

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발

홍기용 · 양찬규 · 최학선
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

An Experimental Method for Analysis of the Dynamic Behavior of Buoys in Extreme Environment

KEYYONG HONG, CHAN-KYU YANG AND HARK SUN CHOI
Ocean Development System Laboratory, KORDI, Taejon 305-343, Korea

KEY WORDS: Buoy motion 부표운동, Mooring tension 계류삭 장력, Extreme environment 극한환경, Model test 모형시험, Model similarity 모형 상사성

ABSTRACT: An experimental method to investigate the dynamic characteristics of buoys in extreme environmental condition is established. Because the buoy model requires a reasonable size for accurate experiment, the test condition in model basin that satisfies the similarity law is hardly compatible with capability of test facilities. It is suggested that the linear wave component that is unable to satisfy similarity is separated with others. The model experiment is carried out with mitigated condition for the linear wave components while others including wave drift, current and wind are keeping the similarities. Then, the result can be extrapolated to give the dynamic behavior of buoys in extreme condition because linear wave component is solely responsible to oscillatory buoy motion and other environmental components are applied as a initial tension. The similarity for current and wind conditions is viewed as equivalence of restoring forces. The validity of proposed method is examined with different types of standard ocean buoys and it indicates that the linearity of measured characteristics is assured with a limitation of reasonable distance between test and estimated wave conditions.

1. 서 론

해양에서 다양한 목적으로 사용되는 부표의 효과적인 운용을 위해서는 부표의 안정성 및 적절한 운동성능의 확보가 필수적이며, 이들 성능의 평가를 위해서는 운동특성 및 계류장력의 파악을 위한 수조모형시험이 요구된다. 특히 설계 환경조건인 극한 조건에서의 부표의 거동은 안전성의 관점에서 모형시험의 주요 관심사항이 되고 있다.

모형시험에서 실험역 환경을 정확히 모사하기 위해서는 파랑, 바람, 조류의 복합환경의 재현이 필요하며, 모형시험에 사용되는 모형의 축척비에 따른 상사성을 만족하는 수조시험 조건이 결정되어야 한다. 그러나 수조에서 재현 가능한 환경조건은 한계가 있으므로 실험역 극한 환경을 상사시키기 위해서 과도한 축척비가 필요한 경우가 흔히 발생한다. 대축척의 모형을 사용하면 시험시 발생하는 각종 잡음과 오차의 크기가 계속되는 특성치에 비해 과도하므로 모형시험의 오차 또한 커지게 된다. 그러므로 모형의 최소크기가 유지되는 축척비의 채택이 필요하며, 이에 따른 상사성의 불일치를 보상하기 위한 모형시험 기법의 정립이 필요하다.

부표는 바람의 영향을 받는 상부구조물과 파랑 및 조류의 영향을 받는 축대칭 형상의 하부구조물로 이루어진다. 파랑은 중력이 지배적인 현상이므로, 파랑에 기인하는 부표의 거동은 프

루드수에 의해 상사성을 만족시킨다. 조류와 바람에 의한 영향은 점성력이 지배적이므로 원칙적으로 레이놀즈수에 의한 상사가 이루어져야 하지만, 일반적으로 외력의 관점에서 상사성을 만족시킨다(한국해양연구소, 1999). 이는 축소모형을 사용하는 모형시험에서 레이놀즈수의 상사가 어렵고, 부표의 주요 거동이 복원력에 따른 운동으로 해석되어지기 때문이다. 복원력은 체적에 비례하는 힘이므로, 조류력과 풍력의 상사는 실험부표와 모형의 체적비에 따라 결정된다.

그러므로 모형의 축척비와 실험역의 설계조건에 따라 결정되는 모형시험 환경조건은 바람과 조류에 대해서는 체적에 비례하는 외력 상사성을 만족하는 조건을 적용할 수 있으며, 파랑의 경우에는 파주파수는 상사성을 만족하는 조건을 적용하고, 파고에 대해서는 수조에서 생성 가능한 최대파고를 사용하여 시험을 실시한 후 이를 외삽하여 상사성을 만족하는 파고에서의 운동특성 및 외력을 계산할 수 있다.

본 연구는 환경조건의 상사성을 적용하기 어려운 극한 환경 조건하의 부표의 운동 및 계류삭 장력 계측을 위한 모형시험기법의 정립을 목표로 하며, 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 표준형 (등)부표의 운동 및 계류삭 장력에 관한 모형시험 결과(홍기용 등, 2001)를 활용하였다.

2. 극한환경 조건의 상사

2.1 파랑조건의 상사

파랑특성은 파고 및 파주기에 의해 정의되며, 모형 축척비를 λ 라고 할 때, 파고의 축척비는 λ , 파주기의 축척비는 $\sqrt{\lambda}$ 가 된다. 모형시험을 수행하는 시험수조에서 생성 가능한 파랑의 크기는 한정되어 있으며, 전세계적으로도 대형수조에 속하는 KRISO 해양공학수조의 파랑생성 범위는 파주기 0.5-5.0sec, 최대 파고 80cm 이다. 다만, 상기 최대파고는 파주기 2.5sec에서 생성 가능하며, 파주기 2.0sec에서 가능한 최대파고는 약 50cm 이고, 3.0sec에서는 약 60cm이다. 실험역 파랑 환경조건이 매우 황천인 경우에, 수조에서 시험 가능한 파랑 조건과 실험역 파랑조건 사이에는 매우 큰 축척비가 존재하게 된다. 파랑조건을 기준한 축척비를 부표에 적용하면, 시험용 부표의 크기가 매우 작아져서 시험에 적합치 않게 된다. 그러므로 파랑조건에 기준한 축척비를 적용하는 대신 모형시험을 고려하여 부표의 축척비를 먼저 결정하고, 파랑조건을 이에 따라 조절하는 것이 필요하다.

