

캠버각 변화에 따른 소수력 축류 프로펠러 수차의 유동 특성 연구

변순석*, 김태윤, 한상목, 김정환, 김윤제**

Performance Characteristics of an Axial Propeller Small-hydro Turbine with Various Cambers of Runner Blade

Sunseok Byeon*, Taeyoun Kim, Sangmeok Han, Jeonghwan Kim and YounJea Kim**

Abstract

The aim of this paper is to examine the hydraulically optimized camber of a blade. Prior studies have tried to determine the sound method of design on small-hydro turbines. These have appeared to realize a reasonably efficient small-hydro turbine. Nonetheless, specific and accurate design data have not as yet been established for the shape of the runner blade. Hence, this study examines the performance characteristic of an axial propeller turbine with 0~8% camber variations. The results of output power, efficiency, and pressure distribution of the turbine are graphically depicted. The definition of camber refers to the NACA airfoil. The commercial finite element analysis (FEA) packages, ANSYS, and CFX are used in this study. The results revealed the performance characteristics on small-hydro turbine and suggested a highly efficient section shape of the runner.

Key words

Axial propeller water turbine(축류 프로펠러 수차), Camber(캠버), hydraulic efficiency(수력 효율), Shaft power(축동력)

(접수일 2012. 4. 29, 수정일 2012. 6. 19, 게재확정일 2012. 6. 20)

* 성균관대학교 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea)

■ E-mail : mildstone@skku.edu ■ Tel : (031)290-7495 ■ Fax : (031)290-5889

** 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea)

■ E-mail : yjkim@skku.edu ■ Tel : (031)290-7448 ■ Fax : (031)290-5889

Nomenclature

C : absolute velocity, m/s

p : pressure, Pa

ρ : density, kg/m³

r : radius, m

τ : stress tensor, Pa

t : time, s

U : velocity, m/s

x : tangential direction

1. 서론

우리나라는 앞으로 온실가스 감축 의무국으로 지정될 경우 제반 산업에서의 온실가스 감축의무에 대한 부담이 증대될 전망이다. 이러한 상황에서 최근 화석연료 고갈 및 고유가 상황이 지속되고 있어 에너지 안보측면에서 신재생에너지 보급의 확대가 매우 시급한 실정이다. 주요 선진국들은 신재생에너지 분야에서 이미 관련 산업이나 보급측면에서 우리보다 앞서나가고 있는 상황이기 때문에 이들 선진국 수준에 도달하기 위해

서는 신재생에너지 기술개발과 관련 산업 육성을 위한 적극적인 정책개발이 필요하다. 현재 우리나라는 신재생에너지 의무 할당제도 (Renewable Portfolio Standard, RPS)가 올해부터 시행이 확정되었으며 이에 따라 국내 신재생에너지의 보급이 활발할 것으로 예측되고 있다. 소수력 발전(small-hydro power plant)은 태양광, 풍력과 같이 신재생에너지원으로서 다른 신재생에너지원에 비해 월등히 에너지 밀도가 높아서 발전효율이 우수하고, 발전설비가 비교적 간단하여 설치 및 유지관리가 용이한 장점이 있다. 농업 용수나 발전소 방류수, 상하수도 시설 등 기존 시설을 이용한 발전계획이 가능한 것도 큰 장점이다. 하지만 기존 시설에 추가적인 토목공사가 불가피하며 환경파괴의 제약이 따른다. 현재 소수력 발전은 개발 가능량의 27.5% 정도 만 활용되고 있으며, 환경파괴 제약에 따라 개발 가능한 발전 지점 대부분이 저낙차의 입지조건을 갖고 있는 실정이다. 프로펠러 수차는 저낙차 입지조건에 적용하기에 효율면에서 적합한 수차라고 할 수 있다.

