技術論文

DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.5.108

연료차단밸브의 열해석에 관한 수치적 연구

백낙곤*† · 이재윤*

A Numerical Study on Thermal Analysis of Fuel Shut-off Valve

Nakgon Baek*† · Jaeyun Lee*

ABSTRACT

Thermal and fluid flow characteristics in a fuel shut-off valve under operating conditions are studied numerically. The disk size of the valve has 15 mm diameters and maximum mass flow rate is 600 kg/h. The Analysis was performed in the commercial code, STAR-CCM+. This paper shows that results from the numerical analysis has a good agreement compared to experimental results.

초 록

연료차단밸브의 운용조건하에서 열 및 유체 특성을 수치적으로 연구하였다. 밸브의 크기는 15 mm이고 최대유량은 600 kph이다. 해석은 STAR-CCM+를 이용하여 수행하였다. 수치해석으로부터 얻은 결과는 시험치와 비교를 하였으며 전체적으로 peak에 도달하는 온도의 기울기는 유사한 경향을 보이며 온도값도 거의 일치를 하였다.

Key Words: Fuel Shut-off Valve(연료차단밸브), Thermal(열), Temperature(온도)

1. 서 론

연료탱크 관성압은 비행체의 순간적인 기동으로 큰 가속도에 의해 연료의 관성력이 연료탱크 내벽에 작용하면서 순간적으로 큰 압력의 상승을 가져오는 현상을 말하며, 그 크기는 가속도와 탱크 내 연료질량에 비례한다. 길이방향으로 서로 연결된 탱크에서 한 쪽 탱크에서 발생한 연료탱크 압력이 다른 쪽 탱크로 전달이 되면, 저압으로 설계된 연료탱크의 최대 허용압력을 초과하여 기체의 구조적 안전성에 치명적인 문제점을 발생시킬 수 있다. 따라서 이에 대한 대비책으로 비행체의 기동시 발생하는 연료탱크 압력의 전파를 제한할 수 있는 장치가 필요하게 되어 연료차단밸브를 개발하였다[1]. 연료차단밸브는 특성상 엔진으로 연료를 공급하기 위해서는 운용중에는 열리도록 하고 비행체의 고 기동시에는 연료차단밸브를 작동시켜 연료의 수두에 의한 관성이 탱크의 전방에서 후방으로 전파되

접수일 2011. 11. 30, 수정완료일 2012. 9. 3, 게재확정일 2012. 9. 7
* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부
† 교신저자, E-mail: ktx1fuel@hanmail.net
[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 앰배서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

지 않도록 동작시켜야 한다. 구조 특성상 연료의 관성압을 견딜 수 있는 압력을 산출하여 장착할 위치를 결정하며 특히, 축방향 가속도(관성)가 작용하지 않을 때에는 탱크사이에 위치한 연료차단밸브는 연료의 흐름에 방해되지 않도록 압력손실이 작게 설계되어야 한다. 본 논문에 적용된 연료차단밸브는 크게 솔레노이드 부와 볼 밸브 부로 구성되어 있는 전기식 제어밸브로서 다른 제어밸브와 달리 모터나 기어박스, 제어기 등을 사용하지 않고 경량화, 소형화, 단순화를 개발 목적으로 전원 공급에 의해 로터리 솔레노이드 내부 코일에 의해 자기력을 발생시켜 볼 밸브를 구동시키는 작동 원리로 설계되었다.

연료차단밸브는 전원을 인가 후 솔레노이드에서 발생하는 발열에 의하여 온도가 상승하고 이로 인하여 전류가 강하되어 구동할 수 있는 토크력이 감소되어 솔레노이드의 동작성능이 저하되거나 동작이 멈출 수도 있다. 그러므로 본 논문에서는 먼저 유량계수를 맞추기 위하여 볼 밸브부의 유동특성을 실험치와 비교한 후에 솔레노이드 내부의 온도분포를 계산함으로서 이 결과를 시험결과와 비교하여 연료차단밸브의 열/유동특성에 관한 수치적 계산을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 밸브 형상 및 모델링

2.1.1 설계조건

본 연구에 적용된 볼 밸브는 배관 내에 흐르는 연료를 차단하기 위한 목적으로 설계되었다. 기본 성능요구 조건은 Table 1과 같다. 볼 밸브가 완전히 개방되었을 때 통과하는 질량 유량은 600 kg/hr 조건을 만족하여야 한다.

