

스윙형 역지 밸브의 열림 특성에 관한 실험적 연구

송석윤* · 김양석** · 박성근** · 홍승열**

Experimental Study on the Opening Characteristics for Swing Check Valves

Seok-Yoon Song*, Yang-seok Kim, Sung-keun Park, Sung-Yull Hong

Key Words : Check Valve(역지밸브), Swing Check Valve(스윙형 역지밸브), Minimum Flow Velocity(최소유속), Disc Oscillation(디스크 진동), Performance(성능)

ABSTRACT

The experimental apparatus is designed and installed to measure the disc positions with flow velocity, V_{open} and V_{min} for 3 inch and 6 inch swing check valves. The minimum flow velocity necessary to just open the disc at a full open position is referred to as V_{open} , and V_{min} is defined as the minimum velocity to fully open the disc and hold it without motion. In the experiments, V_{min} is determined as the minimum flow velocity at which the back stop load begins to increase after the disc is fully opened or the oscillation level of disc is reduced below 1° . The results show that the V_{min} velocities for 3 inch and 6 inch swing check valves are about 15.6% and 4.8% higher than the V_{open} velocities, respectively. Although the experiments were done with the stable uniform flow, additional experiments will be performed to determine the effects of the upstream disturbances.

1. 서론

일반적으로 역지 밸브는 유체계통에 설치되어 펌프가 정지할 때 역류를 막고 펌프의 역회전을 방지하여 펌프의 밀봉장치와 모터를 보호하는 역할을 한다. 또한 밸브 하류측의 탱크 또는 배관내 유체의 배수를 막는 역할을 하기도 한다. 역지밸브 개발 초기에는 밸브가 신속히 닫히고 효과적으로 배관을 격리하면 되는 것으로 생각하여 스윙형을 기준으로 설계되었다. 원자력발전소에서도 설계의 단순성, 낮은 압력손실, 효과적인

인 시트 밀봉능력, 보수 편의성과 다양한 활용성 등으로 인하여 스윙형 역지 밸브가 많이 적용되어 왔다. 원자력발전소에 있는 역지밸브 중에서 원자로냉각재 압력경계에 설치된 것은 위와 같은 기본 기능 이외에 원자로냉각재 유로에 연결된 배관의 파열이 발생할 경우 원자로 1차 냉각원인 냉각재의 유출을 막고 (Inventory 유지) 원자로냉각재 압력경계를 보호하는 중요한 기능을 수행하고 있다. 또한 증기발생기 급수 공급계통 및 보조급수계통에 설치된 역지 밸브도 증기발생기 2차측에 연결된 배관의 파열이 발생할 경우 열 제거원인 증기발생기 2차측 급수가 상실되는 것을 막고 (Inventory 유지) 증기발생기 압력경계를 보호하는 중요한 기능을 수행한다.

원자력발전소에 설치되어 있는 역지 밸브들에 대한

* 한국전력공사 전력연구원
** 한국전력공사 전력연구원
E-mail : sysong@kepri.re.kr

국내의 고장 자료에 의하면 스윙형 역지 밸브가 고장 발생 빈도가 가장 높고, 주로 힌지 및 힌지핀에서의 마모 손상, 디스크 스테르드와 스태프와의 충격으로 인한 손상이 많았다. 밸브의 고장은 불완전한 단합(improper seating)이 가장 많고 디스크나 일부 부품의 파손도 많은 것으로 조사되었다. 발생확률이 극히 낮지만 고장 난 역지 밸브에서 탈락한 일부 부품이 원자로 또는 증기발생기에 유입되면 원전연료 피복재 또는 증기발생기 세관에 치명적인 손상을 가져올 수도 있다. 현재 국내 원전에 설치되어 운전되고 있는 주요 역지 밸브들의 설치 현황, 형태, 크기, 설치 계통, 고장 발생 건수, 고장 원인 등에 대해 조사를 수행하였는데 조사된 4개 호기에서 가장 많은 대수를 차지하는 밸브 유형은 스윙형과 리프트형 이었고, 스윙형의 경우 3인치와 26.6%로 가장 많은 대수를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 4인치, 12인치, 10인치, 6인치 순이었다. 고장 밸브 형태에서도 스윙형과 리프트형의 고장이 적지 않게 발생된 반면 다른 형태의 역지 밸브의 고장은 거의 발생되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 스윙형 및 리프트형 밸브에 대한 성능 예측 모델을 개발하고 이에 대한 검증 실험을 수행하는 것이 향후 원전 활용성 측면에서 가장 타당한 것으로 판단되었다. 따라서, 본 논문에서는 스윙형 및 리프트형 밸브의 열림 특성을 살펴보기 위한 실험 장치와 실험 방법을 기술하고 균일 유동 조건에서 수행된 실험 결과를 제시하였다. 여기에는 3인치와 6인치 스윙형 역지 밸브에 대하여 밸브 완전 열림에 필요한 완전열림 최소유속과 밸브 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운전을 보장하는 완전열림 안정유속 측정결과를 포함하였다.