파랑조건에서 파주기는 파랑의 동력학적 특성을 좌우하는 요소이므로 축척비 조건을 반드시 만족해야 한다. 파고조건 또한 축척비를 만족하도록 설정하는 것이 바람직하나, 조파수조의 파랑생성 능력의 한계로 인하여 동일한 축척비를 적용하는 것이 불가능한 경우에는, 실험부표와 모형의 파랑 축척비에 비해 상대적으로 작은 파고에서 실험을 수행하고, 얻어진 결과를 확장하여 실험 부표의 운동특성과 작용 외력을 추정하는 것이 가능하다(홍도천 등, 1980). 즉, 점성의 효과를 무시할 수 있고, 수심이 일정하며, 파주기의 상사성을 만족하는 경우에, 파고조건에 대한 부표의 의존 특성을 파악하게 되면, 임의 파고에서의 실험 결과를 확장하여 원하는 파고 조건하에서의 부표의 동력학적 특성치들을 추정할 수 있다. 아래에 이에 대한 이론적 근거들이 제시된다.

부표에 작용하는 외력은 일반적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = f(\rho, \nu, D, H, L, d, g) \quad (1)$$

여기서 D 는 부표의 지름, H 는 파고, L 은 파장, d 는 수심, g 는 중력가속도, ρ 와 ν 는 해수의 밀도와 점성계수를 각각 나타낸다. 차원 해석에 의해 작용외력은 다음과 같이 무차원화 할 수 있다.

$$F/(\rho g D^3) = f(d/L, H/L, D/L, Re) \quad (2)$$

D/L 이 충분히 크거나 (예를 들어 $D/L > 0.2$), 파고가 부표의 크기에 비해 높을 때는 부표운동에 의해 파의 산란이 활발하고, 이에 따라 점성의 효과보다는 관성력이 지배적인 외력조건이 되므로 점성력의 효과는 무시될 수 있다. 특히 극한의 설계파를 파랑조건으로 하는 경우에 상기의 가정은 타당하다. 점성력을 무시하는 경우에 식 (2)는

$$F/(\rho g D^3) = f(d/L, H/L, D/L) \quad (3)$$

가 된다. 이 때, 수심과 파주기가 주어지면 파장이 결정되므로 부표에 작용하는 파력은 파고만의 함수가 된다.

$$F/(\rho g D^3) = f(H/L) \quad (4)$$

모형시험은 수심과 파주기의 상사성과 더불어 파고의 상사성을 만족해야 한다. 그러나 조파수조의 물리적 한계에 기인하여 파고의 상사성을 만족하기가 어려운 경우에는 이를 극복하기 위해 아래의 방법이 적용될 수 있다.

점성력을 무시하는 경우에 파력은 동요하는 성분과 파랑표류 성분으로 구분될 수 있다. 동요하는 성분은 1차항이 유도해(leading solution)가 되며, 파랑표류 성분은 2차항이 유도해가 된다. 부유하는 부표의 동력학적 특성은 복원력에 의해 크게 좌우되며, 관성력이 지배적인 현상이므로 동요하는 성분이 중요한 외력이 된다. 그러므로 부표의 동력학적 거동은 파고에 선형적으로 비례한다. 파랑표류력은 초기장력의 형태로 부표의 선형거동에 영향을 미치며, 2차항이 유도해이므로 분리하여 효과를 고려하는 것이 필요하다. 따라서 부표의 운동특성은 다음의 절차에 따라 구할 수 있다.

- 1) 수조의 조파 한계내에 있는 2개 이상의 파고에서 모형시험을 통하여 파랑표류력을 계측한다.
- 2) 파랑표류력의 유도해는 파고의 제곱에 비례하므로, 1)의 결과를 만족하는 최적의 2차 다항식을 최소자승법에 의해 구하고, 이로부터 파고의 상사성을 만족하는 조건에서의 파랑표류력을 계산한다.
- 3) 1)과 2)의 파랑표류력의 차이에 해당하는 수평력을 부표에 추가적인 외력으로 작용시킨 후 부표의 모형시험을 수행하고, 부표의 운동을 계측한다.
- 4) 파랑표류력의 상사성이 만족된 조건하에서 계측된 부표의 운동특성은 파고에 선형적으로 비례하므로, 3)에서 계측된 부표의 운동을 선형적으로 외삽하여, 파고의 상사성을 만족하는 조건에서의 부표의 운동을 구한다.
- 5) 부표의 계류삭에 걸리는 장력은 부표의 동요하는 성분에 의한 장력을 선형적으로 외삽하여 구하고, 이 값에 3)에서 구한 추가 파랑표류력과 조류력, 풍력을 더함으로써 구할 수 있다.

파고에 대한 부표 거동의 선형성 확인과 임의파고의 사용이 유효한지 여부는 실험적으로 확인할 수 있다. 즉, 동일한 파주기에 대해 서로 다른 3개 이상의 파고에서 모형시험을 수행하고, 결과들의 선형성을 확인하여 유효성을 검증할 수 있다.

2.2 바람조건의 상사

바람은 부표의 상부구조에 외력으로 작용하여 변위를 야기하게 되며, 복원력이 지배적인 부표의 동력학적 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 모형시험에서 바람의 상사성을 만족하기 위해서는 모형이 실험부표와 상사한 변위를 일으키도록 풍력을 조절하고, 이에 상응하는 바람의 세기를 결정하여야 한다. 부표의 상하동요, 종동요, 횡동요의 3자유도 운동은 부표의 체적에 비례하는 복원력에 의해 일어나며, 복원력이 상사되기 위한 풍력의 상사는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$F_M = F_P / \lambda^3 \quad (5)$$

여기서 침자 M 과 P 는 모형과 실험부표를 각각 나타낸다. 힘의 작용점을 상사시키고, 식 (5)에 따라 풍력을 상사시키면 상하동요, 종동요, 횡동요의 3자유도 운동에 대한 동역학적 상사는 이루어지게 되며, 나머지 전후동요, 선수동요, 좌우동요는 계류삭

의 강성(stiffness)을 조절($k_m = k_p/\lambda^2$)함으로써 상사를 만족시킬 수 있다.

