

구조물에 작용하는 쇄파의 속도장 측정

최상현^{†*}, 류용욱^{**}

한국원자력안전기술원*
Texas A&M 대학교 토목공학과^{**}

Velocity Field Measurement of Impinging Waves on a Structure

Sanghyun Choi^{†*} and Yonguk Ryu^{**}

Korea Institute of Nuclear Safety*
Dept. of Civil Engineering, Texas A&M Univ.^{**}

Abstract

As the wave impinges on and overtops the structure, a large highly aerated region is created in front of the structure and water splashes on top of the structure. The broken wave in front of the structure and associated green water on top of the structure are highly aerated containing not only a large number of bubbles but also very large sizes of bubbles. In this paper, the velocity field of the highly aerated region and the splashing water on the top is measured using a modified PIV method incorporating the traditional PIV method with the shadowgraphy technique by correlating the "texture" of the bubble images. The velocity fields of a plunging wave impacting on a structure in a two-dimensional wave flume is measured. It is found that the maximum fluid particle velocity in front of the structure during the impinging process is about 1.5 times the phase speed of the wave, while the maximum horizontal velocity above the top is less than the phase speed. It is also found that the dam breaking solution does not work well in predicting the green water velocity.

※Keywords: Velocity field(속도장), Breaking wave(쇄파), Particle image velocimetry(PIV), Bubble image velocimetry(BIV), Green water(청수)

접수일: 2005년 5월 16일, 승인일: 2005년 9월 16일

†주저자, E-mail: schoi@kins.re.kr
Tel: 042-868-0666

1. 서론

극한파(extreme wave)는 파의 충돌을 통하여 엄청난 충격력을 발생시키며 해양구조물에 심각한

손상을 미쳐왔다 (Buchner 1995, Hamoudi and Varyani 1998, Schoenberg and Rainey 2004). 충돌파는 흔히 갑판(deck)으로 상승하여 기기에 손상을 주거나 작업자에 피해를 미치는 청수(Green water)를 생성한다. 실제 멕시코만 일대 다수의 해상 플랫폼(Platform)이 허리케인 이반(Ivan)에 의해 생성된 청수에 의해 손상을 입은 바 있다.

이러한 극한파와 구조물 간의 상호작용은 다년간 연구되어 왔으며 수치해석 모델을 이용한 연구가 일부 수행된 바 있으나(Cooker and Peregrine 1995, Zhang et al. 1996), 대부분 이론적인 연구에만 그쳐왔으며 다상(multiphase) 고난류에 대한 실제적인 모사는 수행된 바 없는 실정이다. 결과적으로 이들 모델을 이용에서 구해진 파력예측값 등의 물리적 현상에 대한 충분한 실증이 이루어지지 못한 상태이다. 이외에, Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations(RANS)이나 Large Eddy Simulation(LES)에 근거한 난류모델을 이용하여 기존의 모델을 개선하기 위한 연구가 수행된 바 있으나(Lin and Liu 1998, Watanabe and Saeki 1999, Christenson and Deigaard 2001), 이들 연구는 부서진 자유수면 및 높은 공극률(high void fraction)의 버블흐름(bubbly flow)에 대한 종합적인 고려가 이루어지지 못하였고, 실험자료의 부족으로 모델 및 예측값에 대한 실증이 이루어지지 못한 상태이다.

본 논문에서는 파랑이 구조물에 충돌한 이후 생성되는 기포영역을 포함한 쇄파의 운동장에 대한 실험적 연구 결과를 제시하였다. 해안의 쇄파대(surf zone) 및 심해에서 파도의 파쇄과정에 대한 유동장의 측정은 Laser Doppler Velocimetry(LDV) 나 Particle Image Velocimetry(PIV) 등의 기법을 이용하여 측정하여 왔다 (현범수 등 2000, Ting and Kirby 1994, Perlin et al. 1996, Greated and Emarat 2000). 이들 실험기법 중 PIV는 개발된지 10 여년 정도밖에 안되었지만 여러 측정법 중 가장 최첨단의 기법이라 할 수 있다 (백부근과 이상준 2004). 이는 PIV를 이용할 경우 전체장에 대한 측정 뿐아니라 시간 및 공간적으로 향상된 분할(resolution) 분석이 가능하기 때문이다. 그러나 PIV 기법 역시 기존의 다른 유속측정법들과 마

