

유동해석을 통한 선박용 디젤엔진(LDCL JWCS)의 3-Way Valve 형상 설계

황기웅* · 곽효서** · 김재열* · 엄태진* · 김 철***†

* 부산대학교 기계융합기술학과, ** 부산대학교 기계기술연구원, *** 부산대학교 기계공학부

Shape Design of the 3-Way Valve used in Marine Diesel Engines (LDCL JWCS) by CFD Analysis

Gi Ung Hwang*, Hyo Seo Kwak**, Jae Yeol Kim*, Tae Jin Eom* and Chul Kim***†

* Dept. Mechanical Convergence Technology, Pusan Nat'l Univ.

** Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Nat'l Univ.

*** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received May 16, 2017 ; Revised July 5, 2017 ; Accepted July 31, 2017)

Key Words: 3-Way Valve(3-Way 밸브), CFD Analysis(전산유동해석), Outelt Temperature(출구 온도), Outlet Mass Flow(출구 유량)

초록: 기존의 선박용 디젤 엔진에는 항상 일정한 엔진 부하량을 유지하는 캠 구동장치가 적용되고 있었으나, 최근 환경규제로 인하여 엔진 부하량에 따라 실린더 온도를 개별적으로 제어하는 LDCL(Load dependent cylinder liner) JWCS(Jacket water cooling system)가 적용된 전자유압 제어방식이 개발되었다. 이 시스템에서 3-way 밸브는 실린더의 상부와 하부와의 온도 차이를 줄여 저온부식을 방지하는데, 대부분 수입에 의존하고 있으며 토출유량이 낮다. 이에 본 연구에서는 3-way 밸브 내부 형상 관련 설계인자가 성능(토출 유량 및 온도)에 미치는 영향을 파악하여 밸브의 형상 설계를 수행하였으며, 기존 모델과의 성능 비교를 통해 제안된 밸브의 우수성을 검증하였다.

Abstract: Camshaft engines designed for constant engine loads have been applied to existing marine diesel engines. However, due to environmental regulations, electro-hydraulic servo mechanisms, which have a load-dependent cylinder liner jacket water cooling system (LDCL-JWCS), have been recently developed to individually control the temperature of the cylinders depending on the engine load. In this system, the 3-way valve, which prevents low temperature corrosion by reducing the temperature difference between the upper and lower parts of the cylinder, has been employed, but the outlet mass flow of the existing valve is low. In this study, the design of the internal shape of the 3-way valve was performed by analyzing the effects of the design parameters of the valve shape on the performance (i.e., the outlet mass flow rate and temperature). The proposed model was verified by comparing its performance to that of existing marine diesel engine valves.

1. 서론

기존의 선박용 디젤 엔진은 크랭크샤프트에 연결된 캠 구동장치를 통하여 연료를 분사하고 출력을 조절하는 방식으로(Cam-shaft engine), 항상 일정한 엔진 부하량을 유지하기 때문에 실린더

헤드, 중심 및 하부의 온도가 동일하다. 그러나 최근 환경규제에 대응하기 위하여, 엔진 부하량에 따라 연료가 분사되는 전자 유압 제어방식(Electro-hydraulic servo mechanism)이 도입되어 연비가 향상되고 배기가스가 감소되었으나, 엔진 부하량이 낮을 때 작동하지 않는 실린더 상부의 온도가 낮아져 하부와 온도차이로 인한 저온부식 현상이 발생하는 문제점이 있다. 저온부식은 실

† Corresponding Author, chulki@pusan.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

