

# PIV에 의한 상수도 배관용 틸팅디스크 체크 밸브의 손실저감에 관한 연구

김범석\* · 김정환\* · 이종열\*\* · 김진구\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

## A PIV Study on Loss Reduction for Tilting Disk Check Valve Installed in Piping System of Water Supply by PIV

B.-S. Kim\*, J.-H. Kim\*, J.-Y. Lee\*\*, J.-G. Kim\*\*\* and Y.-H. Lee\*\*\*\*

*Key Words* : Tilting disk check valve(틸팅디스크 체크 밸브), PIV(입자영상유속계), Pressure drop(압력강하)

### ABSTRACT

In generally, under the influence of over-pressure drop, serious problems such as cavitation, choked flow, flashing and vibration has been coming around the tilting disk check valve. A PIV experiment to examine the cause of energy loss has been performed and the improvement configuration of valve seat based on this visualization results is proposed. In the visualization results, flows in the piping system became instability under the influence of the shape of boss. This unstable flows induces sudden pressure drop in the piping system. So, we change the configuration of boss as a streamlined design to be stabilized the flows. A pressure measurement has been performed to know that the influence of the configuration change. In result, the rate of pressure loss reduction is about 22% at the position of No. 2 and 24.2% at the position of No. 6 in comparison with pre-improved shape.

### 1. 서론

밸브에 의하여 생성된 압력강하는 마찰손실을 통하여 에너지를 흡수하기 때문에 이상적인 압력강하의 상황에서는 전체의 흐름이 과도한 속도증가 없이 보다 적은 에너지를 흡수하면서 밸브본체를 지나가게 하여야 한다. 그러나, 대부분의 산업체에 적용되는 밸브시스템에서는 필요이상으로 밸브를 지나가는 유동의 압력손실이 크게 발생하게 되며, 이는 국부적으로 급격한 압력강하에 의한 캐비테이션(cavitation), flashing, choked flow, 진동 같은 많은 문제를 일으킨다.<sup>[1][2]</sup> 이러한 문제들은 본체와 trim에 피식(erosion) 또는 캐비테이션 손상, 밸브 시트의 파손 또는 성능약화, 부착된 계기의 교정 문제, 배관파괴, 또는 작업자에게 청각 손실 등 많은 직접적인 결과들을 초래할 수 있다.

이러한 경우에, 밸브는 높은 압력강하 때문에 고가의 trim, 보다 잦은 보수, 다량의 예비 부품과 배관 유지비를 필요로 하며 결국 제작비용을 상승시키는 결과를 초래하게 된다.<sup>[3]</sup> 현재 산업체 및 상수도분야에서 적용되는 틸팅디스크 체크 밸브(tilting disk check valve)에서 발생하는 유체저항과 부차적손실(minor loss) 및 과도한 압력강하는 전체 시스템의 효율저하를 초래하므로, 밸브시스템의 보다 효율적인 운영을 위하여, 손실계수(K)의 상수에 큰 영향을 미치는 요소들의 발생원인에 대한 유체역학적 특성을 규명할 필요가 있다.<sup>[4][5]</sup> 본 연구의 목적은 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 통해 현재 수도 사업장에서 사용되는 틸팅디스크 체크 밸브의 정량적·정성적 비정상 유동 특성을 파악한 후 밸브시스템 내부의 유체역학적 원인 규명을 통하여, 에너지 손실이 발생하는 원인을 규명하고, 밸브 형상 개선 등을 통해 압력손실 및 이에 상응하는 손실계수를 기존밸브 대비 약 10~15% 절감하여 밸브시스템의 에너지 손실을 최소화함에 있다.

\* 한국해양대학교 대학원  
\*\* 한국수자원공사  
\*\*\* 충북과학대 컴퓨터응용기계과  
\*\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부  
E-mail : bum\_suck@pivlab.net

## 2. 실험장치

### 2.1. PIV 실험

Fig. 1에 판교가압장에 설치된 체크 밸브를 분해하여 밸브의 전면과 후면을 촬영한 사진을 나타내었다.

