

심해저 바이패스 밸브의 기하학적 형상과 제어조건에 따른 유동특성에 관한 수치해석적 연구

이 정 희, 민 천 흥, 오 재 원, 조 수 길, 김 형 우*

선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

NUMERICAL ANALYSIS FOR FLOW CHARACTERISTICS WITH GEOMETRIC SHAPE AND CONTROL CONDITIONS IN SUBSEA BY-PASS VALVE

J.H. Lee, C.H. Min, J.W. Oh, S. Cho and H.W. Kim*

Technology Center for Offshore Plant Industries(TCOPI), KRISO

The present study has been carried out to analyze the flow characteristics with geometric shape and control conditions in subsea by-pass valve. The function of by-pass valve is to prevent reverse flow. In this study, the static analysis has been performed for analyzing fluid flow in open state. In order to consider the turbulent effect, the standard $k-\epsilon$ model was used. A variety of parametric studies, such as by-pass valve type or size, volume flow rate, leakage hole size, leakage hole position, block type, block shape, were performed. The pressure difference across the valve in the model broadened the flow channel cross-sectional area was greater than the base model for the same operating conditions. As the pipe diameter in the block decreases the pressure difference is greatly increased. The pressure difference according to block shape such as edge type and round was almost negligible. For the same Reynolds number the pressure difference was little changed according to the size of the valve.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 바이패스밸브(By-pass Valve), 양광펌프(Lift Pump), 심해저(Subsea)

1. 서 론

심해저 5,000 m 정도에 부존하는 망간단괴를 끌어올리는 양광 시스템은 Fig. 1과 같이 수력 펌핑 양광 시스템(펌프)과 버퍼 장치 및 유연관 시스템으로 구성된다. 심해저 통합채광 시스템의 운용 중 양광관이 막히는 경우나 양광펌프의 작동이 멈추는 경우에 채광선으로 이송되던 슬러리가 하강하게 된다. 그 때, 하강하는 슬러리가 양광펌프와 직접적으로 충돌이 발생하여 펌프의 고장을 야기할 수 있다. 양광펌프의 고장이 발생할 경우 양광시스템 전체를 다시 해체 후 펌프 정비 후 설치해야 하므로 많은 시간과 비용이 소요된다. 이를 방지하기 위해서는 양광시스템이 정상작동 시에는 슬러리 유동이 선박으로 향하도록 하고 정지 시 다른 유동으로 유동을 변동해

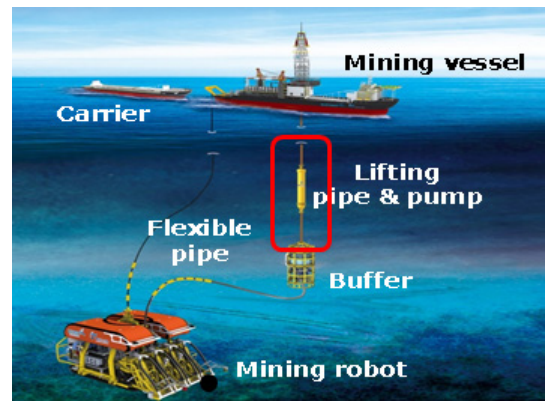


Fig. 1 Lifting system

줄 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 기능을 가진 가장 대표적인 장치가 체크밸브인데 대표적인 종류로는 스윙체크밸브, 듀얼플레이트 체크밸브, 축유동 체크밸브가 널리 사용된다. 스윙체크 밸브[2]의 경우에는 암과 로드핀에 의해 디스크가

Received: June 3, 2016, Revised: June 23, 2016,

Accepted: June 23, 2016.

