

# 수력발전설비의 안전도 평가를 위한 수충격 해석 모형 개발

남명준<sup>1</sup>, 이재영<sup>1\*</sup>, 정우영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주) 신우엔지니어링 융합기술연구소, <sup>2</sup>강릉원주대학교 토목공학과

## Development of Water Hammer Simulation Model for Safety Assessment of Hydroelectric Power Plant

Myeong Jun Nam<sup>1</sup>, Jae-Young Lee<sup>1\*</sup>, Woo-Young Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fusion Research Institute, Sinwoo Engineering CO.,LTD.

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

**요약** 발전용 수력플랜트 분야는 기후변화 및 에너지 확보를 고려해 향후 지속적인 성장이 전망된다. 수력발전설비는 항상 수충격에 의한 위험에 노출되어 있고, 이에 대한 안정성 확보는 매우 중요하다. 수충격 현상은 밸브의 개도 조정이나 펌프와 터빈의 기동 및 정지 시 관로설비 전반에 걸쳐 발생하며, 예기치 못한 긴급 상황 시에는 더욱 현저하게 나타난다. 이와 같은 수충격에 대한 발전설비의 안정성 검토를 위해 본 연구에서는 수충격 발생 메커니즘을 반영된 특성선법을 적용한 수치해석기법(MOC-FDM: Method of Characteristic-Finite Dimensional Method, 이하 MOC-FDM)을 이용하여 전산수치 모형을 개발하였다. 개발모형은 발전설비의 주요시설인 저수지, 관로, 밸브, 펌프 등 경계조건을 반영하였고 가상시나리오 case를 적용하여 개발모형을 이용한 수치모의를 수행하였다. 개발모형 해석결과의 검증은 위해 발전설비의 주요 지점에서의 해석결과를 각각 제시하였다. 각 case 별 수충격 현상이 양호하게 재현되었으며, 상용모델의 수치해석결과와 비교분석 결과가 거의 유사하게 나타나 개발모형의 신뢰성을 확인하였다. 본 연구에서 제시된 전산수치 모델은 수력발전설비의 운영 중 발생할 수 있는 비정상상태의 유체 거동을 정교하게 예측함으로써 설비의 안정성 검토를 위한 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract** Sustainable growth of hydroelectric power plants is expected in consideration of climate change and energy security. However, hydroelectric power plants always have a risk of water hammer damage, and safety assurance is very important. The water hammer phenomenon commonly occurs during operations such as rapid opening and closing of the valves and pump/turbine shutdown in pipe systems, which is more common in cases of emergency shutdown. In this study, a computational numerical model was developed using the MOC-FDM scheme to reflect the mechanism of water hammer occurrence. The proposed model was implemented in boundary conditions such as reservoir, pipeline, valve, and pump/turbine conditions and then applied to simulate hypothetical case studies. The analysis results of the model were verified using the analysis results at the main points of the pipe systems. The model produced reasonably good performance and was validated by comparison with the results of the SIMSEN package model. The model could be used as an efficient tool for the safety assessment of hydroelectric power plants based on accurate prediction of transient behavior in the operation of hydropower facilities.

**Keywords** : Water Hammer, MOC-FDM, Hydroelectric Power Plant, Safety Assessment, Simulation Model

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업(19IFIP-B128598-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Jae-Young Lee(Sinwoo ENG CO.,LTD.)

email: vennard386@gmail.com

Received September 3, 2019

Revised September 30, 2019

Accepted January 3, 2020

Published January 31, 2020

## 1. 서론

국내외로 수력발전은 전력생산 및 공급원으로써 여전히 중요한 역할을 하고 있다. 특히 2000년대부터 기후변화 협약에 따른 환경문제와 신재생에너지 이용의 중요성이 강조되면서 청정에너지인 소수력을 개발하는 국가들이 증가하였다. 국내 수력발전설비의 개발상태는 약 53% 수준이며 선진국 대비 개발기술 수준이 미비하다. 또한 40년 이상 노후 된 수력발전시설은 매년 대량으로 발생하고 있으며, 이에 따라 수력발전설비 현대화의 중요성이 대두되고 있다. 수력발전설비의 현대화는 고효율 발전설비로의 고도화를 의미하며, 전체 수력발전시설물에 안정성 확보는 필수사항이 된다.

