

자켓의 압력 및 두께 변화에 의한 진공 자켓 밸브의 유입 열량 변화에 관한 연구

김시범[†] · 이권희¹ · 전락원² · 도태완²

(원고접수일 : 2011년 2월 7일, 원고수정일 : 2011년 2월 21일, 심사완료일 : 2011년 3월 10일)

A Study on the Heat Flow Change of Vacuum Jacket Valve According to Pressure Change and Jacket Thickness

Si-Pom Kim[†] · Kwon-Hee Lee¹ · Rock-Won Jeon² · Tae-Wan Do²

요 약 : 최근 초저온 밸브 관련 산업의 급속한 발전과 함께 초저온 밸브에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있고 특히, 기계, 조선, 반도체 및 디스플레이 산업, 항공·우주산업분야의 비약적인 발전과 사용자의 요구 등으로 인하여 초저온용 밸브의 고성능화가 되고 있는 추세이나, 진공 단열에 관한 초저온 응용 장비들에 대한 기술개발 및 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 초저온용 진공자켓밸브의 스템 외부에 자켓 배관을 설치 한 후 낮은 압력을 유지함으로써 외부로부터 자켓 내부로의 유입 열전달량을 감소시키는 것에 주안점을 두었고, 효과적인 전열 제어를 위하여 외부로부터 자켓 내부로의 유입 열전달량을 감소시킬수 있는 자켓 내부의 압력과 자켓부의 두께 변화에 관한 열전달 특성을 3차원 수치해석적인 방법으로 연구하여 고찰하였다.

주제어 : 진공 자켓 밸브, 유입 열량, 증발가스

Abstract: Recently, continuous research on cryogenic valves is being carried out with the rapid development of the cryogenic valve-related industry, and especially, high performance of cryogenic valves is being promoted due to the breakthrough development and demand of users, etc., of the mechanical, shipbuilding, semiconductor and display industry and the aerospace industry field, but it is the reality that technical development and research on cryogenic application equipment on vacuum insulation are insufficient.

The present research focused on interception of heat exchange with the outside by keeping low pressure after installing a jacket pipe outside a stem and also considered heat transfer properties on changes in pressure of a vacuum part and radius of a jacket which can reduce heat exchange for effective heat transmission control by studying it in a three-dimensional numerical analysis method.

Key words: Vacuum-jacket valve, Heat flow in, BOG (boil-off gas)

1. 서 론

초저온용 진공자켓밸브는 초저온 설비의 액화 유
량 공급에 있어서 발생하는 밸브 내의 열의 침입을

진공시스템을 이용하여 차단함으로써 원활한 초저
온 가스의 공급 및 BOG 발생을 최소화하기 위해
사용된다[1-3]. 또한, 지구 온난화로 인한 각종 환

[†] 교신저자(동아대학교 기계공학과, E-mail: spkim@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7646)

¹ 동아대학교 기계공학과

² 동아대학교 기계공학과 대학원

경규제로 인하여 오염물질의 발생량이 적은 청정연료를 이용하고 있는 설비들에 주로 이용되고 있고 그 수요가 점차 확대되고 있는 추세이다[4]. 최근 초저온 밸브관련 산업의 급속한 발전과 함께 초저온 밸브에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있고 특히, 기계, 조선, 반도체 및 디스플레이 산업, 항공·우주산업분야의 비약적인 발전과 사용자의 요구 등으로 인하여 초저온용 밸브의 고성능화가 되고 있는 추세이나, 진공 단열에 관한 초저온 응용 장비들에 대한 기술개발 및 연구는 미흡한 실정이다 [5].

초저온용 밸브는 유체가 초저온이라는 특이성에 의해 제조 및 배관계에 설치 가동 할 때, 패킹의 경화로 인한 기능 상실 및 가스 누설 등의 큰 문제가 발생한다. 초저온 상태에서 가스 누설을 방지하기 위해 연성이 뛰어난 소재를 적용하더라도 경화에 의한 가스켓(Gasket)부위에 발생하는 유격에 의한 가스 누설을 완벽히 차단하는 것이 대단히 어렵다. 따라서, 최근에는 이러한 문제를 최소화하기 위하여 본네트의 구조나 길이를 늘려 내부 온도 제어를 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 [6-7].

