

양수발전소의 수력학적 과도현상에 관한 연구(II)

이영범* · 김경엽**†

A Study on Hydraulic Transient Phenomenon of a Pumped Storage Power Plant(II)

Youngbum Lee*, Kyung-Yup Kim**†

Key Words: Pump turbines(펌프수차), Hydraulic transient(수력학적 과도현상), Water hammer(수격현상), Emergency stop(긴급정지), Load rejection(부하 차단), Moment of inertia(관성모멘트)

ABSTRACT

This study performed a field test for the occurrence of a water hammer in a pump storage power plant and compared and analyzed the conducted numerical analyses. The pump storage power plant had the capacity of 1000 MW, had four pump turbines with a capacity of 250 MW, and had an available head of 817 m. A numerical analysis was performed on the water hammer that occurred in a simultaneous emergency stop and in a simultaneous load rejection during an operation of the four 250 MW parallel pump turbines. Furthermore, a study related to hydraulic transients was also conducted to secure the reliability and safety of the pump storage power plant, pump turbines, penstock, and other equipment. The results of the numerical analysis on the water hammer are then analyzed. These results show that an abrupt load rejection occurred when the four turbines failed under the occurrence of the maximum pressure of the penstock and the minimum pressure of the draft tube when the lower reservoir was at a high level and the lower reservoir was at a low level. Moreover, the minimum pressure of the penstock and the maximum pressure of the draft tube occurred when the upper reservoir was at a low level; the lower reservoir was at a high level; and four pumps had an emergency shutdown.

1. 서론

양수발전소에는 펌프수차(pump turbine)가 설치되며, 1대의 기계로 유수의 방향과 회전차의 회전 방향을 바꾸어 펌프와 수차의 작용을 공용하는 기계이며, 축에는 발전기와 전동기를 겸용하는 발전 전동기(generator-motor)가 직결된다.

최근 양수발전소는 고낙차 고양정화로 됨에 따라 수압철관(penstock)과 방수로(tailrace)는 길어지고, 분기 합류부나 조압수조(surge tank)를 포함하는 등, 펌프수차 자체의 특성도 복잡하게 구성되어 수력학적 과도현상(hydraulic transients)은 여러 가지 문제를 내포하고 있다.⁽¹⁾

또한 펌프 시동 및 펌프 입력차단 시 또는 수차 기동 및 수차

부하 차단 시 수압철관과 방수로에서 수격현상에 의한 수압변화, 유량변화, 펌프수차의 회전속도 변화 등이 발생되고 있다. 또한 양수발전소에서 정상운전 중에 사고로 인하여 갑자기 부하를 잃게 될 때 혹은 밸브의 개도를 빠르게 변화 시킬 때 그 순간 수압철관 내에 유속이 급격하게 변하며 압력도 크게 상승하거나 강하하여 심한 수격현상(water hammer)을 일으키게 된다.^(2,3) 이러한 관로 내의 갑작스런 유속 변화로 압력과 양수발전소와 저수지 사이를 왕복할 때 발전소 구내 배관의 압력이 비정상적으로 상승하여 펌프수차나 밸브류, 배관 및 부대시설 등이 파열되어 발전소 침수 사고가 발생하기도 한다.⁽⁴⁾

이러한 수격현상의 사고는 높은 수격압으로 인한 수압철

* 한국산업기술대학교 지식기반-에너지대학원 기계시스템공학과(Graduate School of Knowledge-based Technology and Energy, Department of Mechanical System Engineering, Korea Polytechnic University)

** 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

† 교신저자, E-mail : kykim@kpu.ac.kr

관의 파열과 관 내 부압으로 인한 좌굴, 입구밸브(inlet valve)의 개폐 및 작동 불능사고, 안내깃의 폐쇄사고, 각종 구동부의 손상 등의 사고가 발생되고 있는 실정이다.⁽⁵⁾

그리고 펌프수차의 특성상 경로에 기인하는 축 스트레스의 변화, 안내깃 수압모멘트의 변화, 러너 주변 수압 맥놀이 현상의 크기 및 이들 압력 맥동이 철관 및 방수로로 전파되는 현상 등을 들 수 있으며, 펌프수차 자체의 진동, 방수로가 긴 플랜트에서 수차 부하 차단 시의 러너 하류의 선회류가 조장(助長)하는 방수로 수주분리현상 등을 들 수 있다.

이 과도현상 중에 일어나는 압력변화, 유량변화, 회전속도 변화 및 이들을 고려한 최적 안내깃 폐쇄방법은 펌프수차의 완전 특성을 이용한 이론 계산에 의해 실제 현상과 거의 일치된 결과를 얻을 수 있으며, 복잡한 경우도 효율적이고 정밀도 높게 수치계산으로 해석할 수 있다.^(6,7)

이에 대하여 본 연구에서는 양수발전소의 시설용량이 1,000 MW이고 펌프수차 250 MW급 4기가 설치되어 있으며, 유효낙차가 817m인 양수발전소⁽⁸⁾에서 발생하는 수격현상에 관한 수치해석을 실시하고, 그 결과를 비교·분석함으로써 펌프수차와 수압관 등 양수발전소의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위하여 수력학적 과도현상에 관한 연구를 수행하였다.

2. 시스템 현황

2.1 주요 시설물 현황

양수발전소의 주요 시설물은 Fig. 1에 나타내었다. 상부저수지 취수구에서 지하발전소를 거쳐 하부저수지 방수로까지 평면상 연장은 약 4.9 km로 연결되었으며, 그 사이에는 상·하부 수압터널, 수압철관, 흡출터널 및 하부 조압수조 등이 위치해 있다. 수로터널의 중단 선형은 상부저수지 취수구 지점과 지하발전소 사이의 총 낙차가 약 839 m로 상당히 큰 표고차를 보이기 때문에 1단의 수로터널로 계획하기에는 시공성, 경제성 등 면에서 훨씬 불리하게 검토되어 중간 지점에 절곡부를 두고 상부와 하부 수압터널로 분리하였다. 여기서,



