

폐열 이용 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 성능

이호생* · 정동호* · 홍석원* · 김현주*

*한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부

Performance Analysis of Closed-type OTEC Cycle using Waste Heat

Ho-Saeng Lee*, Dong-Ho Jung*, Seok-Won Hong* and Hyeon-Ju Kim*

*Marine Structure · Plant Research Department, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Closed-type ocean thermal energy conversion 폐쇄형 해양온도차발전, Deep seawater 해양심층수, Generator 재생기, Waste heat 폐열

ABSTRACT: The cycle performance of closed ocean thermal energy conversion (OTEC) system with 50 kW gross power was evaluated to obtain the basic data for the optimal design of OTEC using waste heat such as solar power, discharged heat from condenser of power plant. The basic thermodynamic model for OTEC is Rankine cycle, and the surface seawater and deep seawater were used for the heat source of evaporator and condenser, respectively. The cycle performance such as efficiency, heat exchanger capacity, etc. was analyzed on the variation of temperature increase by waste heat. The cycle efficiency increased and necessary capacity of evaporator and condenser decreased under 50kW gross power with respect to the temperature increase of working fluid. Also, when the temperature increase is about 13.5°C, the heat which can be used is generated. By generator with 0.9 effectiveness under the simulated condition, the cycle efficiency was improved approximately 3.0% comparing with the basic cycle.

1. 서 론

현재 인류가 당연하고 있는 지구 환경에 대한 문제점 및 화석 연료 고갈 가능성으로 인한 에너지 위기 등으로 인해 기존 에너지 자원을 대체할 수 있는 신재생에너지에 대한 관심이 날로 증대되고 있다. 지구온난화에 대처하기 위한 목적으로 기후변화협약 등을 통해 온실가스 감축을 위한 실천적 규범을 발효하였으나, 전 세계의 에너지 소비는 향후 지속적인 경제발전을 추진하기 위해서 계속 증가할 것으로 전망되고 있다. 특히 우리나라는 필요 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하는 실정으로서 기존 화석연료를 대체할 수 있는 환경에 무해한 대체 에너지원 개발이 절실히 필요하다(서태범, 2001). 이 중 해양 에너지는 매우 안정적이며 무한한 청정에너지 자원이다. 지구 표면의 약 71%에 달하는 해양은 조력, 조류, 파력, 해양온도차 등 다양한 형태로 부존하고 있으며, 해양으로 흡수되는 연간 태양 에너지의 양은 현재 인간이 소비하고 있는 전체 에너지량의 약 4,000 배에 해당하는 양이다(Vega, 2003). 해양 에너지는 기존 화석에너지에 비해서 비용이 많은 등다는 단점 등 문제가 있지만 해양공학 기술의 발전에 따른 기술적 어려움의 극복과 새로운 청정에너지 개발의 필요성의 급증에 따라 활발한 연구가 진행되고 있다. 미국과 일본을 비롯한 선진국에서는 해양에너지를 이미 실용화단계까지 개발하고 있어 우리나라에서도 이와 관련된 연구가 절실히 필요한 실정이다. 해양온도차발전은 따뜻한 해양표층수와 차가운 해양심층수의 온도차를 이용하여 암모니아

