

슬라이드 밸브 급폐쇄에 따른 디스크 주위 비정상유동의 PIV계측에 관한 연구

이철재* · 조대환**

* 동명대학교 자동차공학과, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on PIV Measurement of Unsteady Flow around Disk caused by Slide Type Valve Quick Closing

Chul-Jae Lee* · Dae-Hwan Cho**

* Department of Automobile Engineering, Tong Myong University, Busan, 608-711, Korea

** Faculty of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 이 연구에서는 전 유동장의 순간속도를 계측 할 수 있는 PIV계측기법을 슬라이딩 밸브의 폐쇄 직후에 적용하고 짧은 시간에 발생하는 디스크 주위의 비정상 속도를 계측하여 유동특성을 실험적으로 고찰하였다. 순간유동장을 분석한 결과를 기존의 압력변동을 측정된 연구 결과에 비교 검토한 결과 슬라이드 밸브 급폐쇄에 따른 속도변동이 크게 나타나는 시간구간은 0.1초 이내이고 주기는 0.12초로 추정되었다. 또한 원관 내부의 디스크 주위유동은 상부부터 폐쇄되면서 유로가 좁아져 순간적으로 빠르게 하류로 진행하였으며 폐쇄직후에 역류하는 속도의 크기는 4/120초까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 완전 폐쇄 후 상류 측으로 역류하는 흐름의 영향으로 $y/D=0.2$ 하부 영역에 역류하는 속도성분이 나타났으며, $y/D=0.7$, $x/D=-0.3$ 의 근방에서 0.2D 크기의 회전와류가 관찰되었다.

핵심용어 : 원관, 슬라이드 밸브, 비정상유동, 급폐쇄, 입자영상유속계

Abstract : In this research, we experimentally studied flow characteristic by applying PIV measuring techniques which could measure the point velocity of all flow field and measuring the unsteady velocity of surrounding disk generated in a short time. Time range of great velocity change following quick closing of the slide valve was within 0.1s and the cycle was presumed to be 0.12s as a result of comparison study between the result of point flow field and of existing pressure change. Also, surrounding disk flow inside the circular pipe was closed from the upper part and flow road was getting narrow and advanced to the lower part incidentally quickly. There was a tendency that the size of the flow back velocity to the upper part immediately after the closure decreased to 4/120s and increased again. There was flow back velocity component in $y/D=0.2$ lower part by the influence of flow back to the upper part after complete closure and the vortex flow of 0.2D-size near $y/D=0.7$, $x/D=-0.3$ was observed.

Key Words : Circular pipe, Slide valve, Unsteady flow, Quick closing, Particle image velocimetry

1. 서 론

수격현상은 펌프를 기동시키거나 관로에 설치된 밸브의 개도를 빠르게 변화시킬 경우, 관로 내의 유속이 급격히 변화하여 압력이 크게 상승 또는 강하하며 발생한다. 이러한 수격작용으로 압력파가 상류와 하류 사이를 왕복할 때 관로 내의 압력은 관로 형상에 따라 물의 포화증기압 이하로 떨어질 수 있으며, 이 경우 증기공동(vapor cavity)이 형성되고 증기공동으로 분리되었던 수주가 재결합할 때 높은 압력이 유발되어 관로가 파손될 가능성이 커지게 된다(김, 2001). 펌프 관로계에서 수격작용

