

CFD에 의한 소형 튜블러 수차의 캐비테이션 기초해석

남 상현¹⁾, 김 유택²⁾, 최 영도³⁾, 이 영호⁴⁾, 황 영철⁵⁾

Basic Cavitation Analysis of a Micro Tubular Turbine by CFD

Sanghyun Nam, Youtaek Kim, Youngdo Choi, Youngho Lee, Youngcheol Hwang

Key words : small hydropower(소수력), tubular turbine(튜블러수차), cavitation(캐비테이션), CFD (전산유체역학)

Abstract : The small hydropower uses hydraulic power to generate electricity, which one of the future energy resources of the power industry. The tubular turbine which uses in the city water pipe lines's differential pressure electricity is produced, this structure is simple, and therefore advantageous. The effects of cavitation that occurs in the turbine is researched, By using CFD we analysed the flow pattern inside the turbine. As a result, we found out to become the performance fall of turbine.

Nomenclature

- C_p : 압력계수($(P_s - P_{t2})/2\rho U^2$)
- P : 출력
- P_s : 익면정압
- P_{t2} : 러너출구전압
- R : 블레이드 tip에서의 러너베인 전연에서 후연까지의 위치
- R_{LT} : 블레이드 tip에서의 러너베인 전연에서 후연까지의 길이
- U : 러너팁에서의 원주속도
- η : 효율
- ρ : 작동유체밀도

연구하였으며, 상용코드인 CFD를 이용하여 캐비테이션 발생영역과 그로 인한 수차성능특성에 대해 분석하였다.

캐비테이션은 액체의 압력이 포화증기압보다 낮아진 영역에서 증기가 발생하는 현상으로, 상변화와 그에 따른 매우 크고 급격한 밀도변화를 수반한다. 공동현상은 유체기계의 상당한 성능저하를 야기하는 것으로서 기포는 압력이 높은 영역에 이르면 급격히 부서져 소음이나 진동, 부하불균형의 원인이 되며, 포화증기압보다 높은 영역에서 액화되어 기상의 부피가 급격히 축소됨에 따라 그 부분의 국부압력이 매우 커져 유체기계를 침식시키는 원인이 된다⁽¹⁾.

1. 서론

신재생에너지는 화석연료의 대체에너지로서 친환경적이며, 무한정 사용할 수 있는 미래에너지산업이다. 이러한 신재생에너지 중 소수력발전은 깨끗한 물을 이용하여 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 방식으로 이미 선진국에서는 개발 및 상용화되고 있으며, 국내에서는 매우 활발히 개발 진행중에 있다. 그 중 반동수차라 할 수 있는 튜블러 수차(축류형)는 수도관 차압을 이용하는 것으로서 연중 일정유량의 확보가 가능하며, 규모가 작고 구조도 간단한 장점을 가지고 있다. 하지만 아직 국내에서는 개발 초기단계에 있다. 본 논문에서는 튜블러 수차의 개발을 위해 수차 내 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션에 대해서

-
- 1) 한국해양대학교 대학원 유동정보연구실
E-mail : shnam@pivlab.net
Tel : (051)403-1214
 - 2) 한국해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : kimyt@nhu.ac.kr
Tel : (051)410-4258 Fax : (051)404-3985
 - 3) 한국해양대학교 산학협력단 연구원
E-mail : ydchoi@pivlab.net
Tel : (051)403-1214
 - 4) 한국해양대학교 기계정보공학부
E-mail : lyh@pivlab.net
Tel : (051)410-4293 Fax : (051)403-0381
 - 5) (주)신한정공
E-mail : mrghwang@paran.com
Tel : (055)345-8630 Fax : (055)345-8641

