

연료의 점도 변화를 고려한 글로브 밸브 내부 유동 시뮬레이션

김필* · 허정범* · 김해빈* · 염은섭†

Fuel flow simulation in globe valve considering variation of viscosity

Phil Kim*, Jeongbeom Heo*, Haebeen Kim* and Eunseop Yeom†

Abstract Valves are devices used to control or stop the flow of fluids through pipelines. Among them, globe valves with a movable disk or plug experience a significant pressure drop due to the changes in fluid flow direction from horizontal to vertical and back to horizontal. This study analyzes the flow characteristics and cavitation in a globe valve, focusing on the effects of varying fuel viscosity due to changes in pressure and temperature. Simulations were conducted with IFO 380 fuel under constant and variable viscosity conditions. The Realizable k- ϵ model was applied, and cavitation was simulated through multiphase flow conditions. Results showed that at a 50% valve opening, significant pressure drops and cavitation occurred in narrow regions, while at 100%, pressure changes were more gradual. The WLF-Barus model revealed that higher pressures increased fuel viscosity, reducing cavitation compared to constant viscosity conditions. Flow coefficient (K_v) calculations showed minor differences between constant and variable viscosity, with the variable condition leading to a lower K_v at full valve opening. The study highlights the impact of viscosity changes on flow resistance and cavitation behavior.

Key Words : Globe valve (글로브 밸브), WLF-Barus model (WLF-Barus 모델), Viscosity (점도), Flow coefficient (유동계수), CFD Simulation (전산유체역학)

1. 서론

밸브는 파이프라인을 통해 유체의 흐름을 조절하거나 중단하는데 사용되는 장치이다. 그 중 글로브 밸브는 움직이는 디스크 또는 플러그와 이동 가능한 부품이 있으며, 유체의 흐름이 수평 흐름에서 수직 상향 흐름으로 바뀐 후,

다시 정상적인 수평 흐름으로 돌아간다. 글로브 밸브는 이러한 유체 흐름의 변화 때문에 더 큰 기하급수적인 압력 손실을 겪는다.⁽¹⁾ 그렇기 때문에 밸브 내 정확한 압력 및 유량 분포를 결정하는 것이 정확한 설계를 위해 중요하다.

밸브를 통과하는 연료의 점도는 항상 일정하지 않으며 압력과 온도에 따라 크게 변할 수 있다.⁽²⁾ 이러한 연료 점도의 변화는 유체의 흐름 저항을 변화시킨다. 또한, 밸브 내에서 공동현상의 변화에 영향을 미치고, 이는 구조적 안전성에 위험을 초래한다.⁽³⁾

유체 흐름 저항의 변화, 공동 현상의 위험을

† School of Mechanical Engineering, Pusan National University (PNU), Associate Professor
E-mail: esyeom@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering, PNU,
MS Student

정확히 이해하고 대응하는 것은 밸브의 효율성과 내구성을 보장하기 위해 필수적이다. 이를 위해, 밸브 내부의 유동 특성을 면밀히 분석하고, 점도 변화에 따라서 압력 분포 및 유동을 유동 해석을 통해 파악한다. 더구나 공동 현상으로 인한 손상을 최소화하기 위한 정보를 제공하려 한다.

2. 연구 방법

2.1 글로브 밸브 모델링

Fig 1은 실험에 사용된 글로브 밸브의 유동 방향과 메쉬를 보여준다. 입구와 출구에 연결된 관의 직경은 25 mm이다. 출구는 대기압 조건이 적용되었으며, 입구에는 20, 40 bar 조건의 압력이 적용되었다. 100, 70, 50% 개폐된 조건이 모델링 되었다. 50% 개폐 조건에서는 상당히 좁은 유로 때문에 적합한 메쉬의 크기를 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해서 1.0 mm 부터 0.4 mm까지 바뀌가면서 출구에서의 Re 수를 비교하였다. 0.5 mm 이상에서는 수렴하는 것을 확인하였다. 본 해석에서 사용한 메쉬의 크기는 0.4 mm로, 메쉬의 개수는 모든 경우에 2×10^6 개 이상을 확보하였다.