Fig. 2에 본 연구에서 채용한 PIV 시스템의 장치도를 나타내었다. 실제밸브는 틸팅디스크 밸브의 구조상 흐름방향으로 8°의 각도를 가지고 기울어져있다. 모형 밸브는 원활한 유동가시화를 목적으로 견고한 투명 아크릴을 이용하여 60mm로 정밀하게 축소 제작되었으며, 배관의 내경은 60mm로 제작되었다. 광원으로 100mJ Nd-Yag Dual Pulsed 레이저를 이용하였으며, 영상입력장치로써 1K×1K의 공간해상도를 가지는 CCD 카메라를 이용하였다. 추적입자로써 추종성 및 표면반사율이 우수한 직경 100μm의 PVC 구형입자를 선택하였다. 실험배관내의 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며, 레이놀즈수는  $1.38 \times 10^4$ 이다. 밸브의 개폐 제어는 수동으로 15°의 간격으로 제어가 가능하며, 순환 수펌프에 의하여 작동수가 공급되도록 하였다. 그리고 유량은 우측에 위치한 부차식 유량계에 의하여 목적으로 측정하였다. 시간평관을 위한 랜덤데이터의 수는 500 프레임으로 충분한 량의 데이터를 이용하여 신뢰성을 확보하였다. 처리 소프트웨어로써 계조치 상호상관법을 채택한 IIT사의 CACTUS 3.1을 이용하였다.

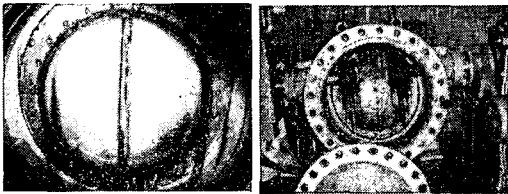


Fig. 1 Photos of tilting disk check valve(front side, rear side)

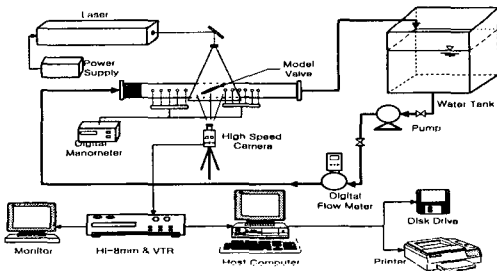


Fig. 2 Arrangement of PIV system

Table 1 Experimental Conditions and Devices

|                         | Item                             | Specification                                    |
|-------------------------|----------------------------------|--|
| Experimental Conditions | Outer diameter(Valve)            | 60mm   |
|                         | Inner diameter(Pipe)             | 60mm   |
|                         | An angle of opening and shutting | Full open,15,30,45,60                            |
|                         | Re                               | $1.38 \times 10^4$                               |
|                         | Pressure measurement             | Digital manometer                                |
| Visualization Equipment | Light source                     | 100mJ Nd-Yag dual pulsed laser                   |
|                         | Sheet light                      | Cylindrical lens                                 |
| Measuring Condition     | Working fluid                    | Tap water  |
|                         | Temperature                      | 15°C   |
|                         | Particle                         | PVC  |
| Image Processing        | Host computer                    | Pentium IV PC (1.7 GHz)                          |
|                         | Number data for time-mean        | 500 Frames                                       |
|                         | Identification                   | Two-frame gray-level cross correlation algorithm |
|                         | Ratio of error vector            | less 1%/frame                                    |

### 2.2. 압력계측

본 실험에서는 밸브전방에 1개소, 후방에 6개소 등 총 7개소에 밸브 직경을 기준으로 압력공을 60mm 간격으로 설치하여 벽면 압력을 측정하였다. 압력은 각 측정개소의 튜브와 연결된 고정도의 디지털 마노미터를 이용하여 측정되었다. 계측단위는 계기압으로 mm Hg이다. 또한, 밸브의 상류와 하류에서 각각 흐름이 비교적 안정된 것으로 판단된 위치에서 정압공에 의해 양단사이의 전 압력차  $\Delta P$ 에 의해 손실계수를 구하여 분석하였다.  $K_V$ 는 무차원 손실계수이며 유량에 의해 환산된 단면 평균유입속도와 정압공에서 계측된 압력 성분을 이용하여 계산할 수 있다. 그리고 손실계수  $K_V$ 와 유량계수  $C_Q$ 와의 관계는 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$K_V = \frac{\Delta H}{U^2} = \frac{\Delta P}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (1)$$

$$C_Q = (2K_V/\pi)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $K_V$  = 무차원 손실계수,  $\Delta P$  = 압력차,  $\rho$  = 밀도,  $U$  = 입구속도

