

## 극저비속도 영역 마이크로 횡류수차의 성능 및 내부유동 수치해석적 연구

최영도<sup>\*†</sup>, 손성우<sup>\*\*</sup>

### CFD Analysis on the Performance and Internal Flow of a Micro Cross-Flow Hydro Turbine in the Range of Very Low Specific Speed

Young-Do Choi<sup>\*†</sup>, Sung-Woo Son<sup>\*\*</sup>

*Key Words* : Micro hydropower(마이크로수력발전), Cross-flow turbine(횡류수차), Very low specific speed range(극저비속도영역), Performance(성능), Internal flow(내부유동)

#### ABSTRACT

Renewable energy has been interested because of fluctuation of oil price, depletion of fossil fuel resources and environmental impact. Amongst renewable energy resources, hydropower is most reliable and cost effective way. In this study, to develop a new type of micro hydro turbine which can be operated in the range of very low specific speed, a cross-flow hydro turbine with simple structure is proposed. The turbine is designed to be used at the very low specific speed range of hydropower resources, such as very high-head and considerably small-flow rate water resources. CFD analysis on the performance and internal flow characteristics of the turbine is conducted to obtain a practical data for the new design method of the turbine. Results show that optimized arrangement of guide vane angle and inner guide angle can give contribution to the turbine performance improvement.

#### 1. 서 론

전 세계적으로 인류는 수 백 년 동안 열과 전력을 생산하기 위해서 화석연료에 높게 의존해왔으나, 이 에너지원은 매장량이 한정적이며 점차 고갈되어가고 있다. 게다가, 화석연료의 사용은 많은 환경적인 오염을 발생시키고 있으며, 유가 상승, 수요 증가, 공급 불확실성 및 기타 요인 등으로 인하여 대체에너지의 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 신재생에너지에 대한 관심이 최근 상당히 높아졌으며, 이러한 결과는 주로 환경 피해, 특히 산성비 및 화석연료의 연소로 인한 지구온난화에 대한 우려 때문이다.

신재생에너지 자원 중에서도 마이크로 수력발전시스템은 다른 재생가능에너지원에 비하여 오랜 기간 동안 사용되고 신뢰성이 검증되어 왔기 때문에 안정적이고 경제적이며, 재

생 가능한 전력원을 제공한다.

우리 주위의 마이크로 수력자원으로는 하천, 상수도시스템, 하수처리장, 관개시설 등이 있으며, 매우 풍부한 부존 자원이 존재하고 있다. 이러한 마이크로 수력자원을 개발하기 위해서 다수의 수차가 개발되어 왔으나, 수력자원의 종류 및 설치지점의 조건에 따라서 수차의 선정범위가 달라지는 특징이 있으며, 식(1)에서 정의되는 비속도  $n_s$ 에 의해서 수차의 성능이 결정된다.

$$n_s = N \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad [\text{min}^{-1}, \text{kW}, \text{m}] \quad (1)$$

여기서,  $N$ ,  $P$ ,  $H$ 는 각각 수차의 회전수, 출력, 유효낙차를 나타낸다.

종래로부터 상대적으로 낙차가 매우 높고 유량이 적은 저비속도영역( $n_s < 70$ )에서는 충동수차가 주로 사용되어 왔다. 일반적인 충동수차로서는 펠턴수차, 터고수차, 횡류수차가

\* 목포대학교

\*\* 목포대학교 대학원

† 교신저자, E-mail : ydchoi@mokpo.ac.kr

있으며, 특히 비속도가  $n_s < 40$ 의 범위에서는 펄턴수차가 널리 사용되고 있지만, 효율개선을 위해서는 부품에 대한 매우 정밀한 가공 공정과 상대적으로 높은 제작비용이 요구되어 마이크로수력발전의 도입에 걸림돌이 되고 있다<sup>(1)</sup>.