2.2 수치해석 방법

Fluent 2022 R1 (ANSYS, Inc., USA)을 활용하여 글로브 밸브 내부를 흐르는 연료(IFO 380)을 수치해석 하였다. 정상상태의 유동으로 Realizable k-ε 난류 모델을 사용하였다. Reynolds stresses에 대한 난류 흐름의 물리와 일치하는 특정 수학적 제약을 만족하도록 제안된 모델이다. 벽면에 대하여 no-slip 조건을 적용하였다. 압력-속도 커플링은 Coupled 조건을 적용하였으며, 공동현상을 모사하기 위해 다상 유동 조건이 적용되었다.

작동 유체의 점도가 일정한 조건은 72°C, 15 bar의 값인 1.661 Pa·s 값이 사용되었다. 온도와 압력이 유체의 점도에 미치는 복합적인 영향을 잘 설명하기 위해 WLF-Barus 모델이 제안되었다. 점도가 바뀌는 경우 해당모델을 적용하여 온도와 압력이 바뀌에 따라 점도(η)의 변화를 계산하였다.

$$\frac{\eta}{\eta_{ref}} = \exp \left[\left(-\frac{c_1(T - T_{ref})}{c_2 + (T - T_{ref})} \right) \left((\beta_0 + \beta_1(T - T_{ref})) (P - P_{ref}) \right) \right] \quad (1)$$

$\eta_{ref} = 1.801 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $T_{ref} = 30^\circ\text{C}$ 이고, $P_{ref} = 0 \text{ bar}$ 일 때, 온도 및 압력에 따라 달라지는 상수들은 다음과 같다. ($c_1 = 3.95$, $c_2 = 96[^\circ\text{C}]$, $\beta_0 = 3.06 \times 10^3$)

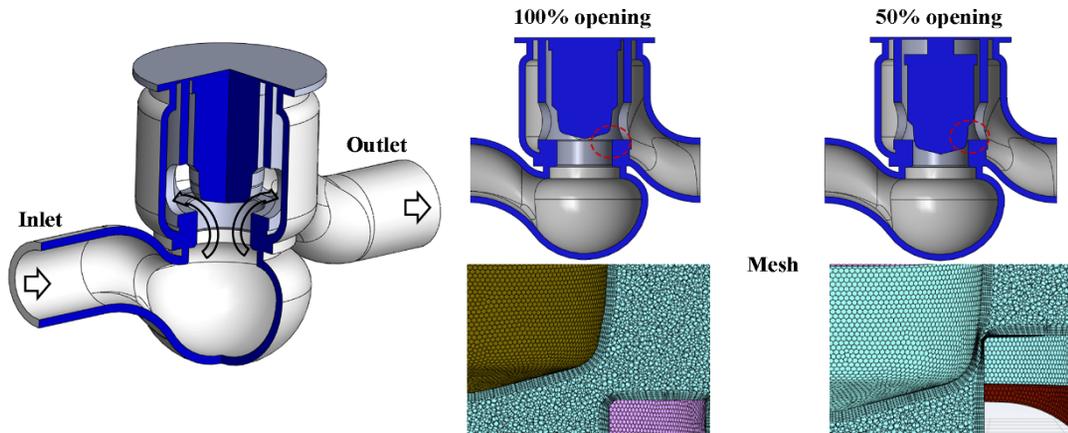


Fig. 1. Schematic diagram of globe valve. Two different opening degrees (50 and 100%) were analyzed. Mesh around corner was magnified

[1/bar], $\beta_1 = 3.4 \times 10^{-5}$ [1/bar·°C]).⁽⁴⁾ 비체적(v)은 온도와 압력에 따라 변하며, 이를 계산하기 위해 Murnaghan 식을 사용하였다.

$$\frac{\eta}{\eta_{ref}} = \exp\left[\left(-\frac{c_1(T - T_{ref})}{c_2 + (T - T_{ref})}\right)\left((\beta_0 + \beta_1(T - T_{ref}))\right)(P - P_{ref})\right] \quad (2)$$

