

쇄파에 의한 처오름 및 월파 발생시 유속에 대한 실험적 연구

Experimental study of Runup and Overtopping Wave Velocities due to Wave Breaking

유용욱*, 이종인**, 김영택***

Yong-Uk Ryu, Jong-In Lee, Young-Taek Kim

요 지

본 연구에서는 구조물 전면에서 발생하는 권파와 그 이후 발생하는 처오름과 월파의 유속장을 계측하기 위하여 수리모형실험을 실시하였으며, 실험결과를 이용하여 월파의 유속분포를 나타내는 경험식을 제안하였다. 구조물을 전면에서 내습파랑이 쇄파된 이후, 구조물을 월파하는 동안에 유체의 흐름은 넓은 연행기포의 지역을 형성하며 다위상(multiphase)상태가 된다. 쇄파에 의한 구조물 주위에서의 유체흐름 중 연행기포가 없는 영역의 유속 측정에는 입자화상유속계(particle image velocimetry, PIV)기법을, 연행기포 영역에서의 유속 측정에는 기포화상유속계(bubble image velocimetry, BIV)기법을 적용하였다. 두 기법을 이용하여 측정된 유속장으로부터 구조물 주위에서의 쇄파, 처오름 및 월파시의 최대유속을 계측하였다. 구조물 위로 월파된 유체흐름 분포는 비선형적인 특성을 보여주며, 시간별 최대유속은 주로 유체의 전면부에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 무차원화된 유속분포로부터 구조물 위에서의 월파시 유속분포가 자기상사성(self-similarity)을 갖는다는 것을 알 수 있었으며, 이를 이용하여 월파의 유속분포를 위한 실험적 경험식을 제시하였다.

핵심용어 : 쇄파, 처오름, 월파, 입자화상유속계, 기포화상유속계

1. 서 론

해양구조물의 설계에 있어서 이상파랑(extreme wave)은 중요한 고려기준이 된다. 이상파랑은 구조물에 내습하여 상당한 충격과 이에 따른 손실을 주고, 일반적으로 높은 파고를 갖기 때문에 구조물상단에 큰 운동량을 갖는 월파를 발생시킨다. 구조물의 전면에 발생하는 쇄파의 유속과 구조물의 상부에서의 월파의 유속은 해양구조물 설계시 고려해야 할 중요한 인자이다. 특히 월파의 유속은 원해구조물의 설계에 있어서 선박이나 platform의 상부장치에 작용할 수 있는 힘을 예상하는 데 유용하다. 반면, 해안구조물, 즉 방파제나 호안의 경우 이는 상부의 설치물에 대한 관점보다는 월파량의 정량적인 산정과 구조물 후면의 안전성 등의 연구에 이용될 수 있을 것이다. Schttrumpf and Oumeraci(2002)는 월파는 구조물의 후면 안전성에도 깊은 연관을 가지고 있으며 이러한 평균월파량은 후면의 쇄굴 등의 안정성에 직접적인 관계를 유추하기엔 제한적이라고 지적하고 월파속도의 연구의 필요성을 제기하였다. 구조물이 없는 순수 쇄파의 측정은 정량적인 비관입(non-intrusive) 유속측정법인 LDV(laser Doppler velocimetry)기법이나 PIV(particle image velocimetry)기법을 이용한 많은 연구가 수행되어온 반면, 구조물 주위에서의 쇄파나 월파의 유속 측정은 거의 이루어 지지 않았다. 이러한 쇄파의 유속을 측정한 연구들 또한 기포지역 밖의 유속 장에 관한 많은 연구에 비해, 기포분율(void fraction)이 높은 기포지역의 측정은 아주 소수의 연구에서만 보여졌다. Govender et al.(2002)은 PIV기법에 기반을 둔 측정법으로 기포지역을 포함한

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 박사후연수생 E-mail : yuryu@kict.re.kr

** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail : jilee@kict.re.kr

*** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail : ytkim@kict.re.kr

쇄파의 유속장을 측정하였으나 측정기법에 대한 자세한 언급은 하지 않았다. Ryu et al.(2005)는 BIV(bubble image velocimetry)라는 기포를 이용한 PIV기법의 변형된 기법을 소개하였으며, 구조물 주위에서의 기포지역을 갖는 다위상유체의 유속을 측정하였다.