풍하중은 풍속의 제곱에 비례하고, 풍향에 연직인 면에 투영되는 면적에 비례하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (6)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도이고, A 는 풍향의 연직방향에 대한 구조물의 투영면적이다. C_D 는 항력계수로서 단면의 형상이나 레이놀즈 수에 따라 달라지며, 표면의 거칠기에 따라서는 천이구간부터 난류영역에서 차이를 보인다(Schlichting, 1968).

식 (5)와 식 (6)에 의해 모형과 실부표의 풍력은 다음의 관계를 만족한다.

$$C_{DM} A_M U_M^2 = C_{DP} A_P U_P^2 / \lambda^3 \quad (7)$$

투영면적의 상사성 $A_M = A_P / \lambda^2$ 을 적용하면,

$$C_{DM} U_M^2 = C_{DP} U_P^2 / \lambda \quad (8)$$

일반적으로 C_{DM} 이 U_M 의 함수이므로 위식을 만족하는 모형 시험에서의 항력계수와 풍속은 유일하지 않으며, 무수히 많은 쌍의 해가 존재한다. 또한 레이놀즈 수의 범위와 상응하는 C_D 값의 분포에 따라서는 U_M 이 U_P 보다 크거나 비슷한 경우가 가능하다. 그러나 모형시험에서 실험역의 설계풍속과 비슷하거나 큰 풍속을 재현하여 실험하는 것은 비현실적이다.

일반적으로 모형시험에서의 풍속 U_M 은 실험실에서 재현 가능한 범위내의 적당한 풍속을 선택하며, 이 때 C_{DM} 또한 결정되므로 기하학적 상사를 만족하는 상부 구조물을 사용하는 경우 식 (8)을 만족할 수 없게 된다. 이를 극복하기 위하여 식 (7)에서 투영면적에 대한 상사성을 만족시키는 대신에, 흔히 U_M 을 먼저 선택하고, 상응하는 C_{DM} 을 계산한 후, 식 (7)을 만족하는 A_M 을 결정함으로써 풍력의 상사성을 만족시키게 된다.

동력학적 상사성이 운동학적 상사성을 보장하지는 못하므로 모형에서 연직방향 힘의 작용점이 바뀔 수 있으며, 특히 투영면적의 상사성을 포기하는 경우에, 풍력의 작용점은 실부표와는

크게 달라진다. 따라서 바람에 의한 모우먼트를 계산하여 이를 확인하여야 하며, 필요시 투영면적의 연직방향 분포를 조정하여 풍력 작용점의 상사성을 확보하여야 한다.

2.3 조류조건의 상사

조류에 의해 수선 아래 부분에 작용하는 조류력에 대한 상사성은 풍력에 대한 경우와 유사하게 다루어질 수 있다. 다만, 풍력의 경우는 투영면적의 조정을 통해 상사성을 만족시킬 수 있는 반면에, 조류력의 경우는 수선면 아래의 형상이 부표의 동력학적 거동에 중요한 요소이므로 변경될 수 없다. 그러므로 조류의 경우는 유속을 조정하거나 중량추를 사용하여 상사성을 확보하여야 한다. 본 연구의 모형시험에서는 상사성을 만족하는 조류력을 수치계산에 의해 산정하고 상응하는 크기의 중량을 조류의 작용점에 수평방향으로 작용하도록 하였다.

3. 표준형 (등)부표 모형시험

극한환경 조건에서의 부표 운동 및 계류장력에 관한 모형시험에서 상사 조건을 적용하기 위한 기법이 앞 절에서 논의되었다. 제시된 방법의 유효성을 검증하기 위해 표준형 (등)부표에 대한 수조시험을 수행하였다. 모형시험에 사용된 부표의 제원 및 특성은 Table 1과 같다. 한편 실험에 적용된 극한 해역환경 조건은 Table 2와 같다. 실험역 환경조건은 부표가 설치되는 우리나라 연안의 환경조건을 고려하였으며, 또한 일반적으로 부표 설계시 사용하는 설계 해양환경 조건을 고려하였다. 모형 상사조건은 모형의 축척비와 각 물리량의 상사성에 의해 결정되는 값이다. 단, 풍속의 경우는 앞 절에서 논의한 바와 같이 속도도에 대한 상사성보다는 풍력의 관점에서 상사성을 만족하는 조건을 적용하였으며, 조류력은 중량물에 의한 수평력으로 대체하였으므로 수조시험 조건이 생략되어 있다.

수심과 파고에서 모형 상사조건과 수조시험 조건이 상이한 것은 해양공학수조의 물리적 환경과 조파능력의 한계에 기인한다. 수심의 경우에는 실험역 수심 20m에 상사하는 계류사의 중량을 수조시험 수심조건에 균일하게 분포시키고, 계류사의 강성을 스프링을 이용하여 상사시킴으로써(Jordan and Brewerton, 1982) 서로 다른 수심 조건의 차이를 극복하였다. 수조시험 파고조건은

Table 1 Principal dimensions and characteristics of ocean buoys (model values in parenthesis)

