



[2017-3-HP-002]

실험계획법(2^k 요인시험)을 활용한 날개각의 변화가 엠티전 펌프수차의 효율에 미치는 영향에 관한 연구

김진우^{1),2)} · 서준원²⁾ · 김준형³⁾ · 최영석^{1),2)} · 이경용²⁾ · 김진혁^{1),2)*}

Effect on the Efficiency of a Counter-Rotating Pump-Turbine with the Variation of Blade Angle Using Design of Experiment (2^k Factorial Design)

Jinwoo Kim^{1),2)} · Junwon Suh²⁾ · Joonhyoung Kim³⁾ · Youngseok Choi^{1),2)} · Kyoungyong Lee²⁾ · Jinhyuk Kim^{1),2)*}

Received 31 May 2016 Revised 4 March 2017 Accepted 6 March 2017

ABSTRACT This paper reports the efficiency of a counter-rotating pump-turbine with various blade angles. Three-dimensional steady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with the shear stress transport turbulence model were discretized by the finite volume method and solved on hexahedral grids to analyze the flow in the pump-turbine unit. The numerical results for the pump and turbine modes were verified by a comparison with their experimental data. The blade angles at both the hub and shroud of the counter-rotating impeller/runner were employed as geometric parameters to investigate their effects on the efficiency of the counter-rotating pump-turbine. The main effects on the efficiency of the geometric parameters were analyzed from their interaction through the 2^k factorial design method. These results showed remarkable increases in both the pump and turbine efficiencies compared to the reference model.

Key words Counter-rotating Pump-turbine(엠티전 펌프수차), Numerical analysis(수치해석), Blade angle(날개각), Power stabilization system(전력안정화 시스템), Design of experiment(실험계획법), Efficiency(효율)

Nomenclature

 η_p : pump efficiency η_t : turbine efficiency

4B_hub : hub profile blade angle of 4blade runner/impeller

4B_shr tip : shr tip profile blade angle of 4blade runner/impeller

5B_hub : hub profile blade angle of 5blade runner/impeller

5B_shr tip : shr tip profile blade angle of 5blade runner/impeller

1) Advanced Energy & Technology, University of Science & Technology

2) Thermal & Fluid System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

3) Hyundai Rotem R&D Center

*Corresponding author: jinhyuk@kitech.re.kr

Tel: +82-41-589-8447 Fax: +82-41-589-8330

1. 서론

전 세계적으로 화석연료가 고갈되어 가고 기후변화 문제에 직면한 상황에서 미래 지속 가능한 대체 에너지로 수력, 풍력, 태양열 및 태양광 등과 같은 신재생에너지를 꼽을 수 있다. 신재생에너지는 블랙아웃, 에너지안보 및 환경문제 해결에 있어서 반드시 필요한 에너지원이다. 그러나 불안정한 자연 환경적 요인 때문에 신재생 에너지원으로부터 발전시킬 때 출력 전압을 일정하게 유지해 안정적으로 전력을 공급하는 것이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 그렇기 때문에 위 문제를 해결하기 위해서 향상된 성능과 함께 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 하이브리드 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근, Kanemoto와 그의 연구진들은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 신재생 에너지원과 함께 엠티회전 펌프수차 기술을 적용한 하이브리드 전력안정화 시스템(Power stabilization system)을 제안하였다. 이 첨단 시스템은 자연환경 변화에 적절하게 반응하여 작동함으로써 안정적이고 일정한 전력생산을 가능하게 함과 동시에 배터리의 용량을 크게 감소시킴으로써 경제성 확보가 가능하다는 장점을 지닌다. 또한 위 시스템은 풍력발전뿐만 아니라 이외의 다양한 신재생 에너지원과 함께 결합이 가능하다는 특징을 가지고 있다.^[1-4]

최근에도 이러한 엠티회전 펌프수차 개발에 대한 유동특성 및 수력학적인 성능 분석을 위해서 실험 및 전산유체역학을 적용한 다양한 연구가 수행되어지고 있다. Momosaki 등^[5]은 엠티회전 축류펌프의 내부 유동특성에 관하여 수치해석 및 실험을 통해 연구를 수행하였다. 이들은 전, 후단 회전자 상호작용에 관한 연구를 통해 더욱 현실적인 해결책을 얻기 위하여 비정상해석을 수행하였다. Kim 등^[6]은 엠티회전 펌프수차 내 수차모드에서의 성능을 향상시키는 최적설계를 통해 효율이 향상된 최적모델을 얻었으며, 이에 대한 결과로서 수차모드의 효율이 2.68% 향상된 결과를 보였다. 또한 Kasahara 등^[7]은 각 펌프 및 수차모드 작동 시 날개 사이의 허브와 쉬라우드 팁 부근에서 발생하는 역류(reverse flow)에 의한 박리(separation)가 발생하여 성능 손실요인의 원인이 되는 유동현상을 파악하였다.

본 연구에서는 선행연구 결과를 바탕으로 시스템의 손실요인으로 작용할 수 있는 역류와 박리를 감소시키기 위하

여 날개각(blade angle)의 변화에 따른 엠티회전 펌프수차의 효율 및 내부유동에 미치는 영향을 분석하였다. 기하학적 형상변수로 허브와 쉬라우드 팁에서의 날개각을 선정하고 이에 대한 성능지표를 펌프 및 수차모드 효율로 선정하여 그에 따른 2^k 요인 시험 셋들을 생성하였다. 생성된 각 시험 셋에 대한 수치해석을 바탕으로 목적함수에 큰 영향을 미치는 최종변수를 도출해 낼 수 있었으며, 이에 대한 변수 민감도분석을 통해 기하학적 변수인 날개각이 모델의 효율 향상 및 유동안정에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 변수들 간의 상관관계 및 변수와 성능지표와의 상관관계에 따른 유기적인 분석을 수행하였으며, 기본모델과 비교하여 성능이 향상된 모델을 얻을 수 있었다.

