

블레이드 타공에 따른 수차의 유동해석

박유신*, 김기중
(주)세니츠코퍼레이션 기술연구소

CFD Analysis on the Hydro Turbine by the Existence of Blade Holes

Yoo-Sin Park*, Ki-Jung Kim

Institute of Technology, CENITS Corporation Inc.

요약 국내 대다수의 하수처리장 방류수로는 2.0 m 미만의 낙차를 형성하고 있고 유량이 지속적이며 변동이 크지 않다는 점을 고려할 때, 저낙차 조건에서도 안정적인 전력 생산과 효율을 유지할 수 있는 소수력 발전장치 개발이 시급히 요구된다. 본 연구에서는 저유속 조건에서 소수력 에너지 생산 효율 증진을 위한 항력식 수직축 수차를 개발하기 위하여 전산 유체 동역학(CFD) 기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 즉, 2.0 m/s 미만의 유속 조건에서 수차 블레이드의 타공 유무에 따른 블레이드 압력변화와 내부유동을 분석하였다. 수치해석 결과, 수차 블레이드의 타공 유무에 따른 압력분포는 타공이 있는 수차 블레이드에 발생하는 압력이 타공이 없는 수차 블레이드보다 약 5.1 % 감소되는 것으로 나타났다. 수조와 수차 블레이드 주변의 내부유동을 분석한 결과, 벡터의 분포로부터 유동속도가 변화하는 것을 알 수 있었으며, 타공이 있는 수차 블레이드의 유속이 타공이 없는 수차 블레이드의 유속보다 5.6 % 감소하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 수차 블레이드에 타공을 형성하는 것이 구조안전성 측면에서 도움이 될 것으로 판단된다.

Abstract Considering that most sewage treatment facilities have a water head of less than 2.0 m and a constant flow rate, the development of a small hydro power generation device capable of maintaining stable power generation and efficiency is urgently needed. In this study, a numerical analysis using the CFD code was carried out to develop drag force type vertical axis hydro turbine for the improvement of the production efficiency of small-scale hydro energy under low flow velocity conditions. The blade pressure changes and internal flows were analyzed in the presence or absence of hydro turbine blade holes at a flow velocity of less than 2.0 m/s. The pressure distribution of the hydro turbine blades with holes was found to be about 5.1 % lower than that of the hydro turbine blades without holes. The analysis of the internal flow around the water tank and hydro turbine blade revealed that the flow velocity varied with the vector distribution and that the flow velocity of the hydro turbine blades with holes was 5.6 % less than that of the hydro turbine blades without holes. It is believed that forming a hole in the blade may be helpful for its structural safety.

Keywords : Blade hole, CFD, Hydro turbine, Small hydro power, Variable flow velocity

1. 서론

1.1 동향 분석

국내의 에너지 확보에 대한 대외적 환경은 유가 변동에 따른 에너지 시장의 수급 불안과 세계 각국의 에너지

자원 확보 경쟁으로 인해 날로 척박해지고 있다. 현재 국내의 에너지 대외 의존도는 약 97%에 육박하며, 따라서 에너지 해외 의존도를 경감시키고 에너지의 수급을 안정시키기 위하여 부존 대체에너지를 개발하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 태양열, 지열, 풍력, 조력, 소

본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호 14CTAP - C078605-01)에 의해 수행되었음

*Corresponding Author : Yoo-Sin Park(CENITS Corporation Inc.)

Tel: +82-2-3461-6604 email: park_ysin@naver.com

Received August 28, 2017

Revised September 13, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

수력 등의 자연 에너지를 이용하여 새로운 에너지를 생산하는 연구가 수행되어 일부는 실용 단계에 이르고 있다[1-3]. 그 중에서 소수력 발전에 의한 에너지는 공해가 없는 청정에너지로서 다른 대체에너지에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 개발 가치가 충분한 것으로 평가받고 있다. 소수력 발전은 일반하천, 농업용저수지, 하수처리장, 정수장 등의 기존 시설물을 이용하여 저비용으로 개발이 가능한 장점이 있다. 특히, 기존 공공시설물로서 발전시설 설치에 따른 추가 민원발생의 우려가 없는 하수처리장이나 정수장 등을 활용한 소수력발전 연구가 더욱 필요한 실정이다. 이와 같은 시설물의 방류수는 저낙차 조건과 2.0 m/s 미만의 저유속 유수 특성을 지니고 있으며, 따라서 효율적인 소수력 발전을 위해서는 유량 및 유속에 적합한 수차의 개발이 필수적이다.

