

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(2), 85-90(2013)
 DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.2.85

Damped Bypass Valve의 내부 누설 유동 특성 전산 해석

이세욱*, 김대현**, 김상범**, 박상준**, 조진수***

Numerical Analysis for Internal Leakage Flow Characteristics of Damped Bypass Valve

Seawook Lee*, Daehyun Kim**, Sangbeom Kim**, Sangjoon Park** and Jinsoo Cho***

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University*,
 Hanwha TechM Aerospace R&D center**,
 School of Mechanical Engineering, Hanyang University***

ABSTRACT

A numerical analysis for the internal flow was carried out in order to analyze the leakage flow characteristics inside the damped bypass valve. This research has found that the valve characteristics became stable at above a specific temperature. Very small amount of leakage flow was occurred. But there was no effect in temperature. The more temperature fell, the more maximum pressure rate was increased.

초 록

비행조종작동기 제어용 파일럿 밸브의 내부 유동 및 응답 특성을 분석하기 위해 유동의 수치 해석을 수행하였고 내부 누설 특성을 해석하였다. 온도 변화에 따른 누설을 고려한 밸브의 작동온도를 결정할 수 있는 영역을 제안 할 수 있었다. 미량의 작동유체가 누설 영역으로 유출된다는 것을 확인하였으나 누설 효과는 작동 온도에 따라 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 압력 상승률이 온도가 하강할수록 높아지는 경향을 나타냈다.

Key Words : Actuator(작동기), Pilot Valve(파일럿 밸브), leakage(누설), Flow Characteristics(유동 특성)

1. 서 론

비행조종작동기는 항공기의 기동성 및 성능 향상, 무게 절감 등을 위해 사용되는 전자식 비행제어(FBW: Fly By Wire) 시스템의 성능을 좌우하는 대표적인 요소이다. 비행조종작동기 시스템에서는 작동기 제어를 위해 일반적으로 고출력과 빠른 응답 속도를 겸비한 전자-유압식 제어

밸브가 사용되고 있으며, 작동 유체는 온도에 의해 밀도, 점성, 포화증기압 등 물성치가 크게 달라지기 때문에 온도 변화에 따른 시스템의 성능을 분석하고 작동 한계 온도를 예측하는 과정은 필수이다. 또한, 액체를 매개로 하는 유압 시스템에서 공동 현상(cavitation) 및 누설에 의한 영향을 고려하지 않을 수 없다.

밸브 내부 캐비테이션 유동에 관한 연구는 불

† Received: November 8, 2012 Accepted: January 29, 2013

*** Corresponding author, E-mail : jscho@hanyang.ac.kr

http://journal.ksas.or.kr/

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

밸브나 버터플라이 밸브에 대하여 주로 진행되어 왔다[1,2]. 그러나 전자-유압 작동형 밸브에 관한 연구는 솔레노이드 입력 신호에 대한 전자력 변환부의 동특성 연구에 국한되어 왔으며[3,4], 유압식 파일럿 밸브 내부의 유동 특성이나 응답 지연, 또는 항공기와 같이 작동 온도의 범위가 넓은 환경에서의 캐비테이션 발생 가능성에 대한 연구는 미비한 실정이다. 특히, 밸브의 스톱이 이동하면서 일어나는 비정상 유동 발달 과정은 밸브의 성능 특성을 결정짓는데 중요한 요소이므로 정확한 분석이 필요하다. 그러나 누설에 대한 연구는 현상을 모델링 하는데 어려움이 많고 그 양도 미미하여 이에 대한 해석이 전반적으로 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 작동온도 변화에 따른 비행조종작동기 제어용 파일럿 밸브 내부의 누설 특성을 해석하여 밸브 성능을 분석하고자 한다. 본 연구를 수행하기 위하여 상용 격자 생성 프로그램인 ANSYS社의 ICEM CFD를 이용하였으며, 전산해석은 상용 프로그램인 ANSYS社의 CFX를 이용하여 해석을 수행하였다.