Fig. 1 Main facilities of pumped storage power plant

주요 시설물을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상부지(상부저수지, upper reservoir)
 - 상시 만수위(H.W.L) : EL. 934.0 m
 - 저수위(L.W.L) : EL. 900.0 m
 - 평균수위(M.W.L) : EL. 921.5 m
- 2) 하부지(하부저수지, lower reservoir)
 - 상시 만수위(H.W.L) : EL. 121.5 m
 - 저수위(L.W.L) : EL. 115.0 m
 - 평균수위(M.W.L) : EL. 118.6 m
- 3) 상부 수압터널(upper headrace tunnel, 원형, 수평 및 수직 터널)
 - 수직 터널 : 내경 ϕ 6.4 m, 높이 406.2 m
 - 수평 터널 : 내경 ϕ 6.4 m, 길이 673.2 m, 경사 3.0%
 - 콘크리트 라이닝 : $t = 0.4$ m
- 4) 하부 수압터널(lower headrace tunnel, 원형, 수평 및 수직 터널)
 - 수직 터널 : 내경 ϕ 6.4 m, 높이 407.9 m
 - 수평 터널 : 내경 ϕ 6.4 m, 길이 492.9 m
 - 콘크리트 라이닝 : $t = 0.4$ m
- 5) 수압철관(penstock, 원형, 1 Line \rightarrow 4 Lines)
 - 1 Line : 내경 ϕ 6.4 m \sim 1.6 m, 길이 148.9 m
 - 4 Lines : 내경 ϕ 4.4 m \sim 1.6 m, 길이 103.0 m
 - 철관 두께 : $t = 36, 43, 50, 55, 58, 64, 72, 77$ mm
- 6) 흡출터널(draft tube tunnel, 원형, 4 Lines \rightarrow 1 Line)
 - 4 Lines : 내경 ϕ 2.6 m \sim 6.4 m, 길이 577.2 m
 - 1 Line : 내경 ϕ 6.4 m, 길이 40 m
 - 철관 두께 : $t = 10$ mm(강관 설치 구간)
- 7) 하부 조압수조(lower surge tank with restricted orifice)
 - 샤프트(shaft) : ϕ 6.4 m, 높이 67.8 m
 - 오리피스(orifice) : ϕ 2.8 m(내경)
 - 수실(chamber or gallery) : 포장형, 폭 12 m \times 높이 12.5 m \times 길이 53 m
- 8) 방수로(tailrace tunnel, 원형)
 - 규모 : 내경 ϕ 6.4 m, 길이 3,089 m, 경사 1.81 \sim 1.94%
 - 콘크리트 라이닝 : $t = 0.4$ m

2.2 펌프수차

양수발전소는 총 설비용량 1,000 MW의 순양수식 지하발전소이고, 기존의 양수발전소와 비교하여 낙차고 및 시설용량 면에서 국내 최대로서 수직축 2단 프랜시스 펌프수차(vertical shaft, double regulated stages Francis pump turbine)를 적용하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 가역펌프수차(reversible pump-turbine)는 1개의 러너(또는 임펠러)로 펌프와 수차의 두 가지 운전을 하므로 펌프와 수차의 특성을 독립적으로 바꾸는

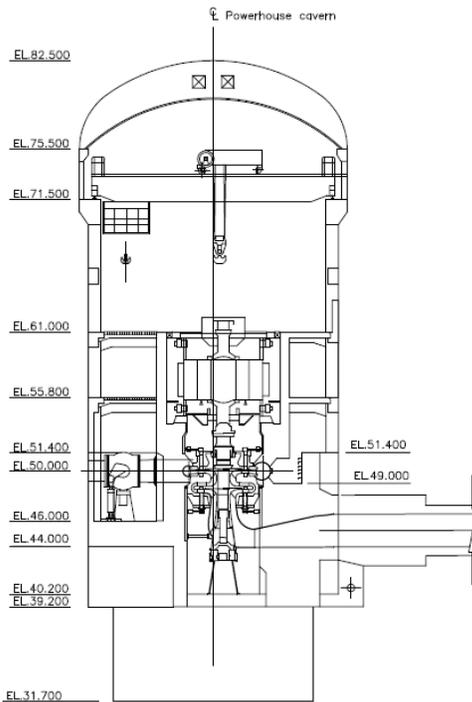


Fig. 2 Pump turbine sectional drawing of pumped storage power plant

Table 1 Pump design conditions

Items	Units	Maximum	Normal (Rated)	Minimum
Net pump dynamic head	m	832.4 ¹⁾	825.0	782.5 ²⁾
Pump discharge	m ³ /s	28.44	28.89	31.30
Pump input power	MW	254.19	255.47	261.15
Rated speed	rpm	600		

Note : ¹⁾ Maximum net head for 1 pump
²⁾ Minimum net head for 4 pumps

Table 2 Hydraulic turbine design conditions

Items	Units	Max.	Normal	Min.	No. of turbines
Static head	m	821.5	803.0	778.5	—
Net head	m	817.0 ¹⁾	798.4	774.0	1
		804.9 ²⁾	785.7 ³⁾	761.7	
Turbine output power	MW	265.34	258.30	245.53	4
Maximum discharge	m ³ /s	37.1	37.1	36.43	4
Guide vane opening	%	98	100	100	4

Note : ¹⁾ Maximum net head for 1 turbine
²⁾ Maximum net head for 4 turbines
³⁾ Rated point

것은 어렵다. 따라서, 펌프수차가 갖고 있는 특성을 이해하는 것은 펌프수차를 운영하는데 있어서 매우 중요하다. 양수발전소

의 펌프 및 수차의 설계조건은 Table 1과 Table 2와 같으며, 펌프는 1대 운전시 최대 양정이 832.4 m이고, 펌프 4대 운전시 최소 양정은 782.5 m이다. 수차는 1대 운전시 최대 유효낙차가 817 m이고, 수차 4대 운전시 최대 유효낙차는 804.9 m이다.

수차의 안내깃의 길이는 2,076 mm, 수량은 상부 20매, 하부 20매이고, 서보모터는 상부 2개, 하부 2개로 구성되어 있으며 폐쇄 시간 25 sec이다. 수차 운전의 경우 안내깃으로 자유롭게 유량을 조절할 수 있지만, 양수 중의 안내깃은 가장 효율이 좋은 개도로 고정된다.

