

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.153

심자도 장비의 냉각장치 특성 최적화를 위한 기하 설계 변수 연구

이정희* · 이영신*[†] · 이용호** · 임현균** · 이성진*

* 충남대학교 기계설계공학과 BK21 메카트로닉스사업단, ** 한국표준과학연구원

A Study on the Geometric Design Parameters for Optimization of Cooling Device in the Magnetocardiogram System

Jung-Hee Lee*, Young-Shin Lee*[†], Yong-Ho Lee**, Hyun-Kyoon Lim** and Sung-Jin Lee*

* BK21 Mechatronics Group, Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

**Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS)

(Received August 12, 2009 ; Revised November 26, 2009 ; Accepted November 30, 2009)

Key Words: Optimization(최적화), Cooling Device(냉각장치), Design Parameter(설계 변수), Dewar (듀아), Heat Transfer Rate(열전달률)

초록: 인체의 심장 활동에 의해 발생하는 생체 자기 신호를 심자도(magnetocardiogram, MCG)라고 부른다. 이러한 생체자기장은 극저온 상태에서 고감도 자장센서인 SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)를 사용함으로써 측정할 수 있다. 이 심자도 장비의 냉각장치는 액체 헬륨을 냉매로 사용하며 이 냉매를 보관하는 방법이 장비의 성능을 좌우한다. 액체 저온 듀아가 극저온 4 K에서 초전도 특성을 유지하기 위하여 사용된다. 본 연구에서는 액체 헬륨 듀아의 온도분포 특성이 연구되었다. 본 연구에서 사용된 듀아는 액체헬륨 용량이 30 L이고 5일간 유지된다. 듀아에는 150 K와 40 K의 이중 차폐체가 설치되었다. 열차폐체 끝단에서의 온도가 측정되었으며 전산 모델의 해석결과와 비교되었다. 기하 설계 변수에 대한 최적화 기법을 적용하여 냉각장치인 저온 듀아의 열전달률을 최소화하였으며 듀아의 응력분포에 영향을 갖는 설계 기하 변수들의 특성을 연구하였다. 냉각장치의 열해석 및 최적화해석을 위해 유한요소 코드 ANSYS 10을 사용하였다. 저온 듀아에 사용된 전산모델은 열복사에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 분야에서 온도 분포를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

Abstract: A magnetocardiogram (MCG) is a recording of the biomagnetic signals generated by cardiac electrical activity. Biomagnetic instruments are based on superconducting quantum interference devices (SQUIDS). A liquid cryogenic Dewar flask was used to maintain the superconductors in a superconducting state at a very low temperature (4 K). In this study, the temperature distribution characteristics of the liquid helium in the Dewar flask was investigated. The Dewar flask used in this study has a 30 L liquid helium capacity with a hold time of 5 d. The Dewar flask has two thermal shields rated at 150 and 40 K. The temperatures measured at the end of the thermal shield and calculated from the computer model were compared. This study attempted to minimize the heat transfer rate of the cryogenic Dewar flask using an optimization method about the geometric variable to find the characteristics for the design geometric variables in terms of the stress distribution of the Dewar flask. For thermal and optimization analysis of the structure, the finite element method code ANSYS 10 was used. The computer model used for the cryogenic Dewar flask was useful to predict the temperature distribution for the area less affected by the thermal radiation.

1. 서 론

생체자기장(biomagnetic fields)은 사람의 심장, 뇌, 척수, 위 등으로부터 발생하는 자기 신호로서 우리 몸 안에서 일어나는 생명활동이 모두 전기적 현상이기 때문에 사람의 몸 주위에도 자기장이 분포한다. 특히 심장 활동에 의해 발생하는 생

체 자기 신호를 우리는 심자도(magnetocardiogram, MCG)라고 부른다. 이러한 생체자기장은 극저온 상태에서 고감도 자장센서인 SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)를 사용함으로써 측정할 수 있다. 극저온 냉동 용기에 관련된 연구 동향을 살펴보면 김호영 등^(1,2)은 정상상태와 과도상태의 극저온 용기의 냉각 특성을 연구하였다. 이정훈 등^(3,4)은

[†] Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

적외선 센서용 극저온 용기의 열유입을 최소화하기 위하여 과도 상태 냉각 특성을 연구하였다. 하지만 국내에서는 아직 생체 자기 측정을 위한 냉각 장치 관련 연구가 많이 부족한 상태이다. 본 연구에서 소개되는 심자도 장비의 냉각장치는 액체 헬륨을 냉매로 사용하며 이 냉매를 잘 보관하는 방법이 장비의 성능을 좌우한다. 따라서 이 액체 헬륨을 보관하기 위한 듀아의 최적화가 절실히 필요하게 되었다. 최적화 설계에 관한 연구는 많은 분야에서 수행되어 응용되고 있다.^(5,6) 본 논문에서는 SQUID 센서가 작동할 수 있는 환경을 조성하고 액체 헬륨 듀아의 냉각 성능을 향상시키기 위해 액체 헬륨 듀아의 열전달 해석 및 구조 해석을 수행하였다. 액체 헬륨 듀아의 외부에서 유입되는 열전달량을 최소화하기 위해 기하학적 설계 변수, 제한 조건을 설정하고 최적화 알고리즘인 부문제 근사법을 이용하여 액체헬륨 듀아의 형상에 대한 최적설계 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