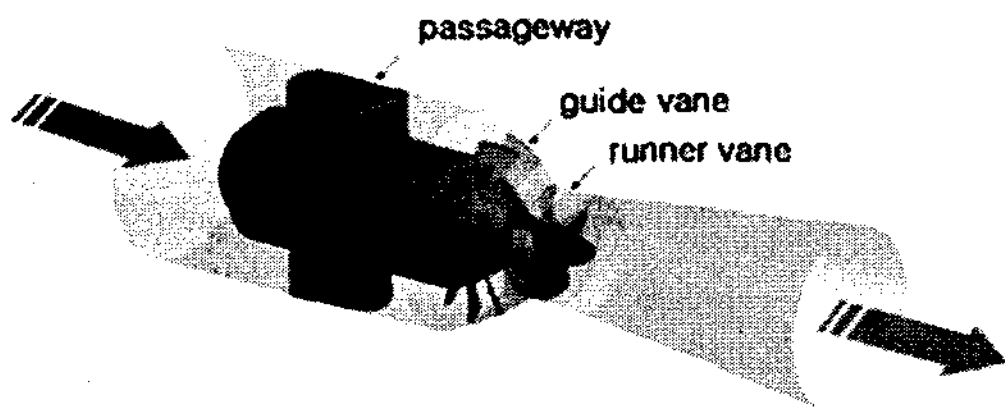


Fig. 1 튜블러 수차 모델

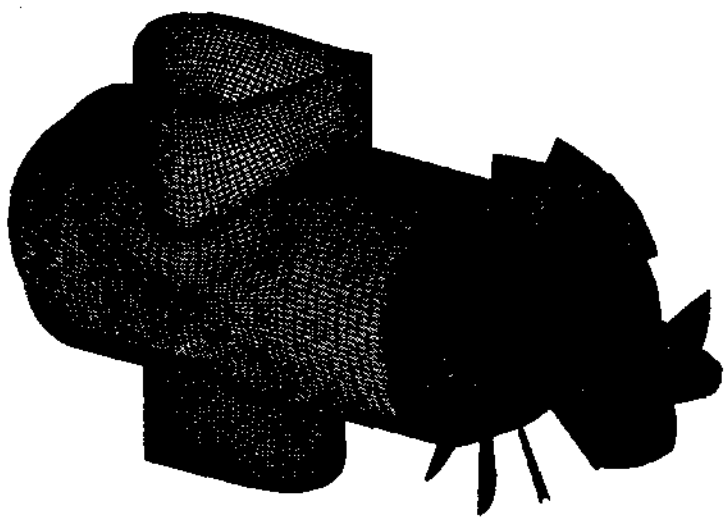


Fig. 2 격자

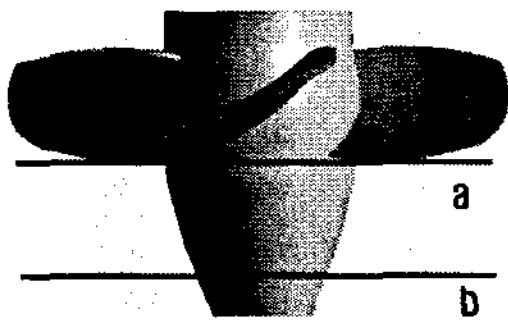


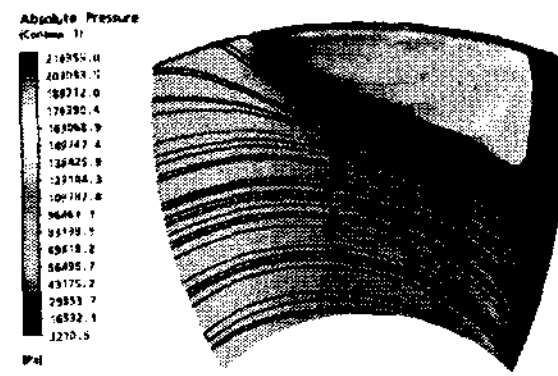
Fig. 3 러너베인 출구부(a) 및 후류(b)

2. 수치해석

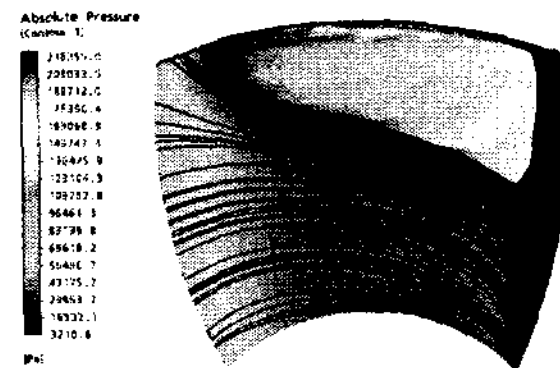
튜블러 수차의 형태는 Fig. 1에 보이고 있으며, 러너베인 및 가이드베인의 모습을 볼 수 있다. 또한 passageway는 수차구동축과 발전기가 벨트풀리로 연결되는 통로이다.

