



깊이카메라를 이용한 파고장 계측 시스템의 구축

김호용¹·전찬일²·서정화^{1,†}
충남대학교 선박해양공학과¹
성균관대학교 융합의과학과²

Development of Wave Height Field Measurement System Using a Depth Camera

Hoyong Kim¹·Chanil Jeon²·Jeonghwa Seo^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Department of Health Sciences and Technology, Sungkyunkwan University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The present study suggests the application of a depth camera for wave height field measurement, focusing on the calibration procedure and test setup. Azure Kinect system is used to measure the water surface elevation, with a field of view of 800 mm × 800 mm and repetition rate of 30 Hz. In the optimal optical setup, the spatial resolution of the field of view is 288 × 320 pixels. To detect the water surface by the depth camera, tracer particles that float on the water and reflects infrared is added. The calibration consists of wave height scaling and correction of the barrel distortion. A polynomial regression model of image correction is established using machine learning. The measurement results by the depth camera are compared with capacitance type wave height gauge measurement, to show good agreement.

Keywords : Depth camera (깊이카메라), Wave height gauge (파고계), Calibration (교정 시험)

1. 서론

선박해양공학 분야에서는 수면파와 관련한 문제의 비중이 절 대적이다. 연구실에서의 모형 실험이나 실해역의 관측을 통해 수면파 문제를 해석할 때에는 파고, 주기, 파향, 진행 속도 등의 정량적인 파랑 정보를 얻어야 하는데, 이를 위해 시간, 공간에 따른 수면 높이의 변화를 계측하게 된다. 계측된 수면파 높이 변화 정보는 규칙파 중 시험에서 파고를 이용한 운동응답을 구 하는데 이용할 수 있고 (Kim et al., 2014; Park et al., 2014), 불규칙파 중 시험의 경우에는 시계열 파고 변화의 스펙트럼 분석을 통해 대상 파형의 주파수 별 파고 분포와 유의파고, 모달 주기를 알 수 있다 (Goo et al., 1994; Jung et al., 2004). 이 외에도, 선박이나 해양구조물 주위의 교란된 수면의 계측을 통해 수면파와 구조물의 상호작용을 연구할 수 있다 (Suh & Ji, 2006; Lee et al., 2013).

위의 연구들과 관련하여, 그간 파고를 계측하기 위해 다양한 기법이 개발되어 왔다. 가장 자주 사용되는 파고 계측 시스템으

로는 용량식 파고계, 서보식 파고계, 초음파식 파고계가 있다 (Kim et al., 1996). 이들은 모두 점계측(pointwise) 방식으로, 한 지점의 시간에 따른 파고 변화를 계측하는데 목적이 있다. 따라서 전체적인 수면파의 분포를 계측하려면 복수의 계측기가 필요하다는 문제가 있다 (Kim et al., 2001; Metcalf et al., 2006).

최근 광학 센서 기술의 발달로 인해 포인트클라우드(point cloud)의 개념으로 공간상의 물체 분포를 인식하는 기술이 적용 되고 있다. 이는 장애물로 인식된 지점들을 공간상의 좌표군으로 나타내는 방식으로, 라이다(lidar), 깊이카메라(depth camera)와 같은 장비들이 다양한 물리 현상의 계측에 이용되고 있다 (Park et al., 2011; Deems et al., 2013). 이들 센서를 수면파 계측에 사용할 경우, 수면파의 3차원 분포, 즉 계측면 전체의 파고장(wave height field)을 한번에 얻어낼 수 있게 된다. 기존의 점계측 방식의 데이터가 한 지점에 한해 시간에 따른 파고 변화만을 제공해온데 비해, 공간에 따른 수면파 변화를 함께 분석하여 실험 데이터의 수준과 해석의 자유도가 높아질 것으로 기대된다.

포인트클라우드 구현을 위한 센서 중 깊이카메라는 라이더에 비해 가격이 싸고 하드웨어가 간단하다는 장점이 있어 비전인식 관련 분야에서 널리 사용되고 있다. 선박해양공학분야에서는 수면파 계측에 대해 깊이카메라를 도입한 사례가 있다 (Toselli et al., 2019). 일반적인 깊이카메라가 적외선을 이용하기 때문에 수면에서 반사가 되지 않는 문제가 있어, 물의 투명도를 떨어뜨리기 위해 수성 페인트를 섞어 실험하였다. 그리고 특정 지점에서 파고계의 계측 결과와 비교하여 깊이카메라도 신뢰성 있는 수면파 계측이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 Toselli et al. (2019)의 연구에 더하여, 조파수조 환경에서 깊이카메라를 이용하여 수면파를 계측하기 위한 일련의 교정 및 실험 수행 과정을 제안하였다. 논문은 깊이카메라와 수조 환경의 구축, 교정시험 절차, 규칙파 중에서 파고장 계측 결과의 분석, 결론 순으로 구성되었다.

2. 실험 구성

2장에서는 실험에 사용된 깊이카메라의 상세 내용과 개발 환경, 조파수조의 구성, 수면파 계측 시험을 위한 추적입자의 선택을 다룬다.

2.1 깊이카메라

실험에 사용된 깊이카메라는 Azure Kinect (Microsoft, Redmond, WA)이다. Fig. 1은 Azure Kinect의 형상과 센서 배치도이다. 해당 장비는 적외선 Time-of-flight 기반의 깊이카메라 센서에 더하여 일반 가시광선 영역의 카메라, 방향 추적 가능한 7개의 마이크로폰, 6자유도 운동의 계측이 가능한 관성 계측 장치(Inertial measurement unit, IMU)를 갖추었다.

Azure Kinect에 내장된 관성 계측 장치는 중력의 방향을 감지하는데 이용하였다. 장비를 수면에 수직으로 정렬한다면, 내장된 가속도계에서 장비의 길이 방향 축이 중력방향과 일치하여 해당 방향의 가속도계에 중력가속도의 값이 나올 것을 기대할 수 있다.