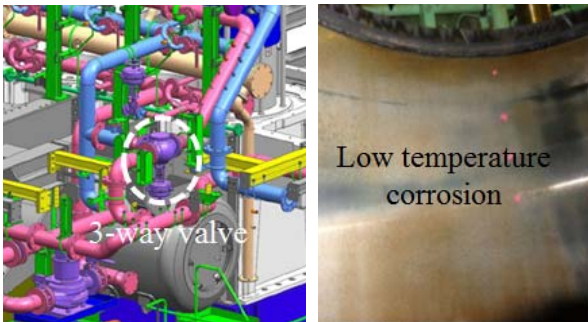
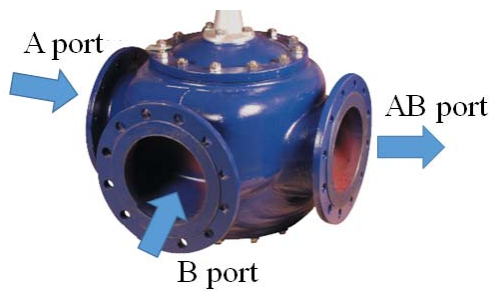
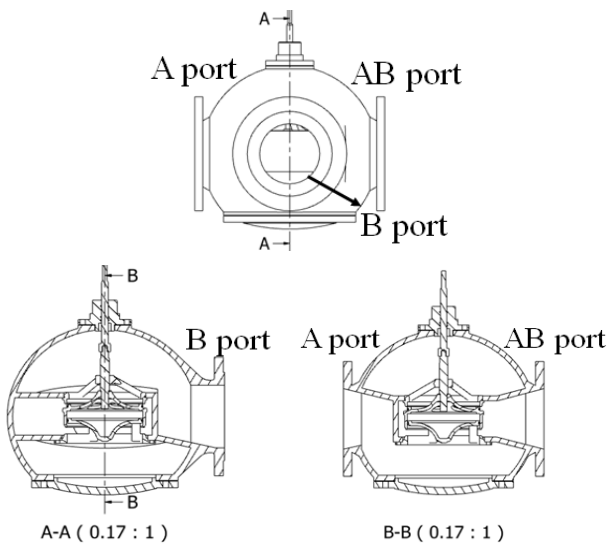


Fig. 1 LDCL JWCS and low temperature corrosion



(a) Prototype valve of 3-way valve



(b) Vertical cross-section of 3-way valve

Fig. 2 Prototype and its vertical cross-section of 3-way valve

린더의 강도저하 및 크랙으로 인한 누수를 야기 하며, 라이너 온도가 약 70°C 이하가 되면 부식 량이 급격히 증가한다.⁽¹⁾ 이러한 문제점을 개선하 기 위하여 Fig. 1과 같이 엔진 실린더를 개별적으 로 관리함으로써 실린더 상부의 온도를 높여 저 온부식을 방지하는 LDCL(Load Dependent Cylinder Liner) JWCS(Jacket Water Cooling System)이 도입 되었다. 이 시스템에서 Fig. 2의 3-way 밸브는 실

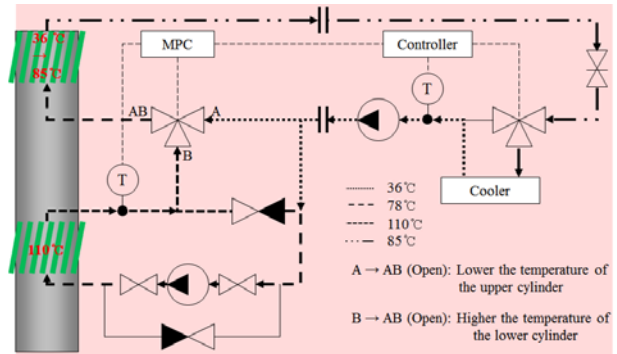


Fig. 3 Mechanism of the 3-way valve at 25% engine load in the LDCL JWCS

린더 상부 온도를 높여 하부와의 온도 차이를 줄 여 저온부식을 방지하는데, 대부분 수입에 의존 하고 있어 가격이 높고 사후관리가 어려우며, 토 출 유량이 낮아 성능이 좋지 않다.

밸브의 유동특성에 관한 기존 연구에서 Bae⁽²⁾ 는 선박용 글로브 밸브의 크기에 따른 유동특성 을 관찰하였고, Choi⁽³⁾는 글로브 밸브의 개도율에 따른 출구 유량 변화를 연구하였으며, Lee⁽⁴⁾는 시 트와 디스크의 형상을 변경하여 누설을 방지하였 다. 또한, Qian⁽⁵⁾은 파일럿 라인이 적용된 글로브 밸브의 오리피스 크기와 입구 측 유속에 따른 유동특성의 변화를 연구하였다. 그러나, 3-way 밸 브의 유동 특성 및 성능향상을 위한 형상 설계에 관한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서 는 3-way 밸브 내부 형상 관련 설계인자가 성능 (토출 유량 및 온도)에 미치는 영향을 파악하여 밸브의 형상 설계를 수행하였으며, 기존 모델과 의 성능 비교를 통해 제안된 밸브의 우수성을 검 증하였다.

