

유효낙차에 따른 80kW급 횡류수차의 성능 및 내부유동 해석 최영도¹ · 임재익² · 이영호[†]

(원고접수일 : 2010년 2월 22일, 원고수정일 : 2010년 6월 12일, 심사완료일 : 2010년 7월 15일)

Performance and Internal Flow Analysis on the 80kW-Class Cross-Flow Hydro Turbine with the Variation of Effective Head

Young-Do Choi¹ · Jae-Ik Lim² · Young-Ho Lee[†]

요약 : 최근 신재생에너지 연구개발과 관련하여 소수력발전에 대한 관심이 높아지고 있지만, 기존의 대수력용 수차 시스템과는 달리 소수력에 적당한 수차의 설계법이 아직 확립되어 있지 않기 때문에 고성능의 소수력용 수차의 개발이 요구되고 있다. 그러나, 복잡한 터빈의 구조에 의한 상대적으로 높은 제작단가는 소수력발전용 터빈의 개발에 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수차의 형상이 상대적으로 간단하고 소수력자원에 적용하기가 용이한 80kW급 횡류형 수차에 대하여 유효낙차 변화에 따른 성능 및 내부유동에 대해서 검토하였다. 유효낙차가 증가함에 따라서 원주방향 및 반경방향 속도비가 증가하게 되며, 증가한 원주속도에 의해 각운동량이 증가하여 출력도 커지게 된다.

주제어 : 횡류수차, 소수력발전, 성능, 내부유동, 유효낙차

Abstract: Recently, small hydropower attracts attention because of its clean, renewable and abundant energy resources to develop. However, suitable turbine type is not determined yet in the range of small hydropower and it is necessary to study for the effective turbine type. Therefore, a 80kW-Class cross-flow turbine is adopted in this study because of its simple structure and high possibility of applying to small hydropower. The result shows that as effective head increases, tangential and radial flow velocities increase and thus, the increased tangential velocity contributes to the increase of angular momentum and output torque.

Key words: Cross-flow turbine, Small hydropower, Performance, Internal flow, Effective head

기호설명

b : 노즐, 러너, 러너챔버 폭 (mm)
 C_p : 압력계수
 d : 러너 외경 (mm)
 H : 유효낙차 (m)
 P : 출력 (W)
 Q : 체적유량 (m^3/s)

u : 러너회전속도 (m/s)
 v : 유속 (m/s)
 η : 효율
 $\theta^1_{passage\ average}$: Stage 1 에서의 블레이드 유로 원주방향 평균 위치
 $\theta^2_{passage\ average}$: Stage 2 에서의 블레이드 유로 원주방향 평균 위치

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail: lyh@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4293)

¹ 목포대학교 기계공학과

² (재)한국조선기자재연구원

ρ : 유체밀도 (kg/m^3)

하첨자

0, b_{ep} : 러너외경 및 최고효율점

r , θ : 반경 및 원주 방향

1. 서 론

최근 신재생에너지 연구개발과 관련하여 소수력 발전에 대한 관심이 높아지고 있지만, 기존의 대수력용 수차 시스템과는 달리 소수력에 적당한 수차의 설계법이 아직 확립되어 있지 않기 때문에 고성능의 소수력용 수차의 개발이 요구되고 있다. 그러나, 복잡한 터빈의 구조에 의한 상대적으로 높은 제작단가는 소수력발전용 터빈의 개발에 큰 걸림돌로 작용하고 있다.

따라서, 수차의 형상이 상대적으로 간단하고 소수력자원에 적용하기가 용이한 횡류형 수차에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

횡류수차에 대한 이전의 연구에서는 Mockmore 등[1]이 수차의 최적형상에 대해서 실험 및 이론적인 방법에 대하여 연구를 수행하였으며, Fukutomi 등[2-5]은 노즐형상에 따른 터빈의 성능변화에 대해서 실험 및 수치계산을 통한 연구를 수행하였다. 또한, 최 등[6]은 1kW급 모델수차에 대하여 러너 챔버 내부의 공기층효과에 대해서 검토하였으며, 적절한 양의 공기를 횡류수차 내부에 주입하면 충돌손실 및 재순환손실을 억제하여 수차효율이 증가함을 확인하였다.

