

# 실험 및 CFD에 의한 가이드베인 개도에 따른 소형 튜블러 수차의 성능특성

남상현\* · 김유탉\*\* · 최영도\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

## Performance Characteristics of Small Tubular-type Hydroturbine according to the Guide Vane Opening Angle by Experiment and CFD

Sang-Hyun Nam\*, You-Taek Kim\*\*, Young-Do Choi\*\*\*, Young-Ho Lee\*\*\*\*

*Key Words* : Tubular-type hydroturbine(튜블러수차), Guide vane(가이드베인), Performance characteristics(성능특성), Velocity distribution(속도분포), Pressure distribution(압력분포), CFD(전산유체역학)

### ABSTRACT

As the alternative energy, renewable energy should have been developing by many techniques, in order to substitute the fossil fuel which will be disappeared in the near future. One of the small hydropower generator, main concept of tubular turbine is based on using the different water pressure levels in pipe lines, energy which was initially wasted by using a reducing valve at the end of the pipeline, is collected by turbine in the hydro power generator. A propeller shaped hydro turbine has been used in order to use this renewable pressure energy. In order to acquire basic design data of tubular type hydraulic turbine, output power, head, efficiency characteristics due to the guide vane opening angle are examined in detail. First, it ensures the reliance of CFD by that of compared with experiment data. After all, the results of performance characteristics of the CFD and experiment show to confirm the data that power, head and efficiency of less than 4%, 2% and 5% respectively. Moreover influences of pressure, tangential and axial velocity distributions on turbine performance are investigated.

### 기호설명

- \* 한국해양대학교 대학원  
\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부  
† 교신저자, E-mail : kimyt@hhu.ac.kr  
\*\*\* 한국해양대학교 산학협력단  
\*\*\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부

- $C_p$  : 압력계수 ( $2(p_s - p_{t2})/\rho U^2$ )  
 $g$  : 중력가속도 ( $m/s^2$ )  
 $H$  : 유효낙차(출구-입구) (m)  
 $P$  : 출력 (kW)

- $p_s$  : 익면정압 (Pa)
- $p_{t2}$  : 러너출구전압 (Pa)
- $Q$  : 유량 ( $m^3/s$ )
- $R$  : 블레이드 중심선의 러너베인 전연에서 후연까지의 위치 (m)
- $R_{LT}$ : 블레이드 중심선의 러너베인 전연에서 후연까지의 길이 (m)
- $U$  : 러너tip에서의 원주속도 (m/s)
- $\beta_{gs}$  : 수차의 축 방향을 기준으로 한 가이드베인 개도
- $\eta$  : 효율 ( $P/\rho g Q H$ ) (%)
- $\rho$  : 작동유체밀도 ( $kg/m^3$ )
- $\phi$  : 유량계수

### 1. 서론

신재생에너지의 개발은 화석연료의 고갈과 환경오염의 주범이라는 문제점에 대한 해결책으로서 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 관심을 가지고 있는 매우 중요한 인류의 과제라 할 수 있다. 현재 신재생에너지 설비 및 부품에 대한 국제무역 규모가 급속히 증가하고 있으며, 기술표준화 선점을 위한 개발과 보급에 각국

의 투자가 늘어나고 있는 추세이다.<sup>1)</sup> 또한 신재생에너지는 거대시장으로 부상할 것이라는 예측이 제기되면서 신재생에너지에 대한 투자 필요성이 부각되었다. 이러한 대체에너지에는 태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 연료전지, 수소에너지 등 많은 종류를 포함하고 있으며, 그 중에서도 소수력발전은 물의 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 수차를 회전시켜 전기를 생산하는 방식으로 발전용량별로는 small(1,000kW~10,000kW)수력, mini(100kW~1,000kW)수력, micro(100kW이하)수력으로 세분할 수 있다. 특히, 출력이 100kW정도 이하의 마이크로수력발전은 수자원의 적극적인 유효이용의 관점에서도 주목받고 있으며, 규모가 작고 구조도 비교적 간단하기 때문에 차세대의 친환경 지속가능한 순환형 에너지 시스템으로 세계적으로 주목받고 있다.

