

# 보온 재료에 따른 구명 조끼 별 단열성능의 비교 실험 및 해석

김성찬\* · 이경훈\*\* · 황세윤\*\*\* · 장호상\*\*\*\* · † 이장현

\*인하공업전문대학 조선해양과 교수, \*\*선박안전기술공단 부장, \*\*\*인하대학교 산업과학기술연구소 연구원, \*\*\*\*인하대학교 대학원,

† 인하대학교 조선해양공학과 교수

## Comparative Studies of Thermal Insulation Performance of Life Vests by Numerical Analysis and Experiment

Sung-Chan Kim\* · Kyung-Hoon Lee\*\* · Se-Yun Hwang\*\*\* · Ho-Sang Jang\*\*\*\* · † Jang-Hyun Lee

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

\*\*Korea Ship Safety Technology Authority, Sejong, Korea

\*\*\*Research Institute of Industrial Science and Technology, Inha University, Incheon, Korea

\*\*\*\*Graduate school of Inha University, Incheon, Korea

† Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**요 약 :** 구명 조끼는 익수자의 부력을 유지시키는 기능을 가지며, 낮은 해수 온도에서 저체온증에 빠지는 시간을 단축 시킬 수 있는 역할을 할 수 있다. 본 논문은 서멀 마네킹 실험과 수치적 방법을 적용하여 단열성능을 향상 시키기 위해서 개발된 팽창형 구명 조끼와 폼형 구명 조끼의 단열성능 및 저체온증 방지 효과를 평가하였다. 단열성능 평가를 위해서 서멀마네킹을 이용하여 열유속 및 열저항을 측정하였으며, 본 연구에서 제시된 구명 조끼의 단열성능을 기존의 제품과 비교하여 검토하였다. 또한 저체온증에 빠지는 정도를 상대적으로 파악하기 위해서 유한요소해석을 이용하여 구명 조끼의 종류에 따른 체온 저감 시간을 예측하고 이를 비교 평가하였다. 저체온증 예측모델은 Pennes의 신체 열전달 해석 모델을 기반으로 작성되었으며, 실험으로부터 측정한 열저항 값을 이용하여 대류 열전달 조건을 환산하여 계산되었다. 그 결과 본 연구에서 단열성능을 향상시키기 위해서 제시된 하는 구명 조끼가 기존 제품에 비해 단열성능이 우수하게 평가됨을 확인하였다.

**핵심용어 :** 구명 조끼, 구명자켓, 열저항, 저체온증, 대류열전달, 서멀마네킹

**Abstract :** Although the life jacket can provide the buoyance with the drowner, heat loss can make the drowned individual be subject to the hypothermia. In this study, The thermal insulation of two types life jacket including inflatable and foam type were evaluate by both experiments and numerical analysis. To estimate the thermal resistance of the jackets, experiments on the heat flux were conducted by the thermal manikin exposed to cold water. Heat flux loss on the surface of thermal manikin were measured for both foam and inflatable type life jacket. Also, finite element method is applied to a body section in order to understand the level of hypothermia of each life jacket. The segmental of human thigh is represented by a multi-layered section which considers the heat conduction within tissue, bone and fat. As a result, the thermal resistance and hypothermia time of each jackets have been compared based on the finite element analysis. It was found that the insulation ability of suggested life jackets is better than that of conventional type.

**Key words :** life jacket, heat transfer, thermal resistance, hypothermia, thermal manikin

### 1. 서 론

익수 조난자의 체온 보전 및 부력을 유지시키기 위한 구명 장비의 개발에 있어서 조난자의 저체온증 방지 효과를 추정할 필요가 있다. 이는 해상 사고로 인하여 승선자가 구명 조끼를 착용한 상태에서 익수하게 될 경우 부력은 유지되지만, 저온의 해수로 인한 체온 강하와 저체온증의 발생 위험도

크기 때문이다. 체온보다 차가운 물속에 인체가 잠겨 있을 경우 인체의 온도가 정상체온 이하로 내려가면 생명에 중요한 장기의 기능이 저하되기 때문에 익수자가 견딜 수 있는 시간은 상황에 따라 급격하게 감소하고 저체온증에 빠지게 된다(Mak, 2008).

저온 환경 또는 여러 대류 조건에 따른 체온 변화 및 저체온증 예측 방법은 실험 및 수치적인 방법을 이용한 연구

† Corresponding author : 연희원, jh\_lee@inha.ac.kr 032)860-7345

\* 연희원, schankim@inhac.ac.kr 032)870-2171

\*\* 연희원, khlee@kst.or.kr 044)330-2340

\*\*\* 연희원, seyun.hwang@gmail.com 032)860-7345

\*\*\*\* 연희원, wa5211@hanmail.net 032)860-7345

들이 상당수 진행되었다(Li and Ito, 2014; Li et al., 2013; Tikuisis et al., 2000; Xu et al., 2005; Xu et al., 2011). 여러 연구에 따르면 신체의 복잡성과 신진 대사의 불확실성 때문에 체온을 정량적으로 매우 정확성하게 예측하는 것은 어려운 일이지만, 유한차분법 또는 유한요소해석을 이용하여 정량적인 추세를 파악하는 것은 유의미하다고 판단된다. 국내에서도 구멍 보트의 조난자 체온 보온 효과 및 단열 성능에 대한 연구 결과(Hwang et al., 2014)와 구멍 조끼의 체온 보온 효과에 대한 이론적 평가 결과(Kim et al., 2015)를 제시한 바 있다.

