

2점지지계류를 활용한 심해 부유체의 다점지지계류 개념설계

박인규^{†*}, 김경무^{*}

울산대학교 조선해양공학부^{*}

Conceptual Design of Deep-sea Multi-Point Mooring
by using Two-Point Mooring

Park In-Kyu^{†*} and Kim Kyong-Moo^{*}

University of Ulsan, School of Naval Architecture and Ocean Engineering^{*}

Abstract

In this paper, we investigated the design method of mooring system in ultra deep sea and carried out the conceptual design for offshore West Africa oil field in ultra deep sea of 3000 meters. Recently, it was feasible to design and install the offshore floating structures in deep sea of up to 2000 meters. Due to the simplicity, two-point mooring design is fully utilized. Force-excursion curves are thoroughly examined to find out the feasibility of various combinations of mooring lines. Free length and pretension effects are discussed. It is found that composite materials including synthetic fiber rope may be good solution for ultra deep sea mooring design.

※Keywords: Ultra deep sea mooring(초심해계류), Mooring design(계류계 설계), Free length(자중과단길이), Pretension(선인장력), Synthetic fiber rope(합성섬유로프), Composite material(복합재료), Two-point mooring(이점지지계류), Force-excursion curve(복원력-변위곡선), Multi-point mooring(다점지지계류)

1. 서론

해양에서 작업하는 부유체의 계류시스템 설계는 수심이 1000m를 초과하게 되면서 그 중요성이 기하급수적으로 커지게 된다. 최근에는 심해 석유의

시추 및 생산기술의 발전으로 인하여 수심2000m까지 계류방식의 부유체 설계 및 적용이 가능하게 되었다(Kang 2007, Kim et al. 2004, Ryu 2008). 앞으로는 수심 3000m에서 투입 가능한 계류계 설계가 당연한 과제로 생각된다. 이러한 초심해에서는 기존 방법에 의한 계류계 설계가 불가능하므로 새로운 개념의 설계를 시도하여야만 한다..

본 논문에서는 수심 3000m 이상인 초심해에

접수일: 2007년 10월 10일, 승인일: 2008년 7월 18일

† 교신저자: ikpark@ulsan.ac.kr, 052-259-2682

적합한 최적의 계류시스템을 설계하는 방법을 연구하고, 특정한 환경조건을 택하여 초기설계를 진행하고 그 결과를 정리하였다.

심해 계류설계에서 중점적으로 고려해야하는 자중파단길이와 선인장력에 대하여 우선 고찰하였다. 다음으로, 실제적인 설계예로서, 심해 FPSO를 선택하여 설계 차트에 의한 간이 설계법으로 계류삭의 직경, 길이와 같은 초기 제원을 대략 정하였다. 설계의 중간과정에서 다양한 변수들에 대하여 검토하고 데이터베이스를 확보하기 위하여 2점지지 계류설계를 활용하였다. 처음부터 다점지지해석을 하는 경우도 있으나(Shin and Kim 1995) 본 연구에서는 2점지지에서 다점지지로 확장하는 설계방법을 사용하였다. 마지막으로 계류해석 S/W인 MOSES(2005)를 사용하여 설정된 계류삭의 제원이 타당한지를 선인장력 등을 바꾸어 가며 확인하고 최적 설계를 완성 하였다.

서론에 이어 2장에서는 계류계 설계에 대한 일반적인 고찰을, 3장에서는 이점지지계류설계(Two-point mooring design)를, 4장에서는 다점지지계류설계를, 그리고 5장에서는 결론을 맺는 순서로 구성되어 있다.