본 연구에서는 소수력 상업발전용으로 개발 중인 80kW급 횡류수차에 대해서 유효낙차에 따른 수차의 성능 및 내부유동을 검토하여 최적성능 운전을 위한 기초 데이터를 확보하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험장치

Figure 1은 본 연구에서 채용한 80kW급 횡류수차의 실제 형상을 보이고 있으며, Figure 2는 수차 개략도를 나타내고 있다. 수차의 노즐유로 중앙에는 유량변화에 대하여 러너입구 유입속도를 조절하기 위한 가이드베인이 설치되어 있다. 가이드

베인은 유량에 따라서 적정 효율을 유지하기 위하여 설정각도가 변화되며, 최고효율점에서의 가이드 베인 각도는 22° 로 설정하였다. 러너는 입구각도가 30° , 출구각도가 87° 이다. 노즐, 러너 그리고 러너실의 폭은 모두 $b=550\text{mm}$ 로 동일하게 설계하였다. 수차의 설계점 유효낙차, 유량 그리고 회전수는 각각 20m, $0.516\text{m}^3/\text{s}$ 그리고 530min^{-1} 이다. 또한, 러너 블레이드를 통과하는 흐름에 의한 러너 국부 각 영역에서 발생하는 축동력을 확인하기 위하여 Figure 2에 보이는 바와 같이 Stage 1, 2 (주류 유로) 와 Area 1, 2(재순환 유로)로 구분하였다.

횡류수차의 성능향상을 위해서 일반적으로 러너실 내부에 공기층을 설치하게 되는데, 공기층을 설치함에 의해 러너내부에 발생하는 재순환흐름의 발생을 억제할 수 있으며, 또한 공기층의 크기를 조



Figure 1: 80kW-Class cross-flow type hydro turbine for commercial power generation

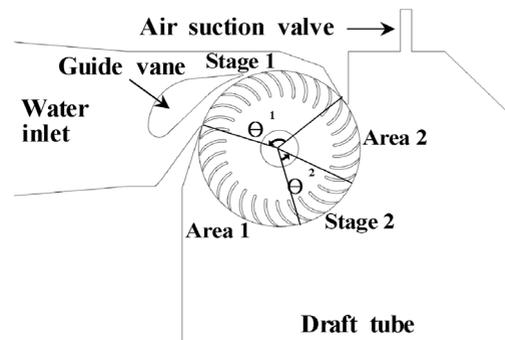


Figure 2: Schematic view of test cross-flow turbine and division of runner flow passage

절함에 의해 러너 Stage 1의 출구를 빠져나온 흐름이 러너축과 충돌하여 발생하는 충돌손실을 저하시킬 수 있다[6].

러너실 내부로 공급하는 공기는 러너실 내부가 대기압보다 낮기 때문에 자연유입되며, 공기유입량은 유량계를 이용하여 확인하고, 공기유입관에 설치된 밸브를 이용하여 유입유량을 조절한다.

2.2 수치해석법

Figure 3은 횡류수차의 형상에 대하여 작성된 계산격자를 보이고 있으며, 본 연구에 채용된 횡류수차는 러너실 내부의 형상이 러너의 폭방향으로 2차원적인 형상이기 때문에 횡류수차의 러너실 내부 유동이 거의 2차원적인 흐름을 나타낼 것으로 판단되어 계산격자는 러너의 폭 방향으로 5층의 격자를 구성하여 2차원형상의 계산격자로 작성하였다. 유입노즐과 러너실, 흡출관을 일체로 작성하고, 러너를 분리 작성하여 다중격자로 구성하였다. 격자의 형상은 계산결과의 수렴성과 신뢰도를 향상시키기 위하여 전체 격자에 대하여 Hexahedral 구조격자를 사용하였다. 무차원 벽면거리인 y^+ 값의 범위는 유로의 형상을 고려하여 러너 부분의 격자에서 15 이하, 노즐 부분에서는 50 이하로 설정하였으며, 전체 계산격자수는 y^+ 값과 계산기의 계산시간 및 용량을 고려하여 약 220만개로 구성하였다. 수치해석을 위한 solver로서는 상용 CFD 코드인 ANSYS-CFX[7]를 사용하였다. 난류모델은 $k-\omega$ SST 모델[7]을 사용하였고, 기액이상류 계산을 위해서는 inhomogeneous 모델을 적용하였다.

