스윙형 역지밸브 성능 평가 방법

김양석[†] · 이도환 · 김대웅 · 박성근 · 홍승열

Performance Evaluation Method of a Swing Check Valve

Y.S. Kim, D.H. Lee, D.W. Kim, S.K. Park, and S.Y. Hong (KEPRI)

Key Words: Check Valve(역지밸브), Minimum Required Flow Velocity(최소요구유속), Tapping(태핑)

Abstract

In spite of its simple design, structure and operating mechanism, swing check valves are one of the critical components which adversely affect the safety of the nuclear power plants if they fail to function properly. Therefore, it is important to evaluate the performance condition of the swing check valves in safety-related systems. The performance characteristics of swing check valves include opening characteristics, the minimum required flow velocity, the pressure drop at design flow, the disc stability, and the effect of the upstream disturbances. Among factors to identify the performance of a swing check valve, a method to evaluate the opening characteristics and the minimum required flow velocity, which guarantees to fully open the disc and hold the disc without motion, are presented to determine the operating region of the swing check valve, such as stable, tapping, or oscillation. Based on the determined operating region and opening characteristics, the simple methods of wear and fatigue analyses of the specific parts of the valve are also described.

기호설명

A_d	디스크 면적
B	부력계수
C_D	압력강하계수
C_{SEAT}	시트계수
D_d	디스크 직경
D_i	배관의 입구내경
F_{impact}	디스크와 백스탑간 충격력
g	중력가속도
H	Penetration Hardness
k	디스크 스터드 강성도(Stiffness)
K	마모계수
K_{SEAT}	유동 및 관성 모멘트 인자
$K_{\Delta P}$	디스크 전·후단 차압에 의한 모멘트 인자
L	힌지핀 중심에서 디스크 중심까지의 거리 또는 접촉부에 작용하는 하중
M_{WT}	디스크 및 밸브 암의 무게에 의한 모멘트
t	운전 시간
V_{disc}	디스크 선속도
$V_{\min}$	안정적 밸브 완전열림에 필요한 최소유속
V_{open}	밸브 완전열림에 필요한 최소유속
$V_{tapping}$	디스크의 tapping이 시작되는 최소유속
W_{ARM}	힌지 암의 무게
W_{DISK}	디스크 무게
β	배관의 기울기
$\Delta\theta$	디스크 변동각
θ	배관축에 수직한 면으로부터의 디스크 각
ρ	유체의 밀도

† 한국전력공사 전력연구원
E-mail : kimys@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5544 FAX : (042)865-5514

1. 서 론

역지밸브는 펌프가 정지할 때 역류를 막고 밸브 하류측의 탱크 또는 배관내 유체의 배수를 막

는 역할을 한다. 또한 과도한 압력손실 없이 설계유량을 통과시키는 역할도 해야 한다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 쉽게 열리고, 작은 유속에서도 안정적으로 열림 상태를 유지할 수 있어야 하며, 부분 개방 또는 유속이 감소된 조건에서도 디스크의 안정성이 보장되어야 한다. 또한 밸브가 닫힐 때에도 역류 유속에 의한 디스크 Slamming을 최소로 할 수 있어야 하며 닫힌 후에는 누설을 최소화하여야 한다. 특히, 스윙형 역지밸브는 설계의 단순성, 낮은 압력손실, 효과적인 시트 밀봉능력, 보수의 편의성과 다양한 크기의 활용성 등으로 인하여 많이 적용되어 왔다. 그러나 스윙형 역지밸브는 설치된 계통조건에 따라 밸브가 닫힐 때 유량의 급속한 감소로 인한 Slamming 현상을 경험하기도 하였다[1]. 역지밸브의 고장은 심각한 운전과도상태를 유발하기도 하며 원자력발전소의 가동율 감소를 포함한 경제적 손실을 가져올 수도 있다. 이에 따라 역지밸브의 성능을 개선시키고 성능저하를 감시할 수 있는 기법과 방법론들이 주로 기기의 고장이력자료를 근거로 개발되었다.