액체 헬륨 듀아는 SQUID 센서가 작동하도록 저온 상태를 유지하는 액체헬륨 용기이다. 듀아의 주요 형상 크기는 높이 1200 mm, 외경 400 mm, 헬륨조의 내경 292 mm 그리고 tail 내경 129 mm이다. 듀아는 헬륨을 보관하는 헬륨조와 진공을 유지하는 진공조로 이루어지고 헬륨조와 진공조의 사이는 약 1×10^{-2} mbar의 진공이 유지된다.⁽⁷⁾ Fig. 1은 좌표계는 원통좌표계 r, θ, z 로 표현되었으며 원점은 바닥의 중심이다. Fig. 2는 듀아의 열유입 모델을 나타낸다. 진공을 유지하는 것은 외부의 열이 대류를 통해 헬륨조로 전달되는 것을 막기 위해서다. 헬륨조와 진공조는 GFRP(fiber glass reinforced plastic) 재료를 사용하여 제작되며 일정한 두께의 튜브 형태로 제작된다. 헬륨조와 진공조 사이의 진공 공간에는 외부의 열을 반사하기 위한 열반사판(superinsulation layer)과 열반사판을 냉각시키기 위한 열차폐체(thermal shield)가 설치된다. 열차폐체는 1차 차폐체와 2차 차폐체를 사용하였고 설계 목표가 되는 온도 40 K, 150 K를 편의상 차폐체 온도로 사용하였다. 그리고 각각의 열차폐체 끝에는 온도계를 부착하여 온도 분포를 측정하였다. 액체 헬륨을 저장할 수 있는 용량은 총 30 리터이며, 액체 헬륨 증발량은 6 L/d 로 설계되었다.

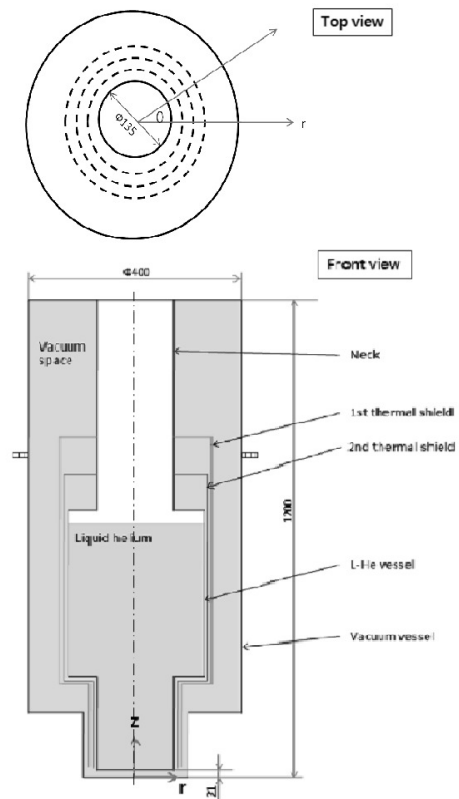


Fig. 1 Schematics and dimension of dewar

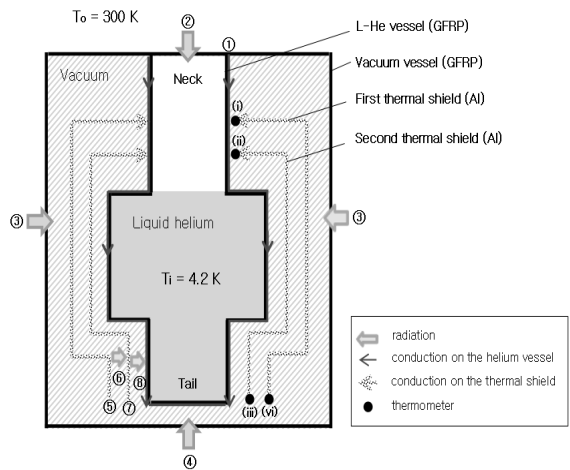


Fig. 2 Schematic of heat transfer mechanism.

