

棧橋床板에 作用하는 揚壓力 分布特性에 관한 實驗的 研究

The Experimental Study of Distribution Characteristics of Lift-force Acting under Pier Deck

박상길* · 박현수** · 안익성*** · 김우생****

Park, Sang Kil · Park, Hyun Soo · Ahn, Ik Seong · Kim, Woo Saeng

Abstract

This study describes the characteristics of distribution of lift-force acting under pier deck through physical experiment. The shape of peak wave pressure was sharp when compressed air existed but was not sharp without that. Values of lift-force was different between edge point and center point in the same block. Distribution of lift-force was expressed differently owing to dimensionless of deck length (L/L), wave steepness (H/L), clearance height per wave height (D/H). The dimensionless factor of D/H affected on the lift-force the clearance between still water surface and decks. This decided the maximum of lift-force. In the case of the same values of D/H , the lift-force are changed by the wave steepness (H/L). Because (D/H) become smaller as the wave steepness (H/L) is increased the height of decks must be decided with the condition which don't have the clearance with D_{max} for the stable design of deck of pier. Effect of reducing lift force was greater in the on-shore than the off-shore according to compressed air existence. This researches points out that design of deck should retain compressed air in order to reduce wave lift force.

Keywords : shape of wave pressure, distribution character of wave lift-force, clearance height per wave height(D/H), exit of compressed air, effect of air cushion

요 지

본 연구는 잔교를 설계할 때 수리모형실험을 통하여 잔교상판에 작용하는 양압력 분포 특성에 대해 기술하였다. 양압력이 상판하부에 작용할 때 압축공기 유출의 유무에 따라 양압력이 작용하는 형상이 다르고 양압력의 크기가 다르게 분포하고 있음을 알았다. 동일 Block 상판내의 양압력분포는 상판의 중심점과 가장자리에서 동일한 분포를 하지 않는 결과를 얻었다. 양압력 분포특성은 잔교길이인 무차원(L/L), 파형경사(H/L), 공간(D/H)에 의해 영향을 받는다. 양압력에 영향을 미치는 무차원 요소(H/L)은 양압력의 최대치를 결정하는 D/H 의 값이 존재하고 있다는 것을 알았다. 동일한 D/H 인 경우도 양압력은 파형경사에 따라서 변화하고 있다. 즉, H/L 이 클수록 (D/H)이 작기 때문에 잔교를 설계할 때 D_{max} 가 되는 Clearance가 생기지 않는 상판높이를 정하는 것이 안전한 설계가 된다. 압축공기가 양압력에 미치는 영향을 검토한 결과 양압력이 크게 작용하는 On-shore에서는 Off-shore보다 압축공기에 의한 양압력의 저감효과가 크게 발생하고 있다. 상판에 작용하는 양압력을 저감시키기 위해서는 압축공기 유출을 방지하는 상판설계가 필요하다.

핵심용어 : 파압분포 형상, 양압력분포특성, 작용 공간, 압축공기의 유출공 유무, 완충효과

1. 서 론

잔교는 과거부터 항만의 물양장 및 안벽 시설물로서 중요한 역할을 해 왔다. 최근에는 대형항만의 보조기능과 도시주변의 협소 만내의 위락시설물 공간기능으로 자리를 잡고 있다. 특히 전망이 좋은 친수 공간 확보를 위해 잔교를 설치하고 있다. 위락시설의 잔교는 잔교상판의 공간을 활용하므로 상판에 공기 유출공을 만들면 반사율은 어느 정도 감소되지만 이용측면과 안전측면에서 불리하므로 양압력을 감소

시킬 수 있는 잔교상판을 설계하여야 한다.

과거에 잔교는 정온도가 양호한 항내에만 설치하였기 때문에 잔교상판에 작용하는 양압력 개념을 고려하여 설계해야 한다는 필요성을 느끼지 못하여 양압력을 무시한 상태로 설계가 되어 왔다. 즉, 양압력을 외력으로 취급하지 않았다는 것이다. 그러나 현재는 잔교식 안벽을 설계할 경우 잔교 상부공 및 연결판의 양압력을 검토하여 설계(해양수산부, 2005)하는 것이 바람직하다고 명기되어 있기 때문에 양압력이 구조물에 작용하는 특성을 분명히 하기 위해서는 양압력

*정회원 · 교신저자 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 교수 (E-mail : sakpark@pusan.ac.kr)

**정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 대학원 박사과정 (E-mail : phs@bmc.busan.kr)

***정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 대학원 박사과정 (E-mail : ahnikseong@hanmail.net)

****정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 대학원 박사과정 (E-mail : wooseang@msn.com)

표 1. 기존연구의 조건

연구자	l/L	D/H	H/L	공기 차단장치	공기유출공
伊藤喜行 (1967) 등	0.09-0.316	0-1	0.0045-0.050	유	유 무
永井莊七郎 (1966) 등	0.12-0.38	0.4-0.75	0.017-0.055	유	유 무
室田明 (1966) 등	0.04-0.085	0.41-2.16	0.013-0.068	무	유
堀川清司 (1967) 등	0.11-0.98	0.07-1.20	0.014-0.038	무	유
谷本勝利 (1978) 등	0.062-0.256	-0.4-0.8	0.012-0.123	무	무

이 발생하는 기구에 관한 특성을 분명히 해야 한다. 양압력(파압강도)을 이용하여 잔교를 설계할 경우 상판의 배근 설계와 상판을 지지하는 말뚝의 인발력에 대한 설계로 대별할 수 있다. 상판배근과 인발력에 대한 하중을 동일하게 생각하여 설계할 경우에 대한 문제점을 파악하기 위해 실제 상판에 작용하는 양압력의 분포특성을 수리모형실험을 통하여 검토하기로 한다.

