

실물 프란시스 수차개발을 위한 모델수차의 성능예측

차상훈* · 최종웅* · 고성호**†

Performance Prediction of Hydraulic Model Turbine for On-site Francis Turbine Development

Sanghoon Cha*, Jongwoong Choi*, Sungho Ko**†

Key Words : Hydraulic Turbine(수력터빈), IEC 60193(국제규격), Maximum Efficiency(최대효율), Model Test(모델시험), Specific Speed(비속도), Turbine Hill Chart(터빈성능곡선)

ABSTRACT

Model performance test is generally used to design a new hydraulic turbine instead of prototype performance test to save time and cost. The present study verifies the usefulness of model performance test for a prototype turbine design. Three different model turbines were designed and manufactured for a model test, and then the model test was conducted in K-water hydraulic turbine model test center. Reproducibility test was performed to determine the uncertainty of the test results. The standard of a model test was referred to IEC 60193 which is the international standard for a hydraulic turbine acceptance test. A Hill Chart with n_{11} - q_{11} -efficiency was plotted based on the model test results. Furthermore, on-site test was conducted to verify the usefulness of model test by comparing model test results with the onsite test results.

1. 서 론

수차발전설비에서 수차효율시험은 기기성능의 종합적인 척도로서 가장 중요한 의미를 갖고 있다. 수력사업은 정부의 신재생에너지 보급 확대 정책으로 공공기관이 주도적으로 개발하여 양적으로 증가되었다. 그러나 성능에 대한 기술적 개선을 위한 노력은 충분하지 못하였다. 국내에서는 CFD를 통한 프란시스형 수차의 설계변수, 수력학적 성능특성의 해석기법 연구가 주로 수행 되었으며,⁽¹⁻⁴⁾ 모델시험을 통하여 프란시스 터빈의 성능시험을 수행하는 것이 바람직하지만, 국제규격에 부합하는 모델수차 성능시험 설비는 국내에서는 오직 한국수자원공사에서 보유한 설비가 유일하다. 한편, 국 외에서는 수력터빈 개발단계에서 CFD와 모델수차 성능시험 을 통한 수차의 성능 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

수차발전 설비의 개발은 설계, CAE기법에 의한 검증, 모델수차의 성능시험 그리고 실증 시험 단계로 수행되며, 국

내에서의 모델수차에 대한 성능검증은 외국에 전적으로 의 존하고 있는 실정이다. 특히 모델수차에 의한 성능검증을 제 외하고 수차 개발을 수행한다면 개발 비용 및 시간 증가 그 리고 수차 개발품의 질적 감소가 발생할 수 있어 반드시 수 차 개발단계에서 모델수차에 의한 성능검증이 필요하다.

모델수차의 성능 검증은 국제 표준 IEC 60193의 정확도 요구사항을 만족하는 시험 설비 구축을 통해 시험이 수행되 어져야 한다.

본 연구의 목적은 K-water에서 보유하고 있는 수차 성능 시험 장치를 활용하여 모델 시험을 수행하고 이 모델 시험을 통해 설계, 제작된 실물 수차의 현장 성능시험 결과와 비교 함으로써 실물 수차 제작을 위한 모델 시험의 유효성을 검증 하는데 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 실물 프란시스 수차 설계를 위 한 3가지 비속도별(N_s 120, 200, 300) 모델수차의 성능시험 을 수행하였으며, 최종적으로 수차의 특성 곡선⁽⁸⁾을 Hill

* K-water 융합연구원(K-water Conversion Institute)

** 충남대학교 기계공학부(Chungnam National University Mechanical Engineering)

† 교신저자, E-mail : sunghoko@cnu.ac.kr



Fig. 1 Overview of test rig for Francis model turbine

Chart로 나타내고, 기존 수차와 개발 수차의 성능향상 정도를 비교하였다.

2. 모델수차 성능시험

2.1 시험 설비의 구성

모델수차의 성능시험을 수행하기 위한 test rig는 유량을 제어하기 위한 펌프실, 프란시스 수차의 성능시험을 위한 수차와 압력변동을 최소화하기 위한 수차의 상·하부 탱크, 모델수차의 시험을 위한 제어실, 펌프 및 각종 기기의 전력을 공급하는 전력설비 등으로 구성된다. 펌프실에는 두 개의 인버터 펌프를 설치하고, 직렬, 병렬 조합이 가능하도록 구성하여 다양한 유량과 낙차 조건을 형성할 수 있도록 구성하였다. Fig. 1은 test rig 구성 설비 중 상·하부 탱크와 모델수차가 설치된 모습을 나타내고 있다. 본 test rig의 시험 가능 범위는 최대 100 MW급 실물 수차발전기의 모델수차 성능시험이 가능하도록 구성하였으며, 최대 낙차 및 유량은 각각 40 m, 1.0 m³/s이다. 그리고 동력계 용량 및 부하 적용 시 최대 측정 가능한 회전수는 각각 400 kW, 2,500 rpm이다.