2. 스윙형 역지밸브의 유속에 따른 디스크 거동

Fig. 1은 스윙형 역지 밸브에 대하여 유속에 따른 디스크 위치와 디스크 진폭을 디스크각으로 나타낸 것으로 유속에 따라 크게 세가지 영역(Oscillation, Tapping, Stable)으로 나눌 수 있다. 디스크의 열림 초기에는 디스크의 진동이 거의 없으나 유속이 일정속도에 도달하게 되면 유동에 의하여 디스크의 진동이 커지기 시작한다.

Oscillation의 주요 원인은 Vortex Shedding 현상으로 알려져 있는데¹⁾ Oscillation 영역은 디스크의 진폭이 일정 크기 이상으로 커지기 시작하는 지점에서 디스크가 백스탑에 닿기 직전, 즉, 디스크와 백스탑사이

에 Tapping이 발생하기 직전까지의 영역이 이에 해당한다. 이 영역에서는 디스크 스테르드에는 어떠한 충격도 발생하지 않지만 이 영역에서 오랜시간 운전하게 되면 힌지핀이나 부싱에서는 디스크의 진동으로 인하여 마모가 과도하게 발생할 수 있다.

Tapping 영역은 유속이 점점 증가함에 따라 밸브 Flutter의 원인인 Vortex Shedding Force가 점점 감소하고 국부적인 난류 유동 또는 계통내 유동 변동에 의하여 디스크와 백스탑이 접촉과 분리를 반복하는 영역이다. 이 영역은 밸브 디스크가 완전 열림 위치에 가까운 위치에서 운전되거나(V_{open}), 완전 열림 위치에 있더라도 Tapping이 발생하지 않을 정도로 충분한 유속이 존재하지 않은 상태에서의 밸브 운전 영역이다. 이러한 Tapping 현상은 유속을 더 증가시킴으로써 밸브 디스크를 백스탑에 확실하게 접촉하도록 하여 방지할 수 있다. Charbonneau¹⁾의 실험에 의하면 디스크가 백스탑에서 약 7° 이내에 위치해 있을 때 Tapping이 발생함을 보여 주었다. 이 영역에서는 힌지핀이나 부싱에서의 마모 뿐만 아니라 백스탑과의 반복적인 충격으로 인하여 디스크 스테르드의 피로손상이 발생할 수 있기 때문에 이 영역에서 운전되고 있는 밸브에 대해서는 주요 부품의 마모뿐만 아니라 피로 손상 가능성을 염두에 두어야 한다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 Tapping 영역은 유속을 기준으로 $V_{tapping}$ 과 V_{min} 사이의 영역에 해당되며 밸브 완전 열림에 필요한 최소 유속을 구하기 위한 V_{open}

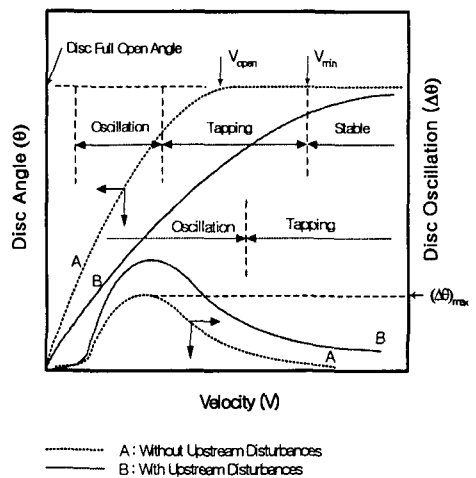


Fig. 1 Disk position vs. flow velocity for swing check valve

모델은 밸브의 위치를 결정하는데 이용될 수 있고, 밸브 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운전을 보장할 수 있는 최소 유속을 평가하기 위해서는 V_{min} 모델이 이용될 수 있다. 따라서 V_{open} 과 V_{min} 에 대한 정확한 예측이 중요함을 알 수 있다.

