

論文

이흘수판형 부소파제 주위의 유동해석을 위한 PIV적용

김호*·조대환**·이경우***·김옥석****

*목포해양대학교 대학원, **목포해양대학교 기관시스템공학부,
목포해양대학교 해양시스템공학부, *목포해양대학교 대학원

PIV Applications for Flow Analysis of Floating Breakwater with double barriers

Ho Kim*·Ok-Sok Gim*· Gyoung-Woo Lee**· Dae-Hwan Cho***

* Graduate School of MMU, Mokpo, 530-729, Korea
** Faculty of Marines Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea
*** Faculty of Ocean System Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea
**** Graduate School of MMU, Mokpo, 530-729, Korea

요약 : 연안 해안공학의 발달과 더불어 경제적이고 설치가 용이하며, 해수 정온화를 고려한 부유식소파제에 대한 관심이 점차 늘어나고 있다. 본 연구는 와류방식에 의한 파랑제어로 쓰이는 이흘수판이 부착된 부소파제 주위에서 생성되는 박리현상, 와의 생성과 소멸, 플레핑(flapping) 현상 등 이흘수판을 부착함으로써 생성되는 유동장에 대해 기계공학 및 유체역학 분야에서 각광을 받고 있는 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry: 이하 "PIV"로 표기)를 이용하여 순간속도장, 시간평균속도장, 등속도 분포 등을 구하여 이흘수판형 부소파제 주변의 유동을 해석하였다.

핵심용어 : 이흘수판형 부소파제, 입자영상유속계, 플레핑 현상, 재순환영역

ABSTRACT : Along with the development of costal engineering, various type of breakwaters have been built. The main purpose of breakwaters are to provide harbour protection against waves, to stabilize beaches against erosion due to large wave action, and to provide for temporary wave protection for installation on or under water surface. This paper an application example of PIV system for analyzing the flow of Floating Breakwater with double barriers. We introduce an analysis method to predict the characteristics of flow around the neighboring fields of Floating Breakwater with double barriers in order to develop a high performance model. Flow visualization has conducted in a circulating water channel by a high speed camera and etc. Flowing phenomenon according to velocity distribution and flow separation around the breakwater with double barriers were obtained by 2-D PIV system.

KEY WORDS : Breakwater with double barriers, PIV system, Flow separation, Velocity distribution

1. 서론

최근 해양개발의 필요성이 점차 증대됨에 따라 해양환경에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며 종래의 원유, 천연자원 등의 생산설비 및 연근해 항만시설에 국한되지 않고 다양한 기능을 가진 구조물의 개발에 관심이 증대되고 있다. 이러한 구조물들은 설치해역의 해상조건, 지역적 특성 및 대상 해역에 적합한 기능을 수행하며 원하는 해수 정온화를 확보해야 한다. 건설되는 대부분의 해안 구조물들은 자연환경과 인간 친화적 구조물이기 보다는 경제적 이익만을 고려한 결과 해양의 오염

및 지역주민의 민원을 초래하는 사회문제를 야기하고 있다. 이를 위하여 설치되는 해양시설의 기능성 및 해양오염 예방, 해수교환 등의 여러 인자를 효율적으로 극대화하기 위하여 실현 가능한 해안 구조물로서 부유식 해양구조물에 관심이 모아지고 있다. 소파구조물은 크게 나누어 중력식과 부유식이 있으며, 항만의 소파제는 대부분 예외 없이 중력식이며, 중력식 소파제의 경우 수심이 깊어지면 수심의 자승에 비례하여 단면적이 크게 되어 건설비용 또한 증가한다. 특히, 중력식 소파제의 경우 파의 작용이 없고, 그 영향이 미치지 않는 해저에 가까울수록 막대한 물자투입을 필요로 하는 것에 반하여, 부유식 소파제는 그 구조상의 특성 때문에 중력식 소파제가 설치될 수 없는 곳에도 설치할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 소파제 밑으로 물이 자유롭게 통과할 수 있으므로 해양오염이나 생태계 파괴에 대한 염려가 없으며 건조기간이 짧고 수심이 깊어도 적은

*대표저자 : 정희원, sopungnara@mmu.ac.kr 011) 9081-9778
**정희원, dhcho@mmu.ac.kr 061) 240-7104
***정희원, kwlee@mmu.ac.kr 011) 9339-3589
****정희원, domingo8873@hotmail.com 016) 614-3001