기존의 신재생에너지로서 풍력, 조력, 소수력 발전의 효율을 증진시키기 위한 일환으로 터빈의 블레이드 수, 블레이드폭 비, 블레이드 각도 및 유량, 풍속 변화 등의 매개변수 연구가 수행되었다[4-6]. 또한 터빈의 블레이드 체결부에 대한 구조안정성 확보를 위한 수치해석이 수행되었다[7-8].

1.2 항력식 수직축 수차

개발을 목표로 하는 항력식 수직축 수차는 기존에 적용되지 않았던 신개념 기술로 2.0 m 이하 저낙차 조건에서 흐르는 물을 에너지원으로 삼아 수차의 회전을 통해 전력을 생산하는 방식으로서 기존의 수차에 대한 차별적인 특징은 물의 수직 낙차가 아닌 수평 흐름에 있다. 현재 소수력 발전을 위해 사용되는 수차는 물의 낙차를 이용하여 수압에 의해 회전을 일으키는 프란시스 또는 카플란수차가 일반적으로 사용되고 있으나, 적정 수준의 낙차고를 확보하지 못하는 경우 운영 효율이 상당히 저하되는 특징이 있다.

항력식 수직축 수차는 Fig. 1 (a)와 같은 기존의 방류 조건에 대하여 Fig. 1 (b)에서와 같이 날개벽이 유로를 차단하는 커튼형 구조로 설치되어 대항류(Counter-Current Flow)가 날개벽에 가로막혀 물의 흐름을 차단하고 수차 회전에 저항하게 되는 차이가 있다. 즉, 수직축 수차 회전시 수차의 회전축을 기준으로 방류수의 50 %는 수차 회전방향과 같은 방향으로 유입되는 정향류(Current Flow)로 활용하고, 수차 회전방향과 역방향으로 유입되어 수차 회전을 방해하는 나머지 50 %의 대항

류를 제거하게 된다. 이와 같은 대항류 차단 효과에도 불구하고 회전상태의 수차에서 정향류의 직접적인 영향을 받는 블레이드를 제외하고 다수의 블레이드는 커튼형 날개벽 내측에 존재하는 잔류 방류수에 의해 회전저항을 발생시킨다. 따라서 수차 블레이드에 적절한 타공을 형성하여 저항을 제어하고 발전성능을 최적화시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 2.0 m/s 미만의 저유속 조건에서 소수력 에너지 생산효율 증진을 위한 차세대 소수력 발전시스템 설계 및 개발의 일환으로서 항력식 수직축 수차의 제작에 앞서 형상 특성에 따른 모의축소 수치해석을 수행하였다. 즉, 전산 유체 동역학(CFD) 기법을 이용하여 수차의 블레이드 타공 유무에 따른 블레이드 압력변화와 내부유동을 분석하고 수차의 블레이드 체결부 설계를 위한 기초자료를 확보하였다.

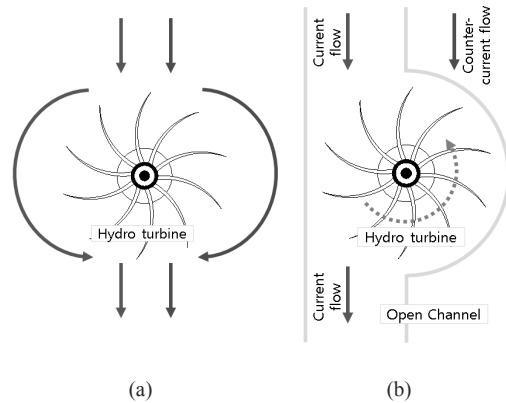


Fig. 1. Concept design of turbine (a)Classical concept (b)Development concept

3. 본론

2.1 기본이론

본 연구에 사용된 식(1), 식(2)와 같은 ANSYS CFX 해석 코드에 적용되는 유체역학의 기본 지배방정식 및 편미분 방정식(PDE, Partial Differential Equation)을 표현하고 계산하는 방법 중 하나인 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)에 관한 주요 이론들은 다음과 같다[9].

연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right) + g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ , \bar{u}_i , g_i , F_i 는 밀도, 순간 속도, 중력가속도, 외부 체적력을 나타낸다. 해석에 필요한 난류모델 선정 시 수차 내 블레이드의 회전 운동으로 인하여 유선의 휨, 와류, 회전 등과 같은 유동 상태에 적합한 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였으며, SST 모델에서 사용하는 난류운동에너지와 난류소산율 k - ω 방정식은 각각 식(3), 식(4)와 같다.

