

시나리오 기반 수력플랜트 설비의 취약성 평가

남명준¹ · 이재영^{2*} · 정우영³

¹(주)신우엔지니어링 융합기술연구소 선임연구원, ²(주)신우엔지니어링 융합기술연구소 연구소장, ³강릉원주대학교 토목공학과 교수

Scenario-based Vulnerability Assessment of Hydroelectric Power Plant

Myeong Jun Nam¹, Jae Young Lee^{2*}, and Woo Young Jung³

¹Researcher, Fusion Research Institute, Sinwoo Engineering CO., LTD.

²Research Director, Fusion Research Institute, Sinwoo Engineering

³Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

요약

최근 신재생 에너지를 활용한 친환경 발전시설의 중요성이 대두되고 있으며 수력발전소는 매우 중요한 전력생산 및 공급원이다. 수력발전소는 일반적으로 대규모로 운용되고 다중 시설이 연계되어 있어 안전성 확보가 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 수력플랜트 설비의 안전성을 평가하기 위해 시나리오 기반의 수충격에 따른 수압관로의 취약성 평가를 수행하였다. 자체 개발한 수충격 해석모델 (TRANSHAM)과 기존 상용모델(SIMSEN)의 모의결과 및 모니터링 자료와의 비교를 통해 해석모델의 신뢰성을 검증하였고, 실제 운영 중인 수력플랜트에 적용하여 발전설비 운영 중에 발생 가능한 수충격 시나리오를 구성하였다. 이를 바탕으로 시나리오 기반의 수압관로의 수충격 해석 및 취약성 평가를 수행하였다. 내·외부 로딩조건을 고려한 시나리오별 모의 결과, 발전설비 운영에 따라 수압관로의 취약성이 상이하게 나타났으며 내·외부 로딩조건 조합에 따라 수압관로의 취약성에 큰 영향을 미치는 것으로 예측되었다. 본 연구에서 제시한 시나리오 기반의 해석기법은 향후 수충격에 따른 발전설비의 취약성을 평가하는데 정량적인 도구로 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어: 시나리오, 수충격, 수력발전소, 취약성 평가, 수압관로

ABSTRACT

Recently, the importance of eco-friendly power generation facility using renewable energy has newly appeared. Hydropower plant is a very important source of electricity generation and supply which is very important to secure safety because it is commonly connected with multi facility and operated on a large scale. In this study, a scenario-based analysis method was suggested to assess vulnerability of a penstock system caused by water hammer commonly occurred in the operation of hydropower plants. A hypothetical hydropower plant was used to demonstrate the applicability of a transient analysis model. In order to verify reliability of the model, the prediction of pressure behaviors were compared with the results of commercial model (SIMSEN) and measured data, then a real hydroelectric power plant was applied to develop all potential water hammer scenarios during the actual operation. The scenario-based simulation and vulnerability assessment for water hammer in the penstock system were performed with internal and external load conditions. The simulation results indicated that the vulnerability of a penstock system was varied with the operating conditions of hydropower facilities and significantly affected by load combination consisting of different load scenarios. The proposed numerical method could be an useful tool for the vulnerability assessment of the hydropower plants due to water hammer.

Keywords: Scenario, Water hammer, Hydroelectric power plant, Vulnerability assessment, Penstock

*Corresponding author: Jae Young Lee, vennard386@gmail.com

Received: 17 December 2020, Revised: 2 March 2021, Accepted: 15 March 2021



1. 서론

최근 신재생 에너지 및 친환경 발전시설의 중요성이 대두되고 있으며 그 중 수력발전은 청정에너지로써 전력의 생산 및 공급원의 중요한 역할을 담당하고 있다. 수력발전소의 수압철관(Penstock)은 수차(Turbine)로 물을 공급하는 역할로 설비 내 가장 핵심이 되는 시설 중 하나로써 발전설비의 규모와 운용능력을 고려하여 설계된다. 수압철관의 안전도를 저해하는 여러 요인 중 가장 큰 요인은 관로 내 갑작스런 유동변화로 인해 발생하는 수충격이다. 수력발전설비에서 발생하는 수충격의 발생 원인은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 발전시설 유역의 이상기후로 인한 홍수발생 시 댐 상·하류에 급격한 수위변화로 인한 외부 부하조건이다. 두 번째는 발전설비 운영 중 설비조작의 부주의 또는 기계설비의 이상으로 발생 가능한 부하 차단(Load-rejection)과 정상운전 중에 사고로 인하여 갑자기 운전이 정지될 때(Emergency Shutdown) 혹은 밸브를 빠르게 닫을 때(Suddenly valve closure)인 내부 부하조건이다. 이러한 조건에서 발생된 수력학적 과도현상에 의해 수압철관은 팽창이나 좌굴하며 갑작스런 변형이 일어나게 되고 이에 따른 통수단면적에 급격한 변화로 인해 수압철관의 관체 뿐만 아니라 기타 발전시설의 안전도에도 영향을 미치게 된다. 2000년도 스위스에 Bieudron 수력발전소는 밸브 제어 시스템 고장으로 인한 수압철관 파열로 인해 1296 MW의 시설이 손실되고 3명이 사망하는 사고가 발생했고, 2009년 6400MW급의 대규모 발전소인 러시아 Sayano-Shushenskaya 수력발전소에서도 한 개의 터빈부에서 발생한 수충격에 의해 9개의 터빈 및 발전소가 전부 파괴되는 대규모 피해사례가 발생한 것으로 보고되었다(Adamkowski and Lewandowski, 2015). 그러므로 수충격에 의한 취약성을 평가하는 것은 수압철관뿐만 아니라 수력발전설비의 전반적인 안전도를 평가하는데 유의미하다고 볼 수 있다.

수충격에 대한 취약성을 평가하는 가장 명확한 방법은 실제 기반시설에 대한 현장실험이다. 그러나 실제 운영중인 시설에 현장실험은 막대한 비용손실을 유발하여 현실적인 적용에 어려움이 있다. 그러므로 수치해석을 통한 시뮬레이션 결과를 고려한 수충격 취약성평가 분야에서 필수적인 기술이라 할 수 있다.