따라서 본 연구의 목적은 수리모형실험을 통하여 잔교상판에 작용하는 양압력의 분포특성을 밝혀 동일하중으로 상판배근과 말뚝 인발력을 설계할 경우의 조건을 제시하며 동시에 이 조건을 만족시키는 잔교상판 구조물의 형태를 제안하여 공기유출공을 설치하지 않고 양압력의 감소를 가져올 수 있는 상판의 구조형식을 고안하는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 기존연구와 차원해석

2.1 기존 해석조건

파력에 대한 연구는 Bagnold(1939)에 의해 시작되었고 부체에 대한 파력을 Morison(1950)이 정량화 시켰다. 일본에서는 잔교상부공인 상판에 작용하는 양압력에 대한 연구(永井莊七郎 등, 1966; 室田明 등, 1966; 伊藤喜行 등, 1967; 堀川清司 등, 1967; 合田良實, 1967; 谷本勝利 등, 1978)가 진행되었다.

1964년과 1965년에 일본의 남부지방을 내습한 태풍에 의해 강관말뚝의 잔교가 파괴되는 사고가 발생했다. 이때에 사용했던 식은 伊藤喜行(1967) 등이 제안한 $4W_0H$ 을 사용하였다. 그러나 이 연구는 실험범위가 한정되어 있어 특수한 조건에서의 양압력 산정에는 문제점이 있다는 지적이 있었다. 이들 연구는 규칙파로 한정되어 있어 불규칙한 파랑에서 양압력의 산정이 될 수 없다는 의문을 제시하고 있다.

永井莊七郎(1966) 등은 잔교에 작용하는 양압력은 잔교 상판하부에 간혀 있는 공기의 거동에 의해서 큰 영향을 받는다고 생각하여 공기유출공을 설치할 경우와 설치하지 않은 경우에 대해 1/20과 1/10의 축척으로 실험을 실시하였다. 어느 경우나 잔교의 후면부(끝부분)에서 큰 파압이 작용하고 있고 잔교전면부로 갈수록 파압이 작아지고 있다. 그리고 공기유출공이 있는 경우가 없는 경우보다 파압이 크게 작용하고 있다. 또한 축척효과(scale effect)에 대해서는 1/10축척모형이 1/20축척모형보다 파압이 작고 공간효과(clearance effect : 잔교상판에서 정수면까지 거리)는 공간높이가 작을수록 양압력이 크게 작용하며 최대치를 갖는 공간이 존재하고 있음을 지적하고 있다. 현재까지의 연구는 잔교의 길이와 파장의 비 즉, l/L 이 비교적 짧은 경우이고 堀川清司(1967)

등은 $l/L=0.98$ 로 실험을 실시하였다. 合田良實(1967)는 잔교에 작용하는 양압력에 대해서 비행정(飛行艇)의 착수문제를 적용하여 운동량의 급변으로 발생하는 부가 질량력으로 생각하여 산정식을 유도하였다. 그러나 잔교의 길이가 매우 짧은 室田明(1966) 등의 결과와 잘 일치하고 있지만 긴 경우에 대해서는 양압력을 산정하는 것은 문제가 있다.

谷本勝利(1978) 등은 양압력이 작용할 때 상판과 파면과의 사이에 간혀 있는 공기의 양이 많으면 많을수록 양압력은 작게 작용한다는 것을 분명히 하고 있다. 공기의 영향에 대해 두 가지의 문제점이 제시될 수 있다. 첫째는 공기의 상사 측이고 둘째는 2차원 실험에서 공기가 유출할 수 없는 상태에서 실험을 실시했다는 것이다. 공기가 유출될 수 없는 상태에서 파고가 상판에 작용할 때는 공기의 압축성보다 단파로서 작용하기 때문에 양압력이 작게 작용하지만 공기의 압축성에 대해 재현시키기에는 장애요소가 크다.

Johnson(1968)은 평판의 낙하문제에서 공기의 압축성을 고려해서 낙하에 따른 공기의 운동을 조사하였다. 이 조사에서 평판의 낙하속도에 따라 공기의 압축성의 비가 비선형적인 관계가 있다고 지적하여 잔교의 양압력에 대해서는 파면의 상승속도가 현지에서 발생하는 조건과 실험에서 발생하는 조건이 다르기 때문에 파로 둘러싸인 공기의 운동도 당연히 다르다고 지적하고 있다. 이유는 2차원 실험에서는 측면으로부터 공기의 유출이 불가능하지만 실제 현장에서는 잔교상판으로 파가 들어오면 측면을 통하여 공기가 유출된다는 것이다. 따라서 2차원 수리모형실험에서는 공기가 빠져나갈 수 있는 장소가 없기 때문에 공기가 압축되어 파면에 작용하여 파면의 순간상승속도를 저감시켜 양압력의 크기를 저감시킨다는 것이다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 2차원 실험시 측면으로 공기의 유출이 충분히 발생할 수 있도록 측면의 개방이 요구되며 동시에 상판에 공기유출공을 만들어 정확한 양압력산정을 위한 방법들이 제시되고 있다. 표 1은 연구자별로 공기유출공의 유무에 대한 양압력의 효과를 정리한 것이다.

2.2 2차원 수조에서의 양압력의 평가

현장에서는 파의 진행방향에 대해 법선방향으로 공기가 유출되지만 2차원 실험에서는 측면을 통하여 공기의 유출이 어려워 압축공기에 의해 파면이 상판에 작용할 때 실제 현장에서 잔교의 상판에 작용하는 양압력보다 실험실에서 측정된 양압력이 과소평가되어 설계상 위험한 상태가 된다.

공기를 유출시키는 방법 중 측면을 통한 방법은 잔교의 끝부분과 육지가 만나는 곳에 공간을 설치하여 공기의 유출을 도울 수 있고 잔교가 긴 경우는 동일한 길이에 대해서

2개의 상판을 제작하여 연결부분에 틈을 두어 공기의 유출을 도울 수도 있다. 이러한 연결부분은 항만의 설계에서는 지진 시의 수평하중과 선박 접안시의 접안 에너지에 의한 수평외력에 대한 허용범위로 설계하고 있다. 이에 대한 정량적인 결정은 지진의 강도와 접안선박 등의 규모에 따라서 결정된다(해양수산부, 2005).

