

양수발전소의 수력학적 과도현상에 관한 연구(I)

이영범* · 김경엽**†

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

Youngbum Lee*, Kyung-Yup Kim**†

Key Words: Pump turbines(펌프수차), Hydraulic transient(수력학적 과도현상), Water hammer(수격현상), Emergency stop(긴급정지), Load rejection(부하 차단), Pumped storage power plant(양수발전소)

ABSTRACT

This field test was conducted to investigate the hydraulic transient at a pumped storage power plant with four 250 MW pump turbines. The occurrence of a hydraulic transient may be a problem related to the water hammer that occurs during the pump start and pump input power shutoff or turbine start and turbine load rejection, which affects the hydraulic pressure change, flow-rate change, and rotational speed change of the pump turbine caused by the water hammer of the penstock and tailrace. The water hammer was field tested to investigate such hydraulic transients. Accordingly, the main factors in the field test must be determined to analyze the water hammer. We monitored the main sensors attached to the pump turbine and those attached to the inlet valve. The result after the field study confirmed that the occurrence of the water hammer during the pump start and pump stop under a normal operation of the pump turbines was not problematic. Moreover, during the load rejection test, an upsurge occurred in the penstock under the rapid closing of the upper and lower wicket gates, while a downsurge occurred in the draft tube and spread to both the upstream and the lower stream. As a result, the pressure rose in the penstock, and the pressure rapidly fell in the draft tube. Subsequent to the full close of the upper wicket gate, the water hammer repeatedly rose and fell in the tailrace between the pump storage power plant and the lower reservoir. Moreover, the pressure in the draft tube rose, and surging occurred in every 2 minutes.

1. 서 론

우리나라의 양수발전은 1970년 타당성 조사를 완료하고 1975년 초 공사를 착수하여 1980년 2월 상업운전을 개시한 400 MW 용량의 청평 양수발전소가 최초이다. 우리나라에서 가동 중인 양수발전소는 상부저수지의 저수량을 거의 대부분 하부저수지로부터 양수된 물로 채우는 순 양수(pure pumped storage)식 발전이다.

양양양수발전소의 경우 유효낙차가 817 m로서 세계적으로 손꼽힐 정도로 낙차가 크기 때문에 1단 펌프가 설치된 국

내의 다른 양수발전소와는 달리 2단 펌프가 설치되었다. 우리나라 7개 양수발전소의 총 시설용량은 4.7 GW이고, 2017년 현재 세계에서 9번째이다. 우리나라는 2017년 12월 제8차 전력수급계획을 통해 양수발전 규모를 2031년까지 2 GW를 확충한 6.7 GW대로 확대시킨다는 방침이다.⁽¹⁾

양수발전소에는 수압철관(penstock)과 방수로(tailrace), 분기 합류부나 조압수조(surge tank)를 포함하는 등,⁽²⁾ 펌프수차 자체도 복잡하게 구성되어 수력학적 과도현상(hydraulic transients)은 여러 가지 문제를 내포하고 있다.^(3,4)

이러한 문제는 수격현상(water hammer)으로 인한 높은

* 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

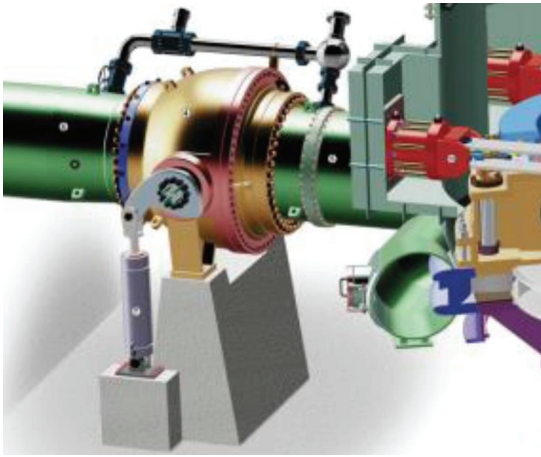


Fig. 1 Pumped storage power plant inlet valve figuration



Fig. 2 View of pumped storage power plant

수격압으로 수압철관의 파열과 관 내 부압으로 인한 좌굴, 입구밸브(inlet valve)의 개폐 및 작동 불능사고, 안내깃의 폐쇄사고, 각종 구동부의 손상 등의 사고가 발생되고 있는 실정이다.^(5,6)

한편, 본 연구를 위한 양수발전소에는 250 MW×4기의 펌프수차가 설치되었으며, 유효낙차는 817m로 대단히 크다.⁽⁷⁾ 그러나, 상부 댐에서부터 발전소 사이의 수로에는 차단용 밸브가 없고, Fig. 1과 같이 호기별 입구밸브만 설치되었기 때문에 입구밸브의 긴급 작동이 필요한 비상시에 대한 대비가 매우 취약한 실정이다. 펌프수차의 기동 및 정지가 빈번한 양수발전소의 특성상 입구밸브가 작동불능 상태이거나 파손될 경우 발전과 양수는 물론 지하발전소 침수나 인명 피해 등 대형 사고를 유발할 수 있다. 입구밸브는 대형 중량물인 관계로 주기적인 분해 정비도 매우 어려우며, 입구밸브의 수리나 정비를 위해서는 장기간 발전 정지가 불가피한 실정이다.⁽⁸⁾

이에 대하여 본 연구는 양수발전소의 펌프수차를 정상적으로 기동 또는 정지시킬 때 도수로(headrace) 터널과 수압철관 그리고 방수로 터널에서 발생하는 수격현상을 현장에서 시험하여 펌프수차와 안내깃의 연동 운전방법 등을 확인

하고 수차의 부하 차단시험(load rejection test) 시 발생하는 수격현상을 현장에서 관측하여 이를 분석하고자 한다. 수격현상을 분석하기 위하여 현장시험 시 취득해야 할 주요 인자들을 결정할 필요가 있어 펌프수차에 부착된 주요 센서들과 입구밸브에 부착된 주요 센서들을 모니터링 하였다.⁽⁹⁾

본 연구는 양수발전소에서 발생하는 수격현상에 관한 현장시험을 수행함으로써 펌프수차와 수압관로 등 양수발전소의 수력학적 과도현상에 관한 연구를 하는데 그 목적이 있다.

