

CFD를 활용한 6 MW 해상풍력발전단지의 풍력터빈 이격거리에 따른 공기역학적 출력 변화연구

최낙준¹ · 남상현² · 정종현² · 김경천[†]

(원고접수일 : 2011년 10월 4일, 원고수정일 : 2011년 10월 21일, 심사완료일 : 2011년 11월 1일)

CFD Study on Aerodynamic Power Output of 6 MW Offshore Wind Farm According to the Wind Turbine Separation Distance

Nak-Joon Choi¹ · Sang-Hyun Nam² · Jong-Hyun Jeong² · Kyung-Chun Kim[†]

요 약 : 본 논문은 2 MW급 풍력터빈 3기로 구성된 6 MW 해상풍력발전단지의 풍력터빈 이격거리에 따른 공기역학적 출력 변화를 전산유동해석을 활용하여 연구한 것이다. 육상 뿐만 아니라 해상풍력발전단지에 있어서 레이아웃 설계는 풍력발전단지 초기 투자비, 연간 발전량 및 유지보수비에 영향을 끼치는 핵심 인자이다. 각 풍력터빈 로터에 대해서 모멘텀 소스를 가지는 액츄에이터 디스크가 아닌 완전한 3-D 모델에 대해서 전산유동해석 기법을 적용하여 연구하였으며 이는 기술적으로 큰 의미를 가진다. 본 논문의 연구결과는 향후 해상풍력발전단지 레이아웃 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

주제어 : 해상풍력발전단지, 레이아웃, 전산유동해석, 이격거리, 공기역학적 출력

Abstract: This paper presents aerodynamic power outputs of wind turbine of 6 MW wind farm composed of 3 sets of 2 MW wind turbine according to the separation distance by using CFD. Layout design including offshore wind farm and onshore wind farm is key factor for the initial investment cost, annual energy production and maintenance cost. For each wind turbine rotor, not actuator disc model with momentum source but full 3-dimensional model is used for CFD and it has a great technical meaning. The results of this study can be applied to the offshore wind farm layout design effectively.

Key words: Offshore wind farm, Layout, Computational fluid dynamics, Separation distance, Aerodynamics power output

1. 서 론

화석연료 사용 등으로 인한 CO₂ 증가는 지구 온난화를 야기하며 기후변화등 인류 생활에 큰 위협이 되고 있다. 이를 극복하기 위한 신·재생에너지에 대한 연구는 선택이 아닌 필수이다[1]. 여러 신·재생에너지원중 풍력에너지는 석탄화력 및 원자력 발전과 대등한 에너지 비용으로 향후 지속적인 성장이 예상된다.

풍력발전은 바람의 운동에너지를 기계적 회전에

너지로 변환하고 이를 다시 전기에너지로 변환하는 일종의 에너지 추출기 또는 변환기이다[2]. 향후 기술적 추세는 수 MW급 대형풍력터빈으로 구성된 대규모 해상풍력발전단지가 주류를 이룰 것으로 예상되며 이는 양호한 해상 풍황 조건, 제한된 육상풍력발전단지 부지 및 민원등 여러 요소가 복합된 결과이다[3].

해상풍력발전단지의 레이아웃 설계는 초기 투자비, 연간 발전량 및 유지 보수비에 영향을 미치는

[†] 교신저자(부산대학교 기계공학부, E-mail:kckim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2324)

¹ 부산대학교 기계공학부 대학원 / (주)디엔디이

² (주)디엔디이

핵심 인자이다[4]. 풍력터빈의 이격거리가 감소하면 하류에 위치한 풍력터빈은 상류 풍력터빈으로부터의 후류 영향을 상대적으로 크게 받고 출력이 감소하며 피로 하중의 증가로 풍력터빈의 수명이 단축될 수 있으나 케이블 설치 비용등은 감소될 수 있다. 이와 달리 풍력터빈 이격거리가 증가하면 상류 풍력터빈으로부터의 후류 영향이 적어 하류 풍력터빈의 출력이 증가하며 피로하중의 감소로 풍력터빈 수명이 증가될 수 있으나 케이블 설치 비용 또한 증가하게 된다.