* Corresponding author, E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.2.099>

© KSCFE 2016

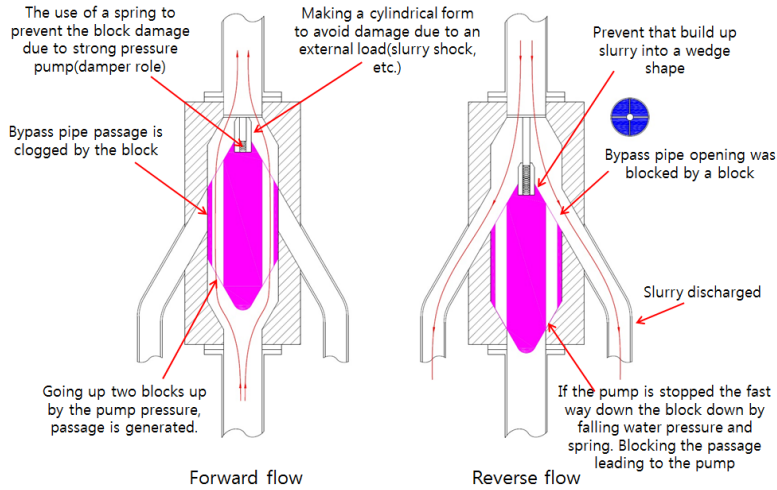


Fig. 2 Concept design for by-pass valve

회전하면서 개폐하는 장치인데 제작이 쉽고 저압에서 고압, 소형에서 대형 제작이 용이한 장점이 있다. 압력손실이 비교적 적은 장점이 있으나 분할핀, 연결부 등의 파손시 내구성에 큰 문제가 발생할 수 있고 수직배관에 적절하지 않는 단점이 있다. 듀얼 플레이트 체크밸브는 소음이 적게 발생하고 압력손실이 다른 형태에 비해 상당히 적으며 설치 방향의 제한이 없는 장점이 있다. 축유동 체크밸브[3]는 블록과 스프링을 사용하여 제어함으로써 디스크의 작동거리가 짧으며 구조가 작동거리가 짧으며 구조가 간단하여 소음이 작고 유동의 안정적인 조절이 가능하며 밸브 작동에 따른 진동이 매우 작은 장점이 있어 다른 형태에 비해 바이패스 밸브 개발에 가장 적합한 모델이라고 사료된다. Cho[4]는 바이패스 밸브의 정상 유동을 해석하여 밸브 형상에 따른 압력차를 계산하여 안정성을 연구한 바 있으며 본 연구에서는 슬러리 유동에 적합한 블록형상에 대해 해석을 차압특성을 분석하고자 한다. 기존에 유동흐름제어에 널리 사용되고 있는 체크 밸브형은 힌지, 회전체 등과 같이 구조적으로 매우 불안정한 형태로 인해 현 상황에 적용하기 어렵다. 이를 충족시키기 위해서는 Fig. 2와 같이 블록형 밸브를 사용하여 구조안정성을 확보하고자 한다. 또한 Passive 밸브형태로 제작하여 정방향 유동은 펌프 압력으로 작동되고 역방향 유동은 유체흐름에 의해 발생하는 압력과 스프링 힘에 의해 작동되도록 설계한다. 바이패스 밸브의 높은 수밀성을 보장하기 위해 쐐기형태의 블록을 사용하고 이를 기반으로 개념설계를 하였다. 본 연구에서는 개념설계를 바탕으로 만들어진 모델을 ANSYS/FLUENT Ver.13을 사용하여 정적유동을 해석하여 기본설계의 타당성을 미리 점검하고 이를 바탕으로 새로운 개선안을 도출[5]한 바 있다. 이를 위해 기본적인 두 가지 형태의 모델에 개념설계 하였고

선행연구로 각 모델별로 형상 및 유량에 따른 정적유동특성을 파악하고 누설이 발생하는 경우에 밸브 양단의 압력특성을 파악하고자 하며 블록형상의 변화와 사이즈 효과에 따라 유동특성을 분석하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 바이패스 밸브 내의 정적 유동특성을 해석하기 위하여 질량보존방정식과 Full Navier-Stokes 방정식을 풀어 국소적인 유동특성과 밸브 양단의 차압특성을 분석하고자 하며 블록의 형상변화에 따른 영향을 해석하고자 한다.