ORNL은 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 NPRDS(Nuclear Plant Reliability Data System)를 이용하여 1984-1990 기간에 발생한 고장사례들에 대한 자료를 평가하여 고장율과 기기수명, 발전소 수명 또는 기타 다른 인자들과의 어떤 중요한 연관성을 확인하고자 하였다[2]. 이때의 조사는 각각의 고장 이력을 검토하고, 고장모드, 고장 영역, 고장 발견방법 등과 같은 중요한 인자들의 특성을 검토하였으나 밸브 유형에 대한 정보는 누락되어 있었다. 그 이후 ORNL은 1991-1992 기간에 발생한 고장사례에 대한 추가분석에서, 동기간의 고장사례 중 85%에 해당하는 밸브 그리고 NPRDS 데이터베이스에 있는 밸브 중 58%의 밸브 유형을 확인하였으며, 이로부터 밸브 유형과 고장모드, 밸브 유형과 고장발견방법, 밸브 유형에 따른 밸브 및 고장분포 등 이전에 분석되지 않았던 상관관계들을 알아내는 기초자료를 제공하였다[3].

한편, 이러한 고장 및 정비이력 자료에 대한 분석이 역지밸브 성능개선이나 상태감시에 필수적이기는 하지만, 밸브성능에 대한 정량적 평가 역시 중요하다. 그러나, 스윙형 역지밸브는 밸브의 선정, 설치 및 운전과정에서 그 형상과 기능이 단순하다는 관점 때문에 성능 특성의 대부분이 흔히 무시되어 왔고 서로 다른 유동조건에서 밸브의 거동 또한 잘 알려져 있지 않았다. 역지밸브의 기능을 수행하기 위한 역지밸브의 유동성능 특성에는 유속에 따른 밸브의 열림 특성, 밸브의 안정적 열림을 보장하는 최소요구유속, 설계유량에서의 압력손실, 부분개방상태에서의 디스크 안정성, 상류측 교란요소에 따른 디스크 영향, 디스크의 닫힘 특성, 밀봉능력, 유지보수의 편의성 등이 있으며 이 밖에 진동 및 소음, 특정 부품의 마모 및 피로 특성 등이 있는데, Rahmeyer는 스윙형 역지밸브의 유동특성과 밸브 상류측 유동변수들과의 관계를 고찰하여 캐비테이션, 진동 및 소음, 디스크 완전 열림을 위한 최소요구유속, 밸브 내부 부품의 동작 그리고 특정 부품의 마모 현상을 정성적으로 설명하였다[4].

본 논문에서는 스윙형 역지밸브에 대한 성능 평가의 기초가 될 수 있는 밸브 디스크의 열림 특성과 최소요구유속, 그리고 특정 부품의 마모 및 피로해석 방법에 대해 기술하고자 한다.

2. 역지밸브 성능 평가

2.1 역지밸브 열림 특성 분석

Fig. 1은 스윙형 역지밸브에 대하여 유속에 따른 디스크 위치를 디스크각으로 나타낸 것으로 유속에 따라 크게 세 가지 영역(Oscillation, Tapping, Stable)으로 나눌 수 있다. 디스크의 열림 초기에는 디스크의 진동이 거의 없으나 유속이 일정속도에 도달하게 되면 Vortex Shedding 현상에 의해 디스크의 진동이 커지기 시작한다. 이와 같은 Oscillation 영역은 디스크의 진폭이 일정 크기 이상으로 커지기 시작하는 지점에서 디스크가 백스탑에 닿기 직전, 즉, 디스크와 백스탑 사이에 Tapping이 발생하기 직전까지의 영역이다. 이 영역에서는 디스크 스터드에는 어떠한 충격도 발생하지 않지만 이 영역에서 오랜 시간 운전하게 되면 힌지핀이나 부싱에서는 디스크의 진동으로 인하여 마모가 과도하게 발생할 수 있다.