따라서 이격거리와 출력과의 관계에서 적절한 타협이 필수적이다[5]. 본 연구에서는 6 MW 해상 풍력발전단지에서 전산유동해석으로 이격거리에 따른 풍력 터빈의 공기역학적 출력 변화를 연구하였다.

2. 해상풍력발전단지 레이아웃 중요성

Figure 1은 해상풍력발전단지의 후류 영향 범위를



Figure 1: Offshore wind farm wake.

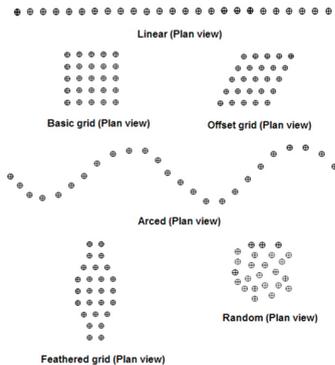


Figure 2: Various offshore wind farm layout.

도시한 것이다[6]. 후류 영향의 최소화가 필요하나 이는 초기 투자비용의 증대를 동반한다. Figure 2는 다양한 풍력발전단지 레이아웃 개념을 도시한 것으로 향후 풍력발전단지 용량이 증가할수록 레이아웃의 중요성은 더욱 증가할 것이다[7].

3. 풍력터빈 및 해상풍력발전단지

3.1 2 MW 풍력터빈

Figure 3은 2 MW 풍력터빈을 도시한 것으로 블레이드는 BEMT 기법을 사용하여 설계하였으며 사용한 에어포일은 아웃보드 영역에서 인보드 영역으로 공력 및 구조적인 특성을 고려하여 차례대로 NACA 63-415, NACA 63-418, DU93-W2-210, DU91-W2-250 및 FFA-W-301을 배치하였다. Table 1은 2 MW 풍력터빈의 주요 사양을 나타낸 것으로 정격 풍속, 정격 회전속도 및 주속비등을 포함한다.



(a) Front view. (b) Side view.

Figure 3: 2 MW wind turbine.

Table 1: Main specifications of 2 MW wind turbine.

Item	Description
Type	upwind
Rotor diameter (m)	84.2
Rated power output (kW)	2,000
Rated wind speed (m/s)	11
Rotational speed (rpm)	18.7
Tip speed ratio	7.5
Tilting angle (°)	5
Hub height (m)	80.5

3.2 6 MW 해상풍력발전단지

Figure 4는 풍력터빈 명칭 및 로터 직경 D의 배수로 표현되는 변수들을 포함한 6 MW 해상풍력발전단지 레이아웃을 도시한 것이다.

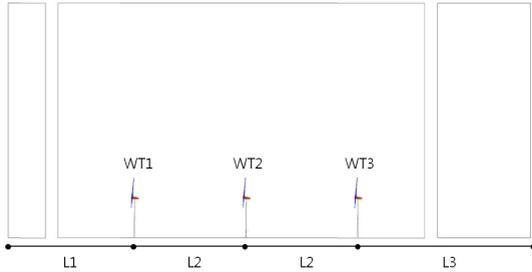


Figure 4: 6 MW offshore wind farm layout and wind turbine identification.

4. 전산유동해석

4.1 해석 케이스

6 MW 풍력발전단지에 대한 전산유동해석은 이격거리 변화에 대하여 수행되었다. Table 2는 해석 케이스에 대한 변수를 나타낸 것으로 입구로부터의 풍력터빈 WT1 까지의 거리 L1은 7D, 풍력터빈 사이의 이격거리 L2는 3D부터 7D 까지의 값을 가지며 풍력 터빈 WT3로부터 출구까지의 거리 L3는 17D로 설정 하였다.

Table 2: Separation distance according to the analysis cases.

Case no.	L1	L2	L3	Remark
Case 1	7D	3D	17D	1) D=84.2 m (Rotor dia.) 2) Height=6D
Case 2	7D	4D	17D	
Case 3	7D	5D	17D	
Case 4	7D	6D	17D	
Case 5	7D	7D	17D	

4.2 격자

Table 3은 회전 영역과 정지 영역에 대한 격자 정보를 도시한 것으로 요소 수 기준으로 1,430만개에 근접하는 대형 계산 문제이다.

Table 3: Mesh information for rotational region and stationary region based on the elements.