찬가지로 기포영역(aerated region)에 대한 측정이 거의 불가능하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 PIV 기법과 함께 Bubble Image Velocimetry(BIV) 기법을 적용하여 구조물에 대한 충격 및 월파를 생성하는 쇄파의 운동장에 대한 측정을 수행하였다. BIV 기법을 이용하여 PIV 기법으로 불가능하였던 구조물 전면의 기포영역 및 구조물 상부 청수의 속도장의 시간에 따른 변화를 순차적으로 측정하였으며, 측정된 속도는 청수의 모사에 많이 사용되어온 댐붕괴해(dam breaking solution)와 비교하여 보았다.

2. 실험조건 및 장비

실험은 폭 0.9 m, 높이 1.5 m, 길이 36 m의 유리벽으로 제작된 조파수조(wave tank)에서 수행하였다. 물의 깊이는 실험 중 0.8 m로 유지하였다. Dry-back flap 형식의 조파기는 조파수조의 한쪽 끝에 설치되었으며 컴퓨터로 제어하였다. 파에너지를 흡수하고 반사를 최소화하기 위하여 수조의 다른 한쪽 끝에는 1:5.5 경사의 파흡수체(horsehair)층을 가진 해변(beach)을 설치하였다. 길이 0.15 m, 높이 0.31 m 그리고 수조와 같은 폭을 갖는 직사각형 구조의 모델을 사용하였으며 모델의 흘수는 0.2 m이다. 모델구조물은 2차원으로 간략화된 1:168 축척의 Tension-leg platform(TLP)의 기동을 나타낸다. 모델 구조물은 바닥에 고정되고 수조의 상단에 매달린 알루미늄 격자에 장착되었다. 모델구조물과 함께 PIV와 BIV 기법에 쓰인 좌표 및 Field of View(FOV)는 Fig. 1에 나타났다. 실험에 사용된 쇄파(breaking wave)는 파랑집중(wave focusing)을 이용하여 생성하였다. 쇄파를 생성시키기 위한 파군은 0.7 Hz에서 1.3 Hz 사이의 주파수를 갖는 파로 이루어졌다. 구조물의 전면에 자유수면을 충돌시켜 생성한 쇄파는 구조물 전면으로부터 수평거리 2cm 내의 파괴점을 가졌다. 각 실험은 20분 간격으로 수행되었으며, 다른 영향을 최소화하기 위해 자유수면이 거동하지 않을 때 시작하였다. Fig. 2는 자유수면 측정결과이다.

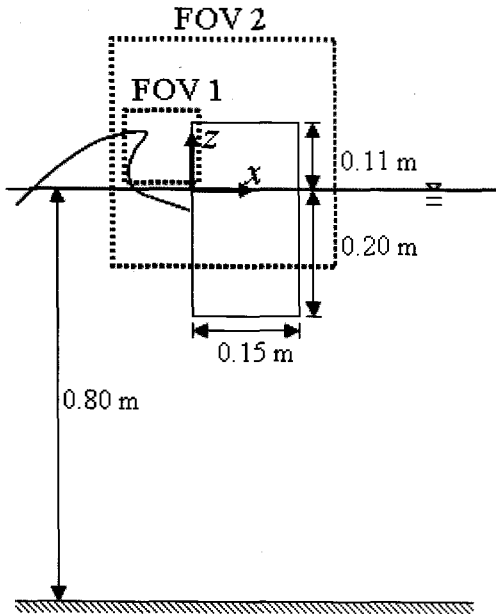


Fig. 1 Sketch of the model structure, coordinate system, and fields of view used in PIV and BIV

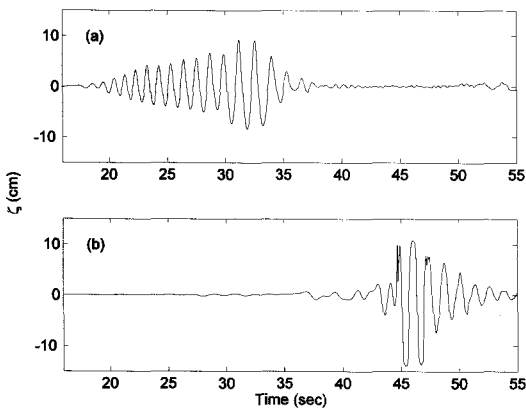


Fig. 2 Wave elevations measured at (a) 5.1 m and (b) 21.7 m from the wavemaker (ζ = wave elevation)

