

## 50kW급 가동물체형 고효율 파력발전시스템 설계

조병학<sup>†</sup>, 양동순\*, 박신열\*, 최경식\*, 박병철\*

\*한전 전력연구원 녹색성장연구소

### Design of a 50kW Class Rotating Body Type Highly Efficient Wave Energy Converter

BYUNGHAK CHO<sup>†</sup>, DONGSOON YANG\*, SHINYEOL PARK\*, KYUNGSHIK CHOI\*, BYUNGCHUL PARK\*

\*Green Growth Laboratory, KEPCO Research Institute, 65 Munjiro,  
Yuseonggu, Daejeon 305-380, Korea

#### ABSTRACT

A 50 kW class rotating body type wave energy converter consisted of two floating bodies and a PTO (Power Takeoff) unit is studied. As a wave energy extractor, the body is designed to have a VLCO (Variable Liquid-Column Oscillator) having a liquid filled U-tube with air chambers. Owing to the oscillation of the liquid in the U-tube caused by the air spring effect of the air chambers, the amplitude of response of the VLCO becomes significantly amplified for a target wave period. The PTO converts the rotational moment introduced from the relative motion of the hinged bodies to an hydraulic power by means of a cylinder. A high pressure accumulator, hydraulic motor and a generator are equipped in the PTO to convert the hydraulic power to electric power. A control law for adjusting the oscillation period of the VLCO is proposed for the efficient operation of the VLCO with various wave conditions. It is found that the effect of the air spring has an important role to play in making the oscillation of the VLCO match with the ocean wave. In this way, the wave energy converter equipped with the VLCO provides the most effective mode for extracting energy from the ocean wave.

**KEY WORDS** : Ocean wave(파랑), Highly efficient(고효율), Rotating body(가동물체), Wave energy converter (파력발전기)

#### 1. 개 요

파랑 에너지는 인류에게 새로운 패러다임으로 등장하고 있는 녹색성장에 필요한 지속가능한 에너지를

충당할 수 있는 신재생에너지로 부각되고 있으며, 전 세계 전력수요의 1/10을 충당할 수 있는 것으로 알려져 있다. 세계적으로 분포하고 있는 파랑에너지 자원은 1-10TW 정도로 추정되고 있으며<sup>1)</sup>, 우리나라에는 영일만과 울릉도, 홍도 및 제주도 서해안에 약 6.5GW의 파랑자원이 분포하는 것으로 보

<sup>†</sup>Corresponding author : chobh@kepri.re.kr

[ 접수일 : 2011.7.8 수정일 : 2011.8.20 게재확정일 : 2011.8.22 ]

