

論文

2차원 Cascade에 의한 연료펌프의 공동발생 해석

타이쿠안나*, 이창진**

Cavitation in Fuel Pump with 2D Cascade Modeling

Thai Quangnha* and Changjin Lee**

ABSTRACT

A CFD code was developed to investigate the inception of cavitation around impeller blades of centrifugal fuel pump using two dimensional cascade modeling. With the verification test for numerical validity of the developed code, the prediction of the onset of cavitation was made for the configuration of a newly designed KHP fuel pump. The calculation results show impeller design was free of cavitation if the pump operates within the operational temperature and rotational speed range. However, the cavitation would be relatively easy to occur at off design region of fuel pump where the rotational speed is higher than design limit. Specially, the onset of cavitation is sensitively dependent on the increase in fuel temperature while the decrease in temperature will reduce the possibility of cavitation inception in the pump.

초 록

원심형 연료펌프의 공동발생 특성을 해석하기 위하여 2차원 cascade 모델링을 적용한 수치 해석 코드를 개발하였다. 해석 코드의 해석 능력에 대한 타당성을 검증한 후, 원심형 펌프의 임펠러 블레이드 주위 유동에 대한 공동 발생을 예측하였다. 본 연구에서 사용한 원심형 연료 펌프의 작동 조건에서는 공동이 발생하지 않는 것을 확인 하였다. 그러나 펌프의 회전속도가 설계점 조건보다 높은 작동점 이외의 영역에서는 공동이 발생할 가능성이 있다. 작동유체의 온도가 낮아지면 공동 발생의 위험이 감소 하지만 온도가 높아지면 작동 영역을 조금 벗어난 입구 유속에서도 공동이 발생할 수 있음을 알았다.

Key Words : Centrifugal pump(원심형 펌프), Impeller(임펠러), Cavitation(공동), 2-D cascade modeling(2차원 cascade 모델링)

Nomenclature

α_1 : Void fraction	S_t : Strouhal number
C_L : Lift coefficient	C : chord length
f : Frequency	S : Control surface
N : Rotational speed	β_{s1}, β_{s2} : Blade inlet, outlet angle
	d_1, d_2 : Blade inlet, outlet diameter
	h : Passage width
	s : Blade thickness
	z : Number of blades
	t : Time
	p : Pressure

† 2009년 2월 23일 접수 ~ 2009년 4월 20일 심사완료

* 정희원, 건국대학교 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 건국대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

\vec{v}	: Velocity vector	V	: Control volume
\vec{n}	: normal vector	u_i, u_j	: velocity components
\vec{b}	: body force	δ_{ij}	: Kronecker delta function
μ_t	: Turbulent viscosity	x_i, x_j	: Cartesian coordinates
k	: Turbulent kinetic energy	C_μ	: Turbulent coefficient
ϵ	: dissipation rate	ρ_m, ρ_l, ρ_v	: Density of mixture, of the liquid, of the vapor

I. 서 론

속도가 증가함에 따라 물체 주위의 압력이 낮아져 압력이 액체의 포화증기압에 이르면 액체와 기체가 공존하는 이상 유동(two phase flow)이 발생하는데 이를 공동 발생(cavitation inception)이라고 한다. 공동은 난류와 함께 발생하므로 유동을 해석하는 것이 매우 어려워진다. 공동 현상이 발생하면 주기적인 생성과 소멸에 의해 물체 주변에 강력한 압력진동을 유발하게 되어 응력의 과다 집중이나 파괴 등이 발생하기도 한다. 또한 공동의 재부착으로 인해 물체 주변에 부식이 발생하여 성능에 악영향을 미치기도 한다.

