

파력발전장치 공기실 내 왕복유동장 해석

문재승* · 현범수** · 홍기용* · 신승호* · 김길원**

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소,

**한국해양대학교 해양시스템공학부

Internal Oscillating Flow Field Analysis in Air Chamber of Wave Energy Conversion

JAE-SEUNG MOON*, BEOM-SOO HYUN**, KEYONG HONG*, SEUNG-HO SHIN* AND GIL-WON KIM**

*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

**Division of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave Energy 파력발전, OWC(Oscillating Water Column) 진동수주, Air Chamber 공기실, Duct 덕트, Oscillating Flow 왕복유동, Unsteady Analysis 비정상해석, MDM(Moving & Deforming Mesh), Piston Motion 피스톤 운동

ABSTRACT: This paper deals with the internal oscillating flow in air chamber and duct of an OWC-type wave energy converter by numerical analysis using commercial CFD code, FLUENT. Whole oscillating flow from OWC-type chamber to outlet through duct was solved by unsteady analysis in order that performance of wave energy conversion was made better. Results show that whole oscillating flow field of this system in unsteady condition. Duct shape at setting place of turbine is curved with elbow, because profile of inlet condition to turbine is important in its efficiency. This paper is found internal flow in air chamber and duct. Also, this research was found effect of duct shape.

1. 서 론

전 세계적으로 화석에너지 고갈과 유가상승 등으로 인하여 자연 청정에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 그 중 유력한 대체에너지 중 하나인 파력에너지에 대한 연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있다(홍기용, 2005). 본 논문에서는 파력에너지를 우리가 필요로 하는 유용한 에너지로 변환하기 위한 방식 중 진동 수주 (Oscillating Water Column) 방식을 채택하고 있는데 파도에너지가 공기에너지로, 공기에너지가 기계적 에너지로, 기계적 에너지가 전기적 에너지로 변환되는 3단계를 과정을 거치게 된다. 본 논문에서는 파랑에너지가 공기에너지로 변환되는 과정을 수치해석을 이용하여 연구하였다.

파도의 상하 운동에 기인하여 공기실내 왕복 유동이 생성되고 이 공기의 흐름이 터빈을 돌려 발전을 하게 되는데, 그 과정 중 효율적인 공기실 및 덕트 설계를 위하여 공기실 및 덕트 내부의 왕복 유동장을 비정상 해석(Unsteady Analysis)하였다. 이와 관련된 내용을 문재승 등 (2005)에서 다룬바 있으나 지난 논문에서는 파도의 상하운동을 실제로 표현하지 않고 입구부에서 흐름을 정의하는 방식으로 계산을 수행하였고, 본 논문에서는 보다 실제적인 연구를 위하여 실제로 파의 상하운동을 고려한 경계조건을 사용하여 수치 계산을 수행하였다. 상용 CFD code인

FLUENT를 이용하여 파력발전장치 내부의 유동 해석을 수행하였으며, 공기실에서 덕트로 연결되는 연결부의 형상변화에 대한 영향도 살펴보고자 하였다. 추후 공기실 내의 유동은 급속소 되는 형상에서 오는 압축성에 대한 영향, 자유수면 문제 고려 등을 추가적으로 보완하여 해석을 수행할 계획이다.

2. 모형, 격자계 및 계산조건

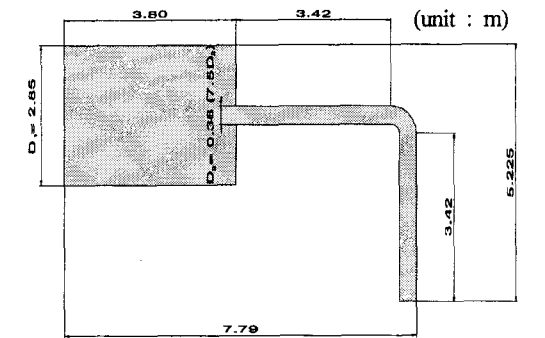
파력발전장치 공기실 내 왕복 유동장을 해석하기 위해서 터빈을 제외한 공기실 및 덕트의 형상을 설계하였다. 파도에너지가 공기에너지로 바뀌는 공기실 직경은 2.85m이며 터빈이 설치되는 덕트의 직경은 0.38m이다. 공기실과 덕트의 직경비(D_1/D_2)는 7.5로 급속소 되는 형상을 취하고 있으며, 급속소 후의 덕트는 굽은 형태인 Elbow-type을 기본형으로 하였으며 개략적인 치수는 Fig. 1과 같다. 또한 공기실에서 덕트로의 도입부의 형상 변화에 대한 영향을 살펴보기 위해서 Fig. 1 (b)와 같이 공기실과 덕트 연결부를 완만하게 처리하여 원뿔형태의 연결부를 두어 그에 대한 영향을 살펴보고 유동의 차이를 비교하여 보고자 하였다.

