

수력플랜트 모델수차 성능시험을 위한 시험설비 적절성에 관한 연구

최종웅*[†] · 조 용* · 홍성택* · 조현식* · 차상훈*

Facility Suitability of Model Turbine Performance Test for Hydraulic Plant

Jong-Woong Choi*[†], Yong Cho*, Sung-Taek Hong*, Hyun-Sik Jo*, Sang-Hoon Cha*

Key Words : IEC 60193(IEC 60193), Model turbine(모델수차), Performance test(성능시험), Hydropower plant(수력플랜트), Facility suitability(설비 적절성), Uncertainty(불확도)

ABSTRACT

Performance evaluation of model turbines in the development of a hydropower plant is critical for determining hydraulic performance. Generally, performance evaluation of a model turbine is performed in accordance with the criteria outlined in IEC 60193, and a facility meeting these criteria is required. However, even with the construction of a facility for testing model turbine performance, a suitable facility for performance evaluation is required. To ensure the reliability of the performance evaluation of the model turbine, the uncertainty of the test is evaluated. For advanced institutes, it is recommended that the total uncertainty be less than 0.25%. Herein, the total uncertainty according to the model turbine performance test was calculated to determine the suitability of the equipment for evaluating model turbine performance. The results of the test performed by an external organization were compared with the results of this study. The results indicated that the total uncertainty was less than 0.25%. The error range of the model turbine test results obtained by the external augmentation system and the results obtained by the turbine test equipment of the vertical axis and the horizontal axis was less than 0.5%. The adequacy of the model turbine performance test facility was thus demonstrated.

1. 서 론

유체기계(펌프, 밸브 수차 등)의 시제품 개발에 따른 성능평가는 개발 시 발생하는 비용과 시간을 절감할 수 있으며, 시제품의 정량적 데이터 및 신뢰성을 확보 할 수 있다. 또한 성능평가 시 발생하는 이상 현상과 원인 분석을 위한 연구 목적으로 활용할 수 있으며, 기존 모델과의 빠른 설계 검증을 통한 기술 발전을 도모 할 수 있다. 그러나 시제품의 성능평가를 위해서는 다양한 계측기기가 설치된 복잡한 성능평가 설비가 요구되며, 성능평가를 목적으로 한 설비에 대한 적절성 연구가 요구된다.

수차발전설비의 성능을 좌우하는 주요 설비는 수차와 발전기이며, 수차의 성능검증을 위하여 모델수차를 제작하여 성능평가를 통해 검증이 이루어진다⁽¹⁻⁴⁾. 또한 전산유체역학

(Computational Fluid Dynamics)를 활용한 수차의 성능평가가 여러 연구자에 의해 수행되었다⁽⁵⁻⁹⁾. 모델수차의 성능시험을 위해서는 성능평가를 위한 설비의 구축이 필요하며, 성능시험 설비의 적절성 평가가 요구된다. 특히, 높은 성능을 갖는 수차 제품을 제작하였으나, 적절하게 구축된 성능시험 설비에서 평가가 이루어지지 않는다면 실물수차의 성능이나 정밀도를 검증하는데 어려움이 발생한다.

본 연구에서는 실물수차의 성능검증을 위한 모델수차의 성능평가 목적으로 구축된 설비의 적절성에 대하여 검토 연구하였다. 모델수차의 설비는 IEC 60193 국제규격⁽³⁾에 따라 설비를 구성하였으며, 모델수차 성능시험 설비의 적절성을 확보하기 위하여 동일한 모델수차에 대한 성능평가를 선진 기관과 비교하였다. 그리고 자체의 성능시험 설비의 신뢰성을 확보하기 위하여 성능시험 불확도를 산출하였다.

* 한국수자원공사(Korea Water Resources Corporation)

