

해상 구명정의 단열성능평가 및 저체온증 예측 수치해석 연구

황세윤* · 장호상** · 김경우*** · † 이장현

*인하대학교 공과대학 산업과학기술연구소, **인하대학교 대학원, ***선박안전기술공단, † 인하대학교 조선해양공학과 교수

Evaluation of Thermal Insulation and Hypothermia for Development of Life Raft

Se-Yun Hwang* · Ho-Sang Jang** · Kyung-Woo Kim*** · † Jang-Hyun Lee

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

**Graduate School of department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Rep. of Korea

***Korea Ship Safety Technology Authority, Korea

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

요 약 : 구명정의 열전달 특성 및 해상상태에 따른 조난자의 저체온증 발생 가능성에 대한 기술적 검토는 선박의 좌초 및 침몰 사고에 대응하기 위해 활용될 수 있다. 본 연구는 해상용 구명정(또는 구명벌)의 설계에 필요한 열전달 특성 및 단열 성능을 분석 및 평가방법에 대해서 연구하였다. 또한, 해상 저체온증 발생 가능성을 파악하기 위한 연구로써 Thermal manikin과 인체를 대상으로 체온 저하의 예측을 판단하기 위한 단열성능 실험 및 인체 온도 특성 해석 결과를 제시하였다. 열전달 해석은 구명 뗏목의 열전도 특성, 해수의 대류 효과 및 단열 재료의 특성에 따른 성능 변화를 파악하도록 유한요소해석 방법을 적용하였다. 인체 시험에서 입수 시 신체 온도 변화를 파악하기 위해서 각 부위에 열전대를 부착한 상태로 구명정에 탑승하여 온도 변화 및 열유속 변화를 계속하였다. 실험으로부터 계속한 체온 변화와 유한요소해석 모델의 체온 변화를 비교함으로써 결과의 타당성을 제시하였다. 나아가 유한요소해석을 통해 저체온증 발생 가능성을 검토하였다.

핵심용어 : 구명정, 구명벌, 열저항, 저체온증, 대류열전달, 인체열전달

Abstract : The technology review about risk of hypothermia of victim according to heat transfer characteristic of life raft and sea state can use accident correspondence of standing and sinking of ship. This study studied heat transfer characteristics required for the design of life raft and thermal insulation property analysis and evaluation methods. In addition, it is study for comprehend the risk of hypothermia and suggest analysis result that is experiment of thermal insulation property and body temperature property for decide of prediction the body temperature decline Thermal Analysis apply the finite element analysis method is comprehended the property of heat conductivity, convective effect of sea water and properties changes according to property of insulation material. it measure the heat flux with attach temperature sensor on body in order to comprehend the variation of body temperature with boarding a life raft experiment on a human body. This study validate results by comparing variation of temperature measured from experiment on a body with variation of temperature from finite element analysis model. Also, the criteria of hypothermia was discussed through result of finite element analysis.

Key words : life raft, heat transfer, thermal resistance, hypothermia, convective heat transfer

1. 서론

선박의 좌초, 충돌 등 사고의 증가로 조난자가 발생할 경우 조난자의 체온과 안전을 보장할 수 있는 구명정 및 구명 뗏목(보트) 등의 역할에 대한 사회적 기술적 관심이 증대하고 있다. 선박의 해양사고 시 익수자의 저체온증에 의한 사망사고를 예방하기 위해서는 구명정의 단열 성능 분석 및 저체온증 가능성 및 익수자의 체온 변화를 파악할 수 있는 접근방법이 필요하다. 구명정의 단열 성능 요구사항을 체계적으로 제시한 국제표준 또는 선급 규정 항목은 명확하지 않으나, Mak et

al.(2008)의 연구는 구명정과 체온 변화의 관계, 저체온증 발생 가능성에 관한 실험을 제시하고 있다. 본 연구는 빙해수조 내에서 구명 뗏목 탑승자의 의복 상태 및 해수 온도, 풍속 등과의 관계를 실험하였으며 신체에 열전대를 부착하여 온도 변화를 관찰하였다. 해상 익수자의 저체온증 해석에 관한 연구는 Xu et al.(2011), Xu et al.(2005), Tikuisi et al.(2000) 등에서 찾아 볼 수 있다. 또한 본 연구의 선행연구로서 구명정의 열전달 특성 분석과 인체를 대상으로 저체온증 예측을 위한 실험 및 해석적인 연구도 수행된 바 있다(Jang et al., 2015; Hwang et al., 2014). 본 논문에서는 앞서 언급한 선행연구의 성과를 설