II. 연구 이론 및 방법

2.1 난류 모델

일반적으로 유동 해석에서 널리 사용되는 $k-\epsilon$ 계열의 난류 모델은 강한 역압력구배가 존재하는 벽면 근처에서 박리점을 제대로 예측하지 못하는 단점이 있다. 반면, Menter의 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 취하여 개발된 모델로서 난류 전단응력 수송항에 의한 정상 난류 유동 예측과 역압력 구배에 의한 벽면 근처 유동 박리의 시작점 예측에 있어 높은 정확성을 보여준다[5]. 전자-유압식 밸브 내부에서는 유동장애 영역에서 박리에 의한 재순환역(recirculation zone)이 발생하여 에너지 손실이 생기게 되며, 이로 인한 난류 전단응력 성분의 정확한 계산을 위해 적합한 난류 해석 모델로 SST 모델을 선정하였다. 난류 유동장 내 유체 유동은 연속방정식, 시간 평균 운동량(RANS) 방정식, 난류 모델 방정식의 지배를 받는다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

시간평균 운동량 방정식 :

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

시간평균화된 RANS 방정식은 $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 라는 미지의 응력 텐서를 포함하게 되어 적절한 난류 모델링 기법이 필요하다. SST 모델의 난류 방정식은 기본적으로 Wilcox의 $k-\omega$ 모델[6]을 따른다.

Turbulent Kinetic Energy Equation :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x k}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y k}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z k}{\partial z} & \quad (3) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] & \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \mu_t \Phi - C_\mu \rho k \omega & \\ + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_k} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] & \end{aligned}$$

Specific Dissipation Rate Equation :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x \omega}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y \omega}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z \omega}{\partial z} & \quad (4) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] & \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] + \gamma \rho \Phi - \beta' \rho \omega^2 & \\ + \frac{(1 - C_3) \beta \rho}{\sigma_t} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] & \end{aligned}$$

SST 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 혼합한 모델로서 $k-\omega$ 모델과의 차이점은 난류 생성항을 변경한다는 점이다. 위 $k-\omega$ 모델의 지배방정식에서 생성항은 다음과 같다.

$$P_t = \mu_t \Phi \quad (5)$$

SST 모델에서는 난류 생성항을 다음과 같이

수정한다.

$$P_t = \min(\mu_t \Phi, C_{lmt} \epsilon) \quad (6)$$

C_{lmt} 계수의 기본값은 10^{15} 으로, 식(6)은 실질적으로 식(5)와 같다. 그러나 식(6)은 정체 영역에서의 과도한 난류 생성을 방지하여 해석의 정확도를 높여준다. SST 모델의 난류 분산 방정식에는 다음의 난류 소실항이 추가된다.

$$\frac{(1-F_1)2\rho\sigma_{\omega^2}}{\omega} \left[\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] \quad (7)$$

F_1 은 Menter의 혼성함수로 벽면 근처에서는 0이 되어 $k-\omega$ 모델이 되고 자유 유동에서는 1이 되어 $k-\epsilon$ 모델이 된다. 모델 계수의 계산은 다음 식을 이용한다.

$$\phi = F_1\phi_1 + (1-F_1)\phi_2 \quad (8)$$

여기서 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 계수이다.

2.2 해석 모델

Figure 1에 비행조종작동기 제어용 밸브의 해석 영역을 나타내었다. 작동 위치에서 밸브의 압력 전달 성능을 관찰하려는 정상 유동 해석 영역은 1번에 해당하며 비정상 유동 해석 영역은 밸브 위치 변환 과정의 응답 특성을 분석하기 위한 유동 영역으로 2번에 해당한다. 작동기의 해석 조건은 대기압, 무부하 작동 조건을 가정하였으며 작동 압력은 3,000psi, 작동 유체로는 Solutia社의 항공유압유 Skydrol 500B-4의 물성치를 사용하였다. 유로 표면에는 smooth wall, no-slip 경계조건을 설정하였다.