† 교신저자, E-mail : jwchoi@kwater.or.kr

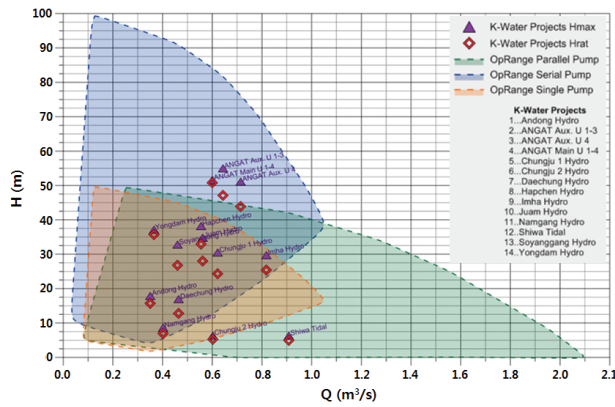


Fig. 1 Head and discharge range for the test rig

2. 모델수차 시험설비

2.1 시험설비의 구성

모델수차 성능시험 설비를 구성하기 위하여 우선적으로 시험 가능범위 내에서 구성되어야 하며, Fig. 1은 K-water 가 국내외 수력플랜트 단일 수차 용량에 대하여 모델수차 성능시험이 가능하도록 설계되었다. 또한 Fig. 2와 같이 CFD를 통하여 선진기관 모델수차 설비의 유로 영역에 대한 결과로써 수차 입구로 유입되는 속도분포를 비교 수행하였으며, 그 결과 유사한 속도분포의 결과를 나타내고 있다. 이는 모델수차 성능시험 시 선진기관의 결과와 유사하게 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 3은 모델수차 성능시험을 위한 설비의 개략도를 나타내었다. 파란색의 회로는 성능시험을 위한 유로이며, 노란색의 회로는 유량에 대한 현장교정을 위한 유로를 나타내고 있다. 펌프의 직렬, 병렬 조합운전으로 양정 100 m, 유량 2.1 m³/s, 발전기의 최대 회전수는 2000rpm까지 모델수차 성능시험이 가능한 범위를 Table 1에 나타내었다. 캐비테이션 시험을 위한 흡입탱크(suction tank)가 설치되어 있으며, 진공시스템과 압축공기 주입 시스템을 사용하여 흡입탱크의 압력을 조절할 수 있다. 유로의 배관망의 연결부위에 따라 수평축, 수직축 모델수차 성능시험이 가능하도록 폐회로로 구성되어 있다. Fig. 4는 모델수차 성능시험을 위한 제어 설비를 나타내고 있으며, 컴퓨터를 통한 펌프 회전수, 유량, 압력, 헤드, 가이드베인 각도 등을 제어 할 수 있다. 그리고 수차의 입구와 출구의 낙차는 펌프의 회전수를 통한 유량제어로 이루어진다.

2.2 모델수차와 계측장비

본 연구에서 적용된 모델수차는 Fig. 5와 같이 수평축으로 설치된 벌브 모델수차, 국내의 남강 수력플랜트(7MW)의 수차

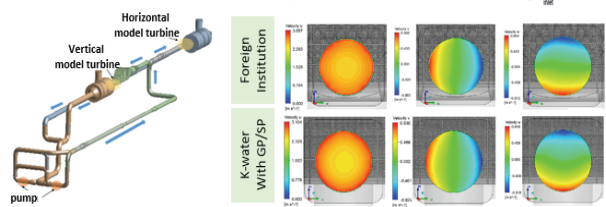


Fig. 2 flow path analysis for Test rig

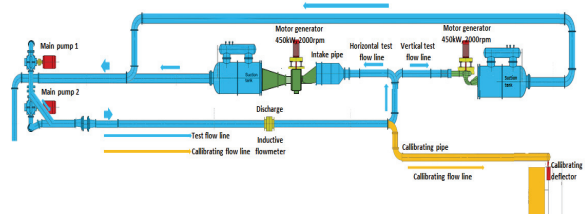


Fig. 3 General layout of test rig

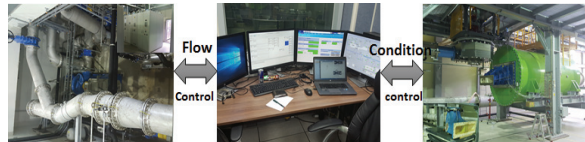
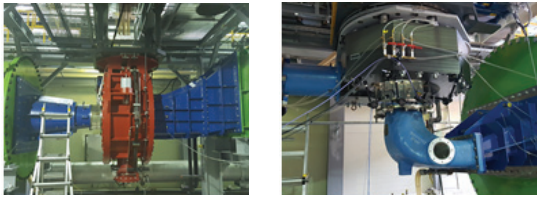


Fig. 4 Control region for test rig

Table 1 Design specifications of test rig

Head(maximum)	100 m
Flow rate(maximum)	2.1 m ³ /s
Generator(maximum)	2,000rpm, 450kW