Chaudhry(1979)는 탄성과 이론을 기반으로 수력발전설비의 수압철관의 취약성 분석기준을 제시하였다. 수치해석을 통해 유효성을 검증했으며, 민감도 분석결과 관 재료의 탄성이 취약성평가에 가장 중요한 요소임을 강조하였다. Wylie(1993)은 관로 및 발전시스템에서 유체의 과도현상에 대해 정립하였고 MOC-FDM 기법을 개발하였다. Bulent et al.(2004)는 수력발전설비의 수충격해석모형을 개발했으며, 신뢰성검증을 위해 터키의 Çatalan Hydro electric Power Plant의 내부 부하조건을 고려한 부하차단, 긴급정지 등의 프로토타입테스트를 통한 모니터링 자료와 결과비교를 하였고 해석결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다. Iliev et al.(2012)는 수력발전설비의 여러 구성요소들을 경계조건으로 한 프란시스수차 수치해석 모델을 개발하고 두 가지 case의 가상의 개념모델에 적용 및 검증하였고, 실제현장 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교 검증하였다. 그러나 외부 부하조건에 대한 수충격 발생은 배제되었으며, 압력수두의 거동만 고려했을 뿐 실제 설비의 취약성 평가는 수행되지 않았다.

국내에서는 Lee and Kim(2019)에 양수발전소의 펌프의 긴급정지 및 부하차단에 의한 수력학적 과도현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 이 또한 외부 부하조건에 대한 평가는 배제되었으며, 발전설비의 취약성평가는 수행되지 않았다. 그 외 국내의 수충격에 의한 취약성평가는 상·하수도 분야에서 고려된 경우가 많고, 수력발전시설에 대한 평가는 미비한 상황이다.

본 연구에서는 선행연구로 개발된 수력발전설비의 비정상 유동해석모형을 이용하여 실제 운영되고 있는 수력발전설비의 수충격 취약성평가를 수행하였다. 이를 위해 개념모델을 적용하여 상용모델과의 수충격 해석결과 비교를 수행하였고, 실제 수충격 실험결과와의 비교를 통해 대상모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 Test-bed에 발생 가능한 수충격 시나리오를 구성하고 그에 따른 수치해석을 통해 수압철관의 수충격에 대한 취약성을 평가하고자 하였다.

2. 수충격 해석모형의 수치해석 기법

2.1 TRANSHAM model

발전설비 내 수압철관의 수충격 거동을 예측하기 위해 MOC-FDM(Method of Characteristic – Finite Difference Method) 기반으로 개발된 비정상 유동해석 모델인 TRANSHAM(Nam et al., 2020)을 활용하였다. 본 모델은 수력발전설비의 구성 요소인 관로, 밸브, 펌프, 터빈 등을 경계조건으로 고려하여 계산한다.

관로연장길이 L , 관경 D , 관로의 분절 수 N_{parts} , 마찰손실계수 f , 저수지 인접부 및 수차 인접관로의 고도(H_{Res} , H_{Tur}) 등 관로의 제원과 펌프·터빈의 가동조건(Torque, RPM, 회전관성), 펌프·터빈특성곡선(Characteristic Curve) 등 발전기의 제원이 입력자료로 요구되며 저수지의 수위(H_0), 파속(a), 관내 유속(V_0) 및 유량조건(Q_0), 발전용량(PG(MW)), 총 계산시간 및 계산간격(T_{max} , Δt)과 가이드베인의 폐쇄시간(T_c) 등이 경계조건으로 고려된다.

2.2 지배방정식

파속 a (Wave speed)는 탄성이론을 근거로 하여 관 두께, 관 재질, 탄성계수 및 프와송비 등으로 계산한다(식 (1)).

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

여기서 ρ =유체의 밀도, K =체적탄성계수, e =관 두께, D =관 직경을 나타낸다.

관로내 흐름은 부정류 상태로 각 지점의 물의 속도와 압력이 시간에 따라 변화한다. 미지변수로 계통의 압력과 평균유속 또는 수두와 유량이 사용되고, 계통의 관로를 따른 거리와 시간이 독립변수가 된다. 운동량방정식과 연속방정식으로 나타내며 식 (2)는 식 (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, θ =파이프 경사, g =중력가속도, t =시간, f =Darcy-Weisbach 마찰 계수, x =파이프를 따른 거리이다.

2.3 특성선법 변환

본 수치해석 모델은 특성선법을 기반으로 비정상 상태의 수충격 해석을 수행한다. 특성선법은 미소 공간축과 미소 시간축의 비를 파속도로 정의하고 이러한 특성선상에서 연속방정식과 운동량방정식을 지배 방정식으로 하고 유한차분으로 적분하여 임의 지점의 수압과 유량(유속)의 해를 구하는 기법이다. 이를 활용하여 압력수두 H_p 와 유속 V_p 에 대한 방정식을 식 (4) 및 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$H_P = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \frac{a}{g} (V_s - V_{Ri}) + (H_s + H_{Ri}) \\ - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} (|V_s| |V_s| - |V_{Ri}| |V_{Ri}|) \end{array} \right] \quad (4)$$

$$V_P = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} (V_{\xi} + V_{Ri}) + \frac{g}{a}(H_{\xi} - H_{Ri}) \\ - \frac{f\Delta t}{2D}(V_{\xi}|V_{\xi}| + V_{Ri}|V_{Ri}|) \end{array} \right] \quad (5)$$

2.4 경계조건 구현

관로-터빈 시스템에 대한 경계조건을 구현하기 위해 상류 경계조건은 저수지 수위로 처리하며 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{P1} &= H_0 \\ V_{P1} &= V_2 + \frac{g}{a}(H_0 - H_2) - \frac{f\Delta t}{2D} V_2 |V_2| \end{aligned} \quad (6)$$

터빈의 경계조건은 관로 상류에서의 유량을 제어하는 방정식을 결합하여 식 (7)과 같이 Q 에 대한 단일 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$H_p = A' Q^2 + B' Q + C' \quad (7)$$

여기서 A' , B' , C' 은 터빈특정상수이다.

