



[2016-3-OE-003]

일점 계류식 조류발전 덕트의 디퓨저 각도 변화에 따른 내부 유동 분석

조철희¹⁾ · 이강희¹⁾ · 황수진¹⁾ · 구찬회^{2)*}

Flow Characteristics inside the Duct with Various Diffuser Angles for the Single Point Moored TCP System

Chul H. Jo¹⁾ · Kanghee Lee¹⁾ · Sujin Hwang¹⁾ · Chanhoe Goo^{2)*}

Received 13 August 2015 Revised 18 March 2016 Accepted 21 March 2016

ABSTRACT With many countries implementing carbon dioxide reducing policy recently, the demand of green energy has been increased. Tidal current power, one of the ocean energy resources, has great potential worldwide due to its high energy density. Since the kinetic energy of the flow at the upstream is proportional to the cube of the velocity, the flow speed is the most critical factor for power generation affecting on the performance of the system. A duct system can accelerate the flow velocity, which could expand the applicable area of TCP systems to relatively lower velocity sites. The shapes of the inlet and outlet could affect the flow rate inside the duct. To investigate the performance of the duct, variable ducts were preliminary designed and a series of simulations were carried out using ANSYS-CFX v13.0 CFD software. This study introduces a ducted turbine system that can be moored to a seabed. A performance estimation and comparison of results with conventional tidal converters were summarized in this paper.

Key words Tidal current Power(조류발전), Duct(덕트), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Horizontal axis turbine(수평축터빈), Renewable energy(신재생에너지)

Nomenclature

 D : duct diameter, m D_i : duct inner diameter, m D_o : duct outer diameter, m L : duct length, m ϕ : duct shape angle, ° ϕ_1 : duct nozzle angle, ° ϕ_2 : duct diffuser angle, °

subscrip

CFD : computational fluid dynamics

SST : sheer stress transport

1. 서론

조류발전은 전 세계적으로 부존량이 높은 에너지원으로써 관심과 이목이 집중되고 있는 해양 에너지이다. 조류에너지는 예측이 가능하여 관리 및 에너지 생산 계획 수립이

1) Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University

2) Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University E-mail: chanhoegoo@inha.edu
Tel: +82-32-860-8849 Fax: +82-32-864-5850

용이함으로써 신뢰성이 높다. 세계 각지에서 조류발전에 관련된 많은 연구들이 진행되고 있으며 현재 상용화를 앞두고 있다.

유체가 가지는 에너지는 속도의 제곱에 비례하므로 유속은 조류발전 시스템에서 매우 중요한 요소이다. 더불어 최근 덕트를 적용한 조류발전 시스템에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 조철희 등은 덕트를 적용한 수평축 조류 터빈에 대한 실험을 수행하였으며^[1], Khunthongjan 등은 디퓨저의 각도에 따른 조류 터빈의 덕트 성능에 대한 연구를 진행하였다.^[2] 김종원 등은 전산유체역학 해석을 통해 유입구 형상에 따른 쉬라우드 내부의 유동 변화를 연구하였으며,^[3] Luquet 등은 조류 터빈 주변에 수중익형 단면을 적용한 덕트 시스템 연구를 진행하였다.^[4] 또한 Domenico P. Coiro 등은 수중 부유식 조류발전 장치에 적용할 수 있는 diffuser에 대한 연구를 수행하였다.^[5]

일반적으로 조류발전 시스템은 1m/s 이상의 유속이 존재하는 지역에 적용하는 것을 권장하고 있는데, 주로 강한 유속이 존재하는 좁은 수로 지역이나, 조수 간만의 차가 커 조류속이 빠른 지역에 적합하다. 덕트 시스템은 상류의 유속을 증폭시킴으로서 낮은 유속의 지역에도 조류발전 시스템을 설치할 수 있어, 조류발전 적용범위를 넓힐 수 있다. 1m/s 이하의 상대적으로 낮은 유속이 분포하는 지역 또는 유향이 일정한 발전소의 방수로에 덕트 시스템이 유리하다.