본 수차의 성능해석을 위해 유체기계의 해석에 우수한 성능을 보이는 CFX-11을 사용하였으며, k-ε 난류모델과 밀도변화가 증기밀도 비의 함수가 고려된 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 격자는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 헥사로 구성되었으며, 총 노드수는 약 2백만개이다. 또한 속도분포를 통한 유동흐름을 알기 위해 Fig. 3에 보이는 바와 같이 출구부(a)와 후류(b)에서 속도분포를 나타내었다.

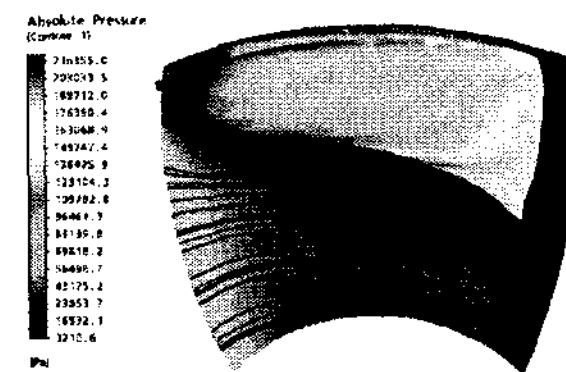
캐비테이션 계산을 위해 VOF (Volume of fraction) 해석을 해야 하는 과정에서 ANSYS CFX에서 제공하는 상호물질교환모델로서 다상류 해석수단이라고 할 수 있는 Rayleigh-Presset 방정식(1) 방법을 이용한다. 이방정식은 증기의 생성과 붕괴되는 과정을 예측할수 있는 방법이다⁽²⁾.



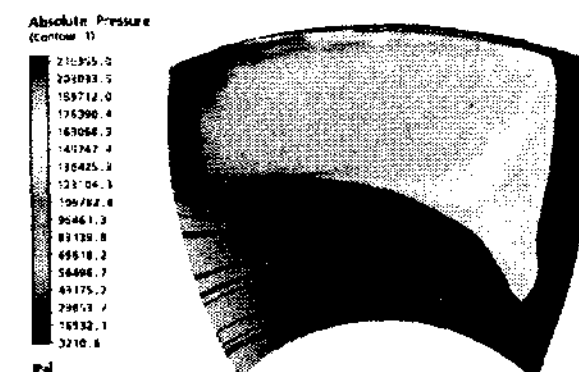
(a) $\sigma=0.81$ (case F)



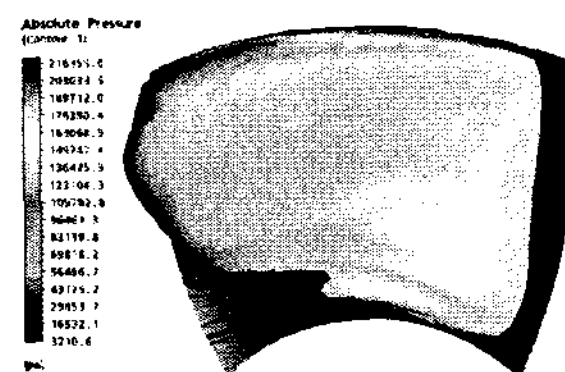
(b) $\sigma=0.69$ (case E)



(c) $\sigma=0.60$ (case D)



(d) $\sigma=0.52$ (case C)



(e) $\sigma=0.45$ (case B)



(f) $\sigma=0.35$ (case A)

