

KIOST-TR-2023-0402

저항식 파고계와 용량식 파고계의 수리모형실험  
적용을 위한 기술업무매뉴얼  
Guidelines for Utilizing Capacitance and Resistance  
Wave Gauges in Physical Experiment



2023. 09. 26

한 국 해 양 과 학 기 술 원



## 요 약

제 목	국문	저항식 파고계와 용량식 파고계의 수리모형실험 적용을 위한 기술업무매뉴얼
	영문	Guidelines for Utilizing Capacitance and Resistance Wave Gauges in Physical Experiment
관련과제명	PM62370 항만구조물 설계기술 고도화 PEA0131 해양에너지 및 항만·해양구조물 고도화 기술 개발	
저 자 명	이주연, 장세철	
작성일자	2023년 9월 26일	
유형	기술동향자료(O), 기술업무매뉴얼(O), 비특허지적재산권( ), 결합보고서( )	
주제분야	해양물리( ), 해양화학( ), 해양생물( ), 해양지질( ), 해양공학(O) 해양정책( ), 융복합( )	
Keyword	기술보고서, 파고계, 용량식파고계, 저항식파고계, 캘리브레이션	
초 록	<p>해상 및 연안에서 작용하는 주요외력인 파랑을 관측하는 것은 항만안전, 연안재해방지, 구조물 설계 등을 위해 가장 중요하고 기초적인 요소임. 이러한 항만 구조물의 설계 단계에서 수리모형실험을 통해 구조물의 수리학적 특성을 평가할 수 있음. 해상에서 파랑을 관측하는 방법과 실험실에서 파랑을 관측하는 것에는 환경, 관측목적 등에 차이가 있으며 이에 따라 현장관측용 파고계와 실험용 파고계를 분리하여 살펴볼 필요가 있음. 특히 실험실의 경우 계측의 선형성 및 정밀성을 위해 전압식 파고계를 주로 활용하고 있으며 이들의 특성에 대한 이해를 바탕으로 실험을 구성, 계측 및 분석할 필요가 있음. 본 매뉴얼에는 실험실에서 활용되는 용량식 및 저항식 파고계의 특성과 이들의 검교정 및 활용 사례에 대해 필요한 부분을 요약하여 기술하였음.</p>	

# 목 차

1장. 서론 .....	1
2장. 파고계 .....	2
가. 현장관측용 파고계 .....	2
나. 실험용 파고계 .....	3
1) 용량식 파고계 .....	4
2) 저항식 파고계 .....	6
3) 용량식 및 저항식 파고계 비교 .....	7
3장. 파고계 활용 .....	9
가. 캘리브레이션 .....	9
나. 실험 사례 .....	11
4장. 결론 .....	14
참고문헌 .....	15



## 약어 및 기호 정의

DAQ            data acquisition system

$\eta_{capacitance}$     용량식파고계 수위

$\eta_{resistance}$     저항식파고계 수위

$F_{cal}$             보정 계수

$\eta_{elevation}$     수위 변동량

$V_{measured}$     관측 전압



## 1장. 서론

파랑 특성에 대한 정확한 계측은 다양한 해양 연구분야에서 중요한 역할을 하고있음. 파랑의 성질을 나타내는 가장 기본적인 변수로 파고와 주기가 있으며, 이를 계측하기 위한 대표적인 장비가 파고계임. 실험실에서 파고계는 파랑관측이 필요한 설치 해상 및 지역을 고려하여 선정되어야 하며, 실험실의 경우 해상 조건에 비해 설치 및 계측이 간편하므로 계측의 정밀성을 고려하여 파고계 종류를 선정함. 본 매뉴얼은 수리 모형실험 시 파고계 선정 방법에 대해 제시함으로써, 실험의 효율성과 신뢰성을 향상시키는 것에 목적이 있음. 이러한 점에서 실험에 대표적으로 활용되는 저항식 및 용량식 파고계에 대해 기술하였으며, 이외에도 실험실에서 활용되는 몇 가지 파고계에 대해 요약하여 소개하였음.



## 2장. 파고계

파랑의 성질을 나타내는 파고와 주기를 관측할 수 있는 장비인 파고계는 계측 원리에 따라 다양한 종류가 있으며, 관측 목적 및 해역, 지점에 따라 선정됨. 파고계를 통해 계측된 파랑 자료는 활용 목적에 따라 다양하게 분석될 수 있으며, 대표적으로 항만구조물의 설계를 위한 기초 자료 구축, 연안 재해 시 파랑작용 원인 및 피해 규명, 선박 또는 해양시설물의 안전 확보, 회피 등에 활용되고 있음. 본 매뉴얼에서는 실제 해역에서 활용되는 현장관측용 파고계에 대해 간략히 서술하였으며, 주요 주제로 다루고자 하는 수리모형실험에서의 파고계에 대해 면밀히 살펴보하고자 함.