본 계산에는 유동해석용으로 한국해양대학교 측의 FLUENT 6.1.22를 사용하였으며, 격자생성에는 GAMBIT 2.1.6을 사용하였다. 격자는 공기실 및 덕트의 경우 형상이 비교적 단순할 뿐 아니라 벽에서의 효과를 잘 모사하기 위해 정렬격자를 사용하였으며, 국부적으로 비정렬격자를 혼용하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였으며 격자는 문재승 등 (2005)와 같다.

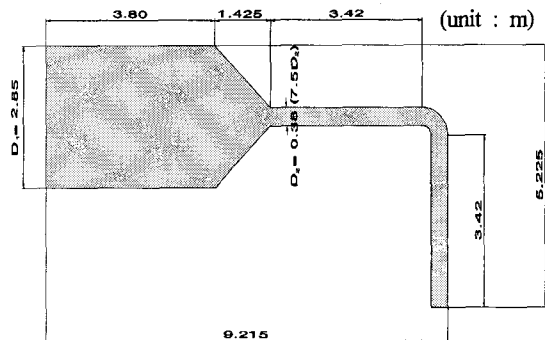
파도에 의한 왕복유동장을 모사하기 위해 FLUENT의 UDF (User Defined Function)를 사용하였으며, 상하로 진동하는 파도의 움직임을 표현하기 위해서 MDM (Moving & Deforming Mesh)를 사용하여 공기실 내의 왕복동 유동을 입구부의 Piston 운동으로 모사하였다.

문재승 등 (2005)에서는 파도의 상하 운동을 실제로 표현하지 않고 파도의 운동에 의한 흐름만을 입구부에 함수로 부여하는 형태로 연구를 수행하였는데, 이때 파가 공기실로 유입되는 흡입의 경우가 파가 유출되는 압축시보다 유량이 많아지는 현상 (Setoguchi et al., 2003)을 고려하지 못했고 파도의 움직임으로 인해 time step 마다 공기실의 검사체적이 바뀌는 것과 공기실과 파도에 의해 유동장이 단절되는 현상 등 이를 표현되지 못하는 것을 확인하여서 본 논문에서는 FLUENT에서 제공하는 MDM (Moving & Deforming Mesh)를 사용하여 실제로 입구부를 파의 움직임에 기인한 왕복운동으로 표현함으로써 위의 가정들을 최대한 고려하고자 하였다.

공기실로 유입되는 파의 특성은 실험역의 파와 같은 주기를 가지고 변화하는 왕복유동이나, 공기실 내의 파고는 공진 주기 등에서 증폭되는 등 다른 특성을 보인다. 본 논문에서는 유입파와 공기실 내의 파고가 같다고 가정한 경우와 공기실내 파고가 2배 증폭되는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 실험역에서 대략 파고 1.5m, 주기 4초를 기본 유입조건으로 하였다. 모형 축척비를 λ 라고 할 때, 파고의 축척비는 λ , 파주기의 축척비는 $\sqrt{\lambda}$ 가 되므로 이를 고려하여 입구조건을 부여하였다.



(a) Column-type



(b) Cone-type

Fig. 1 Air Chamber and Duct Geometry in 2-D Sense

3. 계산결과

파도의 상하운동을 입구부에 적용한 본 논문의 해석방법을 문재승 등 (2005)에 사용하였던 계산기법과 비교하여 보았다. 입구부를 고정하고 파의 움직임을 고려한 유동만 적용한 경우와, 공기실 내의 파고의 변화를 고려하여 파의 해수면에 해당하는 입구부를 벽면 처리하여 상하로 움직인 경우가 그것이다. 전자에서 고려하지 못한 흡입과 압축시 발생하는 유량차이 고려 등 보다 정확한 계산을 수행하기 위해서 후자의 경우 실제 파의 움직임을 그대로 모사하고자 하였다.

