

해수교환 방파제에 작용하는 파력특성 Characteristics of wave force acting on the seawater exchange breakwater

오영민¹·이달수¹
Oh Youngmin¹, Lee Dalsoo¹

1. 서론

방파제는 태풍과 같은 자연재해에 대해 항 내의 시설물을 보호하고 평상시에는 항 내에서 선박의 정박 및 화물의 하역을 원활히 할 수 있도록 개발된 구조물이다. 그러나, 방파제는 항 내의 해수순환을 방해하는 부작용도 있어서 자정능력 이상의 오염원이 유입되었을 때에는 항만의 수질악화가 가속화된다. 현재 이러한 현상은 여러 항만에서 발생하고 있는데 이를 해결하기 위한 한 방안으로서 해수교환 방파제가 제안되었다. 일본에서는 오래 전부터 연구를 시작하여 현장에 설치 운영하는데 예가 다수 있으나 국내에서는 전무한 실정이었는데 최근에 Lee 등(1994)이 방파제 케이슨의 전면 에 원호형의 수로를 만들고 여기에 파이프를 연결하여 항 내로 외해수를 유입시키는 형태의 해수교환 방파제를 개발하였다. 그러나, 이 형태는 시공상의 어려움 때문에 개선의 필요성이 있어서 성능은 그대로 유지하면서 시공성이 우수한 L 자형 수로(해양수산부, 1999)를 내장하는 형태로 발전시키는 등 실용화 연구가 활발히 진행되고 있다.

해안 구조물에 작용하는 파력은 구조물의 안정에 매우 중요한 요소이기 때문에 구조물을 설계할 때에는 작용파력을 정확히 예측하여야 한다. 모형실험에서 작용파력은 파압관측을 통해 개략적으로 계산할 수도 있으나 이 방법은 관측점 간의 파압분포를 직선으로 가정하며 파압계는 센서 단면에 작용하는 평균파압을 측정하므로 파압분포 추

정결과는 관측점의 위치, 개수 및 센서 단면적의 크기에 따라 변한다(과학기술처, 1996). 특히, 파력감소를 목적으로 하는 유공 케이슨이나 원통형 케이슨 및 항내 해수교환을 목적으로 하는 원호수로 케이슨(한국해양연구소, 1993)과 같이 파압 작용면의 형상이 복잡할수록 파압분포 추정의 신뢰도는 극히 낮다. 그러나 하중 측정기는 작용파력을 직접 측정하므로 작용파력 평가에 파압계를 이용한 경우보다 신뢰도가 높다. 따라서, 파압 측정 결과는 개별 부재의 설계를 위한 자료로 이용하고 구조물 전체에 작용하는 하중은 하중 측정기를 이용해 직접 측정(谷本 등, 1981; 高橋·下迫, 1990; 오·이, 1998) 하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 항 내의 수질개선을 목적으로 항 외의 해수가 방파제를 통하여 항 내로 유입될 수 있도록 방파제 케이슨에 구멍을 설치한 해수교환 방파제 케이슨(이하 해수교환 케이슨이라 한다)의 안정성을 검토하기 위하여 하중 측정기를 사용하여 작용 파력을 측정한다. 해수교환 케이슨의 파력에 대한 특징을 알아보기 위하여 같은 파랑조건 하에서 일반적으로 흔히 사용되고 있는 전면이 막혀 있는 무공 케이슨 방파제에 작용하는 파력을 측정하여 상호 비교한다. 이를 통하여 전면이 구멍이 있는 해수교환 케이슨이 일반 무공 케이슨에 비하여 얼마나 안정한지 또는 파력감소 효과는 어느 정도인지를 파악할 수 있다.