### 가. 현장관측용 파고계

표 1. 현장관측용 파고계 종류 및 특징

종류	정의
수압(Pressure)식 파고계	<ul style="list-style-type: none"> <li>파랑과 장주기 수위를 동시에 관측할 수 있음 (절대압 방식)</li> <li>수중 압력으로부터 수면파 선형이론에 따라 수위 변동량 예측</li> <li>구조가 단순하고 저렴함</li> <li>고주파 영역의 정밀한 파고계측 어려움</li> <li>정밀 계측보다 장기간 안정적인 관측이 필요한 경우 채택</li> </ul>
초음파(Sonic)식 파고계	<ul style="list-style-type: none"> <li>초음파 빔을 통해 측정지점(해저, 관측기지 등)에서 수면까지의 거리를 연속적으로 측정</li> <li>초음파 발사 후 돌아오는 시간을 통해 수위 환산</li> <li>수위 변동을 직접 측정할 수 있는 장소에 적합한 방식</li> <li>단주기성 파랑 계측 및 깊은 수심에 한계 (빔 퍼짐 현상 등)</li> <li>쇄파 조건 및 강풍 시 계측 어려움</li> </ul>
부이(Bouy)식 파고계	<ul style="list-style-type: none"> <li>탑재된 가속도계로 연직 가속도를 계측하여 수위로 환산</li> <li>0.6 ~ 10 m 크기의 원반, 구, 원통형 형식</li> <li>설치지점의 제약 적고, 비교적 설치비가 저렴함</li> <li>정밀도가 떨어지고, 배터리 용량의 한계 있음 (계류선이 오차로 작용하는 경우 있음)</li> <li>완만한 가속도 변화 계측 어려워, 장주기파 관측에 부적합</li> </ul>
마이크로파(Microwave) 파고계	<ul style="list-style-type: none"> <li>초음파식 파고계와 달리 공중에서 빔 발사</li> <li>강풍 시에도 안정적인 계측 가능</li> <li>수면 요철이 세밀한 빔에 난반사될 경우 계측 어려움</li> <li>고파랑 계측에는 적합하나, 미소진폭파 계측에는 한계점</li> </ul>

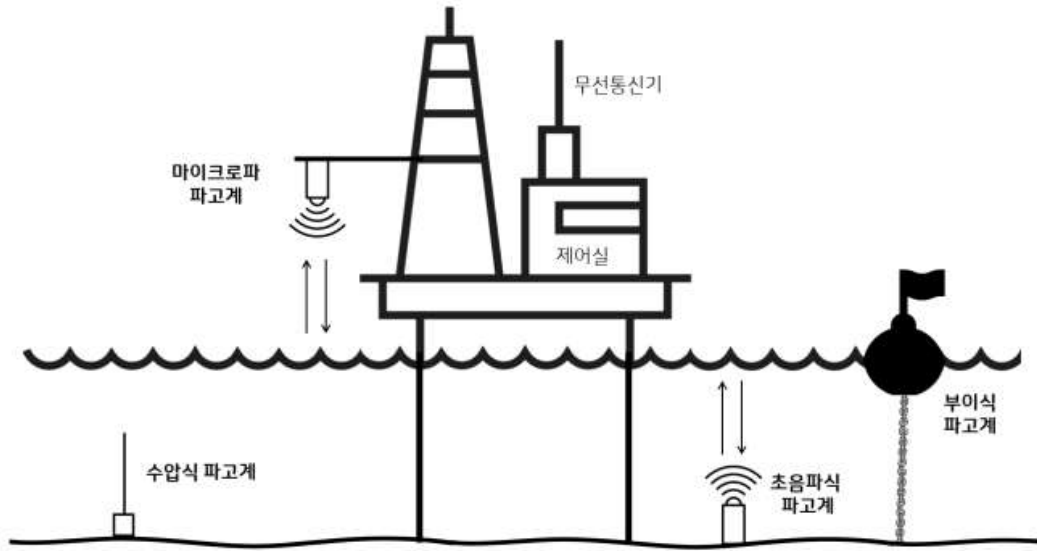


그림 1. 현장관측용 파고계 종류

## 나. 실험용 파고계

실험실에서 사용되는 파고계는 현장조건보다 설치환경의 제약이 적지만, 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 정밀한 계측이 수행되어야 함. 이러한 측면에서 실험용 파고계로는 선형성과 응답성이 뛰어난 전압식 파고계가 주로 활용되고 있음. 전압식(Voltage) 파고계에는 대표적으로 용량식 파고계(Capacitance wave gauge)와 저항식 파고계(Resistance wave gauge)가 있으며, 이러한 센서들은 수면 변위( $\eta$ )에 따라 변화하는 전압의 선형 값을 검출선으로 검출하여 아날로그 신호로 출력함. 출력된 신호는 데이터 독취장치(DAQ; data acquisition system)를 통해 일정 간격으로 디지털 신호로 변환되어 계측된 파고자료를 분석할 수 있음.

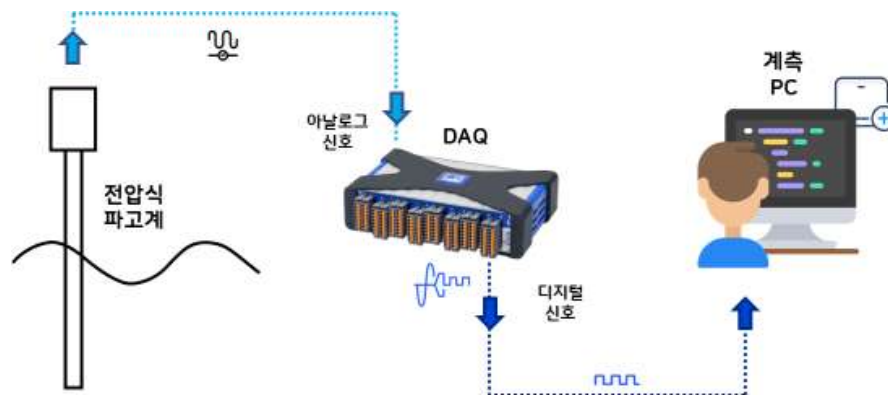


그림 2. 전압식 파고계 계측원리





그림 3. 파고계 설치장면 (수리실험동 2차원 조파수조)