Buoy	Draft [cm]	Buoy Weight [kg]	Mooring Weight [kg]	KG [m]	Kxx [m]	GM _T * [m]	Disp. [kg]	Scale Ratio λ
LL-26(M)	117.14 (23.43)	5,742.7 (45.94)	548 (4.384)	0.281 (0.0562)	2.354 (0.4708)	0.482 (0.0964)	6,130 (49.04)	5
LL-30	104.25 (20.85)	7,644.2 (61.15)	548 (4.384)	-0.142 (0.0284)	2.604 (0.5208)	0.954 (0.191)	7,990 (63.92)	5
LS-35	33.48 (14.70)	5,705.3 (45.64)	548 (4.348)	0.931 (0.186)	1.350 (0.2700)	0.562 (0.112)	6,101 (48.81)	5
LNBY-100	152.60 (15.26)	109,324 (109.3)	2,400 (2.400)	0.582 (0.0582)	2.085 (0.2085)	4.651 (0.465)	108,999 (108.00)	10

Table 2 Extreme environmental conditions at sea, corresponding similarity conditions and test conditions

		d [m]	T [sec]	H [m]	U_w [m/s]	U_c [knot]
sea environment	LNBY-100, $\lambda=10$	20	7.8	5.0	31.8	5.00
	Others, $\lambda=5$	20	7.8	5.0	31.8	5.00
similarity conditions	LNBY-100, $\lambda=10$	2.0	2.5	0.5	10.1	1.58
	Others, $\lambda=5$	4.0	3.5	1.0	14.2	2.24
test conditions	LNBY-100, $\lambda=10$	3.4	2.5	0.2/0.35/0.4	10.0	-
	Others, $\lambda=5$	3.4	3.5	0.2/0.35/0.4	10.0	-

Table 3 Computed wind and current forces on buoy models

Buoy	Wind		Current	
	Force [Kgf]	Center [m]	Force [Kgf]	Center [m]
LL-26(M)	5.714	0.588	5.508	0.536
LL-30	6.587	0.682	6.450	0.608
LS-35	3.796	0.395	4.131	0.159
LNBY-100	2.563	0.516	2.729	0.140

세가지이며, 이 결과를 외삽하여 실험역 극한 설계파고 5.0m에 대응하는 수조시험 파고조건에서의 부표 거동을 추정하였다. 부표 모형에서 풍력 상사성을 만족시키기 위해서는 극한 풍속에서 실험부표의 풍력을 계산하고, 이로부터 식 (5)에 의해 모형에

서의 상사 풍하중을 구한 후, 이를 모사할 수 있는 적당한 상부 구조물을 설계하여야 한다. 역승식에 의해 실험역 바람의 연직 분포를 가정하고, 식 (5)를 적용하여 구한 모형에서의 풍하중과 작용점은 Table 3과 같다. 모형 상부구조물을 설계하기 위해 먼저 바람발생장치에서 생성된 바람의 분포 특성을 파악하였다. 다음으로 실험실 재현풍 조건에서 풍하중과 작용점을 상사시키기 위한 구조물을 한 쌍의 사다리꼴 형상의 평판으로 제작하여 부표의 좌우에 대칭으로 부착하였다.

풍속과는 달리 조류는 자유수면 근처의 유동이 연직방향의 속도구배가 거의 없으므로 수치계산에서 균일한 속도를 가정할 수 있다. 수치 계산으로 얻어진 실험부표에 대한 조류력을 모형에서의 상응하는 조류력(Table 3)으로 변환하여 작용점에 작용시켜 조류력을 모사하였다.