2. 시스템 현황

2.1 주요 시설물 현황

양수발전소의 주요 시설물인 상부댐, 수로터널, 지하발전소 및 하부댐은 Fig. 2의 조감도에 나타내었으며, 주요 시설물의 특성은 다음과 같다.

- 1) 상부저수지는 해발 약 940 m에 위치하고, 총 저수용량이 5,200,000 m³로 8시간 발전가능용량인 4,530,000 m³의 발전용수가 저장된다.
- 2) 하부저수지는 해발 약 120 m에 상부저수지에서 동쪽 약 5 km 지점에 위치하고, 총 저수용량이 10,300,000 m³, 유효저수용량 4,530,000 m³의 발전용수를 저장한다.
- 3) 상부 및 하부 저수지는 약 6,018 m 길이의 수로로 연결되며, 수로 중간에 양수와 발전을 위한 250 MW급 4기의 펌프수차와 발전-전동기를 설치한 지하발전소가 있다. 수로는 취수구, 도수로, 수압관로, 방수로, 조압수조 및 방수구로 구성된다.
- 4) 지하발전소는 하부저수지로부터 약 3,200 m, 상부저수지로부터 약 1,500 m 떨어진 지점의 지하에 있으며, 지하발전소의 크기는 높이 42.3 m, 폭 20 m, 길이 120 m이다.
- 5) 변압기실은 지하발전소로부터 하부저수지 쪽으로 56 m 위치의 지하에 건설되었고, 크기는 높이 21 m, 폭 19 m, 길이 119 m로 300 MVA 변압기 4대가 설치되었다. 지상 제어소는 진입터널 입구지역에 위치한다.
- 6) 지하발전소와 지하 변압기실은 진입터널(높이 7.1 m, 폭 6.7 m, 길이 1,854 m)과 2개의 모선터널(높이 3.9 m, 폭 4.2 m, 길이 1,835 m)로 옥외 제어소와 연결된다.
- 7) 조압수조는 하부(downstream) 수실형으로서 폭 12 m, 높이 12.5 m, 길이 53 m, 수직부 높이는 67.8 m, 샤프트 내경은 6.4 m이다.
- 8) 방수로의 방수위는 EL. 100 m, 내경 6.4 m, 길이 3,089 m이다.

2.2 펌프수차

양수발전소의 시설용량은 1,000 MW(250 MW × 4기)이며, 펌프수차의 출력은 발전시 유효낙차 782.5 m (4개호기 운전시)에서 258.3 MW이고, 양수시 최대입력(maximum input power)은 262 MW(최소 실양정에서 1개호기 운전시)이다. 발전-전동기의 정격출력은 발전시 282 MVA, 양수시 261.2 MVA이다.

양수발전소의 수직축 2단 프랜시스 펌프수차(vertical shaft, double regulated stages Francis pump turbine) 조감도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 펌프수차의 조립단면도를 나타내었다.⁽¹⁰⁾

PUMP TURBINE & GENERATOR MOTOR

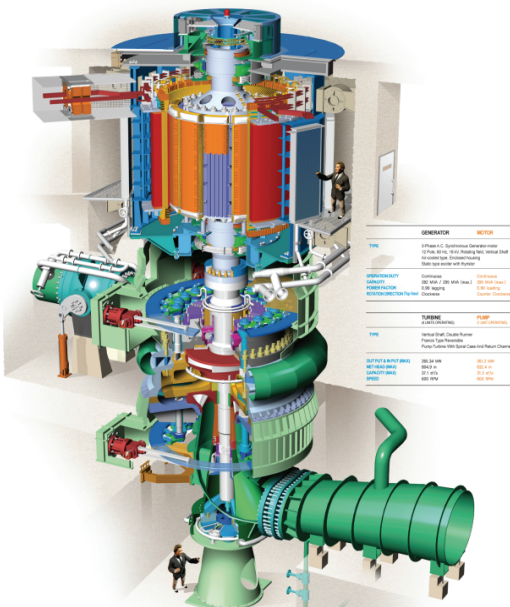


Fig. 3 View of vertical shaft, double regulated stages Francis pump turbine

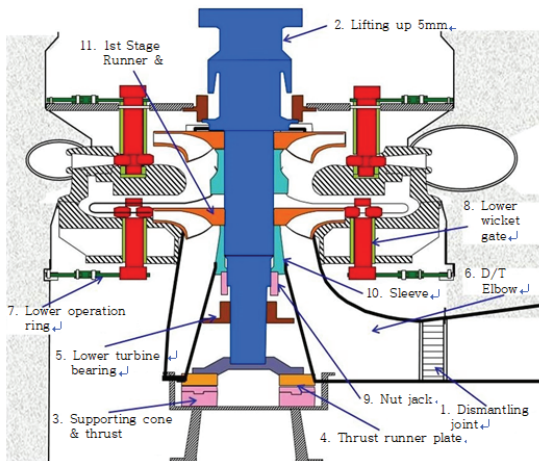


Fig. 4 Assembly sectional drawing of vertical shaft, double regulated stages Francis pump turbine

Table 1 Quantity, time and water level for power generating and pumping

Items	Units	Pumping	Power generation	
Maximum used quantity	m ³ /s	126	149	
Power generation / pumping time	hour	9.99	7.89	
Reservoir level after power generation / pumping	Upperdam	EL. m	934.0	900.0
	Lower dam	EL. m	115.0	121.5

수차에 공급되는 유량과 차단 목적을 하는 입구밸브의 위치는 상·하부 저수지와 펌프수차 사이의 유로를 형성해주는 수압철클관 말단과 유량을 균등히 배분해주는 스파이럴 케이싱(spiral casing) 입구에 위치하며, 입구밸브 상부에 걸리는 수압을 이용한 서보모터(servomotor)로 동작한다.⁽¹¹⁾

입구밸브가 유량의 차단 및 공급이 목적이라면 안내깃(guide vane or wicket gate)은 러너(runner)에 유입되는 유량을 조절하여 발전기 출력을 조절하는 역할을 담당하고, 동작매체는 입구밸브와 같이 서보모터이다.