그러나, 최근에는 가변속의 펌프수차가 개발되어 양수 중 회전수 제어도 가능하게 되었다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 펌프 긴급정지 시 수격현상

3.1.1 안내깃의 개도 모델링

펌프가 긴급정지(emergency stop)된 경우 펌프의 과도한 역회전과 수격작용을 완화시키기 위해 안내깃은 2단계(step)로 폐쇄된다. 이때 안내깃의 닫히는 형태는 수력학적 과도현상에 많은 영향을 준다. 즉, 안내깃의 개도에 따라 유동의 변

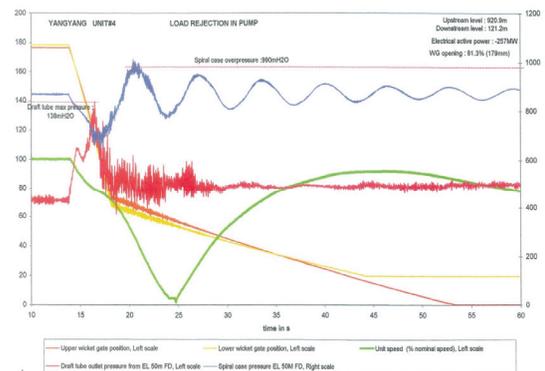


Fig. 3 Field test results according to emergency stop #4 pump (by ALSTOM, 2006.9)

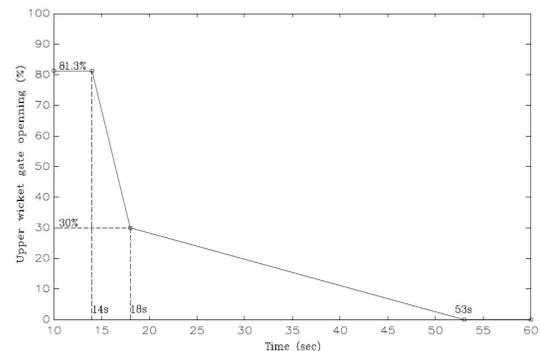


Fig. 4 Upper wicket gate opening degree diagram according to emergency stop #4 pump

적, 저항 등이 변하여 수격현상에 상당한 영향을 미치게 되는데, 이러한 과정을 모사하기 위해서 ALSTOM사가 현장에서 수행한 Fig. 3의 시험결과를 이용하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 4는 현장시험결과를 사용하여 모사된 상부 안내깃의 개도변화를 나타내었다.

한편, 당초 기본설계시 수격현상에 대한 수치해석에 사용된 관성모멘트 GD^2 는 수차가 $110 T \cdot m^2$, 발전기가 $2,060 T \cdot m^2$ 으로 총 $2,170 T \cdot m^2$ 이다. 이를 I로 환산하면 관성모멘트 $I = 5.425 \times 10^5 kg \cdot m^2$ 이 된다.

펌프-전동기의 관성 효과를 분석하기 위해 관성모멘트 I는 환산된 값 $5.425 \times 10^5 kg \cdot m^2$ 과 이 값의 4배인 $2.17 \times 10^6 kg \cdot m^2$ 그리고 이 값보다 약간 작은 $3.3 \times 10^5 kg \cdot m^2$ 의 3가지 경우에 대하여 수치해석을 각각 수행하였다. 수치계산은 범용 전산프로그램인 SIMDRU를 사용하여 수행하였다.⁽¹⁰⁾

3.1.2 펌프 4대 긴급정지 시 수격현상

수압철관 하나에서 분기하여 여러 대의 펌프수차가 설치되는 경우에는 관로의 접속을 통하여 호기 간에 서로 영향을 미치기 때문에 펌프수차 1대일 때의 단독과도현상과는 다른 경우가 있다. 일반적으로 펌프의 운전 대수가 증가할수록 관로 내 유속이 빨라지기 때문에 수격현상은 보다 심각해진다. 이에 따라 양수발전소의 인수성능시험시 안전성 등의 문제로 펌프 4대 긴급정지(입력차단)에 대한 시험은 이루어지지 않았다. 따라서, 양수발전소의 시설용량인 250 MW급 펌프 4대가 병렬로 운전되다가 동시에 긴급 정지된 경우 발생하는 수격현상에 대하여 수치해석을 통해 분석하고자 한다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 실양정(static head)이 가장 작은 상태 ($778.5 m = 900 m - 121.5 m$)에서 양수 펌프 4대가 병렬로 운전 중 불의의 사고 등으로 긴급 정지되었을 때 발생하는 시나리오를 가정하여 수격현상에 대한 수치계산을 우선 수행하였다. 이때 직경이 6.4 m인 도수터널 내에는 가장 많은 수량 $Q = 126 m^3/s$ 의 물이 빠른 속도 $V = 3.92 m/s$ 로 흐르기 때문에 수격작용은 심각할 것으로 쉽게 짐작할 수 있다.

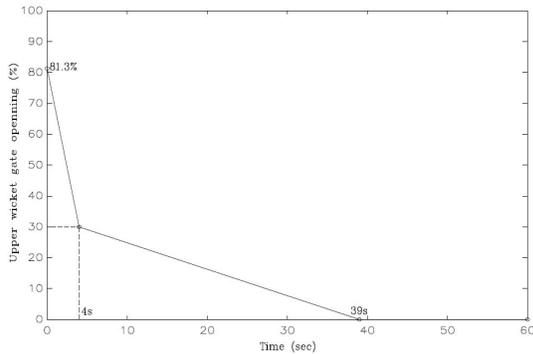


Fig. 5 Diagram of upper wicket gate opening change for emergency stop 4 pumps

동력이 갑자기 차단되면 안내깃은 Fig. 4와 같은 Fig. 5처럼 2단계로 폐쇄 되는 것으로 모사하였다.

Fig. 6은 펌프 4대 병렬 운전시 전체 관로의 수력구배선 및 관로 종단도를 나타내었다. Fig. 7은 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 수치해석결과 얻어진 관성모멘트에 따른 수압관 내 압력수두 변화를, Fig. 8은 흡출관 내 압력수두 변화를

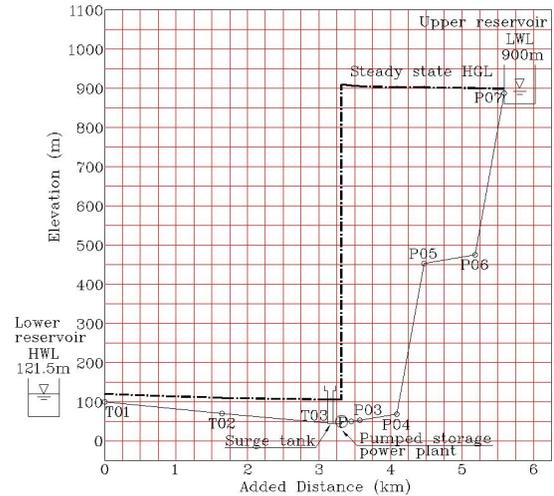


Fig. 6 Hydraulic grade line and pipeline profile for operating 4 pumps

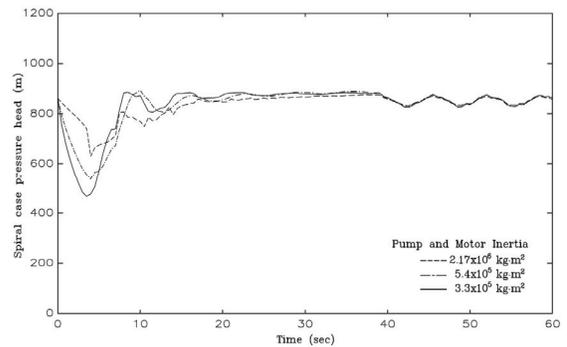


Fig. 7 Spiral case pressure change according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