2.2 시험 조건

모델시험은 국제 규격 IEC 60193을 만족할 수 있도록 실물수차의 스케일 척도 감소를 기준으로 제작되었으며, 프란시스 모델수차 성능시험의 경우 레이놀즈 수 4×10⁶ 이상에서 수력에너지 100 J·kg⁻¹, 최소 head 10.2 m, 프란시스 수차의 대표 최소 직경 0.25 m를 제시하고 있다.

Fig. 2는 국제 규격 IEC 60193에서 요구하는 제원에 따라 제작한 비속도 120, 200, 300의 프란시스 수차를 나타내고 있으며, Table 1은 비속도 120, 200, 300의 프란시스 모델수차의 설계 제원을 나타내고 있다.



(a) Ns 120 (b) Ns 200 (c) Ns 300

Fig. 2 Three different model turbines for performance test

Table 1 Francis model turbine specification for performance test

Specific speed (m-kW)	Reference diameter (mm)	Rotational velocity (rpm)	Flow rate (m ³ /s)	Net head (m)	Power (kW)
120	250	1,200	0.25	35	73
200	350	900	0.45	18	70
300	350	900	0.34	9	26

2.3 성능시험설비의 재현성 시험

본 시험의 획득 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 재현성 시험을 수행하였으며, 시험은 측정 포인트에 대하여 유량제어용 펌프의 인버터 주파수 및 동력계 제어 인버터 주파수를 가감 시킨 후, 초기 측정 포인트로 인버터 값을 설정하는 방법으로 수행하였다.

총 20개 이상의 계측값을 획득하여 재현성 시험을 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 식 (1)~(3)과 같이 N11은 회전수, Q11은 유량, T11은 토크를 나타내는 변수값이다. 여기서, n은 회전수, D는 터빈의 직경, H는 터빈 전, 후단 수두차, Q는 유량, T는 토크를 의미한다.

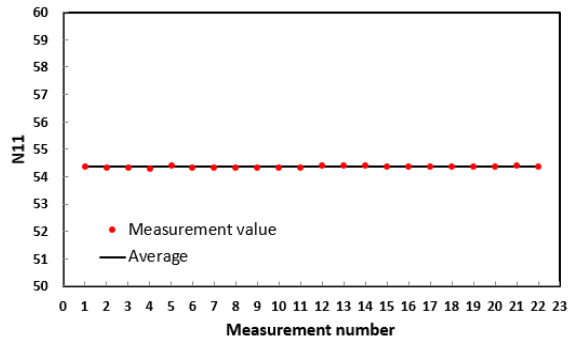
재현성 시험 결과 N11의 표준편차율은 0.056%, Q11, T11 그리고 효율에 대한 각각의 표준편차율은 0.383%, 0.125%, 0.377%로 나타났다.

$$N11 = \frac{nD}{H^{0.5}} \quad (1)$$

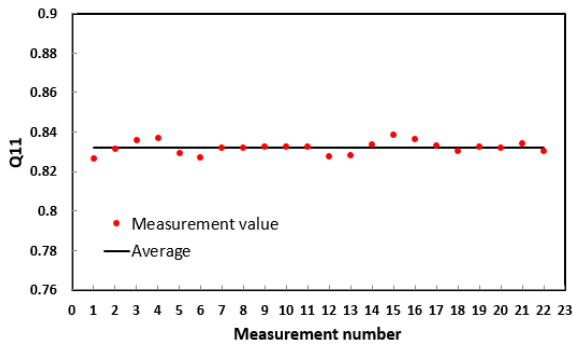
$$Q11 = \frac{Q}{D^2 H^{0.5}} \quad (2)$$

