

## CFD에 의한 모델수차 성능시험 불확도 향상을 위한 Test-rig 유동 안정화에 관한 연구

최종웅\*<sup>†</sup> · 조용\* · 조현식\* · 현정재\* · 박성순\* · 김선우\*

### A study on Test-rig Flow Stabilization for Improving Uncertainty of Model Turbine Performance Test by CFD

Jong-Woong Choi\*\*<sup>†</sup>, Yong Cho\*, Hyun-Sik Jo\*, Jung-Jae Hyun\*,  
Seong-Soon Park\*, Sun-Woo Kim\*

Key Words : IEC 60193(IEC 60193), Model Turbine(모델수차), Performance Test(성능시험), Hydropower Plant  
(수력플랜트), Uncertainty(불확도), Swirling Strength(선회류강도), Flow Uniformity(유동 균일도)

#### ABSTRACT

The uncertainty of the model turbine performance test for the hydraulic turbine plant suggests the reliability of the test. In general, the performance evaluation of the model turbine is carried out in accordance with the criteria set out in IEC 60193. In advanced institutes, the total uncertainty is suggested to be less than 0.25%. The uncertainty is expressed as the sum of system uncertainty, the natural error of the instrument, and random uncertainty occurring in the test. In the model turbine performance test facility, a high-precision instrument is used as method to improve the uncertainty, and the uncertainty that comes from repeated test is improved. In model turbine performance test, the uncertainty can be improved by stabilizing the flow of the test rig as much as possible and measuring the necessary values. In this study, CFD was used to stabilize the flow in the test rig to improve the uncertainty in the performance test of the model turbine. Each result was compared and analyzed as an index of swirling strength, head loss and flow uniformity in the flow rate range of 0.1 to 1.0 m<sup>3</sup>/s.

#### 1. 서 론

수력플랜트의 수차에 대한 성능검증은 국제규격 IEC 60193<sup>(1)</sup>에 따라 모델수차 Test-rig에서 성능시험을 통하여 평가가 이루어지고 있다<sup>(2-5)</sup>. 모델수차의 성능시험 항목으로는 효율, 캐비테이션, 무구속 속도, 인덱스등 시험으로 구성된다. 모델수차 성능시험 가운데 가장 중요한 시험 항목 중 하나인 효율은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h}, P_h = E(\rho \cdot Q) \quad (1)$$

여기서,  $P_m$ 은 기계동력(W),  $P_h$ 는 수동력(W),  $E, \rho, Q$ 는

비에너지(J/kg), 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), 체적유량(m<sup>3</sup>/s)을 각각 나타낸다.

효율 성능시험에서, 계측기를 통하여 취득하는 데이터는 압력, 유량, 토크, 회전수 등이 있으며, 특히 유량의 정확한 측정을 통하여 효율의 정확성을 극대화 할 수 있다. 즉 불확도를 최소한으로 산정할 수 있게 되는 것이다. 불확도는 계통 불확도( $f_s$ )와 우연 불확도( $f_r$ )의 총 합으로 식 (2)와 같이 표현되며, 통 불확도는 시험시 활용되는 다양한 계측기기에서 발생하는 것으로 IEC 60193에서는 식 (3)과 같이 정의된다.

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

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

\* 한국수자원공사 (K-water Convergence Institute, Korea Water Resources Corporation)

† 교신저자, E-mail : jwchoi@kwater.or.kr

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

Abbas 등<sup>(6)</sup>은 문헌 조사에서 유량, 비에너지, 토크, 회전속도에 대한 시스템 불확도와 최고 효율점에서 우연 불확도를 각각  $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\%$ ,  $\pm 0.1 \sim 0.2\%$ ,  $\pm 0.15 \sim 0.25\%$ ,  $\pm 0.01 \sim 0.05\%$ 와  $\pm 0.1\%$ 이하로 제시하여 총 불확도를 0.25% 이하로 제시하였다.

이러한 측정값은 유량 변수에 지배적이다. 그러므로 정확한 유량을 측정하기 위하여 정밀한 유량계측도 중요하지만 무엇보다도 설비의 유로를 안정화하여 유량의 변동이 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 모델수차 성능시험의 불확도 향상을 위한 Test-rig 내 유동을 안정화하기 위한 Guide plate(이하 G/P), Straightener(이하 ST), Test rig와 모델수차 연결부에 대하여 개수, 형태, 각도를 각각 달리하여 전산해석을 수행하였다. 그 결과 G/P-4EA, Straight type ST, 7°이하의 연결부 적용이 Test-rig 내에서 발생하는 유동을 가장 안정화시킨다.

