

# 극저온용 컴팩트형 니들밸브의 히트싱크 치수 최적화를 위한 사례 연구

강수정<sup>1</sup> · 강효림<sup>1</sup> · 한승호<sup>1†</sup> · 박주환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)에스지티

## Case Study on Size Optimization of Heat Sink Used in Cryogenic Compact-type Needle Valve

SU JUNG KANG<sup>1</sup>, HYO LIM KANG<sup>1</sup>, SEUNG HO HAN<sup>1†</sup>, JU HWAN KWAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea  
<sup>2</sup>SGT Inc, 71 Mieumsandan 5-ro 41beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46744, Korea

†Corresponding author :  
shhan85@dau.ac.kr

Received 28 October, 2024  
Revised 24 November, 2024  
Accepted 3 December, 2024

**Abstract >>** A cryogenic valve is designed to accommodate working fluids such as liquid nitrogen and liquid hydrogen. At cryogenic temperatures, changes in gasket tolerance due to the hardening of packing materials can lead to leakage. To address this issue, an extended bonnet structure is typically employed to position the packing as far from the flow path as possible, thereby preventing the hardening of the packing material. However, the increased length of the extended bonnet poses significant challenges for valve installation in confined spaces. As an alternative, a compact-type valve with a significantly shorter extended bonnet is being developed using heat sinks. In this study, a heat transfer analysis for the compact-type needle valve was conducted to evaluate the extent of packing freezing, which can cause leakage, and to optimize the heat sink design to minimize freezing. Case studies were performed to analyze the effects of various design variables on the temperature increase of the packing. The results demonstrated that the thickness of the heat sink significantly influenced the temperature increase of both the packing and the stem top, effectively contributing to the prevention of leakage and valve operation failure.

**Key words :** Compact-type needle valve(컴팩트형 니들밸브), Heat sink(히트싱크), Heat transfer analysis(열전달 해석), Liquid hydrogen(액체수소), Size optimization(치수 최적화)

## 1. 서 론

니들밸브(needle valve)는 바늘 모양의 회전용 플

러그가 스템 끝단에 설치되어 조작부 핸들의 회전에  
로 밸브 바디의 오리피스를 열고 닫음으로써 유량  
제어 및 유로 차단의 용도로 사용하는 밸브이다<sup>1)</sup>. 최

근 극저온 작동유체인 액체질소, 액체수소의 저장 및 이송을 위한 설비에 니들밸브의 적용을 위하여 다양한 시도가 이루어지고 있다. 액체수소는 기체수소 대비 1/800 수준의 부피로 축소되어 저장 및 이송 측면에서 유리하다<sup>2)</sup>. 그러나 액체수소는  $-253^{\circ}\text{C}$ 의 극저온에서 운용됨에 따라 니들밸브의 스템 및 외부에 노출된 조작부가 결빙되어 작동 불능이거나 패키지의 경화로 인한 가스켓 주위의 유격으로 누설이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 밸브 바디의 본넷 길이를 길게 설계한 확장형 본넷(extended bonnet) 구조가 적용되고 있다<sup>3)</sup>. 그러나 확장형 본넷형 밸브에서 극저온 유체와 외부의 온도차에 의한 열응력 및 열변형이 발생할 수 있어 이에 대한 연구가 수행되고 있다.

Kim 등<sup>4)</sup>은 선박용 글로브밸브를 대상으로 작동유체가 액체질소인 경우 열전달 해석 결과를 고려한 구조 해석을 수행하여 본넷과 스템 상부의 온도차로 인한 큰 열변형이 발생함을 수치적으로 확인하였다. Jeong 등<sup>5)</sup>은 초저온용 확장형 본넷 글로브밸브의 열전달 및 열변형 특성을 고려한 형상 최적 설계를 수행하였다. 본넷의 길이와 두께를 설계변수화하고 열전달 해석으로 얻은 결과를 통해 본넷의 길이가 길어질수록 조작부의 온도가 상온에 가까워지고 본넷의 두께가 증가할수록 본넷 주위의 응력이 감소하는 것을 확인하였다. 아울러 조작부 및 실링의 온도 그리고 내압 및 열변형에 의한 응력을 고려한 형상 최적 설계로부터 확장형 본넷의 길이와 두께를 제시하였다. Li 등<sup>6)</sup>은 액체수소용 볼밸브를 대상으로 과도 열전달 해석을 수행하여 시간 경과 및 유량 변화를 고려한 밸브 부품의 온도 분포를 평가하였다. 확장형 본넷의 상단부 온도는 시간의 경과와 관계없이 상온을 유지하며 조작부의 온도는 동결이 일어나지 않는 범위로 나타났다. 그리고 액체수소의 유량이 증가할수록 온도구배 및 열응력은 커지는 경향을 보여주었다.