공기실로 유입되는 파의 파고와 주기는 각각 0.14m, 2초이고, 이때 Reynolds Number는 4.07×10^5 이다(여기서, 길이는 D_2 유속은 D_2 에서의 평균유속임). 주기가 진행되면서 유동의 발달 정도는 3주기가 지나면 수렴되어 안정된 흐름을 보이므로(문재승 등, 2005) 본 논문에서는 3주기째의 흐름을 살펴보았다. Fig. 2는 두 경우의 유량 변화를 보인 것인데 계산 결과 공기실 입구부를 실제 파와 같이 왕복운동하는 형태로 계산한 경우에서도 흡입과 압축시 유량 차이를 보이지 않았다. 흡입과 압축시 서로 유량차이를 보이는 것이 경계조건과 관련된 문제가 아니라 급속소 되는 형상에 기인하는 압축성 등의 문제, 그리고 공기실내의 자유수면과 단힌 형태의 유동장에서 오는 간섭 등에 원인이 있는 것으로 판단된다. 추후 계산시 이를 고려한 계산 기법 개발이 필요하리라 판단된다. 공기실내에서 파고가 두배로 증폭된다 가정한 경우의 계산 결과에서도 유량의 차이는 나타나지 않았다.

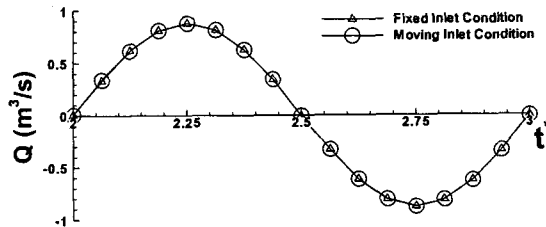
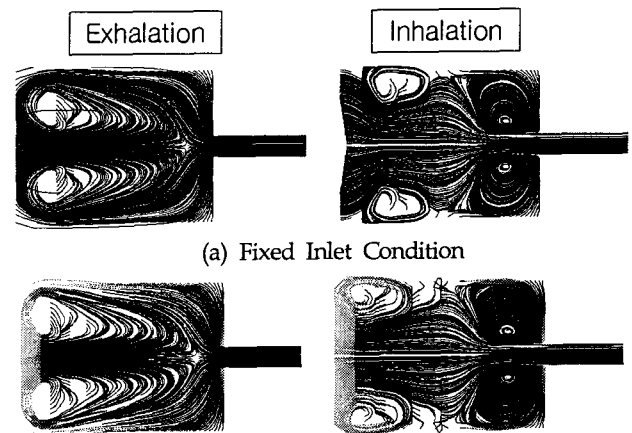


Fig. 2 Time Series data for Flow Rate at Air Chamber



(b) Moving Inlet Condition

Fig. 3 Flow Pathlines at Max Velocity as Boundary Condition

Fig. 3은 두 경우의 유적선을 보여주고 있는데, 유동 형태 역시 닮아 있는 것을 확인 할 수 있다. 공기실 내의 유동을 예측하고 보다 정확한 해석을 위해서는 보완 수정된 계산방법이 필요하겠으나 현 시점에서 공기실과 덕트의 연결부의 급축소된 연결부를 원뿔 형태로 부드럽게 처리하여 급격하게 꺾인 경우와의 차이를 밝혀보는 것도 공기실 및 덕트 유동 해석에 필요하다 판단하여 그에 대한 계산을 수행하였다. 계산 결과 원뿔형태의 연결부와 그렇지 않은 경우에서의 흡입, 압축 사이에 유량차는 역시 나타나지 않았지만 다소 다른 형태의 흐름을 보였다. Fig. 4는 Cone-type 공기실의 유적선을 흡입(Exhalation)부터 압축(Inhalation)까지 1주기에 대해서 보여주고 있는데 검사체적이 바뀌면서 유동이 변해가는 것을 볼 수 있다. 연결부가 부드러운 경우인 Cone-type에서 흡입시 공기실 입구 측에 위치한 와 형태의 유동이 공기실 중앙 부위로 옮겨왔고, 특히 흡입시 공기실과 덕트 연결 부에 위치한 와 형태의 유동의 크기가 줄어들어 왕복 유동이 보다 원활하게 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 원뿔 형태의 경우에 공기실 내에 압력이 다소 낮은 것도 확인할 수 있었다. 공기실과 덕트의 단면적 변화와 함께 공기실과 덕트 연결부의 세심한 처리는 파랑에너지를 흡수하는 공기실 효율에 밀접한 연관이 있다고 판단된다.