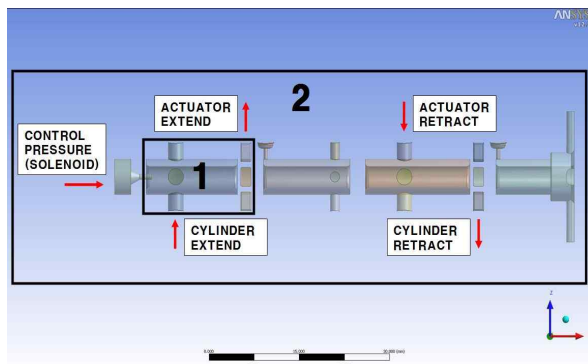


Fig. 1. Valve Flow Analysis Domain

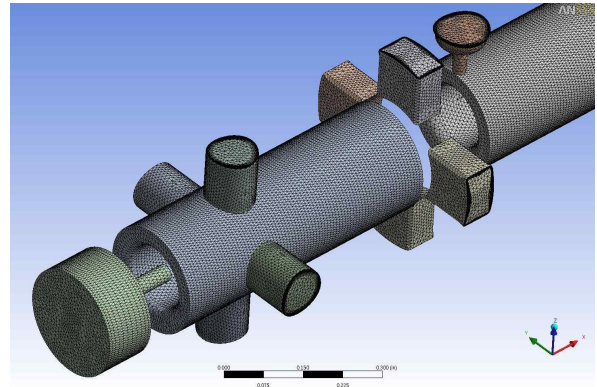


Fig. 2. Valve Computational Grid

Figure 2에서 해석 격자를 나타내었다. 정상 유동 해석 영역 격자의 전체 요소 개수는 약 200만개, 노드 수는 약 70만 개이며 격자 크기는 최대 0.004인치로 생성하였다. 비정상 유동 해석 영역의 격자 요소 개수는 약 280만 개, 노드 수는 약 95만 개이며 1번 영역의 격자 크기는 최대 0.004인치로 동일하고 기타 유동 영역은 최대 0.012인치로 생성하였다. 밸브 내부는 굴곡이 불규칙하며 유로가 형성되는 스톱과 슬리브 간의 반경차가 0.04인치에 지나지 않아 격자 형태로는 정렬-비정렬 하이브리드 격자를 사용하였다. 경계층 묘사를 위해 내부 유로 표면에 전체 두께 0.012인치, 확장비 1.1의 프리즘 레이어가 10점으로 구성되었고 경계층 해석에는 자동벽 처리법 (automatic near wall treatment)을 사용하였다. CFX에서 ω -방정식 기반의 난류 모델에 한하여 제공되는 본 알고리즘의 목표는 가능한 격자의 $y+$ 에 무관하게 해의 정확성을 확보하는 것이며 벽처리 함수와 전단응력을 이용하여 $y+$ 의 범위에 민감하지 않은 해를 제공할 수 있다[7].

III. 결과 및 고찰

밸브 내부 누설에 의한 영향 예측과 분석을 위해 스톱 간극에 존재하는 누설부를 포함한 해석 격자를 생성하여 Fig. 3의 조건으로 정상 유동 해석을 수행하였다. Fig. 4(a)~(d)에 누설 해석 격자를 나타내었으며 격자가 스톱과 슬라이드 사이에 조밀하게 분포함을 확인할 수 있다. 해석 영역은 유동 영역 앞뒤 슬라이드-피스톤 부위를 더하여 유로 영역을 추출하였고, 누설 간극은 5 μm 의 설계 두께를 지닌다. 격자 형태로는 정렬-비정렬 하이브리드 격자를 채택하였으며 해석 영