건조비용으로 시공이 가능하고 구조물 자체를 이동시켜 원하는 해역에 재설치가 가능하다. 그러나 입사파의 일부가 소파제를 통과하는 경우도 있고 장주기파의 경우에는 상대적으로 제어기가 어려워 이를 제어할 수 있는 효율적인 부소파제의 개발이 한층 요망 된다. 또한, 내구성이 짧고, 유지관리가 필요하며, 실질적으로 원전어항부소파제의 설계가 처음인 국내의 경우에는 부소파제의 시공경험이 없고, 다양한 부소파제의 재질과 형식에 대한 설계기술이 미흡한 실정이어서 이를 해결하기 위한 연구가 필요로 하고 있다.

기존의 부유식소파제에 관한 연구 동향을 살펴보면 Bettess와 Zinnkiewicz는 이론해석을 통하여 구조물에 작용하는 표면파의 산란과 발산에 대하여 연구하였고[2], Chakrabarti와 Cofter는 역시 이론 해석을 이용하여 반잠수식으로 수중에 계류되어있는 구조물과 파도와의 상호 작용에 대하여 연구하였다[3]. John은 부유구조물의 운동을 해석함으로써 부유식 방파제의 계류력에 대하여 연구하였다[4]. 박노식 등은 쌍동형 부유식 소파구조물을 계획하기 위하여 단면형상의 변화, 부체간의 간격 변화 및 부가판 취부에 따른 파강제력 및 운동응답, 소파효율의 변화 등을 수치해석 하였으며, 2차원 조파수조를 이용하여 상하요의 동요 및 투과계수에 대한 모형실험을 수행하였다[1]. 그러나 해수 유통에 직접 영향을 주는 부소파제의 수면 하에서 생성되는 유동장의 해석에 관한 연구는 아직까지 이루어 지지 않는 상태이다. 본 연구에서는 소파성능이 우수한 이출수판형 부소파제주위 유동장의 해석을 목적으로 기계공학 및 유체역학 분야에서 활발하게 사용되고 있는 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry; 이하 "PIV"로 표기)를 이용하여 폰튼형 부소파제에 커튼판을 부착한 상태와 이출수판을 부착한 부소파제 주변의 유동특성을 해석함으로써 부소파제의 유동특성을 조사하기위한 기초연구 자료로 활용하고자 하였다.

2.1 실험장치

Fig. 1은 PIV 시스템의 개략도이다. 영상처리시스템은 크게

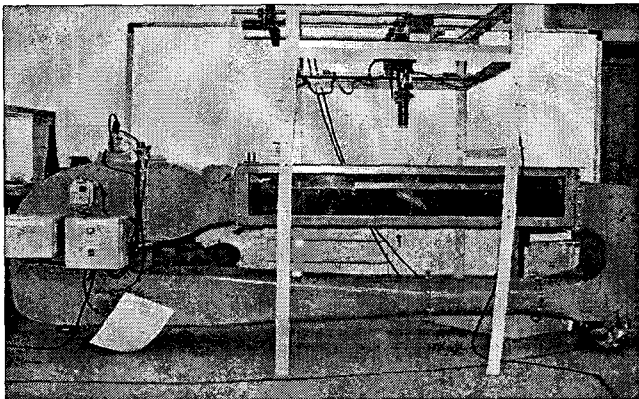


Photo. 1 소형 이동형 회류수조

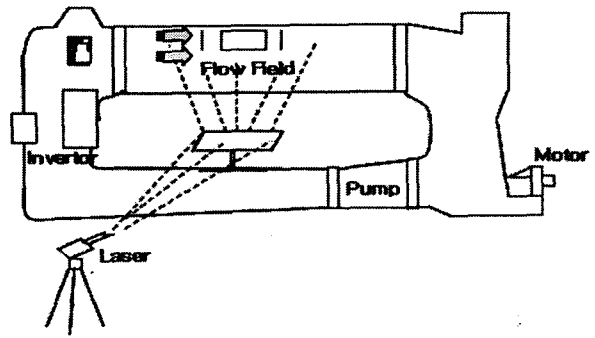


Fig. 1. PIV 시스템.