많은 개발도상국에서 지형적인 특성에 기인하여 소수력 프로펠러 수차의 실제적인 적용 연구가 많이 시행되어 왔다. Rao 등⁽¹⁾은 최대 효율 67%인 5 kW 프로펠러 수차에 대하여 연구하였으며, Soundranayagam 등⁽²⁾은 40kW 운하형 프로펠러 수차를 설계하였다. Demetriades⁽³⁾은 1kW 이하의 간단한 프로펠러 수차를 설계하였고, Upadhyay⁽⁴⁾는 이러한 선행 연구 결과를 토대로 수치해석을 사용하여 실험적 결과의 타당성을 도출하였다. Simson과 Williams⁽⁵⁾는 전산기법을 사용하여 5kW 프로펠러 수차의 수두변화에 대한 효율을 분석하였다. 최근 Alexander 등⁽⁶⁾은 4가지 프로펠러 수차모델에 대하여 3~9m 범위의 수두변화에 따라 발전 출력에 대한 연구를 수행하였는데 최대 68~74%의 효율을 보였다. Singh와 Nestmann⁽⁷⁾은 실험적으로 소수력 수차의 최적화 방법을 제안하였으며, 모델의 최대 효율은 74%를 보였다.

본 연구에서는 축류 프로펠러의 런너 캠버값 변화와 수두 변화에 따른 수력효과를 연구하였으며, 고정된 안내깃에 대해 최적화된 익형 캠버값 도출을 목표로 하였다.

2. 축류 프로펠러 수차 모형

Fig. 1은 발전기, 안내깃, 런너 익형, 그리고 흡출관으로 구성된 저낙차 축류 프로펠러 수차의 개략도를 보여준다. 주

요 설계 변수는 Table 1에 나타내었다. 런너 익형 설계시 낙차는 5.18m, 유량 10m³/s, 그리고 수차 효율은 일반적인 85%로 설정하였고, 수차의 회전속도는 180rpm으로 고정하였다. 허브는 익형 끝단 대비 0.4의 비율을 갖도록 하였다. 상기와 같은 익형 설계변수를 적용하여 런너 직경 1.9m와 허브 직경 0.77m를 갖는 런너를 Fig. 2에 도시하였다. 축속도, 회전속도를 고려하여 속도 삼각형과 각운동량 보존법칙으로부터 도입된 free vortex 법칙을 이용하여 런너의 유입각과 유출각을 계산하였다.

$$C_x \cdot r = constant \quad (1)$$

일반적으로 축류 프로펠러 수차에서 상수를 K 로 가정할 때 K_{inlet} 은 수두에 의해 결정되며, 출구방향 상수 K_{outlet} 이

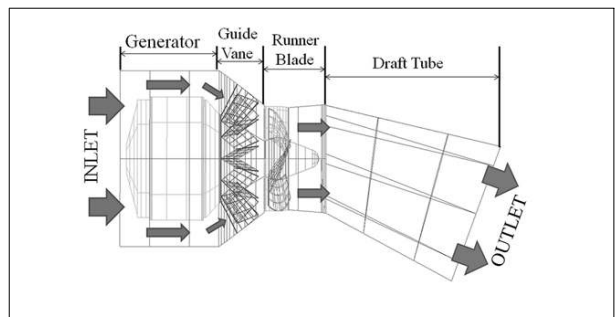


Fig. 1 Schematic diagram of small-hydro power turbine

Table 1. Design parameters of the basic small- hydro power

Net head [m]	5.18
Flow rate [m ³ /s]	10
RPM [rev/min]	180
Moderate hydraulic efficiency [%]	85

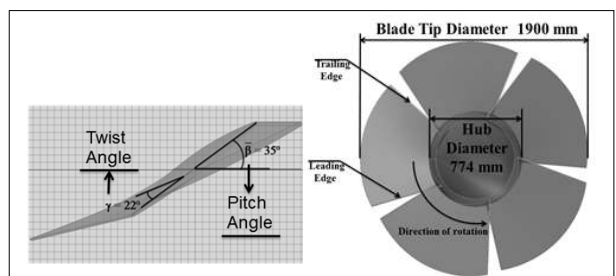


Fig. 2 Designed basic runner blade at top and side views

0에 가까이 갈 때 에너지 변환효율이 최대값을 가진다⁽⁸⁾.