계측장비로는 입사파 계측을 위한 파고계, 부표운동 계측을

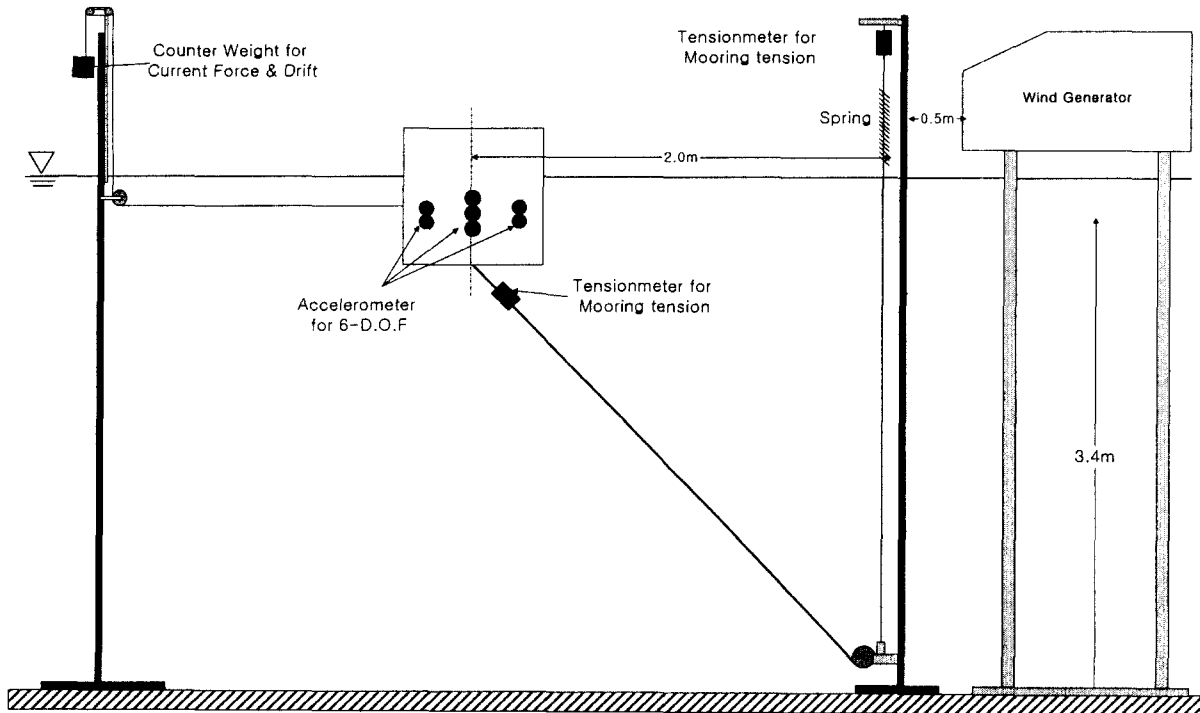


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for the buoy model test

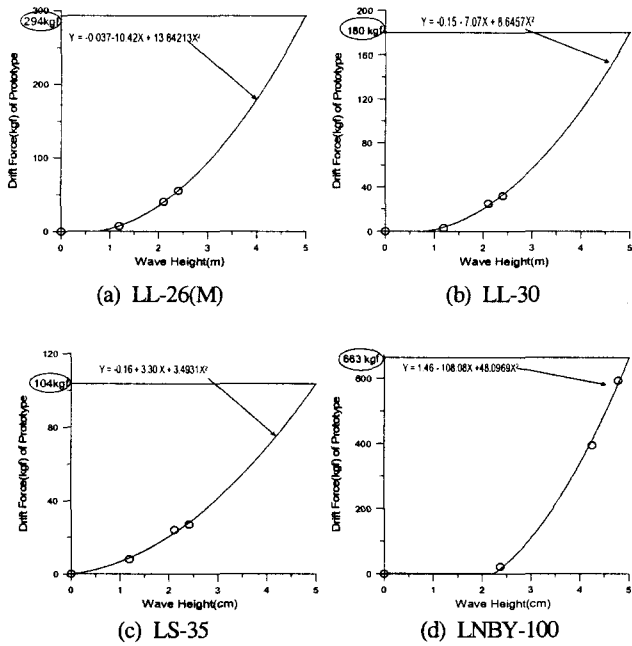


Fig. 2 Wave drift forces extrapolated to the design wave height

위한 가속도계, 계류삭의 장력을 계측을 위한 장력계가 사용되었다. 일반적인 6자유도 운동은 7개의 가속도계를 사용하여 각 점에서 계측된 가속도로부터 병진운동과 회전운동 성분을 분리하여 적분함으로써 운동변위를 얻을 수 있다(Miles, 1986; 홍사영 등, 1987). Fig. 1은 부표의 운동 및 계류삭 장력 계측을 위한 시스템 구성도이다. 시스템에 설치한 스프링은 계류삭의 강성을 고려하여 LNBY-100의 경우에는 160.0kgf/m, 나머지 경우에는 22.3kgf/m의 스프링 상수를 갖는 재질을 선택하였다. 계류삭 장력을 계측하기 위해서 부표의 하부 또는 V-자형 연결선과 일점 계류삭이 만나는 지점에 첫 번째 장력계를 설치하고, 도르래에 연결되어 공기중으로 유도된 지점에 두 번째 장력계를 설치하였다. 계측된 두 장력을 비교함으로써 계류삭의 동력학적 거동이 계류삭의 장력에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

모형시험에서는 먼저 서로다른 3개의 파고에서의 파랑표류력을 계측하였으며, 이를 2차원 곡선으로 외삽하여 설계 극한파에서의 파랑표류력을 추정하였다(Fig. 2). 극한파랑 조건하의 파랑표류력과 계측 파랑표류력의 차이에 해당하는 만큼의 수평력을 부표에 작용시키고, 극한 환경 조건하의 조류력과 풍력을 함께 적용하여 운동 및 장력 계측 시험을 수행하였다. 파랑과 바람은