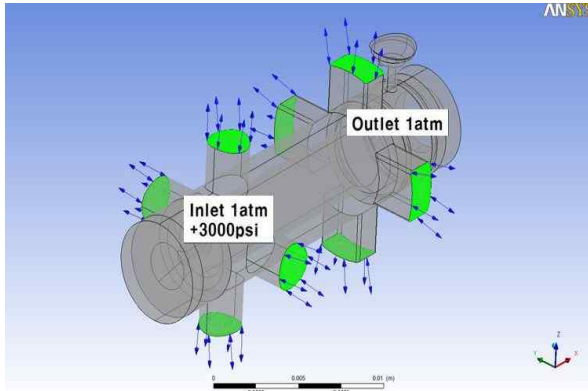


Fig. 3. Leakage Flow Analysis Domain

역 내 격자의 최소 크기는 $0.5\mu m$, 최대 크기는 $0.1mm$, 곡률 법선 각도는 12도로 조밀하게 설정하여 왜곡도를 최소화하였다. 누설 간극 내부에는 5겹의 Tetra Prism Layer를 구성하였으며 일반 경계층 영역은 12겹으로 생성하였다. 전체 해석 격자 요소의 개수는 4,861,548개, 전체 노드 수는 8,455,242개로 높은 격자 해상도로 인하여 노드수가 요소수의 약 2배에 달하는 특징을 보였다.

밸브 저항계수(resistance coefficient, K)는 밸브의 성능 특성을 나타내는 주요 변수로서 밸브의 압력손실 평가 및 효율 검토에 사용되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

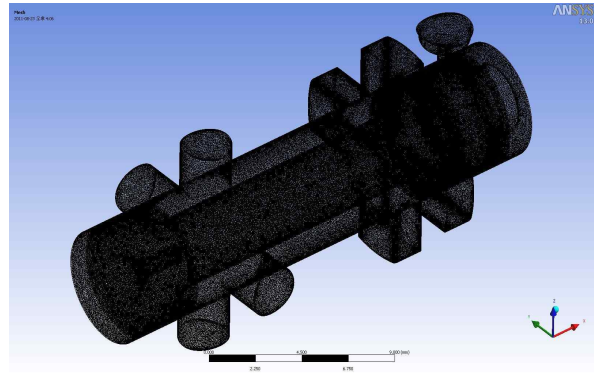
$$K = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (9)$$

- ΔP : static pressure drop
 ρ : density of fluid
 V : average inflow velocity

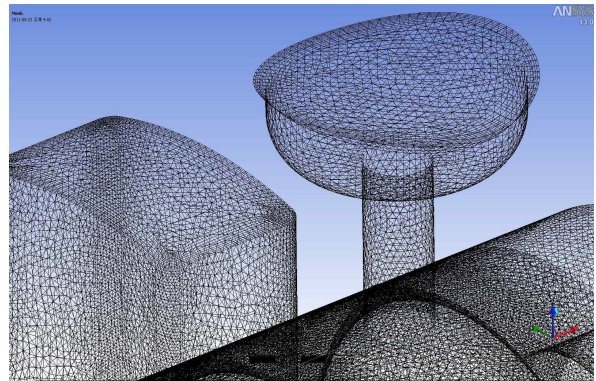
유량계수(flow coefficient, C_v)는 밸브 전후 차압 1psi당 밸브를 통과하는 유량을 gallon/min(GPM)으로 표기한 용량 계수이다. 유동의 원만한 흐름과 밸브 성능을 측정하는 지표로 활용될 수 있다.

$$C_v = Q\sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (10)$$

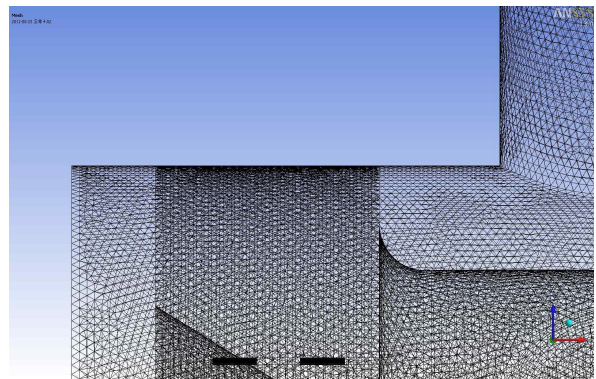
- Q : flow rate
 SG : specific gravity
 ΔP : static pressure drop