따라서, 최근에는 마이크로 수력자원의 효율적인 개발을 위하여 매우 낮은 비속도 영역에서도 매우 단순한 구조와 높은 효율성을 가지는 극저비속도 수차의 개발에 대한 요구가 증가하고 있으며, 기존의 마이크로수차 운전범위를 확대하는 것도 마이크로 수력자원의 개발에 큰 도움이 될 것이다.

한편, 횡류수차는 비교적 단순한 구조와 넓은 유량범위에서 운전이 가능하고, 중비속도의 영역에서 폭넓게 사용되어 왔으며, 본 연구에서 목표로 하는 극저비속도 영역까지 운전 범위가 확대된다면 저비용, 고성능의 마이크로수차로서 도입이 활성화될 수 있을 것으로 기대된다.

관련 연구로서는 Mokckmore 등<sup>(2)</sup>에 의하여 횡류수차의 설계를 위한 이론적 및 실험적 연구가 체계적으로 이루어졌고, Fiuzat 등<sup>(3)</sup>에 의하여 실용화를 위한 최적형상에 대해서 실험적 연구가 이루어졌다. 또한, Fukutomi 등<sup>(4)</sup>은 횡류수차의 성능향상을 위해서 각 요소별 최적형상에 대해서 검토하였고, Olgun 등<sup>(5)</sup>과 Choi 등<sup>(6)</sup>이 횡류수차의 러너 내부에 존재하는 재순환흐름에 의한 손실을 개선하기 위한 새로운 방법을 제안했다.

본 연구에서는 횡류수차의 운전범위를  $n_s < 40$ 의 극저비속도 영역까지 확대하기 위하여 횡류수차의 기존 형상으로부터 내부유로 축방향 폭이 매우 좁은 형상으로 설계하여 그 성능과 내부유동을 검토하고자 한다. 수차모델의 성능과 내부유동을 검토하기 위하여 CFD해석을 수행하였으며, 이너가이더(Inner guider)를 도입하여 러너 내부유로에서 발생하는 재순환 흐름의 억제 효과에 대해서도 검토했다.

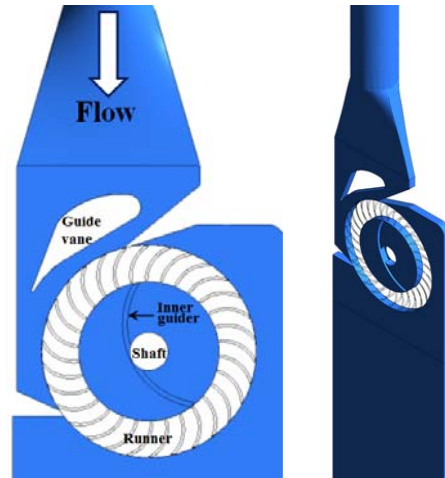


Fig. 1 Schematic view of micro cross-flow hydro turbine model

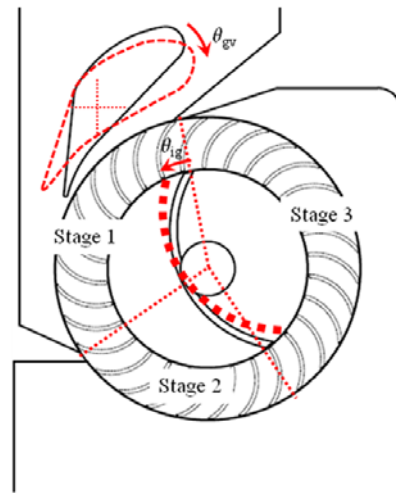


Fig. 2 Variation of guide vane angle and inner guider angle

## 2. 수차모델 및 수치해석법

### 2.1 마이크로 횡류수차 모델

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 극저비속도 횡류수차모델의 개념도를 보이고 있으며, 유입관 및 노즐은 상부로부터 수직으로 설치되어 있으며, 가이드베인의 개도에 의해 유량을 조절한다.