조류발전 시스템은 실제 설치 해역의 환경 조건과 전체적인 시스템을 모두 고려하여 설계되어야 하므로 실 해역 환경에 맞는 다양한 덕트 형상이 연구되고 있다. 본 연구에서는 일점 계류식 조류발전 시스템에 적용 가능한 3 가지 덕트 구조물의 기본설계를 수행하고, CFD 해석을 통해 유동 패턴을 분석하고, 실험용 덕트 모델을 이용하여 CFD의 신뢰도를 평가하였으며 3 가지 덕트 모델 중 성능이 우수한 1 가지 덕트 형상에 대해 디퓨저 각도에 따른 유속 증폭에 관한 연구를 진행하였다.

2. 개념 설계

조류발전 시스템의 제작비용 절감과 시공 및 회수의 용이성을 위하여 일점 계류 시스템을 적용할 수 있다. 덕트 구조

물을 적용한 일점 계류 조류발전 시스템은 상대적으로 유속이 낮은 발전소의 방수로와 같은 지역에 설치하여 전기를 생산할 수 있다. Fig. 1에 보이는 것과 같이 이 시스템은 부력과 계류를 이용한 시스템으로서, 덕트 구조물은 자세 유지를 위한 밸러스트 탱크 공간과 부력 확보를 위해 특정 배수 체적을 고려하여 설계 되어야 한다. 따라서 일점 계류 시스템에서 덕트 구조물은 전체 시스템의 개념을 고려한 설계가 필수적이다.

3. 덕트 기본 설계 및 형상 검증

김종원 등의 덕트 형상연구 결과를 참고하여 덕트 시스템의 유입구와 유출구의 각도를 결정하고, Fig. 2와 같이 3 가지 형상의 덕트 형상을 설계하였다.^[3]

3 가지 형상의 덕트는 길이는 같지만 유입구와 유출구의 형상을 다르게 설계하였다. 유입구 부분만 열린 형태의 노즐 타입과 유출구 부분만 열린 디퓨저 타입, 유입구와 유출

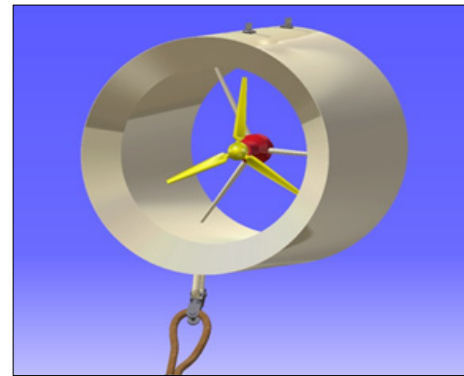


Fig. 1. 일점 계류식 조류발전 시스템

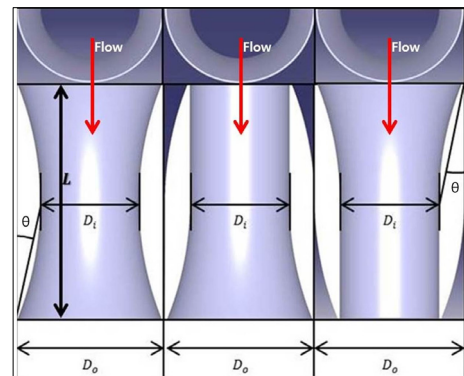


Fig. 2. 3 가지 덕트 형상 기본 설계

Table 1. 기본 설계 덕트 제원

Description	Specification
D_i	0.23 m
D_o	0.35 m
L	0.55 m
θ	10.9°

구 모두 열린 노즐-디퓨저 타입의 유속 증폭에 대한 성능 비교 목적으로 연구를 시작하였다.

덕트 시스템의 내경은 실험을 통한 CFD 해석 검증을 고려하여 실험 스케일인 0.23m로 결정 되었고, 내경과 외경의 비는 1:1.5로 동일하게 설계 하였으며 설계된 모델의 치수를 Table 1에 표기하였다.

3.1 기본 설계된 덕트의 CFD 해석

기본 설계된 3 가지 덕트 형상에 대해 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX 13.0v를 사용하여 유동 패턴을 분석하였다. 실험 결과와의 비교 검증을 위하여 인하대학교의 회류수조의 경계조건과 동일한 해석 조건을 적용하였다. 모든 해석은 같은 크기의 외부 도메인을 사용하였으며, Fig. 3과 같이 덕트의 형상에 따라 내부 도메인의 차이가 존재한다.