2. 기본 모델 선정

이전 연구에서 최적화된 모델을 해당연구의 기본모델로 선정하였으며, 목표 설계사양인 양정 2m(펌프 및 수차 모드)를 만족시키기 위해 유량 및 회전수 등을 재선정해주었다.^[8]

기본 모델은 NACA4409(60% mid-span 기준)의 익형으로 설계된 모델로서 본 연구 수행 시 수치해석 신뢰도 검증과정 및 설계 기준모델로 사용되었다. Fig. 1에 본 연구 모델인 엠티회전 펌프수차의 개략도를 도시하였다. 엠티회전 펌프수차 모델은 5매의 전단 날개와 4매의 후단 날개(펌프 모드 기준)로 구성되었으며, 단일 축계에 내축과 외축으로 이루어져 작동상황에 따라 펌프모드와 수차모드로 구동된다. 양 날개의 팁 간극(tip clearance)은 각각 0.5mm로 설계되었으며, 기본 모델의 최대 효율점에서 질량유량과 효

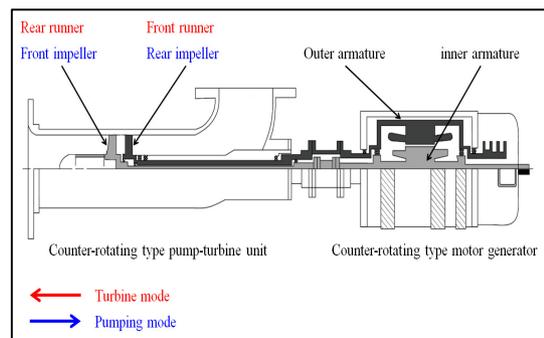


Fig. 1. Counter-rotating type pump-turbine unit^[9]

Table 1. Design specification of the Counter-rotating pump-turbine

(a) pump mode

Mass flow rate (kg/s)	5.18
Total rotational speed (rpm)	2,463
Total head (m)	2.0
Tip clearance (mm)	0.5
Diameter of blade (mm)	150
Pump efficiency (%)	77.03

(b) turbine mode

Mass flow rate (kg/s)	5.95
Total rotational speed (rpm)	1,675
Total head (m)	2.0
Tip clearance (mm)	0.5
Diameter of blade (mm)	150
Turbine efficiency (%)	81.26

율은 5.18kg/s, 77.03%(펌프모드)과 5.95kg/s, 81.26%(수차모드)이다. 본 연구의 기본모델의 주요사양은 Table 1에 기술하였다.

3. 수차해석기법

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 삼차원 점성유체해석 소프트웨어인 ANSYS CFX-13.0을 사용하여 해석을 수행하였다.^[10] 엠티전 펌프수차의 내부유동 특성은 삼차원 비압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 의해 유동해석이 수행되었고, 수치해석 시 계산에 사용한 지배방정식은 유한체적법으로 이산화되었다.^[11] 난류유동해석을 위한 난류모델로는 전단이송 모델(SST 난류 모델)을 사용하였다. 이 모델은 유동박리 등의 예측에 적절하며, 자유 흐름 영역뿐만 아니라 벽면 인근 영역 해석에 정확성을 보이는 모델로서 다른 2-방정식 난류모델들에 비해 유체기계해석에 적절한 모델이다.^[12]

해석형상의 정의, 격자생성, 경계조건의 정의, 유동해석 및 결과 분석은 각각 Blade-Gen, Turbo-Grid, CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하였으며, 작동유체는 표준상태의 25℃ 물로 설정하였다. 경계조건으로는 수차모드의 경우 입구조건은 질량유량, 출구조건은 대기압을 설

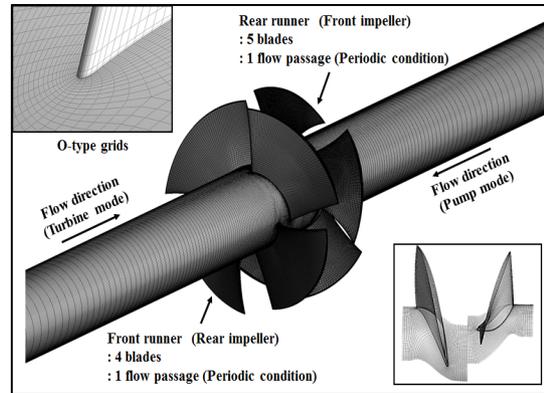


Fig. 2. Boundary conditions and hexahedral grid system in the computational domain

정하였으며, 펌프모드의 경우 반대로 설정하였다.

본 연구의 모델인 엠티전 펌프수차 유닛은 축 방향으로 회전하는 유체기계로서 계산 시간의 단축과 수렴성 향상을 위해서 하나의 유로에 대한 주기조건(periodic-condition)을 부여하여 날개 1매의 유동영역을 해석 도메인으로 설정하였다.

Fig. 2는 엠티전 펌프수차 모델의 격자구성을 보여주고 있다. 전체도메인은 육면체 격자로 이루어졌으며, 날개표면 인근에는 O형 격자계로 구성하고 그 외 부분은 H / J / C / L 형 격자계로 구성하였다. 이를 통해 벽 근처 영역에서 저 레이놀즈수 전단이송모델을 적용하기 위해 첫 번째 격자점의 $y^+ \leq 2$ 를 유지하도록 하였다. 격자의존성을 제거하기 위한 격자의존성 테스트는 이전의 연구에서 수행된 결과를 토대로 전단 및 후단 날개의 격자수는 각각 510,000 및 420,000로 구성되었다.

