

OWC형 파력발전장치 공기실 형상에 따른 왕복유동장 해석

† 문재승* · 홍기용* · 신승호* · 현범수** · 류황진* · 박순종***

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소, **한국해양대학교 해양시스템공학부 교수, ***충남대학교 기계공학과

Oscillating Flow Field Analysis as Shape of Air Chamber in OWC-type Wave Energy Conversion

† Jae-Seung Moon* · Key-Yong Hong* · Seung-Ho Shin* · Beom-Soo Hyun**

· Hwang-Jin Ryu* · Soon-Jong Park***

*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon 305-343, Korea

**Division of Ocean Systems Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

***Division of Mechanics Engineering, National Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

요 약 : 파력발전장치 중 진동수주 (Oscillating Water Column) 형은 3단계 에너지 변환과정을 거치게 된다. 그 중 파랑에너지를 공기에너지로 변환하는 장치인 공기실의 형상을 바꿔가며 그에 따른 성능을 상용 CFD 코드인 FLUENT를 이용한 수치 해석 기법으로 연구하여 보았다. 통상 OWC형 파력발전장치는 공기실과, 터빈이 설치되는 덕트 간에 효율적인 이유로 급축소 형태를 취하고 있는데 이 때 공기실과 터빈 연결부의 형상이 파력발전 장치 전체 성능에 중요한 영향을 미치므로 공기실내의 압력을 최소화하고 터빈 유입유속의 가속화가 용이한 가장 적합한 형상을 정상 및 비정상 해석을 통하여 찾고자 하였다.

핵심용어 : 파력발전, 왕복유동, 공기실 형상, 수치해석, 정상해석, 비정상해석

Abstract : An OWC-type Wave Energy Conversion passes through 3 steps energy conversion process. This paper deal with the internal oscillating flow and effect of shape of air chamber and duct at setting place of turbine by numerical analysis using commercial CFD code, FLUENT. Air chamber and duct in OWC-type wave energy conversion are adopting sudden expanded and contracted form for high-efficiency. So, whole oscillating flow from OWC-type chamber to outlet duct through duct was solved by steady and unsteady analysis in order that flow efficiency of air chamber and duct was made better.

Key words : Wave energy conversion, Oscillating flow, Shape of air chamber, Numerical analysis, Steady analysis, Unsteady analysis

1. 서 론

인류 발전과 더불어 필연적으로 제기되는 화석에너지 고갈과 환경오염 등의 문제로 인하여 전 세계적으로 자연 청정에너지에 대한 관심은 갈수록 높아지고 있다. 또한 유가 상승 등으로 인하여 국내에서도 대체에너지에 대한 관심이 고조되고 있는데 이와 관련하여 풍부한 해양자원을 기반으로 한 파력발전에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다 (홍, 2005). 파력발전 방식 중 진동수주 (Oscillating Water Column, 이하 OWC) 방식은 파랑에너지를 우리가 필요로 하는 전기적 에너지로 변환하기 위해 3단계 변환과정을 거치는데 본 논문에서는 파랑 에너지를 공기 에너지로 변환시키는 역할을 하는 공기실에 대한 초기설계 단계의 연구를 수행하였다. 그 일환으로 공기실 형

상이 파력발전장치 전체적인 성능에 미치는 영향을 살피고자 하였다. 파력발전 최적지 선정을 위한 사전 연구 결과를 바탕으로 (류 등, 2006) 최적지로 선정된 실해역 데이터의 평균 파랑조건을 산정하여 유입조건으로 활용하였으며 상용 Computational Fluid Dynamics(이하 CFD) 코드인 FLUENT를 이용한 수치해석적 기법을 통하여 정성적으로 접근하였다.