Fig. 2(a)는 조파기로 부터 5.1 m 떨어진 곳에서, Fig. 2(b)는 구조물 앞 측, 조파기로 부터 21.7 m 떨어진 곳에서 측정된 결과이다. 대상이 된 파고는 Fig.2(a)에서 측정된 약 16.5 cm 로 이는 미국 멕시코만에서 발생한 폭풍의 최고파고를 넘지

않는 범위 내에서 얻어진 축척값이다.

모델구조물의 전면벽 부근의 속도장은 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. PIV 시스템의 조명원로는 파장 532 mm, 최대출력에너지 400 mJ, 파동 지속시간 (pulse duration) 6 ns 와 laser head 당 10 Hz 의 반복비를 갖는 dual-head frequency-doubled Nd:YAG laser 를 사용하였다. 광막(Light sheet)을 생성하기 위하여 실린더식(cylindrical)과 구체식(spherical)으로 구성된 광학렌즈가 사용되었다. 이미지 기록장치로는 초당 8 프레임의 최대 프레임률 (fps), 1024 × 1280 픽셀의 해상도와 12 비트의 동적영역(dynamic range)을 갖는 CCD 카메라를 사용하였다.

튀어오른 청수와 기포영역의 속도장은 BIV 기법으로 측정하였다. BIV 기법은 고전적인 PIV 기법에서 사용하였던 작은 추적입자 대신에 기포의 이미지와 기포와 물-공기의 경계에 생성되는 이미지의 조직(texture)을 이용한다. BIV 기법은 기포의 유동 패턴을 파악하기 위해 유체 배면의 조명을 이용하는 shadowgraphy 기법과 연속적인 이미지상을 이용하여 속도를 측정하는 PIV 기법에 기초하고 있다. BIV 기법은 shadowgraphy 기법으로 구해진 이미지와 추적자로 쓰인 물방울 구조와의 상호관계를 이용하여 속도를 측정하므로 기포영역의 기포를 조명하기 위한 두 개의 광원만이 필요하며, 고전적인 PIV 기법의 경우와 달리 레이저 광막이 필요 없다. 본 연구에서는 유체의 운동을 조명하기 위하여 반사판을 가진 600 W 의 보통 전구를 사용하였다. 이미지는 105 mm 렌즈를 장착한 고속카메라를 이용하여 촬영하였다. 사용된 카메라는 512 × 512 픽셀의 해상도와 8 비트의 동적영역(dynamic range), 그리고 초당 1000 프레임의 최대 프레임률(framing rate)을 가지며, 카메라의 조리개는 f-number 1.8 을 사용하였다.

전술된 바와 같이 BIV 기법은 고전적인 PIV 기법의 경우와 달리 특정한 평면에 조명을 비추기 위하여 필요한 광막을 사용하지 않으므로 수조 횡단 방향 (Fig. 1 의 y 방향)으로 기포의 위치를 파악하여야 한다. 이러한 문제는 실험시 카메라의 설치를 최적화하여 Depth of Field (DOF)를 제한함으로 해결할 수 있다. DOF 는 카메라에 의해 포

착된 물체가 초점에 잘 맞추어 지고 선명하게 나타날 수 있는 거리로 정의될 수 있다. 카메라의 초점과 DOF 는 각각 PIV 기법의 광학 평면과 광학 두께에 해당한다.