초저온밸브의 경우 밸브 몸체를 통하여 흐르는 초저온액화가스의 냉기가 스템부 패킹을 경화시켜 기밀유지를 어렵게 하거나 조작 핸들 부위를 동결시켜 조작이 힘들어지는 것을 방지하기 위하여 스템부를 확장시켜 초저온가스의 냉기가 패킹이나 핸들에 전달되지 않도록 표면적을 넓혀 열전달을 촉진하는 설계의 경우도 있다. 그러나 진공자켓밸브는 외부에서 밸브의 본네트로 침입하는 열량이 클 경우 BOG(Boil Off Gas) 발생에 의한 가스 누설의 우려가 있기 때문에 열을 차단하여 BOG 발생을 억제 시킬 수 있도록 한다.

본 연구에서는 스템 외부에 자켓을 덧씌우고 자켓 내부에 낮은 압력을 유지함으로써 외부로부터 자켓 내부로의 유입되는 열전달량을 감소시키는 것에 주안점을 두고 자켓 내부의 압력 변화, 자켓부의 두께 변화에 의한 유입 열량의 변화에 대하여 연구하였다.

2. 해석모델 및 경계조건

2.1 해석모델

진공자켓밸브의 형상은 Figure 1과 같다. 자켓부의 열전달 특성의 고찰이 본 연구의 주안점 이므로 하부의 바디와 디스크 시트 및 스템 상부는 해석에서 제외하고 수치해석적인 방법을 이용하여 단열 성능 향상 효과를 얻을 수 있는 자켓 내부의 압력 및 자켓부의 두께(반경)를 연구하기 위해 자켓부의 형상을 모델링 하였다.

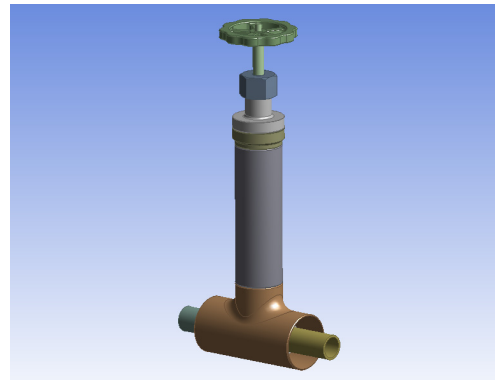


Figure 1: Model of vacuum jacket valve

본 연구에서 사용된 밸브의 자켓 및 스템 형상을 Figure 1~2에 나타내었다. 진공 자켓 부의 형상을 기준으로 자켓의 두께 변화에 따른 유입 열량의 변화를 고찰하기 위해 자켓부의 두께를 7.5mm, 12mm, 15mm, 22.5mm, 30mm로 선정하였다.

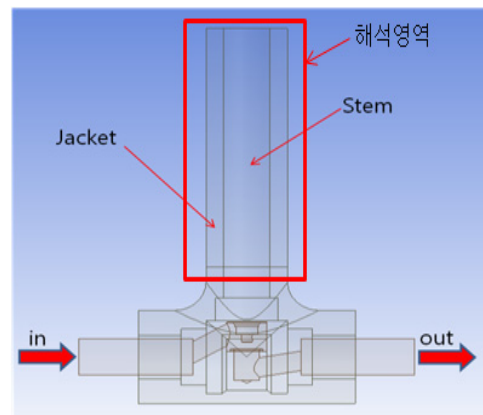


Figure 2: Schematic diagram of jacket valve

2.2 경계조건

본 연구에서 수행된 3차원 수치해석은 상용코드인 ANSYS CFX V12를 사용하였다. 해석대상의 모델링은 Solidworks로 수행하였고, 수치해석 시 중요한 격자생성의 용이성 및 해의 정확도가 높은 ICEM-CFD를 선택하여 유한요소모델링을 하였다. 상부 벽면에서의 경계조건은 단열경계조건을 설정하였고, 자켓 외부 벽면은 대류조건을 설정하였다. 자켓 내부 유체는 공기로 설정하였고, 3차원 정상상태의 층류유동이다.