발전용 수력플랜트 분야는 기후변화 및 에너지 확보를 고려해 향후 지속적인 성장이 전망되므로 구성설비에 대한 안전성 진단기술 확보가 시급한 문제로 대두되고 있다. 수력플랜트 설비에서 발전사용수량 공급 시 관로 내 유속 및 압력변동의 교란에 의해 발생한 수충격은 관로 및 기반시설물의 안정성에 막대한 영향을 끼치게 된다. 그러므로 수충격에 대한 안정성 확보는 필수이며, 수충격에 대한 안정성 검토를 위해 현장실험이 가장 중요한 것이다. 그러나 시설의 규모에 맞는 대규모 현장실험은 막대한 비용손실을 발생시켜 현실적인 어려움이 따른다. 그러므로 국내의 수력발전시설의 개발 및 고도화에 있어 수치해석을 통한 수충격 안정성 평가가 필요하다.

수력발전설비의 수충격 해석을 위해 국내외 많은 연구진에 의해 연구가 이루어졌다. P.H. Azoury et al (1986)은 난류 마찰 조건에서 밸브폐쇄에 의한 수충격의 영향을 분석하기 위해 전산화 된 특성선법을 사용했다 [1]. Chaudhry(1987)는 탄성과 이론을 적용하여 수력발전소의 관로에 대한 안정성에 분석기준을 도출했다. 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 해당 기준의 유효성을 검증했으며, 각각의 매개변수에 대한 해석을 거친 결과, 관 재료의 탄성이 안정성평가에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다 [2]. Hongqing Fang et al(2008)은 MATLAB/Simulink 기반 유압 터빈의 비선형 특성과 비탄성 수충격해석 시뮬레이터를 개발하였다. 유압 터빈 속도 조절기 및 서지 탱크와 같은 기타시설의 매개변수의 영향을 평가하였고, 중국의 실제 수력 발전소에 적용되었다 [3]. 국내의 수충격에 대한 안정성평가는 주로 상·하수도 관망시스템에서의 평가가 대부분이며, 수력발전설비의 수충격에 대한 안정성평가는 미비한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 수충격 발생메커니즘분석과 수치해석

기법을 수립하고, 이를 바탕으로 한 수력발전시설에 대한 비정상 유동해석 프로그램을 개발하였다. 또한 일반적인 수충격 발생현상을 고려한 개념모형을 적용하여 수충격 수치모의해석 및 민감도 분석을 실시하였고, 상용 수충격 해석프로그램의 해석결과와의 비교분석을 통해 개발모형의 성능 및 신뢰성을 검증하고자 하였다.

## 2. 비정상 유동해석모형 개발

### 2.1 수충격 발생 메커니즘

수충격은 관로 시스템 내의 속도가 급변하는 경우에 발생하는 수력적 부정류를 의미한다. 단순한 관로와 밸브가 설치되어있는 상황으로 단순화된 일련의 공식에 따라 수충격 발생 메커니즘을 이해할 수 있다. 수압관로에서 하류부 밸브의 급폐쇄로 인해 물은 순간적으로 정지하여 순간적으로  $\Delta H$ 의 압력수두만큼, 관내압력이 급상승하며 압력파는 상대적으로 압력수두가 낮은 상류부로 전파된다. 이후 상류부에서 상승된 압력은 정상상태를 유지하기 위해 압력파는 다시 밸브 쪽으로 진행되며, 이 과정이 반복되면서 관내압력은 점차 정상상태에 도달하게 된다. 이러한 부정류 현상이 정상유동상태로 복귀 하는데는 시간 단위가 아닌  $L/a$  단위 시간의 주기로 변화한다(Fig. 1)[4].

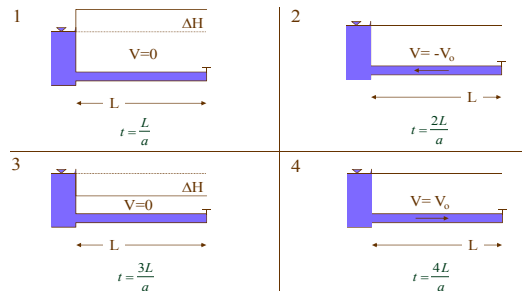


Fig. 1. Water hammer mechanism in single pipe system

밸브의 급폐쇄로 인해 증가된 압력수두( $\Delta H$ )는 속도  $a$ 로 전파된다. 속도  $a$ 는 관로의 입장에서 고정관찰자의 상대적인 속도로 압력이 전달되는 파속이다. 파속은 탄성 이론에 의하여 계산되며 관의 두께, 관의 재질, 탄성계수, 프와송비 등에 의해 결정된다(Eq. (1))[5].

