

오륙도 방파제의 케이슨 작용 파압 및 동적거동의 현장계측 The Field Measurement of the Wave Pressures Acting on the Ohreukdo Caisson Breakwater and its Dynamic Behavior

심재설¹ · 전인식² · 박우선¹
Jae Seol Shim¹, In Sik Chun², and Woo Sun Park¹

1. 서 론

기존의 케이슨식 방파제의 설계파력을 결정하기 위해서는 Goda (1984)의 파압공식을 사용하는 것이 일반적이다. 케이슨의 활동 및 전도의 가능성을 이 파압공식을 이용하여 검토하며 만일의 경우 발생할수 있는 충격파압은 그 작용시간이 매우 짧아 케이슨의 안정성에는 별 영향이 없는 것으로 인식되어 왔다. 그러나, 최근의 Oumeraci, et al. (1996)은 일련의 수치 및 실험 연구를 통하여 케이슨 전면에 발생하는 충격파압은 케이슨의 영구적 활동을 충분히 일으킬 수 있다고 하였으며, 케이슨의 설계에 이 충격파압을 반드시 고려할 것을 제안하였다. 이와 같은 새로운 개념의 케이슨 활동 메카니즘은 전반적으로 유럽 쪽에서 정설로 채택되어 가는 분위기이다. 우리나라에서는 실패역에서 원형파일에 작용하는 쇄파압을 측정 한 바(심 등, 1999) 있고, 또한 충격쇄파력에 의한 원형파일의 동적거동을 연구한 바(전 등, 1999) 있으나, 실패역의 케이슨 방파제에 대한 파압 및 동적거동의 측정은 처음으로 시도되었다. 이와 같은 개념을 인정할 경우에는 단순히 Goda 공식에 의한 정적설계는 미흡하며, 충격쇄파력의 작용에 대한 케이슨의 동적해석이 필요할 것으로 보인다. 오륙도 방파제는 천단고가 낮음에도 불구하고 수십대비 마운드고의 비율이 0.35에 근접하여 케이슨 전면에 충격파력의 발생가능성이 충분히 존재한다. 이와 같은 충격파력에 의한 동적거동이 과도할 경우에는 영구활동으로 이어질 가능성이 있으며, 최소한 케이슨 단면 양측에서의 국소적 지

반침하가 발생하여 평상파 상태에서도 동요가 (Rocking motion) 관측될 가능성이 있다.

저천단 케이슨에서 월파가 과도하게 발생하며 충격파압과 복합되어 나타날 경우, 케이슨의 안정성이 저하되는 것으로 지적되었다 (Oumeraci, 1994). 이 경우, 케이슨의 항외쪽 마운드에서 국소침하가 발생하며 케이슨이 항외쪽으로 기울어지는 성향이 발생하나 이에 대한 정확한 원인은 제시되지 않았다. 오륙도 방파제는 설계파고가 7.24 m 임을 고려하면 천단고가 다소 작게 취해진 경우로서 폭풍 시 월파가 상승적으로 발생할 수 있다. 따라서, 방파제의 연장 상 케이슨의 위치에 따라서 국소침하에 의한 케이슨간의 이격이 발생할 가능성도 배제할 수 없다.

상기와 같은 두가지 원인들은 공히 충격파력과 국소적 지반침하(케이슨의 양측부분)에 관련되어 있다. 국소적 침하에 의하여 케이슨의 안정성이 저하될 경우 정상상태에서 갑자기 안정성이 훼손되는 것은 아니며, 사전에 반드시 이상징후를 보일 것으로 판단된다. 즉, 과거에 국소적 침하가 발생하였다면 케이슨은 설계파에 미치지 못하는 입사파에 대해서도 어느 정도의 동요를 보일 것으로 보인다. 이와 같은 동요가 계속적으로 국소침하를 가속화시킬 것이고, 따라서 그 자체가 증폭되는 성향을 가지며 영구적 활동 및 전도로 연결될 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 오륙도 방파제의 충격파력과 동요를 확인할 목적으로 2000년 10월 5일부터 2000년 11월 10일까지 현장계측을 수행하였다.

