

## 상류곡관에 의한 볼밸브 내부유동 영향성 연구

조철희 · 김명주 · 조석진 · 황수진<sup>†</sup>  
인하대학교 조선해양공학과

### A Study on Influence of Ball Valve and Upstream Curved Pipe on Internal Flow of Pipeline

CHUL HEE JO, MYEONG JOO KIM, SEOK JIN CHO, SU JIN HWANG<sup>†</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, 22212, Korea

**Abstract** >> This study describes the effect of upstream curved pipe on internal flow characteristics ball valve. Continuity and three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equation have been used as governing equations for the numerical analysis. The upstream curved pipe - ball valve model was assumed that it is used for Alaska pipeline project which was planned to provide reliable transportation of natural gas from ANS to Alaska-Yukon border. Therefore the characteristics of pipe and operating condition of pipeline were from report of Alaska pipeline project. The three curvature and three location of upstream curved pipe were analyzed. The results shows that there are typical flow patterns at ball valve and the upstream curved pipe makes some differences to the internal flow of ball valve.

**Key words** : Ball valve(볼밸브), Upstream curved pipe(상류곡관), Natural gas pipeline(천연가스 이송배관), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Three-dimensional numerical model(삼차원 수치모델)

## 1. 서 론

국제적으로 에너지 안보는 국가의 경제와 사회의 안정을 위해 중요한 이슈로 다루어지고 있다. 따라서 각국은 에너지 자원의 안정적인 확보를 위해 다양한 에너지원 개발에 박차를 가하고 있다. 특히 전 세계 미 발견 석유-가스 탐사 자원량의 22%가 영구동토를 포함한 극한지에 매장되어 있어<sup>1)</sup> 에너지 관점에서 극지 및 동토지역의 중요성이 증대됨에 따라 극한지에서의 자원의 채굴 및 이송에 관한 연구의 필요성

이 대두되고 있다.

러시아의 시베리아 및 미국의 알래스카 등의 동토 지역에서 생산된 천연가스는 주로 배관망을 통해서 소비지까지 이송된다. 이러한 배관망은 수백~수천km 거리에 설치되고 운영되기 때문에 대구경 고압배관이 사용되며 Alaska natural gas pipeline project의 경우 직경 48 inch의 배관을 설계압력 17.2 MPa로 운용할 계획을 발표하였다<sup>2)</sup>.

우리나라의 경우 천연가스를 비롯한 대부분의 천연자원을 수입에 의존하고 있으며, 에너지경제연구원에 따르면 2014년에 37,107,000 톤의 LNG를 수입하였으며<sup>3)</sup> 전량 선박을 통해 수송되었다. 이러한 방식의 에너지 수입은 막대한 비용이 소요되기 때문에

<sup>†</sup>Corresponding author : sjhwang@inha.ac.kr

Received : 2015.9.22 in revised form : 2015.10.14 Accepted : 2015.10.30

Copyright © 2015 KHNES

이를 절감하기 위해 배관망을 설치하여 천연가스를 이송하는 방안이 검토되고 있다.

그러나 국내 천연가스 배관의 직경은 30 inch이고 약 7 MPa의 운전압력으로 운영되고 있으며, 장거리 천연가스 이송에 사용되는 대구경 고압배관에 대한 설계, 운용 경험은 전무한 실정이다. 최근 극한지 자원에 대한 접근성을 높이기 위해 동토지역 자원이송망에 대한 연구가 수행되고 있다.

밸브는 배관을 흐르는 유체의 유량 및 압력의 조절을 위해 사용되는 기계설비이다. 볼밸브는 몸통 안에 볼(ball)의 회전으로 배관 내의 유동을 개폐하는 목적으로 사용되며, 단순한 형상으로 유지보수 및 제작의 용이성, 탁월한 누설차단 등의 장점으로 가스배관 등의 주 밸브로 사용되고 있다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 유동해석을 사용하여 극한지 천연가스 이송망의 유량제어에 사용되는 볼밸브의 상류에 곡관이 위치하는 경우 곡관의 위치 및 곡률반경에 따라 내부유동이 어떠한 특성을 나타내는지 확인하였다. 유동해석을 위해 요구되는 배관의 설계 및 운영 조건 등의 자료는 Alaska pipeline project의 보고서에 발표된 자료를 참고하였다.