본 논문은 두 가지 형태의 구멍 조끼의 체온 보온 효과를 평가하기 위한 목적을 가지고 있다. 서멀마네킨을 이용하여 입수 환경에서 신체의 발열 열유속을 측정하고, 이를 이용하여 열저항을 상대적으로 평가한 결과를 제시하고자 한다. 측정된 열유속을 이용하여 단열 성능을 계산하고 이를 바탕으로 저체온증 방지 효과를 상대적으로 평가하고자 한다.

서멀마네킨은 신체와 동일한 발열 구조를 가진 장치는 아니지만, 신체 각 부위별로 주어진 체온을 유지시키기 위한 열유속량을 측정할 수 있고, 이 값을 이용하여 열저항을 파악할 수 있는 장점이 있다. 또한 주어진 열저항 값을 이용하여 체온 변화를 정성적으로 파악할 수 있었다. 체온 변화를 근거로 한 저체온증 예측에는 Pennes bioheat 방정식(Pennes, 1948; Yildirim, and Ozerdem, 1998)을 기반으로 유한요소법 또는 유한차분법을 이용하여 직접 해석할 수 있으나, 신체 구조의 복잡성과 재료 물성치의 불확실성으로 인하여 정확한 값을 얻을 수는 없다. 이는 신체 내부의 발열 조건, 호흡에 의한 열전달, 혈관 대류, 피부 및 근육, 신체 구조의 복잡성 때문이다(Ferreira and Yanagihara, 2009). 본 연구에서는 구멍 조끼별 단열성능을 상대적으로 평가하기 위해 단순화된 인체 부분 모델을 이용하여 온도 변화를 예측하였다. 검토된 단순 인체 모델은 Jang et al. (2015)의 연구에서 실험과의 비교를 통해 그 타당성을 검토한 바 있다.

## 2. 구멍 조끼의 열저항 성능 평가 실험

### 2.1 서멀마네킨 실험장비

본 연구에서 평가하고자 하는 2가지 구멍 조끼를 대상으로 단열 성능을 측정하기 위해서, 서멀마네킨을 이용하여 열유속 및 열저항 측정 실험을 수행하였다. 서멀마네킨을 이용한 실험은 인체에서 발생하는 생리학적 작용을 반영하기는 어렵지만, 피부에서 발생하는 열유속을 평가하기 위한 방법으로 알려져 있다. 본 연구와 같이 의복 착용 상태에 따른 단열 성능을 비교함에 적절한 방법이다(Holmér, 2004). Fig. 1과 같이 인체의 23개 부위에서 열유속을 측정하였으며, Measurement Technology Northwest 사의 Nemo 마네킨을 이용하였다. 계

측 위치에서 일정한 표면온도를 유지하기 위한 전력량을 역산하여 열 유속을 측정하였으며, 구멍 조끼 착용 상태를 달리하여 신체 부위별 열 유속을 측정하였다. 실험은 IMO MSC/Circ.922 (Paragraph 3.2.2) 및 ISO 15027-3(2012-11-01)의 Chapter 3.8의 protocol에 따라 실시하였다.

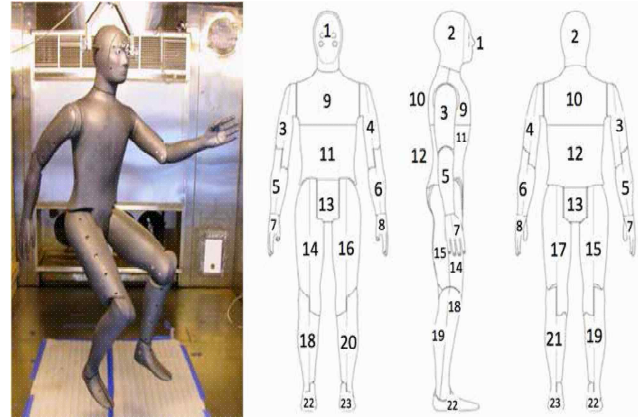


Fig. 1 Configurations of thermal mannequin

측된 열유속  $q''(W/m^2)$ 를 이용하면 아래와 같이 열저항을 계산할 수 있다.

$$R_i = \frac{T_{i \text{ skin}} - T_{i \text{ amb}}}{q''} \quad (1)$$

여기서  $R_i$ ,  $T_{i \text{ skin}}$ ,  $T_{i \text{ amb}}$ 와 는 각각 마네킨의 구역(Zone) 별 열저항( $K \cdot m^2/W$ ), 구역 평균 온도, 주변 온도를 의미한다.