2.2 유한 요소 해석

해석 모델은 진공조, 헬륨조, 1차 차폐체, 2차 차폐체를 모델링하였다. 액체헬륨은 온도가 일정하다고 가정하고 액체헬륨의 온도를 4 K로 적용하였다. 액체 헬륨은 총 30 리터가 들어있을 때 부피를 계산하여 액체 헬륨 높이를 적용시켜 모델링 하였다. 모델에 대한 열전달 계수는 Fig. 3과 같이 입력하였

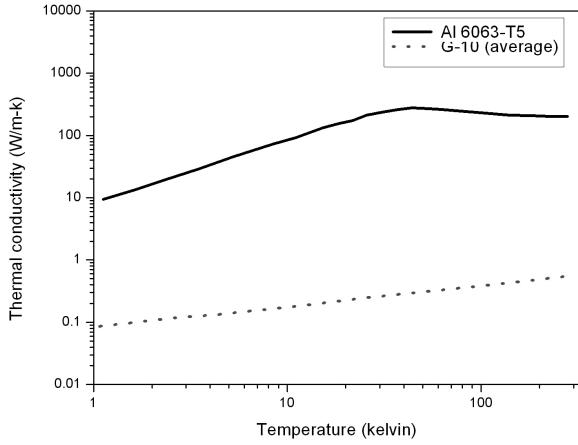


Fig. 3 Thermal conductivity of GFRP and Aluminum

다. GFRP의 열전달 계수는 평균 값으로 구한 데이터 값을 사용하였다. 유한요소 해석에서 알루미늄 (Al)의 방사율 값은 0.06, GFRP의 방사율 값은 0.52의 정수 값으로 입력하였다. 진공조 표면은 대기에 의한 자연대류가 일어나지만 이 조건은 무시하고 300 K로 가정하고 온도 조건에 의한 전도 열전달과 복사 열전달 해석을 수행하였다.

복사 열전달 해석에서 표면의 반사에 대해 직접 적용하지 않는다. 또한 표면에서 흡수율과 방사율은 같다고 가정하였다. 복사 열전달 해석에서 형상 계수는 반드시 알아야 하지만 대부분의 경우 잘 알려져 있지 않다. ANSYS는 형상계수를 모르는 경우 면들 상호간의 복사작용을 이용하여 계산할 수 있으며 이 논문에서는 이 방법을 적용하였다. 2차원 모델의 면적에 표면 효과 요소를 적용하여 복사가 일어나는 표면을 생성해 준다.⁽⁸⁾

액체 헬륨 듀아의 실험 결과와 비교/검토하기 위하여 ANSYS 10을 사용하여 해석을 수행하였다. 액체 헬륨 듀아의 목 부분, 액체 헬륨 저장조 그리고 열 차폐체에 대하여 온도분포, 열응력 해석을 수행하였다.

Fig. 4은 소형 듀아의 열 특성의 온도 분포 해석을 위한 모델로 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 온도계산을 위해 사용한 요소는 Plane 55 요소로서 4개의 절점으로 구성되며, 각 절점에서 온도에 대한 정보를 갖는다. 모델은 총 823개의 절점과 642개의 요소로 구성되었다.

Fig. 5는 열-구조 응력 해석을 위한 상세설명이다. 온도 분포 해석과 동일하게 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 그리고 열-구조 응력 해석의 정확도를 높이기 위해 요소 밀도가 좀 더 조밀한 상태가 되도록 유지하였다. 응력 해석을 위해 사

Table 1 Material properties of the GFRP in cylindrical coordinate system^(9,10)

Properties	Value	
	Θ	z
Tensile strength (MPa)	Θ	310
	z	262
Yield strength (MPa)	Θ	151
	z	130
Young's modulus, E (GPa)	Θ	18.6
	z	16.5
Poisson's ratio, ν	Θ	0.4
	z	0.25
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Θ	5.5
	z	6.6
Density (g/cc)	1.79	

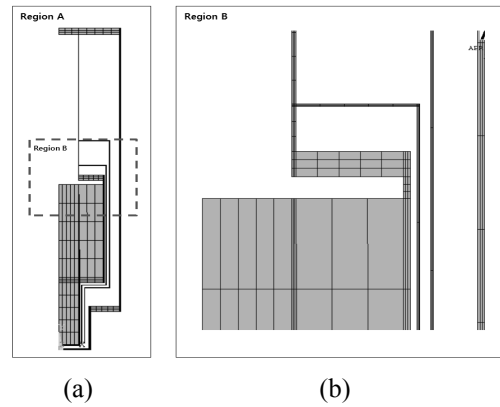


Fig. 4 Finite element model of the dewar for the thermal analysis ; (a) Region A : axial symmetric model of the dewar (b) Region B : detail view of helium vessel with neck and thermal shield

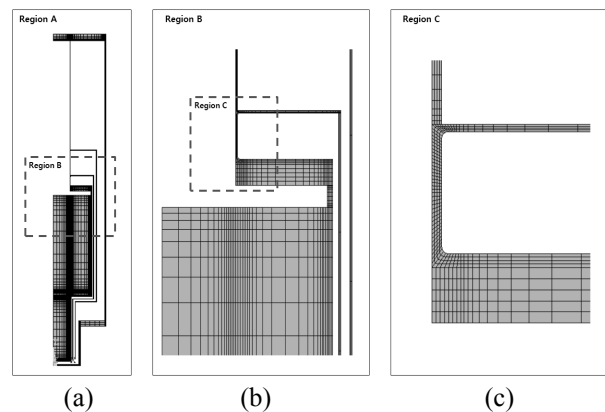


Fig. 5 Finite element model of the dewar for the thermal-structure analysis ; (a) Region A : axial symmetric model of the dewar (b) Region B : detail view of helium vessel with neck and thermal shield (c) Region C : detail view of neck between first shield and helium vessel

