New & Renewable Energy 2020. 6 Vol. 16, No. 2
ISSN 1738-3935 (Print)
ISSN 2713-9999 (Online)
https://doi.org/10.7849/ksnre.2020.2058

Check for updates

[2020-6-HP-005]

수력 현대화 개·대체 시 스파이럴 케이스와 흡출관 형상에 따른 모델수차 설계 적용사례 연구

박노현[1] · 김진혁[2),3)] · 김승준[4),5)] · 현정재[6)] · 최종웅[7)] · 조 용[8)*]

Study of a Model Turbine Design Case Via Application of Spiral Case and Draft Tube Shape in Hydraulic Power Plant Modernization

Nohyun Park[1)] · Jin-Hyuk Kim[2),3)] · Seung-Jun Kim[4),5)] · Jungjae Hyun[6)] · Jongwoong Choi[7)] · Yong Cho[8)*]

Received 19 November 2019 **Revised** 22 May 2020 **Accepted** 22 May 2020 **Published online** 19 June 2020

ABSTRACT Recently, turbines operating in hydro power plants are required to undergo renovation and modernization due to their age exceeding 30 years. In the process of renovation or modernization, a performance test of the scaled-down model is necessary to verify the performance of the real-size model. This model test method, with criteria that is similar to that of a real turbine, is the most economical and important method. Furthermore, the shapes of the runner and guide vane can be modified or replaced easily. However, during the process of modernization, the components with the spiral casing and draft tube are impossible to repair or replace because of the buried ground. Thus, in this study, numerical analysis is conducted to investigate the hydraulic performance based on the difference between the two-dimensional computer-aided design (CAD) shape and the real three-dimensional scan shape of the spiral casing and draft tube.

Key words Hydropower(수력), Model test(모델시험), Model turbine(모델수차), Spiral case(스파이럴 케이스), Draft tube(흡출관), Modernization(현대화), Scanning(형상 측정)

1) Ph.D, Vice President, Kumsung Engineering & Construction Co. Ltd.
2) Associate Professor, Industrial Technology (Green Process and Energy System Engineering), Korea University of Science & Technology
3) Principal Researcher, Clean Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology
4) Ph.D Candidate, Industrial Technology (Green Process and Energy System Engineering), Korea University of Science & Technology
5) Student Researcher, Clean Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology
6) Senior Manager, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation
7) Senior Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation
8) Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation
***Corresponding author:** ycho@kwater.or.kr
Tel: +82-42-870-7664

Copyright ⓒ 2020 by the New & Renewable Energy
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Subscript

S/C : spiral case
D/T : draft tube
S/V : stay vane
G/V : guide vane
R/B : runner blade

1. 서 론

기후변화에 대응하여 신재생에너지에 대한 관심이 높고, 재생에너지원 중 가장 오래된 수력발전은 발전량이 예측 가능하며 신뢰성 있는 발전 방법이다[1].

국내의 중규모 이상의 수력발전소는 댐의 건설과 동시에 추진되는 경향으로 초기 투자비가 증가하여 신규댐의 건설 시를 제외하고는 추가로 수력발전소 건설이 어려운 상태이다.

최근 노후화된 중규모 수력설비의 경우 수명을 연장하여 사용할 목적으로 정기적인 유지보수 외에 러너(R/B)와 가이드 베인(G/V), 발전기 등의 주요 설비에 대한 개보수 또는 교체를 통한 현대화 방법이 활용되고 있다.

수력설비 현대화 과정에서 새로 개대체 될 주요 설비가 기존설비보다 개선된 성능이나 효율을 사전에 확인할 목적으로 모델수차를 제작하여 검증하는 방법을 사용하고 있다[2].

국외 10여 개 국가의 선진기업에서는 Fig. 1과 같이 이러한 중규모 수력 건설 및 개보수 시 모델수차 제작 및 검증 방법이 필수적이며 보편적으로 적용하고 있으며, 국내의 경우도 중규모 수력 국산화 과정에서 기술 연구를 목적으로 수력 성능 검증설비가 건설되고 있다.

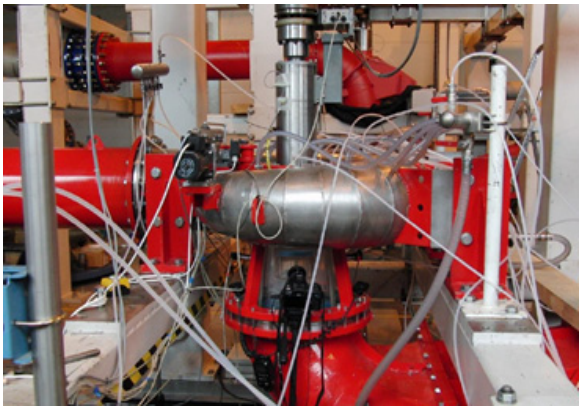


Fig. 1. Francis turbine Model test[3]

모델수차의 검증 시 R/B와 G/V 이외에도 스파이럴케이싱(S/C)과 흡출관(D/T)의 형상은 중요한 요소이나, 최초 설계 후에 건설 시 실제 형상과 다르게 건설되거나, 사용 중 변형이 발생된 경우에 규모가 크고 토목에 매립되는 구조로 인하여 개보수시 대체하거나 보수하기가 어렵다.

본 연구에서는 대청수력 현대화를 위한 모델수차 검증과정에서 대체가 어려운 S/C와 D/T가 당초의 설계와 현재 상태의 3D 스캔으로 측정된 형상과의 차이가 모델의 성능에 미치는 영향을 알아보고자, 삼차원 정상상태 Reynolds-averaged Navier-Stoke(RANS) 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 프란시스 수차 모델의 정격 운전 조건 및 저유량 조건에서 수행되었으며, S/C와 D/T의 형상 차이에 따른 유동구조 및 수력학적 성능 특성을 규명하고자 하였다.

2. 제원 및 형상

본 연구에서 검토할 원형의 수차의 제원은 Table 1과 같다.

제원에 나타난 바와 같이 개선된 성능으로 운영하기 위해서는 설비의 개보수 및 대체 방법으로 S/C와 D/T를 제외하고 모델수차를 만들어 검증시험 후 현대화를 통하여 개선된 설비를 계속 사용하고자 계획하였다.

IEC 60193 규격[2]의 모델수차 제작에 관한 문헌에 따르

Table 1. DAECHUNG HPP specification

Division	Specification	Remark
R. Flow	132 m^3/sec	
R. Head	38.7 m	
Speed	150 rpm	Ns : 323 m-kW
Turbine type	Horizontal Francis	
R. Output	45 MW	
Efficiency	92.3%	
Manufacture	TOSHIBA	
Completion	1980	

면 원형수차 대비 모델수차의 오차율에 대한 허용치를 규정하고 있다.

모델수차의 시험이 주요부의 성능측정을 목적으로 수행하므로 러너의 경우에는 대부분 400 mm이내의 형상(D)으로 정밀한 오차가 요구되어 축소 모형을 제작하여 시험을 하지만, 원형 구조물의 크기가 크고 제작의 정밀도가 요구되지 않는 S/C, D/T의 경우 ±2%의 오차를 허용하고 있다.