$$T11 = \frac{T}{D^3 H} \quad (3)$$

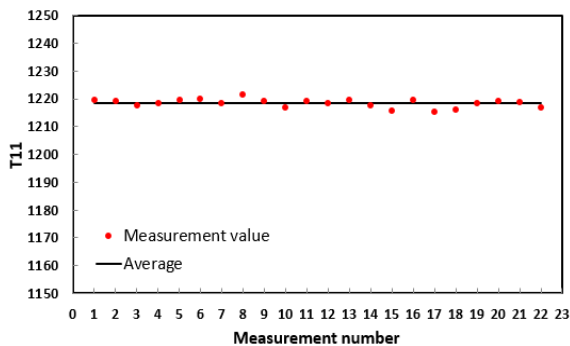
KS B 6018: 2002에 따르면, 낙차와 회전속도의 적정 표준편차율을 0.5%, 0.25%로 각각 제시⁽³⁾하고 있다. 본 시험에서 구한 효율 재현성 시험의 경우 유량, 토크, 회전수, 비에너지의 변수를 포함하고 있어 이 값이 KS 규격의 낙차 표준편차율 0.5%로 보다 작은 값을 가지므로 본 재현성 시험의 신뢰성은 확보한 것으로 판단된다.



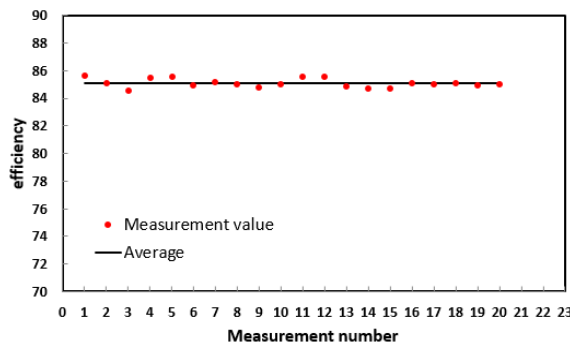
(a) N11



(b) Q11



(c) T11



(d) Efficiency

Fig. 3 Results of reproducibility test

Table 2 Measured values of reproducibility test results

Item	N11	Q11	T11	Efficiency
Avg. value	54.36	0.83	1218.46	85.08
Standard deviation	0.0304	0.0032	1.5196	0.3206
Standard deviation rate (%)	0.056	0.383	0.125	0.377

Table 3 Reproducibility test results for random uncertainty

No.	N11	Efficiency	No.	N11	Efficiency
1	54.359	85.662	11	54.403	85.544
2	54.338	85.112	12	54.406	85.570
3	54.341	84.567	13	54.407	84.871
4	54.408	85.446	14	54.365	84.666
5	54.330	85.558	15	54.366	84.686
6	54.338	84.972	16	54.369	85.057
7	54.339	85.172	17	54.369	85.002
8	54.344	85.002	18	54.361	85.092
9	54.335	84.789	19	54.398	84.902
10	54.333	84.980	20	54.354	85.048

준은 0.2%로 알려져 있다.

세계 최고 수준의 제작사들은 0.25% 이상의 불확도를 갖추고 있다. 수차의 효율은 입력되는 수력학적 에너지 대비 출력되는 기계적인 에너지로 식 (4)와 같이 나타내어진다. 여기서 ω 는 각속도, ρ 는 비중, g 는 중력가속도를 의미한다.

$$\eta = \frac{Tw}{\rho g QH} \quad (4)$$

불확도의 요인은 우연오차에 의한 우연불확도(random uncertainty)와 계통오차에 의한 계통불확도(systematic uncertainty)로 나누어고 두 불확도의 총합으로 총 불확도(total uncertainty)를 산정하게 되며, 이는 IEC 60193 국제 규격에 의하여 산정하게 된다.

우연불확도는 시험 시 예측할 수 없는 원인에 의해 발생하는 것을 의미하며 동일 조건에 대해 n번 반복적인 시험을 통해 산정하게 된다. 본 연구에서는 개발하는 수차를 이용하여 20번의 반복시험을 한 우연불확도의 결과를 Table 3에 나타내었다.

우연불확도 f_r 는 IEC 60193 기준에 따라 식 (5)를 사용하여 구할 수 있으며, 계산된 우연불확도는 0.16%이다. 여기서 t검정을 위한 t값은 자유도가 19이고, 유의수준($\alpha < 0.025$)에서 2.093이며, 표준편차 S_c 는 0.321%이다.

2.4 성능시험의 불확도 산정

시험결과의 정밀도를 높이고 불확실성을 판단하기 위하여 불확도를 산정하였다. 모델시험중 효율시험 결과의 정확도를 판단하기 위하여 불확도를 산정하게 되며, 세계 최고 수

$$f_r = \frac{ts_c}{\sqrt{n}} = \frac{2.093 \times 0.321}{\sqrt{20}} = \pm 0.16\% \quad (5)$$

계통불확도 f_s 는 시험 시 활용되는 다양한 계측기기에 의해 발생하는 불확도를 의미하며 식 (6)을 이용해 산정할 수 있다.

$$f_s = \sqrt{(f_Q)_s^2 + (f_E)_s^2 + (f_T)_s^2 + (f_n)_s^2} \quad (6)$$

여기서 $(f_Q)_s$, $(f_E)_s$, $(f_T)_s$, $(f_n)_s$ 은 유량, 비에너지, 축 토크, 회전속도에 대한 각각의 불확도를 나타내며, 밀도에 의한 불확도는 일반적으로 무시될 수 있다.

