

스윙형 역지 밸브 개도 예측 모델 개선

김양석* · 송석윤* · 김대웅* · 박성근*

Improvement of the Model for Predicting Swing Check Valve Opening

Yang-seok Kim*, Seok-yoon Song*, Dae-woong Kim*, Sung-keun Park*

Key Words : Check valve(역지밸브), Swing check valve(스윙형 역지밸브), Minimum flow velocity(최소유속), Disc opening(디스크 개도), Performance(성능)

ABSTRACT

Swing check valves are the most common type of check valve in nuclear power plant and need to be operated properly to perform their functions and to keep the valve internals stable. However, for a swing check valve disc to remain stable, the opening characteristics should be identified and the upstream flow velocity should be enough to hold the disc fully open and without motion. Thus it is necessary to develop a model for predicting the flow velocity for a given disc opening. In the present study, the disc positions with mean flow velocity were measured for 3 inch and 6 inch swing check valves. Comparison of the measurements with the existing models showed that the models underestimate the mean flow velocity for a given disc position. Therefore, the existing model for predicting swing check valve disc position was improved with the realistic disc impingement area perpendicular to the flow stream and the experimental data. The result showed that the improved model with the best estimate of $k_b = 0.04$ predicts well the disc openings of 6 inch swing check valve, especially in the low velocity region. For better prediction of the disc opening at high flow velocity, however, it is recommended to develop a k_b correlation with the disc angle.

1. 서론

역지 밸브는 유체계통에 설치되어 펌프가 정지할 때 역류를 막고 펌프의 역회전을 방지하여 펌프의 밀봉장치와 모터를 보호하고 밸브 하류측의 탱크 또는 배관내 유체의 배수를 막는 역할을 하기도 한다. 스윙형, 틸팅형, 피스톤형, 노즐형 등 여러 가지 유형의 역지 밸브가 개발되어 이용되고 있으나, 상대적으로 설계의 단순성, 낮은 압력손실, 효과적인 시트 밀봉능력,

보수의 편의성과 다양한 크기의 활용성 등으로 인하여 스윙형 역지 밸브가 많이 설치되어 있다. 스윙형 역지 밸브는 상대적으로 저유속에서도 밸브가 완전히 열릴 수 있는 장점이 있지만 다른 유형의 역지 밸브에 비해 디스크의 무게가 무겁고 완전 열림에서 닫힘까지의 디스크 이동거리가 길기 때문에 신속한 밸브 닫힘이 어려운 단점도 있다. 따라서 스윙형 역지 밸브는 상대적으로 저수두, 저유량의 계통 보호 측면에서는 적절하지만, 설치 및 계통 운전조건에 따라 밸브가 닫힐 때 유량의 급속한 감소로 인한 충격 현상을 경험하면서 역지 밸브에 대한 해석적 및 실험적 연구에 관심을 갖게 되었다. 밸브 닫힘시 디스크의 닫힘 속도나 계통내 역류 유속이 큰 경우에는 밸브 디스크나 시트 또는 배

* 한국전력공사 전력연구원

E-mail : kimys@kepri.re.kr

Table 1 Modes for predicting V_{open} , V_{min} , and opening angle according average flow velocity (see Fig. 5 for nomenclature)