한편 원심펌프는 임펠러의 회전에 의하여 연료의 압력을 높여 연료를 연소실로 이송하는 역할을 담당하는 장치이다. 만일 임펠러의 하류에서 유동 불안정(instability)이 발생한다면 엔진으로 이송되는 연료의 질량유량(mass flow)이 일정하게 유지되지 않고 진동하여 엔진 성능에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 특히 항공기나 액체 로켓에 사용되는 연료 펌프에서 발생하는 공동 현상은 양정의 손실을 일으키며 유량을 감소시켜 성능을 저하시키는 요인으로 작용한다. 대부분의 펌프는 작동 설계점(on-design)에서 공동이 발생하지 않도록 설계하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 설계에서 예측한 운영범위 밖인 탈-설계점(off-design)에서 작동할 때 공동이 발생할 가능성이 매우 높아진다. 따라서 안정적인 엔진 작동을 유지하기 위하여 일차적으로 임펠러 주위에는 어떤 형태의 공동현상도 발생하지 않아야 한다.

임펠러 주위 유동은 3차원 난류 유동으로 공동이 발생하면 비정상(unsteady) 특성을 나타내므로 수치적으로 공동 발생을 예측하는 것은 많은 어려움이 있다. Jousselein 등[1]은 이러한 3차원 유동현상을 2차원 수치 기법인 cascade 모델링을 이용하여 인듀서 주위의 복잡한 유동과 공동 발생을 연구 하였다. 인듀서나 연료 펌프의 임펠러 블레이드에서 발생하는 공동현상은 대부

분 블레이드 길이의 70% 안쪽에서는 얇은 층을 형성한 공동현상(sheet cavitation)으로 발생한다. 이 모델링은 3차원 블레이드 주위의 유동을 2차원 평면 cascade로 가정하였기 때문에 블레이드의 반경방향의 유동 특성을 예측하기는 어렵지만 수치해석 계산에 용의하다. 또한 Coutier 등[2]은 네 개의 블레이드를 갖는 인듀서 주위에서 관찰된 유동불안정 현상과 공동 발생과의 상관관계를 해석하기 위하여 2차원 cascade 방법을 적용 하였다. 그리고 Ugajin 등[3]은 2차원 cascade 방법과 3차원 인듀서 주위의 비정상(unsteady) 공동 발생에 대한 수치 해석을 수행하였다. 이 연구에서는 일반적인 κ - ϵ 난류 모델이 아닌 DES (Detached Eddy Simulation)을 적용하여 공동 발생 특성을 연구 하였다. 그러나 어떤 경우의 해석이던 간에 3차원 유동현상과 공동 발생에 대한 해석을 함께 수행하는 것은 매우 어려운 과제로 알려져 있다. 따라서 효율적이고 편리한 공동 발생 예측 방법에 대한 연구가 필요하였다.

본 연구에서는 2차원 cascade 모델링을 적용하여 공동 현상을 연구할 수 있는 수치해석 코드를 개발하였으며 원심형 연료펌프의 임펠러에서 발생하는 공동 현상에 대한 해석을 실시하였다. 계산에 사용된 연료펌프는 KHP(Korean Helicopter Program) 사업의 일환으로 개발 중인 연료 펌프이었다. 따라서 연구의 목적은 원심펌프의 작동 영역과 탈-설계점 영역에서 공동의 발생을 해석하여 공동 발생 특성을 확인하는 것이다.

II. 본 론

2.1 지배 방정식과 수치해석

수치해석 코드의 지배 방정식은 연속 방정식, Navier-Stokes 방정식, volume 수송 방정식으로 구성된다. 직교 좌표계에서 각 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_m dV + \int_S \rho_m \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_m \vec{v} dV + \int_S \rho_m \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_S \vec{T} \cdot \vec{n} dS + \int_V \rho \vec{b} dV \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i dV + \int_S \alpha_i \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_V (\dot{m}^- + \dot{m}^+) dV \quad (3)$$

여기서,

$$T_{ij} = - \left(p + \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

이고, 혼합물의 밀도와, 난류 점성은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l), \quad \mu_t = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\epsilon}$$

