

인공용승용 대구경 라이저의 기초 설계

°정동호·이승원·문덕수·김현주·이호생
한국해양연구원 해양심층수연구센터

서론

인공용승시스템이란 수심 200m 아래에 있는 해양심층수를 취수하여 표층수와 혼합하여 확산시키는 시스템으로, 해양심층수에 내포된 영양염을 표층으로 확산시켜 해역 기초생산성을 증대시키는데 기여할 수 있다 (정동호 외, 2009). 인공용승시스템은 대량의 해양심층수를 취수하는 것이 필수조건이기 때문에, 대구경 라이저의 개발은 인공용승시스템의 기본요소이다. 인공용승시스템에서 라이저는 해양심층수를 심층으로부터 표층까지 이송시키는 안내자 역할을 하게 된다. 따라서, 라이저는 거의 연직으로 서 있는 형상을 가지게 되는데, 라이저의 상부 끝단은 상부 부유체와 연결되며 하부 끝단은 자유롭게 매달린 상태가 된다. 물론 앵커를 설치하여 라이저의 하부 끝단을 앵커와 연결하여 하부 끝단의 이동을 제약시키는 방안도 있다. 그러나, 하부 끝단이 제약되는 경우에는 상부 구조물의 거동에 의하여 라이저에 큰 장력이 발생하여 구조적 결함이 야기될 수 있기 때문에, 자유롭게 매달린 상태로 설계하는 방안이 보다 효율적이다. 본 연구에서 다루는 라이저는 일반적인 라이저에 비하여 직경이 비교적 크기 때문에 보다 큰 해양환경 하중을 받게 되며, 구조적으로 취약할 수 있다. 따라서, 라이저의 재질 선정부터 설계 및 구조적 안전성 해석까지 세밀한 주의가 요구된다. 본 연구는 인공용승시스템에 적용할 수 있는 대구경 라이저를 설계하기 위한 사전 연구로서, 대구경 라이저의 재질에 대하여 검토한다. 또한, 고유치 해석을 수행하여 대구경 라이저에 적합한 구조형식을 선정한다.

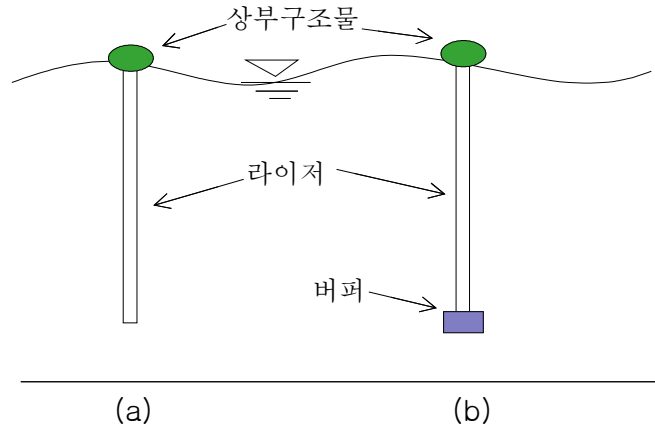
대구경 라이저의 재질 검토

대구경 라이저는 대량의 해양심층수를 해수면까지 이송하는 기능을 수행하게 되는데, 경제적이면서 안전한 재질의 파이프가 사용되어야 한다. 국내에서 사용 가능한 재질의 관은 HDPE관, 강관, 그리고 FRP관 등이 있다. HDPE관은 비중이 1보다 작아서 해양에서 작업 시 이동 및 조절이 용이하지만, 중량과 강도를 증가시키기 위해서 별도의 부재가 부착되어야 한다. 또한 국내에서 제작 가능한 최대 직경은 약 1m이며, 가격이 상대적으로 높다. 강관은 부식의 문제가 있으며, 최대 직경 2.5m까지 제작 가능하다. FRP관은 비중이 약 2이며, 강도는 강관에 비하여 약하지만 비교적 강한 편이다. 가격이 가장 낮아서 경제적이다. 최대 3.6m까지 제작 가능하지만, 접속강도가 약하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 FRP관이 접속강도의 단점을 보완할 경우 인공용승용 대구경 라이저에 가장 적합할 것으로 판단하여 이에 관한 고유치해석을 수행한다.

대구경 라이저의 고유치해석

라이저의 안전성을 평가하기 위해서는 해양환경조건에서 정적 및 동적 해석을 수행해야 하지만, 사전 단계로서 고유치해석을 통하여 라이저의 구조형식을 선정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 파이프 관 종류에 따른 구조형식을 선정하여 이에 대한 고유치해석을 통하여 적절한 구조형식을 선정한다. [그림 1]에서는 HDPE관과 GFRP관을 사용할 경우, 적용 가능한 구조형식을 보여주고 있다.



