

수도관로 소수력발전설비에서의 수격작용으로 인한 고장대책

이형묵*,홍정조*,이은웅**,김경엽***,
한국수자원공사*,충남대학교**,한국산업기술대학교***

Trouble and Measure Owing to Water-hammer In Small Hydropower Turbine System Of Waterpipe

Lee, Hyoung-Mook*, Hong Jeong Jo*, Lee Eun-Woong**, Kim kyung-yup***
Korea Water Resource Corporation*, Chungnam Universtiy**, korea polytechnic Universtiy***

Abstract

Recently the development of small hydropower generation with using water pipes is revitalized by the water works facilities. However, when the turbine generator is in case of emergency stop by the internal and external accidents, it causes water hammer in water pipes and suspension of water supply. To prevent these problems of small hydropower generator, we has analyzed water supply patterns, installation position and water pipe systems.

1. 서 론

최근 수도사업장 수도관로상에 소수력 개발이 활성화됨에 따라 수차발전기의 운영시 내·외부적인 사고로 비상 정지시 수도관로에서 발생하는 수격작용으로 고장이 빈번히 발생되어 안정적인 용수 공급의 차질이 발생되고 소수력 발전기의 운영 및 관리에 문제가 발생할 수 있는 것을 방지하기 위하여 용수공급 패턴, 설치지점, 시스템 구성, 운영 방안 등을 종합적으로 분석하여 대책을 마련하고자 한다.

2. 수도관로 소수력발전소 현황

2.1 보령댐 용수공급계통과 소수력 현황

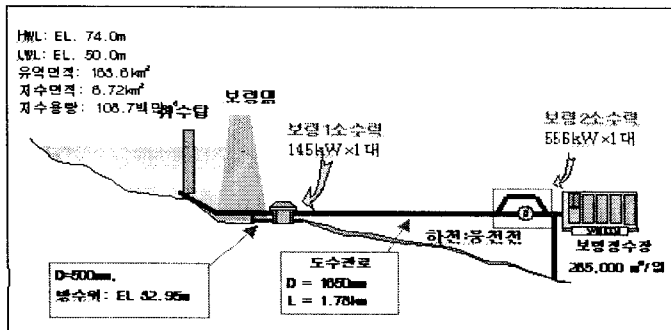


그림 1. 보령댐 관로 및 시설개략도

충남 보령시 웅천읍 평리에 소재된 보령댐 제원은 수위와 관로는 그림1과 같고 발전소 제원은 표1과 같다

2.2 보령댐 시설현황

* 한국수자원공사에너지사업팀, lhm2401@kowaco.or.kr

jjhong@kowaco.or.kr

** 충남대학교 공과대학원, ewlee@cnu.ac.kr

*** 한국산업기술대학교, kykim@kpu.ac.kr

보령댐은 유역 면적이 163.6 km²인 웅천천에 댐을 축조하여 용수원이 부족한 충청남도의 서부 및 서북부 권역에 용수를 공급할 목적으로 건설되었다.

표 1. 보령 제2소수력 발전소 현황

항 목	단 위	내 용
발전 방식	식량	수로식
설비 용량	kW	556×1
연간 발생 전력량	kWh	4,545,000
수차 및 발전기 형식		황축 튜블러형 유도발전기
수차 용수량	cms	3.3
수차 설치 표고	m	42.45
최대 유효낙차	m	26.28
정격 유효낙차	m	20.59
최소 유효낙차	m	8.00
산업 발전 개시일	년월일	1999. 03. 03
총공사비	백만원	1,029

그림1은 보령댐 관로 및 시설 개략도이다. 보령 제1소수력 발전소는 댐의 하천유지용수를 이용한 소수력으로 시설용량 145kW이며, 보령 제2소수력 발전소는 한정적인 물 자원을 최대한 활용하여 무공해 에너지 자원을 개발하기 위해 보령댐에서 보령정수장 착수점으로 유입되는 원수 유량인 285,200 m³/d(3.3 cms)을 이용하는 발전소이다.