상기 연구 사례에서는 확장형 본넷을 적용한 밸브의 열전달 특성을 평가하여 조작부의 온도가 상온을 유지해 동결되지 않는다는 점을 보여주었으며 확장형 본넷의 길이와 두께를 최적화하여 열응력 감소를

위한 설계안을 제시하였다. 그러나 열전도를 고려한 확장형 본넷의 형상 최적화에도 불구하고 확장형 본넷은 밸브 바디에 비해 과도한 길이를 유지하여 하므로 설치 공간이 협소한 곳에서는 사용에 제약이 따르게 된다. 따라서 확장형 본넷의 길이를 대폭 줄이고 열전달 특성을 개선할 수 있는 추가적인 방법에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 확장형 본넷에 히트싱크(heat sink)를 설치하여 본넷의 길이를 대폭 줄인 컴팩트형 니들밸브를 제안하였다. 상온의 대기와의 접촉 면적이 넓은 원반 형상의 히트싱크는 열전달을 통해 조작부와 패키지의 동결을 방지할 수 있으며 이를 통해 본넷의 길이가 짧은 형상으로의 설계가 가능하다. 히트싱크에서의 대류 및 전도 그리고 본넷에서의 전도를 고려한 열전달 해석이 진행되었으며 조작부와 패키지의 동결을 방지하는 히트싱크 형상의 치수 최적화를 위한 사례 연구가 수행되었다.

## 2. 컴팩트형 니들밸브 및 열전달 기구

### 2.1 컴팩트형 니들밸브

컴팩트형 니들밸브는 Fig. 1과 같이 히트싱크가 추가되어 기존의 확장형 본넷 대비 길이가 짧은 구조적 특징을 갖고 있다. 구성품은 바디(body), 본넷(bonnet), 디스크(disk), 스템(stem), 핸들(handle), 패키징(packaging) 및 히트싱크 등으로 이루어져 있다. 스템과 디스크는 볼(ball)로 연결되어 있어 스템에 극저온 유체가 직접적인 영향을 미치지 않는다. 이를 통해 스템과 연결되어 있는 패키징 및 조작부가 극저온의 영향을 적게 받도록 할 수 있다. 히트싱크 주위에서 극저온 작동유체에 의한 열전달 기구의 특성은 Fig. 2와 같이 대류 및 전도로 나타난다. 히트싱크는 원반 형태로 밸브 크기의 면간거리 기준을 넘지 않도록 외경은 140 mm, 두께는 1 mm이며 패키징이 설치된 본넷 외부 상하 두 곳에 설치되어 있다.

컴팩트형 니들밸브에 사용된 소재의 물성치는 Table 1과 같다. 패키징을 제외한 모든 구성품의 소재

는 극저온 환경 및 액체수소용 기소재에 주로 사용되는 SUS 316으로 낮은 열전도율과 열팽창계수를 가지고 있다. 히트싱크 또한 같은 소재로 제작하여 같은 열팽창계수를 가짐으로써 연결부에 발생할 수 있는 열응력을 최소화하였다<sup>7)</sup>. 한편 누설 방지를 위하여 적용된 패키징의 소재는 SUS 316의 열전도율과 열팽창계수와 유사한 값을 갖는 그래파이트(graphite)로 국부적인 열응력 집중에 의한 패키징의 파손을 방지할 수 있다<sup>8)</sup>. 또한 상하부 패키징(upper/lower packing)과 패키징 글랜드(packing gland)의 소재는 열전도율이 낮은 polychlorotrifluoroethylene (PCTFE)과 polyetheretherketone (PEEK)으로 액체수소에 의한 극저온 환경이 조작부로 전달되지 않도록 적용하였다<sup>9)</sup>.

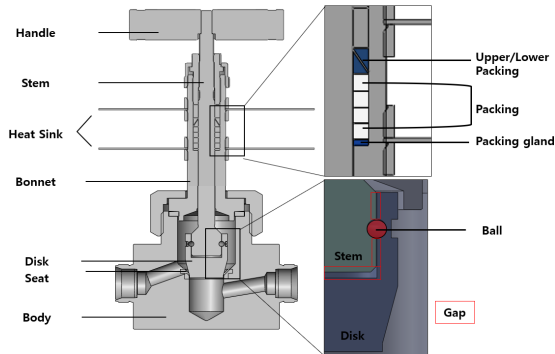


Fig. 1. Cross-section view of compact-type needle valve

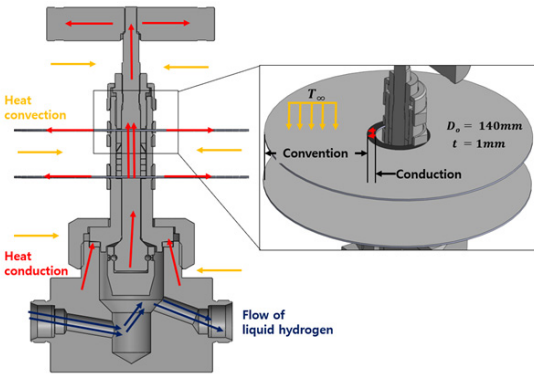


Fig. 2. Schematics of heat transfer and detailed configuration of heat sink

## 2.2 열전달 기구

컴팩트형 니들밸브에서 작동유체에 의하여 나타나는 열전달 기구는 Fig. 2와 같이 전도와 대류로 구분된다. 전도는 밸브 구성품의 단면을 통해 열이 전달되는 과정이, 특히 밸브 구성품 간의 접촉면 및 본넷과 히트싱크가 체결된 단면에서 발생한다. 전도 열전달은 사용된 소재의 열전도율에 따라 전달 속도와 효율이 결정된다. 한편 대류는 밸브 주위 대기와의 열전달 기구로 대기와 접하는 밸브 바다, 본넷 그리고 히트싱크의 표면에서 나타난다. 대류 열전달 기구는 극저온의 작동유체에 의한 조작부와 패키징의 동결로 작동 불능 및 누설 발생 방지에 중요한 역할을 한다.