¹ 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

² 건국대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

2. 실 험

2.1 계측센서의 현장설치

부산 태종대 전면해상에서 관측한 5년간 (1990 ~ 1994) 파랑자료 (해운항만청, 1995)를 보면 유의파고 4.0m 를 초과하는 경우가 0.1% (1.8 days)를 차지한다. 이 파고가 평년 태풍에 의한 방파제 전면에서의 쇄파고 H_b 라고 간주한다. Partenscky (1988)가 제시한 충격쇄파압의 발생범위 Fig.1 을 참조하면, 수면 위 2.8m 에서 최대압력이 발생하며 발생범위는 최고 4.8m 에 이른다. 본 실험역 계측에서는 평균수면 위로는 1 m 간격으로 5 개의 파압계를, 밑으로는 2 m 간격으로 2 개의 파압계를 설치하는 것으로 하였다(Fig. 2). 파압계는 폭이 38 cm 이며 좌우에 파압계의 케이블을 접속 시키기 위한 원형봉(Rod)이 부착되어 있는 지지대에 설치하였다. 케이스의 상부에서 파압계 P7까지의 거리는 940 cm 이며 상치 콘크리트의 두께는 약 480 cm 이다. 현재 케이스의 위치에 따라 상치 콘크리트와 하부 케이스간의 불연속이 있을 수 있음을 고려하여 길이 각각 480 cm 인 지지대를 상치 콘크리트의 하단을 경계로 위, 아래에 하나씩 설치하였다. 지지대는 상치 콘크리트와 하부 케이스에 확대성 볼트(Expansion bolts)로 강하게 접속시켰다. 지지대의 양쪽에는 차후 파압계의 케이블을 접속시키기 위한 원형 강봉을 설치하였다. 또한, 지지대에는 이하 설명하는 파압계 판을 고정시키기 위해 스텐볼트를 심어놓았다 (각 판에 4 개씩). Fig.3 은 케이스 전면에 설치된 압력 센서의 전경을 보여준다. 케이스 동적응답 계측을 위한 가속도계는 2 개소에 설치하였다. Fig.2 에서 보는 바와 같이 A1 은 삼축 가속도계를, A2 는 일축 가속도계를 의미한다. 가속도계들은 완전 방수 케이스 안에 넣었으며 케이스들은 케이스 상부면에 단단히 고정시켰다. 가속도계 케이블들이 월파에 의하여 이동하지 않도록 케이스 면을 V 자 홈으로 절취하여 케이블을 매몰시켰다. 가속도계 센서의 설치에서 x 축은 케이스의 폭방향으로, y 축은 길이방향으로, z 축은 연직 상방향으로 설정하였다.

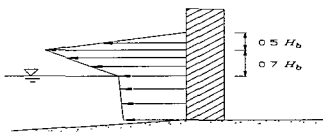


Fig.1. The vertical distribution of the impact pressure by Breaker.

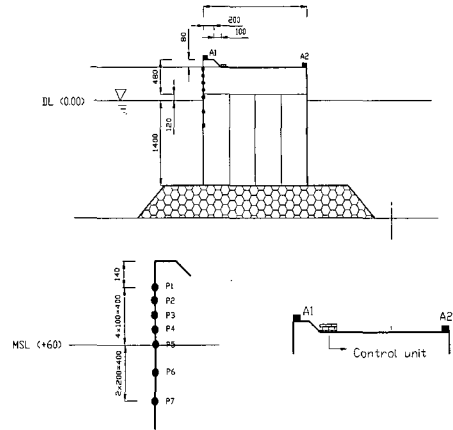


Fig.2. Installation of pressure sensors and accelerometers

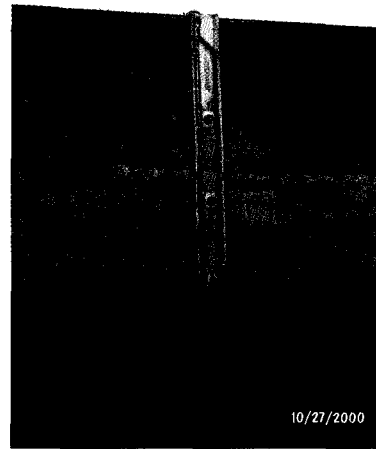


Fig.3. Photograph of pressure sensor installation.