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}(C)} \quad (1)$$

여기서,  $a$ =압력파의 전파속도,  $\rho$ =유체의 밀도,  $K$ = 체적 탄성계수,  $e$ =관 두께,  $D$ =관 직경을 나타낸다.

## 2.2 수충격 해석을 위한 수치해석 기법

### 2.2.1 지배방정식

관로내의 대부분의 흐름은 부정류 상태이며, 이는 특정지점의 유체의 속도와 압력은 시간에 따라 변화함을 의미한다. 계통내의 압력과 평균유속 또는 수두와 유량이 미지변수로 사용되고 독립변수는 계통의 관로를 따른 거리와 시간이 된다. 유체계통에서의 과도현상은 운동량방정식과 연속방정식으로 나타낼 수 있으며 Eq. (2)는 Eq. (3)에 의해 주어진 1차원의 비정상 압력 흐름 방정식이다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + V \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f |V| |V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

여기서  $H$ =압력수두,  $V$ =유속,  $\theta$ =파이프 경사,  $g$ =중력가속도,  $t$ =시간,  $f$ = Darcy-Weisbach 마찰 계수,  $x$ = 파이프를 따른 거리이다.

### 2.2.2 특성선법 변환

천이문제를 해석하는 방법 중에는, 특성선법이 계산상의 정확도와 편리성으로 가장 유용하게 사용된다[6]. 특성선법은 운동량방정식과 연속방정식의 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변형하는 방법으로 미소 공간축과 미소 시간축의 비가 파속도로 정의된 특성선상에서, 지배방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 유한차분 형태로 적분하여 임의의 지점의 수압과 유량(유속)을 구하는 기법이다. 특성선법을 이용하여 Eq. (2)와 Eq. (3)을 압력  $H_p$  와 속도  $V_p$ 에 대한 방정식으로 변환 가능하며 Eq. (4),(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_p = \frac{1}{2} \left[ \frac{a}{g} (V_{\leq} - V_{Ri}) + (H_{\leq} + H_{Ri}) \right. \\ \left. - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} (V_{\leq} |V_{\leq}| - V_{Ri} |V_{Ri}|) \right] \quad (4)$$

$$V_p = \frac{1}{2} \left[ (V_{\leq} + V_{Ri}) + \frac{g}{a} (H_{\leq} - H_{Ri}) \right. \\ \left. - \frac{f \Delta t}{2D} (V_{\leq} |V_{\leq}| + V_{Ri} |V_{Ri}|) \right] \quad (5)$$

### 2.2.3 경계조건 구현

단일관로 시스템에 대한 경계조건을 구현하기 위해 상류 경계조건을 저수지 수위에 상응한 수치로 간주하고 정리하면 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{P1} = H_0 \quad (6)$$

$$V_{P1} = V_2 + \frac{g}{a} (H_0 - H_2) - \frac{f \Delta t}{2D} V_2 |V_2|$$

또한, 하류 밸브의 경계조건은 Eq. (7)과 같이 압력수두로 나타낼 수 있다.

$$H_{P_{N+1}} = H_N - \frac{a}{g} (V_{P_{N+1}} - V_N) - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} V_N |V_N| \quad (7)$$

한편, 펌프의 경계조건을 구현하기 위해 관로 상류에서의 유량을 제어하는 방정식을 결합하여  $Q$ 의 단일 비선형 방정식이 얻어진다(Eq. (8)).

$$H_p = A' Q^2 + B' Q + C' \quad (8)$$

여기서  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ 은 펌프의 상수매개변수이다.