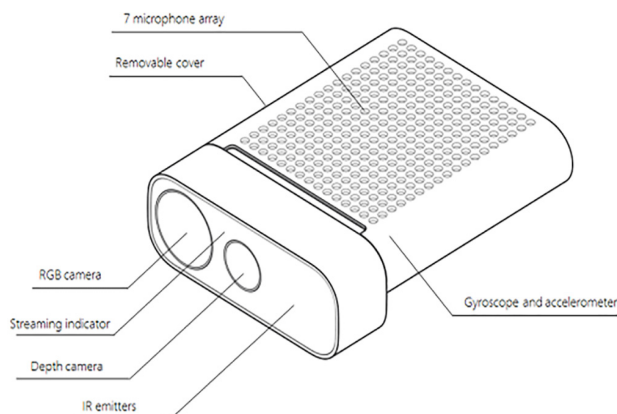


Fig. 1 Sensor arrangement of Azure Kinect

Table 1 Depth camera supported operating modes

Mode	Resolution (Pixels)	Field of View	Maximum Frame Rate (Hz)	Operating range (m)
NFOV Unbinned	640×576	75°×65°	30	0.5 - 3.86
NFOV 2x2 Binned	320×288	75°×65°	30	0.5 - 5.46

적외선 Time-of-flight(ToF)는 Azure Kinect에 설치된 적외선 방사기에서 적외선을 방사, 전방의 장애물을 맞고 돌아오기까지의 시간을 계측하여 거리를 추정하는 방식이다. 다만 방사된 적외선 신호가 방사 순간의 시간정보를 포함해야 해서 연속적인 적외선 방사는 불가능하고, 1초에 최대 30회의 신호를 방사하도록 설계되었다. 따라서 Azure Kinect를 통해 깊이이미지(depth image)는 최대 30 Hz로 얻어진다. 이는 일반적인 파고계에 비하면 다소 낮은 값이나, 한 번에 넓은 영역의 파고 데이터를 구한다는 장점과, 수조시험에서는 0.5 - 3초 영역의 주기의 수면파를 주로 다룬다는 점을 감안하면, 전체적인 파형 분포를 구하기 위한 시험의 목적으로는 적합한 수준으로 판단하였다.

깊이카메라에 적용한 작동 조건을 Table 1에 나타내었다. 깊이카메라는 1024×1024 픽셀(pixel)의 깊이 센서 상의 각 픽셀에 대해 카메라에서 인식된 물체까지의 깊이 정보를 1 mm 단위로 기록한다. Azure Kinect의 구동 설정에서 화각과 정확도를 사용자가 선택할 수 있는데, 본 연구에서는 계측면의 왜곡이 작도록 가장 좁은 75°×65° 화각(Narrow Field of View, NFOV)을 갖도록 설정하였다. 그리고 데이터의 잡음을 줄이기 위해 Binned 조건을 설정, 한 픽셀의 깊이 정보를 주위와 비교하여 유효성을 검증하도록 하였다. 수면파는 연속적인 물리현상이므로, 이렇게 주위 픽셀과의 비교를 통한 검증이 계측 결과의 잡음 수준을 낮춰 실험 정확도 향상에 좋은 효과를 줄 것으로 보였다. Binned 조건의 적용 시 계측면에서 공간해상도는 320×288 픽셀로 줄어든다.

화각이 정해지면 깊이카메라와 수면간의 거리에 따라 관측 영역의 면적이 결정된다. 깊이카메라의 유효 계측 거리는 0.5 - 3.86 m이다. 따라서 최대 파고 조건에서 깊이카메라와 수면간의 거리는 0.5 m 이상을 유지해야 한다.

2.2 조파 수조

실험은 충남대학교 2차원 조파수조를 이용하여 수행되었다. 조파수조는 길이 18 m, 폭 1.2 m로, 수심은 1 m 이하에서 조절 가능하다. 본 연구에서는 0.7 m의 수심을 적용하였다. 본 연구에서 수면파와 Azure Kinect의 거리는 600 mm로 설정하였다. Fig. 2는 Azure Kinect를 이용한 수면파 계측의 배치도이다.

조파기는 피스톤 타입으로, 조파판이 전후로 이동하며 수면파를 생성한다. 작동 주기는 0.35초에서 1.35초로, 무한수심 조건에서는 파장(λ) 0.19 m에서 2.8 m에 대응된다. 본 조파수조에서 사용하는 통상적인 실험 모형의 길이(L)가 1 m 내외임을 고려하면, 파장비(λ/L) 0.2에서 3.0 정도의 영역이 된다.

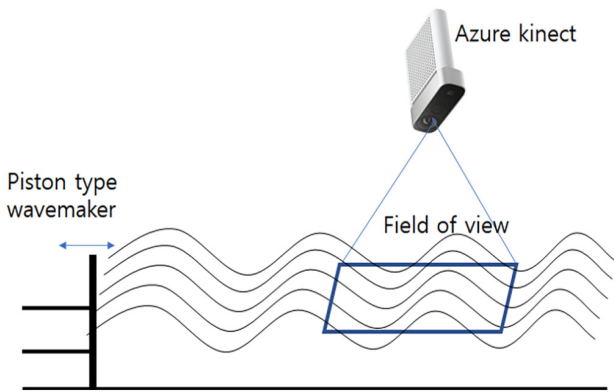


Fig. 2 Arrangement of the wave flume and Azure Kinect for wave height field measurement

파고 계측의 비교를 위해 용량식파고계(AWP-24-2, AKAMINA Technologies, Ottawa, Canada)를 조파기에서 8 m 떨어진 위치에 배치하여 조파기 제어 주기, 스트로크에 대한 수면파를 계측하였다. 그리고 용량식 파고계의 계측 지점에 Azure Kinect의 계측면 중심이 위치하도록 배치하여 동일 파조건에 대한 계측을 수행하였다. 계측 시간은 반사파가 돌아와 계측되어 규칙파 형이 유지되지 않을 때까지로 정하였다. 용량식 파고계와 깊이 카메라 계측 실험은 따로 수행하여 두 계측 시스템간의 결과 간섭이 발생하지 않도록 하였다.

2.3 추적 입자

Azure Kinect의 깊이카메라 센서는 적외선 반사광을 이용하므로, 적외선이 흡수되는 수표면을 감지할 수 없다. 따라서 수면에서 적외선을 반사할 수 있는 조치를 취해야 한다.

Toselli et al. (2019)의 연구에서는 수성페인트를 섞어 물을 불투명하게 만들어 수면을 인식하였다. 사전시험을 통해 확인된 수성페인트의 한계는 다음과 같다.