### 2.2 실험조건

단열성능 비교를 비교하기 위해서 Table 1에 보인 4가지 경우의 서멀 마네킨 측정 실험을 수행하였다. 1, 2 번 실험은 기존의 팽창식 PFD(personal floating device)과 SOLAS 인증을 받은 폼(Foam)형을 의미한다. 3, 4 번 실험은 각각 본 연구에서 개발한 팽창식과 폼형 자켓을 의미한다. 전신 슈트(Full body suit) 모델은 인체 전체의 단열성능을 높이기 위해서 의복 형태로 개발된 모델이기 때문에 인체의 부력을 유지시키는 PFD와 함께 사용하였다. Orange Foam 모델은 의복 자체가 구멍 조끼의 역할을 하고 있다. 본 연구에서 개발된 구멍 조끼의 성능을 기존의 모델과 검토하기 위해서 SOLAS가 승인한 상용 구멍 조끼(2번), 팽창식 PFD만 단독으로 사용하는 구멍 조끼(1번)과 비교하였다.

Table 1 Experiment types

No.	Experimental Condition	
	Jacket type	Suit
1	Inflatable PFD*	Standard
2	Foam (SOLAS)*	Standard
3	Inflatable PFD**	Full Body Suit
4	Orange Foam**	Standard

\*: Existing model for comparative study

\*\* : Developed by present study

실험 과정은 인체가 평상복을 입은 상태에서 물속에 입수된 상태를 가정하기 위해서 Fig. 2와 같이, 속옷과 상, 하의 의복을 입은 상태로 서멀마네킨을 초기상태로 설정하였다. 서멀마네킨에서의 열유속 계측은 평가하고자 하는 구멍 조끼를 각각 입힌 상태로 20°C의 수조에 입수시킨 상태에서 열유속을 계측하였다. 외기에 의한 대류보다 수조 유체에 의한 대류의 열손실이 더 크기 때문에 외기 온도는 고려하지 않았다. 서멀마네킨의 표면온도는 전형적인 인체 표면온도인 33°C로 설정하였다. 실험은 서멀마네킨이 수조에 부유된 상태로 약 15분 동안의 열유속 변화를 계측하였다. Fig. 3부터 Fig. 6은 평상복을 입은 상태에서 각각의 구멍 조끼를 착용하여 실험을 진행되는 동안의 상태를 보여주고 있다. Fig. 7은 Full body suit와 PDF foam suit를 비교한 것이다.



Fig. 2 Manikin standard clothing ensemble



Fig. 3 Test 1 - standard Clothing + inflatable PFD only



Fig. 4 Test 2 - standard clothing + SOLAS-approved lifejacket



Fig. 5 Test 3 - standard clothing + full body suit with inflatable PFD



Fig. 6 Test 4 - standard clothing + orange foam suit



Fig. 7 Lifejacket tested: inflatable with full-body suit (left); foam with short sleeves and legs (right)

### 2.3 열저항 성능 비교 평가

각 의복 착용 조건에 대하여 15분 동안의 정상상태 온도 및 열유속 계측 값을 이용하여 마네킨의 전신 열저항 (full-body heat resistance)를 계산하였다. 전신 열저항은 각 신체 부위의 면적 비율을 고려하여 다음의 parallel resistance equation을 이용하여 계산하였다.

$$R_{mean} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{23} (A_i / (A_{total} R_i))} \quad (2)$$

여기서,  $R_{mean}$ 는 열저항 계산식에 의해 계산된 인체 전체에서의 열저항 값이며,  $A_i$ 는 인체 각 부위의 면적이며 Table 2에 제시하였다.  $A_{total}$ 은 인체 각 부위의 면적을 합산한 값이며,  $R_i$ 는 인체 각 부위에서 계산된 열 저항의 평균값이다.

Fig. 8은 Test 4에서 측정된 서멀 마네킨의 열유속 값이다. Table 3은 열유속과 측정온도, 그리고 식(2)를 이용하여 계산한 열 저항을 정리한 것이다. 이때 Clo는 의류의 열저항을 표현하는 단위이며, 1 Clo는  $0.155 K \cdot m^2/W$ 를 나타내며 이는  $21^\circ C$ ,  $0.1m/s$ , 습도 50%이하의 공기가 있는 공간에서 사람이 편히 앉아 체온을 유지하는데 필요한 단열능력을 말한다 (ASHRAE-55, 2013). 각 실험별로 계산된 열 저항값을 비교하면 Fig. 9와 같으며, 1번과 2번, 3번 실험에서 인체 각 부위에서의 열저항값의 차이를 육안으로는 확인하기 힘든 것을 확인할 수 있다. 또한 4번 실험에서는 인체의 절반 이상이 구멍 조끼가 착용되어 있기 때문에 전반적으로 열저항값이 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 다만, 손과 발, 얼굴은 공기와 접촉하고 있으므로, 해수의 효과와 관련이 적다고 판단되어 검토하지 않았다.