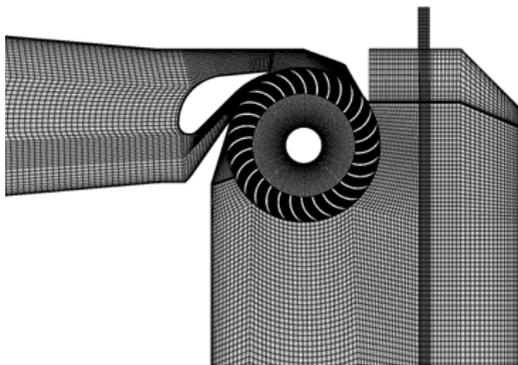


Figure 3: Numerical grid of test turbine geometry

계산유동장의 경계조건으로서, 수차의 폭방향 양쪽 벽면에는 대칭조건을 설정하였고, 수차 유입관 입구에서는 압력 일정, 흡출관 출구에서는 평균유량 일정의 조건을 설정하였으며, 물과 공기를 작동유체로 하는 이상류에 대해서 비정상계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성능곡선

Figure 4는 수차의 성능곡선을 나타내고 있으며, 횡축은 최고효율점에서의 유효낙차를 기준으로 하여 유효낙차비를 나타내고 종축에는 최고효율점에서의 값을 기준으로 하여 효율비 및 유량비를 나타내고 있다.

효율비에서 실험결과와 수치해석결과가 정량적으로 잘 일치하지만, 수치해석결과가 상대적으로 낮게 예측되고 있는 것은 실제 실험에서 계측한 흡출관 내부 평균수위에 비해서 기액이상류 수치해석에서 설정한 초기수위가 비정상계산에 따른 수위 변동에 의하여 흡출관 효과가 발생하여, 흡출관 내부에서의 정압 차이에 따른 유효낙차의 차이에 의하여 효율에서 미소한 차이가 발생한 것으로 판단된다.

한편, 유효낙차비가 커짐에 따라서 상대적으로 터빈의 유량비도 함께 증가하는 경향을 나타내고 있다.

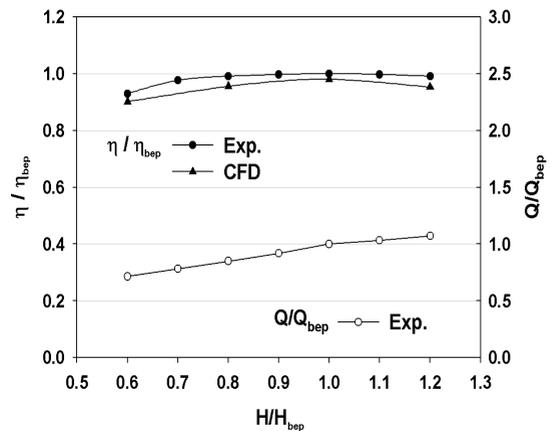


Figure 4: Performance curves of test turbine

3.2 국소출력 분포

Figure 5는 러너 전체에서 발생하는 전체 출력과 Figure 2에서 구분한 각 국소러너유로에서 발생하는 국소출력을 함께 나타내고 있다.

유입관 출구의 노즐에서 흘러나온 흐름이 러너와 부딪히게 되는 Stage 1에서 국소출력이 가장 크게 나오고 있으며, 그 다음으로 Stage 2와 Area 2의 순으로 출력이 발생하고 있다. 그러나, Area 1에서는 출력이 음의 값을 나타내고 있으며, 이러한 결과로부터 이 영역에서 손실이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

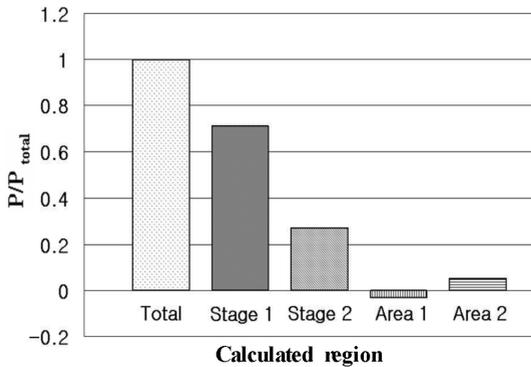


Figure 5: Calculated output power in test turbine rotor (CFD, $H/H_{bep}=1.0$)