난류운동에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \end{aligned} \quad (3)$$

난류에너지소산율 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \\ \mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, F_2 는 벽 영향을 나타내는 조합함수이며 P_{kb} 와 $P_{\omega b}$ 는 부력효과, S 는 변형률(strain rate), a_1 , α , β 는 각각 상수를 나타낸다.

2.2 수치해석

본 연구에서 고려한 수차 모델의 개략도는 Fig. 2와 같다. 수조의 좌측에서 유체가 유입되어 러너 베인을 구동시키고 우측 흡출관을 통해서 배출되는 구조이다. 수조 Inlet과 Outlet 면적은 0.7 m^2 으로 동일하며 러너 베인의 직경은 0.6 m 이고 블레이드 12매로 구성되어 있다. 본 연구에서는 수조와 러너 베인, 그리고 흡출관을 대상으로 해석을 수행하였다.

블레이드 타공 유무에 따른 수차 블레이드 압력변화와 내부유동을 상세히 검토하기 위하여 ANSYS-CFX Ver. 14.5를 사용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 본 연구에 적용한 터빈 블레이드의 타공 유무에 따른 수차의 3D 모델링과 메쉬(Mesh) 모델링을 나타낸 것이다. 메쉬는 ANSYS CFD Ver. 14.5를 사용하여 생성하였으며, 블레이드 타공 유무에 따른 수치해석을 위하여 Tetrahedra Mesh 16,005개의 절점(Node)과 70,921개의 요소(Elements)로 전체 도메인을 구성하였다. 수차의 타공 크기는 0.025 m^2 으로 적용하였으며, 블레이드 한 개당 타공을 15개씩 모델링하였다.

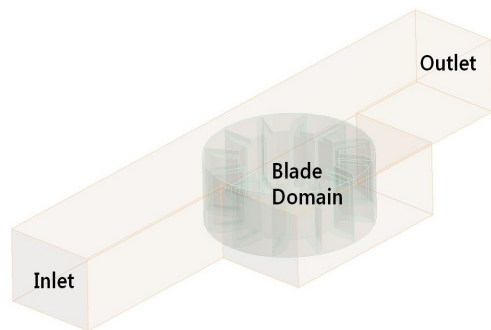


Fig. 2. Schematic view of hydro turbine model

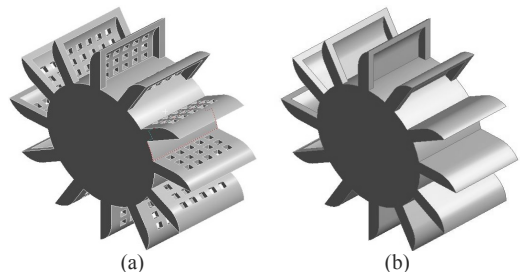


Fig. 3. 3D modelling of hydro turbine (a) Blade with holes (b) Blade without holes

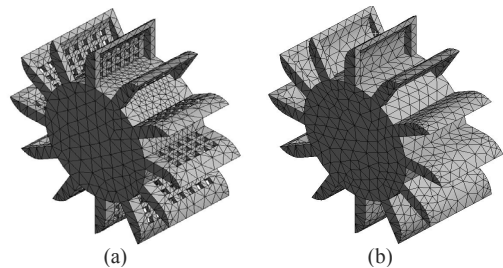


Fig. 4. Mesh modeling of hydro turbine (a) Blade with holes (b) Blade with no holes

Table 1에서와 같이 모든 해석은 Steady state 수행하였으며, 사용된 난류모델로서는 k- ω SST 모델을 적용하였다. 해석 경계조건으로서 입구에는 유속에 따른 조건을 부여하였고 출구에는 대기압에 해당하는 압력조건을 설정하였다.

러너부의 회전수는 60 rev/m으로 모두 동일하게 적용하였으며, 수조의 고정 도메인과 블레이드 영역의 회전 도메인 경계면에 정확한 처리를 위하여 Interface 조건으로 Frozen Rotor 모델을 적용하였다.

Table 1. Boundary Condition

Property	Condition
Simulation type	Steady state
Turbulence model	SST model
Rotational speed	60 rev/m
Fluid	Water at 25 °C
Inlet	2.0 m/s
Outlet	Average static pressure 1 [atm]

2.3 결과 및 고찰

본 연구에서는 수차의 블레이드 체결부 설계를 위한 기초자료를 확보하기 위하여 수치해석을 통해 수차 블레이드의 타공 유무에 따른 압력분포를 분석하였다. Fig. 5는 유속 2.0 m/s 조건에서 수차 블레이드의 압력분포를 나타낸 것으로서 Fig. 5 (a)와 Fig. 5 (b)에 각각 타공이 있는 수차 블레이드와 타공이 없는 수차 블레이드의 압력분포를 나타냈다.