## 2. 모델수차 시험을 위한 Test-rig의 구성

그림 1은 본 연구를 수행하기 위한 모델수차 성능시험 설비의 배관내 물 흐름도를 나타낸 것이다. 노란색으로 표시된 부분은 유량계 On-Site 교정을 위하여 별도로 구성된 배관이다. 모델수차 Test-rig는 펌프의 병렬, 직렬 조합순전에 따라 최대 유량 2.1m<sup>3</sup>/s, 최대 낙차 100m까지 가능하도록 구성되어 있으며, 발전기의 최대 회전 속도는 2000rpm이다. 그림 2는 모델수차 성능시험을 위한 유입배관(inflow pipe)과 회수배관(return pipe)로 구분한 것이다. 유입배관은 펌프 출구에서 모델수차 입구까지의 배관을 나타내며, 회수배관은 수차 출구(드래프트 출구)에서 펌프 입구까지의 배관을 나타낸 것이다. 모델수차의 성능은 수차로 유입되는 유동특성이 지배적으로 작용함으로 유입배관의 구성이 무엇보다 중요하다. 그러므로 유입배관에는 유동 안정화를 위하여 G/P와 ST가 일반적으로 설치되어 있다.

### 2.1 유동 안정화를 위한 G/P, ST, 연결부의 형상

그림 3은 모델수차 성능시험 설비의 유동 안정화를 위하여 적용된 G/P와 ST를 나타내고 있다. G/P의 역할은 배관의 곡관 형상에서 발생하는 와류 또는 선회류 흐름을 유로방향으로 부드럽게 흐름을 유도하는 장치이며, ST는 이 와류나 선회류를 직선류로 유도하는 역할을 한다. G/P는 유입배관에서 펌프의 출구측과 수차의 입구측 두 지점에 설치되어 있으며, 본 연구에서는 유동안정화를 위하여 G/P의 개수에 따라 수행하였다. ST는 G/P 후단에 설치되고, 총길이는

500mm를 갖는 straight type과 20mm의 길이로 양쪽에 설치된 separated type의 형상에 대하여 수행되었다. Test-rig와 모델수차를 연결하기 위한 연결부는 그림 4와 같이 연결부 입구부에서 출구부의 흐름 안정화를 위하여 연결부 각도를 3°~14°에 대한 형상을 적용하여 비교·검토 하였다.

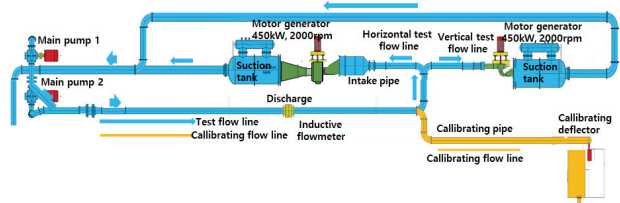


Fig. 1 water flux in the Test-rig for the model test

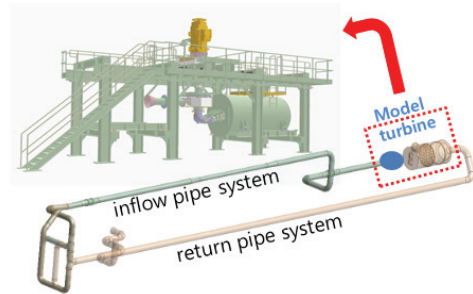


Fig. 2 inflow and return flow pipe for the model test

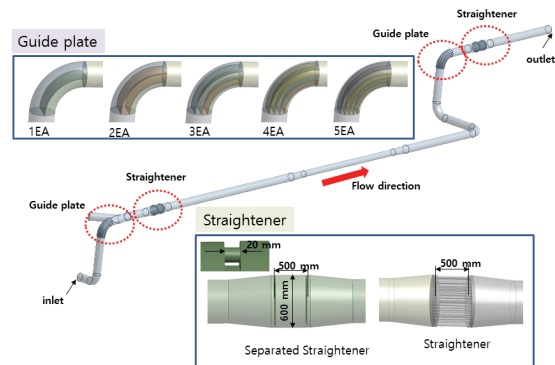


Fig. 3 Guide plate and straightener in the inflow pipe

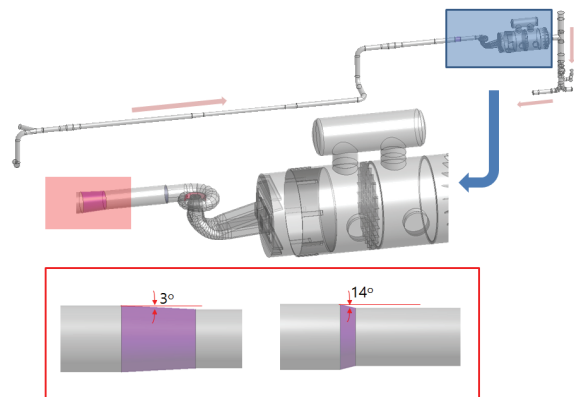


Fig. 4 Connecting part between Test-rig and model turbine

2.2 유동 안정화 평가지표와 해석적 접근 방법

수차에서 와류의 발생은 수차 효율에 큰 영향<sup>(7)</sup>을 미친다. 특히 와류의 거동과 불균일한 유동특성은 정확한 효율 측정에 어려움을 야기시키고 불확도 값을 증가시킨다. 그림 5는 모델수차 성능시험 설비 유입배관의 유량 0.5m<sup>3</sup>/s 조건에 대한 유동해석 결과를 나타낸 것이다. 각각 G/P, ST를 적용한 경우 후단에서 발생하는 선회류가 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 G/P, ST의 영향을 평가하기 위하여 정량적인 지표를 vortex core swirling strength 값으로 비교하였다. 유동장의 속도구배텐서를 매트릭스로 표현하면 식 (4)와 같다. 식 (4)의 gradient tensor를 만족하는 고유치는 식 (5)이며, 이것은 실수부( $\lambda_r$ ), 복소수( $\lambda_{cr} \pm \lambda_{ci}$ ) 해를 가지며 식 (6), (7), (8)과 같이 구할 수 있다. 이 식에서 식(8)이 국부적인 선회류 거동의 강도인 선회류 강도(swirling strength)이다.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (5)$$