V_{min} 을 평가할 수 있는 실험식을 처음으로 제시한 밸브 제작사는 Crane사였고, Chiu & Kalsi²⁾ 및 EPRI³⁾ 에서는 스윙형 역지 밸브의 V_{open} 을 디스크에 작용하는 유동 모멘트와 관성 모멘트 그리고 디스크와 힌지 암의 무게를 고려하여 해석적 모델을 제시하였다. W. J. Rahmeyer⁴⁾는 스윙형 역지 밸브에 대하여 유동 모멘트 및 관성 모멘트, 디스크 및 밸브 암의 무게뿐만 아니라, 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시팅 힘을 고려하여 V_{min} 모델을 제시하였다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1. 성능 실험 장치

Fig. 2에 역지 밸브의 성능실험장치 개략도를 나타내었는데, 폐회로(closed loop)로 구성되어 원자력발전소에 있는 역지 밸브의 운전환경에 가깝도록 설계·제작하였다. 실험장치의 주요 기기는 저장탱크, 펌프, 역지 밸브, 공기구동 제어밸브, 글로브 밸브, 게이트 밸브, 버터플라이 밸브와 연결 배관으로 구성되어 있다. Table 1은 성능 실험장치 각각의 구성요소의 상세 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Test facility equipment list

Equipment	Specifications
Centrifugal Pump	Head : 71.85 m, Flow rate : 5.4 m ³ /min Power : 92.52 kw
Control Valve	Globe valve, 6 inch
	Globe valve, 2 inch
Storage tank	FRP, 2 m ³
Check valve	3 inch(swing, lift)
	6 inch(swing)
Globe valve	3, 6 inch
Gate valve	3, 6 inch
Butterfly valve	3, 6 inch
Flow Meter	Electromagnetic : 5 ~ 180 m ³ /hr, ±0.5% rate, 4 ~ 20 mAdc
	Turbine : 80 ~ 800 m ³ /hr, ±1% rate, 4 ~ 20 mAdc
Pressure Transmitter	0 ~ 25 bar, 0.15%FS, 1 ~ 5 Vdc
DP Transmitter	1, 0.5 kg/cm ² , 0.15%FS, 1 ~ 5 Vdc
Load cell	0~200 kg, 4 ~ 20 mAdc
Temperature Transmitter	PT100, Head type, 0 ~ 100 °C, 4 ~ 20 mAdc
Radial Displacement	Potentiometer type, 4 ~ 20 mAdc

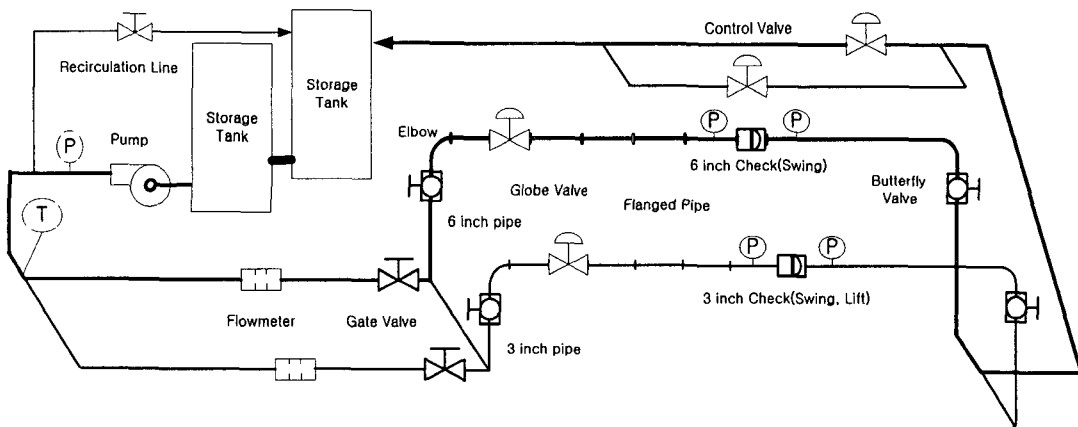


Fig. 2 Schematic diagram of Performance test facility for Swing check valves.