DOF 의 전면이나 후면에 위치한 물체는 포착된 이미지에서 분명한 조직 없이 흐릿하게 나타나므로 속도를 결정하기 위한 상관관계분석과정 (correlation process)에 거의 영향을 미치지 못한다. 반면, DOF 내의 물체는 뚜렷한 패턴을 가진 명확한 이미지로 나타난다. 결국 포착된 이미지의 상호상관관계(cross-correlation)를 통하여 구한 속도는 실제 대부분 DOF 내 유체의 이미지를 이용한 결과임을 의미한다. 구해진 속도에서 DOF 의 두께에 의한 오차(ϵ) 는 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = D/(2L) \quad (1)$$

여기서 D 는 depth of view 이고 L 은 카메라와 focal plane 사이의 거리를 나타낸다. 식(1)에서 보이는 것과 같이 만약 D 를 최소화하고 L 을 최대화 할 경우 오차를 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 DOF 의 두께에 의한 오차는 2% 정도로 산정되었다. BIV 시스템은 Fig. 3 과 같이 설치되었다. 평균유속은 동일조건 하에서 순간유속장의 10 회 의 위상평균으로 계산하였다.

3. 결과 및 토론

구조물 주위의 속도는 일차적으로 고전적인 PIV 기법으로 측정하였다. 파랑이 구조물에 충돌한 이후 구조물의 전면에 큰 공기포켓이 형성되었으며, 이로 인해 심각한 빛의 산란(scattering)이 유발되고 PIV 상관관계에 불리한 포화되고(saturated) 쓸모없는 이미지가 생성되었다. 이러한 문제는 구조물 상부의 청수영역으로 계속되었다.

Fig. 4 는 Fig. 1 의 FOV1 에서 PIV 기법으로 측정된 쇠파를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 형성된 기포로 인하여 속도벡터를 구할 수 없는 영역이 크게 존재함을 확연히 알 수 있다. Fig. 4(a) 에서 특기할 점은 측정된 속도의 최대값이 파의

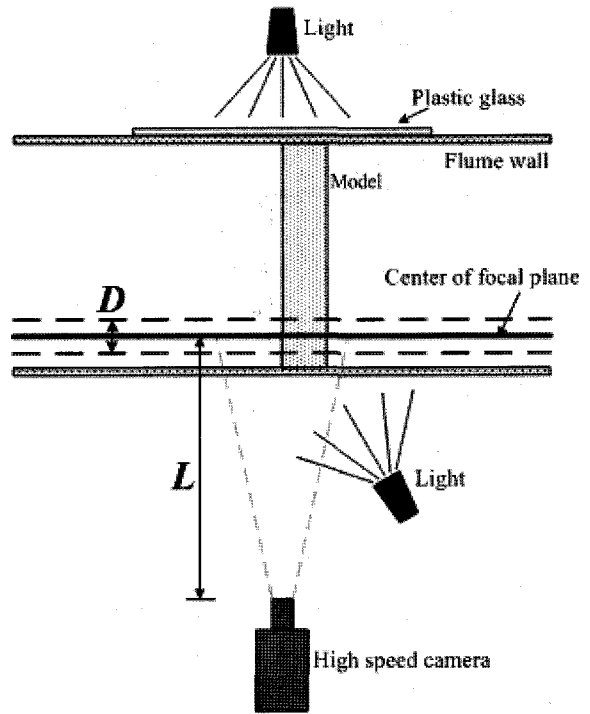


Fig. 3 BIV apparatus

위상속도에 1.5 배로 측정된 것이다. 이 최대값은 쇠파가 구조물에 부딪치는 Fig. 4(b)의 순간부터 파의 물마루(crest)가 구조물을 넘어가는 Fig. 4(d) 순간까지 구조물의 전방에서 지속이 되었다. 참고로 이 결과는 Chang and Liu(1998)에 의해 제시된 결과와 일치한다. 위상속도는 파가 파괴되는 순간을 포함하는 천이파의 파주기로부터 선행파이론을 이용하여 구하였다.

BIV 기법은 기포를 추적인자(tracer)로 사용하며 기포형성영역의 기포 조직(texture)과 감판에 튀어 오른 물(splashing water)의 상호 관련성을 이용한다. 그러므로 BIV 기법은 PIV 기법을 이용할 수 없는 영역에 대한 적용이 가능하다. Fig. 5 는 Fig. 4 와 동일한 조건에서 BIV 기법을 이용하여 측정된 속도장이다. BIV 기법을 이용한 측정에 쓰여진 FOV는 Fig. 1 에서 FOV2 로 표시하였다. Fig. 5 는 충돌 및 청수의 진행과정 동안 속도장의 변화를 명확히 보여주고 있다. Fig. 5 의 속도장은 평균유속이며, 이는 순간 BIV 속도측정값을 10 회 위상