$$\lambda_r = \bar{\zeta}_1 - \bar{\zeta}_2 - \frac{P}{3} \quad (6)$$

$$\lambda_{cr} = -\frac{\bar{\zeta}_1 - \bar{\zeta}_2}{2} - \frac{P}{3} \quad (7)$$

$$\lambda_{ci} = \frac{\bar{\zeta}_1 + \bar{\zeta}_2}{2} \sqrt{3} \quad (8)$$

여기서,  $\bar{\zeta}_1 = \sqrt{\sqrt{\Delta} - \frac{r}{2}}$ ,  $\bar{\zeta}_2 = \sqrt{\sqrt{\Delta} + \frac{r}{2}}$ ,  $\Delta \equiv (\frac{1}{2}r)^2 + (\frac{1}{3}q)^2 > 0$ 으로 정의한다.

표 1은 모델수차 성능시험 설비의 유입배관내 G/P, ST를 미설치한 경우에 대한 유량조건 0.1~1.0m<sup>3</sup>/s의 선회류 강

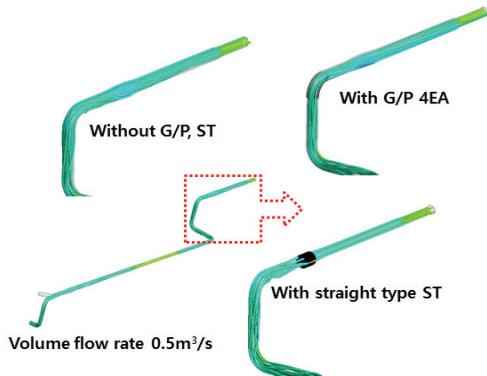


Fig. 5 flow characteristics of in the inflow pipe at 0.5m<sup>3</sup>/s

Table 1 Min. and Max. value of swirling strength at the outlet plane without G/P, ST

Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Swirling strength [1/s]	
	Maximum	Average
0.1	1.9883	0.1548
0.3	5.9293	0.4318
0.5	9.8039	0.6904
0.8	15.5720	1.0706
1.0	19.4020	1.3152

도를 전산모사를 통하여 유입배관 출구단면(수차의 입구)에서의 최대값과 평균값을 구한 것이다. 이 값은 G/P와 ST 설치한 경우의 결과값과 비교하기 위한 대표값으로 사용하였다.

연결부 각도에 따른 유동 영향을 파악하기 위한 지표로 입구와 출구의 전압력차(압력손실)와 출구에서의 유동 균일도로 비교하였다. 압력차이는 일반적으로 흐름내 와류나 흐름의 교란이 발생하는 경우 증가한다. 또한, 와류나 교란이 발생하는 경우, 유동 균일도 값은 감소한다. 유동 균일도는 식 (9)와 같이 Weltens<sup>(8)</sup>가 제안한 지표를 사용하였다.

$$\gamma = 1 - \sum_{i=0}^N \frac{|\nu_i - \bar{\nu}|S}{2|\bar{\nu}|S_i} \quad (9)$$

여기서,  $\nu_i$ 는 국부 유속(m/s),  $\bar{\nu}$ 는 평균 유속(m/s),  $S$ 는 단면적(m<sup>2</sup>),  $S_i$ 는  $i$ 의 국부 단면적(m<sup>2</sup>)을 나타낸다.

수치해석적 접근 방법은 ANSYS 사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX<sup>(9)</sup>를 사용하여 해석을 수행하였다. 계산 격자는 G/P, ST 단일요소 전산해석인 경우 944,000 노드(3,706,000 elements, G/P-5EA), 3,833,000 노드(10,004,000 elements, straight type ST)가 사용되었으며, 결합요소 전산해석인 경우 4,354,000 노드(12,258,000 elements)가 사용되었다. 격자 형태는 tetra-hedra type와 벽면 근처의 wedges type의 격자를 사용하였다. 그리고 Test-rig와 모델수차 연결부 해석의 경우 612,000 노드가 사용되었다. 격자 형태는 hexa-hedra type을 적용하였다. 작동유체로는 25°C의 물을, 경계조건으로는 입구에는 유량, 출구에는 압력 조건을 적용하였으며, 벽면 조건은 no-slip condition을 적용하였다. 연결부 전산해석을 위한 난류모델은 sublayer 영역을 직접 계산하는 SST(Shear Stress Transport) 난류모델<sup>(10)</sup>을 적용하였으며, 그 외의 모델에는 scalable 벽법칙을 사용하는 standard  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 정상상태 계산을 수행하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 G/P 개수, ST type에 따른 결과 비교