원심 펌프의 용량은 3인치 및 6인치 스윙형 역지 밸브의 성능 실험에서 요구되는 전 유량 범위를 거의 일정한 수두(0~7.2 m/min, 72.61~61m)에서 공급할 수 있고, 저 유량에서 펌프 보호를 위해서 재순환관을 설치하였다. 역지 밸브의 실험 유로는 역지 밸브의 크기에 따라 2개(3인치, 6인치) 로 구성되어 있고, 배관을 일정 길이의 연결배관(flanged pipe) 형식으로 연결하여 배관 및 밸브의 위치 이동이 수월하도록 제작하여 역지밸브 상류 교란 요소의 거리에 따른 영향 실험이 가능하다. 또한 각 유로로의 배열은 실험 유로 전·후단에 설치된 버터플라이 밸브를 이용하고, 유량의 제어는 실험유로 하류에 설치된 2인치와 6인치 공기구동 글로브 밸브를 제어하여 설정된 유량을 맞추었다.

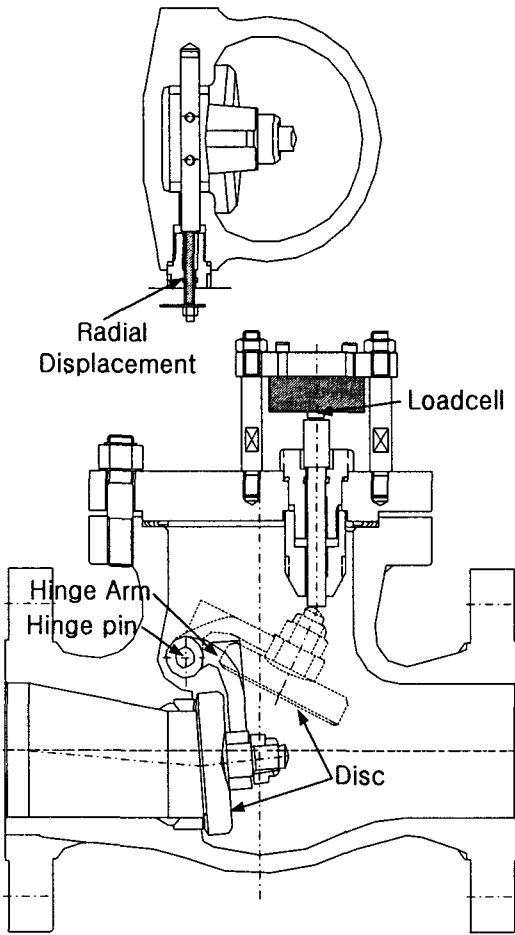


Fig. 3 Swing check valve for testing

실험유로의 유량을 계측하기위한 전자기 및 터빈 유량계, 유동 유체의 온도를 계측하기위한 온도계, 펌프출구와 역지밸브 전·후단에서의 압력을 계측하기 위한 압력계, 역지 밸브에서의 압력강하를 계측하기위한 차압계 등이 있고, 이들 계측장치로부터 취득된 자료는 자료수집장치(DAS)을 통하여 PC로 수집된다.

Fig. 2는 실험에 사용된 스윙형 역지 밸브의 상세도로서 유속에 따른 디스크 각과 디스크가 열리면서 백스탑에 해당하는 부분에 충격이 가해지는 것을 측정하기 위한 Load cell이 설치되어 있다.

3.2. 실험 방법

3.1.1. 실험 유로 배열 및 펌프 운전

실험을 시작하기 전에 저장조 및 유동 유로를 충수한 후 충분한 배기(vent)를 실시하여 펌프 기동으로 인한 실험용 밸브 및 계측기가 파손되지 않도록 유의한다. 실험하고자하는 유로로 밸브 정렬을 하고, 나머지 유로는 닫는다. 공기구동 밸브를 10% 정도 열림 상태로 펌프를 기동한다. 모터 보호를 위해서 펌프 기동 후 펌프출구 압력이 6.6 bar 이하가 되지 않도록 유의한다.