각 구멍 조끼의 열저항 성능을 객관적으로 평가하기 위해서 식 (2)에서 계산된 인체 전체에 대한 열저항 값을 비교하면 Fig. 10과 같으며, 피복을 입은 상태와 인체 전체에 대해서 구멍 조끼를 착용한 순서로 열저항 값이 높은 것을 확인함으로써 본 연구에서 검토한 구멍 조끼의 단열성능이 타 제품에 비해 우수한 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Experiment types

Zone	Description	Area ( $m^2$ )
1	Face	0.03601
2	Head	0.10965
3	Right Upper Arm	0.09557
4	Left Upper Arm	0.09557
5	Right Forearm	0.06281
6	Left Forearm	0.06281
7	Right Hand	0.04181
8	Left Hand	0.04181
9	Chest	0.10033
10	Shoulders	0.10369
11	Stomach	0.10528
12	Back	0.10673
13	Cod Piece	0.06121
14	Right Thigh Front	0.11928
15	Right Thigh Back	0.11928
16	Left Thigh Front	0.11586
17	Left Thigh Back	0.11586
18	Right Calf Front	0.06211
19	Right Calf Back	0.06368
20	Left Calf Front	0.06210
21	Left Calf Back	0.06368
22	Right Foot	0.05817
23	Left Foot	0.05817
	Total	1.6255

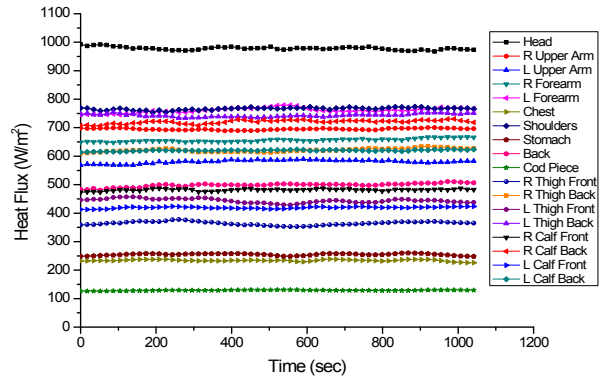


Fig. 8 Heat flux measured (Test 4)

Table 3 Experimental results on the thermal resistance

Test #	Full-Body Resistance (Clo)	Air Temp. ( $^\circ C$ )		Water Temp. ( $^\circ C$ )	
	Mean	Mean	St. Dev.	Mean	St. Dev.
1	1.025E-02	9.60	0.320	10.27	0.0025
2	1.061E-02	9.64	0.368	10.36	0.0032
3	1.359E-02	10.03	0.544	10.41	0.0056
4	1.634E-02	9.47	0.359	10.33	0.0037

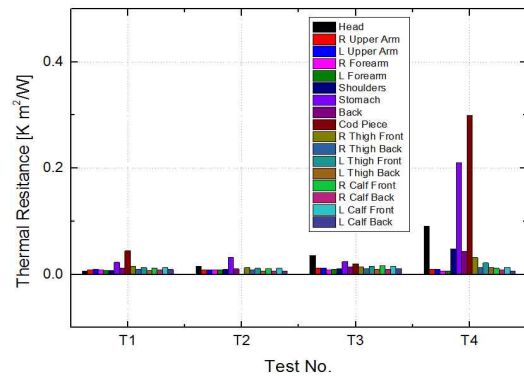


Fig. 9 Comparisons of thermal resistance ( $K \cdot m^2/W$ ) on body part

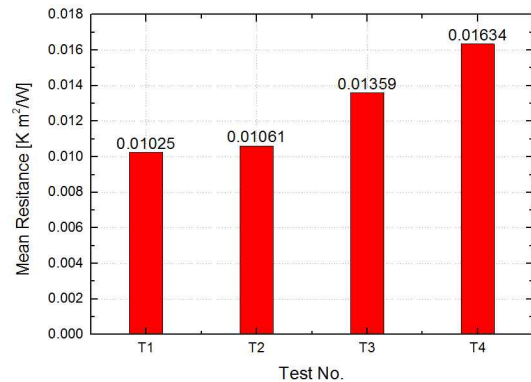


Fig. 10 Comparisons of mean resistance ( $K \cdot m^2/W$ ) on whole body

### 3. 저체온증 예측 및 성능 평가

저체온증을 유발하는 시간을 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 다만, 본 연구는 각 구멍 조끼 및 의복 착용 상태에 따른 저체온증 유발 가능성을 상대적으로 비교하기 위하여, 서멀마네킨의 열저항 값을 이용하여 체온 변화를 살펴 보았다. 각 유형별로 상대적인 단열 효과를 비교할 목적이므로 모든 신체를 대상으로 해석을 수행하지 않고, 수중에 완전히 잠겨있는 대퇴부를 대상으로 저체온증에 시간을 상대적으로 평가하였다.

단위 면적당 열저항 성능은 각각 전도 열 저항( $R'_{t,cond}$ )과 대류 열 저항( $R'_{t,conv}$ )의 두 가지로 나눌 수 있다. 양 측면의 온도가 각각  $T_{s,1}$ 과  $T_{s,2}$ 인 단층 평면에서 발생하는 열전도 저항( $R'_{t,cond}$ )은 식 (3)과 같이 표현된다. 표면의 온도가  $T_s$ 이고 주변 대류 유체의 온도차  $T_\infty$ 인 대류 열 저항( $R'_{t,conv}$ )은 식 (4)와 같이 계산하였다 (Hwang et al. 2014).

$$R'_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q''} = \frac{L}{k} \quad (3)$$

$$R'_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q''} = \frac{1}{h} \quad (4)$$

여기서,  $k$ 는 열전도 계수( $W/mK$ )이며,  $L$ 은 단열층의 두께( $m$ ),  $h$ 는 대류계수( $W/m^2K$ ),  $T$ 는 온도( $^\circ C$ ),  $q''$ 는 열 유속(heat flux,  $W/m^2$ )을 의미한다.

