

부이 내장형 선형발전기 및 그 응용 연구

차경호*, 김정택

Study on Electrical Linear Generator Containing Heaving Buoy and Its Applications

Kyungho Cha* and Jung-Taek Kim

Abstract This paper describes an electrical linear generator (IntELG) based on permanent magnets, containing heaving buoy, and its applications for the floating wave energy converters riding in parallel waves. The permanent magnets are integrated with the heaving buoy as a component and the integrated component is configured within the cylindrical IntELG to be filled with fluid. Thus, the IntELG can effectively be applied for the power-take-off of the floating wave energy converter riding in parallel waves. Typical applications are exemplified with the Pelamis and Anaconda and they are investigated for the diversely redundant power source of nuclear power plant and the cooperation with submerged tunnel(s).

Key words

Electrical Linear Generator(선형 발전기), Floating Wave Energy Converter(부유식 파력에너지 변환장치), Heaving Buoy(부이), Flexible Thin-Film PV(필름형 태양전지)

(접수일 2013. 11. 13, 수정일 2013. 12. 19, 게재확정일 2013. 12. 19)

* 한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute)

■ E-mail : khcha@kaeri.re.kr ■ Tel : (042)868-8731 ■ Fax : (042)868-9816

Subscripts

ELG : electrical linear generator

PTO : power-take-off

PV : photovoltaic

RPS : renewable energy portfolio standard

WEC : wave energy converter

1. 서론

파력발전은 에너지원의 고갈이나 비용 문제가 발생하지 않

고, 또한 다른 발전방식에 비하여 친환경적인 전력생산 방식으로 알려져 왔다. 파력에너지 변환장치(WEC; Wave Energy Converter)는 영국, 일본, 한국과 같은 해양 국가에 조력발전과 더불어 적합한 발전 방식으로 평가되며, 신재생에너지 의무할당제(RPS; Renewable energy Portfolio Standard)와 연계하여 그 필요성 및 경제성을 확보할 수 있다.

최근에는 상용발전을 위한 Pelamis P1 및 P2^(1,2)와 Anaconda 개념^(3,4) 등이 시험되고 있다. 파력에너지 변환장치의 Power-Take-Off(PTO)를 위해 유압회로(hydraulic circuit)와 영구자석을 이용한 선형발전기(ELG; Electrical Linear Generator)가 주로 개발되어 왔으나, 파력에너지 변환장치를 위한 유압

회로는 기계적 고장에 따른 신뢰성 문제가 제기될 수 있다. 최근에는 파력에너지 변환장치의 PTO를 위한 Elastomer Generator와 같은 새로운 방법도 연구되고 있다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 파랑(wave)을 평행하게 타는(swimming or riding) 부유식 파력에너지 변환장치(floating WEC)의 PTO를 위해 부이(heaving buoy)와 영구자석을 하나의 컴포넌트로 통합하여 해수면과 수평으로 배치가 가능한 부이 내장형 선형발전기(IntELG; ELG with an integration between heaving buoy and permanent magnets)와 부유식 파력에너지 변환장치에의 응용 방법을 기술하였다.

2. 연구배경

2.1 파력에너지 변환장치의 PTO

저속의 진동운동(oscillating motion)을 하는 파력에너지 변환장치의 PTO를 위해 발전기가 사용되어 왔으며, 발전기 구동방법에 따라 크게 회전형 발전기(rotary generator)와 선형발전기(linear generator)로 구분할 수 있다.

유압회로는 피스톤(piston)의 왕복운동에 의해 실린더 내부의 유체(fluid)가 압축됨으로써 유압에 의해 유체의 흐름이 형성되어 모터(hydraulic motor)를 구동하는 방식이다. 유압회로는 일정하고 연속적인 전력생산을 위해 일반적으로 Fig. 1과 같이 고압 축압기(high-pressure accumulator)와 저압 축압기(low-pressure accumulator 또는 reservoir)를 이용한다. Pelamis P1과 P2, 그리고 Anaconda가 이러한 유압회로에 의한 PTO 방식을 적용하고 있다. 그러나 유압회로는 다소 복잡한 구조에 따른 기계부품의 고장이 해양(offshore) 파력에너지