스테이 베인(stay vane, stay ring)은 안내깃과 입구밸브 사이에 위치하며, 케이싱의 상부 커브에 전해지는 축방향의 힘을 지지한다. 또한, 안내깃에 물을 도입하는 유로를 형성하고, 안내깃과 그 숫자가 같다.

시어핀(shear pin)은 가이드링과 안내깃 스템 사이에 위치하며, 안내깃 폐쇄시 어느 한 개의 깃에 이물질이 끼일 경우 그 깃의 핀이 절손되어 인접한 안내깃의 동작과 다른 기계장치(mechanism)에 영향을 미치지 않도록 하는 역할을 한다.

본 발전소의 펌프수차 형식이 다단이기 때문에 그 특징을 살려 스파이럴 케이싱 하단부는 공동 단면폭을 최소화하여 수압철클관부로부터 가해지는 압력이 암반에 직접 전달되도록 설계되었다.

양수발전소는 낙차나 유량과 같은 발전소 입지조건에 따라 펌프수차의 형식이나 용량 등이 결정된다. 발전 및 양수시에 필요한 사용수량과 시간 그리고 저수지 수위는 Table 1에 나타내었다. 평상시 저수지를 운영할 때 양수와 발전에 소요되는 시간은 각각 9.99시간과 7.89시간으로 총 17.88시간이며, 나머지 6.12시간은 양수와 발전을 하지 않는 상태로 저수지의 수위가 유지된다.

3. 수격현상 현장시험

3.1 시험장치

관로에서 유속의 급격한 변화에 의해 관 내 압력이 상승 또는 하강하는 현상을 수격현상이라 한다. 펌프수차를 기동시키거나 정지시킬 때 또는 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬



Fig. 5 Pumped storage power plant inside view

때, 그 순간 관로 내 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으키게 된다. 관로 내 압력이 대기압보다 낮아지면 관로에 좌굴(collapse)이 일어날 수 있으며, 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 염려가 있다. 이러한 수격작용을 피하거나 경감시키기 위한 적절한 방법을 취하는 것은 양수발전소의 안전성 확보를 위해 중요한 일이다. 수력학적 과도현상을 실증시험하기 위하여 양수발전소 구내 전경을 Fig. 5에 나타내었다.

양수발전소의 펌프수차를 정상적으로 기동 또는 정지시킬 때 도수로 터널과 수압철관, 그리고 방수로 터널에서 발생하는 수격현상을 현장에서 측정하고, 펌프수차와 안내깃의 연동 운전방법 등을 확인하고자 한다. 특히 수차발전기 2호기의 경우, 전기안전검사의 일환으로 수행된 부하 차단시험(load rejection test) 시 발생하는 수격현상을 현장에서 관측하고 이를 분석하였다. 수격현상을 분석하기 위하여 현장 시험 시 취득해야 할 주요 인자들을 결정할 필요가 있다.⁽¹²⁾

Fig. 6은 펌프수차에 부착된 주요 센서들의 모니터링 화면을, Fig. 7은 입구밸브에 부착된 주요 센서들의 모니터링 화면을 각각 나타내었다. 수격현상은 펌프 및 수차 모드로 운전되는 경우에 대하여 아래와 같이 체계적으로 분류하고, 양수발전소에서 평소 운영하는 상태로 수력학적 과도현상에 관한 자료들을 취득하였다.

3.2 펌프 정상 가동에 따른 수격현상

펌프의 실양정이 805.8 m일 때 250 MW급 펌프가 정상적

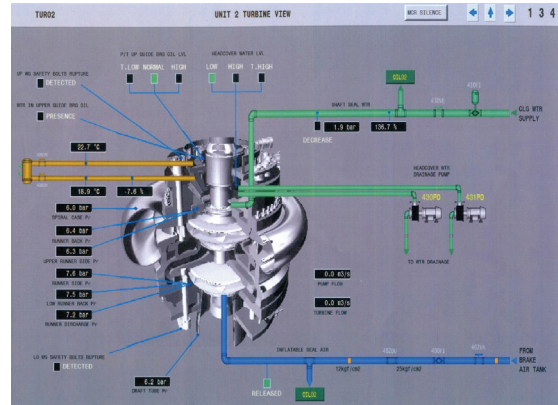


Fig. 6 Main sensor monitoring screen that installed pump turbine

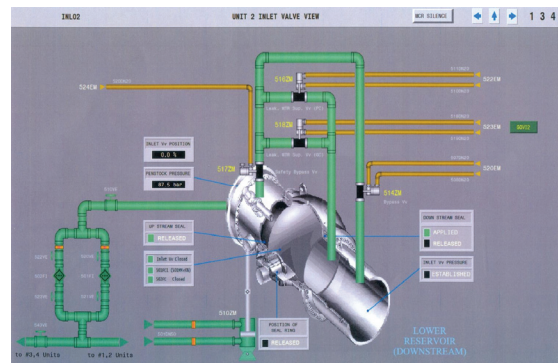


Fig. 7 Main sensor monitoring screen that installed inlet valve

으로 기동되는 경우 발생하는 수력학적 과도현상을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서, (a)는 수압철관과 흡출관 내 압력을, (b)는 상·하부 안내 깃들과 입구밸브 개도를, (c)는 펌프 회전수와 유량을, (d)는 스파이럴 케이싱과 회전차 뒤(runner back) 압력 그리고 전동기 입력을 각각 나타내었다.