등의 작동유체로 터빈을 돌려 발전하는 방식이다. 이는 다른 해양에너지에 비해 변동성이 적어 안정적인 전력 생산이 가능한 장점이 강조되고 있다. 1881년 프랑스에서 최초로 해양온도차 발전에 대한 개념이 제안되었고(D'Arsonal, 1881), 1930년도에 개방형 해양온도차발전 실험을 수행하여 전력 생산에 성공하였으나, 펌프 등 장치 구동에 필요한 동력보다 적은 양이었다(Claude, 1990). 그 후, 뚜렷한 성과없이 부진하던 연구는 1973년 1차 석유파동 이후 전 세계적으로 대체 에너지원에 대한 연구가 가속되면서 해양온도차발전에 대한 연구도 다시 시작되어 미국 및 일본 등지에서 소규모 해상실험이 실시된 바 있다. 미국은 1979년 하와이 Keahole point에서 50kW급 실험용 폐쇄형 해양온도차발전 시스템을 최초로 실험에 성공하였고, 1993년도에는 약 213kW의 전기를 생산하는 등 해양온도차발전에 대한 주도적인 연구로 현재 세계적인 기술을 선도하고 있다(박성식과 김남진, 2010). 일본의 경우 1974년에 발족한 Sun-shine 계획의 일부로 1982년 도쿠노시마에 50kW급 육상형 폐순환식 해양온도차 발전을 설치하였으며(홍기용과 현범수, 2010), 그 후 사가 대학에서 암모니아 및 R22를 작동유체로 하는 해양온도차발전 실험장치를 설치하여 꾸준한 연구를 수행 중에 있으며(Uehara and Ikegami, 1990), 혼합 작동 유체를 사용한 Uehara 사이클을 개발하여 사이클 효율을 향상시켰다(Uehara, 1999). 비록 제한적이긴 하지만 동해에 해양온도차 발전에 적합한 해수온도차를 가지는 것으로 밝혀졌고(Korea Power Company, 1989), 특히 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 비교적 해안에서 근거리

교신저자 김현주: 강원도 속초시 죽왕면 오호리 245-7, 033-630-5000, hjkim@moeri.re.kr

심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10km 내외에서 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다(이호생 등, 2010). 국내에서는 해양온도차발전 사이클에 대한 시뮬레이션(김현주 등, 2010) 및 20kW급 해양온도차 파일렛 플랜트 성능실험을 수행한 바 있으나(엄지홍 등, 2001), 여전히 해양온도차발전의 실용화를 위한 사이클 효율 향상에 대한 연구가 필요한 실정이다.

한편, 태양열이나 발전소 복수기 배열 등 표층수보다 높은 온도 레벨의 폐열을 사용한다면 해양온도차발전 효율을 증대시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 기화기로 유입되는 작동유체의 온도를 폐열을 활용하여 상승시키는 방법이 사이클 효율에 미치는 영향을 분석하고, 재생기를 적용을 통한 사이클 성능을 비교하고자 한다.

2. 폐쇄형 해양온도차발전 사이클

기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클은 기화기, 터빈, 응축기 및 펌프로 구성되어 있고, 이들 구성기기가 서로 파이프라인으로 연결되어 작동되는데 폐쇄형 해양온도차발전의 기본 원리는 일반 발전의 원리와 동일하다. 표층수와 심층수 사이의 온도차를 이용해 비등점이 낮은 작동유체를 표층수로 증발시킨 뒤 그 압력차를 이용해 터빈에서 발전하는 것으로, 고온의 열원에서 저온의 열원으로 열이 흘러 들어가 터빈을 구동시켜 전력을 생산하는 방법이다. 작동유체는 기화기에서 표층수와 열교환하여 증발하여 과열증기 상태가 되어 터빈으로 유입된다. 작동유체 증기는 터빈 가동 후 응축기로 유입되어 심층수와 열교환하여 응축되면서 과냉 상태가 되어 펌프에 의해 승압되어 다시 기화기로 유입된다. Fig. 2는 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 T-s 선도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기는 가열, 상변화, 과열 구간 등 3 구간으로, 응축기는 상변화 및 과냉 등 2 구간으로 설정하였고, 터빈 및 펌프는 각각 이상적인 등엔트로피과정으로 가정하였다. 또한, 외부와의 열교환 및 열교환기 내에서의 압력강하는 무시하였다.