아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W), 레이저 시트, 고속 카메라(Fast Cam), 영상처리장치(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되며, 이형흡수판을 갖는 부소파제 주위의 유동해석을 위해 Photo.1과 같은 소형 회류수조를 이용하였다. 소형 회류수조의 시험부는 길이 1000mm, 폭 290mm, 높이 270mm인 사각형이며, 수조 내에는 수온이 23°인 수도수를 사용 하였다. 회류수조는 축류모터에 의해 유속이 결정되며, 이때 설정 주파수는 10Hz로서 유속으로는 0.32m/s이다. 부소파제가 수면으로 부터 잠긴 깊이 H=60mm를 대표길이로 하여 $Re = 2.12 \times 10^4$ 에서 실험을 수행하였다.

PIV 해석을 위해 유동장에 레이저를 수조위에서 조사했을 때 수면에서의 교란현상과 아크릴 재질로 축소하여 만든 실험 모형의 관들이 접합되는 모서리 부분에서도 레이저투과가 어려워 그림자가 생성된다. 이러한 그림자는 PIV 해석에서 오류 성분으로 작용되어 에러가 발생될 수 있으므로 이를 해결하기 위하여 수조 아래 부분에 45° 각도로 설치된 거울을 이용하여

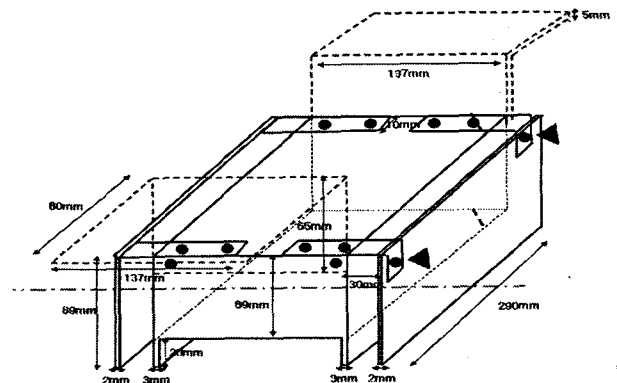


Fig. 2. 부소파제 도면.(Scale- 1:35)

3. 결과 및 고찰

레이저가 유동장에 수직되게 조사될 수 있도록 하였다. 이때 사용된 거울은 150mm×400mm의 직사각형으로 Fig. 1과 같이 하였다.

2.2 유동장 계측

유체역학과 관련된 기기의 설계 또는 성능평가를 위한 제한 사항은 대상 물체주위의 유동장 거동을 정량적으로 평가하는 문제와 직결된다. 유동가시화 기법은 유동장의 거동을 알아보는 방법으로 흐름 중에 추적 입자를 주입하고 적당한 조명과 카메라를 이용하여 순간 또는 시간 평균 유동장을 촬영하여 물수체의 유체역학적인 특성을 고찰하는 방법이다.

가시화기법은 여러 종류가 있지만, 그중에서 PIV(Praticle Image Velocimetry, 입자영상유속계)는 최근, 디지털 영상기법과 컴퓨터 관련 하드웨어의 비약적인 발전에 기인하여 유동변수를 동시다점으로 계측할 수 있어 유동장 해석에 각광을 받고 있다. 이러한 PIV의 원리는 유동장에 추종성(traceability)이 뛰어난 입자를 분포시켜 이들 입자의 순시적인 위치를 미소시간 간격을 두고 계측, 속도를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 2차원의 계조치 상호상관 PIV 해석기법을 적용하여 유동 정보를 해석하였으며, 해석 절차는 Fig. 3과 같다.

추종성이 우수한 입자로 직경이 100~150 μ m인 PVC 입자를 동일입자 추적을 위해 사용하였으며, 유동장의 이미지는 고성능 디지털카메라를 사용하여 획득하였다. 유동해석은 동일입자 추적 방법중 하나인 2프레임 입자 추적법을 사용하였다.