모델수차를 설계하기 위하여 먼저 원형수차의 S/C와 D/T를 포함한 설비에 대하여 건설된 상태를 파악하고자 설계된 원래의 2D 도면을 분석하였으며 분석된 도면을 캐드로 치수화 작업을 하였다.

또한, 현 상태로 건설되어져 있는 실물을 확인하고자 최근 보편적으로 사용되는 3D 스캐닝을 시행하여 형상 정보를 취득하였다.

원형 수차의 S/C에 대하여 원래의 2D 도면의 기록된 치수와 3D 스캔된 데이터를 위치별로 ①~⑤번까지 번호를 부여하고 각 부분의 치수에 대하여 차이점을 Fig. 2와 Table 2에 비교한 결과 모두 허용오차 이내로 검토되었다.

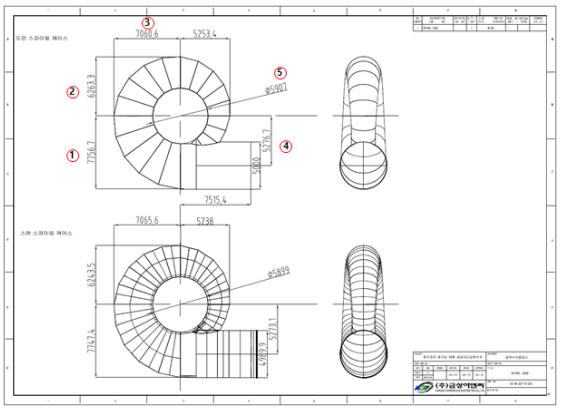


Fig. 2. S/C Shape of Drawing and Scanning Data

Table 2. DAECHUNG HPP S/C dimensional gap (Unit: %)

No	2D Drawing	3D Scan	Gap	IEC Standard
①	7756.7	7747.4	0.0012	±2
②	6263.3	6243.5	0.0031	±2
③	7060.6	7065.6	0.0005	±2
④	5276.7	5273.1	0.0006	±2
⑤	5907	5899	0.0013	±2

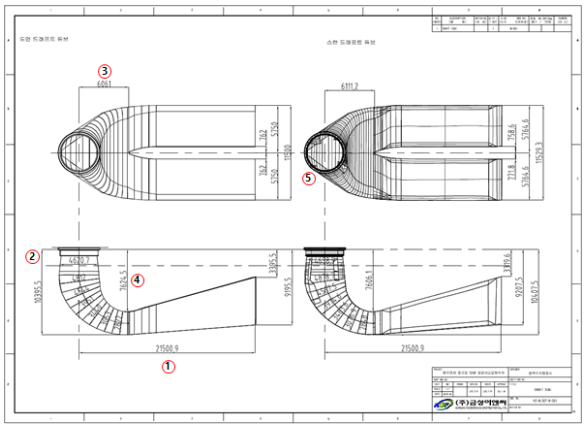


Fig. 3. D/T Shape of Drawing and Scanning Data

Table 3. DAECHUNG HPP D/T dimensional gap (Unit: %)

No	2D Drawing	3D Scan	Gap	IEC Standard
①	21500.9	21500.9	0	±2
②	10395.5	10407.5	0.0011	±2
③	6061	6111.2	−0.0082	±2
④	7624.5	7606.1	0.0024	±2
⑤	11500	11529.3	−0.0025	±2

D/T의 형상도 S/C와 같이 원래의 설계 도면과 스캐닝된 정보에 대하여 두 가지를 비교하여 정리한 것을 Fig. 3과 Table 3으로 나타내었다.

S/C와 D/T의 경우 전체가 오차율 범위 안에 존재하므로 2D 도면과 3D 스캔 데이터를 활용해도 가능하나, S/C에서 ②번 항목이 조금 큰 치수로 나타났고, D/T의 ③, ⑤번 항목에서 오차율이 크게 나타났으나 형상구현 및 경제적 이유로 변형된 부분의 각 상황에 따른 모델수차를 제작하여 검증할 수 없으므로 이 두 가지의 오차를 보인 2D 도면과 3D 스캔 형상에 대하여 모델링 후 전산해석을 통하여 모델수차의 검증시험에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

3. 전산해석

본 연구에서는 프란시스 수차 모델의 비압축성 내부 유동장에 대해 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-19.1을 사용하여 정상상태 수치해석을 수행하였다. 프란시스 수차 모델의 격자 생성은 Turbo-Grid 및 ICEM-CFD

를 사용하였고, 수치해석의 경계조건 부여는 CFX-Pre, 그리고 유동해석과 결과분석은 CFX-Solver 및 CFX-Post를 각각 사용하였다.

프란시스 수차 모델의 내부유동 수치 해석에 사용된 비압축성 유체의 지배방정식의 연속방정 및 운동량 방정식은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial t}+U_i\frac{\partial U_j}{\partial x_i}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\nu\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}+\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)-\overline{u_iu_j}\right] \tag{2}$$

여기서, $\overline{u_iu_j}$ 는 레이놀즈 응력 텐서(Raynolds stress tensor)이며, 2-방정식 난류 모델에서는 등방성 난류 점성 Boussinesq 가설을 사용하여 응력 텐서를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$-\overline{u_iu_j}=\nu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{3}$$

유동해석을 위한 난류모델은 Shear Stress Transport (SST) 모델[4]을 사용하였으며, 이 난류모델은 유동박리 예측에 적절하며 자유 흐름 영역 및 벽면 인근 영역의 해석에 정확성을 보이는 모델로, 다른 2-방정식(k-ω, k-ε) 난류 모델들에 비해 유체기계 해석에 적절한 모델로, 식 (4) 및 (5)와 같다[5,6].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega \tag{5}$$

여기서, k는 난류 운동에너지, ω는 비소산율, G_k는 난류 운동에너지의 생성, G_ω는 ω의 생성을 나타내며, Γ_k 및 Γ_ω는 각각 k 및 ω의 유효 확산도를 나타낸다. 또한, Y_k 및 Y_ω는 k 및 ω의 소실을 나타내며, D_ω는 상호 확산 항이다.

수치해석의 경계조건으로써, 작동 유체는 25°C 물을 사용하였고, 프란시스 수차 모델의 입구와 출구는 전압력 및 정압력 조건을 각각 부여하였다. Fig. 4는 프란시스 수차 모델의 격자계 구성을 나타내며, S/C와 D/T는 사면체 격자계로 이루어져 있고, 그 외의 스테이 베인(S/V), G/V 및 R/B는 육면체 격자계로 이루어져 있다. 또한, 상대적으로 복잡한 유동구조를 가지는 R/B 인근 벽면에는 O형 격자계를 사용하여 첫번째 격자점에서 y+≤1를 유지하도록 하였으며, 벽면에서의 무차원 거리인 y+는 식 (6)과 같다.