각 신체 부위에서 의복, 등에 의해 발생하는 단위 면적 당 열 저항 ( $R'_t$ )은 식 (5)와 같이 표현 될 수 있다. 이는 의복의 두께, 공기층의 두께, 접촉 저항 등 인체와 해수 사이에서 발생하는 열전달 특성을 모두 고려하여 표현할 수 있는 값이다.

$$R'_t = \left[ \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{k_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j} \right] = \frac{1}{h_{total}} \quad (5)$$

여기서,  $m, n$ 은 각각 의복 및 조끼의 전도 층과 대류 층의 개수를 의미한다. 그러나 식(5)에 보인 바와 같이 모든 층의 특성을 파악하는 것 보다는 각 부위별로 열 저항 값을 실험을 통하여 구하는 것이 적절하다. 구해진 저항 값은 등가 대류계수( $h_{total}$ ) 값으로 표현할 수 있다. 서멀마네킨을 이용하여 구한 열저항 값으로부터 등가 대류계수를 구하고, 이를 대류열전달 조건으로 반영하였다.

#### 3.1 저체온증 예측 유한요소모델

저체온증은 신체 내부의 온도를 기준으로 기준 온도를 정하였으나, 사람을 실험 대상으로 수행할 수는 없다. 따라서 유한요소해석법을 이용하여 체온 변화의 정도를 비교 예측할 필요가 있다. 유한요소해석 모델은 인체를 전도체로 가정하여 식 (6)과 같이 Pennes(1948)가 제시한 Bioheat 방법을 사용하

였다. 호흡에 의한 체온 저감 및 복사 열전달에 의한 체온 저하는 상대적으로 적다고 가정하였다. Bioheat 방정식은 인체의 신진대사 효과와 혈관대류 효과를 고려한 체내 열전달 현상을 대표하는 식으로 주로 피부 및 근육 조직의 온도 계산에 사용되고 있으며 내부 열 생성을 가진 열확산 방정식으로 표현된다 (Jang et al., 2015).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q'''_m + q'''_b \quad (6)$$

여기서  $\rho$ 는 신체 조직의 밀도,  $c$ 는 조직의 비열,  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간이며,  $k$ 는 열전도계수이다. 또한  $q'''_m$ 는 인체의 신진대사(basal metabolism)로 발생하는 heat generation으로서 각 부위별 값은 Table 4와 같다.  $q'''_b$ 는 인체 피부 아래 혈관에서 피의 흐름에 의해 발생하는 대류조건이다. 본 연구에서는 유한요소 해석 모델을 단순화하기 위해서 인체는  $q'''_b$ 가 발생하지 않는 전도체라고 가정하고 해석하였다.

인체의 저체온증 예측모델은 인체 부위 중 Fig. 11과 같이 대퇴부(thigh)를 기준으로 작성하였다. 인체모델의 열전달 경계조건은 피부에서 대류가 발생한다고 가정하고 대류조건으로 반영하였다. 대류조건을 반영하기 위한 대류계수는 서멀마네킨 실험에서 계측된 열저항을 식 (4)을 이용하여 계산하였다. 각 모델별로 열전달 해석에 적용된 대류계수는 Table 5에 보인 바와 같다.

Table 4 Thermal condition and properties of thigh

Tissue	k (W/mK)	Basal metabolism (W/m <sup>3</sup> )
Skin	0.47	368
Fat	0.21	368
Muscle	0.51	684
Bone	0.75	368

Table 5 Convection coefficient for thermal analysis

No.	Convection coefficient (W/m <sup>2</sup> K)
1	97.56
2	94.25
3	73.58
4	61.20

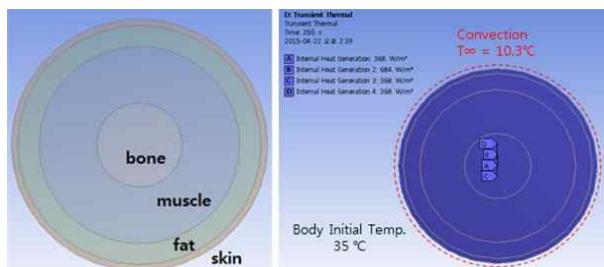


Fig. 11 Finite element model of thigh

### 3.2 열전달 해석 결과

저체온증 예측을 위한 인체모델의 열전달 해석은 1시간동안 Transient 해석을 통해 각각 모델에 대해서 수행되었으며, 이때 발생하는 인체의 온도변화를 관찰하였다. 4번 실험모델인 Foam Suit를 착용한 상태에서의 시간에 따른 인체 모델의 온도변화는 Fig. 11과 같으며, 저체온증에 약 1,800초부터 인체의 온도인 35℃ 이하로 하강하는 것을 확인 할 수 있다.