## 1) 용량식 파고계

용량식 파고계는 절연된 얇은 검출선과 선을 지지하는 지지대로 구성되며, 이때 지지대의 단면적이 작을수록 계측 오차를 최소화할 수 있음. 용량식 파고계는 수중에 넣었을 때 검출선의 도체와 물 사이에서 콘덴서(condenser)를 형성하게 되며, 물과 검출선 사이의 전위차로부터 수심을 계산함. 예를 들어 수심이 낮아지면 콘덴서의 정전용량도 낮아지고, 수심이 깊어지면 정전용량(capacitance)이 증가하는 선형적 변화량을 갖게됨. 이렇게 계측된 정전용량은 전압(Voltage)으로 변화시킨 후 다시 직류 증폭기(D/C Amp)를 통해 전압을 증폭시킴으로써 데이터 독취장치로 값을 출력함. 한편 용량식 파고계의 검교정은 실험 전 한번만 수행되어도 큰 변화가 발생하지 않으며, 단 실험 중 검출선에 이물질이 붙지 않도록 주의해야함. 아래의 그림과 표에는 한국해양과학기술원 수리실험동에서 활용 중인 용량식 파고계의 정보에 대해 도시하였음.

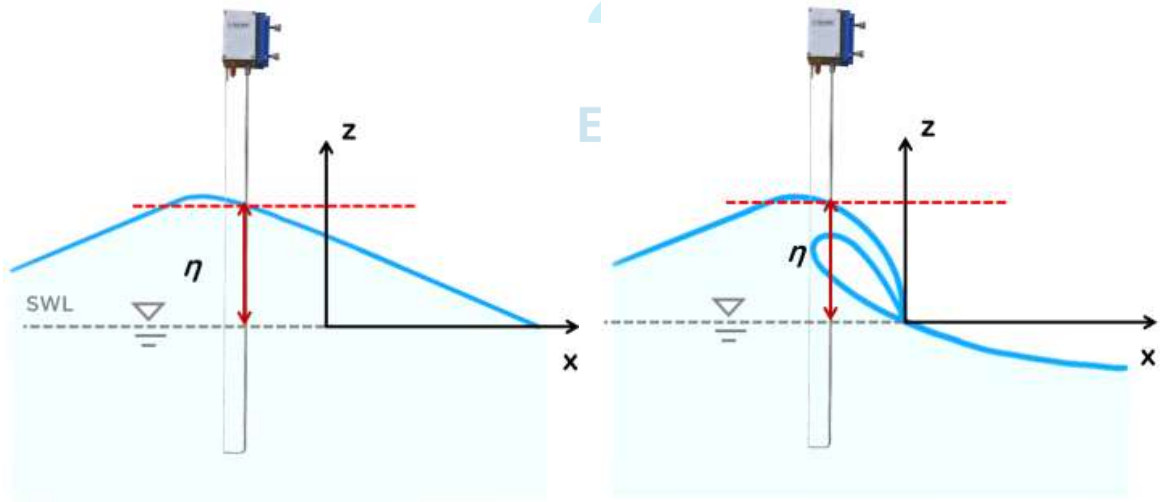


그림 4. 용량식 파고계

표 2. 용량식 파고계 (제조사: 세월기연)

출력전압	±2.5 V/FS
크기	10 (W) × 10 (D) ×90 (H) cm Probe : 80 cm
계측범위	±40 cm
응답	5 Hz
선형성	±0.5%/FS

아래 그림에는 비쇄파 및 쇄파 조건에서 용량식 파고계의 파고 측정 방식에 대해 도시하였음. 앞서 언급한 바와 같이 용량식 파고계는 검출선을 통해 전기용량을 수위로 환산함. 이러한 원리에 의해 용량식 파고계는 접촉하는 물, 즉 전기용량의 최대 값을 파고로 환산하므로 그림과 같이 공기유입(aeration)이 발생하지 않은 비쇄파 조건과 공기가 유입된 쇄파 조건의 파고를 동일하게 계측함. 즉 관찰되는 수위의 최대 지점을 파도의 높이로 계측하게 됨.