속도삼각형과 free vortex 법칙으로 도출된 런너 허브의 유입각과 런너 비틀림 각은 각각 35°, 22°이다. 유동면적 증가와 유압손실을 줄이기 위해 약간의 피치각 조정은 경험치를 적용하여 설계하였다. 캠버 설정은 일반적으로 잘 알려진 NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) 익형을 적용하였다. 이는 NACA모델이 다른 런너 익형에 비하여 균일성을 제공하기 때문이며, Fig. 3에 본 연구에 적용된 캠버의 개략도를 나타내었다. 첫 번째로 허브와 슈라우드에서 런너 익형 단면의 길이를 측정하였으며, 개별적으로 익형에서 변화율을 0~8%를 설정하여 생성하였다.

런너 익형 설계시 불확실성을 최소화하기 위해 4단계의 설계 기준을 확립하였다.

1) 자오면

Fig. 4에 나타내었듯이 런너 형상을 제한하였다.

2) 허브와 날개 끝단의 피치각

허브 피치각은 35°, 비틀림각은 22°를 채택하였다.

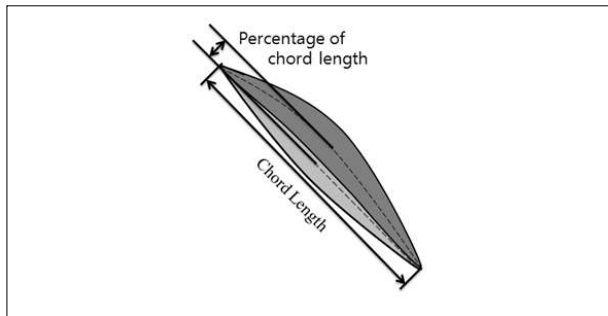


Fig. 3 Schematic of the definition of camber

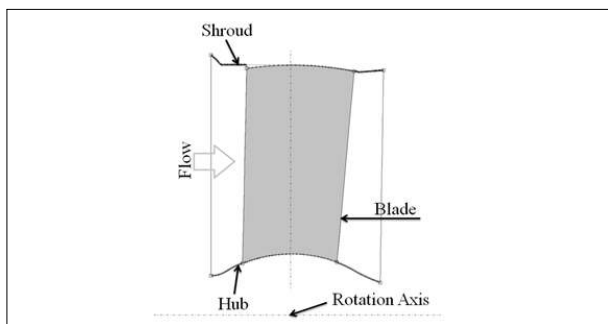


Fig. 4 Meridional shape of the runner part

3) 익형 채택

Fig. 5는 런너부를 나타내고 Fig. 6은 허브측 익형단면을 나타낸다.

4) 허브와 슈라우드 사이를 보간

보간법을 이용하여 허브와 슈라우드 사이 공간을 보정하였다.

캠버에 대한 최적화 설계는 상기 4단계의 설계기준을 적용하여 수행하였으며, Fig. 6은 각 단계를 적용한 최종 런너부를 설계한 형상이다.

본 연구에서는 축류 프로펠러 수차의 런너 익형 캠버 변화에 따른 유동 특성을 연구하였는데, 런너 익형 캠버를 0~8%, 수두 3~5.5m 범위를 설정하여 수치해석을 수행하였다.