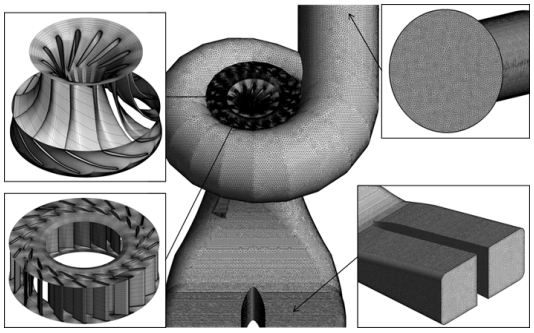


Fig. 4. Computational grids of a Francis turbine model

$$y^+=\frac{yu_\tau}{\nu} \tag{6}$$

여기서, u_τ는 마찰 속도, y는 벽면으로부터 절대 거리를 의미하며, ν는 동 점성률을 의미한다.

정상상태 수치해석 시 회전자인 R/B와 고정자인 G/V 및 D/T 사이의 경계면은 경계면을 통해 원주방향으로 평균된 유동값을 입력하는 Stage-average 방식을 적용하여 해석을 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석결과 검증

프란시스 수차 모델의 수치해석을 위한 최적의 격자계 구성을 위해, Fig. 5와 같이 효율 비교를 통하여 격자 의존성 시험을 수행하였으며, 효율은 식 (7)을 사용하여 계산하였다.

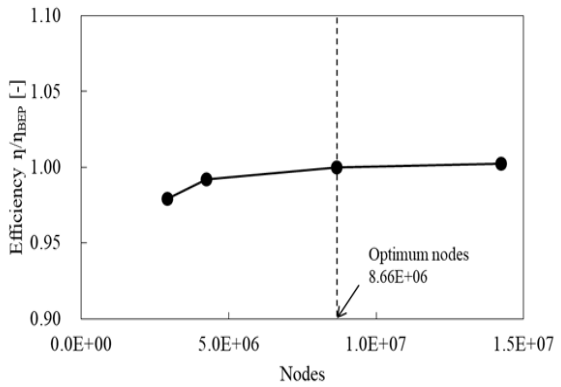


Fig. 5. Grid dependency test of a Francis turbine model

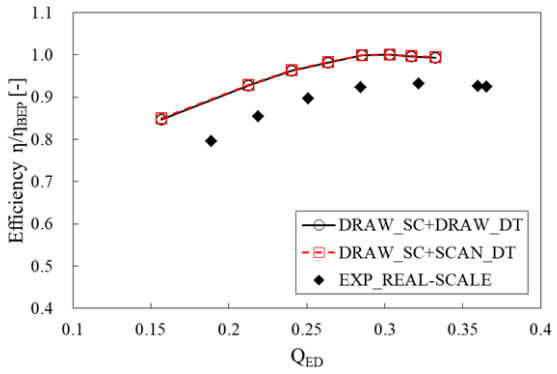


Fig. 6. Performance curves of numerical and experimental results for a real-scale Francis hydro turbine

$$\eta = \frac{T\omega}{\rho g H Q} \tag{7}$$

여기서, T는 토크, ω는 러너의 각속도, ρ는 물의 밀도, g는 중력 가속도, H는 낙차, 그리고 Q는 유량을 의미한다.

격자계는 총 290만 개에서 1,400만 개 사이에 대해 검토하였으며, 1,400만 개와 866만 개의 격자계의 효율이 유사하게 나타났으며 수치해석의 시간 및 비용을 고려하여, 최적의 격자계로 총 866만 개의 격자수를 결정하였다. 최적의 격자계에 대한 각 구성요소의 격자수 및 y+는 Table 4와 같으며, 도면 및 스캔에 따라 형상이 달라지는 S/C 및 D/T에 대해 최적의 격자계와 동일한 구성을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

Table 4. Information of the optimum grids

Components	Nodes	y+
Spiral casing	1.08×10^6	y+≤100
Stay vane	1.88×10^6	y+≤20
Guide vane	2.10×10^6	y+≤20
Runner	2.47×10^6	y+≤1
Draft tube	1.13×10^6	y+≤100
Total	8.66×10^6	–

Fig. 6은 수치해석 타당성을 검증하기 위해 프란시스 수차 모델의 RANS 해석 결과와 실물 수차의 효율을 비교하였다.

수치해석은 도면을 토대로 S/C 및 D/T를 적용한 해석 도메인과 도면의 S/C 및 스캔 D/T 형상을 적용한 도메인에 대해 G/V 개도에 따른 유량에 대해 전반적인 효율을 비교하였으며, 다른 형상이 적용되는 S/C 및 D/T를 제외한 나머지 구성요소(S/V, G/V, R/B)는 동일하게 적용하였다.

효율은 최고효율점(Best Efficiency Point, BEP) 값으로 무차원화 하였으며, 유량은 IEC 60193 규격에 제시된 무차원 수로 나타내었으며, 식 (8)과 같다[2].

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 E^{0.5}} \tag{8}$$

여기서, E 및 D는 각각 비에너지 및 대표직경을 나타낸다.

타당성 검토를 위한 실물 수차의 성능시험 결과는 초기 제작사에서 제공한 현장 성능시험 결과를 사용하였다[7]. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 환산식이 적용된 정상상태의 수치해석 결과와 성능시험 결과에서 차이를 나타내지만, 이는 수치해석에서 실제 수차 운전 시 발생하는 기계적 손실 및 표면 조도 등을 해석 시 고려하지 않아 발생한 효율의 차이로 추정되며, 본 연구에서는 이 차이점을 분석하거나 고려하지 않고 경향성만을 분석하였다.

수치해석 결과는 성능시험 결과에 비해 상대적으로 높은 효율을 나타내지만, 수치해석 및 성능시험 결과의 전반적인 경향이 잘 일치하므로, 본 연구의 수치해석에 대한 결과는 타당성이 있다고 볼 수 있다.

4.2 S/C, D/T 검토

프란시스 수차 모델의 S/C와 D/T의 도면 및 스캔 형상에 따른 성능 검토를 위해, 각 도메인에 대해 동일한 낙차 조건에서 G/V 개도에 따른 BEP 조건 및 BEP의 약 51%의

유량을 나타내는 저유량 조건에서 성능 및 내부유동을 비교하였다. Fig. 7은 S/C와 D/T의 도면 및 스캔 형상에 따른 총 4개의 조합들의 효율 비교를 나타내며, 최고 효율값으로 무차원화 하였다. 각 동일한 G/V 개도 조건에서 S/C와 D/T의 형상이 달라졌을 때, 각각 BEP 및 저유량 조건의 효율은 유사한 값을 나타냈으며, 형상에 따른 효율의 차이는 크게 나타나지 않았다.

