

해설논문

(Special issue)

해수온도차발전용 해양구조물 Offshore structure for OTEC



정 동 호

Dong-Ho Jung

· 한국해양과학기술원
책임연구원
· dhjung@kiost.ac



김 현 주

Hyeon-Ju Kim

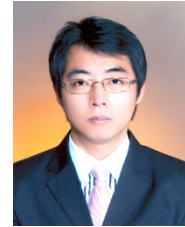
· 한국해양과학기술원
책임연구원
· hyeonju@kiost.ac



홍 사 영

Sa-Young Hong

· 한국해양과학기술원
책임연구원
· sayhong@kiost.ac



이 호 생

Ho-Saeng Lee

· 한국해양과학기술원
선임연구원
· hoslee@kiost.ac

1. 서 론

20세기 후반 들어 가속화된 산업발달은 육상과 천해역에 부존하는 석유와 가스 등의 천연자원이 고갈되는 문제를 야기시켰다. 자원부족 문제를 해결하기 위하여 최근에는 수심 2000m이상의 심해역까지 개발영역을 확장하고 있으며, 천연자원을 대체할 수 있는 신재생에너지 개발에도 많은 투자가 이루어지고 있다. 해양에는 바람, 조류, 파랑, 그리고 해수 등의 다양한 신재생에너지 자원이 부존하며, 신재생해양에너지는 무한하고 청정한 에너지원이므로 미래 에너지원으로 각광받고 있다.

OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion, 해수온도차발전)은 해수가 가지고 있는 열원을 에너지원으로 활용하여, 표층수와 심층수의 수온차를 이용하여 발전하는 시스템이다. 발전사이클은 기화기, 응축기, 열교환기, 터빈발전기, 그리고 순환 펌프 등으로 구성되며, 사이클 내부를 순환하는 작동유

체가 표층수를 통과하면서 기화되어 터빈을 가동시켜 발전하며, 다시 저온의 심층수와 열교환하여 액화되는 구조이다. OTEC 시스템에서는 고온의 표층수와 저온의 심층수를 연속적으로 공급함으로써, 연중 24시간 연속발전이 가능하다. 따라서, OTEC은 연속적으로 심층수와 표층수를 공급할 수 있는 해역에서 적용가능한 시스템인데, 대량의 심층수를 확보할 수 있는 심해역에서 개발이 가능하다. 전 세계적으로 OTEC은 태평양 적도 해역에서 상용화 개발이 가능한 것으로 알려져 있는데, 수심 1,000(m) 아래에 위치하는 저온의 심층수를 취수하고 고온의 표층수를 취수하여 연속발전하게 된다 (김현주 외, 2011). OTEC의 상용화를 위해서는 OTEC 사이클 설비를 탑재하며, 대량의 심층수와 표층수를 연속 취수할 수 있는 해양구조물 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 OTEC 해양구조물의 전체 구성요소와 각 구성요소의 개발 방향에 대하여 알아본다.

2. OTEC 해양구조물의 구성요소

OTEC 해양구조물은 크게 부유체 구조물, 라이저, 그리고 계류시스템으로 구성된다 (Fig. 1). 부유체구조물은 OTEC 설비와 각종 거주시설 등을 탑재하는 구조물이며, 충분한 부력을 가져야 한다. 부유체구조물은 파랑, 조류, 그리고 바람 등의 해양환경 하중에 의하여 거동하게 되는데, 일정 이하의 해양환경 조건에서는 발전설비가 정상적으로 작동할 수 있도록 거동 안정성을 가져야 한다. 라이저는 일정 수심 아래에 있는 심층수를 해수면 부유체까지 이송하는 연결관이다. OTEC용 라이저는 대량의 심층수를 이송하기 위하여 매우 큰 직경의 라이저가 사용된다. 마지막으로 계류시스템은 전체 시스템이 일정위치에 유지될 수 있도록 위치를 유지시키는 역할을 수행한다. 이상의 세 가지 구성요소 중 계류시스템은 일반적인 부유식 해양구조물용과 큰 차이가 없으므로, 자세한 설명은 생략하며 부유체구조물과 라이저에 관하여 자세히 기술한다.