Fig. 4 캐비테이션 계수에 따른 VOF

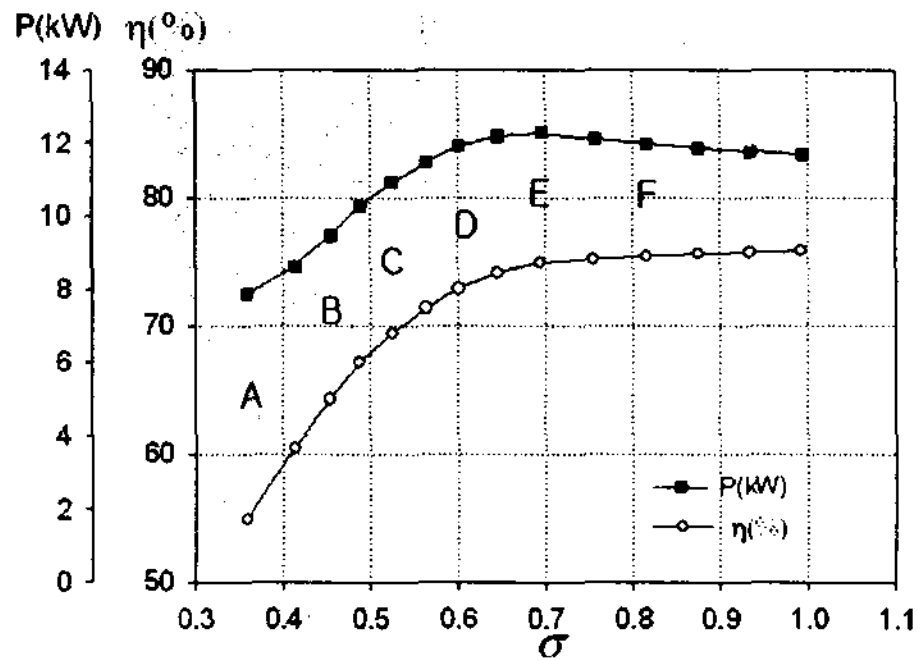
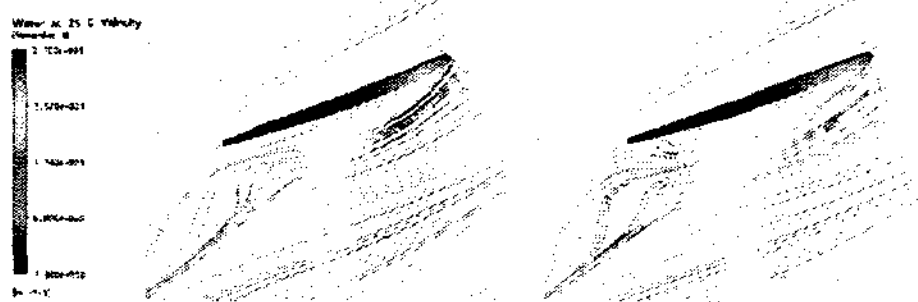


Fig. 5 캐비테이션 계수에 따른 특성곡선

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f} \quad (1)$$

여기서, R_B : 증기방울직경, p_v : 포화증기압,
 p : 압력, ρ_f : 밀도, σ : 표면장력계수

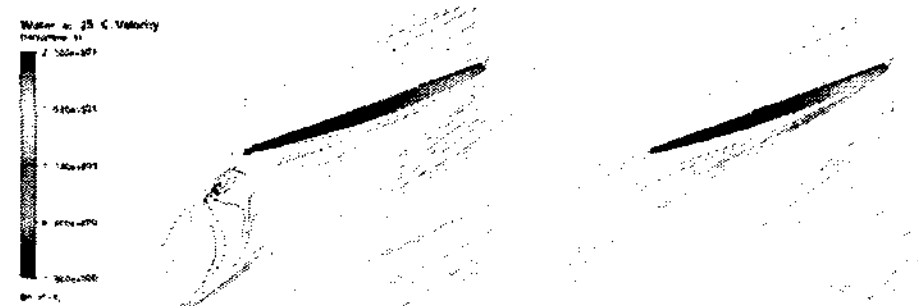
수치해석방법은 펌프와는 달리 일정한 각도에
 서 입구조건으로 일정 유량으로 설정하였으며,
 출구조건에서 압력 변화를 주었다. 그리고 다음
 과 같은 캐비테이션계수 공식(2)을 통해 무차원
 화 하였다.