전도에 의한 열전달은 Fourier 열전도 법칙<sup>10)</sup>으로 나타낼 수 있으며 열전달량  $q_{cond}$ 는 열전도율  $k$ , 단면적  $A$ , 온도구배  $\frac{dT}{dx}$ 에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

기존 확장형 본넷 구조의 밸브는 늘어난 본넷 및 스템의 길이로 온도구배 항의  $dx$ 가 증가하고 이는  $q_{cond}$ 의 저감으로 이어져 작동유체의 열에너지가 조

Table 1. Material properties of used materials

Parts name	Material	Density $g/cm^3$	Thermal conductivity $W/m \cdot K$	Thermal expansion coefficient $/K$
Body	SUS 316	8.0	16.20	$18.2 \times 10^{-6}$
Bonnet				
Stem				
Disk				
Handle				
Heat sink				
Upper/lower packing	PCTFE	2.1	0.20	$7.0 \times 10^{-5}$
Packing gland	PEEK	1.3	0.25	$5.0 \times 10^{-5}$
Packing	Graphite	2.3	25.00	$25.0 \times 10^{-5}$

작부와 패키징으로의 전달을 최소화하는 방법으로 설계되었다. 그러나 본 연구에서 제시한 컴팩트형 니들밸브에서는 본넷 및 스템의 길이가 짧아짐에 따라 온도구배가 증가하여 기존 확장형 본넷 구조의 밸브 대비  $q_{cond}$ 가 증가한다<sup>11)</sup>. 따라서 히트싱크 설치를 통해 대류 열전달을 고려한 추가적인 열제어가 필요하다.

대류에 의한 열전달량  $q_{conv}$ 은 Newton의 냉각 법칙<sup>12)</sup>으로 얻어지며  $q_{conv}$ 은 대류 열전달계수  $h$ , 표면적  $A_s$ , 표면 및 대기의 온도차인  $T_\infty - T_s$ 를 고려하여 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$q_{conv} = hA_s(T_\infty - T_s) \quad (2)$$

대류 열전달을 통한 컴팩트형 니들밸브 조작부와 패키징의 온도 상승은  $q_{conv}$ 가 커져야 하므로 대기와 접하여 대류가 발생하는 히트싱크 표면적  $A_s$ 를 증가시켜야 한다. 따라서 컴팩트형 니들밸브에서 본넷 및 스템의 길이가 짧아 증가한 전도 열전달량  $q_{cond}$ 에 대응하는 대류 열전달량  $q_{conv}$ 을 확보하기 위한 히트싱크의 형상 설계가 필요하다.

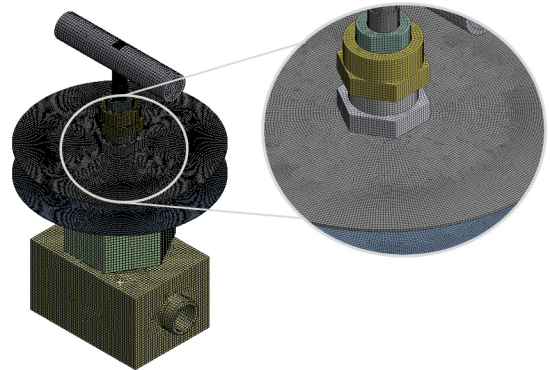
### 3. 열전달 해석

#### 3.1 해석 전처리

컴팩트형 니들밸브에서 작동유체인 액체수소에 의하여 밸브의 스템 및 상부의 조작부가 동결되어 작동 불능과 더불어 패키징에 유격이 발생하여 누설이 발생할 수 있다. 따라서 극저온 환경에서 밸브의 각 부품에 발생하는 온도 분포를 평가하여 조작부 및 패키징의 동결 여부를 판단하기 위해 상용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench (Ansys, Canonsburg, PA, USA)<sup>13)</sup>를 활용하여 열전달 해석을 수행하였다.

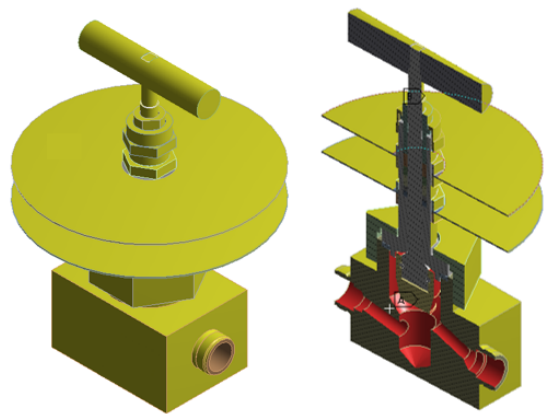
열전달 해석의 전처리를 위한 격자 구성 및 해석 조건은 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 유한요소 모델의 격자 구성 모습으로 해석의 정확도가 비교적 높은 육면체 요소가 적용되었으며 대류 열전달이 주로 나

타는 히트싱크 표면부의 격자는 조밀하게 생성되었다. 유한요소 모델의 전체 요소 및 노드의 수는 1,610,894개 및 5,205,897개이다. 한편 Fig. 3(b)는 열전달 해석에 적용된 경계 조건으로 밸브의 내부 유로 표면에 액체수소의 작동 온도인  $-253^\circ\text{C}$ 를 부여하였다. 대기와 접하는 밸브 바디, 본넷 그리고 히트싱크의 표면에는 자연 대류 조건을 적용하였다. 대기 온도 및 대류 열전달 계수는 일반적으로 사용되는  $22^\circ\text{C}$  및  $0.0001 \text{ W/mm}^2\cdot\text{K}$ 라고 하였다. 그리고 열전달 해석 시 필요한 각 구성품의 물성치는 Table 1과 같다.