2.1.2 3차원 형상 모델링 및 작동원리

전술한 성능요구조건을 만족하기 위해서, 유로를 차단해주는 역할을 하는 볼 밸브와 전기적으로 볼 밸브를 구동시켜 유로를 차단 또는 개방해주는 역할을 하는 로터리 솔레노이드를 결합한 형태의 간단한 구조의 밸브이다. 해석을 위한

Table 1. Performance requirements of ball valve

압력강하	질량유량	직 경
≦0.633 psid	600 kg/hr	15 mm

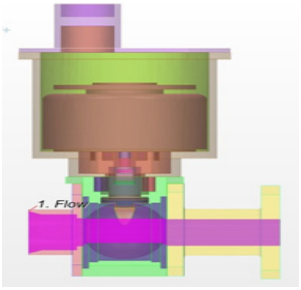

Fig. 1 Fuel shut-off valve configuration

밸브의 단면 및 유동의 3차원 모델링 형상은 Fig. 1과 같으며 볼 밸브는 설계 요구조건을 만족하는 형상이며 이 형상을 기준으로 모델링 하였다.

밸브 조립체는 전술한 바와 같이 밸브 디스크 구동을 위한 상단의 솔레노이드 조립체와 볼이 장착되는 하부의 몸체 조립체로 구성된다. 로터리 솔레노이드는 볼 밸브를 로터리 솔레노이드의 회전토크를 통해 열고 닫는 기능을 수행하는 밸브의 핵심 부품중 하나이다. 로터리 솔레노이드는 대기시 전원이 공급되지 않은 상태로 유지되다가 초기 전원을 인가하여 일정한 시간동안 작동 후 다시 Off 상태로 복귀하는 기능을 수행해야 한다. 볼 밸브는 회전 토크에 의해 밸브 Stem과 연결되어 있는 볼을 회전시켜 유로를 개방하거나 닫는 기능을 수행한다. 특히 회전 토크는 기밀을 수행하는 볼과 Seat와의 마찰력에 비례하며 사용 운용 압력에 따라 마찰력 정도를 결정할 수 있다. 또한 볼 내부 유로는 입구부로부터 들어온 유체가 통과하는 경로로 유량 및 압력 강하를 결정하는 요소가 된다.

2.1.3 압력강하

연료차단밸브는 연료배관에 설치되는 구성품의 하나로써 다른 부품들과 마찬가지로 연료흐름에 있어 유량을 제한하거나 압력손실을 가져오는 원인으로서 작용하게 되며 보통 유량이 증

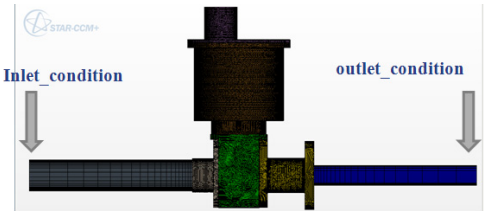

Fig. 2 Flow model

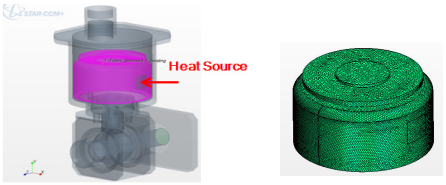

Fig. 3 Thermal model and grid

가할수록 압력강하가 증가한다[2]. 밸브 전/후단의 압력강하 특성을 모사하기 위하여 Fig. 2와 같이 해석영역을 설정하였다. 시험결과와 비교하기 위하여 입/출구의 면에서 센서측정위치인 0.1 m까지 Extrude option을 사용하여 해석영역을 설정하였고 유동특성을 파악하기 위하여 시험과 비교하였다.

