

스윙형 역지밸브의 디스크 개도 변화에 따른 2차원 유동해석

Two-Dimensional Flow Analysis for Various Disk Degrees of Swing Check Valve

박순중, 김대웅, 박성근

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

역지밸브는 원자력발전소의 대부분의 유체계통에 설치되어 안전성 및 운전성 확보에 중요한 역할을 한다. 역지밸브의 고장은 계통장애는 물론 계통에 영향을 미칠 수 있으므로 역지밸브의 성능평가와 상태감시를 통한 유지관리가 필요하다. 본 논문에서는 엘보와 일반적인 난류와 같은 교란요소에 따른 영향을 분석하여 6인치 배관내 유동에서 역지밸브의 안정성을 예측하였다. FLUENT 코드를 사용하여 유체 관성효과가 발생하는 스윙형 역지밸브의 디스크 각도 30°, 45°, 60° 변화에 따라 발생하는 유체유동 특성 및 속도분포를 해석하였다.

Abstract

Check valves, installed in the most fluid systems in nuclear power plant, play an important role of ensuring the safety and operability of the plant. Since the failure of a check valve may effect its the function as well as the operability of the plant. The proper maintenance through the performance evaluation and condition monitoring for the check valves is needed. This paper predicts the stability of check valve in 6-inch pipe by analysis of disturbance factors such as elbow flow and general turbulence sources. The velocity distribution and the flow characteristics for swing check valve with changing the disk angle were analyzed by FLUENT code.

1. 서 론

원자력발전소의 안전성 확보를 위해서는 안전성에 영향을 미치는 중요기기에 대한 성능 해석과 지속적인 상태 감시를 통한 유지관리가 필요하게 된다. 유량의 효과적인 분배나 제어를 위해 여러 종류의 밸브를 사용하게 되나 그 형상에 따라 유체의 저항 및 유량 특성이 다를 뿐만 아니라 기능 또한 제한되어 있다. 그 중 역지밸브는 펌프 정지 시 유체의 역류를 막고 밸브 하류 쪽의 탱크 또는 배관내 유체의 배수를 막는 역할을 하게 되며 과도한 압력손실 없이 설계유량을 통과시키는 역할을 하게 된다. 원자력발전소에서 역지밸브는 대부분의 유체계통에 설치되어 운전모드 변경 시 유로형성 기능 및 계통간의 압력경계 유지와 원심펌프등 관련기기의 보호기능을 수행하게 된다. 특히 안전주입계통을 포함한 원전 안전계통에 설치된 역지밸브는 설계기준 사건시 개방되어 안전 주입, 보조 급수 등의 유량을 확보하고 배관 열성층 및 Steam hammer가 발생되지 않도록 하며 정상운전 시 유동의 역류방지를 위해 충분한 밀폐성을 확보하는 중요한 역할을 한다. 따라서 원자력발전소에 설치된 역지밸브는 원자력발전소의 안전성과 운전성 확보에 중요한 영향을 주게 되어 고장 및 성능장애의 경우에 원자력발전소 자체의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다.

미국에서의 역지밸브 고장 및 사고사례를^{[1],[2]} 보게 되면 계통기능장애 74건, 출력 감발 16건, 원자로 정지 12건 등의 안전에 영향을 주는 것으로 보고 되어 있으나 이에 따른 확실한 대비책이 없는 실정이다. 고장 발생빈도가 가장 높은 스윙형 역지밸브의 경우에는 헨지 및 헨지 편에서의 마모손상, 디스크 스테드와 스택과의 충격으로 인한 손상이 가장 많았으며 근본원인은 Water hammer, Turbulence, Vortex shedding, Pulsating unsteady flow등의 유동에서 기인하는 요인과 Cavitation에 의한 배관의 진동 등이 있다.