[그림 1] 인공용승시스템 라이저의 설계 개념

모드해석 및 결과

모드해석을 통하여 기초 거동특성이 가장 뛰어난 관종을 선정하여 본격적인 설계 및 해석을 수행하고자 하였다. [그림 1]의 두 가지의 구조양식에 대한 고유치해석을 수행하였다. HDPE파이프는 비중이 1보다 작기 때문에 라이저 끝단에 중량체를 붙이는 구조로 해석되며, GFRP 파이프는 비중이 약 2이므로 자유조건으로 해석된다. 라이저의 직경은 3m, 길이는 250m로 해석하였으며, 경계조건은 상부 힌지, 하부 자유 조건으로 처리하였다. 부가질량 계수는 1.0으로 가정하였다.

[표 1] 고유주기(s)

(a) HDPE with attachment of lumped mass

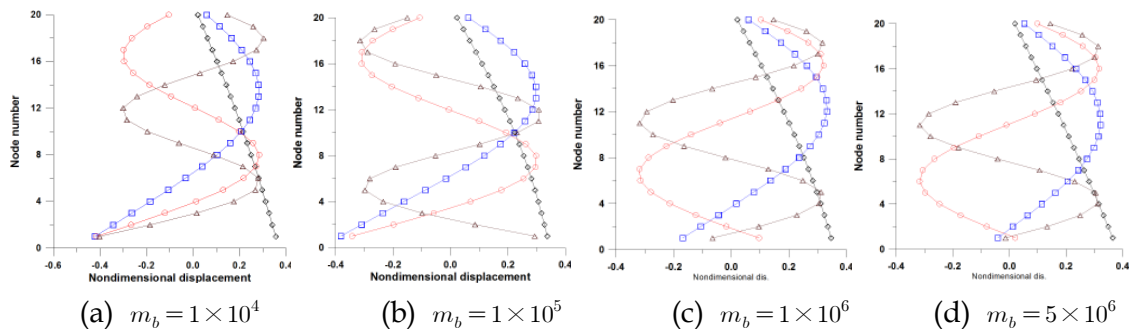
(b) GFRP

Lumped mass ($\times 10^3\text{kg}$)	HDPE				Pipe diameter(m)	GFRP	
	10	100	1000	5000		D1000	D3000
1st	201	90.3	41.9	33.9	1st	133.8	131.7
2nd	30.9	23.2	12.6	6.2	2nd	49.4	29.5
3rd	10.4	9.6	6.1	3.1	3rd	22.0	10.3
4th	5.1	5.0	3.7	2.0	4th	12.9	5.1
5th	3.0	3.0	2.4	1.5	5th	8.1	3.0

[표 1]에서는 하부 끝단에 중량체가 붙어 있는 HDPE관과 GFRP관에 대한 고유치 해석결

과를 보여주고 있다. HDPE 파이프는 하부 끝단에 붙는 중량체의 질량에 따라 고유치를 해석하였는데, 중량체의 질량이 증가될수록 고유주기 값이 작아지는 경향을 알 수 있다. 그 이유는 끝단 중량체에 의해 질량은 증가되지만, 라이저 길이 전체에 대하여 중량체의 자중만큼 장력이 증가되기 때문에 고유주기가 짧아지는 효과로 나타난다. 즉, 중량체 부착으로 인한 질량 증가에 의한 고유치 증가보다 장력 증가로 인한 고유치 감소 영향이 크기 때문이다. 버퍼 질량이 증가할수록 고유주기가 짧아져서 2차 혹은 3차 고유모드에서 해양파 고밀도 에너지 영역에서 공진이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 끝단에 중량체를 설치하는 설계방법은 동적 설계 관점에서 유리하지 않다는 것을 알 수 있다. 반면에 GFRP 파이프를 사용하는 경우에는 1차 및 2차 고유주기가 해양파 고밀도 에너지 영역을 벗어나는 것으로 설계되기 때문에 기본적인 거동특성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