또한, 유량 $Q = V_{p1} A$ 로 $H_p = H_{p1} - H_{\Sigma p}$ 로 대체하여 정리하면 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{p1} = A V_{p1}^2 + B V_{p1} + C \quad (8)$$

관로 시스템의 각 경계조건의 해석기법에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

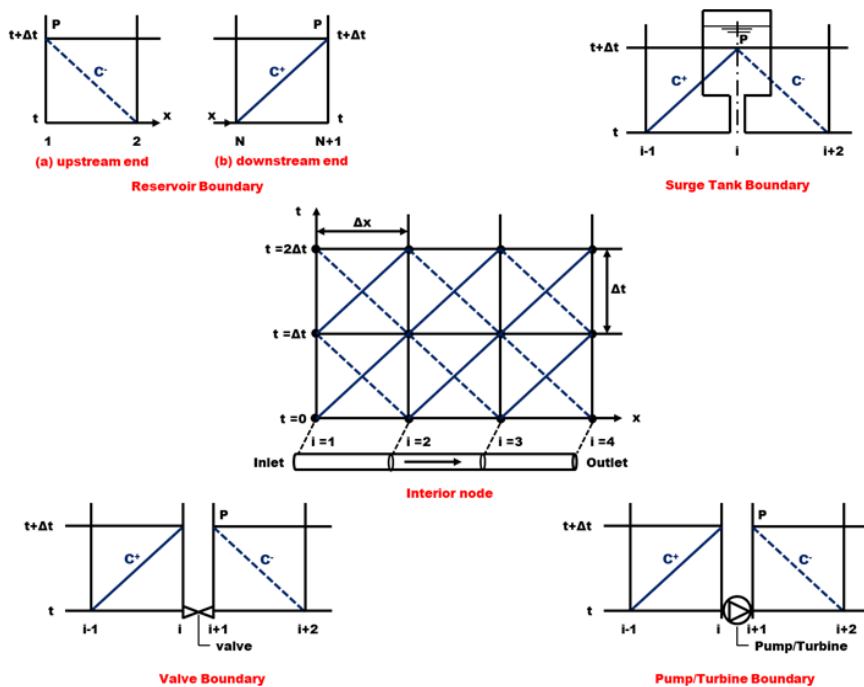


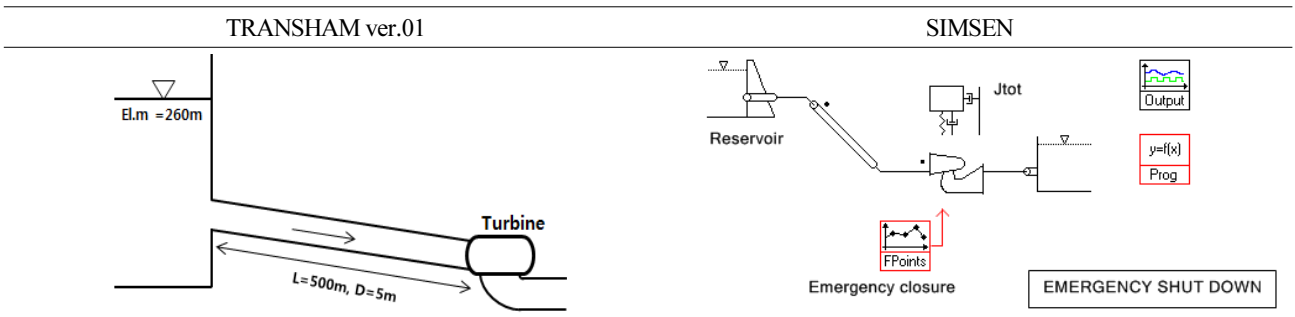
Fig. 1. Boundary Conditions in MOC-FDM (Nam et al., 2020)

3. 수력발전설비의 수충격 해석

3.1 개념모델을 활용한 신뢰성 검토

TRANSHAM의 수력발전시설의 적용성 및 신뢰성 확보를 위해 개념모델을 적용하여 수충격해석 상용모델인 SIMSEN 과의 해석 결과비교를 통해 신뢰성을 검토하였다. SIMSEN 모형은 수력발전시설의 유압시스템과 전력네트워크에 대한 수치해석 프로그램으로, 스위스의 EPFL에서 주관하여 개발되었으며 다수의 연구진에 의해 모델의 신뢰성이 검증된 바 있다 (Nicolet et al., 2002). 개발모델의 신뢰성 검토를 위한 개념모델의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Conceptual Model Composition



개념모델은 저수지-관로-터빈으로 구성되었으며 일반적인 수력발전설비의 구조이며 본 연구대상시설과 유사한 조건으로 구성하였다. 수치해석 조건으로는 터빈부(Governor)의 긴급정지에 의해 발전용량 61.7 MW의 터빈이 44.8 MW로 약 30%의 기능상실이 발생하는 조건으로 고려하였다. 관로의 제원은 $L=500\text{ m}$, $D=5\text{ m}$, $f=0.013$, $a=1200\text{ m/s}$ 등으로 구성되어 있으며, 총계산시간은 18초, 계산간격은 0.2초이다. 터빈의 제원으로 $RPM=200$, 초기유량조건 $Q_0=115\text{ m}^3/\text{s}$, 토크는 $T_R=4.11(10)^6\text{ Nm}$, 터빈의 회전관성 $WR^2=4.81(10)^6$ 로 적용하였다.

Fig. 2는 TRANSHAM과 SIMSEN의 수충격에 의한 압력수두의 변동을 비교한 결과이다. Wicket gate가 닫히는 초반 4초가량의 압력수두의 상승과 저하의 주기가 대부분 일치하는 것으로 나타나며 특히 최대 압력수두가 각각 304.2 m와 306.6 m로 약 0.76%의 오차율 발생으로 결과값이 상당부분 일치하는 것으로 나타났다. 해석시간 5초 이후 압력거동의 안정화 과정에서 나타나는 각 프로그램간의 변동폭 차이는 동일 해석조건에서 SIMSEN의 입력매개변수가 더 다양하므로 민감도의 차이로 나타났다.