파의 상하 운동에 기인하여 공기실 내 왕복유동이 생성되게 되고 이때 발생한 공기의 흐름이 덕트 부에 설치된 터빈을 돌려 발전을 하게 되는데 본 논문에서는 터빈을 배제한 공기실에서부터 덕트의 출구에 이르는 파력발전장치 전체의 유동장을 해석하고자 하였다. 공기실과 덕트 내부 유동장을 정상 해석(Steady Analysis)하여 공기실 형상에 따른 그의 영향을 정성적으로 살폈고, 유입파에 의해 공기실 내부에 발생하는 왕

† 교신저자 : 문재승(정회원), jsmoon@moeri.re.kr 042)868-7586

* 종신회원, kyhong@moeri.re.kr 042)868-7511

* 종신회원, shinsh@moeri.re.kr 042)868-7584

** bshyun@hhu.ac.kr 051)410-4308

** ryu6310@moeri.re.kr 042)868-7502

*** winner-park@hanmail.net 042)821-7697

복 유동장에 의한 비정상성(Unsteadiness) 영향을 파악하기 위해 비정상 해석(Unsteady Analysis) 하였다. 실제 공기실 내의 유동은 외해 파랑조건과, 공기실의 파랑 흡수효율과 연관된 파라미터(공기실의 폭, 공기실과 덕트의 직경비 등)에 의해 공기실 내의 파고 변화의 형태로 나타나게 되지만 본 연구에서는 공기실 입사파면에서의 유동을 Sinusoidal하게 강제로 운동시켜 형상 등의 변화에서 오는 영향을 간접적으로 살펴보고자 하였다. 추후 급축소 되는 형상에서 오는 압축성의 영향 고려, 공기실내 자유수면 효과를 고려한 다상유동 계산 등을 추가 보완하여 해석을 수행할 계획이다. 초기 설계 단계에서의 공기실 형상에 대한 다각적인 검토가 이루어지고 나면 설치해역의 계절별 파랑차에 대한 추가적인 검토가 필요하리라 판단된다.

2. 모형, 격자계 및 계산조건

파력발전장치 공기실 형상에 따른 공기실 및 덕트의 왕복 유동장 해석을 위해 터빈을 제외한 공기실 및 덕트 형상 설계를 하였다. 본 연구의 대상은 2010년도에 실해역에 설치를 계획 중인 500kW급 연안 고정식 OWC형 파력발전 장치로, 수치계산을 위해서 수면 상부구조만을 개념설계하였다. 직육면체 형상의 공기실은 침수표면적이 12×6m이며 수면 상부 높이가 4.5m이고, 공기실 위로 직경 1.5m, 높이 10m의 실린더형상의 덕트가 접해 있는 Rectangular-type을 기본 형상으로 채택하였다. 본 연구의 주목적인 공기실에서 덕트로의 도입부의 형상변화에 대한 영향을 살펴기 위해 공기실과 덕트의 연결부를 원뿔 형태로 증계하여 공기실의 절반만 덕트부와 연결한 Semi Cone-type과 상부를 완전히 연결한 Cone-type 등 3가지에 대해서 수치해석을 통한 유동해석 등으로 성능 비교를 하여 보았다. 모형 축척비 λ 가 1/22.85714(Froude 상사)인 축소된 모형에 대한 계산을 수행하였으며, 수면 하부는 계산영역에 포함시키지 않고 수면을 입구조건으로 부여하여 계산을 수행하였다. 3가지 형상에 대한 정면도가 Fig. 1에 보여지고 있는데, 그림의 좌측이 수면에 해당되는 입구부이다.

본 연구에서는 유동해석용으로 FLUENT 6.1.22를 사용하였고 격자생성은 FLUENT Package인 GAMBIT 2.1.6을 사용하였다. Fig. 2에서 Semi Cone-type에 적용한 격자 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바에 같이 정밀한 해를 얻기 위해 파도에 의해 발생한 공기의 흐름 방향(왼쪽 그림 좌우측으로 주된 유동 발생)으로 정렬 형태를 띠는 Cooper-mesh를 사용하였으며, 유동의 변화가 예상되는 부분에서는 격자를 보다 조밀하게 생성하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ realizable 모델을 사용하였으며, 자세한 내용은 문 등 (2005)과 같다.

외해에서 유입된 파도의 흐름으로 인해 공기실내에서 상하로 진동하는 파고의 변화를 모사하기 위하여 FLUENT의 MDM (Moving & Deforming Mesh)을 사용하여 공기실 내의 왕복동 유동을 입구부의 Piston 운동으로 모사하였다. 실제 공기실 내부 유동은 외부 파랑조건과, 공기실의 파랑 흡수효율

과 관련된 파라미터들에 의해 공기실 내의 파고의 변화 형태로 나타나는 유동이므로 보다 실제적인 계산을 위해서는 공기실 유입 파랑 조건에 의한 공기실 내부 파고 변화를 고려할 수 있도록 수정 보완된 계산 기법이 필요하리라 생각된다.