2. 계류계 설계에 대한 일반적인 고찰

Catenary 방정식과 이를 이용한 설계차트 등 준정적 해석법을 활용하는 **간이설계**는 오래 전부터 이용되어왔다. 수심이 깊어짐에 따라 간이설계는 더 이상 적용하기 곤란해지며 상용 S/W를 활용하여 개념설계단계에서 유용한 **초기설계**가 주로 이루어지고 있다. 환경외력으로는 조류력, 풍력 및 파도에 의한 평균표류력을 고려하고 부유체의 파주파수 운동을 고려한다. 장기간 혹독한 해상에 계류될 경우에는 저주파수 표류거동을 포함한 시간영역에서의 동적해석 및 피로해석을 고려하여 시스템의 안전을 최종적으로 확인하는 **확인설계**가 필요하다(API 2005). 심해 계류계 설계에서 일반적으로 고려하여야 할 중요한 사항은 자중파단길이(SWBL, Self Weight Breaking Length 혹은 자중자유길이, Free Length라고도 함)와 선인장력이며, 수심이 매우 깊어지면 합성섬유로프의 채용을

고려하여야 한다.

2.1 자중파단길이 (Free length)

부유체가 설치될 해역의 수심이 깊어지게 되면 사용하는 계류삭의 길이가 비례하여 길어지게 되고 자중에 의한 인장력이 매우 중요해 질 수 있다. 이와 같이 수심이 깊어짐에 따라 고려해야 할 자중에 관한 특성을 자중파단길이(Free length)라고 하며 심해계류삭의 자중에 따라 사용가능한 길이를 파악하는 데 유용하게 사용될 수 있다(Whitehill 2001).

흔히 사용되는 계류삭의 재질별, 직경별 자중파단길이를 계산하여 다음의 Table 1에 보였다. 이 표는 수심에 따라 선택 가능한 재료들을 알려주고 있다. 여기서 자중파단길이는 파괴하중을 단위길이당 무게로 나눈 값이며 설치가능수심은 자중파단길이를 안전계수인 5 로 나눈 값이다.

2.2 선인장력 (Pre-tension)

다점 계류된 부유체의 계류성능을 개선시키기 위하여 계류삭에 미리 가해주는 인장력을 선인장력이라고 한다. FPSO의 계류에 흔히 쓰이는 다점 계류에서 선인장력을 얼마로 설정해야 하는지는 운영자의 몫이지만 대략의 범위는 설계단계에서 지정해 주어야 한다.

선인장력을 너무 많이 설정하면 계류삭의 허용된 인장력을 과도하게 잠식하게 되어 효율적인 설

Table 1 Free Length of mooring ropes

Line material	Free Length (m)	Water Depth (m)
chain (ORQ)	4000	800
chain (grade 3)	4300	860
chain (grade 4)	5200	1040
W. rope (six strand IWRC)	15000	3000
Wire rope (spiral strand)	20000	4000
Syn. fiber, Polyester	37000	7400
Syn. fiber rope, HMPE	93000	18000

계가 될 수 없다. 반면에 너무 작은 선인장력은 계류계의 탄성계수를 작게 하는 효과가 있어 부유체의 수평 이실패할 수 있다. 더욱이 과소한 선인장력은 부유체의 밀려나는 쪽 계류삭이 slack(계류삭이 탄성을 잃고 늘어져서 외력에 대하여 전혀 저항할 수 없는 상태)되는 치명적인 상황을 맞을 수도 있다.

따라서 최소 선인장력은 매달린 계류삭의 자중 + " α " 만큼 설정하여야 하며 여기서 α 는 수평방향허용거리에 관계있는 계류삭의 "stiffness"에 달려 있다.

최적의 선인장력은 선택된 계류삭의 안전사용인장력(safety working tension)의 1/4~1/2 범위 내에서 초기 값을 설정하는 것이 무난하다고 알려져 있다.

