

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 25, No. 3, 2005

## 소수력 발전용 상용 프란시스 수차의 유동해석을 통한 성능 개선에 관한 연구

최주석\*, 김옥삼\*\*, 김일수\*\*\*, 전철균\*\*\*\*, 문채주\*\*\*\*\*

\*목포대학교 대학원 기계공학과(juseokchoi@mokpo.ac.kr), \*\*여수대학교 기계공학전공(kos@yosu.ac.kr),

\*\*\*목포대학교 기계공학과(ilsookim@mokpo.ac.kr), \*\*\*\*목포대학교 기계공학과(ckchun@hanmail.net)

\*\*\*\*\*목포대학교 전기공학과(cjmoon@mokpo.ac.kr)

## A Study on Hydraulic Performance of Francis Turbine for Small Hydropower Plants

Choi, Ju-Seok\*, Kim, Ok-Sam\*\*, Kim, Il-Soo\*\*\*,  
Chun, Chul-Kyun\*\*\*\*, Moon, Chae-Joo\*\*\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Eng. Graduate School, Mokpo National University(juseokchoi@mokpo.ac.kr),

\*\*Dept. of Mechanical Eng. Yosu National University(kos@yosu.ac.kr),

\*\*\*Dept. of Mechanical Eng. Mokpo National University(ilsookim@mokpo.ac.kr),

\*\*\*\*Dept. of Mechanical Eng. Mokpo National University(ckchun@hanmail.net)

\*\*\*\*\*Dept. of Electrical Eng. Mokpo National University(cjmoon@mokpo.ac.kr)

### Abstract

Francis turbine of commercial small hydropower plants under 10kw which is investigate a flow characterist and an efficiency in the research which it sees, the problem and an improvement is investigate.

In the research which it is simply model with casing, guide-vane, runner, draft tube for simulation numerical analysis of small-sized Francis turbine. Model uses the Gambit and it composes with approximately 800,000 non-uniform lattices. Solutions are investigate the hydraulic characteristics against an outward angle of guide vane, the number of guide vane, head(inlet velocity) by using FLUENT which is a commercial business code.

**Keywords** : 프란시스수차(Francis Turbine), 소수력(Small hydropower plants), 플루언트(Fluent)

## 1. 서 론

통상 수차는 구조에 의하여 만들어지고, 수차에 대한 성능평가는 실험을 통하여 이루어진다. 그러나 수차를 제조하는 경제적 비용이 크므로 실제 제품에 대한 성능평가를 하는 경우가 대부분이며, 이에 대한 성능개선을 위한 수차 제조는 불가능하다. 이러한 측면에서 수치해석용 프로그램을 통한 수차의 성능 및 개선사항을 검토해보는 것은 경제적 측면에서 좋은 방안이라 하겠다. 본 연구에서는 소수력 발전용 10kw 미만의 상용 프란시스 수차에 대해 유동학적 특성 및 성능을 검토하고, 이에 대한 문제점 및 개선점을 검토하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 소형 프란시스 수차의 시뮬레이션 수치해석을 위해 설계모델을 그림 1과 같이 케이싱, 안내깃, 회전차, 흡출관으로 단순화하였다. Gambit을 사용하여 비균일 격자법으로 대략 800,000개의 격자로 구성하고, 비압축성 3차원 정상 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식, 난류 모델, MRF(Moving Reference Frame) 방정식을 사용하여 상용코드인 FLUENT로 안내깃 유출각, 안내깃 수량, 낙차(유입속도), 러너의

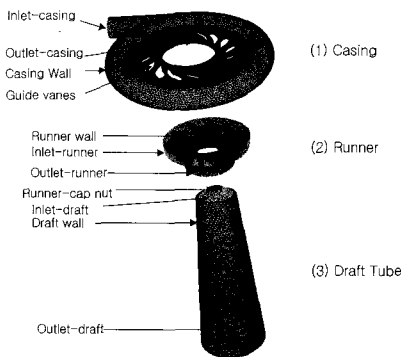


그림 1. Grid system of Francis Turbine

휨 정도에 따른 수력학적 특성 등을 검토하고, 현재 설계된 모델의 유동학적 특성과 개선된 모델의 유동학적 특성을 비교 검토한다.

