

하수처리장의 방류수를 이용한 일체형 발전장치의 성능평가 및 경제성 분석

박유신*, 김기중
(주)세니츠코퍼레이션 기술연구소

Performance Evaluation and Economic Analysis on the Integrated Small Hydro Power Generation Device Using a Discharged Water of Sewage Treatment Plant

Yoo-Sin Park*, Ki-Jung Kim
Institute of Technology, CENITS Corporation Inc.

요약 하수처리장의 방류수는 낙차를 이용하는 기존 발전 방식으로는 소수력발전에 대한 경제성이 없어 버려지는 물로 인식되어져 왔다. 국내 대다수의 하수처리장 방류수로는 2m 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 논문은 저낙차의 유수 특성을 갖는 하수처리장 방류수에 적용 가능한 일체형 소수력 발전장치의 개발을 완료하여 발전장치에 대한 성능 평가 및 결과를 분석하였다. 그리고 실제 적용을 위한 경제성과 활용방안을 제시하였다. 분석 결과, 발전기 효율은 92%이며 전력량은 10kWh로서 경제성의 경우 B/C를 1.0 이상 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 특히, 일체형 발전장치의 운영수준을 정격출력의 80% 이상으로 유지할 경우 경제성 확보가 가능하여 23년차 이후에는 투자비를 회수하여 이익이 발생하는 것으로 확인하였다. 일체형 소수력 발전장치는 하수처리장의 방류수뿐만 아니라 이와 유사한 유수 특성을 갖는 시설에 확대 적용할 경우 긍정적인 효과가 기대된다.

Abstract The water discharged from sewage treatment plants has been considered to be useless, due to its lack of economic utility for small hydro power generation. Considering that most sewage treatment facilities have a water head of less than 2 meters and their flow rate is constant, it is necessary to develop a small hydro power generation device capable of maintaining stable power generation and efficiency. This paper presents the development of an integrated small hydro power generation system and presents its performance evaluation and results. Then, the economics and use of the system for practical applications are suggested. As a result, it is found that the generator efficiency is 92%, the electric energy produced is 10kWh and the economic efficiency, as described by the B/C ratio, is 1.0 or more. Particularly, if the operating level of the generation device is maintained at 80% or more of the rated power, it is possible to secure its economic efficiency and, after 23 years, the investment cost will be returned. The integrated hydro power generation device is expected to have a positive effect not only in terms of the water discharged from the sewage treatment plant, but also in terms of facilities capable of securing similar flow characteristics.

Keywords : economics, hydro power device, low head, performance evaluation, sewage treatment plant

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 25, 2017

Revised September 13, 2017

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

1. 서론

소수력 발전의 적극적인 개발은 신재생에너지의 개발 뿐만 아니라 경제적인 파급효과가 있어 개발의 필요성은 인식되고 있으나 외국과 같이 활성화되지 못하고 있다. 그 이유는 기존의 소수력 발전이 대부분 강, 하천에 국한되어 있어 계절적 특성에 따른 불안정한 유량 확보 및 과도한 초기비용 등으로 인해 경제성이 확보되지 않기 때문이다[1]. 또한, 인위적으로 유수의 낙차를 확보하기 위한 각종 부대공사는 환경적으로 친화적이지 못함과 동시에 지역 민원을 초래하고 있는 실정이다.

최근 국내에서는 이를 극복하기 위한 방안으로 미활용 소규모 소수력 자원 이용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다[2]. 특히, 하수처리장 방류수는 기존 풍력 및 태양광 발전장치의 풍량·풍속, 일조량 등의 불확실성에 기인한 발전효율 및 생산성 저하로 이어지는 단점을 극복할 수 있으므로 잠재적인 에너지원으로써 개발 가치가 충분히 있는 것으로 알려져 있다. 국내 대다수 하수처리장의 방류구 낙차는 2m 미만이지만 하천에 비해 비교적 안정적인 유량의 확보가 가능하기 때문에 상대적으로 높은 가동률 확보가 가능하다.

