

T형 볼밸브 내의 유동특성 해석 및 압력변동의 FFT 분석

여창호* · 허형석* · 서용권**

*동아대학교 대학원 기계공학과

**동아대학교 기계산업시스템공학부

Study on the flow characteristics and FFT analysis to the pressure fluctuation in a T-type ball valve

CHANG-HO YEO*, HYEUNG-SEOK HEO*, YONG-KWEON SUH**

*Graduate School, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**Divison of Mechanical and Industrial System Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

KEY WORDS: CFD (전산유체역학), LES Model (대형와모사), FFT analysis (고속 푸리에 변환 분석)

ABSTRACT: In this paper, we present the CFD and experimental results for flow characteristics as well as pressure fluctuation in a T-type ball valve. In the experiment, flow visualization for the wake is performed with a fluorescent dye. In CFD, the valve flow is simulated three-dimensionally using a commercial fluid analysis code, FLUENT 6.0. FFT analysis to the pressure fluctuation in the wake region is also calculated. Analysis results show that the characteristic frequency of the wake flow is strongly dependent on the Reynolds number.

1. 서 론

해양구조물들은 각종 유체를 전달하는 관들을 연결하는 관이음부는 유량제어 밸브 및 방향전환 밸브 등으로 구성되어지는 경우가 많다. 관이음부는 사용 유체와 구조물의 특성에 따라 해석방향이 다른데, 다음은 이와 관련된 최근 연구동향이다.

유량이 작고 위험하지 않은 액체의 경우에는 밸브의 설계정밀도는 그다지 높을 필요가 없지만 원자력 발전에 사용되는 액체를 수송하는 경우라면 밸브 설계는 정밀도가 높아질 수밖에 없다. 류호근 등(2001)은 원자력 발전소용 밸브에 대한 설계의 중요성을 언급하고 그 밸브에 대한 쓰러스트(thrust)와 토크 분석 방법에 대하여 설명하였다. 조현만 등(2002)은 T형 관이음부의 정적강도에 대하여 유한요소해석을 수행하여 이음부와 환보강재의 기하학적 특성과 보강효과 사이의 상관관계를 규명하였다. 심요셉 등(2002)은 버터플라이 밸브에 대하여 PIV실험 및 수치해석을 수행하고 유동 가시화를 통해 유동형태를 명료하게 제시하였으며 최신 난류모델인 LES 모델을 사용하여 수치해석의 유용성을 확인하였다.

본 연구에서 밸브의 구조는 내부에 T 형태의 구멍을 뚫어 낸 볼을 볼 외부에 하우징을 만들어 방향전환 및 유량조절이 가능하도록 만든 특수밸브이다.

컴퓨터의 발전으로 개인용 컴퓨터에서도 난류해석 모델인 LES 모델을 적용할 수 있는 시기까지 도달하였으며 본 연구에서는 LES 모델을 적용한 밸브해석 방법을 제시하고, 특히 밸브 내에 발생하는 압력변동을 분석하여 FFT분석후 진동수를 분석하여 밸브설계에 반영할 수 있는 기본 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석 방법

Fig. 1은 수치해석에 사용된 격자계이다. 격자계는 FLUENT의 부속인 Gambit을 이용하여 구성하였으며 노드 수는 27만개이고 비구조적 격자계를 사용하였다. 이 그림에서 원은 밸브회전체와 하우징과의 접촉면을 나타내고 있다.