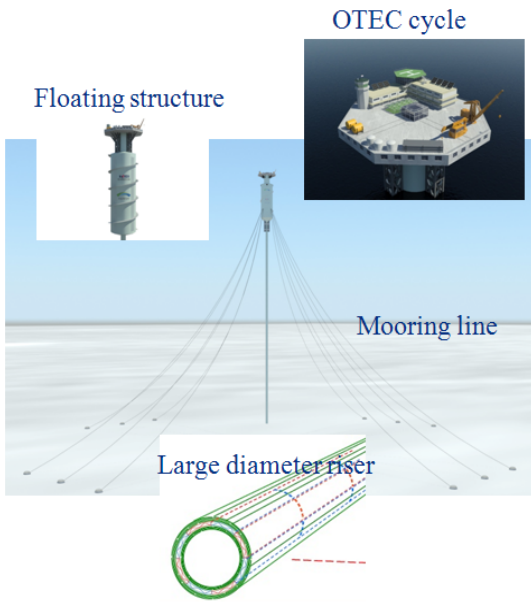
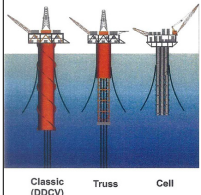
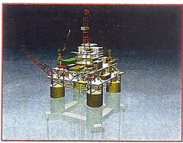




Fig. 1 Components of OTEC structure

2.1 OTEC용 부유체구조물

OTEC용 부유체구조물은 OTEC 설비와 발전시설 등을 탑재하는 시설로서, 재하하중을 지지할 수 있는 최소한의 부력을 가져야 한다. 특히 운용 조건에서 터빈 및 발전 장치들이 안정적인 상태가 유지될 수 있도록 부유체는 안정적인 거동 특성을 가져야 한다. 부유체구조물은 일반적인 부유체 해양구조물을 약간의 구조 변경을 통하여 사용할 수 있다. 따라서, 현재 많이 개발되고 있는 부유체구조물의 특성을 파악하여, OTEC용으로 가장 적합한 부유체 형식을 결정할 필요가 있다. Table 1에서는 현재 많이 개발되고 있는 4가지 부유체구조물의 일반적인 특성을 보여주고 있다. 첫 번째는 TPL(인장각식 플랫폼)으로 높은 선인장이 가해진 인장각에 의하여 부유체의 연직방향 거동은 매우 제한적으로 안정적인 거동 특성을 보여준다. 그러나, 라이저와 인장각과의 상호간섭이 발생할 수 있으며, 재하하중의 크기에 따라 부유체의 거동 특성이 민감하게 변하기 때문에 OTEC용 부유체로는 적합하지 못하다. 두 번째는 Spar(스파)로서 매우 안정적인 거동 특성을 가진다. 비교적 큰 재하하중을 수용할 수 있으며, 자유롭게 매달린 라이저를 적용할 수 있다. 가격이 비교적 높다는 단점이 있다. 세 번째는 Semi-submersible (반잠수식)으로, 재하하중의 한계가 있으며 연직방향 거동은 장주기 특성을 가지나 상대적으로 진폭은 작지 않다. 가격이 비교적 높다. 마지막으로 FPSO(선박형)은 거동은 가장 크게 발생하나, 재하하중을 크게 수용할 수 있다는 장점이 있다. 열악한 해양환경 조건에서 라이저와 분리한 상태로 대피할 수 있는 장점이 있으며, 가격이 가장 저렴하다. OTEC용 해양구조물은 운용 개념을 고려하여, 재하하중 수용성, 경제성, 거동 안정성 등을 고려하여 결정되는데, 특정 위치에 고정되는 개념에서는 Spar형이 유리하고, 극한조건에서 부유체가 라이저와 분리되어 이동하는 개념에서는 선박형이 유리할 것으로 평가된다. 이때, 선박형의 경우 부유체의 거동이 크기 때문에, 라이저와 분리되어 설치/운용되는 개념이 적용되어야 할 것이다.