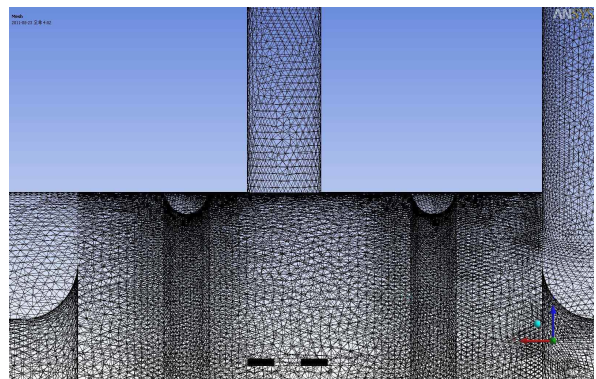
(a) Total view



(b) Boundary area view



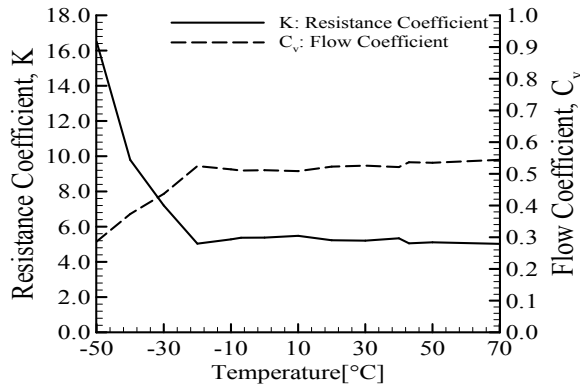
(c) Inlet area view



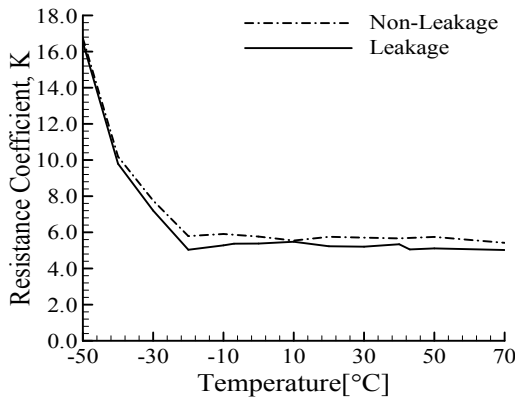
(d) Outlet area view

Fig. 4. Leakage Flow Analysis Computational Grid

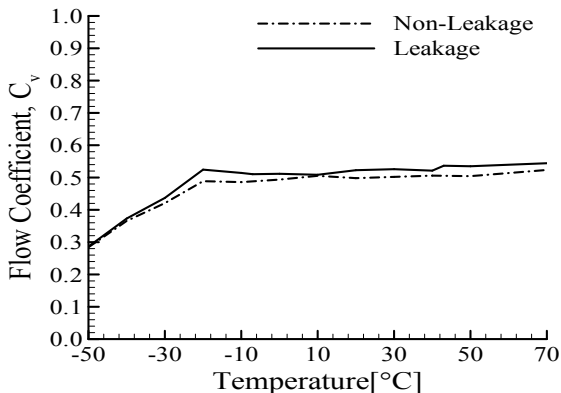
Figure 5(a)~(c)에 밸브 내부 누설을 감안한 저항계수와 유량계수를 나타내었다. Fig. 5.(b), (c)에 따르면 밸브 내부 누설 해석 시 밸브 성능 계수 변화는 전체적으로 비누설 해석 결과와 유사한 경향을 나타내었으나 수치적으로 미세한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 해석 결과, 작동온도에 따라 저항계수는 1.2%~11.0%까지 수치가 감