따라서 본 연구에서는 유체 유동현상의 규명 및 가시화를 위해 상용코드인 FLUENT를^[3] 이용하여 스윙형 역지 밸브 디스크의 각도가 30°, 45°, 60°일 때 밸브 디스크 후류의 유동패턴을 비교 분석 하였으며 배관내의 교란요소인 엘보에 따른 영향을 분석하기 위해 3D, 6D, 10D에 걸쳐 유속의 변화를 두어 해석하였다.

2. 이론적 배경

역지밸브는 유속에 따라 개폐가 진행되므로 밸브의 완전 열림에 필요한 최소요구유속을 계통에서 제공하지 못하면 디스크의 진동 및 Tapping에 의하여 특정부품의 마모와 누적된 피로에 의해 고장을 일으키는 원인이 된다. 따라서 역지밸브가 어떤 배관에 설치되어 본래의 성능을 발휘하기 위해서는 완전 열림을 위한 최소요구유속인 V_{open} 과 안정적인 밸브 열림을 보장하는 최소요구유속인 V_{min} 의 정보가 필수적이다.

최소요구유속에 대한 정보는 절대적으로 밸브 제작사에 의존해왔으나 V_{open} 과 V_{min} 에 대한 개념을 확실히 구분하여 제시하지는 않았다. 해외에서는 Chiu & Kalsi^[4]와 EPRI^[5]에서 이론적인 최소요구유속 관계식을 개발하였다. 이 관계식은 밸브 디스크에 작용하는

유동모멘트와 관성모멘트 그리고 디스크와 밸브 힌지암의 무게를 고려하여 V_{open} 을 예측한다. Kim et.al^[6]은 밸브 전·후단의 압력차와 밸브 완전 열림시 백시팅 힘에 의한 모멘트를 분리하여 다음과 같이 제시하였다.

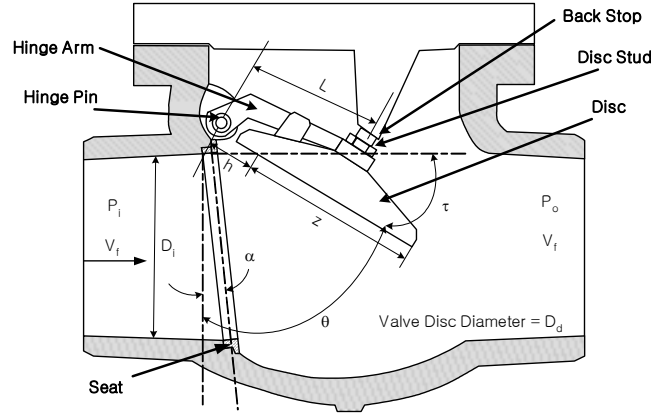


Fig. 2-1 Swing Check Valve Model

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

여기서,

$$M_{WT} = B \cdot (W_{DISK} + 0.5W_{ARM}) \cdot \sin(\theta + \beta) \cdot L$$

$$K_{VEL} = A_{eff} \cdot \cos\theta \cdot (h + 0.5z), \quad A_{eff} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2D_d z^3 \cos^3\theta - z^4 \cos^4\theta}$$

$$h = \frac{(L - D_d/2)}{\cos\theta}, \quad z = (L + D_d/2) - h, \quad K_{\Delta P} = 0.5A_d \cdot L \cdot C_D$$

$$K_{SEAT} = C_{SEAT} \cdot W_{DISK} \cdot (L/D_d)^2$$

여기서 $K_{SEAT} = 0$ 으로 하면 V_{open} 과 밸브를 통과하는 평균유속에 따른 디스크 위치를 예측 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 디스크 개도각에 따른 유동패턴의 변화를 알아보고 속도벡터에 의한 와류현상을 규명하고자 한다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

지배방정식은 질량 운동량 보존방정식으로 이루어지며 계산의 효율과 정확도를 증가시

키기 위하여 물리적 공간(Physical domain)은 일반화된 좌표변환을 사용하여 계산공간으로 변환된다. 파이프의 길이방향과 굽힘 방향의 운동을 무시하고 유체의 Wave 속도가 유속에 비해 상당히 크다고 가정하면 파이프 내부유체의 운동량방정식과 연속방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.^[7]

$$P' + \rho(\tilde{V} + vv') + \rho \frac{f}{2D} |v| v = 0, \quad v' = 0 \quad (2)$$