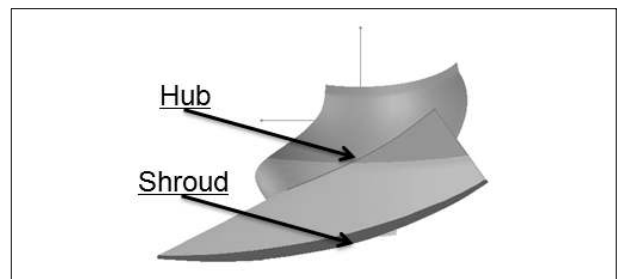


Fig. 5 Generated runner blade

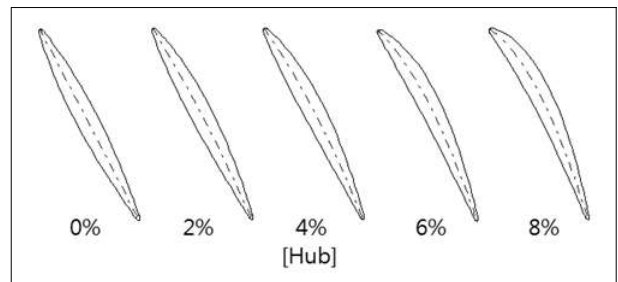


Fig. 6 Adopted airfoil shape on the runner blade hub

Table 2. Cases of conducted numerical analyses

Head	3m	4m	4.5m	5m	5.5m
0% Camber	C00_3	C00_4	C00_4,5	C00_5	C00_5,5
2% Camber	C02_3	C02_4	C02_4,5	C02_5	C02_5,5
4% Camber	C04_3	C04_4	C04_4,5	C04_5	C04_5,5
6% Camber	C06_3	C06_4	C06_4,5	C06_5	C06_5,5
8% Camber	C08_3	C08_4	C08_4,5	C08_5	C08_5,5

Table 2는 각 케이스 명명의 용이성을 위해 분류명칭을 나타내었다.

3. 수치해석

3차원 비압축성, 비정상 유동 특성을 고찰하기 위해 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) \quad (2)$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

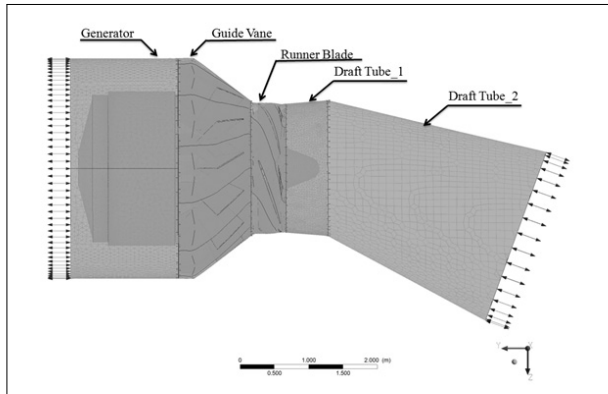


Fig. 7 The grid systems

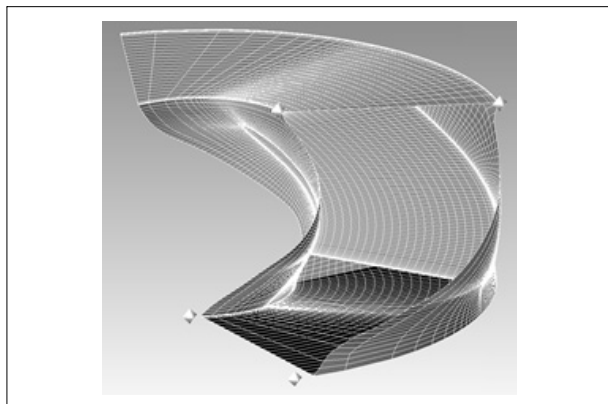


Fig. 8 Grid system for the runner blade

여기서,

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad (4)$$

위 식에서 p 는 압력이며, τ 는 압력텐서를 나타낸다. 이들 지배방정식의 3차원 유동 변수를 해석하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 난류모델로는 $k-\omega$ 모델을 바탕으로 하는 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. 이 모델은 벽면에서 층과 유동박리(flow separation) 모사에 우수한 결과를 보이기에 채택하였다⁽⁹⁾. 또한, 작동유체의 온도 변화는 무시할 수 있기 때문에 열전달을 고려하지 않았다.