초기에 수압철관 내 압력은 87.31 bar, 스파이럴 케이싱과 흡출관 내 압력은 6.4 bar와 6.66 bar로 각각 측정되었고, 상·하부 안내깃들의 개도는 각각 0%와 9.38%로 유지되는 상태였다. 전동기로 전원은 101초에 투입되었고, 이때부터 펌프는 서서히 돌기 시작하여 300초에 정격 회전수인 600 rpm에 다다른 것으로 측정되었다. 스파이럴 케이싱 내 압력은 370초부터 급격히 상승하는데, 이는 이 순간부터 입구밸브를 열기 시작하였기 때문이다. 상부 안내깃은 470초부터 열리고, 하부 안내깃은 475초부터 개방된다. 그러나 상·하부의 안내 깃들은 곧바로 동조되어 505초에 80.1%까지 개방되었다. 상부 안내깃이 열린 순간 펌프를 통한 유동이 형성되므로 수압철관에서 업서지(up surge)가 발생하며, 흡출관에서 다운서지(down surge)가 발생하여 상류와 하류로 각각 전파된다. 이에 따라 수압철관 내 압력은 473초에 89.3 bar까지 상승하고, 흡출관 내 압력은 502초에 5.36 bar까지 떨어진다. 펌프 입구 측에는 직경 6.4 m의 조압수조가 설치되

양수발전소의 수력학적 과도현상에 관한 연구 (I)

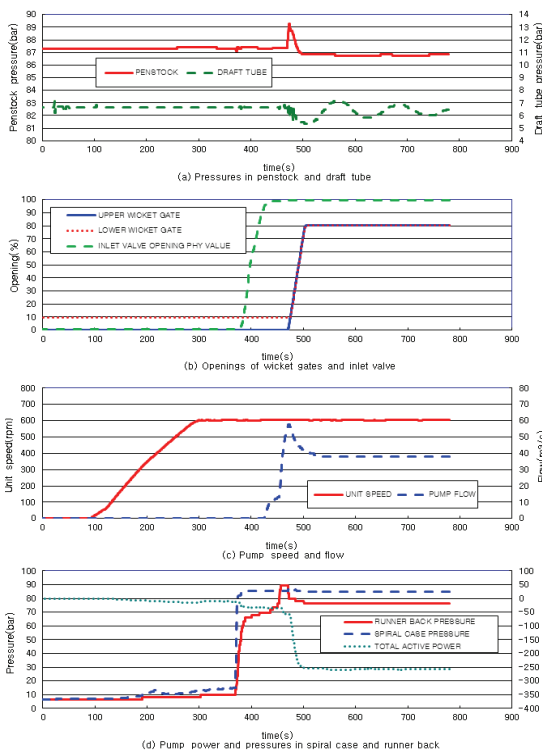


Fig. 8 Hydraulic transients according to normal start of pump

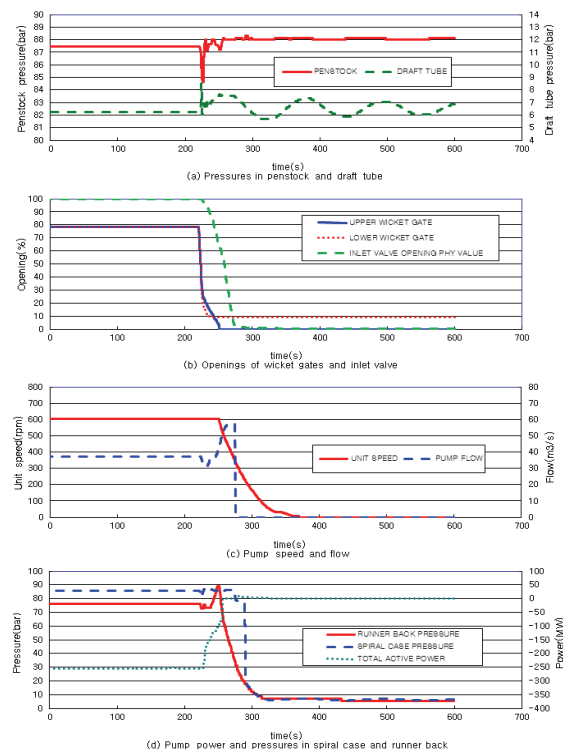


Fig. 9 Hydraulic transients according to normal stop of pump

Table 2 Transient characteristics according to normal start of pump

Description	Units	Value		
		Start	Maximum	End
Penstock pressure	bar	87.31	89.30	86.84
Spiral case pressure	bar	6.40	87.43	84.99
Draft tube pressure	bar	6.66	7.16	6.48
Pump speed	rpm	0.0	605.0	603.1
Upper wicket gate opening	%	0.0	80.43	80.43
Lower wicket gate opening	%	9.38	80.51	80.51
Pump flow rate	m ³ /s	0.0	57.86	38.19
Inlet valve opening	%	0.44	99.45	99.45
Total active power	MW	0.0	260.0	258.0
Runner back pressure	bar	6.66	89.15	76.20

Remark : 1. Water level of upper & lower reservoir : 925.6 m, 119.8 m
 2. Start time : 01:12:00, End time : 01:25:00

있기 때문에 펌프가 정상적으로 기동되는 경우 양수발전소와 하부저수지 사이의 방수로에서 발생하는 수격작용은 약 2분 주기로 서징하면서 효과적으로 완화되고 있음을 알 수 있다.