또한, 유량  $Q = V_{p1} A$ 로  $H_p = H_{p1} - H_{\Sigma p}$ 로 대체하여 정리하면(Eq. (9)),

$$H_{p1} = A V_{p1}^2 + B V_{p1} + C \quad (9)$$

따라서,  $V_{p1}$ 에 대해 정리하면(Eq. (10)),

$$\left( \frac{g}{a} A_p \right) V_{p1}^2 + \left( \frac{g}{a} B_p - 1 \right) V_{p1} \\ + \left( V_2 + \frac{g}{a} C_p - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f \Delta t}{2D} V_2 |V_2| \right) = 0 \quad (10)$$

## 2.3 개발모형 구성

본 연구에서는 단순관로의 수충격 해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 수충격 거동예측 프로그램은 앞서 기술한 MOC-FDM을 기반으로 개발되었으며 Compaq Visual Fortran 6.5로 작성되었다. Parameter optimization을 통해 소스코드가 디버깅 되었고 프로그램의 알고리즘구성은 Fig. 3과 같다. 반복해 기법(Newton Raphson)을 통해 적정 근사값을 모의하도록 되어있으며, 각 관로, 밸브, 펌프, 터빈 등 수력발전설비의 시스템을 적용하였다. 개발모형의 입력자료로는 관로연장길이  $L$ , 관경  $D$ , 마찰손

실계수  $f$ , 파속  $a$ , 정상흐름 시 유속  $V_0$ , 관로의 분절 수  $N_{parts}$ , 관로의 기울기를 계산하기 위한 상류와 하류의 관입부의 고도 El. up, El. down 및 저수지의 수위  $H_0$  등으로 수력발전설비의 형상에 대한 제원과 총 계산시간 및 계산간격( $T_{max}$ ,  $\Delta t$ )과 밸브의 폐쇄시간( $T_c$ )을 결정할 수 있으며, 밸브의 폐쇄는 선형폐쇄로 설정하였다.

펌프·터빈의 가동조건, 펌프·터빈특성곡선(Characteristic Curve)등 경계조건을 반영하여 입력할 수 있게 하였다.

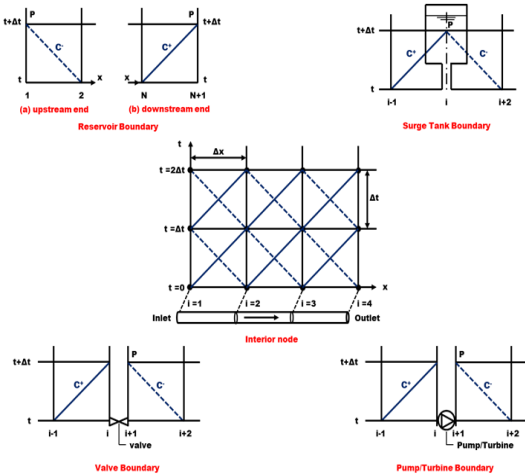


Fig. 2. Boundary condition in MOC-FDM

### 3. 개발모형의 적용

#### 3.1 개념모델에 대한 적용

본 연구에서 개발된 비정상 유동해석 모형의 적용성을 검토하기 위해 가상의 개념모델에 대한 모의를 수행하였다. 수충격을 발생시키는 순간적인 압력변동의 주원인으로는 밸브의 급폐쇄, 펌프 및 터빈의 비정상적 가동 등이 있다[7]. 이러한 조건을 반영한 3 case의 개념모델을 만

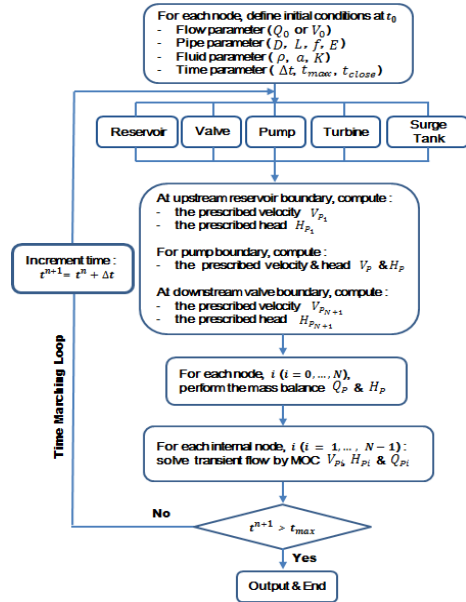


Fig. 3. The flow chart of computational algorithm

들었으며, 각각의 개념모델은 Fig. 4와 같다.