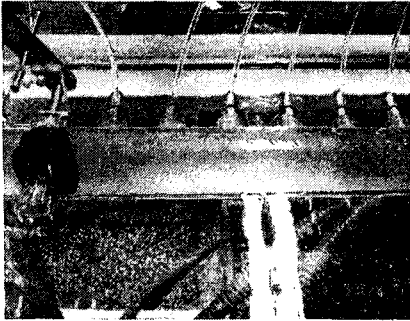


Fig. 3 Photo of pressure holes

Fig. 3에 실제 실험장치에 설치된 압력공의 사진을 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 압력손실 저감을 위한 밸브 형상개선

Fig. 4에 개선전 밸브의 형상에 대한 유동장의 2차원단면 가시화 사진을 나타내었다. 개선전 밸브의 형상은 Fig. 5(a)와 같다. 형상 개선전 밸브의 경우 밸브 시트 상부에 설치된 보스부 형상에 대한 영향으로 유동방향으로 상당한 교란성분이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이로 인한 불필요한 압력손실이 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 보스부의 형상으로 인해 발생하는 불필요한 교란성분을 제거하고 전체적인 흐름특성을 안정화시켜 불필요한 압력손실을 저감하고자 Fig. 5(b)와 같이 보스부의 형상을 최적화하였다.

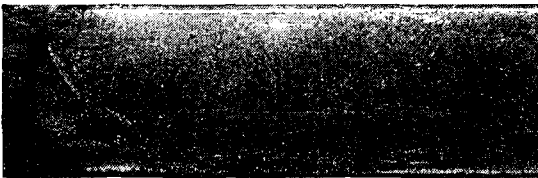
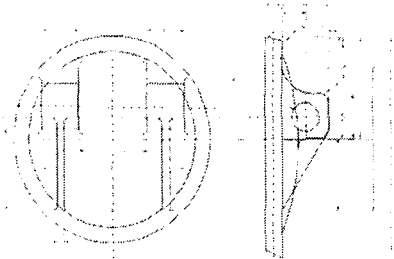
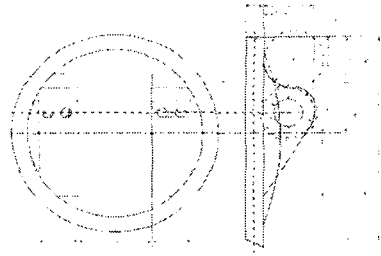


Fig. 4 Visualization on side section of pre-improved valve



(a) pre-improved model



(b) improved model

Fig. 5 Dimension of pre-improved and improved valves

#### 3.2. 속도벡터 분포

Fig. 6(a~b)은 밸브가 완전열림 상태에서 형상개선전의 시간평균 속도 분포와 동일 계측영역에서의 형상개선 후 결과이다. 두 결과는 모두 밸브 보스부 단면을 기준으로 촬영한 속도장의 결과이다. 두 속도장의 결과를 보면 눈에 띄는 변화가 나타나질 않고 있음을 알 수 있다. 이는 밸브가 전개된 상태에서 밸브에 유입되는 주류가 균일류로써 접근하며, 유동장의 축방향과 거의 평행하게 위치하고 있는 밸브의 위치상, 시간평균속도 벡터의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 이에 따라, 형상개선 효과를 밸브의 완전열림 상태에서 시간평균속도벡터의 변화만으로 정확한 판단을 내리기엔 부족한 점이 많다.

Fig. 7(a~d)은 보스단면상에서 밸브가 30°의 각도를 가지고 전개된 상태의 속도장을 나타낸다. 여기서, 시간평균 속도장의 결과와는 달리 밸브 후방으로 발달하는 유동장의 변화가 존재함을 알 수 있다. 즉, 형상개선 후의 유동장이 형상개선전의 유동장에 비해 후류의 유동특성이 다소 안정화되어 가고있음을 알 수 있다. 밸브의 열림각이 커짐에 따라 흐름이 밸브의 형상을 따라 균일하게 흘러가지 못하고 밸브 후방으로 복잡한 3차원 난류성분을 크게 발생시키고 있기 때문에 형상개선의 효과는 밸브의 열림각도가 커질수록 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 따라서, 보스부를 포함한 밸브의 상부형상에 대해 가능한 흐름의 박리현상을 억제하여 복잡한 후류의 발생을 억제해주는 유선형으로 개선함으로써 상당한 흐름의 안정성을 도모 할 수 있음을 알 수 있다.