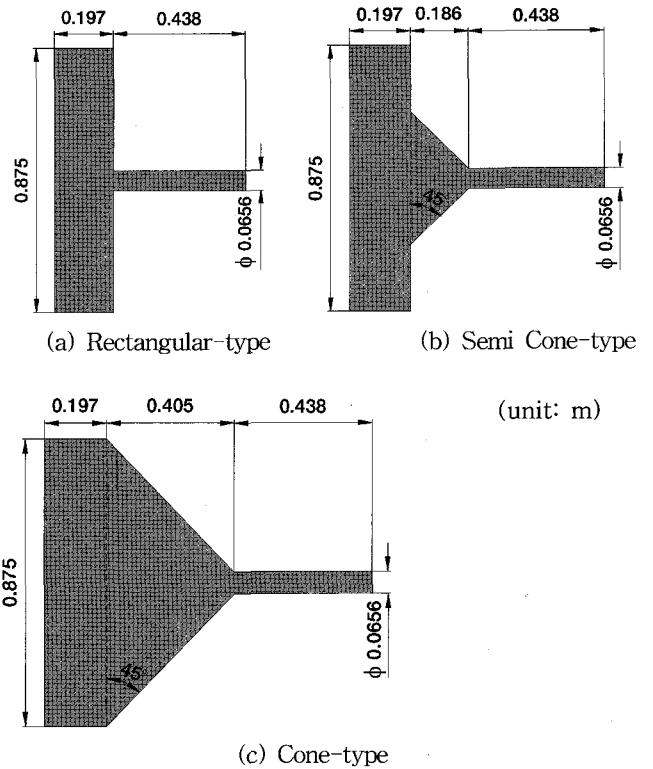


Fig. 1 Geometry of Air Chamber & Duct in 2-D Sense

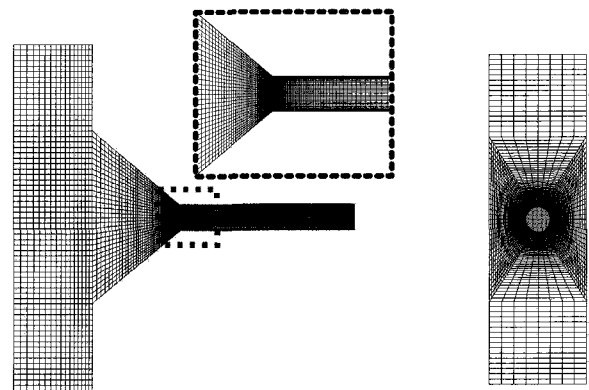


Fig. 2 Grid of Semi Cone-type Air Chamber.

3. 계산 결과

3.1 정상 해석

공기실 형상에 따른 공기실 내부 유동 및 파력발전장치의 성능 해석을 위해서 Fig. 1의 3가지 형태에 대한 정상 해석을 실시하였다. 외해에서 유입되는 파에 대한 공기실의 파랑 흡수 효율은 공기실 내 수위의 고저로 판단되게 되는데, 본 정상