Fig. 5에서와 같이 타공이 있는 수차 블레이드는 최대 1.339e+005 Pa의 표면 압력이 발생하였으며, 타공이 없는 수차 블레이드의 경우 최대 1.271e+005 Pa의 표면 압력이 발생되는 것으로 나타났다. 이와 같은 해석결과로부터 타공이 있는 수차 블레이드에 발생하는 압력이 타공이 없는 수차 블레이드의 압력보다 약 5.1 % 감소되는 것으로 분석되었다.

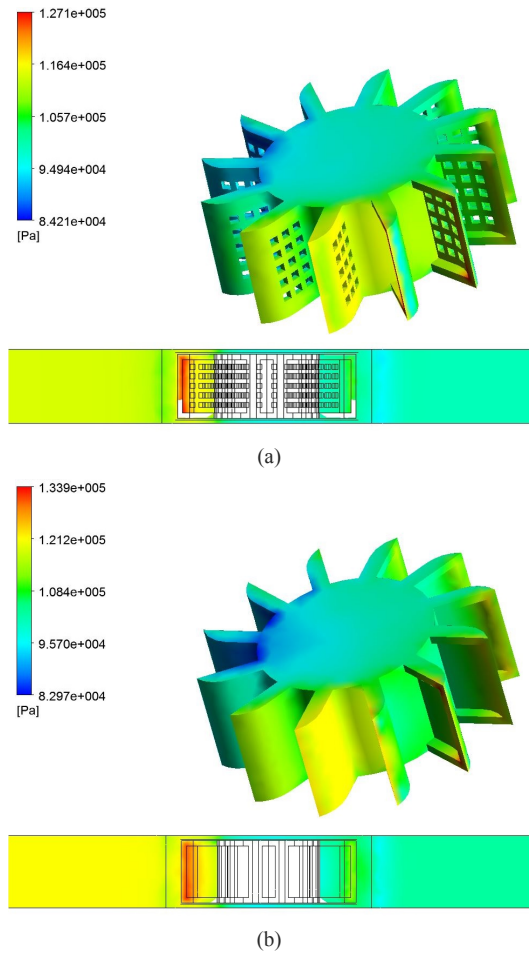


Fig. 5. Pressure distribution of hydro turbine (a)Blade with holes (b)Blade without holes

Fig. 6은 수조와 수차 블레이드 주변의 내부유동을 분석한 것으로서 유동속도의 크기가 변화하는 것을 벡터의 분포로 알 수 있다. Fig.6 (a)와 Fig. 6 (b)에 각각 타공이 있는 수차 블레이드와 타공이 없는 수차 블레이드의 내부유동을 나타냈다. Fig. 6에서와 같이 타공이 있는 수차 블레이드에서는 순간 최대 유속이 9.1 m/s, 타공이 없는 수차 블레이드에서는 순간 최대 유속이 9.6 m/s로 분석되었다. 이와 같은 해석결과로부터 타공이 있는 수차 블레이드의 유속이 타공이 없는 수차 블레이드의 유속보다 약 5.6 % 감소하는 것으로 나타났다.

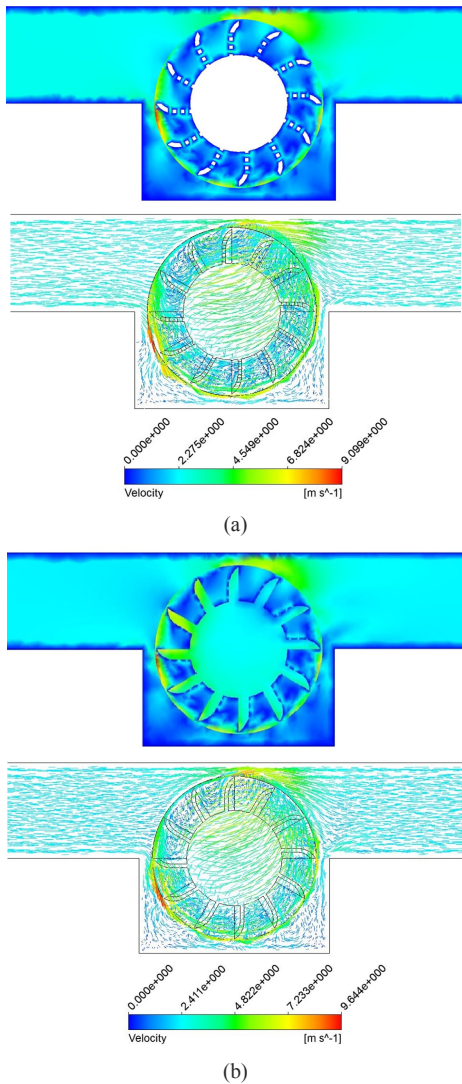


Fig. 6. Internal flow distribution of hydro turbine (a)Blade with holes (b)Blade without holes

