

# 조류발전 장치의 후류 해석

(Downstream Wake Analysis of Tidal Current Power Device)



**조철희**  
인하대학교 조선해양공학과 교수  
chjo@inha.ac.kr



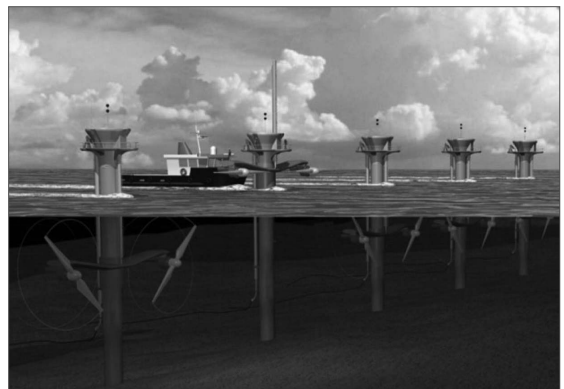
**이강희**  
인하대학교 조선해양공학과  
박사과정  
kanghee@inha.edu

## 1. 조류발전 개요

최근 지구온난화에 따른 대체에너지 자원 확보가 국가적으로 중요한 과제로 대두되고 있다. 우리나라는 삼면이 바다이고 특히 서남해안의 높은 유속은 조류 발전에 적합한 환경을 갖고 있다. 인천 및 서남해안은 세계에서 주목받는 조류발전의 적지로 평가받고 있다. 인천지역은 조차가 10m에 달하고 유속이 빠른 지역이 광대역으로 분포되어 있다. 또한 남해안은 지형적인 특성과 많은 섬들 사이의 채널 형성으로 인해 국지적으로 유속이 증폭되어 조류발전 적용에 적합한 지역이 많이 분포하고 있다.

조류발전은 해류의 직선 운동에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나 기계장치의 회전운동으로 변환하여 전기를 생산하는 원리로 해수의 유속이 빠른 지역에 적용이 가능하다. 조류발전의 장점은 타 재생에너지에 비해 발전량 예측이 가능하다는 점이다. 또한 날씨

나 계절에 관계없이 발전함으로써 가동률이 높고 연속적인 발전이 가능한 신뢰성 있는 에너지원이며 해수의 흐름을 방해하거나 주변 환경영향이 적은 친환경 에너지원이다. 조수간만의 차이가 큰 지역은 주로 조류속도가 높고, 지형적으로 섬 사이 지역은 조류속도가 높아 조류발전 후보지가 많다. 조류발전 기술은 해



〈그림 1〉 조류발전 개념도 (MCT 사)

양뿐만 아니라 유속이 빠른 강이나 발전소의 냉각수 방수로에도 적용이 가능하다. <그림 1>은 여러 대의 조류발전 장치를 설치한 개념도이다.

발전장치의 단독 성능도 중요하지만 조류발전의 상용화를 위해 대용량 발전이 가능한 단지개발이 필수적으로 고려되어야 하고, 발전단지 개발 시 경제성 및 타당성 조사를 위한 전체 발전용량 산정이 매우 중요하다. 한정된 영역에 다수의 발전장치를 배치할 경우 터빈의 후류에 의해 간섭효과가 발생하며, 이를 고려하여 전체 발전용량을 추정해야 한다. 현재 발전단지 개발을 위한 전체 발전용량 산정 기법이 정립되어 있지 않기 때문에 정확한 경제성 평가를 수행하는데 어려움이 있다. 특히 여러 개의 장치가 설치될 경우 후류에 의한 난류와 간섭으로 인해 후방 터빈의 효율이 떨어지며 이는 배치방법, 유속, 터빈크기 등 여러 요소가 영향을 미친다. 본 논문에서는 터빈 후류 해석을 수행하였다.