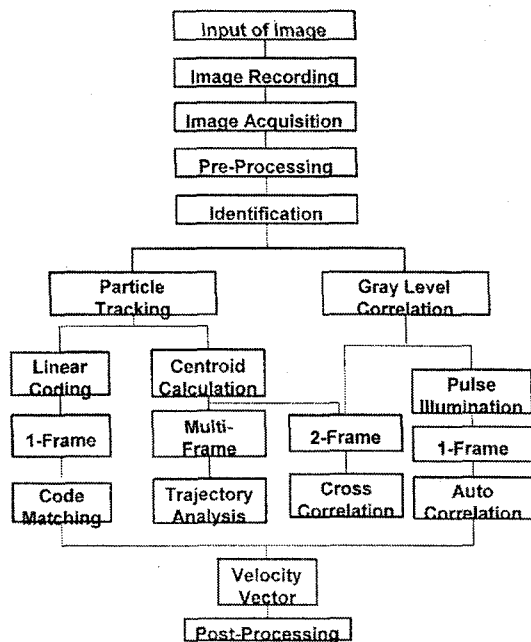


Fig. 3. PIV 처리방식에 따른 순서도.

Fig.4 와 Fig.5는 폰툰형(pontoon type)과 이홀수판(with double barriers)이 부착된 상태에서 각 구간별로 부소파제의 전방 및 중앙과 후방에서의 중형 방향에 대한 상대적인 평균속도를 비교하기 위하여 평균속도성분 추출 구간을 점선으로 표시 하였다. 폰툰형 부소파제의 중방향 평균속도성분 추출 구간은 부가물인 커튼판을 제외한 해석영역에서의 크기 $H_{(1)} = 40mm$ 에 대한 비율을 적용하여 폰툰형 부소파제의 왼쪽 구간은 $0.48H_{(1)}$, 오른쪽 구간은 $0.325H_{(1)}$ 만큼 떨어진 곳에서 추출하였다. 횡방향 평균속도성분 추출 구간은 와의 중심이 놓일 수 있게 하였으며, Fig. 4에 추출 구간 및 간격을 표시하였다. 이홀수판형 부소파제의 경우에도 위와 같은 방법으로 $H_{(2)}$ 를 기준으로 중 형방향에 대한 평균속도성분을 추출하여 폰툰형과 이홀수판형의 평균속도성분 비교를 Fig. 6 이하의 그래프로 나타냈다.

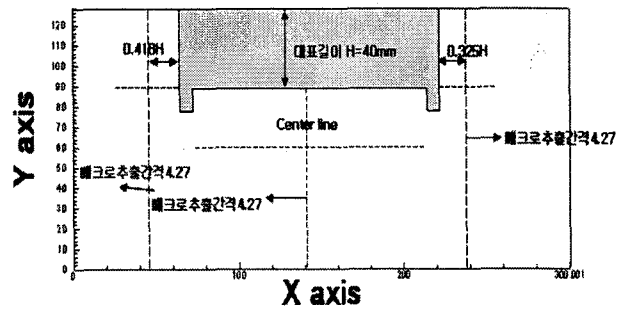


Fig. 4. 폰툰형의 평균속도성분 추출 구간 및 간격.

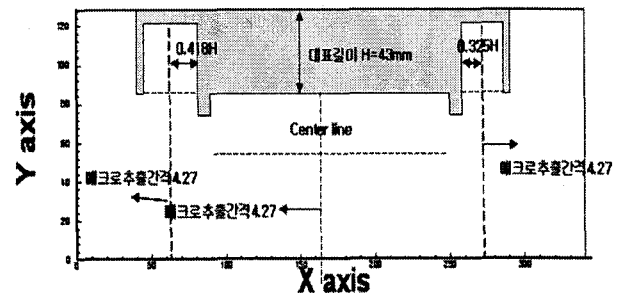


Fig. 5. 이홀수판형의 평균속도성분 추출구간 및 간격.

다음에 보이는 그림들은 앞서 설명한 폰툰형 부소파제와 이홀수판형 부소파제 각각의 전방부, 중앙부, 후방부에서 추출한 평균속도 성분을 그래프로 나타내었으며 파란선의 동그라미 격자로 나타나는 그래프는 폰툰형 부소파제의 평균속도 성분을 나타내고, 직사각형의 점으로 나타나는 그래프는 이홀수판형 부소파제의 평균속도 성분을 나타내고 있다. Fig. 6과 7은 폰툰형부소파제와 이홀수판형 부소파제의 전방부에서 횡방향의 평균속도 성분을 추출하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 6에서 보면 X-axis 30에서는 와의 바깥부분에서 평균 벡터가 크게 나타나지만 와의 핵에 근접속도가 줄어들어 0에

