

도수관로에 설치된 소수력 발전소의 수격현상

김경엽*†

Waterhammer for the Mini Hydropower Plant Installed at the Water Conveyance Pipeline

Kyung-Yup Kim*†

Key Words : Waterhammer(수격현상), Mini Hydro Power Plant(소수력발전소), Conveyance Pipeline(도수관로), Kaplan Turbine(카플란수차), Guide Vane(안내깃), Butterfly Valve(버터플라이밸브), Emergency Stop(긴급정지)

ABSTRACT

The small and mini hydroelectric power plants have been developed to recover the energy which remains in the pipeline of the waterworks. For Boryeong dam water supply project, the raw water of 3.3 m³/s is planned to convey from the dam to a 556 kW hydropower plant through ø1,650 pipeline of 1.77 km, and the outflow from a tubular turbine is discharged through the conduit to the water treatment plant. The rated head of turbine is 20.59 m and the normal speed of rotation is 908 rpm. The tubular turbine has a built-in spiral bevel gear unit, 10 adjustable guide vanes and 5 adjustable runner blades. The generator is installed beside of the turbine. The spiral bevel gear and the shaft of Kaplan turbine were damaged by waterhammer. Various hydraulic turbine operations, such as start-up, shut-down, emergency stop, load acceptance and rejection, produce transients in the mini hydropower plant. In present study, the waterhammer field tests carried out in the hydropower plant, in which the results were compared with that of the numerical calculations in order to provide the examination material securing the reliability and safety of the pipeline-hydropower system.

1. 서 론

최근 수도시설에서 관로에 잔류 수두로 남아 있는 에너지를 회수하기 위하여 도수관로에 소수력 발전소를 설치하는 사업이 활발히 추진되고 있다. 이러한 수도관로에서 정지하고 있는 수차를 기동시키거나 정상운전 중 사고로 인하여 갑자기 부하를 잃게 될 때 혹은 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 때 그 순간 도수관로 내의 유속이 급격히 변하면 압력도 크게 상승하거나 강하하게 되어 심한 수격작용을 일으키게 된다. 관로 내의 갑작스런 유속 변화로 압력파가 소수력 발전소와 저수지 사이를 왕복할 때 소수력 발전소 구내 배관의 압력이 비정상적으로 상승하여 수차나 밸브류, 배관 및 부대 시설 등이 파열되어 발전소 침수 사고가 발생하기도 한다. Fig. 1은 650 MW급 수차 10대가 설치된 러시아 Sayano-

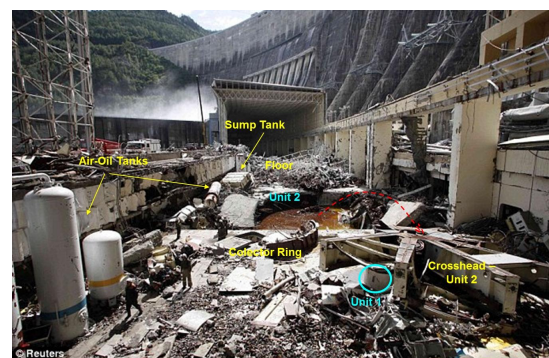


Fig. 1 Catastrophe of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant in Russia (2009.8.17)