(a)

- A Temperature:  $-253.^\circ\text{C}$
- B Convection:  $22.^\circ\text{C}$ ,  $1. \text{e-}005 \text{ W/mm}^2\cdot^\circ\text{C}$

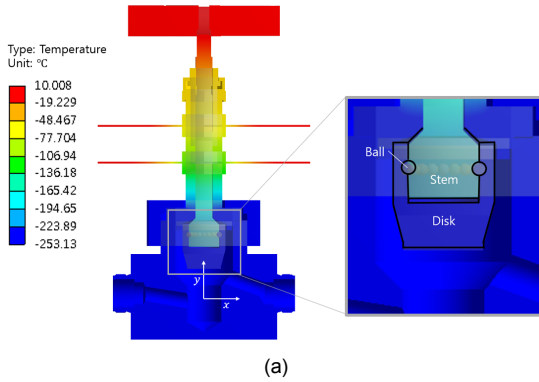


(b)

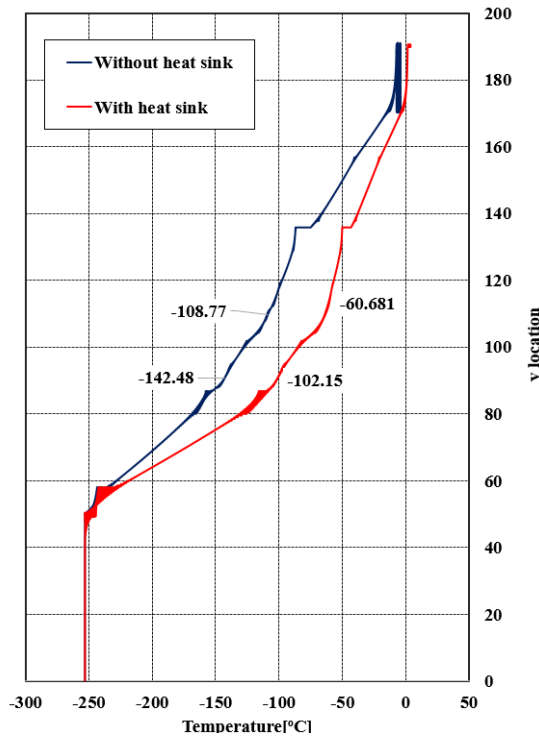
Fig. 3. (a) Grid generation and (b) boundary conditions for heat transfer analysis

### 3.2 해석 결과

Fig. 4는 열전달 해석의 결과로 Fig. 4(a)는 밸브의 유로 중심부를 기준으로 x-y 평면상의 온도 분포이다. 액체수소와 접하는 유로의 단면과 근접한 바디 및 디스크의 온도는  $-253^{\circ}\text{C}$ 이며 스템에 액체수소의



(a)



(b)

**Fig. 4.** Results of heat transfer analysis of compact-type needle valve. (a) Contour plot of temperature distribution. (b) Temperature variation from the center of flow path in vertical axis of y.

직접적인 열전달 효과를 제한하는 볼에 의하여 스템의 최저 온도가  $-233^{\circ}\text{C}$ 로 액체수소의 온도 대비  $30^{\circ}\text{C}$  이상 높은 것을 알 수 있다. 아울러 밸브 구성품 간의 전도 및 대기와 접촉된 표면적에서 발생하는 대류 열전달에 의하여 유로 중심부에서 y-방향으로 멀어질수록 온도가 상승하며 핸들과 히트싱크의 가장자리에서 가장 높은 온도가 나타났다. 한편 히트싱크의 설치 유무에 따른 열전달 효과를 비교하기 위하여 Fig. 4(b)에 밸브의 유로 중심부를 기준으로 높이 y-방향의 온도 변화를 나타내었다. 히트싱크가 설치된 경우 패키징이 설치된 높이의 상하 두 곳에서  $40^{\circ}\text{C}$  이상 큰 온도차가 나타났다. 따라서 히트싱크가 확연하게 열전달 성능을 개선하였다. 이는 히트싱크의 설치로 본넷의 길이를 대폭 줄인 콤팩트형 니들밸브에서 패키징 및 조작부의 동결 방지가 가능함을 보여주는 결과로 판단된다.