또한 상판에 공기유출공을 만들어 유출을 도울 수 있다. 즉, 실험실에서의 양압력 측정 실험을 실시할 때 공기의 충분한 유출이 가능한 실험장치가 필요하다. 이는 공기의 유출을 방지하는 잔교상판을 설계하면 양압력의 저감효과를 가져와 양압력에 대한 안전한 설계가 될 수 있음을 설명한다.

永井莊七郎(1966) 등은 공기유출공으로서 틈을 설치하면 양압력에 미치는 영향이 크기 때문에 틈의 설치위치는 파와 잔교의 특성을 충분히 검토하여 설치해야 한다고 지적하고 있다. 따라서 압축공기에 의한 양압력의 변화를 검토하기 위하여 실시한 실험은 2차원적인 공기 유출공이 설치되지 않은 실험과 2차원적인 공기 유출공이 설치된 실험으로 분류하였다.

이들 연구에 의하면 공기 유출공이 양압력에 미치는 영향이 있다고 지적하였고 본 연구에서도 이를 확인하기 위해 수리모형실험을 실시한 결과 거의 동일한 경향의 결과를 얻었다.

그림 1은 永井莊七郎(1966) 등이 제시한 결과에 본 실험의 제 7Block의 결과를 동일한 기준에서 도시한 것으로 그림의 종축은 양압력의 파압(kPa)으로 취하고 횡축은 잔교상판의 길이(m)를 취하여 축척과 공기유출공의 유무에 따른 양압력의 값을 표시하였다. 그림 1에 의하면 양압력은 잔교의 안쪽부분인

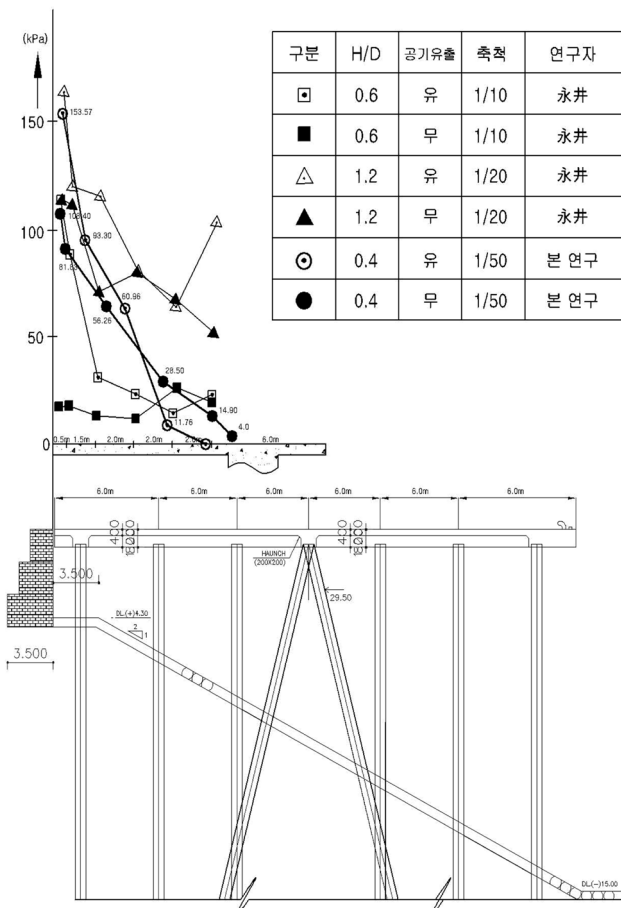


그림 1. 유출공 유무에 따른 양압력 분포특성

연결 판 부분으로 갈수록 증가하고 잔교전면으로 갈수록 감소하는 경향을 보이는데 이는 공기 유출공이 있는 경우가 없는 경우보다 양압력이 증가하고 있음을 보여준다.

또한 기존의 1/10과 1/20의 모형실험축척 자료를 본 연구에서 실시한 1/50 축척과 동일조건에서 실험값을 정리하여 본 결과 1/10 축척에 의한 실험값이 가장 작고 1/50, 1/20 축척의 순서로 나타나고 있기 때문에 수리모형 실험을 실시하여 양압력실험에 관한 축척효과를 확실하게 규정지를 수는 없다.

하지만 永井莊七郎(1966) 등의 수리모형 실험의 결과만을 검토한 결과 축척이 클수록 수리모형의 실험값이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 1/10의 모형에서는 공기의 유출이 쉽게 이루어 지지 않고 있다는 것을 지적하고 있다.

2.3 잔교제원에 대한 양압력의 차원해석

잔교의 상판에 작용하는 양압력 P 는 다음의 함수로 표시된다. 즉, 파고(H), 주기(T), 수심(h), 해저경사(i), 정수면과 잔교상판과의 수직거리(D : clearance), 잔교길이(l), 물의 단위체적중량(ρ), 공기의 단위체적 중량(ρ_a), 대기압(P_o), 공기의 대표속도(v), 공기의 비열비(γ), 중력가속도(g), 잔교상판하부의 격자치수(R)등이다. 이를 함수로 표시하면 식(1)과 같다.

$$P = f(H, T, h, i, D, l, R, g, P_o, v, \gamma, \rho, \rho_a) \quad (1)$$

식(1)을 무차원화 하여 방정식을 세우면 식(2)과 같다.

$$P/\rho g H = (H/L, h/H, i, D/H, V/L, R/H, \rho_a/\rho, v^2/P_o/\rho_a) \quad (2)$$

식(2)에서 값이 일정한 무차원량과 공기의 상사성을 고려하지 않고 직접적으로 구할 수 있는 물질량만 고려하면 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$P/\rho g H = (H/L, h/H, D/H, V/L) \quad (3)$$

여기서 $D+h=Const.$ 이므로 h/H 와 D/H 는 서로 종속관계이고 독립변수가 아니다. 따라서 h/H 와 D/H 중 한 개를 독립변수로 생각하면 최종적으로 양압력 P 는 식(4)과 같다.

$$P/(\rho g H) = (H/L, D/H, V/L) \quad (4)$$

여기서 H/L 는 파의 비선형성을 D/H 는 양압력의 크기의 특성을 그리고 V/L 은 양압력의 시간적 공간적 분포특성을 나타내는 요소이다.