각 인자들에 대한 측정기기는 국가 교정기관에서 교정을 받았으며, 유량계는 K-water 유량계 교정센터에 있는 중력식 탱크를 이용하여 교정을 실시하였고, 교정성적서의 측정 불확도는 0.09%이다. 단위 질량당 에너지인 비에너지는 중력가속도와 낙차의 곱으로 중력가속도는 수식으로 계산되어 무시할 수 있다. 낙차는 교정 완료한 차압계로 측정하였으며, 측정불확도는 0.11%이다.

토크는 압 길이와 힘의 곱으로 측정할 수 있으며, 압 길이와 전기식 힘 측정기에 대한 교정 결과 측정불확도는 각각 0.02%와 0.30%로서 합성불확도는 0.31%로 산정된다.

한편, 회전속도는 IEC 60193에 나타난 바와 같이 교정이 아니라 다른 속도 측정기와 비교를 실시하고 있다. 60개의 치차가 달린 타코미터에 의해서 회전속도는 측정되며, 샘플링 기간동안 1개의 샘플링 에러가 발생할 수 있다. 900 rpm의 회전속도에서 10초 동안 데이터를 샘플링하는 경우 회전속도의 측정불확도는 식 (7)과 같이 0.02%로 산정된다.

$$f_n = \frac{1}{10 \times 60 \times 900 / 60} \times 100 = \pm 0.02\% \quad (7)$$

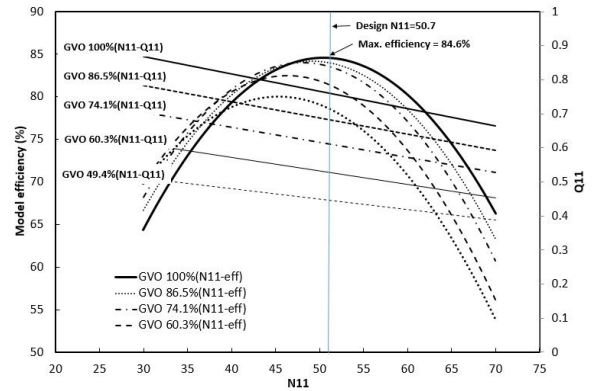
이와 같은 방법으로 측정된 계측기기의 계통불확도 합은 0.35%로 추정할 수 있어, 총 불확도는 우연불확도와 계통불확도의 합성으로 0.39%로 산정되었다.

3. 모델수차 성능시험 결과

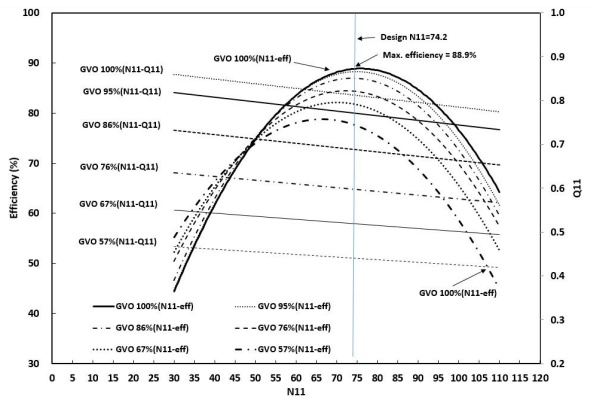
3.1 비속도별 모델수차 효율시험과 무구속 시험

프란시스 모델수차의 효율변화는 가이드베인의 개도율에 따라 변화하며, 본 연구에서는 가이드베인 설계점을 개도율 100%로 설정하고, 가이드베인 개폐율에 따른 효율 및 무구속 시험을 수행하였다.