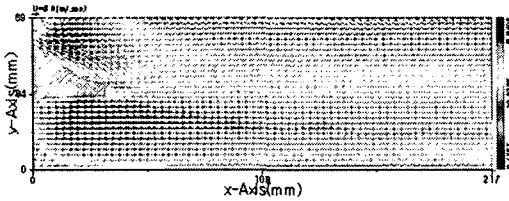
#### 3.3. 속도프로파일 분포

속도프로파일 결과는 밸브의 완전열림 조건 하에서만 검토하기로 한다. 이는 실제 가압장 펌프는 통상적

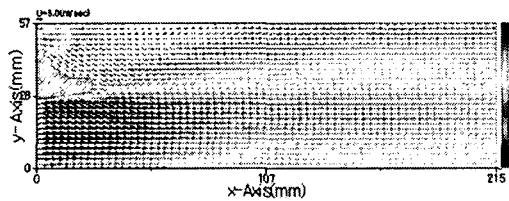
으로 밸브가 완전열림 상태에서 운전되므로, 밸브의 완전열림 상태에서의 형상개선효과가 주된 관심사가 되기 때문이다.

Fig. 8은 보스단면에서의 형상개선 전·후의 결과를 나타내고 있다. 양 결과에서 명확한 차이점은 발견되지 않으나, 밸브 후방에서의 V방향 속도의 프로파일을 유심히 관찰해보면, 형상 개선 후의 시간평균 V속도의 값이 개선 전의 값보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 장애물이 없는 배관내의 시간평균 흐름에서 V방향 속도성분의 값은 0이어야 함으로, 이 값이 크다는 의미는 밸브에 의한 유동의 교란성분이 발달하고 있다는 것을 의미한다. 이는 박리영역의 확대, 방출후류의 발달, 이에 따른 기타 손실을 나타낸다.

Fig. 9는 돌출부인 보스부가 없는 밸브시트 중앙단면에서 촬영한 영상의 결과이다. 밸브시트 형상개선 전의 결과를 보면, 밸브 후방에서 U 방향 속도 성분의 크기가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 운동량 결손의 결과이며, 보통 항력의 크기와 비례한다. 물체의 항력은 물체 후방에서의 박리영역의 크기에 비례한다는 특성을 고려하면, 이와 같은 운동량 결손은 유동장의 손실과 밀접한 관계가 있으며, 본 연구에서 채택된 개선된 밸브의 형상 반영 효과가 잘 반영되어 나타나고 있다고 판단된다.

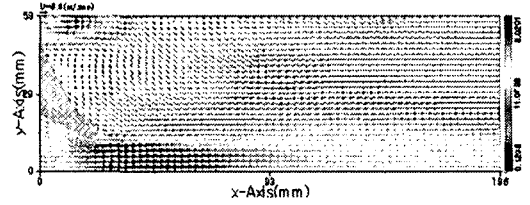


(a) Front section of pre-improved valve, full-open

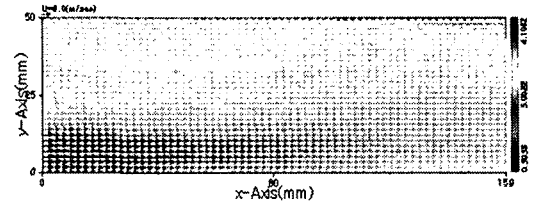


(b) Front section of improved valve, full-open

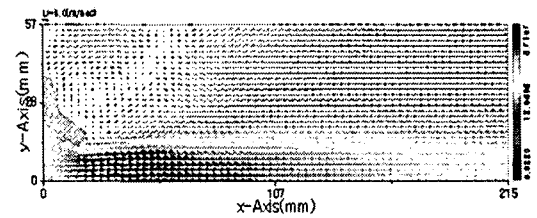
Fig. 6 Time averaged velocity fields (side section, full-open)



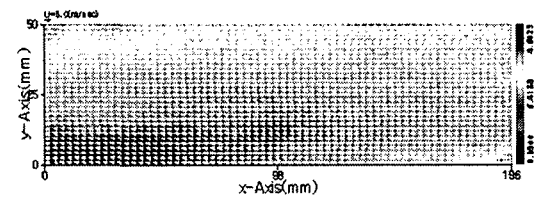
(a) Front section of pre-improved valve, 30° open