2. 실험 제원

¹한국해양연구소 연안·항만공학연구본부(Coastal & Harbor Engineering Lab., Ansan, Seoul 425-600, Korea)

실험수로의 제원은 길이 53 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m의 長水路이며 실험수심은 40 cm, 모형 방파제의 마운드의 높이는 16 cm로 마운드에서 수면까지의 높이는 22 cm이다. 또한, 케이슨은 조파판으로부터 38 m 떨어진 거리에 위치하였다. 본 연구에서 제안한 L자형 해수교환 케이슨의 형상은 Fig. 1과 같고, 무공 케이슨의 경우는 전면을 막음으로써 물이 케이슨 내부로 들어가지 못하도록 하였다. 본 실험에 사용된 3분력 검출기의 최대 출력전압은 $\pm 10V$ 이며 이 값은 X, Z 방향의 파력 ± 100 kg과 Y 방향의 모멘트 ± 40 kg-m에 대응된다. 3분력 검출기에 작용하는 파력 및 모멘트 방향은 Fig. 2와 같다. 이 그림에서 보인 바와 같이 이 장비는 2개의 원통이 결합되어 있는 구조인데 큰 원통에는 힘을 감지하는 센서가 내장되어 있고 작은 원통은 힘을 받는 부분으로서 원통의 평면부에 직각 방향으로 작용하는 힘이 F_z , 수평 방향으로 작용하는 힘이 F_x 이며 큰 원통의 중앙부에 있는 모멘트 중심점을 기준으로 이 두 힘에 의한 모멘트의 합이 M_y 이다.

3분력 검출기의 설치형상은 Fig. 3과 같으며 파력측정을 위해서 케이슨은 마운드에서 2-3 mm 정도를 이격시켰다. 실험에 사용된 케이슨의 크기는 수조의 폭 방향으로 40 cm, 길이 방향으로 44 cm, 그리고 높이가 38 cm이다. 3분력 검출기는 방수가 되지 않으므로 물과 접촉하지 않도록 구조물로부터 멀리 떼어 설치하였다. 또한, 외력에 의하여 고정 부위가 움직여서는 안되므로 수로의 양측벽에 고정된 견고한 지지대 하부에 부착하였으며, 모형은 튼튼한 연결봉을 통하여 검출기에 고정되었다. 3분력 검출기는 모멘트 중심점이 정지 수면과의 연직거리가 83 cm, 케이슨 전면과의 수평거리는 22 cm 되게 설치하였다.

3. 파력측정 결과 및 해석

해수교환 방파제 케이슨과 무공 케이슨에 작용하는 파력특성을 살펴보기 위하여 케이슨 설치위치에서의 파랑은 주기 $T=2.6$ sec 파고 $H=16$ cm를 갖는 규칙파(波形傾斜, $H/L=0.036$)를 60초간 작용시켰다. 본 실험에서 사용한 파랑조건은 현장의 설계파 조건에 해당하는데 본 실험이 1/50 축척의 모형이라고 가정하였을 경우 현장에서의 수심 20 m에 주기는 18.4 sec, 파고는 8 m에 해당한다.

3.1 파력측정 결과

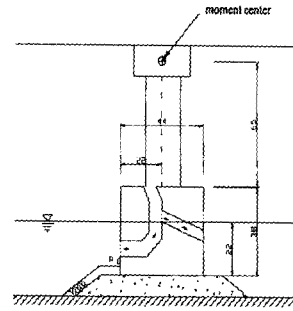


Fig. 1 Configuration of load measurement system (unit : cm).

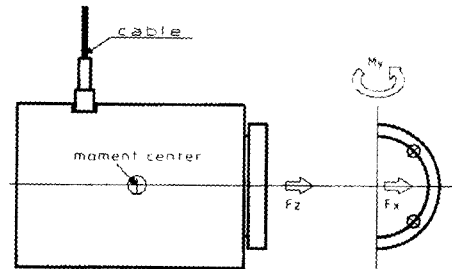


Fig. 2 Three-component load cell.

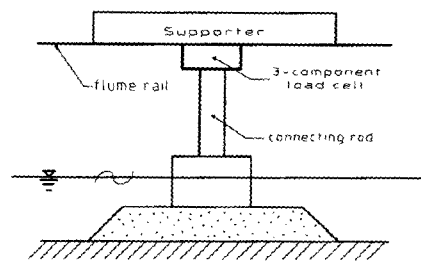


Fig. 3 Installation of three-component load cell.