한편, 펌프를 통한 유동은 426초부터 시작되어 471초에 57.86 m³/s의 매우 큰 유량이 형성된 것처럼 측정되었다. 상부 안내깃은 470초부터 열렸기 때문에 펌프를 통한 유동이 이전에 형성되었다는 것은 사실이 아님을 뜻한다. 이는 양수발전소의 특성상 펌프의 기동 시 흡출관에 압축공기를 주입하고, 유

량은 인덱스법(index method)에 의해 측정하였기 때문에 기인된 것이다. 즉, 흡출관에 주입된 압축공기는 상부 안내깃이 열린 순간 스파이럴 케이싱으로 유입되면서 약 8.7% (=100 × 7.66 bar, abs / 88.31 bar, abs)의 부피로 더욱 압축되고, 이때 유량계에 매우 큰 차압(differential pressure)이 작용하여 펌프를 통한 양수량이 크게 형성된 것처럼 측정될 수 있다. 스파이럴 케이싱과 수압철관으로 유입된 압축공기는 수격작용에 상당한 영향을 주게 되는데, 안내깃이 열린 순간 수압철관에서 발생하는 업서지는 압축공기의 완충(cushion) 작용에 의해 완화되고 있는 것으로 판단된다. 펌프를 통한 유량은 마지막으로 기록된 780초에 38.19 m³/s로 측정되었는데, 이때 수압철관과 스파이럴 케이싱 내 압력은 각각 86.84 bar와 84.99 bar로 안정된 것으로 나타났다. Table 2는 펌프·전동기의 정상적인 기동에 따른 과도 특성을 요약하여 나타내었다.

3.3 펌프 정상 정지에 따른 수격현상

펌프의 실양정이 814.1m일 때 250 MW급 펌프가 정상적으로 정지되는 경우 발생하는 수력학적 과도현상을 Fig. 9에 나타내었다. 여기서, (a)는 수압철관과 흡출관 내 압력을, (b)는 상·하부 안내깃과 입구밸브 개도를, (c)는 펌프 회전수와 유량을, (d)는 스파이럴 케이싱과 회전차 뒤 압력 그리고 전동기 입력력을 각각 나타내었다. 초기에 상·하부 안내깃들의 개도는 78.5%, 펌프를 통한 유량은 37.01 m³/s, 펌프 회전수는 603 rpm인 상태로 운전되었다. 이때 수압철관과

스파이럴 케이싱 그리고 흡출관 내 압력은 87.48, 85.68, 6.23 bar로 각각 측정되었다. 펌프를 정상적으로 정지시키기 위하여 먼저 상·하부 안내깃을 220초에 닫기 시작하였다. 유압장치에 의해 2단계로 제어되는 상·하부 안내깃들이 동조되어 닫힘에 따라 펌프를 통한 유량은 감소하므로 수압철관에서는 다운서지가, 흡출관에서는 업서지가 발생하여 상류와 하류로 각각 전파된다. 이에 따라 스파이럴 케이싱 내 압력은 224초에 81.02 bar까지 떨어졌다가 228초에 86.82 bar까지 상승하는 것으로 측정되었다. 수압철관 내 압력은 226초에 84.63 bar까지 떨어졌다가 230초에 88.01 bar까지 상승하였는데, 약 2초의 시간 지연(time delay)이 있는 것으로 나타났다. 또한, 흡출관 내 압력은 224초에 8.51 bar까지 급격히 상승하였고, 회전차 뒤쪽 압력은 초기 76.21 bar에서 249초 후 89.31 bar까지 높게 상승하였다. 그리고, 상부안내깃은 251초에 0%까지 완전히 닫힌 반면, 하부안내깃은 239초에 9.46%까지 닫힌 후 그 상태를 계속 유지하였다. 상부안내깃이 완전히 닫힌 순간 즉, 256초에 전동기의 전원은 차단되었고, 펌프는 관성에 의해서만 회전하므로 펌프는 정지된 유체 속에서 서서히 감속하게 된다.

한편, 펌프를 통한 유량은 230초에 31.671 m³/s까지만 감소했다가 264초에 57.614 m³/s까지 오히려 증가하는데, 이는 사실이 아니다. 이러한 현상은 입구밸브가 상·하부 안내깃들과 동시에 닫히기 시작했기 때문이다. 즉, 입구밸브와 안내깃이 함께 닫히면서 유량계의 차압이 왜곡되었고, 입구밸브가 완전히 닫힌 275초에 펌프를 통한 유량이 갑자기 0 m³/s로 떨어졌다. 입구밸브가 완전히 닫힌 후 스파이럴 케이싱 내 압력은 290초부터 급격히 감소하여 흡출관 내 압력과 비슷한 값과 형태로 변하고 있다. 펌프 입구 측에 설치된 조압수조에 의해 양수발전소와 하부저수지 사이의 방수로에서 발생하는 수격작

용은 약 2분 주기로 천천히 서징하면서 효과적으로 완화되고 있음을 알 수 있다. Table 3은 펌프·전동기의 정상적인 정지에 따른 과도 특성을 요약하여 나타내었다.

3.4 수차 정상 기동에 따른 수격현상

수차의 총낙차가 808.7 m일 때 250 MW급 수차가 정상적으로 기동되는 경우 발생하는 수력학적 과도현상을 Fig. 10에 나타내었다. 여기서, (a)는 수압철관과 흡출관 내 압력을, (b)는 상·하부 안내깃과 입구밸브 개도를, (c)는 수차 회전수와 유량을, (d)는 스파이럴 케이싱과 러너 뒤(runner back) 압력 그리고 발전기출력을 각각 나타내었다. 수차·발전기가 기동되기 전 입구밸브는 71초부터 열리기 시작하고, 이에 따라 스파이럴 케이싱 내 압력은 급격히 상승한다. 입구밸브가 개방된 후 상·하부 안내깃들은 110초부터 동시에 열리기 시작하고, 이 순간 수차를 통한 유동이 형성되므로 수차의 회전수는 급격히 상승한다. 수압철관에서 유동이 형성됨에 따라 수압철관 내 압력은 초기 87.34 bar에서 114초 후 85.46 bar까지 떨어졌다가 118초 후 87.87 bar까지 상승하는 것으로 측정되었다. 상·하부 안내깃들이 동시에 열림에 따라 수차는 150초에 정격 회전수인 600 rpm에 다다르고, 187초 후 발전기에 부하가 걸리면서 설정된 출력을 내기 위해 상·하부 안내깃들이 동조되어 유량을 자동으로 조절하고 있음을 알 수 있다. 수차를 통한 유량은 535초에 36.7