격자 구성의 신뢰도를 높이기 위해 벽면에 인접한 부분의 격자를 조밀하게 구성하여 해석의 정확성을 확보하였다. 해석 시 전단 응력 수송(SST)모델을 사용하여 난류 모델의 질을 높였고, y-plus 또한 5 이하로 낮게 유지하여 데이터를 취득하였다. 전체 노드의 수는 5백만 개 내외이며, 비정렬 격자와 프리즘 격자로 구성되었다.

덕트 근처의 유동은 비압축성 3차원 정상상태의 유동이며, 상류 유속은 0.2m/s에서 1.2m/s이다. Table 2에서 해

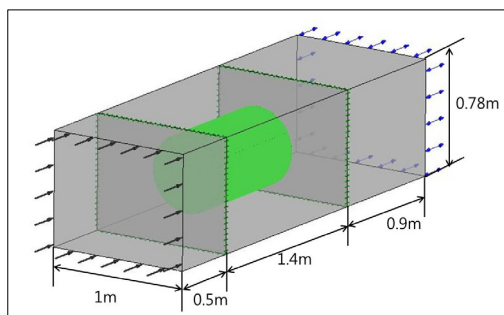


Fig. 3. CFD 도메인

석의 경계조건을 기술하였듯이 출구에는 entrainment OPa의 opening 경계조건을 주었고, 측면과 바닥면 및 덕트 형상에는 no slip 벽면 경계조건을 조성하였으며, 전체 도메인의 상단부는 free-slip 벽면 조건으로 구성하였다.

해석 결과 덕트 내부 중심의 좌표를 (0,0,0)이라고 할 때, 유속방향의 각 지점에서 측정된 유속을 Fig. 4~6에 도시하였다. 노즐-디퓨저 타입에서 1.46배로 가장 높은 유속 증폭률을 보였으며, 디퓨저 타입에서 그와 비슷한 정도의

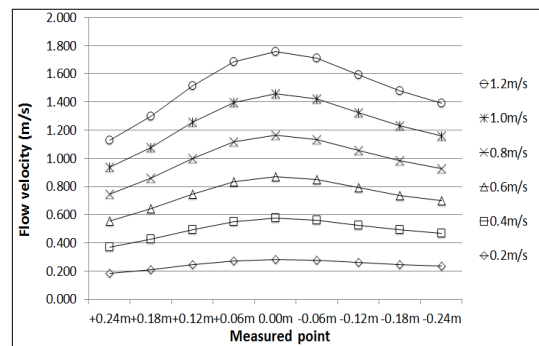


Fig. 4. 위치별 유속(노즐-디퓨저 타입)

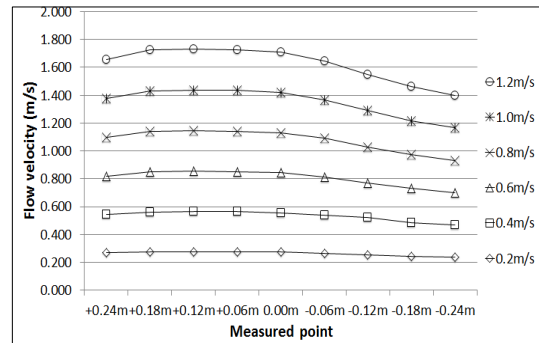


Fig. 5. 위치별 유속(디퓨저 타입)

Table 2. CFD 해석 조건

Description	Analysis Condition
Working fluid	Water (isothermal, 26°C)
Inlet	Normal speed (0.2~1.2m/s)
Wall	Stationary wall (no slip)
Outlet	Opening (Entrainment = 0Pa)
Turbulence model	Shear Stress Transport model (SST model)

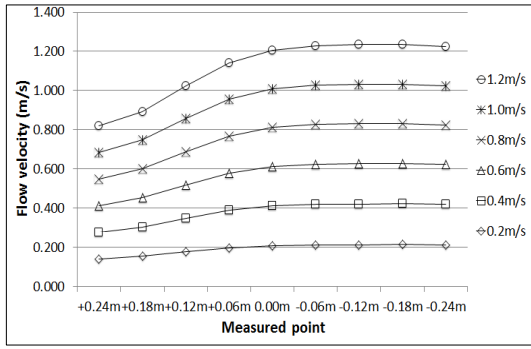


Fig. 6. 위치별 유속(노즐 타입)