계측 모멘트는 단지 3분력 검출기의 모멘트 중심점을 기준으로 한 값이며 케이슨의 안정에 중요한 실제 전도 모멘트는 아니나 수평파력의 작용점을 계산하기 위하여 필요하며 이를 알면 전도 모멘트를 계산할 수 있다. 수평파력의 작용점은 다음 식

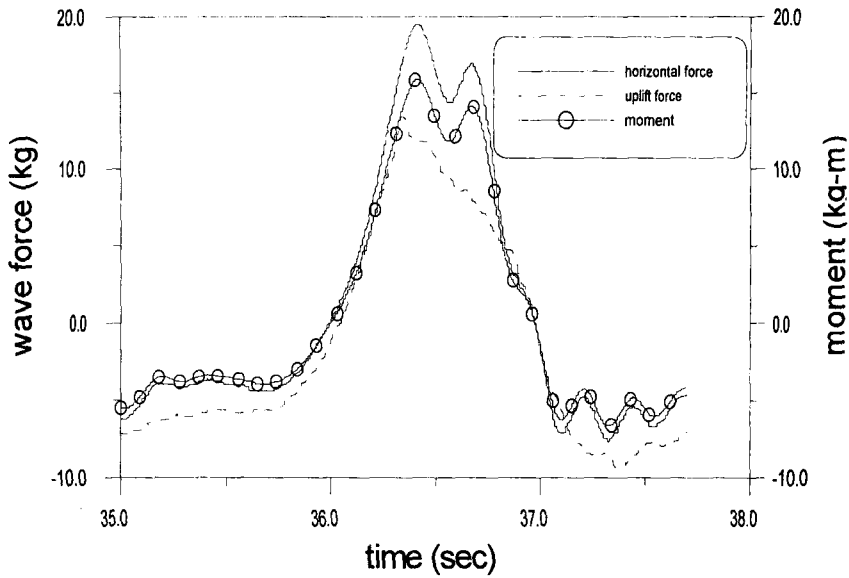


Fig. 4 Wave forces and moment acting on the solid wall caisson.

으로부터 구할 수 있다.

$$M_y = F_x \times l_y - F_z \times l_x \quad (1)$$

여기서, l_y 는 케이슨 전면에 작용하는 수평파력의 작용점에서부터 3분력 검출기의 모멘트 중심점

까지의 연직거리이며 l_x 는 揚波力の 작용점에서부터 3분력 검출기의 모멘트 중심점까지의 수평 거리이다. 한편, 양압력은 케이슨 바닥의 前面部에서 최대이며 後面部에서는 영이 되는 삼각형 분포를 갖는다고 가정하면 (Goda, 1985) l_x 는 기지의 값이 되는데, Fig. 1에서 케이슨의 길이가 44 cm 이고 모멘트 중심점의 위치가 케이슨 전면에서부

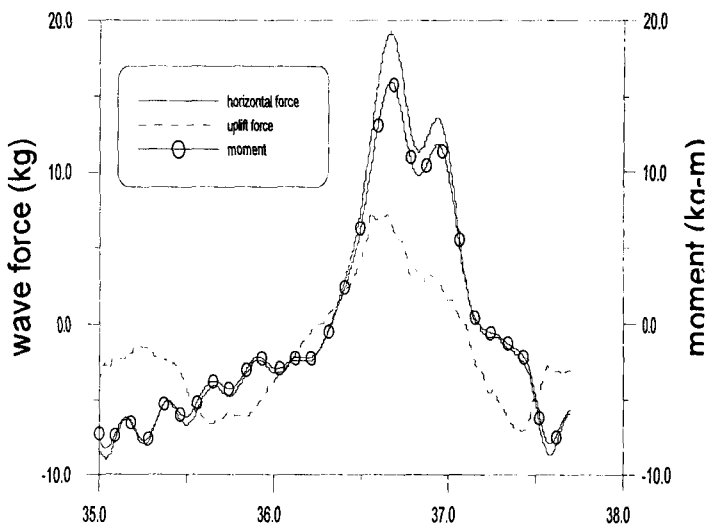


Fig. 5 Wave forces and moment acting on the caisson with L-shaped channel.

