

제대혈 용기 내부 로봇 암의 열해석에 관한 연구

윤상국† · 유삼상*

(원고접수일 : 2008년 5월 6일, 원고수정일 : 2008년 7월 10일, 심사완료일 : 2008년 7월 11일)

A Study on the Thermal Analysis for the Robotic Arm of the Cord Blood Storage Tank

Sang-Kook Yun† · Sam-Sang You*

Abstract : Umbilical cord blood has been recently considered an attractive potential alternative as a source of stem cell transplantation to curing diseases such as leukemia, cancers, immune disorders. Normally the stored system of the umbilical cord blood specimen is equipped with a computer-controlled robotic arm that enables the samples to locate the identification places in liquid nitrogen tank at regulated temperature as about -196°C . As the half of robotic arm is in the air and the rest part is submerged in liquid nitrogen, the temperature of robotic arm varies from ambient to liquid nitrogen temperature. In this study the temperature variation of upper part of arm above tank lid was thermally analysed by using the commercial code of Ansys. The result of analysis was that the upper part of robotic arm was seriously frozen due to heat transfer from liquid nitrogen as low as -120°C . In order to solve the frost problem of robotic arm, small PTFE tube block as resistance material was introduced into the lower part of tank lid instead of the whole stainless steel(SUS) robotic arm. The results showed that the temperature of robotic arm above the lid was higher enough, and this method would be one of the very effective measure to solve the problem.

Key words : Cord blood(제대혈), Robotic arm(로봇 암), Thermal analysis(열해석), Frost(서리) Liquid nitrogen(액체질소), PTFE(폴리 테트라 플루오로 에틸렌)

1. 서 론

일반적으로 제대혈(Cord Blood)이란 산모와 태아 사이의 탯줄혈액을 의미하며, 조혈모 줄기세포가 함유된 백혈구를 추출할 수 있어 현재 국내외

많은 의료 기관에서 출산하는 부모들에게 제대혈 저장을 권장하고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 조혈모 줄기세포는 제대혈 내의 모든 혈액관련 세포를 만들어 낼 수 있는 능력을 지닌 세포인 바, 골수 안에 있는 조혈모세포보다 자기복제능력이 10배 이상 높아 골수

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail : skyun@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4363)

* 한국해양대학교 기계정보공학부

이식보다 뛰어난 효과를 발휘하므로 추후 아기에게 의료 문제가 발생하였을 때 유용하게 활용될 수 있기 때문이다. 이러한 제대혈은 아기가 태어나면 탯줄을 자른 후 태반과 연결된 탯줄 내의 정맥에서 탯줄 혈액을 채취함으로써 얻어지는데, 추출된 제대혈은 제대혈용 냉동백에 밀봉 저장된 후 초저온 저장용기에 안치되어 -196도로 냉동 보관된다. 이때 상술한 초저온 저장용기는 액체산소, 질소, 아르곤, LNG 등을 저장하는데 이용되는 저장용기인 바, 특히 제대혈, 유전자, 조직세포, 골수, 수정란, 백혈구, 심장판막, 각종 미생물 등 -150도 이하로 보관되어야 하는 물질을 세포의 손상없이 장기적으로 저온 저장하는데 주로 이용된다.

이러한 초저온 저장용기는 듀어병(Dewar vessel)의 원리를 이용하여 진공층이 존재하는 이중벽 구조로 제조된다. 특히 내부에는 내부온도를 -196도로 유지시킬 수 있는 초저온액체질소가 채워지게 된다. 한편, 수동식 초저온 저장용기에 따르면, 제대혈 샘플 입구를 밀폐시키는 경우 액체질소에 의해 내부 온도가 초저온이 유지되나, 샘플 주입을 위하여 입구를 개방시키는 경우 실제로는 입구를 개방시키는 순간 입구측 온도가 급격히 상승되어 입구측에 위치한 제대혈이 손상될 수 있는 문제점이 있다. 특히 수동식 초저온 저장용기에 따르면 외통, 진공층 및 내통으로 이루어진 구조로 인해 외부로부터 침투되는 복사열이 차단될 수 있도록 하는데, 이 또한 실질적으로는 외부의 복사열이 모두 차단되지 못하고 일부 복사열이 내통을 통과하여 내통 내부로 침투되는 바, 보관중인 제대혈에 악영향을 끼치는 문제점이 있다^[4].