3.3 기액이상 유동

Figure 6은 러너실 내부에 공기흡입밸브를 통하여 공기가 주입됨에 따라서 러너실 내부에서 물과 공기의 혼합에 의해 발생하는 기액이상유에 대해서

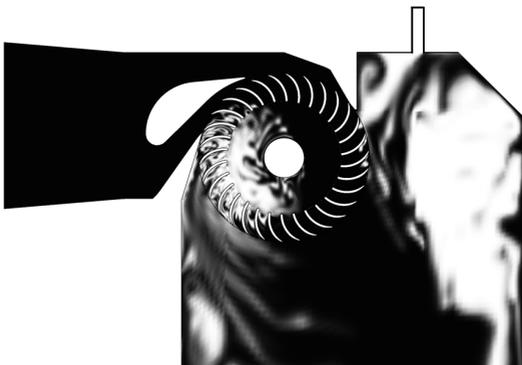


Figure 6: Water-air two phase flow in the test turbine (CFD, volume of fraction, $H/H_{bep}=1.0$)

나타내고 있다. 그림 중의 러너실 내부에서 검은색 영역은 물, 흰색 영역은 공기층을 각각 나타내고 있다.

러너실 우측 상부의 공기흡입밸브를 통해서 공기가 유입될 경우 러너실 우측 상부와 러너내부 좌측에 공기층이 형성되어 전체 흐름에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.4 속도벡터 및 속도분포

성능곡선 및 출력해석결과에서 나타난 80kW급 횡류수차의 성능에 영향을 미치는 내부유동을 상세하게 검토하기 위하여 수차내부의 속도벡터 및 러너유로 입구 및 출구에서의 속도분포에 대해서 살펴봐왔다.

Figure 7은 횡류수차 러너실 하부의 흡출관이 대기방출되지 않는 상태에서의 내부유동장 속도벡터 계산결과를 보이고 있다. 러너실 우측 상부에 설치된 공기흡입구를 통한 공기유입에 의해 러너의 부 우측 및 러너내부 좌측에는 공기층이 존재하게 된다. 이러한 공기층의 존재는 러너내부(Area 1)의 재순환유동과 축충돌을 억제하고[6], Stage 2의 출구 유동각도를 조절하는 역할을 수행하게 되어 성능향상에 기여하게 된다[1].

Figure 5에서 Area 1 영역에서 출력손실이 발생한 것은 이 영역에서 재순환유동이 여전히 존재함을 의미하며, 러너내부 좌측에 공기층을 더욱 크게 형성시킴에 의해 손실발생을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

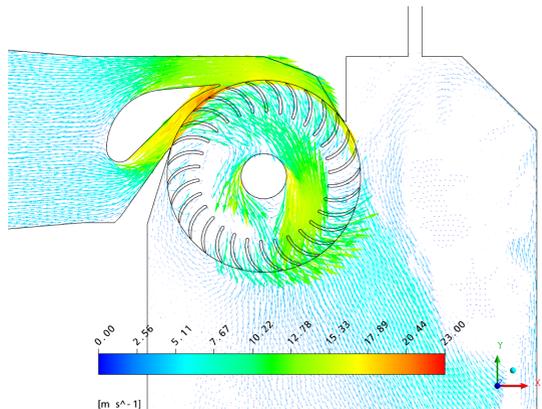


Figure 7: Velocity vectors in the internal flow field of test turbine (CFD, $H/H_{bep}=1.0$)

한편, 횡류수차는 충동형 수차의 특성을 가지고 있기 때문에 러너를 통과하는 흐름의 속도분포가 수차의 성능에 영향을 크게 미치게 된다. 즉, 수차의 출력에 영향을 미치는 주요한 인자로서 각운동량($\Delta L_{AM} = rM\Delta v_\theta$, r 은 러너극소반경, M 은 질량)이 있으며, 각운동량에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서는 원주방향 속도(Δv_θ)와 유량(M)이다. 따라서, 수차 출력의 대부분을 발생시키고 있는 Stage 1과 2의 입구와 출구에서의 속도분포에 대해서 검토하였다.