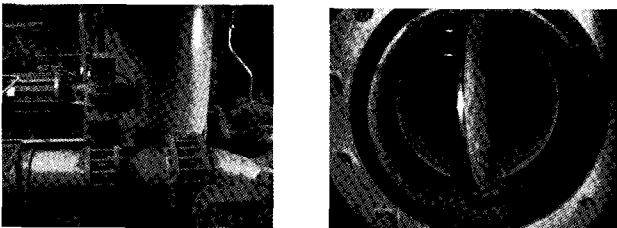
을 완화시키는 장치로는 주로 에어챔버, 서지탱크, 서지릴리프 밸브, 공기밸브, 펌프제어밸브 등이 있으며 이러한 설비들은 경제성과 신뢰성을 고려하여 설치유무가 결정되게 된다.(한국수자원공사, 1994; 한과 김, 1996). Bergant et. al(2006)은 수격과 관련하여 20세기에 이루어진 연구를 전반적으로 분석하였다. 1900년 Moscow Water Works에서 수행한 연구결과 발생된 압력파가 관로시스템 내를 한번 왕복하는데 걸리는 시간에 대한 개념을 도입하면서 관로계의 파속도 및 반사파에 대한 연구가 시작되었고, 그 이후 파의 전파속도에 기초하는 유체밀도, 파속도, 유속변화와 압력상승과의 상관관계가 규명되었다. 같은 시기에 에어챔버가 설치되어 있는 관로에서 마찰손실을 무시할 때 압력 서지는 관내 물의 정상상태 운동에너지에 대한 포텐셜 에너지의 비인 관로상수와 관내 물의 정상상태 운동에너지에

* 대표저자 : 정희원, lcj@tu.ac.kr , 051-620-3538

** 교신저자 : 종신회원, dhcho@mmu.ac.kr , 061-240-7217

대한 챔버 내 공기의 정상상태 포텐셜 에너지의 비인 에어챔버 상수에 관계한다는 개념도 확립되었다. Afshar et. al.(2008)와 김과 이(1997)는 을 개선하여 펌프정지 및 밸브폐쇄에 따른 압력 변화의 시간별 과도특성을 규명하였다. 예상되는 두 가지의 관로계를 가정하여 펌프 출구측 송출관로의 각 지점에서 해석을 하였으나 이 방법으로는 구간별 특성을 해석은 가능하나 보다 상세한 고찰을 할수 없는 제약이 있어 밸브 폐쇄 직후의 속도특성을 파악할 수 없는 단점이 있다.

최근의 연구동향을 보면 대형관과 관련된 연구(최, 2009)와 특성곡선법(characteristic method)등을 이용한 과도특성의 규명(김과 이, 1997), 그리고 펌프장 등 설비 계통에서 에어챔버 등의 수격완화설비를 이용한 연구(라 등, 2004)가 주를 이루고 있다. 그러나 수격현상을 미리 예방 하는 것도 필요하지만 관로 계통에서 수격에 의해 취약한 부분을 설계에 반영할 수 있는 수격현상 직후의 내부 유동특성을 규명하는 것도 매우 중요하다. 특히 대형관 계통의 경우 밸브 디스크의 주위의 흐름특성은 사고발생시 원인 규명 등에 활용 될 수 있으며, 관련분야의 설계에도 유용한 자료가 된다. 이와 관련된 연구(김, 2007)에서 실제 조선소의 건조선박에서 발생하였던 수격 사고들 중 펌프 배관계통 사고(Fig. 1 참조)를 현장 측면에서 분석하고, 이를 방지할 수 있는 방안을 운전방법의 측면과 설계개선의 측면에서 고찰하였다. 그 결과 선박 펌프계통에서의 수격사고의 가장 큰 원인을 관내의 부압 형성에 의한 사고와 밸브 개폐시간을 준수하지 않은 경우로 분류하고 사고 예방을 위한 권장 밸브개폐시간을 제안하였다.



(a) pump appearance (b) damage of disk
Fig. 1. Photo of Pump and Valve Disk Appearance.

