

열역학법 효율시험을 활용한 50MW급 수력플랜트 현대화 평가

조태영* · 고성호*[†] · 조용** · 배강호**

Evaluation of Modernized 50MW Hydropower Plant Using Thermodynamic Method

Tai-Young Cho*, Sungho Ko*[†], Yong Cho**, KangHo Bae**

Key Words : 수력터빈(Hydraulic turbine), 현장시험(Field test), 열역학법(Thermodynamics method), 프란시스 수차(Francis turbine), 수력발전소(Hydropower plant)

ABSTRACT

This study modernizes the runner of a Hapcheon hydropower plant installed with a vertical Francis turbine with a rated head of 95 m, measures and compares the field efficiency before and after the modernization, and verifies how much influence the runner has on the efficiency of the turbine. The same field test was performed using the thermodynamic method, which is a test applicable to turbines exceeding 100 m head according to IEC 60041. Efficiency of the old runner was measured at 93.21% as the highest efficiency point under the condition of head 113.0 m. Efficiency of the new runner was measured at a highest efficiency of 94.20% despite the worse condition of head 115.75 m. The efficiency improved by about 1%p under the operating conditions above about 50% turbine power output. It is meaningful in that the performance of HPP is improved by replacing the runner.

1. 서 론

수력발전소는 댐 등에 모아진 물의 위치에너지를 수차를 활용하여 운동에너지로 변환하고, 이를 다시 유용한 전기에너지로 변환하는 시설이다. 발전소의 고유한 조건에 적합한 형식의 수차를 선정하고 무용한 손실을 최소화하여 효율이 높고 캐비테이션 등의 이상 현상이 발생하지 않도록 수차를 설계, 제작하는 것이 핵심 기술이다.

국내에서는 신규 댐 건설의 어려움으로 10 MW 이상의 중규모급 신규 수력발전소 건설은 현실적으로 어려운 실정이다. 반면 국내 운영 중인 많은 수력발전소가 노후화되어 현대화가 필요한 시기가 도래하였으며, 일부 발전소는 이미 현대화 되었거나 가까운 시일 내에 진행될 예정인 것으로 알려져 있다.

또한 외국의 경우 정기적인 유지보수 및 노후 수력발전소의 현대화 외에도 선제적으로 러너와 가이드 베인, 발전기

등 주요 설비의 교체를 통해 효율 상승을 유도한 사례도 있다.^(1,2)

이에 따라 국내에서도 수력발전소 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며 앞서서는 15 MW급의 수차발전기 국산화 연구가 수행된 바 있으며,⁽³⁾ 50 MW급 프란시스 러너의 설계 기술이 확보된 바 있다.⁽⁴⁾

특히 합천수력발전소는 1989년 준공된 이래 32년간 운영된 50 MW 중규모급 발전소로, 비교적 양호한 운전 환경으로 2018년 측정된 최대 효율은 93.21%로 프란시스 수차 중에서도 상당히 높은 성능을 갖고 있다.⁽⁵⁾

본 발전소에서는 수차의 효율에 가장 큰 영향을 끼치는 러너를 IEC 60193⁽⁶⁾에 기술된 바와 같이 모델수차 성능시험을 통하여 개발된 러너를 실제 적용하고, 현대화 전후의 성능 변화를 비교·분석해보고자 하였다.

IEC 60041⁽⁷⁾에는 수차의 현장성능시험 방법으로 압력-시간차법, 유속계법, 열역학법 등 여러 가지 방안이 기술되어

* 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

** 한국수자원공사 (K-water)

[†] 충남대학교, E-mail : sunghoko@cnu.ac.kr

있으며, 낙차가 100 m 이상인 경우에 열역학법 시험이 적용이 가능하다고 기술되어 있다. 대부분의 시험 방법은 이론출력 계산식인 식 (1)을 도출하기 위해 유량을 측정하고 효율을 계산하는 방법이지만, 열역학법은 수차의 손실은 수차를 통과하는 유체의 온도 상승을 일으킨다는 열역학 제 1법칙을 이용한 시험 방법이다.

$$P = \rho g Q H \quad (1)$$

여기서 P는 출력 [kW], ρ는 통과 유체의 밀도 [kg/m³], Q는 통과 유체의 유량 [m³/s], H는 통과 유체의 낙차 [m]이다.