여기서 P'은 거리의 함수이고 \tilde{V} 은 시간의 함수이다. 또한 P는 유체의 압력, ρ 는 유체의 밀도, v는 유속, f는 friction factor, D는 파이프의 직경이다. 식 (2)를 위치구간에 대하여 적분하여 적분방정식으로 근사화 하면 비압축성 유체의 비정상 베르누이 방정식이 아래와 같이 유도된다.

$$\frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g} + h_{Lij} + I_{ij} \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

v 는 유체의 비중량, g는 중력가속도, Q는 평균유량, p_i 와 v_i 는 i점에서의 유압과 유속, 그리고 h_{Lij} 는 적분구간에서의 손실수두이다. 이때 I_{ij} 와 h_{Lij} 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$I_{ij} = \frac{L_{ij}}{gA_{ij}}, \quad h_{Lij} = f \frac{8L_{ij}}{\pi^2 D_{ij}^3 g} Q^2 \equiv K_{ij} Q^2 \quad (4)$$

여기서, L_{ij} , A_{ij} , D_{ij} 는 각각 적분구간의 거리, 파이프 내부의 단면적, 파이프의 직경이다.

3.2 기본형상 및 경계조건

본 연구에서 사용된 FLUENT는 완전 암시도해 (fully implicit scheme)를 사용한 유한체적법 코드로서 속도와 같은 벡터량과 압력, 온도 등과 같은 스칼라량을 같은 위치에 저장하는 엇갈림 격자계를 사용한다. 난류모델에는 가장 널리 사용되고 있는 k- ϵ 모델이 있다. 이 모델이 개발된 후, 방정식들은 여러 연구자들에 의해서 일반화되고 수정되었으며 본 연구에서는 대류항을 계산하기 위한 격자점 보간으로 벽법칙(Law of wall)을 사용한 k- ϵ 모델을^[7] 적용하였다. 수치해석에 사용된 코드는 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)에 근거하여 계산되었고, 수치해법으로 Patanker가^[8] 제안한 SIMPLE(Semi Implicit Pressure Linked Equation) 알고리즘을 이용하였다.

또한 체크 형상의 압력 진동해를 방지하기 위하여 Rhie등이^[9] 제안한 집중격자 기법인 PWIM(Pressure-Weighted Interpolation Method)를 적용하였으며 계산 속도를 높이기 위해 2차원으로 해석 하였으며 수렴판정은 압력, 속도(U, V) 난류에너지 그리고 소산율(Dissipation)의 Normalized residual이 동시에 10^{-6} 이하로 떨어질 때 해가 수렴한 것으로 판정하였다. 경계조건으로는 압력, 속도가 일정한 값으로 주어지는 Dirichlet 조건을 출구에서는 모든 변수의 변화량을 0으로 하여 Neumann 조건을 사용하였다.

Fig. 2에서는 유동해석에서 고려된 계산격자와 격자계를 보여주고 있다. 해석에 사용된 총 격자의 형상은 디스크 각도 변화에 따라 30°, 45°, 60° 3종류와 교란요소인 엘보와 밸브

간의 거리에 따라 3D, 6D, 10D 3종류로 총 9개의 형상을 사용하였다. Mash의 형태로는 Quad와 Triangle이 복합적으로 사용되었고 3D는 15000개, 6D는 18000개, 10D는 약 20000개의 Cell로 구성되었으며 계산영역의 기하학적 형상은 앞으로 수행 예정인 실험장치와 동일한 조건으로 구성되었다. 경계조건에 대한 요약은 Table 3-1에 간략히 설명하였다.