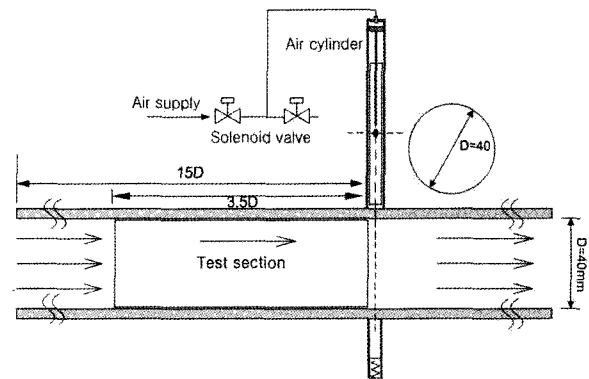
수격작용이 급격한 유동현상에 의한 현상임을 고려할 때 수격현상이 발생하는 시점에서 압력의 변동 과정을 규명하는 것은 매우 중요하며, 기존의 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 지금까지는 수격현상과 같이 짧은 시간에 발생하는 비정상유동을 계측할 수 있는 계측기가 개발되지 않아 Fig. 1의 디스크 손상과 같은 사고의 원인규명에 많은 어려움이 있는 실정이다. 선박의 배관계통에서 주로 사용되는 밸브는 슬라이딩밸브(gate valve)와 버터플라이밸브(butterfly valve)이다. 각각의 밸브의 구조적 특징으로 디스크 면은 평면과 중심축부분의 곡면을 갖는 형상이고 작동은 수직방향으로 상하 이동 및 중심축을 기준으로 회전 이동하는 구조이다.

이 연구에서는 디스크 면이 평면이고 작동방향이 상하방향인 슬라이딩 밸브를 연구대상으로 선정하였다. 계측기법으로는

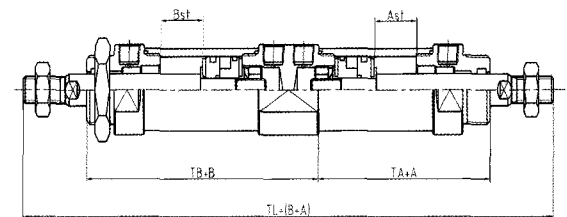
전 유동장의 순간속도를 계측 할 수 있는 입자영상유속계를 채택하고, 아크릴로 제작한 슬라이딩밸브 모형에서 밸브의 급폐쇄 직후 짧은 시간에 발생하는 디스크 주위의 비정상 속도를 계측하여 디스크 주위 유동특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

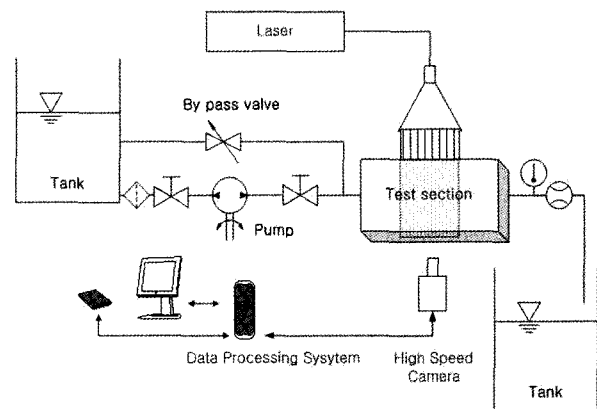
실험에서 사용된 실험 장치와 데이터 처리 시스템의 계통도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험장치는 수조의 물이 필터를 거쳐서 원심펌프에 의해 계측영역으로 급수되고 온도계와 유량계를 거쳐 탱크로 재순환된다. 펌프 출구 측에 바이패스 밸브를 연결하여 유량조절을 가능하게 하였으며 계측영역은 파이프의 곡률에 의한 오차를 줄이기 위해 수조를 설치하였다. 밸브는 슬라이딩 형으로 상부에 연결된 에어실린더에 의해 수직 하강하여 흐름을 차단하게 된다.



(a) Test section



(b) Air cylinder



(c) Experiment setup

Fig. 2. Schematic Diagram of Experiment.

Fig. 2(b)는 실험에 사용된 공압실린더로서 내경 20φ, 행정 100mm이다. 작동속도는 공기압 7kg/cm²에서 약 500mm/sec이며, 실린더 끝단에 연결되어있는 밸브도 같은 속도로 작동되는 것으로 간주 하였다. 고압실린더의 완충장치는 스프링식이며 작동속도를 고려하여 우선적으로 급폐쇄가 되고 남은 행정은 하부로 이동되도록 설계하였다.