여기서

$$v_0(0, T) = a_0 + a_1(T - T_{ref}) + a_2(T - T_{ref})^2 \quad (3)$$

$$K_e(T) = K_e^* \exp(-\lambda(T - T_{ref})) \quad (4)$$

Polynomial 식인 $v_0(0, T)$ 은 대기압에서 특정 온도의 비체적을 말하며, $a_0 = 1.0087 \text{ cm}^3/\text{g}$, $a_1 = 7.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{°C}$, $a_2 = 1.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{°C}^2$ 이다. k_e 는 empirical 상수로 9.4이다. K_e 는 온도에 따라 달라지는 bulk modulus를 표현한다. 는 0 bar, $T_{ref} = 30^\circ\text{C}$ 에서 값으로 $0.07 \times 10^4 \text{ bar}$ 이다. λ 는 $7.4 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ 이다. 변하는 점도와 밀도를 고려하여 해석하였다.

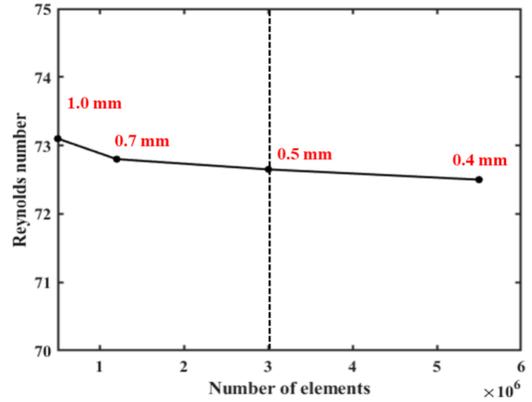


Fig. 2. Variation of Re at outlet depending on element size

3. 결과

3.1 압력에 따른 변화

그림 3는 압력이 20, 40 bar 조건에서 달라지는 글로브 밸브 주변의 유동 속도와 압력 분포의 2차원 분포의 변화를 보여준다. 가장 극명하게 변하는 밸브의 개폐 정도인 100와 50%의

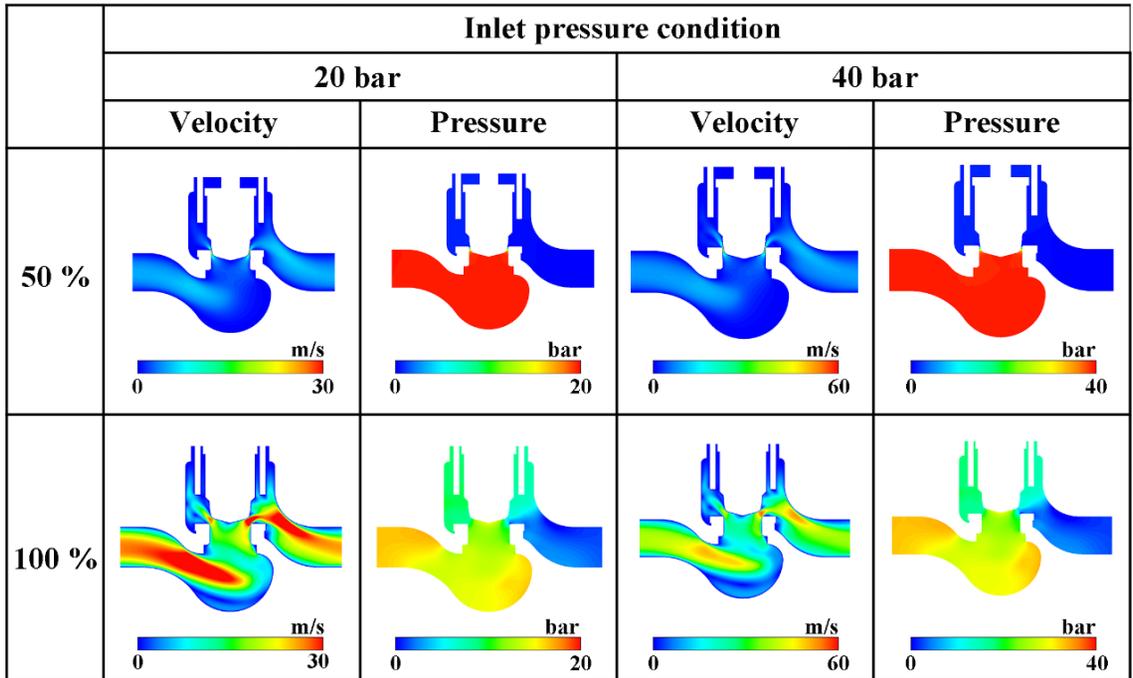


Fig. 3. Comparison of velocity and pressure fields according to inlet pressure and opening degree.