2.2 원격독취 시스템

파압과 동적응답 계측을 위하여 원격제어가 가능한 새로운 독취시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 파압계 및 가속도계에서 들어오는 아날로그 데이터를 수집하는 계측부와 이 측정데이터를 저장하고 시스템을 제어하며 PCS와의 인터페이스를 담당하는 제어부, 축전지로부터 전원을 공급받아 시스템 및 계측기로 전원을 공급하는 전원공급장치로 구성되어 있다 (Fig. 4).

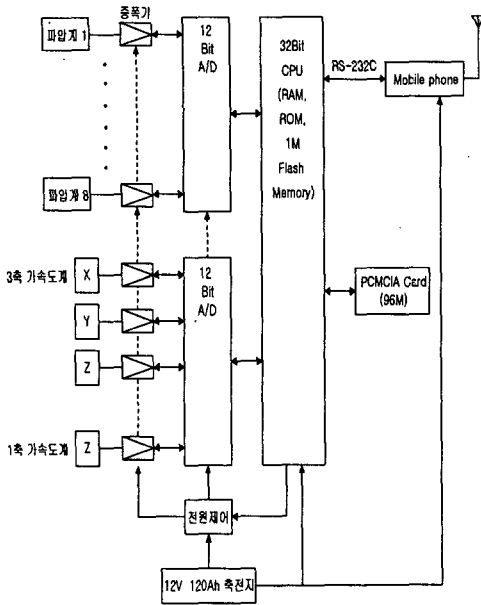


Fig. 4. Configuration of observing system.

이 시스템은 설정시간에 의한 주기적인 관측 및 필요시점에서 명령에 의한 비주기적인 관측이 모두 가능하며 이의 설정은 원거리에서도 가능하도록 하였다. 설정된 또는 명령된 관측시간의 판단은 상시전원이 공급되어 있는 제어부에서 관리하고 측정시점에 전원을 투입하여 계측부에서 관측을 실시한다. 관측된 데이터는 다시 제어부에 저장되어 무선모뎀을 통해 전송이 가능하도록 설계되었다(Fig. 5). 그러나 실제로는 현 무선 통신망의 여건상 자료전송이 불가능하여 직접 노트북 PC의 연결을 통해 자료를 받게 하였다.

계측부는 총 16 채널로 설계되었으나 현재 사용하고 있는 것은 그중 12 채널로 8개의 파압계와 1개의 3축 가속도계, 1개의 1축 가속도계를 연결할 수 있도록 되어 있다. 12 Bit의 고속 AD converter를 사용하여 초당 최대 10,000개의 측정값을 가질 수 있도록 하였다. Modem과 RS-232C 통신용 포트를 통하여 그 Sample rate와 Schedule을 변경하도록 하였다.

제어부는 32 Bit 저전력 고속의 MC68CK338 CPU를 사용하여 DOS를 내장시켰다. 이 DOS기반에서 모든 응용 소프트웨어는 C언어로 개발되었으며 Windows 환경에서도 사용이 가능하게 하였다. 저장장치로는 96M Byte의 PCMCIA Card를 사용하였다. 통신방법으로는 011 무선망을 이용하여, 전화기에 내장된 2400bps의 무선모뎀으로 원격에서 제어가 가능하게 하였다. 제어부는 항상 대기상태로 외부(무