## 2. 유동해석

### 2.1 해석모델

상류곡관의 곡률반경 및 위치에 따른 볼밸브 유동의 영향성을 해석하기 위해 Table 1과 같이 상류곡관

의 곡률반경을 3D, 4D, 5D로 모델링하였으며, 상부 곡관 유출구의 위치는 볼밸브 중심에서 7.2D, 10.4D, 17.2D로 모델링하였다. 볼밸브의 회전 직경은 1.7D라고 가정하고 내부 유동장을 단순화하여 모델링하였다. 볼밸브의 개폐각은 밸브가 완전히 열려있는 0°부터 22.5°, 45°로 설정하여 각각에 대해 정적해석을 수행하였다. Fig. 1은 볼밸브 중심에서 상류곡관의 유출구까지의 거리가 7.2D이고 상류곡관의 곡률이 3D인 모델의 형상이다.

### 2.2 격자생성

유동해석은 상용코드인 ANSYS Fluent v.13<sup>3)</sup>을 사용하여 수행하였다. 볼밸브 부근은 볼밸브의 개폐각에 따라 형상이 비교적 복잡해지고 벽면에 해당하는 부분이 추가로 발생하기 때문에 비정렬 격자를 사용하고 나머지 부분은 정렬격자를 사용하여 격자를 생성하였다. 경계층의 모사를 위해 배관 내벽 근처의 격자를 조밀하게 형성하여 standard wall function을 사용하기에 적합한 y+를 유지하였다.

Table 1 T-branch specification

Description	Specification
Diameter (D)	1,219 mm (48 inch)
Thickness	23.8 mm (0.932 inch)
Radius of upstream curved pipe	3D, 4D, 5D
Distance between centre of ball valve and outlet of curved pipe	7.2D, 10.4D, 17.2D
Opening angle	0°, 22.5°, 45°

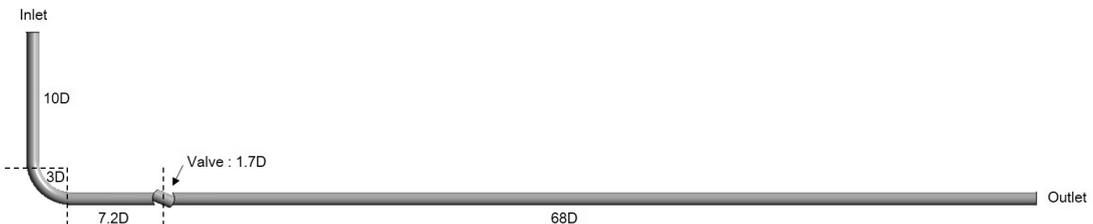


Fig. 1 7.2D-3D model configuration

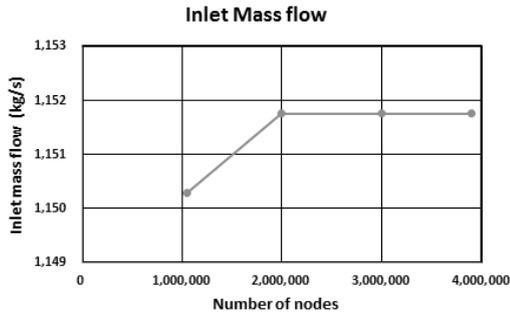


Fig. 2 Grid dependency test (7.2D-3D model)

7.2D-3D 상류곡관-볼밸브 모델에 대해 격자 의존도 시험을 수행하였으며, 이를 통해 적절한 수준의 격자를 결정하였다. 격자 의존도 시험 결과 Fig. 2와 같이 약 200만개의 노드에서 유동이 수렴하는 것을 확인하였으며, 이와 동일한 수준의 격자밀도를 사용하여 최종 해석을 수행하였다.

### 2.3 경계조건

해석을 위해 필요한 조건은 Alaska pipeline project의 보고서를 참고하여 Table 2와 같이 설정하였다. 입구는 Alaska pipeline의 설계압력인 17.2 MPa과 영구동토층에서의 운용온도인 -1°C를 적용하였으며, 출구는 Alaska main line의 공급량을 바탕으로 산정한 유속조건을 적용하였다.

배관 내부의 작동유체는 Species transport model을 사용하여 Alaska pipeline project에서 발표한 Table 3의 Lean gas의 조성을 구현하도록 설정하였으며<sup>2)</sup>, 내부 유체의 밀도는 ideal gas를 적용하여 온도 및 압력이 고려될 수 있도록 설정하였다. 본 해석모델의 경우 천연가스의 밀도는 약 138 kg/m<sup>3</sup>으로 계산되었다.