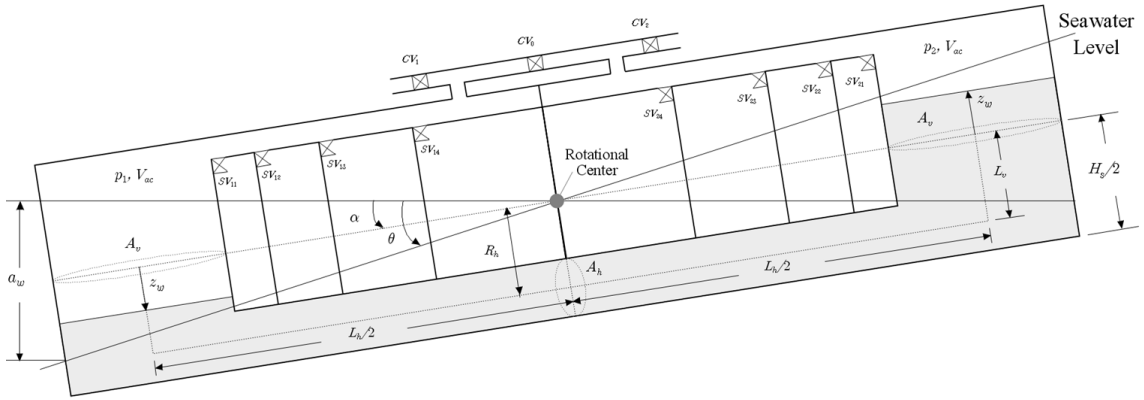


Fig. 1 Schematic diagram of a VLCO unit

고되고 있다. 파랑이 갖는 에너지로부터 전력을 생산하는 파력발전기는 동작원리에 따라 크게 월파형과 진동수주형 및 가동물체형으로 나뉘어 진다<sup>2)</sup>. 이들 파력발전 방식 중에서 월파형과 진동수주형은 파랑의 에너지를 간접적으로 변환하지만, 가동물체형은 파랑에너지를 직접적으로 흡수하므로 에너지 변환효율이 높은 것으로 평가되고 있다. 그러나 파력발전기의 에너지 변환효율은 대략 10% 초반 수준으로 보고되고 있으며<sup>3)</sup>, 이 수치는 풍력의 에너지 변환효율이 30~40%인 데에 비해 매우 저조한 수준이다. 또한, 일반 해역의 평균 파고는 0.5~2.0 미터 정도로 현재의 기술로는 경제성이 없는 1.0 미터 미만의 파랑이 많은 상태이다<sup>4,5)</sup>. 따라서 파력 발전을 확대보급하기 위해서는 낮은 에너지 변환효율을 풍력발전 수준으로 끌어 올리고, 에너지가 낮은 파고 1.0 미터 이하의 파랑에서도 발전이 가능한 에너지 변환 시스템을 개발하여 설비의 이용률을 향상시켜야 한다.

파랑은 횡파와 종파의 특성을 모두 갖는 표면파(surface wave)에 해당하며, 연안에 접근하면 파장은 작아지고 파고는 높아져서 에너지 밀도가 증가되는 특성을 갖는다. 이와 같이 파랑은 근본적으로 진동의 성질을 가지고 있으므로, 파랑으로부터 많은 에너지를 효율적으로 흡수하기 위해서는 파력발전기 메커니즘 역시 파랑에 동조할 수 있는 진동특성을 갖는 것이 필요하다. 일례로서, 추(weight)와 스프링으로 구성된 기계적인 진동장치를 갖는 파력발전기는 파랑

의 진동에 동조되어 효율적으로 많은 에너지를 흡수하게 된다<sup>6)</sup>. 또한, 영국의 Pelamis Wave Power Ltd.에서 개발한 가동물체형 파력발전기인 Pelamis는 부력에 의해 발생하는 강성(stiffness)과 동체의 무게(weight)로 구성되는 진동계의 자유진동수가 파랑의 진동과 일치되도록 동체의 무게를 조절하여 에너지 흡수효율을 향상시키는 것으로 보고되고 있다<sup>4,7)</sup>.

본 연구에서는 고효율 에너지 변환장치로서 VLCO(variable liquid column oscillator)를 장착한 가동물체형을 제안한다. VLCO는 파랑의 주기에 공진되도록 제어되므로 더 많은 에너지를 해양으로부터 흡수하며, 낮은 파고에서도 전력생산이 가능하게 한다. 또한, 공진 주파수의 제어도 가능하여 파랑의 주기와 파장에 무관하게 최고의 효율로 에너지를 흡수할 수 있는 장점도 갖는다.

본 연구에서는 VLCO의 동력학적 설계와 VLCO를 파랑에 동조시키기 위한 제어법칙을 제안하였고, 두 개의 VLCO와 한 개의 유압식 전력변환장치(PTO; power takeoff unit)를 갖는 50kW급 파력발전시스템의 거동을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, VLCO를 갖는 파력발전기의 성능을 종래의 가동물체형 부유식 파력발전기의 성능과 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