- (1) 수성페인트의 농도가 진해질수록 적외선의 반사 비율이 증가하는 성질을 이용하기 때문에, 특정 페인트 농도에서 수면이 인식되는게 아니라 페인트 농도 증가에 따라 수면이 무한대에서 점차 실제값에 가깝게 인식됨(Fig. 3)
- (2) 물의 물성치, 특히 점성에 영향을 줄 수 있음
- (3) 모형선에 대한 실험이 이뤄지는 대형 수조에 적용하기에는 페인트의 양과 회수 방법 모두 실현이 어려움

위의 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 수면에 부유하는 추적입자를 활용하였다. 이는 수면에서 적외선이 반사되므로 수면 위치의 명확한 인식이 가능하고, 실험 후 회수가 가능하다는 장점이 있다. 대량사용을 고려하여 본 연구에서는 식용 송화가루((주)씨케이, 서울)를 사용하였다. 조파수조에서는 실험 후 물을 교체할 수 있어 유기물의 사용이 가능하지만, 수질 관리가 필요한 예인수조와 같은 대형 시설에서는 산화알루미늄 등을 추적입자로 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

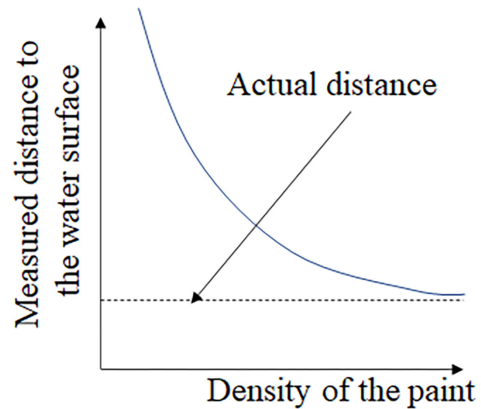


Fig. 3 Water surface recognition by infrared depth camera with respect to the density of the paint

예인수조의 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV) 시험과 유사하게, 한번 뿌린 추적 입자는 살포 후 바로 퍼져나가지 않기 때문에 하루 동안 실험을 수행하는 중에는 입자의 추가 살포가 필요하지는 않았다.

3. 교정 시험

Azure Kinect의 깊이카메라에서 얻을 수 있는 깊이 정보는 센서의 픽셀 상 위치(X, Y)에 대해 센서에서 촬영면의 대상 지점까지의 거리(h)이다. 그리고 실험 환경에서 수면파에 대해서는 정수 중 수면의 물리적 위치(x, y)에 대한 수면높이(η)이므로, 교정함수 f는 식 (1)과 같이 구성된다.

$$(x, y, \eta) = f(X, Y, h) \tag{1}$$

교정함수를 얻기 위해서는 물리적 위치를 알고 있는 대상이 깊이카메라에서 어떤 위치에 나타나는지를 확인하고, 서로의 연관관계를 수식으로 표현해야 한다. 3장에서는 교정함수의 구성, 그리고 교정함수를 얻기 위한 교정시험의 설계와 결과를 다룬다.

3.1 교정 시험 설계

본 연구와 유사하게 광학적 이미지 촬영을 하는 입자영상유속계의 교정시험 절차를 참고하여 교정시험을 설계하였다(Oh et al., 2007). 왜곡이 없는 2차원 이미지 촬영에서는 픽셀 상 위치와 실제 물리적 위치가 선형적 관계를 가지므로, 식 (2)와 같은 교정함수를 기대할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \tag{2}$$

하지만 넓은 화각의 카메라를 사용하면 Fig. 4와 같이 X, Y와 x, y의 관계에서 배럴왜곡(Barrel distortion)이라고 하는 현상이 발생하여 중앙부가 확대되어 사각형이 원형에 가깝게 왜곡된 모습으로 영상이 얻어진다.



Fig. 4 Types of image distortions

배럴이나 핀쿠션 왜곡(Pincushion distortion)이 발생하는 경우, 픽셀과 실제 위치 관계에 비선형성이 발생하므로 X, Y에 대한 다항식으로 교정함수를 구성하게 된다 (Oh et al., 2007; Baek et al., 2011).

본 연구에 사용된 깊이카메라 시스템의 경우, NFOV 조건의 적용 시 X, Y와 x, y의 관계에서 왜곡이 작게 나타났다. 따라서 약한 수준의 배럴왜곡에 대한 교정이 필요한 것으로 보였다. 영상의 보정이 필수인 PIV 교정시험에서는 3차 다항식을 적용하는데 (Seo et al., 2014), 본 연구에서도 같은 차수의 다항식 매핑함수(mapping function)를 도입하였다.

앞의 영상 평면 상 위치의 교정과 같은 이유로, h와 η의 관계식에도 η = ch의 선형적인 관계가 적용될 수 있는지를 교정 시험을 통해 확인해야 한다. 그리고 비례상수 c가 X, Y에 대해 독립인지를 함께 확인할 필요가 있다.

위의 사항을 고려해, 본 연구의 교정시험 식은 식 (3) - (5)와 같이, h와 η에 대해서 1차식으로, x, y에 대해서는 각각 X, Y에 대해서는 3차 다항식으로 구성하였다.

$$\eta = c(X, Y)h = (c_1X + c_2Y + c_3)h + c_4 \quad (3)$$

$$x = a_{30}X^3 + a_{21}X^2Y + a_{20}X^2 + a_{12}XY^2 + a_{11}XY + a_{10}X + a_{03}Y^3 + a_{02}Y^2 + a_{01}Y + a_{00} \quad (4)$$

$$y = b_{30}X^3 + b_{21}X^2Y + b_{20}X^2 + b_{12}XY^2 + b_{11}XY + b_{10}X + b_{03}Y^3 + b_{02}Y^2 + b_{01}Y + b_{00} \quad (5)$$

3.2 수면 인식 시험

먼저 식 (3)의 계수를 얻기 위해 Fig. 5와 같이 수면에 수직으로 Azure Kinect를 배치하고, 이를 상하로 이동시켜가며 수면까지의 거리를 계측하였다. 기본 거리는 600 mm로, 상하 변위는 총 160 mm를 적용하면서 각 픽셀마다 얻어진 h와 η를 비교하였다. Azure Kinect는 리드스크류(lead screw)에 장착되어 상하로 이동되었고, 이때의 고정 불확실성은 ±0.5 mm이다.