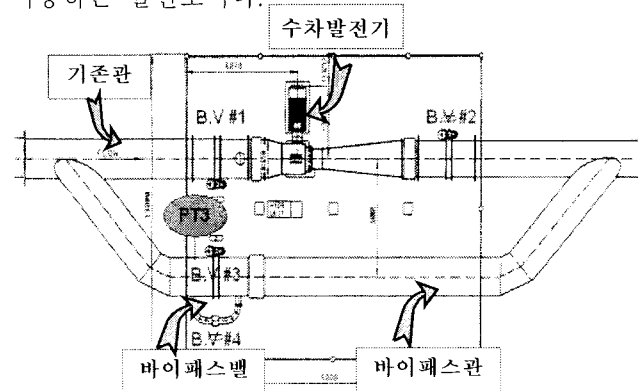


그림 2. 보령댐 제2소수력 구내배관도

2.3 보령댐 제2소수력 발전기 보수이력 현황

날 짜	고장 내용 보수 내용
'00.02.14 ~ '00.05.11	수차발전기 정지(이음), 수차발전기 플렉시블 커플링부 스파이더 파손, 베벨기어 파손
'00.10.04	분해점검후 부품 교체 (약 3개월 소요) 수차 축 온도 상승 및 스파이더 파손 분해점검후 부품 교체
'00.11.16 ~ '01.04.28	수차 축 thrust bearing toggle plate에 있는 screws 부러짐, 베어링 완전 파손, Ring sealing 마모, 분해점검후 부품 교체 (약 6개월 소요)
'01.09.13 ~ '02.04.11	러너 블레이드 유압실린더 핀란드 ATA사에 송부 분해점검후 부품 교체
'03.05.08 ~ '03.09.08	파니언 축 키 부분 및 베벨기어 파손 Bevel Gear, CouplingSpider 교체
'03.12.08 ~ '04.01.14	발전기 절연저항 저하 및 GPT 소손 발전기 재권선 및 GPT 교체
'04. 7.14 ~ '04. 7.26	Guide Bearing 과열 및 오일펌프 커플링 파손 제어장치 수리 및 오일펌프 커플링 교체

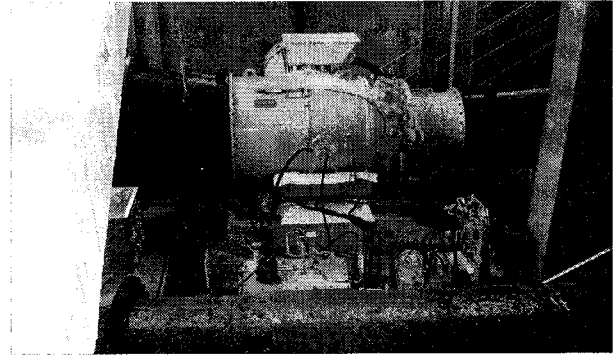


그림 5. 수차 입구측 시험장비 설치 전경

표 2. 현장시험 내용 및 측정 항목

순서	시험내용	측정항목	그림번호
1	정상정지	CH1: 수차 입구 압력 (PT1)	5
2	정상기동	CH2: 바이패스 내 압력 (PT3)	
3	비상정지	CH3: 수차 회전속도 CH4: 가이드 베인 개도 CH5: B.V#1 밸브 개도	

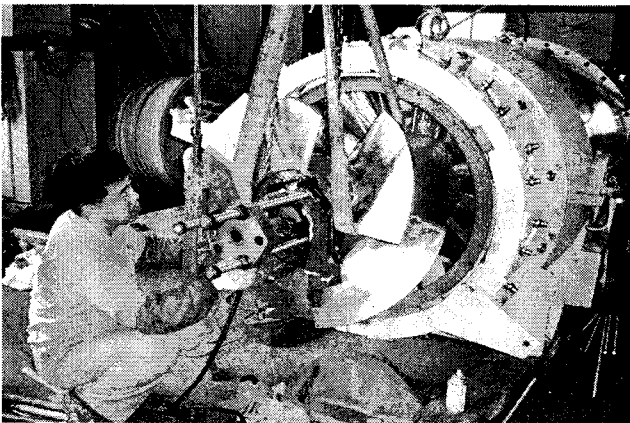


그림3 수차러너 인출작업

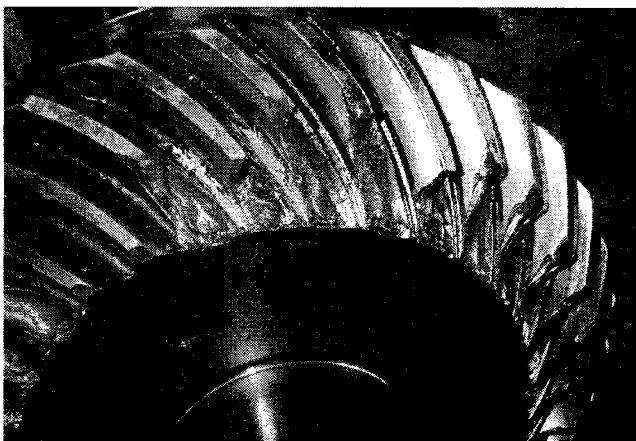


그림4 파손된 베벨기어 상태

의 수격현상 분석을 위한 현장 시험결과를 토대로 향후 제2소수력 발전소 운영 관리의 안전성을 확보하기 위한 자료를 얻고자 한다.

