



공학석사 학위논문

EFDC를 이용한 조류자원 해석과 CFD에 의한 조류발전 터빈의 성능해석에 관한 연구

A Study on the EFDC Analysis of Tidal Current Energy Resources and CFD Performance Analysis of a Tidal Current Turbine

지도교수 이 영 호

1945

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

김 인 철

본 논문을 김인철의 공학석사 학위논문으로 인준함.





한국해양대학교 대학원



List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vii
Nomenclature	viii

1. 서 론

1.1	연구배경	1
1.2	연구동향	4
1.3	연구목적	6
2. EF	DC를 통한 자원조사	
2.1	EFDC 수치모형	7
	2.1.1 EFDC의 개요	7
	2.1.2 수치해법	9
	2.1.3 지배방정식	10
2.2	EFDC 모형 구축 ·····	14
	2.2.1 EFDC 모형 적용을 위한 계산 격자 구성	14
	2.2.2 EFDC 모형의 입력자료 구성	18
2.3	EFDC 결과 ·····	25

3. 조류터빈의 축소모델 실험 및 CFD 비교

3.1	실험	장치		27
	3.1.1	순환	수조	27



	3.1.2 차압계 및 피토튜브	29
	3.1.3 토크센서 및 파우더 브레이크	30
	3.1.4 데이터 로거	32
	3.1.5 블레이드 및 터빈	33
3.2	실험방법	35
3.3	실험결과 및 CFD결과 비교분석	37

4. CFD에 의한 조류발전터빈의 성능해석

4.1 수치해석 기법	40
4.1.1 지배방정식	42
4.1.2 이산화 방법	43
4.1.3 난류모델링	50
4.2 계산격자 및 경계조건	55
4.3 100kW급 조류발전 터빈의 성능해석 결과	57
4.3.1 블레이드 단면 흐름 특성	57
4.3.2 효율 및 출력 특성	65
5. 결론 ······	67
감사의 글	68
참고문헌	69



List of Tables

Table.	1 Current Scenario of Tidal Power Energy in Korea	· 2
Table	2.1 EFDC_Explorer process function	14
Table	2.2 Classification of functions by input file groups	18
Table	3.1 Specifications of the measuring equipment	30
Table	3.2 Design parameters	33
Table	3.3 Specification of blade	34
Table	4.1 Simulation conditions	55





List of Figures

Fig.	1.1 World's potential tidal and tidal current power sites1
Fig.	1.2 Potential sites of tidal, tidal current and wave power in Korea 2
Fig.	1.3 Types according to rotational axis4
Fig.	2.1 Primary Modules of the EFDC Model
Fig.	2.2 Structure of the EFDC hydrodynamic model
Fig.	2.3 Coordinate system(a) and Grid system(b)9
Fig.	2.4 Numerical map
Fig.	2.5 Revised numerical map 15
Fig.	2.6 Grid configuration of EFDC16
Fig.	2.7 Grid by bed height
Fig.	2.8 Grid by depth 1945
Fig.	2.9 cell.inp
Fig.	2.10 image card 9
Fig.	2.11 image card 16
Fig.	2.12 image card 21
Fig.	2.13 image card 62
Fig.	2.14 image card 63
Fig.	2.15 image card 64
Fig.	2.16 image card 65
Fig.	2.17 image card 66



List of Figures

Fig.	2.18 Velocity distribution at start time 25
Fig.	2.19 Velocity distribution at rising tide time
Fig.	2.20 Velocity distribution at ebb tide time
Fig.	3.1 Circulating Water Channel
Fig.	3.2 Measuring section
Fig.	3.3 Operation panel
Fig.	3.4 Differential pressure gauge 29
Fig.	3.5 Pitot tube 29
Fig.	3.6 Torque meter and RPM sensor
Fig.	3.7 Powder brake 31
Fig.	3.8 Measurement system 31
Fig.	3.9 Data logging system 32
Fig.	3.10 Rotor Blade
Fig.	3.11 Flow level
Fig.	3.12 Velocity at the impeller RPM
Fig.	3.13 3-D Streamlines near the blade
Fig.	3.14 Suction side surface streamlines
Fig.	3.15 Comparison of the power output at various water velocities 39
Fig.	3.16 Comparison of the coefficient of power over various water
	speeds 39



– v –

List of Figures

Fig.	4.1	General process of computational fluid dynamic43
Fig.	4.2	Multigrid method process
Fig.	4.3	Mesh arrangement and terminology for dual mesh
Fig.	4.4	Computational grids56
Fig.	4.5	Streamline - Uin=2.4 m/s - 57
Fig.	4.6	Streamline - Uin=2.6 m/s - 58
Fig.	4.7	Streamline - Uin=2.8 m/s
Fig.	4.8	Streamline - Uin=3.0 m/s60
Fig.	4.9	Streamline - Uin=3.2 m/s61
Fig.	4.10) Streamline - Uin=4.0 m/s62
Fig.	4.1 1	Streamline - Uin=4.5 m/s63
Fig.	4.12	2 Streamline - Uin=5.0 m/s - 64
Fig.	4.13	3 Comparison of the power
Fig.	4.14	1 Comparison of the coefficient of power



A Study on the EFDC Analysis of Tidal Current Energy Resources and CFD Performance Analysis of a Tidal Current Turbine

KIM, In Cheol

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In this paper, EFDC was used to analyse an area of interest for tidal current power generation and the performance of a tidal current turbine was done using CFD. Firstly, the water velocity distribution in the area of interest was obtained using EFDC and a water velocity of 2.5m/s was found. Secondly, the performance characteristics of the tidal current turbine blade was compared using experiments on a scaled down tidal turbine model and numerical analysis. The result of the numerical analysis is in good agreement with the experimental results. From the CFD analysis, the maximum efficiency obtained was 0.44 and a maximum power output of 43.18W. The experimental results showed a maximum efficiency of 0.43 and a maximum output of 42.38W. Finally, a 100kW class tidal turbine was analysed using CFD and the maximum efficiency obtained was 0.49 with a maximum power output of 119kW.

KEY WORDS: EFDC_Explorer; CFD; Tidal Current Turbine.



Nomenclature

С	:	chord length	[mm]
Ср	:	power coefficient	[-]
g	:	acceleration of gravity	$[m/s^2]$
Η		total water level	[m]
L_m	:	model length	[m]
n	:	rotational speed	[RPM]
Р	:	outout power	[kW]
Т	:	torque	[N·m]
U	:	fluid velocity	[m/s]
U _{in}	:	inlet velocity	[m/s]
λ		tip speed ratio(TSR)	[-]
ρ	:	liquid density	[kg/m ³]
θ	:	blade twist angle	[°]
ω	:	angular velocity	$[s^{-1}]$



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

지구온난화 및 화석연료의 고갈로 인해 대체에너지 자원의 확보문제가 세계적 으로 대두되고 있다. 그 중 산업적으로 크게 주목 받고 있는 분야가 해양에너 지이다. 특히 활용 가능한 육상공간이 매우 제한되어 있는 우리나라에서, 해양 에너지 자원의 활용은 에너지 수입의존도를 낮출 뿐 아니라 국제적인 환경보 호 노력과 이에 따른 각종 규제에 적극적으로 대응할 수 있는 중요한 방안이 다.^[1]

특히, 국내 연안에는 조력650만kW, 조류 100만kW, 파력650만kW를 포함하여 총 1,400만kW의 해양에너지자원이 부존되어 있는 것으로 추정되고 있으며, 서 남해안은 세계적으로 보기 드문 조류발전의 적지이다. 조석에너지는 천체의 인 력에 기인한 무한 청정 자연에너지로서 태양계가 존재하는 한 지속되는 에너 지이다.^[2]



Fig. 1.1 World's potential tidal and tidal current power sites



Fig.1.1^[3]은 세계 주요 개발 후보지를 보여 주는 사진이며 우리나라 또한 한 후 보지에 들어가며, Fig.1.2^[3]는 우리나라의 조류발전 개발 후보지를 보여 주고 있으며 조류발전 후보지에 대한 현황은 Table.1^[3]과 같다.



Fig. 1.2 Potential sites of tidal, tidal current and wave power in Korea

Table.	1	Current	Scenario	of	Tidal	Power	Energy	in	Korea
--------	---	---------	----------	----	-------	-------	--------	----	-------

구분	수심 (m)	폭 (m)	최대 유속 (m/s)	대조기 평균유속 (m/s)	최대에너지 (kW)	적정개발 규모 (kW)	연간발전량 (kWh)
울돌목	20	300	6.50	4.16	366,354	49,809	122,171,461
장죽수도	30	3,500	3.59	2.30	1,867,359	146,855	360,206,124
맹골수도	45	4,200	3.49	2.23	3,088,113	242,859	595,684,819
횡간수도	30	2,000	2.50	1.60	360,352	28,339	69,510,390
대방수도	15	250	2.50	1.60	22,522	1,771	4,344,399
합계					5,971,700	469,634	1,151,917,193



조류발전은 조류의 흐름이 빠른 곳을 선정하여 수차 발전기를 구동시켜 발전 하는 기술이며, 해양환경에 거의 영향을 끼치지 않는 친환경적인 발전 방법이 다. 해양에너지는 조력발전을 제외하고는 본격적인 상용화에 이르지 못하나, 조류발전은 실용화에 가장 근접한 것으로 전문가들이 전망하고 있다.

조류터빈은 조류에너지를 전기에너지로 변환하는 터빈블레이드, 기어박스 및 발전기로 구분할 수 있으며, 그중 블레이드는 시스템의 안정성, 출력, 에너지 변환효율, 연간 발전량에 영향을 주므로 최적설계가 요구된다. 조류발전은 친 환경에너지보다 신뢰성 있는 에너지로서 정확한 발전량이 예측이 가능하며, 선 박 운항과 생태계에 미치는 영향이 적다.^[4]





1.2 연구동향

조류발전 연구개발은 영국에서 가장 활발히 진행되고 있으며, 독일, 캐나다, 미국, 노르웨이 등에서도 다양한 방식의 조류발전시스템이 개발되어 활발한 실 해역 실증이 진행 중이다. 그동안 HAT방식과, VAT방식이 경쟁적으로 검토되 었으나 현재로는 HAT방식이 대세로 자리 잡았다고 볼 수 있다. Fig.1.3^[5] 은 회전축 방향에 따른 조류발전터빈의 분류를 나타내고 있다.