오래전부터 열역학법을 활용한 유체기계의 효율 측정 연구가 다양하게 수행되어 왔으며, 강신형 등⁽⁸⁾은 시험실에 설치된 펌프에 대하여 열역학법 시험과 전통적인 수력학법 시험 결과를 비교하여 실험 오차 내에서 두 결과가 일치함을 확인하였다.

또 Hulaas 등⁽⁹⁾은 정격낙차 52 m의 프란시스 수차의 개보수 전후의 성능에 대해 압력-시간차법과 열역학법 효율시험을 활용하여 성능개선 여부를 확인한 바 있으며 Paquet⁽¹⁰⁾은 Pt 100 온도센서와 0.001 K의 정밀도를 가진 Seabird 온도센서의 비교로 Seabird 온도센서의 측정 불확도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구시험에서는 기존 러너와 신규 러너가 설치된 수차에 대해 정밀도가 높은 센서들을 활용하여 동일한 방법의 열역학법 효율시험을 반복하여 수행하고 결과를 비교하여 러너의 개대체가 수차 효율에 끼치는 영향에 대하여 분석하고자 하였다.

2. 열역학법 현장 효율시험

2.1 발전소 제원

현대화 전후로 현장 성능시험을 실시하는 합천수력발전소에는 50 MW급 입축 프란시스 수차가 2대 설치되어 있으며, 수차의 제원은 Table 1과 같다. 본 시험을 통해 비교하고자 하는 두 대상은 1988년 일본 Fuji에 의해 제작된 기존 러너와 2020년 국내 이케이중공업에서 제작된 신규 러너이다. 신규 러너는 합천수력발전소에 적합한 형상으로 개발 및 제작하여 합천수력발전소 1호기만을 대상으로 실증하였으며 실증 전후의 1호기 수차발전기의 효율 시험을 진행하였다. 다양한 시험 조건을 임의로 부여할 수 있는 실험실과는 달리 본 시험은 현장시험의 특성상 앞서 수행된 시험과 일부 조건이 변경되었는데 하절기 장마로 인한 댐 수위의 상승으로 낙차가 약 4% 상승하였고, 전력계통 운영을 위해 시험 대상 호기가 변경되었다.

신규 러너는 최초 설계 후 수력학적 성능을 검증하기 위해

모델수차 시험을 수행하였다. 모델수차 시험이란 원형 수차와 상사성이 유지된 축소 모델을 제작하여 모델수차 실험실에서 다양한 조건을 부여하여 설계의 적정성을 검증하는 시험 방법이다. 신규 러너의 모델수차 시험을 통해 도출된 낙차-유량별 효율을 실물수차로 환산한 Hill-chart를 Fig. 1에 나타내었고 스케일 비, 러너 대표외경 등의 정보를 Table 2에 정리하였다. 유량 51.5 m³/s, 낙차 100 m에서 효율이 최대치인 95.47%을 나타내고 낙차가 정격낙차를 초과하여 상승하면 점점 감소하게 되는데 특히 현장시험 조건이 포함되는 신규 러너의 Max. head 110.5m를 초과한 낙차에서는 모델수차 시험을 진행하지 않았다. 이렇듯 Max. head를 초과한 현장시험을 시행하게 된 이유는 앞서 언급한 바와 같이 하절기 장마 등의 직접적 원인이 있지만 최근 가뭄에 대비하여 다목적댐 수위를 높게 운영하는 정책 기조로 인해 수차발전기의 Max. head를 초과하는 운영이 장기화됨에 있다.

Table 1 Design specification of Hapcheon hydraulic turbines

Division	Old runner	New runner
Turbine number	#2	#1
Type	Vertical Francis	Vertical Francis
Rated Output	51.6 MW/unit	51.6 MW/unit
Rated head	95.0 m	95.0 m
Max. head	110.5 m	110.5 m
Min. head	74.1 m	74.1 m
Test. head	113.0 m	115.75 m
Discharge	59.4 m ³ /s	59.4 m ³ /s
Rotation Speed	257 rpm	257 rpm
Runaway Speed	505 rpm	505 rpm
Rated Eff.	93.8%	95.47%
Production year	1988	2020
Manufacturer	Fuji (Japan)	EKHI (Korea)