### 2.2 지배방정식

#### (1) 연속방정식

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

#### (2) 운동량 방정식

$$\rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla P + F + \mu \nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

(P: pressure,  $\mu$ : viscosity, F Body force density)

#### (3) 표준 k- $\epsilon$ 난류모델

$$\triangleright k - \text{방정식} \quad (3)$$

$$\triangleright \epsilon - \text{방정식} \quad (4)$$

$$(\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} : \text{eddy viscosity})$$

이때 C의 값들은 일반적으로 실험 결과에 의해 도출된 값을 사용하고, 와류 점성 계수(eddy viscosity)  $\mu_t$ 는 Prandtl-Komogrov 관계식을 사용한다. k,  $\epsilon$ 은 각각 단위 질량당의 난류 운동 에너지와 난류 운동 에너지 소멸율을 나타낸다. 위 식에서 사용된 난류 모델 상수  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  값은 표 1과 같다.

표 1. 난류상수

$C_{2\epsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
1.92	0.09	1.3	1.0

#### (4) MRF 방정식

$$v_r = v - (\Omega \times r) \quad (5)$$

( $V_r$ : relative velocity, V: absolute velocity,  $\Omega$ : angular velocity of the rotating frame, r: position vector)

### 2.3 계산조건

해석 모델의 수력학적 특성을 해석하기 위한 수치해석 조건은 표 2와 같다.

표 2. 수치해석 계산 조건

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Blade angle	O	O	X	X	A. 설계조건에서의 유동 상태
Blade number	X	O	X	X	
Inlet velocity	X	X	O	X	B. 개선된 조건에서의 유동 상태
Runner twist	X	X	X	O	

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 [Case1] 안내깃 유출각에 따른 수력학적 특성

16개의 안내깃을 사용하여 케이싱내 유입속도 (4.69(m/s))가 일정할 때, 회전차에 유입되는 물의 방향을 결정짓는 안내깃의 유출 상태에 따라 회전차의 날개에 작용하는 회전력을 계산하였고, 수치해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 에너지 방정식과 이론 동력 계산식을 이용하여 유효낙차와 이론 동력을 계산하였다.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H \quad (6)$$

( 1: 유입구, 2: 출구, V: 속도, P: 압력, Z: 수차 입구와 출구의 높이( $Z_1-Z_2$ ), H: 유효낙차(m),  $\gamma$ : 물의 비중 )

$$P = 9.8QH \quad [kW]$$

$$( Q: \text{유량}[m^3/s] )$$

그림 2는 안내깃의 유출각 증가에 따른 유효낙차, 이론출력, 회전차의 회전력의 관계를 비교한 것이다. 안내깃의 유출각 증가에 따라 유효낙차와 이론 출력은 비례하여 증가하다가 유출각이 52도 이상이 되면 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 안내깃 사이의 공간이 좁아져 케이싱 내부의 압력 저항이 상승함에 따라 유입 유량이 일정하게 되기 위해서는 유효 낙차가 커져야 되고, 이에 따라 이

론 출력도 함께 증가함을 볼 수 있다. 그러나 회전차가 받는 회전력은 안내깃 사이의 유속 증가에 따라 유출각과 비례관계를 갖지만 이론 출력의 증가와는 비례관계를 갖지 않음을 볼 수 있다. 이는 좁은 안내깃 사이의 빠른 유속에 의하여 회전력이 증가하더라도 기계적 손실에 의하여 실제 수차의 효율은 감소할 것으로 예측된다.

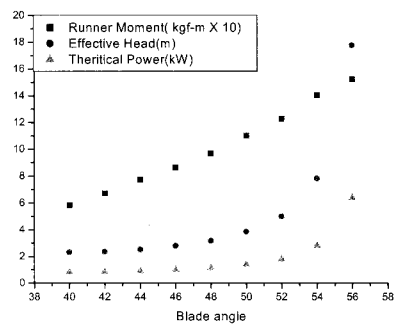


그림 2. Hydraulic characteristics for blade angle

#### 3.2 [Case2] 안내깃 갯수와 유출각에 따른 수력학적 특성

안내깃 사이의 유동 공간이 비슷하도록 안내깃 수와 유출각을 조절하여 다음과 같이 2개의 조건에서 수력학적 특성을 검토하였다.