자켓 주위에 발생하는 유동 및 열전달 현상에 대한 검토를 위해서 주위 공기 측에 대해서도 유동해석을 해야 하지만, 모델에서 고려한 밸브의 실제 사용 환경이 수직 원통 주위의 거의 정지된 공기이므로 적절한 대류 열전달 계수를 도입하여 근사적 계산을 하였다.

자켓 내부의 압력이 낮아질수록 전도와 대류에 의한 열전달은 감소하고 복사열전달이 영향을 미치므로 자켓 내·외부의 벽면 및 스템 표면에서 복사조건을 추가로 설정하였다.

수치해석에 필요한 경계조건을 외부 온도 25°C에서 대류열전달계수 $h=10\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용하고, 밸브의 소재인 스테인리스강의 복사능 $\epsilon=0.035$ 를 적용하여 압력 $P=0.2\sim 1\text{ atm}$ 범위에서 0.2atm씩 증가시켜 압력 변화에 의한 유입 열량의 변화를 고찰하였다. 본 연구의 수치해석에서 변수는 자켓부의 두께와 압력이며 그 내용은 Table 1에 나타내었다.

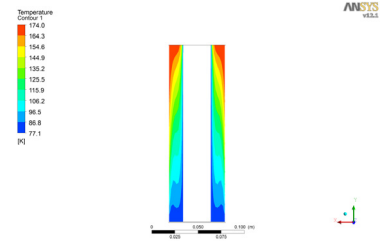
Table 1 : Variable for analysis

R \ P	0.2atm	0.4atm	0.6atm	0.8atm	1atm
7.5mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm
12mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm
15mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm
22.5mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm
30mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm	L=190mm

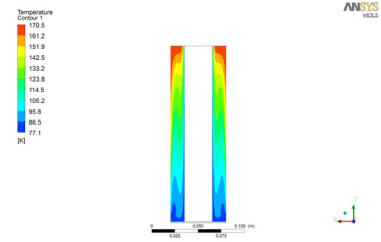
3. 해석결과

3.1 자켓 내부의 압력변화에 따른 결과

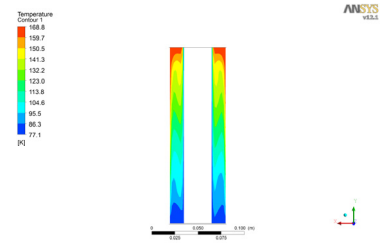
3차원 수치해석으로 구한 열전달 특성에 관련된



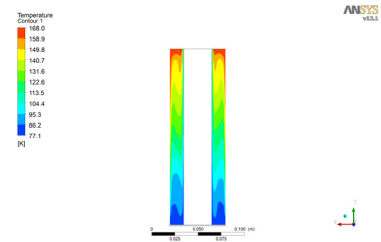
(a) P=0.2atm



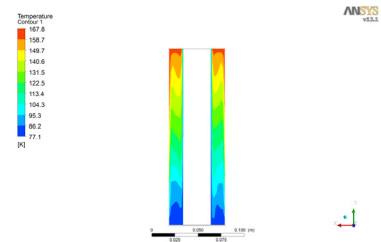
(b) P=0.4atm



(c) P=0.6atm



(d) P=0.8atm



(e) P=1atm

Figure 3: Temperature distribution of flow region for D=15mm

결과를 자켓 내부의 압력 변화에 따라 비교하여 고찰하였다. 이 때 자켓 내부의 압력은 0.2atm, 0.4atm, 0.6atm, 0.8atm, 1atm으로 적용하였다.