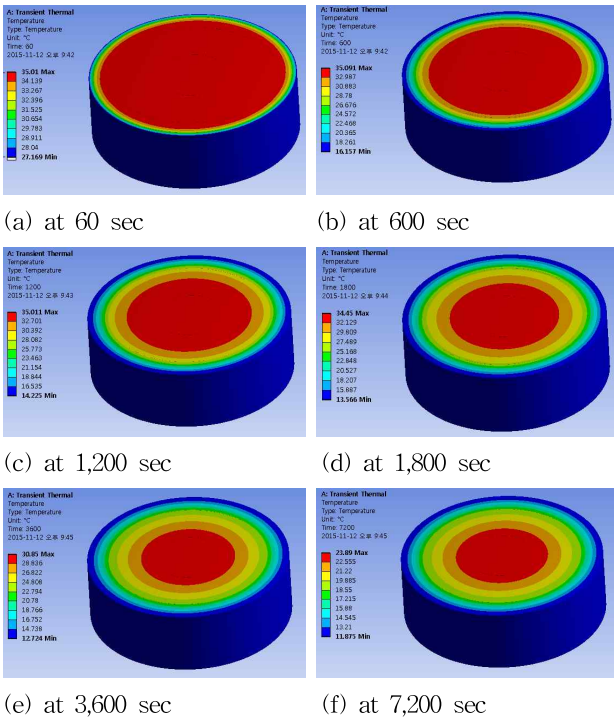


Fig. 12 Temperature distribution of thigh of test 4 model

Fig. 12은 시험조건 4번에 대해서 1시간동안 인체 중심부에서의 온도 변화를 보여주고 있다. 또한 인체 부위에서 최저 온도가 계속되는 피부에서의 온도변화를 확인한 결과 Fig. 14과 같이 2시간 이후인 저체온증에 빠진 상태에서는 약 11℃의 온도분포가 분포하는 것을 확인 할 수 있고, Fig 15와 같이 온도 변화 이력을 살펴보면, 입수된 후 약 5분 이내에 피부온도가 20℃ 이하로 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. Fig 16은 인체에서 발생하는 열유속을 도시한 그림이며, Fig 17은 인체에서 발생하는 최대 열유속의 이력을 도시한 그림이다. 최대 열유속 변화를 살펴보면 1,200초까지 열유속의 변화가 크게 발생하여, 이 시간동안 인체에서 다량의 열이 유출되고 있음을 유추할 수 있다.

### 3.3 저체온증 판단

저체온증이란 체온의 손실에 커지게 되면서 체내 온도가 저하되었을 때 발생하는 증상으로 심하게는 사망에 이를 수 있는 증상이다. 인체의 저체온증 판단기준은 Table 6에서와 같이 정상 시 32.2~35℃ 구간을 Mild, 28~32.2℃ 구간을 Moderate, 28℃ 이하를 Severe 구간으로 정의하였다. 본 판단

기준으로 앞서 수행한 열전달 해석결과와 비교하여 해당 실험 조건에서의 저체온증 발생 여부를 판단하였다.