Rahmeyer ²⁾	Botros et.al. ⁴⁾	Kim et.al. ⁵⁾
$V = \sqrt{\frac{M_{tot}/\rho}{K_v + K_p}}$	$V = \sqrt{\frac{M_{tot}/\rho}{K_v + K_p}}$	$V = \sqrt{\frac{M_{tot}/\rho}{K_v + K_p - K_{seat}}}$
$M_{tot} = W_{eff} L B \sin(\theta + \beta)$		
$K_v = A_o \cos\theta \left[h + \frac{z}{2} \right]$ $A_o = \sqrt{2Dz^3 \cos^3\theta - z^4 \cos^4\theta}$ $h = \frac{(L - d/2)}{\cos\theta}$ $z = (L + D/2) - h$	$K_v = A_o (L - y_{cg})$ $A_o = \frac{\pi D^2}{8} \cos\theta - c \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{y_i^2}{\cos^2\theta}}$ $- \frac{D^2}{4} \cos\theta \sin^{-1}\left(\frac{2y_i}{D \cos\theta}\right)$; $+ \frac{d^2}{4} \cos\theta \sin^{-1}\left(\frac{2(y_i - c)}{d}\right) + \frac{\pi d^2}{8}$ $c = L(1 - \cos\theta);$ $- c + \sqrt{c^2 - \tan^2\theta \left(\frac{d^2}{4} - \frac{D^2}{4} - c^2\right)}$ $y_i = \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\theta}$ $y_{cg} = \frac{M_1 - M_2}{A_o}; M_1 = \frac{2}{3} \left(\frac{d^2}{4} - (y_i - c)^2\right)^{3/2};$ $M_2 = \frac{2}{3} \cos^2\theta \left(\frac{D^2}{4} - \frac{y_i^2}{\cos^2\theta}\right)^{3/2} - \frac{\pi c D^2}{8} \cos\theta$ $- y_i c \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{y_i^2}{\cos^2\theta}}$ $+ \frac{c D^2}{4} \cos\theta \sin^{-1}\left(\frac{2y_i}{D \cos\theta}\right)$	$K_v = A_o \cos\theta \left[h + \frac{z}{2} \right]$ $A_o = \frac{\pi}{4} \sqrt{2D_d z^3 \cos^3\theta - z^4 \cos^4\theta}$ $h = \frac{(L - d/2)}{\cos\theta}$ $z = (L + D/2) - h$
$K_p = \frac{\pi}{4} D^2 L (k_b \theta)^{-3}$ $k_b = \begin{cases} 0.025 & \text{for } V = V_{open} \\ 0.035 & \text{for } V = V_{min} \end{cases}$	$K_p = \frac{\pi}{4} D^2 L (k_b \theta)^{-3}$ $k_b = 0.02368 + 3.942 \times 10^{-17} \theta^8$	$K_p = \frac{\pi}{8} D^2 L (k_b \theta)^{-3}$ $k_b = 0.02$
-	-	$K_{seat} = C_{seat} W_{disk} (L/d)^2$
-	$\theta_{min} = \cos^{-1}\left(\frac{L + d/2}{L + D/2}\right)$ if $\theta < \theta_{min}$ $A_o = (\pi d^2/4)$, $y_{cg} = 0$, $K_{VEL} = A_o L$	$C_{seat} = \begin{cases} 0 & \text{for } V = V_{open} \\ \frac{0.065 (\Delta\theta)^2}{\rho g} & \text{for } V = V_{min} \end{cases}$
Compressible Flow Incompressible Flow	Compressible Flow	Incompressible Flow

관을 포함한 계통에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 역지 밸브가 닫힐 때 발생하는 최대 역류 유속을 예측하는 것은 이러한 충격 현상을 이해하는데 매우 중요하다. 스윙형 역지밸브인 경우, 역지밸브의 닫힘시 충격 현상이외에 밸브의 성능 특성에 크게 영향을 미치는 인자 중에서 디스크 완전 열림각과 밸브 완전 개방에 필요한 최소 유속이 있다. 두 가지 인자는 서로 연관되어 있는데, 완전 열림각이 클수록 유체가 밸브를 통과할 때의 압력 손실을 최소화할 수 있으나 밸브 디스크를 완전 열림 위치에 유지하여 안정화시키기 위해서는 더 큰 유속을 필요로 한다. 밸브 완전열림에 필요

한 최소요구유속을 제공하지 못한다면 유동으로부터 유발된 디스크 진동 및 지속적인 디스크 태핑에 의하여 특정부품의 마모 또는 피로 누적으로 인한 고장이 발생할 수 있다. 따라서 역지 밸브가 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. V_{open} 과 V_{min} 에 대한 기존 모델들을 Table 1에 나타내었는데, 일반적으로 최소요구유속은 밸브 제작사에서 제공되지만 V_{open} 과 V_{min} 에 대한 개념 구분이 명확하지가 않다. Chiu & Kalsi¹⁾는 밸브

완전 열림을 위한 최소요구유속에 대한 정보의 부재를 지적하면서 이론적인 최소요구유속 관계식을 개발하였다. 이 모델은 스윙형 역지 밸브 디스크에 작용하는 유동 모멘트와 관성 모멘트 그리고 디스크와 밸브 힌지 압의 무게를 고려하여 V_{open} 을 예측한다. Rahmeyer²⁾는 비압축성 및 압축성 유체에 적용된 스윙형 역지 밸브에 대하여 유동 모멘트 및 관성 모멘트, 디스크 및 밸브 압의 무게뿐만 아니라, 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시딩 힘을 고려하여 V_{min} 모델을 제시하였다. 이때, 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시딩 힘은 실험상수 (k_b)를 도입하여 하나의 항으로 통합하여 나타내었다. 이 두 가지 모델은 EPRI 보고서³⁾에도 기술되어 있으며 EPRI 모델로도 알려져 있다. Botros et.al.⁴⁾은 압축성 유체인 공기를 이용한 실험으로부터 개도각에 대한 k_b 상관식을 제시하였고 Rahmeyer 모델을 근간으로 하는 압축성 유체에서의 스윙형 역지 밸브 개도각 예측모델을 제시하였다. Kim et.al.⁵⁾은 밸브 전·후단 압력차와 밸브 완전 열림시 백시딩 힘에 의한 모멘트를 분리하여 또 다른 V_{min} 모델을 제시하였는데 같은 모델을 이용하여 스윙형 역지 밸브 개도각과 V_{open} 을 평가할 수 있다.