Figure 3는 수치해석 결과, 자켓부의 두께가 15mm일 경우 자켓 내부의 압력 변화에 따른 내부 유동영역의 온도분포를 이미지화 시켜 청색인 저온부에서 적색인 고온부까지 -196℃부터 10개의 간격으로 나타내었다.

그림에서 보는것처럼 자켓 내부의 압력이 높아짐에 따라 유동영역의 온도분포는 낮아지는 경향을 보이므로 자켓 내부의 압력이 낮을수록 압력이 높을 때 보다 유입 열량이 감소되었다. 따라서 외부로부터 자켓 내부로의 유입 열전달량은 압력이 낮을수록 작다는 것을 알 수 있다. Figure 4는 자켓 내부의 압력변화에 따른 최대온도의 변화를 자켓부의 두께 별로 나타낸 것이고, Figure 5은 수치해석으로 구한 온도 데이터를 자켓 내부의 압력 변화에 따른 자켓 내부로의 유입열량을 나타낸 것이다. 동일한 자켓 두께에서 압력이 높아질수록 유동영역의 온도가 낮아지는 경향을 확인 할 수 있다. 자켓부의 두께가 12mm의 경우 압력 1atm에서 0.2atm으로 변화함에 따라 약 23.61%의 유입열량이 감소하는 것을 확인하였다. 이것은 압력이 높아짐에 따라 내부 유동영역에서 압력이 낮은 경우보다 열전달이 잘 일어나는 것을 의미한다.

Figure 3의 온도분포에서 살펴보았듯이, 같은 두께의 경우 자켓 내부의 압력이 낮으면 외부로부터 자켓 내부로의 유입 열량이 작다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 자켓 내부의 압력이 낮을수록 전도와 대류에 의한 열전달의 영향이 감소하는 것으로 사료된다. 본 연구 결과 동일 두께일 경우, 외부에서 자켓 내부로 유입하는 열량이 자켓 내부의 압력 P=0.2atm에서 가장 작다. 자켓부의 두께가 12mm의 경우, 압력 0.2atm에서 0.4atm로 증가함에 따라 유입열량은 약 0.93% 감소하였다. 따라서, 자켓부의 두께가 동일 할 경우 자켓 내부의 압력은 P=0.4atm인 경우가 본 연구에서 수치 해석한 변수 범위 중 최적 조건이라 사료된다.

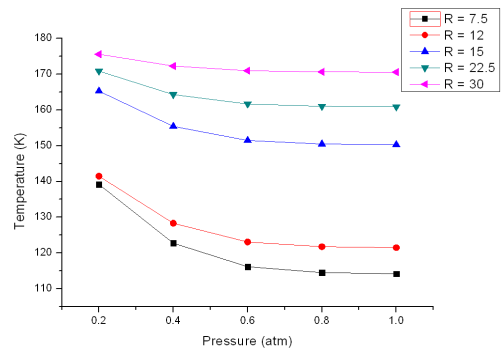


Figure 4: Temperature variation according to the Pressure change inside jacket

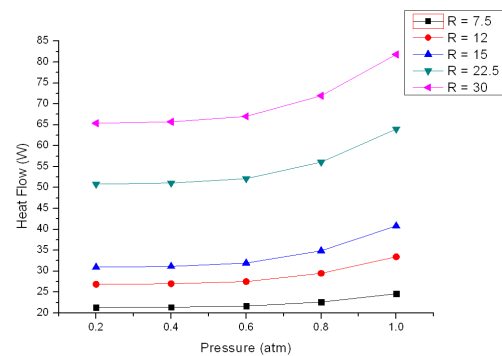


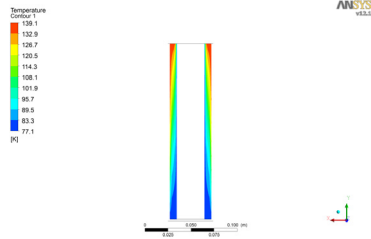
Figure 5: Heat flow into jacket surface according to the Pressure change inside jacket

3.2 자켓부의 두께에 따른 결과

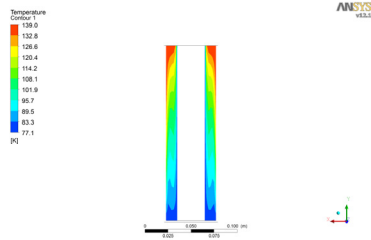
자켓부의 두께를 7.5mm, 12mm, 15mm, 22.5mm, 30mm로 적용하여 두께 변화에 따른 유입 열량의 변화를 수치해석한 결과를 고찰하였다.