3. 결론

본 연구에서는 2.0 m/s의 저유속 조건에서 소수력 에너지 생산효율 증진을 위한 차세대 소수력 발전시스템 설계 및 개발의 일환으로서 항력식 수직축 수차의 제작에 앞서 형상 특성에 따른 수치해석을 수행하였다. 전산 유체 동역학(CFD) 기법을 이용하여 수차의 블레이드 타공 유무에 따른 블레이드 압력변화 및 내부유동을 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 수차 블레이드의 타공 유무에 따른 압력분포의 경우, 타공이 있는 수차 블레이드에 발생하는 압력이 타공이 없는 수차 블레이드보다 약 5.1 % 감소되는 것으로 나타났다.
- 2) 수차와 수차 블레이드 주변의 내부유동을 분석한 결과, 벡터의 분포로부터 유동속도가 변화하는 것을 알 수 있었으며 타공이 있는 수차 블레이드의 유속이 타공이 없는 수차 블레이드의 유속보다 약 5.6 % 감소하는 것으로 밝혀졌다.
- 3) 수차의 블레이드 타공 유무에 따른 블레이드 압력변화와 내부유동 분석결과로부터 본 연구에서 가정한 해석조건과 유사한 수리환경에서 운영되는 수차는 블레이드에 타공을 형성하는 것이 구조안전성 측면에서 도움이 될 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에서는 수차의 블레이드 체결부 제작시 구조설계를 위한 기초자료를 확보하였으며, 향후 수차의 발전 성능과 효율을 증진시키기 위한 블레이드 타공 최적화 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] W. S. Park, Small Hydropower Development Practices, of Existing Structures Using, *Korean Solar Energy Society*, vol. 3, no. 4, 2004.
- [2] K. H. Kim, Framework of Feasibility Study for Small Hydropower Development, Inha University, Master's Thesis, 2008.
- [3] D. H. Na, Feasibility Study on the Construction of Small Hydro-Power Plants at the Discharge Point of Gumi Sewage Treatment plant, Kumoh National Institute of Technology, doctorate thesis, 2010.
- [4] J. Y. Kum, Structure Design and Experimental Appraisal of the Drag Force Type Vertical Axis Wind Turbine, Busan National University, M. S. Thesis, 2005.
- [5] J. H. Park, Y. T. Kim, Y. Cho, B. K. Kim and Y. H. Lee, Performance Analysis of 10kW Class Propeller Hydro Turbine by the Change of Flow Rates and the Number of Runner Vane Using CFD, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*: vol. 17, no. 2, pp.05-11, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.2.005>
- [6] J. H. Park, Y. T. Kim, B. G. Kim and Y. H. Lee, CFD Analysis of a Micro Propeller-Type Hydro Turbine by Varying the Number of Runner and Guide Vanes, *AFORE 2012, JEJU.(HPFRCCS)*, pp. 3-12, 2007.
- [7] H. K. Kim, T. S. Kim, J. H. Lee, B. Y. Moon and K.

W. Kang, Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 35, no. 11, pp. 1407-1413, 2011.

DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.11.1407>

- [8] D. S. Kim, W. Y. Jung and J. Jung, Stress Analysis of the Blade Joint for a Small Wind Turbine, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 36, no. 1, pp. 117-124, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.1.117>

- [9] S. Y. Jeong and K. B. Lee, Flow characteristics analysis and test in the Pelton turbine for pico hydro power using surplus water, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 4, pp. 325-331, 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.325>

박 유 신(Yoo-Sin Park)

[정회원]



- 2002년 2월 : 동국대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 ~ 1999년 9월 : 동아건설산업(주) 플랜트사업부
- 2002년 1월 ~ 2004년 12월 : 한라산업개발(주) 환경사업부
- 2010년 9월 ~ 현재 : (주)세니즈 코퍼레이션 이사

<관심분야>

토목구조, 에너지

김 기 중(Ki-Jung Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 연세대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 1월 ~ 1998년 6월 : 동부건설(주) 기술연구소
- 2003년 8월 ~ 2004년 9월 : University of California 객원연구원
- 2005년 6월 ~ 현재 : (주)세니즈 코퍼레이션 대표이사

<관심분야>

토목구조, 에너지