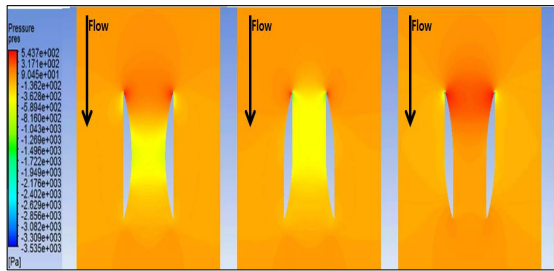


Fig. 7. 압력 분포 비교

유속이 측정 되었다. 노즐 타입은 최대 유속 증폭률이 1.07 배로 다른 타입에 비해 유속 증폭 효과가 미미했다. 이러한 유동은 Fig. 7의 압력 분포도를 통해 설명될 수 있다. 노즐-디퓨저 타입과 디퓨저 타입의 경우, 열린 형태의 유출구에 의해 덕트 출구 부분에서 압력 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이것이 덕트 내부의 유속 증폭에 가장 큰 요인이라고 할 수 있다. 반면, 노즐 타입의 경우, 열린 형태의 유입구에 의해 덕트 유입구 부분에서 강한 정체압이 형성되었다. 노즐-디퓨저 타입과 노즐 타입의 차이점은 유출구의 형상인데, 노즐-디퓨저 타입의 유출구 형상으로 인한 압력 감소가 덕트 전반부에 형성된 정체압을 감소시키는 역할을 하였다. 노즐 타입의 경우, 원통형의 유출구 형상으로 흡입력을 형성할 수 없었고 이로 인해 덕트 전반부의 정체압을 해소할 수 없어 다른 타입에 비해 유속 증가 효과가 적었다.

3.2 실험을 통한 CFD 해석 검증

3 가지 덕트 형상에 대한 CFD 해석 결과의 검증을 위해 Fig. 8과 같이 CFD 해석에 사용된 모델과 동일한 크기의 수리 실험 모형을 제작하여 인하대학교 회류수조에서 ADV

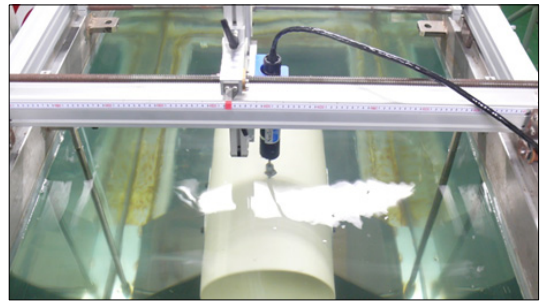


Fig. 8. 수리 모형 실험

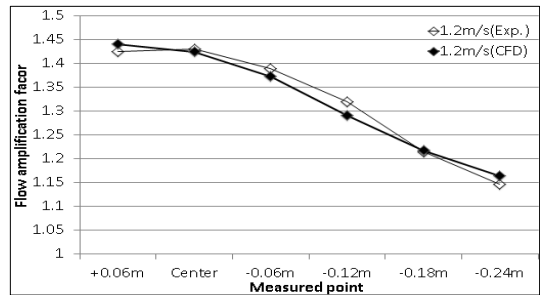


Fig. 9. CFD와 수리 모형 실험 결과 비교

를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험 유속은 CFD와 동일하게 0.2m/s에서 1.2m/s로 진행하였으며, 흐름 방향으로 6개 지점에서 측정하였다. 해석 결과를 Fig. 9에 그래프로 나타내었으며, flow amplification factor f 는 수식 (1)과 같이 계산 되었으며 U_{∞} 는 상류 유속, U_d 는 덕트 내부 유속이다. 그래프의 서 보이는 것처럼 CFD와 실험이 매우 비슷한 결과를 보였으며, 그 오차는 5% 이내였다.

$$f = \frac{U_d}{U_{\infty}} \quad (1)$$

4. 디퓨저 각도의 수정

3 가지 덕트 형상의 유속 증폭률에 대한 연구 결과 노즐-디퓨저 타입의 유속증폭률이 가장 우수하였다. 노즐-디퓨저 타입 형상에 대한 보안을 위하여 노즐 형상과 내경 및 외경의 비를 고정시키고 디퓨저 각도만을 변수로 한 연구를 진행하였다. 해석에 사용된 덕트 모델의 디퓨저 각도는 2°에서 70°이며 Fig. 10과 Table 3과 같이 총 12 가지의 모델

