

케프란 마이크로터빈의 모델링 해석에 관한 연구 A Study on the Modeling Analysis for Kaplan Micro-turbines

김옥삼·김일수·김학형·심지연

O. S. Kim, I. S. Kim, H. H. Kim and J. Y. Shim

Key Words : Kaplan micro-turbine(케프란 마이크로터빈), Modeling analysis(모델해석), Velocity vector(속도벡터), Pressure distribution(압력분포), Small hydro power plants(수소력발전소)

Abstract : Among many other alternative energy resources, small scale hydro power has been brought into attention as a reliable source of energy today, which had been relatively neglected since 1960s. Especially, Kaplan micro-turbine can be applied to various kind of small hydro power plants, such as reservoirs for agriculture purpose, sewage treatment plants and water purification plants. However present low head of Kaplan micro-turbines and small scale hydro turbines, have limitations in the minimum required head and flow rate for efficient operation.

This research is to develop modeling analysis for the Kaplan micro-turbine, which can improve economical features of small hydro power plants. The contents and scope of this research are the efficiency improvement of Kaplan micro-turbine.

1. 서 론

최근과 같은 고유가 시대에 선진국의 신재생 에너지 계획을 보면, OECD 국가의 에너지원별 이용률은 원자력 및 화력 등이 감소하는 반면, 신재생 에너지가 차지하는 비중은 2000년 4%에서 2010년 7%로 증가할 전망이다¹⁾이다. 앞으로 신재생 에너지 산업은 기술 개발과 다양한 지원제도를 통해, 기존 에너지원 대비 가격경쟁력을 충분하게 확보할 것으로 예상된다. 2003년 미국은 "Hydrogen Fuel Initiative" 계획을 통해 수소의 생산, 저장, 수송 및 연료전지 이용기술 개발 등에 17억불의 투자계획을 마련하고 국제 파트너쉽을 추진하고 있다. 또한 일본 등 주요 선진국은 신재생 에너지 전담조직 운영을 통해 기술개발 및 보급 확대를 국가적인 차원에서 지속적으로 추진하고 있는 상황이므로, 우리나라도 이 분야에 보다 획기적인 투자가 필요하다.

지난 수년간의 소수력 자원조사를 통하여 도출된 결론에 의하면, 우리나라의 지형은 자연낙하가 큰

소수력 발전입지가 매우 제한되어 있지 때문에 저낙차 소수력 발전소의 건설이 보다 바람직스럽다는 것이 대다수의 의견이다. 따라서 저 낙차이면서도 고낙차 소수력 발전소에 비하여 경제성 면에서 뒤지지 않은 케프란 마이크로터빈의 개발이 시급한 실정이다. 이것은 호우기와 갈수기의 강수량 변화가 심한 상황에서 소수력 발전입지를 충분히 만족시켜 줄 수 있는 터빈으로, 다른 종류의 터빈보다 효율, 설치 및 운영 면에서 많은 강점²⁾을 갖고 있으며 부품의 표준화를 통하여 가격을 낮출 수 있다.

이 연구에서는 케프란 마이크로터빈 개발을 위한 설계공정에서 컴퓨터를 이용한 3차원 모델링 해석 과정³⁾을 도입하여, 터빈내 유동장 문제가 복잡한 물리적 특성을 가지고 있는 특성상 실험이 용이하지 않으므로, 시뮬레이션으로 모델 해석에 대한 결과를 확보하여 향후 케프란 마이크로터빈을 설계 자료를 마련하고자 한다.