3. 수리실험

3.1 실험시의 제원

실험은 부산대학교 토목공학과 수리실험실의 길이 25 m, 폭 0.6 m, 높이 1.2 m의 수조를 이용하였다. 수리모형실험의 제원은 길이(l) 1.3 m, 폭(b) 0.55 m, 두께(t) 15 mm의 단단한 목재로 페인트와 에나멜로 표면처리를 하였다. 그림 2는 잔교의 단면을 도시한 것이고 사진 1은 잔교상판을 설치하여 수리모형실험을 실시하는 전경이다. 파랑조건은 규칙파고 5 cm에서 15 cm까지 주기는 1.2 sec에서 1.5 sec까지 수심 52 cm에서 75 cm까지 실시하였다. 파압측정에 사용된 파압계는 SSK사가 제작한 P306A-1 series를 사용하였다. 20초

표 2. 실험제원(압축공기 유무)

압축공기	H(cm)	T(sec)	h(cm)	D/H
무	10~15	1.2~1.5	52~75	0.4
유				

표 3. 실험제원(파압분포)

측정위치	H(cm)	T(sec)	h(cm)	D/H	비고
2B	5 10 15	1.2 ~ 1.5	52 ~ 75	0.4 ~ 2.5	단위: cm, sec B: Block
3B					
6B					
7B					



사진 1. 수리모형실험 사진의 일례

면 잔교상판하부에 양압력이 작용할 때 상판과 파고로 둘러싸인 공간에 압축공기의 양이 많을수록 양압력의 절대값이 작아진다는 것을 명확히 제시하였다. 그러나 이들이 제안한 결론에 대해 수리모형실험에서 좀 더 명확히 정리해야 할 것이 남아있다. 이는 상판과 파고로 둘러싸인 밀폐된 공간에 압축된 공기에 대한 수리모형 실험시의 두 가지 문제점을 초래하는데 첫째는 공기의 상사성이고 둘째는 수리모형실험이 2차원 수조에서 실시하여 잔교 측면으로부터 공기가 새어나갈 곳이 없다는 것이다.

공기의 상사성에 대해서는 파랑과 수리모형 구조물은 Froude 상사법칙을 따라서 축척을 실시했다. 그러나 밀폐된 압축공기에 대한 수리모형실험은 매우 어려운 과제로 현재까지 남아 있다. 이들 연구는 밀폐된 공기가 압축공기로 변화되어 공기의 압축성에 대한 직접적인 물리적 현상을 규명하여 수리모형실험을 실시한 결과를 제시한 것이 아니고 2차원 수조에서 공기가 상판의 양 측면으로부터 유출되는 경우(상판을 수조 폭보다 좁게 만들어 설치함)와 유출되지 않는 경우(상판을 수조 폭과 동일하게 하여 수조와 밀폐시킴)로 모형실험을 실시하여 양압력이 상판하부에 작용할 때 측정된 파압의 크기로 구분하여 압축공기에 대한 양압력의 저감효과를 제시하고 있다. 즉, 파고가 내습하여 상판하부에 도달하면 양압력이 발생한다.

이때 밀폐된 공기가 직접 상판하부에 부딪치면서 양압력이 작아지는 것이 아니라 밀폐된 압축공기가 파고와 상판하부의 중심에 존재하면서 파고가 상판하부에 작용할 때 파고의 상승효과를 억제하여 파고를 저감시켜 파고가 마치 완만한 단파형태로서 상판하부에 도달하기 때문에 양압력의 저감효과가 발생되고 있다고 생각된다. 동시에 밀폐된 압축공기는 파고가 상판에 부딪칠 때 완충효과(cushion effect)로 작용하는데 이로 인해 지연시간(lag time)이 발생되어 양압력의 첨두(peak) 현상이 발생되지 않는다는 것이다.

Johnson(1968)은 공기의 압축성을 밝히기 위해 정지수면의 상부에서 평판을 낙하시키면서 낙하속도에 의한 공기의 운동을 조사하였다. 이 실험에 의하면 낙하속도에 의한 공기의 압축성은 공기의 운동과는 비선형으로 나타났기 때문에 수리모형실험과 현지의 상사성이 불확실하다는 것이다. 즉, 잔교상판에 작용하는 양압력에 대해서는 수리모형실험과 현지에서 발생하는 파고의 상승속도가 다르기 때문에 밀폐된 압