표 2와 3은 모델수차 성능시험 설비의 유입배관내 G/P 개수 1~5개를 적용한 outlet plane에서 최대, 평균 선회류 강도 값을 나타내고 있다. 유량이 증가할수록 선회류 강도 최대, 평균값은 증가하며, G/P의 개수가 증가할수록 최대값은 감소하며, 평균값은 저유량 0.1, 0.3m<sup>3</sup>/s에서는 4개까지는 감소하다가 5개에서 증가하였다. 유량 0.5, 0.8, 1.0 m<sup>3</sup>/s에서는 3개까지는 감소하다가 4개부터 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이 값을 식(9)와 식(10)과 같이 G/P, ST가 미설치된 경우를 기준값으로 하여 그림 6과 같이 비율로서 나타내었다. 그림 6(a)는 최대 선회류 강도 비율이며 5개의 G/P에서 가장 낮은 값을 갖는다. 그러나 그림 6(B)의 평균 선회류 강도에서는 4개의 G/P를 적용한 경우가 가장 낮게 나타났다. 평균값은 각 계산점의 선회류 강도 값을 가지고 산술평균하였으며, 최대값은 모든 계산점에 대한 최대값을 사용하였다. 이값은 G/P 개수에 따른 상대적으로 높고 낮은 값을 평가하기 위하여 사용되었다. 이 결과로부터 G/P의 개수는 4개 이상을 사용하는 것이 유동 안정화에 가장 적절한 것으로 판단되며, 제작성을 고려하면 G/P가 4개를 적용하는 것이 가장 적절하다고 판단된다.

$$\lambda_{ratio,max} = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{ref,max}} \quad (9)$$

$$\lambda_{ratio,avg} = \frac{\lambda_{avg}}{\lambda_{ref,avg}} \quad (10)$$

여기서,  $\lambda_{ref,max}$ ,  $\lambda_{ref,avg}$ 는 G/P, ST가 미설치한 경우의 선회류 강도 최대값과 평균값이며,  $\lambda_{max}$ ,  $\lambda_{avg}$ 는 G/P, ST를 적용한 경우의 최대값과 평균값이다.

표 4는 유입배관내 straight type과 separated type ST를 적용한 경우의 outlet plane에서의 선회류 강도 최대값과 평균값을 나타낸 결과이다. 유량이 증가할수록 선회류 강도 최대값과 평균값은 증가하며, straight type ST가 최대와 평균 선회류 강도 값이 separated type ST 보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 ST가 미설치된 결과를 기준값으로하여 비율로 나타낸 그래프이다. 유량 0.1~1.0 m<sup>3</sup>/s 범위에서 straight type ST가 선회류 강도 최대, 평균값이 낮게 나타났으며, 기준값(G/P, ST 미설치) 대비 최대값에서는 50%, 평균값에서는 70%의 감소 경향이 나타났다.

Head loss는 유입배관의 손실을 나타내는 하나의 지표이며, 식(11)과 같이 정의된다. 그림 8은 G/P, ST의 미적용, G/P의 개수, ST의 형태에 따른 head loss를 결과로 나타낸 것이다. G/P의 개수가 증가할수록 head loss는 증가하며

G/P-5EA 경우, 유량 1.0 m<sup>3</sup>/s에서 2.63m까지 증가한다. 또한 유량이 증가할수록 head loss가 증가하는 것을 볼 수 있다. ST 형태에 따라 straight type ST가 separated type ST보다 head loss가 낮게 나타났다. 유량 1.0 m<sup>3</sup>/s에서 straight type ST과 separated type ST이 head loss는 각각 16.87m, 24.63m로 나타났다. 이러한 head loss는 모델수차 성능시험 설비의 유량제어에 사용되는 펌프의 용량 결정에 사용된다.

$$\Delta h_t = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (11)$$

여기서,  $\Delta p$ 는 유입배관 입구, 출구의 압력차(Pa)이며,  $\rho$ 는 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $g$ 는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)이다.

Table 2 Max. swirling strength value according to G/P number

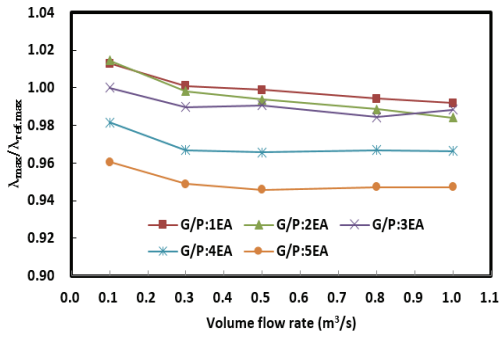
Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Swirling strength[1/s]				
	1EA	2EA	3EA	4EA	5EA
0.1	2.0141	2.0171	1.9883	1.9515	1.9096
0.3	5.9346	5.9192	5.8682	5.7324	5.6257
0.5	9.7931	9.7431	9.7127	9.4676	9.2735
0.8	15.4801	15.3929	15.3275	15.0566	14.7498
1.0	19.2429	19.0954	19.1769	18.7501	18.3795