Shushenskaya 수력발전소에서 2009년 70여명의 사망 사고가 발생한 사건 현장을 보여주고 있다.⁽¹⁾

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

† 교신저자, E-mail : kykim@kpu.ac.kr

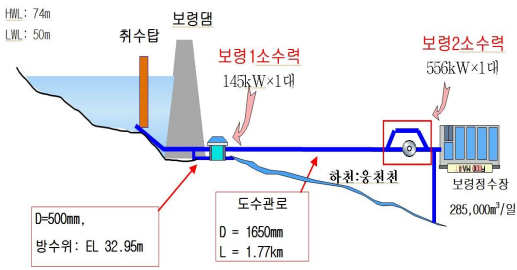


Fig. 2 Schematic diagram of the mini hydropower plants

한편, 보령댐 계통 광역상수도 사업은 충청남도 서부 및 서북부 지역에 생활·공업·농업 용수를 공급하기 위하여 1998.10 준공되었다. 그리고, 보령 제2소수력 발전소는 댐에서 정수장 착수정으로 유입되는 계획설계유량이 285,200 m³/d인 원수(raw water)의 에너지를 회수하여 발전하도록 1999.3 준공되었다. 그러나, 수차 설비의 잦은 고장으로 발전을 중단하는 사고가 빈번히 발생하여 가동률이 100%에 이르지 못하고, 연간 전력 생산량도 시설용량의 30~55% 정도에 머무르고 있는 실정으로 조사되었다.⁽²⁾ 특히, 발전소 운전 중 정전 등에 의한 전기적 사고 및 수차발전기의 고장으로 인한 긴급 정지 시 발생하는 수격현상은 수압 상승 및 하강이 주기적으로 반복되면서 관로와 수차에 무리한 충격을 가함으로써 수도시설과 발전소의 안전을 크게 위협하는 요소로 등장하게 되었다.⁽³⁾ 본 논문은 도수관로에 설치된 소수력 발전소에서 수격현상에 관한 현장 시험을 수행하고, 수치해석결과와 비교·분석함으로써 수도사업장의 관로와 소수력 설비의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위하여 수행하였다.⁽⁴⁾

2. 소수력 발전소 현황

2.1 시설 현황

소수력 발전소의 개략적인 시설 현황을 Fig. 2에, 2 소수력에 설치된 튜블러(tubular)형 카플란(Kaplan) 수차의 제원을 Table 1에 각각 나타내었다. 수차는 댐 수위와 착수정 수위 및 손실 수두를 고려한 유효낙차

에 따라 수차발전기 컨트롤 센터의 프로그램에 의해 안내깃(guide vane)과 러너 블레이드(runner blade)의 각도를 조절하여 최대 효율점에서 운전하도록 계획되었다. 발전기는 정격출력이 556 kW이나 표준정격 600 kW를 설치하였으며, 안전성과 경제성이 뛰어난 유도형 발전기를 채택하였다. 또, 제2소수력은 기본적으로 무인 발전소 개념을 도입하여 정수장 중앙제어실에서 감시 제어토록 하였다.^(5,6)

2.2 사고 사례

Fig. 3에 나타난 바와 같이 제2소수력 발전소의 카플란 수

Table 1 Specifications of a turbine in 2nd hydropower

Items	Data
Rated turbine output	556 kW
Rated head	20.59 m
Flow at rated head and output	3.3 m ³ /s
Rated speed of turbine	908 rpm
Runner diameter	820 mm

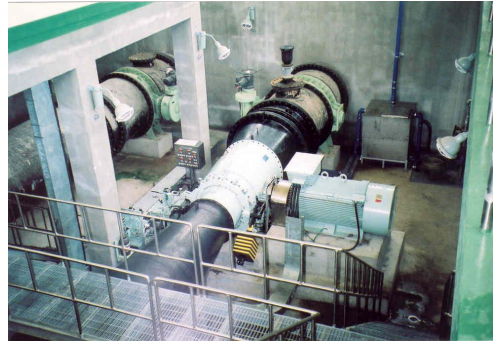


Fig. 3 Picture of 2nd hydropower plant at waterworks

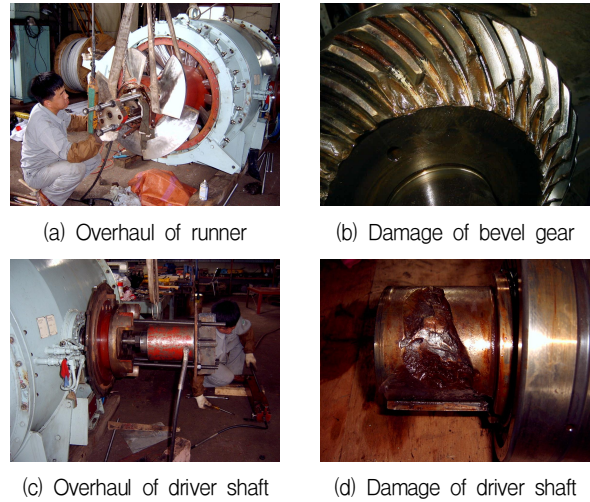


Fig. 4 Damages of hydro-turbine caused by waterhammer

차와 발전기는 수직으로 연결되어 있어 증속기용 베벨 기어(1.263 : 1)를 사용하고 있고, 안내 깃과 러너 깃의 각도 조절 장치 등 기계설비가 복잡하게 구성되어 있다. 이에 따라 수차발전기의 정상적인 운영 중에도 고장이 발생할 위험성이 매우 높는데, 실제로 제2소수력 발전소는 1999.3 상업 발전을 개시한 이후 매년 한차례 이상씩 잦은 고장을 일으킨 것으로 조사되었다. 특히, 발전기 가동 중 정전 등에 의한 전기적 사고 및 수차발전기의 고장으로 인한 긴급 정지 시 발생하는 수격작용은 수압 상승 및 하강이 주기적으로 반복되면서 관로와 수차에 무리한 충격을 가함으로써 수도시설과 발전소의 안전을 크게 위협하는 요소로 등장하게 되었다. Fig. 4는 2003.7.11~9.8 수행된 보수공사 관련 사진을 나타내었다.⁽⁷⁾