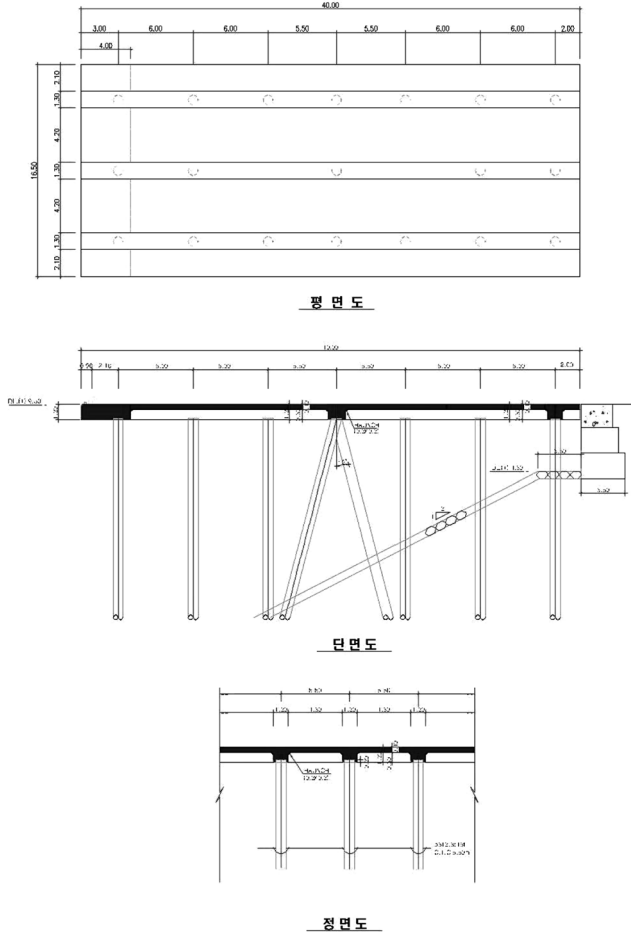


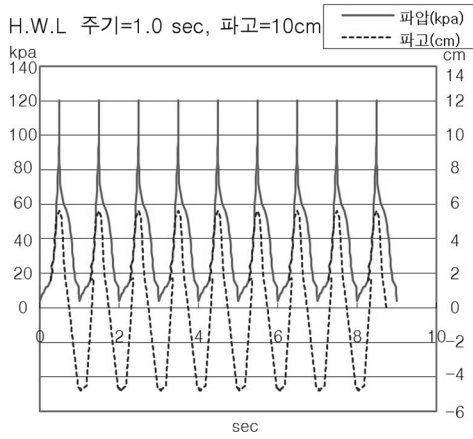
그림 2. 잔교의 수리모형 단면도

간의 파압을 측정하여 AD변환기로 변환시킨 후 Data파일로 저장하였다. 표 2는 압축공기의 유무에 따른 파압의 형상을 조사하기 위한 실험의 제원이고 표 3은 Block내의 파압분포를 조사하기 위한 실험제원이다. 각 Block의 정의는 그림 2의 잔교의 수리모형 단면도에서 평면도와 단면도의 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 1 Block, 2 Block, 3 Block, 4 Block, 5 Block, 6 Block, 7 Block, 8 Block으로 정의하였다. 이에 내습파랑은 제1 Block로 내습하여 7 Block과 8 Block으로 진행하고 있다.

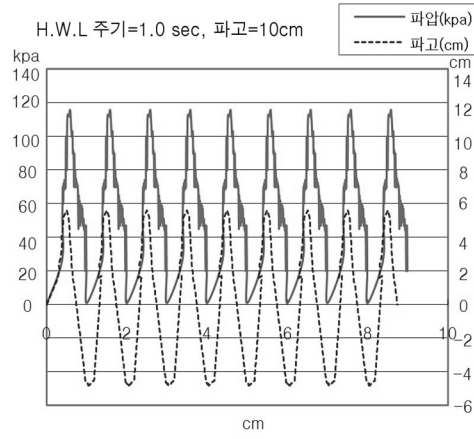
4. 실험결과 분석

4.1 잔교상판하부에 작용하는 파압의 형상

永井莊七郎(1966) 등과 谷本 勝利(1978) 등의 연구에 의하



(a) 압축공기가 없는 경우



(b) 압축공기가 있는 경우

그림 3. 잔교상판 하부에 작용하는 파압형상의 일례

축공기의 운동도 달라진다고 기술하고 있다.

그림 3(a)는 파랑이 내습하여 잔교상판하부에 부딪칠 때에 압축공기가 없는 경우의 양압력이 작용하는 파압의 형상의 일례를 나타낸 것이고 그림 3(b)는 압축공기가 있는 경우의 양압력이 작용하는 파압의 형상의 일례를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 파랑이 잔교상판하부로 내습하면 잔교상판하부에 있던 공기가 잔교의 양방향측면으로 빠져나가면서 상판에 파력이 강하게 작용하고 있기 때문에 분포형태가 매우 뾰족한 형상을 하고 있다.

반면에 그림 3(b)는 파랑이 내습할 때 잔교하부에 있던 공기가 빠져나갈 수 없는 경우 수면과 잔교하부에 존재하고 있던 공기가 밀폐된 공간에 의해 압축되면서 압축공기로 변화하여 파압이 잔교상판하부에 작용할 때 파압에 저항하여 파압의 형상이 완만한 형상을 하고 있음을 보여준다. 즉, 잔교상판하부에 파랑이 내습하여 파력이 잔교상판하부에 작용하는 파압의 형상에 따라서 동일지점에 대해 파압의 작용강도가 달라지는데 이는 동일조건에서 파압의 형상이 뾰족하면 완만한 형상보다 파압이 강하게 작용하여 작용파압이 크다는 것을 의미 한다

4.2 잔교상판의 중심 일점과 중심전후 일점에서의 양압력 관계

수리모형실험에서 파압분포를 측정하는 곳은 대부분이 모형의 중심의 한 점을 측정하여 파압의 대표 값으로 정하고 있는 것이 일반적이다. 이러한 일반적인 사항에 대하여 상판의 중심 일점과 중심전후 일점에서 어느 정도의 양압력의 차이가 발생하고 있는지를 검토하기 위해 Block의 중심점과 중심의 전후 가장자리에 대해 동시에 파압을 측정하였다.