수치해석 시 전단과 후단 날개의 토크, 유량 및 압력 등 산출하고자 하는 값의 편차가 0.1% 내로 수렴하도록 수렴조건을 설정하였다. 이를 충족시키기 위하여, 지배방정식 잔차(residual)의 RMS 값을 1×10^{-5} 로 설정하고 1,000번의 반복해석을 수행하였다. 평균 계산시간은 Intel Xeon processor CPU(E5-2680 V3) 2.5GHz를 사용하여 수차모드의 경우 4시간, 펌프모드의 경우 6시간이 소요되었다.

수치해석의 신뢰성을 검증하기 위해 모델의 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 실험결과와 수치해석 결과가 전반적인 회전수 범위에서 출력 및 효율에 대해 일치하는 경향을 나타냈으며, 오차의 범위

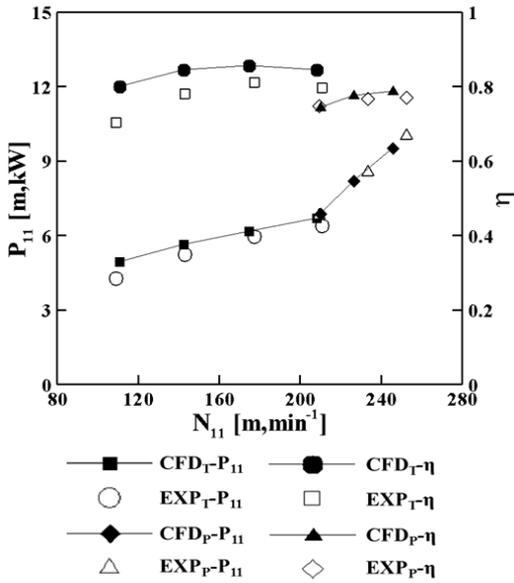


Fig. 3. Validation result of the numerical analysis

가 크지 않음을 확인하였다. 그러므로 수치해석 기법에 대한 신뢰성은 입증되었다고 판단하였다.

Fig. 3의 N_{11} 과 P_{11} 은 펌프 및 수차모드를 제한된 범위 내에 동시에 표현하기 위하여 정의되었으며, 각각 전체 회전수 및 출력과 관련된 차원이 있는 계수이다. 위 계수는 아래의 식으로 계산되었다.

$$N_{11} = \frac{N_t \times D}{\sqrt{H_t}} \tag{1}$$

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \times H_t^{\frac{3}{2}}} \tag{2}$$

여기서 N_t, D, H 및 P 는 각각 전체 회전수[rpm], 날개 직경[m], 양정[m] 및 동력[W]를 의미한다.

4. 설계인자 선정 및 2^k 요인실험 방법

4.1 성능지표 선정

기하학적 변수인 날개각과 펌프 및 수차모드에서의 효율에 대한 상관관계를 분석하기 위해 펌프 및 수차 효율을 본 연구의 성능지표로 선정하였다. 성능지표인 펌프 및 수차

효율은 아래와 같은 계산식을 통해 계산되었다. 식 (3)은 펌프효율을 나타내고, 식 (4)는 수차효율을 나타낸다.

$$\eta_p = \frac{\rho g H_t Q}{T w} [\%] \tag{3}$$

$$\eta_t = \frac{T w}{\rho g H_t Q} [\%] \tag{4}$$

여기서 ρ, g, H, Q, T 및 w 는 각각 밀도[kg/m^3], 중력 가속도[m/s^2], 양정[m], 체적유량[m^3/s], 토크[$\text{N}\cdot\text{m}$] 및 각속도[rad/s]를 의미한다.

4.2 형상변수 및 범위

Fig. 4는 본 연구의 형상변수에 대한 정의로서, 양 날개의 허브와 쉬라우드 팁 프로파일의 날개각을 보여주고 있고, 총 4개로 선정하였다. 형상변수인 날개각은 날개 프로파일의 무게중심점을 기점으로 변수범위에 따라 회전하여 변경하였다. 설계변수 범위는 날개의 뒤틀림에 의한 성능 손실을 최소화하기 위해 날개 형상이 크게 꼬이지 않는 $\pm 2^\circ$ 로 설정하였다. $+2^\circ$ 는 입구방향으로, -2° 는 출구방향으로 날개각이 변하도록 설정하였다(수차모드 기준). 이에 대한 내용은 Table 2에 나타내었다.

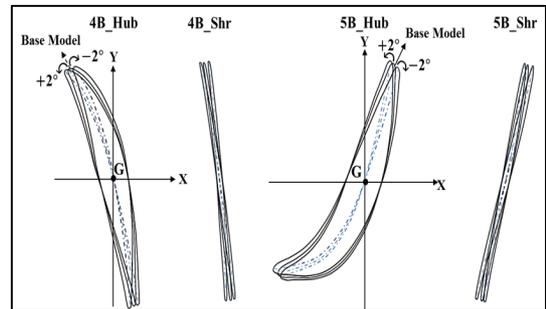


Fig. 4. Definition of geometric parameters

Table 2. Ranges of geometric parameters

Geometric parameter (blade angle)	Boundary
4B_hub	$\pm 2^\circ$
4b_shr tip	$\pm 2^\circ$
5B_hub	$\pm 2^\circ$
5b_shr tip	$\pm 2^\circ$

4.3 2^k 요인실험

실험계획법은 근대적인 통계해석법을 기반으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고 데이터를 어떻게 취하고 어떤 통계적 방법으로 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다.