지금까지는 관로말단부에 있어서 보유한 수압을 감압하기 위해서 감압밸브 등이 설치되어 이러한 에너지를 모두 버리고 있는 실정이었다. 수도관차압을 이용한 마이크로 소수력발전은 이러한 감압밸브를 bypass시켜 수차발전기를 설치하여 지금까지는 버려졌던 에너지를 회수하여 전기로 만드는 것이다. 저자들은 수도관 차압을 이용한 튜블러 수차를 대상으로 러너베인의 개도 및 러너베인 갭 수에 따른 수차성능해석을 연

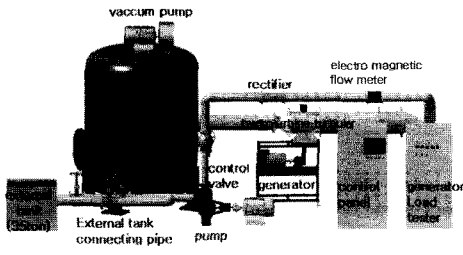


Fig. 1 Experimental equipment of tubular type hydroturbine

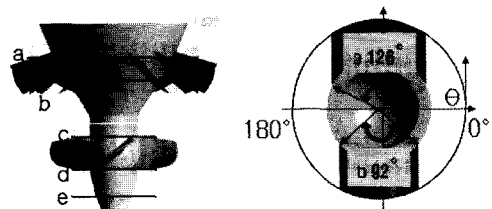


Fig. 3 Arrangement of guide vane and runner vane

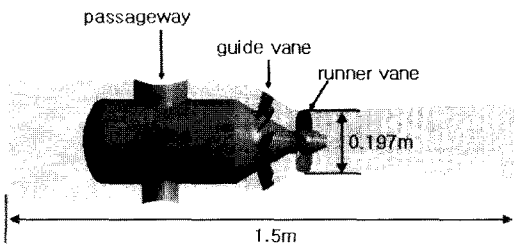


Fig. 2 Tubular-type turbine model

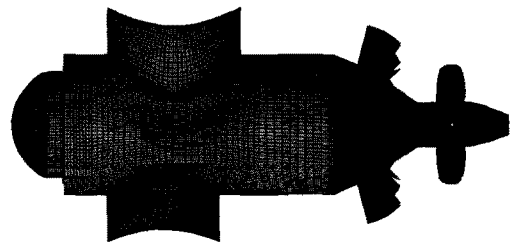


Fig. 4 Computational domain of turbine model

구<sup>[2]-[4]</sup>하였다. 본 논문에서는 가이드베인의 개도를 변수로 하여 유량 및 낙차의 변화에 따른 수차의 수력학적 성능특성을 분석하였다. 그리고 그 결과를 CFD를 통한 유동해석과 비교 분석하여 수차의 설계를 위한 최적 파라미터를 도출하고 효율향상을 도모하는데 그 목적이 있다.

## 2. 실험 및 CFD 해석

### 2.1 실험장치 및 방법

튜블러 수차는 수압에 의하여 러너가 회전하게 되며, 러너에 연결된 구동축과 전달 장치가 발전기를 가동하여 전기를 생산한다. Fig. 1에 실험장치의 개략도를 보인다. 본 장치의 실험은 다음과 같은 순서에 의해 수행된다. 물은 유량조절밸브→정류장치→전자유량계→정류장치→수차(가이드베인)→수차(러너베인)→수조 순으로 순환된다. 수조위에는 진공펌프를 설치하여 캐비테이션 실험이 가능하도록 하였으며, 내부수조 외에 외부수조가 있어서 실험시 수온유지에 대비하였다.