연료차단밸브의 압력 강하량을 계산하였으며, STAR-CCM+에서 여러 가지 Parameter 값을 변경하여 실험값과 해석 결과를 맞추어 기본 설정을 설정하였다. 기준이 되는 실험값은 유량 설계조건인 600 kph에서 압력강하량(ΔP)은 0.633 psid 이며, 변경할 값은 Extrusion의 Layer 개수, Turbulent Viscosity Ratio, Turbulent Intensity, Dynamic Viscosity로 기본값은 각각, 20, 10, 0.01, 0.001375 로 설정하여 STAR-CCM+를 이용하여 세부 항목에 대한 해석을 수행하여 시험결과와 비교/검증하였다.

2.2 열 해석 조건

2.2.1 계산격자 생성

본 연구에 사용된 계산 격자계의 형태를 Fig. 3에 나타내었다. 우선 설계된 밸브의 해석 영역을 유동영역과 솔레노이드로 구성된 발열부 두 부분으로 나누어 수행하였다.

먼저, 압력 강하량을 계산하기 위하여 디스크

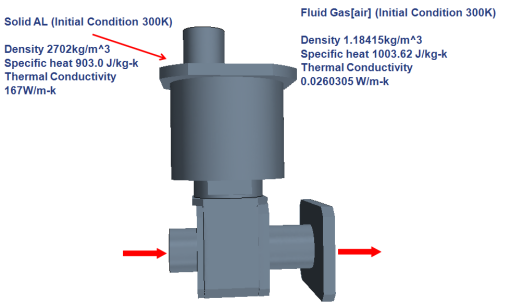

Fig. 4 Boundary condition

Table 2. Heat source boundary condition

발열면적(m^2)	발열량		
	KJ/hr	W	W/m^2
1.36×10^{-3}	5.0	1.39	1017.78

주위의 관 유동 해석을 위해 Wrapper 기능을 이용하여 유동이 흐르는 영역만을 모델링하였다. 또한, Polyhedral 형태의 격자를 사용하여 격자를 생성하였으며, 격자의 개수는 대략 130,000개이고 유동부의 압력강하 특성과 발열부의 열해석을 위한 수치해석을 수행하였다.

2.2.2 경계조건 및 계산과정

유동해석을 위해 상용코드인 STAR-CCM+ 5.01 버전을 이용하였으며[3], 볼 밸브 입/출구, 솔레노이드를 고려한 3차원 정상상태의 해석을 수행하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을 적용하였으며 주어진 Solid의 여러 파라미터를 입력하여, Fig. 3의 발열부인 솔레노이드의 작동 시간에 따른 온도변화를 예측하였다. 경계조건은 Fig. 4와 같다.

1분간 전원을 공급한 후, 약 900초간 밸브내부의 온도 변화를 측정하였으며, 5초 전원공급 및 5초 전원 공급 중단을 12회 반복하여 900초간 솔레노이드 내부 표면의 온도 변화를 계산하였다. 발열부의 경계조건을 정리하면 Table 2와 같다.

본 해석을 모델링하여 계산을 하기 위한 과정은 다음의 Fig. 5와 같으며 3D surface repair, 3D Surface grid generation, 경계조건 설정을

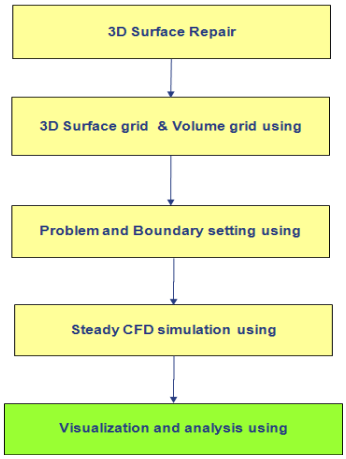

Fig. 5 Calculation process

Table 3. Pressure drop of ball valve

유량(KPH)	밸브에서의 압력강하(psid)	
	시 험	해 석
600	0.633	0.634

거쳐서 최종 CFD 시뮬레이션을 수행하여 결과를 얻었다[4].