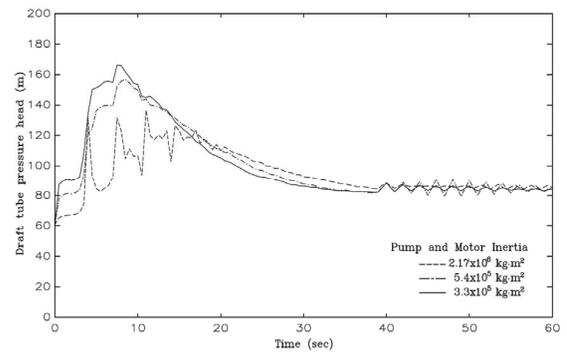


Fig. 8 Draft tube pressure change according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

각각 나타내었다. 펌프-전동기의 관성모멘트가 클수록 수압관 내 압력은 첫 번째 주기의 다운서지(down surge) 과정에서 보다 천천히 적게 떨어지고 있음을 알 수 있다. 업서지(up surge) 과정에서 발생하는 상승압력은 2단계로 제어되는 안내깃에 의해 역류가 서서히 차단되므로 관성모멘트의 영향을 크게 받지 않는 것으로 분석되었다. 안내깃이 완전히 닫힌 39초 후 수압관 내 압력은 관성모멘트 값과 상관없이 일정한 주기(4L/a = 6.7초)로 변동되는 것으로 나타났다.

한편, 펌프가 트립(trip)된 후 펌프를 통한 유동은 안내깃에 의해 차단되기 때문에 흡출관 내 압력은 급격히 상승한다. 펌프-전동기의 관성모멘트가 클수록 회전체와 수주

(water column)의 관성이 커지기 때문에 흡출관 내 압력은 작게 상승함을 알 수 있다. 이후 방수로의 다운서지 과정에서 흡출관 내 압력은 서서히 떨어지게 되는데, 이때 발생하는 최소압력은 관성모멘트 값과 상관없이 정상상태 압력 이상을 유지하는 것으로 분석되었다.

Table 3은 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 펌프-전동기의 관성모멘트를 3가지로 바꿔가면서 수치계산으로 예측한 수압관과 흡출관 내 최대, 최소압력을 서로 비교하여 나타내었다.

Fig. 9는 펌프-전동기의 관성모멘트에 따른 회전수 변화를, Fig. 10은 펌프를 통한 유량 변화를 각각 나타내었다. 기본설계에서 사용된 펌프-전동기의 관성모멘트가 $2.17 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 일 때 펌프는 다른 경우와는 달리 역회전을 일으키지 않았다. 이는 펌프-전동기의 관성이 일반적인 경우와는 다르게 비현실

Table 3 Transient characteristics comparison according to moment of inertia for emergency stop of 4 pumps

Moment of inertia (kg·m ²)	Pump outlet (penstock)		Pump inlet (draft tube)	
	Maximum pressure head(m)	Minimum pressure head(m)	Maximum pressure head(m)	Minimum pressure head(m)
2.17×10^6	874.81	612.99	143.53	60.95
5.43×10^5	892.49	536.60	156.92	60.95
3.30×10^5	887.24	456.01	172.13	60.95

Remark : ALSTOM is presented as $I = 5.43 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ in the basic plan.

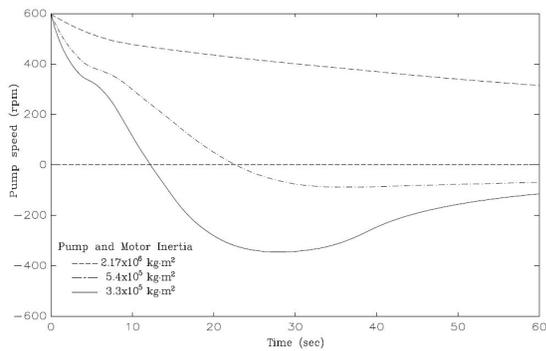


Fig. 9 Pump speed change according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

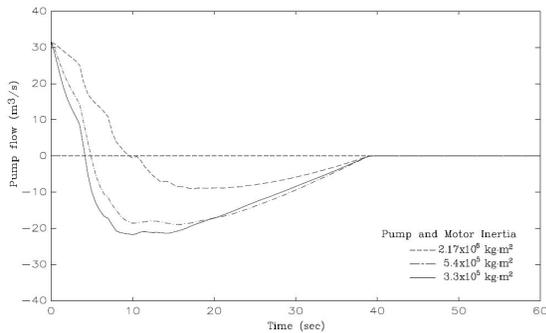


Fig. 10 Pump flow rate change according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

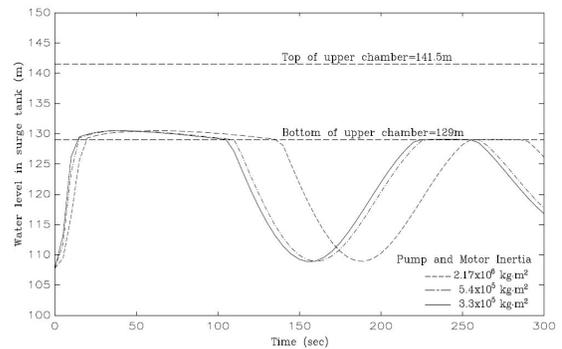


Fig. 11 Water level change in surge tank according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

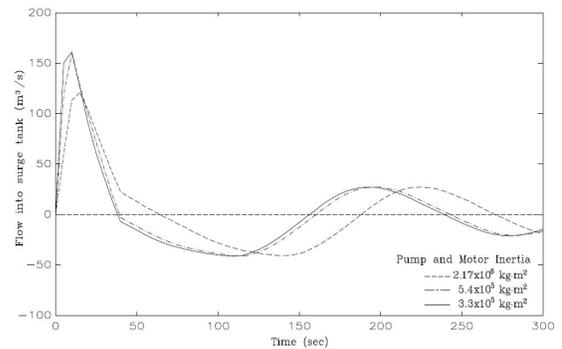


Fig. 12 Flow rate change into surge tank according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

Table 4 Water level change in surge tank according to moment of inertia for emergency stop of 4 pumps

Moment of inertia (kg·m ²)	Maximum water level(m)	Occurrence time of Max.(sec)	Minimum water level(m)	Occurrence time of Min.(sec)
2.17×10^6	130.499	63.8	107.763	0.0
5.43×10^5	130.504	38.5	107.763	0.0
3.30×10^5	130.531	37.5	107.763	0.0

Remark : Bottom height of upper chamber is 129 m

적으로 매우 크다는 점을 암시하고 있다.