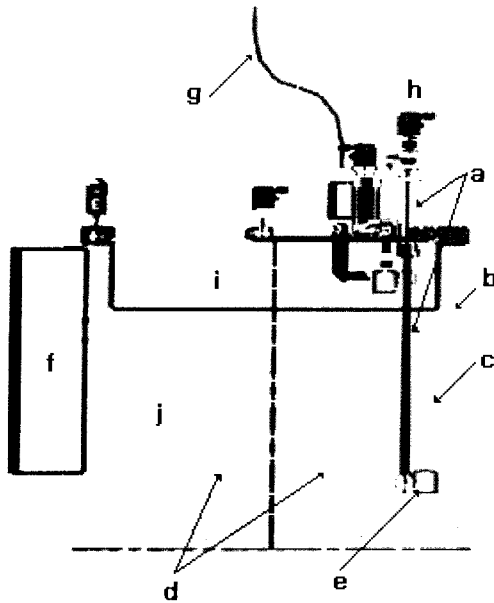
따라서 미국 등 외국에서는 보다 제대혈 샘플의 보관을 장기간 안전하게 보관하기 위하여 로봇 암을 장착한 자동식 충전 제대혈 용기를 개발, 보급하고 있다^[3]. 자동식 용기는 두가지 형태로 이루어져 있다. 그 하나는 로봇 암이 샘플의 주입, 방출 때만 잠겨지는 방식과 또 하나는 항상 액체질소에 잠겨져 있는 방식이 있다. 이들의 장단점을 보면, 단속적으로 잠기는 방식은 로봇 암의 길이가 매우 길게 되고 대부분의 암이 용기 밖으로 나오게 되어 암의 온도가 높고 저장실의 높이가 3m 이상 매우

높게 되는 단점을 갖는다^[5]. 이는 샘플 충전 때 많은 액체질소의 기화를 유발하는 것과 로봇 암에 열응력이 가해지게 되는 문제가 있게 된다. 또한 상시 침전식 용기는 제대혈 샘플의 입방출 빈도가 낮을 경우 액체질소에 암이 잠겨져 있으므로 지속적인 열유입에 의한 액체질소의 기화량 증가와 로봇 암의 열전달에 의한 용기 밖 부분의 서리 생성 문제가 발생하게 된다. 그러므로 제대혈 용기 로봇 암은 전열을 최소화하면서 가열에 의하여 서리생성을 억제시키고 있다.

본 연구에서는 로봇 암의 상시 침전형의 자동 충전식 제대혈 용기의 구조적 단점인 서리 생성의 문제를 보다 효과적으로 해결하기 위하여 로봇 암의 구조를 개선, 보다 안정적인 제대혈 초저온 저장용기 기능을 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 제대혈 용기의 구조

Fig. 1은 자동형 초저온 제대혈 저장용기의 단면도이다. 저장용기는 3개의 통으로 구성되어 있다. 외통(b)과 내통(c) 사이는 고진공의 Super insulation이 적용되며 내통은 제대혈 샘플(e)과 액체질소(j)가 충전된다. 내통과 중간통 사이는 기화된 액체질소 증기가 충전되는 증기 막(Vapor Shield)이 형성되어 진다. 용기 상단에는 로봇 암(a)이 설치되어 있어 암이 회전하면서 내통의 샘플 트레이(d)에 제대혈이 저장된 제대혈용 냉동백(e)을 저장지점에 맞추어 저장하게 된다. 덮개 윗부분의 로봇 암 상부는 외기에 노출되고 있고, 하부는 샘플을 충전 하지 않는 동안에도 액체질소에 잠겨져 있게 된다. 또한 덮개부 로봇 암은 회전 때문에 단열이 전혀 되어 있지 않으며, 로봇 암 상부는 로봇 암을 작동시키는 모터(h)가 장착되어있다. 덮개 상부에는 내통 내부에 액체질소의 레벨에 따라 자동으로 공급하는 액체질소 공급관(g)과 제어부(f)로 이루어져 있다. 또한 용기 덮개 하부는 폴리스틸렌 폼 단열재 블록(i)으로 단열되어 있다. Fig. 2는 해석에 사용된 용기 모사도와 덮개부 단열형상 그림이다.