(a) Valve Coefficients in Leakage Analysis



(b) Comparison of Resistance Coefficient(K)



(c) Comparison of Valve Flow Coefficient(C_v)

Fig. 5. Valve Performance Coefficients

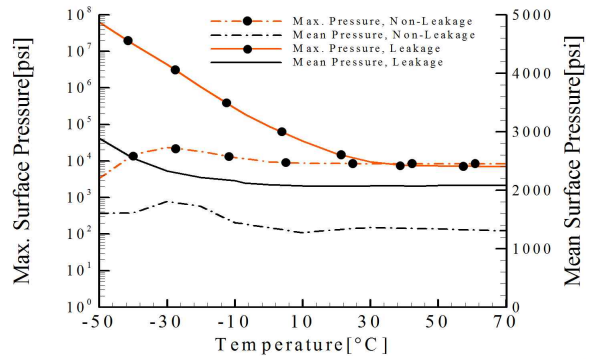


Fig. 6. Maximum and Mean Surface Pressure

소되었으며 유량계수는 0.6%~7.3% 정도 증가하는 모습을 나타내었다. 본 밸브 유동의 특성 상 유량계수와 저항계수는 반비례 관계를 보이는데, 입구에서 측정된 유량이 증가한다는 사실은 미세하게나마 작동유체가 누설 영역으로 유출된다는 것을 의미한다. 또한 유량이 늘어난 만큼 입구 유속이 증가하여 저항계수의 감소가 일어나게 된다. 그러나 누설 효과는 작동 온도에 따른 그래프의 형상에는 영향을 미치지 않으며 전 온도에 걸쳐 저항계수는 평균 7.16% 감소하였고, 유량계수는 3.9% 증가함을 확인할 수 있다.

Figure 6에 작동 유체에 의해 밸브 내부면에 가해지는 최대, 평균 압력(정압)을 그래프로 기록하였다. 밸브 성능 계수와는 달리, 누설-비누설 해석 간에 큰 수치적 차이를 나타내었다. 누설 해석 시 밸브 내부에 작용하는 최대 압력은 비누설 해석 결과에 비하여 최대 약 19,000배(-50°C) 상승하였으며 평균 압력 또한 최대 25배(-50°C) 상승하였다. 이는 아무리 강도 높은 재료일지라도 구조적으로 문제를 일으킬 수 있는 수치로 예상된다. 내부 누설 현상으로 인한 압력 상승률은 영상 30~70°C 구간에서는 비슷하거나 오히려 낮아지는 수치를 보이다가 온도가 하강할수록 기하급수적으로 높아져서 앞서 언급한 -50°C에서 이르러서는 최대 수치를 나타내었다. 평균 압력의 경우 비누설 해석 시 약 1,500psi 내외의 수치를 나타낸 반면 누설 해석 시에는 전 온도 구간에서 2,000psi 이상의 수치를 나타내었다.

최대 및 평균 표면 압력이 상승한 이유는 유동 누설부에서 찾을 수 있다. Fig. 7은 밸브 내 어느 위치에서 최대 압력이 발생하는지 도시한 그림으로 컬러맵의 범위를 최대 10,000psi로 설정하여 최대 압력의 발생 위치를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 출구 측 피스톤 링 근방 1차 내부 누설이 일어나는 위치에서 최대 압력이 발생함을 알 수 있다.