Table 1 General characteristics of floating structures

	TLP (conventional)	Spar (Truss)	Semi-sub (4 Column)	FPSO (Ship Shape)
	 Classic (DDCV) Truss Cell	 CTLP or ETLP (Floatec)	 Deep Draft	 Spread Moored
Water depth (m)	Up to 1500	No practical limit	No practical limit	No practical limit
Trees (Stability_Heave)	Wet or dry (Best)	Wet or dry (Best)	Wet (Good)	Wet (Good)
Station-keeping	Steel tendons	Taut-spread wire or poly	Semi-taut spread wire or poly	Semi-taut spread wire or poly
Free hanging Riser	No (Interaction with tendons)	No constraint	No constraint	No constraint
Hull weight sensitivity to topside	Most	Somewhat	Somewhat	Least
Economics	Expensive	Expensive	Not expensive	Relatively cheap
Payloads	Sensitive	Large (>25000tons)	Somewhat	Large

2.2 OTEC용 라이저

OTEC용 부유체구조물은 일반적으로 개발되고 있는 해양구조물을 약간의 변형을 통하여 적용할 수 있는 반면, 라이저는 새로운 개념으로 접근되어야 한다. 비록, 유체를 이송하는 관이라는 공통점이 있으나, 일반적으로 석유와 가스 개발 시 적용되는 라이저는 직경이 1m 이내이며 강관 혹은 유연라이저가 사용된다. 그러나, 상업용 100MW OTEC급 라이저에서는 약 $138(m^3/s)$ 의 심층수가 취수되므로, 내경 8~10(m)를 가지는 대구경라이저가 사용되어야 한다 (Vega and Michaelis, 2010). 현재까지는 해양개발에서 내경 3(m)를 초과하는 라이저가 적용된 사례가 없기 때문에, 적용 가능한 재료 등 기초적인 검토가 필요하다.

1) 대구경라이저 재질 검토

Table 2에서는 현재 상용으로 개발되고 있는 파이프의 기초적인 특성치를 보여주고 있다. HDPE(고밀도폴리에틸렌) 파이프는 밀도가 0.95로써, 해수중에서 부상되는 문제가 있으나 충분한 접속강도를 가진다. 그러나, 제작가능한 최대 직

경이 1.2(m)에 불과하기 때문에 OTEC용 라이저 재료로는 부적합하다. 강관은 강도가 매우 높으나, 비중이 높으며 대구경관 제작시 비용이 급증할 것으로 판단된다. 또한 부식의 위험성이 있다. 마지막으로 유리강화섬유(GFRP)관은 강관에 비하여 강도는 약하나, 비교적 높은 강도를 가지고 있으며 가격이 가장 저렴하다. 현재 국내에서도 직경 3.6(m)의 상용관을 제작하고 있으며, 보다 큰 직경의 관을 제작할 수 있을 것으로 조사되었다. 유리강화섬유관의 가장 큰 제약은 충분한 접속강도를 가질 수 있는 접속방법이 없다는 것이다. 경제성 및 제작성 등을 고려하여 대구경라이저용 관종을 종합적으로 검토하면, 유리강화섬유 재질을 기반으로 복합재 대구경관이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

2) 대구경라이저 단면형상 검토

복합재로 이루어진 대구경관은 라이저의 단면 설계가 매우 중요한 요소이다. 유리강화섬유 재질로 안쪽과 바깥쪽 두께를 형성하되, 복합재로 샌

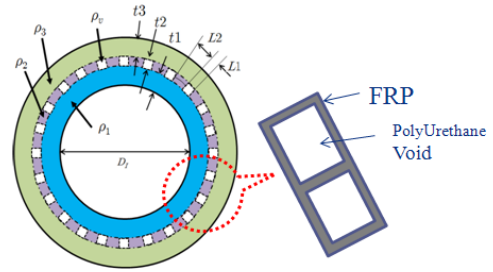
Table 2 Material properties for pipe

	HDPE	Steel	GFRP
Strength	250~280 kgf/cm ²	4000 kgf/cm ²	2500~3000 kgf/cm ²
Elastic modulus	8.0×10 ³ kgf/cm ²	2.1×10 ⁶ kgf/cm ²	8.×10 ⁴ kgf/cm ²
Specific gravity	0.95~0.96	7.8	1.8~2.0
Heat conduct	0.3 kcal/mhr°C	54 kcal/mhr°C	0.22 kcal/mhr°C
Roughness	150	100	100
Price(300mm)	USD73/m	USD100/m	USD58/m
Welding	Heat welding	Welding	Flange bolt
Construction	Easy to handle	Uneasy	Easy
Manufacture	Smaller than 1.2m	Smaller than 2.5m	Smaller than 3.6m