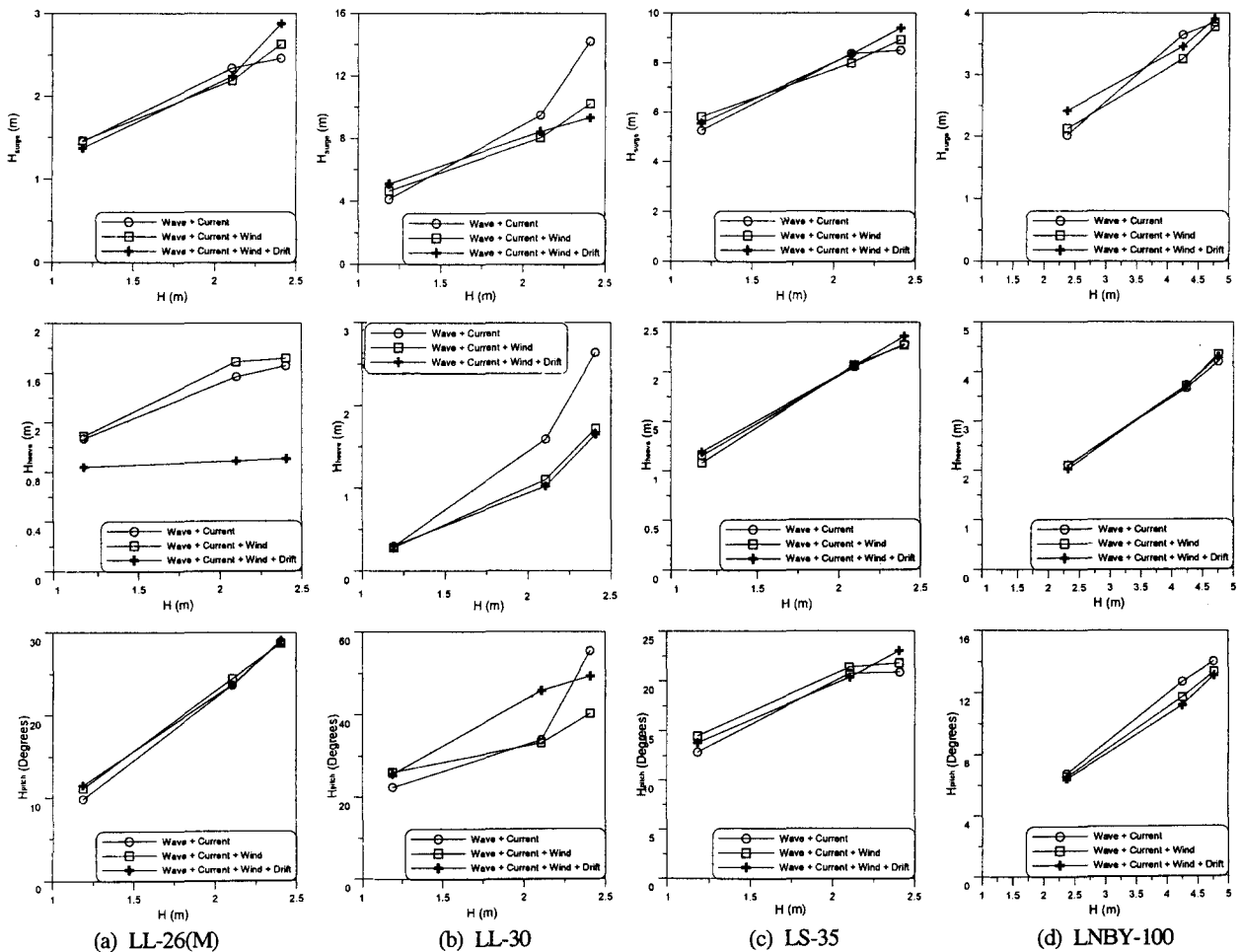


Fig. 3 Maximum height of buoy motions

조파장치와 바람발생장치를 사용하여 직접 생성하였고, 조류와 파랑표류력은 도르래를 사용하여 중량추를 부표의 작용점에 수평으로 작용시켜(Fig. 1) 고려하였다.

운동 및 장력 계측 시험은 여러 환경 요소들에 의한 영향들을 분리하여 평가할 수 있도록 서로 다른 환경 요소들이 조합된 조건하에서 수행되었다. 운동 시험은 파랑과 조류 조건, 파랑과 조류와 바람 조건, 파랑과 조류와 바람과 파랑표류력 조건에 대해 각각 수행되었다. 장력 시험에서는 상기 시험 조건들뿐 아니라 바람만에 의한 장력을 또한 계측하였다. 조류 및 파랑표류력은 앵커(anchor)지점에서의 초기장력이 되며, 부표와 계류사의 연결 지점에서의 초기장력은 조류, 파랑표류력 및 계류사 중량에 의해 발생한다. 장력 시험에서는 초기장력을 0으로 하여 변동성분만을 계측하였고, 결과 해석에서는 계측장력과 초기장력을 모두 포함하는 계류사의 실제장력을 평가하였다. 운동 계측시험에서는 초기위치 및 정적 평형상태를 기준으로 6자유도 운동의 선형성분을 계측하였다.

4. 모형시험 결과 및 해석

부표의 축대칭 특성에 기인하여 직선운동은 전후동요와 상하동요가 횡동요에 비해 크게 나타나고, 회전운동은 종동요가 횡동요나 선수동요에 비해 크게 나타나는 것이 일반적이다. 주 운동인 전후동요, 상하동요, 종동요의 최대값을 구하여 Fig.3에 도시하였다. 원형 기호는 파와 조류만 있는 경우이고, 사각 기호는 바람까지 고려한 경우, 십자 기호는 2차 표류력까지 고려하여 보정한 경우이다. 각 운동의 크기가 파고에 선형적으로 비례하고, 특히 2차 표류력을 보정한 경우가 선형성이 더욱 뛰어난 것을 볼 수 있다. 이 결과를 최소자승법을 이용하여 1차 함수로 회귀(regression)함으로서 설계 환경조건에서 파도의 1차 성분에 의한 부표 운동의 크기를 추정할 수 있다(Table 4). LL-26(M), LL-30, LS-35는 전후동요가 상하동요에 비해 크고, LNBY-100은 이들 운동의 진폭이 비슷한 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 한편 운동의 시계열 자료와 이의 스펙트럼 해석을 통해, 각각의 운동이 상당한 정도로 연성되어 있고, 계류계와의 상호작용 때문에 고주파수 성분이 나타남(Snyder and Darms, 1967)을 확인할 수 있었다. 또한 비선형성 및 반사파의 영향으로 저주파 변화(slowly varying) 성분도 관측되었다.

계류사에 걸리는 장력의 올바른 추정에는 부표 설계에서 중요한 요소인 계류계의 설계에 필수적이다. 앵커 지점과 계류사과 부표의 연결부에서 계측된 장력의 시계열이 Fig.4에 보이며, 부

표 연결부 장력 높이의 최대치를 추출하여 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5는 장력의 시간에 따른 진동 성분 중 최대 높이를 추출한

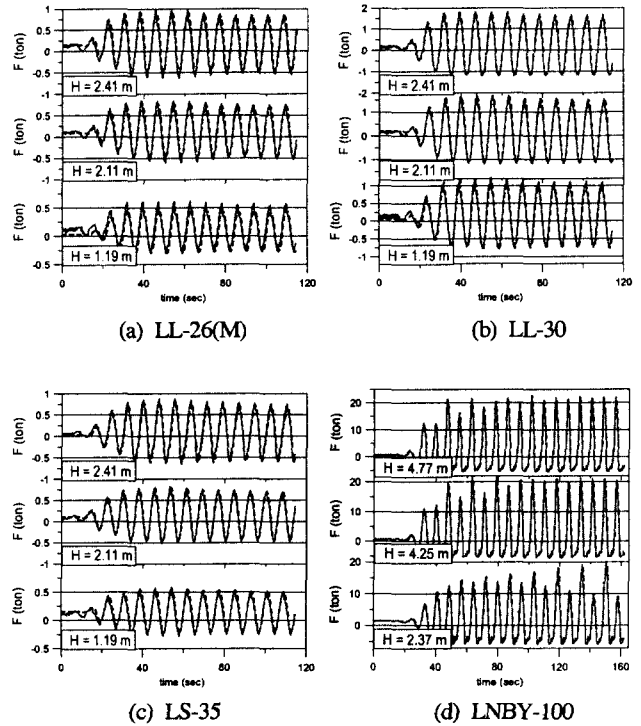


Fig. 4 Time series of tension forces acting on the mooring line at anchor(---) and at buoy(- - -)