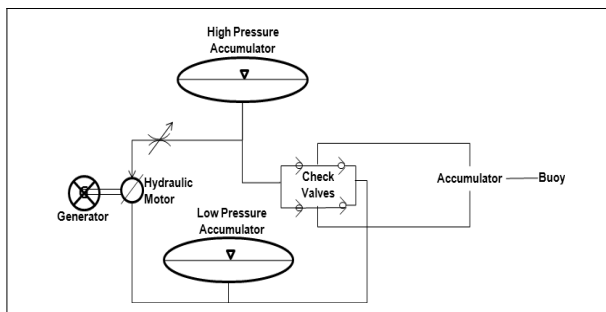


Fig. 1 Hydraulic circuit⁽⁶⁾

변환장치의 경우에는 유지보수가 문제점으로 지적되고 있다.

한편, 영구자석을 이용한 선형발전기가 파력에너지 변환장치의 PTO를 위해 연구되어 왔다. Fig. 2는 파력에너지 변환장치의 PTO를 위해 영구자석을 이용하는 수직형 선형발전기로서, 영구자석의 서로 다른 극(+/-)이 교대로 배치된 변환기(translator)가 부이에 연결되어 부이의 진동에 따라 고정자에 전기(유도전류)가 발생한다. 이러한 영구자석에 의한 선형발전기는 파력에너지 변환장치 응용을 위해 다양한 형태로 개발되고 있다.

이밖에도 부이가 상승할 때 elastomer 층(layer)이 압축되고, 하강할 때 이완됨으로써 전극 사이의 간격 변화에 따라 전압이 발생하는 elastomer generator를 파력에너지 변환장치의 PTO로 적용할 수 있다. Fig. 3은 독일 하르부르크 공과대학에서 연구 중인 파력에너지 변환장치에 응용하기 위한 dielectric elastomer transducer를 사용한 elastomer generator를 나타낸다.

이들 PTO 방식들 중에서 Fig. 1과 같은 유압회로가 파랑의 진행방향과 평행하게 부유하는 파력에너지 변환장치에 주로 이용되고 있다.

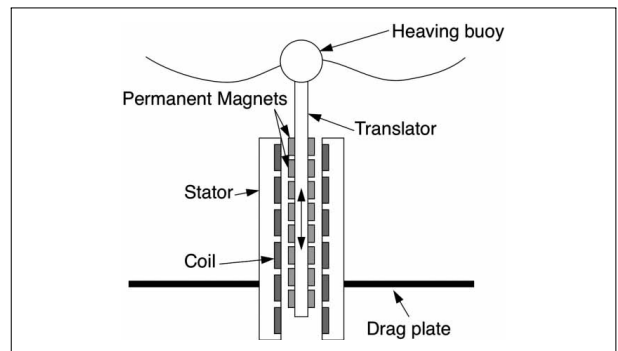


Fig. 2 ELG based on permanent magnets⁽⁶⁾

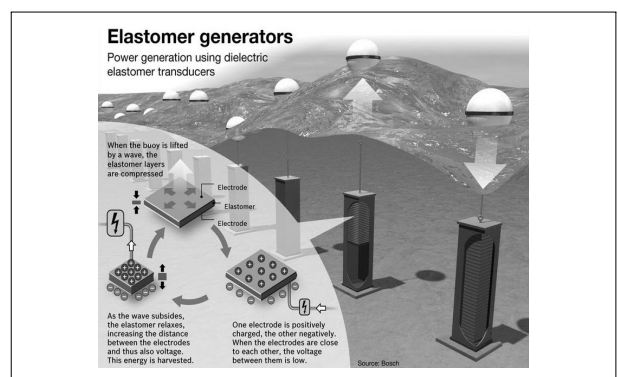


Fig. 3 Elastomer generator⁽⁵⁾

2.2 부유식 파력에너지 변환장치

다양한 형태의 파력에너지 변환장치 중에서 Fig. 4의 Pelamis 파력에너지 변환장치와 Fig. 5의 Anaconda 개념이 파랑의 진행 방향과 평행하게 배치되는 attenuator 형태의 해양(offshore) 파력에너지 변환장치로서 알려진다. 750kW Pelamis P1은 4개의 세그먼트(segments)가 연결되어 파랑(wave)의 진행 방향과 평행한 상태에서 파력에너지를 전기에너지로 변환한다. 그리고 Pelamis P1을 개선한 Pelamis P2를 이용하여 50MW 용량의 부유식 파력발전소 계획들이 수립되어 왔다.⁽²⁾