상판의 일점길이의 Block내의 파압분포의 특성이 명확하지 않는 상태에서 Block의 중심점의 측정값을 Block의 대표 값으로 정하는 데 약간의 문제점이 있는데 이 점을 분명히 하기 위해서 파고 5 cm, 10 cm, 15 cm 수심 52 cm에서 75 cm 주기 1.2 sec, 1.5 sec에 대해서 모형실험을 실시하였다. 실험결과 값에 의하면 파압분포는 특징의 분포형상을 나타내지 않고 각 입사파 및 수심에 따라서 분포형상이 달라지고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 중심점을 기준으로 명확한 분포 형이 나타나지는 않고 단순하게 중심점

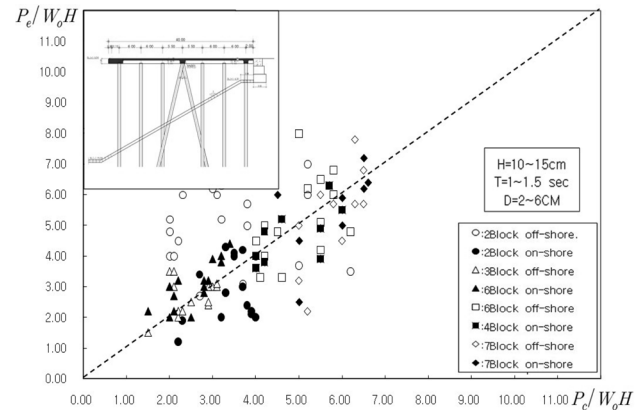


그림 4. 공기유출시의 중심 점과 가장자리에서의 평균 양압력분포

보다 전후 가장자리에서 번갈아 높게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

그림 4는 $D/H=0.4$ 일 경우의 Block내의 중심의 일점과 중심 전후의 일점의 양압력분포를 도시한 것이다. 횡축은 Block내의 중심점에 대한 양압력분포를 종축은 중심점 전후에서 측정된 값을 나타내고 있다.

즉, 중심점에 대한 전후 가장자리에서의 파압강도를 도시한 것으로 전반적으로 그림에 의하면 제 2Block에서는 Off-shore쪽의 파압강도가 크게 나타나고 있다.

동시에 그림 4는 $D/H=0.4$ 일 때 공기가 수조측면을 통하여 유출이 발생할 경우의 상판의 중심점과 중심점에 대한 Block 전후 가장자리 지점의 평균양압력 값을 도시한 것이다.

이 그림은 잔교상판에 작용하는 양압력을 Block내의 중심점에서 측정하여 대표값으로 적용해도 문제가 없는지를 검토한 것이다. 그림에 의하면 중심점에 대한 전후 가장자리에서의 파압강도는 전반적으로 제 2Block에서만 중심점 앞쪽에서 약간 큰 값을 보여주고 제 7Block에서는 뒤쪽이 앞쪽보다 약간 큰 파압강도를 보여주고 있다. 따라서 중심점과 전후 가장자리의 평균양압력 값의 분포가 비교적 폭넓게 분포하고 있음을 보여준다.

그림 5는 $D/H=0.4$ 일 경우 수조의 양 측면을 통하여 공기 유출이 발생하지 않을 경우에 대한 중심점과 전후 가장자리의 평균 양압력분포를 도시한 것이다. 그림 5의 경우는 공기의 유출이 없는 경우에 한하여 중심점의 값과 가장자리의

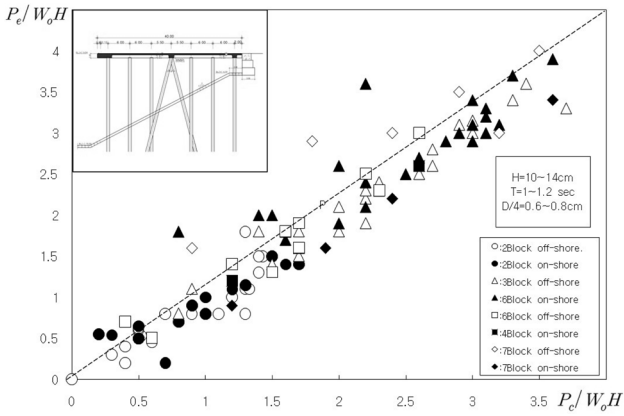


그림 5. 공기 유출이 없을 경우의 각 Block의 평균 양압력분포

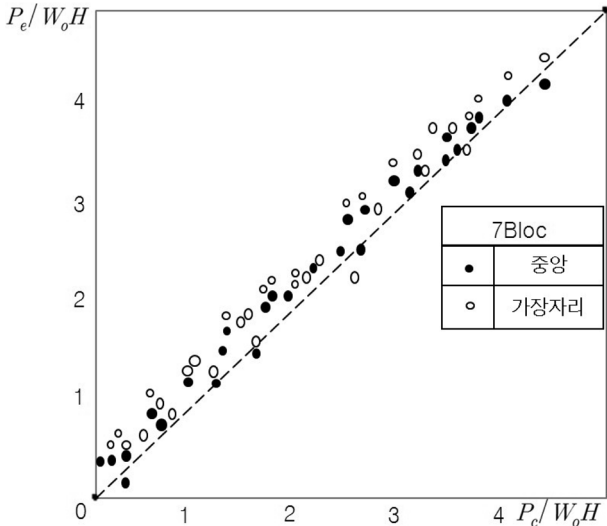


그림 6. 제 7Block에서의 중심점과 가장자리에서 평균양압력분포 (밀폐 공간)

값을 비교한 것이기 때문에 전체적으로 양압력의 값도 작고 거의 일직선상에 분포하고 있음을 알 수 있다. 이들 값은 일직선상에 거의 동일한 분포를 하고 있지만 각 파의 파압 강도에는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 Block 내의 파압은 장소에 따라서 크게 다르지 않고 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 그림에서 직선으로 연결한 선은 중심점과 전후 가장자리에 대한 평균 양압력의 크기가 동일한 것을 연결한 것으로 알 수 있듯이 공기유출이 없는 경우는 중심지점이나 가장자리 지점에서 관측한 평균 양압력은 큰 차이가 없다고 볼 수 있다.