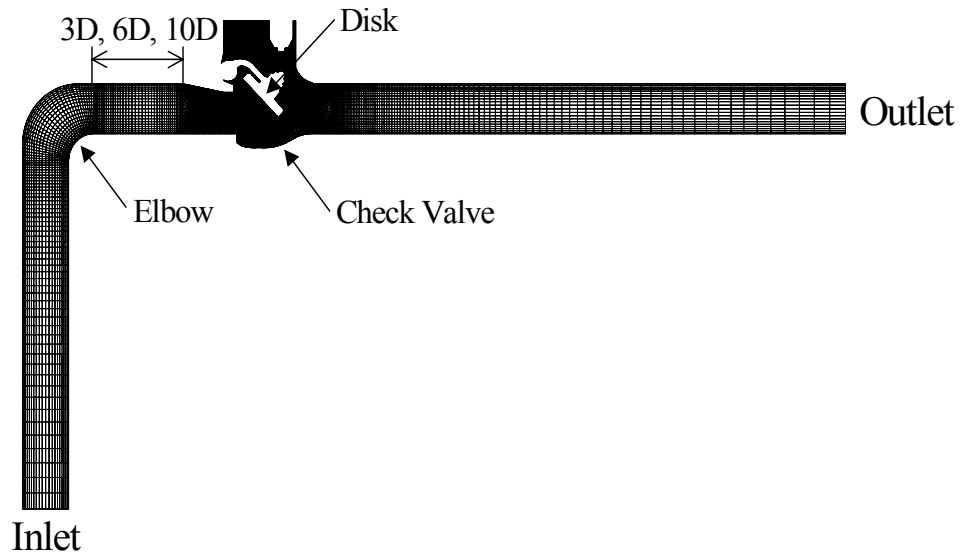


Fig. 3-1 Computational grid system for Check valve

Table 3-1 Boundary conditions for analysis of horizontal channel

Inlet velocity (m/s)	1	Fluid temperature(°F)	72
Total length (mm)	2600~3600	Channel wall	heat flux = 0
Turbulent intensity (%)	6	Disk wall	No-Slip & Adiabatic condition

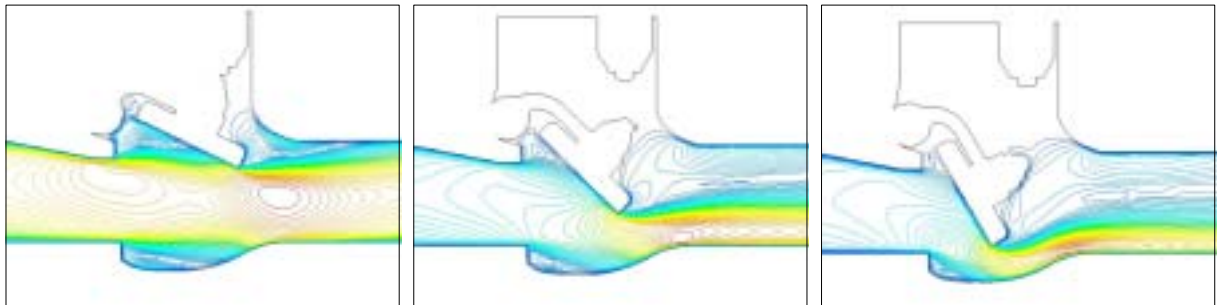
3.3 해석결과

원관내로 유입된 유체의 유동해석은 디스크의 각도변화에 따라 유동분포 및 유체의 속도분포를 비교 분석하였으며 교란요소인 엘보를 사용하여 밸브와 엘보 사이의 거리에 따른 압력·속도분포를 분석하였다. 추후 수행 예정인 시험에 사용되는 스윙형 역지밸브의 최대 열림각이 60°인 관계로 각각 15°의 차이를 두어 3종류(60°, 45°, 30°)의 해석을 하였으며 이때의 유체 유동 현상을 분석하면서 국부적인 와류현상을 가시화하였다.