(a) $\sigma=0.81$ (case F) $\sigma=0.69$ (case E)

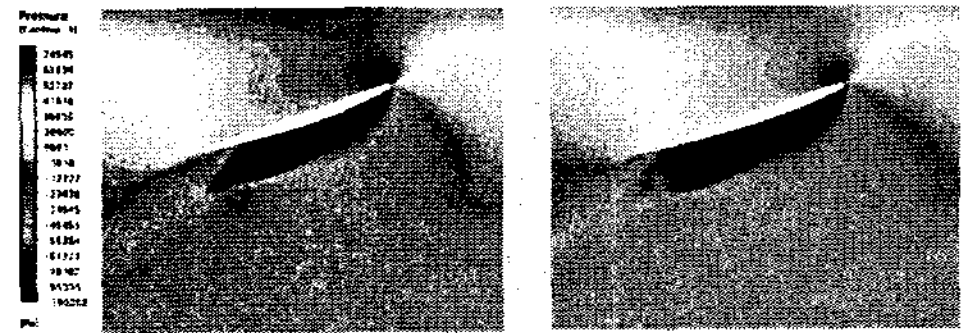


(b) $\sigma=0.60$ (case D) $\sigma=0.52$ (case C)

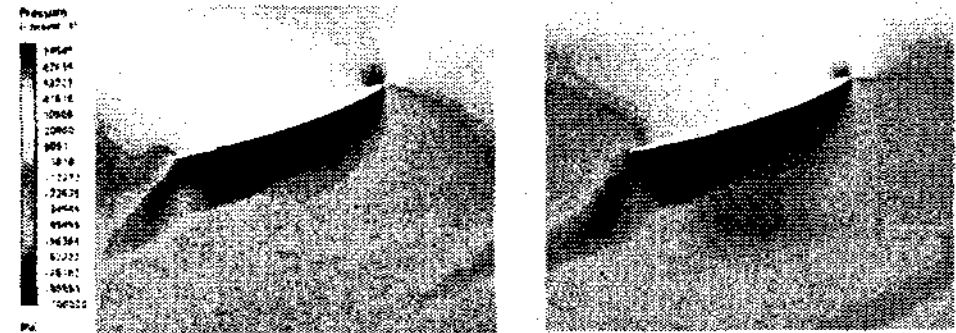


(c) $\sigma=0.45$ (case B) $\sigma=0.35$ (case A)

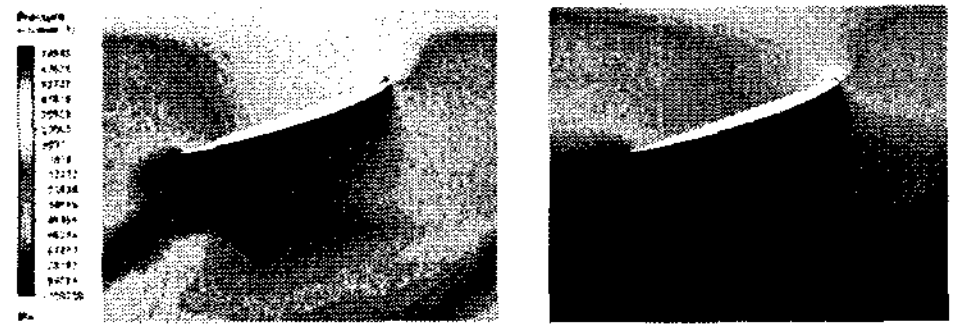
Fig. 6 캐비테이션 계수에 따른 러너베인 tip
 에서의 유적선



(a) $\sigma=0.81$ (case F) $\sigma=0.69$ (case E)



(b) $\sigma=0.60$ (case D) $\sigma=0.52$ (case C)



(c) $\sigma=0.45$ (case B) $\sigma=0.35$ (case A)

Fig. 7 캐비테이션 계수에 따른 러너베인
 tip 부근에서의 압력분포

$$\sigma = \frac{H_a - H_{Va} + H_d + H_{V2}}{H} \quad (2)$$

여기서, H_a : 대기압, H_{Va} : 포화증기압, H_d :
 흡출고 높이, H_{V2} : 출구속도수두

3. 결과 및 고찰

캐비테이션의 발생영역은 대부분 러너부의
 suction side의 tip 및 leading edge 부근에서
 발생한다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 러너베인
 suction side에서 캐비테이션이 발생과 유적선을
 통해 날개표면에 유동흐름을 나타내었다. 캐비테
 이션 계수가 작아짐에 따라 캐비테이션
 VOF(volume of fraction)가 증가하는 것을 알
 수 있으며, 결국, $\sigma=0.35$ 에서 부압면 전체에
 걸쳐 캐비테이션이 발생하였다.