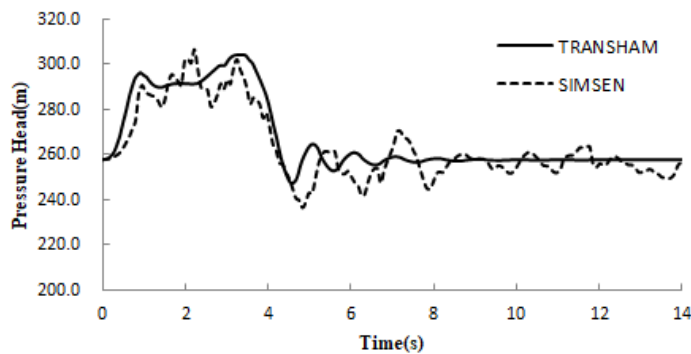


Fig. 2. Comparison of TRANSHAM and SIMSEN Analysis Result

3.2 모니터링 자료를 활용한 모델의 신뢰성 검토

수압철관 내 수충격 해석모델 신뢰성의 최적검증방법은 해석결과와 압력수두 변동 모니터링 값의 결과비교를 통한 검증이다. 그러나 실제 국내 발전설비의 대규모 수충격 실험은 비용 및 시간적 제약과 함께 안전도에 대한 문제가 귀결되어 있어 실제 모니터링 값 획득에 어려움이 있다.

이에 국외에서 수행된 수충격 실험을 통한 모니터링 값의 결과비교를 통해 모델의 신뢰성을 검토하였다. Çatalan Hydro electric Power Plant는 터키의 수력발전소로 지중해 연안에서 북쪽으로 약 80 km 떨어진 Seyhan 강에 위치하고 있으며, 1997년부터 운영되었다. 발전용량 56.3 MW의 Francis 터빈이 3기 운영되고 있다.

Çatalan Hydro electric Power Plant는 터빈의 설치 직후 수압철관의 취약성 평가를 위해 수충격에 대한 프로토타입 테스트를 수행하였다. 수압철관의 구성 및 제원은 Fig. 3 및 Table 2에 나타내었고, Table 3은 설치된 터빈의 제원이다.

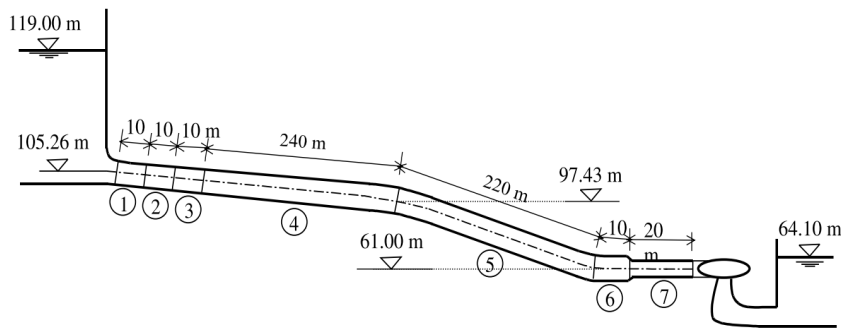


Fig. 3. Penstock of the Çatalan Hydroelectric Power Plant (Bulent et al., 2004)

Table 2. Details of Penstock Properties for the Çatalan Power Plant (Bulent et al., 2004)

Pipe No.	Diameter D (m)	Length L (m)	Wall thickness t (mm)	Wave speed C (m/s)
1	5.5	10	26	823
2	5.5	10	24	800
3	5.5	10	30	864
4	5.5	240	24	800
5	5.5	220	26	823
6	5.5	10	26	823
7	4.5	20	30	921

Table 3. Specifications of Turbine (Downstream Boundary Conditions of the Penstock (Bulent et al., 2004))

Turbine characteristics	Value
Turbine output, P 5	52.8 MW
Rotational speed of the turbine, n	166.7 rpm
Runner diameter, Dr	3.87 m
Initial wicket gate opening, $\phi 0$	22.5°
Steady-state flow rate, Q0	106 m ³ /s
Reservoir head, Hre	119.00 m
Pressure head at downstream end of penstock, p/ γ	54.40 m
Elevation head at downstream end of penstock, z	61.00 m
Tailwater head, Htw	64.10 m
Net head for turbine, H	53.60 m

프로토타입 테스트는 총 3가지로 부하차단(Load rejection), 긴급정지(Emergency shut down), 급제동(Quick stop)으로 진행되었으며, 그 중 부하차단 결과를 추출하여 해석결과를 비교하였다. 부하차단 테스트에서 초기 Wicket gate opening은 Table 3에서와 같이 전체개방의 82%에 해당하는 22.5°이며 최초 제어 발동시간으로부터 12초간 개도율 10%로 급격하게 닫히며 이후 19초까지 완만하게 완전히 닫히는 조건으로 수행되었다.

수압철관의 손실계수 K는 0.05, 마찰계수(f)는 0.025로 계산하였으며 각 node간 간격은 10 m, $\Delta t=10/921=0.011$ s로 계산하였다.

프로토타입 테스트의 압력수두 측정결과와 TRANSHAM의 수충격 해석결과와의 비교는 Fig. 4에 나타내었다. wicket gate의 제어가 시작되는 초반에 압력수두가 급격히 상승하는 형상을 잘 재현하였고 반사압력파에 의해 관내 압력수두가 잠시 하강하였다가 재상승하는 형태도 유사하게 모의하는 것으로 계산되었다. 발생된 최대압력수두는 각각 90.92 m와 91.34 m로 계산되어 약 0.46%의 오차가 발생하여 오차율 5% 이내의 결과값을 나타내었다. 다만 13초 이후 관내 압력이 안정화되는 패턴 및 수치에 발생하는 오차는 압력파가 상·하류 경계단으로 반사되면서 수리진동 현상이 나타나지만 실제현상에선 저수지의 정수압에 의한 압력수두 차에 의해 수리진동이 더 빨리 상쇄되는 것으로 나타나 이로부터 발생하는 차이로 판단되었다.