Table 3 Avg. swirling strength value according to G/P number

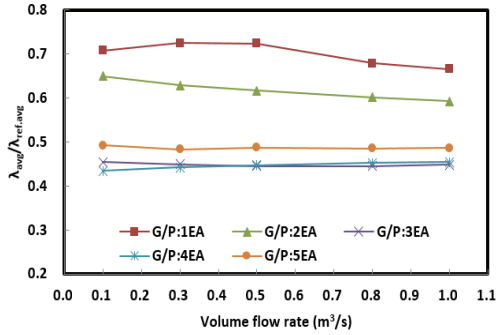
Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Swirling strength[1/s]				
	1EA	2EA	3EA	4EA	5EA
0.1	0.1096	0.1006	0.0704	0.0673	0.0762
0.3	0.3129	0.2716	0.1938	0.1912	0.2088
0.5	0.4996	0.4261	0.3074	0.3088	0.3367
0.8	0.7270	0.6445	0.4773	0.4840	0.5194
1.0	0.8753	0.7792	0.5896	0.5972	0.6398

Table 4 Swirling strength value according to ST type unit : 1/s

Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Straight type		Separated type	
	Max.	Avg.	Max.	Avg.
0.1	1.0880	0.046	1.8819	0.0680
0.3	3.0649	0.1191	5.5552	0.2715
0.5	4.9804	0.1863	9.1666	0.4466
0.8	7.8094	0.2821	14.5770	0.7642
1.0	9.6700	0.3456	18.1680	0.9621

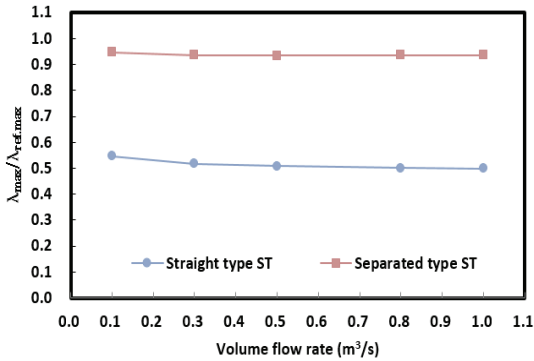


(a) Maximum swirling strength ratio

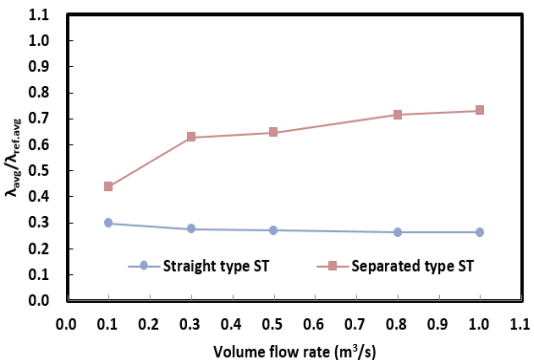


(b) Average swirling strength ratio

Fig. 6 Max&Avg swirling strength ratio according to the number of G/P at the outlet plane



(a) Maximum swirling strength ratio

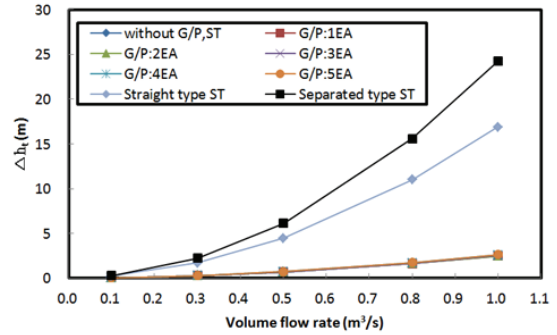


(b) Average swirling strength ratio

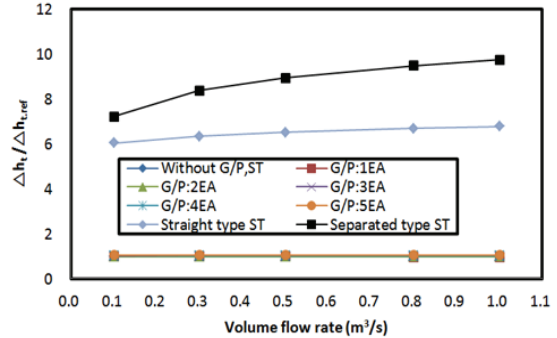
Fig. 7 Max&Avg swirling strength ratio according to the ST type at the outlet plane

### 3.2 Straight type ST G/P-4EA와 separated type ST G/P-2EA 결과 비교

Test-rig에는 그림 9와 같이 separated type ST와 G/P-2EA가 설치되어 있다. 앞선 결과로부터 동일한 위치에 straight type straightener와 G/P-4EA가 설치된 경우 선회류 강도와 head loss 값을 비교하였다. 표 4는 straight type ST, G/P-4EA와 separated type ST, G/P-2EA를 적용한 유입배관의 출구에서 측정된 선회류 강도 최대값과 평균값을 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 선회류 강도 최대, 평균값은 증가한다. 전체 유량 범위에서 straight type ST, G/P-4EA의 선회류 강도 값이 상대적으로 낮게 나타났다. 그림 10은 ST, G/P 미설치된 경우의 값을 기준으로 최대값과 평균값을 나타낸 그래프이다. straight type ST,