물리적으로 공동 현상은 열역학과 시스템 내에서 일어나는 상변화 역학과 관련이 있다. 식 (4)의 \dot{m}^+ 와 \dot{m}^- 항은 각각 상의 증발과 응축을 나타낸다. 이를 이용한 공동 현상 모델은 Kunz 등[4]이 제안한 모델로 다음과 같으며 volume 수송 방정식(transport equation)에서 생성 항을 통해 표현된다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_v \alpha_l M L N [0; p - p_v]}{\rho_l \left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \right) t_\infty}$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_v \alpha_l^2 (1 - \alpha_l)}{\rho_l t_\infty} \quad (4)$$

식 (4)에서 시간은 특성 길이와 기준 속도 (reference velocity)의 비 (l/U)로 정의된다. 경험 상수인 C_{dest} 와 C_{prod} 의 값은 각각 9×10^5 와 3×10^4 를 사용하였고, 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. 지배방정식의 수치해석은 유동현상에 쉽게 적용할 수 있는 유한체적법(finite volume method)을 이용하였다. 속도 성분과 종속 변수들의 배열을 위한 격자계는 비 엇갈림 격자계를 사용하였다. 비 엇갈림 격자계는 압력과 속도 해에 있어서 심각한 비 물리적인 진동 현상을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 모멘트 보간법을 적용한 압력방정식을 이용하였다.

계산 알고리즘은 SIMPLE을 이용하였으며, 격자면에서 대류항은 상류 도식(upwind scheme)을 사용하여 차분화 하였다. 시간 적분 방법으로는 TTL(Three Time Level) 방법을 사용하였다. 이 기법은 내재적 후방 차분(implicit backward scheme)을 기반으로 하였으며 2차의 정확도를 가지고 진동 해를 방지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 내재적(implicit)기법을 기반으로 하기 때문에 각 시간 간격마다 반복계산이 필요하다.

2.2 2-D cascade 모델링

개발된 수치 해석 코드를 검증하기 위해 다른 계산 결과와의 비교를 시도하였다. 타 계산은 Clark Y-6% 형상[5]의 인듀서 블레이드 주위 유동장에 대한 수치 계산 결과이다. 계산에 사용된 계산 조건은 표 1, 블레이드 단면 형상은 그림 1과 같다.

3차원 인듀서 주위의 유동은 블레이드의 팁 부분을 제외하면 위 그림과 같이 블레이드가 반복되는 cascade 주위의 2차원 유동으로 변환할 수 있다. 따라서 복잡한 3차원 계산을 하지 않아도 공동의 발생 여부를 쉽게 예측할 수 있다.

그림 2는 cascade에서 발생하는 공동으로 인한 2차원 블레이드 주위의 liquid volume fraction을 나타낸 것이고 그림 3은 블레이드 00의 양력 계수를 계산하여 참고문헌 [5]의 값과 비교한 것이

표 1. 2D Cascade simulation condition

main fluid	water of 25°C
Reynolds number	5.0×10^5
free flow speed	34.54 m/s
cavitation number	0.5
pressure of fluid	1.01325×10^5 Pa

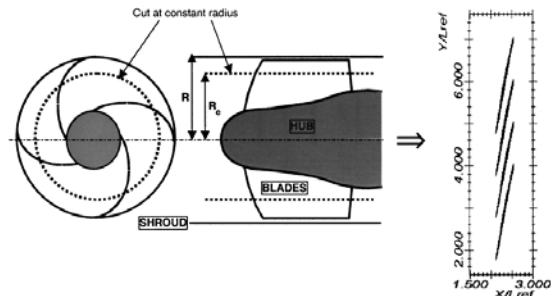


그림 1. 2D Cascade of inducer blade[5]