본 연구의 주된 목적인 수차의 내부유동과 성능의 관계를 검토하기 위해서 수차 내부유로를 가능한 단순한 구조로 설계하였다. 러너 베인의 수는  $Z=30$ 매, 러너 직경  $D=250\text{mm}$ , 러너 베인 유입측 및 유출측 각도는 각각  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=87^\circ$ 이다. 노즐, 러너 그리고 러너 챔버의 유로 폭은 모두 동일하게  $b=17\text{mm}$ 로 동일하며, 케이싱 전면부 벽면과 러너 끝단 사이의 간극은  $c=2\text{mm}$ 이다. 러너 직경에 비해서 유로의 축방향 폭이 매우 좁게 설계되었는데, 이것은 극저비속도 영역에서 상대적으로 적은 유량이 유로를 흘러가도록 설계하기 위한 것이다.

Table 1 Test Cases of turbine model

Case	Guide vane angle $\theta_{gv}$ [°]	Inner guider angle $\theta_{ig}$ [°]
A	0	0
B	5	0
C	15	0
D	15	12
E	15	-

일반적으로 횡류수차에서는 러너 내부 유로의 재순환흐름을 억제하기 위해서 공기를 수차 외부로부터 흡입시켜서 러너 유로 내부에 공기층을 형성시키지만<sup>(6)</sup>, 본 연구에서는 공기를 흡입하여 공기층을 형성시키는 대신에 이너가이더를 러너 내부에 설치하여 재순환흐름을 조절하였다. Fig. 2는 가이드베인 각도  $\theta_{gv}$ , 이너가이더 각도  $\theta_{ig}$  그리고 러너 블레이드 Stage 1과 Stage 2 영역을 나타내고 있다.

Table 1은 본 연구에서 설정한 가이드베인과 이너가이더 각도를 조합한 운전조건을 나타내고 있다. 동일한 이너가이더 각도  $\theta_{ig}=0^\circ$ 에 대해서 3종류의 가이드베인 각도에 의한 Case A, B 그리고 C의 경우와 동일한 가이드베인 각도에 대해서 2종류의 이너가이더 각도에 의한 Case C와 D의 경우에 대해서 수차의 성능과 내부유동에 대해서 검토하였다. 또한, 이너가이더의 설치여부에 따른 효율 변화에 대해서도 Case E와 그 외의 경우를 비교, 검토하였다.

본 연구에서 채용한 횡류수차는 극저비속도 영역인  $n_s < 40$ 에서 운전할 수 있도록 설계하였으며, 설계점에서의 유효낙차, 유량, 회전수, 출력은 각각  $H=19\text{m}$ ,  $Q=0.014\text{m}^3/\text{s}$ ,  $N=1000\text{min}^{-1}$ ,  $P=2.0\text{kW}$ 로 설정하였다.

### 2.2 수치해석법

Fig. 3은 마이크로 횡류수차 모델의 형상에 대하여 작성된 계산격자를 보이고 있으며, 러너실 내부의 형상이 러너의 폭 방향으로 2차원적인 형상을 나타낸다. 유입노즐과 러너실, 흡출관을 일체로 작성하고, 러너를 분리 작성하여 다중격자로 구성하였다. 격자의 형상은 계산결과와 수렴성과 복잡한 수차 내부 유로의 특성을 잘 나타낼 수 있도록 전체 격자에 대하여 Hexa-hedral 격자와 Tetra-hedral 격자를 함께 사용하였다. 무차원 벽면거리인  $y^+$  값의 범위는 유로의 형상을 고려하여 러너 부분의 격자에서 15 이하, 노즐 부분에서는 50 이하로 설정하였으며, 전체 계산격자 노드 수는  $y^+$  값과 계산기의 계산시간 및 용량을 고려하여 약  $7 \times 10^5$ 개로 구성하였다.