본 연구에서는 실험계획법의 종류 중 하나인 2^k 요인실험 중 일부실시법(fractional factorial design)을 수행하였다. 위 실험방법은 불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용을 구하지 않고, 각 인자의 조합 중에서 일부만을 선택하여 실험을 실시하는 방법으로서 실험 횟수를 가능한 최소화하고자 할 때 사용하는 방식이다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 일부실시설계의 해상도는 IV수준으로 주 효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로서 즉, 변수 4개의 중심 값을 포함한 8개의 수치해석 실험 셋을 생성할 수 있다. 이에 대한 내용은 Table 3에 나타내었으며 분석은 상용프로그램인 MINITAB14를 사용하였다.^[13]

5. 결과 및 검토

5.1 2^k 요인실험 분석결과

기하학적 형상변수인 날개각이 성능지표인 펌프 및 수차

Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	II												
8	Full	III	IV	III	II	III	II							
16	Full	V	IV	IV	IV	III								
32	Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64	Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128	Full	VIII	VI	V	V	IV								

Fig. 5. Fractional factorial DOE

Table 3. Numerical analysis set of 2k factorial

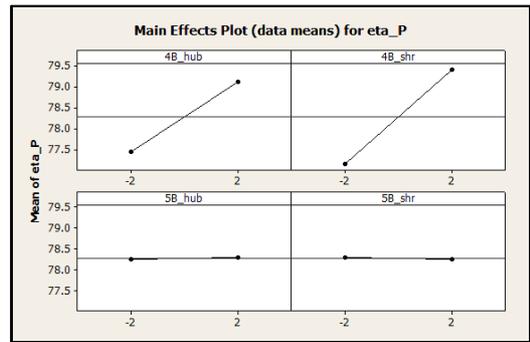
set	4B_hub	4B_shr tip	5B_hub	5B_shr tip
1	-2	-2	-2	-2
2	2	-2	-2	2
3	-2	2	-2	2
4	2	2	-2	-2
5	-2	-2	2	2
6	2	-2	2	-2
7	-2	2	2	-2
8	2	2	2	2

효율에 미치는 영향을 주 효과도표(Main effect plot) 및 파레토 차트(Pareto chart)를 이용하여 분석하였다.

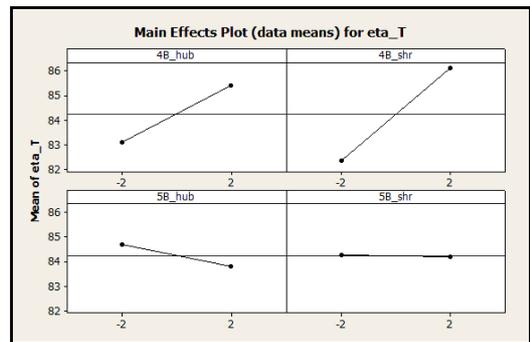
Fig. 6은 변수범위 내에서 각 변수가 변화함에 따라 성능지표에 미치는 정도를 2수준으로 나타낸 주 효과도표이며 기울기의 정도에 따라 목적함수에 대한 영향성을 알 수 있다. 분석결과 펌프 및 수차모드의 경향성이 일치하는 것을 확인하였다.

특히, 4B_hub와 4B_shr tip의 날개각의 경우 성능지표에 대한 영향성이 크며, 기본모델 대비 날개각이 증가함에 따라 효율이 상승하고 날개각이 감소함에 따라 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 반면 5B_hub와 5B_shr tip의 날개각의 경우 성능지표에 대한 영향성이 미비함을 알 수 있으며 수차모드의 경우 5B_hub의 날개각이 증가함에 따라 오히려 효율이 감소하는 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 각 변수가 성능지표에 미치는 정도를 수치화하여 상대적으로 확인할 수 있는 파레토 차트 결과를 보여주고 있다. 펌프 및 수차 모드에서 공통적으로 4B_hub와 4B_shr tip의 날개각이 5B_hub와 5B_shr tip의 날개각에 비하여

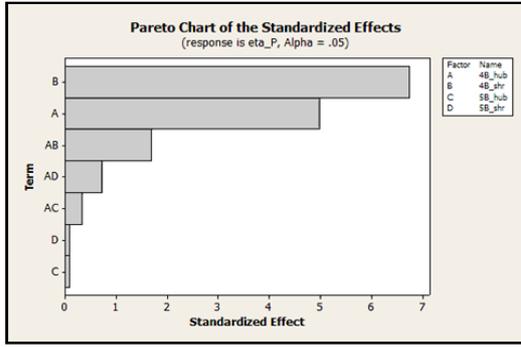


(a) pump mode efficiency

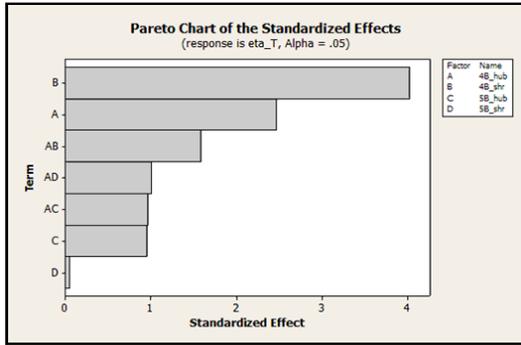


(b) turbine mode efficiency

Fig. 6. Main effects plot



(a) pump mode efficiency



(b) turbine mode efficiency

Fig. 7. Pareto chart

성능지표에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며 교호작용의 영향도 4B_hub와 4B_shr tip의 날개각에 비해 미비하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 성능지표에 영향성이 가장 큰 변수는 4B_shr tip의 날개각임을 알 수 있다.

결론적으로, 본 연구의 성능지표인 펌프 및 수차모드 효율에 큰 영향을 미치는 변수는 4B_hub와 4B_shr tip의 날개각으로 분석되며, 위 변수의 날개각이 증가함에 따라 효율이 상승하는 점을 통해서 아마도 유체의 유입각도와 블레이드 각도의 일치로 인해 입사각(incidence angle)이 줄어든 것으로 보인다.