모델과 수직축으로 설치된 데리아츠 모델수차, 국내의 안동 수력플랜트(45MW)의 수차이다. 벌브 모델수차의 대표직경은 350mm이며, 데리아츠 모델수차의 대표직경은 340mm로 제작되었으며, 가이드베인과 런너의 각도 조절이 가능한 수차이다. 이 대표 직경은 IEC 60193에서 제시하는 대표직경 250mm보다 큰 값을 가지고 있다. Fig. 6은 수직축 모델수차의 성능시험에서 각종 정보를 취득하기 위한 계측장비를 나타내고 있으며, 수평축 모델수차 성능시험의 계측장비는 수직축 모델수차 성능시험의 계측장비와 유사하게 배치 및 사용된다. 계측장비로는 회전 토크, 마찰 힘, 수차 전후의 차압계, 헤드 측정을 위한 압력계, 유량계, 온도계, 가이드베인 각도 측정 장치, 축 스리스트 측정을 위한 차압계, winter-kennedy 측정을 위한 압력계, 용존 산소량 측정을 위한 장치, 특정위치 실시간 압력 측정을 위한 압력계, 회전수 측정을 위한 타코미터 등으로 구성된다. 이 계측기는 신호 증폭기 및 NI 데이터 취득 하드웨어를 거쳐 최종 컴퓨터로 원시 데이터가 기록된다. 기록된 원시 데이터는 IEC 60193에서 제시하는 각종 수식에 의하여 모델시험 항목에 따라 계산이 자동으로 수행된다.



(a) horizontal model turbine (b) vertical model turbine
Fig. 5 Model turbine for suitability validation

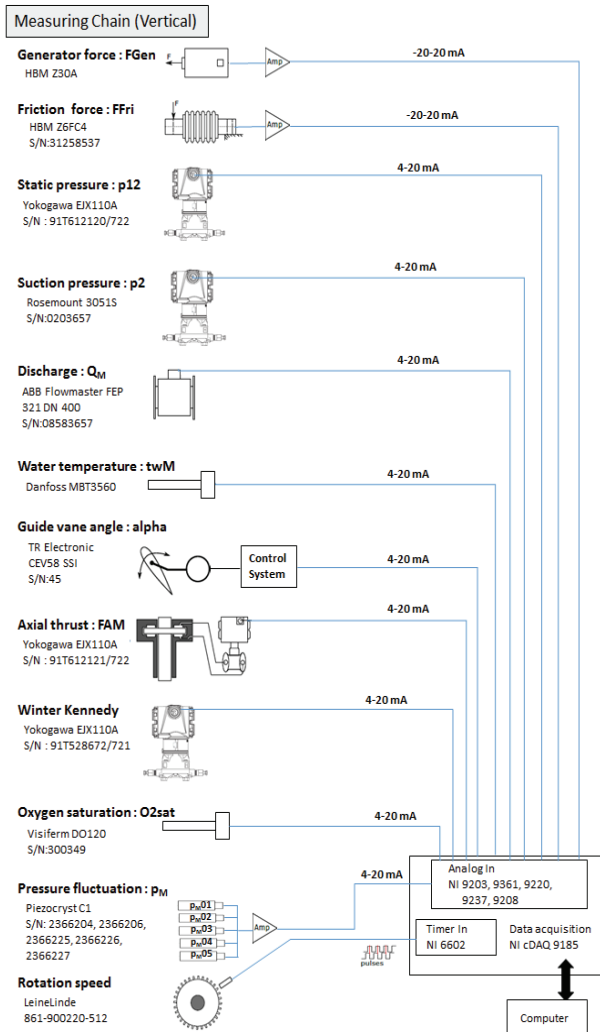


Fig. 6 Measurement instruments for Model turbine performance test

3. 모델수차 시험설비의 적절성 검토

3.1 시험설비의 불확도 산출

모델수차의 시험 결과 정밀도와 측정 장비의 신뢰성을 높이기 위하여 시험 항목 가운데 효율에 대한 불확실성을 도출하였다. 불확실성을 판단하기 위하여 IEC 60193에서는 불확도를 식 (1)~(4)와 같이 산출방법을 제시하고 있다.