따라서 하수처리장 방류수의 유량이 지속적이며 변동이 크지 않다는 점을 고려할 때, 저낙차 조건에서도 안정적인 전력 생산과 효율을 유지할 수 있는 수차 및 발전장치의 개발이 요구된다. 이에 본 논문에서는 버려지는 물로 인식되어온 하수처리장의 방류수를 적극적으로 활용하여 2m 이하 저낙차의 유수 조건에서도 발전이 가능한 일체형 발전장치 개발을 완료하고 일체형 발전장치의 성능을 평가하였다. 또한 발전장치 적용에 따른 경제성 분석과 활용방안을 제시하였다.

2. 일체형 소수력 발전장치

일체형 발전장치는 Fig. 1, Fig. 2와 같이 발전수로와 수직축 수차 그리고 수차의 회전력을 전기에너지로 변환하는 발전기 및 전력장치로 구성된다. 발전수로에 일정 수위 유지를 위한 차수장치가 포함되어 있다.

발전장치의 개발 방향은 저낙차의 유수조건에서도 발전이 가능하도록 물의 운동에너지를 극대화하는 것이다. 하수처리장 방류수의 유수 특성을 반영하고, 실제 하수처리장 현장 환경에 대응할 수 있는 구조로 설치 공간과

크기를 축소하고 모듈의 조합을 위해 일체화 할 수 있는 효과를 구현하고자 하였다.

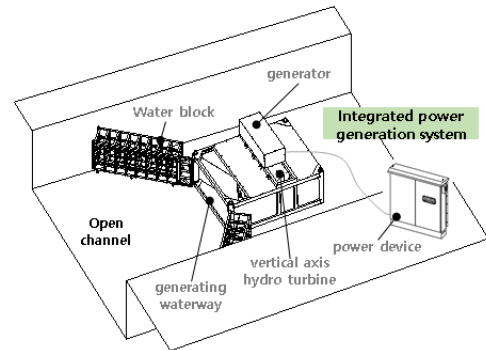


Fig. 1. Overview of integrated power generation system

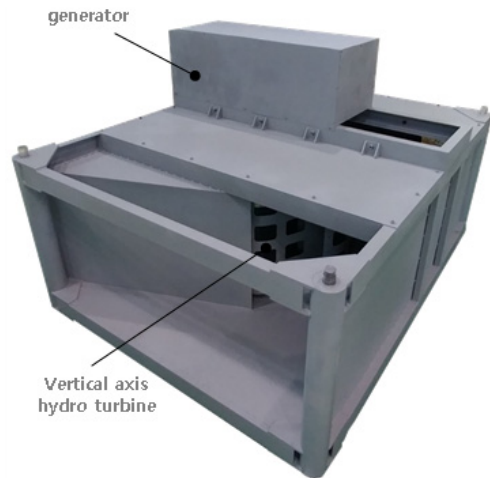


Fig. 2. Prototype of integrated power generation device

일체형 발전장치의 핵심은 저유속의 흐르는 물을 활용하여 발전기에 회전력을 전달하는 수직축 수차이다. 수직축 수차 날개는 Fig. 3과 같이 타공에 의한 공극과 가변형 플레이트로 이루어져 있다. 수차 날개 끝단에는 플레이트가 힌지 구조로 결합되어 있어 물의 흐름과 수차의 회전 방향에 따라 개폐되는 구조이다.

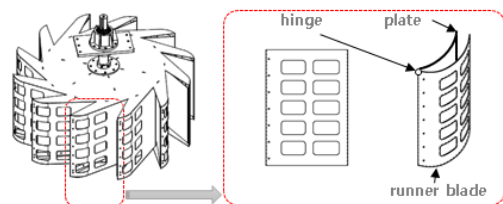


Fig. 3. Drag force type vertical axis hydro turbine

유수 흐름에 따른 수차의 작동 원리는 Fig. 4와 같다. 수차의 회전 방향이 물의 흐름 방향과 일치하는 경우 수차의 플레이트는 수차 날개와 밀착되어 유공을 폐쇄하고 수차 회전 방향이 물의 흐름과 반대 방향으로 이동하게 되면 플레이트가 수차 날개에서 이탈되어 유공을 개방하게 된다. 이러한 작동 원리에 의해 수차에 전달되는 유수의 흐름을 최대한 이용할 수 있고 회전 감소 없이 지속적인 회전을 유지할 수 있다.