펌프는 40마력의 편흡입 벌류트형으로서 4극 모터가 장착되어 인버터에 의해 펌프의 초기부하를 줄이게 된다. 유량은 유량제어밸브를 통해 조절가능하다. 정류장치는 50A 6개를 설치하여 곡관의 영향을 완화하였으며, 전자유량계의 오차범위를 줄이도록 하였다. 전자유량계를 통과한 후의 2차형 곡관 다음에도 정류장치 100A 5개를 설치하였다. 배관을 따라 흐르는 물은 튜블러 수차내부를 통과하여 펌프의 압송에 의한 힘으

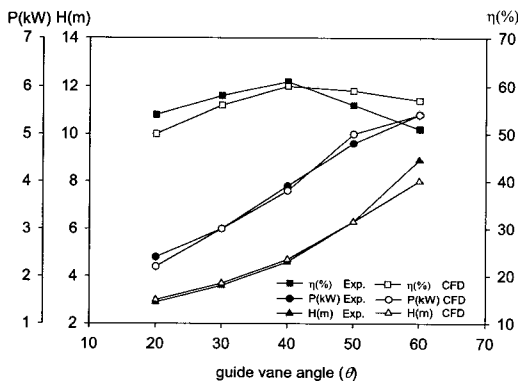


Fig. 5 Comparison CFD and Experiment according to guide opening angle

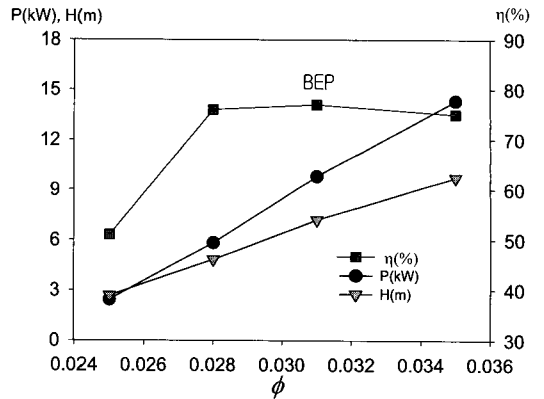


Fig. 6 Performance characteristics curve of turbine model by flow coefficient

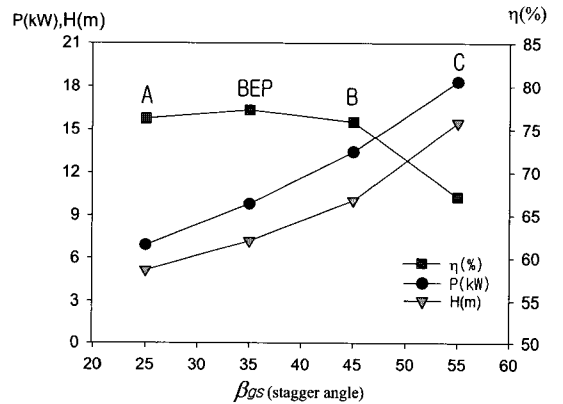


Fig. 7 Performance characteristics curve of turbine model by guide vane angle

로 러너를 회전시키게 된다. 러너는 구동축과 연결되어 있으며, 구동축은 최대 12kW출력이 가능한 동기식 발전기와 벨트풀리로 연결되어 있다. 발전기에는 20kg f·m까지 측정 가능한 토크메타가 연결되어 출력이 계산된다. 0~2kgf/cm<sup>2</sup> 범위의 차압 변환계를 통하여 러너베인 또는 가이드베인의 개도에 따른 수차내부의 압력을 측정할 수 있도록 되어 있다.

### 2.2 수치해석

Fig. 2에 보이는 바와 같이 CFD를 위한 튜블러 수차의 계산 도메인은 길이가 1.5m이며, 러너베인의 블레이드 직경은 0.197m이다. 또한, 수차 내부에 러너와 연결 되는 구동축 또는 그 외 부품들이 설치되어 있는

케이스가 장착되어 있다. 그리고 발전기는 수차 위 통로를 통하여 벨트 풀리로 수차와 연결된다. 러너는 4 것이며, 가이드베인은 총 12개이다. 또한 Fig. 3에 보이는 바와 같이 CFD 해석에 의한 내부유동분석을 위해 가이드베인 입구부(a), 가이드베인 출구부(b), 러너베인 입구부(c), 러너베인 출구부(d), 러너베인 출구에서 날개 높이만큼의 후류부(e)로 구분된다. 또한 수차의 passageway의 크기 및 위치를 알 수 있다.