공기유입이 발생하지 않은 비쇄파 조건

공기가 유입된 쇄파 조건

그림 5. 비쇄파 및 쇄파 조건에서 용량식 파고계 계측원리

## 2) 저항식 파고계

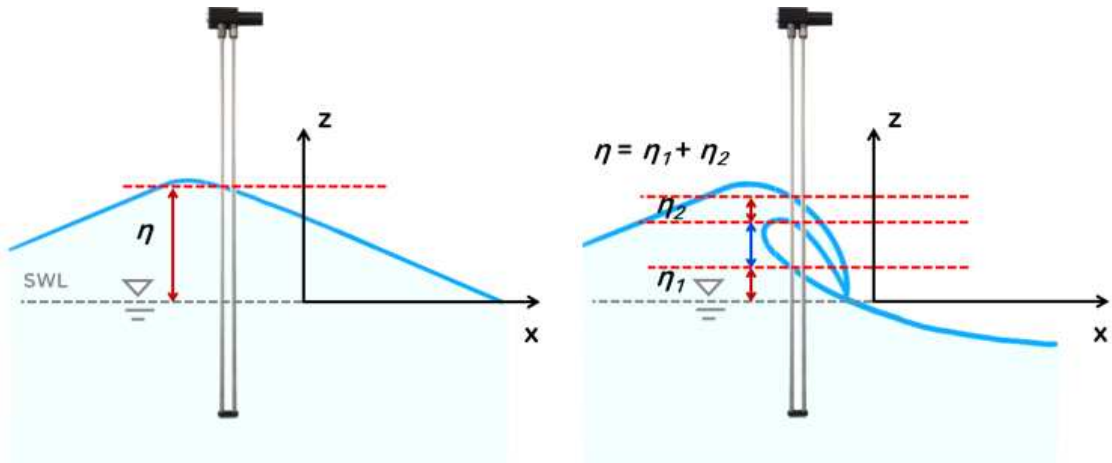
저항식 파고계는 수면의 높이의 변화량에 따라 저항(resistance)이 변화하는 특성을 갖고있으며, 길이가 같은 두 개의 검출선의 저항 차이를 수위로 환산하여 파도의 높이를 측정하게 됨. 저항식 파고계는 수위 변화에 따른 선형응답 특성을 가지며 분해능이 우수하다는 장점이 있으나, 측정 방법의 특성 상 염분이나 온도 등 물의 전도도에 민감하게 반응하며, 이에 따라 검교정을 자주 실시할 필요가 있음. 저항식 파고계의 캘리브레이션은 실험 기간동안 매일 1회 실시하는 것을 권장하며, 일교차가 큰 경우에는 오전과 오후에 걸쳐 1일 2회 교정하는 것을 권장함. 저항식 파고계를 사용할 경우 측정된 값은 용량식 파고계와 마찬가지로 전압으로 변화한 뒤 직류 증폭기를 거쳐 데이터 독취장치로 값을 출력함. 아래에는 수리실험동에서 활용 중인 저항식 파고계의 제원을 도시하였음.



그림 6. 저항식 파고계

표 3. 저항식 파고계 (제조사: VTI)

출력전압	5 V : single-ended mode 15 V : differential mode
크기	10 (W) × 3 (D) × 103 (H) cm Probe : 100 cm
측정범위	±50 cm
사용가능온도	0 ~ 45 °
사용가능습도	15 ~ 85 %



공기유입이 발생하지 않은 비쇄파 조건

공기가 유입된 쇄파 조건

그림7. 비쇄파 및 쇄파 조건에서 저항식 파고계 측정원리

위 그림에는 비쇄파 및 쇄파 조건에서 저항식 파고계의 파고 측정 방식에 대해 도시하였음. 앞서 언급한 바와 같이 저항식 파고계는 두 개의 검출선 사이의 저항 차를 수위로 환산하므로, 공기가 유입(공동)된 연직 높이를 뺀 저항값을 파고로 측정하게 됨. 따라서 공기유입이 발생하지 않은 비쇄파 조건과 공동 현상이 발생한 쇄파 조건의 파고 높이가 다르며, 쇄파 조건의 경우 공동의 연직 높이를 뺀 만큼의 값( $\eta = \eta_1 + \eta_2$ )을 파고로 기록함.

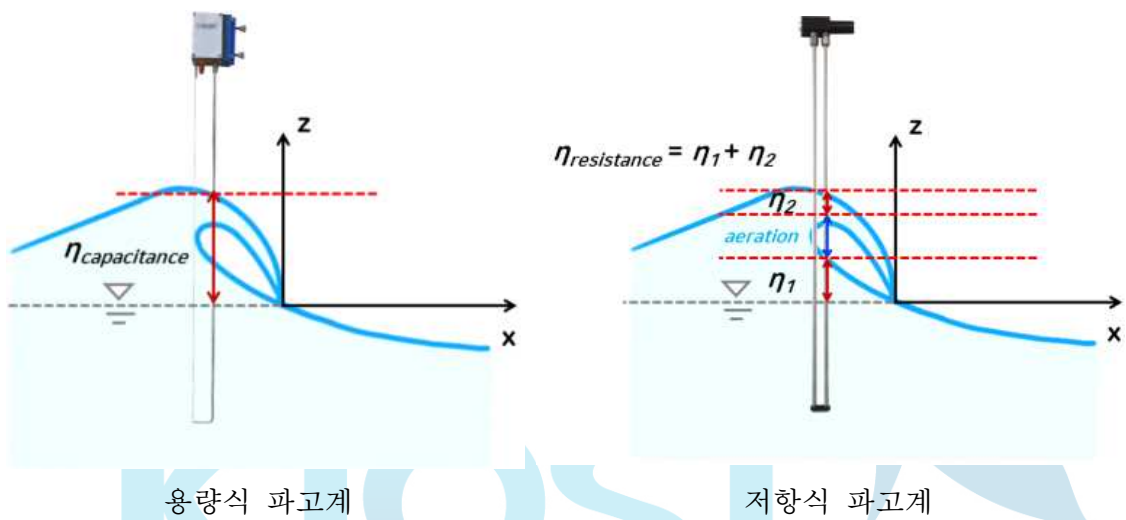
### 3) 용량식 및 저항식 파고계 비교

앞 절에서 살펴본 바와 같이 용량식 파고계와 저항식 파고계의 측정원리에는 차이점이 있으며, 아래 표에 두 파고계의 특성을 비교하여 도시했음. 요약해서 서술하자면 용량식 파고계는 축전된 정전용량을 수위로 환산하고 저항식 파고계는 검출선 간의 저항 차를 수위로 환산하는 것이 가장 큰 특징이며, 용량식 파고계는 응답성과 항온특성이 뛰어나 한번의 검교정으로 비교적 오래 측정할 수 있으나 비교적 측정범위가 적음. 저항식 파고계의 경우 분해능이 우수하고 측정범위가 넓다는 특징이 있으나, 염분 및 온도에 민감하여 매일 검교정을 실시한 후 실험을 수행해야 한다는 점이 있음.