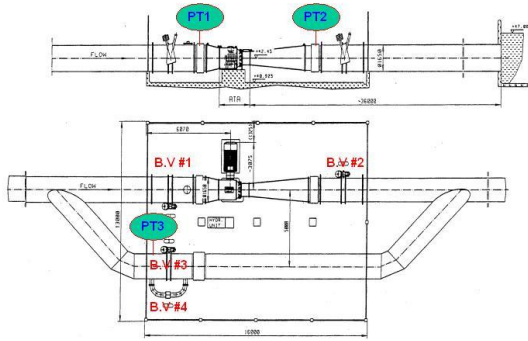


Fig. 5 Layout of the mechanical and experimental equipments in the mini hydropower plant

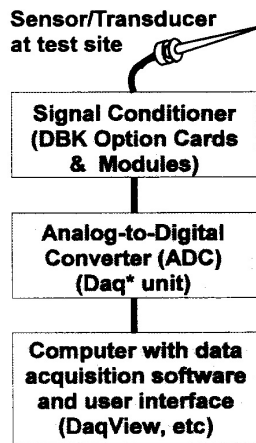


Fig. 6 Block diagram of the data acquisition system

3. 현장시험 및 수치해석 방법

3.1 시험 장치

수차발전기의 정지 시 수차에 유입되는 물의 흐름을 차단하기 위하여 수차 전·후단에 1,650 mm 버터플라이 밸브(butterfly valve)가 설치되었고, 1,650 mm 바이패스 관로(by-pass pipe)는 수차를 장기간 정지시켜야 하는 경우 정수장 착수정 쪽으로 용수를 계속 공급할 수 있도록 계획 설치되었다. 수격현상에 관한 현장 시험을 수행하기 위하여 구성된 측정 장비의 개략적인 배치도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 아날로그-디지털 변환장치(DaqBook/100)의 블록선도를 나타내었다. 압력 전송기(PT; pressure transmitter), 밸브개도 지시계, 발전기 회전속도계 등에서 측정된 전기적인 신호 값은 검사기(DBK11A)를 거쳐 아날로그-디지털 변환장치로 전송되고, 수집된 데이터는 노트북 PC에 설치된 DaqView 프로그램을 사용하여 현장에서 실시간으로 확인·분석된 후 저장된다. 그러므로 본 논문에서 수차 회전속도는 발전기 회전속도를 의미한다. 한편, 현장시험에 사용된 측정 기기는 본 시스템의 수격현상에 대한 수치해석 결과를 토대로 그 측정 범위가 정해지고, 시간에 따른 반응 속도가 빠른

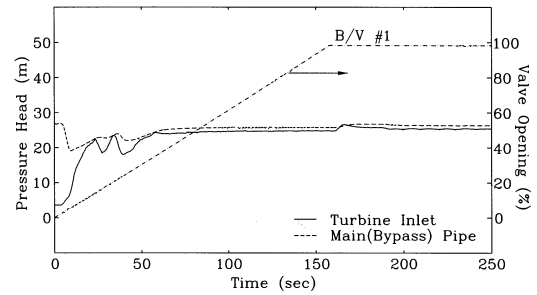


Fig. 7 Measured pressure heads(PT1, PT3) and butterfly valve opening for start-up of turbine

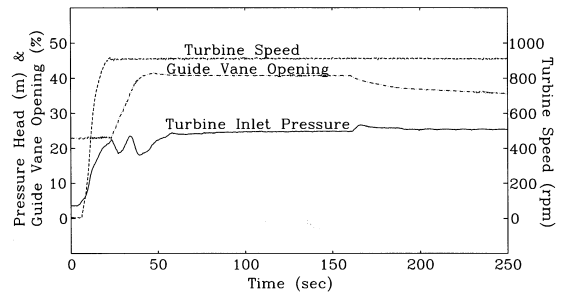


Fig. 8 Measured pressure head(PT1), turbine speed and guide vane opening for start-up of turbine