PIV 계측기법의 특징은 실험현장의 상황을 영상으로 보존이 가능하며, 이를 이용하여 향후 해석방법이 개선되었을 때 재해석이 가능한 장점이 있다. 이러한 PIV기법은 최근 하드웨어의 발전과 관련 알고리즘이 개발되어 3차원 계측 결과가 제시되고 있으나 계측영역의 제한사항으로 인해 고속계측에서의 계측결과에 대한 신뢰성 검증이 주로 이루어 지고 있는 실정이다. 이 연구에서는 2차원 PIV계측기법을 채택하였다. 실험은 다음의 순서에 의해 진행하였다. 먼저 100μm 전후의 PVC(poly vinyl chloride)입자를 1ℓ의 용기에 약간의 계면활성제를 섞어 충분히 혼합 한 다음 일정시간 후 표면에 떠있는 입자와 침강한 입자는 버리고 수중에 부유하는 입자만을 선별하여 수조에 고루 분포 하였다. 이후 펌프를 운전하면 일정한 유량으로 물이 관을 통하여 흐르게 되며, 이때 입자도 함께 실험장치 내를 순환하게 된다. 광원으로 5W의 아르곤이온레이저를 작동 시키고 연결된 광케이블을 이용하여 레이저 광을 계측영역 상부로 유도 하였다. 광케이블의 반대편 끝단에 연결된 원통형렌즈는 상하 두개로 구성되어있으며, 이 렌즈의 거리를 조절하면 약 2mm의 평면광이 생성된다. 이 광원을 계측영역의 상부에 조사하여 유동가시화를 하였다. 유동장이 충분히 발달하였을 때 슬라이딩 밸브의 상부의 에어실린더에 연결된 솔레노이드 밸브(Solenoid valve)를 조작하여 압축공기를 공급하면 밸브가 급폐쇄되게 된다. 솔레노이드 밸브를 조작하는 스위치와 영상획득을 위한 고속카메라(FASTCAM-X, 1280 pixel × 1024pixel)를 동시에 작동하여 슬라이딩 밸브 급폐쇄 직후 약 16초간의 영상을 기록하였다. 시간간격은 1/120초이며, 얻어진 영상은 2,000장에 대해 PIV 상용소프트웨어로 해석하여 속도를 계측하였다.

3. 결과 및 검토

Fig. 3는 40A의 주관에서 유량이 5ℓ/min 일 때 관로 말단에 있는 밸브를 급폐쇄 하였을 경우 밸브로부터 각 지점의 속도를 시간별로 나타낸 결과이다. 밸브를 급 폐쇄하게 되면 수격압이 관로를 따라 왕복하며, 시간경과에 따라 마찰에 의해 압력파는 감쇠되고 관내 속도도 시간경과에 따라 감소하여 정지하게 된다. 밸브폐쇄 후 0.05초가 경과 하였을 경우 속도 감소율은 약 45%이며, 0.1초가 경과 후는 73%의 감소율을 보였다. 0.1초부터 2초까지는 완만한 감소를 보이며, 15.3초의 감소율이 99% 이상으로 나타나 정지된 것으로 판단하였다. y/D=0.3이하에서 나타나는 역류 현상은 슬라이딩밸브가 강하하면서 상부로부터 유료가 좁아져 닫힘으로 나타난 것이다. 역류의 영향은 시간의 경과에 따라 점차 상류로 전파되며, 속도와 크기가 감소되게 된다.

