

수력학적 공동현상을 이용한 온수 발생 장치에서의 회전체 형상에 대한 수치해석적 연구

손 손* · 신명섭** · 이웅엽* · 엄애선*** · 윤준용****†

A Numerical Simulation Study on the Shape of the Rotor in Hydraulic Cavitation Heat Generator

Xun Sun*, Myung Seob Shin**, Woong Yup Lee*, Ae Som Om***, Joon Yong Yoon****†

Key Words : Cavitation(공동현상), Heat Generator(발열 장치), Multiphase Flow(다상 유동), Numerical Simulation(수치해석)

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation on the local hydraulic cavitation phenomena of water resulting from the rotor with high rotational speed in the hydraulic cavitation heat generator. The numerical simulation utilizes the standard k-epsilon turbulence model, the mixture multiphase model and the Schnerr-Sauer cavitation model to simulate the complex cavitation phenomena in the generator. For exploring the efficient shape of the dimples on the rotor to causing cavitation phenomena artificially, the pressure distributions and the volume fractions of the vapor on the rotor are investigated respectively about different shapes of the rotor in the generator. The optimum shape of the dimple to causing cavitation phenomena in the selected shapes is obtained by the means of the numerical simulation.

1. 서 론

공동현상(空洞現象, cavitation)이란 일반적으로 액체가 유동할 때, 국소절대압력(local absolute pressure)이 순간적으로 포화증기압(saturated vapor pressure)이하로 내려가면 그 지점에서 국부적으로 증발이 일어나 기포(bubble)가 발생하는 현상 또는 이렇게 발생한 기포의 압력이 포화증기압 이상으로 회복됨에 따라 붕괴(collapse)하게 되는데, 이러한 기포의 발생, 성장, 소멸의 일련의 과정을 공동현상이라고 한다. Vogel 등은 이러한 공동현상으로 인해 발생하는 순간적인 압력은 1300~7150 MPa 정도이며, 기포가 최대 반지름일 때 기포 벽에서의 속도는 390~2450 m/s 정도인 것으로 밝혔다.⁽¹⁾ Gogate 등은 발생된 기포가 성장하며 붕괴되는 과정에서 발생하는 에너지의 밀도는 $1\sim 10^{18}$ kw/m³ 정도이며, 이 때 수천배의 압력과 수천 K(kelvin)의 온도가 국부

적으로 발생하고 이 에너지는 충격파(shock wave)의 형태로 주변에 전달되는 것으로 보고하였으며,⁽²⁾ Suslick 등은 음파 공동현상에 의해 발생하는 기포가 붕괴 될 때의 온도를 MBSL (Multiple-Bubble Sonolumine-Scence)기법에 의한 스펙트럼 분석을 통해 4300 ± 250 K 정도인 것으로 보고하였다.⁽³⁾ Fujikawa 등이 공동현상에 의해 생성된 기포는 붕괴되는 과정이 대단히 격렬하고, 이 때 수천 K에 달하는 열점(hot spot)을 만드는 것으로 해석 및 수치적으로 예측하였고,⁽⁴⁾ 이러한 열점에 대한 실험을 위하여 Didenko 등이 초음파를 이용하여 공동현상을 생성시킨 후 발생한 기포 무리(cloud of cavitating bubble)에서 방사되는 빛의 스펙트럼 분석을 통하여 발생온도를 측정하였다.⁽⁵⁾ 이와 같이 공동현상으로 인한 고온·고압의 에너지로 인해 다양한 유체계의 작동 중 발생하는 공동현상은 침식, 진동, 소음 등을 유발하여 기계에 부정적인 영향을 끼치는 요인이었다. N. Berchiche 등은 공동

* 한양대학교 기계설계공학과(Department of Mechanical Design Engineering, Hanyang Univ.)