가까워지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에서 유입류의 속도는 이홀수판으로 인한 박리현상의 영향으로 X-axis 46에서 유입속도에 비해 5배 낮은 평균속도 벡터값인 0.07이 나타나며, 1차 박리에 의해 생성된 와의 영향을 받게 되면서 X-axis 50지점에서 급격하게 올라가 3.5배 높은 평균속도벡터 성분이 생성되는데 이것은 이홀수판으로 인해 생성된 와의 바깥 부분의 빠른 속도 성분의 영향이라 말할 수 있겠다. 이 속도 성분은 다시 와의 중심에 가까워지면서 X-axis 70까지 줄어들며 와의 바깥쪽으로 가면서 미세하게 증가하다 벽면효과에 의해 다시 감소하는 현상을 보인다.

Fig. 8과 9에서는 폰툰형과 이홀수판형 부소파제의 중앙부에서 평균속도벡터를 나타낸 것이다. 폰툰형 부소파제의 중앙부에서는 이홀수판형 부소파제의 중앙부 보다 2배 이상 큰 대규모의 와가 발생하며, 와의 중심은 우측으로 $0.6H_{(1)}$ 가량 이동하였다. X-axis 70에서는 고차와류의 영향으로 평균속도벡터

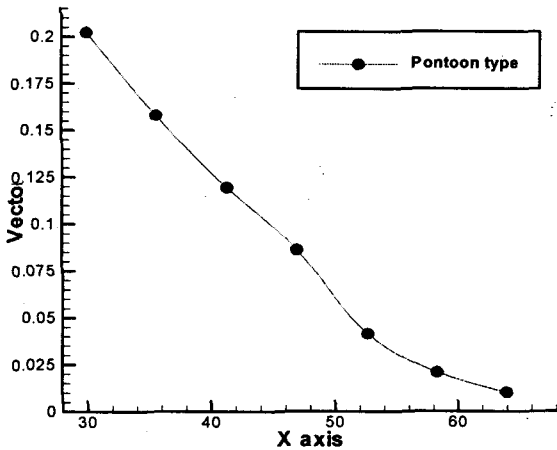


Fig. 6. 폰툰형 부소파제 전방부에서 횡방향의 평균속도벡터.

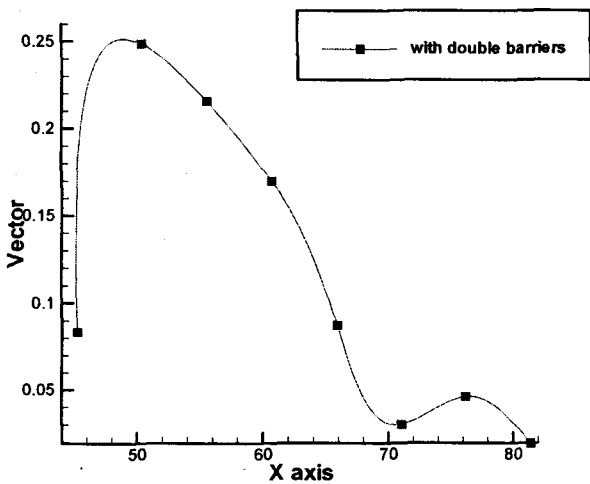


Fig. 7. 이홀수판형 부소파제 전방부에서 횡방향의 평균속도벡터.

성분이 증가, 감소, 증가 하는 현상을 보였으며, X-axis 190이상에서는 커튼판의 영향으로 와류가 생성소멸되었고, 이러한 현상 때문에 평균속도벡터가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이홀수판형 부소파제 중앙부에서는 폰툰형보다 상대적으로 작은 와의 구조가 나타나며, 와의 중심으로 갈수록 속도가 감소하고, 와의 중심부를 지나 X-axis 180~220사이에서 평균속도벡터가 6배 이상으로 급격히 증가 하였다. 이것은 이홀수판형 부소파제 중앙에서 생성되는 대규모 와류에 의해 연계되는 비정상적 상하이동인 플래핑(flapping)현상으로 사료되어 차후 보다 정밀한 분석을 요한다. 또한, Fig. 9에서는 Fig. 8의 폰툰형 부소파제에서 나타난 평균속도벡터의 감소현상이 커튼판의 영향으로 인해 X-axis 200전후에서 나타났다. 폰툰형 부소파제 후방의 커튼판에 의해 대규모 와가 생성되었고, 이것으로 인해 2차 박리가 일어나 복잡한 난류 유동장의 재순환 영역이 형성되어 3배 이상의 속도 성분이 줄어드는 것을 Fig. 10에서