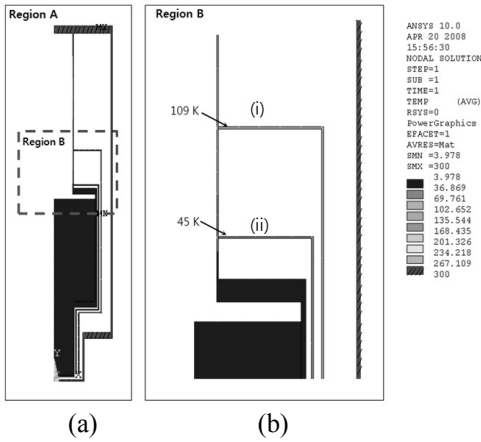


Fig. 6 Temperature distribution of the dewar ; (a) Region A : axial symmetric model of the dewar (b) Region B : detail view of helium vessel with neck and thermal shield

용한 요소는 Plane 42 요소이다. 이 요소는 4개의 절점으로 구성되며, 각 절점마다 두 개의 자유도 정보를 갖는다. 모델은 총 1966개의 절점과 1784개의 요소로 구성되었다. Table 1은 원주방향(θ)와 길이방향(δ)에서의 GFRP의 재료특성을 보여준다.^(9,10)

2.3 유한 요소 해석과 실험 결과 비교

액체 헬륨 듀아의 열 해석의 유용성과 검증을 위해 실제 듀아의 온도를 측정된 결과⁽⁷⁾ 비교 고찰 하였다. 온도계는 Fig. 2에서 나타나 있는 것과 같이 1차, 2차 열 차폐체 시작점 과 끝 점에 부착되어있다. 실험에 의해 측정된 온도는 Table 2에 나타나있다. 우선 유한 요소 결과를 살펴보면, Fig. 6에 전도 열전달과 복사 열전달 조건 만을 고려한 액체헬륨 듀아의 온도 분포 해석 결과를 나타내었다. 2차 차폐체 실드 끝단 (ii) 위치의 온도는 45 K가 나타났으며 이 결과 값은 측정 온도 46 K와 유사함을 알 수 있다. 온도차이가 1 K 발생하였으며 비교적 유사한 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 1차 차폐체 실드 끝단 (i) 위치에서 해석 온도 결과는 109 K 온도가 나타났다. 동일한 위치에서 측정된 온도는 88 K 이다. 온도차는 21 K 가 발생하였으며 해석 결과는 (ii) 위치에 비해 (i) 위치에서 더 큰 온도차이가 나타났다. 1차 차폐체 실드 끝단 (i) 위치에서 온도차가 많이 발생한 이유는 다음과 같이 판단된다. 2차 차폐체 실드는 1차 차폐체 실드 위치 보다 안쪽에 위치해 있으므로 복사열에 의한 열 유입이 1

Table 2 Temperature distribution at the end of thermal shield

	Position (r, θ , z)	Temperature (K)	
		Measure ⁽⁷⁾	FEM
First thermal shield temperature at the end	(73, 0, 795)	88	109
	(75, 0, 25)	139	125
Second thermal shield temperature at the end	(72, 0, 700)	46	45
	(85, 0, 25)	83	47