** 특허청 특허심사3국 차세대수송심사과(Advanced Transportation Examination Division, Korean Intellectual Property Office.)

*** 한양대학교 식품영양학과(Department of Food Science & Nutrition, Hanyang Univ.)

**** 한양대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

† 교신저자, E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr

현상에 의해 발생하는 기포의 붕괴가 프로펠러에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였으며,⁽⁶⁾ Couty 등은 유체기계의 블레이드 앞전(leading edge)의 후류에서 발생하는 와류형 공동현상에 의한 침식은 매우 심각한 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.⁽⁷⁾ Sedlar 등은 공동화 핵(cavitation nuclei)이 공동현상에 미치는 영향을 확인하기 위해 해석적 식을 제시하였으며, 실험을 통해 제시된 식을 검증하고자 하였다.⁽⁸⁾ 공동현상이 유체기계에 미치는 영향에 대한 연구와 공동현상으로 인한 부식을 최소화하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔다. 하지만 최근 들어 공동현상에 의하여 발생하는 에너지를 이용한 장치의 개발이 활발히 진행되고 있는데, 화학반응기(chemical reactor), 수처리장치(water treatment equipment), 의료기기, 세척 장치와 가열장치 등에 공동현상을 적용한 제품들이 그 예라 할 수 있다.⁽⁹⁾ J. Ozonек 는 수력학적 공동현상 발생의 중요 변수에 대한 연구를 발표하였으며,⁽¹⁰⁾ Kumar 등은 형상이 서로 다른 오리피스 장치를 이용하여 수력학적 공동현상을 발생시켜 화학반응기로 사용되는 장치에 대한 실험을 진행하였다.⁽¹¹⁾ 최근 화석연료 고갈에 따른 고효율 발열장치의 필요성이 부각되고 있으며, 화석연료의 열 발생 효율을 높이기 위하여 기존의 발열장치에 대한 개발이 지속적으로 이루어지고 있지만, 열효율이 약 75% 수준이며, 운전과정에서 탄소가 필연적으로 배출되는 단점이 있다. 수력학적 공동현상의 에너지를 이용한 발열장치는 환경에 악영향을 미치지 않는 친환경적인 에너지원으로써 긍정적인 평가를 받고 있으며, 대형화의 용이함과 더불어 에너지 효율 또한 우수한 것으로 보고되고 있다. 공동현상은 그 주기가 수 nano 초에서 수 마이크로 초에 불과할 정도로 매우 짧고 기포의 크기가 약 0.1 mm 이하로 작으며 그 현상이 매우 복잡하여 이론적인 정립이나 실험을 통한 연구는 상당히 어렵다. 따라서 대부분의 공동현상에 관련된 연구는 개별적 상황에 맞춘 경험적인 방법 및 실험으로 진행되고 있으며, 수치해석적 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 수력학적 공동현상을 이용한 발열장치내의 공동현상을 발생시키는 회전체 딩플(dimple)의 위치와 형상이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수치해석적 방법을 이용하였다. 유동해석을 수행하기 위해 Commercial CFD code Fluent를 사용하였으며, 딩플의 위치 및 형상에 따른 발열장치 내부 유동장의 압력분포를 확인하였다. 공동현상 발생의 정도는 기포의 체적분율(volume fraction of vapor)결과를 통하여 평가하였으며, 설정한 회전체 형상들 중 공동현상 발생에 가장 유리할 것으로 예측되는 형상을 제시하였다.