## 2. 터빈 후류 분석 개요

현재 전 세계적으로 실용 발전장치 개발을 위한 요소기술 개발 및 초기모델의 성능검증이 많이 이루어졌고, 대용량 발전을 위해 다배열 설치 계획이 발표되고 있다. 조류발전은 1.5m/s 이상의 유속이 발생하는 지역에 적합하며 항로, 어초지역, 개발 제한구역, 어로지역, 수심확보 등 다양한 요소들에 의해 개발 지역이 고려된다. 조류발전은 발전장치의 배치와 이격거리에 따라 단일 유닛당 발전용량과 단지 전체의 발전용량이 결정되며, 간섭효과에 의한 출력감소와 공간 활용의 효율성을 고려하여 최적 배치가 도출되어야 한다. <그림 2>는 섬 사이의 빠른 유속이 발생하는 지역에 조류발전단지를 배치한 개념도이다.

다수의 발전장치를 적용하기 위해 간섭효과에 대한 연구가 수행되어야 하며, 이를 위해 회전체인 터빈의 후류연구가 중요한 연구과제로 대두되고 있다. 터빈의 특성과 터빈 회전속도, 유속 등 다양한 요소에 의해 터빈 후류의 패턴이 변화하게 되며 후류에 위치하는 터빈의 출력 감소 정도를 분석하기 위해 터빈 후방의 유동장 분석이 선행되어야 한다.

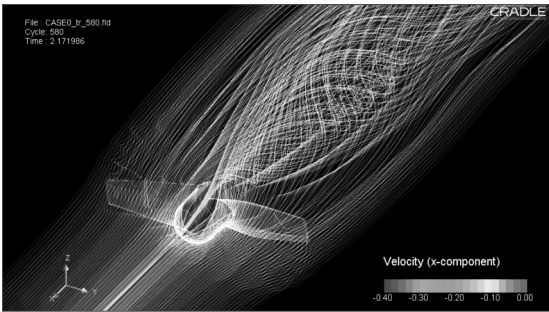


<그림 2> 조류발전단지 개념도

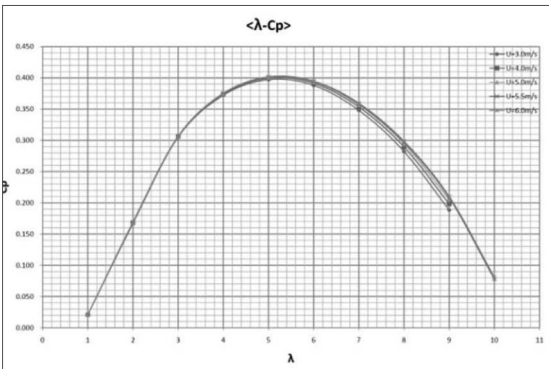
## 3. 후류 유동분석 기법

터빈 디스크 이론 및 블레이드의 각운동량 이론에 의해, 터빈에 토크를 발생시킨 유체입자는 반작용력으로 반대방향의 각운동량을 얻게 되며 <그림 3>과 같이 터빈에 의한 회전성분의 후류(Wake)가 발생한다. 다수의 터빈을 설치 할 경우 터빈 간격이 좁아지면 난류로 인해 발전효율이 감소하고, 간격이 넓어지게 되면 공간과 비용이 증가하는 문제가 발생한다. 주어진 환경에서 경제성 및 발전용량을 고려하여 많은 터빈을 배치해야 하므로 후류에 의한 간섭이 고려되어야 하며, 터빈의 배치 및 간격이 전체 발전용량을 결정한다.