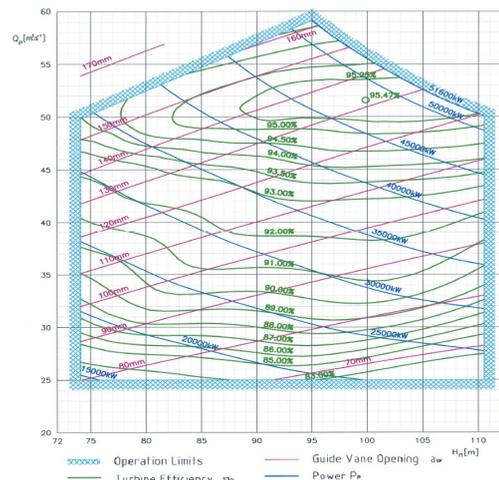


Fig. 1 Hill chart of new runner evaluated from model test results

Table 2 Comparison of model and prototype turbines

Division	Model	Prototype
Scale ratio (D_{refP}/D_{refM})	7.95625	
Runner reference diameter	320.0 rpm	2546 rpm
Runner inlet diameter	342.38 mm	2724.06 mm
Rotational speed	1250 /min	257.14 /min
Guide vane pitch diameter	395.92 mm	3150 mm
Number of runner blades	13	13
Number of guide vanes	24	24
Number of stay vanes	23	23

2.2 효율시험 방법

수차에서의 손실은 열역학 제 1법칙에 따라 수차를 통과하는 물의 온도 상승을 일으킨다. 1 kg의 물의 온도를 1 K 상승시키는데 4,188 joule이 필요하므로 약 427 m의 낙차를 가진 90% 효율의 수차는 0.1 K의 온도 상승을 일으킨다. IEC 60041에서는 열역학법 효율시험을 낙차 100 m 이상의 조건에서 적용하기를 추천하고 있다. 본 수차는 정격낙차가 95.0 m이지만, 댐 수위의 상승으로 정격낙차의 약 124% 수준인 115.75 m에서 수행되어 적용 가능하였다. 수온은 최고 효율점에서 0.02 K만큼 상승되었는데, 이러한 작은 온도 변화를 측정하기 위해 해상도 0.25×10^{-3} K, 정밀도 1.0×10^{-3}

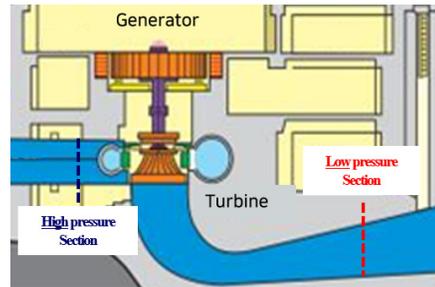


Fig. 2 Temperature Measuring sections for thermodynamic method

K의 고정밀 온도센서를 사용하였다.

수차를 통과하는 유체의 압력과 온도를 측정하는 부분을 Fig. 2에 표시하였는데, 파란색 구역이 수차의 고압 측이고, 빨간색 구역이 수차를 통과하고 난 저압 측이다. 주요 데이터들의 취득 지점과 방법 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

수차의 입구인 고압 측에서는 정압 측정을 위해 기존에 90°간격으로 설치된 4점의 압력 측정점 중 활용할 수 없었던 1점을 제외하고 3점의 배관을 연결하여 평균압력을 측정하였다. 또한 절대압력을 측정하는 압력센서와 수온을 측정하는 온도센서를 설치하였는데, IEC 60041에서는 유입부 직경이 4.0 m인 경우 2점에서의 온도 측정을 추천하고 있어서 마주하는 2점에서 온도를 측정하고 보온재를 활용하여 외부 열 유입을 최소화하였다.