- 1) 질량보존방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \tag{1}$$

- 2) 운동량 보존방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \tag{2}$$

- 3) 난류운동에너지 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + s_k = 0 \tag{3}$$

- 4) 난류소멸율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + s_\epsilon = 0 \tag{4}$$

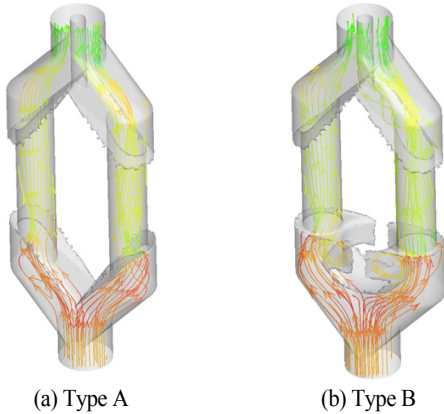


Fig. 6 Streamlines with valve type in by-pass valve

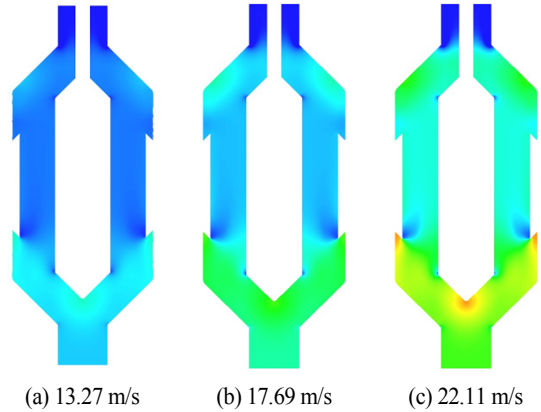


Fig. 8 Pressure distributions with volume flow rate for Type A

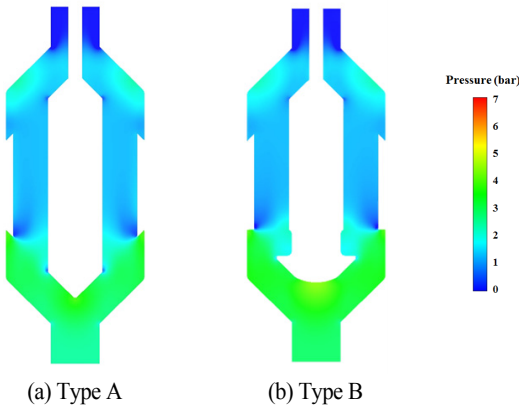


Fig. 7 Pressure distributions in by-pass valve

경우에는 입구로부터 유입된 유동은 유로를 따라 재순환영역이 발생하지 않고 유로를 따라 부드럽게 흘러감을 볼 수 있으나 Type B의 경우는 블록 중간에 빈 공간으로 유체가 흘러들어감으로써 재순환 유동이 형성되고 이로 인해 유동저항에 의해 밸브 양단의 압력차가 상승될 것으로 판단된다. Fig. 7은 압력분포에서 Type B의 경우가 Type A보다 전체적으로 입구 쪽 형상의 유동저항으로 인해 압력이 높게 예측되었고 이로 인해 밸브 입구와 출구의 압력 차이는 증가하게 된다. 또한 각 모델에 대해 유량조건에 대한 영향을 분석하기 위해 Table 1과 같이 3가지 유량변화에 따른 밸브 입구와 출구의 압력차를 비교하였다. Fig. 8은 Type A에 대해 유량변화에 따른 밸브 내의 압력분포를 나타낸 것으로 유량의 증가에 따라 입구 쪽 압력이 크게 증가함을 알 수 있다. 이를 정량적으로 비교, 분석하기 위하여 Fig. 9과 같이 각 밸브의 형태별로 유량에 따른 밸브 양단의 압력차를 정량적 비교하였다. 두 모델 모두 유량이 증가함에 따라 밸브 양단의 압력차는 점점 더 증가함을 알 수 있었고 Type B 모델의 경우가 Type A모델에 비해 전 영역에서 압력차가 크게 예측되었음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6(a), (b)에서 비교된 것처럼 Type B 모델의 경우에 구조적인 문제로 인해 재순환 영역이 발생하여 유동저항이 증가되었기 때문이다.