드위치 구조의 가운데 단면을 형성하거나 혹은 중공으로 형성하여 경제적이면서 효율적인 설계가 이루어질 수 있다. 샌드위치 구조의 가운데 층에는 복합재 재질에 따라 대구경라이저 전체의 비중을 조절할 수 있다. Fig. 2에서는 대구경라이저 관련 연구를 수행 중인 기관에서 제안하는 라이저의 단면을 보여주고 있다. 미국의 록히드-마틴에서 개발한 대구경라이저의 단면형상은 Fig. 2 (a)에서 보여주고 있다 (Miller and Ascari, 2011). 유리강화섬유 재질만을 이용하였으며, 샌드위치 구조의 가운데 부분은 중공을 형성하면서 골격을 이루는 구조이다. 최소한의 유리강화섬유 재료가 소모되며, 중공 부분으로 인하여 큰 부력이 작용하게 된다. 따라서, 라이저가 해수 중에서 연직형상을 가지기 위해서는 상당한 크기의 중량체를 라이저 끝단에 설치해야 한다. Fig. 2 (b)는 한국 해양과학기술원에서 제안하는 대구경라이저 단면을 보여주는데, 유리강화섬유 재질을 이용하며 샌드위치구조의 중공을 형성하거나 중공에 비중조절용 물질을 주입하는 설계 방안이다. 중공에 주입되는 비중조절용 물질을 통하여 강도 증가와 비중 조절이 가능할 것으로 판단된다. 두 경우 모두 대구경라이저 단면 안전성을 확보하기 위해서는 라이저의 거동해석 뿐만 아니라, 단면에 대한 국부구조해석이 필요하다.



(a) Locked Martin



(b) KIOST

Fig. 2 Cross-section of large diameter riser designed by research groups (Miller and Ascari, 2011)

대구경라이저는 소구경 파이프와 같이 하나의 단순공정으로 제작이 불가능하며, 단면의 여러 조각을 연결 혹은 접속하여 제작할 수 있으므로 단면설계 과정에서는 제작의 가능성을 충분히 검토해야 한다. 또한, 유리강화섬유관은 접속강도가 약하므로, 연결없이 연속공정으로 제작할 수 있는 방안을 고려해야 한다.

대구경라이저의 단면형상은 라이저의 전체 형상을 결정하는 요인이 된다. 대구경라이저는 심해영역에서 일정 수심 아래의 심층수를 취수하기

위하여 거의 연직으로 매달린 형상을 유지해야 한다. Fig. 2 (a)와 같은 라이저 단면 조건에서는 라이저가 자유롭게 매달린 연직형상을 유지하기 위해서 하부 끝단에 큰 중량체를 설치해야 한다. 반면에 Fig. 2 (b)에서는 중공에 주입되는 제질의 비중에 따라 라이저 전체의 비중이 결정되며, 하부 끝단에 중량체를 설치하거나 혹은 라이저 자체 중량에 의해 연직 형상을 유지할 수 있다.

3. OTEC 해양구조물 설계 시 고려사항

일반적인 해양구조물 설계 검토 사항 외, OTEC용 해양구조물에서 특별히 검토되어야 하는 사항을 정리하면 다음과 같다.