용량식과 저항식 파고계의 이러한 차이를 적절히 이용하면 관찰하기 어려운 쇄파조건에서 공기유입량을 관찰할 수 있음. 아래 그림에는 용량식과 저항식 파고계의 측정방법의 차이를 이용한 공동(aeration)의 연직 높이를 관찰하는 방법에 대해 도시하였음. 앞서 나타낸 바와 같이 용량식 파고계는 검출선에 접촉하는 수위의 최대 높이( $\eta$  capacitance)를 파고로 환산하고, 저항식 파고계는 양 측 검출선의 저항의 차로부터 공기

유입 높이를 뺀 값( $\eta_{resistance} = \eta_1 + \eta_2$ )을 파고로 환산함. 따라서 용량식 파고계의 관측 파고( $\eta_{capacitance}$ )에서 저항식 파고계의 관측 파고( $\eta_{resistance}$ )를 빼면 유입된 공기(aeration)의 연직 높이를 유추할 수 있음.

$$aeration = \eta_{capacitance} - \eta_{resistance} \quad (1)$$



용량식 파고계

저항식 파고계

그림8. 공기가 유입된 쇄파 조건에서 파고계 비교

표 4. 용량식 파고계와 저항식 파고계의 특성 비교

	용량식 파고계	저항식 파고계
계측 원리	검출선에 축적된 정전용량을 수위로 환산	검출선 간의 저항의 차이를 수위로 환산
검교정	실험 수행 전 1회	1일 1회 * 일교차 큰 경우 1일 2회
최대 계측범위	평균	뛰어남
분해능	평균	뛰어남
최소 계측범위	낮음	뛰어남
응답성	뛰어남	낮음
항온 특성	뛰어남	낮음
설계 유연성	뛰어남	낮음

## 3장. 파고계의 활용

### 가. 캘리브레이션

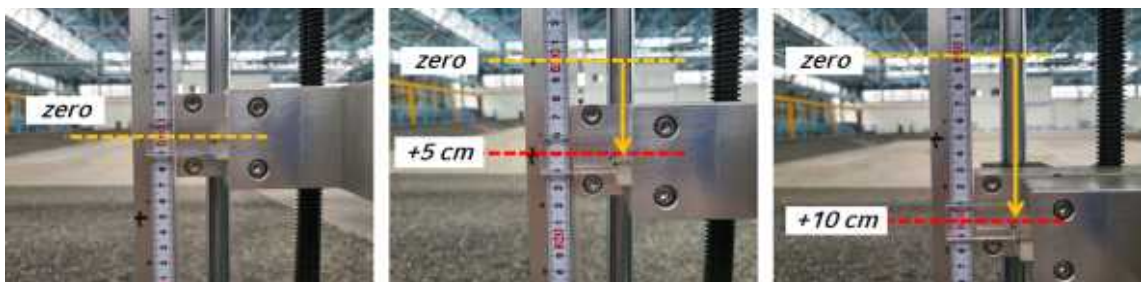
거의 모든 수리모형실험에서 파고의 계측이 수행되며, 해양에서 발생하는 외력의 주요 인자이므로 신뢰성 및 정확도가 높은 자료를 획득하기 위해 실험 전 반드시 파고계의 검교정(calibration)을 수행할 필요가 있음. 파고계 캘리브레이션은 아래의 순서와 같이 수행됨.

[ 파고계 캘리브레이션 순서 ]

- 1) 파고계 교정장치에 파고계 설치
- 2) 영점(zero) 교정
- 3) 일정 간격으로 지그를 동작시켜 물리적인 변위(수위 변동) 발생
- 4) 수위와 계측 전압 기록
- 5) 보정 계수(calibration factor) 산출