3. 결과 및 분석

3.1 압력강하

2절의 Fig. 2처럼 계산영역을 잡아 밸브 전/후단의 압력 강하량을 계산하였다. 해석조건은 실험조건과 동일하게 입구온도 25℃, 600 KPH의 유량이 흘렀을 때의 조건을 기준으로 계산하였다. 밸브 전/후단의 압력강하 특성을 실험치와 해석치를 비교한 결과, 실험치는 압력강하(△P)가 0.633이고 동일한 조건에서 해석결과는 0.634로서 거의 동일하게 산출되었으며, 비교한 결과는 Table 3에 나타내었다.

3.2 온도분포

Figure 6은 하우징과 솔레노이드 표면에 장착한 센서의 위치를 나타낸 그림이다. Fig. 7, 8은 각 시험결과로서 1분 동안 전원공급을 한 경우

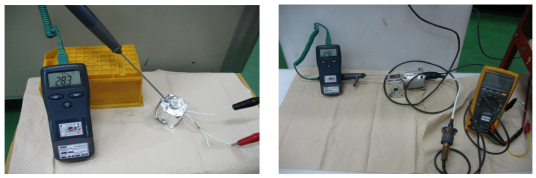

Fig. 6 Location of temp. sensor

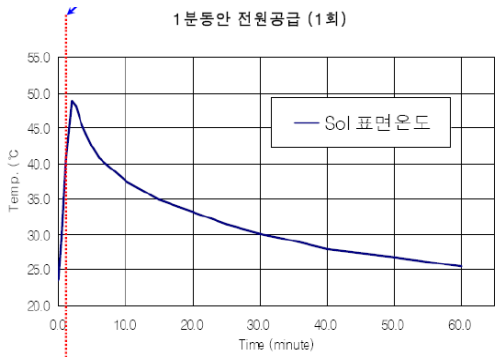

Fig. 7 Temperature distribution of solenoid(shut-off)

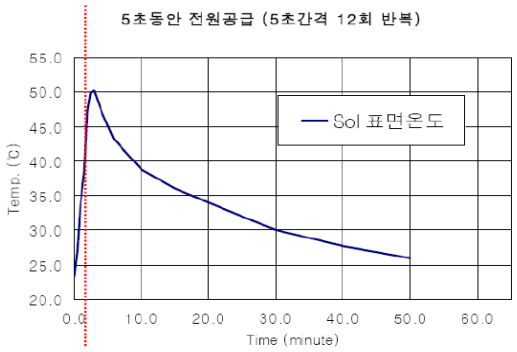

Fig. 8 Temperature distribution of solenoid(step shut-off)

및 5초 동안 12회 동작시켰을 경우의 솔레노이드의 표면온도를 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 1분 동안 공급하였을 경우 최고로 온도가 약 48℃까지 상승한 후에 계속 하강하여 약 30℃도달하는 데는 30분이 소요되며 초기온도인 25℃로 회복하는 데는 거의 1시간이 걸렸다. 적색은 연료차단밸브의 작동 제한시간으로서 약 35초가 설계제한시간으로 이 시간을 넘으면 내부 코일이 과열되어 기능상 영향을 주므로 작동중지 후 다시 작동하여야 하며 약 10분 후 재

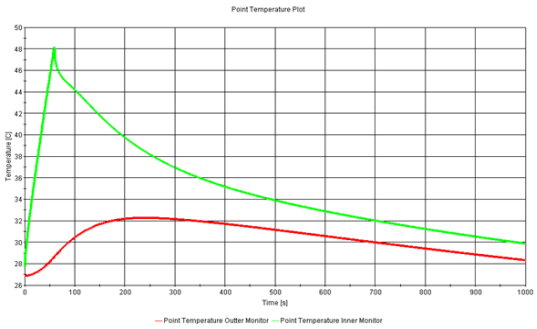

Fig. 9 Temperature distribution at shut-off

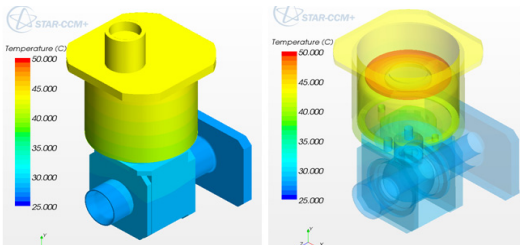

Fig. 10 3-D Temperature distribution at shut-off

동작이 가능하다.