본 연구에서는 긴 상치를 갖는 구조물 주위에서의 쇄파와 연이어 발생하는 월파의 유속을 단면수리모형실험을 통해 연구하고자 한다. 내습직전의 구조물 앞의 쇄파의 유속장은 PIV기법을 이용하여 측정하며, 내습이후의 구조물 근처에서의 기포를 연행한 지역은 BIV기법을 이용하여 측정한다. 실험은 같은 조건하에 반복적으로 시행하여 얻어진 순간유속장은 위상평균을 하여 평균유속을 구하고 이를 차원분석하여 월파의 수평방향유속의 분포를 나타내는 경험식을 제시한다.

2. 실험장비 및 조건

실험은 길이 35m, 폭 0.9m, 깊이 1.2m의 유리벽으로 제작된 2차원 단면수조에서 수행하였다. 아크릴로 제작되어진 구조물모형은 길이 0.15m, 높이 0.31m, 폭 0.9m의 직사각형 구조에 0.22m의 상판을 추가하여 총 0.37m의 상치길이를 갖는다. 모형의 흘수는 0.2m였으며, 조파기로부터 21.6m의 지점에 수조의 바닥과 상단에 고정되었다 (Fig 1 참조). 본 실험에 사용된 쇄파는 다양한 주기를 갖는 파군으로부터 파랑집중(wave focusing)법을 이용하여 생성하였다. 0.8m의 고정된 수심에 쇄파를 생성시키기 위한 파군은 0.7Hz에서 1.3Hz 사이의 주파수를 갖는 파로 이루어졌다. 본 연구에서는 쇄파의 연행기포영역과 이어 발생하는 치오름과 월파의 유속장을 얻기 위하여 PIV기법과 BIV기법을 이용하였다. 먼저 모형구조물의 전면벽 부근의 기포연행이 상대적으로 작은 부분의 속도장은 PIV기법을 이용하여 측정하였다. 광원(light source)으로는 Nd:YAG laser를 사용하였으며, 화상기록장치로는 최대 8fps(frame per second), 1024×1280pixels의 해상도와 12bit의 분해능(dynamic range)을 갖는 CCD카메라를 사용하였다. 레이저를 이용한 PIV기법은 물과 공기의 다위상흐름에서 화상의 색 포화(saturation)로 인해 유속장을 얻기 어려워진다. 이와 같이 기포가 연행된 지역의 측정을 위하여 Ryu et al.(2005)에 의해 고안된 그림자기법(shadowgraphy)을 이용한 BIV기법을 이용하였다. BIV기법은 PIV기법과 유사한 유속측정법으로 전형적인 PIV기법에서 속도측정을 위해 사용하였던 미세한 입자 대신에 기포나 물-공기의 경계에 생성되는 화상의 조직(texture)을 이용한다. BIV기법의 자세한 소개는 Ryu et al.(2005)에서 찾아볼 수 있다. 유체의 운동을 조명하기 위한 광원으로 약 2mm의 두께의 백색의 아크릴판과 600W의 보통 전구를 사용하였으며 분석에 사용되어지는 화상은 f/1.8로 고정된 105mm초점렌즈를 장착한 고속카메라로 기록하였다. 두 기법에 의해 측정된 화장(field of view, FOV)은 Fig 1에 각각 FOV1과 FOV2로 도시되어 있다.

3. 쇄파와 월파의 유속분포

수리모형의 전면직립벽 앞에서의 유속장은 PIV기법을 이용하여 측정되었다. PIV기법에 의해 측정된 화장은 전술한 바와 같이 Fig 1의 FOV1에 해당되는 영역이다. Fig 2는 권파가 구조물에 내습하여 쇄파하는 순간의 overturning jet의 형상과 그 단면의 유속장을 보여준다. Fig 3은 x축에 따른 4개의 연속적인 단면속도 U_c 의 분포를 제시하고 있다. 여기서 단면속도 U_c 란 각 횡단면에서 크기가 최대인 수평속도를 말한다. Fig 3의 속도분포는 쇄파가 구조물을 내습하는 전후의 순간을 나타내고 있으며, 분포된 수평유속으로부터 최고유속은 위상속도 C 의 1.5배에 달하고 이 최고값은 얼마동안 지속됨을 알 수 있다. 참고로, 본 실험에 사용된 파랑의 위상속도는 1.95m/s이다.