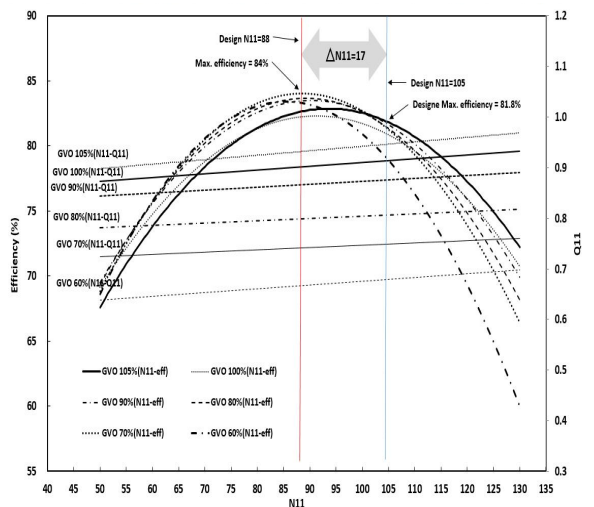
Fig. 4는 비속도 120, 200, 300의 모델수차 형상에 대하여 수행한 시험 결과를 정리한 것이다. 효율 그래프에서 가



(a) Ns 120



(b) Ns 200



(c) Ns 300

Fig. 4 Measurement of the efficiency of the model turbine

로축을 회전수 변수인 N11, 세로축을 효율과 유량으로 표현 하였으며, 무구속 시험에서는 가로축을 회전수로 하고 세로 축을 유량과 Head로 표현하였다.

비속도 120의 경우 최대효율은 가이드베인 개도율 100%, N11=50.7에서 84.6%로 나타났으며, 비속도 200에서는 가이드베인 개도율 100%, N11=74.2에서 88.9% 나타났고, 비속도 300에서는 가이드 베인 70%, N11=84에서 84.0%로 나타났다.

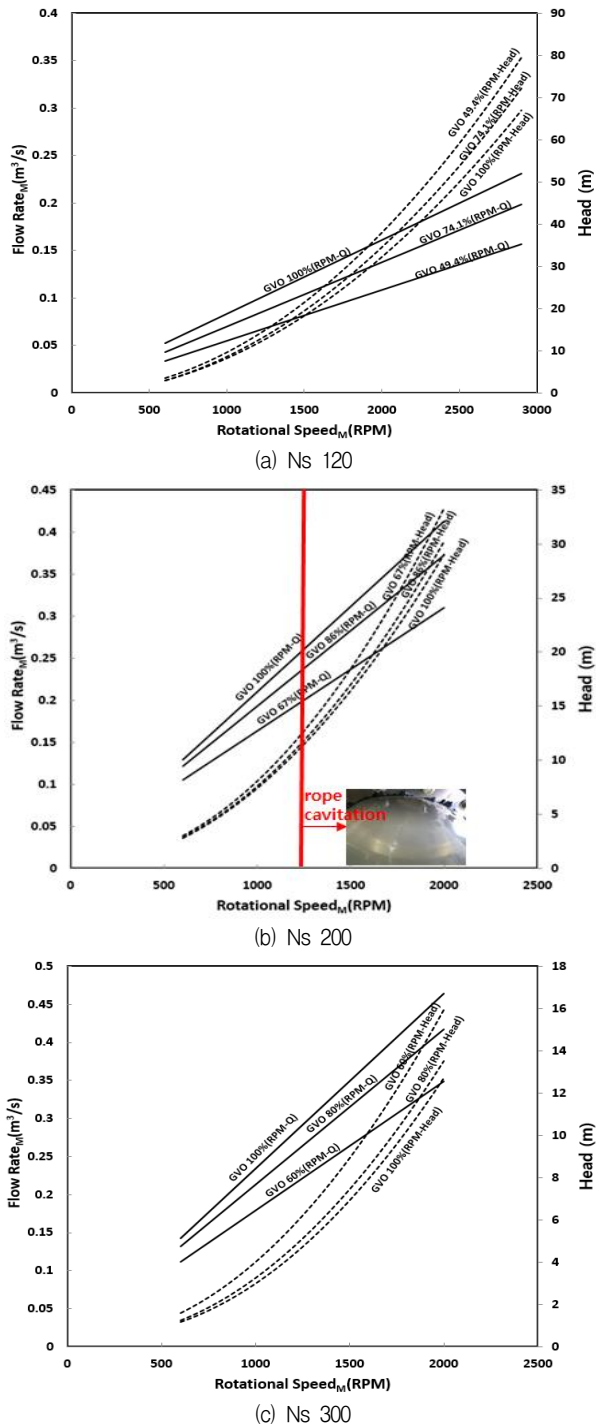


Fig. 5 Results of the runaway test of the model turbine

비속도 300의 경우 설계점인 가이드베인 100%에서 최대 효율이 발생하는 것이 일반적이거나 본 시험에서는 가이드베인 개폐율이 낮은 경우에 최대 효율이 발생하였고, 설계점 N11=105에서 가이드베인 개폐율이 100%로 발생하여 최대 효율 발생점과 설계점에 대한 N11이 약 17의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 설계 시 설계점에서 스테이베인, 가이드베인, 블레이드 사이의 유출각과 유입각과의 불일치로 인한