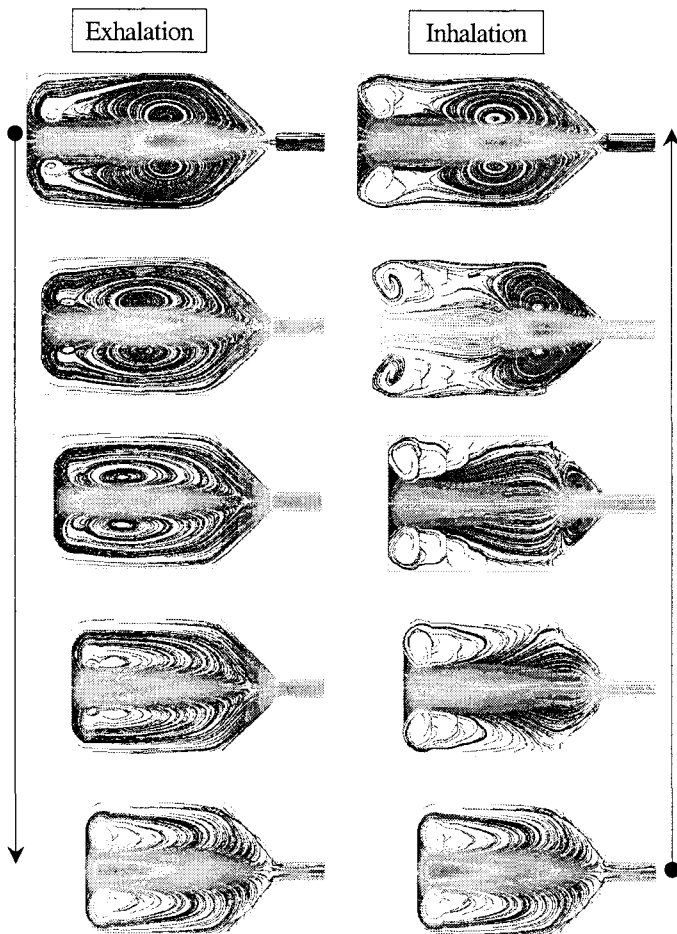
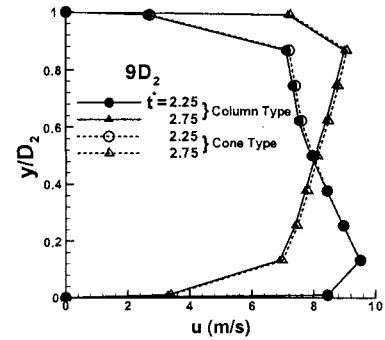
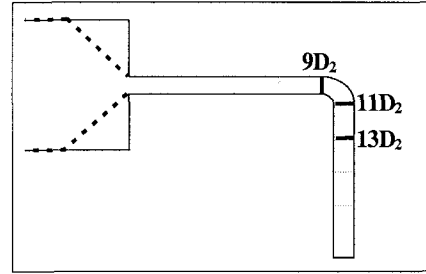
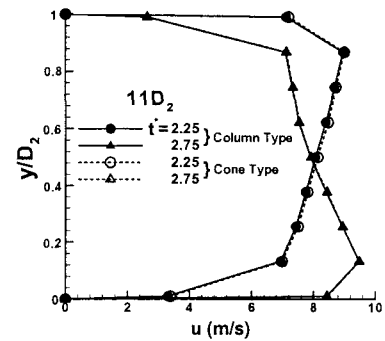


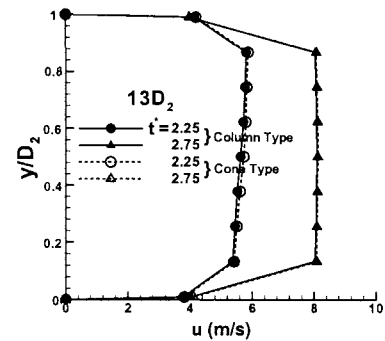
Fig. 4 Flow Pathlines at Cone-type Air Chamber