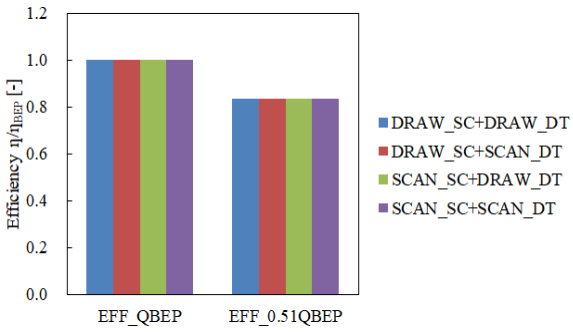
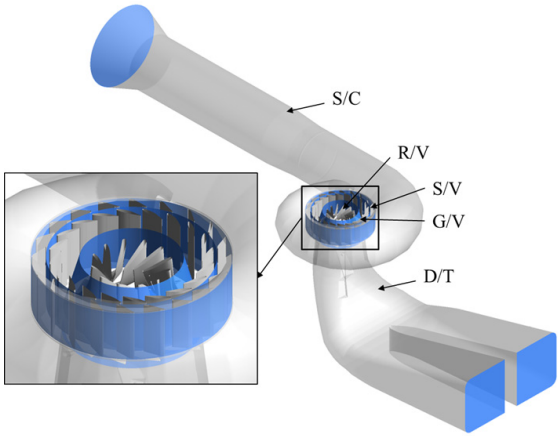
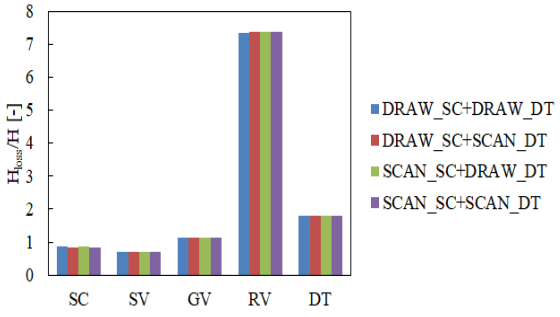


Fig. 7. Efficiency comparisons according to the shapes of S/C and D/T



(a) Location of inlet and outlet of each component



(b) Head loss distributions

Fig. 8. Head loss distributions according to the shapes of S/C and D/T at BEP

BEP 및 저유량 조건의 보다 상세한 검토를 위해, S/C와 D/T의 형상에 따른 프란시스 수차 모델의 각 구성요소의 Head loss를 비교하였다. Fig. 8(a)는 프란시스 수차 모델의 각 구성요소 및 경계면을 나타내며, 각 구성요소의 Head loss 계산을 위해 경계면을 각 구성요소의 유동이 통과하는 입출구로 하여 Head loss를 구하였다. Fig. 8과 9는 BEP 및 저유량 조건에서 Head loss분포를 나타내며, 이때, Head loss는 식 (9)와 (10)을 사용하여 계산하였다[8].

$$H_{loss} = \frac{\triangle p_{total}}{\rho g} \tag{9}$$

$$H_{loss(runner)} = \frac{\triangle p_{total} - \frac{T\omega}{Q}}{\rho g} \tag{10}$$

여기서, H, p, T, ω, ρ 및 g는 각각 낙차, 압력, 토크, 각속도 및 중력가속도를 나타낸다. Fig. 8의 BEP 조건에서는 각 구성요소의 손실률이 유사하게 나타났고, 특히 형상이 달라지는 S/C와 D/T에서도 손실률의 차이가 크게 나타나지 않았다. 저유량 조건인 Fig. 9는 전반적으로 각 구성요소에서 유사한 손실률을 보였지만, D/T에서 약간의 차이를 나타냈다. 하지만, 가장 높은 손실률을 갖는 도메인(Draw S/C+draw D/T)과 가장 낮은 손실률을 같는 도메인(Draw S/C+scan D/T)의 D/T 손실률의 차이는 약 0.25%로, 매우 미미한 차이를 나타냈다.

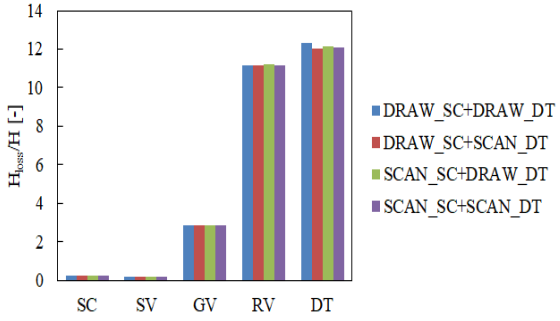


Fig. 9. Head loss distributions according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate

4.3 S/C 형상에 따른 내부유동 검토

프란시스 수차 모델의 S/C의 도면 및 스캔 형상에 따른 성능 특성에 대한 정성적 분석을 위해, S/C의 내부유동 검

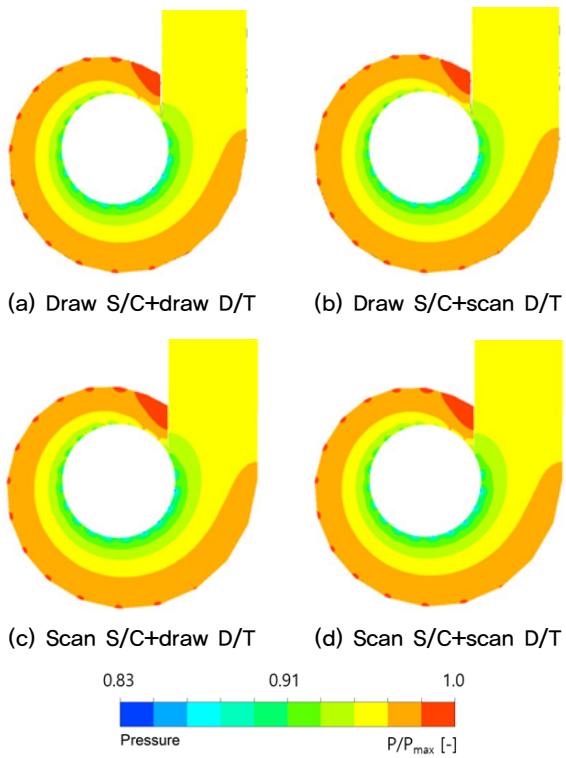


Fig. 10. Pressure distributions on the mid-span of the S/C according to the shapes of S/C and D/T at BEP

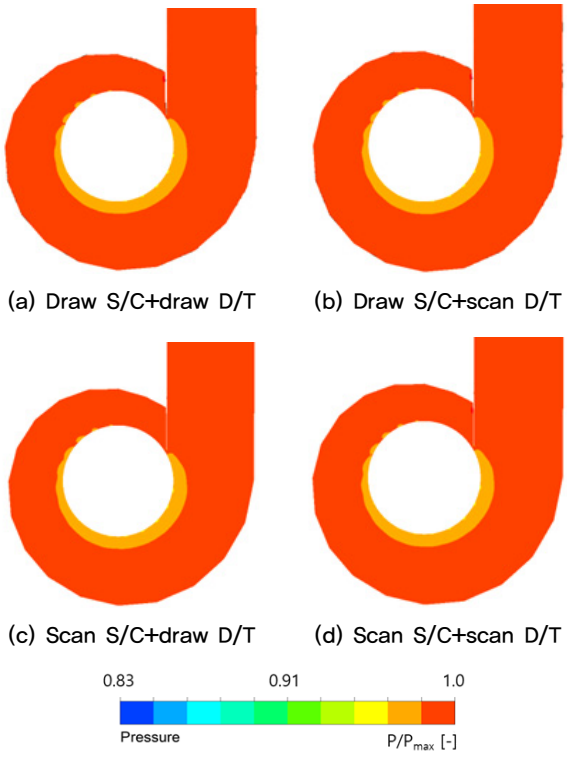


Fig. 11. Pressure distributions on the mid-span of the S/C according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate

토를 수행하였다. Fig. 10은 S/C의 도면 및 스캔 형상에 따른 BEP 조건에서 중간 단면의 압력 분포를 비교하였으며, 최대 압력 값으로 무차원하여 나타냈다. Fig. 10(a)~(d)에서 볼 수 있듯이, BEP 조건에서 형상에 따른 내부 압력 분

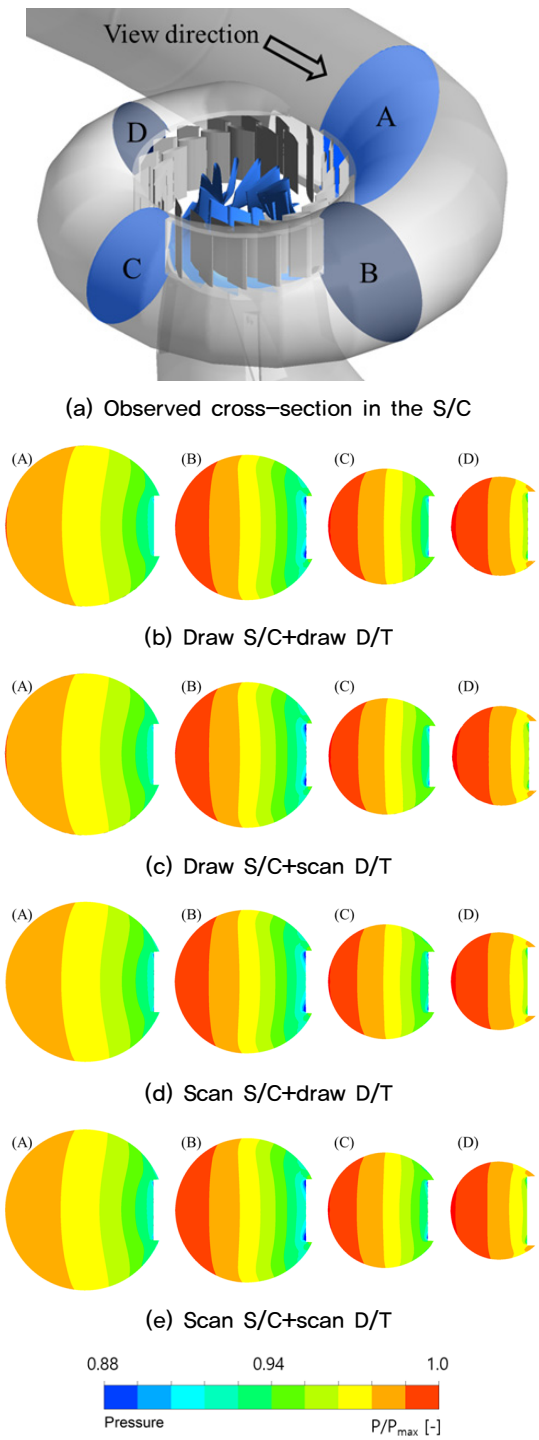


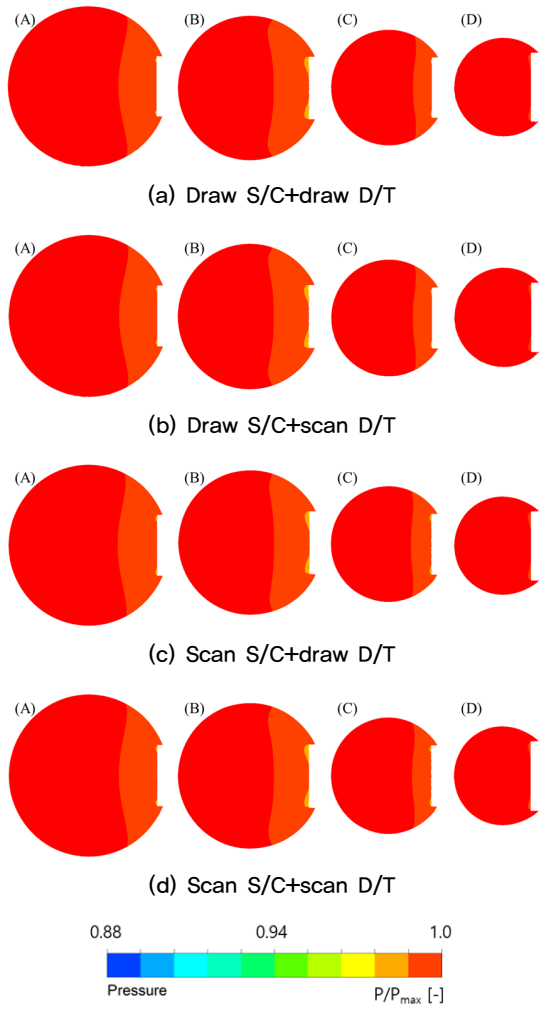
Fig. 12. Pressure distributions on the cross-section in the S/C according to the shapes of S/C and D/T at BEP

포는 유사한 유동 특성을 나타냈으며, 이를 통해 Fig. 8에서 나타낸 Head loss분포에서 확인한 형상에 따른 S/C Head loss의 유사성에 대한 특성을 정성적으로 확인할 수 있다. Fig. 11의 저유량 조건의 압력 분포도 BEP 조건과 마찬가지로 유사한 압력 분포를 나타내며, Fig. 9에서 나타낸 S/C Head loss의 유사한 특성에 대한 이유를 확인할 수 있다.

Fig. 12 및 13은 BEP 및 저유량 조건에서 Fig. 12(a)에 나타낸 S/C 내부의 유동 진행 방향에 따른 A~D, 4개 단면의 압력분포 특성을 나타냈다. BEP 조건인 Fig. 12(b)~(e)의 내부 압력 분포는 S/C 입구에서 유동 진행 방향에 따라 S/C 설부(tongue) 인근으로 갈수록 압력이 점차 증가하며, 이러한 유동 특성이 각각 다른 도메인에서도 유사하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13의 저유량 조건에서도 각 도메인의 S/C 내부 단면의 압력 특성이 유사하며, BEP 및 저유량 조건에서 도면 및 스캔의 형상에 따라 내부 압력 특성은 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14는 프란시스 수차 모델 S/C의 중간 단면에서