(a) HAT 방식



```
(b)VAT 방식
```

Fig. 1.3 Types according to rotational axis

영국 MCT사는 2003년 300kW급 HAT 시스템을 실해역에 설치하여 운영한 바 있으며, 이를 확장하여 한 쌍의 터빈으로 이루어진 1.2MW급 조류 발전시 스템을 2008년에 제작 설치한 바 있다. Atlantis사는 1MW급 조류발전장치를 개발하여 2011년 유렵해양에너지센터(EMEC)에 시험 설치하였고 현재 시험 가 동중이다. 영국이외에 노르웨이의 햄머페스트(Hammerfest)사는 2003년 느로웨 이의 Kvalsund, Finnmark에 300kW급 조류발전장치를 설치하여 2008년까지 4 년동안 기동하였으며, 2011년부터 10~20기의 조류발전장치로 구성된 상업용 조류발전단지를 계획 중이며 영국에 10MW 조류발전 단지를 계획중이다. 미국 Verdant Power사는 뉴옥에 200kW급 조류발전 시스템을 개발하여 6기를 설치 해 전기를 공급하고 있다. 국내에서 개발이 진행 중인 조류발전 기술은 해양연 구원이 2003년 울돌목에 설치한 소형 헬리칼 수차 방식의 조류발전시스템이



시초로서, 이를 확장하여 2009년 1MW급의 조류발전시스템이 울돌목에 건설되 어 운용 중에 있다.^[5] 2009년부터 덕적도 인근 해역에 총 200MW 규모의 조류 발전단지 조성계획을 추진중에 있으며, 최근 인천시는 2013년에 스코틀랜드 국 제개발청과 조류발전 사업분야의 기술지원 및 상호 우호협력 협약을 체결하였 다.

2009년 조철희^[6] 등은 해양 조류발전단지 간섭에 대한 연구를 진행 하였으 며, 2010년 김부기^[7] 등은 CFD를 이용한 100kW급 조류발전 터빈의 성능해석 을 진행 하였고, 양창조^[4]는 2011는 조류발전용 로터 블레이드의 최적 형상 설 계를 진행 하였다. 2011년 신범식^[8]등은 EFDC모형을 이용한 가로림만의 조력 발전 위치 타당성 검토하였다. 영국에서 Susana Baston^[9]등은 오크니제도의 조 력에너지 자원의 평가에 난류 폐쇄 모델의 민감도 분석을 진행 하였다.





1.3 연구목적

조류발전은 친환경에너지보다 신뢰성 있는 에너지로서 정확한 발전량이 예 측이 가능하며, 선박 운항과 생태계에 미치는 영향이 적다. 조류발전은 유향과 회전축의 방향에 따른 HAT(Horizontal Axis Turbine) 방식와 VAT(Vertical Axis Turbine)방식으로 구별하며, 발전량은 조류속도와 로터 단면의 크기에 따라 차 이가 난다. 그렇기 때문에 설치 지역의 조류 속도는 중요한 설계 요소이며, 그 에 맞는 터빈을 설계하는 것이 가장 중요하다. 최근에는 2011년 완공된 시화호 의 조력발전소가 연간 552GWh의 전기를 생산하여 세계최대 규모의 조력발전 단지로 운행 중에 있으며, 신재생에너지비율을 높이는데 큰 역할을 하고 있다. 또한, 현재 인천시는 조류발전소 실증시험장 개발을 위하여 타당성 조사 실행 을 하고 있다. 이렇게 신재생에너지의 비율을 높이기 위하여 노력하고 있으며 신재생에너지를 사용하기 위해서 에너지 자원조사는 필수가 되고 있고 연구가 진행 되고 있다. 본 논문은 EFDC 수치모델을 통하여 설치 지역의 조류 속도 와 흐름을 분석하며, EFDC의 설명 및 실행방법에 대하여 목적이 있으며, 그에 따라 BEMT를 통한 블레이드 설계와 최적의 터빈을 설계하여 축소 모형 실험 을 하여 CFD와 실험값을 비교하여 성능검증을 하며, 100kW급 터빈을 설계하 여 CFD를 통한 유동해석과 성능분석을 나타내었다. 그리하여 EFDC 수치해석 을 통하여 설치지역의 자원조사부터 CFD를 사용하여 그에 맞는 터빈의 성능 및 유동분석을 하여 최적설계의 방법을 일괄적으로 나타내는데 목적이 있다.



제 2 장 EFDC를 통한 자원조사

2.1 EFDC 수치모형

2.1.1 EFDC의 개요

EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형은 Virginia Institute of Marine Science(버지니아 해양과학연구소)에서 John Hamrick에 의해 개발 되 었으며, 2차원 및 3차원 해수유동과 물질이동을 재현할 수 있는 다변수 유한차 분 모형으로 미국 환경청(Environmental Protection Angency)의 공인 모형이 다.(Hamrick, 1992).

또한 수직 · 수평적으로 2차원 및 3차원화가 용이하며, mass-conserving scheme을 이용하여 천해역에서 3차원의 조간대 처리가 가능하도록 설계되어져 있어 조류해석에 용이하게 쓸 수 있다.

EFDC 모형은 이론적인 면, 수치해석적인 면에서 Blumberg and Mellor(1987)^[10] 모형과 미공병단의 Chesapeake Bay 모형과 유사하며, 해수와 담수체계에 모두 적용할 수 있도록 다양한 밀도장에서의 3차원 정수압, 자유수 면, 난류의 연직평균 운동방정식을 푼다. 또한 난류 운동에너지, 난류길이, 염 도와 온도를 구하기 위해 동역학적으로 결합된 질량수송방정식들을 풀며, 두 개의 난류 수송방정식들이 Galperin등(1988)에 의해 수정된 Mellor & Yamada^[11]의 Level 2.5 turbulent closure scheme에 기초되어 풀이된다.

EFDC는 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유 물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동 /반응 등의 모의가 가능하다. 특히 EFDC 유동 부분 모의에 있어서 댐 또는 암거 등의 치수 구조물 해석뿐만 아니라 수심이 얕은 수체에 있어서 습윤/건 조(wet/dry) 현상을 모의할 수 있어 인공습지 등에서의 유동을 모의할 수 있



- 7 -

다. 또한 유동 및 확산 등의 물리적인 이동 기작에 대한 정보는 비반응성 또는 반응성 수질 변수들의 모의를 위해 사용될 수 있다.



Fig. 2.1 Primary Modules of the EFDC Model



Fig. 2.2 Structure of the EFDC hydrodynamic model

EFDC 모형은 Fig. 2.1^[12]과 같이 Hydrodynamics(수리), Water Quality(수질), Sediment Transport(부유사 이동), Toxis(독성물질) 등 총 4개의 모듈로 구성되 며, Hydrodynamics 모듈의 모델링 결과인 수심, 유속, 혼합 등의 자료들은 수 질모의, 부유사 이동, 독성물질 등이 모델링을 위한 입력 자료로 사용된다.



2.1.2 수치해법

EFDC에 이용된 수치 기법은 Fig. 2.3^[8]과 같이 스태거드 격자(staggered gird) 또는 아라카지 격자(C gird) 상의 2차 정확도를 갖는(2nd order accurate) 공간차분법을 사용한다. 모델의 시간적분은 내부전단 또는 바로크리 닉 모드(baroclinic mode)와 외부 자유수면 중력과 또는 바로트로픽 모드를 분 리하는 내부-외부 모드 분리절차를 갖고 있는 2차 정확도를 갖는 시간 3단계 (three time level)로 적분하는 유한차분법을 사용한다. 외부모드 해법은 반음해 법(semi-implicit scheme, 시간 간격을 크게 하여 계산을 쉽게 만드는 방법)이 며, 공액경사법(conjugate gradient procedure)으로 2차원 수위장을 동시에 계 산한다.



Fig. 2.3 Coordinate system(a) and Grid system(b)

외부 모드 풀이는 새로운 수위장을 이용하여 수심평균 바로트로픽 유속을 계산함으로써 완결된다. 외부 모드 반음해법은 중앙차분 양해법(explicit scheme)의 안전기준 또는 비선형 가속항에 대해 사용되는 업윈드 이류법 (upwind advection scheme)에 의해서만 제약받는 큰 시간 간격(time step)을 허용한다. 외부 모드 풀이를 위한 수평 경계조건은 모두 수위만을 정하기 위한 옵션들, 즉 유입파의 특성치(Bennett and Mcintosh, 1982), 유출파의 자유로운 방사력(Bennett, 1976; Blumberg and Kantha, 1985) 또는 임의의 경계부분의



체적 플럭스(Volumetric flux)를 규정하기 위한 선택 사항을 포함한다.^[13]

EFDC 모델의 내부 운동량 방정식 풀이는 외부 모드와 같은 시간간격을 취하며 수직확산을 음해적으로 푼다. 운동량 방정식들의 내부 모드의 해는 수직 단면의 전단력과 마찰속도 항들로 구성 되어 있고, 그것은 바로 클리닉 압력경 사에 가장 간단한고 정확한 형식이고, 내부 모드의 식들이 과계산하는 것을 방 지한다. 시간 3단계 차분법의 시간나누기는 2차 정확도의 시간 2단계 사다리꼴 시간간격을 주기적으로 삽입함으로써 수행된다. 또 EFDC모델은 2차원 평면이 나 수직면을 쉽게 구성할 수 있다.