Item	No. of elements
Rotational region	11,618,532
Stationary region	2,692,118

격자는 크게 회전 영역과 정지 영역의 2부분으로 구분된다. Figure 5는 회전 영역 격자를 도시한 것이다. 회전 영역은 풍력터빈 로터를 포함하며 이는 계산의 정도를 고려하여 육면체 격자로 구성하였다.



(a) Rotor mesh



(b) Blade surface mesh

Figure 5: Rotational region mesh.

Figure 6은 정지 영역 격자를 도시한 것이다. 정지 영역은 회전 영역을 제외한 전체 유동장 부분이며 프리즘 격자 및 사면체 격자로 구성하였다.

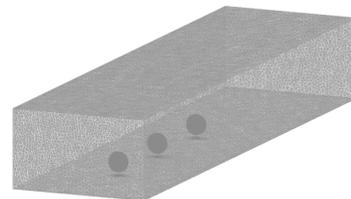


Figure 6: Stationary region mesh.

4.3 경계조건

Figure 7은 경계 조건이 적용되는 영역을 도시한 것으로 입구, 출구, 측면, 윗면 및 해수면인 바닥면 등으로 구성된다.

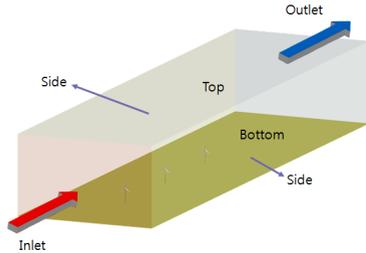


Figure 7: Regions of boundary conditions.

Table 4는 각 경계 조건의 세부 내용을 나타낸 것으로 입구는 허브 높이에서 정격 풍속이 되도록 윈드 쉬어(wind shear) 효과를 고려하였다. 식 (1)은 윈드 쉬어 계산식을 나타낸 것이다[8].

Table 4: Boundary conditions.

Item	Description
Inlet	11 m/s at the hub with wind shear
Outlet	Atmospheric pressure
Side	Symmetry
Top	Free slip condition
Bottom	No slip condition

$$V = V_0 \left(\frac{z}{z_h} \right)^a \tag{1}$$

여기서, V , V_0 , z , z_h 및 a 는 각각 높이에 따른 풍속, 정격 풍속, 높이, 허브 높이 및 윈드 쉬어 지수를 의미한다. Figure 8는 입구에서의 연직방향의 계산된 속도분포를 나타낸다.

공기밀도는 IEC 61400-1에서 규정한 1.225 kg/m^3 을 적용하였다[9]. 전산유동해석은 범용 유동해석 소프트웨어인 ANSYS CFD를 사용하였고 난류 모델은 RANS 기반의 SST 전이 난류 모델이 사용되었고, 난류 강도는 18%를 적용하였다. 하드웨어는 리눅스 클러스터 (8 CPU, Intel Xeon X5650 2.66 GHz, 6 core)로 계산을 수행하였다.

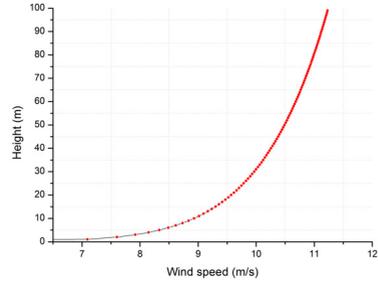


Figure 8: Calculated inlet wind speed according to the height with wind shear.

5. 결과 및 고찰

Table 5는 해석 케이스별 결과를 요약한 것으로 풍력터빈 WT1의 출력은 이격 거리에 따라 큰 차이 없이 정격 출력에 가까운 값을 나타내고 있지만 약하나마 WT2 및 WT3의 영향을 받고 있으며 이 영향은 이격거리가 증가할수록 약해진다고 설명할 수 있다.

Table 5: CFD results according to the separation distance for the 6 MW offshore wind farm.