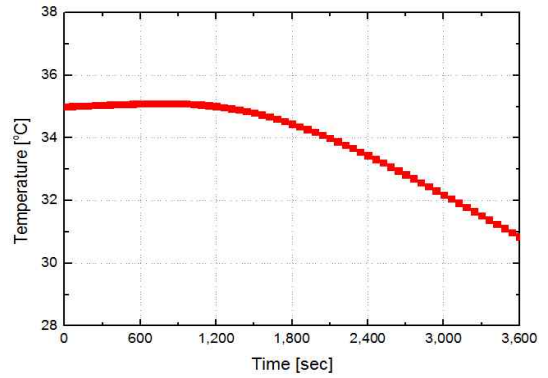


Fig. 13 Max. temperature history of thigh of Test 4 model

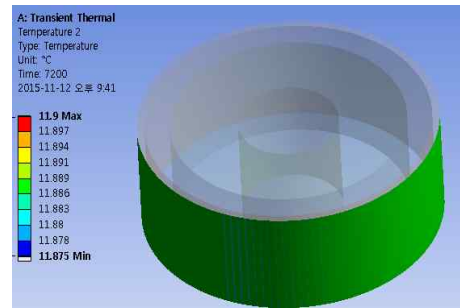


Fig. 14 Temperature distribution at skin of Test 4 model

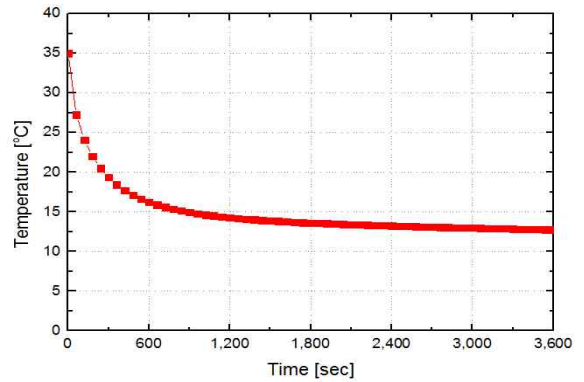


Fig. 15 Skin temperature history at skin of Test 4 model

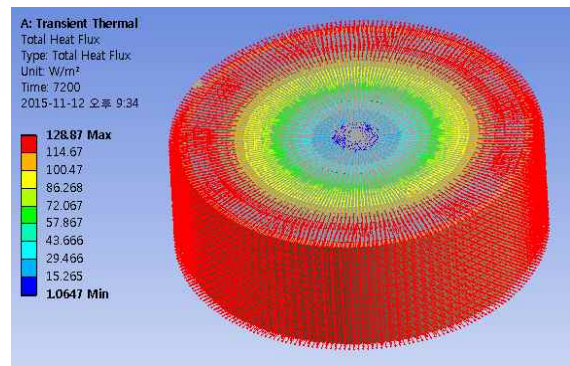


Fig. 16 Heat flux distribution of thigh of Test 4 model

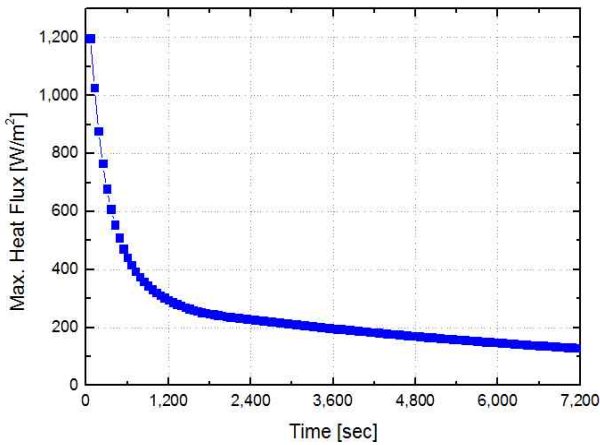


Fig. 17 Heat flux history of thigh of Test 4 model

저체온증 판단기준은 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 대퇴부의 중심부인 최대 온도를 기준으로 살펴볼 때, Foam suit를 착용한 4번 시험 모델의 경우 온도가 32℃ 이하로 떨어지는 약 3,000 초부터 인체에 저체온증이 발생하여 위험상태에 빠지는 것을 확인 할 수 있으나, Fig. 15와 Fig. 17과 같이 약 10분 이내에 인체의 온도 및 열 유속 변화가 크게 발생하기 때문에, 인체의 온도변화가 심한 구간에서도 위험성이 발생하는 것을 예측할 수 있다.

본 연구에서 검토한 각각의 모델에 대해서 열전달 해석을 수행하여 각 제품들을 착용하였을 때, 저체온증에 빠지는 시간 이력을 비교하면 Fig. 18과 같이 약 50분 내외에 인체에 저체온증이 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 각 모델별로 저체온증이 발생하는 시간을 비교하면 Table 8와 같이 구멍 조끼의 단열성능에 비례하여 증가하는 것을 확인 할 수 있으며 단열성능이 우수한 Foam suit를 착용하였을 때 그렇지 않을 때보다 약 6분정도 시간이 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4. 구멍 조끼 타입에 따른 단열 성능 비교

앞 절에서 수행한 실험과 수치해석 방법을 통해서 본 연구에서 개발하고자 하는 구멍 조끼의 단열 성능에 대해서 상대적인 비교 평가를 하였다. 실험 조건은 수온 약 20℃에서 동일한 조건으로 수행하였으며, PFD만 착용한 표준 의복상태를 기준 각 구멍 조끼의 단열 성능에 대해서 상대적으로 평가하였다. 각 실험결과를 비교평가하면 SOLAS 규격의 구멍 조끼를 착용하였을 경우, 약 3%의 단열성능 차이로 구멍 조끼를 착용하지 않았을 때와 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있으며, Full body suit를 착용하였을 경우 33% 더 크게 열저항이 발생하여, 본 연구에서 검토한 Full body suit의 단열성이 우수한 것을 확인 할 수 있으며, Foam suit를 착용하였을 경우는 착용하지 않은 경우와 비교하여 약 60% 크게 단열성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있다.

또한 저체온증 해석을 통해서 저체온증이 도달하는 시간이

단열성능과 비교했을 때보다는 상승 폭이 크지는 않지만, Foam suit의 경우는 13%의 시간이 증가한 것을 확인 할 수 있다.

Table 6 Temperature criteria of hypothermia (Jang et al., 2015)

Status	Temperature(℃)	Time(minute)
Mild	32.2 ~ 35	~ 90
Moderate	28 ~ 32.2	90 ~ 120
Severe	< 28	120 ~

Table 7 Hypothermia time

No.	Hypothermia time (second)
1	2,940
2	3,000
3	3,120
4	3,330

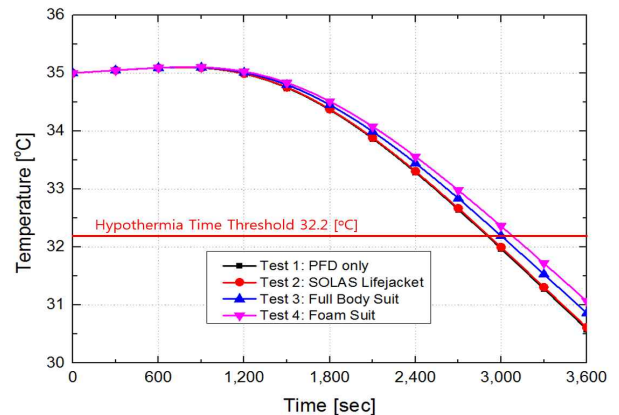


Fig. 18 Comparisons of hypothermia time

Table 8 Comparisons of thermal resistance and hypothermia time

Experimental Condition	Thermal resistance		Hypothermia time	
	$R''_t$	Percentile (%)	Hyp. time(second)	Percentile (%)
Test 1	1.025e-02	100%	2,940	100%
Test 2	1.061e-02	103%	3,000	102%
Test 3	1.359e-02	133%	3,120	106%
Test 4	1.634e-02	159%	3,330	113%