본 논문에서는 스윙형 역지 밸브의 열림 특성 실험 결과를 기술하고 이를 이용하여 평균 유속에 따른 기존의 개도각 예측 모델 개선 내용을 다루고자 한다.

2. 열림 특성 실험

2.1. 실험 장치

역지 밸브 열림 특성 실험을 위한 실험 장치 개략도와 실험 장치 전경을 Fig. 1과 2에 나타내었는데, 실험장치는 저장탱크, 펌프, 유량계, 역지 밸브, 공기구동 제어밸브 및 각종 격리밸브와 연결 배관으로 구성되어 있다. 연결 배관은 6인치 역지 밸브 실험을 목적으로 하는 6인치 배관을 기준으로 구성되어 있으며 3인치 역지 밸브에 대한 실험을 위하여 3인치 배관을 추가로 구성하였다.

원심 펌프의 용량은 3인치 및 6인치 스윙형 역지 밸브의 성능 시험에서 요구되는 전 유량 범위를 거의 일정한 수두(0~7.2 m/7.2, 72.61~61m)에서 공급할 수 있도록 선정하였고, 저 유량에서의 펌프 보호를 위해서 재순환관을 설치하였다. 유량 제어는 2인치와 6

인치 공기구동 글로브 밸브를 이용하였으며, 전자기 및 터빈 유량계를 이용하여 유량을 측정하였다. 그 밖에 역지 밸브의 개도, 유동 유체의 온도, 펌프 출구와 역지밸브 전·후단에서의 압력, 역지밸브 전후단 차압을 측정하기 위한 계측기들을 설치하였다. Table 2에 실험에 사용된 3인치와 6인치 스윙형 역지 밸브의 사양을 나타내었다.

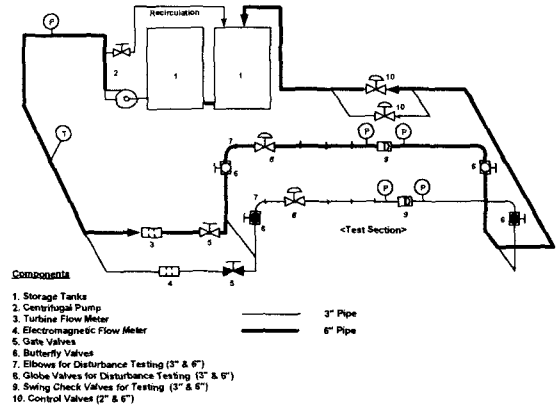


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental loop.

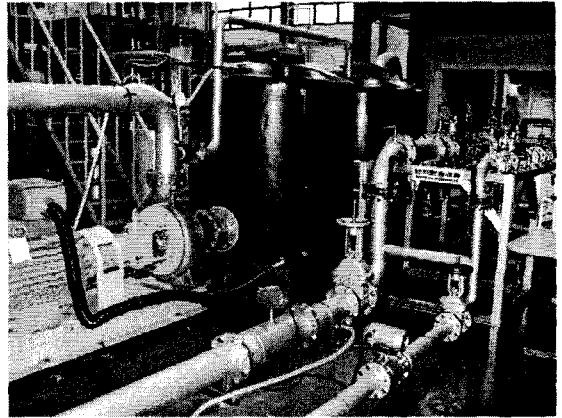


Fig. 2 View of the experimental loop

2.2. 실험 결과 요약

2.2.1. 밸브 열림 특성

3인치와 6인치 스윙형 역지 밸브에 대하여 균일 유동에서의 밸브 열림 특성과 $L/D = 2 \sim 10$ 인 상류측 지점에 엘보우와 글로브 밸브, 또는 오리피스에 있을

경우의 열림 특성 실험을 수행하였다. 여기서는 스윙형 역지밸브의 개도 예측 모델 개선을 목적으로, 균일 유동에 대하여 6인치 스윙형 역지밸브에 대한 균일 유동 시험 결과만을 다루고자 한다. Fig. 3에 균일유동조건에서 평균 유속에 따른 6인치 밸브의 디스크 위치와 디스크 진폭 측정값을 나타내었다.