이에 2005.8.20 수격현상에 관한 현장시험을 수행하였다. 휴가철 성수기였던 지난8월 대천 및 무창포 해수욕장과 휴양지에서 생활 용수의 사용이 배로 급증하여 수돗물의 생산량이 평상시 7만m³/일에서 14만m³/일로 갑자기 늘어났다. 보령댐의 수위는 정격 수위(=69m) 보다 약간 높은 69.7m를 유지하였다. 또, 제2소수력 발전소의 취약성을 감안하여 발전기의 출력은 정격 출력(556kW)의 절반 이하인 200kW 정도에서 수격현상 시험을 하였다. 이렇듯 현장시험 기간 동안 용수 공급의 중단은 없어야 하며 제2소수력 발전소의 안전 운전 할 수 있어야 하는 제약 조건으로 인하여 데이터 취득에 어려움이 있었으나 비교적 다양한 실험을 하였다. 수격작용이 일어날 수 있다고 예상되는 운전상태에서 수행된 현장시험 내용 및 측정항목을 정리하여 분석하였다.

3.2 수격작용 현장시험 및 결과

수차발전기 운전중 계통선로의 임의 고장으로 인한 주차단기 비상 차단으로 수차발전기 비상정지시 수차에 걸리던 부하가 갑자기 제거됨에 따라 수차는 빠르게 가속되고, 원심력 작용으로 이를 감지한 무구속속도밸브에 의해 안내 깃은 빠르게 닫히었다. 전원이 복구된 후에는 바이패스용 밸브(B.V#3)와 부관용 밸브(B.V#4)를 열고, 수차 유입밸브(B.V#1)를 닫도록 한다.그림7은 수차발전기가 비상 정지되고 4.6초 지난 후 안내 깃의 개도는 초기 34.9%에서 18.6%로 급격히 폐쇄되며, 이 때 수차의 회전속도는 초기 910rpm에서 1,324rpm까지 가속 되었다. 이후 안내 깃의 개도는 약 11.8%로 고정되고, 수차를 통과하는 유량은 현격히 감소하므로 수차의 회전속도도 곧 감소되었다. 수차의 유입밸브(B.V#1)가 완전히 닫히면 흐름이 정

3. 보령 제2소수력 수차발전기 현장시험

3.1 수격작용 현장시험 항목 및 조건

한국수자원공사 보령권관리단 내 제2소수력 발전소

지된 케이싱(casing) 속에서 수차는 회전을 멈추게 된다. 참고로, 제조회사의 기술 자료를 참조하면 보령 제2소수력의 수차는 유효낙차가 26.18m이고 기어 박스와 발전기에서 마찰손실이 없을 때 2,452rpm의 무구속속도로 회전하며, 이 수차는 무구속속도에서 2분 동안 회전하여도 별다른 이상이 없는 사실을 보증하고 있다

보령댐과 발전소 사이의 도수관로에서는 수차발전기가 비상 정지된 후 안내 깃이 급속히 폐쇄됨에 따라 양 압력파(positive pressure wave)가 발생하고, 이 압력파는 관 내 압력을 상승시키면서 보령댐 쪽으로 전파된다. 안내 깃은 그림6과 같이 6.6초 후 최소 개도인 11.8%까지 급격히 닫히게 되는데, 이에 따라 수차 입구 측 압력(PT1)은 초기 2.54kgf/cm²에서 6.6초 후 최대 수격압인 5.58 kgf/cm²까지 상승하는 것으로 측정되었다. 또, 바이패스 내 압력(PT3)은 초기 2.63kgf/cm²에서 8.6초 후 최대 3.64kgf/cm²까지 상승하는 것으로 측정되었다. 이와 같이 수차발전기가 출력 200kW인 상태에서 비상 정지되었을 때는 수격작용이 크지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 수차의 출력을 증가시켜야 하는 경우 유량도 출력에 따라 비례하여 커지기 때문에 도수관로에서 발생하는 수격작용은 더욱 심각해질 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 부관에 설치된 500mm 버티플라이밸브(B.V.#4)는 신뢰성이 확보되는 다른 수격완화설비로 교체하거나, 유압 구동장치를 수리하여 제 기능을 발휘할 수 있도록 반드시 보완 조치가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

표 3. 비상 정지 전 주요 지점에서의 측정값

Channel Number	측정 항목	정상상태 측정값
CH1	수차입구압력(PT1) (kgf/cm ²)	2.54
CH2	바이패스 내 압력 (PT3)(kgf/cm ²)	2.63
CH3	수차 회전속도(rpm)	910
CH4	가이드 배인 개도(%)	34.9
중앙 제어실	발전기 출력(kW)	200
	수차 유량 (m ³ /s)	1.278