수격작용의 완화 및 경감을 위한 제어의 목표는 될수록 짧은 시간 내에 최소의 압력변화로 가급적 작은 역류와 역회전을 허용하면서 물 흐름을 차단하는데 있다. 제 1 단계의 압력 저하는 펌프-전동기의 관성모멘트와 관로 시스템에 의해 거의 결정되므로, 안내깃의 제어 목적은 주로 제 2 단계 이후 역류를 심하게 증가시키지 않고 천천히 멈추는데 있다.

관성모멘트가 $3.3 \sim 5.4 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 일 때 펌프를 통한 역류는 4~5초에 발생하는 것으로 예측된 바, 실제로 안내깃의 1단계 폐쇄시간을 4초로 세팅한 것은 합리적인 것으로 판단된다.

한편, Fig. 11은 수치계산으로 예측된 관성모멘트에 따른 조압수조 내 수위변동을, Fig. 12는 조압수조로 유입되는 유량변화를 각각 나타내었다. 병렬로 운전 중인 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 펌프를 통한 유동(flow)이 안내깃에 의해 차단되기 때문에 흡출관 근처에 설치된 조압수조로 물이 유입되면서 조압수조 내 수위는 급격히 상승한다. 조압수조 내 수위가 129 m에 다다르면 물은 매우 커다란 면적의 상부 수실로 유입되므로 더 이상 수위는 상승하지 않고 서서히 차오른다.

안내깃이 완전히 닫힌 후 조압수조와 하부저수지 사이의 물은 서징을 하게 되는데, 방수로 내 압력이 떨어질 때 조압수조 내 물은 하부저수지 쪽으로 유출되면서 서징 주기가 2~3분 정도로 형성되고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 조압수조 내 최대, 최소 수위와 그 발생시간을 서로 비교하여 나타내었다. 펌프-전동기의 관성모멘트가 $2.17 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 일 때 회전체와 수주의 관성효과로 펌프를 통한 유동이 지속될 수 있기 때문에 조압수조로 유입되는 최대 유량은 작아지고, 유입 시간은 조금 더 길어지는 것으로 분석되었다. 그러나, 조압수조 내 최대 수위는 관성모멘트 값

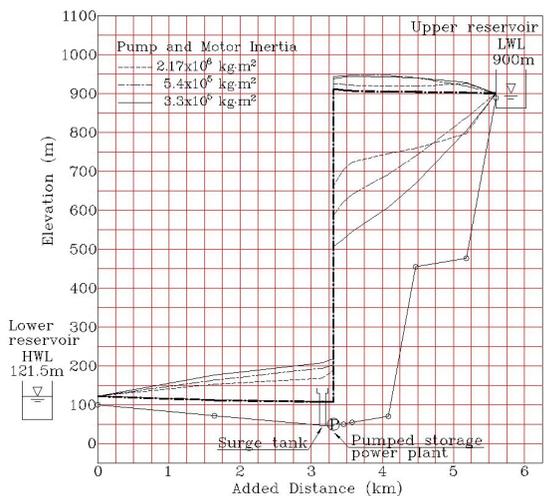


Fig. 13 Maximum and minimum pressure line according to moment of inertia for emergency stop 4 pumps

과 상관없이 약 130.5 m까지 상승하고, 최소 수위는 정상상태 수위 이상으로 유지되는 것으로 나타났다. 안내깃이 완전히 닫힌 후 조압수조 내 수위는 서징 과정을 거치면서 하부저수지의 수위(HWL= 121.5 m)로 수렴한다.

Fig. 13은 전체 관로에서 수치계산으로 예측된 최대, 최소 압력선을 관성모멘트 값들에 따라 서로 비교하여 나타내었다. 펌프-전동기의 관성모멘트가 작아질수록 수압관 내 최소압력선은 더욱 떨어지고 있으나, 최대압력선은 관성모멘트가 $2.17 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 일 때를 제외하고 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 방수로에서 최대압력선은 관성모멘트가 작아질수록 조금씩 올라가고 있으나, 최소압력선은 정상상태 수력구배선에 근접하는 것으로 분석되었다. 그리고 3가지 경우 모두 전체 관로에서 수격현상에 의한 부압은 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

3.2 수차 부하 차단 시 수격현상

3.2.1 안내깃의 개도 모델링

주 기기가 발전운전 중 전력계통이나 제어계통의 사고 등으로 부하 차단되었을 때, 조속기를 포함하는 제어장치가 정상으로 동작하고, 수압철관, 회전속도 및 발전기 전압에 이

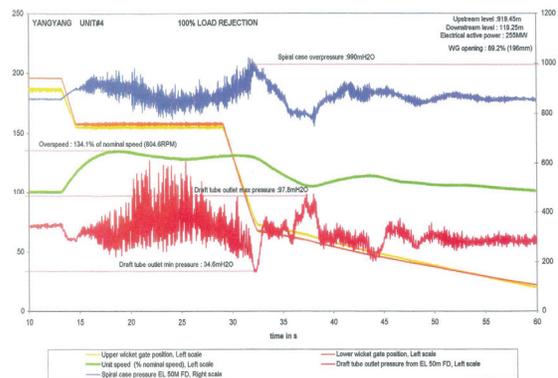


Fig. 14 Load rejection test(100%) results of #4 hydraulic turbine(by ALSTOM, 2006.9)

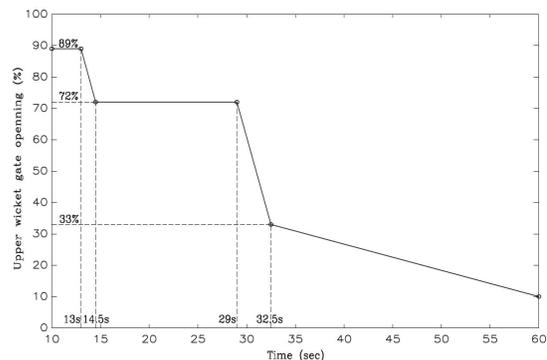


Fig. 15 Diagram of upper wicket gate opening degree according to load rejection(100%) of #4 hydraulic turbine

상이 없이 안전하게 무부하 운전으로 이행되는지를 확인하기 위해 부하 차단시험을 실시한다.⁽¹²⁾ 부하 차단되면 수차의 회전속도가 상승하고, 그에 따라 조속기가 동작하여 안내깃은 미리 설정된 속도로 급격히 폐쇄된다. 이 때문에 수압철관에서는 수격작용에 의한 수압 상승을 일으켜서 수차의 과도운전 중에서도 가장 가혹한 상황을 가져온다. 양수발전소의 경우에도 주 기기의 실제 성능이 계약보증치를 만족시키는 지 여부를 확인하기 위하여 준공 전 인수 성능시험을 현장에서 실시하였는데, 그 중 4호기 수차의 100% 부하 차단 시험결과는 Fig. 14와 같다.