벽면에서의 해석조건으로 점착조건(no-slip condition)을 적용하였으며, 입구조건은 정수압 법칙에 의해 계산된 값을 적용하였다. 출구조건은 상대압력을 0으로 하였고, 런너부의 회전속도는 180rpm이고 정상상태에서 다른 회전속도를 할당하는 MRF(Moving Reference Frame)기법을 사용하여 회전부를 해석하였다.

전체 격자계는 발전기, 안내깃, 런너 블레이드, 그리고 흡출관 1, 2로 나뉘어져 있다. 런너 블레이드를 회전부로 설정하고 나머지 부분은 비회전부로 설정하였다. 런너부와 안내깃은 정렬 격자계로 격자생성을 하였으며, 나머지 비회전부는 비정렬 격자계를 사용하였다. 일반적으로 정렬 격자계와 비정렬 격자계는 격자 수를 최소화 할 수 있기 때문에 해석시간을 줄일 수 있다.

Fig. 7은 전체 격자계를 나타내며, Fig. 8은 런너 블레이드의 격자를 나타내었다. 전체 해석 영역에서 상대적으로 허브와 슈라우드, 그리고 블레이드 면에 대해 조밀 격자를 생성하였다.

전체 격자수는 200만개이며 Table 3은 수차 각 부분에 대한 격자 형태와 격자수를 나타내었다.

Table 3. Number of elements and the cell structure

Part Name	No. of Elements	Cell Structure
Generator	578554	Tetrahedral, Prism layer
Guide Vane	347904	Hexahedral
Runner Blade	330000	Hexahedral
Draft Tube_1	271442	Tetrahedral, Prism layer
Draft Tube_2	444502	Tetrahedral, Prism layer

4. 결과 및 고찰

본 연구에 적용된 소수력 발전 수차는 축류형 프로펠러이며, 주요 형상 변수인 런너 익형 캠버 변화가 수차발전기의 발전 성능에 미치는 영향에 대하여 수치적 결과를 도출하였다.

수차해석은 0~8% 범위로 런너 블레이드의 캠버값을 변화시켰으며, 수차의 날개 수는 5개로 고정하여 날개 수 변화는 고려하지 않았다. Fig. 9~10은 수두 변화에 따른 유량과 축동력(shaft power)을 나타내고 있다. 고정 회전속도일 때 축동력은 Fig. 9에 도시한 바와 같이 수두 변화에 따라 선형적인 결과를 나타내었으며, 캠버 변화에는 반비례 결과를 나타내었다. 한편, 유량은 Fig. 10에 도시한 바와 같이 일정한 경향을 나타내었다. 여기서 주목할 점은 캠버가 4% 변할 경우(C04) 3m 수두의 다른 경우에 비해 상대적으로 높은 질량 유량과 축동력을 나타내었다. 또한, C04 경우에 대한 효율도 축동력이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있으며(Fig. 11 참

조), 다른 경우보다 효율이 우수함을 알 수 있다. 이로부터 C04가 수두변화에 대해 최적화된 캠버값을 가진다고 볼 수 있다. 더욱이 Fig. 12에서 유량 3~5m 변화에 따른 효율곡선은 C04가 최적임을 알 수 있다. C04가 상대적으로 높은 효율을 보이는 이유를 설명하기 위하여 Fig. 13에서 보는 바와 같이 블레이드 표면의 압력분포가 C04 케이스가 가장 균등한 압력분포를 받아 축동력에 전달되는 효율 블레이드 표면 압력이 균등하는 것은 free vortex theory에 따라 회전길이 방향으로 휘어지는 익형이 일정함과 동시에 출구방향 익각의 회전속도가 기준 수두조건에서 0값에 근접한 값을 나타냄에 따라 최대 효율을 얻는 것이라 판단된다⁽⁸⁾. Fig. 14는 수두 5m에서의 런너 블레이드면 압력분포를 나타내었다. 블레이드 면의 압력분포는 0부터 1까지 단위로 표시하였으며, x-축은 전익에서 후익까지, y-축은 허브에서 슈라우드 쪽까지, 그리고 z-축에서 양의 블레이드는 표면 압력값을 나타내고 음수로 표시되면 배압력을 나타낸다. 이런 런너 블레이드 압력면의 해석 결과를 통해 캠버가 증가함에 따라 전체 압력