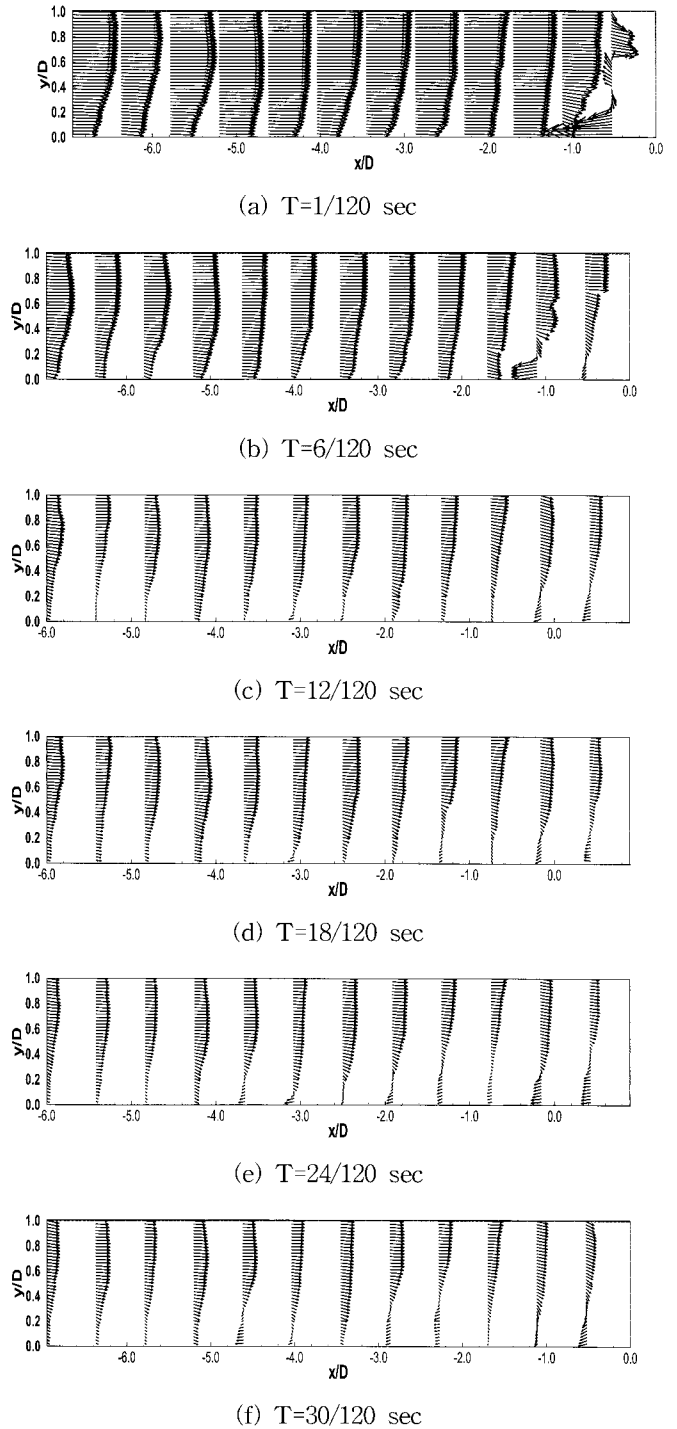


Fig. 3. Velocity profile after closing valve.

Fig. 4는 시간경과에 따른 최대 및 평균속도를 나타내었으며, Fig. 5에는 운동에너지의 결과와 한(1996)의 압력측정결과를 함께 도시하였다. t=1/120초 간격으로 계측한 속도장의 평균속도의 경향은 밸브가 급폐쇄되는 0.1초까지는 다소 급격하게 변화하고 그 이후로는 일정한 주기를 갖는 완만한 변화를 보이고 있다. 밸브의 폐쇄 속도와 한(1996)의 연구결과를 고려할 때 주기는 약 0.12초로 추정된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 각 변수에 대한 주기성을 검토하기위해 한(1996)의 수두의 변화와 실험결과인 운동에너지 및 밸브개폐

속도 0.08초, 주기를 0.12초로 추정하고 계산한 결과를 함께 나타내었다. PIV 계측에 의한 운동에너지의 변화가 첫 번째 주기에서 다소 빠르게 나타났으나 시간이 경과 할수록 완만해져 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 급격한 변화를 보인 구간에 대해 순간 속도벡터분포를 도시한 것이다. 1/120초의 경우 $y/D=0.2$ 하부측에 역류하는 속도성분이 나타나고 있다.