2.3 합성섬유 로프의 특성

최근 해양구조물의 계류에 많이 사용되는 합성섬유로프는 자중과 부력이 거의 같아서 해수 중에서 중성부력(neutrally buoyant)을 가진다. 초기에는 많은 문제점을 가지고 있었으나 차츰 해결되어 근래에는 거의 와이어로프와 비슷한 강도를 가지면서 가벼운 소재로서 각광을 받고 있다. Whitehill(2001)은 해양작업에 쓰이는 합성섬유로프에 대하여 자세한 기술적인 소개를 하였다. 시중에 나온 Aramid 계열의 제품으로는 미국 duPont 사의 Kevlar, 네델란드 Teijin Ltd.사의 Twaron, 일본의 Technora이다. 한편 HMPE(High Modulus Polyethylene) 계열의 제품은 미국 Honeywell/GE사에서 개발한 Spectra가 있다. 이외에 Deeprope, Dyneema, Gripolene, Tiptolon, Euroflex, Tipto012, Tipto-8 등이 있다.

3. 이점지지 계류설계

이점지지계류(two-point mooring)는 Fig. 1에 보인 바와 같이 180도 간격을 가진 2개의 계류삭만으로 부유체를 지지하는 경우를 말한다. 환경외력은 계류삭과 평행한 방향이라고 가정하므로 다점지지 계류계중 가장 간단한 경우이다. 따라서 간단하게 선인장력(pretension) 등 다점지지계류의

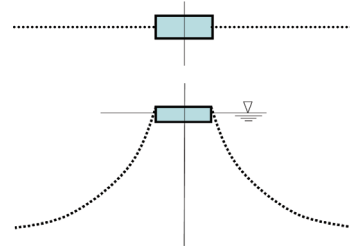


Fig. 1 Sketch of two-point mooring

특성을 살펴 볼 수 있다. 설계의 중간과정에서 활용하고자 하는 2점지지 계류계는 2차원으로 해석할 수 있으므로 예전부터 많이 사용되어 오던 Catenary 방정식을 사용하여 쉽게 검증이 가능하며, 여러가지 재질의 계류삭을 시험해 볼 수 있고, Clump, subsurface buoy 등의 다양한 부력(혹은 중력) 보조장치의 활용을 검토해 볼 수 있다. 또한, 일점계류계(single point mooring)에 비하여 선인장력을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

부유체는 Table 3에 보인 상자 형태의 FPSO이고, 수심은 3000m라고 가정한다. 선수와 선미에 각각 한 가닥의 계류삭이 적당한 선인장력을 가지며 부유체를 계류하고 있다.

이때 사용하는 계류삭으로서는 체인이나 와이어로프는 자중이 무거워 적당하지 않으므로 중성부력을 가진 합성섬유 로프를 사용한다. 다만, 합성섬유로프만 사용하게 되면 계류삭의 형상변화에 따른 복원력을 전혀 기대할 수 없기 때문에 해저면 부근의 약 900m 구간에는 체인을 써서 자중에 의한 계류삭의 형상 변화를 이용하도록 한다. 이렇게 하면 해저면과의 마찰에 의한 파지력을 증가시킬 수 있고, 해저면과의 빈번한 접촉/비접촉 상태에 따른 계류삭의 마모도 막을 수 있다. 한편 부유체와 가까운 100m 구간도 체인으로 하는데, 그 이유는 선인장력을 주기위하여 체인 잭(jack)을 통과해야 하고 방향전환을 위하여 페어리더를 거쳐야 하는 등 상당한 마모가 예상되기 때문이다. 그러므로 해저면에 가까운 900m 길이는 체인, 중간부 4000m는 합성섬유 로프, 부유구조물 가까운 100m 길이는 다시 체인으로 설계하였다. 설계검토에 사용된 계류삭의 재질별 직경, 길이 및 선인

장력이 Table 2에 정리되어 있다.

상용 S/W인 MOSES로 계산한 결과를 Figs. 2~4에 보여주고 있다.

Case I, II는 와이어로프를 주로 사용하여 구성된 계류삭인데 앞에서 언급한 자중파단길이를 초과하므로 적절하지 않지만 비교목적으로 수록하였다.