Fig. 5는 히트싱크, 패키징 및 조작부 주위의 온도 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)는 히트싱크의 온도 분포로 상부 히트싱크 끝부분에서의 온도가  $10^{\circ}\text{C}$ 로 콤팩트형 니들밸브의 온도 중 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 대기와 접하는 히트싱크 표면의 대류 열전달로 인해 온도가 상승함과 더불어 밸브의 유로에서 멀어짐에 따라 본넷과 접하는 히트싱크 단면에서의 전도 열전달이 가장 적게 나타났기 때문으로 판단되었다. Fig. 5(b)는 패키징부의 온도 분포로 최저 온도는 유로와 가장 근접하며 스템과 접촉하는 지점의 패키징 글랜드에서  $-117^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 이는 패키징 글랜드의 소재인 PEEK의 운용 온도 조건인  $-150^{\circ}\text{C}$ 를 만족하지만 안전 여유(safety margin)의 부족으로 사용 시간의 경과에 따른 패키징 소재의 경화로 인하여 누설의 위험성이 있는 것으로 판단된다. 한편 조작부인 핸들과 이와 접하고 있는 스템 상단의 온도 분포는 Fig. 5(c)와 같다. 핸들 끝단의 온도는  $3.8^{\circ}\text{C}$ 로 빙점 이상이지만 스템 상단의 온도는 빙점 이하로 나타나 동결이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 패키징부 누설 및 조작부 동결을 방지하기 위하여 히트싱크 형상 변경을 통한 열전달 성능의 개선이 요구된다.

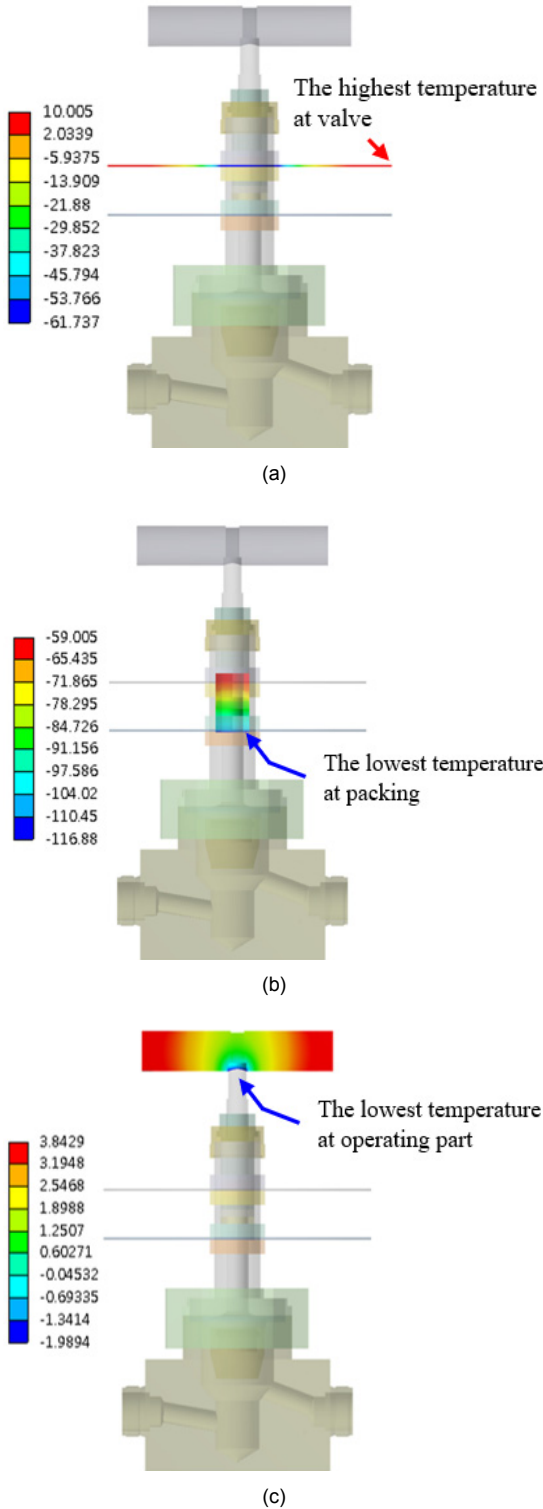


Fig. 5. Contour plot of temperature distribution at (a) upper heat sink, (b) packing, and (c) operating part

#### 4. 히트싱크 치수 최적화를 위한 사례 연구

컴팩트형 니들밸브를 대상으로 수행한 열전달 해석에서 누설 및 작동 불능이 예상되는 패킹 및 스템 상단의 동결을 방지하기 위하여 히트싱크 표면에서 대기와의 대류 열전달을 통한 니들밸브 전체의 열균형 유지 및 그리고 전도와 대류 열전달을 고려한 적절한 히트싱크 형상의 치수를 결정하여야 한다. 이를 위하여 패킹 및 스템 상단의 동결을 방지하기 위한 사례 연구를 진행하였다.

사례 연구는 Fig. 6과 같이 열전달 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 형상 변화를 고려하였다. 첫 번째 사례는 기존 히트싱크의 외경( $D_0$ ) 및 두께( $t$ )를 140 mm 및 1 mm로 유지한 상태에서 Fig. 6(a)와 같이 대기와 접하여 대류 열전달이 일어나는 히트싱크 표면에 원주 방향으로 홈(groove)을 가공한 경우이다. 이때 홈의 피치( $p$ ) 및 높이( $h$ )는 4 mm 및 3.4 mm,