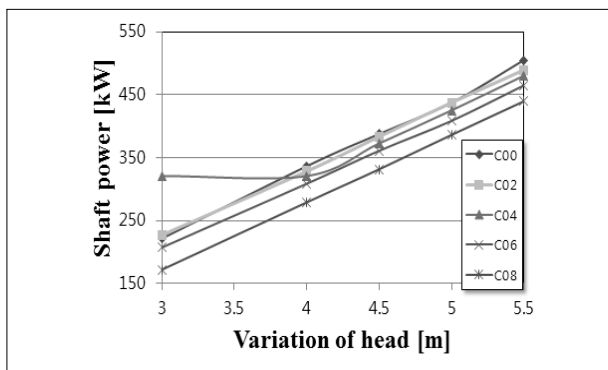


Fig. 9 Shaft power versus variation of head

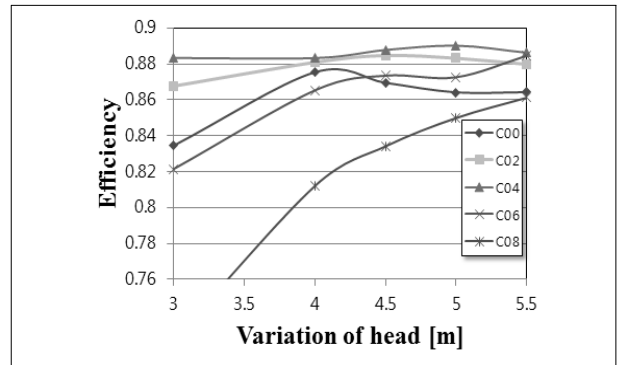


Fig. 11 Efficiencies versus head

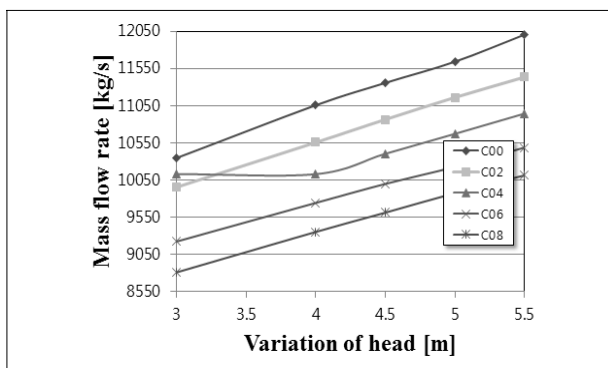


Fig. 10 Mass flow rate versus variation of head

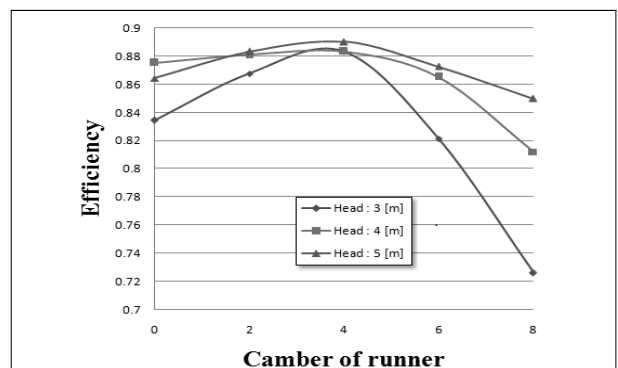


Fig. 12 Efficiencies versus camber with various values of head

이 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 전익에서 회전방향으로 과도하게 굽어지는 것은 캠버의 증가로 인한 영향으로 볼 수 있다. 더욱이 이런 굽힘은 후익에서 와류 발생으로 인한 에너지 분산으로 작동유체의 흐름을 방해한다.