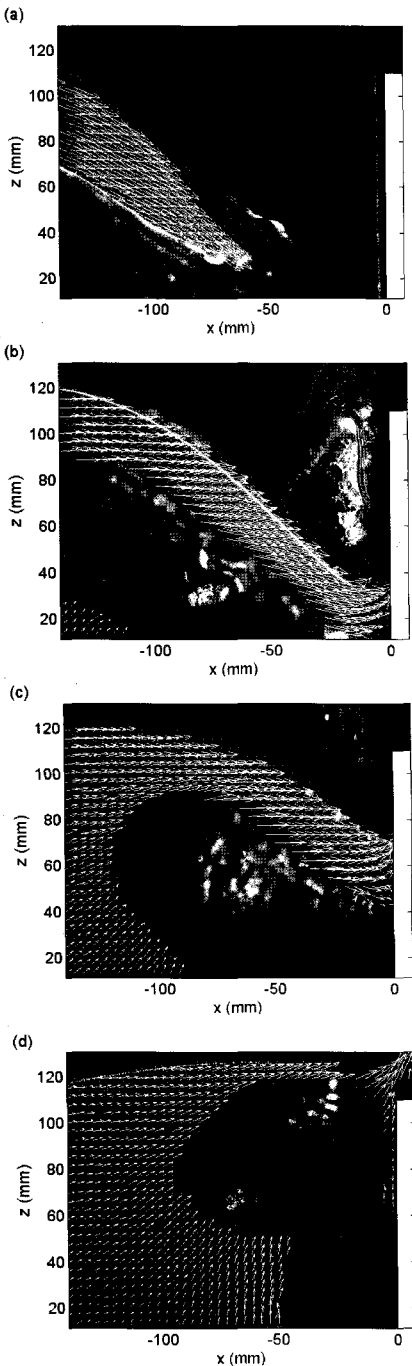


Fig. 4 PIV measurement of plunging wave impinging on the structure, time interval: 25 ms.

평균한 것이다. 제시된 유속장의 배경사진은 그 중 임의로 선택된 한 개의 측정이미지이다. Fig. 5의 $t = 0$ 는 쇄파의 전도 제트(overturning jet)가 구조물에 충돌하기 이전 전수면(front water surface)에 접촉하는 순간이다. Fig. 5(a)는 쇄파의 전도 제트(overturning jet)가 구조물의 전방벽에 충돌하기 이전 전수면에 접촉한 직후를 보여주고 있다. 이 제트의 속도는 하류(downstream)와 하향(downward)쪽으로 유동한다. Fig. 5(b)와 같이 35ms 이후 월파는 구조물의 전방벽에 충돌한 후 수직 상향 쪽으로 다수의 작은 기포(droplet)를 형성하며 튀어 올랐다. 참고로 고속카메라를 이용한 BIV 기법을 통해 기록된 이미지 간의 시간간격은 1.75ms 였다. 참고로 Fig. 5의 속도장은 20 개의 이미지 간격(35ms)을 이용하여 구한 값이다.

Fig. 5(b)에서 튀어오른 제트(splashing jet)는 수직 운동을 하는 -반면 대부분의 파량은 아직 구조물 방향으로 수평적으로 유동한다. 이러한 현상은 Fig.5(d)에서와 같이 파량의 모멘텀이 전방을 밀쳐 상판 위로 유동시킬 때까지 Fig. 5(c)에서도 계속 된다. 파의 모멘텀이 물의 일부를 상향시킬 때 동시에 일부의 물을 하향으로 유동시켜 Fig.5(c)에서 시작되는 것과 같이 커다란 소용돌이를 유발한다. Fig. 5(d)이후, 구조물 상부에서의 수평최대속도는 실험파의 위상속도보다 크지 않았다. 물은 Fig. 5(e)의 순간까지 구조물 상부면을 접촉하지 않았다. 물이 구조물 상부를 접촉할 때까지 상판에서의 초기 수평방향 속도는 작다. Fig. 5(f)와 같이 청수는 수직방향 모멘텀을 상실하고 수평방향의 속도 성분만 남게 된다. 이로 인해 커다란 수평방향 모멘텀을 유발되며 상판 위의 물체에 대하여 커다란 수평력을 작용시킨다. 구조물 상부의 길이가 짧으므로 상부의 청수는 배면을 통해 빠르게 다시 해양으로 회귀했다. 청수의 속도는 하류 쪽으로 유동을 계속하며 하향으로 변화하기 시작했다. 이후 청수의 높이는 빠르게 감소하고 속도를 급격히 상실함에 따라 운동량을 잃었다.