한편, Fig. 5와 같은 고무 튜브 구조에 통해 벌저(bulge wave)를 이용하는 Anaconda 개념이 제안되어 시험되고 있다. Anaconda 개념은 비교적 간단한 구조와 해상계류의 장점을 통해 다른 파력에너지 변환장치들과 비교하여 낮은 비용(capital cost)이 예측된다. 150m 길이와 7m 지름의 1MW Anaconda의 개발이 추진되고 있다.

3. 부유식 파력에너지 변환장치의 PTO를 위한 부이 내장형 선형발전기

해양 부유식 파력에너지 변환장치는 해양환경에서의 계류 및 유지보수 문제로 인해 신뢰성 확보를 제일 중요한 요인으



Fig. 4 P1A-002 on site in Portugal⁽²⁾

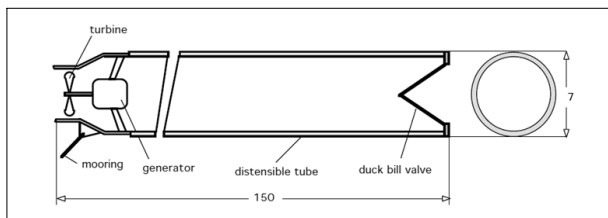


Fig. 5 Anaconda concept⁽⁴⁾

로 고려해야 한다. 그 하나의 방법으로 해양 부유식 파력에너지 변환장치를 위한 PTO 시스템의 컴포넌트 개수를 최소화하여 단순한 구조를 통해 고장을 최소화할 수 있다. 이러한 이유에서 Fig. 2와 같이 비교적 단순한 구조의 선형발전기를 파랑의 진행 방향과 평행하게 배치되는 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 응용할 수 있는 방법이 요구되며, 이를 본 연구의 주요 목적으로 하였다.

Fig. 2와 같은 선형발전기를 파랑의 진행 방향과 평행하게 배치되는 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 응용하기 위해서는 수평배치가 필요하고, 특히 부이의 배치 문제가 선결되어야 한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Fig. 2의 선형발전기를 구성하는 영구자석과 부이를 하나의 컴포넌트로 수평 통합함으로써 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 내장할 수 있는 접근을 제시한다. 이 때, 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 보다 작은 부하가 작용하도록 선형발전기의 내부에 유체 또는 물(water)을 채워 수평 통합된 영구자석과 부이를 내장하는 “부이 내장형 선형발전기(IntELG; ELG containing heaving buoy)”로 구조를 변경한다.

이러한 부이 내장형 선형발전기를 파랑의 진행 방향과 평행하게 배치되는 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 적용할 경우, 부이의 진동운동은 선형발전기 내부의 유체에 국한됨으로써 부유식 파력에너지 변환장치에 작용하는 부하를 최소화할 수 있고 해양 부유식 파력에너지 변환장치에 적용되어 온 해저에 앵커(anchorage)하여 계류하는 방식을 그대로 적용할 수 있다. 또한 부이 대신에 해양 부유식 파력에너지 변환장치를 사람의 평균 키 높이로 설계하여 가시성(visibility)을 확보할 수 있다.

3.1 부이 내장형 선형발전기(IntELG)

선형발전기 내부에 유체(물)를 채운 밀폐된(closed) 실린더에 영구자석을 내장하는 부이를 변환기(translator)를 따라 수평으로 배치하여 Fig. 6과 같은 “부이 내장형 선형발전기(IntELG; ELG containing heaving buoy)”를 구성한다.