2. LDCL JWCS에서 3-way 밸브의 작동 원리

LDCL JWCS는 실린더 상·하부의 온도를 균일 하게 유지하기 위해서 3-way 밸브 디스크의 개도 를 결정하여 토출 온도를 제어한다. 엔진 부하가 클 경우(85%), LDCL JWCS는 Cooler에서 배출되 는 저온의 물(36°C)을 Water Jacket으로 이동시켜 실린더의 온도를 감소시킨다. 그러나 연비향상을 위한 저속운행 시, 3-way 밸브의 B포트가 닫혀 실린더 하부는 폐루프가 되어 냉각수 온도가 상 승한다. 엔진 부하가 25%에 도달하여 실린더 상 부 온도가 낮아지면(36°C) Fig. 3과 같이 고온

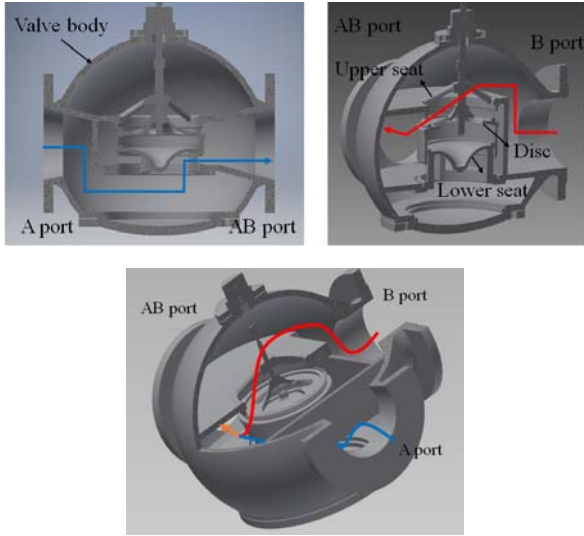


Fig. 4 Fluid flow of cooling water through 3-way valve

(110℃)의 물을 공급하는 B포트가 열려 실린더 전체 온도가 균일해진다.

3-way 밸브는 밸브 바디(Valve body), 디스크(Disc), 하부 및 상부 시트(Lower seat and upper seat)로 구성되어 있다. A포트를 통해 유입된 저온의 물(36℃)은 밸브 하부를, B포트를 통해 들어온 고온의 물(110℃)은 밸브 상부를 지나 밸브 중심의 혼합영역(Mixing area)에서 만나며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 3-way 밸브는 실린더 상부의 온도를 빠르게 상승시켜야 하므로, 높은 토출 온도 및 많은 유량을 필요로 한다.

3. 3-way의 밸브 형상 설계

상용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 17.0을 이용하여 3-way 밸브의 성능 향상을 위한 밸브 내부 형상 설계를 수행하였다.

3.1 이론적 배경

3.1.1 밸브 내부 압력 강하

밸브 내부에서 발생하는 압력 손실을 감소시키면 토출유량이 늘어나기 때문에 압력 손실은 밸브 성능에 영향을 주는 중요한 인자이다. 수정된 베르누이 방정식은 식 (1)과 같으며, 여기서 P_1 및 P_2 는 입구 및 출구 압력, v_1 및 v_2 는 입구 및 출구 속도, ρ 는 유체의 밀도, h_1 및 h_2 는 입구 및 출구 높이이다. 또한, $fL\rho v_2^2/2D_h$ 은 주손실이고, $\sum K_L(\rho v_2^2/2)$ 은 국부 유체저항에 의한 부차적 손

실이며, 압력손실계수(K_L)는 식 (2)와 같다.⁽⁶⁾

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 \tag{1}$$

$$= P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 + \frac{fL}{D_h} \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \sum K_L \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$K_L = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \tag{2}$$

배관 시스템 내의 유체는 배관 벽면의 마찰로 인한 주손실과 유동의 교란, 유동박리 및 혼합으로 인한 부차적 손실이 생긴다. 긴 파이프 시스템에서는 주 손실이 부차적 손실보다 크지만, 3-way 밸브와 같이 곧은 유로의 거리가 짧을 경우에는 부차적 손실이 주 손실보다 크므로, 본 연구에서는 부차적 손실만을 고려하였다. 손실계수는 Reynolds수의 크기가 충분히 큰 난류의 경우 형상에 지배적인 영향을 받으므로⁽⁶⁾밸브 형상을 변경하여 압력손실을 감소시킬 수 있다.