런너 블레이드의 이러한 곡면은 모멘텀을 감소시켜 작동유체의 흐름에 영향을 미치게 되기 때문에 작동유체의 모멘텀

은 축동력으로 효과적으로 전환되지 못한다⁽¹⁰⁾.

5. 결론

앞서 언급한 Alexander 등⁽⁶⁾은 이론적인 부분으로만 평판형 블레이드를 설계 하여 최대 효율을 74%를 얻었지만 충분한 익형을 확보하지 못했으며, 익형의 캠버값에 대한 형상변수를 설정하지 않았다. 본 연구는 실제 소수력발전기 기본 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 최적화된 수차 효율이 88%였다. 이는 소수력발전 산업에서 일반적인 수차 효율이다. 비속도와 설계변수가 유사한 런너와 비교해도 높은 효율임을 알 수 있다. 본 연구에서는 런너 블레이드의 캠버가 출력에 미치는 영향을 고찰하였으며, 최적화 과정을 통하여 얻은 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 런너 블레이드의 전체 압력은 캠버값 변화가 증가할 때 지속적으로 증가하였다. 이는 런너 블레이드의 곡선 형상이 작동유체의 모멘텀을 효과적으로 변화하였다는 것을 나타낸다.
- 2) 블레이드 배면의 전체 음압력은 캠버가 증가함에 따라 증가하였고 후익의 와류 발생으로 인한 에너지 분산으로 작동유체의 모멘텀이 축동력으로 효과적으로 에너지 변환되지 못했음을 의미한다.
- 3) 런너 블레이드 캠버의 최적화과정에 따라 수행된 최적화 캠버(4% 모델)는 유량의 감소에 유연하게 대처함에 따라 높은 효율을 나타내었다.

본 연구를 통해서 캠버값에 따른 최적화 과정을 통해 3~4m 저낙차 부근에서도 일정효율을 얻을 수 있는 CO4 익형을 확보할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 최적화된 NACA익형을 적용하여 효율적인 수차발전기 개발이 가능할 것이다.