Fig. 6(a)에 보인 바와 같이, 깊이카메라의 계측면은 육각형 모양으로 얻어진다. 계측면 상에서 12개의 대표위치를 지정해 각 지점에서 실제 수면과의 거리(η)와 계측된 깊이값(h)을 비교하여 Fig. 6(b)에 나타내었다.

h-η의 비교 결과, c₁에 대하여 X 위치는 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 c₁은 0으로 볼 수 있다. 하지만 Y 위치에 따른 변화는 확연히 나타났으므로, c₂, c₃를 구해야 한다. Fig. 6(b)에서

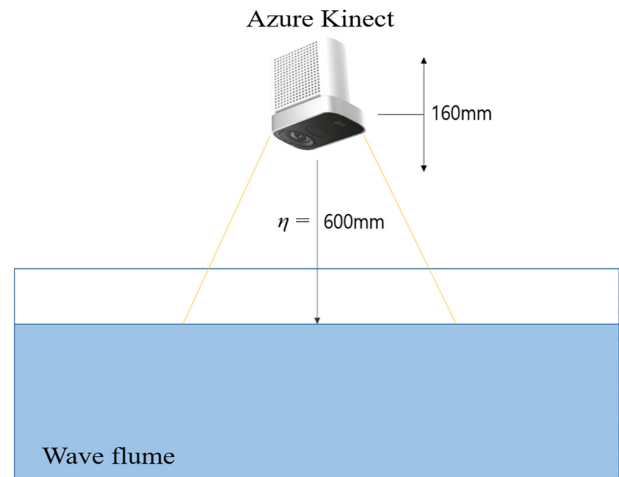
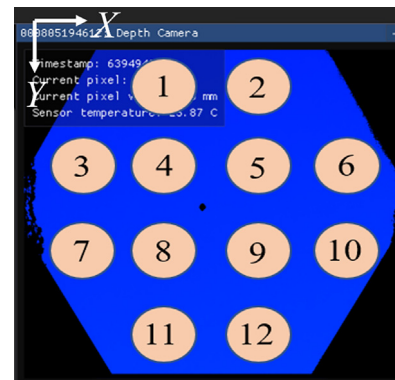
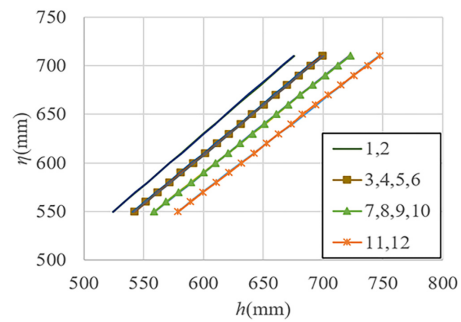


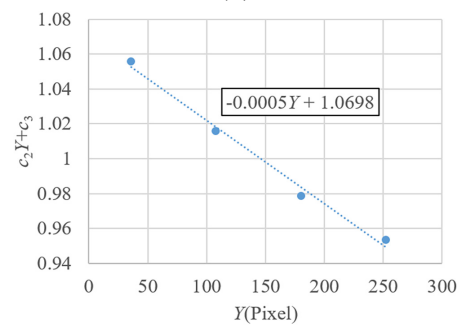
Fig. 5 Arrangement of distance calibration



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Distance calibration: (a) location of probes on the field of view; (b) actual distance versus measured depth; (c) slope of distance calibration with respect to Y position

추세선의 Y 절편도 얻어졌으므로, c_4 또한 존재하는 것으로 확인된다. 이는 깊이카메라 센서가 X 축을 기준으로 경사져 배치된 상황으로 볼 수 있다.

전체적으로 h 와 η 가 일차식의 관계를 보였기 때문에, 일차함수를 가정한 식 (3)은 적절한 것으로 판단된다. 계측 지점의 Y 값에 따라 식 (3)의 계수가 달라지는데, 본 연구에서는 다음과 같이 계측점 위치에 따른 h 와 η 의 관계가 얻어졌다.

$$(1,2): \eta = 1.0559h - 3.802 \quad (6)$$

$$(3,4,5,6): \eta = 1.0159h - 0.718 \quad (7)$$

$$(7,8,9,10): \eta = 0.9787h + 2.931 \quad (8)$$

$$(11,12): \eta = 0.9536h - 2.061 \quad (9)$$

c_4 는 6 mm의 범위 안에서 Y 값과 무관한 경향을 보였다. 본 시험에서 600 mm 정도의 크기를 갖는 $(c_2Y + c_3)h$ 항에 비하자면 그 크기는 작은 값이므로 교정시험의 편의를 위해 각 위치에서의 c_4 의 평균인 -0.9125 mm로 결정하였다. 이로 인해 얻어지는 파고 계측의 오차는 실제 계측값의 0.5% 이내로 추산된다.

식 (6)-(9)의 내용을 바탕으로 Fig. 6(c)에 $c_2Y + c_3$ 의 관계를 나타내었다. Fig. 6(c)의 추세선 분석 결과, c_2 가 -0.0005 , c_3 가 1.0698 로 얻어졌다. Azure Kinect의 내부 구성을 확인할 수 없어 c_2 의 발생 원인은 알 수 없었지만, 연구실에 보유한 2기의 Azure Kinect에서 같은 결과가 얻어졌기 때문에 이는 생산 과정에서 센서의 정렬이나 센서 계측 신호에서 깊이 정보를 얻어내는 내부 데이터 처리과정의 특성으로 생각되며, 본 연구에서 제안된 절차를 통해 교정될 수 있는 것으로 확인되었다.

3.3 매핑 함수

식 (4), (5)의 같이 다변수 다항식으로 나타나는 매핑함수를 구하기 위한 파이썬(Python) 기반의 커스텀 프로그램을 작성하였다. 기계학습 라이브러리인 사이킷런(Scikit-learn)을 사용하여 16개의 표지의 픽셀 위치 데이터(X, Y)와 표지의 실제 물리적 위치(x, y)의 회귀식을 구성하는 3차 다항식의 계수를 구하였다.