(a) Robot arm (b) Outer tank (c) Inner tank (d) Sample tray (e) Cordblood sample (f) Control box (g) Liquid nitrogen filling tube (h) Motor (i) Insulation(Polyethylene) (j) Liquid nitrogen

Fig. 1 Automatic-type storage tank of cord blood with robotic arm

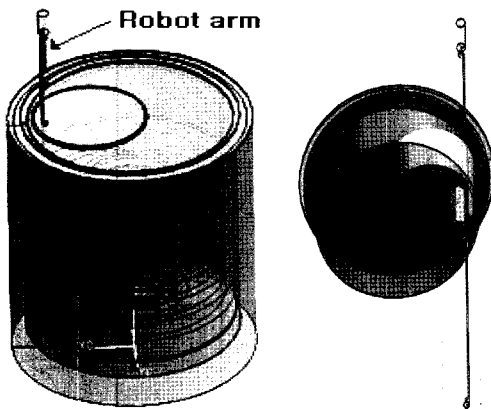


Fig. 2 Tank lid insulation with robotic arm

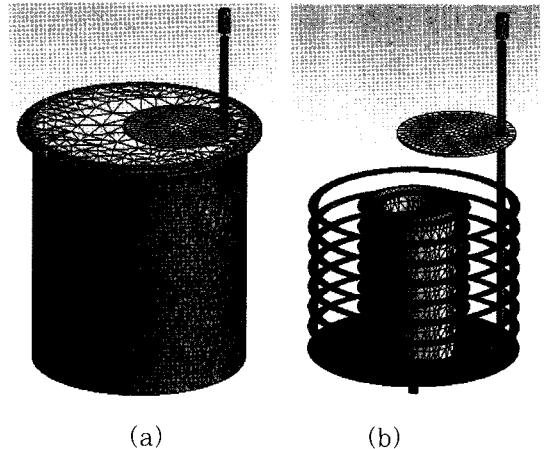
본 연구에서는 내부탱크에 채워진 -196°C 의 액체질소에 접하고 있는 로봇 암이 단열이 되어 있지 않음으로 인한 운전상의 문제점을 분석하고자 하였다. 이를 위한 열전달 해석은 유한요소 해석 프로

그램인 Ansys 11을 이용하였고, 해석 대상의 형상 모델링은 UGS NX4를 이용하여 수행하였다.

3. 해석결과 및 고찰

가. 열전달 해석

Fig. 3은 열 해석을 위한 용기와 로봇 암부의 격자 형상을 보여준다. 내부 탱크와 중간 탱크 사이는 고진공의 Super-insulation 단열이 적용되며, 액체질소는 용기 덮개부 단열재 밑 30mm 하부까지 충전되는 것으로 하였으며 외기 온도는 25°C 로 하였다.



(a) Storage tank with robot arm (b) Inner tank with robot arm

Fig. 3 Grid for thermal analysis

Fig. 4는 외부 탱크 덮개부에 설치된 로봇 암의 구조를 보여준다. 로봇 암은 내부 암과 외부 암의 2개로 구성되며 2mm 두께의 SUS 봉으로 되어 있다. Fig. 5는 탱크 내부와 로봇 암의 온도구배, 그리고 덮개부의 온도구배를 확대한 것을 보여준다. 샘플이 저장되는 랙 부분의 온도는 액체질소 온도인 -196°C 그리고 덮개 및 로봇 암 상부 모터 부위는 25°C 를 보여주고 있다. 로봇 암의 온도는 용기 덮개 하부의 -196°C 로부터 상부 25°C 까지 온도구배를 보이고 있으며, 덮개 상부에 접하고 있는 로봇 암 부위 온도는 -56°C 를 나타내고 있다.

Fig. 6은 내부 로봇 암의 온도구배를 보여주는 것으로 외부 암 부위 보다 낮은 -125°C 를 나타내고 있다. 해석의 결과를 보면 덮개 상부의 내외 로봇 암 온도가 $-56^{\circ}\text{C} \sim -125^{\circ}\text{C}$ 로 영하가 되어 공기 중의 수분이 응결, 서리가 형성되게 될 것이다. 즉, 로봇 암부의 원활한 작동을 위하여 이를 고려한 설계의 개선이나 주기적인 해빙 조치가 필요하게 된다.