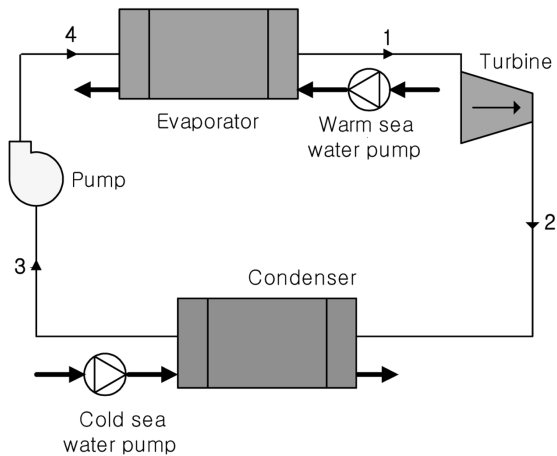


Fig. 1 Diagram of Closed OTEC cycle

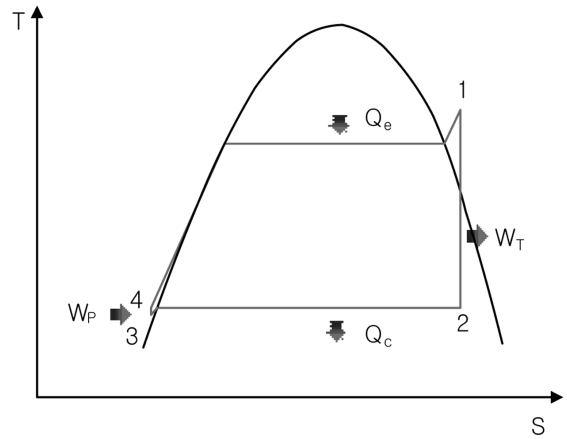


Fig. 2 T-s diagram of Closed OTEC cycle

폐쇄형 해양온도차발전 사이클을 모사하기 위해 EES(Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하였고, 기본적인 랭킨 사이클을 설계하여 시뮬레이션에 이용하였다. EES는 증기동력사이클 및 냉동사이클 등 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태값을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있어 이번 사이클 시뮬레이션에 사용하였다.

또한, 기화기 증발열원으로 26°C의 표층수를 이용하면서 표층수보다 높은 온도 레벨의 이용 가능한 폐열을 기화기 출구 증기 상태의 작동유체와 열교환시켜 터빈으로 유입시키는 작동유체의 온도상승이 사이클 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전에 대해서 기화기 출구의 작동유체와 해양 표층수보다 온도 레벨이 높은 폐열 등을 이용할 때의 사이클 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 기화기 출구의 작동유체는 열교환기(HX)에서 폐열과 열교환 후 온도가 상승하여 터빈으로 유입된다.

Table 1은 사이클 모사를 위한 조건을 나타내고 있다. Table 1에서와 같이 폐열을 이용한 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 모사를 위해 사이클 출력을 50kW로 설정하였으며, 작동유체는 암모니아, 심층수 온도는 5°C, 기화기 증발열원으로 사용되는

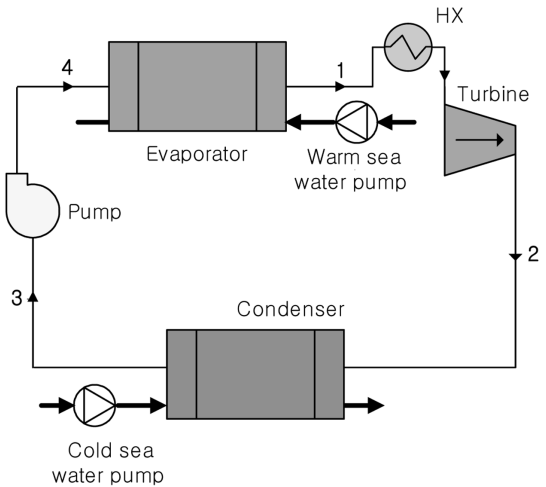


Fig. 3 Diagram of Closed-type OTEC cycle using waste heat

Table 1 Simulated condition

Parameter	Value
Gross power (kW)	50
Cold sea water temperature (°C)	5
Warm sea water temperature (°C)	26
Isentropic turbine efficiency (%)	85
Isentropic pump efficiency (%)	85
Working fluid	Ammonia
Temperature increase (°C)	5~20