물리적 위치인 x, y 위치를 표시한 교정판을 깊이카메라로 촬영하여 픽셀 이미지상의 X, Y 값과 대응시켰다. Fig. 7은 실험에 사용된 교정시험판이다. 교정시험판은 600 mm × 1500 mm 크기의 광학테이블을 이용하였다. 광학테이블 상에는 25 mm 간격으로 M6볼트가 체결되는 탭이 나 있어, 여기에 25 mm × 25 mm × 30 mm의 표지를 100 mm 간격으로 설치하여 깊이카메라가 높이 변화를 인식하도록 하였다.

사전시험에서 이보다 높이가 낮은 표지들을 이용할 경우, Binned 조건이 적용된 깊이카메라의 높이정보에서 표지의 불연속한 경계가 제대로 인식되지 않는 현상이 나타났다. 다만 실제

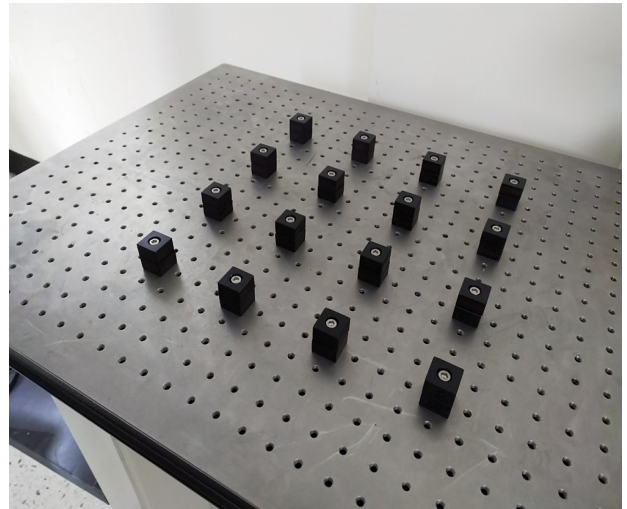


Fig. 7 Arrangement of the calibration target

수면파의 계측은 연속적인 높이 변화를 계측하기 때문에, 불연속면의 경계 포착은 교정시험에서만 고려될 사항으로 판단되어 계측 특성이 수면파 계측에 영향을 주지는 않을 것으로 예상하였다.

Fig. 8은 600 mm 거리에서 깊이카메라로 교정판을 촬영한 결과로, 그래프의 가로, 세로축은 각각 픽셀 위치(X, Y)이다. 교정시험판의 표지영역이 잘 식별되었는데, 여기에 식별된 표지영역의 도심(centroid)을 구하여 이를 표지의 픽셀 상 위치로 지정하였다. 이렇게 구한 16개의 (X, Y)와 (x, y)쌍을 Table 2에 나타내었다. 그리고 이에 대해 식 (4), (5)의 다항식을 통한 근사를 하였다. Table 3은 본 연구에서 얻어진 매핑함수 근사식의 계수이다.

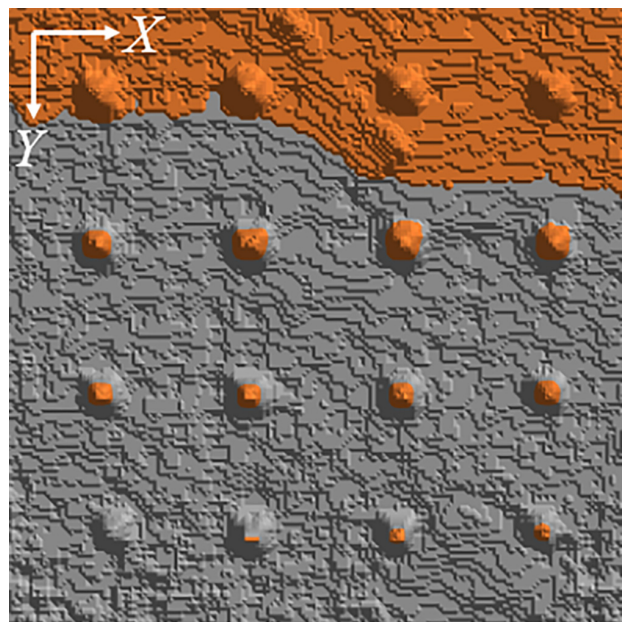


Fig. 8 Depth image of the calibration target

Table 2 Position of the markers on the calibration target

X (Pixel)	Y (Pixel)	x (mm)	y (mm)
18	20	18	20
55	20	118	20
92	20	218	20
128	22	318	20
17	56	18	120
54	56	118	120
92	57	218	120
128	58	318	120
17	93	18	220
54	94	118	220
91	94	218	220
127	94	318	220
18	129	18	320
53	130	118	320
90	130	218	320
125	130	318	320

Table 3 Coefficients of the mapping function

a_{30}	2.94	b_{30}	4.48×10^{-2}	c_1	0
a_{21}	-3.33×10^{-1}	b_{21}	1.61×10^{-5}	c_2	-5.00×10^{-4}
a_{20}	-3.94×10^{-3}	b_{20}	2.92×10^{-4}	c_3	1.07
a_{12}	1.94×10^{-5}	b_{12}	9.37×10^{-7}	c_4	-9.13×10^{-1}
a_{11}	-1.75×10^{-3}	b_{11}	-2.21×10^{-3}		
a_{10}	2.10×10^{-5}	b_{10}	-7.49×10^{-6}		
a_{03}	2.77×10^{-6}	b_{03}	1.68×10^{-5}		
a_{02}	-1.87×10^{-3}	b_{02}	-3.71×10^{-3}		
a_{01}	2.10×10^{-1}	b_{01}	3.01		
a_{00}	0	b_{00}	0		

Table 4 Error of estimated marker position by the mapping function

	Standard deviation (mm)	Maximum error (mm)
x	0.477	1.027
y	0.536	0.994

원래의 표지 위치와 근사식을 통해 구한 표지 위치를 비교하면 매핑함수의 오차를 구할 수 있다. 그리고 이 오차의 표준편차를 이용하면 교정함수의 정확도를 정량화할 수 있다. Table 4는 그 결과이다. 본 연구에서 적용된 깊이카메라 배치에서 하나의 픽셀은 2 mm의 공간해상도를 갖는다. 따라서 매핑함수의 오차가 있더라도 이산화되어 얻어지는 픽셀 단위 수준의 오차로 확대되지는 않을 것으로 생각된다.