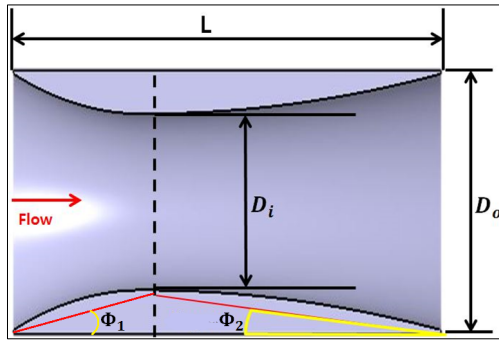


Fig. 10. 다양한 디퓨저 각도의 덕트 설계

Table 3. 다양한 디퓨저 각도의 덕트 제원

Description	Analysis Condition
D_i	2.0 m
D_o	3.0 m
ϕ_1 (유입구 각도)	10.9°
ϕ_2 (유출구 각도)	2°, 3°, 4°, 5°, 8°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°

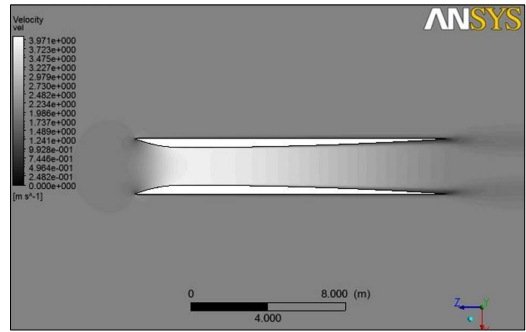
을 설계하여 해석을 수행하였다.

4.2 디퓨저 각도에 따른 유동해석

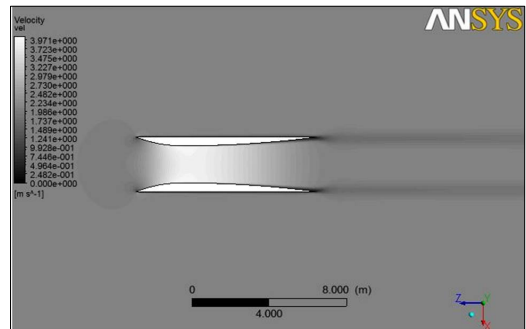
앞선 연구에서 실험으로 검증한 CFD 해석을 통해 연구를 진행하였으며, 격자는 정렬 격자 및 비정렬 격자로, 전체 노드 수는 150만~300만개로 구성하였다. 상류 유속은 2m/s 이며, 난류 모델은 전단 응력 수송(SST)모델을 사용하였다. 기본 설계 연구와 마찬가지로 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 y-plus는 5 이하로 낮추었다.

12 가지 디퓨저 각도에 따른 CFD 해석을 수행한 결과 Table 4, Fig. 12와 같이 디퓨저 각도가 작아질수록 높은 유속 증폭률을 나타냈으며, 특히 30°이하의 디퓨저 각도에서 유속 증폭률이 급격히 증가하였다. 디퓨저 각도 4°에서 최대 유속증폭률 1.88배의 값을 얻을 수 있었고 이것은 6.6 배의 유동에너지 증폭을 나타낸다.

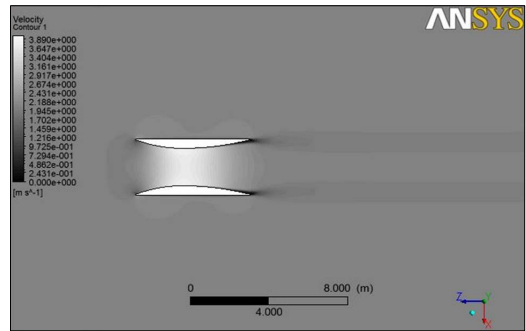
Fig. 11은 다양한 디퓨저 각도에 따른 유속 분포도 및 압력 분포도를 나타낸다. 가장 큰 디퓨저 각도인 70°에서는 강한 와류가 형성되었으며, 동시에 강한 박리가 발생하였다. 덕트 후반부의 형상이 덕트 전반부의 정체압을 해소하지 못하면서 덕트 내부 유속을 충분히 증폭시키지 못하였다. 반면에 디퓨저 각도 10°이하에서는 박리를 관찰할 수 없