5.2 날개각의 영향분석

2^k 요인실험을 위해 산출된 8개의 실험 셋과 기본 모델의 수치해석 결과를 비교 분석하였다. Table 4는 각 실험 셋들과 기본모델의 펌프 및 수차 모드의 효율값을 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 펌프모드의 경우 5번 실험 셋의 효율은 기본모델 대비 2.79% 감소한 반면, 8번 실험 셋의 효율은 기본모델 대비 1.23% 증가하였다. 또한 수차모드의

Table 4. Result of 2^k factorial sets

Set	η_p [%]	η_t [%]	Increment _p	Increment _t
Ref	78.78	85.65	-	-
1set	76.11	81.86	-2.66	-3.79
2set	78.42	84.70	-0.36	-0.95
3set	78.65	86.11	-0.13	0.47
4set	79.88	86.08	1.11	0.44
5set	75.98	79.06	-2.79	-6.58
6set	78.12	83.82	-0.66	-1.82
7set	79.06	85.31	0.28	-0.34
8set	80.01	86.98	1.23	1.34

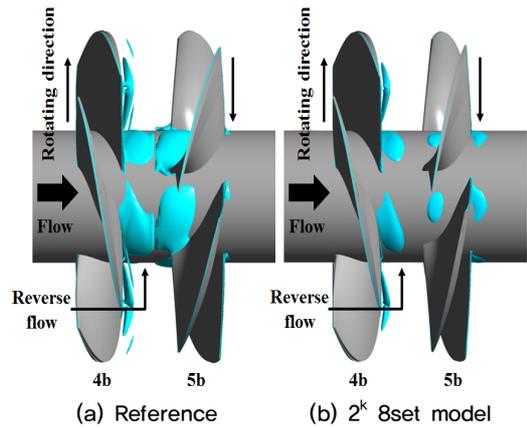


Fig. 8. Reverse flow of 0.1 m/s at isosurface on turbine mode

경우 5번 실험 셋의 효율은 기본모델 대비 6.58% 감소한 반면, 8번 실험 셋의 효율은 기본모델 대비 1.34% 증가하였다. 여기서 5번 실험 셋은 4매 날개의 날개각을 -2° 및 5매 날개의 날개각을 +2°로 설정한 셋이고, 8번 실험 셋은 전체 변수 날개각을 +2°로 설정한 셋이다(Table 4 참고).

성능 향상에 대한 원인 파악을 위해서 내부 유동장분석을 수행하였다. Fig. 8은 수차모드에서 시스템 내부 0.1m/s 역류구간이 있는 등위면을 보여주는 그림으로서 Fig. 8(a)는 기본모델 및 Fig. 8(b)는 펌프 및 수차 효율이 가장 많이 향상된 8번 실험 셋에 대해 보여주고 있다. 앞서 언급한 것처럼 역류에 의한 박리현상은 유체기계의 성능에 부정적인 영향을 주는 요인이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 양 날개의 허브부분에서 넓은 역류구간이 발생함을 확인할 수 있다. 이에 반해 Fig. 8(b)에서는 동일한 구간에서 현저하게 역류구간이 감소한 것을 알 수 있다. 반면 후단날개의 뒷전(trailing edge) 구간의 경우 기본모델에서 보이는 역

류구간이 8번 실험 셋에서는 오히려 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6(b)의 5B_hub 날개각 변수의 주 효과 도표에서 알 수 있듯이 5B_hub 날개각이 +2°가 되면서 오히려 성능이 감소되는 요인으로 작용하여 역류구간이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 수차모드 내 입구에서 출구까지의 정압분포를 보여주고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 기본모델과 성능이 가장 향상된 2^k 요인실험 8번 실험 셋을 비교하였을 때, 양 날개 부분에서 정압이 향상되면서 손실성분이 감소된 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 적절한 날개각도 설정을 통해 날개각과 입구 유동각이 적절히 일치함으로써 손실성분의 감소를 통해 효율이 향상되는 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 수차모드에서 10% 스패(span)에서의 속도벡터분포를 보여주고 있다. 여기서 Fig. 10(a)는 기본모델, Fig. 10(b)는 효율이 가장 감소된 5번 실험 셋 및 Fig. 10(c)는 효율이 가장 향상된 8번 실험 셋을 나타낸다. Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이 기본모델의 경우 전단날개의 뒷전 및 흡입면(suction side) 부분에서 역류구간이 발생하였으며, 또한 후단날개의 앞전(leading edge) 부분에서 역류 및 박리가 발생하여 상류(upstream) 부근에 전반적인 성능하락의 원인이 되는 영역이 생성됨을 확인할 수 있다. 또한 효율이 감소된 5번 실험 셋은 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 전단날개의 뒷전 및 흡입면(suction side) 부분에서는 역류구간이 감소하였으나, 전단날개 및 후단날개의 앞전부분에서 심한 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있