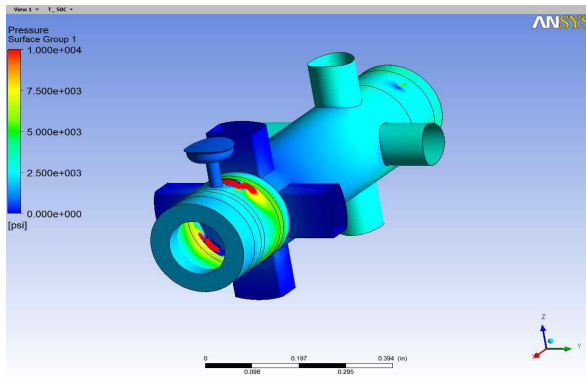
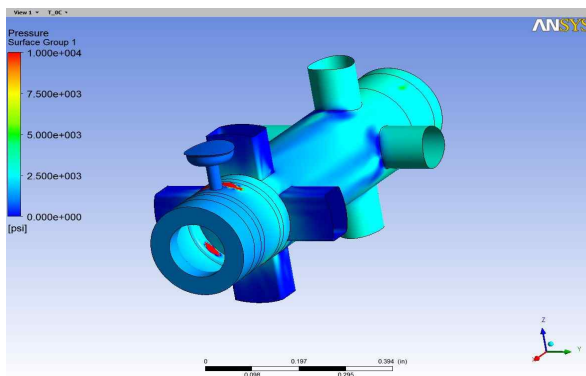
(a) Pressure Contour (-50°C)(b) Pressure Contour (0°C)

Fig. 7. Location of Maximum Pressure

내부 누설 해석의 경우, 정상 유동 해석 영역의 격자가 약 500만개 수준으로 5배 이상의 크기에 달하는 전체 유로 영역을 비정상 해석하기에는 어려움이 있었다. 정상 해석 결과에 따르면, 누설부에 작용하는 내부 압력을 제외하고는 밸브의 성능 계수는 약 10% 이하의 수치 변화를 일으켰으며 작동 온도에 따른 그래프의 형상은 동일하게 유지하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 작동온도 변화에 따른 비행조종작동기 제어용 파일럿 밸브 내부의 누설 특성을 해석하여 밸브 성능을 분석하였다.

밸브 내부 누설을 감안한 저항계수와 유량계수 결과에 따라 밸브 내부 누설 해석 시 밸브 성능 계수 변화는 전체적으로 비누설 해석 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 미세하게 작동유체가 누설 영역으로 유출된다는 것을 확인하였으나 누설 효과는 작동 온도에 따라 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

내부 누설 현상으로 인한 압력 상승률은 일정

온도 구간에서는 비슷한 경향을 보이다가 온도가 하강할수록 급격히 높아져서 앞서 언급한 -50°C 에서 이르러서는 최대 수치차를 나타내었다.

최대 및 평균 표면 압력이 상승한 이유를 유동 누설부에서 찾을 수 있다. 출구 피스톤 링 근방 1차 내부 누설이 일어나는 위치에서 최대 압력이 발생함을 알 수 있다.

슬라이드 스톱은 슬레노이드 압력 전달로 움직인다. 내부 누설 결과를 이용하여 스톱의 반응 속도와 저항계수와의 관계에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 항공우주부품기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Chern M. J., Wang C. C., and Ma C. H., "Performance test and flow visualization of ball valve," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, May 2007, pp. 505~512.
- 2) Kimura T., Tanaka T., Fujimoto K., and Ogawa K., "Hydrodynamic Characteristics of a butterfly valve - Prediction of pressure loss characteristics," *ISA Transactions*, Vol. 34, Dec. 1995, pp. 319~326.
- 3) Szenté V., and Vad J., "Computational and experimental investigation on solenoid valve dynamics," *IEEE/ASME International conference on advanced Intelligent Mechatronics*, July 2001, pp. 618~623.
- 4) Kajima T., "Development of a High-Speed Solenoid Valve: Investigation of the energizing circuits," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, Feb. 1995, pp. 1~8.
- 5) Menter F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, Aug. 1994, pp. 1598~1605.
- 6) Wilcox, D. C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA Journal*, Vol. 26, 1988, pp. 1299~1310.
- 7) ANSYS, Inc. *Theory Reference*, ANSYS Inc., Nov. 2004, pp. 273~275.