터 22 cm이므로 $l_x=22-44/3=7.33$ cm이다.

3분력 검출기에 나타난 무공 케이슨에 미치는 파력 및 모멘트의 시계열을 정밀분석하기 위하여 파력 시계열중에서 규칙성을 보이는 한 주기를 선정하여 표시하면 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 케이슨 전면에 작용하는 최대수평파력은 바닥면에 작용하는 최대 揚波力보다 1.6 배정도 크며, 작용시점은 底面에 최대파력이 작용한 후에 약간의 시차를 두고 전면에 최대파력이 작용함을 알 수 있다. 파력과 모멘트의 최대가 되는 시점이 서로 일치하므로 그 시점에서의 파력과 모멘트를 위 식에 대입하면 $M_y=15.90$ kg-m, $F_x=19.48$ kg, $F_z=11.82$ kg이므로 l_y 는 86.1 cm가 된다. 계산 결과 우변의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 월등히 크므로 모멘트는 수평파력과 거의 같은 시간분포 형상을 보이는 것은 당연하다고 할 수 있다.

동일한 파랑조건 하에서 해수교환 케이슨에 미치는 파력 및 모멘트의 시계열은 Fig. 5와 같다. 이 케이슨도 무공의 경우와 마찬가지로 최대 파력과 최대 모멘트가 작용하는 시점이 거의 일치하므로 그 시점에서의 파력과 모멘트를 식 (1)에 대입하면 $M_y=15.92$ kg-m, $F_x=19.34$ kg, $F_z=7.13$ kg이므로 l_y 는 85.0 cm가 된다. 무공 케이슨의 경우와 비교해 보면 최대수평파력은 연직파력에 비하여 2배 이상으로 큰데, 이는 연직파력의 감소에 기인한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 4와 5를 비교해 보면 최대 수평파력은 무공 케이슨과 해수교환 케이슨에서 거의 동일한 값을 가진다. 그러나, 최대 양파력은 해수교환 케이슨에서 훨씬 작게 작용함을 알 수 있다. 이는 해수교환 케이슨 내의 진동수호가 파력의 연직 하방력을 유발시킴으로써 케이슨의 유효 수중중량을 증가시켜 주는 역할도 하고 있음을 의미한다. 따라서, 진동수호를 내장한 구조형식에서는 케이슨의 폭이 직립 무공 케이슨의 경우보다는 크지만 이 폭의 증가로 유발되는 케이슨 부피의 증가는 내부의 진동수로 및 유수실의 설치로 인한 빈 공간의 부피보다는 작아진다고 할 수 있다.

3.2 케이슨의 안정성 검토 비교

혼성체의 안정성을 검토할 경우 케이슨의 滑動(sliding) 및 顛倒(overturning)에 대한 안전성이 가장 중요한 요소이다. 직립 무공 케이슨의 경우 케이슨이 활동에 관해 안정하면 일반적으로 전도에 대해서도 안정하므로 케이슨의 중량은 주로 활동에 대한 안정을 확보하기 위하여 결정된다. 물

론 해수교환 케이슨과 같이 케이슨의 형상이 복잡하거나 무게중심의 위치가 후반부에 위치하는 케이슨의 경우에는 케이슨의 중량이 활동보다는 전도의 안정성을 충족시키기 위해 결정될 수도 있다.