Table 3 Transient characteristics according to normal stop of pump

Description	Units	Value		
		Start	Maximum	End
Penstock pressure	bar	87.48	88.33	88.14
Spiral case pressure	bar	85.68	86.82	6.73
Draft tube pressure	bar	6.23	8.51	6.83
Pump speed	rpm	603.0	604.9	0.0
Upper wicket gate opening	%	78.58	78.58	0.0
Lower wicket gate opening	%	78.47	78.47	9.36
Pump flow rate	m ³ /s	37.01	57.61	0.0
Inlet valve opening	%	99.84	99.84	0.56
Total active power	MW	254.5	255.6	0.0
Runner back pressure	bar	76.21	89.31	5.17

Remark : 1. Water level of upper & lower reservoir : 932.1 m, 118.0 m
 2. Start time : 06:25:00, End time : 06:35:00

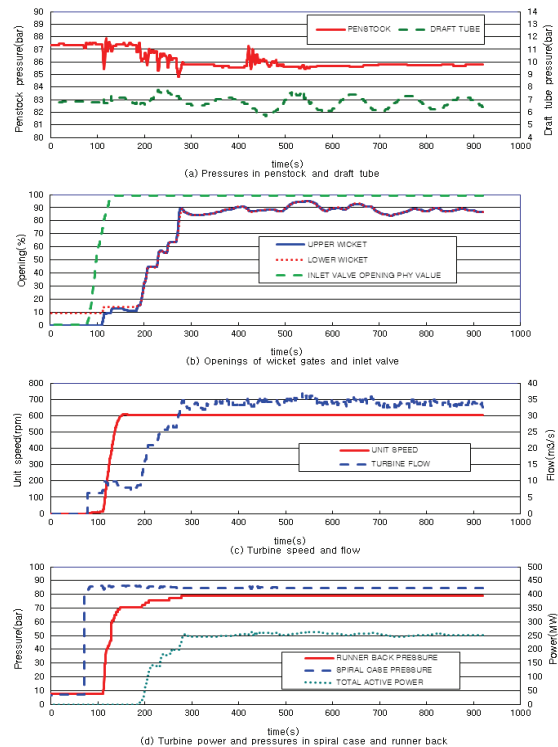


Fig. 10 Hydraulic transients according to normal start of turbine

m³/s까지 증가하다가 마지막으로 기록된 920초에 32.61 m³/s로 안정되는데 이때 수압철관 내 압력은 85.81 bar로 측정되었다.

한편, 안내깃이 개방됨에 따라 수차를 통하여 하부저수지로 유동이 형성되면서, 흡출관 내 압력은 상승과 하강을 반복하게 된다. 즉, 흡출관 내 압력은 초기 6.68 bar로부터 230초에 7.75 bar까지 상승했다가 460초 후 5.7 bar까지 하강하며, 마지막 기록시간인 920초에 6.41 bar로 측정되었다. 수차 하류 측에는 직경 6.4 m의 조압수조가 설치되었기 때문에 수차·발전기가 정상적으로 기동되는 경우 양수발전소와 하부 저수지 사이의 방수로에서 발생하는 수격작용은 약 2분 주기로 오랫동안 서정하면서 효과적으로 완화되고 있음을 알 수 있다. Table 4는 수차·발전기의 정상적인 기동에 따른 과도 특성을 요약하여 나타내었다.

3.5 수차 정상정지에 따른 수격현상

수차의 총낙차가 800.3 m일 때 250 MW급 수차·발전기가 부분 부하에서 운전되다가 정상적으로 정지되는 경우 발생하는 수력학적 과도현상을 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, (a)는 수압철관과 흡출관 내 압력을, (b)는 상·하부 안내깃과 입구밸브 개도를, (c)는 수차 회전수와 유량을, (d)는 스파이럴 케이싱과 러너 뒤 압력, 그리고 발전기 출력을 각각 나타내었다. 수차·발전기를 142.5 MW의 부분 부하 상태로 운전하기 위하여 상·하부 안내깃들은 45.9%로 개방하여 운영하였다. 이때 수차를 통한 유량은 20.68 m³/s, 수차 회전수는 603.3 rpm, 수압철관과 흡출관 내 압력은 86.29 bar, 6.99 bar로 각각 측정되었다. 수차·발전기를 정상적으로 정지시키기 위하여 먼저 상·하부 안내깃들을 86초에 닫기 시

작하였다. 상·하부 안내깃들이 동조되어 닫힘에 따라 수차를 통한 유량은 감소한다. 이에 따라 수압철관 내 압력은 88초에 87.72 bar까지 상승하고, 흡출관 내 압력은 120초에 6.22 bar까지 떨어진다. 상부안내깃이 약 11.7% 까지 닫힌 순간 즉, 113초에 수차를 통한 유량은 7.453 m³/s로 상당히 줄어들기 때문에 이때 발전기의 부하가 차단된 것으로 측정되었다. 그리고, 상부안내깃은 132초에 0%까지 완전히 닫히