Case no.	Wind turbine I.D.	Aerodynamic power output (kW)	Power ratio (WT2/WT1)	Power ratio (WT3/WT1)
Case 1	WT1	2,030	15%	3.6%
	WT2	309		
	WT3	74		
Case 2	WT1	2,052	30%	18%
	WT2	611		
	WT3	364		
Case 3	WT1	2,065	41%	29%
	WT2	838		
	WT3	607		
Case 4	WT1	2,068	49%	35%
	WT2	1,007		
	WT3	718		
Case 5	WT1	2,106	56%	44%
	WT2	1,185		
	WT3	917		

출력 증가 비율을 살펴보면 이격거리가 3D에서 5D까지는 상대적으로 강한 후류 영역으로 이격거

리가 증가할수록 후류 영향력 약화 정도가 크게 되어 출력이 큰 폭으로 증가함을 보여준다. 반면 이격거리가 5D에서 7D 까지는 상대적으로 약한 후류 영역으로 이격거리가 증가되어도 후류 영향력 약화 정도가 크지 않아 출력이 증가하나 그 증가율이 감소함을 보여 준다. **Figure 9**는 이격거리에 따른 풍력터빈 WT2와 풍력터빈 WT3의 공기역학적 출력을 도시한 것이다.

이격 거리 5D를 기준으로 기울기가 다르며 따라서 5D를 기점으로 강한 후류 영역과 약한 후류 영역으로 구분할 수 있다.

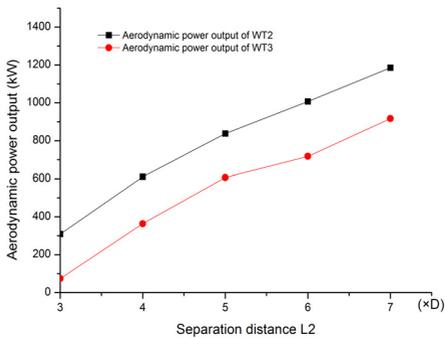


Figure 9: Aerodynamic power output of WT2 and WT3 according to the separation distance.

Figure 10은 거리에 따라 후류 영역을 near wake, intermediate wake 및 far wake로 구분한 것이다[10]. Near wake 및 intermediate wake 영역은 강한 후류 영역, far wake 영역은 약한 후류 영역으로 구분할 수 있음을 보여준다. 유동해석 결과와 비교하면 5D를 기점으로 공기역학적 출력 증가율 기울기가 변화하므로 후류 영향 범위에 따른 특성을 정성적으로 잘 보여준다.

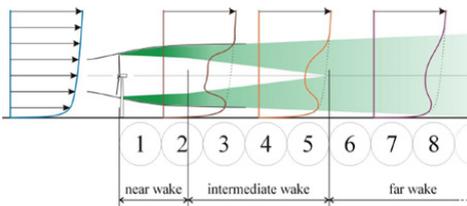


Figure 10: Wake region with respect to the rotor diameter D.

Figure 11부터 **Figure 13**까지는 풍력터빈 이격거리가 각각 3D, 5D 및 7D에 대하여 허브 높이에서의 축방향 풍속 및 풍력터빈 상호작용을 도시한 것이다.

풍력터빈의 이격거리가 증가함에 따라 풍력터빈 WT2 및 풍력터빈 WT3로 유입되는 풍속이 증가함을 보이고 하류에 위치한 풍력터빈에 영향을 미치는 후류의 효과가 감소되어 풍력터빈의 공기역학적 출력이 증가한다[11].

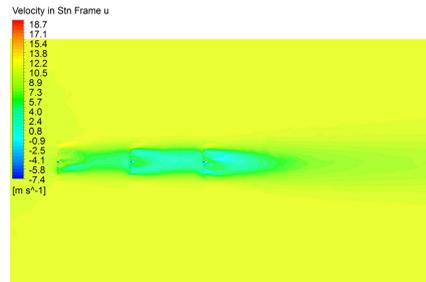


Figure 11: Axial direction wind speed at the hub height for the case no. 1 of L2 with 3D.

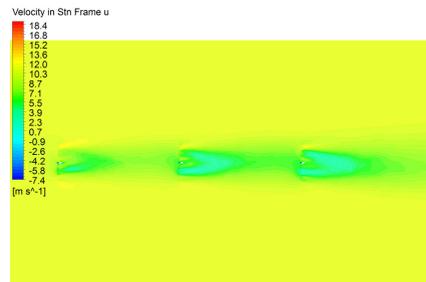


Figure 12: Axial direction wind speed at the hub height for the case no. 3 of L2 with 5D.