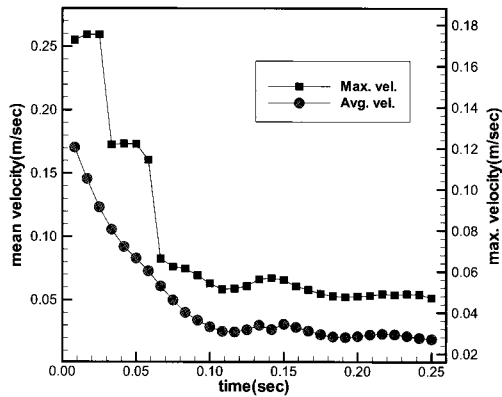
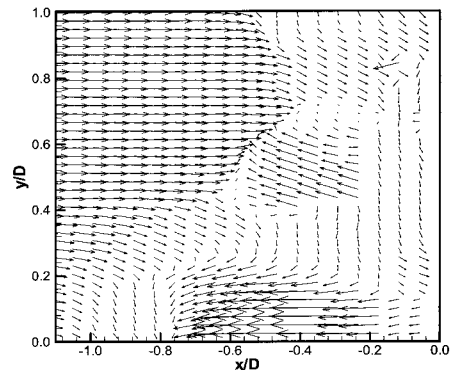


Fig. 4. Velocity profile at time variation.

복잡한 유동형태를 보이고 있다.

4/120초의 순간속도벡터 분포의 경우 기하학적 중심선상에서 사사분면은 역류흐름이 상류 측으로 발달하며 진행하고, 시간의 경과에 따라 그 세력이 약해져 감을 알 수 있다. 그림에는 나타나 있지 않으나 8/120초이후의 유동패턴은 대체로 큰 변화가 없이 속도만이 감소한다. 따라서 큰 속도 변동이 있는 시간 구간은 슬레노이드 및 공압실린더의 작동속도를 고려하더라도 약 0.1초 이내이다.



(a) 1/120 sec

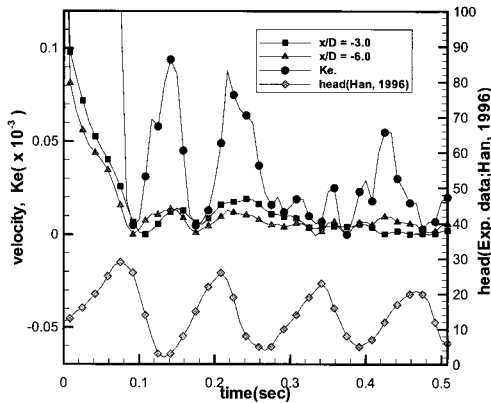
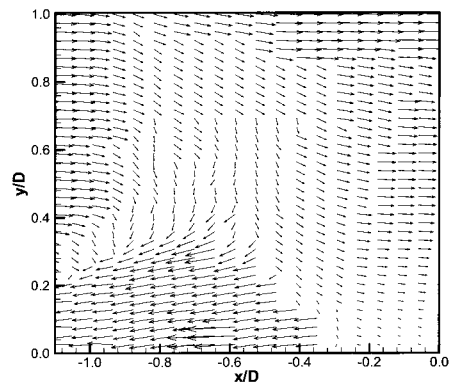


Fig. 5. Velocity wave by quick valve closure.



(b) 4/120 sec

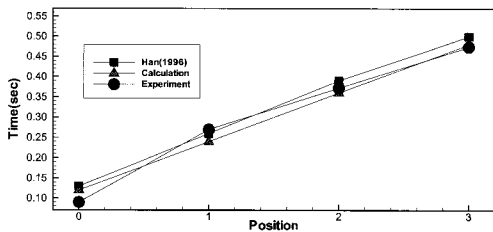
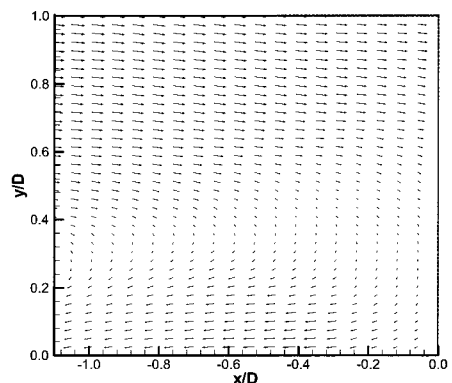


Fig. 6. Comparison of period Variation.