배관 내벽의 표면거칠기는 일반적으로 강철배관에서 사용되는 0.04572 mm를 적용하였다. 난류모델은 비교적 단순한 유동에서 정확도가 높다고 알려진 k-ε realizable model을 사용하였으며<sup>4)</sup>, 배관 내벽 경계층을 모사하기 위해 Standard wall function을 적용

Table 2 Boundary condition and Model

Description	Analysis condition
Inlet	Total pressure : 17.2 MPa Total temperature : -1°C
Outlet	Velocity Magnitude : 7.78 m/s
Wall	Shear Condition : No-slip Roughness Height : 0.04572 mm
Turbulence Model	k-ε Realizable (Standard wall function)

Table 3 Natural gas composition

Gas Component	Lean Gas (MOLE %)
N <sub>2</sub>	0.7
CO <sub>2</sub>	1.5
C <sub>1</sub>	89.9
C <sub>2</sub>	5.8
C <sub>3</sub>	1.7
C <sub>4</sub>	0.3
C <sub>5</sub>	0.1

하였다.

해석 초기에 변수가 발산하지 않고 안정적으로 수렴할 수 있도록 압축성 유동의 초기화를 위해 널리 사용되고 있는 Full Multigrid initialization (FMG initialization)<sup>3)</sup>을 사용하여 유동장을 초기화하였다.

### 2.4 해석결과

Fig. 3과 4는 7.2D-3D 상류곡관-볼밸브 모델의 개폐각에 따른 내부유동을 나타낸 것이다. 볼밸브의 개폐각이 커짐에 따라 볼밸브의 유입구와 유출구가 좁아지면서 볼밸브의 개도율이 작아지며 볼밸브 유입구에서 강한 흐름이 발생하며 볼밸브의 상부면에 부딪힌 후 상부면을 따라 유출구로 흘러나가면서 볼밸브의 상부면에 강한 하중을 가한다. 또한 볼밸브의 개폐각이 45°인 경우 유출구를 빠져나가는 유동이 유출구 배관의 하단에 강하게 부딪히고 이를 따라 흘러나가기 때문에 이 부분도 동일하게 강한 하중을 받을 것으로 판단된다.

볼밸브가 작동함에 따라 볼밸브의 상부 일부분,

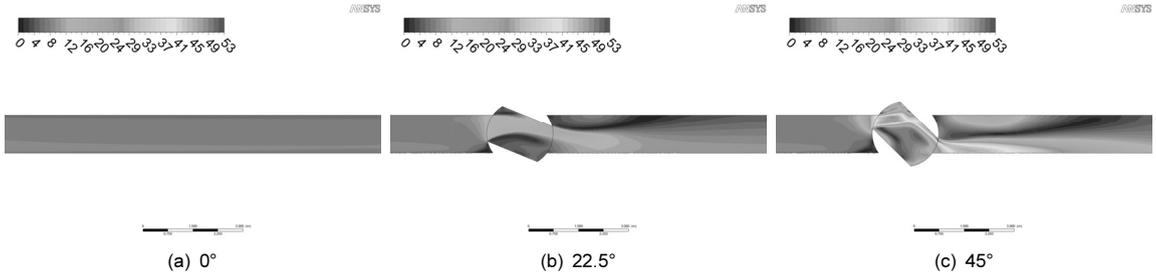


Fig. 3 Velocity contours (7.2D-3D model)

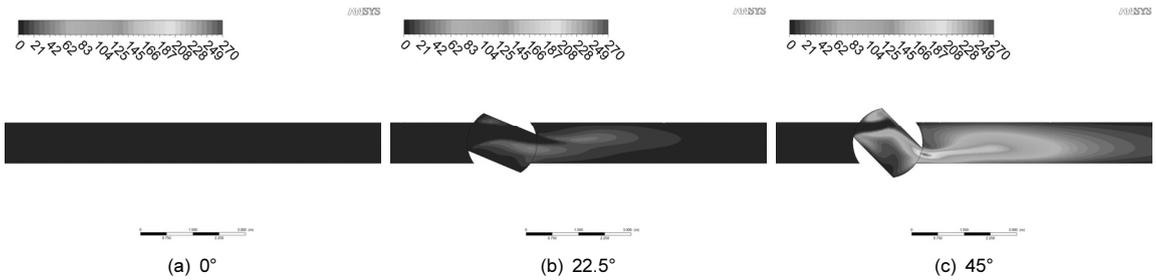


Fig. 4 Turbulence kinetic energy contours (7.2D-3D model)