조류발전시스템의 에너지 변환장치인 터빈은 매우 중요한 요소로써 시스템 전체 효율을 좌우하며



〈그림 3〉 터빈의 후류(Wake)

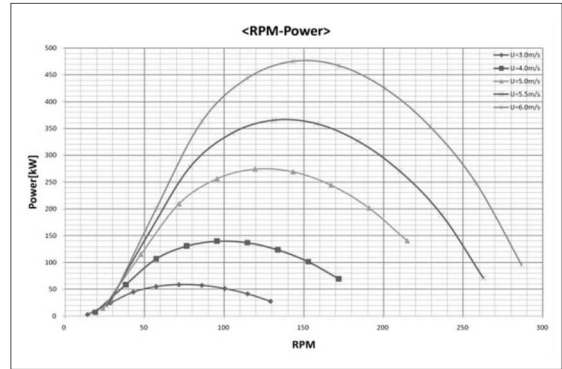


〈그림 4〉 터빈의 성능곡선

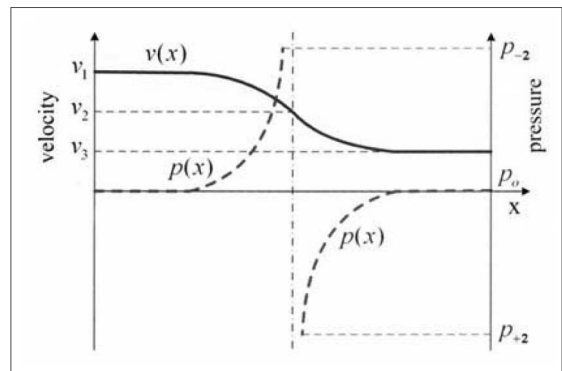
유속, 유향 등에 의해 효율이 변화 할 수 있다. 〈그림 4〉와 같이 터빈의 회전속도에 따른 에너지 변환효율을 보여주는 성능곡선은 터빈의 고유한 특성을 보여주며, 터빈 성능곡선을 바탕으로 다양한 유속에 따른 터빈의 출력을 〈그림 5〉와 같이 산정할 수 있다.

해당 지역의 유속 정보가 존재한다면 성능곡선에 의해 터빈의 출력을 추정할 수 있으므로, 실험 및 유동 수치해석을 통해 터빈의 후류를 분석하여 축 방향 이격 거리에 따른 발전량을 추정할 수 있다.

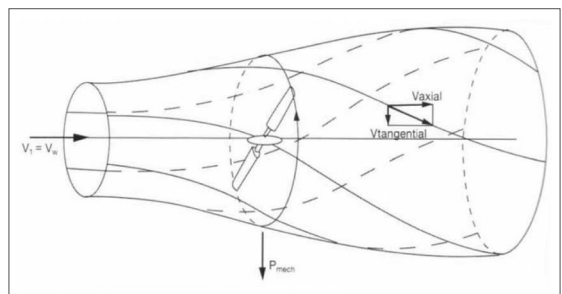
〈그림 6〉은 터빈 주위의 유속 및 압력 변화를 보여준다. 터빈 후류의 유동은 운동량이 감소되어 상류의 유속에 비해 줄어든다. 이 현상에 의해 후류에 설치되는 터빈은 상류에 위치한 터빈보다 출력이 감소하게 된다.



〈그림 5〉 유속별 터빈 출력



〈그림 6〉 터빈 주위의 유속 및 압력 변화



〈그림 7〉 터빈에 의한 유동의 각운동량 발생

실제 터빈 주위의 유동은 터빈의 회전운동에 의해 회전 반대방향으로 각운동량을 가지게 되며 후류 유동은 각운동량에 의해 유선이 꼬이는 현상이 발생한다. 수평축 터빈은 블레이드 스캔별로 유동의

입사각이 익형의 최적받음각으로 형성되도록 설계된다. 본 논문에서는 단일 터빈을 대상으로 하여 CFD를 이용한 비정상 유동해석을 수행하여 조류발전용 수평축 터빈의 후방 유속분포를 통해 후류 특성을 분석하였다.