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

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

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

*** 연희원, benj7901@kst.or.kr 044)330-2343

계에 반영하여 개발된 새로운 구명정 단열성능을 정량적으로 평가하였다.

또한, 구명정에 탑승하여 표류 시 발생 할 수 있는 저체온증을 예측하기 위한 실험과 해석적 연구를 수행하여 개발된 구명정의 단열성능에 대해서 평가하였다. 저체온증 예측을 위한 실험은 인체를 대상으로 수행하였으며, 실험적 한계를 극복하기 위해서 유한요소해석 방법을 이용하여 저체온증 예측을 수행하였다. 저체온증 해석은 주로 Pennes bioheat 방정식을 기반으로 유한요소법 또는 유한차분법을 이용하여 직접 해석하고 있으나, 체온 변화의 정확성은 기술적인 어려움이 있다. 이는 신체 내부의 발열 조건, 복사 열전달, 호흡에 의한 열전달, 혈관 분포, 피부 및 근육, 신체 구조의 복잡성뿐만 아니라, Pennes bioheat 방정식의 비선형성에 의한 이유로 분석된다. 따라서 본 연구에서는 저체온증 예측을 위해서 단순화된 인체 부분 모델을 제시하고 그 결과의 타당성을 검토하였다.

2. 구명정의 단열성능 평가

구명정 개발을 위한 단열성능 평가는 시판되고 있는 6인승 구명정을 대상으로 외산 3종(Zodiac, EV, Platimo) 제품과 개발하고자 하는 시제품을 대상으로 상대적으로 평가하였다. 평가방법은 첫번째로 열저항 계산식을 이용한 평가방법을 적용하였으며, Thermal makekin을 이용한 실험을 통해 단열성능을 비교하였다.

2.1 구명정의 열적 환경

구명정의 단열성능을 평가하기 위해서 구명정의 형상 및 재료 특징을 반영하여야 하며, 구명정의 열적 환경에 대해서 분석하여야 한다. 해상상태에서의 구명정의 열적 환경은 Fig. 1에서와 같이 해수 및 공기에 의한 대류조건과 인체의 온도변화를 열적 특성으로 분류 할 수 있다.



Fig. 1 Thermal environment of life raft

2.1 열저항 성능 평가

단순 평면에서 발생하는 열전도 (Heat conduction)에 의해 발생하는 열 저항($R_{t,cond}$)과 대류에 의하여 발생하는 열 저항($R_{t,conv}$)는 아래와 같은 식 (1)과 (2)에서와 같이 표현할 수

있다.

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (1)$$

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (2)$$

여기서, k 는 열전도계수(W/mK)이며, L 은 단열층의 두께(m), h 는 대류계수(W/m^2K), T 는 온도($^\circ C$), q 는 열유속(heat flux, W/m^2), A 는 단면적(m^2)이다.

구명정에서 발생하는 열전달은 우선 구명정 하부를 대상으로 검토하였다. 이를 이론적으로 계산하기 위해서 구명 돛목 하부의 단열층의 열저항 값을 계산하여 판단 할 수 있으며 Fig. 2에 제시한 구명 돛목의 하부 단열층에서의 열저항은 전도와 대류에 의한 열저항을 합산하여 아래의 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sum R_t = R_{total} = \frac{1}{A} \left[\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4} \right] = \frac{R'_{total}}{A} \quad (3)$$