Figure 8에서는 횡축에 Stage 1과 2에서의 블레이드 유로 원주방향 평균 위치를 나타내고, 종축에 Stage 1과 2의 러너유로 입구 및 출구에서 원주방향 속도비(v_θ/u_0) 및 반경방향 속도비(v_r/u_0)를 함께 나타내어 각 Stage 입출구에서의 유속분포를 1유로분의 평균 속도로 나타내고 있다. 횡축의 좌측은 블레이드의 부압면 부근, 우측은 압력면 부근을 나타낸다.

원주방향 속도비는 Stage 1의 입구에서 가장 높게 나타나고 있으며, Stage 1 출구에서 속도가 낮아졌다가 다시 러너내부를 통과하면서 유속이 상승하여 Stage 2 입구에서는 Stage 1 출구에서보다 높은 속도를 보이고 있다. 그러나, Stage 2의 러너 블레이드 유로를 통과하면서 원주방향속도는 급격히 낮아져서 출구에서는 거의 0에 가까운 속도분포를 보이고 있다.

이와 같은 원주방향 속도비의 변화는 각운동량의 증가에 의한 출력의 발생과 밀접한 관련이 있으며, Figure 5에서 확인된 Stage 1과 2에서의 발생 출력에 원주방향 유속이 큰 기여를 한 것으로 판단된다.

즉, 러너블레이드 유로의 입구와 출구 사이에서 감소한 원주방향 유속(Δv_θ)의 절대값은 러너블레이드 유로에서 증가한 각운동량(ΔL_{AM})의 절대값에 비례($|\Delta L_{AM}| = |rM\Delta v_\theta|$)하기 때문에 원주방향 유속의 감소분은 수차의 출력증가에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

또한, 반경방향 속도비(v_r/u_0)는 각 지점을 통과하는 유량과 밀접한 관련이 있으며, Stage 2 입구

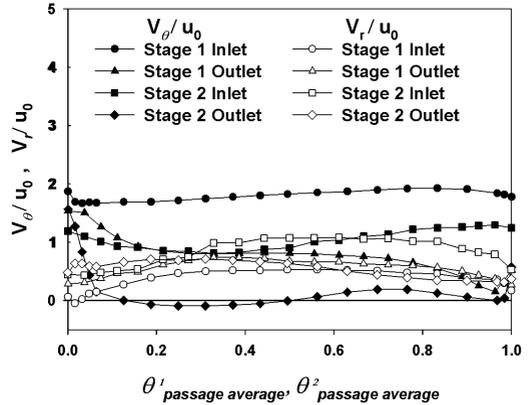
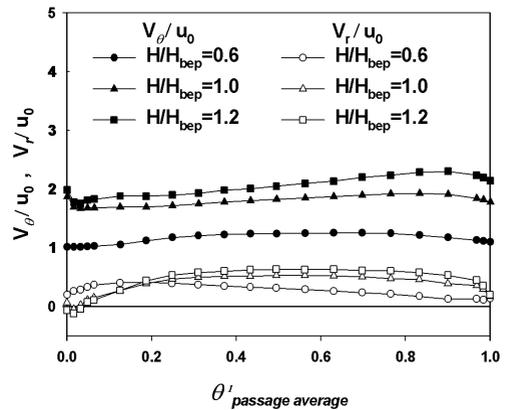
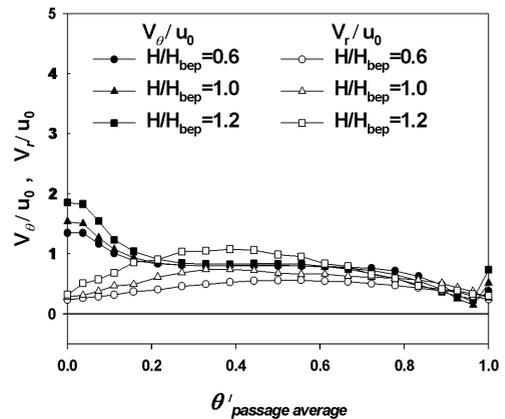