VLCO의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다. VLCO

는 U-자형 튜브의 양측 수직관로에 서로 격리되어 있는 공기챔버를 가지며 U-자형 튜브에는 일정량의 작동액(working liquid)이 채워진다. U-자형 튜브 내에서 작동액의 유동은 공기챔버의 공기를 압축 또는 팽창하여 에어스프링 효과를 유발하는 유체 피스톤(fluid piston)의 기능을 갖는다. 에어스프링의 강성은 공기챔버의 체적과 초기압력에 의해 결정되므로, 본 연구에서는 전체 공기챔버를 여러 개의 구역으로 나누고 구역별로 밸브( $SV_{11} \dots SV_{1n}$  및  $SV_{21} \dots SV_{2n}$ )를 설치하여 이들 밸브의 개폐 상태에 따라 유효한 공기체적을 변경하는 방법을 채택하였다. 이와 같은 방법으로 에어스프링의 강성을 조절하면 에어스프링의 강성과 작동액의 질량으로 형성되는 진동계의 공진주파수를 파랑의 주기와 일치시킬 수 있게 되어 에너지 흡수효율이 크게 향상된다. 밸브  $CV_0 \dots CV_2$ 는 양쪽 공기챔버의 초기 공기압력을 균일하게 하는 목적으로 활용된다.

## 2.1 지배방정식

VLCO의 회전중심이 VLCO의 기하학적 중심에 위치하는 것으로 가정하고, Fig. 1에 보인 내부 작동액과 VLCO 동체의 운동방정식을 lagrange 방정식을 통해 구하면 다음과 같이 3개의 식이 얻어진다<sup>8)</sup>. 먼저, VLCO의 수직관로와 수평관로들로 구성되는 U-자형 튜브에 채워진 내부 작동액의 거동에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \rho A_v L_c \ddot{z}_w + \frac{1}{2} \rho A_v r \zeta_{wc} |\dot{z}_w| \dot{z}_w + 2\rho g A_v \cos \alpha z_w \quad (1) \\ & = -\rho A_v L_h (L_v + R_h) \ddot{\alpha} - \rho g A_v L_h \sin \alpha - (p_1 - p_2) A_v \end{aligned}$$

여기서,  $A_h$  ( $A_v$ )는 수평(수직)관로의 단면적,  $L_h$  ( $L_v$ )는 수평(수직)관로의 길이,  $r = A_v/A_h$ 는 수평관로와 수직관로 단면적의 비율,  $R_h$ 는 VLCO 동체의 회전중심과 수평관로 중심 사이의 거리이며,  $L_c = 2L_v + rL_h$ 이다.  $\alpha$ 는 VLCO 동체의 회전각,  $z_w$ 는 수직관로에 채워진 내부 작동액의 변위,  $\rho$ 는 내부 작동액의 비중,  $\zeta_{wc}$ 는 U-자형 튜브와 내부 작동액 사이의 마찰

계수를 나타낸다. 다음으로, VLCO 동체의 거동에 대한 미분방정식은 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & (2J_s + J_A + \frac{1}{2} \rho A_v L_v L_h^2 + \rho A_h L_h R_h^2) \ddot{\alpha} \quad (2) \\ & = -\rho A_v L_h (L_v + R_h) \ddot{z}_w - \rho g A_v \{ L_h z_w \cos \alpha \\ & \quad - (L_v^2 + z_w^2) \sin \alpha \} - \rho g A_h L_h R_h \sin \alpha \\ & \quad - c_c \operatorname{sgn}(\dot{\alpha}) - c_d \dot{\alpha} + \tau_w \end{aligned}$$

식 (2)에서,  $J_s$ 는 시스템의 회전 중심에 대한 VLCO 동체의 관성모멘트,  $J_A$ 는 VLCO 동체가 해수 속에서 회전할 때 발생하는 부가질량(added mass)에 의한 관성모멘트를 나타낸다.  $-c_c \operatorname{sgn}(\dot{\alpha})$ 는 VLCO 동체와 결합된 부하에 의해 발생하는 댐핑 모멘트,  $-c_d \dot{\alpha}$ 는 VLCO 동체가 해수 속에서 회전할 때 발생하는 항력 모멘트이고,  $\tau_w(t)$ 는 부력에 의해 VLCO 동체에 가해지는 회전 모멘트이다. 마지막으로, 단열과정에 의한 수직관로에서의 수주변동에 따른 좌우측 공기챔버의 공기압력을 계산하면 다음과 같다.