(a) 9D₂



(b) 11D₂



(c) 13D₂

Fig. 5 Velocity Profile as Air Chamber Type

Fig. 5는 공기실을 지나 터빈이 설치될 지점인 덕트에서의 속도장을 보여주고 있다. 공기실과 덕트 연결부가 직각인 경우와 부드러운 경우에 대해서 비교하여 보았는데, 공기실에서는 Fig. 4에서처럼 유동의 차이가 다소 있었으나 덕트에서는 거의 같은 유동을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 언

파력발전장치 공기실 및 덕트 내부 유동 해석을 위해서 공기 실로부터 유입되는 왕복동 흐름이 덕트를 거쳐 출구로 빠져나가는 과정에 대해서 비정상 해석을 수행하였다. 실제로는 덕트에 터빈이 설치되어 있기 때문에 터빈까지 포함해서 해석하여야 하지만, 터빈의 영향은 배제하고 공기실 및 덕트의 내부유동에 대해서 비정상 해석하였다.

(1) 문재승 등 (2005)에서 사용하였던 파력발전용 공기실 및 덕트 내부유동 해석 계산기법에서 경계조건 등을 보완하여 실제로 파의 해수면에 해당되는 공기실 입구부를 상하 운동하게 하여 계산하고 지난 결과와 비교하였는데 큰 차이를 보이지 않았다. 흡입과 압축시의 유량이 달라지는 등의 현상(Setoguchi et al., 2003)을 밝혀내지 못했는데 이는 급축소 되는 형상에 기인하는 압축성 등의 문제, 그리고 공기실내의 자유수면과 닫힌 형태의 유동장에서 오는 간섭 등에 기인한 것으로 판단되며 보다 정확한 계산을 위해서는 이를 고려한 수정 보완된 계산기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이번 연구를 통한 경계조건 등의 변화에서 오는 이점은 파의 상하운동으로 인하여 발생하는 검사체적의 변화를 고려하는 정도였으며 그 영향은 그리 크지 않았다.

(2) 공기실과 덕트의 연결부 형상에 의한 영향을 확인하여 보았다. 연결부가 급격하게 직각으로 꺾인 Column-type과 Cone-type으로 연결부가 부드럽게 꺾인 형상에 대한 비교를 수행하였는데, 공기실에서의 유동은 Cone-type에서 비교적 매끈한 흐름을 보여주었고, 터빈이 설치되는 덕트에서는 서로 거의 같은 유동을 보여주었다. 연결부 형상 역시 공기실의 파 흡수효율 등 성능에 영향을 미칠 중요한 변수로 판단되므로 추후 수정 보완된 계산기법으로의 재검토가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 지원으로 수행된 "파력에너지 실용화 기술 개발" 및 한국해양연구원의 기본연구(PE0115A)의 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 문재승, 현범수, 홍기용, 홍석원 (2005). "OWC형 파력발전 장치의 공기실 및 덕트 내부유동해석", 한국해양공학회 2005년 추계학술대회 논문집, pp 219-224.
- 홍기용 (2005). "파력에너지 실용화 기술개발", 한국해양연구원 연구 보고서.
- 홍석원 (2003). "한.인도 해양에너지 공동연구사업", 한국해양연구원 연구보고서.
- Boughamoura, A., Hafedh Belmabrouk, Sassi Ben Nasrallah (2003). "Numerical Study of a Piston-driven Laminar Flow and Heat Transfer in a Pipe with a Sudden Expansion", International Journal of Thermal Sciences 42, pp 591-604.
- Mizushima, J., and Y. Shoitani (2001), "Transitions and Instabilities of Flow in a Symmetric Channel with a Suddenly Expanded and Contracted Part", Journal of Fluid Mech. Vol 434, pp 355-369.
- Hyun, B.-S., J.-S. Moon, S.W. Hong and Y.Y. Lee (2004). "Practical Numerical Analysis of Impulse Turbine for OWC-type Wave Energy Conversion Using Commercial CFD code", Proc. 14th ISOPE, Toulon, France, Vol 1, pp 253-259.
- Setoguchi, T., S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao and K. Kaneko (2001). "A Review of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion", Renewable Energy, Vol 23, pp 261-292.
- Setoguchi, T., Tae-Ho Kim, Kenji Kaneko, Manabu Takao, Yeon-Won Lee and Masahiro Inoue (2003). "Air Turbine with Staggered Blades for Wave Power Conversion", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 13, No. 4, pp 316-320.

2000년 0월 0일 원고 접수

2000년 0월 0일 최종 수정본 채택