과 시간이 필요하다는 단점이 존재하므로 이에 대안적인 방법으로서 임펄스 응답법을 이용하여 수리구조물이 부착된 관망 내의 부정류를 해석하였다. 우선적으로 수리구조물의 대한 특성 임피던스를 적용하여 관의 경계지점에서의 유량 펄스에 대한 임의의 지점에서의 수압 반응함수를 식 (5), (6)과 같이 유도하였다.

또한 그림 2 및 같은 관망을 가정하여 관로 내의 부정류를 모의하였다. 모의 결과 층류에서는 두 방법이 거의 일치하는 결과를 보인 반면, 난류에서는 점차 시간이 흐름에 따라 임펄스 응답법에 의한 결과가 특성선 방법에 의한 결과보다 감쇄효과를 과대평가하는 경향이 있음을 보였다. 이는 임펄스 응답법의 가정에 기인한 것으로써 난류 상태의 흐름에서 상당한 불일치를 가져올 수 있으나, 수리 구조물에 의한 수격압이 감쇄되는 과정에서 대부분 흐름이 층류 상태로 전환된다고 가정 할 때는 상당한 적용성이 있을 것이다. 따라서 차후 추가 연구를 통해 보완될 수 있을 것이다. 본 연구는 수리구조물이 부착된 관망의 해석함에 있어서 임펄스응답법의 적용이 가능함을 보였고, 이는 보다 복잡한 관망에서의 천이류 해석이 가능함을 시사한다.

감 사 의 글

이 논문은 2007년도 제 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 현

1. Roberson, J. A., Cassidy, J. J., and Chaudhry, M. H., *Hydraulic engineering*. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1995,
2. Wylie, E. B., Streeter, V. L., Suo, L., *Fluid transient in systems*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New York, 1993
3. Suo, L., and Wylie, E. B., "Impulse response method for frequency-dependent pipeline transients." *ASME Journal of Fluids Engineering*, 111(4), 478-483, 1989
4. 이미현, 송용석, 김상현(2006). 단일관망에서 누수효과를 고려한 천이류 분석 및 실험. 대한상하수도학회지, 제20권 2호, pp. 207-214
5. 김현수, 송용석, 김상현(2006). 관조도와 난류를 고려한 부정류와 정상류 해석의 적용 연구, 대한상하수도학회지, 제20권 3호 pp. 357-366