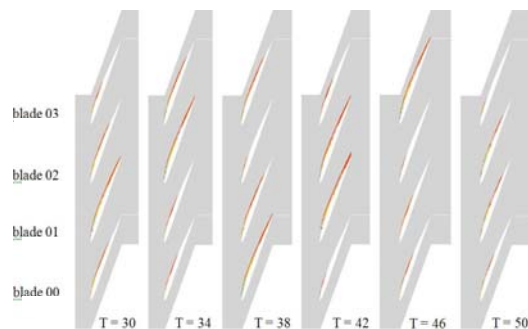


그림 2. Contour of liquid volume fraction

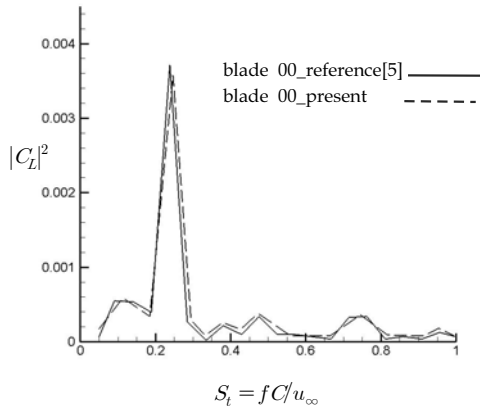


그림 3. Comparison of spectrum of St vs. lift coefficient

다. 그림 3에서 보듯이 블레이드의 양력과 Strouhal 수에 대한 함수관계는 타 계산 결과와 매우 잘 일치함을 보여주고 있다. 양력계수는 $St=0.25$ 에서 피크 값을 보이며 주기적으로 진동하고 있다.

2.3 2-D cascade 임펠러 유동해석

3차원 인듀서 주위 유동에 대한 2차원 cascade 모델링은 논문의 앞절 “2-2. 2-D cascade 모델링”에서 그 타당성을 검증하였다. 그러나 원심형 임펠러 주위의 공동 발생을 예측하기 위하여 우선 임펠러 유동해석에 이 방법을 적용하는 것이 타당한가에 대한 검증이 필요하다. 검증을 위하여 다음과 같은 계산조건과 임펠러 형상을 사용하였다.

이 형상은 참고문헌 [6]에서 사용된 원심형 펌프의 임펠러 형상이다. 참고문헌 [6]은 3차원 계산을 수행하였다. 설계점의 작동조건은 질량유량이 730kg/sec 인 물이며, 양정은 46.68m 그리고

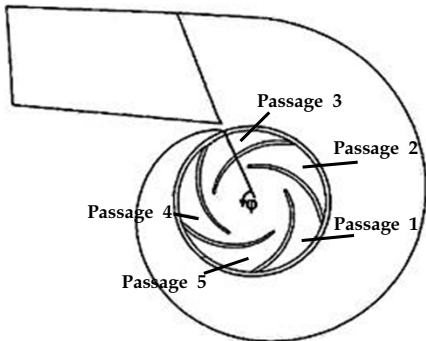


그림 4. Impeller geometry for verification test[6]

회전속도는 1482rpm 이다. 모두 5개의 블레이드를 갖고 있으며 그림 4에서 보듯이 각 블레이드 사이의 유로를 passage 1~5로 표기하였다. 계산은 설계점 및 탈설계점에서 많은 경우로 수행되었으나 검증을 위하여 비교에 사용한 질량유량은 978.2kg/sec 이다. 이 값은 설계유량보다 더 많은 양이므로 유동불안정이 발생할 가능성이 높다. 그림 5는 cascade 모델링 검증을 위하여 사용된 2차원 블레이드와 격자시스템이다.

유동 속도는 6m/sec 이고 블레이드 두께는 18mm , 코드 길이는 319mm 이다. 2차원 cascade 계산에는 3차원 형상을 2차원 cascade로 대체하기 위하여 계산영역 조건을 물리적으로 타당한 조건으로 적용하여야 한다. 3차원 블레이드 주위의 유동을 고려해볼 때 그림 5에서 계산 영역의 윗면과 아랫면은 일치하는 면이다. 따라서 그림 5에서 계산영역의 윗면과 아랫면은 같은 값을 공유해야 하는데 이를 주기적 경계조건(periodic boundary condition)이라 한다.