Tapping 영역에서는 유속이 점점 증가함에 따라 국부적인 난류 유동 또는 계통내 유동 변동에 의하여 디스크와 백스탑이 접촉과 분리를 반복하게 된다. 이 영역은 밸브 디스크가 완전열림위치에 가까운 위치에서 운전되거나, 완전열림위치에

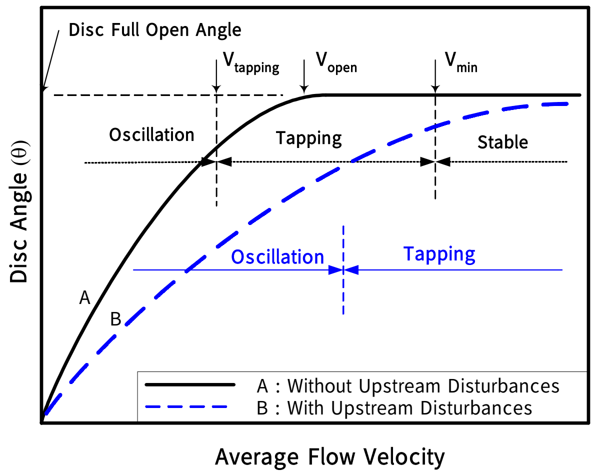

Fig.1 Disc Position with Average Flow Velocity for a Swing Check Valve

있더라도 Tapping이 발생하지 않을 정도로 충분한 유속이 존재하지 않은 상태에서의 밸브 운전 영역이다. 이러한 Tapping 현상은 유속을 더 증가시킴으로써 밸브 디스크를 백스탑에 확실히 접촉하도록 하여 방지할 수 있다. Charbonneau의 실험에 의하면 디스크가 백스탑에서 약 7° 이내에 위치해 있을 때 Tapping이 발생함을 보여 주었다[5]. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 Tapping 영역은 유속을 기준으로 $V_{tapping}$ 과 $V_{\min}$ 사이의 영역에 해당되며 이 영역에서는 힌지핀이나 부싱에서의 마모뿐만 아니라 백스탑과의 반복적인 충격으로 인하여 디스크 스터드의 피로손상이 발생할 수 있기 때문에 이 영역에서 운전되고 있는 밸브에 대해서는 주요 부품의 마모뿐만 아니라 피로 손상 가능성을 염두에 두어야 한다.

한편, Fig. 1에 나타낸 밸브의 특성곡선은 역지밸브의 상류에 설치되어 있는 교란요소(엘보우, 확관 또는 유량조절밸브, 펌프, 오리피스와 같은 난류 발생원)의 유무나 밸브로부터의 거리에 따라 달라진다. 밸브 상류측의 교란요소는 배관내 유동특성, 특히 유속분포를 왜곡시키고 역지밸브 디스크의 거동에 영향을 주어 아주 빠른 유속에서도 밸브가 완전히 열리지 않거나 안정적인 밸브 운전을 보장하지 못할 수도 있다. 따라서 밸브 상류측 교란요소의 영향을 고려할 필요가 있으며 이러한 교란요소의 형태와 밸브에서의 설치거리에 따라 교란요소가 없을 경우의 $V_{\min}$에 비해 최대 1.8배까지 증가한다고 알려져 있다[6].