$$F_{cal} = \eta_{elevation} / V_{measured}$$

- 6) 데이터독취 장치(DAQ)에 보정 계수 입력
- 7) 영점 셋팅 후 수위변화량 및 전압값 최종 비교검토
- 8) 실험 수행



(a)  $\eta_{elevation}=0$  cm

(b)  $\eta_{elevation}=5$  cm

(c)  $\eta_{elevation}=10$  cm

그림9. 파고계 검교정 시 수위 변화( $\eta_{elevation}$ ) 장면

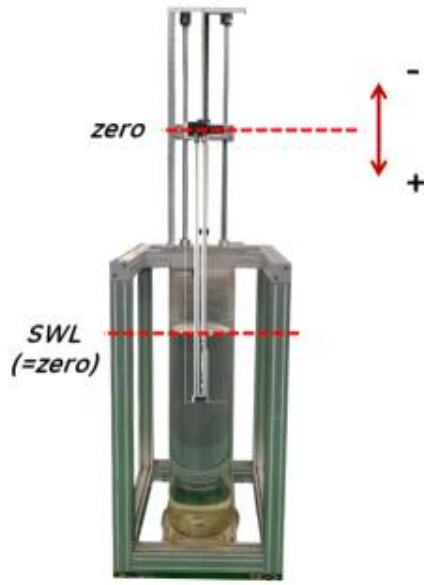


그림10. 파고계 검교정(calibration) 장치

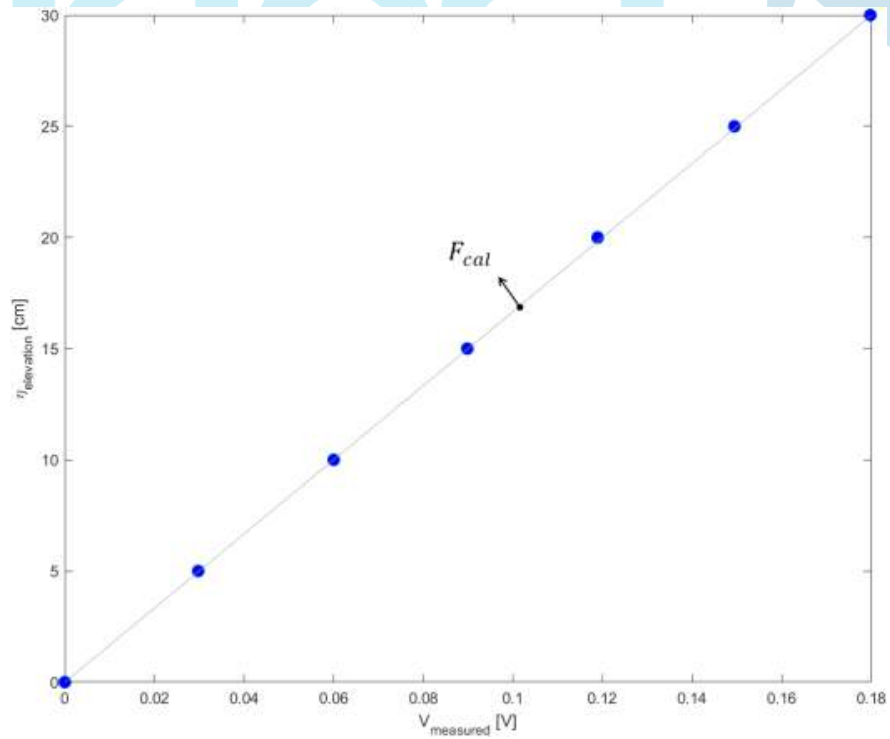


그림11. 파고계 캘리브레이션 결과

그림10에는 수리실험동에서 사용하는 파고계 검교정 장치를 도시했음. 그림과 같이 zero로 표시된 빨간선에 위치한 파고계를 DAQ에서 먼저 영점교정하고, 그 후 그림9와 같이 0, 5, 10 cm의 일정간격으로 파고계를 물 속에 담그면서 계측되는 전압값을 기록하여 수위변화량( $\eta_{elevation}$ )과 계측 전압 값( $V_{measured}$ )의 비율로부터 보정 계수( $F_{cal}$ )를 산정하게 됨. 그림11에는 실제 검교정 장치를 통해 계측된 전압 값과 수위변화량 그래프를 도시했으며, 이때 수위변화량은 0에서 30 cm까지 5 cm의 간격으로 설정하여 계측하였음.

## 나. 실험 사례

용량식 파고계와 저항식 파고계를 복합적으로 사용하여 경사식 호안 전면에서 쇄파의 형태에 따른 충격쇄파압을 분류하는 연구(Na et al., 2022)가 수리실험동 2차원 조파수조 I에서 수행된 바 있음. 아래 그림에는 해당 실험을 위한 파고계 및 모형 배치도를 도시했으며, 그림에서 SE01~SE12는 용량식 파고계를, VE01~VE11은 저항식 파고계를 나타냄. 여기서 SE01~SE03은 조파기에 가까운 심해 측 파랑을 관측하는 용도이고, SE04~SE06은 모형에 진입하는 천해역에서의 파랑을 관측하는 용도로 설치하였음. 이때 파고계를 각각 3대씩 배치한 것은 입사파의 스펙트럼 분석 시 범용적으로 활용되는 3점법을 사용하기 위함임. 한편 경사식 호안의 시작점(toe)에서부터 마루높이에 위치한 평탄부까지 용량식 파고계(SE07~SE12)와 저항식 파고계(VE01~VE11)가 수조의 폭 방향으로 나란히 배치되어 있음. 이는 앞서 살펴본 바와 같이 쇄파 조건에서의 공동(aeration)현상 및 입사파랑별 침투깊이 피크의 차이를 관찰하기 위함임. 그림13에는 해당 실험에서 파고계 배치 장면을 도시하였음.

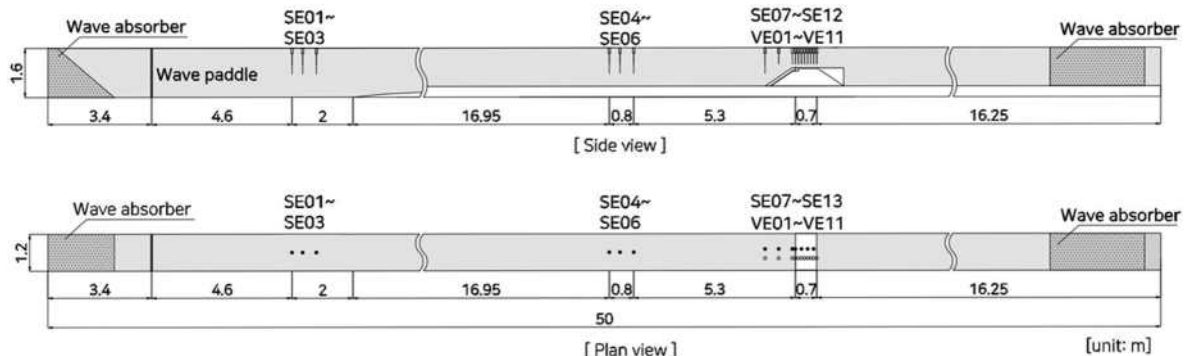


그림12. 파고계 배치도 (한국해양과학기술원 2차원조파수조 I)