2. 회전체 형상 및 모델링

본 연구의 대상이 되는 발열장치는 Fig. 1과 같다. 공동현

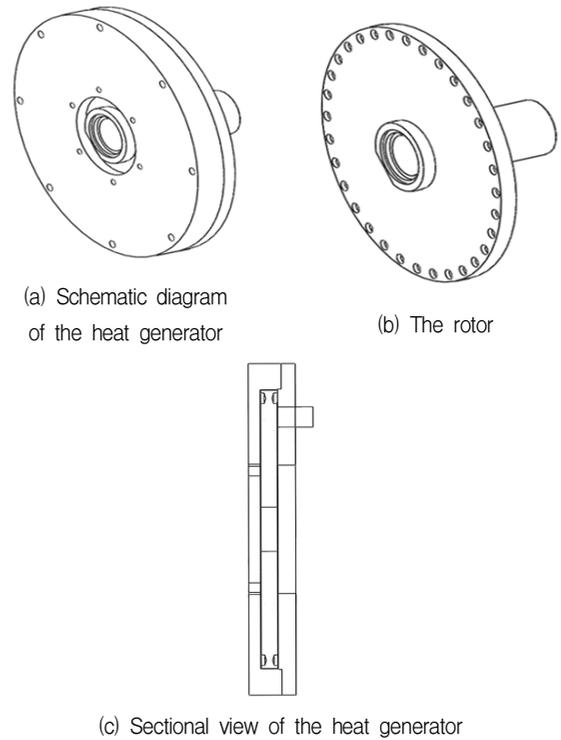


Fig. 1 The cavitation heater

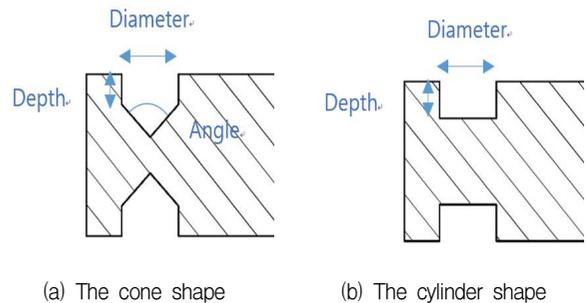


Fig. 2 The shapes of the dimple

상은 날카로운 모서리나 콘 모양의 딩플 등의 기하학적 형상이 유동장에 존재할 때 포화증기압보다 높은 압력에서 공동현상의 시작이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 형상은 공동현상의 발달에도 도움을 주며, 이를 고려하여 물이 유입되는 입구, 고속으로 회전하는 회전체(rotor)를 지나 물이 퇴출되는 출구로 형성되는 유로를 유동해석 해석영역으로 설정하였다.

회전체의 딩플이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 딩플이 없는 회전체, 딩플이 한 줄로 형성되어 있는 회전체, 딩플이 두 줄로 형성되어 있는 회전체에 대하여 수치해석을 진행하였다. 또한 딩플의 형상이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하고 가장 유리한 딩플의 형상을 확인하기 위해 Cylinder 형태의 딩플과, Cone 형태의 딩플에 대하여 수치해석을 진행하였다. 각 형상의 직경(diameter)은 10 mm로 고정하였고, Cylinder 형태는 깊이를 변경하였고

Table 1 Types of the dimple

Shape type	Depth (mm)	Angle α (degree)
Cylinder	3.0	-
	3.5	
	4.0	
	4.5	
Cone	3.0	140
		150
		160
	3.5	140
		150
		160
	4.0	150
		160
	4.5	150

Cone 형태의 딤플은 깊이와 각도를 변경하였다. Fig. 2에 딤플의 형상을 나타내었으며, Table 1에 회전체 딤플의 형상 조건을 정리하였다.

3. 수치해석 방법 및 경계조건

3.1 격자 형태

해석 모델이 단순한 형태를 가지고 있으나 매우 좁은 영역을 포함하고 있어 격자(meshing)는 Ansys Meshing 의 비정렬(unstructured) 격자를 사용하였으며, 격자로 인한 해석결과의 영향을 최소화하며 정확도를 확보하기 위해 각 형상에 약 500만개의 격자를 생성하였다. 생성한 격자는 Fig. 3에 표시하였다.

3.2 경계 조건

본 연구의 수치해석 프로그램은 ANSYS v14.0 내의 유동해석 모듈인 Fluent를 이용하여 다상 유동해석을 수행하였고, 회전체에 회전 조건을 설정하기 위해, 회전체 해석에서 주로 사용되며 해석시간을 줄일 수 있는 Multi-Reference Frame (MRF) 기법을 사용하였다. Fig. 4와 같이 해석영역의 좌표를 Part 1과 Part 2의 두 개의 영역, 즉 2개의 좌표로 나누었으며, Part 1은 정지하여 있고, Part 2는 기준 축을 중심으로 좌표계가 3600 rpm으로 회전하도록 설정하였다.

수치해석에 적용된 난류(turbulence)모델은 일반적으로 공학용으로 가장 많이 사용되며, 난류모델과 Cavitation model을 동시에 사용할 때 수렴성 및 CPU Time이 우수한 Standard K-epsilon⁽¹²⁾을 적용하였고, 속도와 압력의 커플링(coupling)을 위하여 SIMPLE⁽¹³⁾ 알고리즘을 사용하였다.