이것은 슬라이딩밸브가 하강하면서 상부부터 폐쇄되면서 유로가 좁아져 순간적으로 빠르게 하류로 진행하던 속도성분이 완전 폐쇄되면서 압력파와 더불어 상류측으로 역류하기 때문이다. 이러한 영향으로 $y/D=0.7$, $x/D=-0.3$ 의 위치에서 $0.2D$ 크기의 회전와류가 발생하고 있으며, 유동방향이 바뀌면서 매우



(c) 8/120 sec

Fig. 7. Instantaneous velocity distribution.

Fig. 8과 Fig. 9는 시간경과에 따라 $x/D=-0.2$ 위치에서 파이프의 반경방향의 수평속도와 시간 평균속도를 나타낸 결과이다. 폐쇄직후에 역류하는 속도의 크기가 4/120초까지 감소하다가 다시 증가하는 경향은 수평속도분포와 속도성분분포 모두에서 공통적으로 보이고 있으며, 5/120이후에는 완만하게 감소하는 결과를 보였다.

Fig. 10은 수직방향속도를 Fig. 8과 같은 방법으로 구하여 나타낸 것이다.

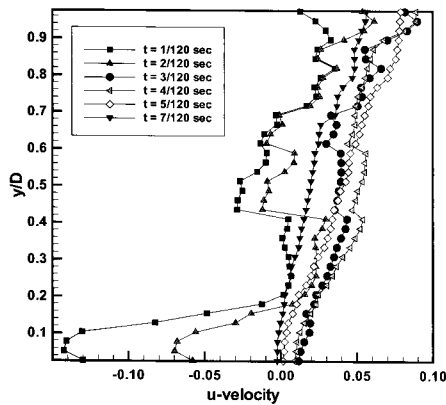


Fig. 8. Distribution of u-velocity at time variation.

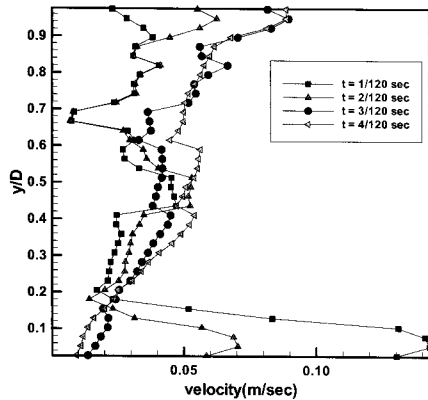


Fig. 9. Distribution of velocity at time variation.

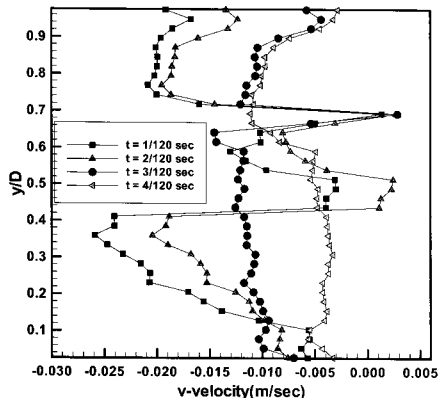


Fig. 10. Distribution of v-velocity at time variation.

여기서 슬라이딩 밸브의 폐쇄직후 중앙부근의 속도크기가 매우 크게 변화하고 있으며, 2/120초의 경우 $y/D=0.4$ 전후, 그리고 3/120초의 경우 $y/D=0.7$ 전후에 교호로 큰 변동이 관찰되었다. 수평속도의 경우 하부의 감소폭이 작은 반면 수직속도의 경우 상부의 감소폭이 작게 나타나고 있다. 이것은 급 폐쇄 이후 발생하는 압력파와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며, 여기에 관해서는 차후에 보다 면밀한 검토가 필요하다.

Fig. 11은 $x/D=-0.2$ 위치에서 파이프의 반경방향의 수평속도와 수직속도 변화를 1.120초에서 1/120초 구간에서 나타낸 것으로 4/120 sec 이후의 경우에는 완만하게 감소하고 있다.