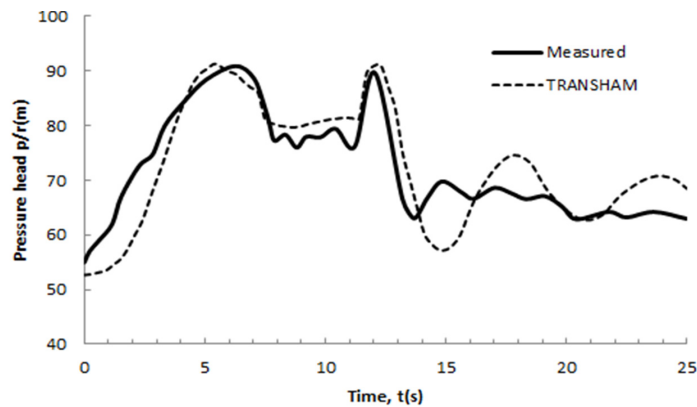


Fig. 4. Comparison of Measured and TRANSHAM Analysis Result

4. 시나리오 기반 수충격 해석 및 취약성 평가

4.1 수력 발전설비 현황

본 연구에서 적용된 수력발전소의 제원은 Fig. 5에 나타내었다. 완공된 지 50년 이상이 지나 발전설비의 노후화가 진행되었을 가능성이 있고, 국내 수력발전소 중 발전설비 제원에 대한 자료취득이 상대적으로 용이하여 연구대상으로 선정하였다. 댐체는 유역면적 4,134 km², 총 저수량 13억 4,000만 m³의 콘크리트 중력식댐과 사력댐으로 구성된 복합형 댐이며 45 MW 급 프란시스 수차 2기로 구성된 소수력 발전소이다. 주요 시설물을 요약하면 다음과 같다.

- | | |
|--|----------------------|
| 1) 저수지 | 2) 댐체 및 여수로 |
| - 홍수시 만수위(EL.m) : 81.2 m | - 계획홍수량(cms) : 8,000 |
| - 상시만수위(EL.m) : 77.2 m | - 높이(m) : 61.7 |
| - 저수위(EL.m) : 65.0 m | - 길이(m) : 418.0 |
| - 총저수용량(10 ⁶ m ³) : 1,340 | |

3) 수압철관(Penstock)

- 총 연장길이 : 54.275
- 내경 : 0~36.775m 구간 Ø 6.0m
36.775~50.775m 구간 Ø 5.5 m
50.775~54.275m 구간 Ø 5.0 m

4) 발전시설 및 수차(Turbine)

- 방수위(EL.m) : 27.0
- 최대유량(cms) : 125.4
- 총낙차(m) : 51.3-30.5
- 기준낙차(m) : 38.9
- 회전속도(RPM) : 150
- 중량(Ton) : 377×2EA
- 발전용량(MW) : 45×2EA

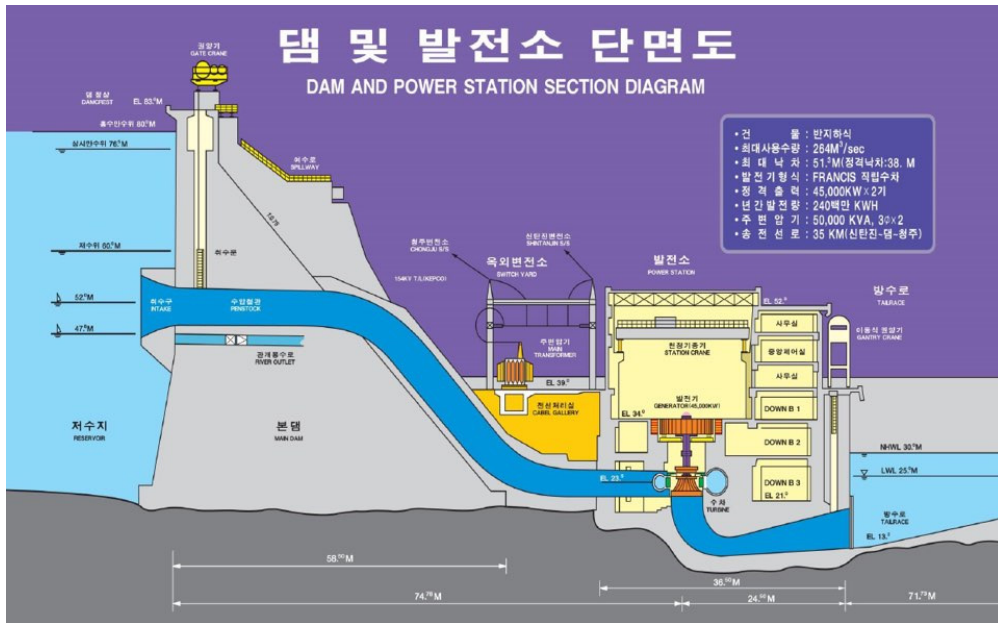


Fig. 5. Hydro Power Plant

4.2 시나리오 구성

수충격 발생의 가장 큰 원인은 발전시설의 갑작스런 운영중지로 인한 유동흐름의 급격한 제어가 주 원인이다. 이를 고려하여 시나리오는 크게 부하차단과 긴급정지로 구분하였다. 부하차단 시나리오는 시설의 갑작스런 부하로 인한 운영자의 판단 하에 수차 유입량을 제어하는 경우이며, 긴급정지는 정전이나 수차의 파손 등 갑작스런 운영조건 변화로 인한 운영자의 판단 보다 빠르게 제어되는 형태이다. Fig. 6은 긴급정지와 부하차단 시나리오의 Wicket gate의 개폐율이다. 수차 시스템 설계 상 긴급정지 시 2초간 90%에서 20%로 급속도로 닫히며 2초 이후 완만한 속도로 폐쇄되며, 부하차단 시나리오는 2초간 90%에서 60%로 긴급정지에 비해 보다 완만한 속도로 폐쇄되는 시나리오로 구성되었다.