변환기는 실린더의 중심축을 따라 양 끝(edges)에 고정하고, 영구자석을 내장하는 부이가 변환기를 동축으로(co-centric) 실린더의 양끝 사이를 직선 왕복운동이 가능하도록 구성한다. 부이의 운동에 따른 변환기와의 마찰은 실린더에 채워진 유체를 축매(윤활)로 하거나 또는 베어링시스템을 이용하여

최소화할 수 있다. 그리고 충격에 의해 부이 내장형 선형발전기의 파손을 방지하고 부유식 파력에너지 변환장치에 부하를 최소화하기 위해 실린더 양 끝에 완충장치(damper system)를 배치한다.

이러한 부이 내장형 선형발전기는 파랑에 따라 실린더의 양 끝이 상승과 하강을 반복하는 진동운동을 하고, 영구자석을 내장한 부이가 실린더 내부에서 유체(물)의 부력에 의해 직선 왕복운동에 의해 진동된다. 즉, 실린더 내부에서 부이는 항상 실린더의 상승하는 부분(edge)으로 직선 왕복운동에 의해 진동된다. 이러한 부이의 진동운동은 Fig. 2와 같은 수직형 선형발전기의 부이가 해수면의 상승에 따라 함께 상승하는 동작원리와 유사하나, 실린더의 하강 부분으로는 부이가 이동하지 않는 점이 수직형 선형발전기와 다르다.

부이 내장형 선형발전기도 Fig. 2와 같은 선형발전기와 마찬가지로 불규칙한(invariant) 파력에너지로부터 일정하고(constant) 연속적인(continuous) 전력생산의 문제점은 극복해야할 문제점이다. 가장 현실적인 접근방법으로는 축전지(rechargeable battery)와 변압기를 이용하여 정격 교류전력으로 부하(electric load)나 그리드(grid)로 송전하는 방법을 적용할 수 있다. 다른 방법으로는 불규칙한 파랑의 발생에도 부이가 일정하고 연속적인 진동운동을 할 수 있도록 구성하는 것이나, 이 방법은 복잡한 구조가 예상되기 때문에 부이 내장형 선형발전기에는 적절치 않은 것으로 판단된다.

부이 내장형 선형발전기의 실린더 내부에 채운 유체(물)와 항상 실린더의 상승하는 부분으로 이동하는 부이의 동적 특징은 불규칙하고 비정형적인 파랑에도 실린더가 정현파(sine wave)에 더 유사한 형태의 진동운동을 가능케 한다.

부이와 유체 사이의 상호작용(interaction)을 밀폐된 실린더 내부로 제한함에 따라 부유식 파력에너지 변환장치의 해상 계류를 위한 앵커 체인(anchoring chain)에는 부이에 의

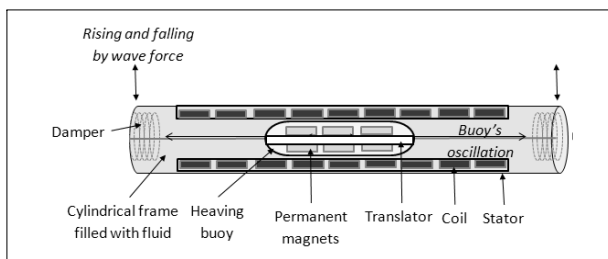


Fig. 6 Conceptual Architecture of ELG containing heaving buoy (IntELG)

한 장력(tension)을 거의 무시할 수 있기 때문에, 부이 내장형 선형발전기를 적용하는 부유식 파력에너지 변환장치의 해상 계류는 해저에 앵커하는 기존의 방법을 그대로 적용할 수 있다.

부유식 파력에너지 변환장치를 위한 단위 segment는 파랑의 파형을 정현파로 가정하고 설치장소(site)의 과거 관측자료(누적 연간 평균)로부터 최소 유효 파고의 $2\sqrt{2}$ 배에서부터 최대 유효 파고의 $2\sqrt{2}$ 배 이내의 길이로 할 수 있다.