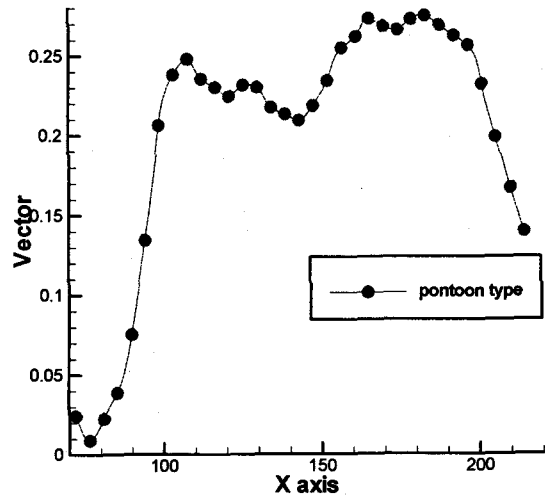


Fig. 8. 폰툰형 부소파제의 중앙부에서 횡방향 평균속도 벡터.

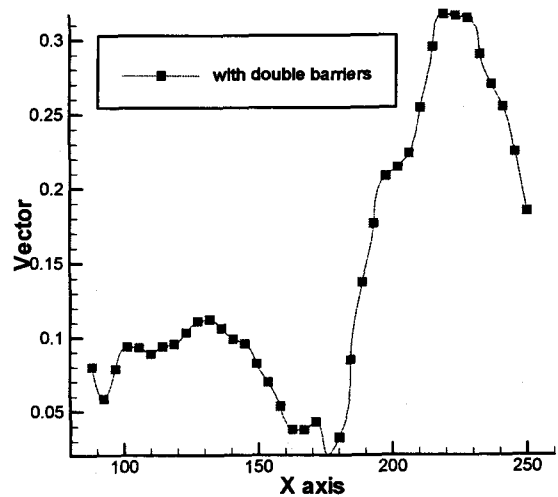


Fig. 9. 이홀수판형 부소파제 중앙부에서 횡방향의 평균속도벡터.

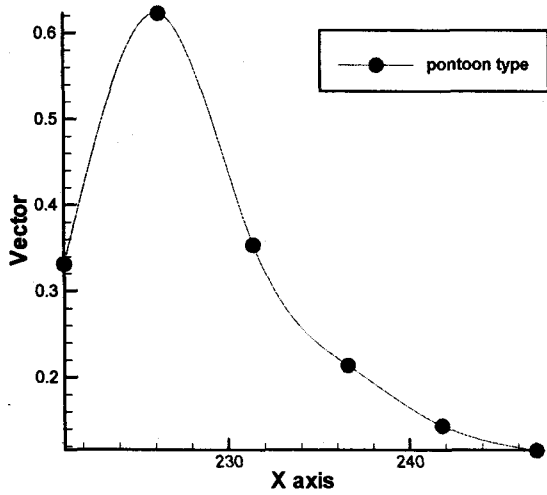


Fig. 10. 폰툰형 부소파제 중앙부에서 횡방향의 평균속도벡터.

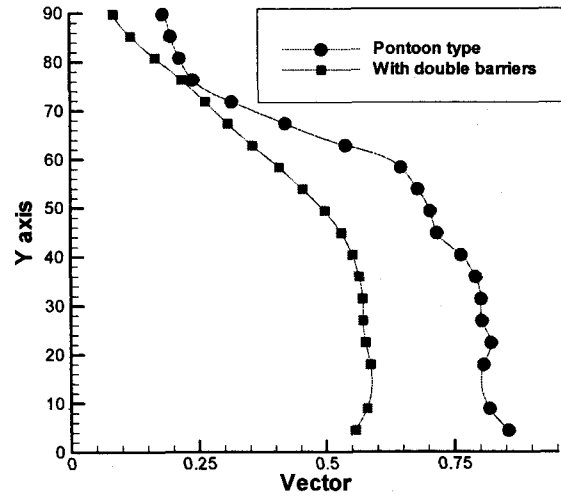


Fig. 12. 폰툰형과 이홀수판형 부소파제 전방부에서 종방향의 평균속도벡터 비교.