본 수차의 CFD 성능해석을 위해 core2쿼드 q6600 4GB사양의 병렬 컴퓨터2대를 이용하였으며, 상용코드로는 유체기계의 해석에 우수한 성능을 보이는 CFX-10을 사용하였으며, 난류모델은 수렴성이 강한, k-ε 모델을 이용하였다. 또한 회전체인 러너베인에 대한 interface조건으로 frozen rotor를 적용하였으며 경계조건으로 입구는 낙차, 출구는 유량으로 설정하였다. Fig. 4에 계산에 사용한 튜블러 수차 형상의 격자를 보이고 있으며, 본 격자는 ICEM-CFD를 이용하였다.

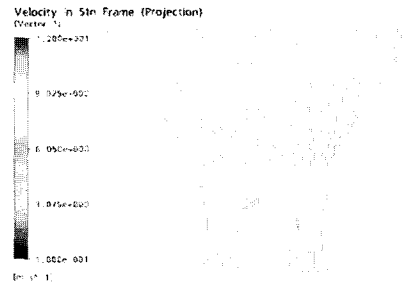
### 3. 결과 및 고찰

가이드베인 개도에 따른 성능특성을 CFD와 비교한 결과를 Fig. 5에 보인다. CFD해석은 실험수행을 통하여 가이드베인개도에 따른 경계조건을 토대로 계산하였다.  $\beta_{gs}=40^\circ$ 를 전후로 출력 및 유효낙차는 각각 4%, 2%이내, 효율은 5%이내로 거의 일치하였으며 이 결과를 CFD의 성능해석 신뢰성을 확보할 수 있었다.

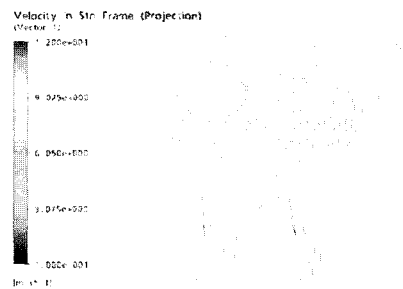
튜블러 수차의 수치해석을 하기 위한 경계조건을 설정하기 위해 먼저 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 유량계수에 따라 성능특성을 나타내었다. 유량이 증가할수록 출력 및 유효낙차는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 효율은 유량계수 0.031에서 최고효율을 보이다가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7에 가이드베인의 허브에서의 개도  $\beta_{gs}$ 가 25°, 35°, 45°, 55° 인 경우의 특성곡선을 보이고 있으며, 유량계수 0.031의 경계조건을 통한 CFD해석결과로 최고효율은 (BEP point)  $\beta_{gs}=35^\circ$ 에서  $\eta=77\%$ 이며, 이때  $P=9.8kW$ ,  $\Delta H=7.2m$ 임을 알 수 있다.

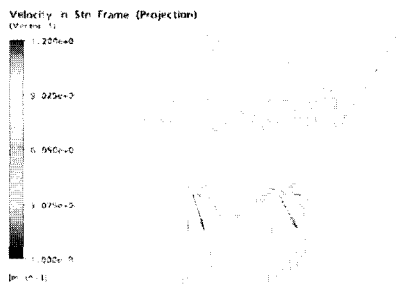
Fig. 7의 A, BEP(Best Efficiency Point), B, C점에 있어서 러너베인과 가이드베인의 갭 높이의 중간부분(mid-section)에서의 속도벡터 및 압력분포를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 보인다.  $\beta_{gs}$ 가 증가할수록 가이드베인 출구로부터 속도벡터가 증가하는 경향을 볼 수 있