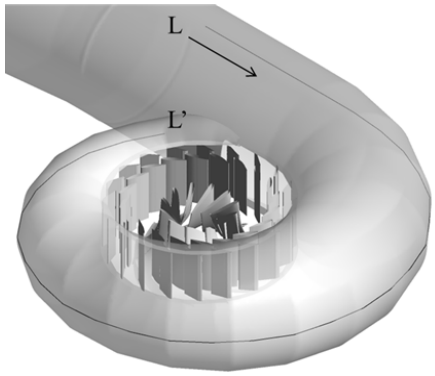
(a) Draw S/C+draw D/T

(b) Draw S/C+scan D/T

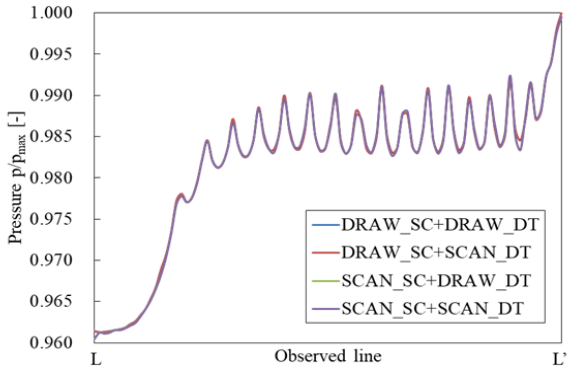
(c) Scan S/C+draw D/T

(d) Scan S/C+scan D/T

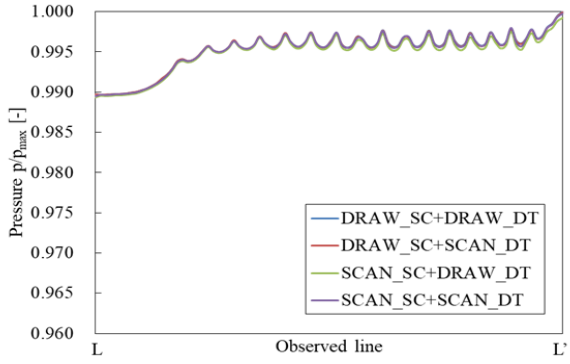
Fig. 13. Pressure distributions on the cross-section in the S/C according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate



(a) Observed line on the S/C wall



(b) Wall pressure distributions at BEP



(c) Wall pressure distributions at low flow rate

Fig. 14. Wall pressure distributions on the mid-span of the S/C according to the shapes of S/C and D/T

S/C 입구 인근(L)의 외형 벽면에서부터 설부 인근(L')의 외형 벽면까지의 압력 분포를 비교하여 나타냈고, 그 위치는 Fig. 14(a)와 같다. Fig. 14(b)의 BEP 조건의 압력 분포는 각 4개의 도메인에서 유사한 분포를 나타냈다. 한편, S/C 벽압력 분포 특성이 완만하지 못하고 진행 방향에 따라 압력 특성의 변동을 보이는 것은, S/C의 외형이 만곡진 형태로 제작된 케이싱이 아니라, 케이싱의 각 부위를 제작 후 용접으로 연결하여 제작했기 때문이다[9]. 저유량 조건인 Fig. 14(c)는 BEP 조건보다 압력 변동 폭이 더 작은 특성과 함께, 4개 도메인에서 유사한 압력 분포를 나타냈다. 이와 같이, S/C의 형상이 도면과 스캔에서 치수 차이가 존재하더라도, 그 차이가 IEC 60193 규격에서 제시하는 오차 범위 이내일 때, 형상 차이에 따른 성능 및 내부유동 차이가 거의 없으며, 유사한 성능 및 유동 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

4.4 D/T 형상에 따른 내부유동 검토

프란시스 수차 모델 D/T의 도면과 스캔 형상에 따른 내부유동 특성 검토를 위해, Fig. 15 및 16은 BEP 및 저유량 조건에서 D/T 내 3D 유선분포를 비교하였으며, 최대 속도 값으로 무차원 하여 나타냈다.

Fig. 15의 BEP 조건의 3D 유선 분포는 출구로 원활한

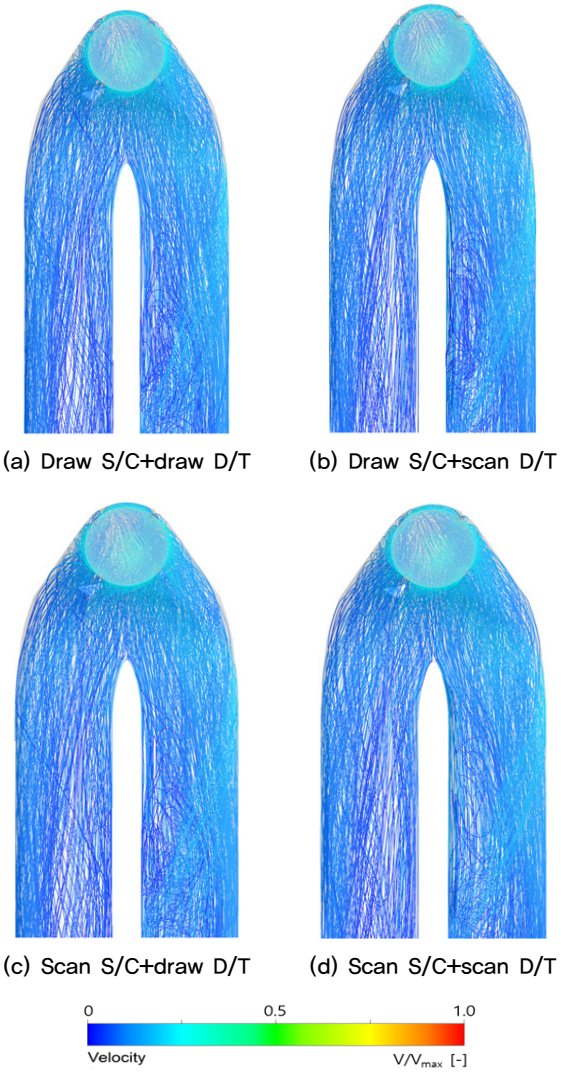


Fig. 15. Streamline distributions in D/T according to the shapes of S/C and D/T at BEP

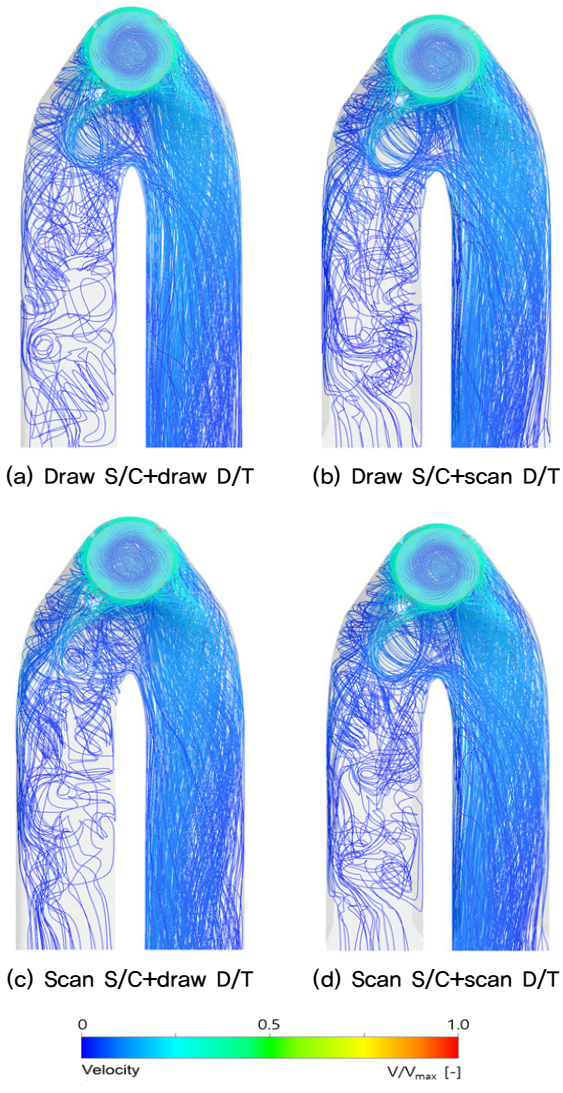


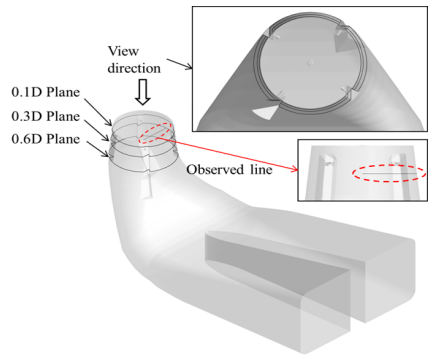
Fig. 16. Streamline distributions in D/T according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate

유동 흐름을 나타내고 있으며, 4개의 도메인에서 유사한 유동을 볼 수 있다.