Automesh로 생성시켰으며 각각 695,382와 741,919개의 격자계를 형성시켰다. 유동해석을 위하여 Fig. 5와 같이 각각 두 가지 형태의 밸브에 대해 각각 입구경계조건을 주었고 출구영역에선 압력경계조건을 주었다. 그 외 영역은 모두 no-slip 벽 경계조건을 주어 해석을 수행하였다. 여기서 유동해석을 좀 더 간단히 처리하기 위하여 케이스와 블록에 의한 마찰력에 의한 힘은 다른 힘에 비해 상대적으로 적을 것으로 판단하여 고려하지 않고 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 블록 형태별 유량변화에 따른 유동특성

바이패스 밸브 내의 블록형상에 따른 유동특성을 비교하기 위해 Fig. 6과 같이 두 가지 형태의 밸브 모델(Type A와 B)에 대해 해석을 수행하여 얻은 유선을 그린 그림이다. Type A의

Table 1 Test conditions for different types and volume flow rates

| Type | Velocity(Volume flow rate) |
|------|-------------------------------------|
| A | 13.27 m/s(93.75 m ³ /h) |
| | 17.69 m/s(125 m ³ /h) |
| | 22.11 m/s(156.27 m ³ /h) |
| B | 13.27 m/s(93.75 m ³ /h) |
| | 17.69 m/s(125 m ³ /h) |
| | 22.11 m/s(156.27 m ³ /h) |

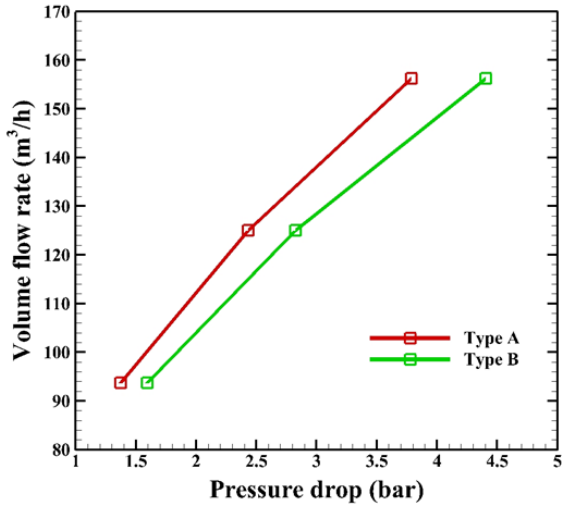


Fig. 9 Pressure drop with valve types and volume flow rate



Fig. 10 Test model considered leakage

3.2 누출양에 따른 압력특성 분석

바이패스 밸브의 누출양이 밸브 입출구의 압력차에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 10과 같이 작은 홀을 만들어 해석을 수행하였다. Table 2와 같이 총 4가지 모델에 대해 해석을 수행하였다. 홀 사이즈가 증가(누출양이 증가)함에 따라 밸브 양단의 압력차는 점점 더 감소함을 알 수 있다. 또한 홀

Table 2 Test conditions with hole size for Type A

| Hole size[mm] | Pressure drop[bar] |
|---------------|--------------------|
| 0 | 2.4321 |
| 5 | 2.2378 |
| 7.5 | 2.1730 |
| 10 | 2.0898 |