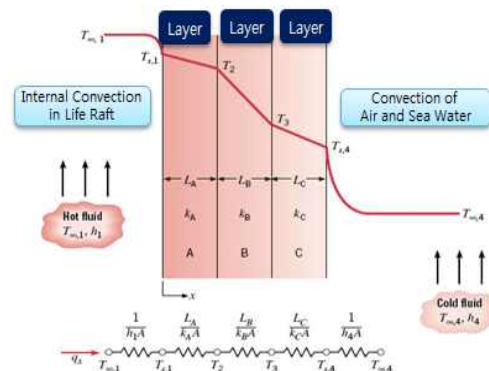


Fig. 2 Schematic model of thermal resistance(Kim et al., 2015)

구명정의 바닥의 열 저항(보온) 특성을 각기 다른 재료에 대해서 비교하면 아래의 Table 1와 같이 계산되며, 열저항 값은 단열층의 개수 및 재료에 크게 의존함을 알 수 있다. 열저항 평가 대상은 구명정이 해상상태에서 해수와 접하는 바닥면에서 대류가 가장 활발하다고 가정하고 바닥면을 대상으로 평가하였다. 각 제품의 바닥면 재료는 실제로 각 제품별 열전도계수 값의 차이는 있으나, 그 차이가 적다고 가정하고, Rubber와 Techlon로서 동일한 재료를 사용한다고 가정하여 평가하였다. 그 결과 단열층이 포함되지 않은 EV 제품에서 열저항값이 가장 낮게 계산되었으며 단열층이 두께 열저항값이 비례하는 것을 확인할 수 있다. 열저항 평가를 통해 개발된 모델에서는 같은 단열재를 사용할 경우 구명정의 성능과 설계에 영향을 주지 않는 범위 내에서 3mm 이상의 단열재를 바닥에 사용함으로써 단열성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Table 1 Schematic model of thermal resistance

	Zodiac	EV(no air layer)	Plastimo	Present
k_A	0.2 (nylon)	0.2 (nylon)	0.2 (nylon)	0.2 (nylon)
L_A	1mm	1mm	1mm	1mm
k_B	0.05 (techlon)	0.2 (nylon)	0.05 (techlon)	0.05 (techlon)
L_B	2mm	1mm	1mm	3mm
R'	45	10	25	65

2.2 단열성능 검증 실험

구명정의 단열성능을 검증하기 위해서 각 제품을 대상으로 Thermal manikin을 이용한 단열성능 실험을 수행하고 그 결과를 상대적으로 비교하여 평가하였다. Thermal manikin 실험은 0℃의 저온 챔버에서 5℃의 물이 채워진 수조에 구명정을 부유시키고 Fig. 3과 4에서와 같이 Thermal manikin을 탑승 시켜 1시간 동안의 열유속(Heat flux)의 변화량을 측정하였다.

열유속 측정을 위해 Thermal manikin의 표면온도를 35℃를 유지하도록 설정하고 실험을 수행하였다. 단열성능 평가를 위한 실험조건은 Table 2에서와 같다.



Fig. 3 Experimental condition of thermal insulation assessment using thermal manikin



Fig. 4 Life raft in low temperature chamber

Table 2 Experiment condition of thermal insulation

Parameter	Value
Wind Speed	0.5 m/s
Ambient Temp.	0 °C (± 1 °C)
Water Temp.	5 °C (± 2 °C)
Skin Temp. of thermal manikin	35 °C (± 0.2 °C)

2.3 단열성능 평가

열전달 실험을 통해 각 구명정을 대상으로 Thermal manikin에서 발생하는 열유속을 측정하여 단열성능을 비교 평가 하였다. 단열성능 평가 실험에서 각 부위별로 측정된 열유속(q''_i)을 식 (4)에서와 같이 각 부위별 단면적(A_i)을 곱하여 얻어진 열유량(q_i)으로 환산하여 비교하면 Fig. 5에서와 같다. 비교 결과 대부분의 위치에서는 유사한 값이 측정되었으나 바닥면에 단열재가 없는 EV 제품에서는 바닥과 접하는 인체의 각 부위에서 높은 열유량이 측정된 것을 확인할 수 있다.