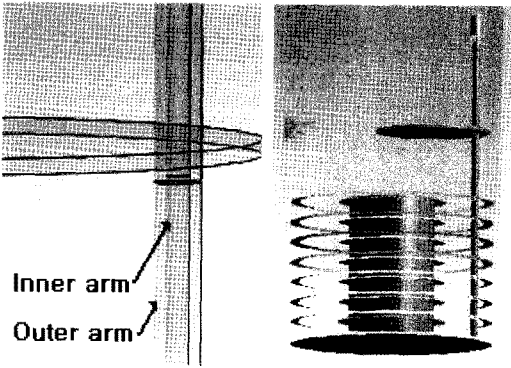


Fig. 4 Structure of inner and outer robotic arm

상기한 서리 생성의 문제를 해결하기 위하여 로봇 암의 SUS 대신 -196°C 액체질소 온도인 극저온 시스템에 널리 적용이 가능하고 열전도도가 0.26W/mK 로 낮은 PTFE (Poly tetra fluoro ethylene) 튜브 블록을 적용하였다⁽⁶⁾. Fig. 7은 그 구조도로 탱크 덮개 밑 20mm 하부에

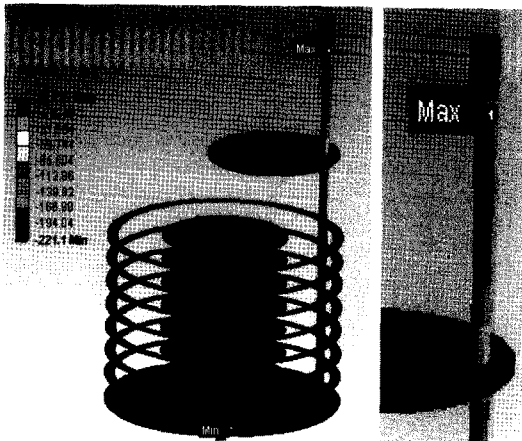


Fig. 5 Temperature distribution of outer robotic arm and inner tank

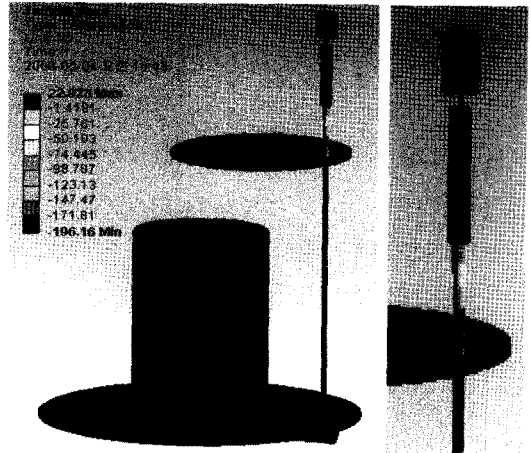


Fig. 6 Temperature distribution of inner robotic arm and inner tank

길이 30mm, 두께 2mm의 PTFE 블록을 가설하여 해석하였다. Fig. 8은 외부 로봇 암의 열해석 결과로 덮개 상부가 상온이 되어 서리가 발생하지 않게 됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 내부 로봇 암의 온도구배로 덮개 상부의 온도가 -119°C 를 나타내고 있다. 이는 내부 암이 외부 암과 접촉하지 않고 분리되어 있어 서리 발생에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타나나 내부 암을 통한 외기로부터 열유입으로 인하여 액체질소의 소모량을 증가시키게 될 것이다. Fig. 10은 이를 해소하기 위하여 내부 로봇 암에 PTFE 블록을 적용하였을 때의 온도 구배 해석 결과를 보여 준다. 해석결과로 PTFE 적용이 내부 로봇 암