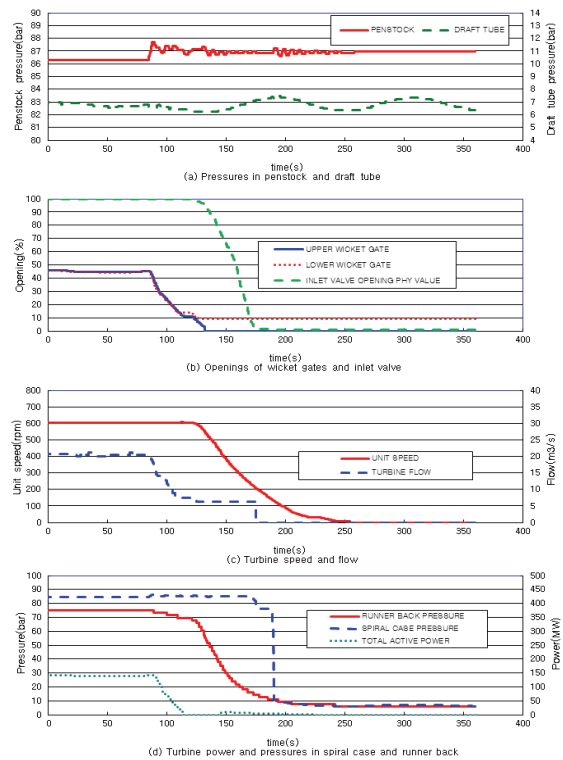


Fig. 11 Hydraulic transients according to normal stop of turbine

Table 4 Transient characteristics according to normal start of hydraulic turbine

Description	Units	Value		
		Start	Maximum	End
Penstock pressure	bar	87.34	87.87	85.81
Spiral case pressure	bar	6.68	86.55	84.63
Draft tube pressure	bar	6.68	7.75	6.41
Turbine speed	rpm	0.0	607.4	602.8
Upper wicket gate opening	%	0.0	94.88	86.68
Lower wicket gate opening	%	9.37	95.05	86.85
Turbine flow rate	m ³ /s	0.0	36.70	32.62
Inlet valve opening	%	0.26	99.25	99.25
Total active power	MW	0.0	264.0	251.4
Runner back pressure	bar	7.34	78.80	78.80

Remark : 1. Water level of upper & lower reservoir : 929.2 m, 120.5 m
2. Start time : 14:56:40, End time : 15:12:00

Table 5 Transient characteristics according to normal stop of hydraulic turbine

Description	Units	Value		
		Start	Maximum	End
Penstock pressure	bar	86.29	87.72	86.95
Spiral case pressure	bar	84.52	86.06	6.15
Draft tube pressure	bar	6.99	7.48	6.36
Turbine speed	rpm	603.3	606.0	0.0
Upper wicket gate opening	%	45.90	45.90	0.0
Lower wicket gate opening	%	45.93	45.93	9.42
Turbine flow rate	m ³ /s	20.68	21.14	0.0
Inlet valve opening	%	99.83	99.83	0.63
Total active power	MW	142.5	142.5	0.0
Runner back pressure	bar	74.90	74.90	5.86

Remark : 1. Water level of upper & lower reservoir : 921.2 m, 120.9 m
2. Start time : 23:49:00, End time : 23:55:00

고, 하부안내깃은 132초에 9.42%까지 닫힌 후 그 상태를 계속 유지하는 것으로 나타났다. 발전기의 부하가 차단된 후 수차의 회전수는 점차로 감소하게 되는데, 상부안내깃이 완전히 닫히면서 수차는 관성에 의해서만 회전하면서 서서히 정지하게 된다. 수차를 통한 유동을 확실히 차단시키기 위하여 입구밸브는 125초부터 닫히기 시작하는데, 스파이럴 케이싱 내 압력이 급격히 떨어지는 175초에 입구밸브가 거의 닫힌 것으로 측정되었다.

한편, 상부안내깃이 완전히 닫힌 순간 양수발전소와 하부저수지 사이의 방수로에서 발생하는 수격압은 상승과 하강을 반복하게 된다. 즉, 흡출관 내 수격압은 193초에 7.48 bar까지 상승하고 약 2분 주기로 서징하는데, 수차 하류 측 조압수조는 방수로에서 발생하는 수격작용을 효과적으로 완화시키고 있음을 알 수 있다. Table 5는 수차·발전기의 정상적인 정지에 따른 과도 특성을 요약하여 나타내었다.

3.6 수차 부하 차단에 따른 수격현상

현장시험은 전기안전검사의 일환으로 수행된 부하 차단시험 시 양수발전소의 안전을 위하여 발전기의 출력을 185 MW로 줄인 상태에서 현장시험을 실시하였다. 수차의 총낙차가 806.4 m일 때 250 MW급 수차·발전기를 75% 부분 부하 상태에서 긴급 정지시킨 경우 발생하는 수력학적 과도현상을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서, (a)는 수압철관과 흡출관 내

압력을, (b)는 상·하부 안내깃과 입구밸브 개도를, (c)는 수차 회전수와 유량을, (d)는 스파이럴 케이싱과 러너 뒤 압력 그리고 발전기 출력을 각각 나타내었다.

발전기의 출력을 줄이기 위하여 상·하부 안내깃들을 초기 88%의 개도에서 56.6%까지 닫는 선행 작업을 수행하였다. 이때 수차를 통한 유량은 24.8 m³/s, 수차 회전수는 602.8 rpm, 수압철관과 흡출관 내 압력은 86.34 bar, 6.51 bar로 각각 측정되었다. 도수터널 및 수압철관에서 유동이 안정될 수 있도록 8분 이상 기다린 다음 125초에 인위적으로 발전기의 부하를 갑자기 차단시켰다. 발전기의 부하가 긴급 차단됨에 따라 수차의 회전수는 129초에 무구속 상태로 705.7 rpm까지 급격히 상승하나, 상·하부 안내깃들이 유압장치에 의해 재빨리 닫히기 때문에 수차의 회전수와 유량은 급격히 감소하게 된다.

2단계로 제어되는 상부안내깃은 171초에 0%까지 완전히 닫히고, 하부안내깃은 164초에 9.41%까지 닫힌 후 그 상태를 계속 유지하는 것으로 나타났다. 상부안내깃이 완전히 닫힌 후 수차는 정지된 유체 속에서 관성에 의해서만 회전하므로 서서히 감속하게 된다. 또한 상·하부 안내깃들이 닫힌 후 스파이럴 케이싱 내 압력은 178초부터 급격히 떨어지는데, 이는 입구밸브가 상부안내깃과 거의 동시에 닫혔기 때문으로 판단된다.