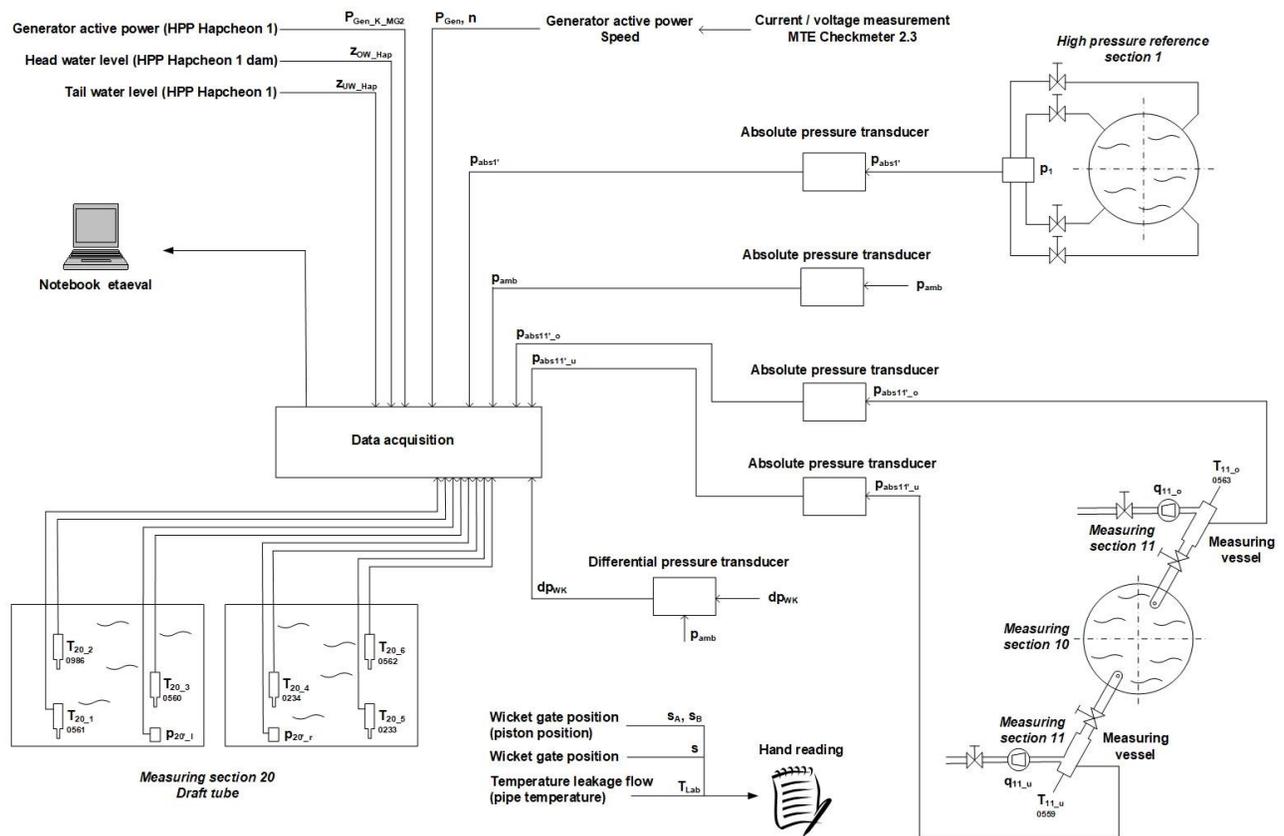


Fig. 3 Overview of the instrumentation setup

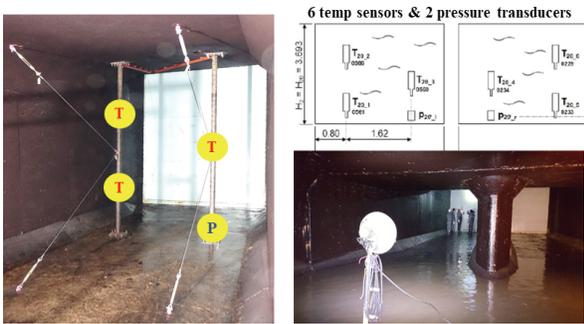
수차의 출구인 저압측의 온도와 압력을 측정하기 위하여 드래프트 튜브를 배수하고 센서 고정용 파이프를 Fig. 4와 같이 설치하였다. 2개로 나누어지는 드래프트 튜브에 총 4개의 천공된 파이프를 설치하였고, 6개의 온도계와 2개의 압력계를 설치하였다. 파이프 내에 설치된 센서들의 데이터는 드래프트 튜브 상부까지 연결된 공기관을 통해 유선 케이블로 취득장치와 연결되었다.

발전기 출력 측정을 위한 전압·전류계, 가이드 베인의 개도, 회전속도, 역률, 상·하류 수위 등의 데이터는 제어반을 통해 취득하였고, 대기압을 측정하는 절대 압력계와 향후 댐 수위가 하락하면 효율을 재산출할 수 있도록 Winter-Kennedy 시험용 차압계 등의 부가적인 계측기들을 설치하였다. Fig. 5는 Data를 취득 중인 현장의 전반적인 모습이다.