Figure 8: Passage averaged velocity distribution (CFD, $H/H_{bep}=1.0$)



(a) inlet



(b) outlet

Figure 9: Passage averaged velocity distributions by effective head at Stage 1 (CFD)

에서 다른 지점에서 보다 약간 상승된 속도비를 보이는 것은 Figure 7에 보이는 바와 같이 러너를 통과하는 주류가 Stage 1에서는 상대적으로 많은 수의 블레이드 유로를 통과하지만, Stage 2에서는 비교적 적은 수의 러너 블레이드 유로를 통과함에 따라서 통과 유로의 유속 평균값이 크게 나타나고 있기 때문이다.

한편, Figure 9와 10에서는 Stage 1과 2의 입구와출구에서 유효낙차의 변화에 따른 유속분포를 나타내고 있다. Figure 9의 Stage 1 입구에서는

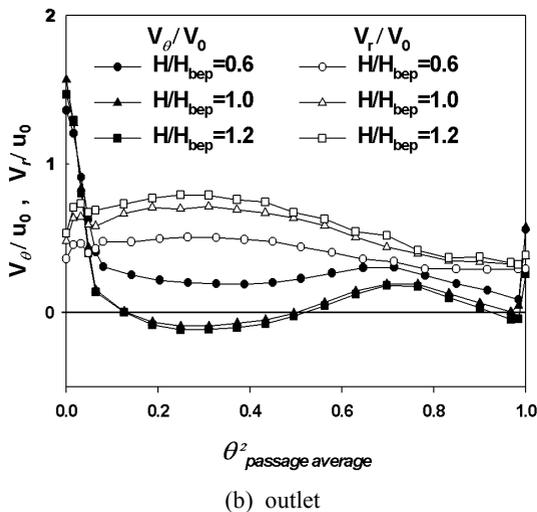
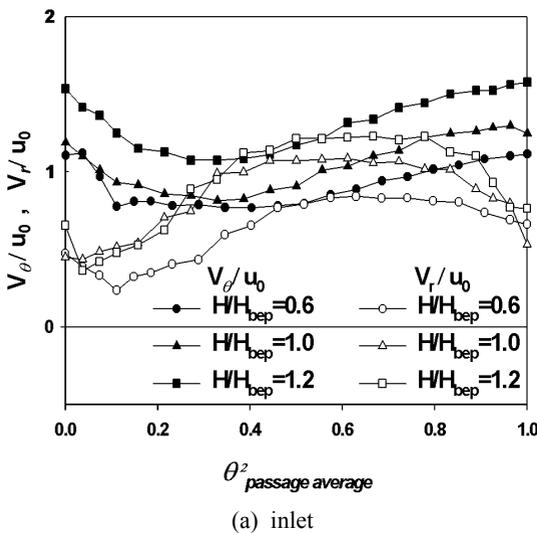


Figure 10: Passage averaged velocity distributions by effective head at Stage 2 (CFD)

낙차가 증가함에 따라서 원주방향 및 반경방향 속도비도 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 유입관 노즐 출구에서의 유출각도가 Stage 1 입구의 원주방향 유입각도와 거의 동일하기 때문에 유량이 증가할 경우 Stage 1의 입구의 원주방향 유입속도도 증가하게 된다. 또한, 낙차가 증가하게 되면 Figure 4에 보이는 바와 같이 유량도 거의 비례적으로 증가하여 반경방향 속도도 증가하게 된다. 따라서, Figure 4에서 보인 바와 같이 일정 낙차 범위까지는 낙차 증가에 따라서 각운동량 증가에 따른 출력 및 효율의 증가가 예상된다.

Figure 9의 Stage 1에서 유입흐름이 러너 블레이드 유로를 통과하면서 입구에서의 원주방향속도에 포함된 운동에너지가 각운동량으로 변화됨에 따라서 러너의 출력이 발생하게 되며, 유로출구에서는 원주방향속도가 크게 저하되지만, 반경방향속도는 유량에 비례하는 속도분포를 보이고 있다.