기기들로 선정되었다. 보령 댐의 수위는 정격 수위 69 m 보다 약간 높은 69.7 m를 유지하였다. 또, 제2소수력 발전소의 취약성을 감안하여 발전기의 출력은 정격 출력 556 kW의 절반 이하인 200 kW 정도에서 수격현상에 관한 현장시험을 수행하였다.⁽⁸⁾

3.2 수치해석 방법

관내의 비정상 유동을 1차원으로 가정할 때 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이며, 편미분으로 표시되는 지배방정식은 특성곡선법을 사용하여 유한차분방정식으로 변환시킬 수 있다.⁽⁹⁾ 경계조건으로는 밸브, 저수지 등이 관로 중에 연결되어 있는 경우에 대하여 관계식들을 구성하고, 초기조건으로서 수차-관로계의 정상상태 변수 값을 구한 후 수치해석의 안정성이 만족되도록 시간증분 Δt 와 관 분할간격 Δx 를 정하여 수치계산하였다.⁽¹⁰⁾

4. 결과 및 검토

4.1 수차발전기의 기동에 따른 수격현상

출력을 200 kW로 설정하고 발전기를 정상적으로 기동시켰다. Fig. 7과 Fig. 8은 데이터 수집장치를 사용하여 현장 시험에서 측정된 수차 입·출구 측 압력, 수차 회전속도, 안

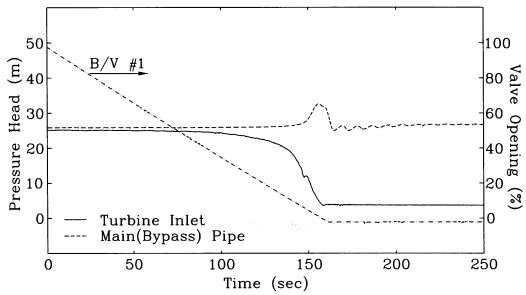


Fig. 9 Measured pressure heads (PT1, PT3) and butterfly valve opening for shut-down of turbine

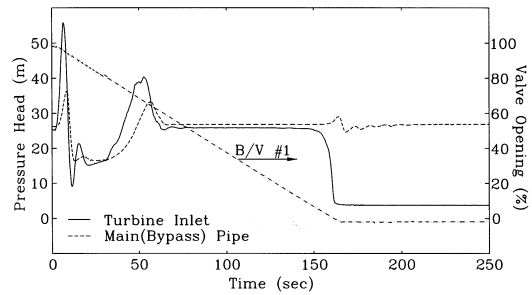


Fig. 11 Measured pressure heads (PT1, PT3) and butterfly valve opening for emergency stop of turbine

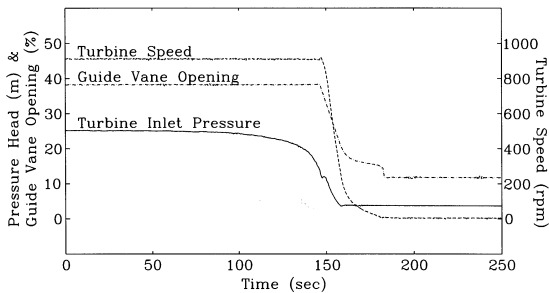


Fig. 10 Measured pressure head (PT1), turbine speed and guide vane opening for shut-down of turbine

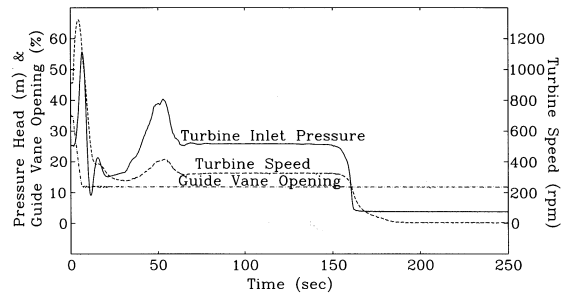


Fig. 12 Measured pressure head (PT1), turbine speed and guide vane opening for emergency stop of turbine