것으로 사료된다.⁽¹¹⁾

Fig. 5는 유량, 회전수, 낙차에 대한 프란시스 수차의 무구속시험 결과를 나타낸 것이다. 비속도 120의 경우 유량 0.25 m³/s에서 회전수 2,600 rpm, 낙차 48 m로 나타났으며, 비속도 200의 경우 유량 0.45 m³/s에서 회전수 2000 rpm, 낙차 32 m로 나타났고 비속도 300의 경우 0.34 m³/s에서 회전수 1750 rpm, 낙차 14.5 m로 나타났다.

추가적으로 비속도 200의 경우 회전수 1200 rpm이상에서 rope cavitation 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 모델수차 Hill Chart 및 실물수차 환산 Hill Chart

시험에서 취득한 데이터는 모델시험에 대한 성능지표이므로 이것을 실물로 환산하여 표현하는 것이 필요하다. 실물수차의 효율로 환산하기 위하여 IEC 60193 규격에서 제시하는 식 (8)을 사용하였으며 본 식은 모델수차의 효율에 대하여 형상 척도에 따른 손실효율을 고려한 것이다. 손실효율은 식 (9), 식 (10)과 같으며 레이놀즈 수의 함수로 표현된다.

$$\eta_P = \eta_M + (\Delta\eta)_{M \rightarrow P} \quad (8)$$

$$(\Delta\eta)_{M \rightarrow P} = \delta_{ref} \left[\left(\frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{ref}}{Re_P} \right)^{0.16} \right] \quad (9)$$

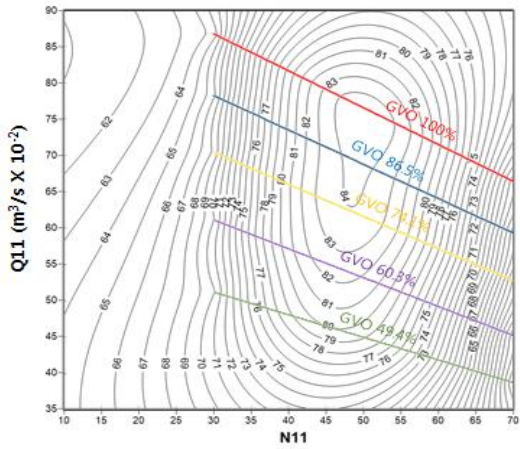
$$\delta_{ref} = \frac{1 - \eta_{opt.M}}{\left(\frac{Re_{ref}}{Re_{opt.M}} \right)^{0.16} - \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \quad (10)$$

여기서, 하첨자 M, P 는 모델과 실물을 나타내며, $Re_{ref} = 7 \cdot 10^6$, $V_{ref} = 0.7$ 이다.

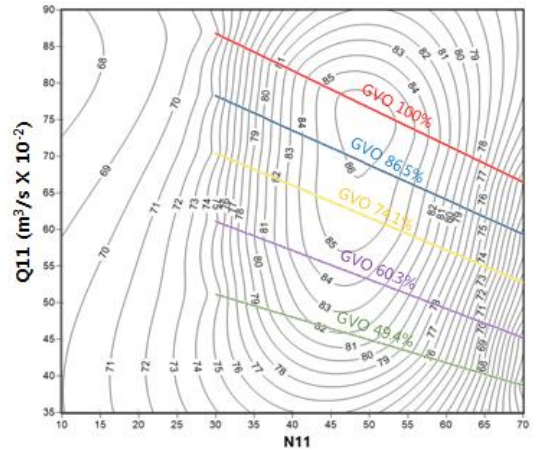
앞서 Fig. 4에서 모델수차의 실측한 데이터에 대하여 N11 변화에 따라 효율곡선을 나타내었다. 이것을 N11, Q11에 대하여 효율곡선을 나타낸 것이 Fig. 6과 같다.

Fig. 6(a)에서와 같이 비속도 120의 경우 N11=50.7, Q11=0.76에서 최대효율 84.6%이 나타났으며, Fig. 7(a)에서와 같이 실물수차로 환산시 최대효율은 86.5%로 계산되어 효율이 1.9%가 증가한 것을 확인할 수 있다.