해석을 이용한 연구 기법에서는 그 수위가 변화하는 부분에 해당되는 입구부에 걸리는 힘을 비교함으로써 공기실 수위 변화를 간접적으로 예측하고자 하였다. 즉 공기실 입구부에 힘이 많이 받으면 공기실의 수위가 낮아질 것이라 예상하였다. 500kW급 파력발전장치가 설치될 예정지에서 예측된 파랑자료를 바탕으로 하여 실험역의 평균 파랑조건과 극한 파랑조건이라 예상되는 경우의 해석을 수행하였는데, 이때 공기실 입구에서의 경계조건은 두 경우 각각의 공기실 유입 평균 유속을 채택하여 계산을 수행하였다. 공기실 내로 유입되는 파의 특성은 실험역의 파와 같은 주기를 가지고 변화하는 왕복운동이고, 공기실 내의 파고는 파랑 에너지 흡수 효율에 따라 공진 주기 등에서 증폭되는 등 다른 특성을 보이지만 본 논문에서는 유입파와 공기실내 파고가 같다고 가정할 경우에 대해서 형상별로 비교 계산해 보았다. Fig. 3은 실험역에서 평균 파고 조건인 파고 1m, 주기 5초인 경우와 극한 파랑 조건인 파고 7.2m, 주기 7초 때의 결과이다 (여기서, 파고의 축척비는 λ 이고 파주기의 축척비는 $\sqrt{\lambda}$ 임). 예상한 것과 같이 두 경우 모두 Rectangular-type의 경우에서 공기실 입구부에 가장 큰 힘이 걸리는 것을 확인할 수 있었으며 이로 미루어 짐작컨대 이때 공기실 내의 수위가 동 조건에서 3가지 형상 중 Rectangular-type이 가장 낮은 것을 예상할 수 있었다. 여기서 F^* 는 $F/0.5\rho_a V^2 S$ (V 는 각 경우에 공기실에서의 평균 유속이고, S 는 공기실 입구의 단면적)으로 무차원된 힘이다. 보다 정밀한 계산이 필요하겠지만 정상 해석으로도 공기실 형상의 성능 비교를 간접적으로 할 수 있었다.

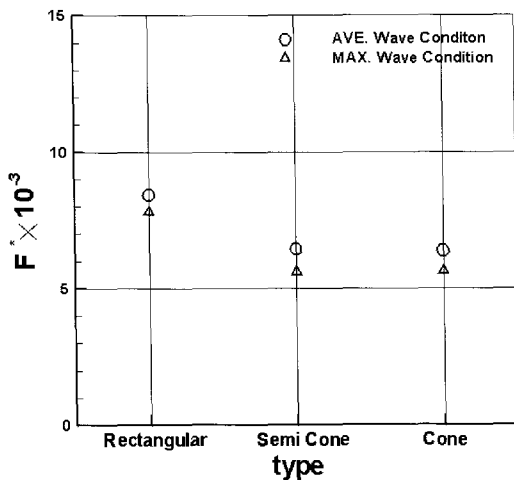


Fig. 3 Force at Inlet in Various Wave Condition.

3.2 비정상 해석

공기실 및 덕트 내부 유동과 공기실 형상에 따른 성능 해석 시 시간에 대한 영향 등 비정상성에 대해 검토하고자 비정상 해석을 수행하였다. 정상 해석과 마찬가지로 Fig. 1의 3가지 형상의 공기실에 대하여 비정상 해석을 수행하였는데 Time Step Size(ΔT)를 $T/100$ 로 하였으며, 주기가 진행되면서 유

동 발달정도를 살핀 결과 5주기 이상 진행된 후부터 수렴되는 경향을 보여주었다. 주기내 수렴의 특징으로는 파정에서 수렴성이 상대적으로 좋았으며 외력이 가해지지 않는 구간, 즉 유속의 방향이 바뀌는 구간에서 수렴이 지연되는 등 Sinusoidal한 유속의 크기와 수렴성이 반비례하는 경향을 확인할 수 있었다(문 등, 2005). Fig. 4는 주기가 진행되면서 주기별로 공기실 입구에 걸리는 힘의 변화 과정을 각 형상별로 보여주고 있는데, 이를 통해 주기가 지남에 따른 수렴과정을 확인할 수 있다. 여기서 t^* 는 시간을 유입파의 주기로 무차원한 값으로 t^* 가 3.25인 위상은 3주기와 1/4주기가 지난 시점을 의미한다.