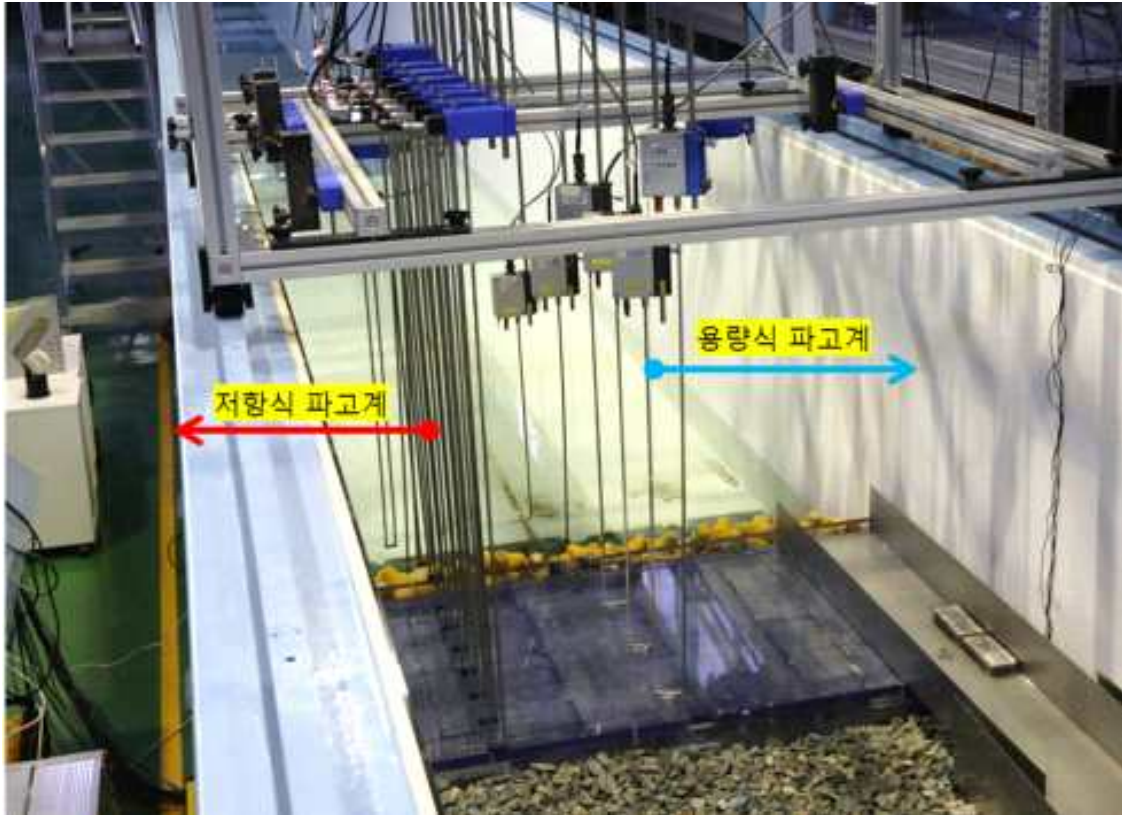


그림13. 용량식 및 저항식 파고계 설치 장면

아래 그림에는 실험에서 측정된 파고자료를 비교하여 도시하였음. 이때 작용한 실험 파 조건은 규칙파이며, 주기( $T$ )가 1.8초, 파고( $H$ )가 18 cm임. 파고가 측정된 지점은 경사식호안이 시작되는 toe부분이며(시계열 왼쪽아래 참조), 용량식 파고계 SE07과 저항식 파고계 VE01을 비교하였음. 그래프에서 검은색 실선은 저항식 파고계( $\eta_{resistance}$ )를 파란색 실선은 용량식 파고계( $\eta_{capacitance}$ )를 나타내며, 빨간색 실선은 용량식 파고계와 저항식 파고계 관측 값의 차( $Deviation = \eta_{capacitance} - \eta_{resistance}$ )를 의미함.

그림14에서 저항식 파고계와 용량식 파고계의 침두값에 큰 차이가 없는 것으로 미루어보아 구조물 toe 부근에서 해당 입사파조건( $T=1.8$  s,  $H=18$  cm)에 공기의 유입이 적은 것으로 판단됨. 반면 경사식호안의 사면( $\tan\alpha = 1/1.5$ )의 중간지점에서의 시계열을 도시한 그림15에서는 용량식 파고계의 침두값이 저항식 파고계보다 비교적 크게 관측된 것을 확인할 수 있고, 빨간색 그래프( $Deviation$ )을 통해 편차가 큰 것을 알 수 있음. 편차의 평균 값은 약 3 cm로 용량식 파고계로 관측된 파고가 저항식 파고계보다 3 cm 더 큰 것을 의미하며, 이를 기포분율( $(\eta_{capacitance} - \eta_{resistance}) / \eta_{capacitance}$ )로 환산하면 약 0.29로 비교적 큰 공기유입(high-aeration) 상태인 것을 예측할 수 있음 (Bullock et al., 2007).