각 제품의 단열성능을 비교하기 위해서 계산된 열유량을 식 (2)에서와 같이 합산하고, 이를 식 (3)에서와 같이 총 열유량으로 환산하면 Fig. 6에서와 같이 시제품이 총 열유량이 가장 낮게 측정되어 시제품에서의 단열성능이 가장 높은 것으로 평가되었다.

$$q_i = q''_{i,avg} \cdot A_i \tag{4}$$

$$q_{total} [W] = \sum_{i=1}^n q''_{i,avg} \cdot A_i \tag{5}$$

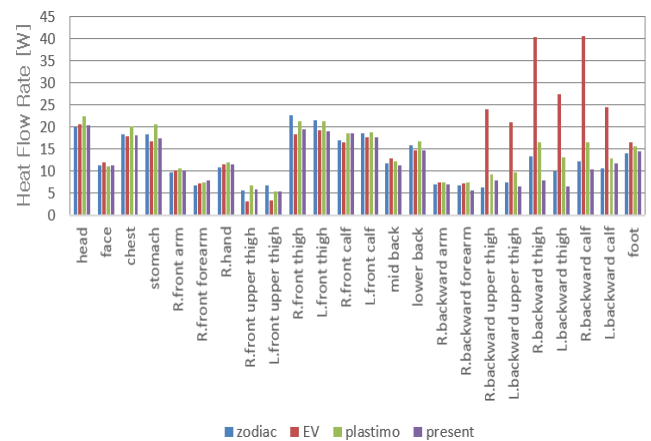


Fig. 5 Comparison of heat flux for each part of thermal manikin

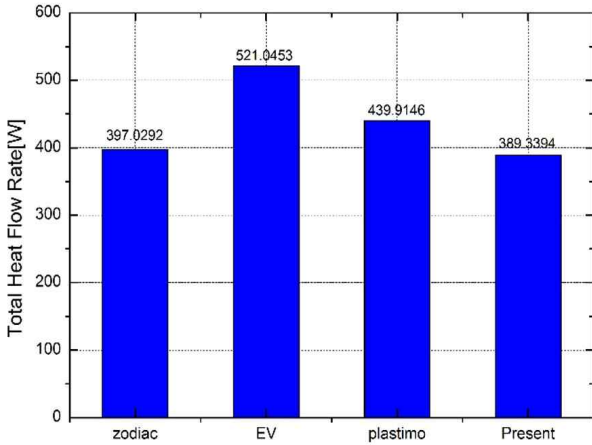


Fig. 6 Comparison of total heat flow rate

3. 저체온증 예측 실험

저체온증 예측을 위해서 인체를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2에서와 같이 구명정 단열성능 평가와 같은조건으로 수행되었으며 피시험자의 위험도를 고려하여 1시간동안 인체 각 부위에서의 온도변화를 관찰하였다. 온도계측 위치는 Fig. 8에서와 같이 Thermal manikin과 동일하게 설정하였으며, 대류가 활발하게 일어나는 바닥면과 접하는 인체부위에 계측위치를 증가시켜 확인하였다. 저체온증 예측 인체실험은 개발된 시제품을 대상으로 수행되었으며, 계측실험 조건은 Fig. 7에서와 같다.