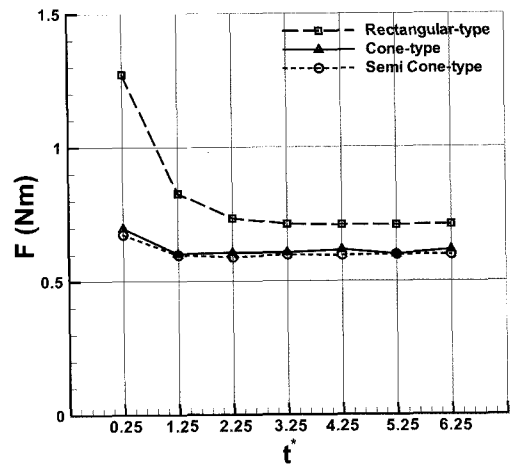
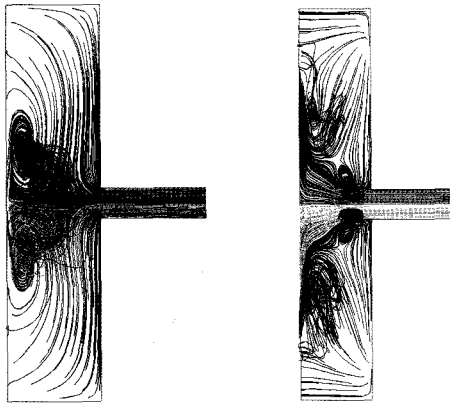


Fig. 4 Force Variation at Inlet of Air Chamber per Period

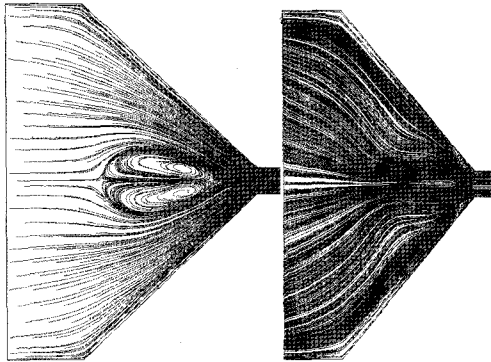
공기실 형상별 유동 해석을 위해 각 형상별로 6주기 짝의 파정과 파저에서의 유적선을 Fig. 5에서 관찰하여 보았다. 예상대로 Rectangular-type의 공기실 내부 유동은 매우 불안정한 형태로 나타났으며 Semi Cone-type과 Cone-type은 비교적 매끈한 유동 흐름을 보여주고 있다. 또한 공기실과 덕트를 매끄럽게 연결하는 부분이 넓어질수록 공기실 내 발생하였던 와(eddy)의 크기가 줄어들었고, 덕트 쪽으로 옮겨간 것을 확인할 수 있었는데 이를 통해 덕트로의 유입이 Cone-type으로 갈수록 보다 원활해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 공기실 및 덕트의 흐름방향으로 수직인 두 단면의 유동 패턴을 비교한 결과 Rectangular-type의 경우에서 비대칭성을 띠는 등의 3차원성 효과에서 기인된 비정상성이 큰 유동 패턴을 보였다. 급속소되는 형상을 취하고 있고, 원형실린더 타입 덕트 형상과 세장비 2:1의 길쭉한 직사각형 형상을 취하고 있는 공기실 형상에서 오는 유동적인 관점에서의 비효율적인 형상 또한 본 구조의 원활치 못한 흐름을 야기하는 한가지 원인이 되리라 판단된다. 이는 서두에서 언급한 2010년에 실험역 설치를 계획 중인 500kW급 파력발전장치가 연안 고정식이며, 방파제 역할까지 고려된 설계 형상이기 때문인데 지금과 같은 형상을 피할 수 없으므로 공기실과 덕트의 연결부를 매끄럽게 하는 등의 공기실의 형상에 대한 연구가 추가적으로 더 필요할 것으로 판단되며 공기실 및 덕트시스템의 종합적인 성능 검증이 파력발전 성능 향상에 매우 중요하리라 판단된다.

<<Exhalation>>

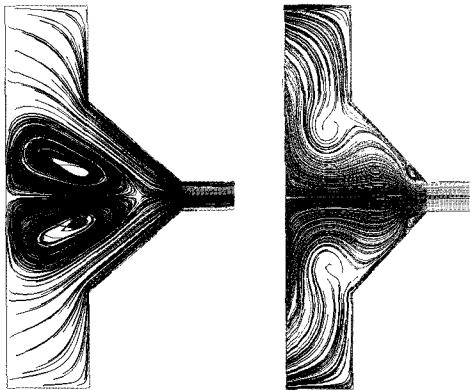
<<Inhalation>>



(a) Rectangular-type



(b) Cone-type



(c) Semi Cone-type

Fig. 5 Flow Pathlines at Max Velocity as Shape of Air Chamber & Duct.