내 깃 개도, 버터플라이밸브(B,V#1) 개도 등을 나타내었다. 수차 입구 측에 설치된 1,650 mm 버터플라이밸브(B,V#1)가 열리면서 수차를 통한 유동이 형성되고, 수차는 곧바로 가속되면서 안내 깃의 개도가 조절되기 시작한다. 수차의 회전속도가 일정한 값에 도달하면 차단기가 투입되어 발전기가 가동되고, 수차에 부하가 걸리면서 안내 깃의 개도와 러너 깃의 각도가 유효낙차에 따라 자동으로 조절된다. 수차 입구 측 버터플라이밸브(B,V#1)는 약 160초 동안 서서히 개방되는데, 수차 입구 측 압력수두(PT1)는 밸브가 완전히 개방된 후 초기 3.6 m에서 25.4 m로 상승하였음을 알 수 있다. 수차의 총낙차와 유효낙차는 각각 23.2 m와 21.8 m이며, 발전기의 출력이 200 kW로 설정되었을 때 수차를 통한 유량은 1.278 m³/s로 측정되었다. 초기에 관로 내 압력수두(PT3)는 26.8 m로 유지되다 버터플라이밸브(B,V#1)가 개방되면서 압력수두가 19.1 m까지 떨어졌다 26.3 m 정도에서 안정되는 것으로 측정되었다. 또, 수차의 회전속도는 910 rpm, 안내 깃의 개도는 34.9%로 점차 고정되어 가는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 수차발전기의 운전 개시에 따른 수격작용은 부관의 버터플라이밸브(B,V#4)가 작동하지 않았음에도 불구하고 별다른 문제를 일으키지 않는 것으로 분석되었다.

4.2 수차발전기의 운전 정지에 따른 수격현상

발전기 출력을 250 kW로 설정한 후 수차발전기의 정지에

따른 수격작용에 관한 현장시험을 실시하였다. 수차의 총낙차는 23.2 m이고, 유효낙차는 21.5 m이다. Fig. 9와 Fig. 10은 현장시험에서 측정된 수차 입구 측 압력, 바이패스 관내 압력, 수차 회전속도, 안내 깃 개도, 버터플라이밸브(B,V#1) 개도 등을 나타내었다. 수차 입구 측 버터플라이밸브(B,V#1)는 약 160초 동안 서서히 폐쇄되는데, 버터플라이밸브의 특성상 밸브가 거의 닫혀갈 무렵 수차 입구 측 압력(PT1)은 재빨리 떨어지고, 안내 깃이 닫히면서 수차의 회전속도도 급격히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 관로 내 압력수두(PT3)는 초기의 25.8 m에서 버터플라이밸브가 완전히 닫힌 순간 32.6 m까지 약간 상승하였다가 26.8 m 정도에서 안정되는 것으로 측정되었다. 이와 같이 수차발전기의 운전 정지에 따른 수격작용은 바이패스 관로와 부관의 버터플라이밸브(B,V#3, B,V#4)가 작동하지 않았음에도 불구하고 별다른 문제를 일으키지 않는 것으로 분석되었다.

4.3 수차발전기의 긴급 정지에 따른 수격현상

현장시험 기간 동안 용수 공급의 중단 우려와 제2소수력 발전소의 안전성 등의 제약 조건으로 인하여 발전기의 출력은 정격 출력 556 kW의 절반 이하인 200 kW에서 긴급 정지에 따른 수격현상에 관한 현장시험을 수행하였다. 수차의 총낙차는 23.2 m이고, 유효낙차는 21.8 m로 측정되었다. Fig. 11과 Fig. 12는 현장시험에서 측정된 수차 입구 측 압력, 바

이패스 관 내 압력, 수차 회전속도, 안내 깃 개도, 버터플라이밸브(B.V#1) 개도 등을 나타내었다. 수차에 걸리던 부하가 갑자기 제거됨에 따라 수차는 빠르게 가속되고, 원심력 작용으로 이를 감지한 무구속속도밸브에 의해 안내 깃은 빠르게 닫히고 있음을 알 수 있다. 수차발전기가 긴급 정지되고 2.4 초 지난 후 안내 깃의 개도는 초기 34.9%에서 18.6%로 급격히 폐쇄되며, 이 때 수차의 회전속도는 초기 910 rpm에서 1,324 rpm까지 다다르게 된다. 이후 안내 깃의 개도는 약 11.8%로 고정되고, 수차를 통과하는 유량은 현격히 감소하므로 수차의 회전속도도 곧 감소된다. 수격현상의 두 번째 주기인 압력상승 과정에서 수차는 회전속도가 약간 증가하였다가 다시 감소하여 일정한 회전속도로 오랫동안 돌고 있음을 알 수 있다. 즉, 수차가 긴급 정지되었음에도 불구하고 러너 깃을 구동하는 유압 시스템은 계속 작동하여 약 1분 후 수차 입구 압력수두는 26 m, 수차 회전속도는 325 rpm으로 1분 30초 동안 일정한 값으로 제어되고 있다. 수차의 유입밸브(B.V#1)가 거의 닫히면 수차 입구 측 압력은 급격히 떨어지고, 수차 축의 제동장치가 작동하여 흐름이 정지된 케이싱 속에서 수차는 회전을 멈추게 된다.