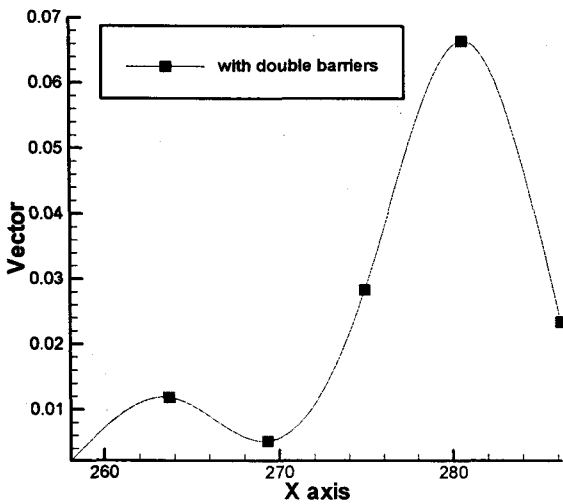


Fig. 11. 이홀수판형 부소파제 후방부에서 횡방향의 평균속도벡터.

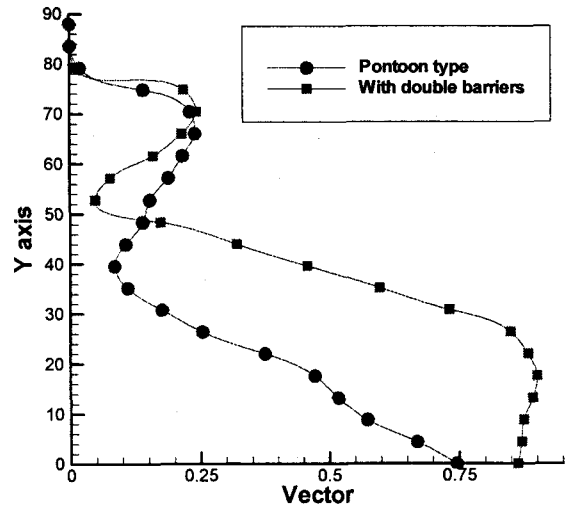


Fig. 13. 폰툰형과 이홀수판형 부소파제 중앙부에서 종방향의 평균속도벡터 비교.

알 수 있다.

Fig. 11에서는 이홀수판형 부소파제 후방에서의 평균속도벡터를 나타내고 있으며, 이홀수판형 부소파제 후방에서의 급격한 속도 감소현상이 그래프에서 잘 나타나고 있다. 이는 이홀수판형 부소파제의 전방부에서부터 후방부까지 커튼판과 이홀수판의 영향으로 유입류의 속도 성분이 크게 감소된 것으로 사료된다.

Fig. 12에서는 폰툰형 부소파제와 이홀수판형 부소파제 전방부에서 종방향 평균속도벡터를 나타낸 것이다. 이홀수판의 영향으로 소규모 와류가 발생하였고, 와류의 영향으로 평균속도벡터는 폰툰형 부소파제 전방에서 보다 2배정도 감소하였으며, 부소파제 하방으로 갈수록 유속이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 폰툰형과 이홀수판형 부소파제의 중앙부에서는 커튼판과 이홀수판으로 인해 박리 현상이 일어나는데 이는 고차

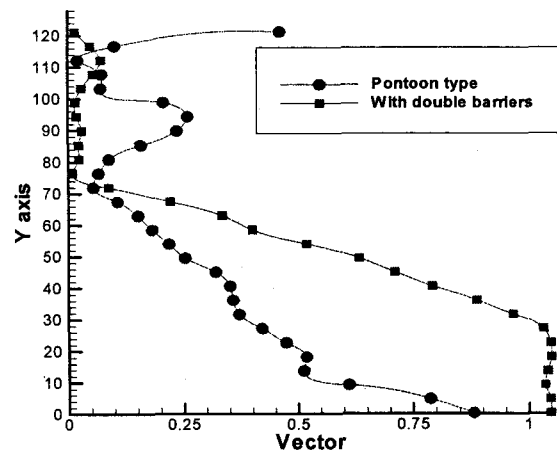


Fig. 14. 폰툰형과 이홀수판형 부소파제 후방부에서 종방향의 평균속도벡터 비교.