안내깃의 개도는 과도현상에 많은 영향을 미치기 때문에 Fig. 14의 100% 부하 차단 시 안내깃 개도를 Fig. 15와같이 모사하여 범용 전산프로그램인 SIMDRU를 사용한 수치계산을 수행하였다. 부하 차단에 대한 수치해석을 수행하기 위해서는 수차의 특성곡선 및 펌프의 완전한 특성곡선 등이 필요하다. 아울러 수차·발전기의 동특성을 고려한 전산 프로그램도 개발되어야 한다. 그러나 현재까지 이러한 조건들을 갖추지 못하여, 본 연구에서는 기본설계시와 마찬가지로 수차를 하나의 저항기구로 모델링(modelling)하여 수치계산을 수행하였다.

3.2.2 수차 4대의 부하 차단 시 수격현상

동일 수로계에 여러 대의 수차가 설치된 경우에는 각 수차의 부하 차단시험이 완료된 단계에서 모든 발전기의 부하 차단시험이 동시에 이루어져서 보증치와의 최종 확인을 하는 것이 바람직하다. 또 필요에 따라서는 여러 대의 수차를 시간차로 차단하는 차단시험을 하는 경우도 있다. 전체 호기가 최대 부하에서 동시에 부하 차단되기 보다는 여러 대가 시차

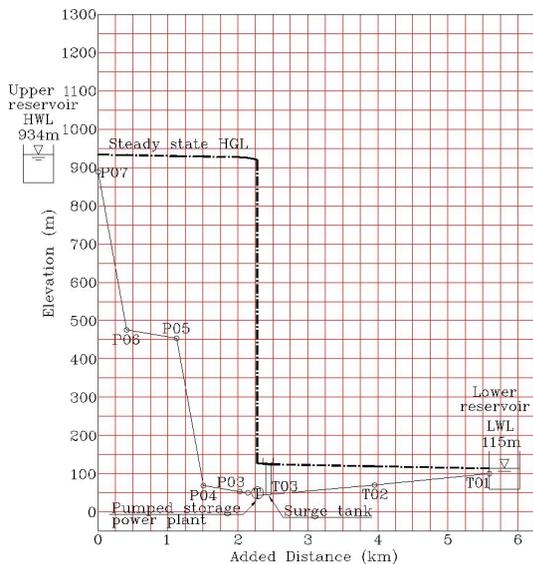


Fig. 16 Hydraulic grade line and pipeline profile for operating 4 hydraulic turbines

를 가지고 차단되는 경우가 많으며, 나중에 차단되는 호기는 앞에서 차단되면서 발생한 수압 상승의 영향을 받기 때문에 회전속도 상승, 케이싱 내 수압 상승, 흡출관 내 수압 저하가 보다 심하게 되는 경우가 많다. 수차 1대가 부하 차단되고, 다른 호기가 운전을 계속할 경우에는 차단된 호기에 의해 일어나는 수압상승에 의해 정상 운전되는 호기의 걸보기 낙차가 증가한다. 이 때문에 계속 운전하는 호기의 출력이 과도적이기는 하지만 대폭 증가하는 수가 있다.

양수발전소의 인수성능시험시 안전성 등의 문제로 수차 4대 부하 차단에 대한 시험은 이루어지지 않았고, 단지 수차 1대의 100% 부하 차단시험만 실시하였다. 따라서, 본 연구에서는 양수발전소의 시설용량인 250 MW급 수차 4대가 병렬로 운전되다가 동시에 부하 차단 된 경우 발생하는 수격현상

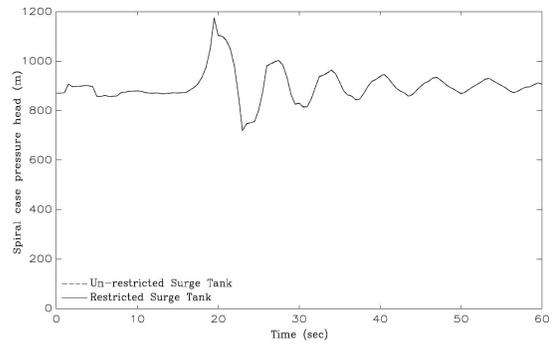


Fig. 17 Spiral case pressure change with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

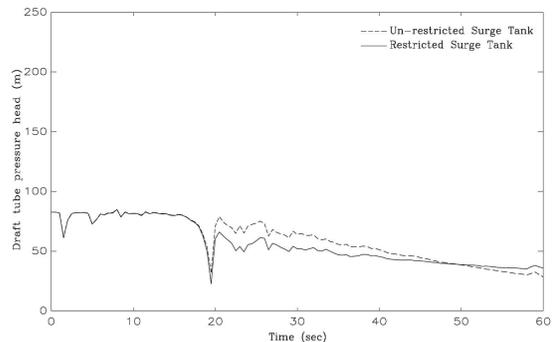


Fig. 18 Draft tube pressure change with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

Table 5 Transient characteristics comparison with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

Surge tank	Penstock		Draft tube	
	Maximum pressure head (m)	Minimum pressure head (m)	Maximum pressure head (m)	Minimum pressure head (m)
With orifice	1,174.04	708.64	90.49	22.74
Without orifice	1,175.46	709.54	97.47	23.60

에 대하여 수치해석을 통해 분석하고자 한다.

상부저수지가 고수위(HWL=934 m)이고, 하부저수지가 저수위(LWL= 115 m)일 때 그 차가 최대 총낙차(gross head)는 819 m이다. 이때 직경이 6.4 m인 도수터널 내에는 가장 많은 수량 $Q= 148.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 물이 빠른 속도 $V= 4.61 \text{ m/s}$ 로 흐르기 때문에 수격작용은 심각할 것으로 쉽게 짐작할 수 있다. 이 상태에서 수차 4대가 병렬로 운전 중 불의의 사고 등으로 부하 차단 되었을 때 발생하는 시나리오를 가정하여 수격현상에 대한 수치계산을 수행하였다. 부하가 갑자기 차단되면 안내깃은 Fig. 15처럼 4단계로 폐쇄되는 것으로 모사하였다. Fig. 16은 수차 4대 병렬 운전시 전체 관로의 수력구배선 및 관로중단도를 나타내었다.