표 3. 안내깃과 안내깃 유출각 조건

안내깃 수(개)	12	13	14	15	16
A	62°	60°	58°	56°	54°
B	64°	62°	60°	58°	56°

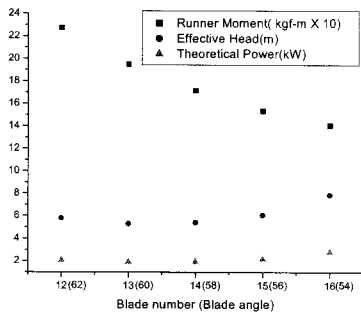
그림 3은 안내깃 수와 유출각을 조절하였을 때 나타나는 회전차의 회전력, 유효낙차, 이론 출력의 관계를 나타낸 것이고, 안내깃 사이의 공간은 A가 B에 비하여 약간 넓은 경우이다. A의 경우는 안내깃 수가 증가함에 따라 유효낙차와 이론 출력은 약간 증가하는 경향을 나타내었고, B의 경우에는 안내깃 수가 증가함에 따라 A의 경우보

다 유효낙차와 이론 출력이 크게 상승함을 나타내었다. A와 B의 경우가 다소 차이를 보이는 주요 원인으로 모델링 과정에서 안내깃 사이의 공간을 동일하게 일치시키지 못한 것이 원인으로 파악된다. 이러한 오차를 감안하고 A의 경우에 대해 속도벡터를 분석하였다. 안내깃(12)/유출각(62)의 경우는 안내깃(16)/유출각(54)의 경우에 비해 안내깃 사이의 공간이 다소 넓다. 또한 안내깃(12)/유출각(62)의 경우는 다른 경우에 비하여 안내깃 사이의 유속이 느리며, 안내깃 수가 많아질수록 안내깃 사이의 유속은 증가하였다. [Case1]의 안내깃의 유출각에 따른 변화 분석에서 안내깃의 유출각이 커지는 것은 실질적으로 안내깃 사이의 공간이 좁아져서 유속이 증가하는 것을 의미하며, 동일한 안내깃 수를 사용하는 경우에는 안

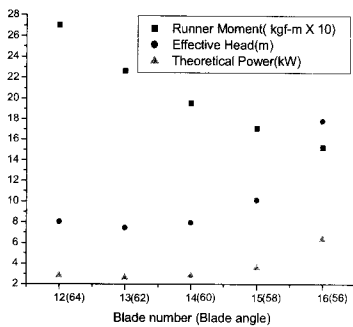
내깃 사이의 공간이 좁을수록 회전차의 회전력이 크게 증가함을 알 수 있었다. 그러나 그림 3은 안내깃 사이의 공간이 유사한 경우에 안내깃의 수가 많은 경우보다 안내깃의 수가 적은 경우가 더 큰 회전력을 받았다. 이러한 원인으로는 속도벡터 분석 결과 안내깃의 수가 적지만 상대적으로 안내깃의 유출각이 커서 물의 유동 방향이 원주방향과 유사하게 형성됨으로서 회전차의 회전력이 증가한 것으로 판단된다. 유효낙차 및 이론 출력의 변화에 비하여 회전차의 회전력의 성능향상을 통하여 수차의 효율을 높일 수 있을 것으로 예측된다.

### 3.3 [Case3] 유입속도에 따른 수력학적 특성

[Case 1]에서 안내깃이 16개일 때는 유출각이 50도인 경우가 효율 측면에서 가장 안정적일 것으로 예측되었다. 이러한 경우 유입속도에 따른 유효 낙차와 회전차에 작용하는 회전력, 그리고 이론 출력간의 관계를 검토하였다.