3.1.2 지배방정식

3-way 밸브의 유동해석을 수행하기 위하여 식 (3)~식 (5)의 비압축성 유동장의 연속방정식, 시간평균 운동량방정식 및 k-ε 난류 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \rho f_i \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho g_i \end{aligned} \tag{5}$$

3.2 3-way 내부 밸브 형상 관련 설계인자

밸브 내부 형상 변화에 따른 성능을 파악하기 위하여, 기존의 연구를 토대로 5가지의 설계인자를 선정하였다. Go⁽¹⁰⁾와 Lee⁽¹¹⁾의 연구에 따르면 유체가 흐르는 벽면의 각도와 모서리 필렛은 유동의 압력 손실에 직접적인 영향을 주며, Kwak⁽¹²⁾의 연구에서는 입구부 체적이 늘어나면

Table 1 Design parameters of the existing 3-way valve

	Dimension
θ (°)	15
l (mm)	100
Fillet	No fillet
The Number of disc holes	5
Diameters of disc hole(mm)	36

Table 2 Design parameters regarding to shapes of the 3-way valve

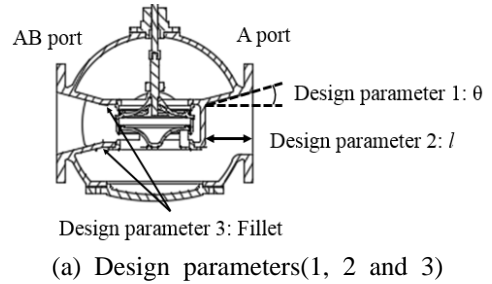
	Dimension			
	θ (°)	0	7.5	15
l (mm)	80	100	120	
Fillet	A port	B port	Mixing area	
The Number of disc holes	0	3	5	7
Diameters of disc hole(mm)	26	36	46	

유량이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 5와 같이 입구부 벽면의 기울기(θ),⁽¹⁰⁾ 입구부에서 내부 벽까지의 거리(l),⁽¹²⁾ A포트, B포트 및 물이 섞이는 혼합 영역의 필렛(Fillet)의 유무,⁽¹¹⁾ 디스크 홀(Disc hole)의 개수 및 직경을 설계인자로 선정하였으며, Table 1의 기존 형상의 치수를 토대로 Table 2와 같이 설계인자 값을 결정하였다.

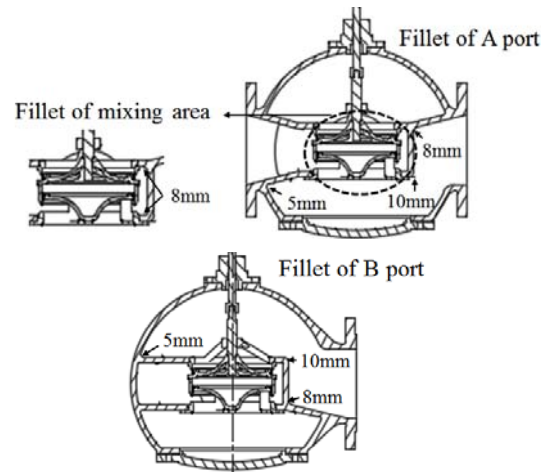
3.3 3-way valve의 유동해석

3.3.1 메쉬 및 해석조건

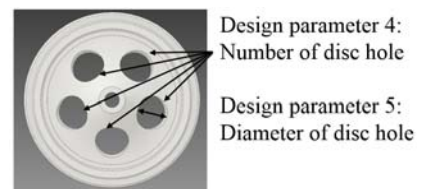
유동해석의 모델은 A포트 및 B포트로 흘러들어오는 유동장인 2개의 입구, AB포트로 흘러나가는 유동장인 출구 및 밸브 바디 내의 유동장으로 구성되어 있다. 이때, 유동의 완전 발달을 유도하기 위하여 입구측은 직경의 6배, 출구측은 직경의 10배로 3D 모델링하여 Fig. 6에 나타내었다. 격자 생성 프로그램인 CFX- Mesh를 사용하여 약 320만개의 요소를 생성하였으며, 벽면에서의 점성 경계층은 점성효과를 고려하기 위하여 인플레이션 메쉬를(Inflation mesh) 생성하고, 나머지 영역에서는 사면체 격자를 적용하여 Fig. 7에 나타내었다.^(7,8) 밸브의 실제 구동 환경에 따라, 경계 조건의 경우 입구 및 출구의 압력을 각각 10 bar 및 9.3 bar로, A포트 및 B포트 물의 온도는 각각 36 °C 및 110 °C로 설정하였으며 이를 Fig. 8에 나타내었다. 또한, 벽면에 접촉하고 있는 유체의



(a) Design parameters(1, 2 and 3)



(b) Fillets of A port, A port and mixing area



(c) Design parameters (4 and 5)