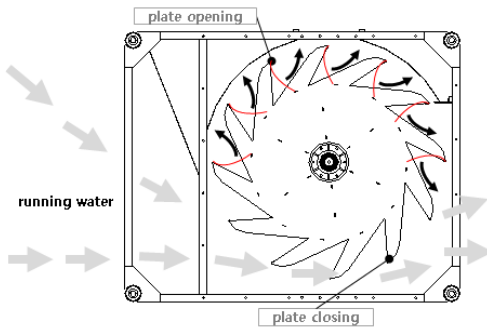


Fig. 4. Operation concept of hydro turbine

일체형 발전장치는 하수처리장의 방류수를 활용하여 소수력발전을 위한 발전장치로 개발되었다. 발전장치는 하수처리장 방류구 구조물의 변경이나 개조 없이 단독으로 설치하여 전력을 생산할 수 있다. 발전장치를 병렬 또는 직렬로 다수 연결하여도 유수의 흐름을 방해하지 않고 목표로 하는 전력 생산이 가능하여 소규모 발전소의 건설과 유사 효과가 기대된다. 즉, 하수처리장 본연의 운영 목적을 달성함과 동시에 방류수를 에너지원으로 이용하여 부가적으로 적정 수준의 전력을 발전하는 하수처리장 발전소 개념으로 확대하여 활용할 수 있다.

3. 일체형 발전장치 성능 평가

3.1 성능 평가 방법

일체형 발전장치의 성능을 평가하기 위해 실제 하수처리장의 방류구를 활용하는 경우 하수처리장 시설 사용을 위한 인허가와 다양한 운영 환경 조건의 적용에 제한적일 수밖에 없으므로 육상에서 시험운동을 계획하였다. 일반적으로 신재생에너지 시스템의 경우 실제 현장 적용을 통한 시험운영에 무리가 있어 설치 환경 특성을 고려한 조건에서 가혹시험을 진행하여 짧은 시간에 장치의

안정성을 확인하고 있다. 따라서 일반적인 하수처리장 방류수의 유수 특성(회전수, 토크 등)에 대응할 수 있는 시험 장치를 제작하여 기계장치에 의한 입력치를 변경하면서 일체형 발전장치의 성능 분석을 수행하였다.

3.1.1 발전기 효율 시험

발전기 효율 시험에는 모터 구동에 의한 발전기 효율 측정 방법을 적용하였다. 발전기 효율 시험 운영 구조도는 Fig. 5에 나타내었다.

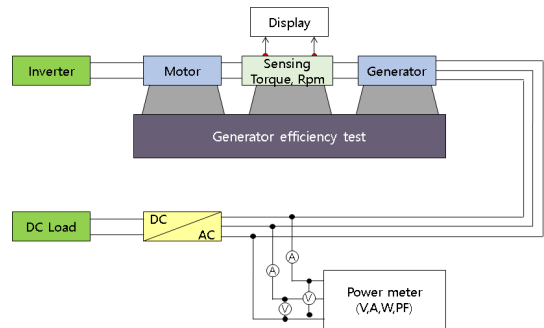


Fig. 5. Configuration diagram of generator efficiency test

적용된 모터는 발전기에 최대 150rpm의 회전수와 토크를 변경시켜 회전력을 전달하게 되고 발전기 후단에 위치한 파워미터를 통해 전력 측정치를 확인한다. 발전기 효율의 계산은 기계적 입력에너지와 출력에너지의 비율로 산정하였다. 발전기 효율 시험 장치는 Fig. 6과 같이 구성된다.