2.1.3 지배방정식

EFDC모형의 Hydrodynamic Model에 포함되어 있는 Dynamics 모듈의 지배 방정식은 시간평균된 Navier-Stokes 방정식을 곡선-직교 수평좌표계(curvilinear orthogonal horizontal coordiates)와 시그마 연직좌표계(sigma vertical coordinate)로 전환하여 유도하며 x, y 방향 운동방정식^[14]은 식(2.1)과 같 다.^[11,15-18]

$$\begin{split} \frac{\partial}{\partial t}(m_{x}m_{y}Hu) &+ \frac{\partial}{\partial x}(m_{y}Huu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_{y}Hvu) + \frac{\partial}{\partial z}(m_{x}m_{y}wu) - f_{e}m_{x}m_{y}Hv \\ &= -m_{y}H\frac{\partial}{\partial x}(p + p_{atm} + \phi) + m_{y}(\frac{\partial}{\partial x}z^{*} + z\frac{\partial}{\partial x}H)\frac{\partial}{\partial z}p + \frac{\partial}{\partial z}(m_{x}m_{y}\frac{A_{v}}{H}\frac{\partial}{\partial z}u) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(\frac{m_{y}}{m_{x}}HA_{H}\frac{\partial}{\partial x}u) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{m_{x}}{m_{y}}HA_{H}\frac{\partial}{\partial y}u) - m_{x}m_{y}c_{p}D_{p}(u^{2} + v^{2})^{1/2}u \\ & \frac{\partial}{\partial t}(m_{x}m_{y}Hv) + \frac{\partial}{\partial x}(m_{y}Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_{y}Hvv) + \frac{\partial}{\partial z}(m_{x}m_{y}wv) + f_{e}m_{x}m_{y}Hu \\ &= -m_{x}H\frac{\partial}{\partial y}(p + p_{atm} + \phi) + m_{x}(\frac{\partial}{\partial y}z^{*}_{b} + z\frac{\partial}{\partial y}H)\frac{\partial}{\partial z}p + \frac{\partial}{\partial z}(m_{x}m_{y}\frac{A_{v}}{H}\frac{\partial}{\partial z}u) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(\frac{m_{y}}{m_{x}}HA_{H}\frac{\partial}{\partial x}v) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{m_{x}}{m_{y}}HA_{H}\frac{\partial}{\partial y}v) - m_{x}m_{y}c_{p}D_{p}(u^{2} + v^{2})^{1/2}v \end{aligned} \tag{2.2}$$



$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \frac{\partial}{\partial y} m_x + v \frac{\partial}{\partial_x} m_y$$
(2.3)

$$\tau_{xz}\tau_{yz} = A_v H^{-1} \frac{\partial}{\partial z}(u, v) \tag{2.4}$$

여기서 u, v는 곡선-직교 수평좌표계에서의 x, y 방향 유속, w는 시그마 연 직좌표계에서의 z방향 유속을 나타낸다. zs*, zb*각각 자유수면과 하상의 물리 적 연직좌표이며, H는 전체 물기둥 깊이를 가리킨다. m_x, m_y는 scale factor이 고 φ는 자유수면 포텐셜로 gzs*,와 같다. f_e는 유효 Coriolis 가속도이다.

Av= 연직 난류점성계수

A_H= 수평 난류점성계수

Dp= 무차원화 된 식생의 투영면적, c_p는 저항계수를 나타낸다.

z방향에 대한 운동방정식은 정수역학을 가정하여 다음과 같이 간략화한 식 을 이용한다.

$$\frac{\partial}{\partial z}p = -gHb = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1}$$
(2.5)

여기서 ρ와ρ₀는 각각 실제밀도와 기준밀도이고, b는 부력을 가리킨다. 직교-곡선 수평좌표계와 시그마 연속좌표계에서 3차원 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w) = 0$$
(2.6)

용존 및 부유물질에 대한 일반적인 이동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y HC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HvC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x m_y wC) - \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w_{sc}C) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x m_y wC) - \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w_{sc}C) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x m_y wC) - \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y wC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x m_y wC) +$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y}{m_x} H K_H \frac{\partial}{\partial x} C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x}{m_y} H K_H \frac{\partial}{\partial y} C \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(m_x m_y \frac{K_v}{H} \frac{\partial}{\partial z} C \right) + Q_c$$
(2.7)

여기서 K_v 와 K_H 는 각각 연직, 수평방향의 난류확산계수를 가리킨다. w_{sc} 는 침강속도이며, C는 단위 체적당 질량으로 농도를 나타내고 Q_c 는 소스-싱크항 이다.



난류 모형은 운동방정식 식(2.1), 식(2.2) 그리고 이송-확산방정식 식(2.7)의 해 는 난류 점성계수 $A_{H'}$, A_v 와 난류확산계수 $K_{H'}$, K_v 를 필요로 한다.

EFDC에서는 이를 위해 Mellor와 Yamada^[11]의 2차 난류폐쇄기법이 사용된 다. 이MY 모델에서 A_v , K_v 는 난류강도 q와 난류길이스케일 l과 관계되고 q, l은 Richardson number R_q 에 기초한다.

연직 난류점성 및 확산계수는 second moment turbulence closure model^[21] 을 사용하여 계산되며, turbulence intensity(q), turbulence length scale(l), Richardson number(R_n)와 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$A_v = \phi_A A_0 q l \tag{2.8}$$

여기서, ϕ_A 와 A_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{split} \phi_A &= \frac{(1+R_1^{-1}R_q)}{(1+R_2^{-1}R_q)(1+R_3^{-1}R_q)} \\ A_0 &= A_1(1-3C_1-\frac{6A_1}{B_1}) = \frac{1}{B_1^{1/3}} (2.10) \\ R_1^{-1} &= 3A_2 \frac{(B_2-3A_2)(1-\frac{6A_1}{B_1}) - 3C_1(B_2+6A_1)}{(1-3C_1-\frac{6A_1}{B_1})} \end{split}$$

$$R_2^{-1} = 9A_1A_2$$

$$R_3^{-1} = 3A_2(6A_1 + B_2)$$
(2.9)

여기서 ϕ_k 와 K_0 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{split} K_v &= \phi_k K_0 q l \\ \phi_k &= \frac{1}{(1+R_3^{-1}R_q)} \end{split}$$



$$K_0 = A_2 \left(1 - \frac{6A_1}{B_1}\right) \tag{2.10}$$

$$R_q = -\frac{gHb}{q^2} \frac{\partial}{\partial z} \frac{l^2}{H^2}$$
(2.11)

상수들은 다음과 같이 주어진다.^[11] $A_1=0.92, A_2=0.74, B_1=16.6, B_2=10.1, C_1=0.08$ 난류강도 q와 난류길이스케일 l은 다음의 이동방정식에 의해 결정된다. $\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y Hq^2) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huq^2) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvq^2) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y wq^2)$ $= \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y \frac{A_q}{H} \frac{\partial}{\partial z}q^2) - 2m_x m_y \frac{Hq^3}{B_1 l}$ $+ 2m_x m_y \left\{\frac{A_v}{H}\left[\left(\frac{\partial}{\partial z}u\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z}v\right)^2\right] + \eta_p c_p D_p (u^2 + v^2)^{3/2} + gK_v \frac{\partial}{\partial z}b\right\} + Q_q$ (2.12) $\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y Hq^2 l) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huq^2 l) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvq^2 l) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y wq^2 l)$ $= \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y \frac{A_q}{H} \frac{\partial}{\partial z}q^2 l) - m_x m_y \frac{Hq^3}{B_1 l} \left[1 + E_2(\frac{l}{kHz})^2 + E_3(\frac{l}{kH(1-z)})^2\right]$ $+ m_x m_y E_1 l \left\{\frac{A_v}{H}\left[\left(\frac{\partial}{\partial z}u\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z}v\right)^2\right] + gK_v \frac{\partial}{\partial z}b + \eta_p c_p D_p (u^2 + v^2)^{3/2}\right\} + Q_l$ (2.13) & + hear 2 hea

 E_1 =1.8, E_2 =1.33, E_3 =0.25

lectio

여기서 q와 l에 대한 이동방정식에 나타나는 연직확산계수 $A_q=0.2ql, R_q$ 의 제곱근이 0.52보다 작게하여 Galperin 등에 의해 지정되었다. 수평 방향 난류 점성계수 A_H 와 확산계수 K_H 는 사용자의 선택에 따라 포함여부가 결정된다.

2.2 EFDC 모형 구축

2.2.1 EFDC 모형 적용을 위한 계산 격자 구성

EFDC의 데이터 처리 프로그램인 EFDC_Explorer는 EFDC를 편리하게 사용 할 수 있는 전·후처리 가능한 도구(tool)이다. EFDC_Explorer의 주요 처리 기 능은 전처리와 후처리로 나눌 수 있으며 전처리 기능으로는 Single셀과 Multiple셀의 편집, 셀 대 셀의 복사와 할당기능과 데이터의 생성, 편집의 경 계조건 지정 등이 있으며 후처리 기능은 EMF파일과 Tecplot 파일로 출력하거 나 데이터의 모의 결과를 볼 수 있는 기능 등이 있다.

본 연구에 사용된 EFDC_Explorer의 전·후처리 기능은 Table 2.1^[19]과 같다.

Table 2	2.1	EFDC_	Explorer	process	function
---------	-----	-------	----------	---------	----------

Pre-Processing Functions	Post-Processing Functions
Single Cell Edits	Export EMF Files
Multiple Cell Edits	Export Tecplot Files
Cell to Cell Copy/Assign	Time Series
Data Field Smoothing	General Statistics
Bathymetry Comparison to Another Model	Water Flux Tool
Creat/Assign/Edit Boundary conditions	Animation of Results

EFDC 모형을 이용한 수치해석을 수행하기 위해서는 대상지역에 대하여 지 형자료와, 여러 가지 입력 조건이 필요하다. EFDC 모형에 이용되는 수치모형 은 실제 지형을 수치적으로 나타낸 수치지도 또는 전자해도가 이용된다. 그 중 에서 본 논문에서는 1:25,000 수치지도를 이용하여 격자를 구성 하였다. 격자망 을 구성하기 위해서 Auto-CAD와 Surfer 라는 프로그램으로 수치지도에서 필 요한 부분을 작업하였고, Fig. 2.4는 기본의 수치 지도 이고, Fig.2.5는 수치 지 도에서 필요한 부분만을 나타내었다. Fig. 2.5는 지도의 지형과, 수심에 대한 자료가 나타나 있다. 다음과 같은 작업 후에 격자 작업을 하였다. Fig. 2.6은 수치모의를 위해 횡단방향 94개와 종단방향 94개로 구성하고, 2499개의 수체격 자를 구성하여 모의를 하였다. Fig. 2.7, Fig. 2.8은 segment의 하상고와 수심을 평균하여 나타낸 값이다.





Fig. 2.5 Revised numerical map





Fig. 2.7 Grid by bed height







2.2.2 EFDC 모형의 입력자료 구성

EFDC 계산을 위한 입력파일은 Table. 2.2와 같으며, 그중 주요 입력파일에 대 한 설명은 아래에 설명을 하였다.