#### ① Case I

Case I은 밸브의 긴급폐쇄에 의해 발생하는 수충격을 해석하였다. 본 개념모델은 일반적인 수충격 해석모델 개발과정에서 가장 많이 고려되며 저수지-관로-밸브-저수지 순의 단순형태로 구성되어 있다. 상류단 저수지의 수두  $H_0=220m$  관로 길이  $L=1500m$ , 관 직경  $D=0.8m$ , 파속  $a=750m/s$ , 마찰손실계수  $f=0.02$  등으로 구성되어 있으며 관입구와 출구의 높이는 각각 30m, 15m이다. 초기 유속은 1.5m/s로 설정하였으며 총 계산시간은 100초, 계산간격은 0.25초이다. 밸브폐쇄속도 변화에 따른 민감도 분석을 위해 밸브폐쇄시간을 5초와 10초 두 가지의 선형폐쇄조건으로 계산하였다(Fig. 5).

해석결과 밸브폐쇄시간에 따라 상승 및 하강 압력파의 왕복 소요시간인 8초 간격으로 수두의 주기적 변동을 확

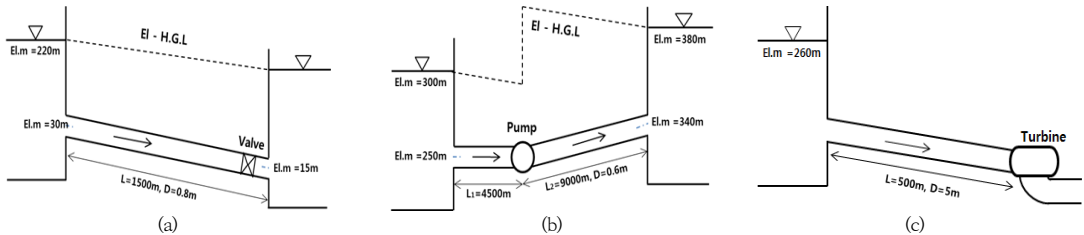


Fig. 4. Conceptual model for validation of this study  
(a) Case I (b) Case II (c) Case III

인하였다. 밸브폐쇄시간 10초의 계산결과보다 밸브폐쇄 시간이 5초로 더 짧은 경우 수두 및 유속변동의 주기가 더 앞당겨졌으며, 압력수두 및 유속의 변동폭이 두 배 이상 증가한 것으로 나타나 밸브폐쇄시간이 짧을수록 관내에 작용하는 압력증가량이 커지는 것을 확인하였다. 또한 저수지의 인접부인 상류부근에선 압력수두의 변동보다 유속의 변동폭이 큰 것으로 나타났으며, 밸브방향으로 진행될수록 압력수두의 변동폭이 점차 커지는 것으로 보아 밸브부의 급폐쇄에 의한 압력수두 모의를 정상적으로 한 것으로 판단된다(Fig. 6).

② Case II

Case II는 정상 운영되는 관로설비에서 펌프의 긴급정지 시 발생하는 수충격을 모의하고자 하였다. 가상모델은 저수지-관로-펌프-관로-저수지 순으로 구성되어있으며, 두 관로의 길이는 각각  $L_1=4500m$ ,  $L_2=9000m$ 이고, 관직경  $D=0.6m$ , 마찰손실계수  $f=0.013$ , 파속  $a=1100m/s$  등으로 구성되어 있다. 관로의 입구 및 출구높이는 각각 250m와 340m이다. 또한 펌프는 회전수  $N_s=3020$ ,  $RPM=1775$  로 Ingersoll\_Dresser 15H277 펌프를 사용하였다. 펌프의 제원 및 특성곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 총 계산시간은 100초, 계산간격은 0.412초이다. 해석결과는 Fig. 8에 나타내었다.

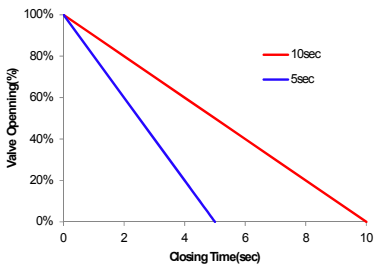


Fig. 5. Valve closing time

Fig. 8 (a)에서 나타나듯 긴급정지가 발생하는 펌프의 직상-하류부근인 흡입부와 토출부에서 압력수두의 차이가 크게 나타났다. 펌프가 정지되는 순간부터 흡입부의 수두는 상승하게 되고, 압력파가 저수지에 도달하여 상승 압력수두가 상쇄되고 반대로 저수지에서 펌프방향으로 감소압력수두가 발생되며 이런 과정이 반복되면서 수두 손실에 의해 점차 감쇄된다. 또한 흡입부 관로보다 관로 길이가 두 배인 토출부 관로에서 수두의 변화폭이 더 넓게 나타나는 것으로 보아 합리적인 계산결과임을 알 수 있다. 유속결과 또한 펌프의 감속으로 인해 유속은 점차 감소하며 펌프주변부에서는 속도변화가 0이 된다.