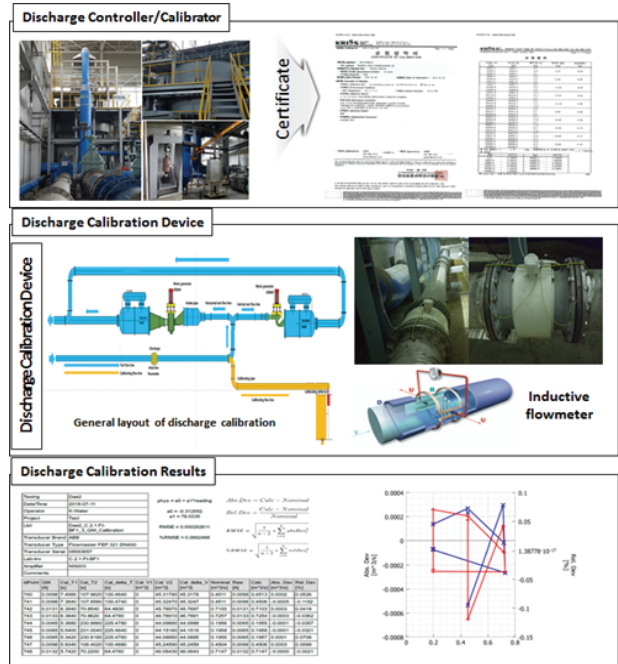


Fig. 7 Calibration process for Measurement instruments (example: discharge)

$$\eta = \frac{T \times w}{\rho g Q H} = \frac{T \times w}{\rho Q E} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{t s_c}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$f_s = \sqrt{(f_Q)_s^2 + (f_E)_s^2 + (f_T)_s^2 + (f_n)_s^2} \quad (3)$$

$$f_t = \sqrt{f_s^2 + f_r^2} \quad (4)$$

여기서, η 는 수력효율, T 는 토크, w 는 회전속도, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, Q 는 유량, H 는 헤드, f_r 은 우연 불확도, t 는 95% 신뢰수준을 갖는 분포값, s_c 는 표준편차, n 은 자유도(시험측정수), f_s 는 계통 불확도, $(f_Q)_s$, $(f_E)_s$, $(f_T)_s$, $(f_n)_s$ 는 유량, 비에너지, 축토크, 회전속도에 대한 각각의 불확도, f_t 는 총 불확도를 나타낸다.

모델수차 성능시험의 주요 항목은 효율, 무구속 속도, 캐비테이션, 축추력, 압력변동, winter-kennedy 이며, 이 시험을 위한 측정 장비로는 압력계, 스트레인 게이지, 토크미터 등의 계측기가 사용되었다. 각각의 계측기 교정을 위하여 교정 기준기를 사용하여 On-site 즉 test-rig에 설치된 상태로 교정이 수행되었다. 이것은 계측기의 단독 교정 이후 설치에 따른 오차를 최대한 줄이기 위함이며, 교정 기준기로는 유량 기준기, 압력 기준기, 무게 기준기가 사용되었으며, 기준기는 별도로 교정 전문기관에 의해 교정이 수행되었다.

Fig. 7은 모델수차 성능시험 설비 유량계의 교정 절차 및 방법에 대한 예로써 나타낸 것이다. 유량 기준기는 K-water에서 보유하고 있는 중량측정 설비를 이용하여 일정시간 등

Table 2 Systematic uncertainty results

	Discharge (QM)	Energy (E)	Torque (TmM)	Speed (nM)
systematic uncertainty	0.177	0.080	0.075	0.076

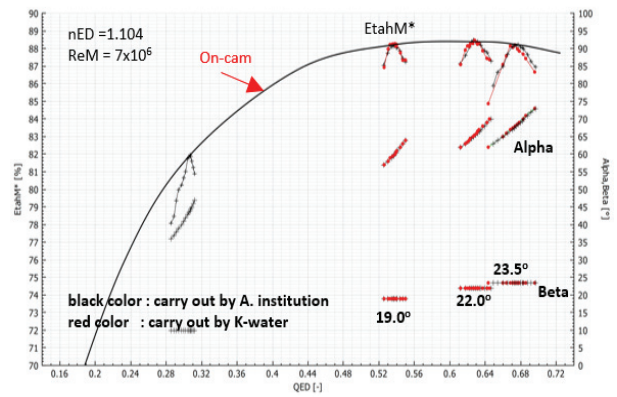
Table 3 Raw data for random error

HM	EM	QM	nM	TmM	Y= EtahM	(SYi)/n-Yi	((SYi)/n-Yi) ²
m	J/kg	m ³ /s	l/min	Nm	%	-	-
5.95	58.35	0.375	1160.7	166.1	92.48	0.0287	0.0008
5.95	58.36	0.375	1160.7	166.1	92.60	-0.0881	0.0078
5.96	58.44	0.376	1160.7	166.2	92.30	0.2070	0.0428
5.95	58.34	0.376	1160.8	166.2	92.50	0.0052	0.0000
5.94	58.30	0.375	1160.7	166.0	92.52	-0.0117	0.0001
5.94	58.30	0.375	1160.8	166.1	92.60	-0.0896	0.0080
5.96	58.41	0.375	1160.8	166.3	92.46	0.0545	0.0030
5.95	58.35	0.376	1160.8	166.2	92.48	0.0349	0.0012
5.95	58.34	0.374	1160.8	166.1	92.76	-0.2510	0.0630
5.95	58.38	0.376	1160.7	166.1	92.40	0.1101	0.0121