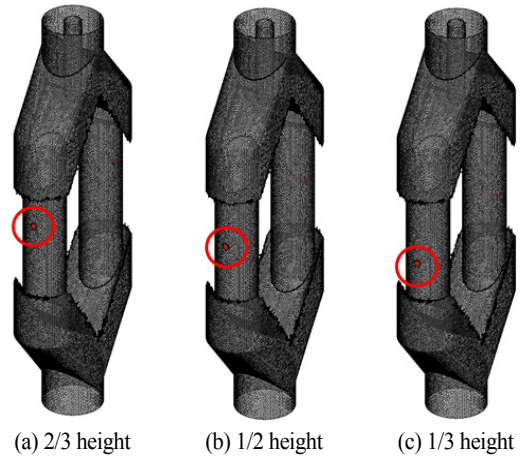


Fig. 11 Test models with leakage hole position

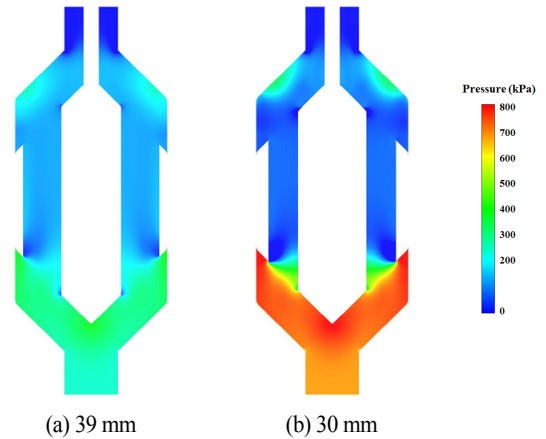


Fig. 12 Pressure distributions with pipe diameter

의 위치에 따른 영향(누출되는 위치의 영향)을 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 블록 내 파이프 길이 방향으로 홀을 2/3, 1/2, 1/3인 각각의 위치에 설치하였을 때 밸브 양단의 압력차를 계산하여 분석해 보았다. 해석결과, 홀의 위치에 따라 밸브 양단의 압력차는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

3.3 블록 내 파이프 직경에 따른 압력차 비교

바이패스 밸브의 블록 내 파이프 직경에 따른 영향을 분석하기 위해 Fig. 12와 같이 직경을 각각 39 mm와 30 mm에 대해 압력 차이를 비교하였다. 기존 39 mm에서의 압력차이는 2.3865 bar인 반면 30 mm인 경우에는 압력차이가 6.7722 bar로 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 수력직경을 고려한 레이놀즈 수에 따라 압력차이는 크게 변화함을 확인할 수 있었다.