수치해석을 위한 solver로서는 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX<sup>(7)</sup>를 사용하였고, 난류모델로서는  $k-\omega$  SST 모델을 사용하여 복잡한 내부유동의 특성을 비교적 잘 표현할 수 있도록 하였다. 계산유동장의 경계조건으로서 수차 유입관 입구에서는 압력 일정, 흡출관 출구에서는 평균유량 일정한 조건을 설정하였으며,  $25^\circ\text{C}$  상온의 물을 작동유체로 하여 정상계산을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 성능곡선

Fig. 4는 극저비속도 영역 마이크로 횡류수차의 성능곡선을 나타내고 있다. 횡축은 회전수  $N$ , 종축은 최고효율점에서의 효율  $\eta_{max}$ 를 기준으로 하여 국소효율비  $\eta/\eta_{max}$ 를 나타내고 있다. 최고효율은 설계점 회전수인  $N=1000\text{min}^{-1}$ 에서 가이드베인 각도  $\theta_{gv}=15^\circ$ 와 이너가이더 각도  $\theta_{ig}=0^\circ$ 를 조합한 Case C의 경우에서 나타나고 있으며,  $\eta_{max}=60.5\%$ 를 나타내었다. 극저비속도 영역에서는 상대적으로 높은 낙차에 비하여 매우 적은 유량에 적합한 유로단면적을 채용해야 하기 때문에, 매우 좁은 수차 유로벽면에서 발생하는 벽면마찰손실이 극저비속도 영역에서 상대적으로 낮은 효율의 원인으로 판단된다.

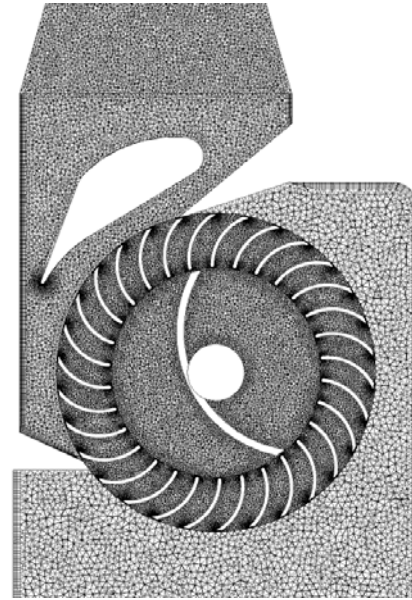


Fig. 3 Numerical grid system

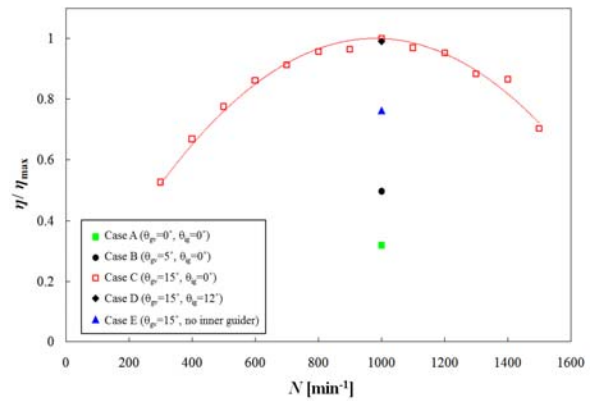


Fig. 4 Performance curve of turbine model by CFD analysis

한편, 이너가이더 각도를  $\theta_{ig}=0^\circ$ 로 고정하고 가이드베인 각도를 변화시켰을 경우, 효율변화가 매우 크게 나타나기 때문에 가이드베인 각도가 노즐에서의 유동과 러너 블레이드 유입 유동에 상대적으로 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

이너가이더 부착여부에 따른 효율변화는 Case C와 E의 결과를 비교 시 이너가이더를 부착한 Case C에서 효율이 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 이너가이더를 설치함에 의해 러너 내부 유로에서 발생했던 재순환흐름을 억제하는데 효과적임을 알 수 있다.