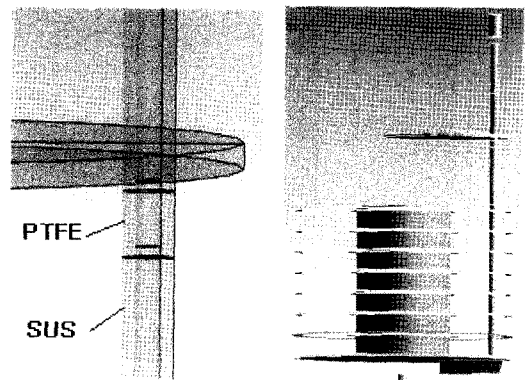


Fig. 7 PTFE block of robotic arm

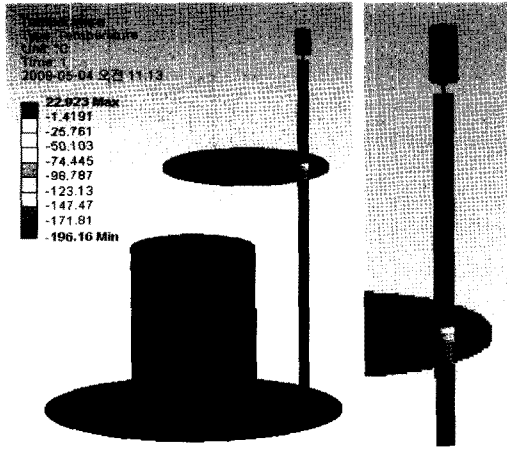


Fig. 8 Temperature contour of outer robotic arm with PTFE tube

부의 외기와와의 열전달을 효과적으로 차단할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동식 제대혈 저장용기의 로봇 암을 통한 열유입을 최소화하고 암 부위의 서리 발생을 방지하기 위하여 로봇 암 부의 열전달 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액체질소 침전식 자동 제대혈 저장용기의 용기 덮개 부 로봇 암은 탱크 내부 액체질소의 영향

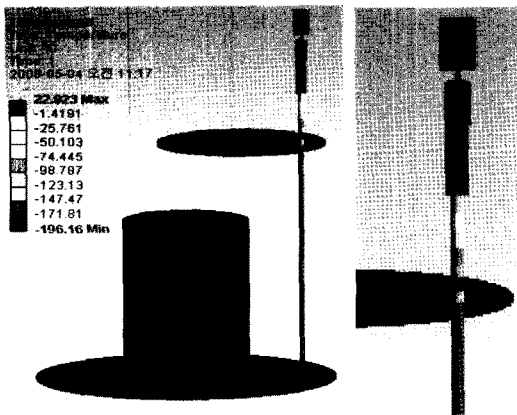


Fig. 9 Temperature contour of inner robotic arm

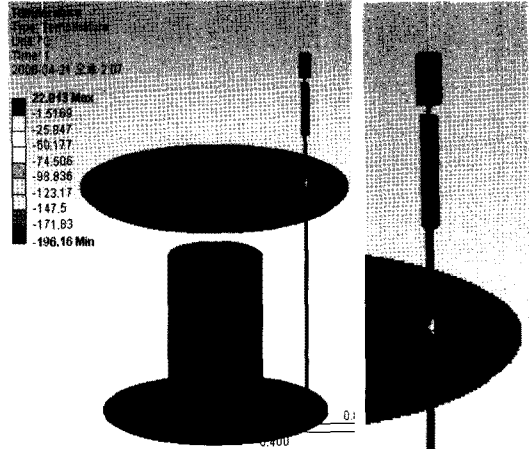


Fig. 10 Temperature contour of inner robotic arm with PTFE tube

으로 작동부에 서리가 발생하게 되므로 이를 고려한 설계가 필요하다.

(2) 로봇 암의 서리 발생을 막기 위하여 적용하고 있는 전기에 의한 가열 방법보다 용기 덮개 밑 부위에 PTFE 블록을 가설하여 보다 효과적으로 서리 발생을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 로봇 암을 통한 열유입을 방지하기 위하여 외부 암 뿐만 아니라 내부 로봇 암에도 PTFE 블록을 적용하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Mugishima F., Harada L., Chin M., et al, "Effect of long-term cryopreservation on hematopoietic progenitor cells in umbilical cord blood", Bone Marrow Transplant 23:395, 1999.
- [2] "Cord blood banking for potential future transplantation: subject review", American Academy of Pediatrics, 104, 116~118, 1999.
- [3] Ballen KK, "New trends in umbilical cord blood transplantation", Blood, 105, 3786~3792, 2005.
- [4] Yang H., Acker JP., et al, "Damage

and protection of umbilical cord blood cells during cryopreservation", Cryotherapy 3:377, 2001.

- [5] Liu J, Zhou SY, et al., "Cryobiological characteristics of cord blood preserved in Bioarchive autopreserved liquid nitrogen system", Zhongguo Shigan Xue Ye Za Zhi, 1093:261, 2002.
- [6] Barron R. F., Cryogenic Systems, Oxford University Press, pp.372-377, 1985.

저 자 소 개



윤상국(尹相國)

1955년생. 1977년 성균관대학교 화학공학과 졸업(학사). 1982년 연세대학교 대학원졸업(공학석사). 1989년 Southampton 대학교 초저온공학과 졸업(공학박사), 1993~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수



유삼상(柳三相)

1990년 미국 University of Wisconsin-Madison 기계공학과 석사, 1994년 미국 Iowa State University 기계공학과 박사. 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수. 전공은 시스템 동역학 및 제어공학으로 자동차 동역학 제어, 로봇 제어 및 수중 로봇의 제어에 대한 연구를 수행.