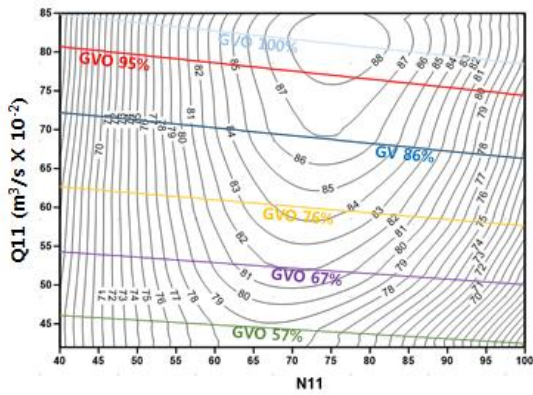
Fig. 6(b)와 같이 비속도 200의 경우 N11=74.2, Q11=0.81에서 최대효율 88.9%이 나타났으며, Fig. 7(b)에서와 같이 실물수차로 환산 시 최대효율은 89.5%로 나타나 효율 0.6%가 증가한 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)와 같이 비속도 300의 경우 N11=88.0, Q11=0.74에서 최대효율 84.0%이 나타났으며, Fig. 7(c)와 같이 실물수차로 환산 시 최대효율은 84.7%로 나타나 효율 0.7%가 증가한 것을 확인할 수 있다. 비속도가 증가할수록 실물수차로 환산 시 적용되는 손실효율의 폭은 감소하는 것을 확인할 수 있다.



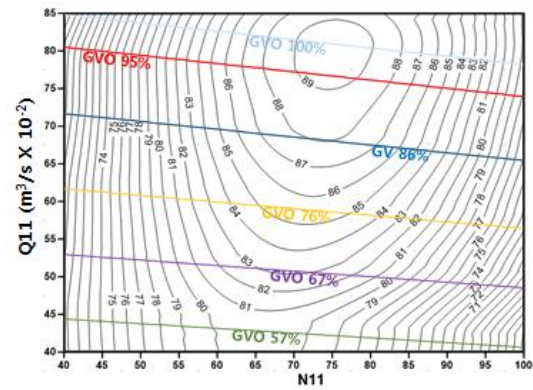
(a) Ns 120



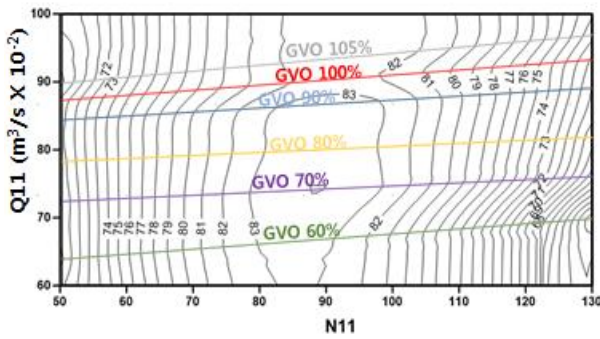
(a) Ns 120



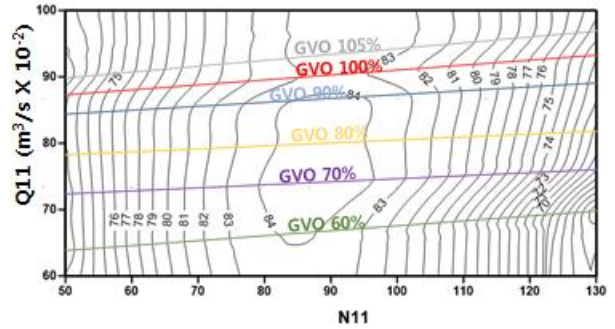
(b) Ns 200



(b) Ns 200



(c) Ns 300



(c) Ns 300

Fig. 6 The model Turbine Hill Chart (N11-Q11-efficiency)

Fig. 7 Prototype Hill Chart (N11-Q11-efficiency) converted from the model turbine results

5. On-Site 수력설비

모델수차의 성능시험은 원형수차 개발에 앞서 수행되는 절차로서 원형수차의 성능을 예측하기 위해 모델을 사용하여 평가하는 방법이다. 본 연구를 통해 수행한 모델 성능시험 데이터를 기반으로 설계, 제작한 원형수차는 현재 K-water M발전소에서 운영되고 있으며, Fig. 8은 기존수차와 실물 수차의 런너를 나타내고 있다.