그러나, 가이드베인 각도를  $\theta_{gv}=15^\circ$ 로 고정하고 이너가이더 각도를 변화시킬 경우, Case C와 D에서와 같이 효율변화가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

### 3.2 토크 해석

Fig. 5는 러너 전체에서 발생하는 전체 토크와 Fig. 2에서 구분한 국소러너유로에서 발생하는 각 Stage별 국소토크를

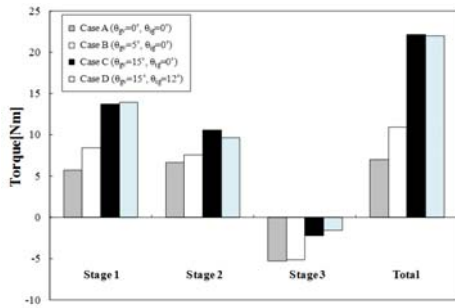


Fig. 5 Output torque analysis by CFD ( $N=1000\text{min}^{-1}$ )

함께 나타내고 있다. 유입노즐에서 흘러나온 흐름이 러너와 부딪히게 되는 Stage 1에서 국소토크가 상대적으로 크게 나오고 있으며, 그 다음으로 Stage 2와 Stage 3의 순으로 토크가 발생하고 있다. 그러나, Stage 3에서는 토크가 음의 값을 나타내고 있으며, 이러한 결과로부터 이 영역에서 손실이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

또한, 이너가이더를 고정하고 가이드베인의 각도를 변화시켰을 경우의 Case A 및 B는 Case C 및 D와 비교할 경우 Stage 1에서 발생하는 토크가 절반 정도밖에 나오지 않음을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Stage 2에서도 크게 변함이 없으며, Case C 및 D에 비해서 Case A 및 B의 경우에 토크가 적게 발생함을 알 수 있다. Stage 3에서 토크 손실이 Case A와 B에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 국소러너 각 유로에서의 토크 발생량은 가이드베인 각도에 따른 노즐출구의 유동각도가 러너 블레이드 유로 유입부 각도와와의 매칭에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

### 3.3 속도분포

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( $\Delta L_{AM} = rM\Delta v_\theta$ , r은 러너국소반경, M은 질량)이 있으며, 각운동량에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서는 원주방향 속도( $\Delta v_\theta$ )와 유량(M)이다. 따라서, 수차 출력의 대부분을 발생시키고 있는 Stage 1 입구에서의 속도 분포에 대해서 검토하였다.

Fig. 6은 가이드베인 각도와 이너가이더 각도에 따른 Stage 1 입구에서의 원주방향 유속을 나타내고 있으며, 횡축은 노즐출구의 원주방향 반시계방향 시작점과 끝점 위치에 해당하는 Stage 1에서의 블레이드 유로 원주방향 무차원 위치를 나타내고, 종축은 Stage 1의 러너유로 입구에서 원주방향 속도비( $v_\theta/u_1$ )를 나타내고 있다.

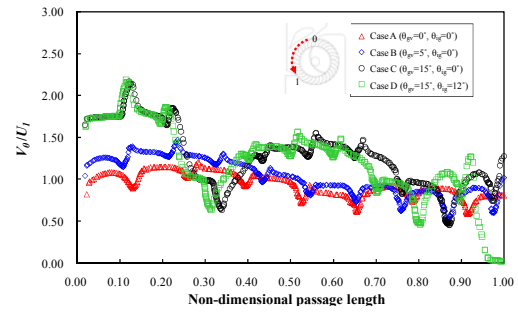


Fig. 6 Velocity distribution by the variation of guide vane angle and inner guide angle at Stage 1 inlet ( $N=1000\text{min}^{-1}$ )

원주방향 속도비는 Stage 1의 입구 우측상부에서 가장 높게 나타나고 있으며, 원주방향 반시계방향 위치로 갈수록 점차 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 노즐출구 유로에서 우측상부의 위치에서는 러너유로로 진입하는 가장 단거리에 위치하며, 반시계방향의 위치로 이동할수록 흐름이 유로를 지나가는 거리가 길어져서 벽면마찰 등에 의해 유속이 낮아졌기 때문으로 판단된다.