[그림 2]에서는 버퍼를 붙이는 경우 버퍼 질량에 따른 고유모드 형상을 보여주고 있다. 버퍼의 질량을 증가시키면서 모드 형상 변화를 살펴보았는데, 질량이 1×10^6 (kg)인 경우에도 모드 형상은 버퍼가 없는 경우와 유사하게 나타났다. 이것은 버퍼로 인하여 횡방향 거동 특성은 크게 변화가 없다는 것을 예측할 수 있다. 질량이 5×10^6 (kg)인 경우에는 2차 모드 이상에서 라이저의 하부 끝단은 매우 안정적인 거동을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그러나 질량이 5×10^6 (kg)인 경우에는 약 5000 ton의 중량체를 설치하는 것을 의미하는데, 매우 큰 중량으로 인하여 HDPE 재질의 라이저는 파괴될 것으로 예상할 수 있다. 버퍼의 질량이 1×10^4 (kg)인 경우에는 약한 조류에도 라이저의 끝단이 들러 올라가서 안정적인 취수가 어려우며, 1×10^6 (kg)인 경우에도 버퍼로 인한 라이저의 거동 안정성을 기대할 수 없으므로 버퍼를 설치하는 설계는 적합하지 않은 것을 알 수 있다. 해양광물 채광용 라이저에서는 라이저가 안정적인 거동 특성을 갖도록 하기 위해서 하부 끝단에 버퍼를 설치한다. 그러나, 본 연구와 같이 인공용승용 대구경 라이저에서는 끝단 버퍼를 설치하는 것은 적합하지 않다는 것을 알 수 있었다.



[그림 2] 버퍼를 부착하는 경우 버퍼 질량에 따른 모드 형상

대구경 라이저에서 하부 끝단에 버퍼를 설치하는 경우 거동 특성에 크게 영향을 미치지 않는 이유를 규명하기 위하여 라이저의 거동에 의해 발생하는 부가질량(added mass)와 버퍼의 질량을 비교해 보았다. 라이저의 거동으로 인하여 발생하는 부가질량은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$m_a = \left(\frac{\pi}{4} D_o^2\right) \cdot L \cdot \rho_w$$

직경이 3(m), 길이가 250(m)인 파이프의 부가질량은 약 2×10^6 (kg)이므로, 예제해석에서 사용된 [표 1]의 버퍼 질량과 비교해 볼 때 질량이 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ (kg)인 경우에는 버퍼의 설치가 라이저의 거동 안정성에 크게 영향을 미치지 못하는 이유를 알 수 있다. 즉, 버퍼 질량이 라이저 전체의 부가질량보다 매우 큰 5×10^6 (kg)인 경우에만 라이저의 거동 안정성에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

결론적으로 직경이 매우 큰 라이저 설계 시에는 하부 끝단의 안정성을 높이기 위해서 설치하는 버퍼는 큰 효과를 얻을 수 없다는 것을 알 수 있었다. 비록 버퍼의 질량이 라이저의 부가질량보다 매우 큰 경우에는 버퍼의 효과가 있을 수 있으나, 이 경우에는 버퍼의 과도한 중량으로 인하여 라이저의 구조적 안전성에 문제가 발생할 수 있기 때문에 비효율적인 설계가 된다는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과를 볼 때, 인공용승을 위한 대구경 라이저는 HDPE 파이프를 활용하는 [그림 1] (b) 과 같이 설계하는 것은 효율적이지 못하다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서, GFRP 파이프를 활용하는 [그림 1] (a)와 같은 구조가 효율적이라는 결론을 얻을 수 있었다. GFRP 라이저의 모드 형상은 [그림 2] (a)와 유사하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 고유주기는 [표 1] (b)와 같이 1차 모드는 100초를 넘는 것으로 나타났다. 1차와 2차 고유주기는 해양파 고에너지 영역을 벗어났으며, 직경 3m의 GFRP관은 3차 모드 이상에 대해서는 해양파에 의해 거동이 크게 나타날 것으로 예상되는 바, 정밀한 동적해석이 요구된다.

결론

본 연구에서는 인공용승시스템을 개발하기 위해 필요한 요소기술 중의 하나인 대구경 라이저에 관한 사전연구로써, 고유치 해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 대구경 라이저는 하부 끝단에 집중질량을 사용하는 HDPE관으로 구성되는 경우보다, 균일한 질량으로 구성되는 GFRP관으로 구성되는 경우가 효율적인 설계가 될 것이라는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 버퍼에 의한 끝단 절점의 질량 증가효과보다 라이저의 큰 직경으로 인한 부가질량 효과가 지배적이기 때문에, 끝단 절점에 질량을 증가시킬 지라도 질량증가 효과가 미비하기 때문이었다. 본 연구 결과를 바탕으로 자세한 동적해석을 통하여 안전한 설계가 이루어져야 할 것으로 사료되는 바이다.

감사의 글

본 연구는 ‘해양심층수의 다목적 이용 개발’ 및 ‘해역 기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 핵심기술 연구’ 과제의 지원으로 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

[1] 정동호, 이승원, 문덕수, 2009, ‘해역기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 소개’, 한국어업기술학회 춘계학술대회