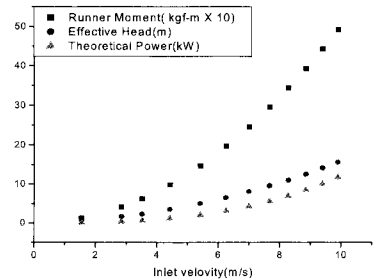


(a) Case A

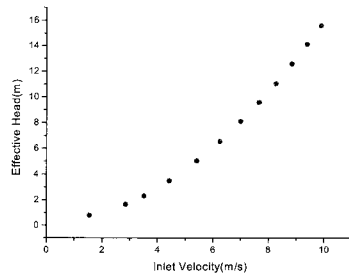


(b) Case B

그림 3. Hydraulic characteristics for blade number & blade angle



(a)



(b)

그림 4. Hydraulic characteristics for Inlet velocity

그림 4는 유입속도에 따른 회전차의 회전력, 유효낙차, 이론 출력의 관계를 나타낸 것이다. (a)에서 전반적으로 유입속도 증가에 따라 회전력, 유효낙차, 이론 출력의 증가폭이 약간 다르게 나타난다. (b)에서 유입속도 증가에 따라 유효낙차의 폭이 다소 증가하는 원인으로서는 안내깃 사이의 압력 저항 증가로 인하여 유효낙차 폭이 약간씩 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 유입속도 증가에 따라 유효 낙차나 이론 출력의 증가폭에 비하여 회전차의 회전력이 큰 폭으로 증가하는 것은 수차의 효율측면에서 안정적이라 할 수 있겠다.

### 3.4 [Case4] 회전차 날개의 휨 정도에 따른 수력학적 특성

대형 수차의 경우 회전차의 날개가 하방향으로 내려갈수록 휘어진다. 그러나 소형 수차의 경우 구조의 어려움 때문에 일반적으로 위와 아래의 휨이 없다. 이러한 소형 수차에 대해 날개의 휨 정도에 따른 수력학적 특성을 다음과 같은 조건에서 검토하였다.

표 4. 회전차 날개의 휨 각

안내깃 수 (개)	안내깃 유효낙차(°)	유속(유량) (m/s)	회전차 날개 휨 각(°)
16	50	4.69(0.36)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30

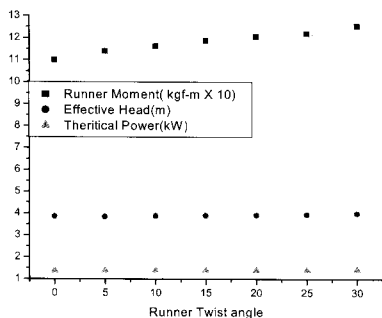


그림 5. Hydraulic characteristics for Twist angle of runner

그림 5를 검토해보면, 회전차 날개의 휨 각도

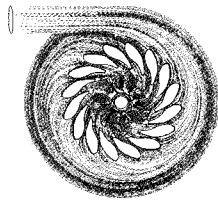
에 따라 유효 낙차와 이론 출력의 변화는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 회전차에 전달되는 회전력의 영향은 30도인 경우가 0도인 경우에 비하여 대략 12%의 성능향상을 나타내었다. 회전차에 작용하는 회전력이 향상되었다는 것은 수차의 수력학적 손실을 줄여서 수차의 효율을 향상시킬 수 있다고 보겠다.

### 3.5 [Case5] 설계 및 개선된 조건에서의 유동 상태

그림 6은 설계조건에서의 회전차 날개의 회전을 포함한 유동현상을 파악한 그림이다. (a)는 물의 입자 유동의 궤적을 추적한 그림으로서 회전차 출구부에서 큰 와류가 발생하지 않으며, 흡출관 하부로 내려갈수록 물이 수직으로 잘 배출되고 있음을 보여준다. (b)의 속도분포 그림에서 안내깃의 후류에서 발생한 와류는 회전차의 날개부에 유동속도의 저하를 가져오는 것이 나타난다. 이러한 현상은 구조공정을 고려한 안내깃의 후미 처리를 날카로운 형상을 취하지 않은 결과라 하겠다. 이런 문제점을 제품의 운용 측면에서 해결하는 방안으로 안내깃의 유출각을 회전차 유입부의 원주방향에 되도록 조절하는 방법이 있다 하겠다. 안내깃 후미에서 발생한 와류는 원주방향의 강한 유속에 의하여 회전차의 날개부에 영향을 미치기 전에 곧 소멸해버린다. 또한 본 설계조건에서의 유동을 분석한 결과 회전차의 날개부분이 상부와 하부가 휨 각이 없는 형태를 취하고 있으므로, 회전차 상부에서 회전차의 날개부분을 따라 흐르는 물은 하부로 유동하며 앞단 날개의 뒷부분에 반작용의 힘을 주는 것으로 분석되었다.