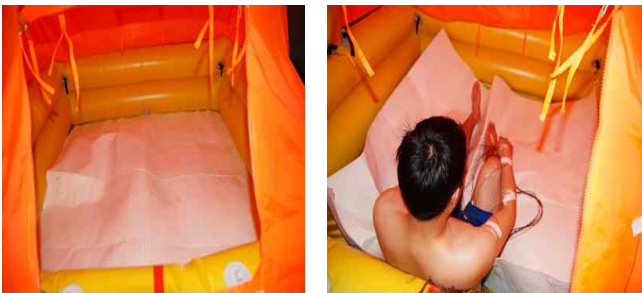


Fig. 7 Experimental condition for hypothermia

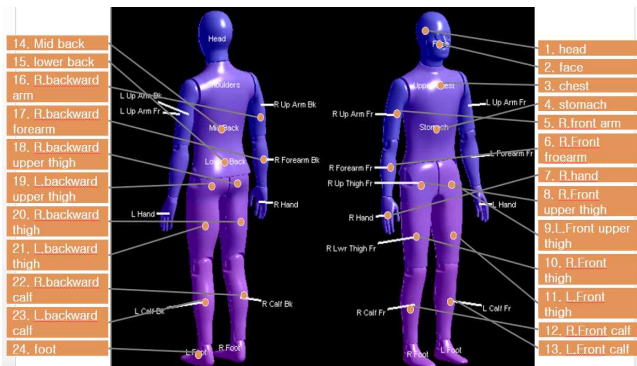


Fig. 8 Positions of temperature measure of human body

인체실험 결과 1시간 동안의 각 부위별 온도변화는 Fig. 9에서와 같이 일부 부분을 제외한 전체 신체부위에서 1시간동안 온도가 하강하는 결과를 확인하였다. 주요 부위별 온도 변화는 Head는 $-1^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, Chest는 $-1^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, Foot는 $-5^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, Hand는 $-5^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, Thigh $-4^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 로 계측되었다. 시뮬레이션 대상으로 Head와 Thigh를 선택 하였다.

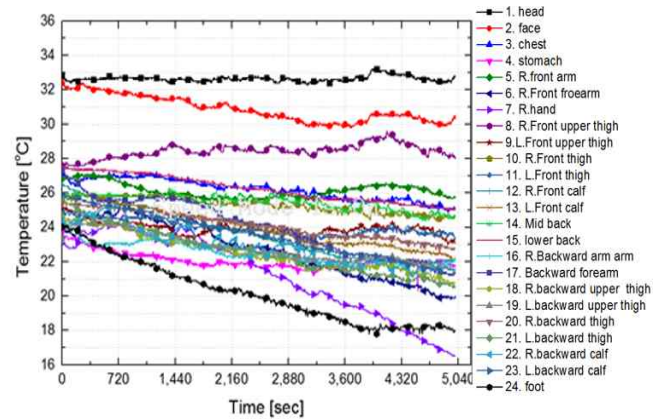


Fig. 9 Temperature history of parts of human body

4. 저체온증 예측 시뮬레이션

4.1 저체온증 예측 모델

저체온증을 판단하기 위해서는 신체 내부의 온도를 기준으로 판단하게 되는데 앞서 언급한 인체실험 조건으로 저체온증 예측 결과를 도출하는데는 사고 위험 및 한계가 있기 때문에 유한요소해석법 (Finite Element Analysis)을 이용하여 인체가 저체온증에 빠지는 시간을 예측하였다. 유한요소해석 모델은 인체를 전도체로 가정하여 식 (4)에서와 같이 Pennes(1948)가 제시한 방법을 사용하였다. 이는 호흡에 의한 체온 저감 및 복사 열전달에 의한 체온 저하는 상대적으로 적다는 가정을 두고, 주로 피부 조직의 체온을 예측하기 위하여 Bioheat 방정식을 제안하였다. 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.

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

여기서 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 3에서와 같다. q'''_b 는 인체 피부 아래 혈관에서 피의 흐름에 의해 발생하는 대류조

건이다. 본 연구에서는 유한요소 해석 모델을 단순화하기 위해서 인체는 q''_b 가 발생하지 않는 전도체라고 가정하고 해석하였다.

인체의 저체온증 예측모델은 Thermal manikin 실험결과로부터 구멍정의 바닥면과 접하는 대퇴부(thigh)와 머리(head) 부에서 가장 활발히 발생하였다. 따라서 저체온증 예측 모델은 Fig. 10과 Fig. 11에서와 같이 두 인체 부위를 대상으로 작성하였다.