3.1 부유체/라이저 상호 연성 문제

앞서 언급한 바와 같이 OTEC용 라이저는 직경이 매우 큰 라이저로 구성되며, 파랑 및 조류가 작용하는 해양환경에서 라이저에는 가혹한 해양 환경하중이 작용한다. 대구경라이저는 파랑에 의하여 거동하며, 부유체구조물 거동의 영향으로 지속적인 운동을 나타낸다. 대구경라이저의 거동은 다시 부유체구조물에 가진력으로 작용한다. 즉, 부유체구조물과 대구경라이저는 상호 연성운동이 매우 강하게 발생할 수 있다. 따라서, 부유체구조물과 대구경라이저 사이에 발생하는 연성 효과가 최소로 될 수 있도록 전체시스템 형상 설계가 필요

하다. Fig. 2에서는 부유체와 라이저의 연성효과를 최소화하기 위한 개념도를 보여주고 있다. 강한 파랑의 영향은 부유체가 모두 받도록하며, 라이저는 상부 끝단이 해수면에서 충분히 아래에 잠기도록 하여 파랑의 영향을 받지 않도록 한다. 이 경우 라이저는 양성부력을 받아서 자중으로 연직형상을 가지도록 단면이 설계되어야 할 것이다. 취수되는 심층수는 연결된 호스를 통하여 부유체까지 이송된다.

3.2 대구경라이저의 제작, 설치, 운반

대구경라이저는 설계 과정에서 제작 가능성, 설치 방안, 운반 등이 동시에 고려되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 직경이 약 10(m)되는 라이저를 하나의 단관으로 제작하는 것은 어려우며, 각 부품을 조립하여 제작될 수 있다. 따라서, 대구경라이저를 설계한 후 타당한 제작방법이 제시될 수 있도록 고안되어야 한다. 일반적으로 부유체는 육상에서 제작된 후, 예인선박에 의해 이동되어 현장에서 설치된다. OTEC 라이저는 수백~천 미터의 장대형 구조물이기 때문에, 이동 및 설치방법에 관한 검토가 요구된다. 수 m의 단관을 제작하여 설치 현장에서 조립하면서 내리는 방법을 선택하거나, 혹은 백m 길이의 라이저를 육상에서 제작 후 바아지에 탑재 및 이동하여 현장에서 전체 길이만큼 연결 후 설치하거나, 혹은 모든 재료를 설치 선박에 탑재 후 현장에서 제작하면서 설치하는 방법 등에 관한 제작/설치 전략을 수립해야 한다. 결정된 설치방법에 따라 수치해석 및 실험을 통한 충분한 안전성 평가가 이루어져야 한다.

4. OTEC 상업화 및 국내외 연구동향

4.1 상용화를 위한 고려 사항

지속적인 유가상승과 이산화탄소 배출 억제 정책은 신재생해양에너지 자원의 개발 및 상용화 연구를 촉진시키고 있다. OTEC 역시 상용화 개발을 위하여 기술적·정책적 측면에서 지속적인 연구가 필요하다. OTEC은 전체발전용량 100(MW)급

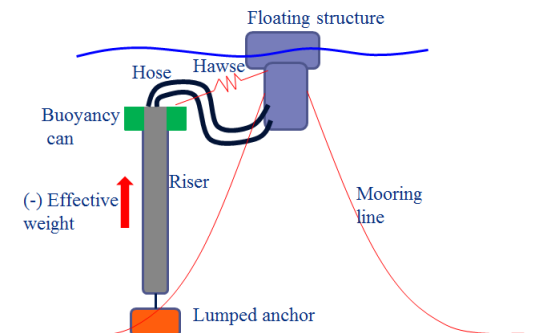


Fig. 2 An example to minimize coupling effect between floating and riser

규모일 때 상업적 개발이 가능한 것으로 알려져 있다 (Varley et al., 2011). OTEC의 상용화를 이루기 위해서는 경제적 관점과 기술적 관점에서 문제점을 극복해야 한다. 경제적 관점에서는 가장 큰 비용이 소모되는 열교환기 관련 설비 비용을 줄이는 것이 중요하다 (Fig. 3). 열교환기가 일반적으로 티타늄 재질이 사용되는데, 고가의 티타늄 재질의 열교환기를 대체할 수 있는 재질 혹은 열교환기 시스템을 개발해야 한다. OTEC 시스템을 설비와 해양구조물로 나누면 해양구조물 비용이 거의 절반을 차지하기 때문에, 경제적인 OTEC 해양구조물 개발이 이루어져야 한다. 기술적인 측면에서는 대구경라이저의 설계, 제작, 그리고 설치 기술을 개발해야 한다. 특히, 현재로서는 길이 약 1,000(m), 직경 약 10(m)의 대구경라이저 제작 자체가 불가능하기 때문에, 상용화를 위하여 극복해야 할 가장 우선시 되는 문제점으로 꼽을 수 있다. 물론 고려되는 대구경라이저는 극한 해양환경에서 안전성을 충분히 확보할 수 있어야 할 것이다.