Fig. 5 Design parameters of 3-way valve

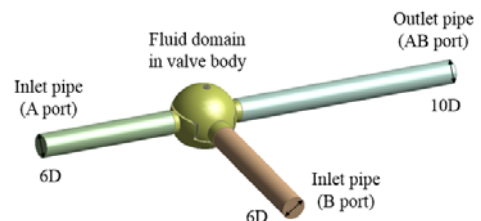


Fig. 6 Fluid analysis model of 3-way valve

점성효과를 고려하기 위해, 미끄럼이 발생하지 않게 하는 점착 조건(No-slip condition)을 적용하였다. 유체 도메인 내에 존재하는 디스크의 상하 운동을 구현하기 위하여 디스크를 Immersed solid 도메인으로 설정하였다.⁽⁹⁾ 또한, Ansys CFX의 Expression 기능을 사용하여 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 디스크 개폐율(40%~60%)에 대한

Table 3 Performance of the 3-way valve according to θ

Performance	Opening length	θ (°)		
		0	7.5	15
Outlet temperature (°C)	40%	71.4	61.5	57.2
	60%	74.5	70.0	69.0
Outlet mass flow (kg/s)		86.5	80.3	69.5

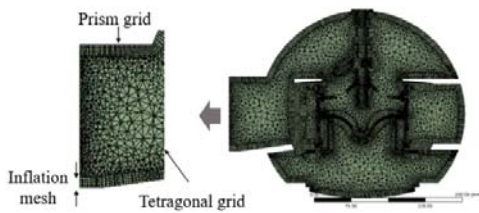


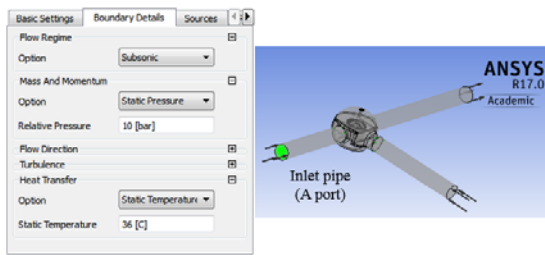
Fig. 7 Mesh for fluid analysis of 3-way valve

Table 4 Performance of the 3-way valve according to l , $\theta(0^\circ)$

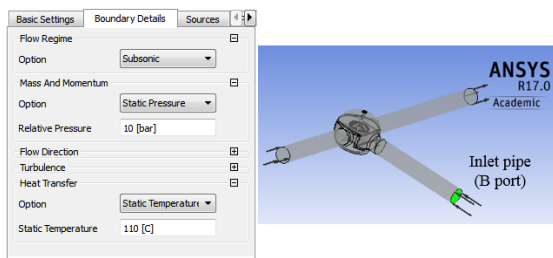
Performance	Opening length	l (mm)		
		80	100	120
Outlet temperature (°C)	40%	71.0	71.4	68.5
	60%	72.5	74.5	72.5
Outlet mass flow (kg/s)		57.1	86.5	98.9

Table 5 Performance of the 3-way valve according to l , $\theta(15^\circ)$

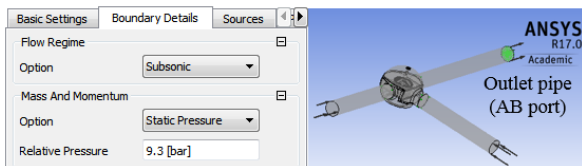
Performance	Opening length	l (mm)		
		80	100	120
Outlet temperature (°C)	40%	57.3	57.2	55.5
	60%	69.0	69.0	68.6
Outlet mass flow (kg/s)		64.7	69.5	72.2



(a) Inlet condition of A port



(b) Inlet condition of B port



(c) Outlet condition of AB port

Fig. 8 Boundary conditions for fluid analysis

이동을 표현하였다. Fig. 9와 같이 입구로 작동유를 흘려보내고 유동이 안정화되는 시점인 3초 이후, 디스크가 움직이기 시작하여 현장에서 사용하는 디스크 이동속도인 10 mm/s으로 0.52초 동안 이동하도록 설정하였다.