Fig. 17은 수차 4대가 부하 차단된 경우 수치해석결과 얻어진 수압관 내 압력수두 변화를, Fig. 18은 흡출관 내 압력수두 변화를 각각 나타내었다.

안내깃이 닫힐 때 수압관 내 압력은 상승하고, 흡출관내 압력은 떨어진다. 안내깃이 89%에서 72%까지 닫히는 1단계에서 수차를 통한 유량은 크게 줄지 않기 때문에 압력 변동은 매우 작은 것으로 분석되었다. 안내깃의 개도가 72%로 계속 유지되는 2단계 과정 중 압력과 유량은 개도와 마찬가지로 일정하게 유지된다. 안내깃이 약 3.5초 동안 72%에서 33%까지 급속히 닫히는 3단계에서 압력과 유량이 급격히 변한 것으로 나타났다. 즉, 3단계에서 수압관 내 압력은 1,174 m까지 최대로 상승하고, 흡출관 내 압력은 22.7m까지 최저로 떨어지는 것으로 수치계산결과 예측되었다. 안내깃이 33%에서 0%까지 약 40초 동안 서서히 폐쇄되는 4단계에서 수압관과 흡출관 내 압력은 상승, 하강을 반복하며 점차로 안정된다. Table 5는 수치계산으로 예측된 수압관과 흡출관 내 최대, 최소압력을 나타내었다.

Fig. 17, Fig. 18, Table 5에는 조압수조에 오리피스(orifice)가 있을 때와 없을 때의 수치계산 결과를 서로 비교하여 나타내었다. 흡출관 근처의 조압수조에 설치된 오리피스는 상류 지역의 수압관 내 수격작용에는 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 조압 수조 연결관(내경 6.4 m)에 설치된 오리피스(내경

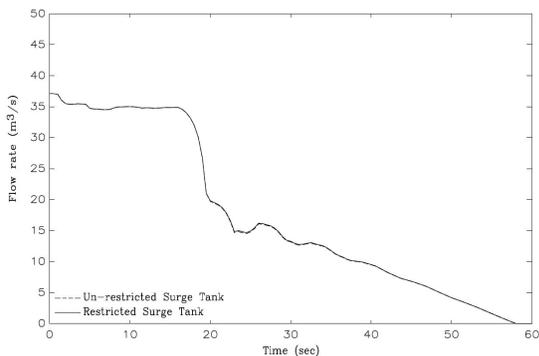


Fig. 19 Flow rate change with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

2.8 m)는 흡출관 내 압력에는 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 부하 차단 후 안내깃이 닫히면서 흡출관 내 압력이 떨어지기 때문에 조압수조 내 물은 방수로로 유출되는데, 이 오리피스에 의해 유출량은 줄어들고 오리피스가 없을 때에 비해 흡출관 내 압력은 좀 더 떨어진다. 안내깃이 닫힌 후 흡출관과 하부저수지 사이의 방수로에서 서징이 발생하는데, 하부저수지에서 조압수조로 유동이 형성될 때 오리피스는 기계적인 손실을 유발하여 상승압을 보다 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다. 안내깃을 통한 유량은 Fig. 19에 나타내었는데, 이 유량은 Fig. 15의 안내깃 개도변화와 유사하게 변동되고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 20은 수치계산으로 예측된 조압수조 내 수위

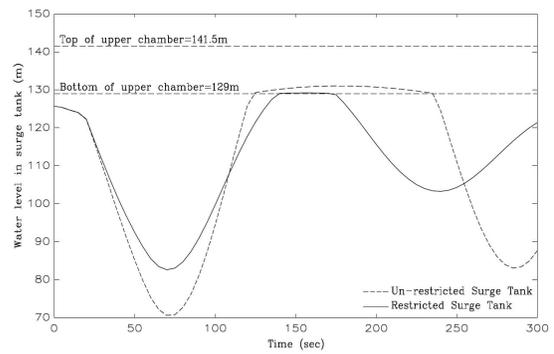


Fig. 20 Water level change in surge tank with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

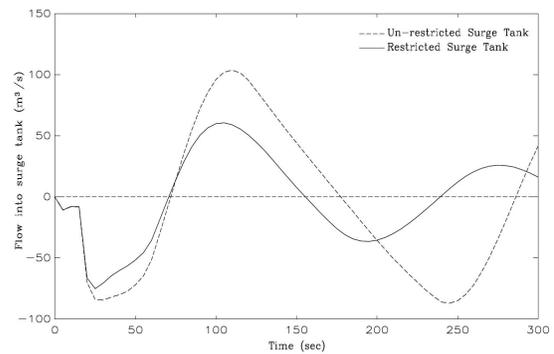


Fig. 21 Flow rate change into surge tank with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

Table 6 Water level change in surge tank with/without orifice for load rejection of 4 hydraulic turbines

Surge tank	Maximum water level(m)	Occurrence time of Max. (sec)	Minimum water level (m)	Occurrence time of Min. (sec)
With orifice	129.180	155.7	82.582	70.6
Without orifice	131.041	177.3	70.434	71.9

Remark : Bottom height of upper chamber is 129 m

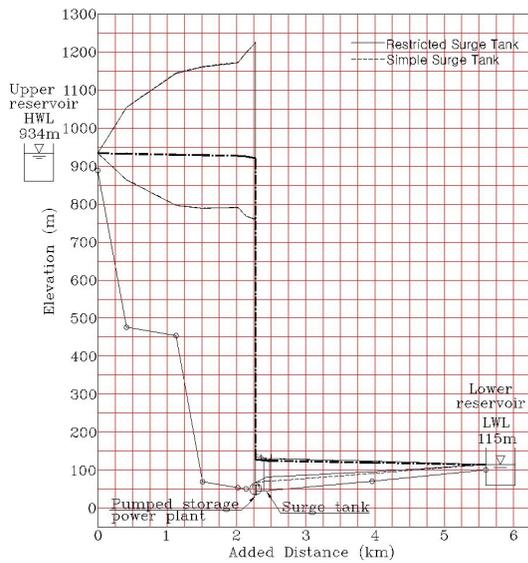


Fig. 22 Maximum and minimum pressure line with/without orifice

변동을, Fig. 21은 조압수조로 유입되는 유량변화를 각각 나타내었다. 수차 4대가 부하 차단 된 경우 방수로로 흐르던 물은 안내깃에 의해 흐름이 차단되기 때문에 흡출관 근처에 설치된 조압수조로부터 방수로로 물이 유출되면서 조압수조 내 수위는 빠르게 떨어진다. 안내깃이 완전히 닫힌 58초 후에도 물은 조압수조로부터 방수로로 유출되나, 하부저수지의 수위가 115m로 일정하게 유지되어 흡출관 근처의 에너지 선보다 높기 때문에 곧 물은 하부저수지에서 조압수조 쪽으로 유입하게 된다. 이처럼 안내깃이 완전히 닫힌 후 조압수조와 하부저수지 사이의 물은 서징을 하게 되는데, 이 서징은 2~3분 정도의 긴 주기로 발생하는 것으로 예측되었다.