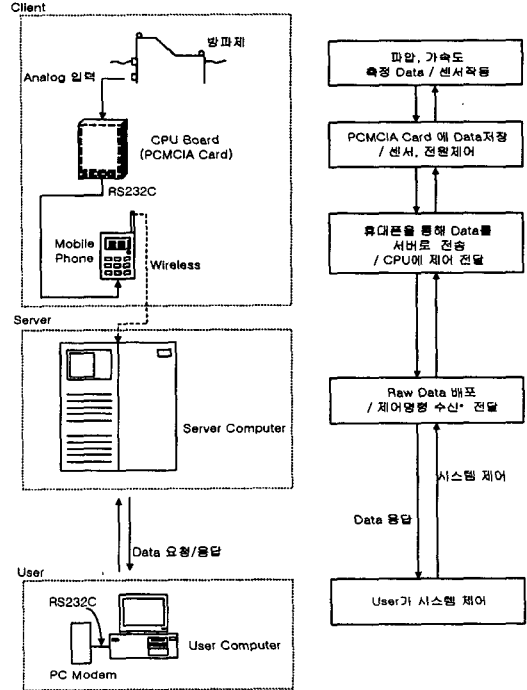


Fig. 5. Flow chart of control and command of measurement data and system

선모뎀 또는 RS-232C)의 명령을 기다린다. 만약, 측정 Schedule이 이미 만들어진 상태일 경우 그 시간에 맞추어 자동으로 측정하여 보관한다. 이 상태에서도 외부에서의 제어는 가능하다. 측정이 시작되면 각 센서와 AD converter에 전원을 공급하여 지정된 Rate와 시간에 맞추어 측정하고 그 데이터를 PCMCIA Card에 저장한다. 측정이 종료되면 계측부의 전원을 끄고 다시 대기상태로 돌아간다. 이 계측 시스템의 원격·제어 명령은 시작년도-시작월-시작일-시작시간-종료년도-종료월-종료일-종료시간-독취간격(분)-독취시간(초)-독취율(Hz)의 순서로 이루어져 있다. 예를 들면, 2000년 10월 5일 16시 40분부터 2001년 1월 5일 12시 20분까지 매 10분마다 60초씩 100 Hz로 관측하라는 명령은 다음과 같이 표현된다.
2000-10-05-16:40-2001-01-05-12:20-0010-0060-100

3. 결과 및 분석

3.1 파고, 주기의 일일변화

파압자료 분석에 참고하기 위하여 오투도 방파제 전면 14m 해저에 설치되어 있는 수압식 파고계에 의해 관측된 파고와 주기 자료를 이용하였다.

본 연구에서는 0.5초 간격으로 관측된 수압식 파고계에 의한 자료에 대해 1시간 간격으로 스펙트럼법의 사용을 기본으로 하되 파별분석법(Wave by wave analysis method)을 부차적으로 사용하여 분석하였다. 수압식 파고계로 취득된 자료의 경우에는 수심과 주기별로 미리 구해진 수압-해수면 변위간의 전달함수를 수압 스펙트럼에 곱하여 해수면 변위에 대한 스펙트럼을 구하게 된다.

수압식 파고계에 의해 관측된 파랑특성계수 중 스펙트럼법에 의한 유의파고 추정치(H_{m0} : 통상 유의 파고로 불리고 H_s 로 표시된다)와 침투주기 추정치(T_p)를 2000년 10월 5일 - 2000년 11월 10일까지 도시하였다(Fig.6). 관측기간중 유의파고는 대략 0.3 - 2.8 m였으며 최대 유의파고는 2000년 11월 2일 08시의 2.83 m이었다.

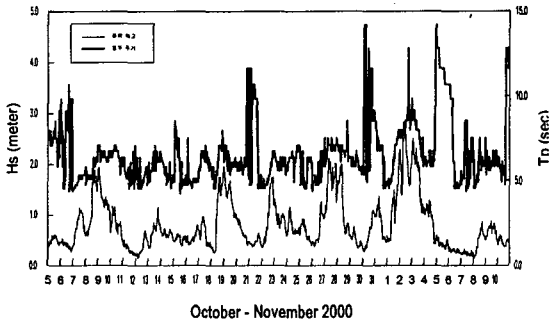


Fig. 6. Time series of wave data measured in front of breakwater.