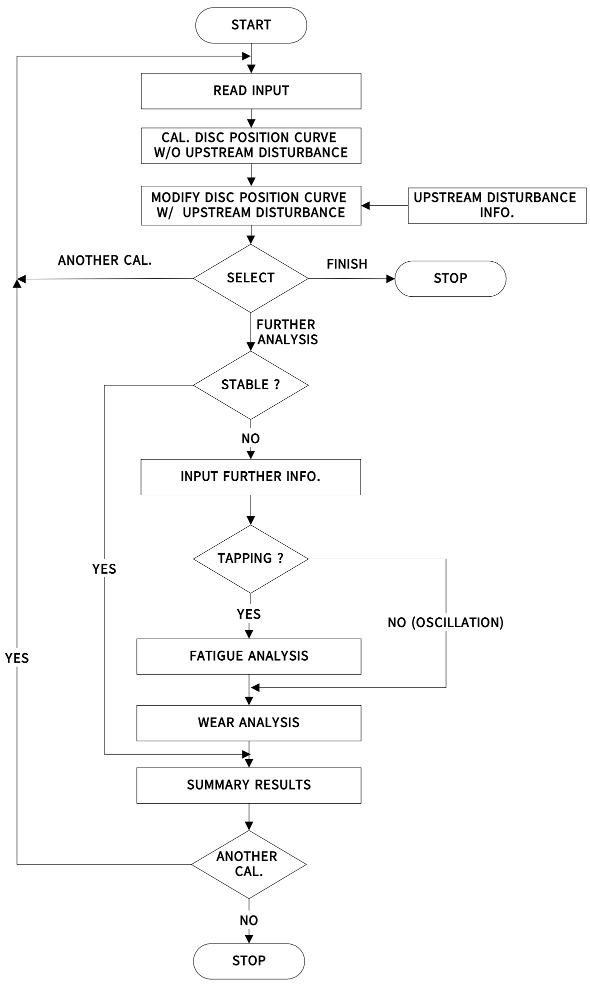

Fig.2 Schematic of Check Valve Performance Evaluation Procedure

2.2 성능 평가 절차

역지밸브의 성능을 평가하기 위한 절차는 아래와 같다(Fig. 2 참조).

1) 배관내 균일유속분포를 가정한 최소요구유속 계산[2.3절]
2) 상류측 교란요소 영향을 고려한 최소요구유속 평가
3) 계통운전조건에 의한 배관내 유체의 평균유속과 2)에서 구한 최소요구유속으로부터 밸브의 운전영역 결정
4) 운전영역이 Tapping 영역이면 마모 및 피로도 평가 수행[2.4절]
5) 운전영역이 부분개방상태인 Oscillation 영역이면 마모 해석 수행[2.4절]

여기서 상류측 교란요소 영향 평가 방법은 관

련 실험을 수행한 후 제시할 예정이며 마모 및 피로도 평가도 기본적인 절차만 기술하고자 한다.

2.3 최소요구유속

밸브 완전열림에 필요한 최소요구유속을 계통에서 제공하지 못한다면 유동유발 디스크 진동 및 지속적인 디스크 Tapping에 의하여 특정부품의 마모 또는 누적된 피로에 의한 고장이 발생할 수 있다. 따라서 역지밸브가 어떤 계통에 설치되어 본래의 의도된 성능을 보여주기 위해서는 밸브 완전 열림을 위한 최소요구유속인 V_{open}과 안정적 밸브 열림을 보장할 수 있는 최소요구유속인 $V_{\min}$에 대한 정보가 필수적이다.

최소요구유속은 밸브 제작사에서 제공하여 왔으나 V_{open} 과 $V_{\min}$에 대한 개념을 뚜렷이 구분하여 제시하지는 않았다. 그러다가, Chiu & Kalsi[7] 및 EPRI[8]가 밸브 완전열림을 위한 최소요구유속에 대한 정보의 부재를 지적하면서 이론적인 최소요구유속 관계식을 개발하였다. 이들 모델은 스윙형 역지밸브 디스크에 작용하는 유동 모멘트와 관성 모멘트 그리고 디스크와 밸브 힌지 암의 무게를 고려하여 V_{open}을 예측한다. 또한 시팅힘에 대한 최소 20%의 SFM(Seating Force Margin)을 도입하였는데 이는 $V_{\min}$ $1.1\,V_{open}$에 해당한다. Rahmeyer[9]는 스윙형 역지밸브에 대하여 유동 모멘트 및 관성 모멘트, 디스크 및 밸브 암의 무게뿐만 아니라, 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전열림시 백시팅 힘을 고려하여 $V_{\min}$ 모델을 제시하였다. 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시팅 힘은 실험상수를 도입하여 하나의 항으로 통합하여 나타내었다. Kim et.al[10]은 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시팅 힘에 의한 모멘트를 분리하여 다음과 같은 모델을 제시하였다 (Fig.3 참조).