(b) Rear section of pre-improved valve, 30° open

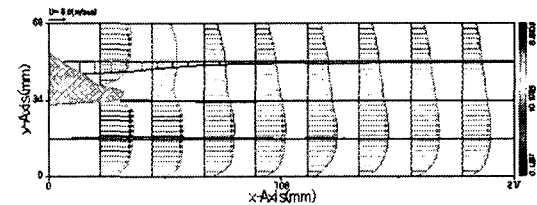


(c) Front section of improved valve, 30° open

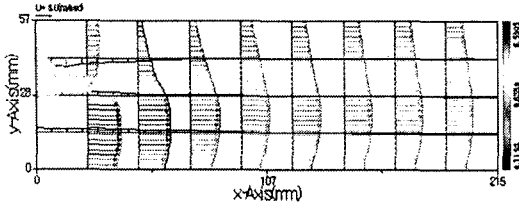


(d) Rear section of improved valve, 30° open

Fig. 7 Time averaged velocity fields (side section, 30° open)

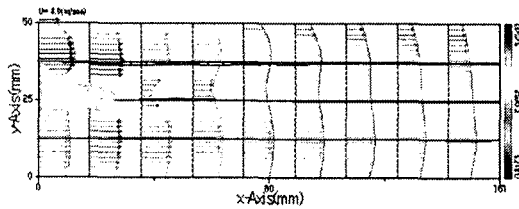


(a) Front section of pre-improved valve, full-open

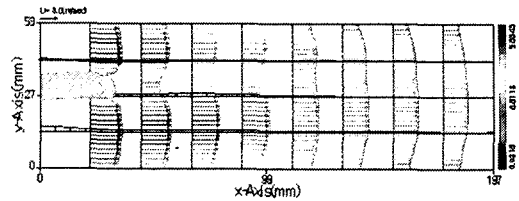


(b) Front section of improved valve, full-open

Fig. 8 Time averaged velocity profiles (side section, full-open)



(a) Front section of pre-improved valve, full-open



(b) Front section of improved valve, full-open

Fig. 9 Time averaged velocity profiles (mid-section, full-open)

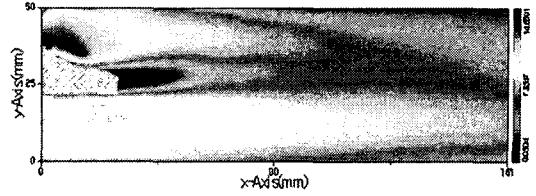
### 3.4 운동에너지 분포

Fig. 10(a~b)은 밸브가 완전열림 상태에서의 시간 평균 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 운동에너지 분포는 유동장의 국소유량과 상관관계를 가짐으로서 이 값이 크게 나타나는 곳은 공급유량이 많음을 의미한다.

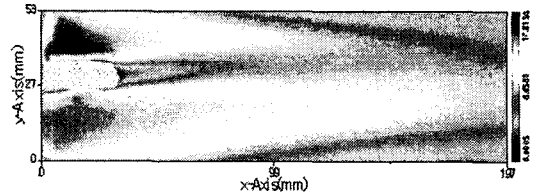
Fig. 10은 중앙단면에서의 결과이며, 밸브 형상개선 후에 밸브 상하면에서 운동에너지가 크게 분포함으로써 통과하는 유량이 증가함을 나타내고 있으며, 동시에 밸브 물체의 저항이 작아짐을 나타내고 있다. 따라서, 발생하는 유동손실도 감소함을 예측할 수 있다.

### 3.5 압력손실 및 손실계수

본 연구에서는 밸브의 전방에 1개, 후방에 6개의 압력공을 밸브의 직경과 동일한 간격으로 배치하여 벽면



(a) Front section of pre-improved valve, full-open



(b) Front section of improved valve, full-open

Fig. 10 Time averaged kinetic energy (mid section, full-open)

압력을 계측하였다. 일정한 유량상태에서 밸브 전방에서의 압력 측정값을 기준으로 밸브 후방에서 측정된 6개소의 압력값을 뺀 데이터를 이용하여 Fig. 11에 그래프로 나타내었다. 압력 측정결과 어느 위치에서나 2번의 압력공 위치(밸브 후방으로 두번째 계측지점)에서 가장 낮은 값을 나타내고 있음으로써 밸브 물체에 의한 속도증가가 가장 크게 발생하는 교축부를 의미한다. 교축부를 지나서는 서서히 압력이 회복하는 특성을 보이고 있으며, 6번의 위치에서 대부분의 압력이 회복된 특성을 나타내고 있다. 실제 밸브의 운전상태에서의 밸브 압력손실 저감의 효과를 판단하는 것이 중요한 부분이므로, 밸브의 개도가 완전열림 상태에서의 압력분포에 대한 결과만 나타내었다.