Table 2 Swing check valve specifications for the test

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(°)	64.2	63.59
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

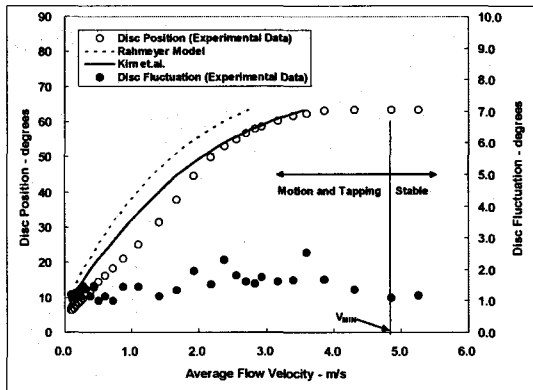


Fig. 3 Disc position and disc fluctuation with average flow velocity for 6-inch swing check valve

본 실험에서 V_{open} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 열림각으로 나타난 최소의 평균 유속으로 정하였는데 6인치 밸브인 경우 약 3.86 m/s로 측정되었다. V_{min} 은 디스크가 백스탑에 위치하는 완전 열림 후 디스크 진동의 떨림 정도(진폭)가 최대값에서 감소하여 1° 이내로 유지되는 최소의 평균 유속으로 정하였으며, 예상대로 V_{open} 보다 더 큰 4.86m/s로 측정되었다. Fig. 3에

나타낸 바와 같이 평균 유속이 V_{open} 보다 더 커서 디스크가 완전 열림 위치에 있더라도 V_{min} 보다 작은 유속에서는 일정 수준 이상의 디스크의 떨림이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 스윙형 역지밸브가 열림상태에서 필요한 유량을 통과시키더라도 밸브의 안정적 운전과 건전성 확보를 위해서는 좀 더 많은 유량이 필요함을 의미한다.

Fig. 3을 보면 Rahmeyer 모델이 거의 모든 디스크 개도에서의 평균 유속을 작게 예측하고 있는 반면 Kim et.al.의 모델은 디스크의 개도가 작은 영역에서는 평균 유속을 작게 예측하고 있지만 완전열림에 가까운 위치에서는 평균유속을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 즉 Kim et.al.의 모델은 평균유속에 따른 개도각보다는 상대적으로 V_{open} 을 예측할 때 훨씬 유용하다고 볼 수 있다.

2.2.2. 압력손실계수

Table 1에 나타낸 바와 같이 평균 유속에 따른 스윙형 역지 밸브의 디스크 개도 또는 V_{open} 을 예측하기 위한 모델들의 차이는 K_v 와 K_p 를 평가할 때 이용하는 A_0 와 k_b 의 차이에 기인한다. 이 두 가지 인자중 A_0 는 다음 절에서 다루기로 하고 여기서는 압력손실계수 C_D 를 구하는데 이용되는 k_b 에 대해 다루고자 한다.

Fig. 4에 k_b 를 평가하는 관계식 또는 상수와 본 실험에서 측정된 값을 비교하였다. Rahmeyer 모델은 스윙형 역지밸브의 개도를 예측하는 것보다는 V_{open} 또는 V_{min} 을 예측하기 위한 목적이 우선이었기 때문에 Fig.4에 나타낸 바와 같이 완전 열림 위치에서는 Rahmeyer가 제시한 값 ($k_b = 0.025$)과 유사한 값이 측정되었다. 그러나 유량이 감소할수록 k_b 측정값은 Rahmeyer가 제시한 값보다 더 커짐을 알 수 있다. 이는 Rahmeyer 모델을 이용하여 스윙형 역지 밸브의 개도를 예측할 때 오차가 커질 수 있음을 의미하는 것이며, Fig. 3에서 이를 확인할 수 있다. 참고로 압축성 유체에 대한 모델인 Botros et.al. 모델도 함께 나타내었다.