한편, 댐과 발전소 사이의 도수관로에서는 수차발전기가 비상 정지된 후 안내 깃이 급속히 폐쇄됨에 따라 양 압력파(positive pressure wave)가 발생하고, 이 압력파는 관내 압력을 상승시키면서 댐 쪽으로 전파된다. 안내 깃은 4.2초 후 최소 개도인 11.8%까지 급격히 닫히게 되는데, 이에 따라 수차 입구 측 압력수두(PT1)는 초기 25.4 m에서 4.4초 후 최대 수격압인 55.79 m까지 상승하는 것으로 측정되었다. 또, 바이패스 내 압력수두(PT3)는 초기 26.3 m에서 6.4초 후 최대 36.4 m까지 상승하는 것으로 측정되었다. 이와 같이 수차발전기가 출력 200 kW인 상태에서 긴급 정지되었을 때 수격작용은 커다란 문제를 일으키지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 유효낙차가 일정한 상태에서 수차의 출력을 증가시켜야 하는 경우 유량은 출력에 정비례하여 커지기 때문에 도수관로에서 발생하는 수격작용이 더욱 심각해짐을 쉽게 예측할 수 있다.

정전 등으로 인하여 전원이 공급되지 않는 상태로 수차발전기가 긴급 정지되었을 때 안내 깃은 유압장치에 의해 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 급격히 닫히기 때문에 시간에 따른 안내 깃의 거동을 모사하기 위하여 수치계산결과를 현장시험결과와 여러 차례 비교 검토하였다. Fig. 13은 수치해석으로 모사된 안내 깃의 개도 변화를 나타내었는데, 안내 깃의 무차원 개도(dimensionless guide vane opening)는 유로면적(opening area)과 유량계수(discharge coefficient)의 합수로써 아래 식과 같이 표시된다.^(11,12)

$$\tau = \frac{C_d A_G}{(C_d A_G)_0} \quad (1)$$

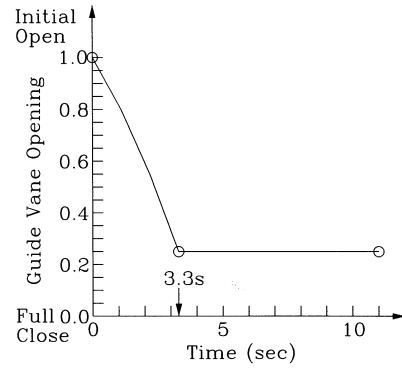


Fig. 13 Numerical prediction of guide vane opening for emergency stop of turbine

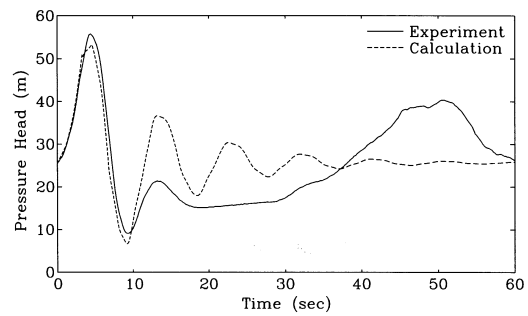


Fig. 14 Comparison of measured and predicted pressure heads (PT1) for emergency stop during partial load of 200 kW

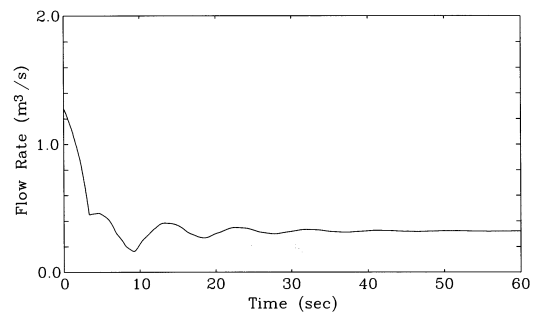


Fig. 15 Predicted flow rate through the hydro-turbine for emergency stop during partial load of 200 kW

여기서 C_d 는 유량계수, A_G 는 안내 깃의 유로면적이고, $(C_d A_G)_0$ 는 정상상태의 값이다.