그림 6은 제 7Block에서 그림 5와 같이 양 측면을 밀폐시킨 상태로 측정된 양압력을 평균하여 중심점과 가장자리에서의 평균양압력을 도시한 것이다. 그림 중의 실선은 중심점의 값과 가장자리에서 평균양압력이 동일한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 흰 원과 검은 원의 평균양압력 차이는 $1 W_0H$ 이내로 분포하고 있음을 보여준다. 이는 중심점과 가장자리의 양압력 차이는 약간의 차이는 발생하고 있지만 각 Block내의 파압분포는 거의 동일한 분포를 하고 있음을 나타내는 것으로 이러한 결과는 다른 Block에서도 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 따라서 수리모형실험에서 잔교상판에 대한 각 Block의 중심점에서 측정된 평균양압력은 각 Block내의 어떤 곳에서도 분포하는 양압력으로 보아도 큰

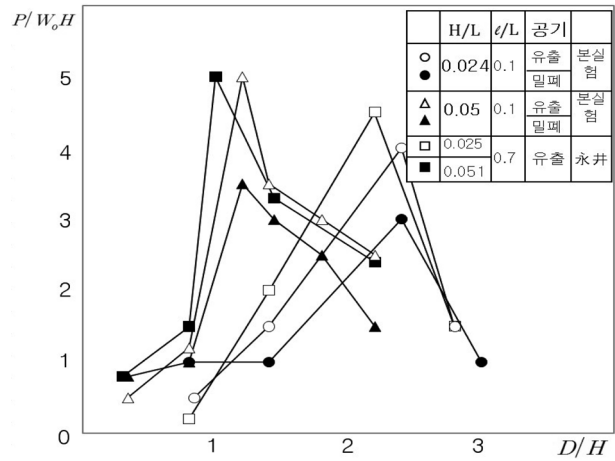


그림 7. H/L에 의한 양압력과 D/H와 관계

차이가 없다는 것을 알 수 있다.

4.3 D/H, l/L, H/L에 의한 양압력의 분포특성

차원해석에서 알 수 있듯이 잔교의 상판에 작용하는 양압력은 D/H , l/L , H/L 의 변화에 따라서 양압력 강도가 달라지고 있다(박상길, 2006) 그림 7은 종축에는 무차원의 양압력을 횡축에는 D/H 의 값을 취하고 파라메타로서 H/L 과 l/L 의 변화에 따른 양압력의 분포형태를 도시한 것이다. l/L 의 변화에 따른 양압력의 분포형태는 $l/L=0$ 인 곳이 잔교의 끝단지점으로서 파랑이 잔교하부로 내습하여 반사가 시작되는 지점이므로 양압력의 강도가 최대가 되고 다음에 $L/4$ 떨어진 곳에서 또다시 중복파의 피크 파형이 발생되면서 최대양압력이 발생되고 있다. 끝단에서 정확히 $L/4$ 만큼 떨어진 곳에서 중복파형이 발생되어 최대 양압력이 발생되지 않는 이유는 Mound에 대한 파형의 변화를 충분히 검토를 하지 않는 상태에서 언급하는 것은 무리가 있지만 잔교하부의 Mound의 영향을 고려했을 때 잔교상판의 양압력의 분포형상은 l/L 과 Mound의 형상, 재질, 경사 등에서 분포특성이 l/L 결정된다고 볼 수 있다.

또한 D/H 에 의한 양압력의 분포는 그림 7에서 볼 수 있다. 그림 7은 양압력과 D/H 의 관계를 파형경사 H/L 로서 나타낸 그림의 일례이다.

永井莊七郎(1966) 등은 $l/L=0.12$, $H/L=0.05$ 일 때 양압력의 극대치는 $D/H=1.1$ 에서 나타나고 $H/L=0.025$ 일 때 $D/H=2.2$ 에서 나타난다고 보고 있다.

수리실험에 의하면 파압강도의 극대치가 출현하는 상대 공간(Relative Clearance)(D/H)이 파형경사 H/L 에 의해 변화양상을 보이는데 이는 어떤 파형경사(H/L)에 있어서 파압강도의 극대치가 나타나는 D/H 을 $(D/H)_{max}$ 로 하면 H/L 가 크면 클수록 $(D/H)_{max}$ 가 작게 되기 때문에 H/L 와 $(D/H)_{max}$ 는 근사적으로 $(H/L) \times (D/H)_{max} = C$ 로 표현이 가능하다. 이러한 경향은 양압력의 극대치는 H/L 과 D/H 에 의해서 변화하며 파랑특성인 H/L 가 변화하면 이것에 의하여 파압강도의 최대치를 갖는 공간(Clearance)이 존재한다는 것을 의미한다.

4.4 공기유출공 유무에 대한 비교

파압강도에 미치는 압축공기의 영향을 검토하기 위해 공기

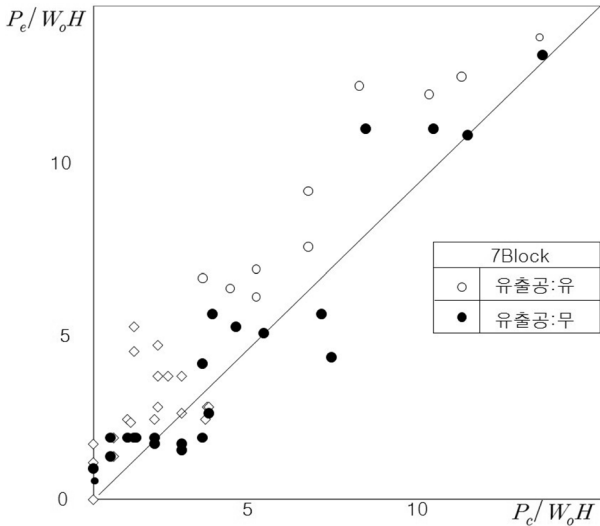


그림 8. 제 7Block에서 유출공의 유무에 대한 평균양압력분포

의 유출통로가 있는 경우와 없는 경우의 양압력강도를 검토하기로 한다. 하지만 압축공기를 생성할 수 있는 실험 장치를 고안하여 수리모형실험을 실시하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 수조의 양 측면을 밀폐시킨 경우와 밀폐를 시키지 않고 동시에 상판의 중심에 공기유출공을 설치했을 경우에 대해서 비교하기로 하였다. 그림 8은 제 7Block에 대해서 압축공기가 양압력에 미치는 영향을 검토한 것이다.