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

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

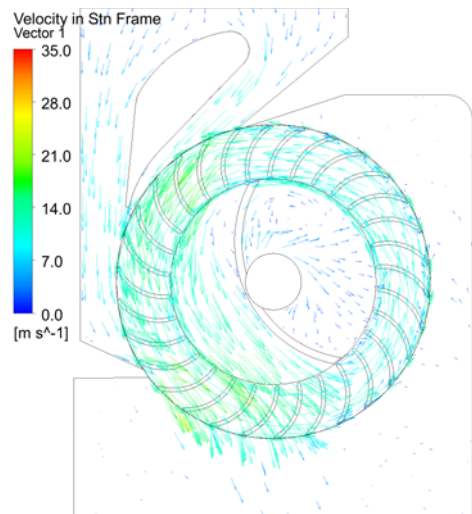
한편, 가이드베인 각도가  $\theta_{gv} = 15^\circ$ 일 때의 원주방향 유속이  $\theta_{gv} = 0^\circ$ 일 때보다 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 상대적으로 높은 유속을 가지는 가이드베인 각도  $\theta_{gv} = 15^\circ$ 일 때의 흐름이 러너유로에서 가이드베인 각도  $\theta_{gv} = 0^\circ$ 일 때의 흐름보다 상대적으로 높은 각운동량을 발생시켜서 토크의 발생량도 더 크게 나타남을 알 수 있다.

즉, 가이드베인 각도에 의해 노즐 유로내에서의 유동각도가 변화하고, 노즐 출구 흐름의 원주방향 속도성분이 러너 블레이드 유입각도와와의 매칭에 의해 원주방향 유속이 결정되어 각운동량을 발생시키게 된다.

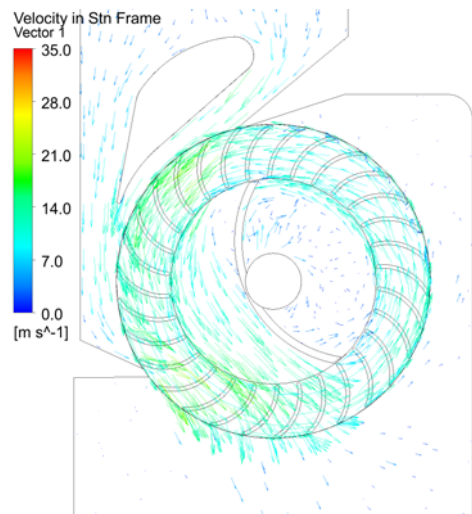
### 3.4 내부유동

성능곡선 및 토크해석 결과에서 나타난 마이크로 횡류수차의 성능과 내부유동의 관계를 검토하기 위하여 성능에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 확인된 가이드베인 각도에 따른 수차내부유동을 검토하였다.

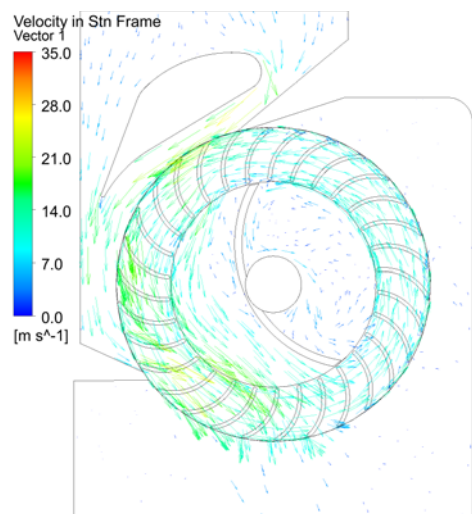
Fig. 7은 러너실 내부유동장의 절대속도벡터를 보이고 있으며, 계산조건 상 러너실 하부의 흡출관은 대기 방출되지 않



(a)