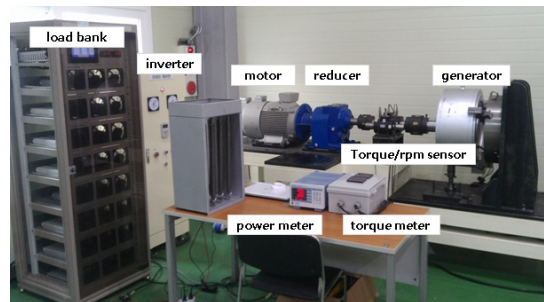


Fig. 6. Equipment configuration of generator efficiency test

3.1.2 전력량 측정 시험

육상 기계식 시운전에 활용하는 시험체는 제작 중인 발전장치 시제품의 일부를 변형시키고 수차를 구동시킬

수 있는 있는 모터를 별도로 설치하였다. 이때 수차에 전달되는 회전수와 토크는 유입수의 유수 특성에 부합하도록 구현하였다. 전력량 측정시험 운영 구조도와 장치구성은 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

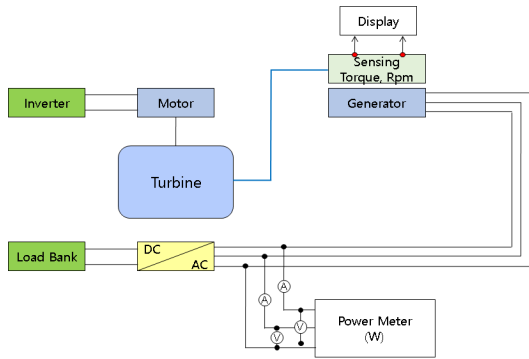


Fig. 7. Configuration diagram of electric energy test

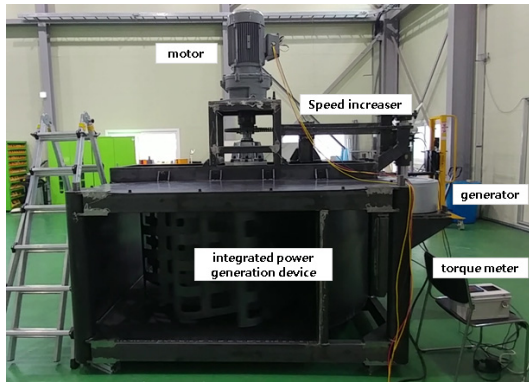


Fig. 8. Equipment configuration of electric energy test

수차에 전달되는 회전력을 일정하게 유지하여 발전장치의 지속적인 발전 가능 여부를 확인하였다. 구동모터에 의해 수차에 전달되는 에너지는 수차 회전수를 20~30rpm 이하로 유지시키도록 강제하고 계측되는 전력량이 10kWh 이상으로 유지되는지 확인하였다. 이때의 전기적 특성도 함께 검토하여 발전장치의 특성치 설정에 활용하도록 하였다. 시험의 객관성 확보를 위해 한국생산기술시험연구원의 시험과정 및 결과에 대한 검증 후 시험성적서를 확보하였다.

3.2 성능 평가 분석

발전기 효율 시험에 의해 Tabel 1과 같은 결과를 얻었다. 이때의 발전기 효율은 92~96% 수준으로 안정적

인 결과를 보여주고 있다. 발전장치에 적용하는 발전기는 일정한 입력에너지가 유지되는 조건에서는 안정적인 발전이 가능한 것으로 분석되었다. 실제 발전장치에 유입되는 하수처리장 방류수가 충분한 유량을 갖도록 한다면 10kW 이상의 출력 유지는 가능한 것으로 확인되었다.

Table 1. Generator efficiency test result(certification of Korea Testing Certification)

| rotation [rpm] | torque [Nm] | power (W) | efficiency (%) |
|----------------|-------------|-----------|----------------|
| 150 | 78.1 | 1.226 | 94.2 |
| 150 | 147.4 | 2.315 | 95.7 |
| 150 | 274.5 | 4.311 | 96.5 |
| 150 | 451.7 | 7.094 | 95.3 |
| 150 | 698.1 | 10.965 | 92.2 |

발전기의 정격 출력을 확보하기 위해 수차례 시험을 진행한 결과 발전장치를 통한 전력 발생량은 시간당 10kW 수준을 유지하였다. 시간 간격을 달리하여 시험한 경우에도 발전장치가 출력은 일정 수준의 출력을 나타내고 있으며 안정적인 운영이 가능하였다. Tabel 2에 전력량 측정 결과를 나타내었다. 전력량은 증감폭 없이 평균적으로 10kWh를 유지하고 있다.