Figure 10에서는 Stage 2의 러너 블레이드유로 입구와 출구에서 유효낙차의 변화에 따른 유속분포를 나타내고 있다. Stage 2에서는 낙차에 따른 유속변화의 크기가 Stage 1에서보다는 작게 나타나고 있지만, 낙차에 따른 유속분포 변화의 경향은 Stage 1에서의 경우와 전체적으로 유사함을 알 수 있다.

3.6 압력선도 및 압력분포

Figure 11은 수차내부의 압력선도를 나타내고 있으며, 유입관에서 노즐을 통과하면서 압력이 점차 내려가게 되어 러너내부에서 최저압력 영역이 존재함을 알 수 있다. 러너내부에서 최저압력 영역이 존재하는 것은 러너가 회전함에 따라서 러너유로를 통과하는 흐름의 유속이 증가한 반면, 러너내부에서는 부압이 형성되어 수차 외부의 대기압에 비해서 상대적으로 낮은 압력 영역이 형성되었기 때문이다.

러너 내부 좌측하부 최저압력 영역은 Figure 6의 해석결과에서 확인된 공기층이 존재하는 영역과 일치하며, 이것은 러너내부 최저압력 영역의 크기 및 분포 위치가 공기층의 형성 면적 및 위치와 서로 상관관계가 있음을 의미한다.

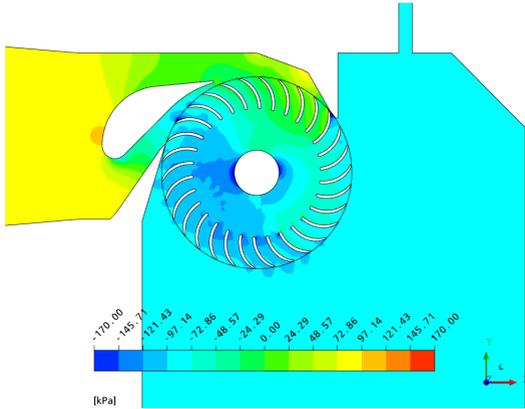
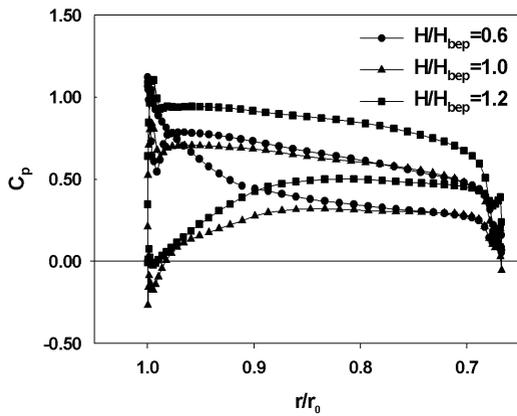
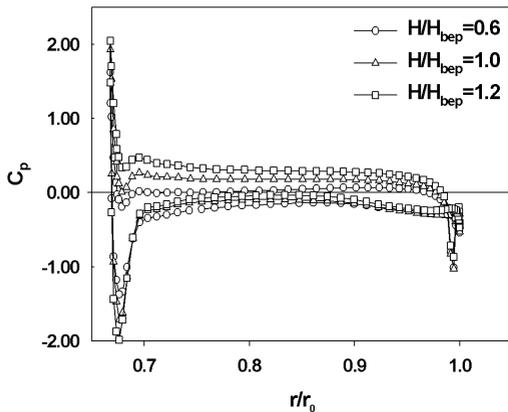


Figure 11: Pressure contours in the internal flow field of test turbine (CFD, $H/H_{bep}=1.0$)



(a) Stage 1



(b) Stage 2

Figure 12: Averaged pressure distributions around the runner blade surface by effective head (CFD)

Figure 12는 유효낙차에 따른 Stage 1과 2에서의 전체 러너 블레이드 표면 압력을 각 Stage 별로 평균한 결과이다. 낙차가 증가함에 따라서 블레이드의 압력면과 부압면 사이의 면적이 증가하게 되며, 이러한 결과는 압력면과 부압면의 차압이 증가하게 되어 출력이 증가하는 결과를 나타내게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소수력 상업발전용으로 개발 중인 80kW급 횡류수차에 대해서 유효낙차에 따른 수차의 성능 및 내부유동을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 횡류수차 러너 Stage 1의 입구에서는 유효낙차에 비례하여 원주방향 유속비가 증가하는 원인을 검토하였으며, 이것은 유입관 노즐 출구에서의 유출각도가 Stage 1 입구의 원주방향 유입각도와 거의 동일하기 때문에 낙차가 증가하게 되면 유량도 거의 비례적으로 증가하여 반경방향 속도가 증가하게 되는 것으로 판명되었다.