Figure 6은 수치해석 결과, 동일 압력 P=0.4atm을 적용하였을 때 자켓부의 두께 변화에 따른 내부 유동영역의 온도분포를 나타낸 것이다.

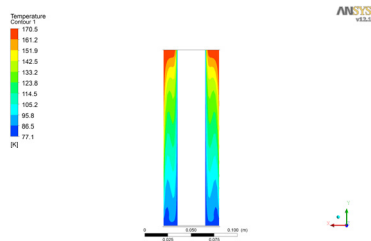
그림에서 보듯이 자켓부의 두께가 커짐에 따라 유동영역의 온도는 높아지는 경향을 보이므로 자켓부의 두께가 클수록 유입 열량이 감소되는 것을 알 수 있다. 같은 압력일 경우 두께가 커지면 열저항의 증가에 의해 열전달이 감소 되는 것으로 사료된다. 수치해석으로 구한 온도 데이터를 사용하여 자켓부의 두께 변화에 따른 온도 변화를 Figure 7에 나타내었고, Figure 8에 자켓부의 두께변화에 따른 주위 공기로부터 자켓 내부로의 유입 열량 변화를 나타내었다.



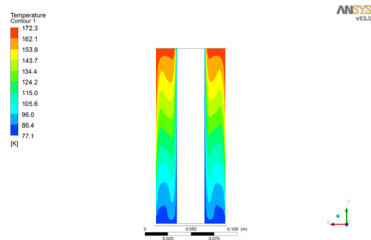
(a) D=7.5mm



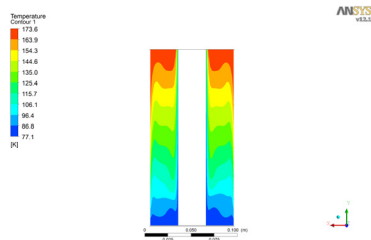
(b) D=12mm



(c) D=15mm



(d) D=22.5mm



(e) D=30mm

Figure 6: Temperature distribution of flow region according to the Thickness change, P=0.4atm

자켓 내부가 동일 압력 0.4atm일 경우, 자켓부의 두께가 7.5mm에서 12mm로 증가함에 따라 외부로부터의 유입 열량은 약 42.13% 감소하였고, 12mm에서 15mm로 증가함에 따라 유입 열량은 약 25.8% 감소하였다.