2. 케프란 터빈의 유동장 해석

수력발전용으로 사용되는 터빈은 충돌형과 반동형 터빈으로 대별된다. 충돌형 터빈은 물의 위치에너지를 운동에너지로 변환하는 메카니즘으로 낙차가 큰 수력발전소에서 사용된다. 케프란 마이크로터

접수일 : 2006년 6월 8일, 채택확정 : 2006년 9월 15일
김옥삼(책임저자) : 전남대학교 기계·자동차공학부
E-mail : kos@chonnam.ac.kr, Tel : 061)659-3284
김일수 : 목포대학교 기계공학전공
김학형, 심지연 : 목포대학교 대학원

빈은 물의 운동에너지와 압력에너지를 동시에 사용하는 반동형⁴⁾이며 이 터빈은 발전입지의 자연적인 특성, 즉 낙차와 유량에 따라 선정되는데 농업용 저수지를 이용하는 소수력 발전과 같이 사용유량과 낙차가 수시로 변하는 입지에 적합하다.

2.1 유동장의 지배방정식⁵⁾

케프란 마이크로터빈의 양수과정에서 유동특성을 해석하기 위하여 적용된 지배방정식 식(1)은 연속방정식이며, 식(2)는 운동방정식으로 $F=ma$ 를 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S u_i \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, u_i, u_j 는 속도벡터, P 는 압력, τ_{ij} 는 응력텐서이다. 위에 있는 식(2)의 $S u_i$ 는 운동에너지항(source term)으로 기준좌표에 대하여 케프란 마이크로터빈의 회전운동량을 의미한다.

2.2 해석영역의 정의

모델링 해석에 사용된 영역의 이산화(離散化) 방법은 Fig. 1과 같이 격자를 중심으로 하는 implicit pressure-based 방법⁶⁾으로 하였다.

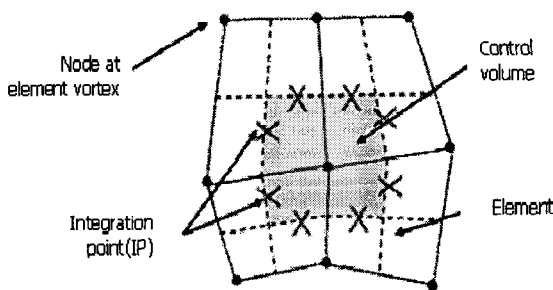


Fig. 1 Define of mesh generation and dual mesh

실선으로 나타낸 요소(element)를 나누어 점선으로 표시된 서브요소(sub-element)로 구성한다. 제어 체적은 음영으로 나타낸 부분과 같이 절점(node)을 둘러싼 서브요소들로 이루어지며 모든 요소 형태에서 동일하게 적용된다.

변수값과 유체의 물성치는 절점에 저장되며 해석의 정확도는 절점값으로 표현되는 적분점(IP)에서 표면 적분값들로 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해

는 요소 절점에 저장되지만 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분점에서 해나 해의 구배값을 필요로 하기 때문에 요소 내부에서 해의 변화를 계산하기 위해 유한요소법(finite element method)의 형상함수(shape function)를 사용하였다.

2.3 지배방정식의 이산화 적분식

식(1)과 (2)의 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 식(3)과 같은 이산화적분식을 구할 수 있다.

$$\sum_{ip} m_{ip}(u_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S u_i} V \quad (3)$$

여기서 $(\Delta n_j)_{ip}$ 는 적분점 위치에서 국부 표면벡터이며 제한체적의 (ip) 표면을 통과하는 m_{ip} 는 질량유동을 의미한다. 확산항(diffusion term)은 요소의 형상함수의 미분항으로 각 (ip) 위치에서 구배계수를 계산함으로써 이산화하였다. 대류항은 식(4)와 같이 upwind scheme에 기초한 high resolution 기법을 사용하였다.

$$\phi_{ip} = \phi_p + \beta(\nabla \phi)_{ip} \overline{\Delta r_{ip}} \quad (4)$$

대류값, 식 (4)의 ϕ 는, upwind 노드값 (식 (4)의 ϕ 에 (ip) 위치에서 upstream node로부터 떨어진 거리에 1차 미분 수정항에서 구하였다.

Implicit scheme에서 중요한 것은 대류항의 선형화이므로 Newton-Raphson방법으로 (5)식과 같이 정리하였다.

$$(\rho u) \approx \rho^n u^o + \rho^o u^n - \rho^o u^o \quad (5)$$

여기서, 위첨자 n 는 새로 계산된 값이며 o 는 반복계산 바로 전에 계산한 값들을 말한다.