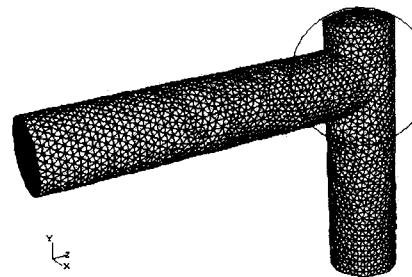


Fig. 1 Grid system within the T-type ball valve

제1저자 여창호 연락처: 부산광역시 사하구 하단2동 840번지

동아대학교 기계공학부 전산유체실험실

051-200-6982 chyoo@donga.ac.kr

2.2 지배방정식과 LES model

비압축성 난류 흐름에 대하여 필터링 처리된 지배방정식을 텐서형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_{\alpha}^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

여기서 τ_{ij} 는 전단응력텐서로서

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

이며, u_i 와 u_j 의 곱의 필터링에서 u_i 의 필터링과 u_j 의 필터링의 곱을 뺀 것이다. 또한 \bar{u}_i , \bar{u}_j 는 각각 속도성분의 필터링 결과이며 방정식 (1)을 통해 구하고자 하는 변수이다. 그러나 $\overline{u_i u_j}$ 는 \bar{u}_i , \bar{u}_j 와는 또 다른 항으로서 별도의 모델링을 통해 \bar{u}_i 와 \bar{u}_j 를 사용하여 나타내지 않으면 안 된다.

2.3 Smagorinsky 와 점성모델

본 연구에서는 가장 흔히 사용되는 Smagorinsky와 점성모델을 사용하였다. 아격자 스케일(SGS ; Subgrid Scale)의 응력텐서 τ_{ij} 는 각 좌표계 방향의 기준격자계인 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 보다 작은 에디의 활동이 공간평균성분의 점성을 일으키는 효과이다. 이것과 해상변수(resolved variable ; 공간평균변수 즉, \bar{u}_i, \bar{p} 등을 가리킴)와의 관계는 아래와 같이 가정한다. 해상변수를 GS(grid scale)변수라고도 한다.

$$\tau_{ij}^a = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

여기서 τ_{ij}^a 는 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이고, \bar{S}_{ij} 는 변형률(strain rate)텐서이고 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

식 (2)가 의미하는 바는, 응력텐서의 비등방성(anisotropic)부분이 변형률 \bar{S}_{ij} 에 비례하며 그 비례상수를 $-2\nu_t$ 로 두자는 것이다. 여기서 응력텐서의 등방성항 $1/3 \tau_{kk}$ ($=1/3(\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33})$)는 압력에 흡수시킬 수 있으므로 고려에서 제외시킬 수 있다. 식(2)의 관계를 고려하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^a - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_{\alpha}^2} - \frac{\partial \tau_{ij}^a}{\partial x_j} \quad (3)$$

새로운 압력 \bar{p} 는 아래와 같다.

$$\bar{p} = \bar{p} + \frac{1}{3} \tau_{kk}$$

Smagorinsky는 ν_t 를 에너지 생성과 소산이 균형을 이룬다는 가정에서 다음과 같이 정의하였다.

$$\nu_t = C \Delta^2 |\bar{S}|$$

$$\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{\frac{1}{3}}$$

$$|\bar{S}| = (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}}$$

C 는 모델상수이고 $|\bar{S}|$ 는 공간함수로서 스칼라이다. Δ 는 필터링 폭이며 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ 는 각방향의 각자간격이다. 수치해석시 시간에 대해서는 음적으로, 대류항에 대해서는 풍상차분법, 압력항에 대해서는 SIMPLE법, 이산화는 유한체적법으로 하였다. 난류강도는 0.1%, 모델상수 C 는 0.1로 두었으며 초기입구에서의 유속은 1 m/s로 주었다.

2.4 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치는 Fig. 2에서와 같이 물탱크, 가이드 튜브, T형 볼 밸브, 유량 조절 밸브, 아르곤-이온 레이저(argon-ion laser), 카메라로 구성되어 있다.