③ Case III

터빈의 경계조건을 반영한 case로 저수지-관로-터빈-관로-저수지 순으로 구성하였다. Governor의 긴급정지에 의한 기능상실 조건이며 61.7MW의 터빈이 44.8MW로 약 30%의 기능상실이 발생하는 시나리오로 계산되었다.

국내의 대다수 수력발전설비는 환경 대비 수압철관의 길이가 짧은 특성을 반영하여 상대적으로 수압철관의 길이를 짧게 하여 모델을 구성하였다.  $L=500m$ ,  $D=5m$ ,  $f=0.013$ ,  $a=1200m/s$  등으로 구성되어 있으며, 총 계산시간은 18초, 계산간격은 0.2초이다. 터빈의 제원으로

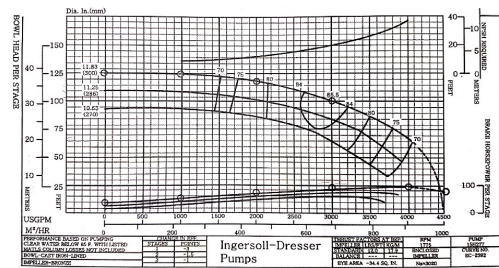


Fig. 7. Characteristic curve in pump

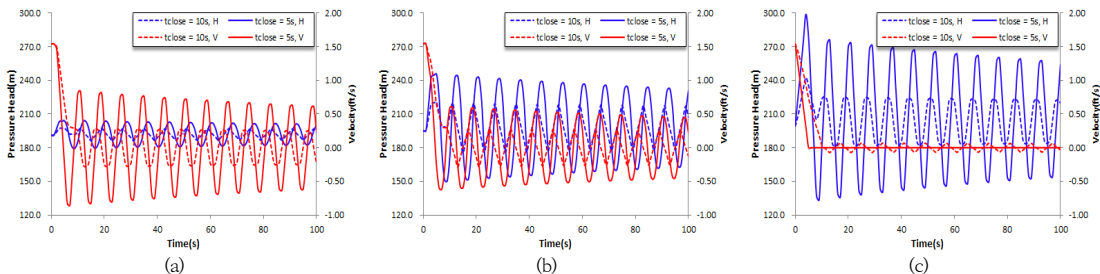


Fig. 6. Transients in a reservoir valve system (case I)  
(a) reservoir (b) pipe (c) valve

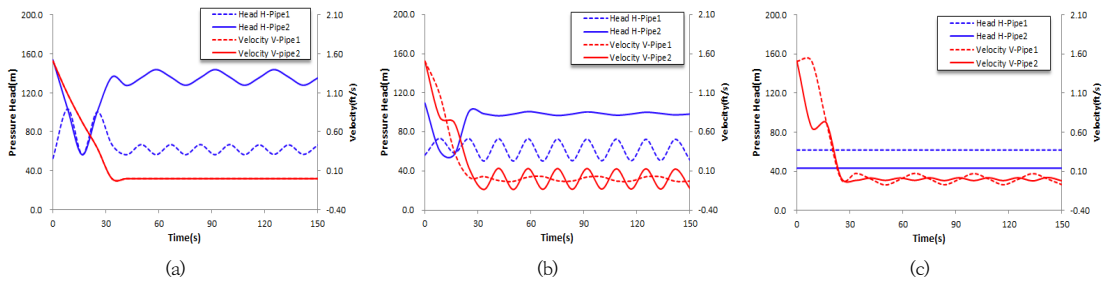


Fig. 8. Transients in a pumping system (case II)  
(a) pump (b) pipe (c) reservoir