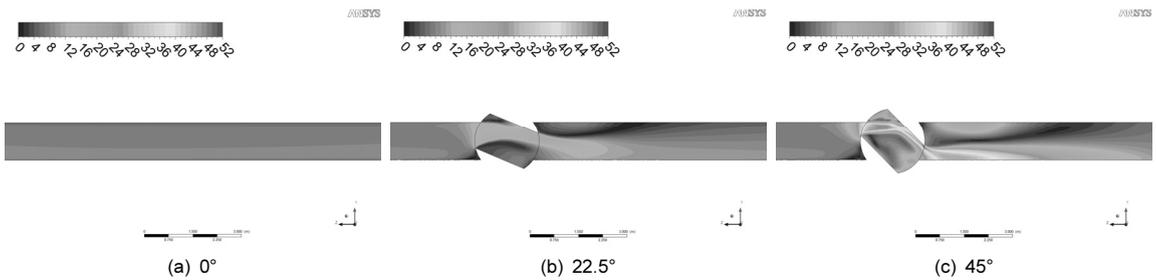


Fig. 5 Velocity contours (7.2D-4D model)

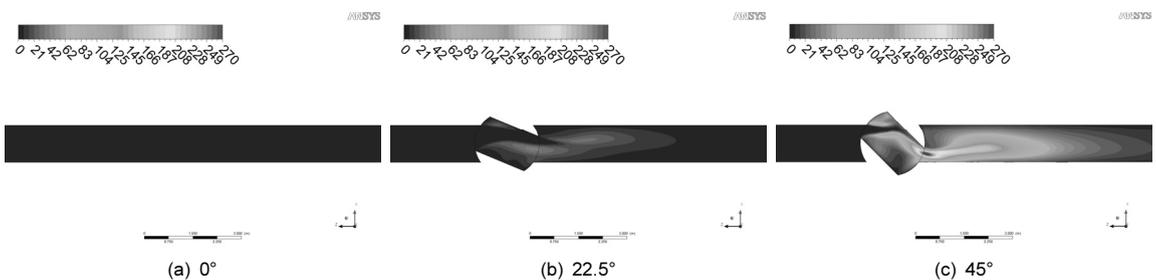


Fig. 6 Turbulence kinetic energy contours (7.2D-4D model)

하부의 대부분, 유출구 후방 상부에 와류가 발생하며  
 개폐각이 커질수록 와류의 크기 및 강도가 커지며 더  
 먼 후류까지 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한

밸브가 작동하면 유출구 후방 상부에 발생하는 와류  
 와 하부의 강한 흐름 사이에 유동이 거의 흐르지 않  
 는 정체부가 발생하는데 개폐각이 커질수록 볼밸브

를 통과한 유동이 하부로 집중되면서 정체부 또한 후류로 점점 영역이 확장되는 것을 확인할 수 있다.

볼밸브의 개폐각이 커질수록 난류운동에너지가 증가하며 45°인 경우 볼밸브의 유출구에서 난류강도가 급격히 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 유입구에서는 단순히 유량이 집중되어 흘러들어오지만, 유출구에서는 유동의 방향이 급격하게 변화하기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 5와 6은 7.2D-4D 상류곡관-볼밸브 모델의 개폐각에 따른 내부유동을 나타낸 것이다. 7.2D-3D 상류곡관-볼밸브와 비교하면 볼밸브의 유입구를 지난 유동이 소산되지 않고 집중되어 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이는 상류곡관의 곡률반경이 커졌기 때문에 곡관으로 인해 발생하는 2차 유동에 의한 영향이 작아졌기 때문인 것으로 판단된다. 개폐각이 45°인 경우에는 이렇게 집중된 유동이 볼밸브 상부면과 유출구 배관의 하단에 더 강하게 부딪히며 볼밸브 유출구에서 발생하는 난류운동에너지의 최댓값이 약 10% 증가하였다.

Fig. 7과 8은 17.2D-3D 상류곡관-볼밸브 모델의 개폐각에 따른 내부유동을 나타낸 것이다. 7.2D-3D 상류곡관-볼밸브와 비교하면 내부유동에 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 상류곡관의 위치보다는 곡률반경에 따라 볼밸브의 작동에 의한 내부유동의 영향성이 더 큰 것으로 나타났다.