non-cavitation 에서의 출력 및 효율은 다음
 과 같이 각각 $P=11.6kW$, $\eta=76\%$ 이다. 실제 캐비
 테이션의 초생 영역은 $\sigma=0.99$ 에서 나타나며,

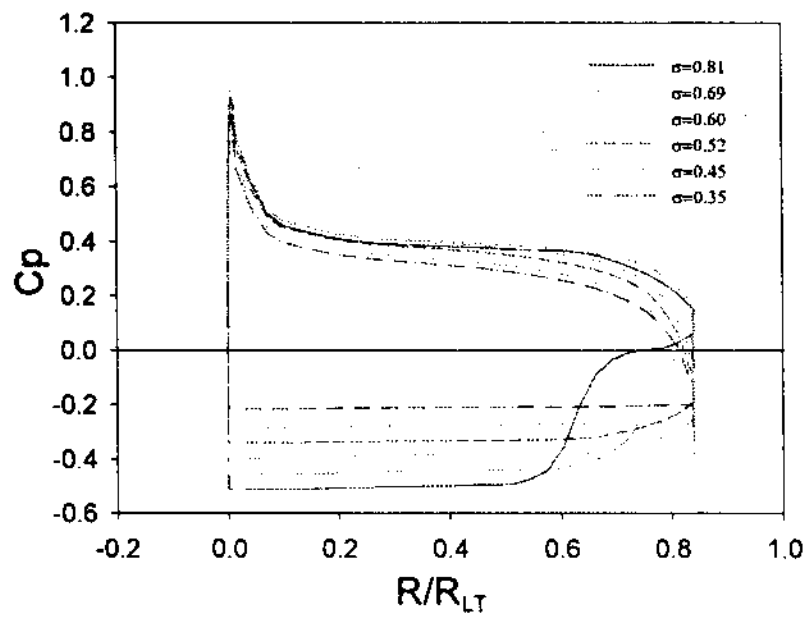


Fig. 8 캐비테이션 계수에 따른 러너베인 tip부근에서의 압력계수

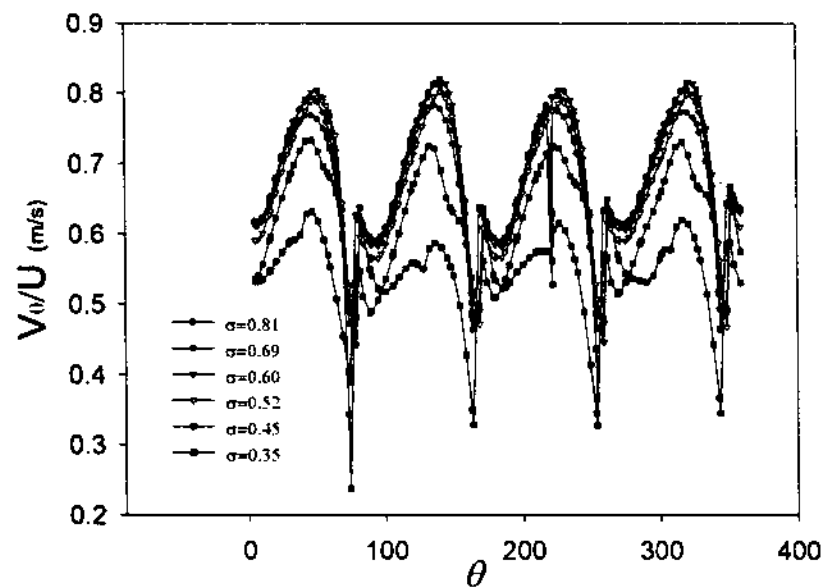


Fig. 9 캐비테이션 계수에 따른 러너베인 출구부에서의 원주방향속도분포

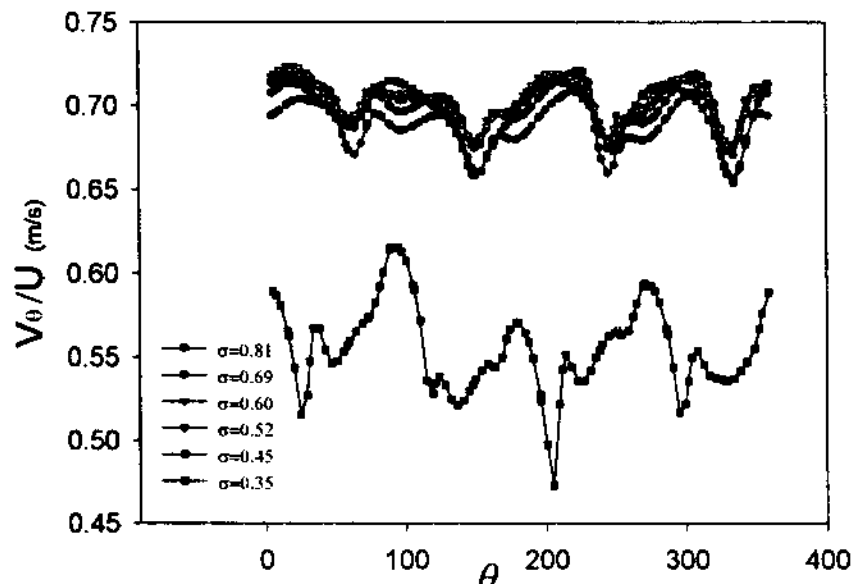


Fig. 10 캐비테이션 계수에 따른 러너베인 출구부에서의 원주방향속도분포

Fig. 5에 보이는 바와 같이 $\sigma=0.7$ 이상에서는 non-cavitation과 비교하였을 때 커다란 차이를 보이지 않는다. 그러므로 미소한 캐비테이션 발생은 효율 및 출력에는 튜블러 수차에 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 하지만, 효율은 $\sigma=0.7$ 부근에서 효율은 적은 효율감소를 보이다가 $\sigma=0.2$ 에서 0.7 사이에는 큰 효율감소를 보이고 있으며, 출력은 $\sigma=0.69$ 에서 높게 나타내고 있지만 그 이후에는 출력이 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6는 날개 tip부근에서의 유적선을 나타내었다. 유적선은 날개의 캐비테이션 VOF를 따라 흐르다가 trailing edge의 후류에서 vortex흐름

을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 캐비테이션 계수가 감소할수록 더욱 복잡한 흐름을 보이다가 $\sigma=0.35$ 에서는 vortex흐름은 사라진다.