또한 수충격은 댐 저류부의 갑작스런 수위변화에 의해 증폭되므로 발전소 댐체의 설계빈도를 고려한 설계홍수량을 고려하였다. 설계홍수량은 각각 100년 빈도, 500년 빈도, 가능최대홍수량(PMF)로 설정하였으며, 이에 따른 설계홍수위를 계산하여 수치해석의 경계조건으로 활용하였다. 설계홍수량 및 설계홍수위는 Table 4에 나타내었다. 부하조건과 홍수위를 경계 조건으로 한 수력발전소의 수충격 취약성평가 시나리오는 총 6개로 구성되었으며 Table 5에 나타내었다.

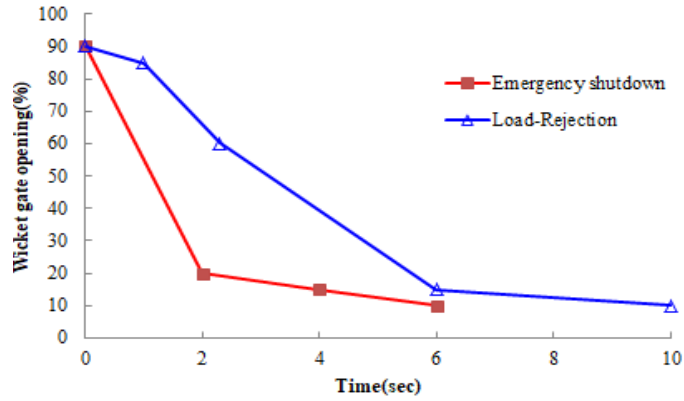


Fig. 6. Wicket Gate closing Rate Over Time

Table 4. Reservoir Flood Level Analysis Results

Probability Flood Frequency	Peak Flood Rate (m ³ /sec)	Peak Water Level (EL, m)	Peak flood and Flood level Chart
100	9,500	79.98	<p>This chart shows the inflow (dashed line) and reservoir water level (solid line) for a 100 probability flood. The inflow peaks at approximately 9,500 m³/s around 35 hours, and the water level peaks at approximately 79.98 m around 40 hours.</p>
500	12,200	80.90	<p>This chart shows the inflow (dashed line) and reservoir water level (solid line) for a 500 probability flood. The inflow peaks at approximately 12,200 m³/s around 35 hours, and the water level peaks at approximately 80.90 m around 40 hours.</p>
PMF	14,700	81.65	<p>This chart shows the inflow (dashed line) and reservoir water level (solid line) for the Probable Maximum Flood (PMF). The inflow peaks at approximately 14,700 m³/s around 60 hours, and the water level peaks at approximately 81.65 m around 70 hours.</p>

Table 5. Waterhammer Analysis Scenario

Loading Condition	Probability Flood frequency	Scenario No.
Load-rejection	100-year	Scenario 1
	500-year	Scenario 2
	PMF	Scenario 3
Emergency Shutdown	100-year	Scenario 4
	500-year	Scenario 5
	PMF	Scenario 6

4.3 시나리오 별 수충격 해석 및 취약성 평가

내·외부 부하조건을 고려한 시나리오를 경계조건으로 반영하여 수충격 해석을 수행하였다. 본 수력발전소는 수압철관의 연장길이가 총연장길이 54.275 m로 짧은 편에 속한다. 수압철관은 총 27개 세그먼트가 용접되어 있는 형태로 이루어져 있고 계산관로 분절은 9개 지점으로 구성하여 총 9개 node에서 압력수두 변동을 확인하였다. 저수지 인접부인 상류부의 내경은 6.0 m, 터빈유입구의 내경은 5.0 m로 점차 좁아지는 형태이며 각각 SM41, SM50재질의 강관으로 구성되어 있다. 관의 재료 특성을 고려하여 계산된 압력파의 파속(a) = 636.7 m/s이다. 총계산시간은 각 Wicket gate의 최종폐쇄 시간을 고려해 20초 이고 계산간격은 0.2초이다. 터빈의 제원으로는 $RPM=150$, 초기유량조건 $Q_0=131 \text{ m}^3/\text{s}$, 토크는 $T_R=3.06(10)^6 \text{ Nm}$, 터빈의 회전관성 $WR^2=4.80(10)^6$ 이다.

Fig. 7은 수력발전소의 종단도이며 총 9개 노드중 저수지 인접부, 관로 중앙부, 터빈 인접부의 압력수두 모의결과를 도시하여 수압철관의 취약성 평가를 수행하였다. 각 시나리오 별 수충격 해석결과는 Fig. 8에 나타내었다.

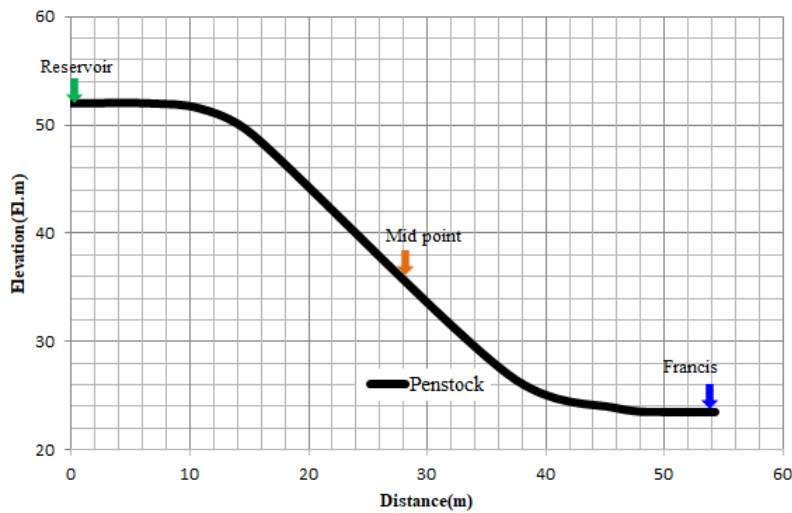


Fig. 7. Test-bed Longitudinal Diagram

Scenario 1~3은 부하차단에 의한 수충격 시나리오로 각 빈도별 수위차에 의해 압력상승이 상이하게 나타났다. Turbine의 Wicket gate가 닫히는 순간 압력파의 상·하류 전파주기만큼 압력수두가 상승과 하강을 반복하며 전반적인 압력상승이 일어나며 개폐율이 15%가 되는 6초 이후에는 안정화가 되는 것으로 나타났다.