Table	2.2	Classificati	on of	functions	hv	input	file	groups
Tabic	2.2	Classificati		1 une t 1 ons	Dy	Input	LIIC	SIOups

Group	File	Type of Input Date
	Name	
Horizontal grid specification files	cell.inp cellt.inp depth.inp dxdy.inp lxly.inp	 -Horizontal cell type identifier file. -Horizontal cell type identifier file for saving mean mass transport. -File specifying depth, bottom elevation, and bottom roughness for Cartesian grids only. -File specifying horizontal grid spacing or metrics, depth, bottom elevation, bottom roughness and vegetation classes for either Cartesian or curvilinear-orthogonal horizontal grid. -File specifying horizontal cell center coordinates and cell orientations for either Cartesian or curvilinear-orthogonal grid.
		1945
General data and run control files	efdc.inp show.inp	-Master input file. -File controlling screen print of conditions in specified cell during simulation runs.
Time series forcing and boundary files	qser.inp	-Volumetric source-sink time series file.

EFDC에 사용되는 입력파일 중 cell.inp 파일은 그림 Fig. 2.9와 같이 육지셀 과 물셀을 구분하는 파일이다. 숫자 5는 사각형으로 된 물 셀을 나타내며, 숫 자 9는 육지와 물셀의 경계층이라고 볼 수 있으며, 숫자 0은 육지 셀이다.



сс	ell,inp
C C C	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 1234567890123456789
94	000000000000000000000000000000000000000
93	095555555555555555555555555555555555555
91	095555555555555555555555555555555555555
90 89	09555555555555555555555555555555555555
88	095555555555555555555555555555555555555
87	095555555555555555555555555555555555555
85	095555555555555555555555555555555555555
84	095555555555555555555555555555555555555
83	095555555555555555555555555555555555555
81	095555555555555555555555555555555555555
80	09555555555555555555555555555555555555
78	095555555555555555555555555555555555555
77	09555555555555555555555555555555555555
75	095555555555555555555555555555555555555
74	095555555555555555555555555555555555555
72	095555555555555555555555555555555555555
71	095555555555555555555555555555555555555
70	09999999995555555555555555555555555555
68	000000095559995555555555555555555555555
67	000000095559095555555555555555555555555
65	000000009999099999999000099995555555555
64	000000000000000000000000000000000000000
63 62	00000000000000000000000000000000000000
61	000000000000000000000000000000000000000
60	000000000000000000000000000000000000000
58	000000000000000000000000000000000000000
57	000000000000000000000000000000000000000
56	00000000000000000000000000000000000000
54	000000000000000000000000000000000000000
53	00000000000000000000000000000000000000
51	000000000000000000000000000000000000000
50	000000000000000000000000000000000000000
49	00000000000000000000000000000000000000
47	000000000000000000000000000000000000000
46	00000000000000000000000000000000000000
44	000000000000000000000000000000000000000
43	000000000000000000000000000000000000000
42	000000000000000000000000000000000000000
40	000000000000000000000000000000000000000
39	00000000000000000000000000000000000000
37	000000000000000000000000000000000000000
36	000000000000000000000000000000000000000
34	000000000000000000000000000000000000000
33	000000000000000000000000000000000000000
32	00000000000000000000000000000000000000
30	000000000000000000000000000000000000000
29	00000000000000000000000000000000000000
27	000000000000000000000000000000000000000
26	000000000000000000000000000000000000000
25	00000000000000000000000000000000000000
23	000000000000000000000000000000000000000
22	00000000000000000000000000000000000000
20	000000000000000000000000000000000000000
19	000000000000000000000000000000000000000
17	000000000000000000000000000000000000000
16	000000000000000000000000000000000000000
15	000000000000000000000000000000000000000
14	000000000000000000000000000000000000000
13	000000000000000000000000000000000000000
12	000000000000000000000000000000000000000
10	00000000000000000000000000000000000000
9	000000000000000000000000000000000000000
87	00000000000000000000000000000000000000
6	000000000000000000000000000000000000000
5	000000000000000000000000000000000000000
4	.uuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuu
2	000000000000000000000000000000000000000
1	00000000000000000000000000000000000000

Fig. 2.9 cell.inp



efdc.inp 파일은 주입력 파일로서 총 90장의 card image로 구성되어 있다. card image안의 정보는 실행 변수와 출력의 제어, 그리고 모델의 물리적인 정 보의 설명과 외부 강제력등을 제공해 준다. 공통적으로 모든 card image 코드 안의 많은 옵션들은 정수변환에 의해 활성화되며 만약 그렇지 않다면 '0'으로 변환하여 옵션을 비활성화 시킬 수 있다는 것이다. 옵션은 보통 0이 아닌 정수 값이 지정되어 활성화된다. 그 코드는 보통 IS 또는 JS로 시작된다. 이 논문에 사용된 몇 가지 카드에 대해서 아래에 설명을 하였다.

image card 9 는 격자에 대한 사양을 입력하는 카드이다. 이 계산에 사용된 격자는 94x94 구성되어 있으며, 활성화되는 격자는 2501개의 격자이기 때문에 Fig. 2.10과 같이 입력 하였다.

C9 SPACE-RELATED AND SMOOTHING PARAMETERS

Collection

*										- //			
*	KC:	N	IUMBE	ROFY	ERT I C/	AL LA	YER						
*	IC:	N	IUMBE	ROFC	ELLS	NI	DIREC	CTION					
*	JC:	N	IUMBEI	ROFC	ELLS	N J	DIREC	STION					
*	LC:	N	IUMBE	ROFA	CTIVE	CELL	S IN	HORIZ	CONTAL +	2			
*	LVC:	N	IUMBEI	ROFV	ARIABL	E SI	ZE HO	ORIZON	ITAL CELL	_S	20		
*	ISCO:	1	FOR	CURVI	LINEAF	R-ORT	HOGON	VAL GF	RID (LVC=	=LC-2)	90		
*	NDM :	N	IUMBEI	ROFD	IOMA I NS	S FOR	HOR	I ZONTA	L DOMAIN	I DECOMPO	OSITION		
*		(NDM:	=1, FC	R MODE	EL EX	ECUT	ION ON	I A SINGL	LE PROCES	SSOR SYST	FEM OR	
*			NDM:	=MM+NC	PUS, W	HERE	MM	IS AN	INTEGER	AND NCPL	JS IS THE	E NUMBER	
*			OF.	AVAILA	BLE CF	PU'S	FOR N	IODEL	EXECUTIO	ON ON A F	PARALLEL	MULTIPLE PROCESSOR SYSTEM)
*	LDM :	N	IUMBEI	R OF W	ATER (CELLS	PER	DOMAI	N (LDM=)	(LC-2)/N	DM, FOR M	AULTIPE VECTOR PROCESSORS,	
*			LDM	MUST	BE AN	INTE	GER N	NULTIF	LE OF TH	HE VECTOR	R LENGTH	OR	
*			STR	IDE NV	EC THU	JS CO	NSTR/	AINING	G LC-2 TO	D BE AN	INTEGER M	AULTIPLE OF NVEC)	
*	ISMASK:	ୀ	FOR	MASKI	NG WAT	FER C	ELL	TO LAN	ID OR ADD	DING THU	BARRIEF	RS	
*			USIN	G INFC	RMATIC	DN IN	FILE	E MASK	. INP	-11 %			
*	ISPGNS:	1	FOR	IMPLE	MENTIN	IG A	PERIC	DDIC 0	BRID IN (COMP N-S	DIRECTIO	ON OR	
*			CONNI	ECTING	ARBIT	FRATY	CELL	_S USI	NG INFO	IN FILE	MAPPGNS.	INP	
*	NSHMAX:	N	IUMBEI	ROFD	EPTH S	SMOOT	HING	PASSE	S				
*	NSBMAX:	N	IUMBEI	ROFI	NITIAL	. SAL	INITY	/ FIEL	D SMOOTH	HING PASS	SES		
*	WSMH:	E)EPTH	SMOOT	HING W	VEIGH	T						
*	WSMB:	S	SALIN	ITY SM	OOTHIN	IG WE	I GHT						
*													
*													
С													
C9	KC I	IC	JC	LC	LVC	SCO	NDM	LDM	ISMASK	I SPGNS	NSHMAX	NSBMAX WSMH WSMB	
	1 9	94	94	2501	2499	1	1	2499	0	0	0	0 0.06250 0.06250	
										00000	00000		

Fig. 2.10 image card 9

image card 16은 개방경계에 대한 입력 카드로 북쪽에 29개의 경계를 입력 하였으므로, Fig. 2.11와 같이 입력 하였다.

C16	SURFACE	ELEVATION	OR PR	ESSURE	BOUNDARY	CONDITIO	N PARA	METERS	
*									
*	NPBS:	NUMBER OF	SURFAC	CE ELEV.	ATION OR	PRESSURE	BOUND	ARY CONE	DITIONS
*		CELLS ON	SOUTH (PEN BO	UNDARIES				
*	NPBW:	NUMBER OF	SURFAI	CE ELEV.	ATION OR	PRESSURE	BOUND	ARY CONE	DITIONS
*		CELLS ON	WEST OF	PEN BOU	NDARIES				
*	NPBE:	NUMBER OF	SURFAI	CE ELEV.	ATION OR	PRESSURE	BOUND	ARY CONE	DITIONS
*		CELLS ON	EAST OF	PEN BOU	NDARIES				
*	NPBN :	NUMBER OF	F SURFAI	CE ELEV.	ATION OR	PRESSURE	BOUND	ARY CONE	DITIONS
*		CELLS ON	NORTH (OPEN BO	UNDARIES				
*	NPFOR:	NUMBER OF	F HARMON	IC FOR	CINGS				
*	NPFORT :	FORCING 1	ΓΥΡΕ, O:	CONSTA	NT, 1=LII	NEAR, 2=	QUADRA	TIC VARI	ATION
*	NPSER:	NUMBER OF	F TIME S	SERIES	FORCINGS				
*	PDGINIT:	ADD THIS	CONSTAN	AT ADJU	STMENT GI	LOBALLY T	0 THE	SURFACE	ELEVATION
*	10.3250325331 1	0920070N NB	MORTON 1	1282038237	1000000000	1977 1978 19	100000000	(mminian)	
C16	NPBS	NPBW N	IPBE	NPBN	NPFOR I	NPFORT	NPSER	PDGINIT	
	0	0	0	29	0	0	29	2.0	

Fig. 2.11 image card 16

C21 PERIODIC I	FORCING	(TIDAL)	SURF	ELEV C	R PRE	SSURE	ON	NORTH	OPEN	BOUNDARI	ES
* IPBN: SEE I * JPBN: * ISPBN: * NPFORN: * NPSERN: * TPCOORDN:	CARD 18	(OREA				I AND	nell				
* C21 IPBN 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 15 16 17 18 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35	JPBN 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92	ISPBN NI 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	PFORN	NPSEF 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	N TPC 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 3 14 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 2 4 5 6 7 8 9 10 11 1 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2						

Fig. 2.12 image card 21



image card 18~21은 카드 한 장당 남, 서, 동, 북측 개방경계 I, J 좌표 및 조 석 조건을 입력하는 카드이며, 북쪽에 입력 하였기에 그림 Fig. 2.12와 같이 입 력 하였다. IPBN, JPBN은 격자의 I, J 번호가 이며, NPSERN은 개방경계의 순번이 되겠다.

image card 47~51은 남측의 농도경계조건, 52~56은 서측 농도경계조건, 57~61은 동측 농도경계조건, 62~66은 북측 농도경계조건을 입력하는 카드 이 며, 북측만 입력을 하였기 때문에 62~66번 image card를 입력 하였고 Fig. 2.13~17과 같이 나타내었다.