현재까지 구조물 상부의 청수의 모사에는 댐붕괴해가 흔히 사용되어 왔으나 (Schoenberg and Rainey 2004), 실험을 통한 실증이 이루어진 바 없었다. 댐붕괴해를 극한파에 의해 생성된 청수

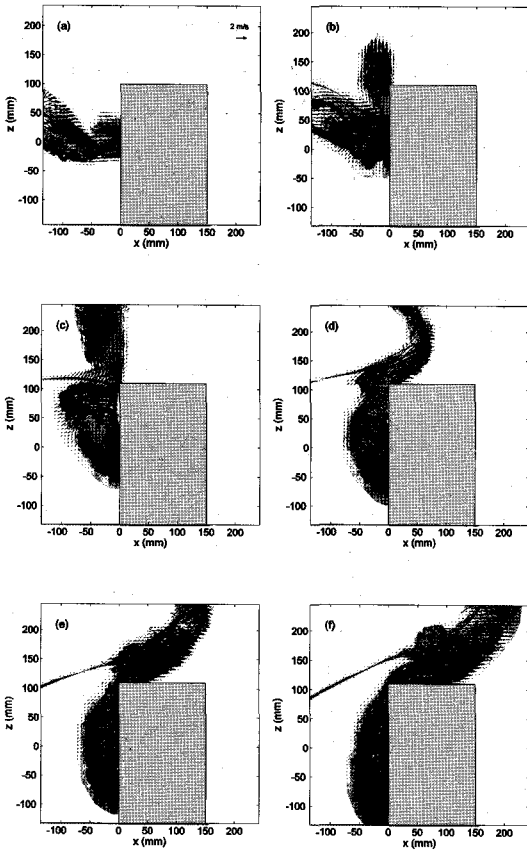


Fig. 5 BIV measured mean velocity fields of plunging breaker impinging on the structure. $t =$ (a) 0.022 s, (b) 0.057 s, (c) 0.092 s, (d) 0.127 s, (e) 0.162 s, (f) 0.197 s.

문제에 적용할 수 있는지를 확인하기 위하여 측정된 수평방향속도와 댐붕괴 문제의 해석해를 비교하였다. 본 연구에서는 간단하지만 기본적인 많이 사용되는 Ritter의 해를 이용하였다. Ritter의 해에 의한 수평유속은 다음과 같다 (Ritter 1892).

$$u = \frac{3}{2} \left(\sqrt{gh_0} + \frac{x}{t_d} \right) \quad (2)$$

여기서 u 는 수평방향 속도, g 는 중력가속도, h_0 는 저수조의 초기 수위, t_d 는 댐붕괴이후시간이다.

청수 흐름에서 파가 구조모델을 월류하기 시작할 때 파의 상부에서 구조물의 상부까지 측정된 수위를 가정하여 Ritter 해의 계산을 위한 h_0 는 5 cm 를 사용하였다. 시간 $t_d = 0$ 는 댐붕괴순간을 나타내고 실험 시 청수의 속도가 수평으로 변화하는 순간(Fig. 5(d))과 같다고 가정하였다. 측정값과 Ritter 해의 비교 결과는 Fig. 6 에 수록하였다. 우선 청수 속도가 수평으로 변화한 순간(Fig. 6 에서 $t_d = t_1$)의 측정값과 해를 비교한 결과, 해석하는 청수 속도를 과소평가한 것으로 나타났다. 또한, 측정값을 근거로 할 때 수평방향의 속도성분이 생성되기 전 대부분의 튀어오른 제트가 상향으로 움직이는 $t = t_1$ 이전의 해석하는 실제 속도를 과대평가하고 있다. 결론적으로 Fig.6 에서 보이는 것과 같이 측정된 청수의 속도장은 댐붕괴해와 매우 상이하게 나타났으며 추후 이에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