3. 모델 개선 및 결과

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 A_0 는 밸브 개도에 따라 배관을 흐르는 유체와 직접 접촉하는 디스크의 수직 단면적을 의미하는데, 이는 유체의 유동 및 관성 모멘트와 관련된 K_v 를 예측하는데 필요한 것이다. 물리적

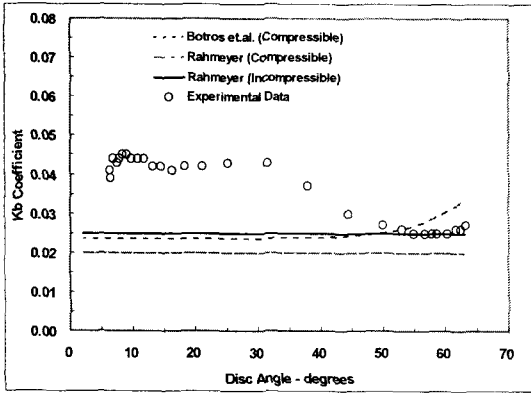


Fig. 4 Comparison of the measured k_b coefficient with model prediction

으로 Botros et.al.이 제시한 A_0 가 가장 타당하며 세 가지 모델에서의 A_0 를 본 실험에 이용된 6인치 역지밸브에 적용하여 비교하면 Fig.6과 같다. 여기서, 개도각이 약 19도 (θ_{min})이하가 되면 A_0 는 밸브 입구에서의 배관 단면적과 같게 됨을 알 수 있다. Rahmeyer 모델과 Kim et.al. 모델에서의 A_0 는 전반적으로 실제의 단면적보다 더 큰 값을 예측하고 있으며 특히 개도각이 θ_{min} 이하가 되면 과도하게 큰 값을 보여주고 있다. 이는 A_0 를 이용하여 평균한 K_v 값 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 따라서 압축성 유체에 대한 모델이기는 하지만 A_0 가 유체의 특성과는 무관한 인자이기 때문에 본 논문에서는 Botros et.al.의 A_0 를 이용하여 K_v , k_b 및 밸브 개도를 평가하였다.

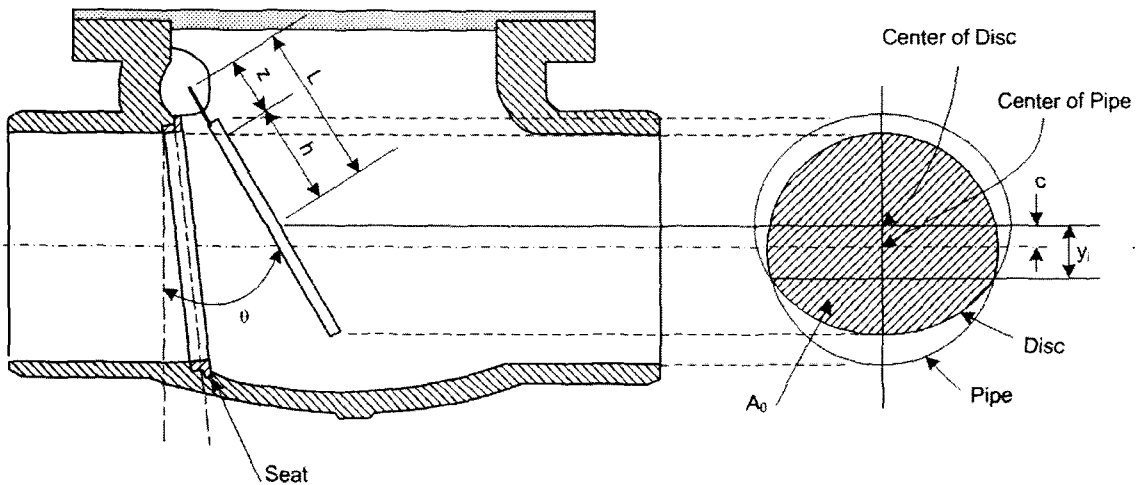


Fig. 5 Schematic diagram for determination of jet impingement area (A_0)

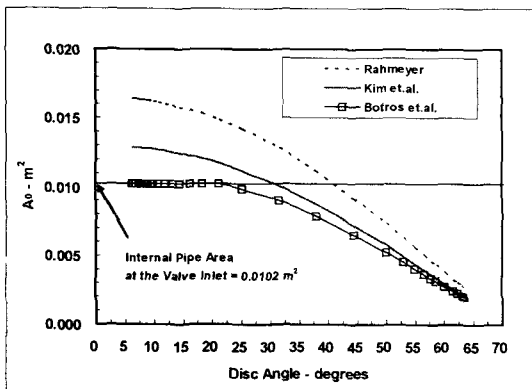


Fig. 6 Comparison of the jet impingement area models (A_0)

디스크 개도각에 따른 K_b 의 변화는 Fig. 7에 나타내었는데 Rahmeyer가 제시한 모델을 이용한 계산값을 함께 나타내었다. 또한 Kim et.al.의 모델을 이용한 계산에서는 Rahmeyer가 제시한 값인 $k_b = 0.025$ 를 이용한 결과와 $k_b = 0.04$ 를 이용한 결과를 함께 나타내었다. Fig.4에서도 예상할 수 있듯이, Rahmeyer 모델이 실험 값에서 많이 벗어나고 있음을 알 수 있다.