결과를 비교하였다. 50%의 개폐 정도에서는 그림 1의 메쉬에서 보이듯이 plug에 의해 가로막혀 유로의 면적이 좁은 영역 (빨간 원으로 표시한 영역)이 발생한다. 이러한 좁은 유로를 통과하면서 많은 압력 손실이 발생하여 밸브 전 후단에 큰 압력 차이를 유발한다. 이러한 경향은 20, 40 bar에서 유사하게 보이는 것을 확인할 수 있다.

개폐 정도가 100%인 경우, 20 bar와 40 bar의 경우에서 압력 분포가 크게 달라지지 않았지만, 속도에서는 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. Plug에 의해 좁은 영역을 지나면서 빨라진 속도가 출구까지 유지되는 20 bar인 경우와 다르게 복잡한 형상에 의해서 발생하는 에너지

손실로 인해 상대적인 유동 속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 항력에 영향을 많이 받는 40 bar인 압력에서 점도와 개폐 정도에 따른 변화를 비교하려 한다.

3.2 점도의 변화에 따른 유동 변화

그림 4는 입구 압력이 40 bar인 경우 100, 70, 50% 개폐에서 점도의 변화를 고려한 경우와 일정한 점도로 해석한 경우 압력 및 점도 분포를 보여준다. 앞에서 언급한 것과 같이 50%의 개폐율에서는 매우 좁은 유로 면적으로 인해 큰 압력 변화가 보인다. 점도의 변화에 무관하게 압력 분포는 서로 유사하게 관측된다. 이렇