계산결과, 밸브 내의 솔레노이드와 솔레노이드 외부 하우징의 표면온도 분포는 Fig. 9, 10, 11과 같이 결과를 얻었다. 먼저, Fig. 9, 10은 전원의 공급방법을 Shut-off로 하였을 경우의 온도분포를 나타낸 그림으로서 녹색은 솔레노이드 표면 온도를, 적색은 하우징의 표면온도를 나타낸다.

1분 동안 전원을 밸브에 공급하는 Shut-off 시의 경우는, 솔레노이드 표면온도 분포를 계산한 결과 peak를 치는 온도는 솔레노이드 동작시간과 비례하여 약 120초에 발생하여 Fig. 7의 시험결과보다도 약 1분 늦게 지연이 되어 발생을 하였으나 peak 온도는 약 48℃로 시험결과와 동일한 값을 나타내었다. 최대 발열시간이 시험과 차이가 나는 이유는 발열되는 부분의 차이에서 기인한다. 시험에서는 발열부인 솔레노이드가 코일을 통해서 열이 전달이 되므로, 솔레노이드 표면을 통해서 발열하는 지연시간이 존재하는 것이라고 판단된다. CFD 해석에서는 코일을 고려할 수가 없기 때문에 밸브의 표면에 발열을 주게 되므로 실제 시험결과 보다는 Peak Time이 짧

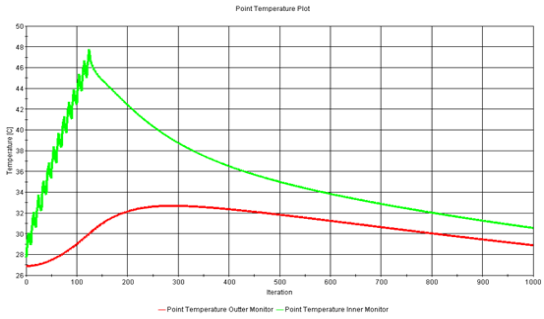

Fig. 11 Temperature distribution at step shut-off

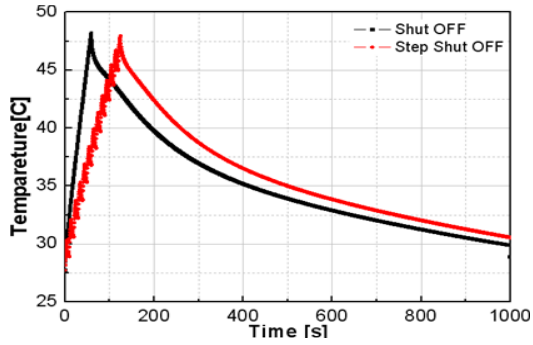

Fig. 12 Temperature distribution along time

게 된다고 판단된다. 전체적인 온도변화는 초기 온도는 급격히 상승을 하다가 서서히 감소하기 시작을 하여 주위온도 30℃기준으로 해석결과가 시험결과보다는 더 빨리 도달함을 알 수 있었으며 냉각하는 경향도 거의 유사한 결과를 얻을 수가 있었다.

Figure 11은 전원공급 방법을 Step Shut-off로 하였을 경우의 온도분포를 나타낸 그림이다. Step Shut-off 시에는 온도 Peak치가 Shut-off 의 경우보다도 60초 지연된 120초에서 발생하였으며 peak 온도는 약 48℃로 Shut-off 와 동일한 결과를 보이고 있다. 이는 유체와 고체의 열전도율 과 같은 물성치의 차이와 미흡한 경계조건에서 기인한다.