Table 2. Electric energy test result(certification of Korea Institute of Industrial Technology)

| no. | energy(kWh) | voltage(V) | current(A) |
|-----|-------------|------------|------------|
| 1 | 10.411 | 353.270 | 18.182 |
| 2 | 10.376 | 352.700 | 18.150 |
| 3 | 10.409 | 353.270 | 18.177 |
| 4 | 10.360 | 352.400 | 18.137 |
| 5 | 10.374 | 352.620 | 18.150 |
| 6 | 10.380 | 352.710 | 18.156 |
| 7 | 10.382 | 352.720 | 18.159 |
| 8 | 10.374 | 352.370 | 18.152 |
| 9 | 10.376 | 352.700 | 18.150 |
| 10 | 10.370 | 352.600 | 18.144 |

발전장치에 적용된 발전기 부하시험을 통해 시험성적서를 기준으로 발전기의 효율 92%를 얻을 수 있었다. 그리고 기계식 시운전 장치에 의해 발전장치에 정격 출력의 확보 가능성을 확보하고 시간당 평균 발전량 10kWh에 대한 시험성적 결과를 확보하였다.

4. 일체형 발전장치의 경제성 및 활용방안

4.1 경제성 평가

일체형 발전장치는 기존의 소수력 발전방식과 달리 충분한 낙차가 확보되지 않는 방류구에 설치하게 된다. 일체형 발전장치는 경제성 측면에서는 어느 정도의 경제적 가치가 있는지 검토할 필요가 있다. 따라서 일체형 발전장치의 경제성 확보 여부와 경제적인 운영수준을 확인하고자 경제성 검토를 수행하였다.

일체형 발전장치의 경제성 분석을 위해 편익·비용분석(Benefit-Cost analysis: B/C) 기법 및 생애주기비용(Life Cycle Cost: LCC) 분석기법을 적용하였다. 경제성 분석을 위한 할인율[3], 분석기간[4], 연간 유지관리비[3]는 소수력 관련 지침의 기준을 활용하였으며, 수익 분석을 위한 계통한계가격(System Marginal Price: STP)[5]을 적용하였다.

분석기간 45년 동안 운영수준에 따른 B/C 분석결과는 Table 3에 나타내었다. 일체형 발전장치는 운영수준을 정격출력의 80% 이상으로 유지할 경우 경제성 확보가 가능하며 23년차 이후에는 초기투자비를 회수하여 이익이 발생하는 것으로 분석되었다.

Table 3. Result of economic analysis(45 years)

| operation level | B/C ratio | |
|-----------------|-----------------|----------------|
| | constant prices | present prices |
| 80% | 1.18 | 1.08 |
| 85% | 1.32 | 1.21 |
| 90% | 1.54 | 1.41 |
| 95% | 1.70 | 1.56 |
| 100% | 1.87 | 1.71 |

앞서 경제성 검토 시 소수력발전에 대한 이론적 사용수명을 분석기간으로 적용하여 검토하였으나, 발전시스템의 기술변화 및 교체 등을 고려하면 현실적인 운영기간은 이보다 작게 산정하는 것이 합리적이라 판단된다. 이에 따라 분석기간을 10년으로 설정할 경우 발전장치의 운영수준은 85% 이상으로 유지하여야 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 적용한 발전시스템은 정격출력 범위에서 지속적인 운영이 가능한 장치로 경제성 확보에 무리가 없을 것으로 사료되며, 향후 발전장치의 표준화에 의해 추가적인 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

4.2 활용방안

일체형 발전장치는 하수처리장의 방류수를 이용하여 소수력발전을 위한 발전장치로 개발되었다. 국내 하수처리장 중 일체형 발전장치의 적용이 가능한 하수처리장은 일 방류량이 5만톤/일 이상을 대상으로 한다. 2014년 기준으로 국내에 5만톤/일 이상의 처리용량을 갖는 하수처리장은 총 84개소로 조사되었으며, 하수처리 공정에 지장을 초래하지 않고 소수력발전이 가능하다.