Fig. 11의 1번 위치에서는 개선 전·후의 압력차이가 22%, 2번 위치에서는 12.2%의 차이를 보이고 있다. 또한 압력의 회복이 대부분 이루어졌다고 판단되는 위치인 6번 지점에서는 24.2%의 차이를 보이고 있다. 즉, 밸브의 완전열림 상태에서 밸브 형상개선을 통한 압력손실저감 효과가 계측 위치마다 각각 다른 값을 가지나, 6의 위치를 기준을 약 20%이상 손실압력 감소효과를 가져온다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서 제안된 밸브 형상변경에 의한 압력손실 저감 효과는 PIV에 의한 유동특성 해석과 더불어 정량적으로도 충분한 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

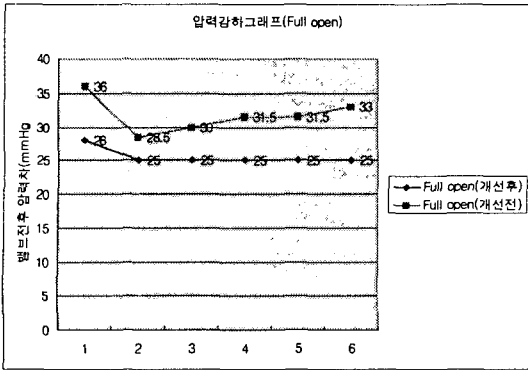


Fig. 11 Comparison of pressure drop rate

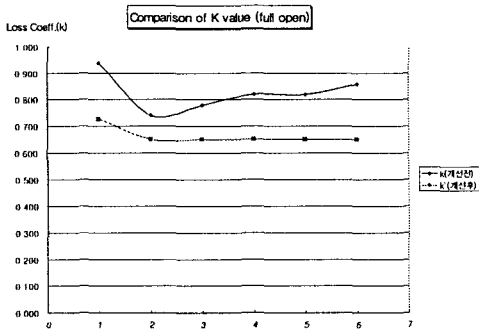


Fig. 12 Comparison of loss coefficient

손실계수는 손실 수두 값을 밸브의 유입속도로 무차원화한 값이며, 밸브를 비롯한 배관손실을 나타내는 대표적인 값이다. Fig. 12에 밸브가 완전열림시 손실계수 값을 그래프로 비교하여 나타내었다.

압력계측 위치 6번 지점에서의 손실계수 감소효과는 24.2%임을 알 수 있고, 이는 앞서 언급한 6번 위치에서의 압력 감소율과 동일한 값이다. 본 실험은 모형실험이므로 실제의 대형밸브에서의 손실계수 측정결과와 당연한 차이를 나타낼 것이라고 판단된다. 손실계수의 측정값이 엄밀하게 동일한 조건 하에서 측정된 값이 아닌 경우 그 측정값들은 변화가 있을 수 있음을 염두에 두어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 손실계수의 절대적인 값을 평가하기보다는 밸브의 형상개선에 따른 상대적인 손실계수의 감소효과에 보다 중점을 두고 고찰을 하여야 할 필요성이 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서 제안하는 밸브 시트 형상개선의 효과는 우수한 성과를 제시하고 있음을 알 수 있으며,

향후, 실제 밸브의 제작을 통해 그 효과를 입증할 필요성이 있다고 판단된다.