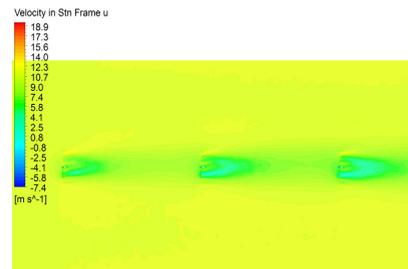


Figure 13: Axial direction wind speed at the hub height for the case no. 5 of L2 with 7D.

Figure 14 및 **Figure 15**는 대표적으로 이격거리 5D에 대하여 수직 중앙 단면의 허브 높이에서의 축방향 풍속 및 대기압을 기준으로 한 압력을 각각 도시한 것이다.

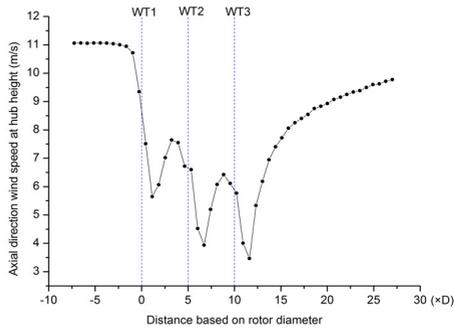


Figure 14: Axial direction wind speed at the center line of hub height for the case no. 3 of L2 with 5D.

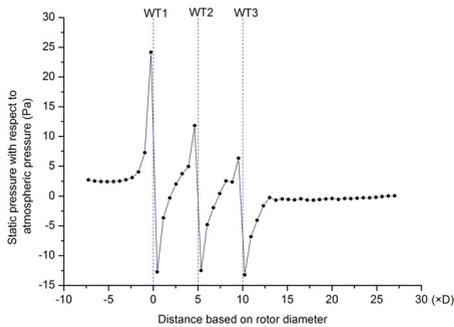


Figure 15: Pressure with respect to the atmospheric pressure at the center line of hub height for the case no. 3 of L2 with 5D.

축방향 풍속은 풍력터빈 WT1의 로터면을 통과 하면서 감속이 되고 풍력터빈 WT2 로터면 도달전 풍속이 회복되다가 풍력터빈 WT2 로터면을 통과 하면서 다시 감속이 된다. 풍력터빈 WT2 로터면을 지나 풍력터빈 WT3 로터면을 전후해서도 동일한 현상을 보인다.

풍력터빈 로터면을 전후한 풍속 감소는 바람의 운동에너지가 로터 블레이드에 전달된 후 회전력으로 변환되었기 때문이다. 따라서 하류에 위치한 풍력터빈은 축방향 유입속도의 감소로 상류에 위

치한 풍력터빈 대비 공기역학적 출력이 낮아진다. 풍력터빈 이격거리의 증가는 후류영향 감소로 축방향 속도의 회복에 기여 하며 결과적으로 풍력터빈의 공기역학적 출력의 증가에 기여한다. 풍력터빈 WT3 로터면을 통과한 후의 풍속은 점진적으로 회복됨을 보여준다. 각 풍력터빈 로터면을 전후해서는 큰 압력차를 보이며 압력차의 폭은 WT2 및 WT3를 지날수록 낮아진다. 풍력터빈 블레이드 압력면과 흡입면의 압력차가 클수록 양력이 크며 양력의 회전면 점선방향 분력인 회전력 또한 증가하여 공기역학적 출력이 증가하고 로터면 전후의 압력차가 적으면 공기역학적 출력이 감소하게 된다.

풍력터빈 WT3 로터면 이후의 압력은 서서히 회복되어 점차적으로 대기압에 근접하게 되며 풍속도 회복되는 경향을 보이며 후류 영향은 약해진다.

6. 결 론

본 연구는 6 MW 해상풍력발전단지에 대하여 풍력 터빈 이격거리에 따른 공기역학적 출력 변화에 대한 전산유동해석적 연구에 대한 내용으로 풍력발전단지 레이아웃 설계시 이격거리의 중요성을 평가하였다.