C62	LOCATION	OF I	CONC	BC'S (ON NOF	TH	BOUNDAR	RIES AND	SERIES	IDENTIFI	ERS	
* * * * * * * * * * *	I CBN : JCBN : NTSCRN : NTSCRN : NTSERN : NDSERN : NSFSERN : NSTSERN : NSDSERN : NSNSERN :	I CEI J CEI NUMBI TO II NORTI NORTI NORTI NORTI NORTI	LL IN ER OF NFLOW H BOL H BOL H BOL H BOL H BOL H BOL	IDEX IDEX IDEX IDEX IDEX IDEX INDARY INDARY INDARY INDARY INDARY INDARY	STEPS OUTFL CELL CELL CELL CELL CELL CELL	TC OW SAL TEM DYE SHE TOX COF	RECOVE PERATUR CONC 1 LLF1SH IC CONT ESIVE S -COHESI	TIME SEF TIME SEF TIME SEF TIME SEF LARVAE AMINANT SED CONC VE SED	FIED VAL RIES ID N SERIES I RIES ID N TIME SER CONC TIME CONC TIME CONC TIME	UES ON C UMBER D NUMBER UMBER IES ID N ME SERIE RIES ID E SERIES	HANGE UMBER S ID NUM NUMBER S ID NUMBI	ER
Č62	BBN JB 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 223 225 20 21 223 225 20 31 322 30 31 323 334 35	N 92 99222999999999999999999999999999999	SCRN 360 360 360 360 360 360 360 360 360 360	NSSER	NTSE	ନ ନ	NDSERN 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	NSFSER		NSDSERN 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	NSNSERN 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	

Fig. 2.13 image card 62





Fig. 2.15 image card 64





Fig. 2.17 image card 66



2.3 EFDC 결과



Fig. 2.19 Velocity distribution at rising tide time




Fig. 2.20 Velocity distribution at ebb tide time

Fig. 2.18~20까지의 그림은 계산 초기시간과, 밀물과 썰물일 때의 유속분포를 나타낸 그림이다. 최대 유속은 2.5m/s이다.



제 3 장 조류터빈의 축소모델 실험 및 CFD 비교

3.1 실험장치

3.1.1 순환수조

본 논문에 실험은 해양대학교의 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행 하였다. Fig. 3.1^[20]은 수조의 모형을 도식화 한 모습이며, 회류수조의 유 속발생은 2 Impeller Vertical Type(OV2 - 60B)이며, 수조의 전체 크기는 길이 12.5m, 폭 5.0m 높이 5.2m이다. 또한 본 실험이 진행 되는 관측부의 크기는 길이 5.0m 폭 1.8m 높이 1.2m이며, 수조의 가동시 사용되는 물의 용량은 60ton이고, 수조의 발생 유속은 0.1m/sec ~ 2.0m/sec 까지 이다. 그리고 수조 의 구동은 AC 22kW x 2set Impellor Motor로 구성되며, Fig. 3.3 작동패널에 의해 수위조정 및 유속조절이 된다.



Fig. 3.1 Circulating Water Channel









Fig. 3.3 Operation panel



3.1.2 차압계 및 피토튜브

실험에서 속도 측정을 위해 사용된 센서는 용량은 0~20kPa이며, 정밀도는 ±0.25%*FS*의 압력계인 Sensys사의 DWSD0020R1AA를 선정 하였으며, L자형 피토튜브를 이용하여 속도를 측정 하였으며, 측정 장소는 터빈의 1m 앞에서 측정을 하였다.



Fig. 3.4 Differential pressure gauge



Fig. 3.5 Pitot tube



3.1.3 토크센서 및 파우더 브레이크

수차의 효율을 직접적으로 나타내주는 토크 및 RPM을 측정을 위해 토크미 터와 파우더 브레이크를 설치해야 한다. Fig. 3.6은 SENSTECH사의 SBB-2K 모 델로 토크와 RPM을 동시에 측정 할 수 있는 모델을 선정 하였고, Fig. 3.7은 PORA 사의 PRB-YF모델로 팬이 부착된 공랭식 파우더 브레이크를 나타며, 본 실험의 경우 Fig. 3.8과 같이 베벨기어로 토크미터를 연결 하였으며, 데이터 취 합은 데이터 로그를 통하여 나타내었다. 센서의 용량은 표 3.1과 같다.

Table	3.1	Specifications	of	the	measuring	equipment
Table	0.1	opeenreations	01	ιnc	incusui ing	cquipment

Measuring Parameter	Measuring Range	Measuring Instrument
Torque	0~2 kgf-m	Torque meter
RPM	0~10,000 RPM	Magnetic type rotation detector
Brake	50 Nm	Powder type



Fig. 3.6 Torque meter and RPM sensor





Fig. 3.7 Powder brake









3.1.4 데이터 로거

Fig. 3.9는 Powertron사의 PT-1642 모델로 우측부분의 연결부가 있어 데이터 를 컴퓨터로 바로 받아 실시간으로 모니터링 할 수 있는 이점을 가지고 있으 며, 실시간 데이터와 평균데이터를 바로 엑셀 및 텍스트 같은 파일로 output 할 수 있다. 또한 영점을 오토로 잡을 수 있는 장점을 가진 데이터로거이다.



Fig. 3.9 Data logging system



3.1.5 블레이드 및 터빈

조류터빈에서 성능에 가장 중요한 부분은 블레이드 부분이고, Fig. 3.10는 본 실험에 사용된 블레이드의 모습이다. 날개 매수는 3매이며, 직경은 0.5m 이다. 터빈의 설계 조건은 Table. 3.2와 같다. 에어포일은 NACA-63421 사용하였으 며, 조류터빈 설계제원은 Table. 3.3에 나타내었다.



Fig. 3.10 Rotor Blade

Table 3.2 Design parameters

Parameters	value	
Designed Power	40 W	
Number of blade	3	
Blade profile	NACA-63421	
Rated water velocity	1 m/sec	
Tip speed ratio	5	
Diameter of roter	500 mm	



Local Position	θ [°]	Position [mm]	C [mm]	Airfoil distribution
0.05	23	12.5	15	Cylinder
0.1	23	25	15	Cylinder
0.25	18.529	62.5	52.365	NACA-63421
0.3	15.524	75	50.158	NACA-63421
0.35	13.055	87.5	47.951	NACA-63421
0.4	11.028	100	45.744	NACA-63421
0.45	9.35	112.5	43.537	NACA-63421
0.5	7.948	125	41.33	NACA-63421
0.55	6.764	137.5	39.123	NACA-63421
0.6	5.756	150	36.916	NACA-63421
0.65	4.893	162.5	34.709	NACA-63421
0.5	7.948	125	41.33	NACA-63421
0.55	6.764	137.5	39.123	NACA-63421
0.6	5.756	150	36.916	NACA-63421
0.65	4.893	162.5	34.709	NACA-63421
0.7	4.153	175	32.502	NACA-63421
0.75	3.523	187.5	30.295	NACA-63421
0.8	2.998	200	28.088	NACA-63421
0.85	2.593	212.5	25.881	NACA-63421
0.9	2.353	12255	23.674	NACA-63421
0.95	2.113	237.5	21.467	NACA-63421
1	1.873	250	19.261	NACA-63421

Table 3.3 Specification of blade



3.2 실험방법

실험은 다음과 같은 순서로 진행 된다. 회류수조의 운전을 위한 세팅을 우선 해야 한다. Fig. 3.12^[21]는 임펠러의 RPM에 따른 회류수조의 속도를 나타낸 그 래프 이다. 이 그림을 참조하여 회류수조에 임펠러를 가동시켜 측정 할 속도에 맞춘 후 수위를 다시 제파판(wave suppressing plate)까지 맞춰 Fig. 3.11^[21]의 A는 수위가 모자란 것이며, B는 수위가 높은 상태이고, C는 적정 수위를 나타 낸다. 그러므로 C처럼 만들어 준다. 회류수조의 세팅이 끝나면 powder brake 를 조정하여 RPM을 설계 RPM인 190RPM으로 만들어 준 후에 토크를 측정한 다. Data logger를 확인하며 유속 값에 따른 각각의 데이터 값을 기록한다.



Fig. 3.11 Flow level





Fig. 3.12 Velocity at the impeller RPM



3.3 실험결과 및 CFD결과 비교분석

조류발전 터빈의 실험 결과와 CFD를 통한 성능 특성을 Fig. 3.15, Fig. 3.16 에 나타내었다. CFD에 의한 계산 결과는 1.8m/s 이후에 출력이 떨어지는 것 을 확인 할 수 있었다. 또한 실험에 의한 출력 곡선을 보면 속도가 증가 할수 록 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며, CFD와 거의 일치하는 경향을 볼 수 가 있었다. CFD에서 최대 출력은 1.8m/s에서 얻을 수 있었으며, 최대 효율점 에서의 출력은 CFD에서 43.18W, 실험에서 42.38W을 얻었다. 효율은 CFD와 실험에서 설계 유속 1m/s에서 최대인 것을 확인 할 수 있었으며, CFD에서 0.44 실험에서 0.43의 효율을 확인 하였다.

Fig. 3.13과 Fig.3.14는 블레이드에서 3D 스트림라인과 Suction side 표면에서 의 스트림 라인을 보여 주고 있으며, 1m/s 이후 허브부터 팁부분으로 난류가 발생하는 것을 볼 수가 있었다. CFD해석방법은 4장과 동일하다.