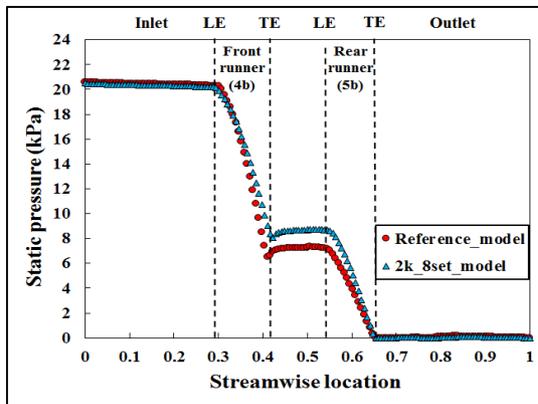


Fig. 9. Static pressure distribution of streamwise location on turbine mode

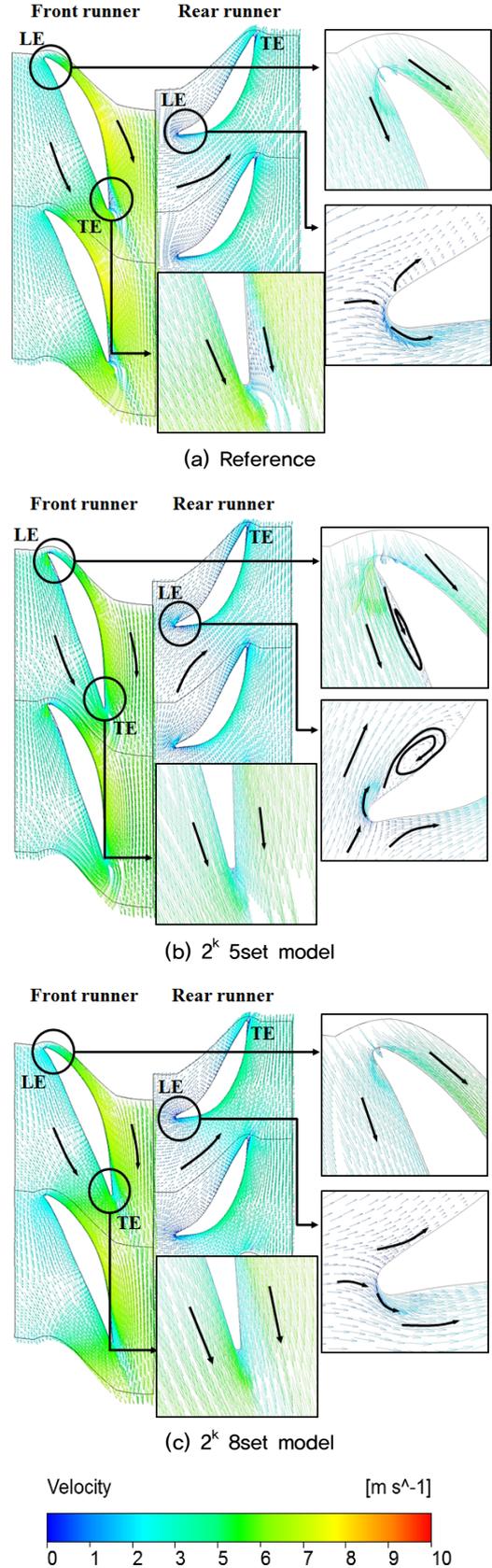
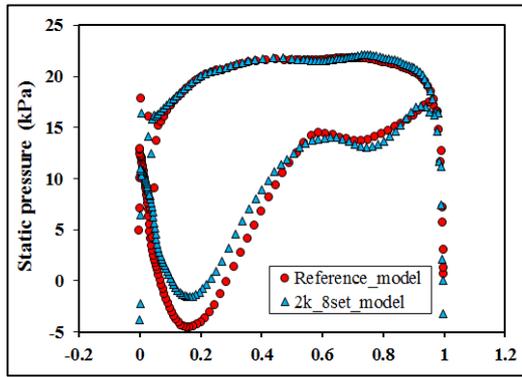


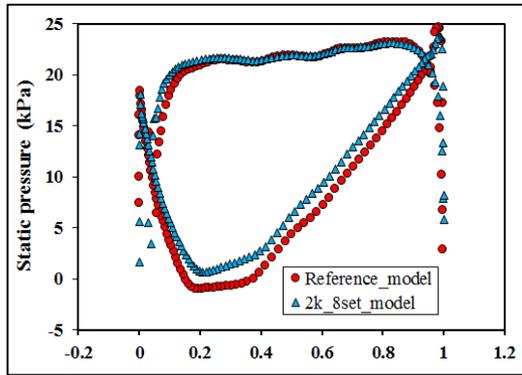
Fig. 10. Velocity vectors at 10% span on turbine mode

있으며 이로 인해 성능이 현저히 감소되었다고 볼 수 있다. 이에 반해 효율이 향상된 8번 실험 셋은 Fig. 10(c)에서 보는 바와 같이 전단날개의 앞전 및 흡입면 부분에서는 박리 구간이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 더불어 후단날개 부분에서 기본모델에 비하여 빠르게 유동이 안정되면서 본래의 유속을 되찾는 것을 볼 수 있다.