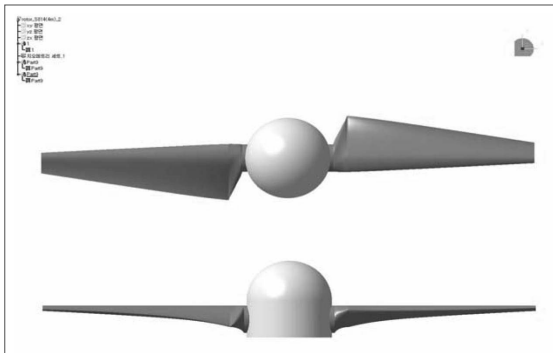
#### 4. CFD를 통한 터빈 후류 유동 분석

터빈은 유체의 운동에너지를 기계적인 동력으로 변환시키는 장치로 본 연구에 사용된 터빈은 S814익형을 기반으로 설계된 2블레이드 직경 4m 터빈이다.

상용코드인 ANSYS CFX v.13을 이용하여 터빈을 대상으로 유동해석을 수행하였다. 계산격자는 난류 모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 y+, 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, 종횡비 등을 고려하였다. 단일 CPU에 의한 계산환경에서는 하드웨어 성능 한계를 고려하여 격자

공간해상도를 확보하였고, 회전영역에서는 비정상 해석의 격자 회전을 고려하여 터빈 주위에 조밀한 Prism Layer를 적용하였으며 격자의 밀도를 증가시켰다. 나머지 영역은 사면체 비정렬 격자계로 구성하였다.

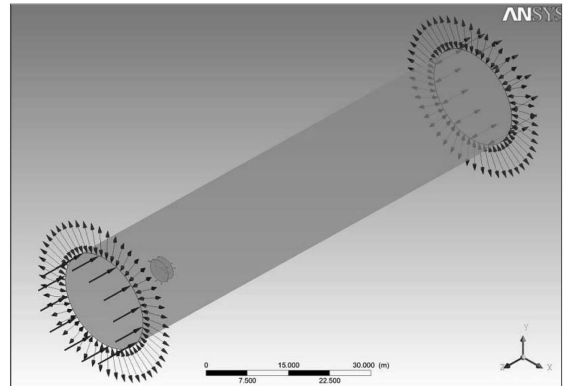
해석은 회전 도메인과 정적 도메인으로 나누어 해석하였으며 회전체인 터빈에 상대속도를 부여하기 위해 터빈 주위에 실린더 형태의 회전 도메인을 생성하고, 나머지 영역에 정적 도메인을 생성하였다. 터빈 중심에서 입구까지의 거리는 12m, 양 측면과의 이격 거리는 각각 10m, 출구까지의 거리는 터빈 직경의 20배인 80m로 설정하였다. 계산영역을 다음 그림과 같이 모델링하였고 회전 도메인의 직경은 4.2m, 정적 도메인의 크기는 직경 20m, 길이 92m이다.



〈그림 8〉 터빈 형상

〈표 1〉 격자 정보

Rotating	Nodes	73,746
	Elements	367,768
Stationary	Nodes	2,206,176
	Elements	12,930,021



〈그림 9〉 유동장 모델링

회전영역과 정적영역이 접하는 면은 GGI(General Grid Interface) 방법에 의해 인터페이스 되었다. 입구는 수직 유입 유속 조건으로 출구는 기준압력(대기압)에 대해 0기압으로, 실린더 옆면은 유체가 자유롭게 출입할 수 있는 조건을 부여하였다. 본 해석에 사용된 난류 모델은 SST이다. SST 모델은 난류전단응력의 수송을 계산하여 역 압력구배에 의해 발생하는 유동박리 크기와 발생 시점을 정확히 예측

하였으며, 자동 벽 처리법으로 확장이 가능하여 격자의 y+에 무관하게 일정 수준 이상의 정확성을 확보하였다.

해석 시간은 총 10초이고, Time Step은 0.04초로 설정하여 250회의 반복계산을 수행하였다. ANSYS CFX 매뉴얼에서 권장하는 설정기준을 참고하여 Time Step을 0.04초로 결정하였다.