관측된 쇄파의 최고유속값 $1.5C$ 는 구조물이 없는 쇄파만을 연구한 Chang and Liu(1998)에서 얻어진 최고유속과 일치하며, 이로부터 파가 구조물에 쇄파되기 직전의 최고유속은 구조물의 유무에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

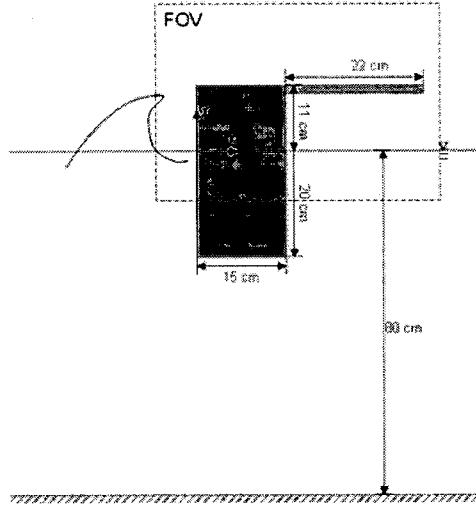


Fig 1. Sketch of the structure model and field of view(FOV).

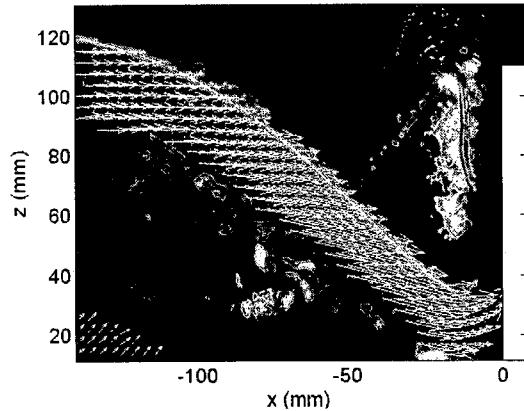


Fig 2. Velocity field of the plunging breaker obtained using PIV.

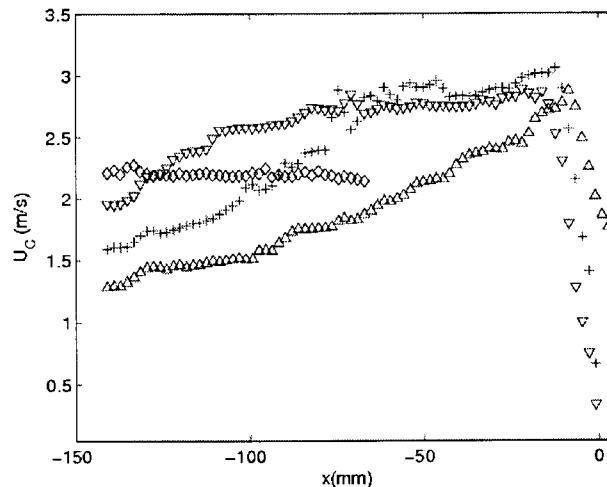


Fig 3. Cross sectional velocity in front of the front wall.

Fig 2에 제시된 PIV 화상과 얻어진 유속벡터의 분포로부터 PIV기법은 기포가 없거나 기포의 밀도가 아주 작은 지역에서 성공적으로 유속을 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 반면, 이러한 레이저를 이용한 전형적인 PIV기법의 유속측정은 기포의 크기나 밀도가 상대적으로 많은 지역에서는 속도를 거의 얻을 수 없음을 알 수 있다. 이에 대한 대안으로, 모형구조물의 전면과 상부에서의 쇄파에 의한 연행기포영역의 측정을 위하여 BIV기법을 이용하였다. Fig 4는 동일한 쇄파를 BIV기법으로 측정한 연행기포영역의 유속장을 보여주고 있다. BIV기법에 의해 측정된 화장은 Fig 1에 도시되어있는 FOV2이다. Fig 4는 쇄파의 내습에 이어 발생하는 구조물위에서의 월파의 진행과정을 보여주고 있다. 그럼안의 유속장은 20개의 반복된 실험안을 위상평균(phase average)하여 얻어진 평균유속이며 화상의 배경은 이 20개의 실험안 중 하나의 순간화상이다.