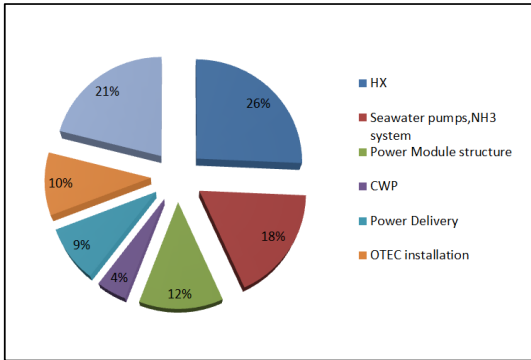


Fig. 3 OTEC CAPEX ratio

4.2 국내외 기술개발 동향

1930년에 Claude가 쿠바에서 OTEC 실험역 실험을 수행한 이래로, 많은 원천기술 및 실증기술 연구가 수행되어져 왔다. 1차석유판동이 발생한 후 미국에서 OTEC 연구에 많은 투자를 하다가 중단된 이후, 다시 2000년 후반들어 미국 에너지부와 민간회사에 의해 연구가 재개되었다. 특히 록히드 마틴에서는 OTEC 해양구조물을 개발하기

위하여 전체 시스템의 고안과 더불어 직경 10(m) 대구경파이프 개념설계를 수행하였다. 이를 바탕으로 직경 4(m) 중형라이저 실험을 제작하여, 향후 상용화를 위하여 준비하고 있는 현황이다. 일본은 1981년에 Naur공화국에 육상형 OTEC 시스템을 제작하였으며, 2000년대 들어서는 OTEC 사이클 설비의 효율 개선 연구를 집중적으로 수행해 왔다. 최근에는 오키나와에 50(KW)급 실증플랜트를 건설하여 운용 중이며, 향후 MW급 발전을 위한 계획을 수립하였다 (<http://www.okinawatimes.co.jp/>). 우리나라에서도 단기적인 OTEC 사이클 및 해양구조물 연구를 수행한 바 있으나, 본격적인 연구는 2010년에 한국해양과학기술원에 의해 진행되고 있다. OTEC 사이클 설비의 효율개선과 열교환기 성능 개선 연구를 수행하고 있다. OTEC 해양구조물 개념설계와 거동안전성 해석 연구를 통하여 100(MW)급 개념설계도를 완성하는 것을 목표로 연구를 수행하고 있다. 2013년에는 20(KW)급 실증실험을 수행하며, 2014년에는 200(KW)급 실증 연구를 진행할 예정이다. 요소기술 연구와 실증기술 확보를 통하여 향후 OTEC 상용화에 대비하고 있다.

5. 맺음말

본 해설기사에서는 OTEC 해양구조물의 구성요소와 설계 시 고려사항 등을 검토해 보았다. OTEC 상용화를 위하여 극복해야 할 문제점을 분석하였으며, 국내외 관련 연구동향을 기술하였다. OTEC은 다른 신재생해양에너지 발전기술에 비하여 기술의 성숙도는 낮은 편이지만, 지속적인 기술개발을 통하여 상용화에 도달한다면 거의 무한한 청정에너지를 얻을 수 있을 것이다. OTEC 상용화를 위해서 국가적인 재정지원과 연관 연구기관의 유기적인 공동연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. L. A. Vega and D. Michaelis, 2010, "First Generation 50 MW OTEC Plantship for the

Production of Electricity and Desalinated Water",
OTC 20957.

2. A. K. Miller and M. Ascari, 2011, "OTEC advanced composite cold water pipe", Final Technical Report, Locked Martin.
3. R. Varley, L. Meyer, and D. Cooper, 2011, OTEC report.
4. <http://www.okinawatimes.co.jp/>
5. 김현주 외, 2011, "해양온도차발전의 실용화 추진계획", 한국해양환경공학회 추계학술대회.