3.2 부이 내장형 선형발전기 응용

파력에너지는 해양 기후환경에 따라 불규칙한 특징을 나타내기 때문에 일정하고 연속적인 전력생산을 고려해야 한다. 필름형 태양전지 판넬(flexible thin-film PV panel)를 이용하여 Fig. 7과 같은 부이 내장형 선형발전기(IntELG)를 내장하는 하이브리드 태양광-파력에너지 변환장치를 구성할 수 있으며, 태양전지로부터 생산되는 전력을 축전지 충전에 이용할 수 있다. 이러한 하이브리드 시스템은 태양전지 어레이(thin-film PV array)와 파력에너지 변환장치가 해상 계류장치, 전력기기 및 송전선, 축전지 등을 공유할 수 있는 장점을 제공한다.

Fig. 7과 같은 세그먼트의 직렬연결을 통해 파랑의 진행방향과 평행한 상태로 해상계류가 가능한 Fig. 8과 같은 부유식 하이브리드 태양광-파력에너지 변환장치를 구성할 수 있다. Fig. 8의 부유식 하이브리드 태양광-파력에너지 변환장치는 구성 요소들을 공유할 수 있는 장점 이외에도 해양 태양광 및 파력에너지를 동시에 전기에너지로 변환할 수 있는 장점을 제공한다.

Fig. 8의 부이 내장형 선형발전기에 의한 태양광-파력에

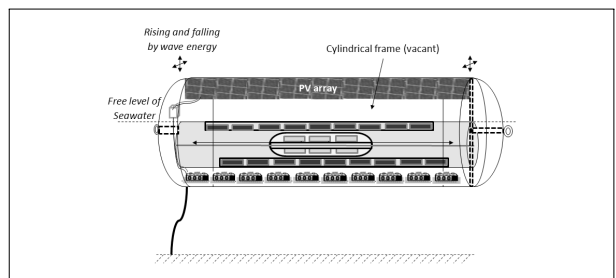


Fig. 7 Segment Architecture for floating hybrid PV-WEC based on the IntELG

너지 변환장치는 Fig. 9와 같은 PTO 구조(mechanism)를 가진다.

한편, Pelamis나 Anaconda와 같은 파랑의 진행방향과 평행한 상태로 부유하는 파력에너지 변환장치에도 부이 내장형 선형발전기를 유용하게 응용할 수 있다. Pelamis의 경우, 각 세그먼트(segment)에 배치되는 PTO를 위한 유압회로는 펌프와 축압기(accumulators)를 이용한다. 따라서 부이 일체형 선형발전기를 펌프나 축압기로 이용될 수 있다. Fig. 10과 같이 유압회로의 축압기를 추가 배치함으로써 불규칙한 해양 기후환경에서도 일정하고 연속적인 정격 전력의 출력이 가능하다. 이러한 응용은 Fig. 12와 같은 원자력발전소의 장시간 외부 전력 상실(prolonged loss of offsite AC power) 시 대체교류전력(AAC; Alternative AC)의 요건을 충족하기