2. Stage 1에서 유입흐름이 러너 블레이드 유로를 통과하면서 입구에서의 원주방향속도에 포함된 운동에너지가 낙차에 비례하여 각운동량으로 변화됨에 따라서 러너의 출력도 낙차에 비례하여 발생하게 되지만, Stage 1 유로출구에서는 블레이드 유로 내부에서의 출력 증가에 따른 각운동량 감소량에 비례하여 유출흐름의 원주방향속도가 크게 감소하게 된다.

3. 공기층의 존재는 러너내부의 재순환유동과 축충돌에 의한 손실발생을 억제하고, Stage 2의 출구 유출각도를 조절하는 기능을 수행하게 되어 성능향상에 기여하게 된다. 따라서, 러너실 내부에 적당한 양의 공기층을 형성시키는 것에 의해 손실 발생 억제에 의한 횡류수차의 성능향상을 기대할 수 있다.

참고문헌

[1] C. A. Mockmore and F. Merryfield, The Banki Water Turbine, No. 25, Engineering Experiment Station, Oregon State Colleg, Corvallis, Oregon.

USA, 1949.

- [2] J. Fukutomi, Y. Nakase and T. Watanabe, "A numerical method of free jet from a cross-flow turbine nozzle", Bulletin of JSME, vol. 28, no. 241, pp. 1436-1440, 1985.
- [3] J. Fukutomi, Y. Senoo and Y. Nakase, "A numerical method of flow through a cross-flow runner", JSME International Journal, Ser. II, vol. 34, no. 1, pp. 44-51, 1991.
- [4] J. Fukutomi, Y. Nakase, M. Ichimiya and H. Ebisu, "Unsteady fluid forces on a blade in a cross-flow turbine", JSME International Journal, Ser. B, vol. 38, no. 3, pp. 404-410, 1995.
- [5] Y. Nakase, J. Fukutomi, T. Watanabe, T. Suetsugu, T. Kubota and S. Kushimoto, "A study of cross-flow turbine (Effects of nozzle shape on its performance)", Small Hydro Power Fluid Machinery (Proc. the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers), Phoenix, Arizona, USA, pp. 13-18, 1982.
- [6] Y. D. Choi, J. I. Lim, Y. T. Kim and Y. H. Lee, "Performance and internal flow characteristics of a cross-flow hydro turbine by the shapes of nozzle and runner blade", J. of Fluid Science and Technology, vol. 3, no. 3, pp. 398-409, 2008.
- [7] ANSYS-CFX Documentation Ver. 11, ANSYS Inc., <http://www.ansys.com>, 2007.

저 자 소 개

최영도(崔永都)



1970년 6월생, 1996년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2003년 오코하마국립대학 대학원 박사과정수료(공학박사), 1996년~1998년 대우중공업(주) 사원, 2003년~2006년 오코하마국립대학 대학원 공학연구원 조수, 2009년~현재 목포대학교 기계공학과 전임강사, 관심분야: 소수력발전, 해양에너지, 풍력발전, 유체기계, PIV, CFD.

임재익(林宰燧)



2008년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 (공학석사), 2008~현재 (재)한국조선기자재연구원 연구원, 관심분야 ; 조선기자재, 소수력발전, 해양에너지, 신·재생에너지, PIV, CFD.

이영호(李英浩)



1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986-1989년 일본 동경대학 기계공학과(공학박사), 1980년~현재 한국해양대학교 근무 (기계·정보공학부 교수), 2001.12~2003.6 (재)한국조선기자재연구원 원장(초대), 관심분야 : 신·재생에너지, 유체기계, PIV, CFD, FSI, 수중램제트.