Table 2 Mooring line design cases

Case No.	Seg. Material	Line Dia. (mm)	*Wt (ton/m)	CBS (ton)	Seg. Len. (km)	Pre-tension (ton)
I	Wire	120	0.06	1300	5	300
II	Chain	130	0.32	1560	0.1	300~400
	Wire	120	0.06	1300	4~6	
III	Chain	120	0.27	1360	0.9	100
	Fiber	140	0.01	1130	5	
IV	Chain	130	0.32	1560	0.1	100
	Fiber	140	0.01	1130	4~6	
	Chain	120	0.27	1360	0.9	

*해수 중 무게임. Fiber rope는 공기 중 무게임

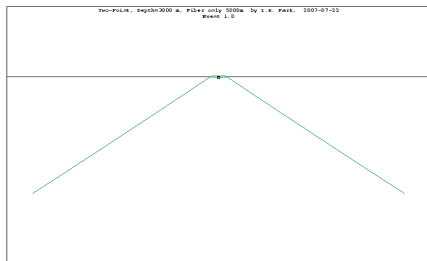


Fig. 2 Fiber rope only (Case III)

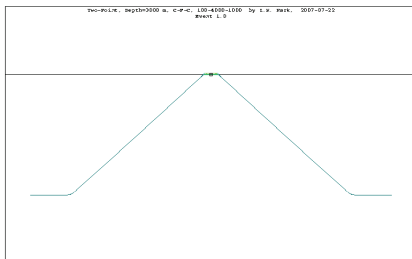


Fig. 3 Chain-Fiber-Chain (Case IV)

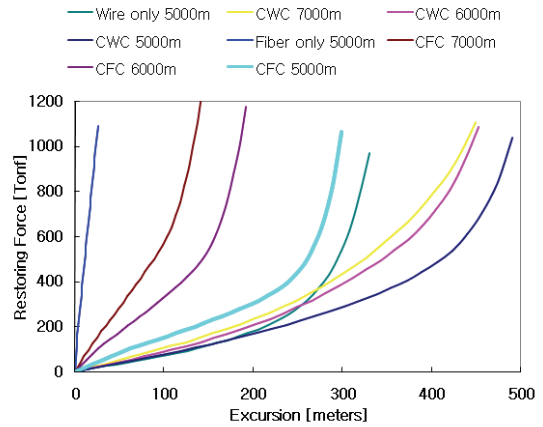


Fig. 4 Force-excitation curves comparison

Case III은 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fig. 2에 보인바와 같이 섬유로프만으로 구성하였다. 비중이 1에 가깝고, 해수 중에서 거의 중성부력을 가지므로 그림에 보이는 것처럼 직선에 가까운 형상을 보이고 있다. 자중에 의한 문제는 해결되지만 또 다른 여러 가지 문제가 발생한다. 우선 복원력-변위 곡선의 특성이 매우 급격한 기울기를 보이게 되며 결국 약간의 변위도 허용하지 못하게 된다. 이 경우 커다란 관성력을 가진 해양구조물이 파랑중 수평운동을 하게 되면 이를 허용하지 못하고 계류삭이 파손될 수 있다. 하중의 반대편 계류삭이 slack 될 가능성도 매우 크다. 또한 해저면에 설치된 anchor에 수직 하중이 작용하여 파지력이 급격히 떨어진다. 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 Fig. 3에 체인-섬유로프-체인으로 구성된 계류삭의 측면도를 보여주고 있다. 섬유로프로 구성된 구간은 역시 직선에 가까운 측면을 보여주나 체인으로 구성된 구간에서는 약간의 catenary 형상을 유지할 수 있다.