따라서 볼밸브의 상류에 곡관이 위치한 경우 곡관의 위치보다는 곡관의 곡률반경에 대해 검토하여 이로 인해 변화하는 내부유동의 특성이 볼밸브와 볼밸브의 후류에 미치는 영향을 확인하여 적합한 곡률반경의 곡관을 선정해야 한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 극한지 천연가스 이송망에 사용되는 볼밸브에 상류곡관이 위치한 경우 상류곡관의 곡률반경 및 위치에 따라 내부유동이 어떠한 특성을 나타내는지 수치해석을 통해 분석하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

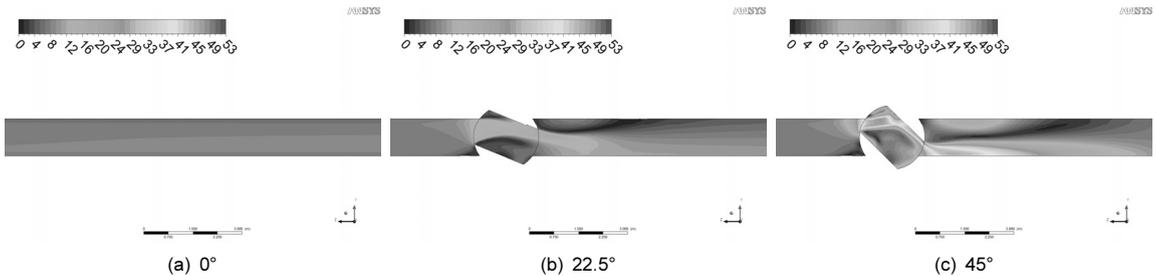


Fig. 7 Velocity contours (17.2D-3D model)

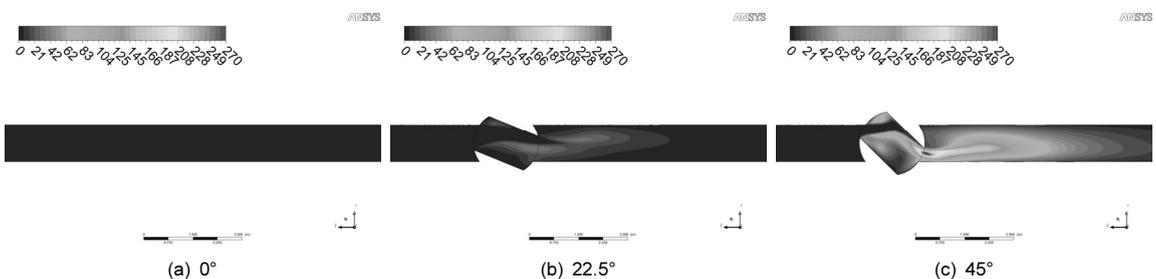


Fig. 8 Turbulence kinetic energy contours (17.2D-3D model)

- 1) 볼밸브가 작동하는 경우 볼밸브의 개도율이 작아지면서 볼밸브의 유입구에 강한 흐름이 발생하며 볼밸브의 상부면 및 유출구 배관의 하단에 강하게 부딪히며, 볼밸브의 개폐각이 45°인 경우 이 부분에 강한 하중이 발생하는 것을 확인하였다.
- 2) 볼밸브의 개폐각이 커짐에 따라 유출구의 난류운동에너지가 증가하며 45°인 경우 유출구에서 난류강도가 급격히 커지는 것을 확인하였다.
- 3) 상류곡관의 곡률이 증가하는 경우 2차유동의 영향성이 적어지면서 볼밸브의 유입구를 지난 유동이 소산되지 않고 집중되어 흐르는 경향이 나타났다.
- 4) 상류곡관과 볼밸브의 이격거리가 증가하는 경우에는 상류곡관의 곡률반경의 변화에 비해 내부유동에 큰 영향성이 없는 것으로 나타났다.
- 5) 추후 비정상 해석을 통해 밸브가 작동되는 것을 시간영역에서 해석하여 밸브 내부의 비정상 유동에 상류곡관의 곡률반경 및 위치가 어떠한 영향을 미치는지 확인하고, 정적 해석과 비교하여 어떠한 특성이 나타나는지 비교분석할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비 지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. W. S. Kim, "Design and Construction Technology for Arctic Pipeline", Journal of the Korean society of mechanical engineers, Vol. 54, No. 1, 2014, pp. 53-57.
2. TransCanada, ExxonMobil, "Alaska Pipeline Project Resource Report", 2011.
3. S. M. Lee and C. M. Jang, "Internal Flow Analysis for a 10 inch Ball Valve using Flow Similarity", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 26, No. 4, 2015, pp. 386-392.
4. KEEL, "Monthly Energy Trends", Series No. 39, 2015.
5. TSNE, "ANSYS CFD Fluent Basic", TSNE Co. Ltd., Seoul, 2012.