그림 6은 본 계산에 적용된 주기적 경계조건을 설명하고 있다. 즉, 3차원에서 연결되어 부분을 인위적으로 잘라 2차원 형상으로 변환하였기

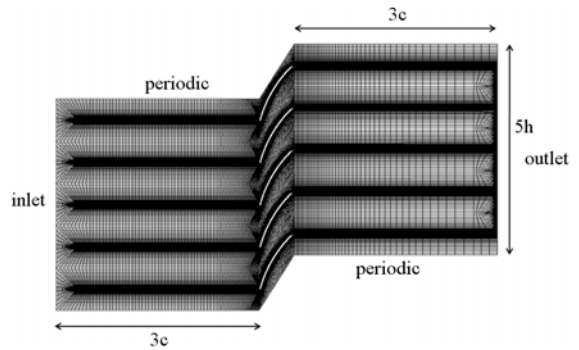


그림 5. blade cascade of impeller

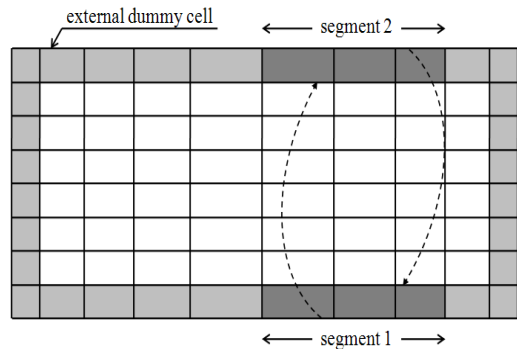


그림 6. Information transfer in periodic condition

때문에 그림에서 segment 1과 2로 나타낸 가상 격자의 수치 정보는 동일하여야 한다. 또 다른 방법은 두 격자 블록이 겹쳐서 존재하는 경우에는 선형 보간법을 이용하여 격자 사이에 존재하는 경계면에서의 격자 값을 구하여야 한다. 2차원 cascade 격자에서 보듯이 각 블레이드를 포함하고 있는 격자 블록이 만나는 경계면에서는 이 방법을 적용하여 선형보간법을 이용한 정보 교환이 이루어 져야 한다. 자세한 내용은 참고문헌 [5]에 잘 설명되어 있다.

한편 원심형 임펠러 블레이드 주위 유동을 2차원 cascade 유동으로 변환하는 데 있어서 인두서의 유동과는 다른 특징들을 고려해야 한다. 그림 1에서 보듯이 인두서에서 입구와 출구 유동은 항상 축방향과 같은 방향이며 2차원 cascade 변환과 관계없이 일정하게 존재한다. 그러나 원심형 임펠러 유동은 입구 유동은 축방향이지만 출구 유동은 축과 직각을 이루며 진행된다. 이런 이유로 임펠러 유동을 2차원 cascade 주위 유동으로 변환할 때는 임펠러의 회전에 의한 선속도를 고려하여야 한다. 즉, 블레이드가 정지되었다고 가정하였기 때문에 블레이드 선속도를 고려한 상대속도로 유동이 입구로 들어오는 것으로 하여야 한다. 그림 7은 2차원 cascade에서 사용되는 유동의 벡터 합을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 정지된 블레이드의 유로에는 블레이드 회전으로 인한 선속도가 고려된 상대속도(relative velocity)로 유동이 유입된다.

그림 8은 3차원으로 계산된 질량유량[6]과 2차원으로 계산한 결과를 비교한 것이다. 계산에 사용된 격자수는 1780x30이며 캐비테이션 수는 2.296이다. 이 계산에서는 공동현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 2차원에서 질량유량을 구하기 위해 면적을 유로 사이의 길이와 단위 길이의 곱으로 정의했고 이는 3차원 면적과 같다.