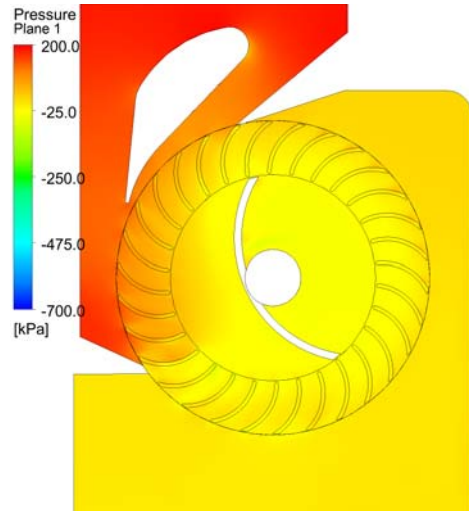


(b)

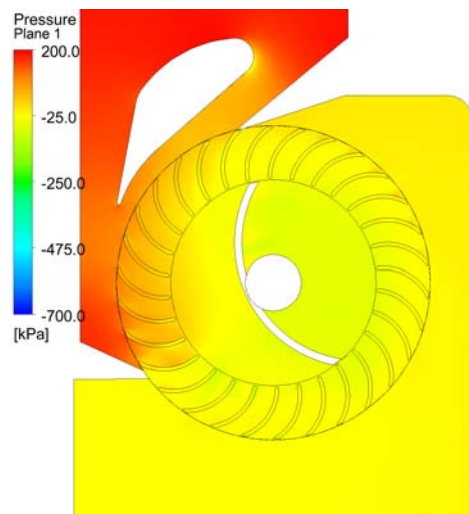


(c)

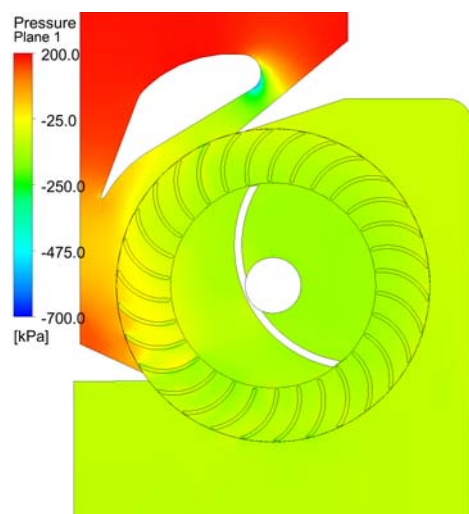
Fig. 7 Velocity vectors by the variation of guide vane angle ( $N=1000\text{min}^{-1}$ ,  $\theta_{ig}=0^\circ$ ) (a)  $\theta_{gv}=0^\circ$ , (b)  $\theta_{gv}=5^\circ$ , (c)  $\theta_{gv}=15^\circ$



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Pressure contours by the variation of guide vane angle ( $N=1000\text{min}^{-1}$ ,  $\theta_{ig}=0^\circ$ ) : (a)  $\theta_{gv}=0^\circ$ , (b)  $\theta_{gv}=5^\circ$ , (c)  $\theta_{gv}=15^\circ$

는 상태이다. Fig. 5에서 Stage 3 영역에서 토크손실이 발생한 것은 이 영역에서 이너가이더의 설치에 의해 재순환유동은 거의 억제하였으나, 러너실 내부에 전체적으로 작동유체인 물이 가득 차있기 때문에 Stage 3에서는 러너블레이드 유로 내에서 물이 함께 회전하게 되고 그 질량만큼의 각운동량 손실이 발생하였기 때문이라고 판단된다.

따라서, Stage 3 영역에서 러너 블레이드에 물이 접촉하지 않도록 러너실 내부의 수위를 러너 하부 끝단 이하로 낮추는 등의 검토가 요구된다.