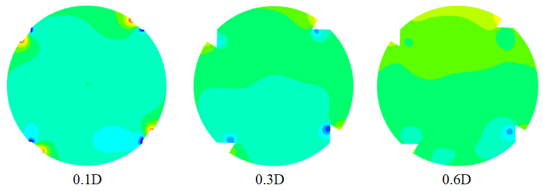
Fig. 16은 저유량 조건으로써, 상대적으로 복잡한 내부 유동이 발생하여, 각 도메인에서 약간의 유동 특성 차이를 나타내지만, 오른쪽 D/T의 출구에 유량이 집중되는 유동 특성을 4개의 도메인에서 모두 볼 수 있다.

Fig. 17은 D/T 입구를 기준으로, 직경의 0.1, 0.3 및 0.6배 위치의 단면에서 압력 분포를 비교하였으며, Fig. 17(a)에서 단면의 위치 및 관찰 방향을 나타내고 있다. Fig. 17(b)~(e)에서 볼 수 있듯이, 단면 0.1D에서 0.6D로 유동 방향에 따라 압력이 점차 회복하며, 4개의 도메인에서 유사한 압력 특성을 볼 수 있다.

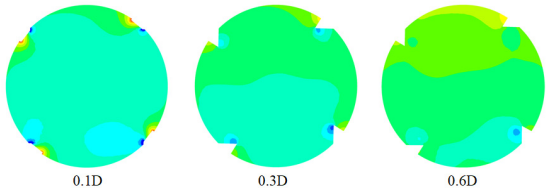
Fig. 18은 Fig. 17과 동일한 D/T 내 단면 위치에서 저유량 영역의 압력 분포를 나타내고 있다. 각 도메인(Fig.



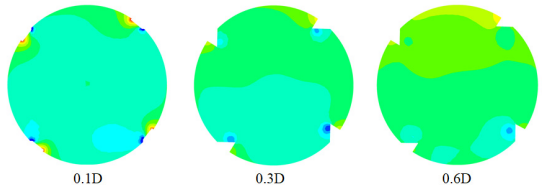
(a) Observed planes in the D/T



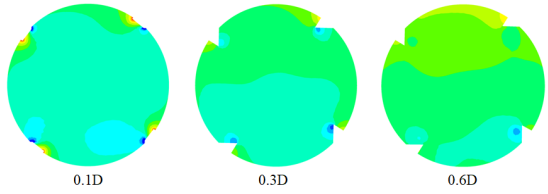
(b) Draw S/C + draw D/T



(c) Draw S/C + scan D/T



(d) Scan S/C+draw D/T



(e) Scan S/C + scan D/T

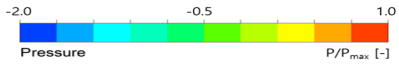
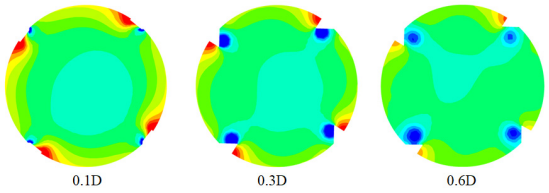
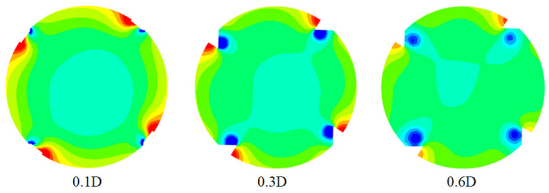


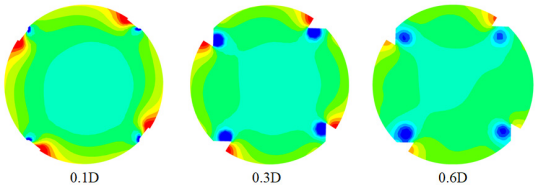
Fig. 17. Pressure distributions on the observed planes in the D/T according to the shapes of S/C and D/T at BEP



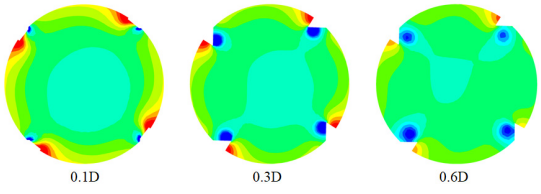
(a) Draw S/C+draw D/T



(b) Draw S/C+scan D/T



(c) Scan S/C+draw D/T



(d) Scan S/C + scan D/T

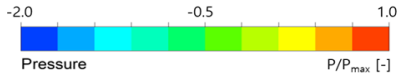
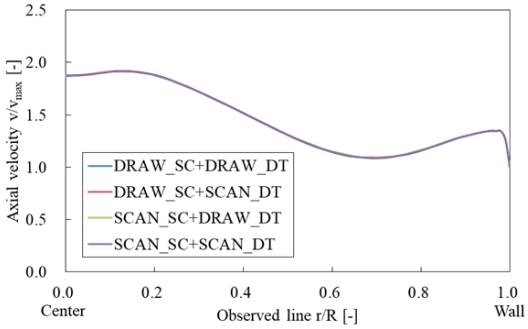


Fig. 18. Pressure distributions on the observed planes in the D/T according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate

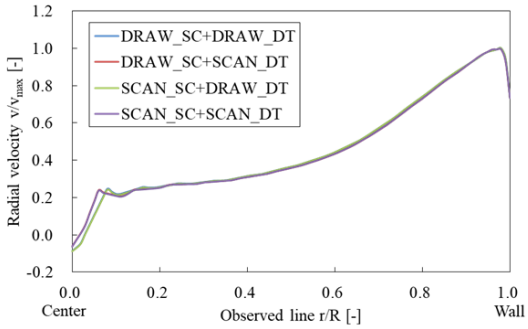
18(a)~(d))에서 유사한 압력 특성을 볼 수 있으며, Fig. 17의 단면 0.3D 및 0.6D에서 D/T의 벽면 사방에 위치한 삼각기둥 형태의 Anti-swirl fin에 의해 발생하는 저압구간도 각 도메인에서 유사하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, Fig. 17은 BEP 조건으로 러너의 출구에서 흡출관으로 들어가는 유동에 원주 속도(Circumferential velocity) 성분이 거의 없으며, 이에 따라 흡출관 내 유동이 벽면의 Anti-swirl fin에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 유동 진행 방향에 따라 정압회복을 통해 약간의 압력 상승을 나타낸다. 반면, Fig. 18은 저유량 영역으로써, 흡출관으로 들어가는 러너 출구의 유동 속도 성분에서 증가된 원주 속도 성분이 흡출관 벽면의 Anti-swirl fin의 영향을 받아 유발된 저압구간 나타내며, 유동 진행 방향에 따라 전반적으로 적은 정압회복을 나타낸다.