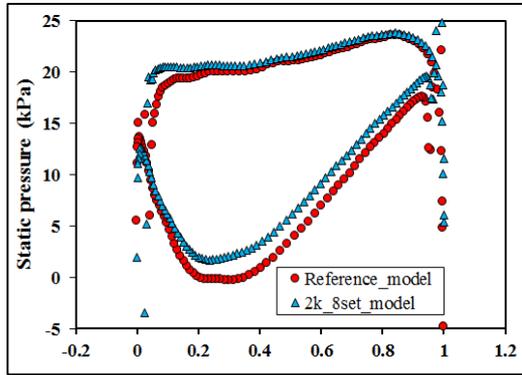
이러한 결과로부터 날개의 설치 각에 따라 유동 유입각



(a) At 10% span



(b) At 60% span

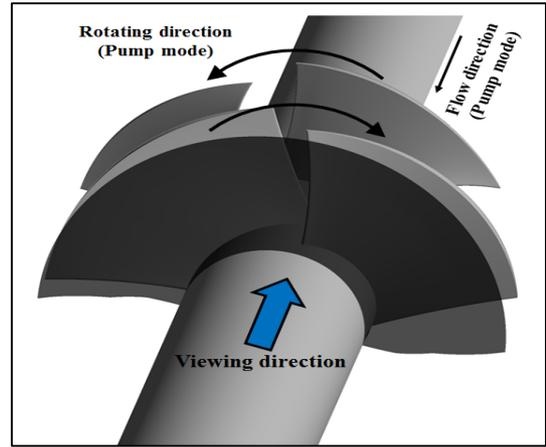


(c) At 90% span

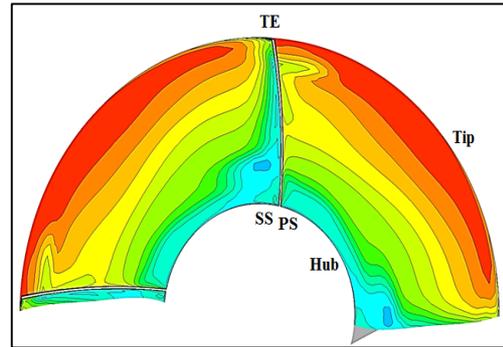
Fig. 11. Distribution of static pressure of rear impeller surfaces on pump mode

및 유출각이 달라지면서 불안정한 유동현상이 증가하거나 감소하는 현상을 볼 수 있으며 이에 따라 효율의 향상 및 감소에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있다.

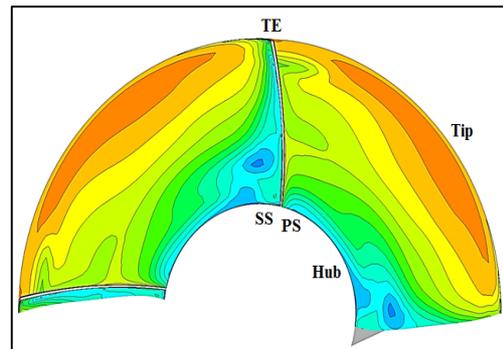
Fig. 11은 펌프모드 내 기본모델과 2^k 요인실험 8번 실험



(a) Location of observation



(b) Reference



(c) 2^k 8set model

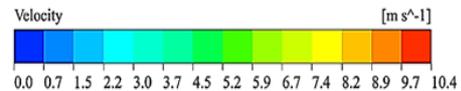
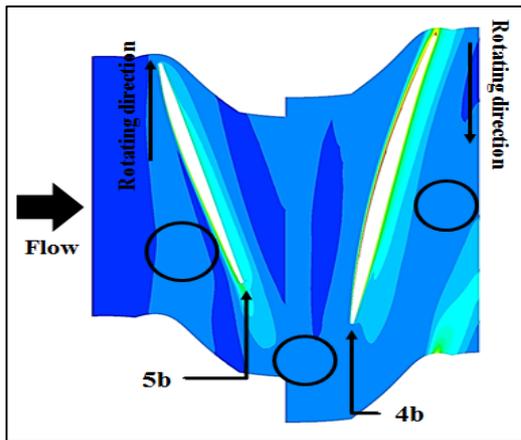


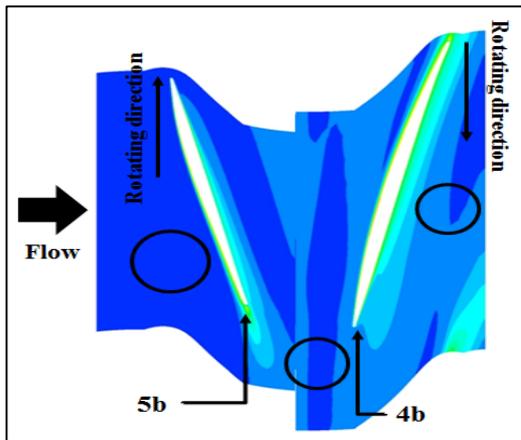
Fig. 12. Axial velocity contours at TE of the rear impeller on pump mode

험 셋 모델에 대한 후단 날개 10%, 60% 및 90% 스패에서의 압력 분포를 비교하고 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 전압과 유량을 고정된 상태로 실험이 진행되었기 때문에 각 스패의 압력면에서는 기본모델과 2^k 요인실험 8번 실험 셋의 값의 차이가 없지만 흡입면에서는 압력이 향상된 것을 확인할 수 있다. 흡입면의 압력이 향상되어 압력면과 흡입면의 압력차가 감소한 만큼 날개에 걸리는 부하가 감소됨으로써 축동력(Input power)이 감소되어 펌프 효율이 향상된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 펌프모드에서 후단날개의 날개 끝단부분에서 허브에서 쉬라우드 팁까지의 속도분포를 보여주고 있다.



(a) Reference



(b) 2^k 8set model

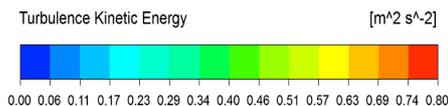


Fig. 13. Turbulence kinetic energy contours of 90% span on pump mode

이를 통해서도 앞선 결과를 확인할 수 있는데, 날개에 걸리는 부하가 감소됨으로써 축동력이 감소되는 만큼 동일 전압과 유량상태에서 축방향 유동속도가 전반적으로 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 허브에서 쉬라우드 팁까지 속도분포가 균일해짐으로써 유동이 안정화되면서 효율이 향상되었다고 판단된다.