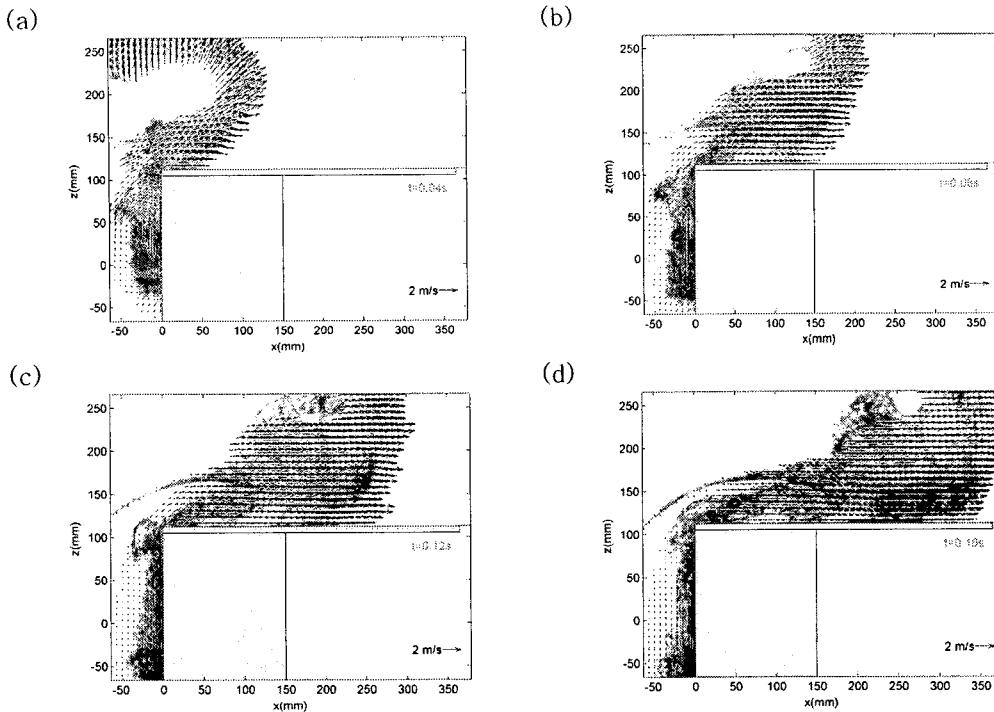


Fig 4. Velocity fields of the plunging breaker and overtopping wave measured by BIV.

모형의 천단 위에서의 월파의 단면수평유속의 시간별 x 축에 따른 분포가 Fig 5에 제시되어 있다. 각 시간별 월파의 단면수평유속의 분포 중 최대유속은 파랑전면 근처에서 나타나는 반면 최소유속은 모형의 전면선단 근처에서 나타난다. 참고로 분포된 값의 끝은 월파의 파랑전면을 나타낸다. 그림에서 보이는 천단 위에서 단면수평유속 U_C 의 분포는 이 선단근처의 최소속도에서 파동전면 근처의 최대속도까지 대략적으로 점근적인 증가를 보여주는 비선형의 형태를 나타낸다. 또한, 각 시간별 최대수평유속은 월파의 파동전면이 모형의 후면선단을 지나기 전($t=0.16s$)까지 감소하지 않고 $1.2C$ 의 일정한 값을 보이나, 이후에는 최대유속이 점차 감소한다.