시험은 가이드베인의 개도량을 조정하여 발전기 출력을 정격 출력인 51.6 MW에서 최소 19 MW까지 단계적으로 줄인 후, 다시 증가시켜 51.6 M까지 도달하는 방법으로 총 19점의 측정점에서 샘플링 주기 1초, 약 2분간 120개의 데이터가 취득되었다.



(a) Temperature sensor at high pressure section



(b) Temperature & pressure measuring system at low pressure section

Fig. 4 Temperature & pressure measuring system



Fig. 5 Measurement data acquisition system

2.3 열역학법 계산식

수차의 효율 (η_T)은 수력효율 (η_{hyd})에 기계효율 (P_T/P_m)을 곱하여 구할 수 있다. 수력효율은 비기계에너지(Specific mechanical energy, E_m)와 비수력에너지(Specific hydraulic energy, E)의 비로 정의될 수 있어 식 (2)을 통해 계산할 수 있다. 비수력에너지(E)는 식 (3)와 같이 고압부와 저압부 측정지점 사이에 있는 단위 질량의 물이 갖고 있는 에너지의 차를 의미한다. 비기계에너지(E_m)는 식 (4)에 나타난 바와 같이 고압부 온도센서 위치에서의 에너지와 수차의 손실이 고려된 저압부 온도센서 위치에서의 에너지 차를 나타낸다.

$$\eta_{hyd} = \frac{E_m}{E} \quad (2)$$

$$E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (3)$$

$$E_m = \bar{a}(p_{abs11} - p_{abs20}) + \bar{c}_p(\theta_{11} - \theta_{20}) + \frac{v_{11}^2 - v_{20}^2}{2} + g(z_{11} - z_{20}) + \delta E_m \quad (4)$$

여기서 p_{abs} 는 절대압력, v 은 속도, z 는 위치수두, \bar{a} 는 평균 등온계수(Mean isothermal factor), \bar{c}_p 는 평균 비열용량(Mean specific heat capacity), θ 는 수온을 나타내며 하첨자 1은 고압측 기준점, 하첨자 2는 저압측 기준점을 나타낸다. 하첨자 11은 고압측 센서부, 하첨자 20은 저압부 센서부를 의미한다.

δE_m 은 IEC 60041에서 정의된 보정치를 의미하며 열복사, 벽을 통한 열전달, 공기와의 열교환으로 구분하여 보정을 하게 된다. 본 연구에서는 유입수의 온도 변화에 대한 영향은 보정하였고, 벽을 통한 열전달은 수차가 완전히 콘크리트로 덮여있기 때문에 무시할 수 있었으며, 대기와의 열교환은 무시할 수 있는 수준으로 보정하지 않았다. 유입수의 온도 변화에 대한 보정 (δE_m)은 식 (5)으로 정의될 수 있다.

$$\delta E_m = \bar{c}_p \times \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \times (t_a - t - t_b) \quad (5)$$

여기서 t 는 고압부와 저압부 사이를 물이 흐르는 시간이며, t_a 와 t_b 는 각각 고압부와 저압부에서 온도센서까지 물이 흐르는 시간을 나타낸다. 수차 유입측의 고압부에서 압력과 온도가 측정된 물은 드래프트 튜브의 저압부까지 흐르는데 일정 시간이 소요된다. 현장시험 시에는 고압부와 저압부의 온도 센서를 동일한 시간에 측정하기 때문에 유입되는 물의 온도가 변화하는 경우 이를 보정해야 할 필요가 있다.

현장시험 시 강한 햇빛이 비추거나 폭우 또는 폭설로 인해 유입수온이 일정하지 않은 경우에 보정이 필요하며, 본 연구의 경우 유입 수온의 변화가 0.005 K/min 이하로 미미하여 IEC 60041에 명시된 바와 같이 용납할 수 있는 수준이었다.