(a) Head loss



(b) Head loss ratio

Fig. 8 Head loss with/without G/P and ST

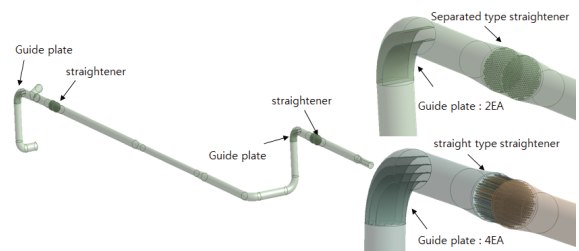


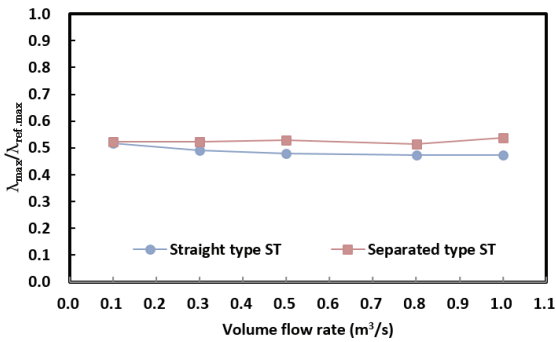
Fig. 9 Installed G/P and ST in the Test-rig



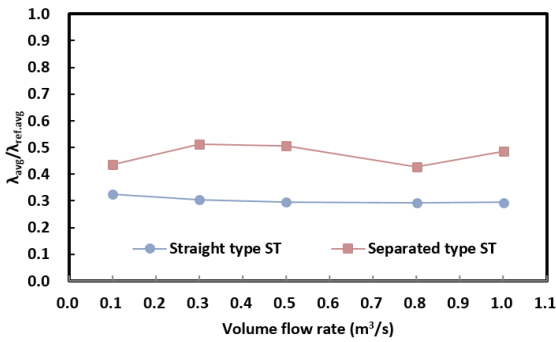
Table 5 Max&avg swirling strength value according to type of the G/P and ST

unit : 1/s

Flow rate [m <sup>3</sup> /s]	Straight type ST G/P : 4EA		Separated type ST G/P : 2EA	
	Max.	Avg.	Max.	Avg.
0.1	1.0279	0.0502	1.0413	0.0673
0.3	2.9040	0.1310	3.0961	0.2210
0.5	4.7101	0.2045	5.1723	0.3492
0.8	7.3859	0.3125	8.0323	0.4581
1.0	9.1822	0.3864	10.4214	0.6397



(a) Maximum swirling strength ratio

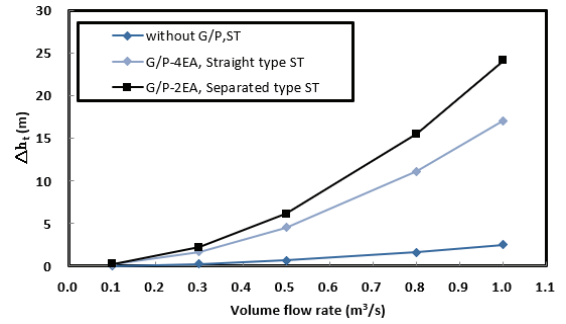


(b) Average swirling strength ratio

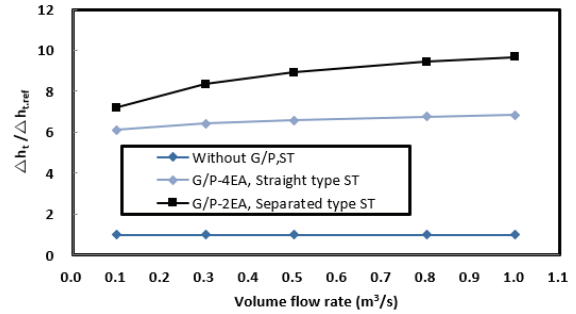
Fig. 10 Max&Avg swirling strength ratio according to the G/P, ST

G/P-4EA의 값이 전체 유량에 걸쳐 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 Test-rig의 유동 안정화에 좀 더 효과적인 것을 알 수 있다.

그림 11은 ST, G/P 미설치, straight type ST, G/P-4EA와 separated type ST, G/P-2EA에 대한 head loss를 비교한 것이다. 체적유량 0.1~1.0m<sup>3</sup>/s 범위에서 separated type ST G/P-2EA의 head loss가 가장 높게 나타났으며, 유량 1.0 m<sup>3</sup>/s에서는 straight type ST, G/P-4EA보다 약 7m 높게 나타났다. Separated type ST, G/P-2EA와 straight type ST, G/P-4EA 적용에 따른 수차의 효율 변화를 확인하기 위하여 그림 12와 같이 유입배관 해석 결과(체