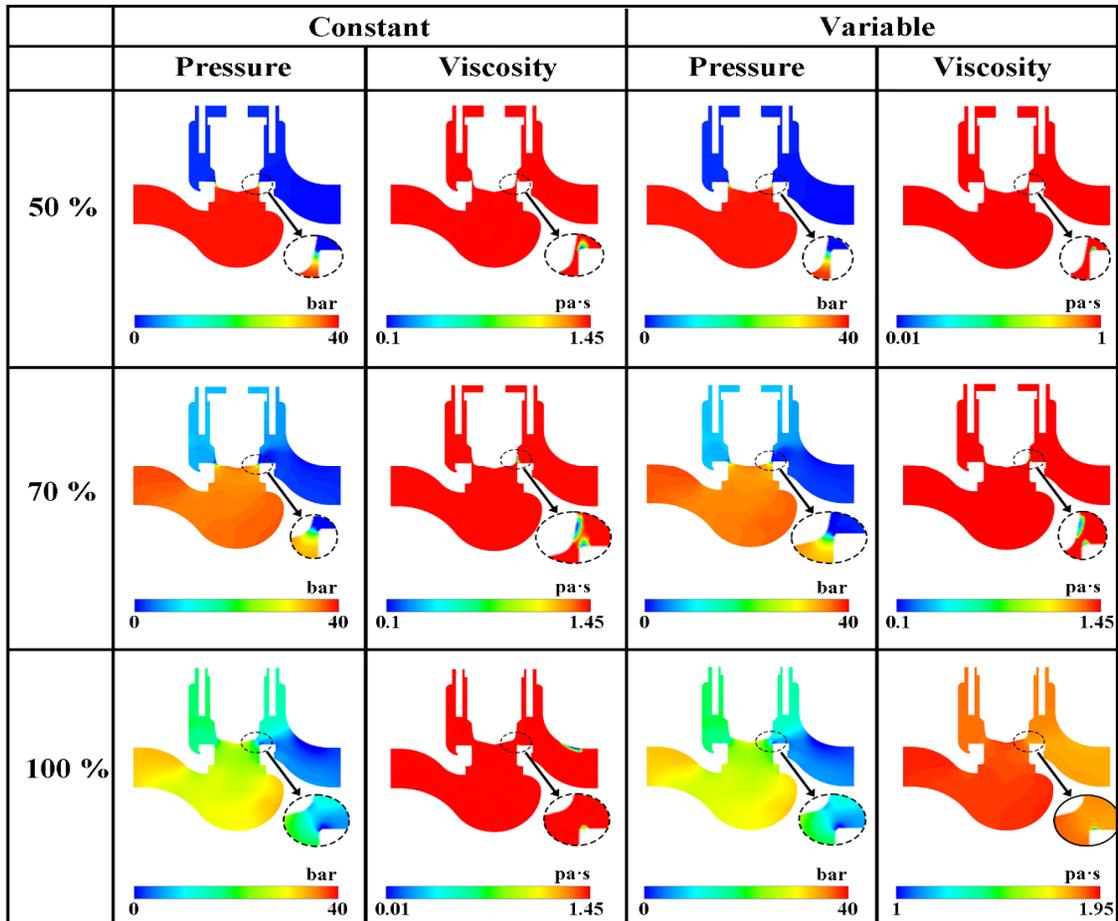


Fig. 4. Variations in velocity and pressure fields according to constant and variable viscosity.

게 좁은 영역을 지난 후 유체의 속도가 빨라지고 압력이 낮아지고 액체의 압력이 증기압보다 낮아지게 되어 액체 내에 증기 방울이 생성되는 공동 현상이 관측된다. 이러한 증기는 액체 연료에 비해서 점도가 매우 낮기 때문에 점도 분포에서 낮은 점도를 가지는 영역은 공동 현상이 발생한 것으로 볼 수 있다. 좁은 영역을 지나고 면적이 확장되는 corner 부분에서 cavitation이 발생하는 것을 관측할 수 있다. WLF-Barus model에 따라 IFO 380 연료는 압력이 높을수록 높은 점도 값을 가지게 된다. 매우 좁은 영역을 지나면서 급격히 낮아진 압력으로 인해 점도가 고정된 경우 보다 낮은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 확대된 그림에서 점도 변화로 인해 공동 현상이 발생한 영역이 고정된 점도의 결과에 대비하여 줄어 든 것을 확인할 수 있으나, 상대적으로 매우 좁은 영역이기에 압력에서 큰 차이를 보이지는 않는다.

개폐 정도가 70%로 늘어남에 따라 갑자기 압력이 변하는 경향은 줄어 들었다. 압력의 분포는 점도가 일정한 경우와 아닌 경우 유사한 것을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 경향은 개폐 정도가 100%인 경우도 크게 차이 나지 않는 것을 확인할 수 있다. Plug에 의해 바뀌는 면적이 더 지배적으로 압력 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그리고 70% 개폐 정도에서도 밸브를 지나고 나서 압력이 급격하게 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이때의 전체적인 점도 분포는 점도가 일정한 경우와 유사하게 나오지만 국부적으로는 낮은 점도가 형성되고 이러한 경향이 공동 현상이 발생한 영역을 고정된 점도의 결과에 대비하여 줄이게 된다.

개폐 정도가 100%가 되면 압력 감소는 상대적으로 천천히 발생한다. 앞에 서술한 경우와 유사하게 압력이 corner 부분에서 낮은 값을 가진다.

그러나 다른 개폐 경우와 다르게 상대적으로 낮은 유동 저항으로 출구에서 높은 압력 분포가 형성된다. 이로 인해 점도가 변하는 경우 출구 근처에서 점도가 유의미하게 변화하는 것을 보인다. 또한 이로 인해 corner 부분에서 더 강한

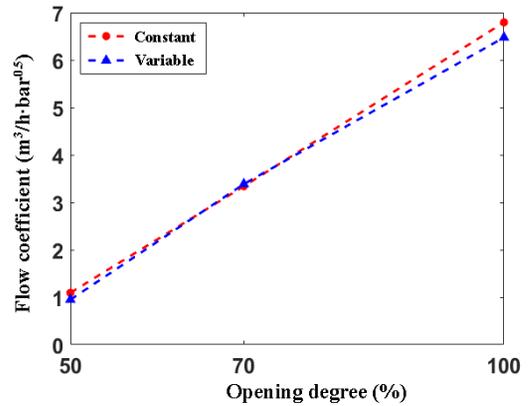


Fig. 5. Variations in flow coefficient with opening degree for constant and variable viscosity

공동 현상이 관측된다.