1) 풍력터빈 이격거리 변화에 따른 풍력터빈 공기역학적 출력 변화는 축방향으로 유입되는 풍속의 차이에 기인하며 이론적으로 공기역학적 출력은 풍속은 세제곱에 비례하는 비선형적인 특징을 가지므로 공기역학적 출력의 변동성 및 출력 비율의 급격한 변화를 야기하는 것으로 판단된다.

2) 이격거리가 증가하면 후류의 영향이 약해지며 따라서 축방향 풍속은 다소 회복된 상태로 다음 풍력터빈 로터로 입사되고 이는 공기역학적 출력의 증가로 나타남을 유동해석 결과에서 알 수 있다.

3) 이격거리 5D를 기준으로 풍력터빈의 공기역학적 출력 증가율의 기울기에 변화가 있으므로 이격거리 5D는 풍력발전단지 레이아웃 연구에 있어 공기역학적 출력 관점에서는 기준이 될 수 있다.

4) 본 연구는 향후 다양한 해상풍력발전단지 레이아웃에 대한 풍력터빈의 공기역학적 출력 변화 연구의 기반을 제공할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20114010203080)

참고문헌

- [1] K. C. Tong, "Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74-76, pp. 399-410, 1998.
- [2] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained-Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons (Canada), 2002.
- [3] Wang Zhixin, Jiang Chuanwen, Ai Qian and Wang Chengmin, "The key technology of offshore wind farm and its new development in China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 216-222, 2009.
- [4] Javier Serrano Gonzalez, Angel G. Gonzalez Rodriguez, Jose Castro Mora, Jesus Riquelme Santos and Manuel Burgos Payan, "Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1671-1681, 2010.
- [5] 최낙준, 남상현, 정종현, 김경천, "이격 거리에 따른 2 MW급 풍력발전기 배열의 출력영향에 관한 전산유동해석적 연구," 제 6회 한국유체공학학술대회, vol. 1, pp. 183-185, 2010.
- [6] <http://cires.colorado.edu/news/archives/2009/pichuginaTurbulence.html>
- [7] 최낙준, "풍력발전단지 레이아웃 설계를 위한 CFD 역할," ANSYS 풍력세미나 초청 강연, 2011.
- [8] M.L.Ray, A.L. Rogers and J.G. McGowan, "Analysis of wind shear models and trends in different terrains," *Proceedings of American Wind Energy Association Windpower 2006*.
- [9] DNV/Risø, *Guidelines for Design of Wind Turbines*, Jydsk Centraltrykkeri, 2002.

- [10] Peter Eecen, "Wind farm calculation and optimization with FarmFlow," *Dutch Wind Workshops*, 2010.
- [11] M. O. L. Hansen, J. N. Sorensen, S. Voutsinas, N. Sorensen and H. Aa. Madsen, "State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 42, pp. 285-330, 2006.

저 자 소 개



최낙준(崔洛俊)

1971년 4월생, 1997년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업 (공학사), 1999년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업 (공학석사), 2011년 부산대학교 기계공학부 박사 수료, 1999년~2001년 삼성SDI(주) 대리, 2003년~2004년 한진산업(주) 과장, 2008년~현재 (주)디엔디이 부장, 관심분야 : 풍력발전, 신·재생에너지, CFD



남상현(南相鉉)

1980년 4월생, 2006년 한국 교육개발원 기계설계공학과 학위취득 (공학사), 2008년 한국 해양대학교 대학원 기계공학과 졸업 (공학석사), 2008년~현재 (주)디엔디이 대리, 관심분야 : CFD, 유체기계, 신·재생에너지



정종현(鄭鍾現)

1973년 6월생, 2000년 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학사), 2002년 동아대학교 대학원 기계공학과 졸업 (공학 석사), 2008년 동아대학교 대학원 기계공학과 박사 수료, 2002년~현재 (주)디엔디이 차장, 관심분야 : 다상유동, 터보기계,

CFD



김경천(金晷天)

1957년 3월생, 1979년 부산대학교 기계설계공학과 졸업 (공학사), 1981년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업 (공학 석사), 1987년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업 (공학박사), 1983~현재 부산대학교 기계공학부 교수,

관심 분야 : 풍력발전, 난류유동, 다중 스케일 다중 물리 현상 및 측정