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{M_{WT}/\rho}{K_{VEL} + K_{\triangle P} - K_{SEAT}}} \qquad (1)$$

여기서,

$$M_{WT} = B \cdot (W_{DISK} + 0.5\,W_{ARM}) \cdot sin\,(\theta+\beta) \cdot L,$$
$$K_{VEL} = A_{eff} \cdot cos\,\theta \cdot (h + 0.5\,z),$$

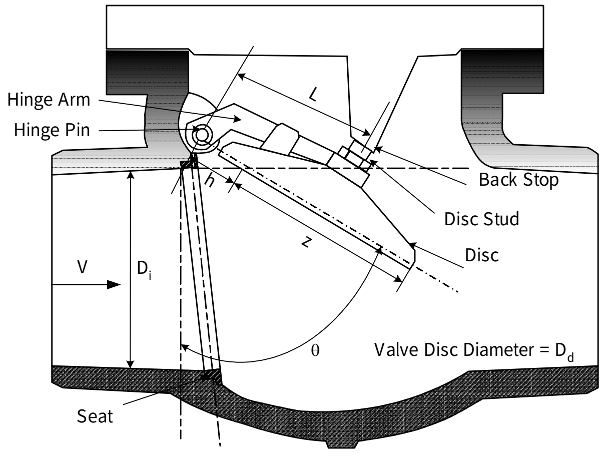

Fig.3 Swing Check Valve Model

$$A_{eff} = \frac{\pi}{4}\sqrt{2D_d\,z^3\,cos^3\theta - z^4\cos^4\theta}\,,$$
$$h = \frac{(L - D_i\,/2)}{\cos\theta};\; z = (L + D_d/2) - h,$$
$$K_{\triangle P} = 0.5\,A_d \cdot L \cdot C_D\,,$$
$$K_{SEAT} = C_{SEAT} \cdot W_{DISK} \cdot (L/D_i)^2\,.$$

위 식에서 K_{SEAT} = 0으로 두면 V_{open}과 밸브를 통과하는 평균유속에 따른 디스크의 위치를 예측할 수 있다. 여기서, C_D와 C_{SEAT}는 각각 제작사 자료 또는 실험을 통하여 관계식을 구할 수 있는데, 특히 C_{SEAT}는 디스크 변동각, $\Delta\theta$의 함수이다.

2.4 마모 및 피로 해석

스윙형 역지밸브가 Oscillation 영역 또는 Tapping 영역에서 장시간 운전되는 경우, 힌지핀과 부싱에서 마모가 발생되어 밸브의 성능이 저하될 수 있다. 여기서의 마모 모델은 스윙형 역지밸브의 작동에 따라 밸브의 성능저하를 일으킬 수 있는 마모 발생 부품, 즉 힌지핀과 부싱에 대해 유동의 변화로 인한 밸브 디스크의 회전속도, 마모 발생부품의 접촉 길이 및 시간 등을 예측하여 단위시간당 해당 부품의 마모량, 즉 마모율을 예측한다. 마모량 또는 마모율은 아래 식을 이용하여 평가한다[11].

$$W = \frac{KLV_{disc}\,t}{H} \qquad (2)$$

여기서, 접촉부에 작용하는 하중(L)은 디스크와 힌지 암의 무게로 가정할 수 있으나, 유체에 의

한 동적 Lift 하중 및 Drag 하중 영향도 유동실험과 해석적 방법을 병행하여 살펴볼 필요가 있다. 힌지핀과 부싱사이의 Sliding 거리($V_{disc}t$)를 평가하기 위하여 힌지핀과 부싱사이의 상대속도가 필요하다. 힌지핀과 부싱의 상대속도는 디스크의 선속도로 가정할 수 있으며 디스크의 선속도는 마모가 발생할 수 있는 운전영역에서의 디스크 변동각 및 변동주파수를 이용하여 디스크의 각속도를 유추해 낸 다음 이를 이용하여 보수적으로 평가할 수 있다.

피로모델은 피로에 의한 손상이 발생할 수 있는 부품에 대한 충격력과 충격 발생 빈도를 예측하여 피로도를 평가한다. 스윙형 역지밸브인 경우 피로손상이 발생되는 부품은 디스크 스터드 및 스터드 볼트 부위로 알려져 있는데, Tapping 영역에서 운전되고 있다고 판단되면, 디스크 스터드와 백스탑과의 충격력을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$F_{impact} = V_{disc}\sqrt{\frac{W_{eff}}{g}k} \qquad (3)$$

여기서, 디스크의 운동에너지는 백스탑과의 접촉순간 모두 스트레인 에너지로 전환되고, 디스크 스터드는 선형적으로 거동하는 스프링으로 가정하며 $W_{eff} = W_{DISK} + 0.5\,W_{ARM}$이다. 또한 디스크 스터드로 전달되는 다른 에너지 손실도 없다고 가정한다. 충격 순간의 디스크의 최대 선속도, V_{disc}를 결정하기 위하여 디스크의 변동주파수를 이용할 수 있는데, 유체의 스프링 강성도를 기준으로 한 디스크의 고유진동수, 배관의 에디 주파수, 또는 디스크 각속도에 대한 실험식을 이용하여 디스크의 변동주파수를 추정할 수 있다[8].