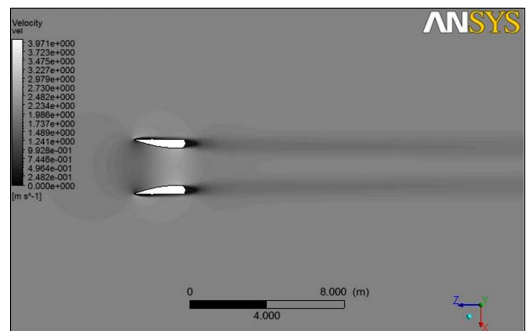
(a) 디퓨저 각도 2°의 유속 분포도



(b) 디퓨저 각도 4°의 유속 분포도



(c) 디퓨저 각도 8°의 유속 분포도

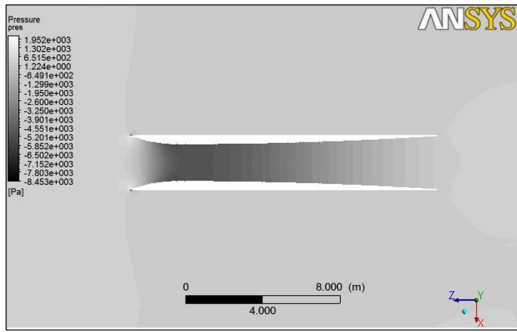


(d) 디퓨저 각도 70°의 유속 분포도

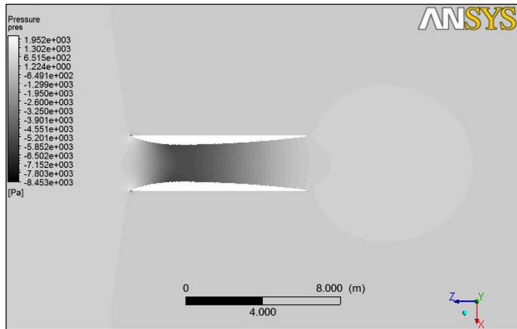
Fig. 11. 디퓨저 각도에 따른 유속 분포도 및 압력 분포도 (계속)

었고, 높은 유속 증폭률을 보였다.

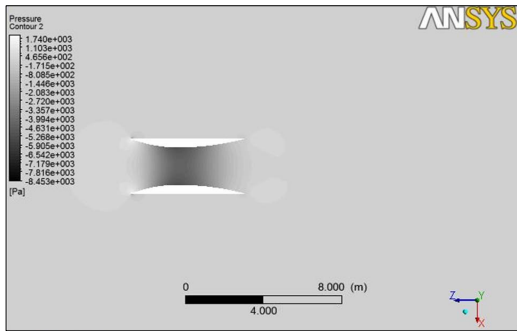
이런 유동 현상은 압력 분포로 확인할 수 있다. 디퓨저



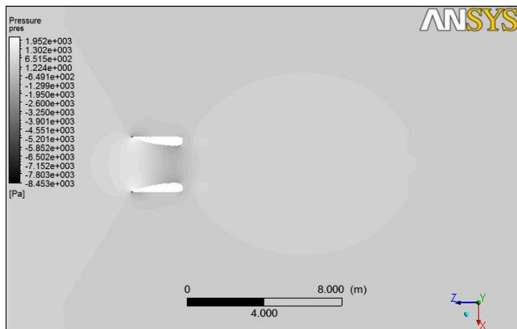
(e) 디퓨저 각도 2°의 압력 분포도



(f) 디퓨저 각도 2°의 압력 분포도



(g) 디퓨저 각도 2°의 압력 분포도



(h) 디퓨저 각도 2°의 압력 분포도

Fig. 11. 디퓨저 각도에 따른 유속 분포도 및 압력 분포도

각도 2°에서는 덕트 전반부에 비교적 작은 정체압이 형성되었다. 디퓨저 각도 4°에서 최대 유속 증폭률을 확인할 수

Table 4. 디퓨저 각도에 따른 유속 증폭률

디퓨저 각도	유속 증폭률	디퓨저 각도	유속 증폭률
2°	1.84	20°	1.45
3°	1.87	30°	1.33
4°	1.88	40°	1.27
5°	1.87	50°	1.24
8°	1.79	60°	1.21
10°	1.71	70°	1.19