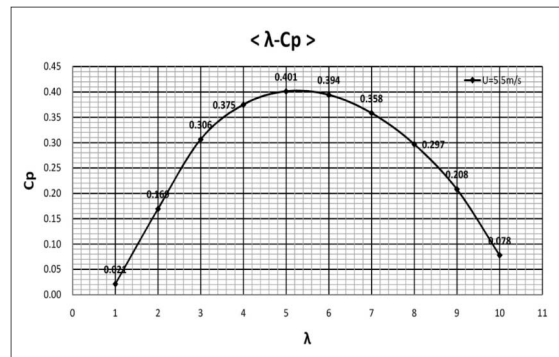
$$time\ step [s] = \frac{60}{m \times RPM \times N} \quad (1)$$

〈표 2〉 경계조건 및 해석 정보

Working Fluid	Water(Isothermal, 25℃)
Rotating Domain	Angular Velocity (7.5rad/s, TSR=5) Rotation axis (Global Z)
Inlet	Normal Speed (3m/s)
Opening	Opening
Outlet	Opening
Interface Area	Transient Rotor Stator
Turbine	Wall (No Slip)
Turbulence Model	SST
Time Step	0.04s
Analysis Time	10s

비정상 해석에 앞서 원활한 수렴과 결과의 신뢰성을 높이기 위해 동일한 조건으로 정적해석을 수행하여 비정상 유동해석에 필요한 초기조건들에 대한 정보를 획득하였다. 사용된 터빈은 주속비 5에서 최대 효율이 발생하며, 최대전력 생산을 위해 최적 주속비에서 작동 되어야 한다. 비정상 유동해석 시 터빈의 회전속도를 최적 주속비 5에 해당하는 7.5rad/s로 설정하였다. Moving Mesh Method를 본 해석에 적용함으로써, 회전 도메인의 격자 회전속도 또한 7.5rad/s로 설정하여 터빈의 회전운동을 구현하였다.

비정상 해석의 특성상 초기값 입력이 해석의 정확성에 영향을 미친다. 정적 해석을 통해 나온 결과파일인 .res파일을 CFX Solver에서 초기값으로 설정하여 비정상 유동해석의 정확성을 확보하였다. 이와 같이 초기값을 설정함으로써, 초기에 터빈이 구동하는 과정을 비정상 유동해석에 포함시킬 필요성이 없어지므로 완전 발달된 유동 패턴을 얻기 위한 계산 시간을 감소시킬 수 있다.

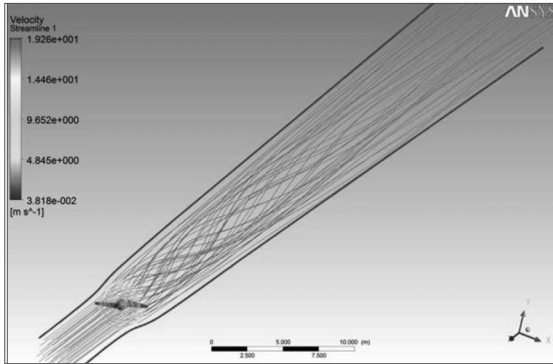


〈그림 10〉 해석 터빈의 성능곡선

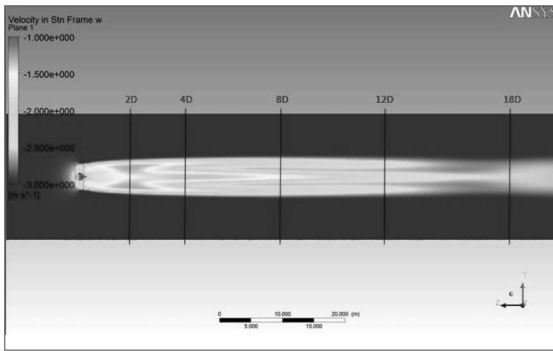
### 3. 해석 결과

유체의 에너지는 유속의 3제곱에 비례하므로 후방 터빈의 유입속도가 설계속도에 미치지 못했을 경우 출력 저하가 발생한다. 상용화를 위한 발전단지 설계 시 최대전력을 생산해야 할 뿐만 아니라, 전체 발전량이 예측되어야 하므로 후류에 배치되는 터빈의 출력 저하가 추정되어야 한다. 따라서 발전 장치의 최적배치를 도출을 위해 터빈 후류의 유속 분포를 분석하는 것은 매우 중요하다.