3. 케프란 마이크로터빈 모델링 해석

유체와 열전달분야의 시뮬레이션은 제반 물리적 현상을 컴퓨터를 이용하여 해석하는 분야로서 기계, 항공, 및 물리 그리고 최근에는 건축 설비에 이르기까지 방대한 적용 영역을 가지고 있다. 그러므로 유체, 열 그리고 물질전달을 지배하는 편미분 방정식들의 해 (solutions)를 구함으로써 다양한 물리 값들

의 특성을 해석할 수 있다.

3.1 해석영역의 요소 생성

케프란 마이크로터빈에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 3차원으로 요소 분할을 하였다. 이 과정에서 격자를 부분적으로 세밀하게 분할하여 해석 결과의 정밀도를 증진시켰다. 정확한 격자를 보장하지 못한 경우는, 저유량 영역에서 역압력 구배와 유동박리로 인한 오류로 부정확한 결과를 도출할 수도 있다.

해석영역의 유동장 내에 요소(tetra mesh type) 수와 절점수를 각각 1,386,642개와 255,328개로 구성하였으며, 고정도 경계층 모사가 가능하도록 하였다.

압력구배가 역으로 발생하는 경우, 유동박리의 시작점과 크기를 정확히 예측할 수 있도록 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 수행하였다. 경계조건으로서 입구 측과 출구 측의 질량 유량조건을 주어 전체압력을 구하였다.

케프란 마이크로터빈의 모델링 해석을 위한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 먼저 모델을 3차원으로 정확히 이해를 하여야 한다. 간단한 형상인 경우는 누구나 쉽게 이해할 수 있지만, 터빈과 같이 메카니즘이 복잡한 형상의 기구는 CAD 도면을 정확히 판독하여야 한다. 그러나 CAD 도면이 대부분 2차원이기 때문에 3차원 형상을 정확히 이해하기가 어려우며 아울러 모형을 3차원으로 제작하기가 매우 어렵다. Fig. 3은 케프란 마이크로터빈의 모델링 해석을 위한 3차원 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위한 일련의 과정들이다.

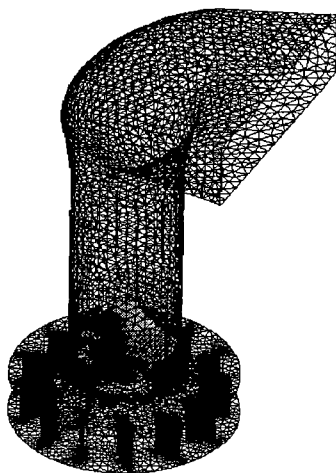


Fig. 2 Tetra-prism for elements and nodes generations

Fig. 3에서 보는 바와 같이 해석할 터빈형상을 결정하고 이에 대한 2차원 도면을 먼저 제작하여 2차원 치수를 획득하여야 한다. 2차원적 치수를 얻는데 가장 중요한 것은 CAD(*.dwg) 파일이며 이것으로부터 쉽게 치수를 환산할 수 있다. 구해진 2차원 치수를 3차원 치수로 환산작업을 하고, 얻어진 3차원 치수를 3차원 CAD 프로그램(ICEM-CFD)을 이용하여 외형을 모델링 한다. 특히 케프란 마이크로터빈과 같이 형상이 복잡한 경우 내부를 정확히 알 수 없기 때문에 현장 확인이 필수적으로 수반되어야 한다.