Fig. 19는 Fig. 17(a)에 나타낸 D/T의 단면 0.3D 높이에 위치한 D/T의 중심에서 벽면까지 Observed line의 상대적인 반경 위치(r/R)에 따른 축 방향 및 반경 방향 속도 분포를 나타낸다. Fig. 19(a) 및 (b)에서 볼 수 있듯이, 각 도메인의 BEP 조건에서 유사한 3D 유선 및 내부 압력 분포와 같이, 4개의 도메인에서 유사한 축 방향 및 반경 방향 속도 분포를 나타내고 있다.

Fig. 20은 저유량 조건의 속도 분포 특성으로써, Fig. 16에서 나타낸 바와 같이, D/T 내부에 복잡한 유동 구조를 발생시키므로, Fig. 20(a)의 축 방향 속도 분포는 상대 반경 약 r/R=0.6에서부터 1(wall)까지 축방향의 역방향 속도 분포를 나타내고 있으며, 이러한 속도 분포를 4개의 도메인 모두 유사하게 나타냈다. Fig. 20(b)의 반경 방향 속도 분포는 복잡한 유동 구조로 인해 약간의 속도 차이를 나타내지만, 전반적으로 유사한 속도 분포 특성을 나타냈다[10]. 이와 같이 프란시스 수차 모델 D/T의 도면 및 스캔 형상의 치수 차이에 대한 성능 및 내부유동 특성 검토를 통하여, IEC 60193 규격에서 제시하는 오차범위 이내의 형상 차이에 대해, 성능 및 내부유동 특성의 큰 차이가 없음을 확인하였다.

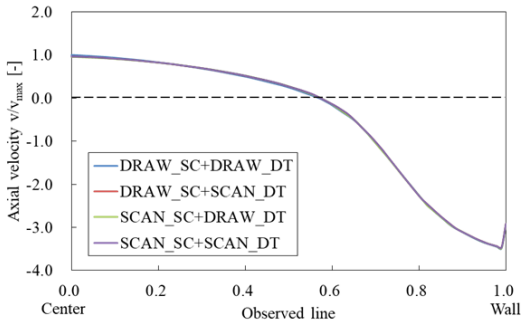


(a) Axial velocity distributions

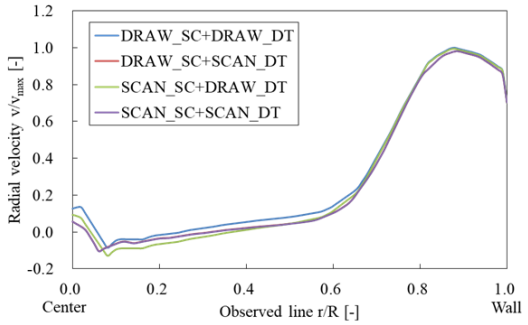


(b) Radial velocity distributions

Fig. 19. Velocity distributions along the observed line in the D/T according to the shapes of S/C and D/T at BEP



(a) Axial velocity distributions



(b) Radial velocity distributions

Fig. 20. Velocity distributions along the observed line in the D/T according to the shapes of S/C and D/T at low flow rate

5. 결 론

중규모 수력인 50 MW 프란시스 수차의 국산화를 위한 연구 중 모델시험을 수행하기 전에 원형수차에 대한 S/C와 D/T에 대한 설계초기의 2D 도면과 3D 스캔한 모델링을 대상으로 건설 및 사용 시 발생된 변형이 오차 범위일 경우, 모델수차의 성능에 영향을 미치는지 여부를 예측하기 위해 정상상태 3차원 RANS 수치해석을 수행하였다.

수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구의 S/C와 D/T에 대하여 설계된 2D 도면과 3D 스캔을 비교해 원래의 도면과 실제 수차가 허용 오차범위 내에서 일부 다른 형상을 가지는 것을 알 수 있었다.
2) S/C와 D/T의 설계된 2D 도면과 3D 스캔 형상을 모델링하여 유로에 대한 전산해석을 수행한 결과 S/C에서는 유사한 형태로 나타나 손실차이를 확인할 수 없었으며, D/T의 경우도 최대와 최소 구간에서도 거의 손실 차이가 없는 것으로 나타났다.
3) 중규모 수력의 현대화를 위한 모델수차의 연구 중 원형 S/C와 D/T의 측정된 두 형상의 변형이 IEC 60193의 허용 오차범위 이내 일 경우 모델수차의 수력성능 검증시험에는 영향을 미치지 않는 것으로 예측된다.

감사의 글

본 논문의 연구는 한국국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 중규모 수력플랜트 건설기술 개발(과제번호: 20IFIP-B128598-04)의 연구비 지원에 의한 연구입니다.

References

[1] Kim, J.W., Suh, J.W., Kim, J.H., Choi, Y.S., Lee, K.Y., and Kim, J.H., 2017, “Effect on the efficiency of a counter-rotating pump-turbine with the variation of blade angle using design of experiment (2k Factorial Design)”, New. Renew. Energy, **13**(1), 17-26.

[2] International Electro-technical Commission (IEC), 1999, “IEC 60193: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines model acceptance tests”, 2nd ed, International Electro-technical Commission, Geneva, Switzerland.

[3] Park, N.H., 2019, “Modernization of existing hydro turbine”, Modernization Workshop.

[4] Menter, F.R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application”, AIAA J., **32**(8), 1598-1605.

[5] Bardina, J.E., Huang, P.G., and Coakley, T.J., 1997, “Turbulence modeling validation”, Proceedings of the 28th Fluid Dynamics Conference, 97-2121.

[6] ANSYS, Inc., 2019, “ANSYS CFX Manager User’s Guide”.

[7] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2018, “Development of construction technology for medium sized hydropower plant (Report No. 18IFIP-B128598-02).

[8] Chen, Z., Singh, P., and Choi, Y.D., 2016, “Francis turbine blade design on the basis of port area and loss analysis”, Energies, **9**(3), 164.

[9] Kim, S.J., Kim, Y.I., Choi, Y. S., Lee, K. Y., Ahn, I.S., Cho, Y., and Kim, J.H., 2018, “Effect of a leakage wall on hydraulic performance of spiral casing tongue in a Francis hydro turbine”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, **21**(1), 5-12.

[10] Park, J.G., Yang, J.W., and Lee, J.G., 2018, “Vibration analysis in a water turbine using a model test”, Proceedings of Korean Society for New and Renewable Energy Autumn Annual Conference, 149.