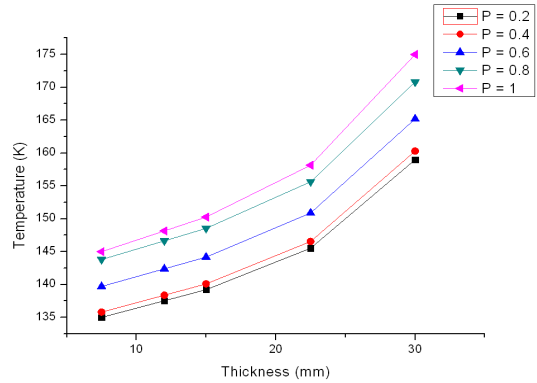


Figure 7: Temperature variation according to the Thickness change

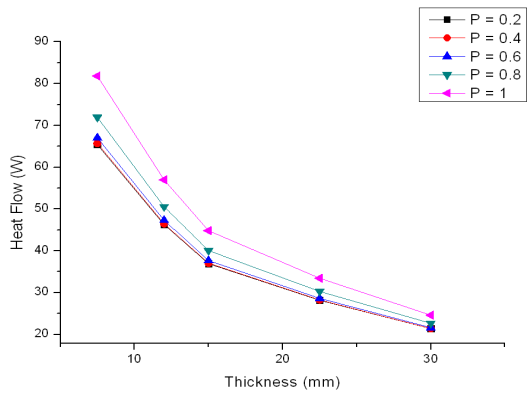


Figure 8: Heat flow into jacket surface according to the Thickness change

따라서, 동일 압력일 경우 외부에서 자켓 내부로 유입되는 열량이 자켓부의 두께 D=30mm에서 가장 적으나, 두께가 지나치게 클 경우 제품 제작 시 재료비 증가 및 자켓 내부의 저압력 유지에 따르는 단점이 있기 때문에 자켓 부의 두께를 설정할 때는 이 점을 동시에 고려하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

초저온용 진공자켓밸브 내부의 열전달 특성을 연구하기 위하여 단열 성능에 영향을 미치는 변수로서 자켓 내부의 압력 0.2atm~1atm, 자켓의 두께 7.5mm~30mm의 변화에 따르는 열전달 특성을 수치해석으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자켓 내부의 압력이 낮을수록 내부 유동 영역의 온도가 자켓 내부의 압력이 높은 경우보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 유입 열량은 압력이 가장 낮은 0.2atm의 경우가 가장 적었다.

(2) 압력 0.2atm에서 0.4atm로 증가함에 따라 유입열량은 약 0.93% 감소하였다. 따라서 P=0.4atm 이하일 경우, P=0.2atm 대비하여 유입 열량의 변화가 거의 없으므로 P=0.4atm의 경우가 최적 압력으로 판단된다.

(3) 자켓의 두께와 스템 반경의 비(D/r)=4인 경우인 D=30mm에서 내부 유동영역으로의 유입 열량이 가장 적어 단열 성능이 가장 우수하다는 것을 확인 하였다.

(4) 두께가 클수록 제작 시 재료비 증가 및 저압력 유지에 어려움이 있으므로 적정 자켓의 두께를 선정하는 것이 중요하다.

후 기

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

[1] Brian Nesbitt, "Handbook of valves and actuators", Elsevier in Association with Roles & Associate Ltd., Valves Manual international, pp. 43-68, 2007.
 [2] Philp. L Skousen, "Valve Handbook", McGraw-Hill Press, pp. 1248-1255, 2006.
 [3] 정석 외 2명, "천연가스 격납장치 및 해상 운송 체계에 관한 기술동향 분석", 과학기술부, 한국 과학기술정보연구원, pp. 10-46, 2005.
 [4] Eleftherakis, John G., "Determining

valve contaminant sensitivity effect using two contaminants", SAE TP 910960, pp. 459-464, 1991.

[5] "수소액화 및 저장 시스템 개발", 통상산업부, pp. 89-90, 1996.
 [6] 김시범 외 4명, "초저온용 게이트 밸브의 Bonnet 최적 길이 설계를 위한 열전달 해석", 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 205-208, 2010.
 [7] 김동균 외 1명, "LNG선박용 글로브 밸브 구조 해석에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지 제31권, 제8호, pp. 1013-1019, 2007.

저 자 소 개



김시범(金施帆)

1956년생, 1979년 서울대학교 기계공학과(공학사), 1981년 서울대학교 기계공학과(공학석사), 1985년 서울대학교 기계공학과(공학박사), 현재 동아대학교 기계공학과(교수), 한국냉열에너지학회 부회장, 관심분야 : 공기조화, 열공학



이권희(李權熙)

1963년생, 1989년 한양대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1991년 한양대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1997년 한양대학교 기계설계학과 졸업(공학박사), 현재 동아대학교 기계공학과(부교수), 관심분야 : 최적설계



전락원(全樂元)

1982년생, 2008년 동아대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2011년 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학석사), 현재 동아대학교 기계공학과 대학원 재학 중.



도태완(都泰完)

1985년생, 2009년 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학사), 현재 동아대학교 기계공학과 대학원 재학 중.