모델수차 성능시험을 검증하기 위하여 모델수차 성능시험 결과를 활용해 제작한 원형수차를 현장에 설치하여 현장시

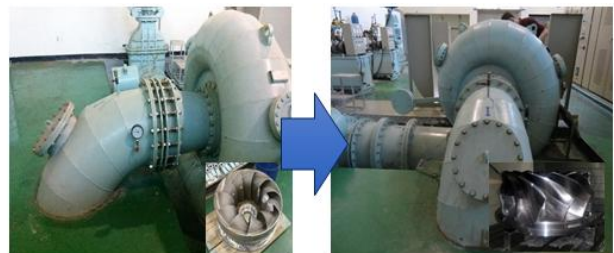


Fig. 8 The old and new prototype turbines

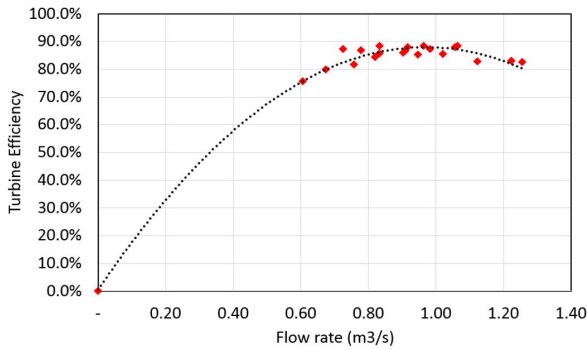


Fig. 9 The prototype turbine on-site efficiency teste result

험을 수행하였다. 현장에 설치된 원형수차는 비속도 130의 수차가 설치되었으며, 현장시험 결과는 Fig. 9와 같이 최고 효율 88.5%로 나타났다. 이는 비속도 120의 모델시험 결과로 예측한 최고효율 86.5%보다 다소 높은 수치를 나타내고 있다. 이는 비속도의 차이에서 오는 효율 차이와 모델 시험과 다르게 현장 시험의 경우 유량, 압력 계측의 오차가 발생할 수 있는 환경적 조건이 큰 데서 오는 차이라 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 프란시스 원형수차 개발을 위해 필요한 모델수차의 성능시험을 비속도 120, 200, 300 형상별로 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비속도별 모델수차 성능시험 결과 비속도 200에서 최대효율 88.9%로 가장 높게 나타났다.
- 2) 프란시스 모델수차 성능시험 결과를 원형수차로 환산 시 최대 효율은 89.5%로 약 0.6%가 증가하였다.
- 3) 모델수차를 기반으로 제작된 원형수차를 현장 설치 후 현장 효율시험결과 모델시험을 통해 예측한 결과보다 다소 높은 88.5%의 효율값을 확인하였다.
- 4) 향후, 본 연구에서 시험하지 않은 영역(비속도 300 초과)의 비속도별 수차모델 성능시험을 통해 추가적 비속도별 수차 특성분석이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 과제번호 20153010060310)

References

- (1) Choi, H. J., Zullah, M. A., Roh, H. W., Ha, P. S., Oh, S. Y., and Lee, Y. H., 2013, "CFD Validation of Performance Improvement of a 500 kW Francis Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 54, pp. 111~123.
- (2) 전진현, 변순석, 최영철, 박준식, 김유제, 2013, "유출각 변화에 따른 프란시스 수차 성능해석", *한국유체기계학회*, 제16권 제 4호, pp. 10~14.
- (3) 김옥삼, 최주석, 김일수, 2005, "프란시스 터빈의 설계조건 변동에 따른 수력학적 특성해석", *한국동력기계공학회*, 제9권 제 3호, pp. 39~43.
- (4) 최주석, 김옥삼, 김일수, 전철균, 문채주, 2005, "소수력발전용 상용 프란시스 수차의 유동해석을 통한 성능개선에 관한 연구", *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 25, No. 3, pp. 19~25.
- (5) Tridon, S., Barre, S., Ciocan, G. D., and Tomas, L., 2010, "Experimental Analysis of the Swirling Flow in a Francis Turbine Draft Tube: Focus on Radial Velocity Component Determination," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 29, No. 4, pp. 321~335.
- (6) Liu, X., Luo, Y., Karney, B. W., and Wang, W., 2015, "A Selected Literature Review of Efficiency Improvements in Hydraulic Turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 18~28.
- (7) Trivedi, C. and Cervantes, M. J., 2017, "Fluid-structure Interactions in Francis Turbines: A Perspective Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 87~101.
- (8) Aggidis, G. A. and Židonis, A., 2014, "Hydro Turbine Prototype Testing and Generation of Performance Curves: Fully Automated Approach," *Renewable Energy*, Vol. 71, pp. 433~441.