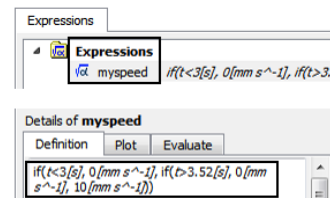
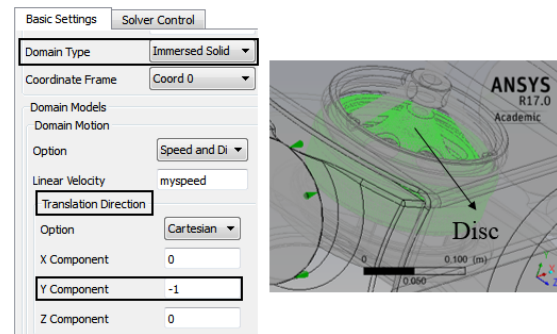
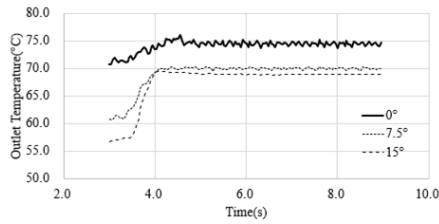


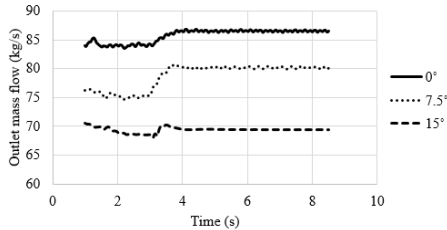
Fig. 9 Movement velocity of disc

3.3.2 입구 부 형상에 따른 유동해석

입구 측과 관련된 설계인자인 입구 부 벽면의 기울기(θ) 따른 유동해석을 수행한 결과, Fig. 10 및 Table 3과 같이 기울기가 작아질수록 토출온도 및 유량이 증가하였다. 입구부에서 내부 벽까지의 거리(l)에 따른 유동해석에서는 기울기와 성능에 미치는 영향도 우선순위를 결정하기 위해 Table 4 및 Table 5와 같이 총 6가지 모델을 생성하였다. 그 결과, 내부 벽까지의 거리가 늘어날수록 토출 유량이 증가하는 경향을 보이나, 기울기 값에 따라서 성능의 증가폭에 큰 차가 있기 때문에 거리보다 기울기가 성능에 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있었다.



(a) Temperature according to θ in outlet



(b) Mass flow in outlet

Fig. 10 CFD results of 3-way valve according to θ

Table 4의 기울기가 0°인 3가지 모델을 비교해 보면, 온도 측면에서는 거리가 100mm인 모델이, 유량 측면에서는 거리가 120mm인 모델이 우수하다. 냉각수는 실린더 상부의 온도를 높이는 것이 목적이기 때문에 더 큰 열량을 가진 모델의 성능이 더 좋다고 판단할 수 있다. 따라서, 온도와 유량의 우선순위를 결정하기 위하여 두 모델에서 냉각수(36°C)의 열량을 식 (6)으로부터 계산하였다. 그 결과, 거리가 100 mm인 경우의 열량이 13,454 kJ/s, 120 mm인 모델은 14,277 kJ/s로, 밸브에서 온도보다 유량이 더 중요한 성능임을 알 수 있었으며, 기울기가 0° 및 거리가 120 mm인 모델의 성능이 가장 좋다.

$$Q = mc\Delta t \tag{6}$$

3.3.3 필렛 유무에 따른 유동해석

필렛의 유무에 따른 밸브 성능을 파악하기 위해 Fig. 5(b)와 같이 A포트, B포트 및 혼합영역에 필렛을 적용하여, Table 6과 같이 총 5가지 모델의 유동해석을 수행하였다. 필렛에 의한 유량 증가량은 θ 가 15°일 때 10 kg/s이고 0°일 때 7.6 kg/s로, 유량이 증가하는 추세를 보이며 유량 증가량의 차이는 2.4 kg/s이다. 두 모델의 필렛에 의한 유량 증가량은 다소 차이를 보이지만, 유량이 증가하는 추세는 일치하고 다른 설계인자들에 비하여 그 차이가 작으므로 교호작용이 없는 것으로 고려하여 설계를 진행하였다.

입구부 벽면의 기울기와 입구부에서 내부 벽까

Table 6 Mass flow in outlet according to fillets

Fillet	Outlet temperature (°C)		Outlet mass flow (kg/s)
	Opening length		
	40%	60%	
No fillet (existing)	68.5	72.5	98.9
A port	67.7	72.5	99.9
B port	70.3	75.7	106.9
A and B port	69.1	75.0	107.6
A port, B port and mixing area	69.0	75.0	106.5

Table 7 Performances of the 3-way valve according to the number of disc holes

Number of disc holes	Outlet temperature (°C)		Outlet mass flow (kg/s)
	Opening length		
	40%	60%	
0	55.1	67.2	80.1
3	54.8	67.0	79.8
5	55.6	67.2	81.6
7	55.0	66.8	79.8