$$p_1 (V_o + V_{ac} - A_v z_w)^\gamma = P_o (V_o + V_{ac})^\gamma \quad (3a)$$

$$p_2 (V_o + V_{ac} + A_v z_w)^\gamma = P_o (V_o + V_{ac})^\gamma \quad (3b)$$

여기서,  $p_1$  ( $p_2$ )는 좌측(우측) 공기챔버의 압력,  $V_o$  ( $P_o$ )는 균형상태에서의 수직관로 상부 공기의 체적(압력),  $V_{ac}$ 는 밸브( $SV_{11} \dots SV_{1n}$  및  $SV_{21} \dots SV_{2n}$ )의 개폐상태에 의해 결정되는 공기챔버의 유효체적,  $\gamma = 1.4$ 는 공기의 비열비(heat capacity ratio)이다.

## 2.2 제어법칙

VLCO에서는 U-자형 튜브 내에서 작동액이 갖는 유체 피스톤 역할에 의해 발생하는 에어스프링 효과를 이용하여 진동주기를 제어한다. 먼저, 식 (3)을 정리하여 좌우측 공기챔버의 압력을 구하고, 이를 테일러 급수로 전개하여 수식을 근사화한 후 양쪽 공기챔버의 차압을 구하면 다음과 같이 얻어진다.

$$p_1 - p_2 = 2\gamma \frac{A_v}{V_o + V_{ac}} P_o z_w \quad (4)$$

Table 1 Dimension of 50kW class VLCO unit

Design parameters	Dimension
VLCO length ( $L_s$ )	18.0 m
VLCO height ( $H_s$ )	2.4 m
VLCO width ( $W_s$ )	2.4 m
Vertical tube area ( $A_v$ )	7.68 m <sup>2</sup>
Vertical tube length ( $L_v$ )	1.2 m
Horizontal tube area ( $A_h$ )	1.152 m <sup>2</sup>
Horizontal tube length ( $L_h$ )	14.8 m
U-tube friction factor ( $\zeta$ )	2.5 N·sec/m
Air chamber volume ( $V_{ac}$ )	27.648 m <sup>3</sup>

차압에 의해 내부 작동액에 인가되는 힘은  $f_a = (p_1 - p_2)A_v = k_p z_w$  이므로, 에어 스프링의 탄성계수는 다음과 같다.

$$k_p = 2\gamma \frac{A_v^2}{V_o + V_{ac}} P_o \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 내부 작동액의 거동을 나타내는 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$\rho A_v L_e \ddot{z}_w + \frac{1}{2} \rho A_v r \zeta \dot{z}_w + (2\rho g A_v \cos\alpha + k_p) z_w = -\rho A_v L_h (L_v + R_h) \ddot{\alpha} - \rho g A_v L_h \sin\alpha \quad (6)$$

식 (6)에서 내부 작동액의 고유진동수는 다음과 같다.

$$w_m = \sqrt{(2\rho g A_v + k_p) / \rho A_v L_e} \quad (7)$$

식 (5)의 에어스프링 탄성계수  $k_p$ 는 공기챔버의 유효체적  $V_{ac}$ 의 함수이므로,  $V_{ac}$ 를 적절히 조절하면, VLCO 내부작동액의 진동주기를 파랑의 진동주기에 동조시킬 수 있게 된다.