3.1.2. 정상상태(steady state condition) 점검 및 신호 수집

원하는 유량으로 조정 후 유동 유체의 설정 유량이 3초의 주기 동안에 편차가 3% 이내에 만족하는지를 점검하여 이 조건이 만족한 정상상태(steady state)에서 측정시작 버튼을 눌러 데이터를 입력 받는다. 정상 상태에서 유량, 디스크 각, load cell 하중 등의 자료를 실시간으로 자료수집장치(DAS)에서 수집하고, 취득하고자 하는 신호를 지정된(100/1000s) sampling 주기로 데이터를 읽어 시트(sheet)에 나타내고, 마지막은 읽은 값에 대한 평균값을 나타낸다. 동일한 유량에서 50개의 신호를 수집하고 이것의 평균값을 취하여 총 51개의 자료를 구한다. 그리고 다른 유량으로 맞추기 위해 공기구동 제어밸브를 제어하여 원하는 유량으로 설정하고 그 조건에서 역지 밸브의 성능에 관련된 신호의 안정성을 점검하여 50개의 신호를 수집한다. 적절한 유량의 제어 간격이 되도록 공기구동 제어밸브에 입력 신호를 0.2V 씩 변화시켜 가면서 설정된 유량으로 제어한다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험에 사용된 스윙형 역지 밸브의 상세한 사양은 Table 2에 나타내었다. Fig. 4는 스윙형 역지 밸브의 디스크와 힌지 암(hinge arm)이 결합상태의 사진이다.

스윙형 역지 밸브의 디스크와 힌지암은 일체형과 분리형이 있는데, 분리형은 디스크 스테드 볼트와 힌지암의 간극에 의한 자유도에 의해 디스크가 시트에 잘 밀착되어 밀봉능력은 증가하나 열림 상태에서의 디스크 안정성은 떨어지게 된다. 실험에 사용된 스윙형 역지 밸브는 디스크와 힌지 암이 스테드 볼트에 의해 조립되어 스테드 볼트가 풀리지 않도록 전둘레 용접되어 있다. 또한 일반적으로 시트에 각을 주어 디스크 행정 거리를 줄여 디스크가 닫힐 때 추가의 밀봉을 제공한다. 역지 밸브에서의 밀봉은 밸브 몸체에 있는 시트의 평면부와 디스크의 평판 밀봉면의 밀착에 의해 이루어진다. 힌지와 힌지 핀과 분리형일 경우 디스크와 스테드 핀 사이의 간극에 의해 효과적으로 밀봉이 될 수 있도록 자체 정렬이 이루어진다. 실험에 사용된 3인치 역지 밸브는 디스크가 완전 닫힘 시 시트 각은 4.574°로 설계되고 완전 열림 시 디스크 각이 56.74°로 측정되어, 수직면으로부터의 디스크 각은 61.314°로 계산된다. 또한 6인치 역지 밸브는 디스크가 완전 닫힘 시 시트 각은 4.574°로 설계되고 완전 열림 시 디스크 각이 58.13°로 측정되어, 수직면으로부터의 디스크 각은 62.704°로 계산된다.

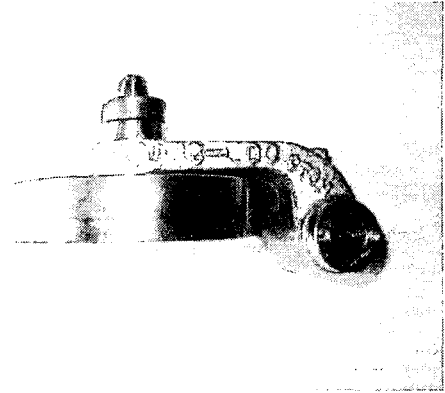


Fig. 4 Disc Assembly of swing check valve for testing

디스크와 힌지 암의 무게를 정확히 아는 것이 중요 한데 3인치 밸브의 무게를 실측한 결과는 1.3 kg이고, 6인치 밸브의 무게를 실측한 결과는 4.9 kg이다. 같은 크기의 디스크라 할지라도 제조과정에 따라서 디스크 무게는 약간씩 차이가 난다. 그리고 유동 유체의 유속은 시트(seat) 내경을 기준으로 하여 구하였다.

스윙형 역지 밸브의 성능을 평가하기 위해서는 유동 유체의 속도에 따른 디스크 위치, 디스크의 진동(Oscillation) 진폭, 디스크 백스탑에 가해지는 힘의 정도를 나타내는 Load cell 부하, 밸브에서의 압력강하 등이 필요하다. 스윙형 역지 밸브의 특성곡선을 상류측 유동이 완전히 발달된 균일유동 상태에서 나타내기 위하여 상류측 교란요소로부터의 거리는 11D에 위치시켰다.