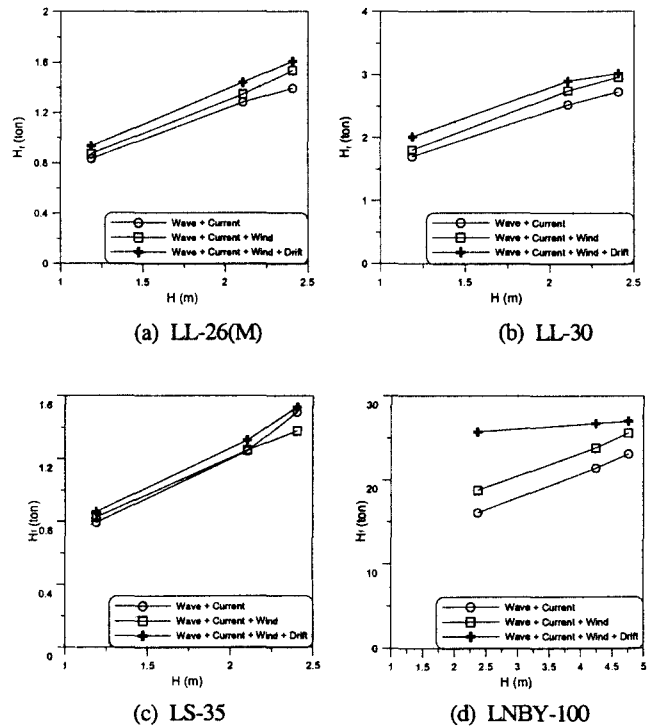


Fig. 5 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

Table 4. Estimated maximum height of 1st order motion at the design wave height

motion type	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg.)	Pitch (deg.)	Yaw (deg.)
LL-26(M)	5.788	5.213	1.056	34.341	65.216	73.228
LL-30	18.459	5.570	4.185	23.893	79.850	24.115
LS-35	17.482	0.855	4.834	11.115	42.238	9.652
LNBY-100	3.992	1.234	4.490	4.292	13.559	2.281

Table 5 Estimated maximum tension forces caused by each environmental load

force type	Environmental Load [ton]							
	1st O. Wave Motion		Current	Wind			2nd O. Drift	Weight of Chain
	at anchor	at buoy		45m/sec	60m/sec	70m/sec		
LL-26(M)	1.841	1.603	0.415	0.576	1.024	1.394	0.177	0.438
LL-30	3.221	3.149	0.660	0.466	0.828	1.128	0.147	0.315
LS-35	2.716	3.020	0.400	0.344	0.612	0.832	0.081	0.347
LNBY-100	22.513	22.793	1.505	1.802	3.204	4.360	0.366	2.002

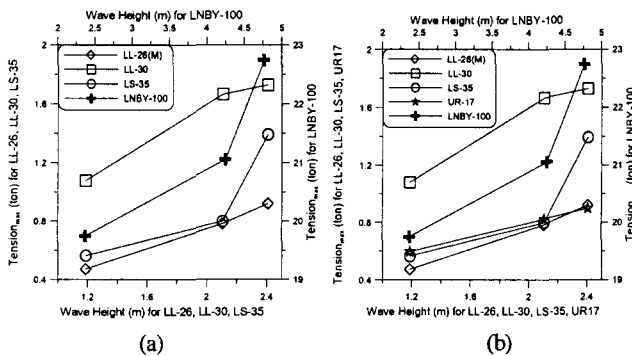


Fig. 6 Maximum mooring tensions induced by 1st order wave component (a) at anchoring point and (b) at the junction point of buoy and mooring line

것으로, 초기장력을 0으로 하였으므로 파랑의 1차 성분에 기인하는 장력만을 포함하며, 파고에 선형적으로 비례한다. 조류만을 고려한 경우, 바람까지 고려한 경우, 2차 표류력까지 고려하여 보정한 경우의 순서대로 선형파의 장력이 크게 나타난다. 이것은 초기장력이 커지면, 같은 파력에 대해서도 보다 큰 장력을 유발하게 됨을 의미한다. 계류계의 강성을 구현하기 위해 설치한 스프링의 영향과 계류삭 자체의 운동에 의해 앵커지점의 장력과 연결부 장력 사이에는 미소한 크기의 위상차가 존재하며, 최대 10% 내외의 절대값의 차이를 보여준다.

최대 장력은 최대 인장 시 발생하게 되며, 장력의 변동폭 크기가 최대일 때와 항상 일치하지는 않는다. 2차 표류력까지 보정한 경우의 1차 파력만에 의한 최대 장력을 구하여 그려보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 앵커 지점에서 1차 파력에 의한 최대 장력이고, Fig. 6(b)는 부표와 계류삭의 연결부에서의 최대장력이다. 이 결과를 최소자승법을 이용하여 1차 함수로 회귀하면 설계파고의 1차 파랑 성분에 기인하는 최대 장력이 얻어진다.