### 3. VLCO 거동의 해석

해수면에 떠 있는 부유체의 회전(pitching) 운동에 작용하는 해수면 수위차는 파랑의 파고와 파장에

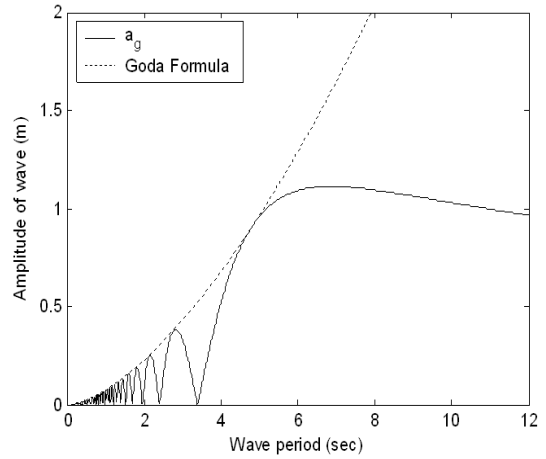


Fig. 2 Amplitude of wave between VLCO endpoints

의해 결정된다. Table 1의 사양을 갖는 VLCO의 양단에 걸리는 최대 유효진폭  $a_g$ 는 파랑주기  $T$ 에서 발생하는 최대진폭  $A_g$ 를 나타내는 Goda's formula<sup>9)</sup>와 파랑주기와 파장  $L_w$ 와의 관계를 나타내는 아래의 식들로부터 Fig. 2와 같이 얻어진다.

$$A_g = 0.5 \left( \frac{T}{3.3} \right)^{0.63}, \quad L_w = g \frac{T^2}{2\pi} \quad (8)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도이다.

Fig. 2에 보인 바와 같이, Goda's formula에 의한 최대 진폭의 파랑이 발생하였을 때 VLCO 양단에 걸리는 최대 유효진폭  $a_g$ 는 파랑주기 5~12초 사이에서 대략 1.0m 정도인 것을 알 수 있다. VLCO의 거동을 정량적으로 해석하기 위해서는 VLCO 좌우측 양단에 걸리는 유효진폭  $a_w$ 를 일정하게 유지하고, 파랑의 주기별로 응답을 살펴볼 필요가 있다. Table 1에 보인 사양을 갖는 VLCO의 공기챔버 유효체적을  $V_{ac}=9.216, 12.16, 16.22, 21.38$ 와  $27.64\text{m}^3$ 으로 설정하고, 실린더 구속토크를  $c_c=10^6\text{N}\cdot\text{m}$ , 파랑에 의해 VLCO 양단에 걸리는 유효진폭을  $a_w=1.0\text{m}$ 로 했을 때의 주파수응답을 구하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 VLCO의 응답은 진폭이 증가되는 VLCO 영역과 감소되는 TLCD(tuned liquid column oscillator) 영역을 포함한다. VLCO는