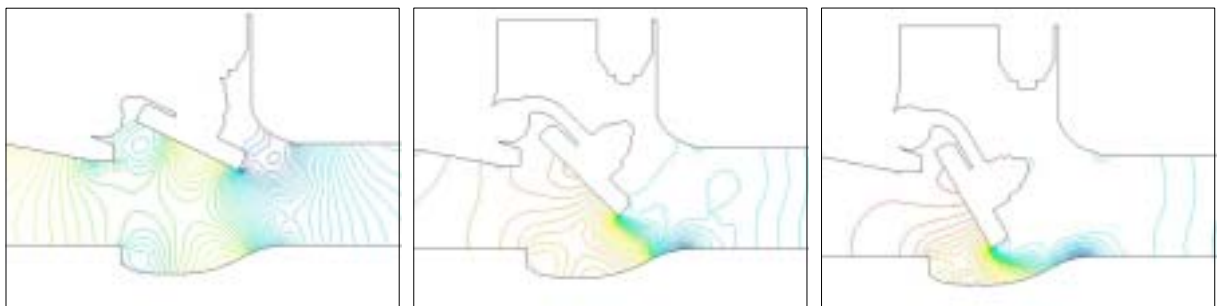
Fig. 3-2에서는 60°, 45°, 30° 디스크 위치에서의 완전열림 상태에 대한 유체유동 해석 결과로 압력분포, 속도벡터분포를 보여주며 일정속도(1m/s)로 관내로 유입된 유체의 일부

는 밸브파트의 디스크 벽면에 부딪치고 나머지 유체는 디스크 아래의 공간으로 유출된다. Fig. 3-2의 (a)에서 보면 배관을 지나 밸브파트 전까지 유속이 증가되는 것을 볼 수 있으며 디스크를 끝단에서 최대유속 상태를 유지하였다. 60°일 때의 유속은 약 1.5m/s이며 압력은 음의 값을 취하게 되므로 유동장내에 난류가 형성되어 와류가 진행됨을 알 수 있었다. 밸브가 닫히는 시기인 30°일 때에는 디스크 벽면에서는 저압상태를 유지하며 디스크 끝단 아래쪽으로 빠른 흐름의 유체 유동이 확인되었으며 이때의 유속은 약 4.9m/s이다. Fig. 3-2의 (b)는 각 개도에 따른 압력분포를 나타내고 있으며 60°일 때는 밸브 전 구간에 걸쳐 비슷한 압력을 보여주나 점차 밸브가 닫힘에 따라 급격한 압력변화를 알 수 있었다. 특히 30°일 때의 밸브 전단부와 후단부의 차압은 약 7psi 정도를 보여주었다.

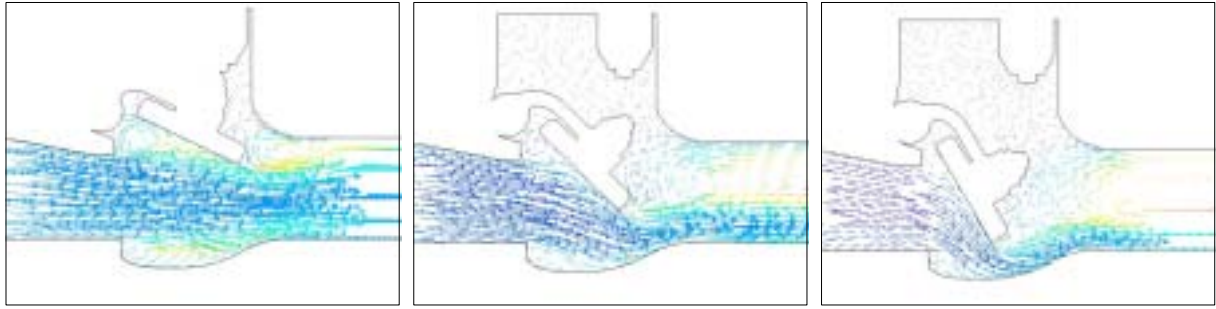
Fig. 3-2의 (c)와 (d)에서는 유동에 따른 속도벡터와 Stream line을 가시화한 것인데 30°일 때 가장 큰 와류가 형성되었고 밸브가 열릴수록 점차 와류의 진행이 작아짐을 볼 수 있었으며 디스크 후단부에는 케비테이션 영역이 생성됨을 알 수 있었다. 따라서 역지밸브의 가장 큰 역할인 유동의 원활한 흐름을 위해서는 디스크 완전열림각에서의 균일한 속도와 압력손실을 최소화할 수 있는 밸브의 설계가 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 역지밸브의 최대 열림각은 60°이나 수치해석 결과만을 보면 유동 패턴을 고려하여 65°에서 70° 사이가 적당할 것으로 사료된다. 그러나 디스크의 무게 및 디스크 거동에 영향을 주는 유속변화에 따른 진동을 고려한다면 보다 정확한 해석이 필요하게 되며 이는 차후의 실험 및 해석에서 보완할 예정이다.