그러나 일정한 점도의 경우 corner 부분 외에 유로의 위쪽 부분에서 압력이 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서 해당 부분에서 위로 상승하는 유동이 벽을 만나 운동 방향이 바뀌고 이로 인해 빠른 속도가 발생하는 부분이다. 그리고 점도가 일정한 경우 이 영역에서도 공동 현상이 발생하고 이것이 상대적으로 길게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위해서 유량 계수(K_v)를 계산하여 점도의 변화에 따른 영향을 비교하였다(그림 5).

$$K_v = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (5)$$

여기서 Q 는 유량이고, SG 는 비중, ΔP 는 입구와 출구의 압력 차이다.

전체적으로 두 값이 확인한 차이를 보이지는 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 100% 개방 정도에서는 점도가 변하는 조건에서 낮은 유량 계수를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 출구 근처에서 높은 점도로 인해 기인하였다. 70% 개방 조건에는 비슷한 점도로 인해 두 경우의 차이가 크지 않는 것을 확인할 수 있다. 50% 개방에서는 상대적으로 높은 압력이 형성

된 밸브의 상류에서 큰 점도를 유발하여 점도가 변하는 조건에서 낮은 유량 계수를 가지는 것으로 여겨진다. 이러한 경향은 단순히 점도에 의한 영향 외에도, 압력의 증가에 따른 밀도의 상승도 영향을 줄 것으로 예상된다. 더구나 압력에 의한 점도 및 밀도의 변화 보다 온도가 더 영향이 크기 때문에 열전달이 같이 고려될 때 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4. 결론

결론적으로, 본 연구에서는 글로브 밸브 내부에서 발생하는 유동 특성 및 공동 현상에 대한 수치해석을 통해 점도 변화에 따른 압력과 유동 속도의 변화를 분석하였다. 점도가 일정한 조건과 변하는 조건을 비교한 결과, 좁은 유로에서의 압력 손실과 공동 현상이 관찰되었으며, 점도 변화에 따라 이러한 현상이 달라짐을 확인할 수 있었다. 특히, WLF-Barus 모델을 적용하여 압력과 온도 변화에 따른 점도의 변화를 고려한 경우, 공동 현상의 발생 영역이 줄어드는 경향을 보였다.

개폐 정도에 따른 유동 특성도 분석되었으며, 100% 개폐 시에는 상대적으로 낮은 유동 저항으로 인해 출구에서 높은 압력 분포가 형성되었고, 50% 개폐 시에는 좁은 유로로 인해 큰 압력 차이와 점도 변화가 발생했다. 이러한 연구 결과는 밸브 설계 시 공동 현상을 최소화하고, 효율성과 내구성을 향상시키는 데 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCE

1) Nuri Al-Amin, N. m. A.-B. M., Abdul Rani, A. M., Awang, M. N., A Rani, M. N., Ishar, N. A., Thompson, H. M., Hafizun Hassan, M.,

Zakir, B. M. and Hassan, A. T., 2021, "Simulation-Enabled Design and Analysis of Globe Valve," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2051, No. 1, pp. 012025.

2) Hermoso, J., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C., 2017, "Modeling Pressure-Viscosity Behavior of Oil-Based Drilling Fluids," *Oil & Gas Science and Technology-Revue D Ifp Energies Nouvelles*, Vol. 72, No. 4, pp. 18.

3) Jin, Z.-j., Gao, Z.-x., Qian, J.-y., Wu, Z. and Sunden, B., 2018, "A Parametric Study of Hydrodynamic Cavitation inside Globe Valves," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 140, No. 3, pp. 031208

4) Martínez-Boza, F. J., Martín-Alfonso, M. J., Gallegos, C. and Fernández, M., 2011, "High-Pressure Behavior of Intermediate Fuel Oils," *Energy & Fuels*, Vol. 25, No. 11, pp. 5138-5144.