그림 7은 현재의 설계조건에서 본 연구에서 파악한 성능향상을 위한 개선점을 고려한 형태의 모델의 유동을 분석한 그림이다. 본 모델에서는 안내깃의 수를 12개로 줄이고 유출각을 62도로 회전시켜 유출 유동이 회전차의 원주 방향에 유사하게 형성되도록 구현하였으며, 회전차의 날개를 상

부에서 하부로 30도의 휨 각을 가지고 있는 모델이다. (a)의 물의 궤적을 파악하면 안내깃 수가 16개, 유출각이 50도인 그림 6보다 회전차의 날개부에 물의 유입이 강하다. 회전차 날개의 휨 각 영향으로 회전차 출구부에서 설계조건에 비해 큰 와류가 발생하지만 흡출관을 빠져나오며 수직으로

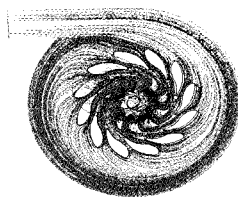


(a) Path line of particles

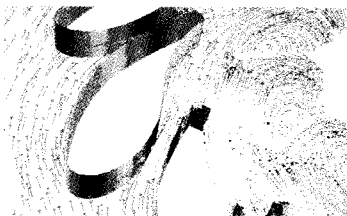


(b) Overlay of static pressure & relative velocity vector

그림 6. Flow profiles with design condition (Blade number :16)



(a) Path line of particles



(b) Overlay of static pressure & relative velocity vector

그림 7. Flow profiles with improvement of design condition(Blade number :12)

배출되고 있음을 보여준다. (b)는 개선된 수차의 속도분포를 나타내고 있다. 안내깃의 유출각이 원주방향을 향하고 있으므로 후미 모서리에 의해 발생하는 와류가 곧 소멸되어 설계조건에 비해 회전차 날개에 미치는 영향이 작음을 알 수 있고, 회전차 날개에 유입되는 유속의 흐름이 빠르고 또한 물의 회전차 날개로의 유입방향이 설계조건에 비하여 수직에 가까우므로 회전력이 증가에 따라 수차의 효율이 증가할 것으로 예측된다.

#### 4. 결 론

케이싱의 유입직경이 100mm인 소형 상용 프란시스 수차의 성능향상을 위한 개선점을 분석하기 위해 수치 해석적 방법으로 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

수차의 안내깃의 유출각 증가는 이론출력 및 회전차의 회전력 증가시키지만 상대적으로 유효낙차가 큰 폭으로 커짐으로 많은 수의 안내깃과 큰 유출각은 오히려 수차의 효율을 감소시킬 수 있다. 수차의 안정적 효율증가 방안으로는 안내깃의 수와 유출각을 조절하여 물의 흐름 방향이 회전차의 원주방향으로 형성될 때 가장 효율적으로 파악되었다. 또한 회전차의 상부와 하부의 휨 각을 주어 물과의 접촉면적을 늘려줌으로서 회전력 향상에 의한 수차 효율의 증가를 기대할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력 연구센터육성사업에 의해 작성되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. 안병노, "소수력용 수차의 익렬 주위 유동", 학위논문, 1992
2. 이철형 외, "소수력발전용 입축 프로펠러 수차

- 의 수력학적 성능특성 분석”, 한국수소 및 신 에너지 학회 논문집, 제14권 제2호, pp171~176, 2003
3. 최용진, “고낙차 양수발전 2단 가역 프란시스 펌프/수차 효율에 관한 연구”, 학위논문, 2002
  4. 정진달, “프란시스 수차의 성능변화에 관한 연구”, 학위논문, 1992
  5. R. Montanari, “Criteria for the economic planning of a low power hydroelectric plant”, Renewable Energy, pp. 2129~2145, 2003
  6. N. H. Costa Pereira, “Study of the nozzle flow in a cross-flow turbine”, Int. J. Mech. Sci., pp.283~302, 1995
  7. A. Wickstrom, “Structural analysis of francis turbine runners using ADINA”, Computers & Structures, pp1087~1095, 1997