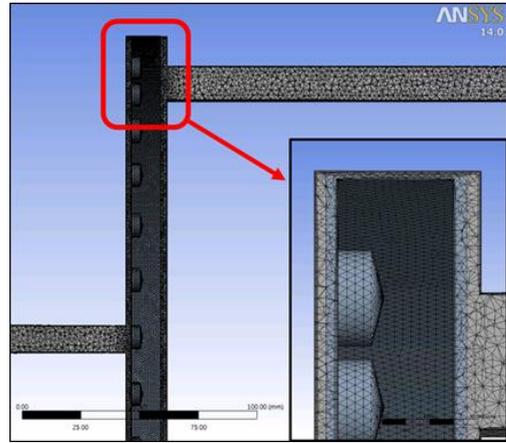


Fig. 3 The grid

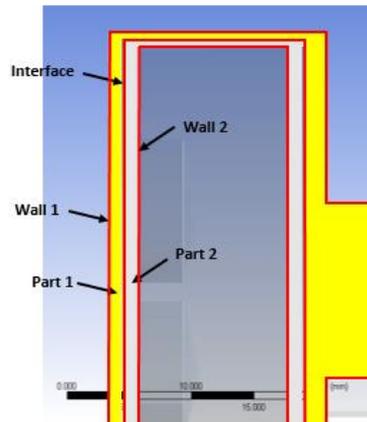


Fig. 4 The boundary conditions

본 연구의 수치해석은 물과 증기가 동시에 존재하는 다상 유동이다. Fluent에 적용된 Cavitation 모델 중 다른 모델들보다 빠른 수렴성을 가진 강건(robust)한 모델인 Schnerr-Sauer⁽¹⁴⁾을 사용하였다. Phase 조건은 Primary phase는 물(water), Secondary phase는 증기(vapor)로 설정하였다.

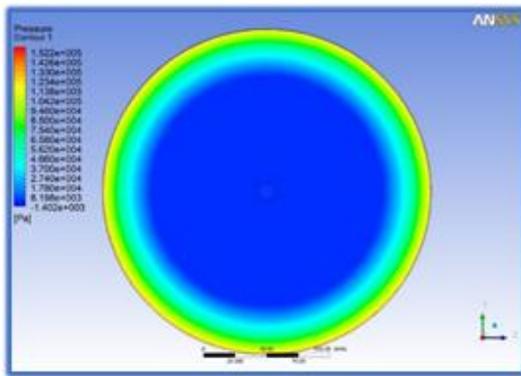
입구 경계조건은 Velocity inlet으로 0.8 m/s, 출구 경계조건은 Pressure outlet으로 대기압 조건으로 설정하였다.

앞서 기술한 회전속도와 입구 경계조건에 부여한 조건은 실험조건과 맞추어 설정하였다. 벽면조건으로는 벽면점착(no-slip) 조건으로 설정하였으며, 상온에서의 포화증기압 조건으로 설정하였다.

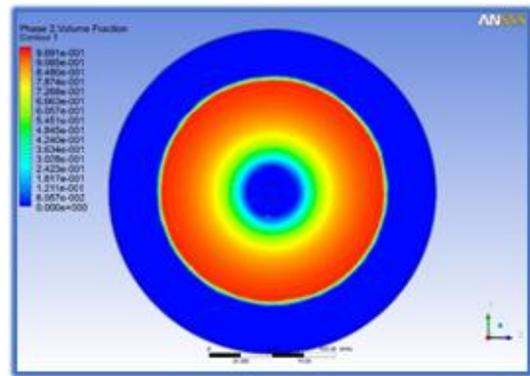
4. 수치해석 결과 및 고찰

4.1 딤플의 배열에 따른 결과

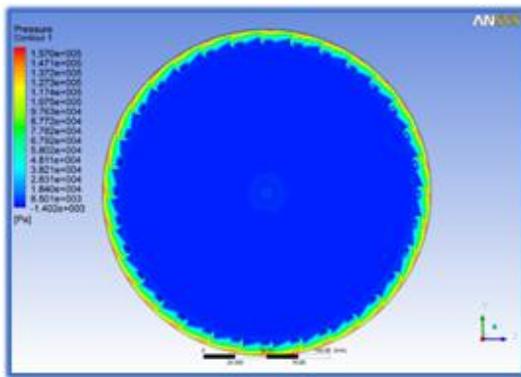
딤플의 유무 및 배열이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여 딤플이 없는 회전체, 딤플이 한 줄로 형성되어 있는 회전체, 딤플이 두 줄로 형성되어 있는 회전체에 대