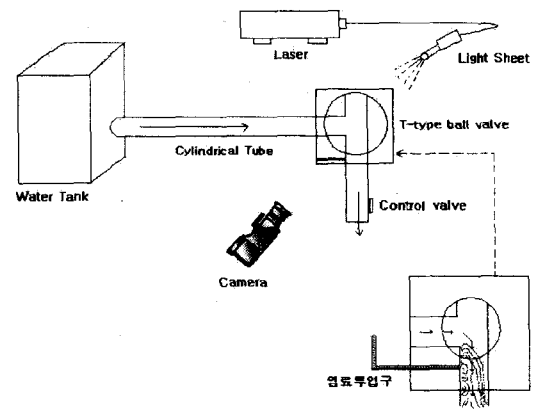


Fig. 2 Experimental apparatus

T형 볼밸브에서 아래 방향으로 내려가는 유동의 형태를 관찰하기 위해서 두가지 방법을 사용하였다. 첫 번째로 물과 비중이 비슷한 약 100 μ m 직경의 아크릴 파우더를 물과 같이 흐르게 하여 밸브중간에 레이저를 비추어 산란시켜 유동을 관찰하였고 두 번째는 하류부분의 재순환 영역을 집중적으로 관찰하기 위해 적정 위치에 세관을 설치하고 형광액을 주입하여 그 형광액의 패턴을 카메라로 촬영하였다. 이 밸브는 볼 형태이며 볼 각도를 조절할 수 있지만, 본 실험에서는 각도를 고정하여 하류에서의 유동특성을 관찰하였다. 밸브 내경은 5cm이고, 유속은 하류쪽의 유량조절밸브를 조절하여 1%를 유지하도록 하였다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서 실험 및 해석조건은 평균 유속 1%, 관의 수력직경 5cm, 유체는 물이며, 이에 따른 레이놀즈수는 50,000이다. 그리고 수치해석에서는 별도로 레이놀즈 수 10,000, 25,000에 대해서도 수행하여 레이놀즈 수의 영향을 검토하였다.

Fig. 3은 실험결과로서 볼 내부에서의 유선을 보여 주고 있다. 직각 모서리 바로 아래에서 유체가 재순환되고 있는 것을 볼 수 있고 이 이후의 유동은 주유동과 2차유동의 사이의 전단층에서 보텍스가 간헐적으로 형성되고 이것이 하류로 흘러가면서 유동 압력의 변동을 일으키는 형태이다. 그리고 하류에서 유동이 서로 혼합되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 형광액의 산란을 통해 가시화한 유동형태로서 실험 결과이다. Fig. 3에 비하여 더욱더 선명한 재순환 영역과 보텍스를 확인할 수 있다. 그리고 재순환영역에서 발생한 보텍스가 발생 후 떨어져 나가고 있는 모습을 볼 수 있다. 이것은 밸브가 사용 중에 진동을 일으키는 중요한 인자가 되며 이 부분에서의 압력변동을 분석하여 설계에 반영하고자 한다.

Fig. 5는 수치해석의 결과로서 재순환 영역이 상대적으로 커진 경우이다. Fig. 4의 실험결과와 비교하면 재순환 영역의 크기 등에서 유사함을 알 수 있다. Fig. 6은 압력장을 나타내고 있으며 재순환 영역에서 압력이 낮게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 재순환 영역의 하류에서는 압력이 회복되고 있다.