추가 실험을 통하여 상관관계를 좀더 분석한 후 상관관계식을 도출함이 바람직하므로, 여기서는 최적 상수값으로 판단되는 $k_b = 0.04$ 를 이용하여 밸브 개도를 예측하였다. Fig. 7을 보면 개도각이 작은 영역에서 좋은 예측 결과를 예상할 수 있는데 Fig. 8을 보면, 예상

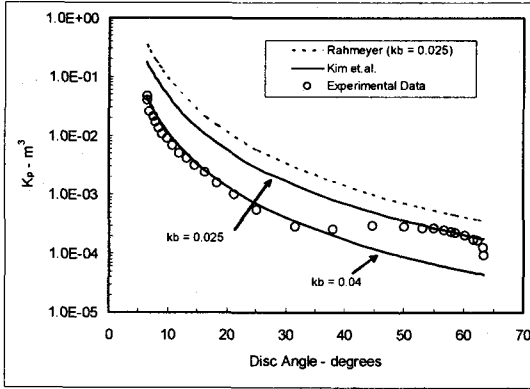


Fig. 7 Comparison between measurement and various models for the coefficient of K_b

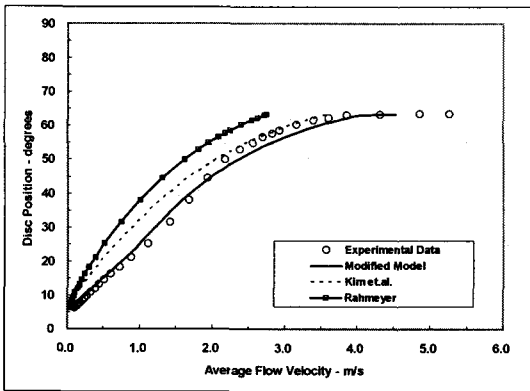


Fig. 8 Comparison of the measured disc position with the model predictions for 6-inch swing check valve

한 바대로 저유속에서의 밸브 개도는 잘 예측하는 반면 일정 유속 이상에서는 실험값에서 약간 벗어남을 알 수 있다. 이는 추가 실험을 통하여 밸브 개도에 따른 k_b 상관식을 개발하여 적용하면 개도각이 큰 영역에서도 역지밸브의 개도를 잘 예측할 것으로 판단된다.

4. 결론

스윙형 역지 밸브의 개도에 따라 배관을 흐르는 유체와 직접 접촉하는 디스크의 수직 단면적을 좀 더 정

확히 평가하고 스윙형 역지 밸브의 열림 특성 실험 결과를 이용하여 평균 유속에 따른 기존의 개도각 예측 모델을 개선하였다. 개선 모델은 저유속에서의 밸브 개도는 잘 예측하는 반면 일정 유속 이상에서는 실험값에서 약간 벗어남을 알 수 있었다. 이를 보완하기 위해서는 추가 실험을 통하여 밸브 개도에 따른 k_b 상관식을 개발하고 밸브 디스크 크기에 따른 영향을 살펴볼 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Chong Chiu & M. S. Kalsi, 1986, "Plant Availability Improvement by Eliminating Disc Vibrations in Swing Check Valves," ASME Paper 86-JPGC-NE-6.
- (2) W. J. Rahmeyer, 1993, "Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits," Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 115, pp. 406-410.
- (3) EPRI, 1993, Application Guidelines for Check Valves in Nuclear Power Plants, EPRI NP-5479, Rev. 1, EPRI.
- (4) K. K. Botros, B. J. Jones, and O. Roorda, 1997, "Effects of Compressibility on Flow Characteristics and Dynamics of Swing Check Valves - Part 1," Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp. 192-198.
- (5) Kim et al., 2003, "Minimum Flow Velocity Model for Swing Check Valves," Proceedings of Korean Nuclear Society (in Korean).