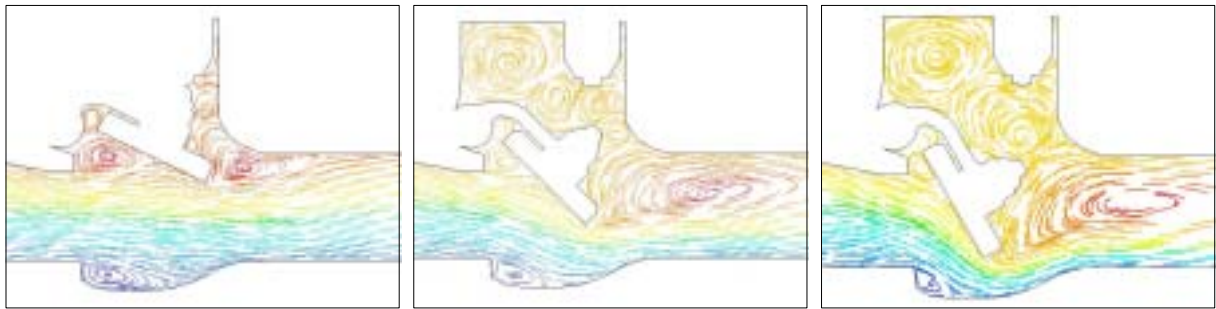
(a) Typical velocity contour of swing check valve disk angles



(b) Typical pressure contour of swing check valve disk angles



(c) Typical vector contour of swing check valve disk angles



(d) Typical streamline contour of swing check valve disk angles

Fig. 3-2 Numerical solution for various swing check valve disk angles at $Re=1.5 \times 10^4$

Fig. 3-3에서는 밸브와 엘보 사이의 거리에 변수를 두고 디스크 개도에 따른 전단압력과 후단압력을 비교하였고 이때의 속도분포를 비교함으로써 유동상태의 특성을 파악하였다. 압력분포에서 보면 그래프상단이 전단, 하단이 후단이 되겠으며 유동방향은 위쪽에서 아래로 흐르게 된다. 3D 상태의 그래프와 6D 상태의 그래프에서는 압력함수로는 확연한 차이는 없으나 속도함수에서는 전단부에 엘보 효과가 나타남을 알 수 있다. 대부분의 직관에 설치된 엘보의 형태에 따라 Up & Down 으로 나누어지게 되는데 Down 형태의 엘보에서는 상류는 고압상태의 저속 유동 현상을 보이게 되고 하류는 저압상태의 고속 유동 현상으로 나타나게 된다. 본 논문에서는 Down 형태의 엘보를 사용하였으며 따라서 이와 동일한 효과를 보이고 있다. 디스크 전단부의 속도 분포에서 하단부로 고속의 유동 현상을 보이고 있으며 후단부에서는 3D와 6D 모두 비슷한 속도의 값인 저속상태를 유지함을 알 수 있었다.