수차의 효율 (η_T)은 식 (6)과 같이 수력효율 (η_{hyd})과 기계 효율 (η_m)의 곱으로 나타낼 수 있으며, 기계효율은 수차의 기계 출력 (P_m)과 베어링 등 기계부품의 손실 고려하여 실제 수차축에서 발전기로 전달되는 수차출력 (P_i)과의 비로 정의된다. 수차 베어링 손실 (P_{Lm})은 베어링 오일의 냉각수의 유량과 온도차를 측정하여 산출하였으며, 냉각수 유량과 온도차는 각각 $9.16667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 와 약 $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 측정되어 베어링 손실은 7.66 kW로 산출되었다.

$$\eta_T = \eta_{hyd} \eta_m = \frac{E_m P_T}{E P_m} = \frac{E_m P_m - P_{Lm}}{E P_m} \quad (6)$$

수차의 기계출력 (P_m)은 발전기 출력 (P_G), 발전기 효율 (η_G) 그리고 베어링 손실 (P_{Lm})을 통하여 산출할 수 있으며, 이를 식(7)에 나타내었다.

$$P_m = \frac{P_G}{\eta_G} + P_{Lm} \quad (7)$$

시험 결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여 수차 효율에 대한 절대불확도를 식 (8)을 이용하여 산정하였다.

$$e_{\eta_T} = \sqrt{(\eta_m \times e_{\eta_{hyd}})^2 + (\eta_{hyd} \times e_{\eta_m})^2} \quad (8)$$

3. 시험결과 및 고찰

현장시험은 정격 출력뿐 아니라 부분 출력에서도 실시하였으며, 가이드베인 개도 조정을 통한 유량제어로 최대 51.6 MW에서 19.6 MW까지 출력을 조정하고 1대 또는 2대 운전조건과 공기주입 실시·미 실시 여부에 따라 38가지 운전조건을 설정하고 2회를 반복하여 총 76번의 측정을 실시하였다.

일반적으로 프란시스 수차의 경우 부분 출력에서 러너 출구의 회전 유동으로 인해 발생하는 Vortex rope로 인해 압력맥동이 크게 나타나고, 진동과 소음이 발생하게 된다. 이를 저감 시키고자 인위적으로 공기를 주입하기도 하는데, 합천수력발전소의 경우 Fig. 6과 같이 드래프트 튜브에서 워터젯에 의한 공기주입이 이루어지고 있다. 공기를 주입하게 되면 압력맥동은 저감되나 수차의 효율이 감소하게 된다. 본 시험에서는 공기주입 여부도 구분하여 시험하였다.

신규 러너가 적용된 1호기를 단독 운전하며 Data 취득을 완료한 후 1·2호기를 동시에 운전하는 조건에서 Data를 취득하였다. 일반적으로 2대를 운전하는 경우 발전소로 유입되

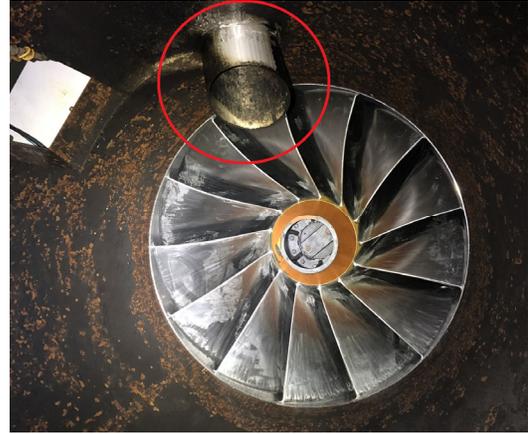
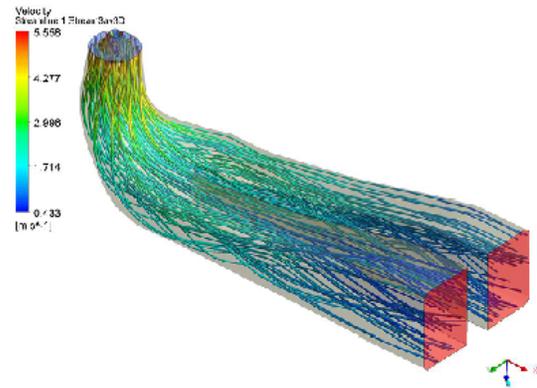


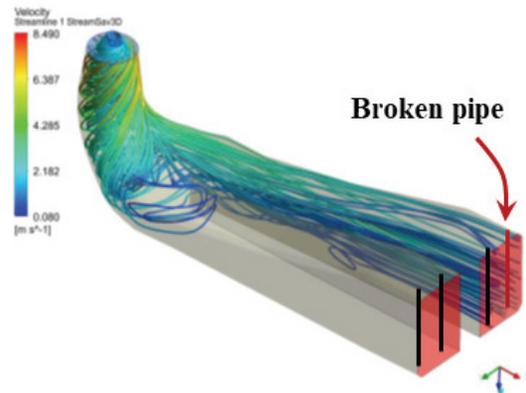
Fig. 6 Aeration inlet by water jet in the draft tube

는 과정인 펜스탁에서 손실이 발생하여 운전 낙차가 감소하게 되는데 본 시험의 경우 정격낙차에 가까운 113.88 m로의 감소로 수차 효율이 증대되었다. 특히 유량이 $47.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 출력이 49.05 MW일 때 수차 효율은 94.89%의 최고 효율을 나타내었다.