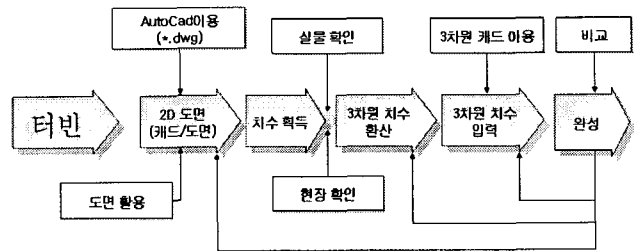


Fig. 3 Process of 3-D modeling analysis for Kaplan micro-turbines

3.2 시뮬레이션 처리과정

시뮬레이션 해석에 사용된 solver의 구조는 Fig. 4와 같은 CFX-10이며, 이 solver는 유체기계 해석에 널리 사용되는 상용코드 CFX-TASC flow의 기술을 이용하여 다상 유동해석, 화학 반응해석, 연소 해석 등의 목적으로 최적화된 것이다. 해석코드의 구조는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 격자생성 (Hexahedral mesh, Tetra mesh), Structure / Unstructured Grids, 경계조건 및 모델링을 부여하는 전처리 과정과 지배방정식의 해를 구하는 주처리 과정, 해석결과 판독성의 편리를 위해 XY Plotting, Animating Graphics, Visualization CFD결과를 표시하기 위한 후처리과정으로 나누어지게 된다.

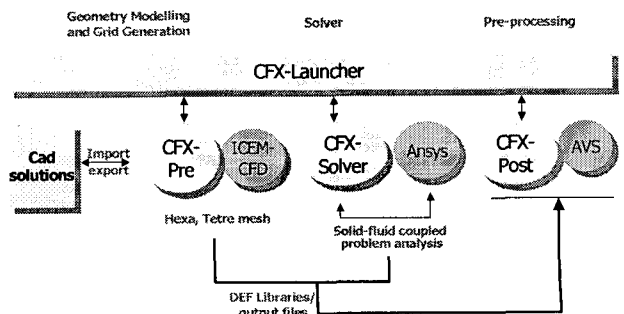


Fig. 4 Structure of CFX-10

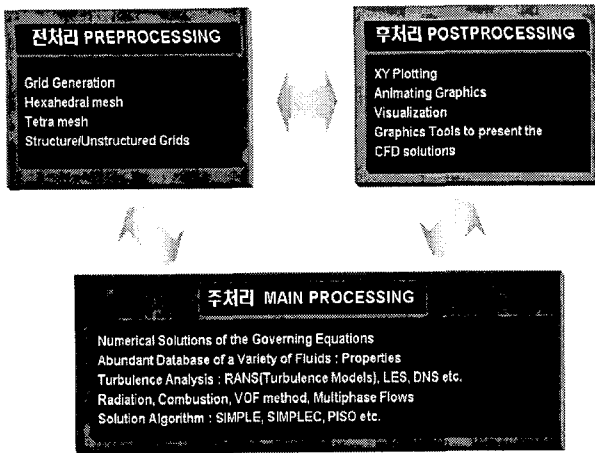


Fig. 5 Steps of CFD for processing unit

3.3 계산조건

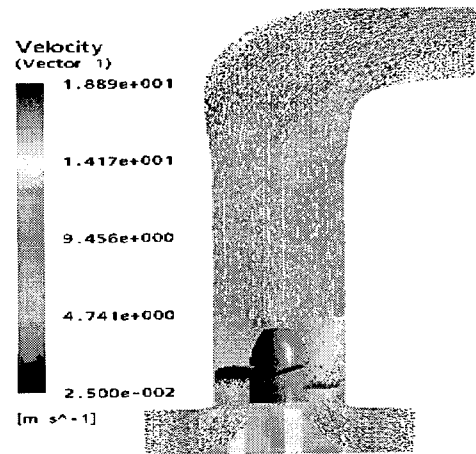
케프란 마이크로터빈의 모델링 해석을 하기 위한 계산조건 파라미터는 향후, 실험으로 검증하기 위한 실제조건과 일치시키기 위하여 2.3 m의 낙차와 유량 0.77 m³/s으로 설정하였으며, 유입부에 가이드 베인을 고려한 시뮬레이션을 위하여 회전수는 615 rpm의 계산조건으로 축류형태의 임펠러를 모델링하였다.