Fig. 7에서는 날개 tip에서의 압력 분포를 나타낸 것으로서 캐비테이션 계수가 작아짐에 따라 전체적으로 압력분포가 작아지는 것을 알 수 있는데 이는 캐비테이션 VOF가 점차 증가하여 날개에 국부적으로 압력저하를 가져오는 것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 tip부근에서의 압력계수로 표현한 것이다. 보는 바와 같이 캐비테이션 계수가 작아질수록 부압면의 압력은 점차 작아지며, 압력면 보다는 부압면에서의 압력차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 러너베인 출구에서의 원주방향속도 분포를 나타낸 것이다. $\sigma=0.52$ 에서, $\sigma=0.81$ 까지는 거의 비슷한 크기의 속도분포를 보이지만 $\sigma=0.45$ 에서 원주방향 속도분포가 점차 감소하는 것을 알 수 있으며, $\sigma=0.35$ 에서 급격히 감소한다. 또한 속도분포파장형태도 불규칙한 모습을 볼 수 있다.

Fig. 10에 보이는 바와 같이 러너베인 후류(b)에서 속도분포를 나타낸 것으로서 $\sigma=0.35$ 에서만 매우 낮은 속도분포를 보이고 있으며, 출구에서 보다 불규칙한 형태를 보이고 있다. 반면 $\sigma=0.45$ 에서, $\sigma=0.81$ 에서는 다소 차이는 보이지만 비슷한 형태의 파장형태와 크기를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 튜블러 수차에 대한 캐비테이션 현상에 대해 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- (1) 캐비테이션의 발생영역 과 속도분포 및 압력 분포를 통해 캐비테이션이 미치는 영향을 알 수 있었다.
- (2) 캐비테이션계수가 감소함에 따라 캐비테이션 VOF가 증가하며 그로인해 수차성능에 저하를 가져오는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 양승용 "CFD-ACE+에서의 캐비테이션 해석" 대한기계학회 기계저널 제46권 제9호 pp. 64-68
- [2] 정경남, 김양익 "수직펌프 캐비테이션 성능 해석" 2006 유체기계 연구개발 발표회 논문집 조선대학교, 2006. 11 30~12.1 pp. 187~192