4. 규칙파 계측 결과

앞서 확인한 Azure Kinect의 특성을 감안하여 규칙파의 파고를 계측하고, 그 결과를 용량식 파고계와 비교하였다. 계측 파형에 대한 정성적 비교, 시계열의 진폭 비교, 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통한 계측 특성 파악에 대한 정성적 비교를 수행하였다.

4.1 광학 설정의 검토

Azure Kinect의 깊이카메라 설정에는 Binned조건과 Unbinned 조건이 있다. Unbinned 조건에서는 각 화소별로 계측된 깊이 정보를 그대로 제공하는데 반해, Binned 조건에서는 주위 픽셀과의 비교를 통해 잡음을 걸러내어 유효 화소 수는 감소하지만, 계측 오차가 줄어드는 장점이 있다 (Tölgyessy et al., 2021).

본 연구에서는 이를 파고 계측에 적용하여 파경사(H/λ) 1/25, 파고(H) 20 mm의 규칙파 조건에서 Unbinned와 Binned 조건의 계측 결과를 비교하였다. 이는 4.2장에서 다룬 용량식 파고계와 비교를 위한 본 실험보다 작은 파고 조건으로, 더 세밀한 수면파 양상에 대해 두 설정 조건 간의 차이가 나타나지를 확인하기 위함이다. Fig. 9는 그 결과이다. Tölgyessy et al. (2021)의 연구에서 지적된 바와 같이, Binned조건으로 계측된 파형에 비해 Unbinned조건으로 계측된 파형은 잡음이 발생하는 것을 알 수 있다. 7 Hz 근처 주파수 영역에서 국소적인 피크(peak)가 나타났으며, 이는 시계열 자료에서의 파정, 파저의 국부적인 요동에 대응되는 값이다. 두 조건 모두 주파수 영역의 해석에서는 전체 피크(peak)의 대응 주파수는 같은 값(1.4063Hz)을 보였으나, Unbinned 조건의 결과에서는 피크 주파수의 진폭이 Binned 조건 대비 7.2 % 줄어들었다. 따라서 실험에서는 잡음이 작고 실제 수면파에 가까운 양상을 나타내는 Binned 조건을 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다.

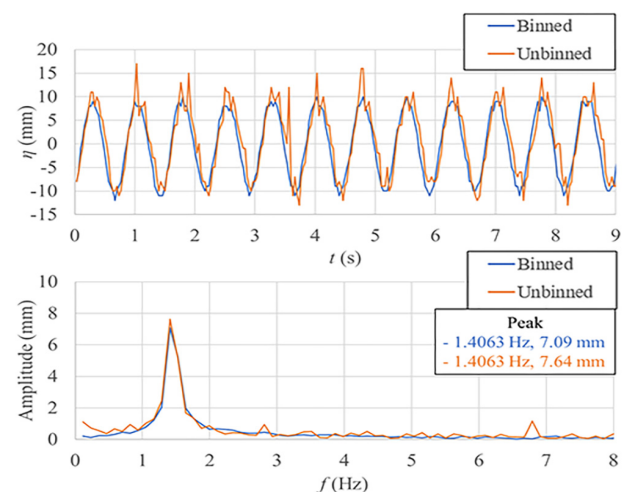


Fig. 9 Comparison of measurement of wave elevation by binned and unbinned setup: time-history (top) and frequency domain (bottom)

4.2 규칙파 실험 조건

조파시스템이 생성 가능한 수면파 영역을 우선 식별하였다. 조파기의 구동에 있어 생성 가능한 최대 파고의 제한이 있게 된다. 짧은 주기의 수면파의 생성에서는 구동 모터가 생성할 수 있는 조파판의 최대 왕복 속도가 제한 요소로 작용하여 파고를 일정 이상 키울 수 없게 되고, 긴 주기의 수면파를 만들 때에는 조파판의 왕복 스트로크(stroke)의 한계 때문에 파고의 제한이 발생한다. 그리고 선형파가 기대되는 장파영역과 쇄파가 일어나지 않는 파경사 영역을 선택하였다.

쇄파 영역에 근접한 큰 파경사 조건에서 추가로 발생할 수 있는 문제로는 계측 신호의 손실과 추적입자의 분산이 있다. 계측 원리가 Azure Kinect의 깊이카메라 센서와 유사한 초음파 파고계의 실험에서는 수면에서 반사된 초음파 신호가 수신부로 돌아오지 못해 신호를 받지 못하는 경우가 있었는데, Azure Kinect에서도 같은 문제가 검증되어야 할 것으로 보였다. 그리고 큰 파경사에서 쇄파현상이 발생할 경우 추적입자가 수중으로 섞여 들어가며 분산되어버리는 경우가 있었다. 따라서 깊이카메라를 이용한 실험에서 1/7에 근접한 큰 파경사각은 신호 손실 비율이 증가하였음을 사전 실험에서 확인하였다.

Table 5 Test cases of regular wave measurement

Designed wave stiffness	H/λ	1/12.5	1/25	1/50
Measured wave height (mm)	H	87.4	76.7	82.7
Period (s)	T	0.75	1.15	1.75
Wave number (rad/m)	k	7.16	3.11	1.62

Table 5는 최종적으로 선택된 본 실험이 수행된 규칙파 조건이다. 파고는 용량식 파고계의 계측값을 기재하였다. 파수와 파경사는 실제 수심 700 mm가 아닌 무한수심을 가정하여 구한 값이기 때문에 실제값과는 차이가 있었으나, 파경사에 의한 전체적인 계측 경향을 확인하기에는 문제가 없었다.

4.3 Azure Kinect-용량식파고계 비교 분석

4.2장에서 선정한 파 조건에 대해 Azure Kinect의 Binned 조건으로 파형을 계측하였고, 3.2장의 교정함수를 적용해 수면파의 변위를 얻었다. 이 중 계측면 중앙의 값을 추출하여 용량식 파고계의 계측 결과와 비교하였다. Fig. 10은 그 결과이다.