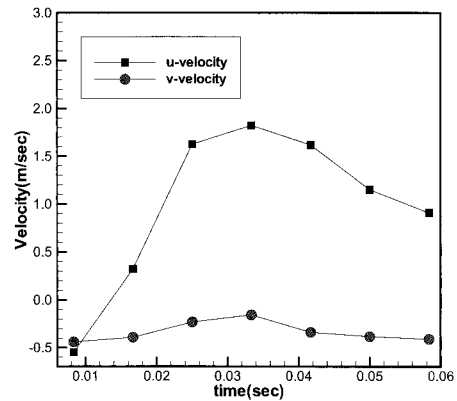


Fig. 11. Variation of u-velocity and v-velocity at time variation(1/120sec - 8/120sec).

4. 결론

이 연구에서는 유동장의 순간속도를 계측 할 수 있는 입자영상유속계를 이용한 PIV계측기법을 슬라이딩 밸브의 폐쇄 직후에 적용하여 짧은 시간에 발생하는 비정상유동을 계측하였다. PIV계측 결과 슬라이드 밸브 급폐쇄에 따른 속도변동이 크게 나타나는 시간구간은 0.1초 이내이고 주기는 0.12초로 추정된다. 또한 원관 내부의 디스크 주위유동은 상부로부터 폐쇄되면서 유로가 좁아져 순간적으로 빠르게 하류로 진행하였으며, 폐쇄직후에 역류하는 속도의 크기는 4/120초까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 완전 폐쇄 후 상류 측으로 역류하는 흐름의 영향으로 $y/D=0.2$ 하부 영역에 역류하는 속도 성분이 나타났으며, $y/D=0.7$, $x/D=-0.3$ 의 근방에서 0.2D 크기의 회전와류가 관찰되었다.

참고 문헌

- [1] 김경엽, 오상현(2001), 펌프제어밸브를 사용한 취수 펌프장에서의 수격 현상, 유체기계저널, 제4권, 제4호, pp. 16-21.
- [2] 김경엽, 이영호(1997), 펌프 관로계의 수격현상, 한국마린

- 엔지니어링학회지, 제21권 4호, pp. 331-355.
- [3] 김상균, 이계복(2007), 에어챔버가 설치된 가압펌프 계통에서의 수격현상, 한국에너지공학회지, 제16권 제4호, pp. 187-193.
- [4] 김정진(2007), 대형선박 배관망의 수격현상에 관한 연구, 목포해양대학교 대학원, 석사학위논문, pp. 53.
- [5] 라병필, 김진만, 이동근, 박종호, 김경엽(2005), 과도수리현상 해석과 실증을 통한 펌프장 안정성 확보방안, 유체기계저널 제8권 제5호, pp. 22-28.
- [6] 최명원(2009), 수격압 수치해석을 통한 관로 시스템의 안전성 검토, 한국지반환경공학회 2009 봄 학술발표지, pp. 175-187.
- [7] 한국수자원공사(1994), 펌프장설비 신뢰성 향상방안 연구, 수자원연구소 보고서, pp. 177.
- [8] 한화택, 김종만(1996), 단순 급수관로계내의 에어챔버 및 어레스터의 수격방지효과에 관한 실험적연구, 설비공학 논문집, 제8권, 제1호, pp. 37-44.
- [9] Afshar M. H., Rohani M.(2008), Water hammer simulation by implicit method of characteristic, J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, pp. 851-859.
- [10] Bergant A., A. R. Simpson, A. S. Tijsseling(2006), Water hammer with column separation: A historical review, J. Fluids and Structures, Vol. 22, pp. 135-171.
- [11] Wenxi Tian, G. H. Su, Gaopeng Wang, Suizheng Qiu, Zejun Xiao(2008), Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump feedwater system, Annals of Nuclear Energy, Vol. 35, pp. 2280-2287.

원고접수일 : 2009년 07월 07일

원고수정일 : 2009년 08월 20일 (1차)

2009년 09월 23일 (2차)

게재확정일 : 2009년 09월 24일