Table 8 Performance of the 3-way valve according to the disc hole diameters

Diameter of disc hole(mm)	Outlet temperature (°C)		Outlet mass flow (kg/s)
	Opening length		
	40%	60%	
26	55.2	67.1	80.9
36	55.6	67.2	81.6
46	56.3	67.0	81.4

지의 거리는 밸브 성능이 가장 좋은 0° 및 120 mm로 고정하였다. 그 결과, A포트 측의 필렛은 성능에 큰 영향을 주지 않았고, B포트 측 필렛은 토출 유량 및 온도 모두 증가시켰다. 또한, 혼합영역의 필렛은 성능을 저하 시키는 것으로 나타나, A포트와 B포트에 필렛을 적용한 모델의 성능이 가장 좋음을 알 수 있었다.

3.3.4 디스크 홀의 개수 및 직경에 따른 유동해석

디스크 홀을 등 간격으로 배열하여 홀의 개수에 따른 4가지 모델, 홀의 직경에 따른 3가지 모델을 생성하였으며, 나머지 인자는 기존 모델과 동일하게 적용하였다. Table 7 및 Table 8에 의하면, 홀 개수가 5개 및 직경이 36 mm인 기존 모델이 높은 성능을 가지며, 설계인자 변경으로 인한

Table 9 Comparison of design parameters between the existing 3-way valve and the improved one

	The existing model	The improved model
θ (°)	15	0
l (mm)	100	120
Fillet	No fillet	A port, B port
The number of disc holes	5	5
Disc hole diameters (mm)	36	36

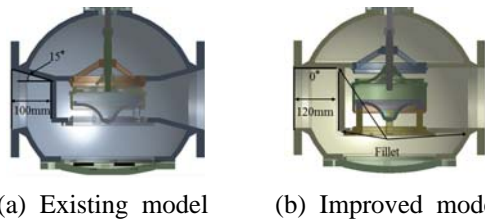


Fig. 11 3D modelings of the existing 3-way valve and the improved one

Table 10 Comparison of performances between the existing model and the improved one

Classification	Temperature of the water sending to outlet(°C)		Mass flow in outlet (kg/s)
	Opening length		
	40%	60%	
The existing model	57.2	69.0	69.5
The improved model	69.1 (20.8% ↑)	75.0 (8.7% ↑)	107.6 (55% ↑)

수 및 직경은 각각 5개 및 36 mm인 모델을 제안하였다. 기존 밸브와 개선된 밸브의 3D 모델링 및 설계인자를 비교하여 Fig. 11 및 Table 9에 나타내었다. 개선된 모델은 기존모델과 비교하여 개도길이가 40% 및 60%일 때 토출 온도가 각각 20.8% 및 8.7% 증가하였고, 토출 유량이 55% 상승하였으며, 이를 Fig. 12 및 Table 10에 나타내었다.

4. 결론

이에 본 연구에서는 3-way 밸브 내부 형상 관련 설계인자가 성능(토출 유량 및 온도)에 미치는 영향을 파악하여 밸브의 형상 설계를 수행하였으며, 기존 모델과의 성능 비교를 통해 제안된 밸브의 우수성을 검증하였다.

(1) 입구 부 벽면의 기울기(θ)가 감소할수록 토출 유량과 온도가 증가하였으며, 입구 부에서 내부 벽까지의 거리(l)가 늘어날수록 토출 유량이 증가하였다. 또한, 이론식을 통한 열량 계산 결과로부터 온도보다 토출유량이 실린더 온도를 높이는 데 더 중요한 성능임을 알 수 있었다.

(2) 필렛의 유무에 따른 유동해석 결과, A포트 및 B포트에 필렛을 적용한 모델의 토출 유량 및 온도가 가장 높았다.

(3) 디스크 홀의 개수 및 직경은 토출 유량 및 온도에 큰 변화가 없었으므로 밸브 성능에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

(4) 3-way 밸브의 토출 유량 및 온도 증가를 위하여, 입구부 벽면 기울기(θ) 0°, 입구부에서 내부 벽까지의 거리(l) 120 mm, A포트 및 B포트 측의 필렛 적용, 디스크 홀의 개수 및 직경은 각각 5개 및 36 mm인 모델을 제안하였다. 개선된 모델은 기존모델과 비교하여 개도길이가 40% 및 60%일 때 토출 온도가 각각 20.8% 및 8.7% 증가