수치해석결과 얻어진 수차 입구에서의 압력 변동(PT1)을 측정값과 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 수차를 통한 유동이 안내 깃에 의해 차단됨에 따라 압력이 상승하였다가 다시 떨어지는 첫 번째 주기의 수격작용을 수치계산은 합리적으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 두 번째 주기부터 수치해석결과와 현장시험 결과는 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 현장 시험 시 제2소수력 발전소의 안전을 위해 유입밸브(B.V#1)를 곧바로 닫았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 수차의 러너 깃을 제어하는 유압기구의 특성도 과도현상에 영

Table 2 Measured and predicted pressure heads (PT1) with leakage of guide vane for emergency stop

		Max. pressure head (m)	Occurrence time (sec)	Min. pressure head (m)	Occurrence time (sec)
Experiment		55.79	4.4	9.11	9.2
Cal.	With leakage	53.30	4.6	6.68	9.2
	Without leakage	67.98	4.6	-18.02*	9.2

향을 준 것으로 보인다. Fig. 15는 수치해석결과 예측된 수차를 통한 유량 변동을 나타내었다. 초기에 수차를 통과하는 유량은 1.278 m³/s인데, 안내 깃이 급격히 닫힘에 따라 유량도 빠르게 감소하고 있다. 안내 깃의 폐쇄 거동이 끝나더라도 유동은 완전히 차단되지 않고 약 0.32 m³/s의 유량이 수차를 통해 계속 흐르게 된다. 이처럼 안내 깃은 무구속 상태에서 수차가 과다한 속도로 오랫동안 회전하지 않도록 빠르게 닫히고, 이에 수반되는 수격작용을 경감시키기 위하여 약간의 누설유동(leakage flow)을 허용하는 형태의 거동을 보이고 있다.

Table 2는 수차발전기가 긴급 정지되었을 때 수치해석결과와 현장시험결과를 서로 비교하였는데, 안내 깃이 누설유동을 허용하지 않는 경우 예측된 결과도 함께 나타내었다. 안내 깃이 누설유동을 허용하지 않고 급격히 폐쇄되는 경우 수차 입구측에서 압력상승률은 약 268%(=67.98/25.4)에 다다른 것으로 분석되었다. 또, 수차 입구 측에는 관 내 압력이 물의 포화증기압 이하로 떨어져 증기공동(vapor cavity)이 형성되는 것으로 예측되었다.

4.4 정격 출력에서 긴급 정지된 경우 수격현상

수차발전기가 정격 유량 3.3 m³/s에서 운전되다 긴급 정지되었을 때 발생하는 수격현상은 수치해석으로 예측된 안내 깃의 개도 변화, 즉 Fig. 13을 토대로 수치계산을 수행하여 분석하였다. Fig. 16은 수치계산결과 얻어진 수차 입구에서의 압력 변동(PT1)을, Fig. 17은 수차를 통한 유량 변동을 각각 나타내었다. 수차 입구에서 압력수두는 초기 26.2 m에서 4.6초 후 약 90 m까지 급격히 상승하며, 수차를 통한 유량은 초기 3.3 m³/s에서 9.3초 후 약 0.287 m³/s까지 감소하다가 0.85 m³/s로 곧 안정되는 것으로 예측되었다.

5. 결 론

도수관로에 설치된 소수력 발전소에서 수격현상에 관한 현장시험을 수행하고, 수치계산결과와 비교·분석한 후 발전

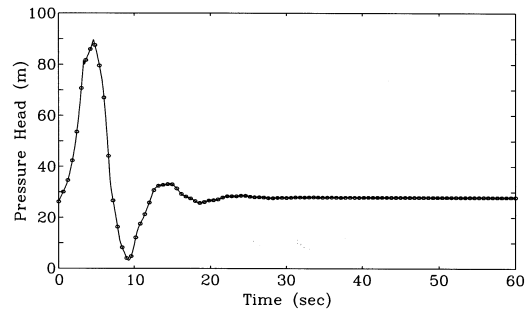


Fig. 16 Predicted pressure head(PT1) for emergency stop during full load of 556 kW

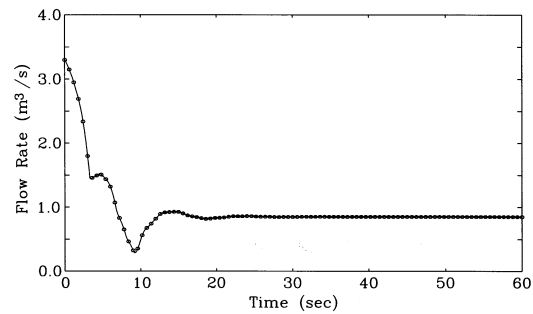


Fig. 17 Predicted flow rate through the hydro-turbine for emergency stop during full load of 556 kW