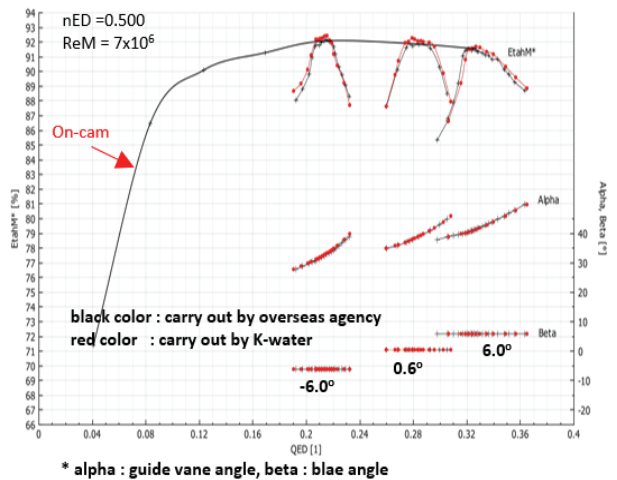
안의 물의 중량을 측정하여 유량계와 비교 교정한다. 중량측정 설비에 사용되는 저장탱크의 불확도는 ±0.035%의 정확도를 가지고 있으며, 저장탱크로 전환되는 데플렉터의 불확도는 ±0.018%이다. 압력 기준기로는 ±0.015%의 불확도를 갖는 Fluke사의 DHI PPC4를 사용하여 압력계를 교정 수행하였다. 그리고 축추력, 토크 등과 같은 힘을 측정하기 위한 스트레인 게이지, 로드 बैं크 등의 계측기는 ±0.012%의 불확도를 갖는 무게 추 기준기에 의하여 교정되었으며, 모델수차 효율 산출을 위한 각 인자의 계통 불확도를 Table 2와 같이 산출하였다.

Table 3은 효율에 대한 불확도를 산출하기 위한 측정 데이터를 표시한 것이다. 최고 효율점에서 10번의 반복 수행하였으며, 효율에 대한 우연 불확도는 IEC 60193의 절차에 따라 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

식 (2)에서 $n = 10$, $(\sum Y_i)/n = 92.51$, $\sum((\sum Y_i)/n - Y_i)^2 = 0.1389$, $s_c = 0.12423$ 이다. 최종적으로 효율에 대한 우연 불확도 $(f_r)_{.95} = \pm 0.096\% < \pm 0.1\%$ 이내의 값으로 도출되었다. 총 불확도는 우연 불확도와 계통 불확도의 합성 불확도로 표현되면 식 (4)에 의해 총 불확도는 ±0.243%로 도출되었다. 세계 최고 수준의 효율에 대한 총 불확도는 ±0.2%로 알려져 있으며, 수력플랜트 선진기관의 제작사들은 효율 성능시험에 대하여 ±0.25%이상의 총 불확도를 갖추고 있다.



(a) horizontal model turbine results



(b) vertical model turbine results

Fig. 8 Efficient results for model turbine

3.2 모델수차의 성능시험 결과 비교

모델성능시험 설비에 대한 적절성을 제시하기 위하여 또 하나의 방법으로 동일 모델수차에 대하여 다른 기관의 성능시험 설비에서 수행한 결과를 비교하는 것이다. 본 연구에서는 선진기관의 성능시험 설비에서 수행한 성능시험 결과 항목 가운데 효율시험, 캐비테이션시험, 무구속 속도 시험, winter-kennedy 시험의 결과를 서로 비교하였다.

Fig. 8은 효율시험에 대한 결과를 비교한 것으로서 검정색은 선진기관, 빨간색은 본 연구에서 수행한 결과이다. 가로축은 무차원 유량인자이며 세로축은 무차원 효율을 나타내고 있으며, 무차원 속도 1.104, $Re=7 \times 10^6$ 에서 시험이 수행되었다. 무차원 속도, 유량은 각각 식 (5), (6)과 같다. Fig. 8(a) 수평축 모델수차(벌브형)의 결과로서 가이드베인과, 러너의 각도 조절이 가능한 이중 조절형 형태를 가지며 최대 효율점은 유량증가 또는 감속에 따라 On-cam 선도상에 위치하게 된다. On-cam 선도는 선진기관에서 수행한 결과이며, 본 연구에서는 가이드베인, 러너 각도 변화에 따른 시험 결과 최대