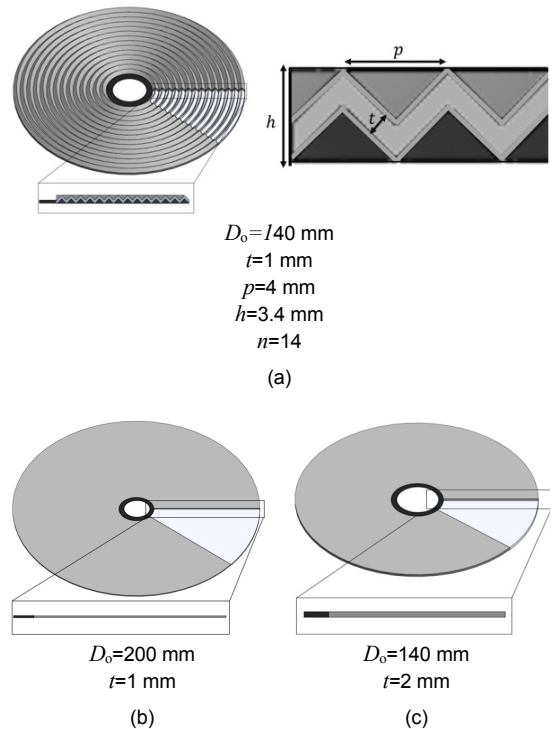


Fig. 6. Case studies for shape design of heat sink. (a) Circumferential grooves, (b) increase in outer diameter, and (c) increase in thickness

홈의 개수는 총 14개이며 대류 열전달 표면적은 기존 29,516 mm<sup>2</sup>에서 41,899 mm<sup>2</sup>로 1.4배 증가하였다. 두 번째 사례는 Fig. 6(b)와 같이 히트싱크의 두께( $t$ )를 1 mm로 유지한 상태에서 외경( $D_o$ )을 200 mm로 1.4배 증가시킨 경우로 대류 열전달 표면적이 62,460 mm<sup>2</sup>로 기존 대비 2배 증가하였다. 마지막 세 번째 사례 연구는 히트싱크에서 나타나는 전도 열전달의 변화를 살펴보기 위한 것으로 Fig. 6(c)와 같이 히트싱크의 외경( $D_o$ )을 140 mm로 유지한 상태에서 두께( $t$ )를 2 mm로 증가시켜 히트싱크와 본넷 연결부의 단면적이 2배 넓어졌다. 세 가지 사례 연구로 제시된 히트싱크의 형상에 대하여 3절의 열전달 해석과 동일한 조건에서 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 세 가지 사례 연구로 변경된 히트싱크 형상을 고려한 열전달 해석 결과로 상부 히트싱크, 패킹 및 조작부에서의 온도 분포를 나타내었다. Fig. 7(a)는 상부 히트싱크의 반경 방향  $r$  위치에 따라 발생한 온도 분포이다. 원주 방향으로 홈을 가공한 모델과  $D_o$ 가 200 mm인 모델의 경우  $r$  위치에 따라 기존 모델 대비 높은 온도가 나타났다. 이는 원주 방향 홈과 외경  $D_o$ 의 증가로 인하여 식 (2)와 같이 대류 열전달이 발생하는 표면적  $A_s$ 가 증가하여 대류 열전달량  $q_{conv}$ 가 증가하였기 때문이다. 아울러 식(1)과 같이 히트싱크 반경 방향 온도구배 항의  $dx$  증가로 전도 열전달량  $q_{cond}$ 이 감소하여 액체수소에 의한 열전도 영향이 적게 나타났기 때문으로 사료된다. 한편 두께  $t$ 가 2 mm인 세 번째 사례 연구의 모델에서는 기존 모델을 포함하여 나머지 두 사례 연구의 모델 대비 히트싱크와 본넷 연결부에서 온도가 가장 높게 나타났다. 이는 전도 열전달이 일어나는 단면적  $A$ 의 증가로 인하여  $q_{cond}$ 이 커졌기 때문이다. 따라서 히트싱크에 의한 열전달 효과는 두께  $t$ 에 의한 영향이 가장 큰 것으로 확인하였다. Fig. 7(b)는 누설에 직접적인 영향을 미치는 패킹 주위의 온도를 하부 히트싱크가 위치하는 곳에서부터 높이  $h$  위치별로 나타낸 결과이다.  $h$ 가 높아짐에 따라 패킹의 온도는 상승하며 유로와 가장 근접하며 스템과 접촉하는 지점의 패킹 글랜드에서 가장 낮은 온도가 나타났다. 첫 번째 및

두 번째 사례 연구에서 고려한 히트싱크 형상에 의한 온도 분포는 기존과 유사하여 열전달 개선의 효과가 미미하며 두께  $t$ 를 2 mm로 키운 세 번째 사례