실험에 관하여 Fig.3.12를 보면 2m/s의 유속까지 수조 운전이 가능하다고 나 오지만 기계의 노후화로 인하여 최대 1.4m/s까지 실험을 할 수가 없어 그 이 후는 확인 할 수가 없었다. 하지만 1.4m/s까지의 실험경향을 보면 CFD와 실 험의 경향이 비슷하게 나올 것이라 본다.





Fig. 3.14 Suction side surface streamlines





Fig. 3.15 Comparison of the power output at various



Fig. 3.16 Comparison of the coefficient of power over various water speeds



4. CFD에 의한 조류발전터빈의 성능해석

4.1 수치해석 기법

본 연구에서는 유체기계 해석에 우수한 성능을 보이는 상용 CFD코드인 CFX-13^[18]을 사용하였다.

일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLEC, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들압력에 기초한 코드들은 일반적으로 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 Multi-physics 문제 등에 적용될 수 있다.

유체기계의 정확한 해석을 위해서는 점성저층(viscous sublayer)영역을 안정 적으로 처리 할 수 있는 최적화된 난류모델들이 필요하다. 현재 상용코드에서 오랫동안 적용되어온 $k-\epsilon$ 모델과 벽 함수의 조합은 유체기계에서 요구되는 높은 해의 정밀도를 만족시킬 수 없다. 보다 정확한 해를 구하기 위해 점성저 층에 대한 해석이 요구되고, 이를 만족시키기 위해서는 벽면근처에 종횡비 (aspect-ratio)가 매우 큰, 높은 격자 밀집도의 확보가 요구된다. 이러한 요구 조 건을 만족하는 CFX-13의 수치기법의 핵심은 질량 방정식과, 운동량 방정식의 연동화(coupled formation)이다.

CFX-13은 압력기반 유한 체적법(finite volume method)을 완전 내재적(fully implicit)로 이산화하여 얻어지는 방정식을 대수다중격자법(algebric multigrid coupled solver)를 이용하여 해석한다. SIMPLE 등 고전적인 분리 접근방법에 비해 내재적 연결방법(implicit coupling)은 수렴을 가속화시키고, 압축성 유동 에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있고, 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있는 장점을 갖는다.

유체기계에서 난류모델의 적용에 있어 아주 간단한 난류모델도 충분한 정확



- 40 -

도를 제공한다는 입장과 해석 정확도의 확보를 위해서는 가장 최신의 난류모 델과 천이 모델을 사용해야 한다는 견해가 있다.

이러한 견해의 차이는 엔지니어가 해석하는 유체기계가 서로 다르고 요구되는 정밀도에 대한 만족범위가 다르기 때문이다. 특히 유체기계의 설계점 영역에서는 점성과 난류효과는 단지 전체 손실에 미소한 추가적인 기여를 하며, 이러한 유도장에서는 난류모델이나 천이모델의 정밀도가 상대적으로 중요하지 않다. 그러나 1-방정식 모델이나, 2-방정식 모델은 계산시간을 크게 증가시키지 않으므로, 해석의 일관성을 위해 적절히 사용하는 것이 좋다.





지배방정식은 유체의 흐름을 예측 할 수 있는 수학적이고 물리적인 방정식 으로 구성되어 있다. 또한 상황에 맞는 수학적 방정식과 물리적인 알고리즘이 중요하기 때문에 다양한 방정식을 적절하게 사용해야 한다.

일반적인 유동에서 다루는 운동방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이며, 식 4.1, 식 4.2 식 4.3과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0$$
(4.1)

여기서, V_x, V_y, V_z= x, y, z 방향의 속도벡터요소, ρ=밀도, t=시간을 나타 낸다.

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \delta_{ij}\lambda\frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$
(4.2)

여기서, au_{ij} =응력텐서, u_i =직교속도, μ =점성계수, λ =체적점성계수를 나타 낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z C_p T_o) \\
= \frac{\partial}{\partial x}(K\frac{\partial T_o}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K\frac{\partial T_o}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K\frac{\partial T_o}{\partial z}) + W^v + E^k + Q_v + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t}$$
(4.3)

여기서, $C_p = 비열$, $T_o = 전온도$, K = 열전도율, $W^v = 점성일항$,

$$E^k$$
=운동에너지, Q_v =체적열원, Φ =점성발열항을 나타낸다.

난류유동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리 량에 대해 푼다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.



4.1.2 이산화방법

Fig. 4.1에 나타낸 순서도는 일반적인 해석순서를 나타낸다. 순서도에 나타난 각 방정식의 해는 수치적으로 두 가지의 지배적인 다음의 과정을 통해 구해진 다.

1. 비선형 방정식의 선형화와 행렬 구성

2. 대수다중격자법을 이용한 선형방정식의 풀이



Fig. 4.1 General process of computational fluid dynamic



CFX는 이산화된 선형 방정식 시스템을 풀기 위해 multigrid accelerated Incomplete Lower Upper (ILU) 분해 기술을 사용한다. 이 방법은 반복계산 방 법으로써 일련의 반복계산을 통해 정확한 해에 도달하는 방법이다. 이산화된 방정식의 선형화된 시스템은 일반적으로 식(4.4)와 같이 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$[A][\phi] = [b] \tag{4.4}$$

여기서 [A]는 계수 행렬, $[\phi]$ 는 해 벡터, [b]는 우변항을 나타낸다.

위 방정식은 근사해 f(n)에서 시작하여, f(n)을 이용한 수정과정을 통해 더 나은 해인 f(n+1)를 구하는 일련의 반복과정을 통해 풀 수 있다.

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \tag{4.5}$$

여기서 f(n)은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\dot{A}\phi' = r^n \tag{4.6}$$

여기서 r^n 은 오차값이며, 식(4.7)과 같이 정의된다.

$$r^n = b - A\phi^n \tag{4.7}$$

이와 같은 과정을 반복적으로 적용하면 원하는 정확도의 해를 구할 수 있다. 근본적으로, ILU와 같은 반복 해법은 격자수의 증가와 종횡비의 증가에 따라 성능이 감소하는 경향이 있다. 그러나, 다중격자(multigrid) 기법을 적용함으로 써 이 기법의 성능을 상당히 향상시킬 수 있다. 많은 반전도치법의 수렴성은 다중격자기법을 사용함으로써 향상시킬 수 있다.다중격자기법은 조밀격자(fine mesh)에서 초기계산을 수행하고 점진적으로 가상의 성긴격자(coarse mesh)에 서 반복계산을 수행한 후, 최종결과를 원래의 조밀격자로 전달하는 방법이다. 수치해석적 관점에서 볼 때, 다중격자기법은 상당한 장점이 있다. 주어진 격자 크기에 대해서, 반복계산법은 단지 격자 간격 order의 파장길이를 갖는 오차를 감소시켜주는 데 있어서만 효율적이다. 따라서, 보다 짧은 파장 오차는 아주 빠르게 감소하는 반면에, 해석영역크기의 차수를 갖는 오차를 사라지게 하기 위해서는 상당히 긴 시간이 필요하다. 다중격자기법은 이 문제를 격자 간격보



다 더 긴 파장 오차가 보다 짧은 파장길이처럼 나타나도록 일련의 성긴격자들 을 사용함으로써 우회적으로 해결한다. 서로 다른 격자 간격을 사용하여 격자 를 생성할 필요를 없애기 위해, CFX-13는 대수 다중격자기법을 사용한다. 대수 다중격자(Algebraic multigrid)는 조밀격자 방정식의 합을 이용해 성긴격자에서 의 이산화방정식을 구성한다. 따라서, 반복계산과정 동안 격자간격의 가상 조 대화(virtual coarsening)과 정확한 해를 얻기 위한 격자 재개선(mesh re-refining)이 일어난다. 이 기법은 수렴성을 현저하게 향상시켜 주며, 비선형 방정식의 이산화가 단지 가장 조밀한 격자에 대해 한번만 수행되기 때문에 다 른 다중격자기법보다 경제적이라는 장점이 있다. CFX는 부가 교정(additive correction)이라고 불리는 다중격자의 독특한 방법을 사용한다. 이 방법은 이산 화 방정식이 제어 체적에 걸친 보존량의 균형을 나타낸다는 장점을 가지고 있 으므로, CFX-Solver와 이상적으로 결합된다. 성긴격자 방정식은 아래에 보여진 것처럼 더 큰 제어체적에서 원래의 제어체적을 합침으로써 만들 수 있다.

CFX는 내재 압력 기반(implicit pressure based) 방법을 사용하며, 여기서 사용되는 주요 독립변수들은 (*P*, *u_i*, *H*)이다. 일반적으로 범용 상용코드는 위의 변수에 대해 해석을 수행하며, 이는 현장에서 일반적으로 부딪히는 비압축성 유동의 해석이 용이하기 때문이다.

Fig. 4.2에서 실선으로 나타난 것은 일반적으로 알려져 있는 격자이다. 실선 으로 나타난 격자를 다시 나누어 점선으로 표현된 하위요소(sub-element)를 구 성하며 제어체적은 음영으로 나타낸 부분과 같이 노드(node)를 둘러싼 하위요 소들로 구성되며, hexa, tetra, wedge, pyrimd등 모든 요소(element) 형태에 대 하여 동일하게 적용된다. 모든 변수 값과 유체의 물성치는 이 노드에 저장된 다.





Fig. 4.2 Multigrid method process



수치해석의 정확도는 노드 값으로 표현되는 적분점(IP)들에서의 표면적분 (fluxes) 값들의 정확도에 의해 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해는 격자 노드 에 저장되지만, 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분 점에서의 해나 해의 구배 값을 필요로 하며 따라서, 요소 내부에서의 해의 변 화를 계산하기 위해 유한요소형상함수(finite element shape function)가 사용된 다. 이러한 방식을 FEM based FVM 혹은 element based FVM이라 한다. Fig. 4.5과 같이 제어 체적면에서의 적분점의 개수가 2차원인 경우 일반적인 FVM 의 4개에 비해 8개로 2배가 많은 것을 알 수 있다. 3D 육면체 격자의 경우 6 개에서 24개로, 사면체의 경우 4개에서 평균 60개로 적분 점이 많아지므로 비 교적 성긴 격자에 대해서도 해의 정확도가 뛰어난 장점이 있다.