정수장 취수구(유입구)는 일정 유량이 확보되고 지속적인 유수의 흐름을 갖는 하수처리장 방류구와 유사한 물의 흐름을 갖고 있으므로 일체형 발전장치를 정수장의 취수구에 확대 적용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 기존 발전 방식으로는 소수력에 대한 경제성 확보가 어려워 버려지는 물로 인식되어 온 각종 수처리 및 수리시설을 활용하는 경우 소수력발전의 확대 적용이 가능할 것으로 전망된다.

일체형 발전장치는 단독으로 설치하여 전력을 생산할 수 있다. 또한 발전장치를 병렬 또는 직렬로 다수 연결하여도 유수의 흐름을 방해하지 않고 목표토 하는 전력 생산이 가능하므로 소규모 발전소의 건설과 유사 효과가 기대된다. 즉, 수처리시설 본연의 운영 목적을 달성함과 동시에 방류수를 에너지원으로 이용하여 부가적으로 적정 수준의 전력을 발전하는 발전단지 개념으로 확대하여 활용할 수 있다.

5. 결론

일체형 발전장치는 전국적으로 운영 중인 하수처리장의 방류수를 에너지원으로 활용하여 저낙차, 저유속 조건에서도 발전이 가능하도록 하는 소수력 발전장치이다. 본 논문에서는 개발된 일체형 발전장치의 성능과 발전장치 적용에 따른 경제성을 분석하였다. 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 한국기계전기전자시험연구원과 한국생산기술연구원의 시험평가 결과 발전기의 효율은 92% 이상으로 분석되었으며 10kWh 이상의 전력량을 유지하는 것으로 확인되었다.
- 2) 편익·비용 분석기법 및 생애주기비용 분석기법에 따른 경제성 분석결과 발전장치의 운영수준 80%인 경우부터 일체형 발전장치는 B/C가 1.0 이상으로

로 계산되어 경제적 타당성이 있는 것으로 분석되었으며 일체형 발전장치의 운영수준을 정격출력의 80% 이상으로 유지할 경우 경제성 확보가 가능하며 23년차 이후에는 투자비를 회수하여 이익이 발생하는 것으로 확인하였다.

- 3) 분석기간을 10년으로 설정할 경우 발전장치의 운영수준은 85% 이상으로 유지하여야 경제성이 있는 것으로 분석되었으며 발전장치의 표준화에 의해 추가적인 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 2m 이하 저낙차 및 저유속의 우수 흐름을 갖는 전국의 하수처리장 방류구에 확대 적용할 경우 신재생에너지 분야의 추가적인 녹색 에너지기술의 확보가 가능하고 하수처리장의 방류수뿐만 아니라, 이와 유사한 우수 특성을 갖는 시설에 확대 적용할 경우 편중된 에너지 공급원의 다양화 및 신재생에너지의 적극적 개발 측면에서 긍정적인 효과가 기대된다.

References

- [1] K. J. Chae, Micro-Hydropower System with a Semi-Kaplan Turbine for Sewage Treatment Plant Application: Kiheung Respia Case Study, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 35, No. 5, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2013.35.5.363>
- [2] K. B. Lee, Domestic and overseas small hydro power generation market trend, p.15, The Korea Water Resources Development Corporation, 2012.
- [3] General Guidelines for Performing a Preliminary Feasibility Study, Korea Development Institute, 2009.
- [4] Enforcement Decree of the Act on the Construction of Dams and Support for Surrounding Areas, etc. Article 27 [Attached Table 2], Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2013.
- [5] Electric Power Statistics Information System(EPSIS), <https://epsis.kpx.or.kr>

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)세니즈코 퍼레이션 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)세니즈코 퍼레이션 대표이사

<관심분야>
토목구조, 에너지