터빈 후방의 유선분포를 〈그림 11〉에 나타냈다. 터빈을 통과하는 유동은 압력이 떨어지고 유동관 단면적 증가 및 유속 감소 현상이 발생한다. 유선분포에서 유동관이 확장되는 모습이 이론과 같이 관찰되었고, 터빈 후류 유동에서 터빈 회전방향과 반



〈그림 11〉 유선분포

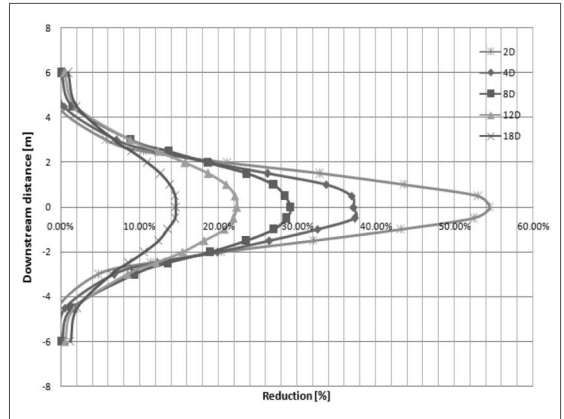


〈그림 12〉 축방향 유속 분포

대로 회전하며 꼬여 나가는 형상 역시 확인할 수 있다.

터빈 후방의 축방향 유속분포를 〈그림 12〉에 나타내었다. 터빈 후류의 유동장은 시간에 따라 변화하는 비정상 유동상태이며 특정 Time Step에서의 유속분포이다. 각 Time Step별 데이터를 시간 평균값으로 취득하여 유동장을 분석하였다. 속도 감소율로 터빈의 후류를 분석함으로써 연구결과를 일반화 시킬 수 있고 보다 직관적으로 특성을 파악할 수 있다. 속도 감소율은 식 (2)와 같이 정의되며, 터빈으로부터 이격된 거리에 따른 속도 분포를 통해 후류 특성을 분석하였다.

$$Velocity\ deficit = 1 - \frac{U_x}{U_\infty} \quad (2)$$



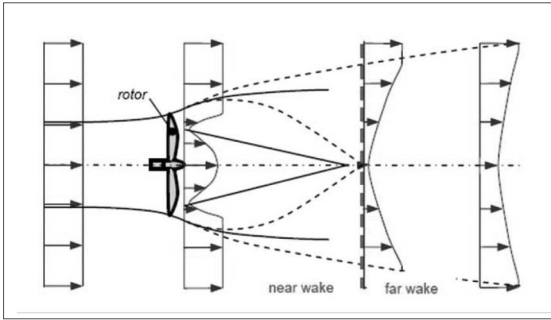
〈그림 13〉 유속 감소율 분포

유속 측정은 총 85개 위치에서 수행되었다. 터빈으로부터 유동방향으로, 2D(Diameter), 4D, 8D, 12D, 18D 거리의 5개 구간과 터빈 중심에서 유동에 연직 방향으로 17개 구간을 설정하여 후방 이격거리에 따른 속도 감소율을 그래프로 작성하여 〈그림 13〉에 나타내었다.

2D, 4D 거리에서는 속도 감소율이 각각 최대 54.5%, 37.2%로 계산되었으나, 터빈과 유동방향으로 이격거리가 짧을수록 터빈의 영향을 받는 영역이 좁게 나타났다. 즉 유속이 감소되는 영역이 터빈을 중심으로 퍼져나가는 형태를 보였다. 4D 위치까지 유속이 빠른 속도로 회복되었으며 4D 이후로는 유속회복이 더디게 이루어졌다. 8D, 12D, 18D 거리에서는 후류 영역의 폭이 큰 대신 속도 감소율은 상대적으로 작게 나타났다.