펌프모드에서 날개 90% 스패에서 유동영역의 난류특성은 Fig. 13에서 살펴볼 수 있다. 난류운동에너지의 분포를 보면 난류운동에너지가 가장 큰 영역은 유동이 전단날개 및 후단날개의 양 끝단부분을 지나는 영역에서 최대로 나타나고 있다. 이는 난류 유동 특성으로서 속도구배가 큰 영역에서 난류운동 에너지가 커지는 난류발생 기구로부터 유추할 수 있는 사실이다. 또한 그림에 표기된 부분에서 보이는 바와 같이 기본모델에 비하여 효율이 향상된 8번 실험 셋에서는 전반적으로 난류운동에너지가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 말한 내용처럼 전반적인 구간에서 속도구배가 크지 않고 일정하게 변화하는 것을 의미함으로써, 속도구배가 일정해지면서 유동이 안정되어 효율이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 날개각의 변화에 따른 엠티전 펌프수차 유닛의 효율에 대한 영향성 및 변수간의 상관관계를 파악하고자 실험계획법의 2^k 요인실험을 통해 변수영향성 평가를 수행하였다. 기하학적 형상변수로는 4매 날개의 허브와 쉬라우드 팁 날개각과 5매 날개의 허브와 쉬라우드 팁 날개각을 선정하였으며, 성능지표로는 엠티전 펌프수차의 펌프 및 수차 모드 효율을 선정하였다. 2^k 요인실험결과 4개의 변수 중 4매 날개의 허브 및 쉬라우드 팁 날개각이 각 모드 효율에 대한 영향성이 큰 것을 확인할 수 있었다. 8개의 2^k 요인 실험 실험 셋 중 전체 변수 날개각을 +2°(수차모드 기준 입구 방향)로 설정한 8번 실험 셋의 경우 기본모델과 비교하였을 때 수차모드에서 1.34% 및 펌프모드에서 1.23% 효율이 증가한 결과를 보였으며, 반면 4매 날개의 날개각을 -2° 및 5매 날개의 날개각을 +2°로 설정한 5번 실험 셋의 경우 수차모드에서 6.58% 및 펌프모드에서 2.79% 효율이 감소한 결과를 보였다. 성능이 향상된 주요원인을 내부유동해석을

통해 분석한 결과, 형상변수인 날개각의 변화가 입구유동 각과 일치하는 방향으로 변화함에 따라 내부유동에서 성능 감소요인으로 분석되었던 역류에 의한 박리가 현저히 감소하고, 날개에 걸리는 부하가 감소함으로써 기본모델 대비 내부유동이 안정화되고 결과적으로 효율이 향상되었다.

본 연구를 통해 날개각에 따른 펌프 및 수차모드에서의 효율의 상관관계를 확인할 수 있었으며, 적절한 날개각을 설정함에 따라서 성능이 향상된 모델을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과를 토대로 향후 날개각에 따른 펌프 및 수차모드 효율을 동시에 극대화하기 위한 다중목적 최적화 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국생산기술연구원원의 창의형 SEED 연구사업(No. ER150004)과 수요기반생산기술실용화사업(No. JA170018)의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Kanemoto, T., Okamoto, S., Usui, Y., and Galal, A.M., 2013, "stabilize momentarily fluctuating power from renewable energies exploited with advanced technologies," in Proceedings of the 5th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management, Lisbon, Portugal.

[2] Murakami, T. and Kanemoto, T., 2013, "Counter-Rotating Type Pump-Turbine Unit Cooperating with Wind Power Unit," Journal of Thermal Science, Vol. 22, No. 1, pp. 7-12.

[3] Kanemoto, T., Kimura, S., Oba, S., and Sato, M., 2000, "Smart Control of Axial Flow Pump Performances by Means of Counter-Rotating Type (1st Report, Counter-Rotating Type and Performances)," Transaction of the JSME Series B, Vol. 66, No. 651, pp. 2927-2933.

[4] Kanemoto, T., Kasahara, R., Honda, H., Miyaji, T., and Kim, J. H., 2013, "Counter-Rotating Type Pump-Turbine

Unit Stabilizing Momentarily Fluctuating Power From Renewable Energy Resources," Proceedings of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Diego, California, USA, IMECE2013-66000.

[5] Momosaki, T., Usami, S., Watanabe, S., and Furukawa, A., 2010, "Numerical simulation of internal flow in a contra-rotating axial flow pump," in Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 12, Paper no. 012046.

[6] Kim, J. H., Kasahara, R., Miyaji, T., Kanemoto, T., and Choi, Y. S., 2014, "Power stabilization system with unique pumped storage to stabilize momentarily fluctuating power from renewable resources (Counter-Rotating Type Pump-Turbine Unit Operated at Turbine Mode)," Renewable Energy and Power Quality Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 274.

[7] Kasahara, R., Takano, G., Murakami, T., Kanemoto, T., and Komaki, K., 2012, "Counter-Rotating Type Axial Flow Pump Unit in Turbine Mode for Micro Grid System," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 15, Paper no. 042026.

[8] Oba, S. and Kanemoto, T., 2004, "Design of Counter-Rotating Impellers by Inverse Method to Improve Pump Performances," 22th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, Sweden.

[9] Kim, J. H., Kasahara, R., Kanemoto, T., Miyaji, T., Choi, Y. S., Kim, J. H., Lee, K. Y., and Galal, A. M., 2014, "Multiobjective Optimization of a Counter rotating Type Pump-Turbine Unit Operated at Turbine Mode," Advances in Mechanical Engineering Journal, Vol. 2014, Article ID. 467235, pp. 11.

[10] ANSYS CFX-13.0, 2010, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc.

[11] 조철희, 고광오, 이준호, 이강희, 2012, "항력식 조류발전 터빈의 최적 형상 설계 및 유동 수치해석을 통한 성능 평가," 신재생에너지, 8권 2호, pp. 6-13.

[12] 김재우, 김진혁, 김광용, 2010, "환기용 축류송풍기의 유동해석 및 모터 위치에 따른 성능특성 연구," 유체기계저널, 13권 4호, pp. 25-30.

[13] Minitab Inc, 2003, MINITAB Statistical Software Release 14 for Windows, State College USA.