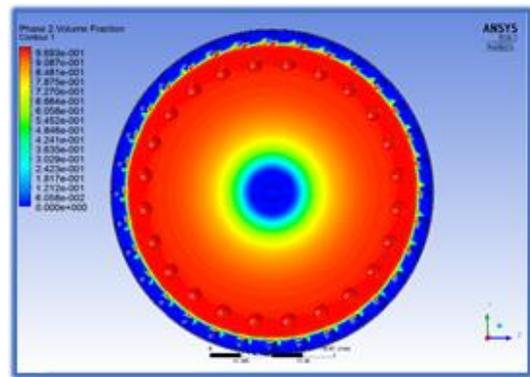
(a) No dimple



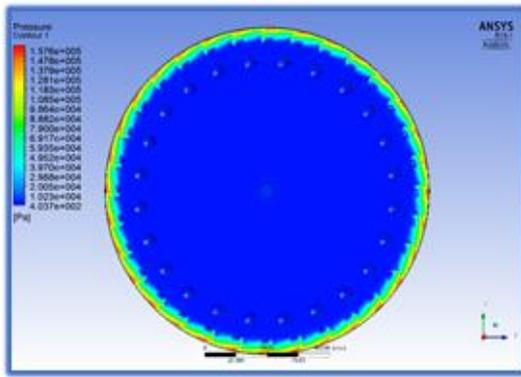
(a) No dimple



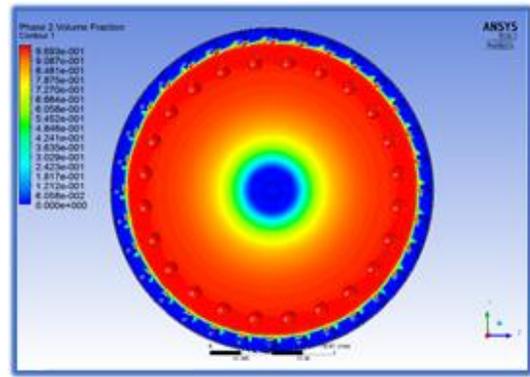
(b) Single



(b) Single



(c) Double



(c) Double

Fig. 5 The pressure distributions

Fig. 6 The distributions of the volume fractions of vapor

한 수치해석 결과를 Fig. 5과 Fig. 6에 나타내었다. 각각의 조건에서 압력장과 기포 체적분율을 나타내었다.

먼저, 뒨플이 없는 회전체와 뒨플이 있는 회전체의 수치해석 결과를 비교하여 보면, 뒨플이 없는 회전체에 비하여 뒨플이 있는 회전체의 경우 뒨플로 인하여 압력이 더 낮아지는 것을 확인하였다. 발생한 기포의 양을 정량적으로 비교하기 위해 각 조건의 체적분율을 측정하였다. 회전체의 중심에서 Y 축을 기준으로 측정하였으며, 뒨플이 공동현상 발생에 미치는 영향을 중점적으로 확인하기 위하여 중심으로부터 Y축 방향으로 -70 mm 인 지점부터 회전체 끝단까지 측정하였다. 중심을 기준으로 X축 방향 및 Y축의 양의 방향에 대한 기포 체적분율 그래프는 측정 방향에 따른 차이가 미미하여 생략

하였다. 뒨플의 배열에 따른 기포 체적분율 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

뒨플이 있는 회전체의 경우 뒨플이 없는 회전체에 비하여 상당한 기포 체적분율 차이를 보이는 것을 확인하였다. 한 줄의 뒨플을 가지는 회전체와 두 줄의 뒨플을 가지는 회전체의 기포 체적분율은 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 한 줄의 뒨플을 포함한 회전체의 경우 뒨플의 위치에서 기포 체적분율이 확실하게 증가하는 것으로 나타났고, 가공 및 회전체가동으로 인한 소비 동력을 고려하면 두 줄의 뒨플을 포함한 회전체보다 한 줄의 뒨플을 포함한 회전체 조건이 적합하다고 판단하였으며, 나머지 해석 조건의 뒨플 배열은 한 줄의 뒨플을 포함한 회전체로 진행하였다.