위의 여러가지 경우에 대한 복원력-변위 곡선을 Fig. 4에 보여주고 있다. 와이어로프만인 경우 (Case I) 변위 300m 까지 복원력-변위곡선이 상당히 부드럽게 단조증가하고 있어 환경하중에 의해 발생하는 변위를 무리 없이 복원력으로 받쳐주고 있음을 알 수 있다. 여기에 체인이 더해진 CWC인 경우(Case II)는 더욱 곡선의 기울기가 완

만해 저서 500m의 변위까지 받아낼 수 있다. 그러나 섬유로프로만 구성된 계류삭의 경우(Case III)에는 매우 급격한 곡선의 기울기 때문에 약간의 변위에도 큰 하중이 생기기 때문에 23m의 변위밖에 수용할 수 없다. 그 이유는 합성섬유로프의 자중이 해수와 거의 같아서 catenary 형상을 가지지 못하고 직선으로 되어 형상에 의한 복원력을 기대할 수 없기 때문이다. 이러한 특성은 질량이 매우 큰 부유체가 파주파수 운동을 하게 되면 계류계가 이러한 변위를 받아줄 수 없게 되어 큰 문제가 발생한다. 그러나 체인이 더해진 CFC의 경우 (Case IV) 어느 정도의 변위(변위 300m~150m)는 허용하고 있다. 비교적 짧은 길이의 섬유로프가 큰 허용변위를 가지는 것은 제3 segment인 체인이 해저면에서 해수 중으로 떠올라 catenary를 형성하기 때문이다. 현실적으로는 수심의 5%에 해당하는 변위량 0~150m의 범위에서 부드러운 복원력-변위곡선을 가져야 하지만, CFC의 경우는 CWC의 경우에 비하여 약간 크기는 하지만 비교할만한 기울기를 보여주고 있다. 이러한 곡선의 기울기는 동적하중이나 충격하중이 계류삭에 가해지면 과도한 응력으로 파손될 가능성이 적음을 암시한다. 앞의 여러 가지 검토결과 중에서 중간 segment인 섬유로프의 길이가 4000m인 경우(Case IV) 복원력-변위 곡선의 기울기가 CWC에 비하여 크게 불리하지 않고 비교적 큰 변위에도 견딜 수 있기 때문에 수심 3000m에서 만족할만한 계류성능을 보이고 있다고 판단되어 다음 단계인 다점지지 계류설계로 확장하고자 한다.

4. 다점지지 계류설계

앞 장의 2점지지 계류설계를 통하여 최적의 계류삭의 길이 및 segment 별 재질을 충분히 검토하였다. 다점지지설계에서는 환경조건에 맞추어 필요한 만큼 계류삭의 수를 늘리는 방법을 사용하였다. 본 설계에서는 L/B가 5인 상자형 FPSO를 부유체로 가정하였다. 횡방향의 환경외력이 제일 클 것으로 보고 부유체의 beam sea 방향으로 지지하도록 4개의 코너부분에 계류삭을 각각 1개씩

우선 배치하고 여기서 30 deg 및 60 deg 방향으로 각각 1개씩 배치하여 head sea 방향의 환경외력에도 대비하도록 하였다. 이러한 12가닥의 배치는 부유체를 설치할 해역의 환경하중이 방향에 따라 균일한 확률로 올 경우에 특히 유효하며, 주환경하중의 방향을 미리 알지 못할 경우에도 가능하다는 장점이 있다.

하나의 계류삭의 2차원 평면상에서의 수평탄성계수를 k 라고 하면, x 축과 각도 α 만큼 비껴서 배치된 계류삭의 x 축 및 y 축 방향으로의 stiffness는 각각 $K_x = (\cos \alpha)^2 k$, $K_y = (\sin \alpha)^2 k$ 와 같이 된다 (Fig. 5 참조).

이러한 관계를 감안하여 2점지지 계류설계로부터 다점지지 계류설계로 확장하는 데 필요한 계류삭의 수와 펼친 각도를 결정할 수 있다. 이때 환경조건은 Table 4와 같이 설정하였다. 환경외력의 입사방향은 wave, wind, current 모두 같은 방향으로 입사하는 경우를 계산하였으며, 부유체의 입장에서 선수 방향(head sea) 및 선측 방향 (beam sea)을 계산하여 계류삭들이 안전하중을 검토하였다. 환경하중이 head sea 방향에 대하여 계산된 시간평균 하중을 Table 5에 정리하였다. 설계하고자 하는 수심 3000m에서 다점지지 계류계를 설계하고 그 결과를 Fig. 6에 보이고 있다.