4. 차원분석

쇄파에 의한 모형 주위에서의 월파과정 중 천단위에서의 월파에 영향을 주는 변수들의 관계를 이해하기 위하여 차원분석을 하였다. Fig 6은 무차원화된 단면수평유속 U_d/U_M , 선단부터의 거리 x/Ct , 그리고 시간 t/T 사이의 관계를 나타내며, 이 변수들 사이에서 자기상사(self-similarity)관계가 있음을 알 수 있다. 참고로, Fig 6의 속도단면은 모형 근처에서 파가 쳐오름하는 순간부터 월파의 파랑전면이 모형의 후면선단을 지나는 순간까지의 변수들의 관계를 나타낸다 (0.02초부터 0.15초). 그림 안의 무차원변수들 사이의 자기상사관계를 최소자승회귀법을 이용하여 회귀분석하였으며 얻어진 회귀 공식은 아래와 같다.

$$\frac{U_C}{U_M} + 1.20 \frac{t}{T} = 1.02 \left(\frac{x}{Ct} \right)^{0.34} \quad (1)$$

위의 결과로 부터 모형의 천단위에서 거동하는 월파의 유속은 거리와 시간의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서, 최대수평유속 U_M 은 시간에 따른 변화가 거의 없으며 파랑전면의 유속과 유사하다

는 Fig 5의 결과로부터 U_M 과 전면속도의 평균값인 2.20m/s(1.13C)에 해당하는 값을 식(1)의 U_M 에 적용하였다. 위와 같은 가정을 통해 모형천단위에서의 월파의 단면수평유속 U_C 를 위한 경험식을 아래와 같이 제시하였다.

$$U_C = 1.15 C \left[1.02 \left\{ \frac{x}{Ct} \right\}^{0.34} - 1.20 \frac{t}{T} \right] \quad (2)$$

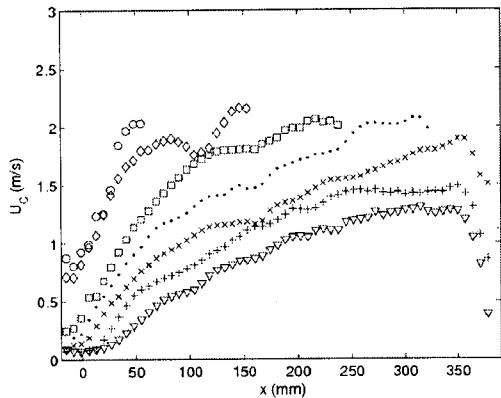


Fig 5. Cross sectional velocity on the deck of the structure.

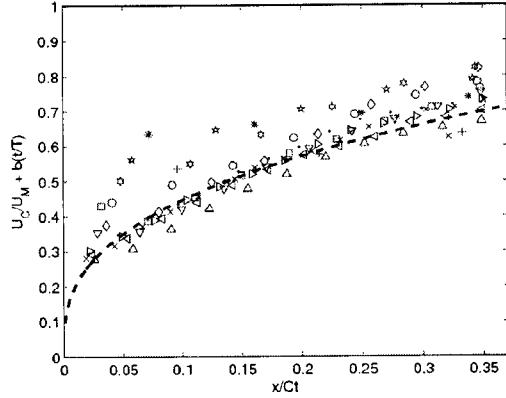


Fig 6. Similarity profile obtained using the non-dimensional velocity, time and distance.

5. 결론

본 연구에서는 모형에 내습하는 권파와 그에 따른 월파의 유속장을 광학적 유속측정기법인 PIV기법과 BIV기법을 이용하여 측정하였다. 권파는 모형에 내습하기 전 위상속도의 1.5배의 크기의 최대값을 가지며 수평주도의 흐름을 보여준다. 이후 발생하는 월파는 천단위에서 위상속도의 1.1배에서 1.2배의 크기를 갖는 최대값을 보인다. 이 최대값은 월파의 전면속도(front velocity)와 거의 일치하며 파랑전면이 모형의 후면선단을 지나기 전까지 큰 감소를 보이지 않고 지속된다. 천단위에서의 수평유속을 차원분석하여 수평유속과 거리와 시간사이에 자기상사성을 가지고 있음을 밝히고 이를 회귀분석하여 이 수평유속을 예측하는 경험식을 제시하였다.

참 고 문 헌

- Chang, K.-A., and Liu, P.L.-F. (1998) Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave, *Physics of Fluids*, Vol. 10, pp. 327-329.
- Govender, K., Mocke, G.P. and Alport, M.J. (2002) Video-imaged surf zone wave and roller structures and flow fields. *Journal of Geophysical Research* Vol. 107, pp. 3072.
- Ryu, Y., Chang, K.-A., Lim, H.-J. (2005) Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, pp. 1945-1953.