Fig. 5는 실험에 의해 구해진 3인치와 6인치의 스윙형 역지 밸브에 대하여 유동 유체의 속도에 따른 디스크의 위치와 Load cell 부하를 나타낸 것이다. 본 실험에서 V_{open} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 열림각으로 나타난 최소의 평균 유속으로 정하였다. 유속이 증가함에 따라 디스크가 급격히 열리기 시작하여 완전 열림 위치에 도달함을 알 수 있다. 디스크 완전 열림 위치에 도달하기 위한 평균유속인 V_{open} 은 3인치 밸브는 11.38 ft/s 이고, 6인치 밸브는 13.62 ft/s 이다. 밸브의 디스크 각이 증가함에 따라 디스크가 열리는데 필요한 유속 모멘텀이 더욱더 필요하고, 이것은 유속의 증가에 의해 이루어질 수 있다. 또한 Load cell 부하는 3인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 13.16 ft/s에서부터 계속 증가하고, 6인치 밸브에서는 밸브가 완전 열림 후 Load cell 부하가 약간 감소하다가 다시 증가

Table 2 Swing check valve specifications

Parameter	3 inch	6 inch
Pipe I.D.(mm)	77	143
Seat I.D.(mm)	62	114
Disc Dia.(mm)	82	134
Seat angle(°)	4.574	4.574
Disc angle measured from vertical(°)	61.314	62.704
disc & Hinge Arm Weight(kg)	1.3	4.9
Hinge Pin to Disc center(mm)	62	100.5
Hinge Pin to Disc CG(mm)	25	20
Disc Assy CG Angle(°)	22	11.25
Material	SUS	SUS
Pressure Class	class 300	class 300

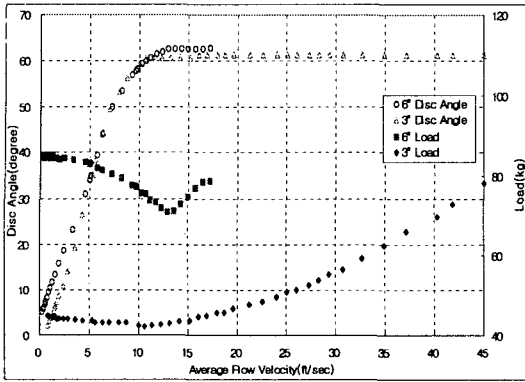


Fig. 5 Disc Position and Load cell Load at various flow velocity for swing Check Valves with uniform Flow.

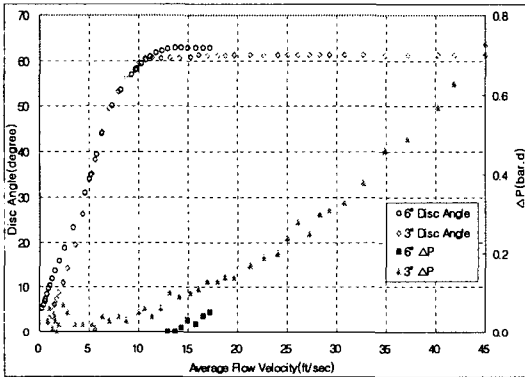


Fig. 6 Disc Position and Pressure Drop at various flow velocity for swing Check Valves with uniform Flow.

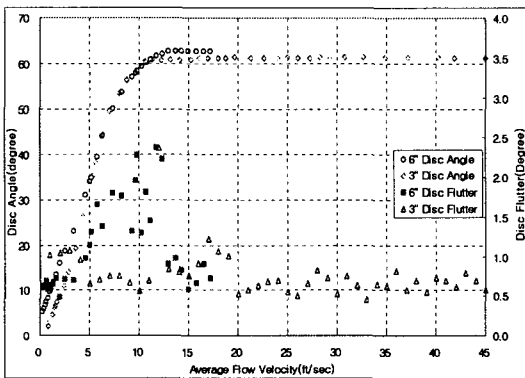


Fig. 7 Disc Position and Disc Fluttering at various flow velocity for swing Check Valves with uniform Flow.