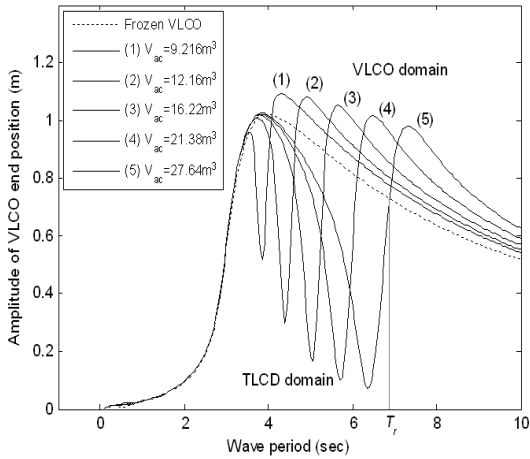


Fig. 3 Frequency response of VLCO end position

공기챔버의 유효체적이 감소하면 식 (5)에 보인 바와 같이 에어스프링의 강성이 커지게 되므로 VLCO의 응답은 frozen VLCO의 응답에 접근하게 된다. Frozen은 VLCO의 내부작동액이 유동하지 못하도록 내부 작동액이 동결된 것과 같은 상태를 의미한다. VLCO 내부 작동액의 고유진동수는 식 (5)에 보인 에어스프링의 강성을 식 (7)에 대입하여 얻을 수 있다. 공기챔버의 유효체적이  $V_{ac}=27.64\text{m}^3$ 인 경우 내부 작동액의 고유진동주기는 6.36초이며, 이때 VLCO 동체에 대한 내부 작동액의 위상차는 90도를 이룬다. 특히, 파랑의 주기가  $T_r$  보다 커지게 되면, 내부 작동액은 VLCO 동체와 반대의 방향으로 운동을 하게 된다. 따라서 VLCO는 식 (2)로부터 작동액 무게의 불균형에 의해 발생하는  $\rho g A_v L_h z_w$ 에 해당하는 복원모멘트와 내부 작동액의 슬로싱 운동에 의해

발생하는  $\rho A_v L_h (L_v + R_h) z_w''$ 에 해당하는 관성모멘트를 추가적으로 얻게 된다. 이와 같은 이유로 VLCO는 종래의 가동물체형 파력발전기에 해당하는 frozen VLCO에 비해 더 많은 에너지를 파랑으로부터 얻게 된다.

#### 4. 50kW급 파력발전 시스템

50kW급 시스템은 Fig. 4에 보인 바와 같이 Table 1에 보인 사양을 갖는 두 개의 VLCO와 한 개의 PTO로 구성된다. 두 개의 VLCO는 결합기구(linkage)에 의해 결합되며, 결합기구에는 고압의 작동오일을 PTO로 공급하는 유압 실린더가 배치된다. 결합기구는 VLCO들을 기계적으로 결합하는 기능과 VLCO의 회전 모멘트를 직선 운동으로 바꾸어 유압 실린더를 구동하는 기능을 갖는다.

PTO는 VLCO에 흡수된 파랑에너지를 전력으로 변환하는 기능을 가지며, Fig. 5에 보인 유압회로도 와 같이 크게 유압실린더와 축압기(accumulator), 감압밸브(relief valve), 유압모터와 발전기 및 저장조(reservoir)로 구성된다. 50kW급 PTO의 사양은 Table 2와 같다.

Fig. 5에 보인 유압회로의 작동원리를 설명하면 다음과 같다. 먼저, 실린더에 의해 간헐적으로 펌핑된 작동유의 유압은 축압기에 의해 평활되고, 솔레노이드 밸브를 통해 유압모터를 구동한다. 유압모터는 발전기를 돌려 전력 생산하며, 유압모터는 공급되는 유량에 비례하여 회전한다. 유압모터를 구동한 작동유는 저장조로 복귀된다. 유압모터 또는 발전기에 고장이 발생하여 축압기의 압력이 설정치