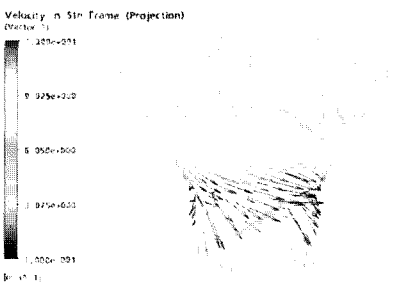
(a)  $\beta_{gs}=25^\circ$  (case A)



(b)  $\beta_{gs}=35^\circ$  (case BEP)



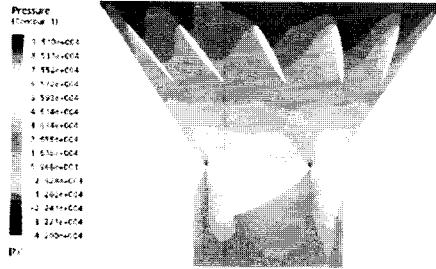
(c)  $\beta_{gs}=45^\circ$  (case B)



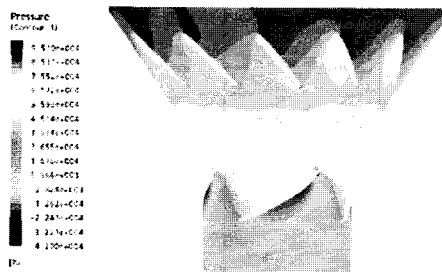
(d)  $\beta_{gs}=55^\circ$  (case C)

Fig. 8 Velocity vectors of tubular-type hydroturbine by uide vane angle

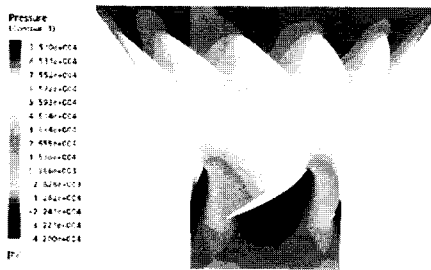
으며, 압력차가 증가하는 것을 알 수 있다.  
가이드베인의 입구와 출구에서의 원주방향의 속도



(a)  $\beta_{gs}=25^\circ$  (case A)



(b)  $\beta_{gs}=35^\circ$  (case BEP)

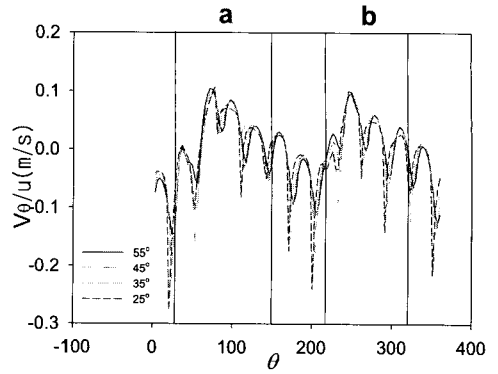


(c)  $\beta_{gs}=45^\circ$  (case B)

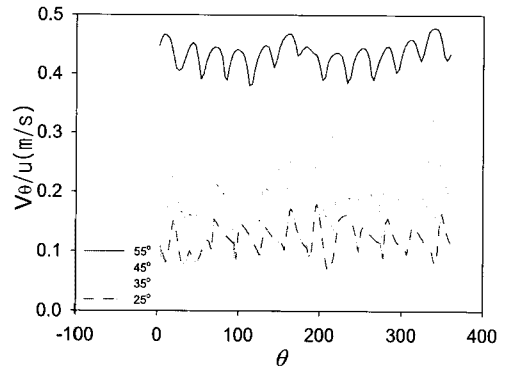


(d)  $\beta_{gs}=55^\circ$  (case C)

Fig. 9 Pressure distributions around the runner and guide vane by guide vane opening angle



(a) guide vane inlet



(b) guide vane outlet

Fig. 10 Tangential velocity distributions

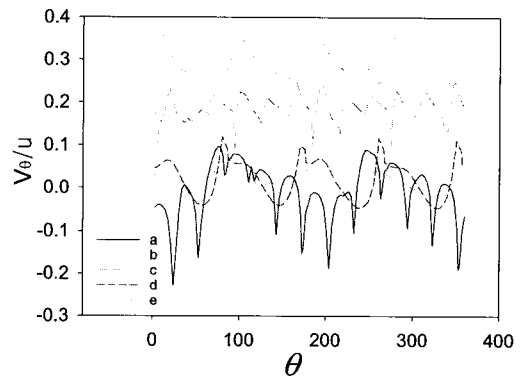


Fig. 11 Velocity distributions according to flow direction (from a to e)