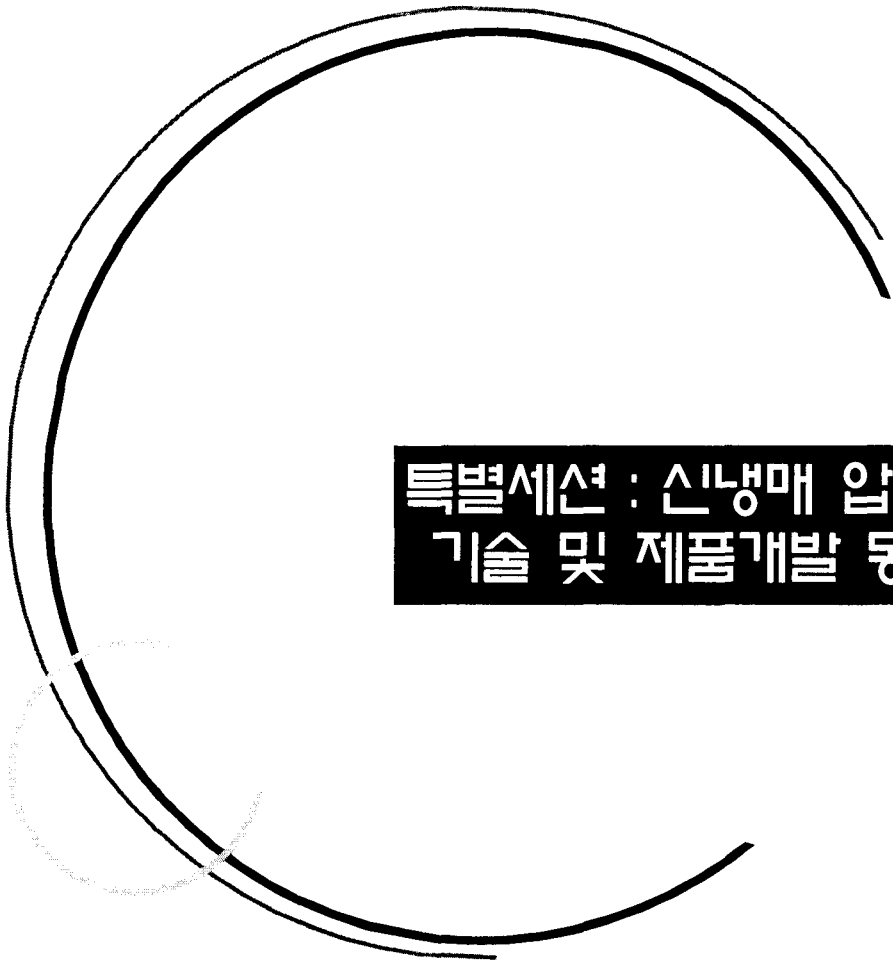
## 6. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 속도벡터 분포에서는 형상개선 후의 후류의 크기가 감소함을 알 수 있으며, 보스부의 형상을 유선형으로 개선함으로써 유동박리 현상을 억제하여 후류의 발달을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다.
- 2) 속도프로파일의 비교에서는 형상개선 후의 시간평균 V 방향속도 값이 개선전에 비하여 작게 나타남으로써 밸브에 의한 유동교란이 감소하여, 박리영역의 축소, 방출후류의 감쇄, 이에 따른 손실저감의 효과를 알 수 있다. 또한, 운동량결손의 감소에 대한 영향으로 개선 후 형상 후방으로 U 방향속도성분이 증가함을 알 수 있다.
- 3) 운동에너지 분포는 유동장의 국소유량과 상관관계를 가지며, 중앙단면에서는 밸브 형상 개선 후에 밸브 상하면에서의 운동에너지가 크게 분포함으로써 통과하는 유량이 증가하여 밸브 물체의 저항이 작아짐을 알 수 있다.
- 4) 압력계측결과에서는 밸브의 완전 전개상태에서 밸브 직후 위치에서 22%, 2번 위치에서 12.2%, 압력이 대부분 회복되었다고 판단되는 6번의 위치에서는 24.2%의 압력손실 감소 효과를 얻었다. 또한 손실계수의 감소효과는 압력손실의 감소효과와 동일하게 나타난다.

## 참고문헌

- (1) J. W. Hutchison, 1984, "ISA Handbook of Control Valves," Instrument Society of America.
- (2) Roger C. Baker, 1995, "An Introductory Guide to Valve Selection," Mechanical Engineering Publications Limited, London, pp. 24-30.
- (3) Bill Fitzgerald, 1995, "Control Valves for the Chemical Process Industries," McGraw-Hill.
- (4) G. H. Pearson, 1979, "Valve Design," Mechanical Engineering Publications Limited, London.
- (5) D. R. Airey, 1990, "Valve and Actuators Applications and Developments, Independent Technical Conference, Kempston.



**특별세션 : 신냉매 압축기  
기술 및 제품개발 동향**