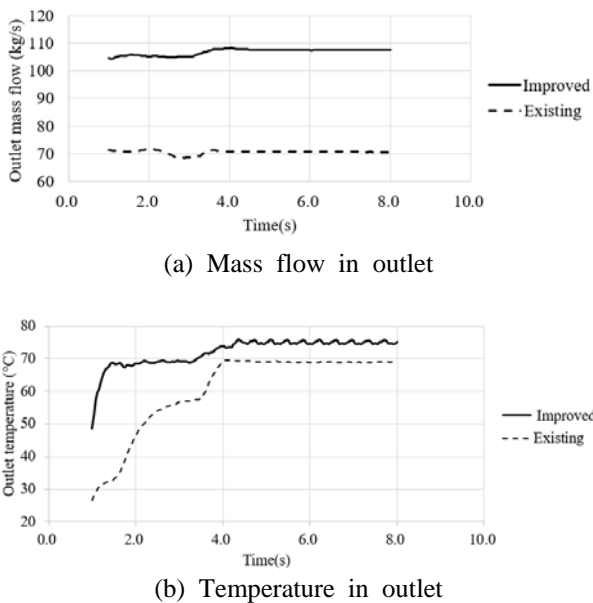


Fig. 12 CFD results of the improved 3-way valve

성능변화에는 큰 차이가 없었다.

3.3.5 3-way 밸브의 내부 형상 설계

상기에서 수행된 3-way 밸브의 내부형상 관련 설계인자에 따른 유동해석 결과를 토대로, 유량 및 온도 증가를 위하여 입구부 벽면 기울기(θ) 0°, 입구부에서 내부 벽까지의 거리(l) 120 mm, A 포트 및 B포트 측의 필렛 적용, 디스크 홀의 개

하였고, 토출 유량이 55 % 상승하여 좋은 성능을 가짐을 알 수 있었다.

본 연구결과의 개선된 3-way 밸브는 실린더의 저온부식 방지 및 국산화에 크게 기여 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015년도 중소기업청의 기술혁신개발사업(S2256407) 지원에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(References)

- (1) Kim, D. K., Lee, J. H. and Cho, K. H., 2017, "A Study on Performance Comparison of Jacket Cooling Fresh Water System for Marine Diesel Engine," *J. Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 8~14.
- (2) Bae, K. H., Park, J. H. and Kang, S. M., 2008, "A Study on the Flow Characteristics inside a Glove Valve for Ships," *J. Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 110~118.
- (3) Choi, J. W., Park, S. H. and Lee, K. H., 2016, "Flow Analysis and Experimental Study of Globe Valve for Precision Control," *J. Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 7, pp. 734~739.
- (4) Lee, S. H., Kang, G. A., Kwak, J. S., An, J. E. and Jin, D. H., 2016, "New Seat Design and Finite Element Analysis for Anti-Leakage of Globe Valve," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 1, pp 81~86.
- (5) Qian, J. Y., Liu, B. Z., Lei, L. N., Zhang, H., Lu, A. L., Wang, J. K. and Jin, Z. J., 2016, "Effects of Orifice on Pressure Difference in Pilot-control Globe Valve by Experimental and Numerical Methods," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 41, pp. 18562~18570.
- (6) Yunus, A. Cengel and John, M. Cimbala, 2014, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, MC Graw Hill, pp. 349~351.
- (7) Jung, M. S. and Kwon, O. J., 2007, "Development of a 3-D Viscous Flow Solver Based on Unstructured Hybrid Meshes," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 677~684.
- (8) Kwak, H. S., Li, S. H. and Kim, C., 2015, "Optimal Design of a Gerotor (Ellipse1-Elliptical Involute-Ellipse2 Combined Lobe Shape) for Improving Fuel Efficiency and Reducing Noise," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 11, pp. 927~935.
- (9) Yoon, Y. H., Park, B. H., Han, Y. O., Hong, B. J. and Shim, J. S., 2014, "Numerical Simulation of External Gear Pump Using Immersed Solid Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 1, pp. 95~101.
- (10) Go, T. S. and Kim, K., 2013, "The Effect of Divergence Angle on the Control Valve Trim Characteristics," *Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 16, No. 1, pp. 32~39.
- (11) Lee, H. C., Lee, T. G. and Park, W. C., 2010, "Design Change of E-EGR Valve to Suppress Carbon Deposit," *The Korea Academia-industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 4685~4690.
- (12) Kwak, H. S., Li, S. H. and Kim, C., 2016, "Performance Improvement of an Oil Pump: Design of Port Assembled with Gerotor (2-Ellipses-Combined Lobe)," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 8, pp. 1017~1024.