효율점이 선진기관 결과와 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 효율오차는 선진기관 $\pm 0.25\%$, 본 연구 0.25% 를 가정하여 최대 발생하는 한 오차는 $\pm 0.5\%$ 로서 본 연구에서 수행한 효율 결과는 모두 최대 오차 범위내에 존재하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 수직축 모델수차(테리아즈, 프란시스형)의 결과로서 이중 조절형으로 무차원 속도 0.6, $Re=7 \times 10^6$ 에서 수행된 결과이다. 수평축 모델수차와 유사한 결과가 도출되었으며, 결과 데이터의 효율 오차는 최대 오차 범위 $\pm 0.5\%$ 이내에 존재하는 것을 볼 수 있다.

$$n_{ED} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}} \quad (5)$$

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}} \quad (6)$$

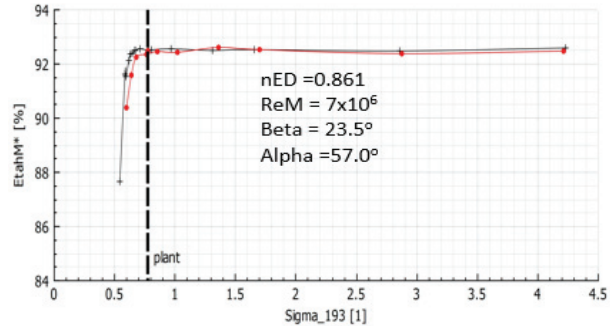
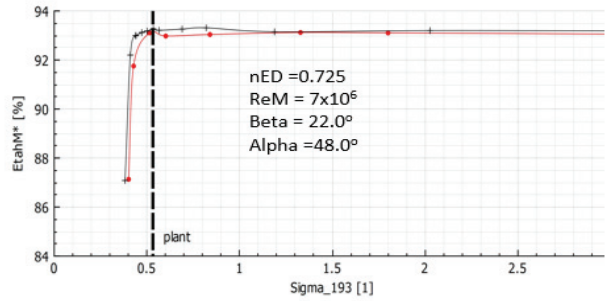
Fig. 9(a), (b)는 수평축, 수직축 모델수차 캐비테이션 성능시험 결과를 각각 비교한 것이다. 가로축은 토마수이며, 세로축은 무차원 효율을 나타내며 토마수는 식 (7)에 정의되어있다. Fig. 9(a)는 회전속도 인자 0.725(가이드베인 각도 22° , 러너각도 48°), 0.861(가이드베인 각도 23.5° , 러너각도 57°) 수행되었으며 선진기관 설비에서 수행된 결과와 유사하게 나타났다. Fig. 9(b)는 회전속도 인자 0.5(가이드베인 각도 6° , 러너각도 41°), 0.584(가이드베인 각도 6° , 러너각도 49°) 수행되었다. 회전속도인자 0.584의 결과는 선진기관의 결과와 효율부분에서 약 1%의 차이를 보이며 이것은 러너 각도 설정 시 약 0.1° 각도 차이 때문에 발생한 것으로 보인다. 또한 캐비테이션이 발생하는 영역에서 일부 오차는 물속에 존재하고 있는 용존산소량에 의하여 차이가 날 수도 있다. 본 연구에서는 물속에 존재하고 있는 용존 산소량이 $4.0mg/l \sim 6.0mg/l$ 에서 수행되었으며, 캐비테이션 성능시험에서는 플랜트 토마수 이하에서 캐비테이션 발생 존재여부가 최대 관심사이다. 본 연구에서는 플랜트 토마수 아래에서 캐비테이션이 발생하는 것을 볼 수 있다. 플랜트 토마수는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{\frac{p_{amb,M} - p_{va,M}}{\rho_M \cdot g_M} - H_{S,M}}{H_M} = \frac{\frac{p_{amb,P} - p_{va,P}}{\rho_P \cdot g_P} - H_{S,P}}{H_P} \quad (7)$$

$$\sigma_P = \frac{\frac{p_{amb,P} - p_{va,P}}{\rho_P \cdot g_P} - (z_r - TWL)}{H_P} \quad (8)$$