#### 4. 웨이크 이론과의 비교

CFD결과와 신뢰성을 검증하기 위해 Jensen Wake Model을 이용해 터빈 후류의 유속분포를 계산하여 CFD 결과와 비교하였다. 터빈 후방의 Wake



〈그림 14〉 터빈 주위의 전형적인 유동패턴

영역은 5D 이내의 Near Wake 영역과 5D 이상의 Far Wake 영역으로 나뉘는데, Wake는 터빈 후방의 속도 감소와 증가된 난류도로 정의된다. 빠른 흐름과 느린 흐름 사이에 난류 전단층이 발생하면서 Near Wake 영역이 Far Wake 영역으로 변화하고, 주변 난류에 의해 Wake 속의 유속이 회복된다.

〈그림 15〉에 Jensen Wake Model의 개략도를 나타냈다. Jensen Model은 Wake 특성을 기반으로 도출된 경험적인 계산식으로 후류의 유속을 계산할 수 있는 기법이다. 터빈의 추력계수와 유입속도를 입력하여 터빈을 통과한 유체의 유속( $U_{w0}$ )을 계산할 수 있고, 계산된  $U_{w0}$ 를 기반으로 Wake Decay를 고려하여 터빈 중심과의 유동방향 이격 거리에 따른 유속  $U_w$ 를 계산할 수 있다. 식 (3), (4), (5)에 운동량 보존을 기반으로 한 Jensen Model의 계산식을 나타냈다.

$$\pi r_0^2 U_{w0} + \pi(r^2 - r_0^2)U_0 = \pi r^2 U_w \quad (3)$$

$$U_{w0} = U_0 \sqrt{1 - C_T} \quad (4)$$

$$(5)$$

$$r = r_0 + kx$$

$U_{w0}$  = Initial velocity behind the turbine

$U_0$  = Inlet velocity (3m/s)

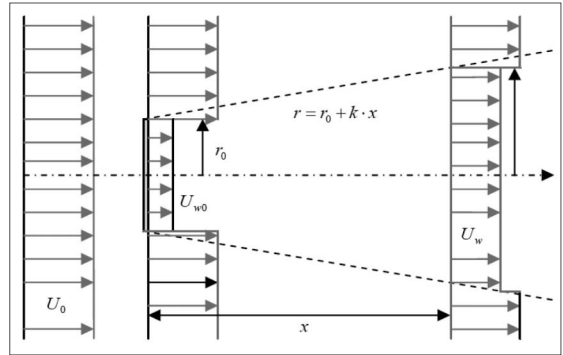
$U_w$  = Wake velocity

$r_0$  = Turbine radius

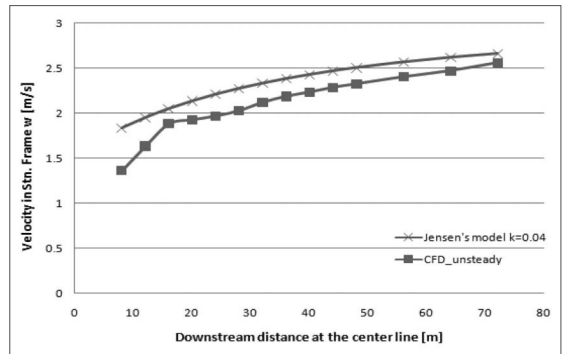
$r$  = The diameter of the wake at distance  $x$  behind the turbine