4. 해석결과 및 고찰

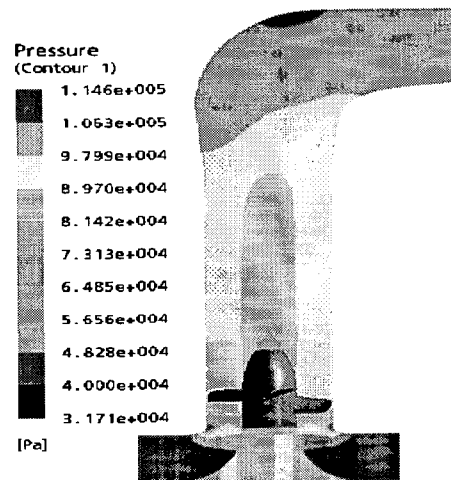
4.1 속도벡터와 압력분포

케프란 마이크로터빈의 모델링 해석영역 중간 단면부근에서 속도와 압력 분포를 나타낸 것이 Fig. 6이다. (a)그림은 마이크로 터빈내에서 $2.5 \times 10^{-2} \sim 1.9 \times 10^1$ m/s 범위로 아래의 임펠러 부분은 빠르게, 출구측은 상대적으로 느린 속도로 물의 입자가 움직이고 있음을 보여준다. (b)그림은 $3.17 \times 10^4 \sim 1.15 \times 10^5$ Pa 압력 거동을 나타내므로 전체 해석 영역에서 다양한 압력차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

케프란 마이크로터빈의 임펠러내 유동장의 움직임을 세밀하게 살펴보기 위해 Fig. 7과 같이 임펠러 부분을 확대하여 나타내었다. (a)그림에서는 615 rpm으로 회전하는 경우, 임펠러 부분에서 $1.9 \times 10^1 \sim 2.5 \times 10^{-2}$ Pa 정도의 부 압력이 형성되어 물을 양수시키고 있음을 알 수 있다. (b)그림은 임펠러 동체와 물입자 상호 운동관계를 분석하기 위해 보다 자세한 움직임을 보여주는 그림이다. 임펠러 베인의 날끝 경사도에 따라 물의 입자가 방사형으로 분산되고 있는 모습을 알 수 있었다.



(a) Velocity vector

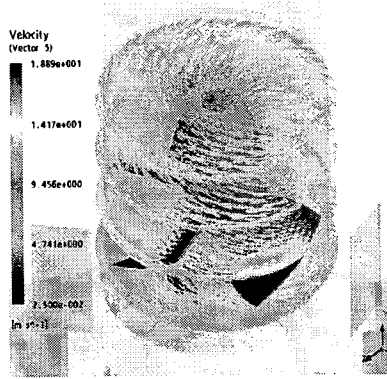


(b) Distribution of pressure

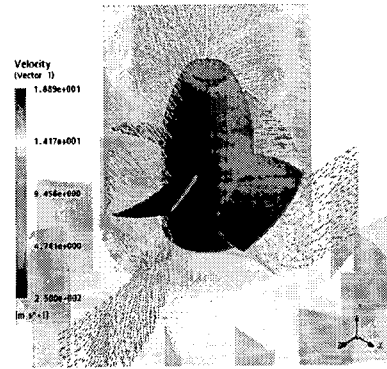
Fig. 6 Velocity vector and pressure distribution of mid section for Kaplan micro-turbines

4.2 시간변화에 따른 유동해석

Fig. 8은 마이크로터빈 임펠러와 유동장 해석영역의 유동 특성을 미크로하게 규명하기 위해, 양수 개시 0.05, 0.2 및 0.5 초가 경과하였을 때 시간변화에 따라 양수거동을 나타낸 것이다. 시작 후 0.05 초가 경과한 (a)그림은 물의 입자가 베인부근에서 순환 유동하고 있는 상태이며, 0.2 초가 지난 (b)그림은 임펠러 스크류를 통과하여 유동장내로 진입하는 양상을 보여준다. 양수 개시 0.5 초 이후를 보여주는 (c)그림은 케프란 마이크로터빈의 전체 영역에 비교적 원활하게 활동되고 있음을 확인할 수 있어서 양수 개시 모델링 해석결과 양수 개시 0.5 초 이후에는 정상적으로 케프란 마이크로터빈의 유동장이 형성되어 진다는 것을 알 수 있었다.