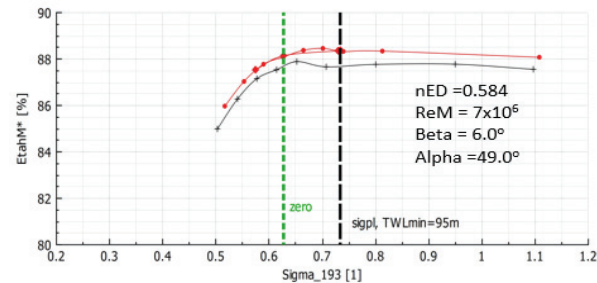
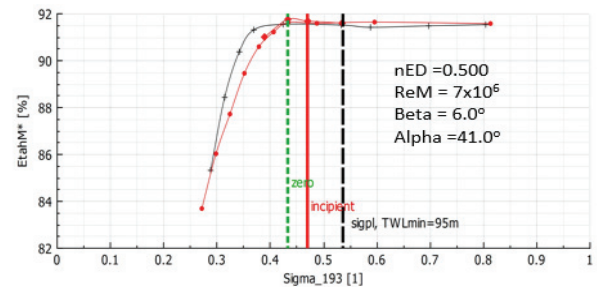
여기서, σ 는 토마수, σ_P 는 플랜트 토마수, 하첨자 M은 모델, P는 실물, p_{amb} 는 대기압, p_{va} 는 증기압, z_r 은 수차의 기준 높이, TWL 는 방수위를 각각 나타낸다.

Fig. 10은 무구속 속도 결과를 나타낸 것이며, 가로축은



* black color : carry out by A. institution
* red color : carry out by K-water

(a) horizontal model turbine results

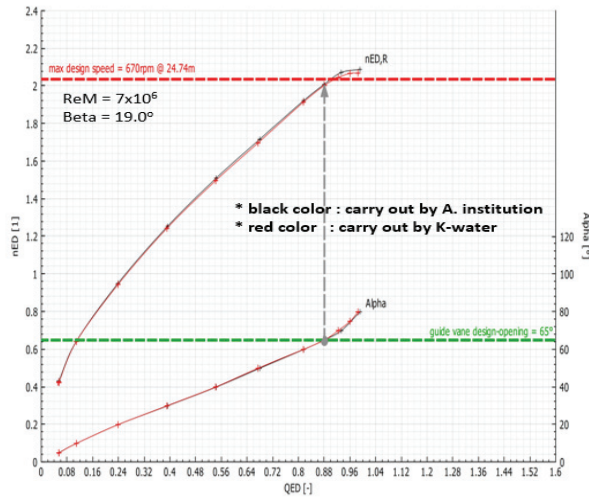


* black color : carry out by A. institution
* red color : carry out by K-water

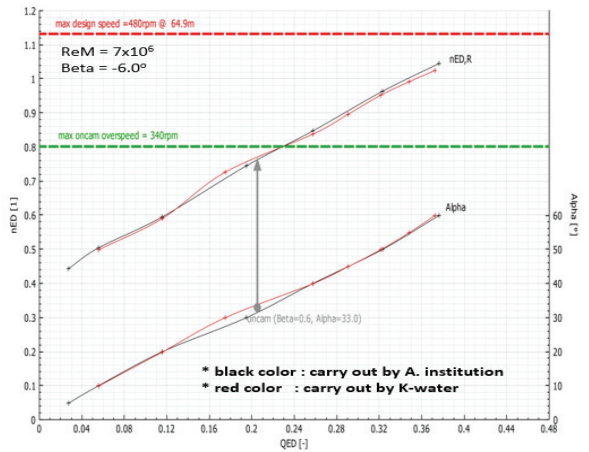
(b) vertical model turbine results

Fig. 9 Cavitation results for model turbine

식 (9) 유량인자, 세로축은 식 (10) 속도인자로 나타낸 결과이다. 선진기관의 설비에서 수행한 결과와 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) horizontal model turbine results



(b) vertical model turbine results

Fig. 10 Runaway speed results for model turbine

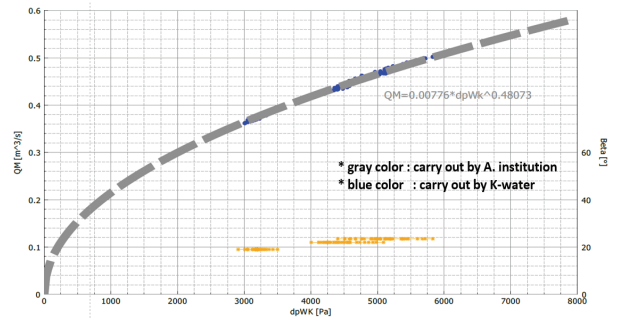
$$Q_{ED,R} = \frac{Q_{R,M}}{D_M^2 \cdot \sqrt{g_M \cdot H_M}} \quad (9)$$