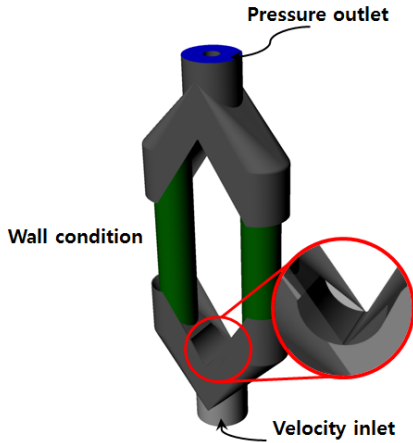


Fig. 13 Test model for round block geometry

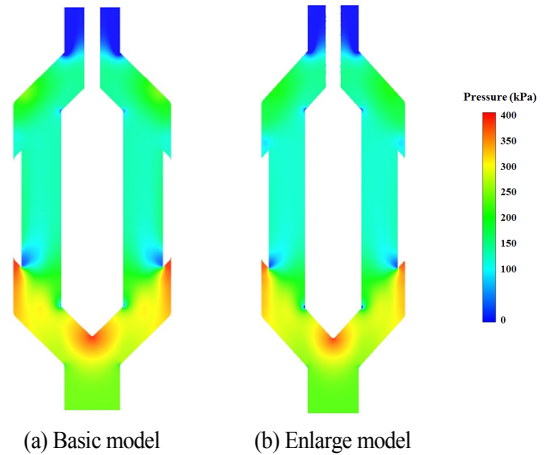


Fig. 15 Pressure distributions with model size

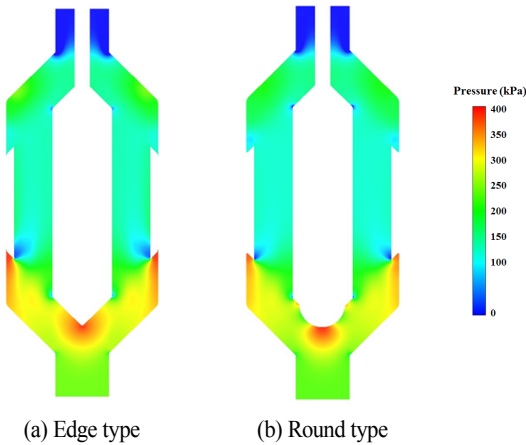


Fig. 14 Pressure distributions with block geometric type

3.4 블록 형상에 따른 압력차 비교

바이패스 밸브의 블록 형태는 앞에서 논의 한 바와 같이 슬러지의 원활한 이동을 위하여 Fig. 6(a)와 같이 Edge type으로 만들었는데 이런 경우 Edge 부분에 응력이 집중되는 현상으로 내구성에 문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 블록의 형태를 Edge type과 Fig. 13과 같이 Round type으로 제작하였을 때 압력차이가 어느 정도 나는지를 분석해 보았다. Fig. 14(a)와 같이 Edge type의 경우는 2.3865 bar로 예측되었고 Round type의 경우는 2.2924 bar로 예측되어 압력차가 크게 나지 않음을 알 수 있었다. Fig. 14(b)와 같이 Round type의 경우는 입구로 들어온 유체가 유선을 따라 부드럽게 흘러감으로 인해 저항이 감소하였고 이로 인해 압력차가 약간 감소하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다. 전체적으로 압력차이

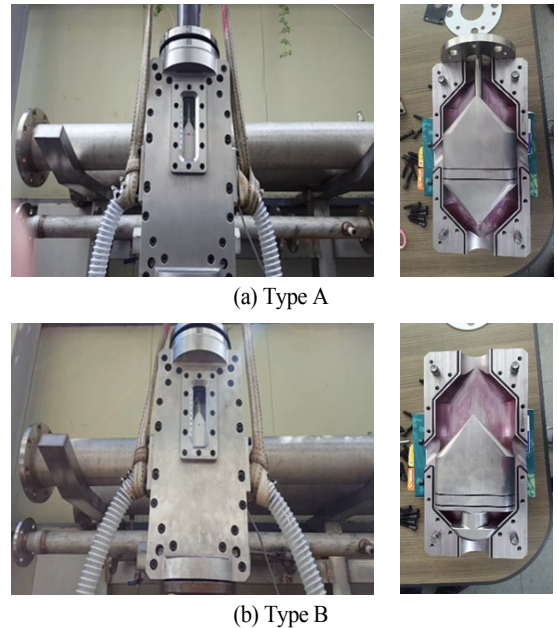


Fig. 16 Performance test of by-pass valve

가 크게 차이나지 않는 점을 고려할 때 Round type의 블록으로 사용하는 것이 내구성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

3.5 바이패스 밸브 사이즈 변화에 따른 압력차 비교

실제 모델과 테스트 모델의 사이즈 차이에 의한 유동상사를 분석하기 위하여 같은 레이놀즈 수에서 Fig. 15과 같이 전체적인 사이즈를 1.5배 증가시켜 두 경우에 대해 밸브 양단의 압력차를 비교해 보았다. 해석 결과, 기본사이즈에서 2.3865

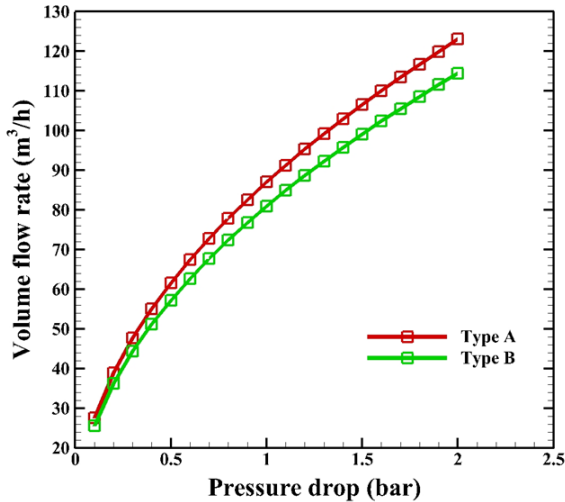


Fig. 17 Pressure drop with volume flow rate by experimental method

bar로 예측되었고 1.5배 사이즈를 증가시킨 모델에서는 2.2801 bar로 예측되었다. 즉 유동상사법칙을 이용하더라도 모형과 실제 모델에서의 결과는 거의 차이가 없을 것으로 사료된다.