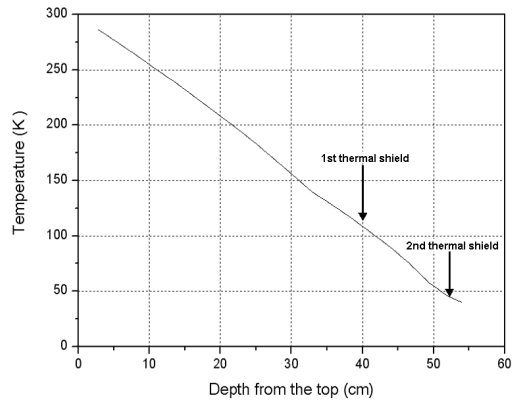


Fig. 7 Temperature distribution along the neck from top of the dewar

차 차폐체가 받는 양보다 적다. 해석 값과 측정 온도 사이의 오차는 1차 차폐체 실드를 통해 외부에서 들어오는 Fig. 2의 ③과 같은 복사열에 의하여 온도 변화가 더 크게 나타날 수 있다. 그리고 해석 시에는 Thermal shield와 neck tube 사이의 열 접촉이 완전히 이루어진 것으로 표현되므로 실제 듀아 모델에서 온도 측정 시 열 접촉이 잘 이루어지지 않았을 경우 온도가 낮게 평가되어 오차의 원인이 될 수 있다. 복사 열전달을 막아주는 초단열재(Superinsulation)의 조건을 해석에 적용하지 않아 복사 열 유입이 더 많아져 1차 차폐체 끝단 온도의 오차원인이 될 수 있다. 오차원인에 대한 분석 및 개선할 수 있는 방법은 아직 연구 중이며 차후 연구에 적용 할 것이고 해석에 오차 편차가 큰 이유는 해석 모델과 달리 실제 장비를 제작하는 단계가 매우 어렵고 까다로워 발생할 수 있는 문제라고 생각된다.

Table 2에서 하단에서 차이가 상단에서의 차이가 나는 원인에 대한 분석 및 개선할 수 있는 방법은 아직 연구 중이며 차후 연구에 적용하겠습니다. 본 논문에서는 실제 액체헬륨이 저장되는 장소의 온도에 따른 응력 평가를 주 관심사항으로 보고 하단부의 영향은 부 관심사항으로 보았습니다.

다. 하단부의 Thermal shield와 Neck tube 사이의 열 접촉이 완전히 이루어진 것으로 표현되므로 실제 듀아 모델에서 온도 측정 시 열 접촉이 잘 이루어지지 않았을 경우 온도가 낮게 평가되어 오차의 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 7은 액체헬륨 듀아의 상부에서부터 듀아의 목 튜브를 따라 내려올 때 온도 분포를 나타낸 것이다. 액체 헬륨 듀아의 내부 조건은 전도 열전달과 복사 열전달에 의한 해석 조건을 가정하였기 때문에 듀아의 목 튜브를 따라서 선형적인 온도 분포를 가짐을 알 수 있고 각 실드를 전 후로 온도 분포가 미세하지만 작은 변화가 있는 것을 알 수 있다. 이는 실드의 전도 열전달과 복사 열전달에 의한 영향으로 목 튜브의 온도분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2.4. 기하 설계 변수 평가

Fig. 8은 목의 두께에 따른 목의 깊이 방향의 온도 분포를 나타낸다. 헬륨조와 주저장조가 연결되는 부분을 목의 깊이 방향의 기준점으로 정하였다. 목의 두께가 2 mm에서 6 mm로 커짐에 따라 깊이가 0.56 m 지점에서 온도 분포는 17.1 K에서 37.0 K로 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 9는 목의 두께가 다양하게 변함에 따라 액체 헬륨 듀아의 최대 응력과 열전달률을 나타낸다. 목의 두께가 2 mm에서 6 mm로 커짐에 따라 최대 응력은 150 MPa에서 105 MPa로 낮아지고, 열전달률은 0.57 W에서 1.68 W로 증가하는 경향을 나타냈다. 목의 두께가 커지다는 것은 하중이 작용하는 단면적이 넓어진다는 의미에서 응력 값이

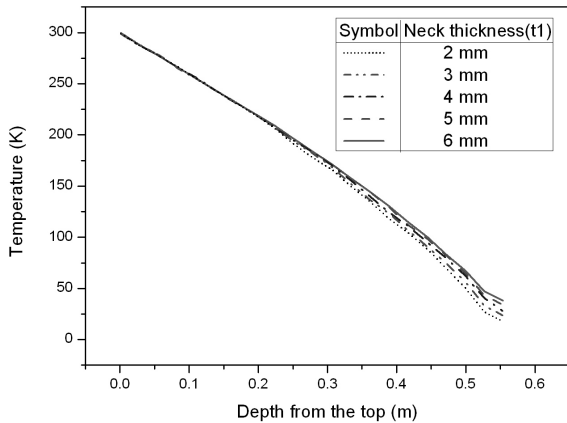


Fig. 8 Comparison of temperature along the neck depth from the top of the dewar with various thickness of neck for $r_1=65.0$ mm, $r_2=146.0$ mm

줄어드는 것이며, 반대로 전도에 의해 유입될 수 있는 표면적이 넓어짐으로 열유입량이 증가하는 것을 의미한다. 또한 목의 두께 변화 값이 조금

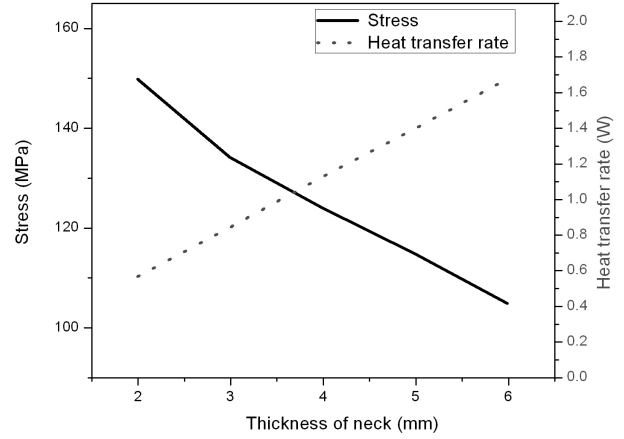


Fig. 9 Comparison of maximum stress and heat transfer rate with various thickness of neck