한편, 상·하부 안내깃들이 급속히 닫힘에 따라 수압철관에서는 업서지가 흡출관에서는 다운서지가 발생하여 상류와 하류로 각각 전파된다. 이에 따라 수압철관 내 압력은 128초에 91.74 bar까지 상승하고, 흡출관 내 압력은 130초에 4.13 bar까지 급격히 떨어진다. 상부 안내깃이 완전히 닫힌 후 양수발전소와 하부저수지 사이의 방수로에서 수격압은 상승과 하강을 반복하게 되는데, 흡출관 내 압력은 205초에 7.6 bar

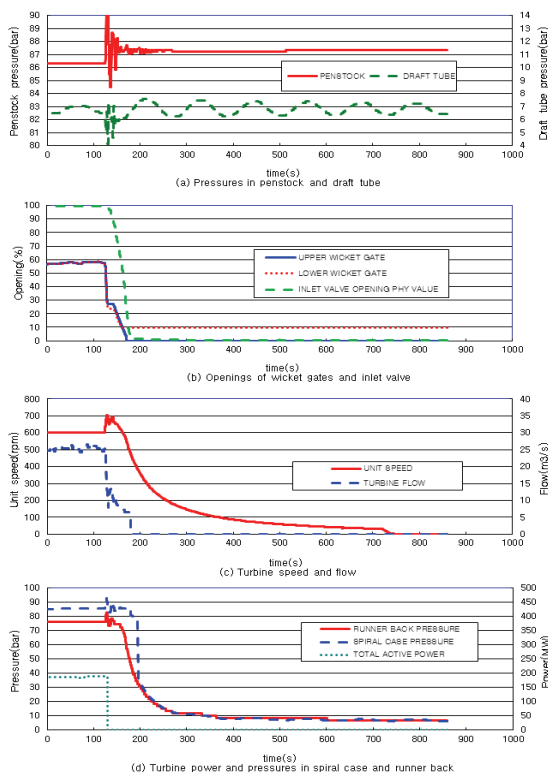


Fig. 12 Hydraulic transients according to load rejection of turbine

Table 6 Transient characteristics according to normal stop of hydraulic turbine

Description	Units	Value		
		Start	Maximum	End
Penstock pressure	bar	86.34	91.74	87.32
Spiral case pressure	bar	85.09	92.35	6.37
Draft tube pressure	bar	6.51	7.60	6.43
Turbine speed	rpm	602.8	705.7	0.0
Upper wicket gate opening	%	56.60	58.17	0.0
Lower wicket gate opening	%	56.73	58.39	9.41
Turbine flow rate	m ³ /s	24.80	26.58	0.0
Inlet valve opening	%	99.53	99.66	0.40
Total active power	MW	184.9	189.5	0.0
Runner back pressure	bar	76.08	82.68	6.86

Remark : 1. Water level of upper & lower reservoir : 927.3 m, 120.9 m
 2. Start time : 17:02:00, End time : 17:24:00

까지 상승하면서 약 2분 주기로 서징하고 있음을 알 수 있다. Table 6은 수차·발전기의 부하 차단에 따른 과도 특성을 요약하여 나타내었다.

4. 결론

양수발전소에서 발생하는 수력학적 과도현상을 현장에서 시험하기 위하여 평상시 펌프수차를 정상적으로 기동·정지시킬 때 발생하는 수격현상에 관련된 자료들을 현장에서 취득하고, 펌프수차의 기동·정지 및 수차의 부하 차단시험을 현장에서 진행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양수발전소에서 평상시 펌프수차를 정상적으로 기동·정지시킬 때 발생하는 수격현상은 별다른 문제가 없는 것으로 현장시험 결과를 통해 확인되었다.
- 2) 현장에 설치된 유량계는 오차가 큰 것으로 나타났으며, 펌프 모드에서 유량계의 오차가 더 큰 것으로 판단된다. 인덱스법에 사용되는 k 와 n 은 사용년수에 따라 달라질 수 있으므로 교정이 필요하고, 아울러, 수압관의 압력계도 수치계산으로 예측된 수격압을 측정할 수 있는 범위로 교체하는 것이 바람직하다.
- 3) 수차 부하 차단시험 시 상·하부 안내깃들이 급속히 닫힘에 따라 수압철관에서는 업서지가 흡출관에서는 다운서지가 발생하여 상류와 하류로 각각 전파된다. 이에 따라 수압철관 내 압력은 128초에 91.74 bar까지 상승하고, 흡출관 내 압력은 130초에 4.13 bar까지 급격히 떨어진다. 상부안내깃이 완전히 닫힌 후 양수발전소와 하부저수지 사이의 방수로에서 수격압은 상승과 하강을 반복하게 되는데, 흡출관 내 압력은 205초에 7.6 bar까지 상승하면서 약 2분 주기로 서징하고 있음을 알 수 있다.

References

- (1) IHI, International Hydropower Association, 2017, 2017 Key Trends in Hydropower.
- (2) SMEC, Asian Development Bank, 2017, "Yonki Toe-of-Dam Surge Tank / Hydraulic Transient Analysis" Norconsult New Zealand.
- (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) Watters, G. Z., 1984, Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, Second edition, Butterworth Publishers, MA,
- (5) Chaudhry, M. H., 2014. Applied Hydraulic Transients, 3rd edition, Springer.
- (6) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (7) 한국중부발전, 2007, 양양양수발전소 1~4호기 건설지(제 I 권, 제 II 권).
- (8) 한국수력원자력 양양양수발전소, "제1회 다단수차 정비기술 워크숍," 발표자료, 2016년 3월.
- (9) 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.
- (10) Doosan Heavy Industries & Construction, 2006, "ALSTOM Power Hydro, Yangyang Unit 1~4 P/T Commissioning Report(Unit #1~4 Turbine Field Tests Report)."
- (11) 최용진, "고낙차 양수발전 2단 가역 프란시스 펌프/수차 효율에 관한 연구," 연세대학교 공학대학원 석사학위논문, 2002
- (12) Kim, K. Y., Oh S. H., 2001, "Waterhammer for the Intake Pumping Station with the Pump Control Valve." The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 4, No. 4, pp. 16-21.