소의 현재 운영용량과 당초계획 시설용량에 대한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 발전기의 출력을 200 kW로 설정한 후 수차발전기를 기동시켰을 때 관 내 압력은 초기에 정압 수두인 26.8 m로 유지되다 유입밸브가 개방되면서 19.1 m까지 떨어졌다 26.3 m에서 안정되는 것으로 측정되었다. 수차발전기가 250 kW 출력으로 운전 중 정지되었을 때 관 내 압력수두는 초기 25.8 m에서 유입밸브가 완전히 닫힌 순간 32.6 m까지 약간 상승하였다가 댐의 수위에 의해 결정되는 정압 수두인 26.8 m로 안정되었다. 이와 같이 수차발전기의 기동 및 정지에 따른 수격작용은 별다른 문제를 일으키지 않는 것으로 분석되었다.
- 2) 정격 출력 556 kW의 절반 이하인 200 kW에서 긴급 정지에 따른 수격현상에 관한 현장시험을 수행하였다. 수차발전기가 긴급 정지되고 2.4초 지난 후 수차의 회전속도는 초기 910 rpm에서 1,324 rpm까지 다다르고, 안내 깃은 초기 34.9%에서 4.2초 후 최소 개도인 11.8%까지 급격히 닫히게 되는데, 이에 따라 수차 입구 측 압력수두는 초기 25.4 m에서 4.4초 후 최대 수격압인 55.8 m까지 상승하는 것으로 측정되었다. 또, 수차를 통과하는 유량은 초기 1.278 m³/s였는데 안내 깃이 급격히 닫힘에 따라 유량도 빠르게 감소하고, 안내 깃의 폐쇄 거동이 끝나더라도 유동은 완전히 차단

되지 않고 약 $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 누설 유량을 허용하는 것으로 수치해석결과 예측되었다.

- 3) 수차발전기가 정격 출력인 556 kW로 운영 중 긴급 정지되었을 때 도수관로에서 발생하는 수격현상에 대하여 수치해석을 통하여 예측하였다. 수차 입구에서 압력수두는 초기 26.2 m에서 4.6초 후 약 90 m까지 급격히 상승하며, 수차를 통한 유량은 초기 $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 9.3초 후 약 $0.287 \text{ m}^3/\text{s}$ 까지 감소하다가 $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 곧 안정되는 것으로 예측되었다.

후 기

본 논문은 한국수자원공사 연구과제로 수행한 결과 보고서⁽²⁾의 일부이며, 연구용역에 참여한 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- (1) Euler, C. and Rafael, C., 2009, "Accident at Russia's Biggest Hydroelectric Sayano-Shushenskaya on 17 August 2009," Microsoft PowerPoint, Brasil.
- (2) 한국수자원공사, 2005, "수도관로 소수력 개발에 따른 최적 시스템 적용 및 운영 방안," 연구용역 최종보고서.
- (3) Lee, H. M., 2006, "Trouble and Measure Owing to Water-hammer In Small Hydropower Turbine System Of Waterpipe," Master's Thesis of Chungnam National University.
- (4) Lee, H. M., Hong, J. J., Lee, E. W., and Kim, K. Y., 2006, "Trouble and Measure Owing to Water-hammer in Small Hydropower Turbine System of Waterpipe," Proceedings of the Fourth National Congress on Fluid Engineering, Kyungju, Korea, pp. 61~64.
- (5) 한국수자원공사, 2000, "보령댐계통 광역상수도사업(담편)," 공사지.
- (6) Harvey, A., 2002, "Micro-Hydro Design Manual : A Guide to Small-scale Water Power Schemes," ITDG Publishing, UK.
- (7) 수자원기술(주), 2003, "보령 제2소수력 수차발전기 보수 공사," 결과보고서.
- (8) Kim, K. Y. and Kim, J. B., 2004, "Waterhammer Caused by Startup and Stoppage of a Centrifugal Pump," Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 1, pp. 51~57.
- (9) Chaudhry, M. H., 2014, Applied Hydraulic Transients, 3rd edition, Springer.
- (10) Kim, S. G., Lee, K. B., and Kim, K. Y., 2015, "Waterhammer in the Pump-rising Pipeline System with an Air Chamber," Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Vol. 26, pp. 960~964.
- (11) Wylie, E. B. and Streeter, V. L., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (12) Ramos, H., and Almeida, A. B., 2002, "Parametric Analysis of Water-Hammer Effects in Small Hydro Schemes," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 7, pp. 689~696.