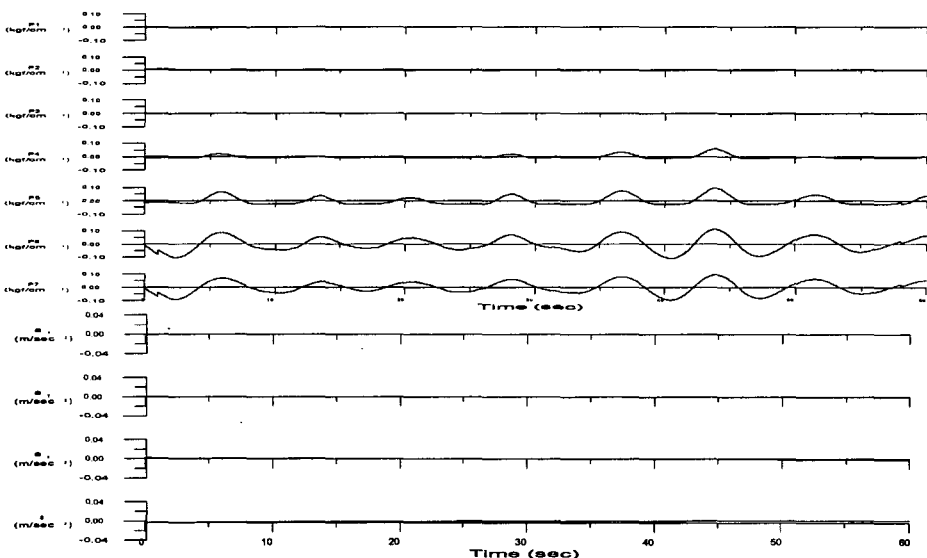


Fig. 7. Wave pressure and acceleration ($H_s = 2.83m$).

3.2 파압, 가속도 시그널의 시계열

AD 변환식에 의해 파압과 가속도 값이 산출되었으며, 파압의 경우 정수압 값을 공제하기 위하여 각각의 평균값을 이용하여 제거하였다. 또한 가속도 값 및 파압 값의 극값(Spike)을 제거하기 위하여 이동평균을 사용하였다. 계측 자료 중 수압식 파고계의 유의파고 자료를 바탕으로 특별히 큰 파고가 형성되었다고 생각되어지는 시간대에 대해 도시한 결과를 아래에 보였다(Fig. 7).

Fig. 7에서 보여지는 것처럼 수면 근처에 있는 4번 파압계에서부터 시그널이 나타나기 시작하여 수면 바로 아래 있는 6번 파압계에서 그 크기가 가장 크게 나타난다. 특별한 기상현상이 발생하지 않는 시기였던 관계로 파압의 경우 그 크기가 그리 크지 않았다.

3.3 파압데이터 검토

본 현장 파압계측의 정확도를 검토하기 위하여 파고기록 중 파고가 비교적 크게 나타난 시간구간을 선택하여 이 구간에 대한 계측파압을 구하고 이를 Goda 공식에 의한 계산 파압과 Table 1에 비교하였다. Table 1에서 H_{max} 와 H_s 그리고 H_m 은 Zero-up-crossing 법을 적용하여 산출한 최대파고, 유의파고 그리고 평균파고를 나타낸다. 수심은 오탁도 방파제에서의 조석변화를 고려하여 각 분석시점에 대하여 DL 기준 수심 14.0 m를 수정하여 산출한 값이다. Table.1.에서 계측파압과 Goda 공식에 의한 파압을 비교하여 보면 이들의 값들이 꼭 일치하는 것은 아니지만 전반적으로 정략적인 유사성을 보임을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of measured pressures and estimated pressures by Goda's formula