드래프트 튜브에 설치한 온도센서 주의의 유동 특성을 살펴보기 위하여 러너 설계시 수행된 CFD 해석결과를 조사하였



(a) Full load case



(b) Part load case

Fig. 7 Predicted streamlines in the draft tube

다. 정격낙차에서 가이드베인 개도가 22.0°이고 유량이 5.1 m³/s인 전 부하 운전인 경우와 가이드베인 개도 10.0°이고 유량이 25.1 m³/s인 부분 부하 운전인 경우의 드래프트 튜브 내의 유선을 Fig. 7에 나타내었다. 전 부하 운전시에는 많은 유량이 드래프트 튜브를 통해 안정적으로 유속을 낮추어 속도 에너지를 회수할 수 있도록 설계되었으나, 부분 부하 운전시에는 유량이 줄어들어도 불구하고 러너 하부에서 빠르게 회전하는 유동으로 인해 빠른 유속의 유동이 드래프트 튜브 한쪽으로 치우치는 현상이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 시험 도중 드래프트 튜브 내 설치한 온도센서 파이프 하나가 유실되어 4개의 온도센서를 활용하여 시험을 실시하게 되었다.

본 시험을 통하여 얻어진 출력별 케이스를 모두 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 녹색선은 공기주입을 실시한 경우이며, 빨간 선은 공기주입을 하지 않은 경우의 케이스별 효율을 나타낸다. 공기주입을 실시하는 경우에 효율이 감소되는 경향을 보이며, 부분 부하에서는 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 유동 편향에 의해 3~4개의 온도계가 일정하게 측정되지 않음을 알 수 있다.

기존 러너와 신규 러너의 효율을 비교한 그래프를 Fig. 9에 나타내었는데, 검정 선은 신규 러너, 파란 선은 기존 러너

Table 3 Efficiency improvement for turbine power output

Power Output (MW)	Old runner [%]	New runner [%]	Comparison [%p]
51.36	93.20	94.02	+0.82
46.17	91.62	92.96	+1.34
41.04	88.27	89.25	+0.98
35.91	84.29	85.21	+0.92
30.78	80.27	81.26	+0.99
25.65	76.23	75.95	-0.28

를 나타낸다. 각 러너별 최고 효율점(BEP)는 신규 러너가 적용된 수차는 낙차 115.75 m 시험조건에서 유량 48.6 m³/s에서 효율 94.20%로 가장 높았고, 기존 러너가 적용된 수차는 낙차 113.0 m 시험조건에서 유량 50.91 m³/s에서 효율 93.21%이 최대치였으며 이후 유량이 증가하면 효율이 감소하였다. 유량 30 m³/s 이상 구간에서는 개선 러너가 약 1%p 가량 증가함이 확인되며 동일한 출력일 때의 기존 수차와 개선 수차의 효율 차이를 Table 3로 비교하였다.

수차 효율의 절대 불확도는 ±0.66%, 낙차의 절대 불확도는 ±0.29%, 출력의 절대 불확도는 ±0.76%, 유량의 절대 불확도는 ±1.12%로 전반적으로 정밀한 시험이 이루어졌으며 앞서 실시된 2호기의 시험과도 비슷한 수준이었다.

4. 결론

본 연구에서는 정격낙차 95.0 m의 입축형 프란시스 수차가 설치된 합천수력발전소의 러너 현대화 전후 효율 변화를 열역학법 효율시험을 통해 비교하였다. 열역학법 효율시험을 위해 정밀한 온도센서와 압력센서 등을 수차의 유입측과, 유출측인 드래프트 튜브에 설치하였다. 출력을 최대 52.0 MW에서 최저 19.2 MW까지 조정하고 운전대수를 1대 또는 2대로 변경하거나 공기주입 여부에 따라 38개 케이스를 선정 후 2번 반복하여 총 76회 Data를 취득하였다.