를 각각 Fig. 10의 (a)와 (b)에 보인다. 원주방향 속도 분포 모두 12매 기의 영향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 가이드베인 입구부에서는  $\beta_{gs}$ 에 관계없이 일정한

반면 가이드베인 출구에서는  $\beta_{gs}$ 가 증가할수록 접선방향의 속도성분이 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서 수차의 passageway의 위치 및 크기를 알 수 있듯이 가이드베인의 입구부에서는 통로(passageway)의 영향을 받아  $\theta$ 에 따라 불균일한 속도분포를 보이나 가이드베인 출구에서는 passageway에 대한 영향이 줄어들고 어느 가이드베인에서나  $\theta$ 에 따라 균일한 패턴의 속도 분포를 보인다.

Fig. 11은 최고효율인 지점( $\beta_{gs}=35^\circ$ )에서 수차의 내부유동특성을 알아보려고 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 가이드베인 입구(a)에서부터 후류(e)위치에서의 원주방향속도분포를 보인다. 원주방향속도성분은 가이드베인 입구부에서 변동이 심하고, 가이드베인 출구부로 갈수록 증가하다가 러너베인 입구부에서 최대가 되며, 12매의 가이드베인의 영향이 러너베인 입구부에서는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 그리고 출구부에서 변동이 심하고 4매 간의 영향이 나타나며, 러너베인 출구부에서 후류(e)로 가면서 점차 안정적인 속도 분포를 나타낸다.

#### 4. 결론

튜블러수차의 내부유동흐름 및 성능특성을 분석하기 위해 가이드베인의 개도에 따른 실험 및 CFD를 통하여 분석한 결과 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

- (1) CFD 및 실험결과는 출력 및 낙차는 각각 약 4%, 2%이내, 효율은 5%이내로 잘 일치하여 CFD 신뢰성검증을 확인하였다.
- (2) 주어진 조건에서 최고효율점은  $\beta_{gs}=35^\circ$ 으로 약 77%이며 출력은 9.8kW이다.
- (3)  $C_p$ 는 러너베인 부압면에서  $\beta_{gs}$ 에 관계없이 거의 일정한 압력계수를 보이는 반면, 압력면에서

는  $\beta_{gs}$ 가 증가할수록 증가한다.

- (4) 내부유동에 미치는 passageway의 영향은 guide vane 출구부에서는 거의 나타나지 않는다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 및 에너지관리공단의 신 재생에너지 연구개발(Project No. 2006-SH02-P-02-0)의 일부로 수행되었으며, 저자들은 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 윤석운, 2006, “신재생에너지 정책과 동향”, 2006년도 하계학술발표대회 대한설비공학회 논문집 pp.36~45
- [2] You-Taek Kim, Sang-Hyun Nam, Young-Do Choi, Young-Cheol Hwang, Chung-Do Nam, Young-Ho Lee, “Tubular-type Hydroturbine Performance for Variable Guide Vane Openingby CFD”, the Fifth International Conference on Fluid Mechanics, Aug.15-19, 2007, Shanghai, China pp. 424~427.
- [3] 남상현, 김유택, 최영도, 남청도, 이영호, 2007, “소형 하이드로터빈의 깃 수의 영향”, 2007년도 전기학술대회 한국마린엔지니어링학회 논문집, pp. 211~212.
- [4] You Taek Kim, Sang-Hyun Nam, Young-Jin Cho, Young-Do Choi, Chung Do Nam, Young-Ho Lee, “Internal Flow Characteristics of Tubular-type Hydroturbine for variable Runner Vane Opening”, The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, October 16-19, 2007, Jeju, Korea pp. 198.