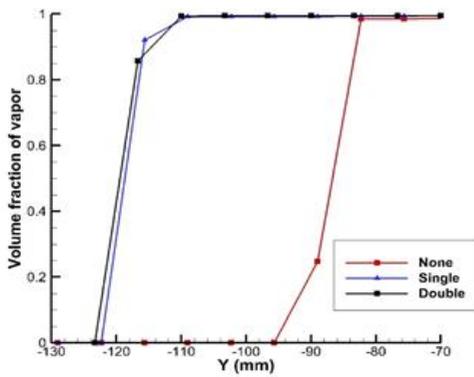


Fig. 7 Comparison of the volume fractions of vapor

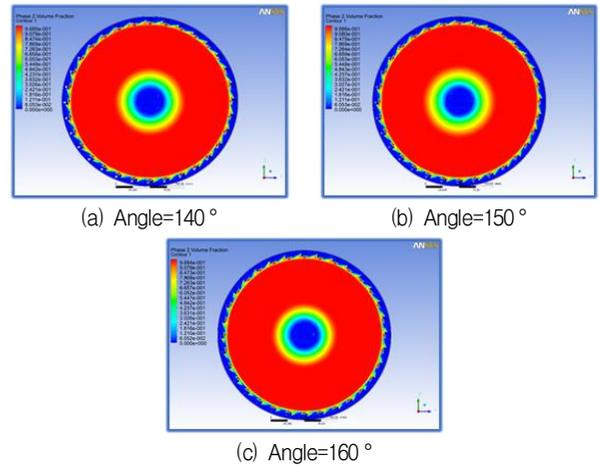


Fig. 10 The volume fractions of vapor

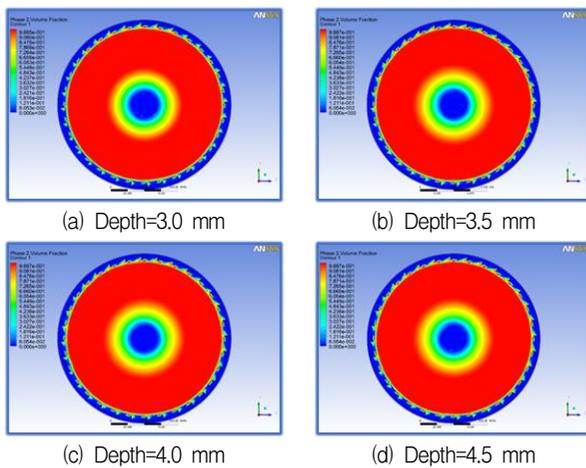


Fig. 8 The volume fractions of Vapor

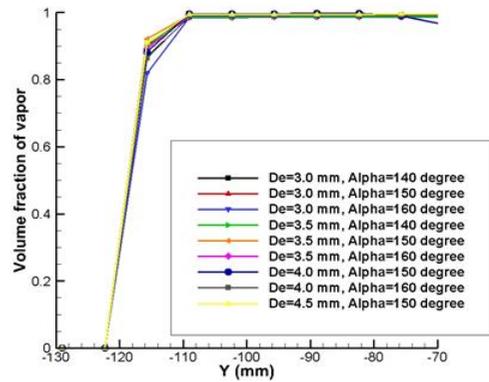


Fig. 11 Comparison of the volume fractions of vapor

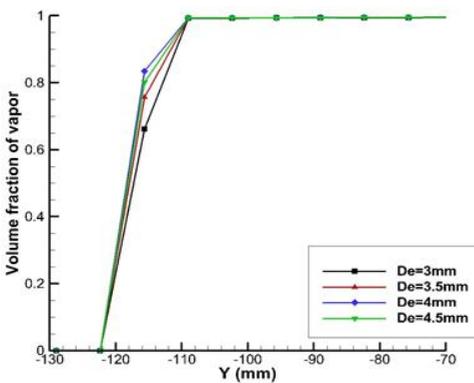


Fig. 9 Comparison of the volume fractions of vapor

4.2 댄플의 형상에 따른 결과

회전체의 댄플의 형상이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여 앞서 언급한 Table 1의 형상 조건에 대하여 수치해석을 진행하였다.