비록 모델수차 시험과 달리 낙차와 회전수를 변경할 수 없는 현장효율시험의 특성상 완전히 동일한 시험조건은 아니었으나 기존 러너가 설치된 2호기는 113.0 m의 낙차에서 93.21%의 최고 효율을 나타내었고, 개발 러너가 설치된 1호기는 115.75 m의 낙차에서 94.20%로 유효한 수준으로 개선되었음을 확인하였으며 2대 운전 시에는 최대 94.9%까지 상승함을 확인하였다. 모델수차 성능시험 결과에 기반하여 향후 댐 수위가 하락하여 정격낙차 95.0 m에 가까워지면 신규 러너의 효율은 더욱 상승할 것으로 예상된다.

국내에서는 최초로 순수 자체기술로 제작한 50 MW급 규모의 수차 러너가 해외 유수의 제작사와 동등 또는 그 이상의 성능을 갖는다는 점에서 의의가 있다.

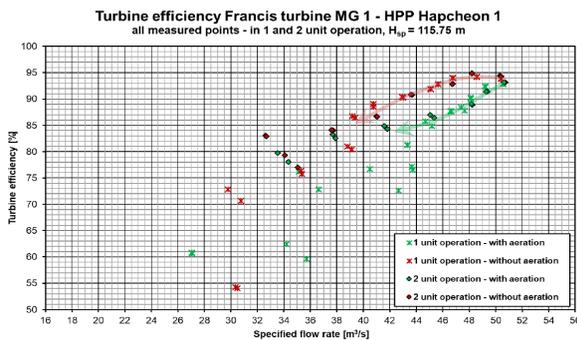


Fig. 8 All test results of efficiency test for each operation condition

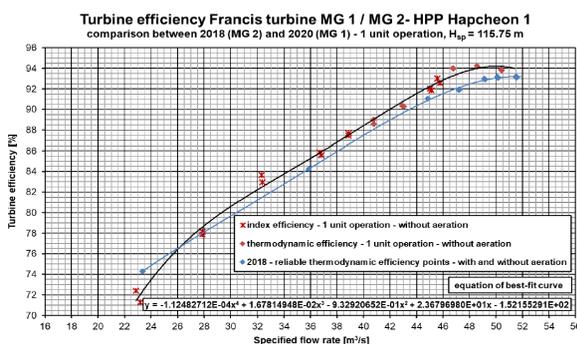


Fig. 9 Comparison of efficiency curves for old and new runner

후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 20153010060310)과 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 21IFIP-B128598-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Tsukamoto Naofumi and Inagaki Masahiro, 2003, Francis Turbine Renewal Technology, Fuji Electric Journal, Vol. 76, No. 9, pp. 568-571.
- (2) Kiyohito Tani, and Yutaka Hanada, 2011, Effective Utilization of Hydraulic Energy through Improved Turbine Runner Characteristics, Hitachi Review Vol. 60, No. 7.
- (3) Jeon, Y.H., 2016, “국내 최초 15 MW급 프란시스 수차 개발,” The proceedings of KIEE Vol. 65, No. 9, pp. 27-32.
- (4) Yoo, I., Choi, W., Park, M., and Cho, Y., 2018, “Design of a Francis Runqoqoner Based on the Operations Statistics of a 50MW-Class Hydraulic Turbine,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 6, pp. 45-53.
- (5) Kim, D. G., Cho, T. Y., Cho, Y., and Lee K. B., 2020, “Field Efficiency Measurement Test of a Hydropower Plant Using Thermodynamic Method,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 23, No. 3, pp.13-20.
- (6) International Electrotechnical Commission, 1999, “Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines-Model acceptance tests,” IEC 60193, Geneva.
- (7) International Electrotechnical Commission, 1991, “Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines,” IEC 60041, Geneva.
- (8) Kang, S. H., Kim, J. K., Hong, S. S., and Yates, A., 2000, “Evaluation of Thermodynamic Method for Pump Performance Measurement,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 3, No. 3, pp. 25-30.
- (9) Hulaas, Harald, Parr, Lief, and Nilsen, E, 2012, “Comparison Between The Pressure-Time and The Thermodynamic Method on a 52 m Net Head Plant,” IGHEM 2012, Trondheim, Norway.
- (10) Paquet, E., 1998, “Thermodynamic Method : Comparison of Sea Bird and Pt 100 Temperature Probes,” The 2nd International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements, IGHEM 1998, Reno, NV, USA.