Fig. 8은 수차내부의 압력선도를 나타내고 있으며, 흐름이 점차 좁아지는 노즐 유로를 통과하면서 유속의 증가와 함께 압력이 점차 내려가게 되고, 러너 Stage 1단을 통과하면서 압력은 상당히 낮아짐을 알 수 있다. 특히, 가이드베인 각도가  $\theta_{gv} = 15^\circ$ 일 때는 가이드베인 배면의 노즐유로에서부터 압력이 상당히 낮아져서 러너 내부의 압력이 상대적으로 낮게 형성됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 Fig. 4와 5에서 효율과 토크가 상대적으로 높은 이유는 가이드베인의 각도 증가에 따라서 노즐 출구에서의 높은 유속이 러너블레이드 입구에서 높은 원주방향 속도성분을 발생시키고(Fig. 6 참조), 이것은 러너 블레이드에서 높은 각운동량으로 변화하여 상대적으로 높은 토크를 발생시키는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 8(c)에서는 상대적으로 가이드베인 유로가 좁아짐에 따라서 수차 유입부 가이드베인 상류와 러너 하류 사이의 압력차가 비교적 크게 나타나고 있으며, 이것은 가이드베인 유로가 좁아짐에 따라 유속이 증가하고, 러너 내부 및 하류의 비교적 폭이 좁은 유로를 지나면서 압력이 크게 감소했기 때문으로 판단된다. 또한, 가이드베인 전연 부압면에서 유로가 좁아짐에 따라 압력이 매우 낮은 영역이 발생하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 극저비속도 영역에서 적용 가능한 마이크로 횡류수차에 대해서 가이드베인 및 이너가이더의 각도에 따른 수차의 성능 및 내부유동을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 극저비속도 영역 마이크로 횡류수차는 높은 유효낙차에 비하여 유량이 매우 적기 때문에 유로의 흐름방향

유로 너비에 비하여 축방향 폭이 상대적으로 매우 좁게 되며, 가이드베인의 각도에 따라서 노즐 출구의 유동각도가 크게 영향을 받게 된다. 가이드베인 각도가 커지게 되어 유로가 상대적으로 좁게 될 경우에 토크와 효율이 높게 나타나는데, 이러한 결과는 노즐 출구에서 형성된 상대적으로 높은 원주방향 유속이 러너 블레이드 유로에 진입하면서 상대적으로 높은 각운동량을 발생시킴에 따라서 출력이 증가하기 때문이다.

2. 러너 내부유동장에서 발생하는 재순환흐름을 억제하기 위해서 종래로부터 사용되어 온 공기유입에 의한 공기층을 형성시키는 대신 이너가이더를 설치하여 재순환 흐름에 의한 수력손실을 크게 낮출 수 있음을 확인하였다. 그러나, 러너 블레이드 Stage 3 유로에서 충분한 물이 러너와 함께 회전함에 의해 토크손실이 발생한다. 또한, 이너가이더 각도에 의해서는 성능이 크게 변하지 않음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) Thake, J., 2000, "The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual," ITDG Publishing, London.
- (2) Mockmore, C. A. and Merryfield, F., 1949, "The Banki Water Turbine," No. 25, Engineering Experiment Station, Oregon State Colleg, Corvallis, Oregon.
- (3) Fiuzat, A. A. and Akerkar, B. P., 1991, "Power Outputs of Two Stages of Cross-Flow Turbine," Journal of Energy Engineering, Vol. 117, No. 2, pp. 57~70.
- (4) Fukutomi, J., Nakase, Y. and Watanabe, T., 1985, "A Numerical Method of Free Jet from a Cross-flow Turbine Nozzle," Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 241, pp. 1436~1440.
- (5) Olgun, H., 2000, "Effect of Interior Guide Tubes in Cross-Flow Turbine Runner on Turbine Performance", International Journal of Energy Research, Vol. 24, pp. 953~964.
- (6) Choi, Y. D., Shin, B. R. and Lee, Y. H., 2010, "Air Layer Effect on the Performance Improvement of a Cross-Flow Hydro Turbine," 유체기계저널, 제 13권, 제 4호, pp. 37~44.
- (7) ANSYS Inc., 2010, "ANSYS CFX Documentation," Ver. 12, <http://www.ansys.com>.