Fig. 4.3 Mesh arrangement and terminology for dual mesh



식(4.1), 식(4.2), 식(4.3)의 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 질량, 운동량, 그리고 에너지 방정식에 대한 이산화 적분식은 식(4.8), 식(4.9), 식 (4.10)과 같다.

$$\rho V(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t}) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip} = 0$$
(4.8)

$$\rho V(\frac{U_i - U_i^0}{\Delta t}) + \sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} (\mu_{eff} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_u} V$$

$$(4.9)$$

$$\rho V(\frac{(H-P/\rho) - (H^0 - P^0/\rho)}{\Delta t}) + \sum_{ip} m_{ip} H_{ip} = \sum_{ip} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_{\phi}} V$$
(4.10)

여기서, (Δn_j)_{ip}는 적분점 위치에서 국부 표면 벡터이다. 그리고, 제한체적의 적분점 표면을 통과하는 m_{ip}는 질량유동이다. 모든 방정식들은 시간간격의 제 한을 피하기 위하여 implicit하게 다루어지며, 비정상 항에는 1차와 2차 backward Euler 방정식이 사용된다. 확산항은 요소형상함수(element shape function)의 미분형태로 각 적분점의 위치에서 구배계수를 계산함으로써 결정 된다. 대류항은 Upwind, Quick 등 몇몇 기법에 의해 평가될 수 있으나, 기본 설정된 기법인 고해상도(high-resolution) 기법을 사용한다. 고해상도 기법은 대 류항에 대한 2차 정확도의 upwind biased approach에 기초한 기법이며 Barth 와 Jesperson에 의해 기술된 방법과 유사하고 식(4.11)과 같다.

$$\phi_{ip} = \phi_P + \underline{\beta(\Delta\phi)_{ip}} \Delta \overline{r_{ip}}$$
(4.11)

식(4.12)와 같이 divergence 형태에서 모든 항들에 대해 질량 divergence 항 은 표면적분의 형태로 변환된다.

$$m_{ip} = \rho_{ip} u_{j,ip} \Delta n_{j,ip} \tag{4.12}$$

밀도는 다른 대류 항처럼 표준 고해상도 기술을 적용하여 식(4.13)과 같이

Collection

계산된다.

$$\rho_{ip} = \rho_P + \underline{\beta(\Delta\rho)_{ip}} \Delta \overline{r_{ip}}$$
(4.13)

이 upwind biased 평가는 운동량과 에너지 방정식의 다른 대류량과 마찬가 지로 유동이 상당히 압축성이어도 안정적이며, 2차의 정확도를 가진다. Implicit 방법에서 중요한 것은 *pu*의 선형화이다. 먼저 *pu*는 Newton-Raphson 선형화에 의해 확정된다.

$$(\rho u) \approx \rho^{n} u^{0} + \rho^{0} u^{n} - \rho^{0} u^{0}$$
(4.14)

여기서 위첨자 n은 새로운 값 (implicit)을 의미하고 0은 예전 (지연된 값) 시간레벨이다. 이러한 선형화는 전 영역에 걸친 마하수의 신뢰성 있는 수렴을 보장한다.

마지막으로, 식(4.15)와 같이 밀도에 대한 상태방정식은 압력의 항으로 구성 된 ρ^n 의 implicit 표현을 얻기 위하여 차분되며 앞서 제공된 상태방정식에서



 $\rho^{n} = \rho^{0} + \frac{\partial \rho}{\partial P} (P^{n} - P^{0})$

(4.15)



4.1.3 난류모델

난류 모델은 평균성분과 변동성분을 도입하여 수정된 수송 방정식 (transport equation)의 해를 구하기 위한 수단이다. 예를 들어, 속도 U는 평균 성분 U 와 시간에 따른 변동성분 u로 나눌 수 있다.

$$U = \overline{U} + u \tag{4.16}$$

$$\overrightarrow{a} \overrightarrow{\gamma} \overrightarrow{k}, \overrightarrow{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t + \Delta t} U dt$$
(4.17)

Δt는 난류의 변동 scale보다 상대적으로 큰 시간 scale이지만, 방정식을 푸는 전체 시간보다는 작은 시간 scale이다. 원래의 수송방정식에 시간 평균된 물리 량을 대입하면 식(4.18), 식(4.19), 식(4.20)과 같은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{4.18}$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (\tau - \overline{\rho u \otimes u}) + S_M$$
(4.19)

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \rho \overline{u \phi}) + S_E$$
(4.20)

여기서 τ 는 분자 응력 텐서 (molecular stress tensor)이다.

연속방정식은 변화가 없으나, 운동량과 스칼라 수송방정식은 레이놀즈 응력 항인 $\rho u \otimes u$, 그리고 레이놀즈 유속, $\rho u \phi$ 등, 분자 확산 유속에 난류 유속항 을 더한 항을 포함하고 있다. 이들 항은 비 평균화 방정식의 비선형 대류항으 로부터 나타난다. 이 항들은 turbulent velocity fluctuation에 의한 대류는 molecular level에서의 thermal fluctuation에 의해 야기되는 혼합보다 더 크다 는 사실을 나타낸다. 고 레이놀즈수에서, turbulent velocity fluctuation은 thermal fluctuation의 평균자유경로 (mean free path)보다 훨씬 큰 길이 스케 일을 갖는다. 따라서, 난류 유속은 분자 유속보다 훨씬 크게 된다. Reynolds



Averaged Energy 방정식은 식(4.21)과 같다.

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho U h_{tot} + \rho \overline{uh} - \lambda \nabla T\right) = \frac{\partial P}{\partial t}$$
(4.21)

여기서 평균된 전체 엔탈피는 식(4.22)와 같이 주어진다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \tag{4.22}$$

전엔탈피(total enthalpy)는 평균운동에너지 (mean kinetic energy)와 난류운 동에너지(turbulent kinetic energy)를 포함한다.

여기서 난류운동에너지는 식 (4.23)과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{2}\overline{u^2} \tag{4.23}$$

k는 난류 운동 에너지이고 속도 변동의 분산으로 정의되고, 차원은 (L^2T^2) 이 며, 단위는 m^2/s^2 이다. ε 은 난류 소산율(turbulence eddy dissipation)이고 단 위시간당 k의 차원을 갖는다. 즉, (L^2T^3) , m^2/s^3 이다. $k-\varepsilon$ 모델은 기본 방정 식에 2개의 변수가 추가된다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{4.24}$$

운동량 방정식 :

ollection

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho U \otimes U) - \nabla \bullet (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla \rho' + \nabla \bullet (\mu_{eff} \nabla U)^T + B$$

(4.25)

여기서 B는 body force의 합이고, 는 난류를 고려한 유효 점성이다. 그 리고, p'은 식(4.26)과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.



$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k \tag{4.26}$$

Zero-방정식 모델과 같이, *k*-ε 모델은 와점성 개념에 기초한다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{4.27}$$

여기서 는 난류 점성이다. *k*-ε 모델은 난류 점성을 난류 운동에너지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4.28}$$

여기서 는 상수이다.

Collection

 k와 &
 운동에너지와 난류 소산율에 대한 식(4.29), 식(4.30)의 식으로

 부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon$$
(4.29)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon)$$
(4.30)

여기서 C_{e1} , C_{e2} , σ_k 는 모델상수이다. P_k 는 점성과 부력에 따른 난류생성항 이며, 식(4.31)과 같이 표현된다.

$$P_{k} = \mu_{t} \nabla U \bullet (\nabla U + \Delta U^{T}) - \frac{2}{3} \nabla \bullet U(3\mu_{t} \nabla \bullet U + \rho k) + P_{k}$$
(4.31)

비압축성 유동에 대해, ▽ • *U*는 작고 오른쪽 두 번째항은 생성에 크게 기 여하지 않는다. 압축성 유동의 경우 ▽ • *U*는 shock이 발생하는 구역에서만 큰 값을 갖는다. 3µ_t항은 "frozen stress"가정에 기초한다. 이 값은 *k*와 ε값이 shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

수중 보텍스 수치해석을 위한 난류모델은 Menter^[22,23]의 1_ SST 난류 모



델을 적용하였다. 일반적으로 Wilcox model의 단점으로 자유유선에 민감한 결 과를 보이는 것을 들 수 있는데 CFX에서는 이러한 단점을 보완하여 벽면근처 에서는 1 모델을 사용하고 바깥쪽은 1 모델을 사용하는 BSL(Baseline Model)과 SST(Shear Stress Transport) 모델을 지원한다. 🗗 모델의 또 다른 장 점은 쉽게 자동처리 벽 처리법(automatic wall treatment)로 확장이 가능하다는 것이다. 이는 가능한 격자의 에 무관하게 해의 정확성을 확보하기 위한 것 이다. 표준 viscous sub-layer model 들이 벽면 전단응력을 정확히 해석하기 의 수준을 요구하는 반면자동벽면처리 기법은 성긴 벽면 격자를 위해 1_ SST 모델은 난류전단응력의 수송 처리 할 수 있는 장점이 있다. (transport)을 계산하기 때문에 역 압력구배에 의해 발생하는 유동박리 크기와 발생 시점을 정확히 예측할 수 있다. Wilcox 모델과 1 모델의 장점만을 취 해 BSL 모델이 개발되었으나, 매끄러운 표면에 발생하는 유동박리 시점 및 크 기에 대한 정확한 예측에 실패하였다. 이러한 원인에 대한 상세한 내용은 Menter의 연구결과에 상세히 기술되어 있다. 가장 주된 원인으로서 이전의 난 류모델들은 모두 난류전단응력의 수송에 대한 고려를 하지 않았기 때문이며, 그 결과 eddy-viscosity에 대한 과다 예측을 하였다. 수송항은 식(4.32)와 같이 eddy-viscosity 형태의 방정식에 대한 제한으로 얻어질 수 있다.

(4.32)

여기서, , Fblending function, S=strain rate

Blending function은 난류모델의 성공을 위해 매우 중요한 요소이다. 이 방 정식의 형태는 표면과의 가장 가까운 거리와 유동변수를 기반으로 한다.

(4.33)

(4.34)



여기서, 1는 벽면으로부터 가장 가까운 곳까지의 거리를 의미한다. 1,는 동 점성계수이다.