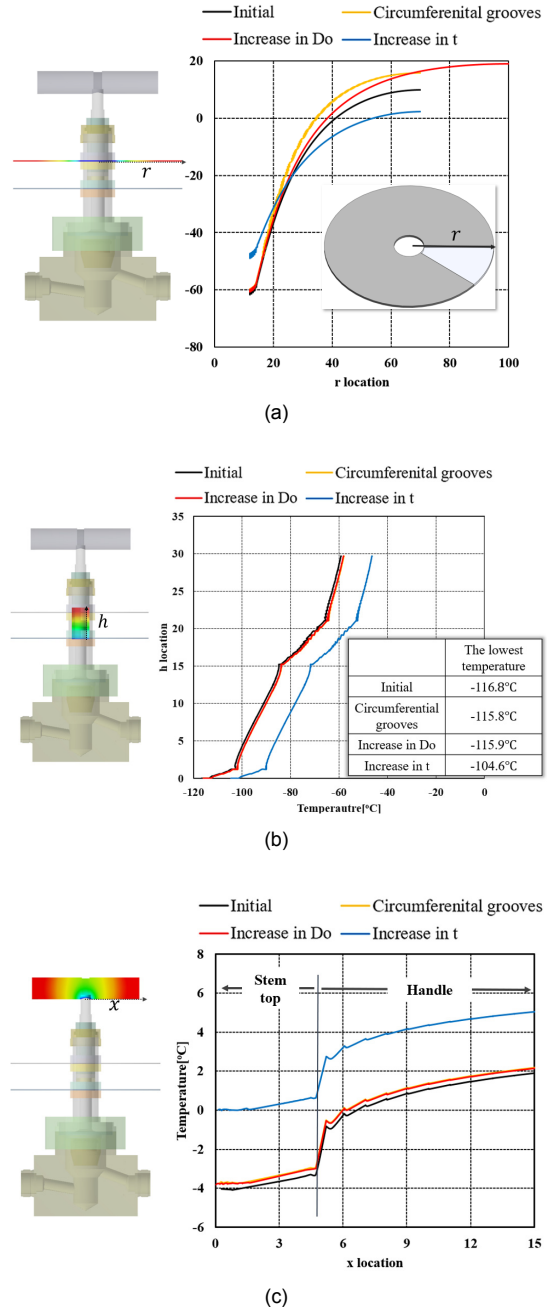


Fig. 7. Temperature distribution at (a) upper heat sink, (b) packing, and (c) operating part for each case study

연구의 모델에서는 패킹 글랜드의 최저 온도가  $-105^{\circ}\text{C}$ 로 기존 모델 대비  $12^{\circ}\text{C}$  이상 높아진 것을 알 수 있다. 이는 대류 열전달에 의한 히트싱크 온도가 히트싱크와 본넷의 접촉 단면적을 통해 전도로 열전달이 원활히 이루어져 패킹 글랜드의 온도 상승에 기여한 것으로 판단된다. Fig. 7(c)는 조작부 스템 상단과 핸들이 만나는 지점에서  $x$  위치별로 얻은 온도 분포의 결과이다. 히트싱크에 원주 방향 홈을 가공한 모델과 외경  $D_0$ 가 200 mm로 늘어난 모델 모두 스템 상단부의 온도가  $-4^{\circ}\text{C}$ 로, 패킹부의 결과와 마찬가지로 온도 분포가 기존 모델과 유사하다. 반면 두께  $t$ 가 2 mm인 세 번째 사례 연구의 모델에서는 뚜렷한 온도 상승이 관찰되었으며 스템 상단부의 온도가 빙점 이상으로 나타났다.

사례 연구를 통하여 히트싱크 형상 중 두께  $t$ 가 열전달 성능 개선에 가장 영향을 크게 미치는 인자임을 확인하였다. 누설 방지를 위하여 패킹 글랜드에 적용된 PEEK 소재의 경우 기존 모델에서 나타난 최저 온도  $-117^{\circ}\text{C}$ 가 두께 증가를 고려하여 최저 온도가  $-105^{\circ}\text{C}$ 로  $12^{\circ}\text{C}$  상승한 세 번째 사례 연구에서 충분한 안전 여유(safety margin)를 확보할 수 있었다. 아울러 스템 상단부의 온도가 빙점 이상으로 상승하여 조작부 작동 불능의 원인이 되는 결빙 문제를 해결할 수 있다.

현재 참여 기업과 협업하여 Fig. 8과 같은 컴팩트형 니들밸브의 시제품을 제작하였으며 액체질소를 이용한 시험을 수행하여 히트싱크를 고려한 열전달 해석의 정도를 확인할 계획이다. 이후 본 연구에서

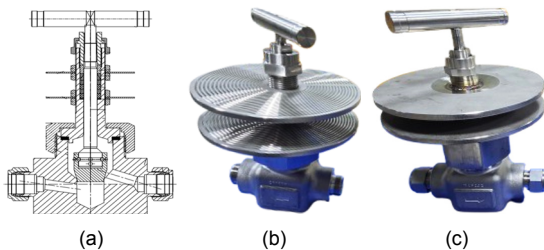


Fig. 8. Detail drawings and prototypes of compact-type needle valve. (a) Detail drawings, (b) prototype with grooved heat sink, and (c) prototype with thick heat sink

수행한 사례 연구를 기반으로 히트싱크 형상의 치수 최적 설계를 진행할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 히트싱크가 설치되어 본넷의 길이를 대폭 줄인 극저온용 컴팩트형 니들밸브를 제안하였으며 히트싱크의 열전달을 통해 조작부와 패킹의 동결을 방지하여 본넷의 길이가 짧은 형상으로의 밸브 설계가 가능함을 제시하였다. 아울러 히트싱크에서의 대류 및 전도 그리고 본넷에서의 전도를 고려한 열전달 해석과 조작부 및 패킹의 동결을 방지하는 히트싱크 형상의 치수 최적화를 위한 사례 연구가 수행되었다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 패킹부 최저 온도는  $-117^{\circ}\text{C}$ 로 사용 소재인 PEEK의 운용 온도 조건인  $150^{\circ}\text{C}$ 를 만족하지만 안전 여유 부족으로 사용 시간의 경과에 따른 패킹 소재의 경화로 인한 누설의 위험성이 있으며 스템 상단의 온도는 빙점 이하로 나타나 동결이 발생할 것으로 예상되었다.