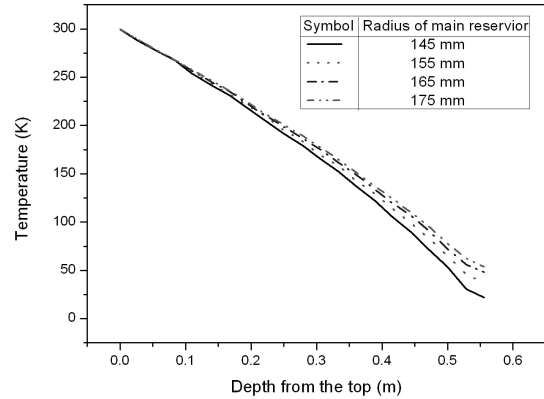


Fig. 10 Comparison of temperature along the neck depth from the top of the dewar with various radius of main reservoir for $r_1=65.0$ mm, $r_2=146.0$ mm

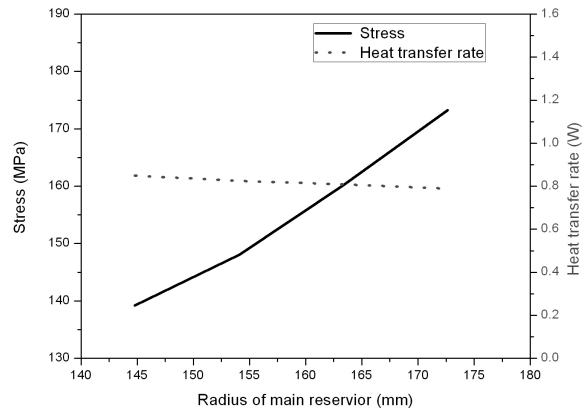


Fig. 11 Comparison of maximum stress and heat transfer rate with various radius of main reservoir

변하여도 응력 값 및 열전달률의 변화의 폭이 상대적으로 다른 변수들과 비교했을 때 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10는 주저장조의 반경에 따른 목의 깊이 방향의 온도 분포를 나타낸 것이다. 주저장조의 반경이 145 mm에서 175 mm로 커짐에 따라 깊이가 0.56 m 지점에서 온도 분포는 20.5 K 에서 54.4 K로 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 11은 주저장조의 두께가 다양하게 변함에 따라 액체 헬륨 듀아의 최대 응력과 열전달률을 나타낸 것이다. 주저장조의 반경이 145 mm에서 175 mm로 커짐에 따라 최대 응력은 139 MPa에서 173 MPa로 증가하고, 열전달률은 0.84 W에서 0.78 W로 감소하는 경향을 나타냈다. 주저장조의 반경이 커지면 액체 헬륨 저장 높이가 낮아진다. 따라서 0.56 m 지점의 온도의 분포가 올라가게 되고 최대 응력에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

해석 수행 시 한 변수만을 변화시켰고 이때 다른 변수를 초기 값, 상수로 고정하였다. 응력 값과 열전달률을 비교해 본 결과, 크게 3가지 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 변수의 값이 증가함에 따라 응력값은 증가하고 열전달률은 감소하는 경우, 응력값은 감소하고 열전달률은 증가하는 경우, 그리고 응력값은 증가하지만 열전달률은 변화가 거의 없는 경우이다.

응력값은 증가하고 열전달률이 감소하는 경우의 설계 변수는 tail의 반경(r_3) 이고, 응력값은 감소하고 열전달률은 증가하는 경우의 설계 변수는 목의 두께(t_1), 목의 반경(r_1), 주저장조의 반경(r_2)이다. 그리고 응력값은 증가하지만 열전달률은 변화가 없는 경우의 설계 변수는 주저장조의 두께(t_2)이다.

설계 변수 영향을 전반적으로 평가해 보면 두께가 커지거나 반경이 커지면 일반적으로 응력은 낮아지는 경향을 보이는 반면에 열전달률은 증가하는 경향이 나타났다.

2.5. 최적 설계

본 논문에서는 액체 헬륨 듀아의 냉각 장치 효율을 높이고 구조적으로 안전한 최적 설계 연구를 하고자 한다. 액체 헬륨 듀아의 최적 설계 목표는 구조적으로 안전성을 갖으며 외부에서 유입되는 열 전달률을 최소화하는데 두고 다음과 같은 최적화 기법을 적용하였다.