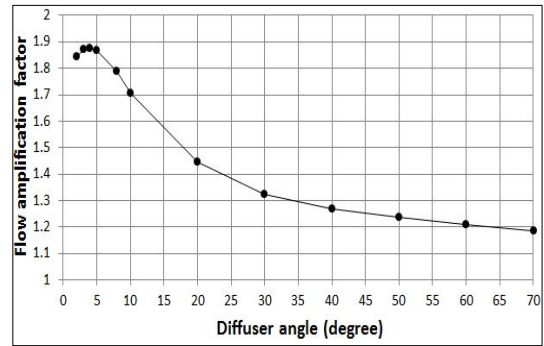


Fig. 12. 디퓨저 각도에 따른 유속 증폭률

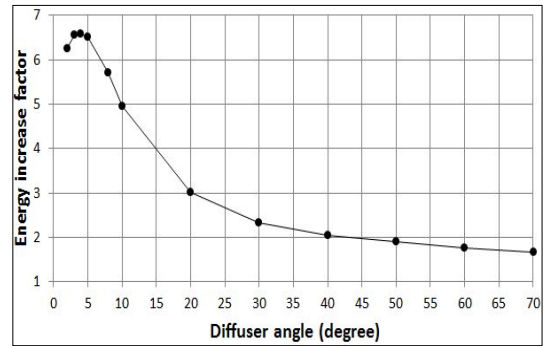


Fig. 13. 디퓨저 각도에 따른 유속 증폭률

있었으나, 덕트의 총 길이가 9.17m 로 덕트 내径의 4.58배에 해당하여 일점 계류 조류발전의 전체 시스템을 고려하여 조류발전 단지를 건설할 경우 가장 좋은 디퓨저 각도는 8°이며, 그 때 유속 증폭률은 1.79배이고, 덕트 총 길이는 5.75m이다.

앞서 언급한 바와 같이 유체가 가지는 에너지는 유속의 제곱에 비례한다. 따라서 덕트 구조물에 의해 증폭된 유속을 통한 유체의 에너지 증가율은 Fig. 13과 같으며, 디퓨저 각도 4°일 경우 최대 6.6배 증가한 유동에너지를 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 일점 계류식 조류발전 시스템을 소개하고, 3 가지 덕트 형상에 대한 기본 설계 및 CFD 해석과 실험을 통한 성능 평가를 수행하였으며, 노즐-디퓨저 타입 덕트에서 가장 높은 유속 증폭 성능을 확인할 수 있었다. 추가로 노즐-디퓨저 타입 덕트에 대하여 다양한 디퓨저 각도에 따른 다양한 케이스의 유동 해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

디퓨저 각도 4°일 때, 최대 유속 증폭률 1.88배의 결과를 얻었다.

디퓨저 각도 4°일 때의 덕트의 총 길이는 9.17m로 유체 동역학적 특성이 불안정 하므로, 디퓨저 각도는 8°이며, 총 길이 5.75m 인 덕트가 일점 계류식 조류발전 시스템에 가장 적합한 형상이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(20133030000260).

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성).

References

- [1] C.H. Jo, K.H. Lee, J.Y. Yim, K.S. Chae, "Performance Evaluation of TCP Device with Upstream Duct Installation" *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference*, pp. 77-80, 2009.
- [2] Palapum khunthongjan, Adun janyalertadun, "An investigation of diffuser for water current turbine application using CFD", *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol.3 No. 4, pp. 3437-3445, 2011.
- [3] Jong Won Kim, Jeong Hun Song, Woo Seo Kang, Sang Ho Lee, "A study on flow characteristic variations of tidal current generation turbine with shroud geometry", *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference*, pp. 1853-1856, 2012.
- [4] R. Luquet, D. Bellevre, D. Frechou, P. Perdon, P. Guinard, "Design and model testing of an optimized ducted marine current turbine", *International Journal of Marine Energy* Vol. 2, pp. 61-80, 2013.
- [5] Domenico P. Coiro, Rlia Daniele, Pierluigi Vecchia, "Diffuser shape optimization for GEM, a tethered system based on two horizontal axis hydro turbines" "Developments in ducted water current turbines", *Grand Renewable Energy* 2014, O-Oc-6-2, Aug, 2014.