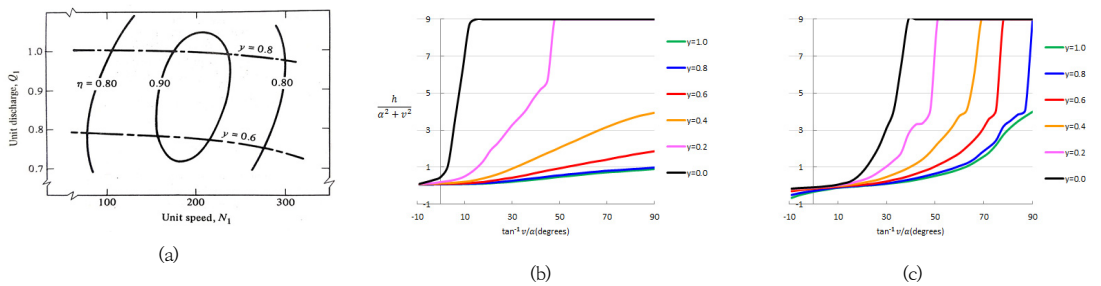


Fig. 9. Hill chart;(a) and dimensionless characteristic curves;(b),(c) in turbine

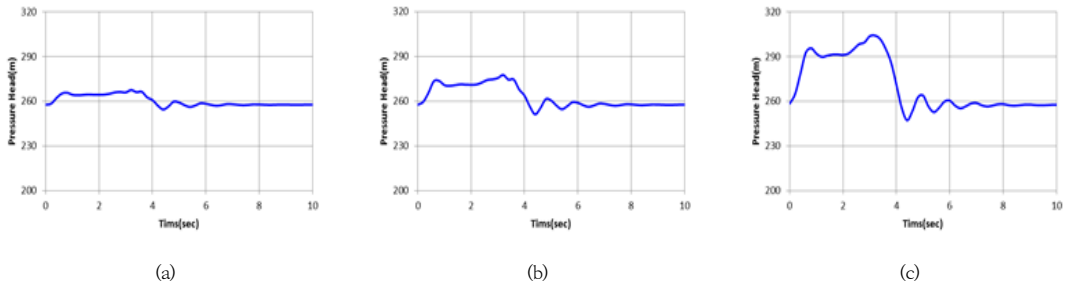


Fig. 10. Transients in a turbine system (case III)  
(a) Reservoir (b) Pipe (c) Turbine

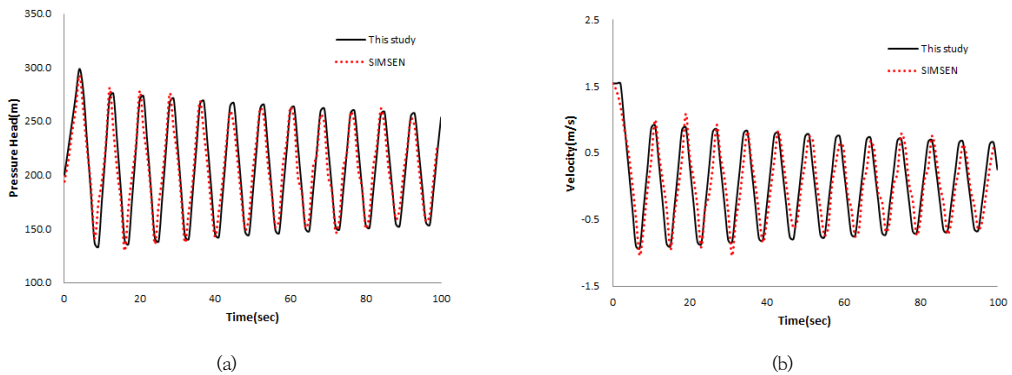


Fig. 11. Comparison of results between this study and SIMSEN  
(a) pressure head (b) velocity

$RPM=200$ , 초기유량조건  $Q_0=115m^3/s$ , 토크는  $T_R=4.11(10)^6Nm$ , 터빈의 회전관성  $WR^2=48.1(10)^6Nm^2$ 이며, 입력자료로 사용된 무차원 특성곡선은 Fig. 9에 수치해석결과는 Fig. 10에 나타내었다. 모의결과 터빈부의 수충격 발생 시에 나타나는 일반적인 압력거동[8]을 잘 묘사하고 있음을 확인하였다. 일반적으로 긴급정지 시 부하거부로 인한 터빈 입구부에서 수두가 급격히 증가하며 안내깃이 완전히 닫히는 시간까지 증가된 압력이 일정수두를 유지하고 안내깃이 완전히 닫히면서 한 번 더 터빈부의 압력이 증가하게 된다. 이후 점차 안정화되는 과정까지 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