일반적으로 최적설계는 설계하고자 하는 목적을 수식으로 표현한 목적함수 및 설계시 고려되는 범주

를 결정하는 제한조건, 제약조건을 포함한다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 최적화 알고리즘인 부문제 근사법을 이용하여 액체헬륨 듀아에 대한 최적설계를 수행하였다. 최적설계 프로그램으로는 ANSYS 10 의 최적화 프로그램을 사용하였다. 본 연구의 최적화 문제는 다음과 같은 수학적 모델로 나타낼 수 있다.

목적함수 : $Minimize(Heat\ transfer\ rate)$

제한조건 : $\sigma_{max} \leq \sigma_a = 130\ MPa$

설계변수 : $2 < t_1 < 6$

$2 < t_2 < 8$

$55 < r_1 < 95$

$145 < r_2 < 175$

$65 < r_3 < 75$

3. 결과 및 고찰

액체 헬륨 듀아에 대해 모든 설계 변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 Fig. 12, Fig. 13에 설계변수들의 최적화 경향을 나타내고 있다. 설계 변수인 목의 두께(t_1)은 5.0 mm에서 3.8 mm로, 목의 반경(r_1)은 65.0 mm에서 62.6 mm로, 주저장조의 두께(t_2)는 3.0 mm에서 2.3 mm로, 주저장조의 반경(r_2)은 146.0 mm에서 145.1 mm로, tail의 반경(r_3)은 65.0 mm에서 71.1 mm로 변화하였다. 이에 따라 목적함수인 외부에서 유입되는 열전달률의 변화는 Fig. 12에 나타나 있다. 초기 열전달률 1.41 W 에서 1.02 W로 수렴하는 것을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of initial value and optimized value

Properties	Initial value	Optimized value
Thickness of neck, t_1 (mm)	5.0	3.8
Radius of neck, r_1 (mm)	65.0	62.6
Thickness of main reservoir, t_2 (mm)	3.0	2.3
Radius of main reservoir, r_2 (mm)	146.0	145.1
Radius of tail, r_3 (mm)	65.0	71.1
Max. Stress (MPa)	113.0	129.0
Heat transfer rate (W)	1.38	1.02

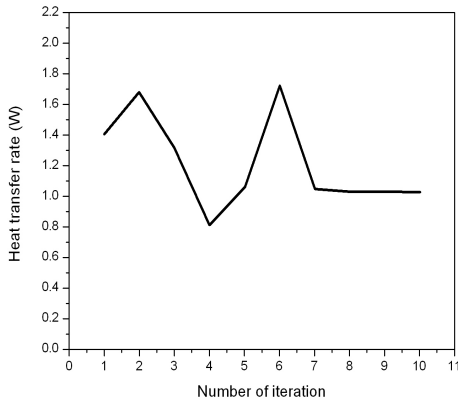


Fig. 12 History of heat transfer rate for the design variables

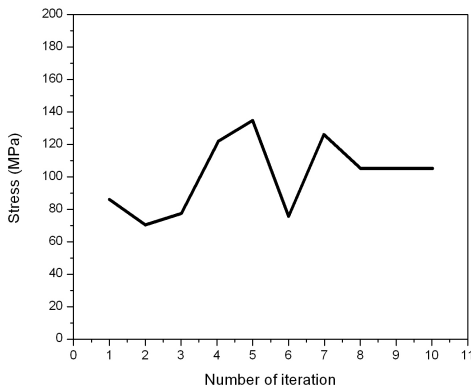


Fig. 13 Stress history for the design variables

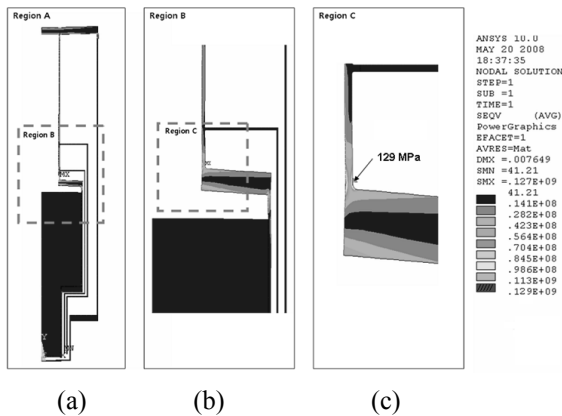


Fig. 14 Stress distribution of the dewar with optimized design variable ; (a) Region A : axial symmetric model of the dewar (b) Region B : detail view of helium vessel with neck and thermal shield (c) Region C : detail view of neck between first shield and helium vessel

최적화 해석은 총 10회 반복 수행하였다. Fig. 13은 제약조건인 최대 응력변화를 나타낸 것이다. 응력은 113 MPa에서 129 MPa로 제약조건을 만족하는 값으로 수렴하였다. Fig. 14는 최적설계변수를 가진

듀아의 응력 분포를 나타낸다. 그림 (a)는 듀아의 축대칭 모델이며 그림 (b),(c)는 상세응력분포도이다. Table 3은 최적화 해석을 수행하기 전 초기 값과 최적 값을 비교하여 나타내었다.