4. 결론

구조물에 충돌하는 쇠파의 속도장과 관련된 구조물 상부의 청수를 PIV 및 BIV 기법을 이용하여 측정하였다. PIV 기법의 경우 구조물 전방의 기포 영역을 측정할 수 있었다. 측정 결과 파쇄 제트(Breaking jet)가 구조물에 충돌하기 전의 최고속

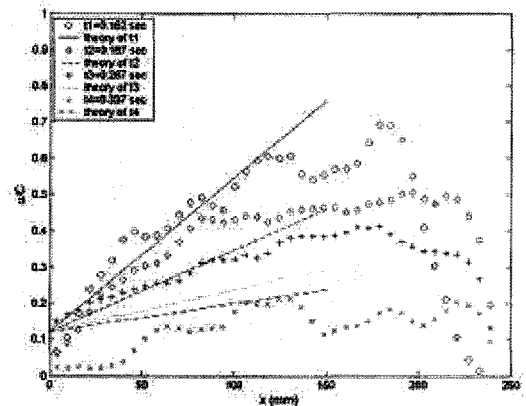


Fig. 6 Comparison between the measured horizontal velocity and the dam breaking solution

도는 위상속도의 1.5 배로 측정되었다. 청수의 경우 댐붕괴해는 쇠파에 의해 생성된 청수의 초기에는 청수의 속도를 과대평가하는 것으로 나타났으나, 초기생성단계 이후 속도장을 과소평가하는 것으로 나타나 추후 이에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 백부근, 이상준, 2004, “ 회전하는 선박 프로펠러 전방 유입류에 대한 PIV 속도장 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 4 호, pp. 30-37.
- 현범수, 최경신, 도덕희, 2000, “ 몰수실린더에 의하여 생성되는 쇠파주위 점성유동의 고찰(제 3 부: PIV 를 이용한 순간유동장 해석),” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 2 호, pp. 38-45.
- Buchner, B., 1995, “ The Impact of Green Water on FPSO Design, ” Offshore Technology Conference 95, OTC, Vol. 7698, pp. 45-57.
- Chang, K.A., and Liu, P.F., 1998, “ Velocity, Acceleration and Vorticity under a Breaking Wave,” Physics of Fluids, Vol. 10, pp. 327-329.
- Christensen, E.D. and Deigaard, R., 2001, “ Large Eddy Simulation of Breaking Waves,” Coastal Engineering, Vol. 42, pp. 53-86.
- Cooker, M.J. and Peregrine D.H., 1995, “ Pressure-impulse Theory for Liquid Impact Problems,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 297, pp. 193-214.
- Greated, C.A. and Emarat, N., 2000, “ Optical Studies of Wave Kinematics,” Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 6, pp. 185-223.
- Hamoudi, B. and Varyani, K.S., 1998, “ Significant Load and Green Water on Deck of Offshore Units/Vessels, ” Ocean Engineering, Vol. 25, pp. 715-731.
- Lin, P. and Liu, P.F., 1998, “ A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 359, pp. 239-264.
- Perlin, M., He, J., and Bernal, L.P., 1996, “ An Experimental Study of Deep Water Plunging Breakers,” Physics of Fluids, Vol. 8, pp. 2365-2374.
- Ritter, A., 1892, Die Fortpflanzung der Wasserwellen (The Propagation of Water Waves). Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 36, No. 33, pp. 947-954.
- Schoenberg, T. and Rainey, R.C.T., 2004, “ A Hydrodynamic Model of Green Water Incidents,” Applied Ocean Research, Vol. 24, pp. 299-307.
- Ting, F.C.K. and Kirby, J.T., 1994, “ Observation of Undertow and Turbulence in a Laboratory Surf Zone,” Coastal Engineering Vol 24, pp. 51-80.
- Watanabe, Y. and Saeki, H., 1999, “ Three-dimensional Large Eddy Simulation of Breaking Waves,” Coastal Engineering Journal, Vol. 41 pp. 281-301.
- Zhang, S., Yue, D.K.P., and Tanizawa, K., 1996, “ Simulation of Plunging Wave Impact on a Vertical Wall, ” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 327, pp. 221-254.



< 최 상 현 >

< 류 용 욱 >