발전소 온배수 온도는 26°C, 폐열과의 열교환을 통해 증발기로 유입되는 작동유체의 온도 상승을 5~20°C로 변화시켜 사이클 성능을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 기화기 출구 작동유체가 해양 표층수보다 높은 온도 레벨의 폐열 등과 열교환 후 온도가 상승하여 터빈으로 유입시켰을 때, 그 온도 상승에 대한 해양온도차발전 사이클 효율 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 폐열과의 열교환을 통해 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 상승할수록 사이클 효율이 증가함을 알 수 있다. 총 출력이 50kW에 대해 폐열과의 열교환을 통해 터빈 유입 작동유체의 온도가 약 20°C 상승시 사이클 효율은 약 3.3%로 터빈 유입 작동 유체 온도 상승이 없을 때에 비해 약 3.5% 증가하였다. Fig. 5는 총 출력 50kW에 대해 폐열과의 열교환을 통한 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도 상승에 따른 기화기 및 응축기의 용량 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 상승할수록 사이클 효율이 상승하게 되고, 그로 인해 출력 50kW에 대해 필요한 기화기 및 응축기 용량이 감소함을 알 수 있다. 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 20°C 상승시 기화기의 용량은 온도 상승이 없을 때에 비해 약 8.3% 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

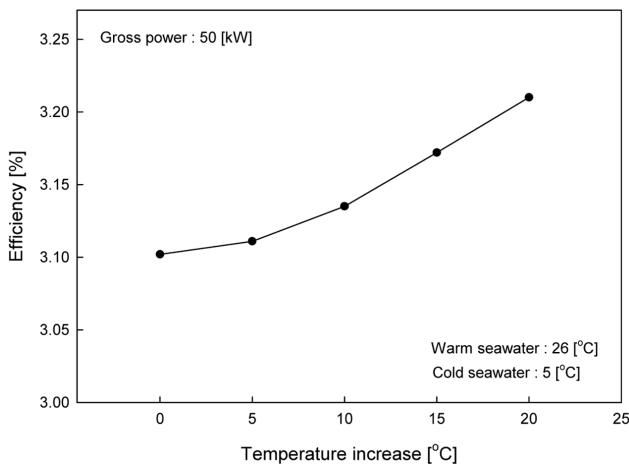


Fig. 4 Efficiency variation on temperature increase

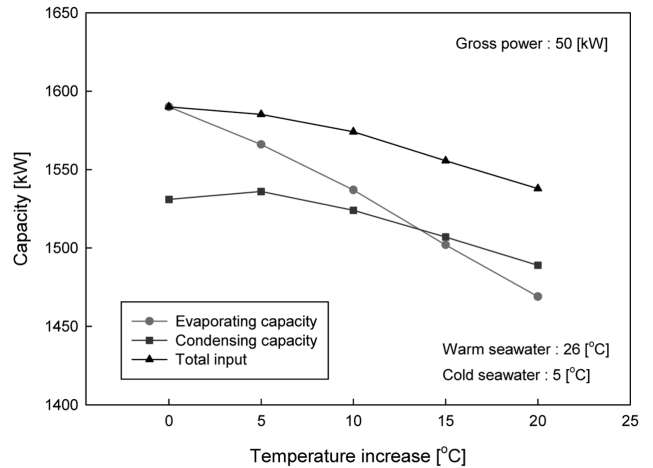


Fig. 5 Capacity variation on temperature increase