Scenario 4~6은 긴급정지 시나리오에 의한 해석결과이며 부하차단 시나리오에 비해 수압철관 내 압력상승분이 2배 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Wicket gate가 닫힌 시점부터 2초간 개폐율이 각각 20%와 60%로 3배가 차이 나기 때

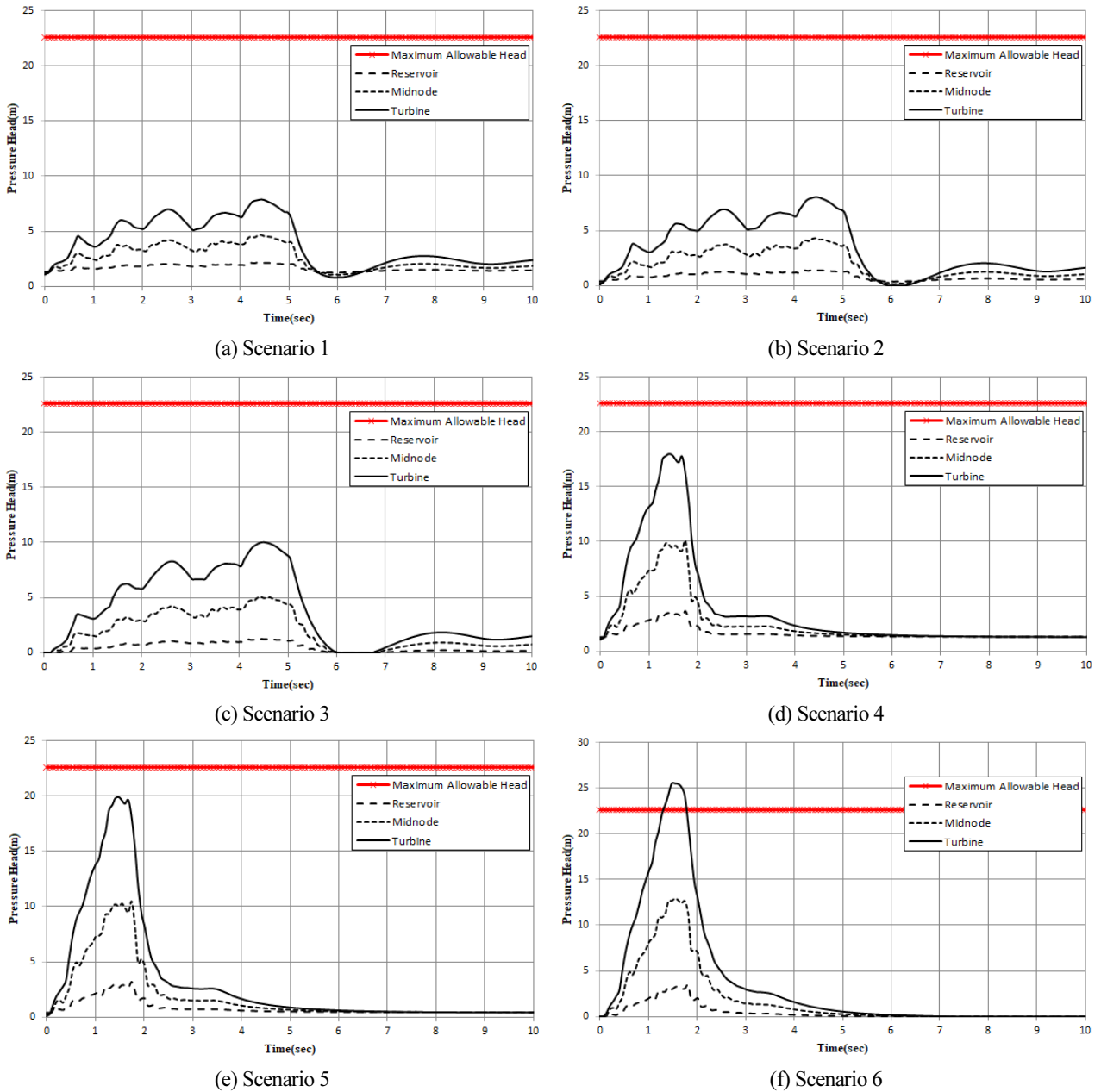


Fig. 8. Waterhammer Analysis Result by Scenario

문인 것으로 나타난다.

각 시나리오에서 Wicket gate의 가장 인접부분인 터빈부 연결관로에서 압력상승이 가장 크게 나타났으며, Scenario 6는 수압철관의 허용수두를 초과하는 것으로 나타났다. 압력수두 변동에 의한 취약성평가를 위한 수압철관의 관재질에 따른 허용수두는 식 (9)와 같이 계산하였다.

$$H_a = \frac{20\sigma_a\eta(t - \epsilon)}{D} \tag{9}$$

H_a =허용수두(m), σ_a =허용압력(kg/cm²), η =용접효율:0.9, D =수압철관내경(mm), t =수압철관 두께(mm), ϵ =부식허용 두께(mm)이다. 본 수압철관의 재질을 고려하여 계산된 허용압력수두는 22.6 m로 Fig. 8에 시나리오 별 해석결과에 각각 도