4. 결론

본 논문은 심자도 장비의 냉각 장치 특성 최적화를 위한 기하 설계 변수를 연구하여 액체 헬륨 듀아에 대해 재료의 비선형성을 고려한 온도 해석을 수행하고 측정된 온도와 비교하였다. 또한 액체 헬륨 듀아의 목부분 온도 및 외부 열전달량 그리고 최대 응력 등에 미치는 영향을 파악하기 위해 설계변수 고찰을 수행하여 어떠한 변수가 열에 영향이 있는지 비교 분석하였다. 본 연구 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액체 헬륨 듀아의 열전달 해석을 수행하여 듀아 목 부분과 연결되어 있는 2차 차폐체 끝단 위치에서 해석 온도는 45 K 를 얻었고 측정 온도와 차이를 비교해 보면 1 K 오차가 발생했다. 1차 차폐체 실드 끝단 위치에서 해석 온도 결과는 109 K, 측정 온도는 88 K 이다. 온도차는 21 K 가 발생하였다. 해석오차는 복사열에 의한 초단열재의 해석을 적용하지 않아 복사 열 유입이 많아진 영향으로 판단된다.

(2) 설계 변수 중 가장 민감하게 작용하는 변수는 목의 두께(t_1)이며 2 mm에서 6 mm로 변화할 때 최대 응력 값은 150 MPa에서 105 MPa 로 감소하였고, 열전달률은 0.57 W에서 1.68 W로 증가하였다.

(3) 액체 헬륨 듀아에 대해 모든 설계 변수를 고려한 최적설계를 수행한 결과 설계 변수인 목의 두께(t_1)은 5.0 mm에서 3.8 mm로, 목의 반경(r_1)은 65.0 mm에서 62.6 mm로, 주저장조의 두께(t_2)는 3.0 mm에서 2.3 mm로, 주저장조의 반경(r_2)은 146.0 mm에서 145.1 mm로, tail의 반경(r_3)은 65.0 mm에서 71.1 mm로 증가할 때 최적의 결과가 얻어졌다. 이에 따라 외부에서 유입되는 열전달률은 1.41 W에서 1.02 W로 감소하는 최적 형상을 얻었다. 응력은 113 MPa에서 129 MPa로 증가하였으나 제약조건을 만족하는 값으로 수렴하였다.

(4) 액체 헬륨 듀아의 열전달 해석 및 구조 해석을 수행하여 듀아의 형상 및 크기에 대한 최적 설계안을 제시하였다. 이를 바탕으로 차후 액체

헬륨 듀아 모델 설계 및 제작시 참고 자료로 이용할 수 있다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-511-D00015)

참고문헌

- (1) Kim, H. Y., Kang, B. H., and Lee, D. Y., 2000, "A Parametric Study on the Cooling Characteristics of an Infrared Detector Cryochamber," *Cryogenics*, Vol. 40, pp.770~788.
- (2) Kim, H. Y. and Kang, B. H., 2002, "Thermal Isulation Technology for Cryogenic Cooling Devices," *Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 19 No. 11, pp. 24~30.
- (3) Lee, J. H., Kim, H. Y., and Kang, B. H., 2002, "Numerical Analysis on the Transient Cooling Characteristics of an Infrared Detector Cryochamber," *The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 4 No. 2, pp. 68~72.
- (4) Kang, B. H., Lee, J. H. and Kim, H. Y., 2004, "An Experiment Study on the Cooling Characteristics of an Infrared Detector Cryochamber," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16 No. 10, pp. 889~894.
- (5) Lee, H. S. and Lee, Y. S., 2008, "Optimal Contact Design and Allowable Limit on Spindle Assembly of Al Hot Rolling Process," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 240~246.
- (6) Jang, J. W. and Lee, Y. S., 2008, "Topology Optimization of Compressor Bracket," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 9, pp.1668~1676.
- (7) Lee, Y. H., 2000, "Development of MEG Measurement System Using SQUID," Final report, KRIS/IR-2000-094. pp.178~184.
- (8) Kim, Y. M. and Kang, B. H., 2006, "Thermal Analysis of a Cryochamber for an Infrared Detector Considering a Radiation Shield," *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating*, Vol. 18 No. 8, pp. 672~677.
- (9) Zhu, H., Heng, S., Lie, X. and Ping, P., 2007, "Transient Thermal Stress Analysis of Threaded-Adhesive Joints Applied in Non-Magnetic Dewar," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, pp. 621~628.
- (10) Zhu, H., Heng, S., Tingxiang, J., Lie, X. and Ping, P., 2006, "Geometrical Non-Linear Thermal Stress Analysis of Threaded-Adhesive Joints Applied in Non-Magnetic Dewar," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 26, pp. 337~344.
- (11) Vandeplaats, G. N., 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications," *McGraw-Hill Co.*