$C_T$  = Thrust coefficient

$k$  = Wake decay coefficient



〈그림 15〉 Jensen Wake Model의 개념도



〈그림 16〉 CFD결과와 Jensen Wake Model의 비교

터빈 중심을 통과하는 센터 라인 위 2D~18D 구간에 14개 지점을 선정하여 Jensen Wake Model을 이용한 계산 값을 유동해석 결과와 비교하였다. 터빈으로부터 약 20m 이내의 지역을 제외하고, 두 결과는 매우 유사한 양상을 보였다. 오차가 큰 영역은 Near Wake 또는 설계변수에 따라 유동패턴 및 유속분포가 다양하게 나타날 수 있다. 유동해석 결과에서 Near Wake 영역에서 유속이 40% 이상 감소하였다. 터빈으로부터의 이격 거리가 8D를 넘어서면

서부터 오차는 10% 이하로 점차 감소하여 3%까지 줄어들었으며, Far Wake 영역에서는 유동 패턴이 터빈의 형상에 영향을 받지 않는다는 가정의 타당성을 검증하였다. CFD 결과와 Jensen Wake Model로 계산한 후류 특성 사이에 유사성을 확인하였고, 비정상 유동해석을 통한 후류 분석기법의 신뢰성을 확보하였다.

## 5. 결론

조류발전은 계절이나 낮과 밤에 관계없이 항상 발전이 가능하며 예측 가능한 에너지일 뿐 아니라, 해양에 댐을 설치하지 않음으로 주변 해양환경 변화를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 현재 영국을 중심으로 여러 형태의 발전장치가 개발되었고 상용화 기술이 확보되어 있으며, 조류발전단지 개발을 추진하고 있다. 국내에서도 인천 및 신안 지역에 대규모 조류발전단지 계획이 발표되었다.

터빈의 후류 분석은 단지개발 및 발전용량 산정을 위한 선행연구로써 추후 다수 발전장치의 최적배치를 가능하게 하는 중요한 요소이다. CFD를 이용한 유동해석 뿐만 아니라 실험을 통한 검증이 수반되어야 하며, 구체적인 경제성 및 타당성 분석을 위해 실제 발전단지의 발전용량을 유추할 수 있는 기법이 마련되어야 한다.

## 6. 참고문헌

- (1) Schepers, J. G., Brand, A. J., Bruining, A., Graham, J. M. R., Hand, M. M., Infield, D. G., Madsen, H. A., Paynter, R. J. H. and Simms, D. A., 2008, "Final Report: HAWT Aerodynamics and Models from Wind Tunnel Measurements", NREL/TP-500-43508.
- (2) Rethore, P. E., 2009, "Wind Turbine Wake in Atmospheric Turbulence", PhD Thesis, Aalborg University.
- (3) Harrison, M. E., Batten, W. M. J., Myers, L. E., Bahaj, A. S., 2009, "A comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines", Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference.
- (4) Maganga, F., Pinon, G., Germain, G. and Rivoalen, E., 2010, "Wake properties characterisation of marine current turbines", 3rd International Conference on Ocean Energy.
- (5) Jo, C. H., Lee, K. H. and Yim, J. Y., 2010, "A study on the interference effects for tidal current power rotors", Journal of Science in China Technological Sciences, Vol. 53, No. 11, pp. 3094~3101.



**저자 약력 조철희**

- 1984: 인하대학교 조선공학과 공학사
- 1985: 미국 Steven Institute of Technology  
해양공학과 공학석사
- 1991: 미국 Texas A&M University 해양공학과  
공학박사
- 1991 - 1992: Intec Engineering Inc.,  
Houston, Texas. Project  
Engineer
- 1992 - 1997: 현대중공업 해양사업본부 설치기  
술개발부 부서장
- 1996 : 울산대학교 선박해양공학과 외부강사
- 1997 - 현재: 인하대학교 조선해양공학과 교수

**저자 약력 이강희**

- 2008: 인하대학교 조선해양공학과 학사공
- 2010: 인하대학교 조선해양공학과 공학석사
- 현재: 인하대학교 조선해양공학과 박사과정