하는 것으로 나타났다. Load cell 부하는 처음에는 유속이 증가하여도 어떤 일정한 값을 유지하는데 이것은 배관의 진동이 Load cell 부하로 나타난 것으로 판단된다. 유속의 증가와 더불어 디스크가 완전 열림 이후에도 부하가 증가하는데 여기서부터는 디스크와 Load cell 이 완전히 밀착되어 유동 모멘트의 증가분이 Load cell 부하로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 유동 유체의 속도에 따른 디스크의 위치와 밸브에서의 압력강하를 나타내었다. 3인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 13.16 ft/s 에서부터 서서히 증가하고, 6인치 밸브에서는 디스크가 완전 열림 후 14.27 ft/s 에서부터 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 유속에 따른 디스크의 진동을 나타내었다. 6인치 밸브에서는 유속의 증가에 따라 급격히 증가하여 디스크가 완전 열리기 직전 11.75 ft/s에서 최대 진폭(2.37°) 이후 급격히 감소하여 완전 열림 후 12.93 ft/s에서 진폭(0.9°)로 변동하였다가 이후의 유속에서도 거의 일정한 값으로 유지하고, 3인치 밸브에서는 유속의 증가에 따라 거의 일정한 진폭으로 움직이는 것으로 나타났다.

V_{min} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 완전열림 후 Load cell 부하가 증가하거나, 디스크 진동의 진폭이 최대값에서 감소하여 1° 이내로 유지되는 최소의 평균 유속으로 정하였다. 또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이, 밸브에서의 압력강하 값은 밸브의 완전 열림 이후에 디스크 진동의 진폭이 안정된 이후부터 증가하는 추세를 보이므로 V_{min} 의 결정에 참조자료로 활용하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 3인치와 6인치 밸브에 대한 V_{open} 측정값은 각각 11.38 ft/s 13.62 ft/s 이었지만 이렇게 결정된 V_{min} 측정값은 각각 13.16 ft/s 14.27 ft/s 로 V_{open} 보다 약 15.6%, 4.8% 정도 증가한 값을 보여주었다. 그러나 본 실험결과는 밸브 상류측 교란요소의 영향을 배제한 균일유동 조건에서 얻어졌기 때문에 밸브 상류측 교란요소가 밸브에 근접하여 설치되어 있을 경우에는 그 영향을 고려할 필요가 있다.

5. 결론

스윙형과 리프트형 역지 밸브의 열림 특성을 살펴보기 위한 실험 장치로부터 3인치와 6인치 스윙형 역지 밸브에 대하여 밸브 완전 열림에 필요한 완전열림 최소유속(V_{open})과 밸브 완전 열림 위치에서 안정적인 밸브 운동을 보장하는 완전열림 안정유속(V_{min})을 측정

하였다. V_{open} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 열림각으로 나타난 최소의 평균 유속으로 하였고, V_{min} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 완전열림 후 Load cell 부하가 증가하거나, 디스크 진동의 진폭이 최대값에서 감소하여 1° 이내로 유지되는 최소의 평균 유속으로 정하였다. 균일 유동조건에서의 측정결과를 보면, 3인치와 6인치 밸브에 대한 V_{min} 측정값은 각각 13.16 ft/s, 14.27 ft/s로 V_{open} 에 비해 약 15.6%, 4.8% 정도 증가한 것으로 나타났다. 그러나, 밸브 상류측 교란요소에 따라 배관내 유동특성이 바뀌고 이에 따라 밸브의 운전특성이 영향을 받기 때문에 향후 실험에서는, 교란요소의 형태와 밸브에서의 설치거리가 밸브 열림특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기사업 "원전역지밸브 고장원인 분석 및 성능진단 관리기법 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) A.G. Charbonneau, "Innovations in Non-Intrusive Testing and Trending of Motor Operated Valves and Check Valves," Paper H3, pp.301-310, 2nd International Conference on Developments in Valves and Actuators for Fluid Control, Manchester, England, 28-30 March 1988.
- (2) Chong Chiu & M.S. Kalsi, "Plant Availability Improvement by Eliminating Disc Vibrations in Swing Check Valves," ASME Paper 86-JPGC-NE-6, 1986.
- (3) EPRI, Application Guidelines for Check Valves in Nuclear Power Plants, EPRI NP-5479, Rev. 1, EPRI, 1993.
- (4) W.J. Rahmeyer, "Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits," Transactions of ASME, Vol.115, pp.406-410, Nov. 1993.