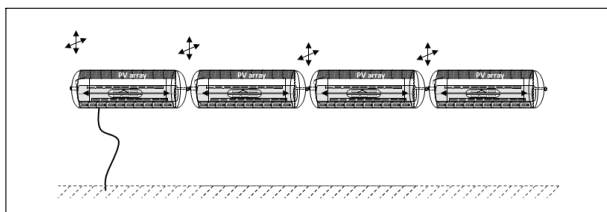


Fig. 8 Schematic of floating hybrid PV-WEC based on the IntELG

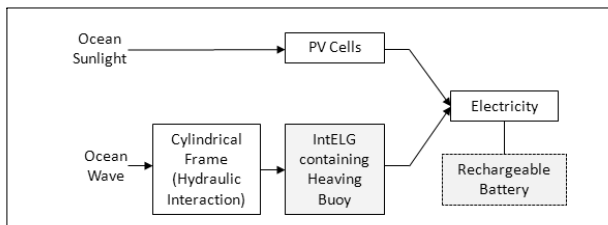


Fig. 9 PTO mechanism of the IntELG

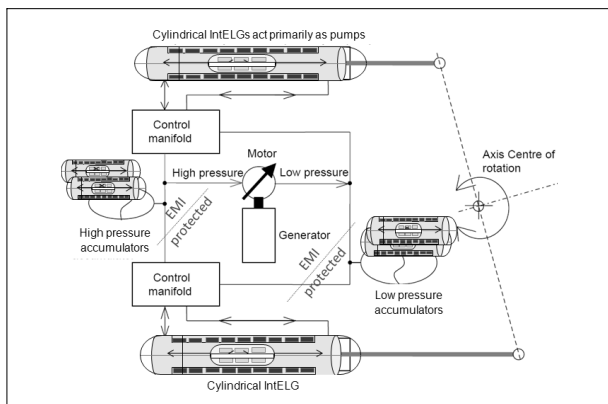


Fig. 10 IntELG application for Pelamis

위해 요구된다.

또한, 벌저(bulge wave)를 이용하는 고무 튜브형 Anaconda의 응용을 고려할 수 있다. 부이 일체형 선형발전기를 고무 튜브와 같은 유연성(flexibility)을 갖도록 구조화하여 Fig. 11과 같이 Anaconda 튜브에 내장한다. 이 때, 부이 내장형 선형발전기를 Anaconda의 고압탱크(high pressure tank)로 이용하는 방법은 Pelamis 응용과 동일한 방법으로 적용할 수 있다. 파력에너지에 의한 고무 튜브 내부의 에너지(bulge energy) 전달 속도는 튜브의 단면적에 비례하는 것으로 알려져 있다. 부이 일체형 선형발전기를 고무 튜브 내부에 배치하는 경우, 부이 일체형 선형발전기의 단면적에 해당하는 만큼 벌저에너지를 획득할 수 없다. 따라서 Pelamis 응용과 같이 정격 출력 시간을 증가시키는 요구가 더 중요한 경우에 유용한 것으로 판단된다.

3.3 부유식 파력에너지 변환장치의 응용 방안

부이 내장형 선형발전기를 PTO로 적용하는 부유식 파력에너지 변환장치는 2011년도 후쿠시마 원자력발전소 사고와 같

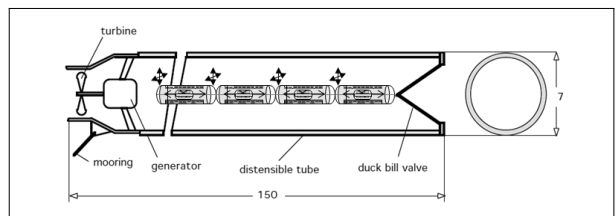


Fig. 11 IntELG application for Anaconda

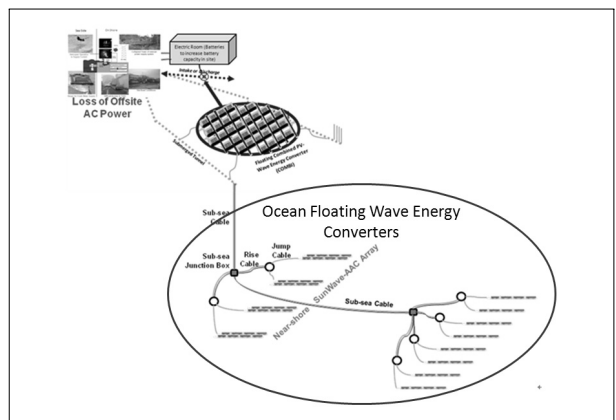


Fig. 12 Application concept of the floating hybrid PV-WEC for nuclear power plant