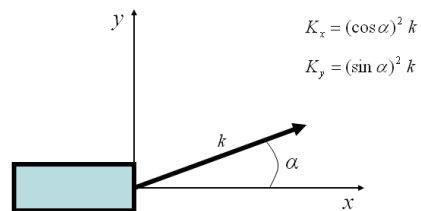


Fig. 5 Stiffness of oblique mooring line

Table 3 Floating structure's dimensions

	Dimensions
LOA (m)	300
Breadth (m)	60
Depth (m)	40
draft (m)	17
Displacement (m ³)	306,000

Table 4 Design environmental condition

Location Environment		West Africa	GoM	North Sea
Wave	Hs(m)	3	10	20
	Tz(sec)	8	10	15
Wind (m/sec)		26	40	100
Current (m/sec)		1	2	4

Table 5 Environmental force (head sea)

	Env. force(tonf)
Wind force	17
Current force	51
Wave drift	16
Total	84

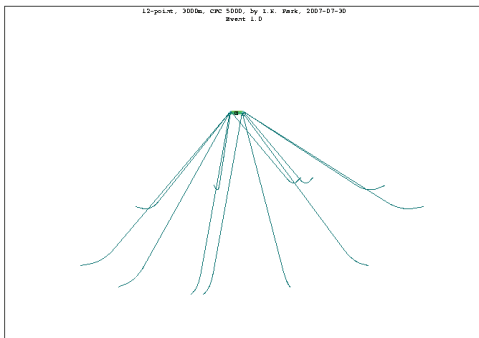


Fig. 6 12-point mooring Chain-Fiber-Chain

주어진 해역의 환경조건하에서 설계된 모든 계류삭들이 안전하며 부유체는 허용된 범위내에 들어움을 확인하였다. 이러한 복합재료로 구성된 chain-fiber-chain의 장점은 합성섬유로프의 중성 부력으로 인하여 계류계 전체의 무게가 경량화 되어 부유체의 부력손실을 줄일 수 있으며, 선인장력을 상대적으로 작게 할 수 있다. 또한 합성섬유로프만 사용했을 때보다 훨씬 더 부드러운 하중-변위곡선을 얻을 수 있어서 커다란 변위에도 부드럽게 하중이 증가할 수 있다.

5. 결론

앞에서 논의한 바와 같이, (1)수심 3000m에서의 계류설계를 완성하였다. 이로부터 (2)초심해 계류계의 초기설계에는 자중과단길이를 고려한 가벼운 재질로 선인장력을 일정한 값 이하로 줄여야 하며 (3)합성섬유로프와 체인을 적절히 혼합한 복합재료를 사용하여 이를 달성할 수 있었다.

참 고 문 헌

- API, 2005, Design and Analysis of Station-keeping Systems of Floating Structures, API Recommended Practice 2SK, Third Edition
- Kang, D.H., 2007, "AGBAMI FPSO Mooring System Analysis,," Spring Workshop on the Design of Offshore Structures, KSOE .
- Kim, Y.B., Kim, M.S., Lee, J.H. and Ha, M.K., 2004, "Coupled Dynamic Analysis of an FPSO and Mooring Lines in Two-peak Random Wave, Current and Wind,," Proceedings of the Annual Autumn Meeting of SNAK, pp. 640-645.
- MOSES, 2005, Reference Manual for MOSES, Ultramarine, Inc.
- Ryu, S.S., 2008, Mooring System & Riser, Pusan National University
- Shin, H.K. and Kim D.S., 1995. "On the Study of Static Analysis of Multi-point Mooring System,," J. of KSOE, Vol. 9, No. 2, pp. 53-60
- Whitehill, A.S., 2001, High Strength Synthetic Fiber Ropes, Chapter 3 National Science Foundation, Third edition.



< 박 인 규 >



< 김 경 우 >