그림에서 보듯이 2차원 cascade 모델링을 사용하여 각 유로를 통과하는 질량유량의 변화를 계

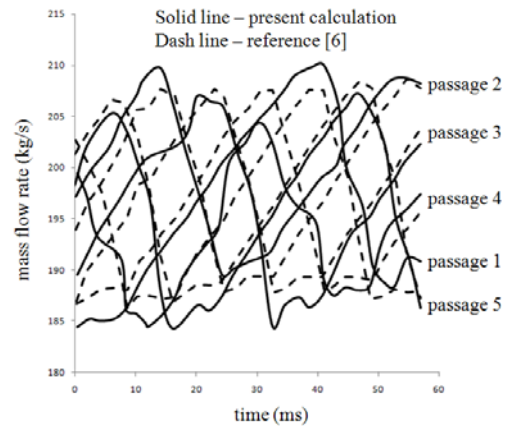


그림 8. Unsteady mass flow rate through each passage ($\dot{m}=978.2$ kg/s)

산한 결과는 3차원 계산결과와 비교할 때 약 2-3% 정도의 오차를 보이며 그 경향이 잘 일치하고 있다. 따라서 임펠러 블레이드 주위의 유동을 해석하는 데에도 2차원 cascade 모델링이 매우 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

2.3 원심형 연료펌프의 공동 발생

본 연구에 사용된 연료펌프는 원심형 연료펌프로 3개의 임펠러 블레이드와 반 길이의 블레이드(splitter blade) 3개를 갖고 있다. 반 길이의 블레이드는 일반적으로 공동발생의 특성에는 영향을 미치지 않지만 임펠러 하류의 유동 불안정을 억제하며 공동 발생을 지연시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다[7]. 본 연구에서는 반 길이 블레이드는 고려하지 않았다. 그림 9는 연료 펌프의 임펠러 블레이드와 2차원 형상으로 변환된 cascade를 보여주고 있다.

연료펌프의 작동유체는 JP-7이며 작동 조건은 표 2와 같다. 임펠러에 대한 설계점(on-design)은 입구 압력이 1atm이고 입구 속도는 8m/s, 유량조건은 0.1536kg/s이다.

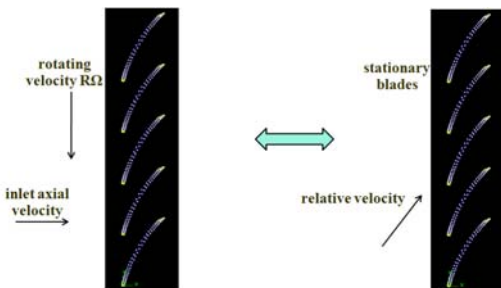


그림 7. Equivalent flow condition

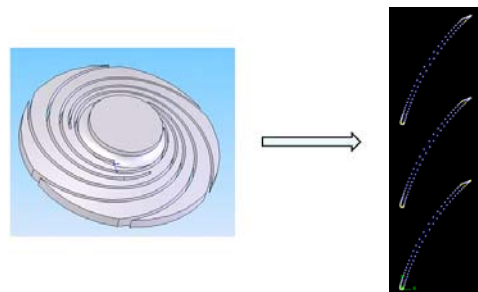


그림 9. Pump configuration and Equivalent 2D cascade

표 2. Nominal design of the pump

($\dot{m} = 0.1536\text{kg/s}$)

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Dynamic viscosity (kg/m·s)	Inlet velocity (m/s)
-35	838.15	0.006727	6
20	795.948	0.0009375	8
43	781.218	0.0011925	10

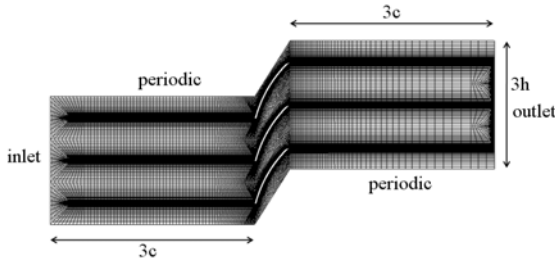


그림 10. Computational domain, mesh and boundary conditions

탈-설계점 영역은 설계점 영역보다 속도가 크거나 작은 영역이다. 낮은 속도에서는 공동이 발생하지 않을 가능성이 높으므로 본 연구에서는 탈-설계점 영역을 입구 유속 10m/sec 이상의 영역에 초점을 맞춰 계산을 수행하였다.