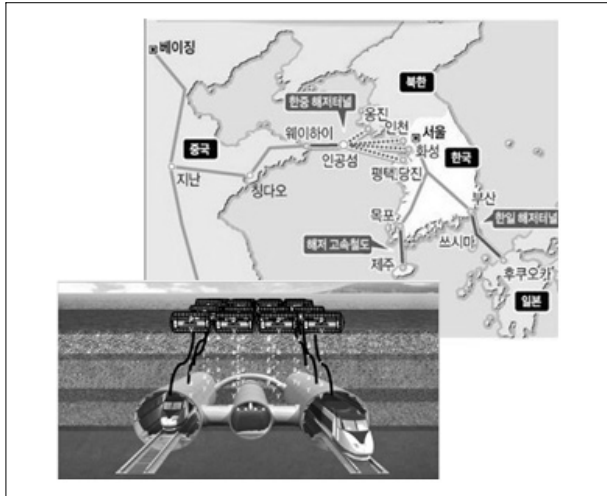


Fig. 13 Application concept of the floating hybrid PV-WEC for submerged tunnels

이 외부전력 상실로 인한 정전(Station Black Out: SBO)을 예방하기 위해 Fig. 12와 같이 다양성(diversity) 전원으로 응용할 수 있다.

한편, 부이 내장형 선형발전기에 의한 부유식 파력에너지 변환장치는 해저터널에 앵커함으로써 해상계류가 용이하고, 생산되는 전력은 해저터널 설비에 직접 제공할 수 있기 때문에 그 응용이 매우 유용하다. 예로, Fig. 13과 같이 전체 300km를 상회하는 한-일 및 한-중 해저터널에 대한 구상(안)과 부유식 파력에너지 변환장치를 연계하는 경우에는 시너지 효과가 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 파력에너지의 진행방향과 평행한 상태로 부유하는 파력에너지 변환장치를 위해, 연구자석과 부이(heaving buoy)를 하나의 구성 요소로 통합한 선형발전기를 제안하고 그 수평배치에 의한 응용을 고찰하였다. Pelamis의 경우에는 선형발전기를 유압회로의 축압기로 이용할 수 있는 장점을 제공하는 반면, Anaconda에 응용하는 경우에는 파력에너지 변환효율 측면에서 다소 제약이 따른다. 그리고 제안된 선형발전기를 적용하는 부유식 파력에너지 변환장치는 대륙간 해

저터널과의 연계와 원자력발전소의 정전 예방을 위한 적극적인 접근방법으로 유용하게 응용될 수 있다. 이러한 부유식 파력에너지 변환장치를 국가 신재생에너지 의무할당제(RPS; Renewable Energy Portfolio Standard)와 연계하여 그 필요성 및 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다. 한편, 제안된 수평 배치가 가능한 선형발전기의 Anaconda 응용, 태양전지를 이용한 하이브리드 태양광-파력에너지 변환장치, 그리고 부유식 파력에너지 변환장치를 위한 세그먼트(segment) 길이의 최적화에 대한 연구가 더 요구된다.

후 기

본 논문의 내용은 원자력발전소의 전원상실 사고를 예방하기 위한 적극적인 접근(Technical and Engineering Approach)으로, 해양 신재생에너지에 의한 전력생산 시스템을 다양성 전원(redundantly diverse power source)으로 활용하기 위한 선행 연구결과임.

References

- [1] URL=<http://www.pelamiswave.com/>
- [2] R. Yemm, D. Pizer, C. Retzler and R. Henderson, 2012, "Pelamis: experience from concept to connection," Philosophical Transactions, The Royal Society.
- [3] "Anaconda" Could Provide up to 20MW of Wave Energy. URL=<http://www.renewableenergyworld.com/>
- [4] F.J.M. Farley and R.C.T. Rainey, 2006, "Anaconda - The bulge wave sea energy converter."
- [5] German Consortium Plans to Harvest Wave Energy with Silicon Sheets. URL=<http://www.dailyfusion.net/2013/07/>
- [6] B. Drew, A. R. Plummer, and M.N. Sahinkaya, 2009, "A review of wave energy converter technology," Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 18(2), pp. 63-69.
- [7] Nuclear Emergency Response Headquarters of Japan, 2011, "Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report)."

차 경 호



1982년 경북대학교 전자공학과 공학사
1985년 한국과학기술원 전산학과 공학석사

현재 한국원자력연구원 책임연구원
(E-mail : khcha@kaeri.re.kr)

김 정 택



1982년 한양대학교 원자력공학과 공학사
1982년 한양대학교 원자력공학과 공학석사
1985년 충남대학교 전자공학과 박사과정 수료

현재 한국원자력연구원 책임연구원
(E-mail : jtkim@kaeri.re.kr)