참 고 문 헌

와류와 대규모 와류의 발생으로 이어져 유입류의 유속변화에 큰 영향을 미치게 되며, 폰툰형 부소파제와 이홀수관형 부소파제의 중앙에서 횡방향 평균속도벡터의 크기를 비교해 보면 와의 중심에서 멀어질수록 평균속도벡터는 Y-axis 70지점 에서 벡터 값이 0.025까지 동시에 증가하다 벽면에 부딪혀 다시 감소하였다. 이홀수관형 부소파제의 경우는 이홀수관의 영향으로 인해 폰툰형 부소파제보다 유속이 급속히 줄어드는 현상을 보이는데 난류 유동장을 벗어나는 범위인 Y-axis 50지점 전후에서는 폰툰형과 이홀수관형 부소파제의 평균속도벡터가 같은 유형으로 크게 증가하는 것을 Fig. 13 에서 볼 수 있다.

Fig. 14 에서는 폰툰형 부소파제와 이홀수관형 부소파제의 후방에서 종방향 평균속도벡터의 변화를 보여주고 있다. 폰툰형과 이홀수관형 부소파제의 후방에서 커튼판과 이홀수관의 영향에 의해 생성되는 박리 현상은 복잡한 난류 유동장의 비정상적(unsteady) 상하이동을 일으키며 Y-axis 120~70 부근에서는 평균속도벡터가 감소하였다가 다시 증가하고 또다시 감소하는 불규칙한 현상을 보였다. 이러한 전체 박리 전단층의 비정상적 상하 운동을 플레핑(flapping)현상이라 하며 난류 유동장의 경계층을 벗어나면서 점차적으로 안정적인 평균속도벡터의 증가를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 부소파제 주위의 유동현상을 PIV 기법을 사용하여 폰툰형과 이홀수관형 부소파제 주위의 유동특성 및 속도분포를 $Re = 2.12 \times 10^4$ 에서 정량적으로 계측하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유동장에서 유입방향에 수직인 부소파제의 벽면에 의해 와류가 생성됐으며, 와류의 속도성분을 계측 분석한 결과 와의 핵에 가까워질수록 평균속도벡터값은 0에 근접하며, 반대로 멀어질수록 평균속도벡터의 크기가 증가하나 벽면의 표면에서 다시 평균속도벡터의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었다.
2. 각 부소파제의 중앙부에서 유선을 분석한 결과 커튼판과 이홀수관의 영향으로 와류가 생성되었다. 폰툰형 부소파제보다 이홀수관형 부소파제에서 생성된 와류의 크기가 수직방향으로 40%만큼 작게 나타났으며, 와류 핵의 위치는 0.6H만큼 앞에서 나타났다.
3. 폰툰형·이홀수관형 부소파제의 전방, 중앙 및 후방에서의 종방향별 평균속도벡터를 계측 분석한 결과 폰툰형 부소파제 보다 이홀수관이 부착된 이홀수관형 부소파제의 전후방위에서 속도성분이 상대적으로 낮게 계측되었다. 이것으로부터 이홀수관형 부소파제의 속도저감 효과가 상대적으로 높은 것을 알 수 있었다.

[1] 박노식, 엄병섭 “쌍동형부유식소파제의 소파성능에 관한 연구” 한국해양공학회지, pp.128~134, 1998. 2
 [2] 이회성, 권순홍, 조효제 “소형파수조에 적합한 소파장치 개발에 관한 실험적 연구” 대한조선학회논문집, pp.103~108, 2001
 [3] 조대환, 이 경우, 오경근 “수직벽 하부에 있는 틈새 후방의 유동특성에 관한 실험적 연구” 해양환경안전학회 추계학술발표지, pp.153~158
 [4] Bettess P. and Zinnkiewicz O.C. "Diffraction and radiation of surface wave using finite and infinite elements", International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol.11 1977 pp1271~1290
 [5] Chakrabarti S.K. and Cofer D.c. "International of wave with a moored semisubmersible", Third International Offshore Mechanics and Arctic Engineering System, ASME, New Orleans
 [6] John F. "On the motion of floating bodies", Communications in Pure and Applied Meth. Vol/2,1950