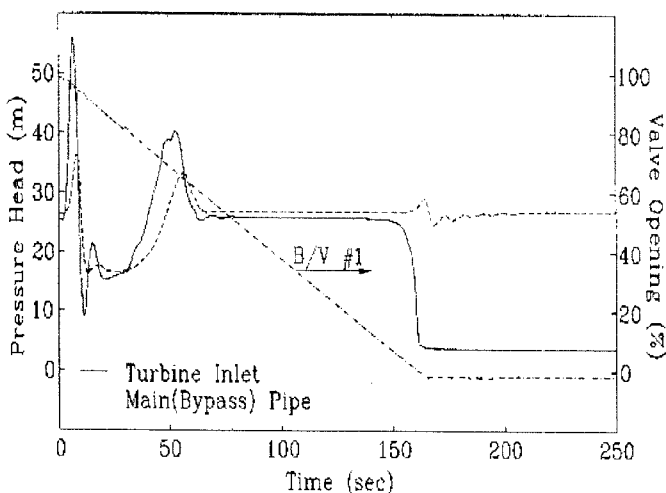


그림 6 비상정지에 따른 밸브#1 개도 및 압력변동

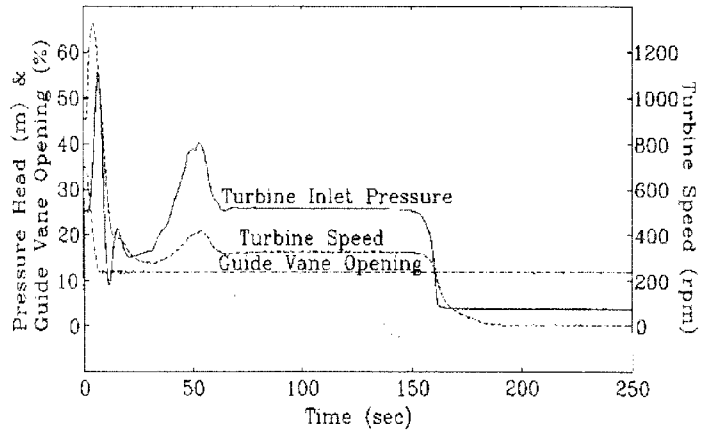


그림 7 비상정지에 따른 안내깃 개도 및 회전속도의 변동

현장시험 기간 동안 용수 공급의 중단 우려와 제2소수력 발전소의 안전성 등의 제약 조건으로 인하여 발전기 정격 출력(556kW)의 절반 이하인 200kW에서 비상 정지시 2.4초 지난 후 수차의 회전속도는 초기 910rpm에서 1,324rpm까지 이르고, 안내 깃은 초기 34.9%에서 4.2초 후 최소 개도인 11.8%까지 급격히 닫히게 되는데, 이에 따라 수차 입구 측 압력은 초기 2.54kgf/cm²에서 4.4초 후 최대 수격압인 5.58kgf/cm²까지 상승하는 것으로 측정되었다. 또, 수차를 통과하는 유량은 초기 1.278m³/s이었는데 안내 깃이 급격히 닫힘에 따라 유량도 빠르게 감소하고, 안내 깃의 폐쇄 거동이 끝나더라도 유동은 완전히 차단되지 않고 약 0.32m³/s의 누설 유량을 허용하는 것으로 수치해석결과 예측되었다. 이처럼 안내 깃은 무구속 상태에서 수차가 과도한 속도로 회전하지 않도록 빠르게 닫히고, 이에 수반되는 수격압을 경감시키기 위하여 약간의 누설 유동을 허용하는 것이 수격작용 관점에서 유리한 것으로 판단된다.

4. 결론

보령 제2소수력의 수차발전기를 한전라인의 정전에 의한 빈번한 단속운전과 고낙차에 의한 수충격으로 각종 구동부의 손상 등 파손을 최소화하고 설비의 안정성 및 신뢰성 확보를 위하여 수충격에서 보호하기 위해서는 수차발전기 동력전달 축을 직결형(단일축)수충격강화 형식의 수차발전기를 설치하여야 하며 또한 약간 느린 안내깃 폐쇄(Slower Guidevane closure)로 압력상승을 방지하는 효율적인 방법이 될 수 있다. 그러나 이는 수차발전기의 무구속속도 허용범위 내에서 운영되는 조건으로 수차발전기의 안정성을 고려하여 폐쇄시간을 설정한다. 마지막으로 유체가 설정압력 이상으로 압력이 증가시 자동으로 열리게 되어 수도관로 및 수차발전기의 안전을 고려하기 위해 서지완화밸브(Surge Relief valves)등을 수차발전기 전단에 설치하여 수격압에 의한 설비보호에 만전을 기해야 할 것이다

참고문헌

- [1] "그림으로 푸는 수충격해석", 한국수자원공사, 동명사, 2004
- [2] "소수력 수차발전기의 선정과 무인화 운영기술", 충남대학교 산업대 학원 석사학위논문, 2005.2

[3]김경엽, “수격현상 계산에 의한 펌프장 에어챔버의 설계도표 개선 및 응용,” 서울대학교 대학원 석사학위논문. 1986