그림 8의 종축은 압축공기가 유출될 수 있는 유공이 있는 경우의 측정 양압력을 횡축은 유공이 없는 경우의 측정양압력을 표시하였다. 흰 원은 Off-shore에서 측정한 양압력을 검은 원은 On-shore에서 측정한 양압력을 나타낸다. 중심의 실선은 양자가 동일한 경우를 나타내는데 그림에서 Off-shore 관해서는 유출공이 있는 경우 반드시 양압력이 크다고 할 수 없다.

즉, 어느 정도의 분산이 있지만 유출공의 유무에 양압력은 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 양압력값은 $2W_0H$ 이하에서는 유출공에 관계없이 거의 동일한 분포를 하지만 $2W_0H$ 이상에서는 유출공이 없는 경우가 유출공이 있는 경우보다 양압력의 측정값이 작다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

상판에 작용하는 양압력에 대해 양압력의 분포특성을 수리모형실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 양압력이 상판하부에 작용할 때 시계열의 특성을 살펴보면 상판하부에 압축공기의 유출의 유무에 따라 양압력이 작용하는 형상이 다르며 압축공기의 유출이 없는 곳의 분포형상은 상판의 하부에서는 완만한 곡선형이 유출이 있는 곳에서는 매우 뾰족한 분포를 하고 있다.
2. 잔교상판 전체에 대한 양압력 분포는 일정한 분포를 하지 않고 매우 폭 넓게 분포하고 있지만 밀폐된 Block에는 일정한 크기로 양압력 분포특성을 나타낸다. 따라서 상판배근 양압력은 각 Block의 평균양압력을 말뚝의 인발력 하중은 전체상판에 작용하는 평균양압력으로 설계하는 것이 타당하다.

3. 잔교길이인 무차원(l/L), 파형특성(H/L), 공간특성(D/H)에 대한 양압력의 특성을 밝혔다. 특히 l/L 은 잔교의 끝부분에 큰 양압력이 작용하고 이곳에서 $l/4$ 만큼 떨어진 곳에서 다시 양압력이 크게 작용한다는 것을 알았다.
4. 양압력에 미치는 수면과 상판의 공간(Clearance)을 표시하는 공간높이와 파고(D/H)의 영향은 최대값을 나타내는 D/H 가 존재하는 것을 알았다. 이는 H/L 가 클수록(H/L)가 작기 때문에 잔교를 설계할 때 D_{max} 가 되는 Clearance가 생기지 않는 상판높이를 정하는 것이 안전한 설계가 된다.
5. 압축공기가 양압력에 미치는 영향을 검토한 결과 상판전체에서는 잔교상판 전면(Off-shore)보다는 후면(On-shore)에서 압축공기에 의한 완충효과가 크게 발생하고 있고 동일 상판에서도 뒷부분(On-Shore)이 앞부분(Off-Shore)보다 완충효과가 크게 나타나고 있다.
6. 각 Block에 작용하는 양압력과 Block전체에 작용하는 양압력은 매우 상이하게 분포한다. 따라서 동일한 하중을 이용하여 상판배근과 말뚝의 인발력 설계를 할 조건은 압축공기가 상판하부에 존재하여 파압이 작용할 때 유출되지 않고 완충역할을 할 수 있는 밀폐된 공간을 갖는 조건이며 이를 위해서는 잔교상판을 한 Block씩 압축공기가 유출되지 않는 구조형식으로 제작해야 한다. 본 연구는 한정된 조건에서 얻어진 결과이므로 보다 많은 수리실험이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 BK21 “유비쿼터스 항만물류 인프라 구축사업단”의 산업체인 (주) 대림산업의 대응자금(2006. 9. 1-2008. 8. 31)으로 진행되었으며 이에 감사드립니다. 또 본 실험을 열심히 수행한 당시 석사과정인 박병열 군과 강덕훈 군께 감사를 전한다.

참고문헌

- 박상길(2006) 棧橋床版에 作用하는 揚壓力 分布에 관한 實驗的 研究, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집, 한국해양과학기술협의회, pp. 728.
- 해양수產部(2005) 漁港 및 港灣 設計基準(上卷), pp. 152-156.
- 해양수產部(2005) 漁港 및 港灣 設計基準(下卷), pp. 858-859.
- 永井莊七郎, 久保直, 時川和夫(1966) 棧橋に 働く 揚壓力に 關する 研究(1), 第 13回 海岸工學 講演會集, 日本土木學會, pp. 120-125.
- 室田明, 古土井光昭(1966) 棧橋床版に 作用する 揚壓力についての 實驗的 研究, 第 13回 海岸工學 講演會集, 日本土木學會, pp. 120-125.
- 合田良實(1967) 構造物に 働く 波力, 1967年度 水工學에 關한 夏期研修會 講演集, B코스 日本土木學會 水理委員會, pp. 10-2~10-31.
- 伊藤喜行, 竹田永章(1967) 棧橋に 作用する 波の 揚壓力, 港灣技術研究所報告, 日本港灣研究所, 第6卷 4號, pp. 37-63.
- 堀川清司, 中尾忠彦, 矢島昭弘(1967) 棧橋に 働く 揚壓力についての 實驗的 研究, 第14回 海岸工學 講演會集, 日本土木學會, pp. 148-153.
- 谷本 勝利, 高橋重雄, 和川田芳和(1978) 水平版に 働く 揚壓力に 關する 研究, 日本港灣技術研究所報告第, 日本港灣研究所, 17卷 2, pp. 3-47.
- Bagnold, R.A. (1939) Interim report on wave pressure research,

Journal of Inst. Civil Eng., Vol. 12, pp. 202-226.
Johnson, R.S. (1968) The Effect of air compressibility in a first approximation to the ship slamming problem, *Journal of Ship Research*, pp. 57-68.
Morison, J.R., M.P. O'Brien, Johnson, J.W., and S.A. Schaaf

(1950) The force exerted by surface waves on piles, *Petroleum Trans.*, AIME, Vol. 189, pp. 149-154.

(접수일: 2008.7.31/심사일: 2008.9.16/심사완료일: 2008.11.13)