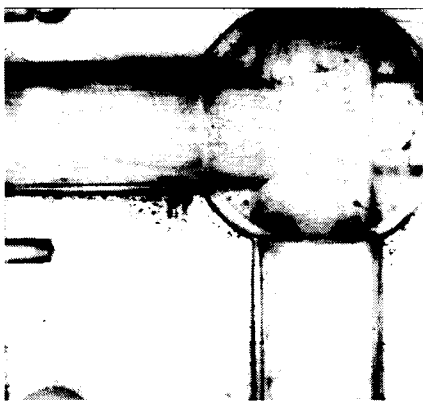


Fig. 3 Pathlines within valve

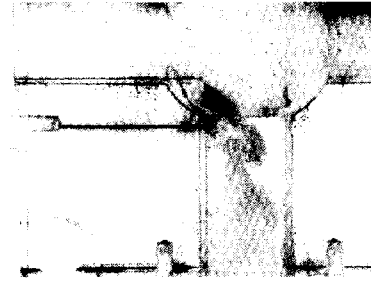


Fig. 4 Dye deformation in the wake of the valve

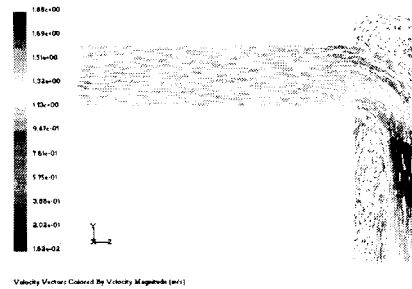


Fig. 5 Numerical results of velocity vectors in the pipe

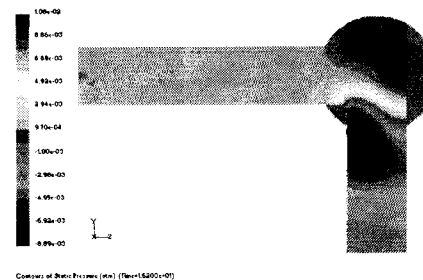


Fig. 6 Numerical results of pressure distributions in the pipe

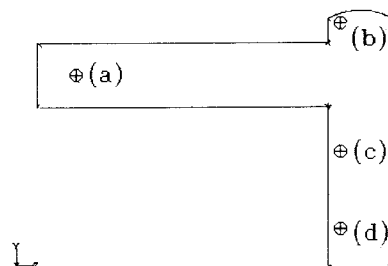
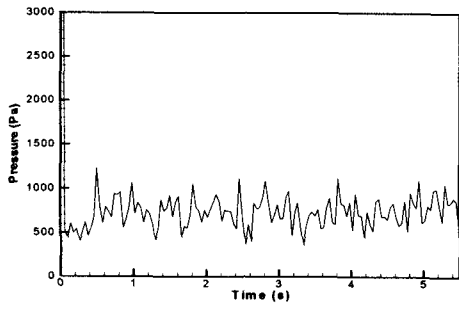
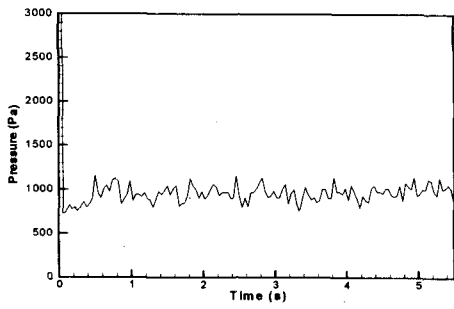


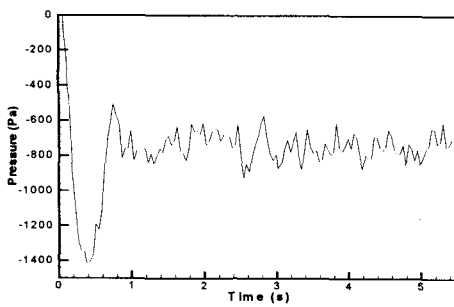
Fig. 7 Four positions for pressure measurement in CFD



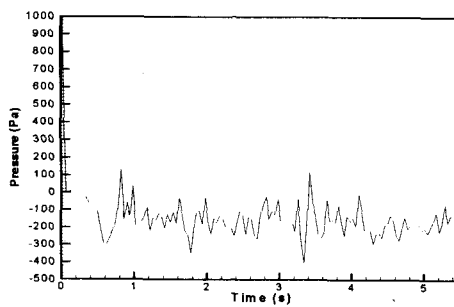
(a)



(b)