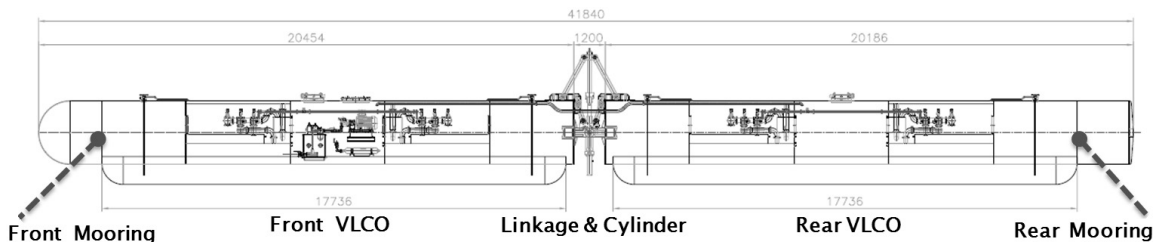


Fig. 4 Configuration of a 50kW class wave energy converter having two VLCO's

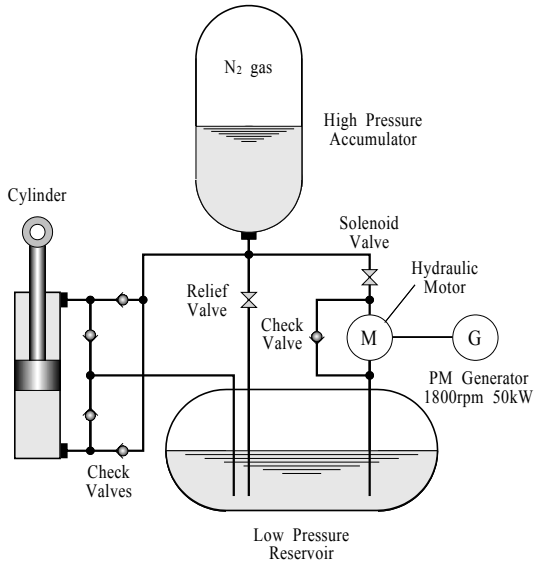


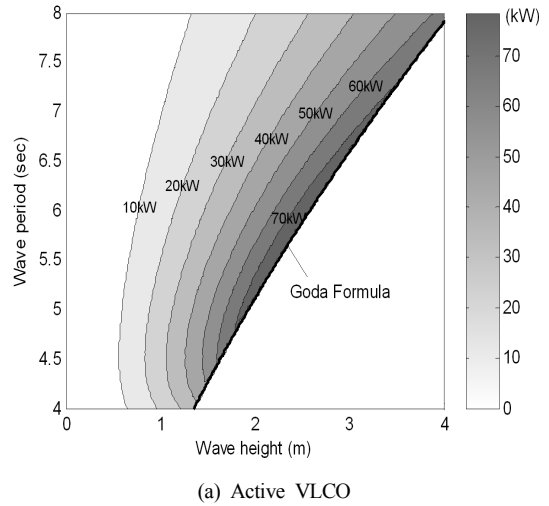
Fig. 5 Block diagram of PTO hydraulic circuit

이상 상승하면 작동유는 감압밸브를 통해 저장조로 보내진다. VLCO가 주어진 파랑조건에 동조되어 효율적으로 에너지를 흡수할 수 있도록 에버챔버의 최적 유효체적과 PTO의 구속토크가 결정된다. PTO의 구속토크는 축압기의 압력에 의해 조절되며, 축압기의 압력을 조절하기 위해 발전기에 전력제어장치가 배치된다. 전력제어장치의 출력은 태양광 발전시스템에서와 같은 방법으로 인버터에 의해 전력계통에 연계된다<sup>10)</sup>.

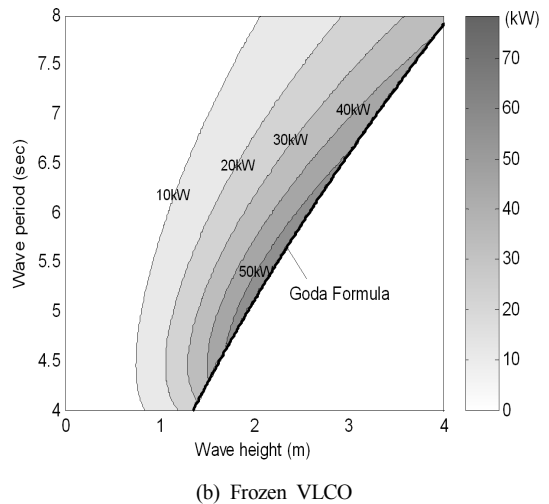
설계된 50kW급 파력발전 시스템의 성능곡선은 파랑의 입사방향에 대해 상대적으로 뒤에 위치하는

Table 2 Specification of 50kW class PTO unit

Design parameters		Specification
Generator		50kW (1,800rpm)
Hydraulic Motor		125cc/rev (A2FM12)
Cylinder	Stroke	455.2mm @±8deg
	Effective Area	0.0261538m <sup>2</sup>
Accumulator	Capacity	32,000cc
	Precharged Pr.	75bar
Relief Valve Setting		210bar



(a) Active VLCO



(b) Frozen VLCO

Fig. 6 Performance of wave energy converter with active and frozen VLCO's

선미 측 VLCO에 작용하는 파랑의 감쇠특성을 고려한 전체 파랑에너지 흡수효율을 70%, 결합기구와 유압실린더의 효율을 90%, PTO의 에너지 변환효율을 80%로 보았을 때 Fig. 6(a)와 같다.