파랑표류력과 조류력이 계류계에 미치는 영향을 산정하기 위해서는 계류삭의 기울기를 알아야 한다. 즉, 수평적인 표류력과 조류력에 계류삭과 바닥면과의 경사각의 코사인 값을 곱하면 이들 성분에 의한 장력의 크기를 구할 수 있다. 이때, 계류삭과 바닥면과의 각도는 최대 장력이 작용한 시점으로 추정되는 전후동요가 후방으로 최대일 때의 각도로 봄이 타당하다. 바람의 영향은 31.82m/sec의 풍속에 의한 힘을 계속하고, 이로부터 풍속이 45m/sec, 60m/sec, 70m/sec인 경우에 계류계에 걸리는 장력을 추정하였다.

Table 5에는 지금까지 구한 장력의 최대치를 정리하였다. 여기서 조류력과 2차 표류력은 앞서 구한 표류력에 계류삭 경사각의 코사인 값을 곱한 값이다. 또한 계류삭의 수중 무게에 의한 앵커지점에서의 장력 증가를 고려하기 위해, 계류삭의 수중 무게와 계류삭의 바닥면에 대한 경사각의 사인 값을 곱한 결과를 표시하였다. Table 5의 1차 파력에 의한 앵커지점의 장력, 조류력, 풍력, 2차 표류력을 모두 더하면 앵커지점에 작용하는 최대 장력을 구할 수 있으며, 1차 파력에 의한 부표 아래 부분의 장력, 조류력, 풍력, 2차 표류력, 그리고 계류삭의 수중무게에 의한 장력을 모두 더하면 부표와 계류삭의 연결부에서의 최대 장력을 구할 수 있다.

5. 결 론

극한 환경에서의 부표의 운동 성능 및 계류삭 장력을 추정하기 위한 모형시험 기법을 정립하였다. 부표 모형 크기에 대한 제약과 모형시험수조의 재현 가능한 환경 조건의 한계에 기인하여 실험역 극한 환경조건과 모형시험 조건의 상사성을 만족하기 어려운 경우에 적용할 수 있는 시험기법으로서 상사성을 만족하는 외력 성분과, 상사성을 만족하지 못하지만 선형 외삽이 가능한 외력 성분으로 분리하여 모형시험을 수행하는 방안이 제시되었다. 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위해 다른 특성을 갖는 4종의 표준형 (등)부표의 극한 설계 환경조건에서의 수조모형시험을 실시하였다. 모형시험에서 부표의 동력학적 거동과 함께 계류삭의 장력을 조사하였으며, 모형시험 결과를 확장하여 극한 환경조건에서의 부표의 거동과 계류삭의 최대장력을 평가하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 조류력, 풍력 및 파랑표류력 성분에 대한 상사성을 만족하고, 파주기의 상사성을 만족하는 조건하에서, 1차 파랑성분에 의한 부표운동의 크기는 파고에 대해 선형성을 유지하므로 상사조건보다 작은 파고에서의 모형시험 결과를 외삽하여 부표의 동력학적 특성을 추정할 수 있다.

2) LNBY-100을 제외하고는 설계와 시험 파랑조건 차이가 커서 부표의 동력학적 거동을 추정하기 위한 외삽 시 대체로 과대평가하는 경향이 있다. 이는 파고가 커짐에 따라 발생하는 각종 비선형적 현상과 점성의 영향을 선형 외삽이 효과적으로 고려하지 못하기 때문이다. 선형 외삽의 오차는 설계조건과 시험조건 차이의 크기에 따라 달라지므로, 선형 외삽이 유효하기 위해서는 두 조건의 차이가 일정 한계 이내에 존재해야 한다.

3) 부표의 동력학적 거동에서 풍력과 조류력의 영향은 복원력의 관점에서 상사가 이루어져야 한다. 풍력은 모형시험 바람조건을 먼저 선정하고, 투영면적의 크기와 분포를 조절하여 상사시키는 것이 바람직하며, 조류력은 형상의 변경이 불가능하므로 조류속도를 조절하거나 증량추를 사용하여 상사시킨다.

본 모형시험은 단일 환경조건에 대해 수행되었다. 그러나 부표의 동력학적 특성은 다양한 환경인자의 영향을 받으며, 환경 조건의 크기가 최대일 때 항상 안정성이 최소가 되지는 않는다. 무엇보다도 파랑의 주파수 변화에 따라 부표의 동력학적 특성은 민감하게 변화하며, 환경 인자들 간의 상호작용에 의해서도 불안정성이 증가할 수 있다. 그러므로 이에 대한 깊이 있는 연구가 앞으로의 과제로 남는다.

후 기

본 연구는 해양수산부와 한국해양대학교의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

한국해양연구소(1999). "해양공학수조 시험 안내서", 한국해양연

구소 선박해양공학분소 보고서.

홍기용 외(2001). "표준형 (등)부표 안정성능 모형시험", 한국해양연구원 보고서, BSI00-928-2301.

홍도천, 이상무, 홍사영(1980). "불규칙파중 운동시험법 개발", 한국기계연구소 보고서, UCE280-887 · D.

홍사영 외(1987). "컨테이너선의 불규칙파중 운동응답에 대한 실험적 고찰", 대한조선학회지, 제24권 제2호.

Jordan, P. A. and Brewerton, R. W.(1982). "Offshore Catenary Moorings", Proc. of Offshore Moorings Conf., Thomas Telford Ltd., London.

Miles, M. D.(1986). "Measurement of Six Degree of Freedom Model Motions Using Strapdown Accelerometers", Proc. of the 21st ATTC, pp 369~375.

Schlichting, H.(1968). "Boundary Layer Theory", 6th ed., McGraw-Hill, Inc.

Snyder, R. M. and Darms, D.(1967). "Nonlinear Response of Buoy Shapes", Transactions of 2nd Int. Buoy Technology Symposium/Exposition.

2001년 6월 19일 원고 접수

2001년 7월 20일 수정본 채택