(4.35)

(4.37)

SST 모델이나 BSL 모델은 1. 과 1. 사이의 blending을 위해 벽면과 가 장 가까운 거리에 위치한 노드의 거리정보를 필요로 한다. Wall scale 방정식 은 식(4.38)과 같은 단순한 형태의 방정식으로부터 구할 수 있다.

(4.38)

여기서, _는 wall scale 값을 의미한다. 벽면거리는 식(4.39)에 의해 wall scale로부터 계산된다.

1945

Wall Distance =

(4.39)



4.2 계산격자 및 경계조건

본 연구에서는 축소모형 40W 조류터빈의 CFD 해석을 수행하여 축소터빈의 실험결과를 비교 하고, 100kW급 조류터빈을 CFD 해석 수행하였다. 터빈의 제 원은 실험에 사용된 축소 모델과 동일하며 직경 4.8m, 유속 3m/s로 설계 하였 다. Fig. 4.4는 CFD 계산에 사용된 격자를 보이고 있으며, ICEM-CFD Ver.13을 이용하여 Hexa mesh를 생성 하였으며, 총 노드 수는 축소모형이 4,130,600 노 드 수를 사용 하였으며, 100kW급 조류터빈에서는 8,386,336 노드를 사용하여 계산 하였다. 격자를 생성함에 있어 y+ 값을 5이하로 맞춰 계산 하였으며 turbulence model은 *k*-ω SST 모델을 사용 하였다. 계산에 사용한 컴퓨터는 해석용 서버 컴퓨터를 사용 하였다.

경계조건은 Fig. 4.5와 같이 입구 조건은 유속조건을 주었으며, 출구조건은 averaged static pressure 조건을 설정 하였다. 단일 블레이드 계산을 위하여 양쪽 주기 경계면에 preiodic 조건을 부여 하였다. 로터 블레이드로부터 입구 까지 거리는 로터 직경의 3배, 윗면으로 5배 후방으로 7배를 확보하였으며, 상 대회전 조건을 부여 하였다. 계산조건은 Table. 4.1에 요약정리 하였다.

TSR	water speed(m/s)	rotating speed(RPM)
6.3	2.4	60
5.8	2.6	60
5.3	2.8	60
5.0	3.0	60
4.7	3.2	60
3.8	4.0	60
3.4	4.5	60
3.0	5.0	60

Table 4.1	Simulation	conditions
-----------	------------	------------





(1) Near by the rotor



(2) Outer domain

Fig. 4.4 Computational grids



4.3 100kW급 조류발전 터빈의 성능해석 결과

4.3.1 블레이드 단면 흐름 특성

Fig. 4.5 ~ Fig. 4.11까지 로터 블레이드 주위로 발생하는 3차원 유동현상 등 의 정확한 이해를 위해 입구 속도의 변화에 따라 흡입면의 표면 유선과 블레 이드의 3차원 유선을 나타내었다.

유속이 3.2m/s 까지는 받음각의 변화 폭이 적어 허브 근방 지역을 제외 하 고는 반경류가 거의 나타나고 있지 않으며, 유속이 4m/s 이상부터는 반경류의 영역이 넓어 지면서 4.5m/s 부터는 전반적으로 반경류를 형성하는 것을 알 수 있다. 이러한 반경류에 의해 후연 박리가 형성 됨을 알 수 있다.



(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.5 Streamline - U_{in}=2.4 m/s





Fig. 4.6 Streamline - U_{in} =2.6 m/s





(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.7 Streamline - U_{in} =2.8 m/s





(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.8 Streamline - Uin=3.0 m/s





(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.9 Streamline - U_{in} =3.2 m/s




(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.10 Streamline - U_{in} =4.0 m/s





(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.11 Streamline - U_{in} =4.5 m/s





(1) 3D Streamline (2) Suction side surface

Fig. 4.12 Streamline - U_{in} =5.0 m/s



4.3.2 효율 및 출력 특성

Fig. 4.12에 입구 유속의 변화에 따른 출력 특성 변화를 나타내었다. 유속 3.2 이후로 효율이 떨어지는 것을 확인했기 때문에 유속 폭을 0.5m/s로 주 계산을 하였고 속도에 따라 출력은 증가 하지만 효율은 3.2m/s부터 감소하기 시작하 였다. 최대 효율점이 3m/s에서의 출력은 119kW 이며 효율은 약 0.49이다.



Fig. 4.13 Comparison of the power







제 5 장 결론

본 연구는 EFDC를 이용하여 조류속도를 구하는 해석을 진행 하였고, 축소 모델로 실험과, 상용코드인 ANSYS CFX를 사용하여 비교 하였으며, 100kW급 조류발전터빈을 CFX를 이용하여 성능해석을 하였다.

다음과 같은 결론으로 요약 정리 할 수 있다.

- 1. EFDC를 통하여 설정지역의 조류 속도를 예측 하였다. 최대 속도는 2.5m/s이다.
- 2. 조류터빈의 축소모델 실험과 CFD해석을 통하여 설계한 블레이드의 성능 특성을 비교 하였다. 수치해석 데이터와 실험 데이터의 경향이 비슷한 경 향을 보이는 것을 확인 하였다.
- CFD에서의 최대효율은 0.44, 실험에서의 최대 효율은 0.43을 얻을 수 있었고, 최대 효율점에서의 출력은 CFD에서 43.18W, 축소모델실험에서 42.38W을 얻었다.
- 4. 100kW급 조류터빈 CFD 해석을 통하여 얻은 최대 효율은 약 0.49이며 이 때 출력은 119kW 이다.

감사의 글

공부를 더 해야겠다는 마음을 먹고 한국해양대학교로 편입을 하여 대학원에 진학한지 벌써 2년이라는 시간이 지나 이렇게 결실을 맺게 되었습니다. 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으시고 학문의 길을 열어 주신 이영호 지도교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 심사과 정을 통해 부족한 논문을 세심하게 다듬어 빛내 주신 정재현 교수님과 정형호 교수님께도 감사를 드립니다. 아울러 학위논문이 완성되기까지 수치해석과 실 험과정을 많이 도와준 이낙중 형에게 감사를 드립니다. 그리고 논문과 학업에 진취할 수 있었던 것은 항상 도움을 주는 유동정보연구실의 식구들, 듬짐한 김 창구형, 취업하신 최현준형, 김문오형, 김정윤형, 박사과정인 이낙중형, 박지훈 형, 동기이자 동생인 김병하, 외국에서 공부하러온 Joji Wata, Nirmal Acharya, Zhao Yuxin, Aatma Kayastha가 있었기에 가능했다고 생각합니다. 무엇보다 감사한 것은 멀리 떨어져 있어서 함께 많은 시간을 보내지 못한 것이 아쉬운 우리 가족들, 부족한 저를 믿고 항상 저에게 힘을 주신 할머니, 아버지, 어머 니, 누나, 공부하기 부족함 없이 뒤에서 지켜준 이모, 외삼촌에게 고마움을 전 합니다.

저에게 주신 따뜻한 마음을 간직하면서, 앞으로 더 노력하는 공학자가 되도록 하겠습니다. 진심으로 감사드립니다.



참고문헌

- Bu-Gi Kim, 2012, A Study on the Performance of an 100kW Class Tidal Current Turbine, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18 No.2 pp.145-152
- [2] Beom-Su Hyun, 2011, Technology status and prospect of Tidal current power generation, Bulletin of the Society of naval Architects of Korea, Vol. 48 No.3 pp.12-19
- [3] 2012 New & Renewable Energy White Paper, 2012, 에너지관리공단 신 재생에너지센터
- [4] Chang-jo Yang, 2011, Optimal Rotor Blade Design for Tidal In-stream Energy, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol.17 No.1 pp.75-82
- [5] 현범수, 조철희, 김문찬, 문채주, 2011, 조류발전 기술현황과 전망, 대한조 선학회지, 제48권 제3호 pp.12-19
- [6] 조철희, 임진영, 채광수, 박노식, 2009, 해양 조류발전단지 간섭 연구, 한 국해양공학학회지, 제23권, 제1호, pp.109-113
- [7] 김부기, 박종혁, 양창조, 최민선, 2010, 100kW급 조류발전 터빈의 성능해
 석, 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp.347
- [8] 신범식, 김규한, 김종현, 백승화, 2011, EFDC모형을 이용한 가로림만의 조력발전 위치 타당성 검토, 한국해안·해양공학회, 제23권, 제6호, pp.489-495



- [9] Susana Baston, Robert E.Harris, David K. Woolf, Robert A. Hiley, Jonathan C. Side, 2013, Sensitivity Analysis of the Turbulence Closure Models in the Assessment of Tidal Energy Resource in Orkney, 2013EWTEC
- [10] 저자 공학박사 이동주 편저, 2009, EFDC활용길라잡이 (ISBN 978-89-8225-735-3)
- [11] Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- [12] efdc dsi description, https://www.ds-international.com
- [13] 김연수, 2011, EFDC모형을 이용한 호소 내 수질 특성 분석, 석사학위논 문, 인하대학교
- [14] 이창림, 황필선, 김현식, 김남형, 허영택, 2012, EFDC모형을 이용한 주문 진항의 해수흐름에 관한연구, 대한토목학회 정기학술대회, pp.2104-2108
- [15] Tetra T ech, Inc., 2002, Hydrodynamic and transport extension to the EFDC model. A report to the U. S. Environmental Protec\-tion Agency, Fairfax, VA.
- [16] Tetra Tech, inc 2002. User's manual for Environmental Fluid Dynamics Code. Hydro Version(EFDC-Hydro) Release 1.00
- [17] Galperin, B., L. H. Kantha, S. Hassid, and A. Rosati, 1988, A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. J. Atmos. Sci., 45, 55-62.
- [18] 국립환경과학원, 실험을 통한 수질오염물질의 이송 및 확산 모의검증 기법 개발 및 적용, 2011년도 연구사업 보고서
- [19] 박희영, 2008, 대산항의 EFDC를 이용한 3차원 준설 부유사 이송에 관한 연구, 석사학위논문, 군산대학교





- [20] 김무롱, 2006, 위상 평균법을 이용한 진동날개 주위 유동의 실험적 해석, 석사학위논문, 한국해양대학교
- [21] 회류수조 및 관련기기 사용설명서, 한국해양대학교 조선공학과
- [22] meter F.R., kuntz M. and Langtry R., 2003, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence, Heat and Mass Transfer, Begell House, Redding, CT
- [23] ANSYS-CFX13 Manual, 2010, ANSYS