해석결과를 나타낸 Fig. 12로부터 2가지 모드(Shut-off, Step Shut-off)에서 전체적인 경향은 시험결과와 유사하며 다만 시험결과와 비교하여 솔레노이드의 모델링 차이로부터 오는 Peak를 치는 시간만 차이를 보일 뿐, Peak치는 거의 동

Table 4. Comparison of temperature distribution

	shut-off(℃)		step shut-off(sec)	
	시 험	해 석	시 험	해 석
peak 온도	48.1	48	50	48
peak 시간	120	60	150	120

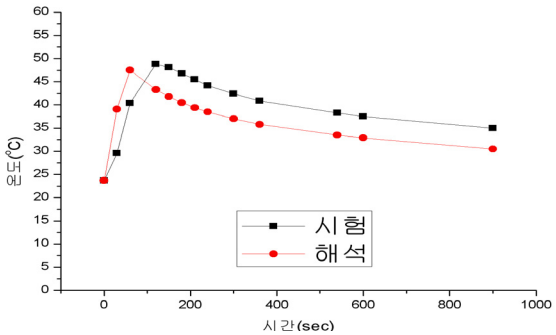

Fig. 13 Comparison of cal. and exp.

일하며 초기온도로 돌아오기 위하여 하강하는 기울기의 경향도 유사함을 알 수 있다. 이 결과를 Table 4 및 Fig. 13에 나타내었다. 해석과 시험의 Peak를 치는 시간이 차이를 보이는 이유는 해석에서는 off 시 바로 온도가 강하하지만 실제에서는 거의 유지를 하기 때문에 시험보다는 peak치 시간이 빠르게 나타난다. 좀 더 정확한 해석모사를 하려면 발열량을 서서히 주어야 함을 알 수 가 있다.

Shut-off의 경우에 설계조건 발열량, 10 kw/m^{2}를 기준으로 ±1 kw/m^{2}씩 변화시키면서 1분 동안의 온도분포를 Fig. 14에 나타내었다. 이 그림으로부터 발열량이 커질수록 최대온도는 비례하여 상승하며 9 kw/m^{2}시에는 46℃, 11 kw/m^{2}시에는 50℃이었다.

4. 결 론

본 연구는 설계 조건에 부합하는 경계조건을 입력하여 유량을 변화시켜 압력 강하량을 계산하였고, 발열부인 솔레노이드의 열 특성을 파악하고자 CFD 해석을 수행하여 시험결과와 비교

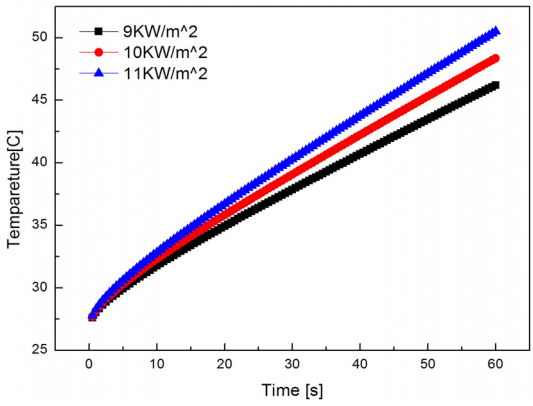

Fig. 14 Temperature distribution along heat source

검토하였다. 설계된 밸브의 해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 볼 밸브를 전후한 압력강하 특성을 해석한 결과 유량에 따른 압력강하 특성이 시험치와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
2) 1분 동안 전원을 밸브에 공급하였을 경우, 솔레노이드 표면온도 분포를 계산한 결과 최대 발열 온도는 동작시간과 비례하여 시험 및 해석결과 모두 동일하게 산출되었으나 최대 발열 시간은 차이를 보이고 있는데 이는 솔레노이드 코일의 모델링(경계조건의 구체화) 차이에 기인한다.
3) 발열량의 변화에 따른 온도분포는 발열량 1 kw/m^{2}의 증가에 따라서 최대 발열온도는 약 2℃씩 증가하였다.

향후, 수치해석 부분의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위해 발열부의 모델링 및 경계조건을 보완만 하면 실험을 통한 시험결과와의 비교·분석을 추가로 수행할 필요가 있으며, 시험도 추가적으로 여러 가지 검증을 통해 다양한 조건에 대하여 부수적으로 연구를 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 백낙곤, 최호진, 이세영, 김준태, “연료탱크

내압제한장치의 개발," 2011년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011, pp.2073-2076
2. Philip L. Skousen, 밸브 핸드북, 홍릉과학출판사, 2006, pp.131-133
3. STAR-CCD+, User Manual
4. Patanker, S.V,Numerical Heat Transfer, 1980