3.6 바이패스 밸브 제작 및 성능테스트

본 연구에서는 개념설계와 수치해석적 분석을 통하여 Fig. 16과 같이 두 종류의 바이패스 밸브를 제작하였고 실험적 방법으로 Fig. 17과 같이 밸브 양단의 차압을 측정하였다. 전체적으로 유량이 증가함에 따라 차압은 증가하고 Type B의 차압이 Type A보다 높게 예측되었다. 앞의 Fig. 10의 수치해석 결과에서도 같은 경향을 보였다. 단 수치해석 결과에 비해 평균 0.5 bar 정도 낮게 예측되었는데 이것은 수치해석에서는 누설량을 고려하지 않았서 나타난 결과로 사료된다. 향후 정량적 비교를 위해서는 실험에서와 같이 같은 형상에 대해 동적거동을 해석하여야 하며 누설량, 응답특성, 블록의 거동에 대한 상세한 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이패스 밸브의 블록의 형상, 입구유량, 블록 내 파이프의 직경, 블록의 형상 및 밸브사이즈에 따른 압력차를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 같은 블록 무게에 대해 기본모델과 유로단면적을 넓힌 모델을 비교한 결과, 기본모델에서는 재순환 없이 유로를 따라 잘 흘러간 반면 유로단면적을 넓힌 모델에서는 블록의 단면적 변화에 따라 재순환영역이 발생하는 등 유동의 지

- 향이 커져 전체적으로 밸브 양단의 압력차가 증가되었다.
- (2) 기본 모델과 유로단면적을 넓힌 모델 모두 유량이 증가함에 따라 밸브 양단이 압력차는 증가하였고 유로단면적을 넓힌 모델의 압력차가 유량이 증가함에 따라 전체적으로 기본모델에 비해 더 크게 나타났다.
- (3) 블록 내의 파이프 직경이 감소함에 따라 압력차이는 크게 증가함을 보였다.
- (4) 블록 형상에 따른 압력차를 비교한 결과, Edge type과 Round type의 압력차이는 거의 미미하였다.
- (5) 같은 레이놀즈 수에서 밸브의 사이즈 증가에 따라 압력차이를 비교한 결과, 압력차이의 변화는 거의 미미하였다.
- (6) 향후 실험과 같은 형상에서 동적거동을 해석하여 누설량, 응답특성, 블록의 거동에 관한 상세한 결과를 얻고 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하고자 하며 밸브 형상을 개선하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 “해양플랜트 Topside 기자재 CAE 기술 개발(PES2170)” 과제의 연구결과 중 일부를 밝힙니다.

References

- [1] 2011, Xu, H., Guang, Z.M., Qi, Y.Y., "Hydrodynamic Characterization and Optimization of Contra-push Check Valve by Numerical Simulation," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.38, pp.1427-1437.
- [2] 2015, Yu, J. and Yu, S., "Numerical and Experimental Research of Flow and Sound Fields in an Axial-flow Check Valve and its Optimization," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.7, No.11, pp.1-8.
- [3] 2011, Turesson, M., "Dynamic simulation of check valve using CFD and evaluation of check valve model in RELAP5," *Master of Science Thesis*, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [4] 2008, Cho, A.T., "Analysis of Flow Through High Pressure By-pass Valve in Power Plant," *Master Thesis*, Inha University.
- [5] 2016, Lee, J.H., Min, C.H., Oh, J.W., Cho, S., Kim, H.W. and Hong, S., "Numerical Analysis For Flow Characteristics of By-pass Valve with Geometric Shape and Control Conditions," *2016 Korean Society for Computational Fluids Engineering(KSCFE) Spring Proceeding*, pp.148-149.