여기서, Fig. 6에서와 같이 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도 상승에 따른 증발기 및 응축기의 용량 변화에서 온도 상승이 약 13.5°C 이상일 때에는 응축기 용량이 증발기 용량보다 증가하게 됨을 알 수 있다. 이 지점에서 터빈 출구에서의 해양온도차발전 사이클 T-s 선도를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 기화기 출구는 과열이 없는 포화상태로 해석을 수행하였다. 여기서 터빈 출구상태는 과열 상태가 되고, 응축기에서 이 과열 증기의 열을 냉각시키게 되므로 이용 가능 열원을 버리게 되고, 응축기 용량이 증대되는 문제가 발생하게 된다. 본 시뮬레이션에서는 응축기의 냉각열원으로 심층수를 가정하였고, 응축기 용량 증대에 따른 심층수 취수량이 증가하게 되는 문제가 발생하게 된다. 따라서 터빈 출구에서 발생하는 이용 가능 열원을 회수하고 사용하여 사이클 효율을 증대시키기 위해 Fig. 8에서와 같은 재생기를 적용할 필요가 있음을 알 수 있다.

재생기의 유용도를 0.9로 가정했을 때, 총 출력 50kW급 해양 온도차발전 사이클의 성능을 재생기를 적용하지 않았을 때와 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서와 같이 재생기를 적용하여 터빈 출구 작동유체의 과열 증기가 가지는 열을 회수

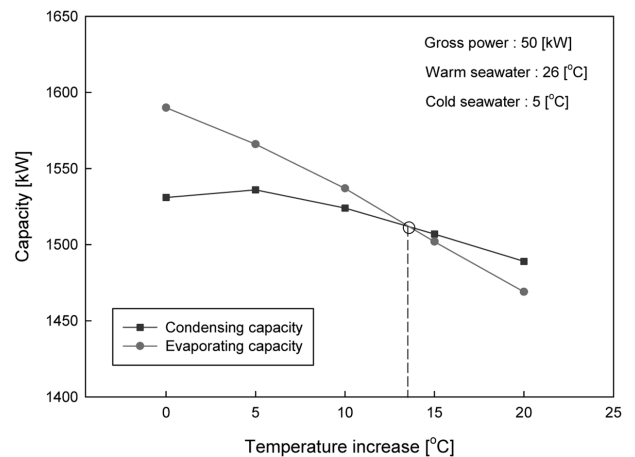


Fig. 6 Capacity variation of evaporator and condenser on temperature increase

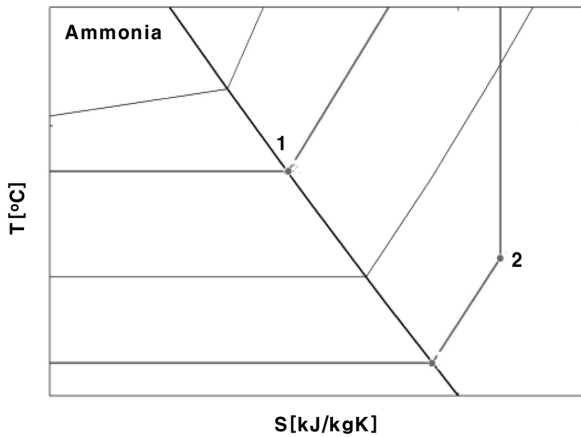


Fig. 7 T-s diagram for turbine outlet

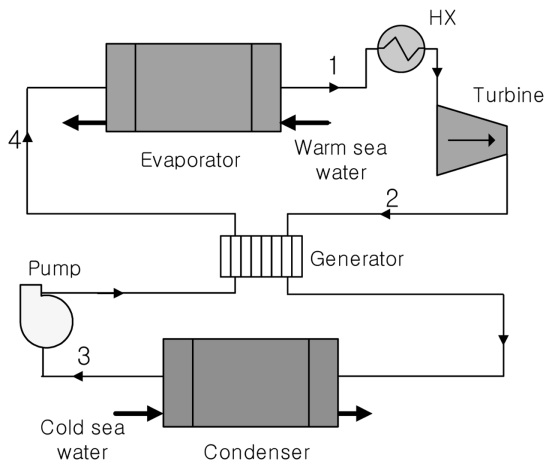


Fig. 8 Closed-type OTEC cycle with generator

Table 2 Comparison of efficiency and net power

Parameter	Basic cycle	Generator
Efficiency (%)	3.10	3.19
Evaporating capacity (kW)	1590	1498
Condensing capacity (kW)	1539	1502
Mass flow rate of working fluid (kg/s)	1.30	1.22