Fig. 10의 시계열 파형 비교를 보면 모든 규칙파 조건에서 Azure Kinect로 계측한 파형의 진폭이 용량식 파고계의 계측값

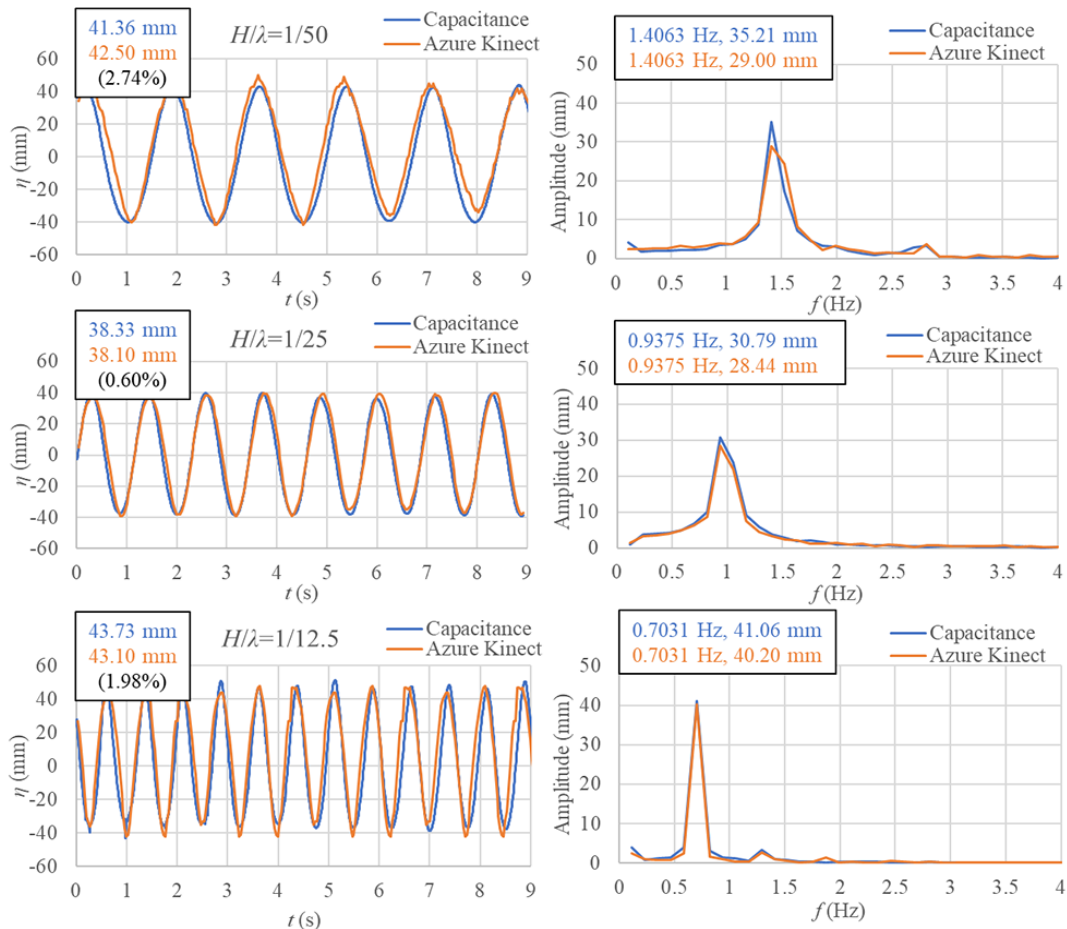


Fig. 10 Comparison of Azure Kinect and capacitance type wave height gauge: time-history (left) and frequency domain (right) with wave stiffness variation

과 최대 2.74 % 이내로 잘 일치하는 것을 확인하였다. Azure Kinect의 수면 높이 계측은 1 mm의 해상도를 갖기 때문에 0.5 mm의 고정 불확실성(Systematic uncertainty)을 갖는다. 이와 더불어 교정시험에서의 고정 불확실성도 0.5 mm로 언어지므로 Azure Kinect를 이용한 파고 계측 자체의 고정 불확실성은 기본적으로 0.7 mm를 내포하고 있어, 실험에서 얻어진 용량식 파고계의 계측값과의 차이는 이해할만한 수준으로 보인다.

파경사의 변화와 실험 결과의 정확도의 관계에 대하여, 초음파의 ToF를 이용한 초음파 파고계의 경우 파경사가 커지면 신호의 손실이 일어나 계측이 불가능해지기도 하는데 Azure Kinect의 깊이카메라 계측에서는 파경사 조건에 따른 유의미한 신호 손실은 발생하지는 않았다.

파경사 조건을 주파수 영역 해석의 해석과 연계하여 결과를 설명하자면 오히려 파경사가 작은 경우에 용량식 파고계와의 차이가 발생하였다. 우선 시계열에서는 파정과 파저 외의 영역, 즉 수면이 상승하거나 하강하는 영역에서 Azure Kinect가 더 큰 값을 보였다. 따라서 주파수 영역에서의 피크가 뚜렷하지 않게 나타났다. 이런 차이는 파경사가 증가할수록 감소하여 $H/\lambda = 1/12.5$ 조건에서는 두 실험 결과가 시계열이나 주파수 영역 양쪽에서 잘 일치하게 되었다. 이는 Azure Kinect가 깊이값을 mm 단위로 이산화하여 기록하기 때문에 점진적인 파고 변화를 나타내는데 약점이 있어, 주파수 영역의 정확한 피크 영역의 식별에 어려움이 있는 것으로 판단된다.

4.4 수면파 중 구조물 주위의 파형 계측

주요 성능을 파악한 Azure Kinect의 사용 예시로, 이를 이용해 규칙파중에 놓인 지름 40.5 mm의 원형 실린더 주위의 수면 파형을 계측하였다. 파 조건은 파고 31 mm, 주기 0.5 s로 설정하였다. 이는 앞에서 시험한 파고 조건에 비해 작은 파형으로, 계측면 안에 2개의 파장이 위치하도록 주기를 정하고, 앞서의 최대 파경사각 1/12.5를 적용하여 얻어진 시험 조건이다. Fig. 11은 그 결과로, 5초 동안 계측된 총 10장의 동일 위상의 파고장을 평균하여 얻었다.