앞서 정상 해석을 통해 밝혔던 공기실 입구부에 걸리는 힘의 비교를 공기실 수위 변화에 시간적인 영향 등의 비정상성(Unsteadiness)을 고려한 비정상 해석을 통해서 확인하여 보았다. 6주기가 지나는 시점이면 충분히 발달된 유동의 형태를 띠므로 Fig. 6은 6주기 한주기 동안 공기실 입구부에 걸리는 압력을 각각의 형상에 대해서 확인하여 보았다. Fig. 4에서와 같이 특정 시간(파정 등)에서는 형상별로 입구부에 걸리는 힘의 차이가 관찰되었으나 전체적으로는 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 특이한 점은 공기실 입구부에 걸리는

압력 분포의 위상이 다소 지연된 것을 관찰할 수 있었다. 공기실 내의 비교적 복잡한 흐름에서 기인된 것으로 판단된다.

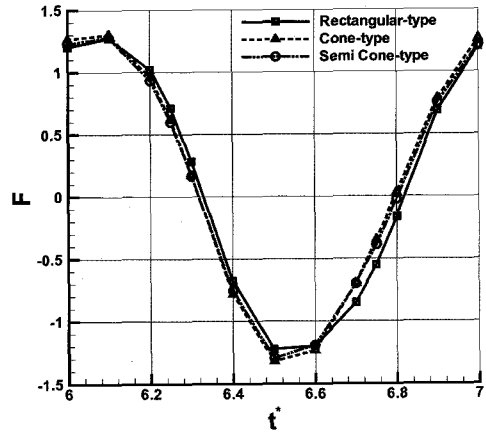
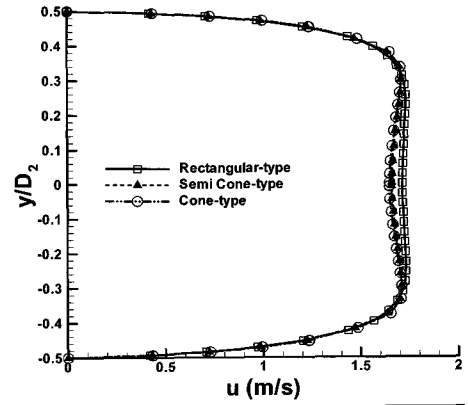
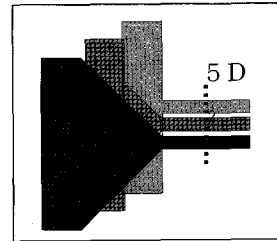
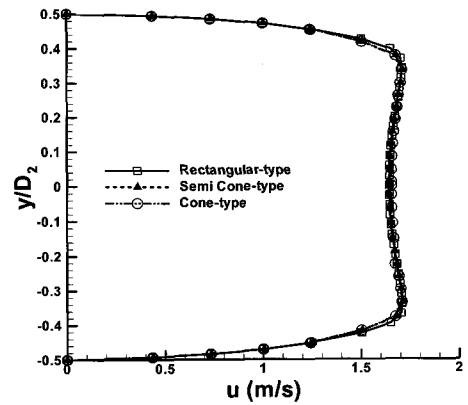


Fig. 6 Force at inlet of Air Chamber in 6th Period.



(a) t*=6.25



(b) t*=6.75

Fig. 7 Velocity Profile at 5D₂ in Duct

복잡한 공기실 내의 유동 패턴과는 달리 터빈이 설치되는 구간인 덕트 내의 유동은 안정된 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 보다 자세한 덕트 내의 유동 패턴을 관찰하기 위해 파장과 파제에서의 흐름 방향 덕트 중앙 부분에서 속도 분포를 Fig. 7에서 확인하여 보았다. 본 계산 조건에서 유량을 Sinusoidal하게 강제로 가하였기 때문에 각각의 위상에서 유량이 같은 결과를 보였다. 이것 때문에 덕트에서의 유속의 크기는 동 위상에서 거의 같게 관찰되었다. 공기실의 형상이 덕트 내부 유동에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 이상적이지 못한 공기실 형상을 취하게 되면 동 유입조건 대비 덕트 내부로 유입되는 유량 자체가 작아지게 되어 발전량 손실의 결과를 초래하게 되는데, 이것이 덕트 및 터빈 관점에서의 공기실 형상에 따른 영향이라 할 수 있겠다.