## 5. 결론

본 연구는 저체온증을 방지하기 위한 팽창식 구멍 조끼를 개발함에 있어서 비교평가를 통해 단열 성능에 대해서 실험을 통해서 검증하고, 저체온증에 빠지는 상태를 파악하기 위해서 인체의 온도변화를 수치적으로 검토하였다. 서멀마네킨을 이용한 구멍 조끼의 단열성능 비교평가 결과 본 연구에서 제시한 Full Body Suit와 Foam Suit의 열저항값이 높게 측정되어 단열성능이 우수한 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 본 구멍조끼를 착용할 경우 저체온증에 빠지는 시간이 증가함에 따라 조난자의 생존성을 보장할 수 있는 가능성이 높아지는 것을 확인하였다.

저체온증 시뮬레이션에서 검토된 인체 모델은 대퇴부를 기준으로 분석되었으며 그 결과 약 90분 뒤에는 Moderate상태에 빠지고, 약 120분 뒤에는 Severe상태에 빠지게 된다고 나타남으로서 타 제품에 비해 열저항은 최대 약 60%, 저체온증 도달 시간은 최대 약 13%정도 더 우수한 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 검토한 저체온증 예측모델은 간이화된 모델로서 실제 인체조건과의 차이가 크게 발생할 수 있다는 점을 감안하여 정량적인 정확성 보다는 정성적인 변화 위주로 해석한 점은 추후 보완이 필요할 것으로 판단되며, 실제 조끼의 착용 상태 및 간극을 고려한 열손실에 대한 해석도 필요하다고 사료된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학사업의 지원을 받았으며, 해양수산부의 수산실용화기술개발사업의 지원으로 수행된 '저체온증 예방을 위한 기능성 구멍조끼 개발(과제번호 : 20130288)'연구의 일부임을 밝힙니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

[1] ASHRAE Standard 55(2013), Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.

[2] Ferreira, M. S. and Yanagihara, J. I.(2009). "A transient three-dimensional heat transfer model of the human body", International Communications in heat and mass transfer, Vol. 36, pp. 718-724.

[3] Holmér, I.(2004). "Thermal Manikin History and Applications", Eur. J. Appl. Physiol, Vol. 92, pp.614-618.

[4] Hwang, S. Y., Jang, H. S., Kim, K. W., and Lee, J. H. (2014), "Evaluation of Thermal Insulation and Hypothermia for Development of Life Raft", Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineering Annual Autumn Conference, pp. 508-511.

[5] Jang, H. S., Hwang, S. Y., Kim, K. W. and Lee, J. H.(2015), "Evaluation of Thermal Insulation and Hypothermia for Development of Life Raft", KSOE Annual Spring Conferences.

[6] Kim, S. C., Lee, K. H., Hwang, S. Y., Lee J. S. and Lee, J. H.(2015)., "Thermal Insulation Effect of Inflatable Life Vest on the Drowned Individual estimated by Numerical analysis", Journal of Navigation and Port Research. Vol. 39, No. 4, pp. 285-291.

[7] Li, C., and Ito, K.(2014). "Numerical and experimental estimation of convective heat transfer coefficient of human body under strong forced convective flow", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 126, pp. 107 - 117.

[8] Li, F., Wang, Y., and Li, Y.(2013). "A Transient 3-D Thermal Model for Clothed Human Body Considering More Real Geometry", Journal of Computers, Vol. 8, No. 3, pp. 676 - 684.

[9] Mak, L. et al.(2008). "Assessment of Thermal Protection of Life rafts in Passenger Vessel Abandonment Situations", Proceedings of ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers. pp. 389-398.

[10] Pennes, H. H.(1948), "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm", Journal of Applied Physiology, Vol. 1, pp. 93-122.

[11] Tikuisis, P., Jacobs, I., Moroz, D., Vallerand, A.L., and Martineau, L.(2000), "Comparison of thermoregulatory responses between men and women immersed in cold water", Journal of Applied Physiology, Vol. 89, No.4, pp. 1403 - 1411.

[12] Xu, X., Tikuisis, P., Gonzalez, R., and Giesbrecht, G.(2005), "Thermoregulatory model for prediction of long-term cold exposure", Computers in Biology and Medicine, Vol. 35, No. 4, pp. 287 - 298.

[13] Xu, X., Turner, C. A. and Santee, W. R. (2011), "Survival time prediction in marine environments", Journal of Thermal Biology, Vol. 36, No. 6, pp. 340 - 345.

[14] Yildirim, E. D., and Ozerdem, B. (2008), "A numerical simulation study for the human passive thermal system", Energy and Buildings, Vol. 40, No. 7, pp. 1117 - 1123.

Received 23 November 2015

Revised 23 February 2016

Accepted 26 February 2016