Table 6은 조압수조 내 최대, 최소 수위와 그 발생시간을 서로 비교하여 나타내었다. Table 6은 Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21과 마찬가지로 조압수조에 오리피스 가 있을 때와 없을 때의 수치계산 결과들을 서로 비교하여 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 흡출관 근처의 조압수조에 설치된 오리피스는 상류 지역의 안내깃을 통과하는 유량에는 별다른 영향을 주지 못하는 것으로 분석되었다. 그러나, 이 오리피스는 조압수조와 방수로 사이에서 유출입되는 유동에는 상당한 영향을 미친다. 즉, 방수로에서 발생하는 서징 과정 중 조압수조로 유출입되는 수량을 오리피스 저항으로 줄임으로써 서징 주기를 좀 더 짧게 하는 효과가 있음을 확인할 수 있다. 시간이 한참 지나면 조압수조 내 수위는 서징 과정을 거치면서 두 경우 모두 하부 저수지의 수위(= 115 m)로 수렴한다.

Fig. 22는 수치계산으로 예측된 전체 관로에서 최대, 최소압력선을 나타내었다. 전체 관로에서 수격현상에 의한 부압은 발생하지 않으나, 수압관에서 압력은 안내깃이 닫히는 과정 중 매우 높게 상승하므로 각별한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

양수발전소에서 발생하는 수력학적 과도현상을 분석하기 위해 펌프의 긴급정지, 수차의 부하 차단 등의 수격현상에 관한 수치계산을 수행하여 비교 및 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수압관의 최대압력과 흡출관의 최소압력은 상부저수지가 고수위이고 하부저수지가 저수위일 때 수차 4대의 부하가 사고 등에 의해 갑자기 차단된 경우 발생한다. 또 수압관의 최소압력과 흡출관의 최대압력은 상부저수지가 저수위이고 하부저수지가 고수위일 때 펌프 4대가 긴급 정지된 경우 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 펌프 4대가 병렬로 운전되다가 동시에 긴급 정지된 경우 펌프-전동기의 관성모멘트가 $2.17 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 일 때 회전체와 수주의 관성 효과로 펌프를 통한 유동이 지속될 수 있기 때문에 조압수조로 유입되는 최대 유량은 작아지고, 유입 시간은 조금 더 길어지는 것으로 분석되었다. 그러나, 조압수조 내 최대 수위는 관성모멘트 값과 상관없이 약 130.5 m까지 상승하고, 최소 수위는 정상상태 수위 이상으로 유지되는 것으로 나타났다. 안내깃이 완전히 닫힌 후 조압수조 내 수위는 서징 과정을 거치면서 하부저수지의 수위(HWL= 121.5 m)로 수렴하였다.
- 3) 수차 4대가 부하 차단 된 경우 방수로로 흐르던 물은 안내깃에 의해 흐름이 차단되기 때문에 흡출관 근처에 설치된 조압수조로부터 방수로로 물이 유출되면서 조압수조 내 수위는 빠르게 떨어졌다. 안내깃이 완전히 닫힌 58초 후에도 물은 조압수조로부터 방수로로 유출되나, 하부저수지의 수위가 115m로 일정하게 유지되어 흡출관 근처의 에너지 선보다 높기 때문에 곧 물은 하부저수지에서 조압수조 쪽으로 유입하게 되었다. 이처럼 안내깃이 완전히 닫힌 후 조압수조와 하부저수지 사이의 물은 서징을 하게 되는데, 이 서징은 2~3분 정도의 긴 주기로 발생하는 것으로 예측되었다.
- 4) 본 논문을 타 수력발전소를 포함한 양수발전소에 확대 적용함으로써 다양한 패턴의 데이터베이스를 확보하고, 수력학적 과도현상에 대해 분석을 수행하여 양수발전 및 수력발전소의 신뢰성 향상 및 안전성 확보에 기여 하고자 한다.

References

(1) SMEC, Asian Development Bank, 2017, "Yonki Toe-of-Dam Surge Tank / Hydraulic Transient Analysis" Norconsult New Zealand.

- (2) Watters, G. Z., 1984, Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, Second edition, Butterworth Publishers, MA.
- (3) Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., and Axworthy, D. H., 2005, "A Review of Water Hammer Theory and Practice." ASME, Vol. 58, pp. 49~76.
- (4) Thorley, A. R. D., 1991, Fluid Transients in Pipeline Systems, D. and L. George Ltd., UK.
- (5) Kim, K. Y., 2017, "Waterhammer for the Mini Hydropower Plant Installed at Water Conveyance Pipeline." The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 3, pp. 11~17.
- (6) Chaudhry, M. H., 2014. Applied Hydraulic Transients, 3rd edition, Springer.
- (7) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (8) 한국중부발전, 2007, 양양양수발전소 1~4호기 건설지(제 I 권, 제II 권).
- (9) Doosan Heavy Industries & Construction, 2006, "ALSTOM Power Hydro, Yangyang Unit 1~4 P/T Commissioning Report(Unit #1~4 Turbine Field Tests Report),"
- (10) SIMDRU(Simulation of Pressure Oscillation in Pipe Networks) User's Manual, 1980, Hannover University, Germany.
- (11) Kim, K. Y., Yu, T. I., 2000, "Numerical Study on the Waterhammer of PalDang Intake Pumping Station." The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 3, No. 4, pp. 52~58.
- (12) Taulan, J. P., "Pressure Surges in Hydro-electric Installations: Peculiar Effects of Low Specific Speed Turbine Characteristics," 4th International Conference on Pressure Surges, BHRA Fluid Engineering, Bath, England, pp. 337~352, 1983.