시하였다. 각 시나리오별 최대 압력수두를 통해 수압철관의 취약도를 산정하였다. 그 중 취약도에 가장 큰 영향을 미칠 부하 차단과 긴급정지 각각의 부하조건과 홍수위 PMF 조건인 Scenario 3과 Scenario 6의 취약도의 비교를 Fig. 9에 나타내었다. Scenario 3의 최대압력수두는 10.02 m로 터빈인접부에서 나타났으며, 취약도는 약 44.35%로 나타나 안전성을 확보한 것으로 나타났으나 Scenario 6는 최대압력수두가 25.51 m로 수압철관의 허용압력수두를 2.91 m 초과하는 것으로 나타났다. 이를 취약도로 환산하면 112.9%로 산업통상자원부의 전기설비기술기준의 판단기준에 의거하면 수압철관 안전도의 기준은 수압철관에 대한 허용응력으로 1~1.5를 초과하지 말 것을 기준으로 산정하였으므로 기준치를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 수압철관이 노출되어 설치되었을 때를 기준으로 하며 철관재료만 가지고 판단하므로 수압철관이 취약한 것으로 평가되었으나, 본 수력발전설비의 수압철관은 콘크리트에 매설되어 있는 매립관의 형태이므로 설비에 작용하는 하중의 조합이 동수압 외에 본체의 자중, 양압력, 풍하중, 온도하중 등으로 다양하다. 따라서 향후 연구에서는 시멘트의 강도기준에 따른 콘크리트 매립관의 허용응력의 상수를 고려하고, 그에 따른 유체-구조의 연계해석을 통한 취약성 평가가 필요하다.

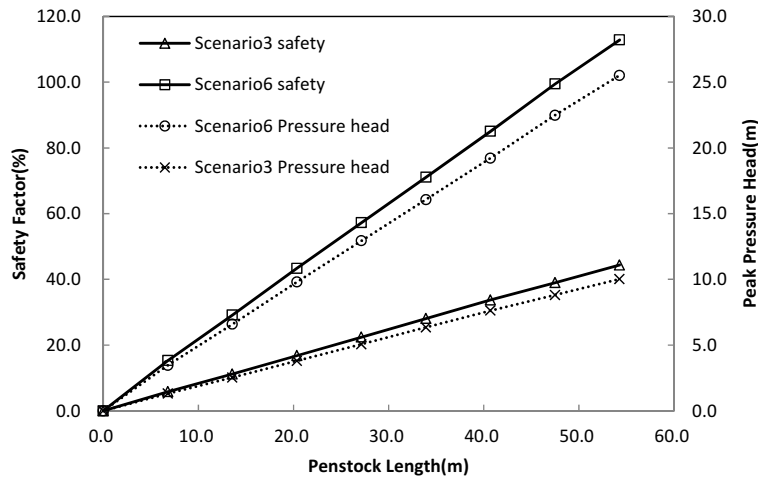


Fig. 9. Vulnerability Evaluation of Penstock (Scenario 3, Scenario 6)

5. 결론

본 연구에서는 수력발전설비의 수압철관을 대상으로 시나리오 기반의 수충격 취약성 평가기법을 제시하였으며 주요 연구내용 및 결과는 다음과 같다

- (1) 수충격 취약성 평가를 위한 해석모형의 신뢰성을 확보하기 위해 가상의 개념모형을 적용하여 상용모델인 SIMSEN의 해석결과와 비교하였고, 국외 수력발전설비의 수충격 실험데이터와 모델해석결과를 비교한 결과 수압철관 내 압력수두의 수치 및 변동 주기가 상당히 일치하는 것으로 나타나 해석모델의 신뢰성을 입증하였다.
- (2) 실제 수력발전소의 취약성 평가를 위한 수충격 발생 시나리오를 개발하였고, 이를 수압철관의 취약성 평가에 적용한 결과 긴급정지 시나리오에서 PMF 빈도의 경우 수압철관의 취약성을 12.9%가량 초과하는 것으로 나타났다. 다만 수압철관이 콘크리트 매립관이며 해당 시나리오는 극한의 상황임을 고려하면 실제 수압철관의 안전도는 더 높을 것으로 예상된다. 그러므로 댐체 콘크리트의 응력과의 연계해석 및 확률론적 해석이 동반되어야 하며 향후 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구를 통해 제시된 시나리오 기반의 수충격 취약성 평가기법은 수력발전시설 중 수압철관의 수력학적 과도현상에 따른 설비의 취약성 평가를 위한 정량적인 평가기법으로 활용될 것으로 기대된다.

Acknowledgment

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(20IFIP-B128598-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Adamkowski, A. and Lewandowski, M. (2015). Preventing Destructive Effects of Water Hammer in Hydropower Plant Penstocks. Conference: ACI's Hydropower Development. Europe 2015 At: Salzburg. Austria.
- Bulent, S., Salih, K. M., and Zeliha, S. (2004). Comparison of Computed Water Hammer Pressures with Test Results for the Çatalan Power Plant in Turkey, Canadian Journal of Civil Engineering. 31(1): 78-85.
- Chaudhry, M. H. (1979). Applied Hydraulic Transients. Springer NY. p. 583. pp. 10-220.
- EPFL. SIMSEN – Simulation Software for Power Networks, Electrical Drives and Hydraulic Systems. [Online]. Available: <http://simsen.epfl.ch/> (Accessed 2020. 8. 8.)
- Iliev, V., Popovski, P., and Markov, Z. (2012). Transient Phenomena Analysis in Hydroelectric Power Plants at Off-Design Operating Conditions. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2(6): 1480-1488.
- Lee, Y. B. and Kim, K. Y. (2019). A Study on Hydraulic Transient Phenomenon of a Pumped Storage Power Plant (II). The KSFM Journal of Fluid Machinery. 22(5): 44-53.
- Nam, M. J., Lee, J. Y., and Jung, W. Y. (2020). Development of Water Hammer Simulation Model for Safety Assessment of Hydroelectric Power Plant. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 21(1): 1-8.
- Nicolet, C., Allenbach, P., Sapin, A., Simond, J. J., and Avellan, F. (2002). New Tools for the Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants. Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Lausanne. Switzerland. pp.519-528.
- Wylie, E. B. and Streeter, V. L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs.

Korean References Translated from the English

- 남명준, 이재영, 정우영 (2020). 수력발전설비의 안전도 평가를 위한 수충격 해석 모형 개발. 한국산학기술학회. 21(1): 1-8.
- 이영범, 김경엽 (2019). 양수발전소의 수력학적 과도현상에 관한 연구(II). 한국유체기계학회 논문집. 22(5): 44-53.