디스크 개도별로 분석해보면 압력분포에서는 30° 일 경우에 가장 큰 차압을 보이고 있으며 디스크가 완전히 열렸을 60° 인 경우에는 차이가 미세함을 볼 수 있었다. 관내에서의 난류 유동과 Vortex에 의한 진동으로 인해 캐비테이션이 생성되고 이는 밸브 구조물에 악영향을 미치는 것으로 분석되고 있다. 따라서 대부분의 관로 설계 시 교란요소인 엘보와 직각면으로부터 밸브까지의 거리를 $5D \sim 10D$ 이상 떨어지게 설치하게 되는데 $10D$ 상태의 압력분포와 속도분포에서 보여주듯이 밸브 전단과 후단의 압력차가 $10D$ 상태가 가장 작음을 알 수 있다. 30° 에서는 $3D$ 와 $6D$, 그리고 $10D$ 모두 같은 값을 취하고 있으나

45°와 60°의 진행률에 따라 간격이 감소되므로 보다 원활한 유동이 흐르게 됨을 알 수 있다. 속도분포에서도 밸브가 열릴수록 전단부에서의 압력은 점차 증가되나 완전열림각인 60°에서는 모두 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 사용된 6" 배관에서는 3D와 6D에서는 큰 차이를 알 수 없었으므로 이는 차후에 1D와 2D의 실험으로 보완하여 정량적인 특성을 분석할 예정이다.