이 성능곡선을 Fig. 6(b)에 보인 종래의 기술에 해당하는 Frozen VLCO를 갖는 파력발전기의 성능곡선과 비교하여 보면, VLCO를 갖는 파력발전 시스템은 파랑의 주기와 진폭에 따라 차이는 있지만 우리나라 해역에서 가장 많이 존재하는 6초대의 파

랑주기에서 대략 50% 정도의 전력을 더 생산할 수 있다.

## 5. 결 론

파랑은 근본적으로 진동의 성질을 가지고 있으므로, 파랑으로부터 많은 에너지를 효율적으로 흡수하기 위해서는 파력발전기 메커니즘 역시 파랑에 동조할 수 있는 진동특성을 가져야 한다. 내부작동액(물)이 절반쯤 채워져 있는 U-자형 튜브와 튜브 양단 수직관로와 연결되는 공기챔버로 구성되는 VLCO는 내부 작동액의 유동에 의해 공기챔버의 공기를 수축 또는 팽창시켜 에어스프링 효과를 유발한다. 이 에어스프링 효과는 VLCO의 고유진동수를 결정하는 중요한 역할을 하며, 공기챔버의 유효체적을 조절함으로써 VLCO의 고유진동수를 파랑의 고유진동수에 동조시킬 수 있게 된다. 이와 같이 VLCO의 진동을 파랑의 진동에 동조시킴에 따라 VLCO는 파랑으로부터 에너지를 효율적으로 흡수할 수 있게 된다. 설계된 가동물체형 50kW급 시스템은 종래의 같은 사양의 파력발전시스템에 비해 파랑주기 6초대에서 50% 정도의 전력을 더 생산할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업비 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) Boud, R., 2003. Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Accessed Energy. UK Dept. of Trade and Industry (DTI), DTI Report # FES-R-132, AEAT Report # AEAT/ENV/1054, United Kingdom.
- 2) Khan, J., Bhuyan, G., Moshref, A., Morison, K., Pease, J.H., Gurney, J., July 2008. Ocean wave and tidal current conversion technologies and their interaction with electrical networks, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 20-24, pp. 1-8.
- 3) Rodrigues, L., March 2008. Wave power conversion systems for electrical energy production. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ08), Santander (Spain).
- 4) Cruz, J., 2008. Ocean wave energy: current status and future perspectives. Springer, pp. 304-319.
- 5) 홍기용, 신승호, 홍석원 (2004). “한국연안의 해역특성을 고려한 파력발전 방식의 적용성 분석”, 한국해양환경공학회 2004년도 추계학술대회 논문집, pp. 243-249.
- 6) Temeev, A.A., Belokopytov, V.P., Temeev, S.A., 2006. An integrated system of the floating wave energy converter and electrolytic hydrogen producer. Renewable Energy 31, pp. 225-239.
- 7) Retzler, C., 2006. Measurements of the slow drift dynamics of a model Pelamis wave energy converter. Renewable Energy 31, pp. 257-269.
- 8) Cho, B.-H., et al., 2011. Modeling and control of a 75 kW class variable liquid-column oscillator for highly efficient wave energy converter. Ocean Engineering 38, Issues 2-3, pp. 436-443.
- 9) Suh, K.-D., Kwon, H.-D., Lee, D.-Y., 2010. Some statistical characteristics of large deepwater waves around the Korean Peninsula. Coastal Engineering 57, pp. 375-384.
- 10) 황정희, 안교상, 임희천, 김수창, 김신섭, 120kW급 태양광 발전시스템 설치 및 실 계통연계 운전 결과 평가, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제17권 제3호, 2006. pp. 338-346.