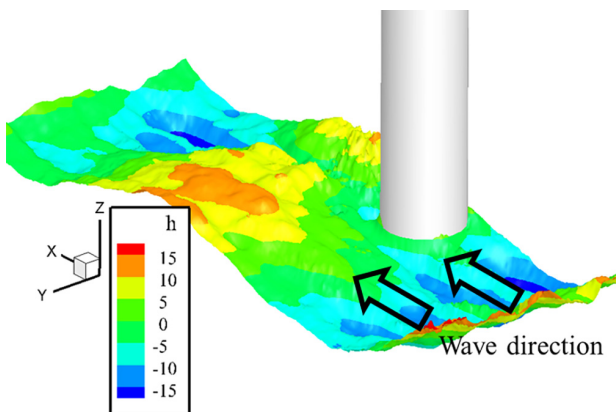


Fig. 11 Example of wave height field measurement around a circular cylinder in regular waves

깊이 이미지에서는 원형 실린더 주위 영역의 파고장 계측 결과로는 원형 실린더의 벽면과 수면을 구분할 수 없었다. Fig. 11에서는 원형실린더의 1.5배 지름의 원기둥으로 원형 실린더 영역을 가렸다. 따라서 Azure Kinect의 활용은 모형에서 떨어진 영역의 파고장 계측에 강점을 가질 것으로 판단되었다.

원형 실린더 주위파고장 계측 결과 전체에서 파저와 파정이 잘 인식되었다. 그리고 수면파가 원형 실린더를 지나면서 파정이 유지되지 못하기 때문에 후류 영역에서는 낮은 파고를 보이는 현상을 관찰할 수 있었다. 다만 본 실험 결과는 Azure Kinect 활용의 예시를 위해 조직된 실험에 대한 것으로, 상세한 물리적 현상의 관찰과 분석을 위해서는 더 세심한 실험 환경의 설정이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 조파수조 시설에서의 파고장 계측을 위해 Azure Kinect의 깊이카메라를 도입하였다. 깊이카메라의 정확한 계측을 위한 교정시험 절차를 깊이값과 계측평면상의 위치에 대해 각각 수행하도록 제안하였다. 그리고 규칙파를 계측하여 그 결과를 용량식 파고계와 비교하였다.

교정시험 결과를 통해 깊이카메라 센서는 픽셀 위치에 따라 실제 거리-깊이값의 차이가 발생함을 확인하였다. 그리고 이를 일차식으로 보정하였다. 이미지 평면 상에서는 배열왜곡이 발생하는 것을 확인하여, 다항식에 기반한 매핑 함수를 적용해 보정하였다. 이 교정 과정을 통해 이미지 상 픽셀 위치와 계측된 거리값을 이용해 실제 물리적 공간의 3차원 위치를 얻을 수 있게 되었다.

규칙파에 대한 파고 계측 결과의 비교에서는 파형과 주파수별 파고의 분석이 이루어졌다. 시계열의 파형이나 주파수 영역 모두 용량식 파고계의 계측 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였는데, 큰 파경사각에서 더 우수한 결과를 보였다. 마지막으로 본 연구에서 제안된 기법의 활용 사례로 원형 실린더 주위의 수면파형을 계측하여 그 결과를 보였다.

본 연구에서 제안된 기법은 넓은 영역의 파형을 한 번에 계측할 수 있기 때문에, 불규칙파중의 반사파나 정속 항주 중인 선박 주위의 켈빈 파형(Kelvin wave pattern)과 같은 수면파 관련 문제에서 이전의 점계측 실험보다 더 많은 정보를 얻어내어 관련 해석 기법이나 물리 현상의 이해에서 큰 발전이 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 충남대학교 혁신지원사업(2019-2020)과 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0001968, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 작성되었습니다.

References

- Baek, G.D., Cheon, S.P., Kim, S.D. & Kim, S.S., 2011. Performance criterion-based polynomial calibration model for laser scan camera. *Korean Institute of Intelligent Systems*, 21(5), pp.555-563.
- Deems, J.S., Painter, T.H. & Finnegan, D.C., 2013. Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59(215), pp.467-479.
- Goo, J.S., Jo, H.J. & Lee, C.H., 1994. Dynamic response analysis of tension leg platforms in multi-directional irregular waves - Frequency domain-analysis. *The Korean Society of Ocean Engineers*, 8(1), pp.23-32.
- Jung, J.S., Cho, D.H., Hwang, J.K. & Cho, Y.S., 2004. Reflection of random waves propagating over rectangular submerged non-porous breakwaters. *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(9), pp.729-736.
- Kim, D.J. et al., 2014. Effects of hull form variations on resistance and seakeeping performance of planing hulls with and without incoming regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.369-379.
- Kim, J., Kim, H.S. & Kim, S.B., 1996. Development of a capacitance-type wave recorder for measuring real-time wave height based on microprocessor technique. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 10(3), pp.162-167.
- Kim, W.J., Van, S.H. & Kim, D.H., 2001. Measurement of flows around modern commercial ship models, *Experiments in Fluids*, 31, pp.567-578.
- Lee, C.H., Choi, C.M., Ahn, J.Y. & Cho, I.H., 2013. Efficiency of wave absorption by the porous of "Taewoo" of Jeju in regular seaway. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 49(2), pp.144-152.
- Metcalf, B., Longo, J., Ghosh, S. & Stern, F., 2006. Unsteady free-surface wave-induced boundary-layer separation for a surface-piercing NACA 0024 foil: Towing tank experiments. *Journal of Fluids and Structures*, 22(1), pp.77-98.
- Oh, J. et al., 2007. Development of algorithm for stereoscopic PIV using normalized cross-correlation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), pp.579-589.
- Park, D.M., Lee, J. & Kim, Y., 2014. Uncertainty study of added resistance experiment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.396-408.
- Park, H.S., Sim, J.S., Yoo, J. & Lee, D.Y., 2011. The breaking wave measurement using terrestrial LIDAR: validation with field experiment on the Mallipo Beach. *Journal of Coastal Research*, 64, pp.1718-1721.
- Seo, J. et al., 2014. Uncertainty assessment of a towed underwater stereoscopic PIV system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(4), pp.311-320.
- Suh, K.D. & Ji, C.H., 2006. Reflection and transmission of regular waves by multiple-row curtainwall-pile breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 18(2), pp.97-101.
- Toselli, F., De Lillo, F., Onorato, M. & Boffetta, G., 2019. Measuring surface gravity waves using a Kinect sensor. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 74, pp.260-264.
- Tölgýessy, M., Dekan, M., Chovanec, I. & Hubinský, P., 2021. Evaluation of the Azure Kinect and Its comparison to Kinect V1 and Kinect V2. *Sensors*, 21(2), Article No. 413.