### 3.2 개발모델 신뢰성 검토

개발모델의 신뢰성 검토를 위해 Case1의 개념모델에 적용하여 수력발전설비의 전산유체해석 상용모델인 SIMSEN의 모의결과와 비교하였다. SIMSEN 모형은 수력발전설비의 비정상 유동해석 모형으로 본 Case의 모의결과 검토에 적합하며, 결과의 신뢰성 또한 여러 연구에 의해 입증된 바 있다. 수치해석결과 중 밸브 주변부 관로의 수두변동 및 유속변동결과를 비교하였다(Fig. 11). 개발모형과 SIMSEN의 해석결과 최초 수두가 상승하기 시작하여 최대상승수두가 각각 298.8m와 296.3m로 약 0.8%의 오차를 보이며, 수두의 상승과 저하가 반복되는 주기 또한 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 유속의 경우 최대유속은 1.54m/s로 일치하며, 최소치는 -0.93과 -1.01로 약 7.9%의 오차가 나타났다. 여기서 (-)는 저류지방향인 역방향 유속이다. 유속의 변동 주기 또한 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 수력발전설비 중 관로설비에서 발생할 수 있는 수충격에 대한 메커니즘을 정립하고, 안정성 평가를 위한 수충격 해석프로그램을 개발하였다. 다수의 연구진에 의해 정립된 수충격 해석이론인 특성선법을 유한차분법을 통해 계산하며 이를 Fortran으로 코딩하였다. 개발모형의 검증에 위해 세 가지 Case의 수충격 모의를 실시하였다. 해석결과, 조건에 따른 압력수두의 변동 및 관내 유속변화를 합리적으로 모의하는 것으로 나타났다. 또한 개발모형의 신뢰성 검토를 위해 상용모델인 SIMSEN과 같은 Case로 모의한 결과와 비교하였으며,

수두 및 유속의 결과값과 수두상승과 수두저하의 주기가 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 개발된 모형을 통해 수력발전설비의 운영 중 발생할 수 있는 수충격에 대한 합리적인 모의가 가능할 수 있음을 제시한다.

## References

- [1] P. H. Azoury, M. Baasiri, H. Najm, "Effect of Valve-Closure Schedule on Water Hammer." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.112, No.10, pp.890-903, October, 1986.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE0733-9429\(1986\)112:10\(890\)\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE0733-9429(1986)112:10(890)))
- [2] M. H. Chaudhry, *Applied Hydraulic Transients*. p.583 Springer NY, 1979. pp.10-220  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- [3] H. Fang, L. Chen, D. Nkosinathi, Z. Shen, "Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.23, No.3, pp.834-841, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2008.921560>
- [4] B. E. Larock, R. W. Jeppson, G. Z. Watters. *Hydraulics of Pipeline Systems*, p.552, CRC press 1999, pp.15-20  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/9781420050318>
- [5] J. Carlsson., *Water Hammer Phenomenon Analysis using the Method of Characteristics and Direct Measurements using a 'stripped' Electromagnetic Flow Meter*, Master's Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp.5-7, 2016.
- [6] E. B. Wylie, V. L. Streeter, *Fluid Transients in System*, P.463, Prentice-Hall INC, 1993, pp.37-43
- [7] V. Iliev, P. Popovski, Z. Markov, "Transient Phenomena analysis in Hydroelectric Power Plants at off-design operation conditions," *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 6, pp. 1480-1488, 2012
- [8] S. Dursun. *Numerical Investigation of Protection Measures Against Water Hammer in the YESILVADI Hydropower Plant*, Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, pp.73-75, 2013.

남 명 준(Myeong Jun Nam)

[정회원]



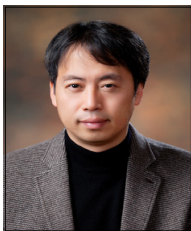
- 2015년 2월 : 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 12월 : 인스티 인프라연구소 연구원/대리
- 2018년 1월 ~ 현재 : (주)신우 ENG 융합기술연구소 선임연구원 /과장

<관심분야>

수자원, 전산유체공학

이 재 영(Jae-Young Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2010년 12월 : 플로리다 주립대(UCF) 연구교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : (주)신우ENG 융합기술연구소 소장

<관심분야>

수자원, 전산유체공학, 수문지질공학

정 우 영(Woo-Young Jung)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 뉴욕주립대(버펄로) 토목환경공학 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2004년 2월 : MCEER Research Associate
- 2004년 3월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

전산구조 및 내진공학, 복합재료(FRP)공학