그림 10은 계산에 사용된 격자, 경계조건, 그리고 계산영역의 크기를 보여주고 있다. 사용된 격자수는 1424x30이며 격자수를 더 이상 증가하여도 격자수 변화에 대한 계산결과는 변화가 거의 나타나지 않았다.

원심형 연료펌프의 작동조건인 입구유속 6-10 m/sec 사이에서 블레이드에 공동이 발생하는 여부를 확인하기 위하여 2차원 cascade 모델을 사용한 수치계산을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 이 유속영역은 펌프의 설계점을 포함하고 있는 펌프의 작동 영역이다. 그림 11은 20°C에서 설계점인 입구유속 8m/sec와 탈-설계점인 30m/sec의 계산 결과인 블레이드 주위의 liquid volume fraction을 나타낸다. 그림에서 보듯이 설계점인 입구 유속 8m/sec에서는 공동이 발생하지 않지만 탈설계점인 입구속도 30m/sec에서는 블레이드 주위에 공동이 발생하고 있다.

2차원 cascade 주위의 공동발생 특성을 예측하기 위하여 입구유속의 온도와 속도를 변화해 가면서 공동이 발생하는 영역을 각각 계산하였으며 이를 정리하여 그림 12와 같은 공동발생을 판단할 수 있는 곡선을 얻었다. 이 곡선은 질량유량

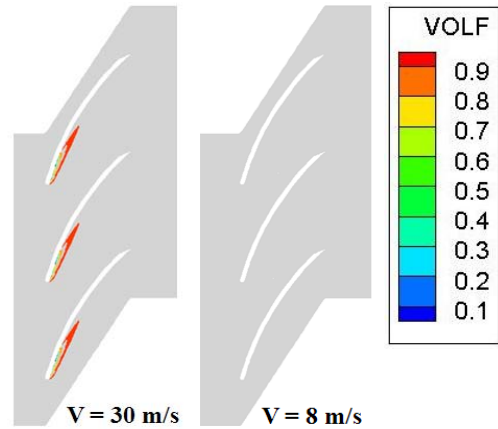


그림 11. Cavitation with liquid volume fraction at on and off-design point

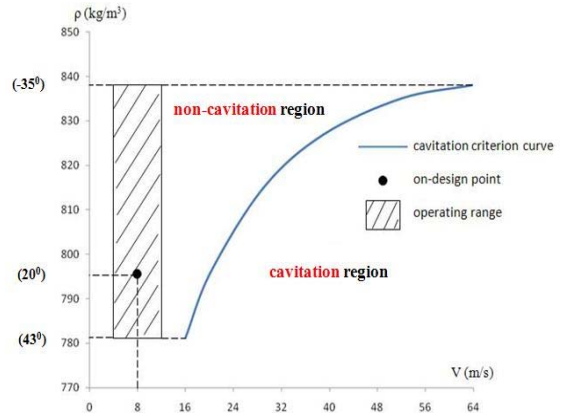


그림 12. Cavitation criterion curve of the pump

553.38kg/hr, 입구 압력 1atm일 때의 결과이다. 곡선의 아래 영역은 2차원 cascade 모델링을 사용한 수치 계산의 결과로부터 공동이 발생하는 영역이고 위 영역은 공동이 발생하지 않는 영역이다.