$$n_{ED,R} = \frac{n_{R,M} \cdot D_M}{\sqrt{g_M \cdot H_M}} \quad (10)$$

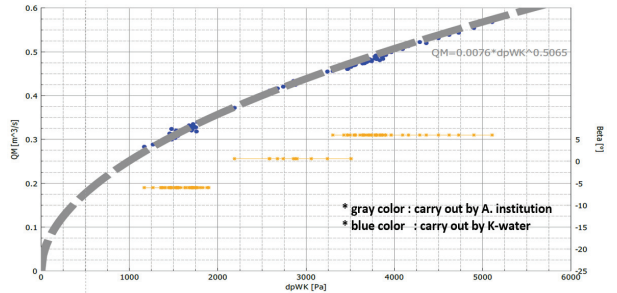
유량은 모델수차의 특정 위치 차압으로서 표현되는 Winter-Kennedy 시험 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 시험을 통하여 k , n 값을 도출하는 것이 주요 목적이며 선진기관 설비에서 수행결과에 의해 k , n 값이 수평축에서는 0.00776, 0.48073, 수직축에서는 0.0076, 0.5065의 값이 도출되었다. 본 연구에서는 식 (11)의 계수 값을 적용한 선상에 결과 값이 표시되는 것을 확인 할 수 있었다.

$$Q = k \cdot \Delta p^n \quad (11)$$

여기서, k , n 은 일반상수이며 일반적으로 n 값은 0.48~0.52의 값을 갖는다.



(a) horizontal model turbine results



(b) vertical model turbine results

Fig. 11 Winter-Kennedy results for model turbine

4. 결론

본 연구에서는 수력플랜트의 모델수차 성능시험 설비의 적절성을 판단하기 위하여 첫 번째로 모델수차 효율에 대한 총 불확도를 0.243% 산출되었으며, 두 번째로는 동일 모델수차에 대하여 선진기관 설비에서 수행한 효율, 캐비테이션, 무구속 속도, Winter-Kennedy 시험결과를 비교하였으며 그 결과가 거의 일치하는 것으로 판단됨에 따라 선진기관 수준의 정밀도를 갖는 설비이며, 향후 모델수차 시험에 대한 데이터 신뢰성을 확보하였다. 그리고 국내의 수력플랜트 수차 개발 시 본 모델수차설비를 활용한다면 수차 개발에 따른 시간, 비용을 저감할 수 있을 것으로 사료되며, 또한 지속적으로 모델수차 성능시험 기술을 제고할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트 연구개발 사업의 연구비 지원 (과제번호 19IFIP-B128598-03)에 의해 수행 되었습니다.

References

- (1) S. H. Cha, J. W. Choi, and S. H. Go, 2017, "Performance prediction of hydraulic model turbine for on-site francis turbine development," Korean Society for Fluid Machinery, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 4,

- pp. 5~11.
- (2) Korean Agency for Technology and Standards, 2002, "Methods for model tests of hydraulic turbine and reversible pump-turbine," KS B 6018.
 - (3) International Electrotechnical Commission, 1999, "Hydraulic turbines, storage pump and pump-turbines model acceptance tests," International standard IEC 60193 second edition.
 - (4) T. Sylvain, B., Stephane, D. C., and Gabriel, T. Laurent, 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, pp. 321~335.
 - (5) H. J. Choi, M. A. Zullah, H. W. Roh, P. S. Ha, and S. Y. Oh, 2013, "CFD validation of performance improvement of a 500 kW francis turbine," *Renewable Energy*, Vol. 54, pp. 111~123.
 - (6) J. H. Joon, S. S. Byeon, Y. C. Choi, J. S. Park, and Y. J. Kim, 2013, "Hydraulic performance of francis turbine with various discharge angles," *Korean Society for Fluid Machinery, THE KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 16, No. 4, pp. 10~14.
 - (7) O. S. Kim, J. S. Choi, and I. S. Kim, 2005, "Analysis of hydraulics power characteristics according to changeable design conditions for francis turbines," *The Korean Society for Power System Engineering, Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 39~43.
 - (8) X. Liu, Y. Luo, B.W. Karney, and W. Wang, 2015, "A selected literature review of efficiency improvements in hydraulic turbines," *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 51, pp. 18~28.
 - (9) C. Trivedi, and M. J. Cervantes, 2017, "Fluid-structure interactions in francis turbines: A perspective review", *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 68, pp. 87~101.