인체모델의 열전달 경계조건은 피부에서 대류가 발생한다고 가정하고 대류조건으로 반영하였다. 대류조건을 반영하기 위한 대류계수는 Thermal manikin 실험에서 측정된 실내온도를 기준으로 식 (7)의해 계산하고, T_s 는 Thermal manikin의 표면온도 35°C를 적용하고, T_∞ 는 인체실험에서 측정된 실내 온도 7.5°C를 적용하여 대류계수를 인체 부위별로 계산하였다.

$$h = q'' / (T_\infty - T_s) \tag{7}$$

Table 3 Parameters of human model

Tissue	k (W/mK)	Basal metabolism (W/m ³)
skin	0.47	368
fat	0.21	368
muscle	0.51	684
bone	0.75	368

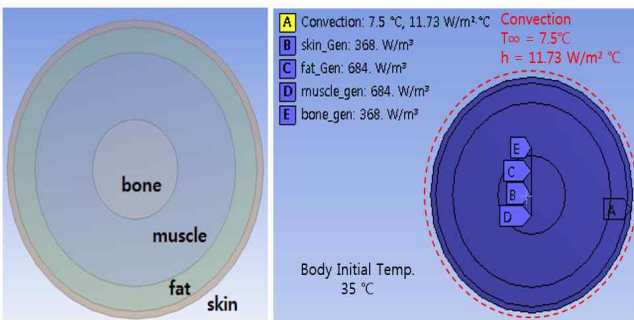


Fig. 10 Finite element model of thigh

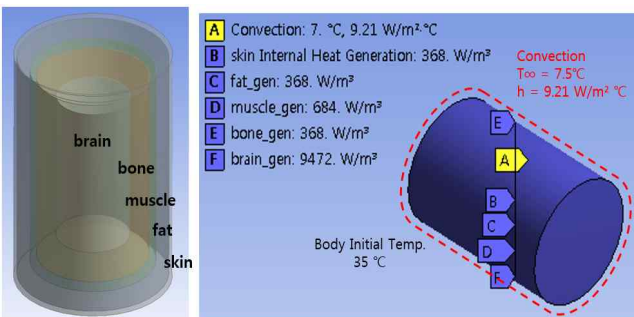


Fig. 11 Finite element model of head

4.2 열전달 해석 결과

저체온증 예측을 위한 열전달 유한요소해석은 10시간동안의 인체변화를 관찰하였다. 해석 결과 10시간 이후 대퇴부의 온도분포는 Fig. 12에서와 같이 최대 온도가 12.8°C로 분포함을 확인하였고, 해석 시간동안 인체의 최대 온도변화는 Fig. 13에서와 같이 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 열전달 해석 모델의 타당성을 검토하기 위해서 Fig. 13에서와 같이 대퇴부를 기준으로 실험에서 측정된 온도와 비교하였다. 실험 결과는 인체 실험 시작 후 1시간 이후 대퇴부에서 측정된 온도가 22.75°C 이고, 유한요소 해석을 통한 예측된 온도는 Fig. 11에서와 같이 약 21°C로서 유한요소해석을 통해 얻어진 온도분포가 실험결과와 유사함을 확인하였다.

또한, 머리부위에서의 온도변화를 살펴보면 10시간 이후 Fig. 14에서와 같이 최대 온도가 약 27°C로 분포함을 확인 할 수 있고, 해석 시간동안 인체의 최대 온도변화는 Fig. 15에서와 같이 변화하는 것을 확인 할 수 있으며, 머리부에서는 brain의 heat generation에 의해 온도가 다소 상승하는 현상을 확인 할 수 있다. 그리고 실험결과와 수치해석 결과를 비교하면 인체 실험 시작 후 1시간 이후 머리부에서 측정된 온도가 30°C 이고, 유한요소 해석을 통한 예측된 온도는 Fig. 15에서와 같이 약 34.7°C로서 유한요소해석을 통해 얻어진 온도분포가 실험결과와 유사함을 확인하였다.