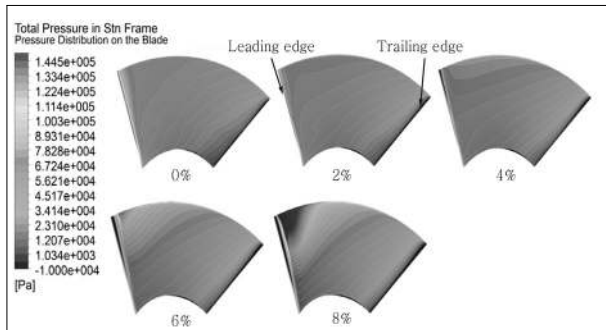


Fig. 13 Pressure distributions on the runner blade

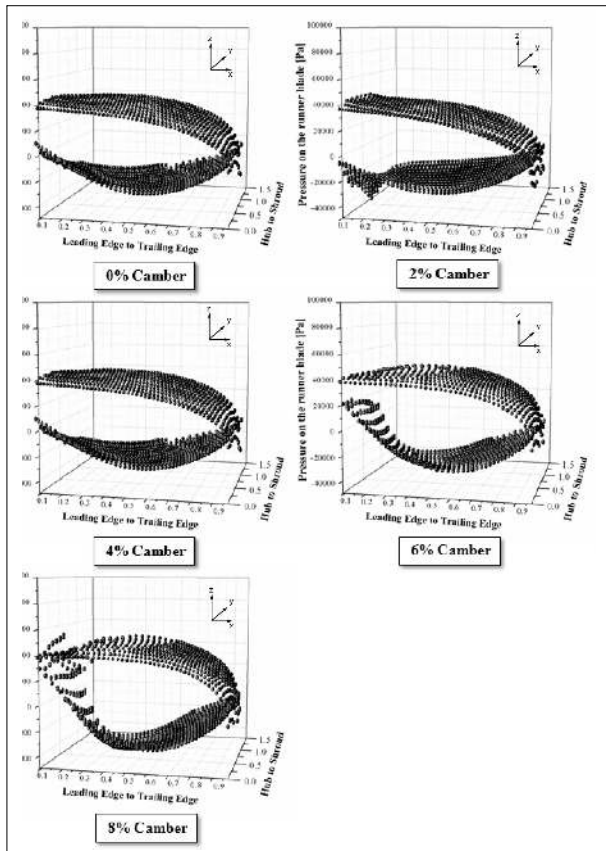


Fig. 14 Pressure distribution on the runner blade with various camber conditions

References

[1] Rao, G. J., Prasad, R. and Rao, J. K. S., 1988, "Investigation of an Axial Flow Runner for Micro Hydro Power Development", in: Proceedings of 8th Fluid Machinery Conference, Budapest, Hungary, pp. 616-23.
 [2] Soundranayagam, S. and Suryanarayanan, A., 1988,

“Ultra Low-Head Propeller Turbines for Small Canal Drops”, Turbomachines Laboratory Report, Indian Institute of Science, Bangalore, India.

- [3] Demetriades, G. M., 1997, “Design of Low-Cost Propeller Turbines for Standalone Micro-hydroelectric Generation Units”, Ph. D. Thesis. University of Nottingham, United Kingdom.
- [4] Upadhyay, D., 2004, “Low Head Turbine Development using Computational Fluid Dynamics”, Ph.D. Thesis. University of Nottingham, United Kingdom.
- [5] Simpson, R. G. and Williams, A. A., 2006, “Application of Computational Fluid Dynamics to the Design of Pico Propeller Turbines”, in: Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries.
- [6] Alexander, K. V., Giddens, E. P. and Fuller, A. M., 2009, “Axial-flow turbines for microhydro systems”, Elsevier Journal of Renewable Energy, Vol. 34, pp. 35-47.
- [7] Singh, P. and Nestmann, F., 2009, “Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application”, Elsevier Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33, pp. 991-1002.
- [8] Dixon, S. L., 2005, Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery, Elsevier, Oxford, UK, Chapters 2, 6 and 9.
- [9] ANSYS CFX ver.13 User's Guide, 2011, ANSYS Inc.
- [10] Paik, N. C., 2010, “Performance Characteristics fo an Axial Propeller Small-hydro Turbine with Various Cambers fo Runner Blade”, International Conference on Parallel Computational Fluid dynamics.

변 순 석



2007년 성균관대학교 기계공학과 공학사

현재 성균관대학교 기계공학과 석사과정
(E-mail : mildstone@skku.edu)

김 정 환



1998년 부경대학교 기계공학과 공학사
2000년 부경대학교 기계공학과 공학석사
2003년 한국해양대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국조선해양기자재연구원 에너지해양연구본부 본부장
(E-mail : jhkim@komeri.re.kr)

김 태 운



2007년 전북대학교 정밀기계과 공학사
2012년 성균관대학교 공학부 기계공학과 박사과정
수료

현재 한국조선해양기자재연구원 전북분원 선임연구원
(E-mail : tykim@komeri.re.kr)

김 윤 제



1982년 성균관대학교 기계공학과 공학사
1987년 State University of New York (Buffalo),
기계공학과, M.S.
1990년 State University of New York (Buffalo),
기계공학과, Ph.D

현재 성균관대학교 기계공학부 정교수
(E-mail : yjkim@skku.edu)

한 상 목



2001년 성균관대학교 기계공학과 공학사
2003년 성균관대학교 기계공학과 공학석사
2011년 성균관대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국조선해양기자재연구원 전북분원 선임연구원
(E-mail : smhan@komeri.re.kr)