(a) Head loss



(b) Head loss ratio

Fig. 11 Head loss and ratio according to the G/P, ST

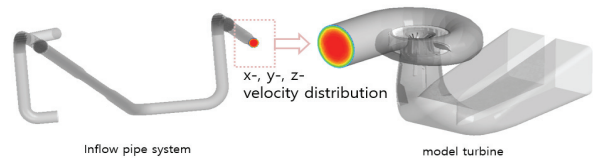


Fig. 12 Inlet velocity extraction in the outlet

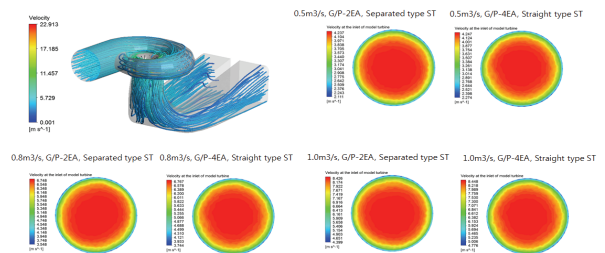


Fig. 13 Inlet boundary conditions of hydraulic model turbine

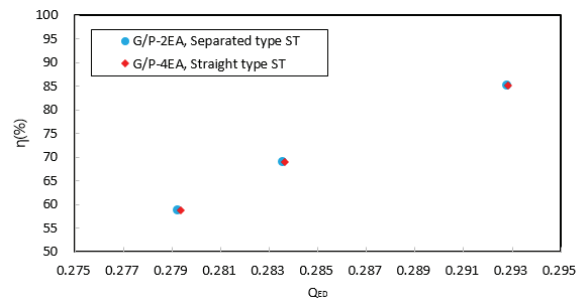


Fig. 14 Efficiency comparison of model turbine

적유량 0.5, 0.8, 1.0 m<sup>3</sup>/s)에서 outlet의 x, y, z의 속도를 추출하여 모델수차 해석을 위한 입구 조건으로 적용하였다. 그림 13은 입구 경계조건으로 적용한 속도분포를 나타내었으며, 거시적으로 G/P와 ST의 동일 유량에서는 유사하게 나타났다. 전산모사를 수행하기 위한 러너의 회전수 설정은 Re=7,000,000에 해당하는 값을 적용하였으며, 스파이럴케이스, 스테이/가이드베인, 러너, 드래프트 튜브를 포함하는 모델수차를 대상으로 격자수 약 900만 노드 수, k-ε 난류모델을 사용하여 수행하였다.

그림 14는 식(12)의 유량 인자에 대한 효율을 나타낸 결과이다. 동일한 유량 인자에서의 효율값은 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, separated type ST, G/P-2EA와 straight type ST, G/P-4EA 적용에는 효율 변화가 거의 없는 것으로 판단된다.

$$Q_{ED} = \frac{Q_m}{D_m^2 \times (E_m)^{0.5}} \quad (12)$$

여기서,  $Q_m$ 은 유량(m<sup>3</sup>/s),  $D_m$ 은 대표직경(mm, 350mm 적용),  $E_m$ 은 비에너지(J/kg)이다.

### 3.3 모델수차 유입 연결부 각도에 따른 유동 안정성

그림 15는 모델수차 유입 연결부 전산모사를 위하여 적용한 SST 난류모델의 공간 격자 분포의 적절성을 판단하기 위한  $y^+$ 를 유량에 따라 나타낸 결과이다. 유입 체적유량 0.2m<sup>3</sup>/s에서는  $y^+$ 의 최대값이 0.423, 0.5m<sup>3</sup>/s에서는  $y^+$ 의 최대값이 0.380, 0.8m<sup>3</sup>/s에서는  $y^+$ 의 최대값이 0.579로서 모두 1이하의 값을 갖으며, 본 연구에서는 SST 난류모델 적용에 적절한 것으로 판단된다.

그림 16은 체적유량 0.2, 0.5, 0.8m<sup>3</sup>/s에서 연결부 각도 3°~14°에 대한 유동균일도와 전압차를 나타낸 것이다. 체적 유량 0.2m<sup>3</sup>/s에서 유동균일도는 각도가 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이것은 각도가 증가할수록 형상에 의한 와류 발생으로 유동장 내부에 교란이 발생함을 의미한다. 빨간색으로 표현한 것은 그래프에서 선형으로 나타나는 데이터를 확장한 것이다. 각도 8°에서 변곡점이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이 각도를 기점으로 유동 균일도가 상대적으로 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 체적 유량 0.5, 0.8m<sup>3</sup>/s의 특성은 0.2m<sup>3</sup>/s와 동일한 경향이 나타났다. 유량에 따른 압력손실은 유동균일도와 경향이 유사한 8°에서 변곡점이 나타났다. 이것으로 각도 7° 이내의 연결부 사용이 효율적임을 알 수 있다. 그림 17은 Test-rig와 모델수차 사이에 연결부가 설치된 성능시험 설비 사진이며 각도는 3.85°를 적용하였으며, 향후 모델수차 성능시험을 수행할 예정이다.