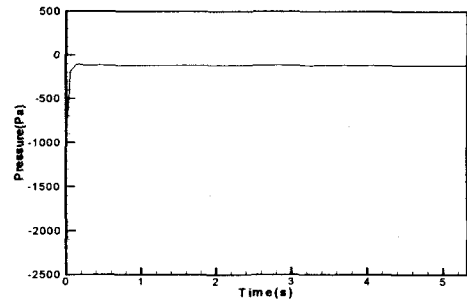


(c)

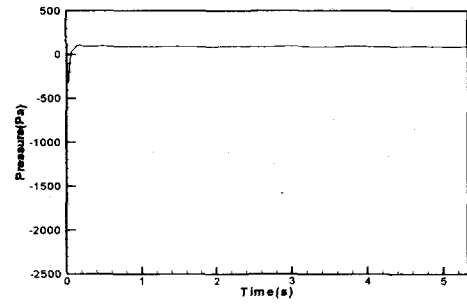


(d)

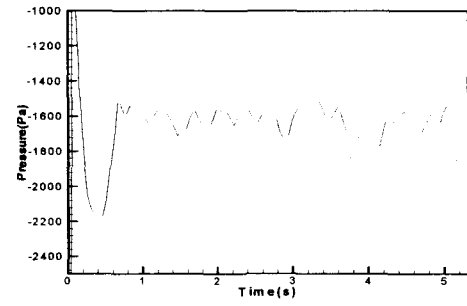
Fig. 8 Time history of the pressure in each position
(B.C. : velocity condition)



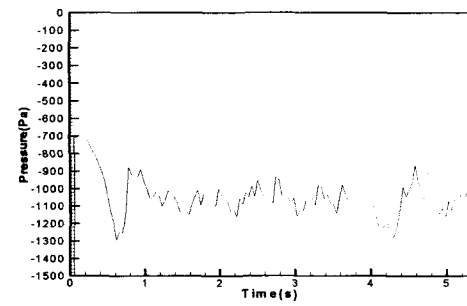
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Time history of the pressure in each position
(B.C. : mass-flow condition)

Fig. 7은 수치해석에서 압력의 측정 위치를 나타내고 있다. (a)는 밸브 입구, (b)는 밸브 내 유동영역 상단, (c)는 후류 영역, (d)는 밸브출구 부분이다.

Fig. 8과 9는 각 위치에서의 압력변동에 대하여 수치해석상의 조건을 변경하여 구한 결과를 제시한 것이다. Fig. 8은 출구경계에서 압력조건을 설정한 결과이고, Fig. 9는 출구에서 질량유량 조건으로 해석한 것이다.

Fig. 8의 결과를 보면, 후류 및 출구 뿐만 아니라 모든 영역에서 압력이 진동하는 것을 볼 수 있는데, 일반적으로 밸브나 곡관 등 장애물이 있는 관 내 흐름에서 출구부분에서는 압력변동이 있더라도 입구부분에서는 압력변동이 거의 없다는 사실과 비교하면 경계조건에 문제가 있음을 의미한다. 이에 따라 경계조건을 변경하여 수치해석한 결과인 Fig. 9(a)는 입구에서의 압력변동이 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 경계조건이 더욱더 정확한 해석결과를 도출할 수가 있다고 판단된다. Fig. 9(b)는 상단부분의 압력이며 이곳은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 유동이 정체되는 영역으로 주유동에 비하여 상대적으로 유속이 느린 분포를 보이며 따라서 압력은 입구보다 더 높게 나타났다. Fig. 9(c)는 후류 영역에 해당하며 Fig. 6에서와 같이 상대적으로 압력이 떨어지는 부분이다. 이곳이 압력변동을 일으키는 시작부분이며 이 압력변동에 대한 FFT 분석이 필요하다.