먼저, Cylinder 형태의 댄플을 포함한 회전체의 기포 체적분율 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Cylinder 형태의 댄플의 경우 댄플의 깊이를 변경하였으며, 이에 따른 정량적인

기포 체적분율 값을 Fig. 9에 나타내었다.

Cylinder 형태의 댄플을 포함한 회전체의 경우 댄플의 깊이가 4.0 mm 인 경우에 공동현상 발생에 가장 유리한 형상인 것으로 예측되었다.

Cone 형태의 댄플을 포함한 회전체의 기포 체적분율 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 각 형상 조건에 따른 기포 체적분율 결과는 가시적으로 큰 차이가 없으므로, 깊이 3.5 mm인 경우의 각도를 변경한 결과를 대표적으로 나타내었다. Cone 형태의 댄플의 경우 댄플의 깊이 및 각도를 변경하였으며, 이에 따른 정량적인 기포 체적분율 값을 Fig. 11에 나타내었다. Cone 형태의 댄플을 포함한 회전체의 경우 댄플의 깊이가 3.5 mm, 각도 150° 인 경우에 공동현상 발생에 가장 유리한 형상인 것으로 예측되었다.

Table 2에 전체 형상 조건에 대한 기포 체적분율 결과를 정리하였다. 전체 유로의 총 체적에 대한 기포 체적의 비를 나타내었으며, 이를 통해 공동현상 발생에 가장 유리한 댄플의 형상을 확인하고자 하였다.

Cylinder 형태의 깊이가 4.0 mm의 댄플을 포함한 회전체의 경우, Cone 형태의 깊이가 3.5 mm, 각도 150° 인 경우에 공동현상 발생에 가장 유리할 것으로 예측되었다.

Table 2 The volume fractions of vapor for various shape of the dimples

Shape type	Depth (mm)	Angle α (degree)	Total volume fraction of vapor (%)
Cylinder	3.0	-	55.20
	3.5		55.47
	4.0		55.77
	4.5		55.53
Cone	3.0	140	55.93
		150	55.84
		160	55.81
	3.5	140	56.13
		150	56.15
		160	55.70
	4.0	150	55.62
		160	55.53
	4.5	150	55.67

5. 결 론

본 연구에서는 수력학적 공동현상을 이용한 운수 발생 장치에서의 회전체 형상이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하였고, 공동현상 발생에 유리한 딩플 형상을 확인하고자 하였다. 딩플의 배열에 따른 결과를 확인하여 딩플의 유무가 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 또한 딩플의 형상 조건을 변경하여 공동현상 발생에 가장 유리한 형상을 예측하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 회전체에 기하학적인 형상이 존재할 경우 공동현상 발생에 유리한 것으로 예측되었다.
- 2) 회전체의 딩플의 형상이 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하였으며, Cone 형태의 딩플이 Cylinder 형태의 딩플보다 공동현상 발생에 유리한 것으로 예측되었다.
- 3) Cylinder 형태의 깊이 4.0 mm인 딩플의 경우 공동현상 발생에 가장 유리한 것으로 예측되었으며, 깊이가 커질수록 기포 발생에 유리한 것으로 나타나지만, 깊이가 4.5 mm 인 경우 기포 발생량이 깊이가 4.0 mm인 경우보다 작게 나타나 딩플 형상에 대한 적합한 깊이를 설정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.
- 4) Cone 형태의 깊이 3.5 mm, 각도 150°인 딩플을 포함한 회전체의 경우 공동현상 발생에 가장 유리한 것으로 예측되었으며, 각도보다 깊이 변화가 기포 발생량에 미치는 영향이 큰 것으로 예측되었다. 전반적으로 깊이가 큰 것보다 작은 경우에 기포 발생에 유리한 것으로 예측되었으며, 각도가 작아질수록 기포 발생에 유리할 것