디스크 스터드와 백스탑과의 충격력을 구하게 되면 스터드의 축응력 및 굽힘응력, 그리고 스터드의 Alternating Stress를 계산할 수 있고 밸브 운전시간과 피로곡선으로부터 피로도를 평가할 수 있다.

2.5 성능 평가 사례

여기서는 24인치 스윙형 역지밸브[8]에 대하여 평균유속에 따른 디스크 열림특성, V_{open}, $V_{\min}$ 평가, 그리고 밸브의 운전영역 결정, 그리고 디스크 변동각에 대한 $V_{\min}$의 영향을 살펴보았다.

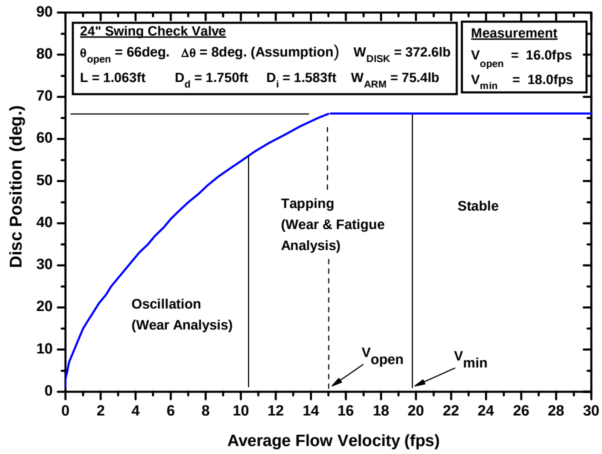

Fig.4 Disc Position vs. Average Flow Velocity for 24" Swing Check Valve

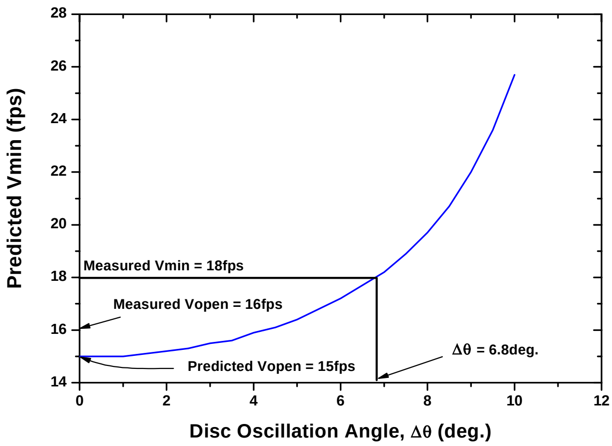

Fig.5 Effect of Disc Oscillation Angle on Minimum Required Flow Velocity for 24" Swing Check Valve

Fig.4에 평균유속에 따른 밸브 디스크의 열림위치를 나타내었는데 밸브를 통과하는 유속에 따른 밸브의 운전영역도 함께 나타내었다. 여기서 $V_{\min}$을 평가할 때 필요한 정보중의 하나인 Tapping 영역에서의 최대 디스크 변동각을 8deg.로 가정할 경우, $V_{\min}$ = 19.7fps가 되는데 측정값(18fps)보다 더 큰 값이다. 측정값과 동일한 값이 예측되는 디스크 변동각은 6.8deg.에 해당된다(Fig.5 참조). Tapping 영역이 시작되는 유속은 V_{open}의 0.7로 가정하였으며 이 값은 실험을 통하여 확인하고자 한다.