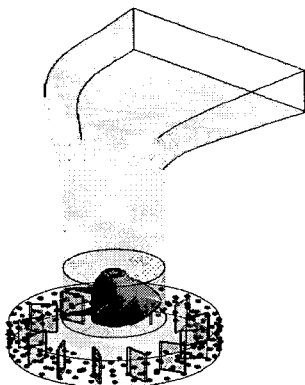


(a) Velocity vectors

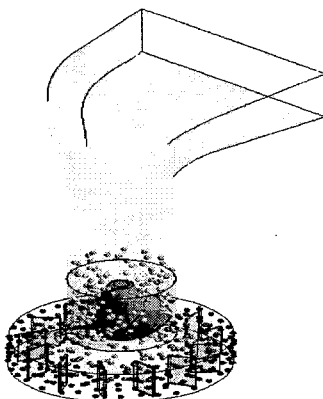


(b) Detail view of impeller

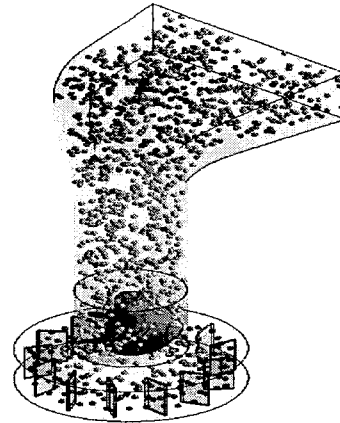
Fig. 7 Velocity vector for Kaplan micro-turbines



(a) After 0.05 sec.



(b) After 0.20 sec.



(c) After 0.50 sec.

Fig. 8 Particle behaviors according to time interval

5. 결 론

저수지나 농업용 수로와 같은 저낙차 소수력발전
 에 적합한 케프란 마이크로터빈의 국산화 개발을
 시급히 착수하기 위하여, 임펠러와 유입부가이드 베
 인의 거동을 시뮬레이션 모델링 해석한 결론은 다
 음과 같다.

첫째, 케프란 마이크로터빈은 유효낙차에 따라 최
 적의 유량과 속도벡터가 결정되므로 합리적인 모델
 링 해석을 통해 최적의 유동량을 결정할 수 있다.
 둘째 케프란 마이크로터빈 유동장 규명을 위해 615
 rpm으로 회전을 하면서 물을 양수시키는 과정에 대
 한 시뮬레이션이 가능하다. 마지막으로 모델링 해석
 결과는 해석영역 내에서 압력차가 다양하게 발생하
 는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학 전력연
 구센터육성사업에 의해 작성되었습니다.

참고문헌

1. R. H, Montanari, 2003, "Criteria for the economic planning of a low power hydroelectric plant", Renewable Energy, London, pp. 2129~2145.
2. 최주석 외, 2005, "소수력 발전용 상용 프란시스 수차의 유동해석을 통한 성능개선에 관한 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 제25권 제3호, pp. 19~25.

3. 김옥삼 외, 2005, “프란시스 터빈의 설계조건 변동에 따른 수력학적 특성해석” 한국동력기계 공학회 논문집, 제9권 제3호, pp. 39 ~ 43.
4. 이철형 외 2003, “소수력 발전용 입축 프로펠러 수차의 수력학적 성능특성 분석”, 한국수소 및 신에너지 학회 논문집, 제14권 제2호, pp. 171 ~ 176.
5. N. H. Costa Pereira, 1995, "Study of the nozzle flow in a cross-flow turbine", Int. J. Mech. Sci., pp. 283 ~ 302.
6. A. Wickstrom, 1997, "Structural analysis of francis turbine runners using ADINA", Computers & Structures, pp. 1087 ~ 1095.