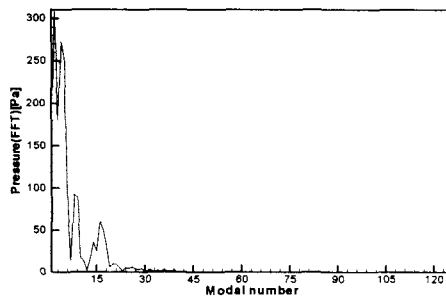


Fig. 10 FFT analysis in wake region(results from Fig. 9(c))

Fig. 10은 Fig. 9(c)위치의 압력변동에 대한 FFT분석 결과이다. 1초까지의 진동부분은 해석에서 제외하였으며 2~5초까지의 데이터로 해석하였다. FFT결과 응답특성이 지배적인 모달수(modal number)가 각각 1.69와 3.85임을 알 수 있다. 이 값은 각각 0.4225, 0.9625[Hz]의 특성진동수(characteristic frequency)에 해당한다. 이 특성진동수가 밸브를 구성하는 외부 물체의 구조적 진동수와 일치한다면 구조의 큰 진동을 유발하며 이것이 밸브 파손의 원인이 된다.

Fig. 11은 세 가지 Re수에 따른 밸브 출구부분에서의 특성 진동수를 분석할 결과이다. 결과를 보면, 레이놀즈 수가 낮은 경우(Re=10,000)는 거의 유동이 정상 상태에 근사하며 압력변동은 없다. 그러나 이로부터 레이놀즈 수가 증가하면 진동 수도 증가하는데 Re=25,000에서의 진동 수가 Re=50,000보다 더 크게 나타났다. 이에 대한 이유는 현재로서는 알 수 없지만, 추후 더욱 정밀한 수치해석으로 확인할 필요가 있겠다. 이 데이터로 스트라

울 수(Strouhal number)를 구하면 각각 0.17, 0.062이다. 이 데이터는 원주 후류의 Karman 와류 유출시의 데이터(약 0.2)와 비교하면 Re=25,000의 경우는 어느 정도 타당하다고 볼 수 있다.

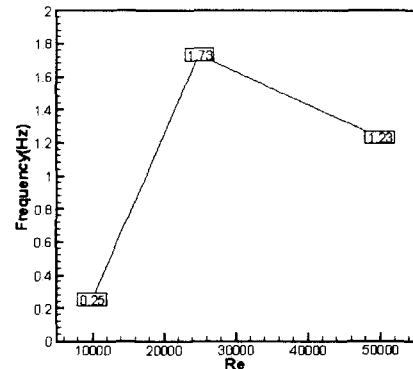


Fig. 11 Characteristic frequency of the pressure fluctuation in the wake of the ball-valve flow for three Reynolds numbers

후기

본 연구는 2002 부산테크노파크 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 결 론

볼밸브 내부 유동에 대한 수치해석과 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 밸브 후류에서의 재순환 영역을 가시화 할 수 있었다.
- (2) 수치해석시 입구와 출구 경계조건을 달리 하여 해를 구한 결과 출구 경계에 따라 해의 진동특성이 상당히 달리 나타났다.
- (3) 밸브 내 각 위치에 대하여 압력 변동을 분석한 결과 출구부분에서 압력변동이 가장 강한 것을 확인 할 수 있었다.
- (4) FFT 분석결과에 의하면 레이놀즈 수 10,000에서는 거의 정상상태이며, 25,000에서 가장 큰 진동 수, 50,000에서는 오히려 진동 수가 감소한다.

참 고 문 헌

- 류호근, 박성근, 김대웅 (2001). "원자력 발전소 모터구동밸브의 쓰러스트/토크 신호 분석", 2001년도 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp 613~618.
- 조현만, 류연선 (2002). "내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 145-150.
- 심요섭, 허형석, 서용권 (2002). "원관내 버터플라이 밸브 후류에 대한 수치해석 및 실험적 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 220-221.
- 심요섭, 허형석, 변동근, 서용권 (2002). "원관내 밸브 디스크 회전각의 변화에 따른 유동특성", 제2회 한국유체공학회 학술대회 논문집, pp 75~78.