2) 누설 및 작동 불능이 예상되는 패킹 및 스템 상단의 동결을 방지할 목적으로 히트싱크 형상이 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 히트싱크 표면에 원주 방향으로 홈을 가공한 경우, 히트싱크의 두께를 유지한 상태에서 외경을 200 mm로 증가시킨 경우, 히트싱크의 외경을 유지한 상태에서 두께를 2 mm로 두껍게 형상을 변경한 경우의 세 가지 사례 연구를 실시하였다.

3) 첫 번째, 두 번째 사례 연구에서 고려한 히트싱크의 형상에 의한 패킹 주위의 온도 변화는 기존 모델 대비 유사하여 열전달 개선의 효과가 나타나지 않았다. 그러나 두께  $t$ 를 2 mm로 키운 세 번째 사례 연구 모델에서 최저 온도가  $-105^{\circ}\text{C}$ 로 기존 모델 대비  $12^{\circ}\text{C}$  이상 상승하였다.

4) 조작부 스템 상단 온도의 경우 세 번째 사례 연구 모델에서 뚜렷한 온도 상승이 관찰되었으며 스템 상단부의 온도가 기존  $-4^{\circ}\text{C}$ 에서 빙점 이상으로 나타났다.



5) 사례 연구를 통하여 히트싱크 형상 중 두께  $t$ 가 열전달 성능 개선에 가장 크게 미치는 인자임을 확인하였다. 히트싱크의 두께 증가를 통해 패키징에 적용된 PEEK 소재의 충분한 안전 여유를 확보할 수 있었으며 스템 상단부의 온도가 빙점 이상으로 상승하여 조작부 작동 불능의 원인이 되는 결빙 문제도 해결할 수 있었다.

## 후 기

본 과제는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2023RIS-007).

## References

1. N. Hwang, H. Kang, J. Kang, and S. Han, "Disk shape design of liquid hydrogen needle valve with various inherent flow characteristics", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 4, 2024, pp. 363-369, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.4.363>.
2. M. Aziz, "Liquid hydrogen: a review on liquefaction, storage, transportation, and safety", *Energies*, Vol. 14, No. 18, 2021, pp. 5917, doi: <https://doi.org/10.3390/en14185917>.
3. S. P. Kim, R. W. Jeon, I. J. Hwang, J. H. Lee, and D. K. Kang, "A numerical analysis study on the characteristics for packing design of cryogenic gate valve", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 3, 2012, pp. 160-165. Retrieved from <http://journal.ksmpe.or.kr/journal/article.php?code=43096>.
4. D. K. Kim and J. H. Kim, "A study on structural analysis of globe valve for LNG carrier", *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 8, 2007, pp. 1013-1019, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.8.1013>.
5. H. S. Jeong, J. R. Cho, J. H. Kim, J. R. Kim, J. H. Park, and Y. H. Kim, "A study on structural design of cryogenic miniature globe valve using finite element method", *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 4, 2007, pp. 343-349, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.4.343>.
6. S. Li, M. Zheng, Y. Wang, L. Yang, B. Zhang, and J. Zhang, "Research on transient heat transfer of ball valves in high-pressure liquid hydrogen receiving stations", *Results in Engineering*, Vol. 19, 2023, pp. 101285, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101285>.
7. J. H. Kim, D. K. Park, T. J. Kim, and J. K. Seo, "Thermal-structural characteristics of multi-layer vacuum-insulated pipe for the transfer of cryogenic liquid hydrogen", *Metals*, Vol. 12, No. 4, 2022, pp. 549, doi: <https://doi.org/10.3390/met12040549>.
8. K. Sotoodeh, "A review of valve stem sealing to prevent leakage from the valve and its effect on valve operation", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 21, No. 1, 2021, pp. 9-16, doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01050-1>.
9. N. Zhang, Q. Li, K. Hu, and Q. Li, "Valve seat soft sealing characteristics of cryogenic control valve(II): sealing characteristics at liquid nitrogen temperature and comprehensive analysis", *Transactions of Beijing Institute of Technology*, Vol. 35, No. 5, 2015, pp. 445-449, doi: <https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2015.05.002>.
10. S. Y. Kim, B. H. Kang, and H. J. Choi, "Effect of vapor-cooled heat stations in a cryogenic vessel", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 9, No. 4, 1998, pp. 169-176. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10597939>.
11. H. Kim, Y. J. Hong, H. Yeom, J. Park, J. Ko, S. J. Park, and S. In, "Thermal analysis of a cold box for a hydrogen liquefaction pilot plant with 0.5 TPD capacity" *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 571-577, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.571>.
12. R. H. S. Winterton, "Newton's law of cooling", *Contemporary Physics*, Vol. 40, No. 3, 1999, pp. 205-212, doi: <https://doi.org/10.1080/001075199181549>.
13. R. Kumar, D. Singh, and A. K. Sharma, "Static thermal analysis of fins models using ANSYS", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 11, No. 2, 2020, pp. 10-21, doi: <https://www.doi.org/10.34218/IJMET.11.2.2020.002>.