하여 기화기로 유입되는 작동유체에 전달한 결과 사이클 효율이 증가하였고, 동일 총 출력에 대한 필요 열교환기 용량 및 작동유체 순환량이 감소하였다. 본 시뮬레이션 조건에 대해 재생기를 적용하여 약 4.3kW의 열량을 회수하였으며, 이는 발전효율을 약 3.0% 향상시킨 결과로 판단할 수 있다. 또한, 해양온도차발전 플랜트 용량이 커질수록 재생기를 통해 회수되는 열량은 증가할 것으로 생각된다.

5. 결 론

태양열, 발전소 복수기 배열 등의 이용 가능한 폐열을 해양온

도차발전 사이클의 외부 열원으로 사용하여 폐쇄형 해양온도차발전 효율을 향상시키기 위한 기초적 해석 연구를 수행하였다. 이를 위해 해양온도차발전 사이클을 모사하여 성능을 분석하고, 재생기를 적용한 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 성능을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 해양 표층수보다 높은 온도 레벨의 폐열과 열교환 후 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 상승할수록 해양온도차발전 사이클 효율은 증가하였고, 동일 총 출력에 대한 필요 열교환기 용량은 감소하였다.

(2) 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도 상승 약 13.5°C일 때에는 터빈 출구가 터빈 출구상태는 과열 상태가 되고, 재생기를 이용한 회수 가능한 열량이 발생됨을 알 수 있었다.

(3) 재생기 유용도를 0.9로 가정했을 때, 사이클 효율은 증가하였고, 동일 총 출력에 대한 필요 열교환기 용량 및 작동유체 순환량이 감소하였다. 본 시뮬레이션 조건에 대해 재생기를 적용함으로써 발전효율은 기본 사이클에 비해 약 3.0% 향상되었다.

후 기

본 연구결과는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김현주, 이호생, 정동호, 문덕수 (2010). “발전소 온배수를 이용한 1MW급 폐쇄형 해양온도차발전 성능해석”, 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제4호, pp 470-476.

박성식, 김남진 (2010). “전력 및 담수생산을 위한 해양온도차발전에 대한 연구”, 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집, pp 243-248.

서태범 (2001). “해양온도차발전 시스템의 소개”, 설비저널, 제30권, 제1호, pp 18-24.

엄지홍, 이재용, 김남진, 김중보 (2001). “20 kW급 해양온도차파이롯 플랜트 성능실험”, 대한설비공학회지, 제13권, 제10호, pp 1002-1009.

이호생, 김현주, 윤정인 (2010). “해양 심층수를 이용한 냉난방 히트펌프 시스템”, 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제1호, pp 21-25.

홍기용, 현범수 (2010). “해양에너지 기술현황과 전망”, 설비저널, 제39권, 제1호, pp 13-20.

Claude, G. (1990). “Power from the Tropical Seas”, Mechanical Engineering, Vol 52, No 12, pp 1039-1044.

D'Arsonal, A. (1881). “Utilisation de Forces Naturelles, Revue Scientifique”, Vol 17, pp 370-372.

Korea Power Company (1989). A Study on the Development of Ocean Thermal Energy conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10.

Uehara, H. and Ikegami. Y. (1990). “Optimization of a Closed-Cycle OTEC System”, Journal of Solar Energy

Engineering, Vol 112, pp 247-256.

Uehara, H. (1999). "The Experimental Research on Ocean Thermal Energy Conversion using the Uehara Cycle", Proceeding of the International OTEC/DOWA Conference, pp 132-141.

Vega, L.A. (2003). "Ocean Thermal Energy Conversion

Primer", Marine Technology Society Journal, Vol 6, No 4, pp 25-35.

2010년 11월 29일 원고 접수

2010년 12월 23일 심사 완료

2011년 2월 18일 게재 확정