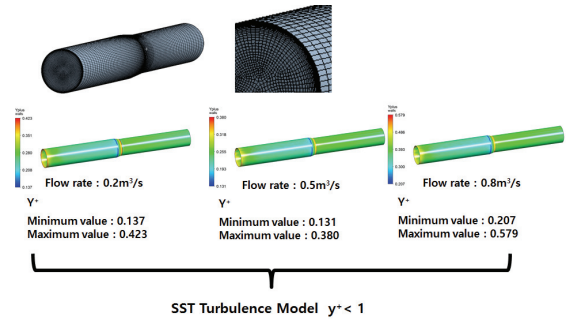
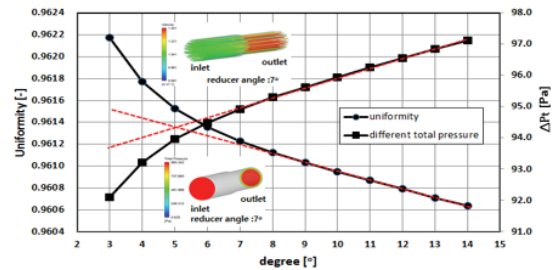
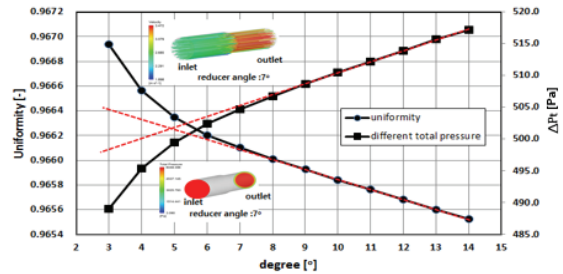


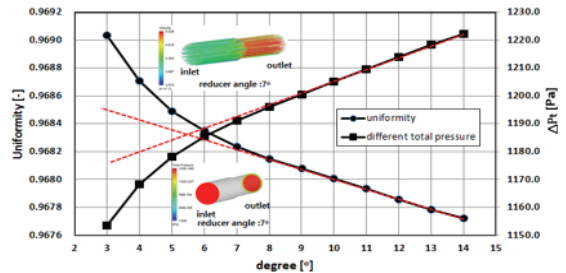
Fig. 15  $y^+$  distribution at the wall



(a) flow rate 0.2m<sup>3</sup>/s



(b) flow rate 0.5m<sup>3</sup>/s



(c) flow rate 0.8m<sup>3</sup>/s

Fig. 16 Efficiency comparison of model turbine

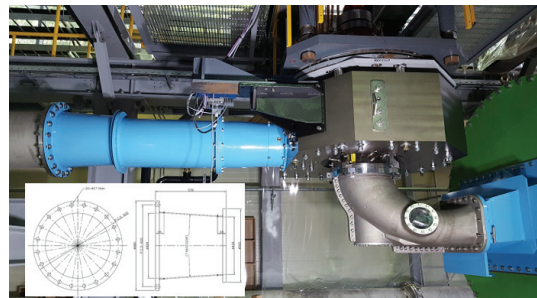


Fig. 17 Installed connecting-part in the Test-rig

#### 4. 결 론

본 연구에서는 모델수차 성능시험의 불확도 향상을 위한 Test-rig내의 유동을 안정화하기 위하여 설치되는 guide plate 개수와 straightener 형태, test-rig와 모델수차의 연결부 각도에 따른 유동해석을 수행하였다. 이상의 결과로부터 straight type ST, G/P-4EA적용이 Test-rig 내 유동 안정화 측면에서 안정적이므로 불확도 측면에서 효율적이다. 모델수차와 test-rig 연결부의 각도는 내부 유동 변화를 최소화하기 위하여 7° 이하의 형상을 사용하는 것이 효율적이며 향후 모델수차 성능시험의 유동안정화를 위하여 3.85°를 적용하였다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트 연구개발 사업의 연구비 지원(과제번호 20IFIP-B128598-04)에 의해 수행 되었습니다.

#### References

- (1) International Electrotechnical Commission, 1999, "Hydraulic turbines, storage pump and pump-turbines model acceptance tests," International standard IEC 60193 second edition.
- (2) Sanghoon Cha, Jongwoong Choi, Sungho Ko, 2017, "Performance Prediction of Hydraulic Model Turbine for On-site Francis Turbine Development", The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol.20, No.4, pp.5~11.
- (3) 산업자원부 기술표준원, 2002, "수차 및 펌프 수차의 모형 시험 방법", KS B 6018.
- (4) Jong-Woong Choi, Yong Cho, Sung-Taek Hong, Hyun-Sik Jo, Sang-Hoon Cha, 2019, "A study on Facility Suitability of Model Turbine Performance Test for Hydraulic Plant ", The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol.22, No.2, pp.46~52.
- (5) T. Sylvain, B. Stephane, D.C. 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.
- (6) A. Abbas, A. Kumar, 2019, "Evaluation of uncertainty in flow and performance parameters in Francis turbine test rig", Flow Measurement and Instrumentation, Vol.65, pp. 297~308.
- (7) Seung-Jun Kim, Young-Seok Choi, Yong Cho, Jong-Woong Choi, Jin-Hyuk Kim, 2019, "Numerical Analysis on Inter-Blade Vortex Characteristics of a Francis Hydro Turbine Model", The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol.22, No.2, pp.30~37.
- (8) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier and D. Rammoser, 1993, "Optimization of catalytic converter gas flow distribution by CFD distribution", SAE Technical paper, 930780.
- (9) ANSYS, 2009, "ANSYS CFX 12 manual", UK.
- (10) 이용갑, 육진환, 강만호, 2004, "CFX Pressure-Based Coupled과 다양한 난류모델을 이용한 유체기계의 유동해석", 한국유체기계학회, 제7권, 제5호, pp.82~90.