Date	Wave height (m)		Period (s)	Depth (m)	Pressure (kg/cm ²)		
					Measured	Goda's formula	
10/09/2000	H_{max}	2.00	6.72	14.73	P_{max}	0.0798	0.0779
	H_s	1.69	6.84		P_s	0.0680	0.0661
	H_m	0.91	7.17		P_m	0.0526	0.0361
10/19/2000	H_{max}	2.12	5.04	15.06	P_{max}	0.0664	0.0783
	H_s	1.55	6.11		P_s	0.0543	0.0583
	H_m	0.81	7.30		P_m	0.0410	0.0320
10/27/2000	H_{max}	2.36	6.91	15.25	P_{max}	0.0750	0.0909
	H_s	2.01	6.76		P_s	0.0738	0.0768
	H_m	1.05	7.07		P_m	0.0573	0.0407

4. 결 과

오륙도 방파제는 폭풍 시 충격파압과 월파가 동시에 발생할 수 있는 가능성이 높은 단면형태를 갖고 있다. 방파제의 케이슨에 현 시점까지 동요가 증폭되는 과정이 진행되었다면 케이슨 저면 폭의 중심선 부근에서 회전 축이 형성되었을 것이고 설계파에 훨씬 못 미치는 파라 할지라도 케이슨은 쉽게 동요를 보일 것이다. 본 현장계측은 이와 같이 실제 존재할지 모를 비정상적 동요를 감지하기 위하여 수행된 것이다. 사전정보를 통하여 케이슨의 동요가 심할 것으로 판단되는 케이슨을 선정하여 가속도계와 파압계를 부착하여 동요와 케이슨 전면파압을 각각 계측하였다. 아울러, 케이슨의 항외측에 파고계를 운영하여 입사파 제원을 연속적으로 득취하였다. 계측자료를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

계측기간 중 케이슨의 전면 파고는 최대 약 2.0m로 나타났으며 케이슨 전면에 충격파압의 형태는 감지되지 않았다. 본 현장 파압계측의 정확도를 검토하기 위하여 파고기록 중 파고가 비교적 크게 나타난 시간 구간을 선택하여 이 구간에 대한 계측파압을 구하고 이를 Goda 공식의 파압과 비교한 결과 이들은 개략적으로 잘 일치하였다. 가속도계의 시그널의 값은 매우 미미하였으며 변화위상 측면에서 파압시그널과의 유사성은 발견되지 않았다. 따라서, 계측기간 중 발생한 파의 제원에 대한 케이슨의 동요운동은 발생하지 않은 것으로 판단된다. 본 현장계측 기간 중 오륙도 방파제에 발생한 파고는 비교적 작았으며 계측파압과 가속도의 값은 매우 미미하여 케이슨의 동적거

동 및 충격파압과의 상관관계를 파악할 수 없었다. 현재로서는 파고 2m 이하의 평상파 조건에서는 케이슨의 동요가 없는 것으로 판단되며 방파제의 설계파 및 폭풍파에 대한 케이슨의 주기적 또는 영구적 거동을 파악하기 위해서는 향후 태풍시의 현장계측이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 심재설, 전인식, 1999. 쇄파압의 실험역 측정, 해안해양공학회지, 제 11 권 제 3 호, pp. 141~148.
- 전인식, 심재설, 1999. 충격쇄파력의 작용에 의한 원형파일의 충격거동, 해안해양공학회지, 제 11 권 제 2 호, pp. 87~94.
- 해운항만청, 1995. 1994 년도 파랑관측자료분석 및 통계분석(1990~1994) 보고서.
- Goda, Y., 1985, *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyp Press.
- Oumeraci, H., 1994. Review and analysis of vertical breakwater failures - lessons learned, *Coastal Engineering*, 22 (3-29), pp. 3 - 29.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A. and Klammer, P., 1996. Displacement of caisson breakwaters induced by breaking wave impacts, *Advances in coastal structures and breakwaters*, (ed.) Clifford, J.E., Thomas Telford Publishing.
- Partenscky, H., 1988. Dynamic forces due to waves breaking at vertical coastal structures, *Proc. 21st. International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2505-2518.