디스크 변동각에 따른 $V_{\min}$의 영향은 Fig.5에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이, 디스크 변동각이 없을 경우에는 $V_{\min} = V_{open}$이 된다. 이 의

미는 V_{open}, 즉 디스크가 완전히 열린 상태에서 디스크의 변동 또는 진동이 거의 없다는 것이고 디스크가 안정적으로 열려 있다는 의미가 된다. 그러나 V_{open}이상의 유속에서 디스크 변동각이 0 보다 크다는 것은 안정적인 완전 열림상태가 아니라는 의미가 되며 완전열림상태에서 디스크 변동각이 0이 되도록 하기 위해서는 더 큰 유속이 필요하기 때문에 $V_{\min} > V_{open}$이 된다.

동 밸브에 대한 계통운전조건이 Oscillation 영역이나 Tapping 영역에 해당될 경우, 즉 밸브를 통과하는 유체의 유속이 $V_{tapping}$ 이하인 Oscillation 영역 또는 유속이 $V_{tapping}$과 $V_{\min}$ 사이인 Tapping 영역에서 장시간 운전된 이력이 있거나 운전되고 있다면 마모 및 피로해석이 필요하다. 이에 대한 해석은 동 밸브에 대한 운전이력 자료가 확보되고 실험을 통하여 디스크 변동각에 대한 정보 또는 관계식이 도출된 후 수행할 예정이다.

3. 결 론

스윙형 역지밸브의 성능을 나타내는 여러 가지 요소중 계통의 운전조건과 밸브자체의 안정적인 완전열림을 보장하는 최소요구유속을 평가하고 이로부터 역지밸브의 운전영역(Stable, Tapping, Oscillation)을 결정하는 방법을 제시하였다. 이렇게 결정된 운전특성과 운전영역으로부터 힌지핀과 부싱에 대한 마모해석 및 디스크 스터드에 대한 피로분석의 필요성을 결정하고 그 분석방법을 간략히 기술하였다. 이와 같은 해석결과는 밸브의 선정 및 설계변경, 비해체 진단 또는 밸브 분해검사의 필요성 등에 대한 중요한 의사결정의 도구로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기사업 “원전 역지밸브 고장원인 분석 및 성능진단 관리기법 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) A.R.D. Thorley, 1989, Check Valve Behavior Under Transient Flow Conditions: A State-of-the-Art Review, Transactions of the ASME, Vol.111, pp.178-183.

(2) D.A. Casada & M.D. Todd, 1993, A Characterization of Check Valve Degradation and Failure Experience in Nuclear Power Industry C 1984-1990 Failures: NUREG/CR-5944, Vol.1. Oak Ridge National Laboratory for the US Nuclear Regulatory Commission.

(3) K.L. McElhaney, 2000, An Analysis of Check Valve Performance Characteristics Based on Valve Design, Nuclear Engineering and Design, Vol.197, pp.169-182.

(4) W.J. Rahmeyer, 1983, The Effect of Upstream Piping on Swing-Check Valves, Management and Operations, Journal AWWA, pp.553-555.

(5) A.G. Charbonneau, 1988, Innovations in Non-Intrusive Testing and Trending of Motor Operated Valves and Check Valves, Paper H3, 2nd International Conference on Developments in Valves and Actuators for Fluid Control, Manchester, England, pp.301-310.

(6) T. Horst and M.S. Kalsi, 1989, Integrating the Check Valve Application Review with Preventative Maintenance Programs, ASME 89-JPGC/NE-2.

(7) Chong Chiu & M.S. Kalsi, 1986, Plant Availability Improvement by Eliminating Disc Vibrations in Swing Check Valves, ASME Paper 86-JPGC-NE-6.

(8) EPRI, 1993, Application Guidelines for Check Valves in Nuclear Power Plants, EPRI NP-5479, Rev. 1.

(9) W.J. Rahmeyer, 1993, Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits, Transactions of ASME, Vol.115, pp.406-410.

(10) Y.S. Kim, D.H. Lee, S.C. Kang, & S.Y. Hong, 2003, Minimum Flow Velocity Model for Swing Check Valves, Proceedings of the Korean Nuclear Spring Meeting, Gyeongju, Korea(in Korean).

(11) E. Rabinowicz, 1995, Friction and Wear of Materials, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.