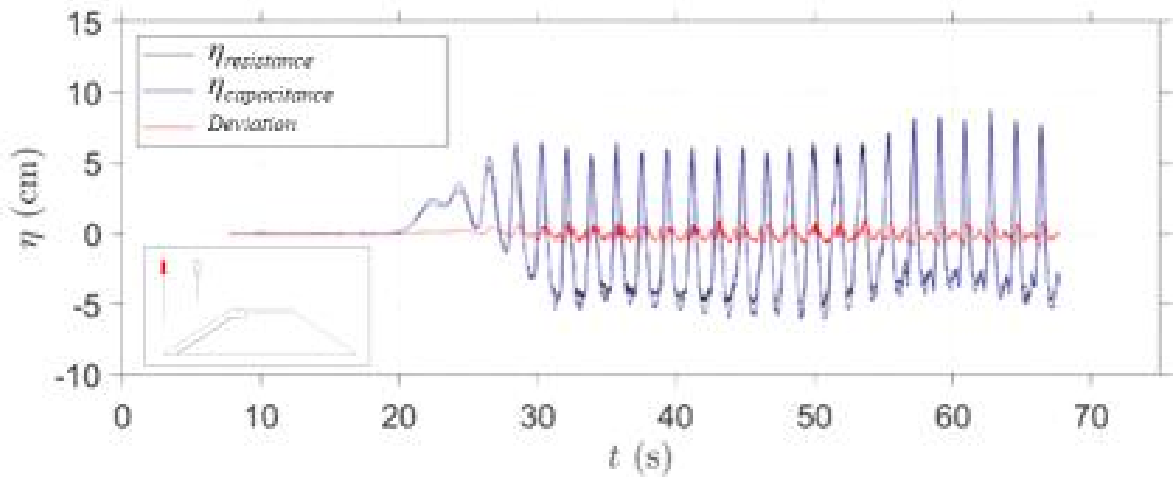


그림14. 경사식호안 toe 부분에서의 계측 파고 비교 (그림 내 왼쪽 아래 도면 참조)

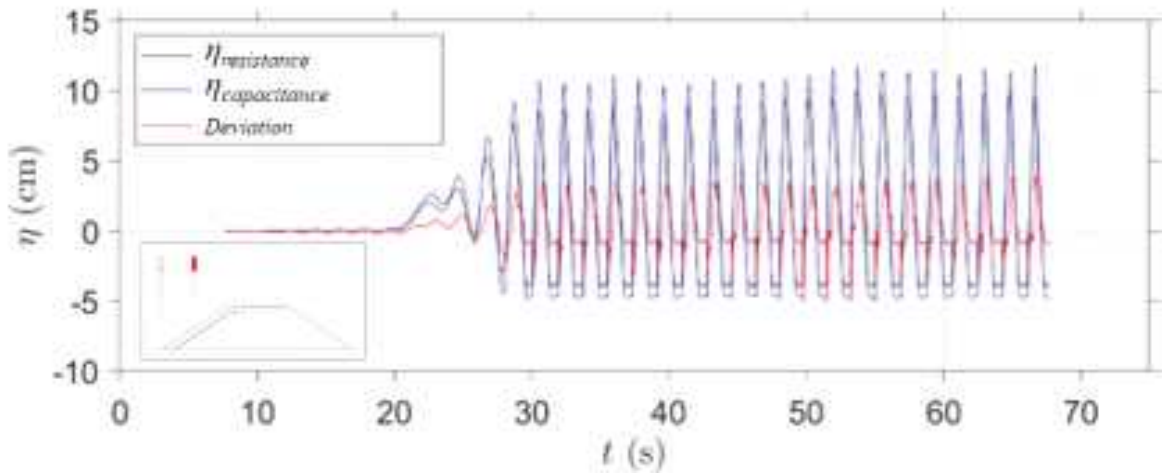


그림15. 경사식호안의 사면부에서의 계측 파고 비교 (그림 내 왼쪽 아래 도면 참조)

## 4장. 결론

본 매뉴얼에서는 해안공학 및 해양공학 분야의 수리모형실험 연구에서 가장 중요한 요소인 파랑을 계측하는 파고계의 종류와 활용방법에 대해 요약하여 정리하였음. 실험실에서는 선형성과 정확도를 고려하여 용량식 및 저항식 파고계를 보편적으로 활용하고 있으며, 각 파고계의 특성 및 활용사례를 제시함으로써 실험연구 구성 단계에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대됨. 향후 계측 목적에 따른 파고계 설치방법 및 파고계를 수조 내에 설치할 때의 고려사항 등에 대해 추가로 기술매뉴얼을 작성할 계획임.



## 참고문헌

- Bullock, G. N., Obhrai, C., Peregrine, D. H., & Bredmose, H. (2007). Violent breaking wave impacts. Part 1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coastal Engineering*, 54(8), 602-617.
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.
- Na, B., & Son, S. (2021). Void fraction estimation using a simple combined wave gauge system under breaking waves. *Ocean Engineering*, 241, 110059.
- 나병준, & 고행식. (2022). 기포영상유속계와 복합파고계를 활용한 경사식 호안 전면에서 쇄파의 형태에 따른 충격쇄파압의 분류. *한국해안·해양공학회논문집*, 34(4), 119-127.