유체(JP-7)의 밀도는 온도 변화에 따라서 변화하므로 온도 변화에 대한 밀도를 그림의 y축으로 나타냈으며 x축은 상대속도의 크기이다. 이 결과는 온도 43°C일 때 입구 유속 16m/sec 이상으로 작동하면 블레이드에서 공동이 발생하며 온도 -35°C에서는 유체의 밀도 증가로 인하여 유속이 64m/sec에 이를 때까지 공동 발생이 지연될 수 있음을 의미한다. 그러나 빗금으로 표시된 펌프의 작동 영역에서는 공동이 발생하지 않고 있음을 보여주고 있다. 즉, 펌프의 설계점 영역에서 주어진 작동 온도 범위에서 블레이드 주위에 공동 발생은 나타나지 않는다. 그러나 탈 설계점 작

동 영역에서는 작동유체의 온도가 낮아질수록 공동 발생 위험은 낮아지나 반대로 유체 온도가 높아지면 공동 발생의 위험도가 급격히 증가한다.

III. 결 론

3차원 인듀서나 임펠러 주위 유동 해석은 매우 복잡한 물리적 특성 때문에 수치 해석을 수행하는 데 어려움이 있다. 더욱이 공동 발생을 예측하기 위해서는 3차원 유동해석과 공동발생을 동시에 예측할 수 있는 적절한 물리적 모델이 사용되어야 한다. 유체 기계에 대한 공동 해석은 많은 시간 그리고 계산 자원이 필요한 문제이다. 그러나 2차원 cascade 모델링을 사용하면 복잡성을 어느 정도 단순화 할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 원심형 연료펌프의 공동발생 특성을 해석하기 위하여 2차원 cascade 모델링을 적용한 수치 해석 코드를 개발하였다. 해석 코드의 해석 능력에 대한 타당성을 검증한 후, 원심형 펌프의 임펠러 블레이드 주위 유동에 대한 공동 발생을 예측하였다. 본 연구에서 사용한 원심형 연료 펌프의 작동 조건에서는 공동이 발생하지 않지만 작동점 이외의 영역에서는 공동이 발생할 수 있음을 확인 하였다. 작동유체의 온도가 낮아지면 공동 발생의 위험이 감소 하지만 온도가 높아지면 작동 영역을 조금 벗어난 입구 유속에서도 공동이 발생할 수 있음을 알았다.

후 기

본 연구는 KHP 개발사업의 일환으로 (주)한화의 위탁과제로 수행된 연구 결과입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) F. Jousellin, Y. Courtot, O. Coutier-Delgosha, and J. L. Reboud, 2001, "Cavitating Inducer Instabilities: Experimental Analysis and 2D Numerical Simulation of Unsteady Flow in Blade Cascade", B8.002, 4th Int. Symp. CAV2001.
- 2) O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, J. L. Reboud, M. Hofmann, B. Stoffel, "Experimental and numerical studies in a centrifugal pump with 2D-curved blades in cavitating conditions", Journal of Fluids Engineering, 2003.
- 3) H. Ugajin, M. Kawai, K. Okita, T. Ohta, T. Kajishima, M. Nakano, H. Tomaru, "Numerical Analysis of the Unsteady Cavitating Flow in a 2D Cascade and a 3D Inducer", AIAA 2007-553.
- 4) R. F. Kunz, D. A. Boger, D. R. Stinebring, T. S. Chyczewski and H. J. Gibeling, 1999, "A Preconditioned Navier- Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction", AIAA-99-3329.
- 5) K. Okita, Y. Matsumoto, K. Kamijo, 2003, "Numerical Analysis for Unsteady Cavitating Flow in a Pump Inducer", 5th International Symposium on Cavitation (CAV 2003).
- 6) K. Majidi, "Numerical Study of Unsteady Flow in a Centrifugal Pump", Journal of Turbo- machinery, vol.127, No. 2, pp. 363 - 371, 2005.
- 7) 이창진, KHP 연료펌프 공동발생 해석 보고서, (주)한화, 2009년.