케이슨의 滑動과 顛倒에 대한 안정도를 점검하는 수단으로써 安全係數 (Safety Factor)는 다음과 같다(Goda, 1985).

$$\text{Sliding : S.F.} = \frac{\mu(W - F_z)}{F_x} \quad (2)$$

$$\text{Overturning : S.F.} = \frac{Wl - M_u}{M_h} \quad (3)$$

여기서, μ = 케이슨과 마운드 사이의 摩擦係數 (= 보통 0.6), W = 케이슨의 수중무게, l = 케이슨의 무게중심과 後面 모서리(Heel) 사이의 수평거리, M_u = 揚壓力에 의한 모멘트, M_h = 수평파압에 의한 모멘트

여기서는 위의 실험모형에 대해 3분력 하중측정 결과로부터 무공 케이슨의 활동에 대한 안전계수가 1.2가 되는 중량을 계산하여 전도에 대한 안전계수를 계산하였으며, 동일 중량에 대해 해수교환 방파제 케이슨의 파력관측 결과로부터 활동 및 전도에 대한 안전계수를 계산하였다. 무공 케이슨의 활동에 대한 안전계수가 1.2가 되는 케이슨의 수중중량 $W=50.78$ kg이므로 케이슨의 저면에 작용하는 파압을 삼각형 분포로 가정하였을 때의 전도에 대한 안전계수는 위 식에 의해 2.3이 된다. 따라서, 케이슨의 안정성은 전적으로 활동에 달려있다고 할 수 있다.

케이슨의 수중중량 $W=50.78$ kg을 사용하여 해수교환 케이슨의 활동에 대한 안전계수를 구해 보면 1.4가 된다. 따라서, 이 케이슨이 무공 케이슨에 비하여 활동에 대해 더 안정함을 알 수 있다. 한편, 전도에 대한 활동계수를 구하기 위해서는 식 (3)에서 보다시피 케이슨의 무게중심을 알아야 하는데 이를 알기 위해서는 케이슨 격벽과 상부의 두께 및 속채움 내용 등이 상세히 결정되어야 한다. 그러나 이는 본 모형실험의 범위를 벗어나므로 생략하였다.

4. 결론

동일한 파랑조건 하에서 해수교환 방파제 케이슨과 무공 케이슨에 작용하는 파력의 차이를 측정하기 위하여 수평파력과 양파력 및 모멘트를 측정할 수 있는 3분력 검출기를 이용하였다. 이러한 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 최대 수평파력은 무공 케이슨과 해수교환 케이슨 사이에 거의 차이가 없으나 최대 양파력은 해수교환 케이슨이 훨씬 작아서 케이슨의 활동에 관한 한 케이슨의 중량을 가볍게 할 수 있어서 경제성을 의미한다.

2) 최대 수평파력은 최대 양파력에 대하여 무공 케이슨은 2 배가되지 않으나 해수교환 케이슨은 2.7배에 해당한다.

3) 활동에 대한 안전계수는 같은 무게의 케이슨에 대하여 무공 케이슨이 1.2, 해수교환 케이슨이 1.4로 해수교환 케이슨이 더 안전하였다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 연구과제 "해수교환 방파제의 실용화연구 용역" 결과의 일부이다.

참고문헌

- 과학기술처. (1996). 연안재해 방지개발 기술 (II). (연구기관: 한국해양연구소), BSPN 00323-939-2.
- 오영민, 이달수. (1998). "混成防波堤 케이슨에 작용하는 파력특성 실험", 대한토목학회논문집, 제18권 제II-4호, pp.359-364.
- 한국해양연구소. (1993). 혼성방파제의 케이슨에 작용하는 파압분포특성(II), BSPE 00335-549-2.
- 해양수산부. (1999). 해수교환방파제의 실용화 연구(I), (연구기관: 한국해양연구소).
- 高橋重雄, 下迫健一郎. (1990). 長大ケーソンの波力平滑効果と耐波安定性, 港灣技研資料 No.685.
- 谷本勝利, 原中祐人, 富田英治. (1981). マルチセルラーケーソンの水理特性に関する實驗的研究, 港灣技術研究所報告, 제20권 제2호.
- Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. Univ. of Tokyo Press.
- Lee, D.S., Park, W.S. and Kobayashi, N. (1994). "Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange", *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, Kobe, pp.1373-1387.