으로 예측되었다. 하지만 공동현상에 가장 유리할 것으로 예측된 형상은 깊이 3.5 mm, 각도 150°인 것으로 나타나, 형상 변경 조건인 깊이와 각도를 각각 나누어 기포 발생에 미치는 영향을 판단하는 것보다 딩플 형상에 대한 적합한 깊이와 각도를 설정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

- 5) 설정한 회전체 딩플의 형상들 중에 딩플이 Cone 형태의 깊이 3.5 mm, 각도 150°인 경우 공동현상 발생에 가장 유리할 것으로 예측되었다.
- 6) 두 줄의 딩플 배열을 가진 회전체의 경우 한 줄의 딩플 배열을 가진 회전체보다 공동현상 발생에 더 유리할 수 있으나 그 차이가 미미한 것으로 예측되었으며, 가공 및 회전체 가동으로 인한 소비 동력을 고려한다면 한 줄의 딩플 배열을 포함하는 회전체가 적합할 것으로 판단된다. 추후에는 소비 동력을 고려한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2015년 농림수산물기술평가 고부가가치 식품기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Vogel, A., Busch, S., and Parlitz, U., 1996, "Shock Wave Emission and Cavitation Bubble Generation by Picosecond and Nanosecond Optical Breakdown in Water," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 1, pp. 148~165.
- (2) Gogate, P. R., Tayal, R. K., and Pandit, A. B., 2006, "Cavitation: A Technology on the Horizon," *Current Science*, Vol. 91, No. 1, pp. 35~46.
- (3) Suslick, K. S., Didenko, Y., Fang, M. M., Hyeon, T., Kolbeck, K. J., McNamara 3, W. B., Mdleleni M. M., and Wong M., 1999, "Acoustic Cavitation and Its Chemical Consequences," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, Vol. 357, No. 1751, pp. 335~353.
- (4) Fujikawa, S., and Akamatsu, T., 1980, "Effects of the Non-equilibrium Condensation of Vapour on the Pressure Wave Produced by the Collapse of a Bubble in a Liquid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 97, No. 3, pp. 481~512.
- (5) Didenko, Y. T., McNamara 3, W. B., and Suslick, K. S., 1999, "Hot Spot Conditions During Cavitation in Water," *Journal of American Chemical Society*, Vol. 121, No. 24, pp. 5817~5818.
- (6) Berchiche, N., and Grekula, M., "Concept of Focusing of Collapse Energy - Application to Cavitation Observations," 5th International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan,

- November 1~4, 2003.
- (7) Couty, P., Farhat, M., and Avellan, F., "Physical Investigation of a Cavitation Vortex Collapse," 4th International Symposium on Cavitation, California, USA, June 20~23, 2001.
- (8) Sedlar, M., Zima, P., Nemeč, T., and Marsik, F., "Analysis of Cavitation Phenomena in Water and Its Application to Prediction of Cavitation Erosion in Hydraulic Machinery," 15th International Conference on the Properties of Water and Steam, Berlin, Germany, September 8~11, 2008.
- (9) Kwon, W. C., and Yoon, J. Y., 2013, "Experimental Study of a Cavitation Heat Generator," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 227, No. 1, pp. 67~73.
- (10) Ozonk J., and Lenik K., 2011, "Effect of Different Design Features of the Reactor on Hydrodynamic Cavitation Process," Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 54, No. 2, pp. 112~117.
- (11) Kumar, P. S., Kumar, M. S., and Prandit, A. B., 2000, "Experimental Quantification of Chemical Effects of Hydrodynamic Cavitation," Chemical Engineering Science, Vol. 55, No. 9, pp. 1633~1639.
- (12) Launder B. E., and Spalding D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 269~289.
- (13) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Taylor & Francis, Abingdon, UK.
- (14) Schnerr, G. H., and Sauer J., "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA, May 27~June 1, 2001.