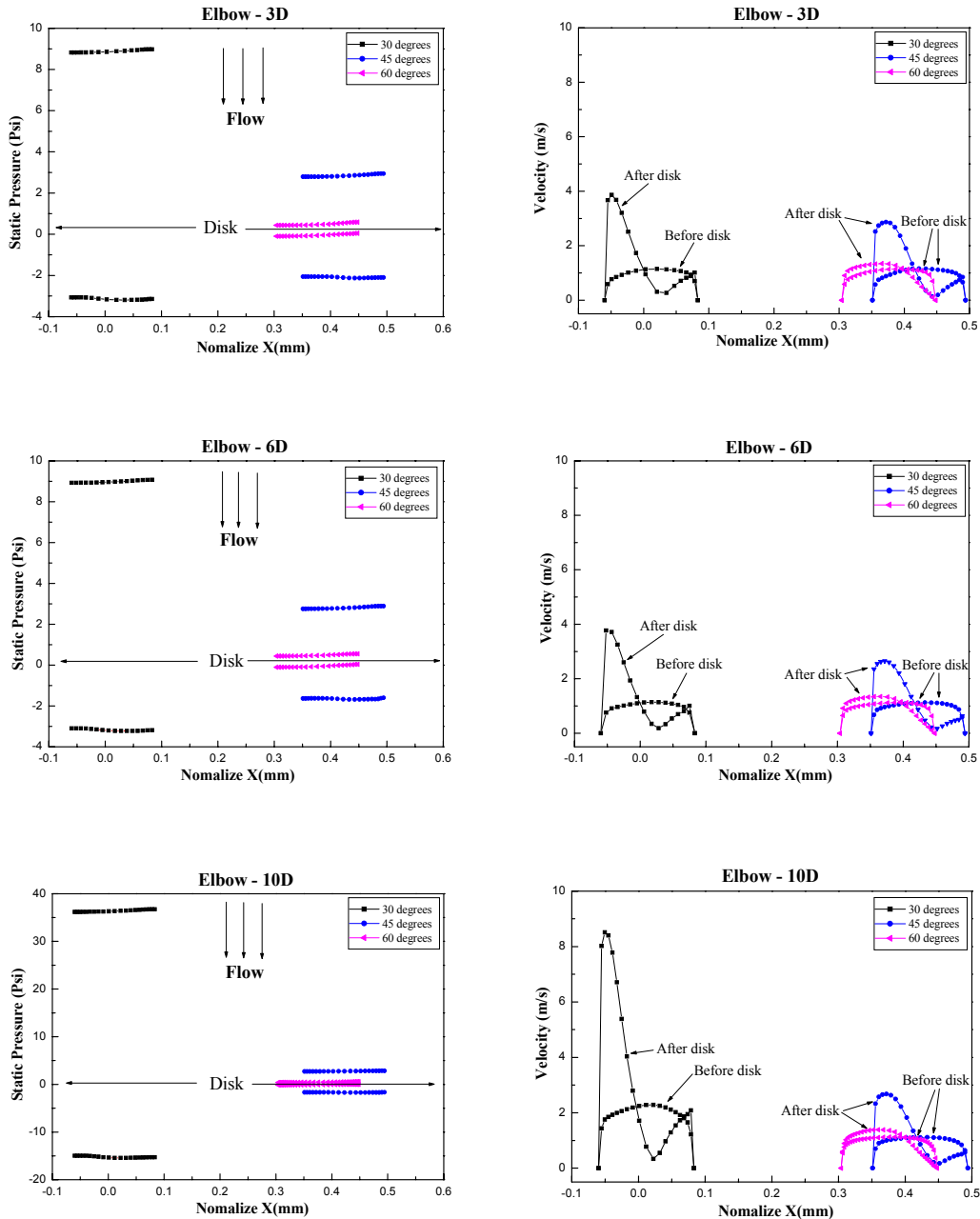


Fig. 3-3 Comparison of computed static pressure & Velocity distribution

4. 결론

본 연구에서는 스윙형 역지밸브의 디스크 각도 및 엘보효과에 대한 유동장 특성해석과 변화를 수치해석을 통하여 연구하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 스윙형 역지밸브 디스크를 통과하면서 발생하는 유체의 정체점, 박리점, 재순환영역이 밸브 각도에 따라 상당히 다르게 나타났다.
2. 밸브 개도각 30°에서 디스크 후단에 가장 큰 와류가 생성되어 전단부에 저속·고압의 상태를 유지하였으며 완전열림 상태인 60°에서 압력 손실이 가장 작게 나타났다.
3. 엘보로부터 이격거리 10D 상태에서 가장 적은 압력 손실을 가져왔으며 원활한 유동 형태가 유지됨을 알 수 있었다.
4. 수치해석에서 얻은 결과를 토대로 정량적인 값은 추후 실험을 통해 보완·분석할 예정이다.

참고문헌

- [1] D.A. Casada & M.D. Todd, 1993, A Characterization of Check Valve Degradation and Failure Experience in Nuclear Power Industry C 1894-1990 Failures: NUREG/CR-5944, Vol.1. Oak Ridge National Laboratory for the US Nuclear Regulatory Commission.
- [2] A.R.D. Thorley, 1989, Check Valve Behavior Under Transient Flow Conditions: A State-of-the-Art Review, Transaction of the ASME. Vol. 111, pp. 178-183.
- [3] FLUENT Inc, 2000, "FLUENT Tutorial Guide/User's Guide manual"
- [4] Chong Chiu & M.S. Kalsi, 1986, Plant Availability Improvement by Eliminating Disc Vibrations in Swing Check Valve, ASME Paper 86-JPGC-NE-6
- [5] EPRI, 1993, Application Guidelines for Check Valves in Nuclear Power Plants, EPRI NP-5479, Rev.1.
- [6] 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).
- [7] Weaver, D.S., Adubi, F.A. and Kouwen, N., 1978, "Flow Induced Vibrations of a Hydraulic Valve and Their Elimination, " ASME J. of Fluids Engineering, Vol.100,pp.239-245.
- [8] B.E. Launder and D. B. Spalding. "The Numerical Computation of Turbulent Flows." Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3. pp. 269-289, 1974.
- [9] S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, "Hemisphere, Washington D.C.,1980.

- [10] C. M. Rhie and W. L. Chow, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil With Trailing Edge Separation," *AIAA Journal*, Vol. 21, pp. 1525-1532, 1983.