4. 결 론

파력발전장치 공기실 및 덕트 내부 유동 해석을 위해서 공기실로부터 유입되는 왕복동 흐름이 덕트를 거쳐 출구로 빠져나가는 전 과정을 수치 해석적 기법으로 연구하였다. 실제 파력발전장치는 터빈이 필수적이므로 터빈을 포함한 유동 해석이 이루어져야 하나, 계산의 효율성 및 사전 연구를 통하여 간접적인 고려에 대한 타당성이 충분히 확보되었다고 판단되어 본 연구에서는 터빈의 영향은 배제하고 공기실 및 덕트 내부의 왕복 유동에 대해 정상 해석 및 비정상 해석을 하였다.

1) 파력발전시스템이 설치될 실해역의 파랑조건을 기반으로 한 평균 파랑 조건과 극한 파랑 조건에서의 정상 해석을 수행하였다. 공기실 형상 변화에 따른 공기실 입구부에 걸리는 힘의 차이를 비교함으로써 공기실 형상의 영향을 살폈는데, Rectangular-type보다 공기실과 덕트의 연결부를 매끄럽게 처리한 Cone-type 및 Semi Cone-type의 경우에 입구부의 힘이 약 10% 덜 걸리는 등 보다 좋은 성능을 보였다. 그 결과 정상 해석만으로 충분히 정성적인 해석을 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2) 공기실 및 덕트 내부유동의 비정상성을 확인하기 위해서 동 조건에서 비정상 해석을 수행하였다. 그 결과 공기실 형상에 따른 입구부의 압력 차이는 파장 등의 특정시간에는 두드러지게 관찰되었으나 전체적으로는 정상 해석 대비 다소 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Rectangular-type의 경우에는 흐름과 수직한 단면에서 다소 상이한 유동 패턴을 보여서 Cone-type 등에 비해 다소 비정상성이 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 비교적 복잡한 유동 패턴을 보이는 공기실 대비 덕트는 매끈한 유동 현상을 보였으며 공기실 형상의 영향도 거의 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3) 실제 공기실 내부 유동은 외해 파랑조건이나 공기실의 파랑 흡수효율과 연관이 깊은 파라미터(공기실 폭이나 공기실과 덕트의 직경비 등)에 의해 공기실 파고 변화의 형태로 나타나는 유동이므로 보다 정확한 계산을 위해서는 이러한 공기실 수위 변화를 고려할 수 있는 보완된 계산 기법이 필요하다

고 판단되며 뿐만 아니라 급속소된 형상에서 오는 압축성 영향을 고려한 계산과 공기실 내 자유수면 효과를 고려한 다상 유동 해석 등이 필요하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 “파력발전 실용화 기술개발”과 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 수행하는 기본연구사업(PE0115A)의 일부로서 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 류황진 (2006). “수치파랑모델을 이용한 파력발전 적지 선정 대한 연구”, 박사학위논문.
- [2] 문재승, 현범수, 홍기용, 홍석원 (2005). “OWC형 파력발전 장치의 공기실 및 덕트 내부유동해석”, 한국해양공학회 2005년 추계학술대회 논문집, pp. 219-224.
- [3] 문재승, 현범수, 홍기용, 신승호, 김길원 (2006). “파력발전 장치 공기실 내 왕복유동장 해석”. 한국해양공학회 2006년 추계학술대회 논문집, pp. 427-430.
- [4] 홍기용 (2005). “파력에너지 실용화 기술개발”, 한국해양연구원 보고서.
- [5] 홍석원 (2003). “한.인도 해양에너지 공동연구사업”, 한국해양연구원 보고서.
- [6] 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.
- [6] Mizushima, J., and Shoitani, Y. (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.
- [7] Setoguchi, T., Kim, T. H., Kenji Kaneko, Manabu Takao, Lee, Y. W. and Masashiro 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.

원고접수일 : 2006년 12월 28일

원고채택일 : 2007년 2월 21일