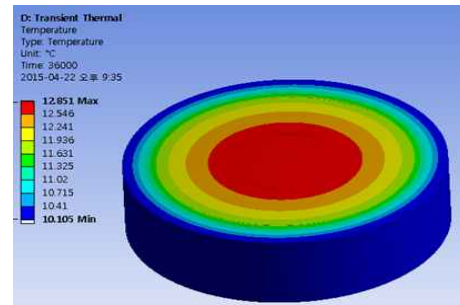


Fig. 12 Temperature distributions of thigh at 10 hours

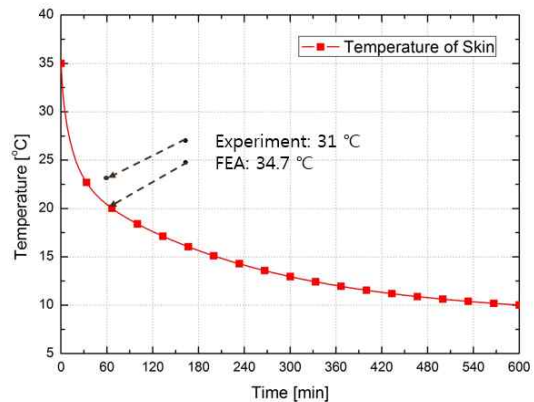


Fig. 13 Temperature history by FEA and comparison between experiment and FEA results of thigh

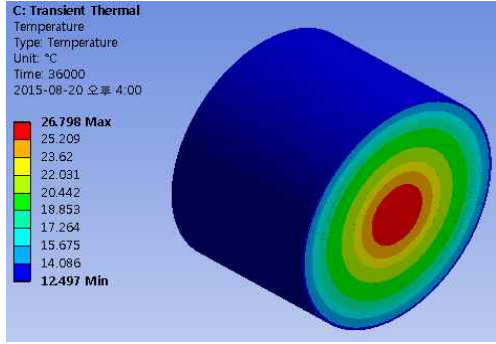


Fig. 14 Temperature distributions of head at 10 hours

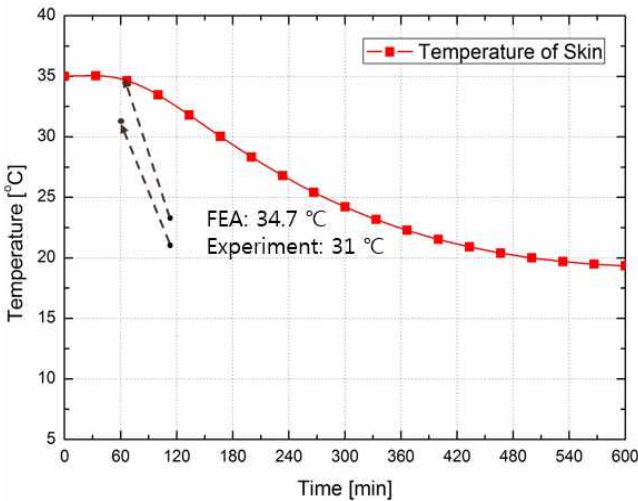


Fig. 15 Temperature history by FEA and comparison between experiment and FEA results of head

3.4 저체온증 판단

인체의 저체온증 판단기준은 Table 4에서와 같이 정상 시 32.2~35°C 구간을 Mild, 28~32.2°C 구간을 Moderate, 28°C 이하를 Severe 구간으로 정의하였다. 본 판단기준으로 앞서 수행한 열전달 해석결과와 비교하여 해당 실험조건에서의 저체온증 발생 여부를 판단하였다.

Table 4 Temperature criteria of hypothermia

Status	Temp.	Time
Mild	32.2 ~ 35°C	~ 90m
Moderate	28 ~ 32.2°C	90m ~ 120m
Severe	< 28°C	120m ~

저체온증 판단은 10시간동안 수행된 열전달 수치해석결과에서 인체부위의 온도 변화이력을 도시하고, 이를 Table 4에서 제시된 판단기준과 비교하여 평가하였다. 그 결과는 Fig. 16과 Fig. 17에서와 같으며, 최대 온도는 조직 내부이고 최저

온도는 피부라고 볼 수 있다. 저체온증을 판단하기 위해서는 조직 내부의 온도를 기준으로 평가하기 때문에 최대 온도를 기준으로 저체온증 발생을 판단하였다. Table 5에서와 같이 대퇴부를 기준으로 한 인체의 저체온증 도달시간은 Moderate 상태까지 약 90분, Severe 상태까지 약 120분이 걸리는 것을 확인 할 수 있고, 머리부를 기준으로 하면 각각 약 120분, 240분이 걸리는 것을 확인 할 수 있다.

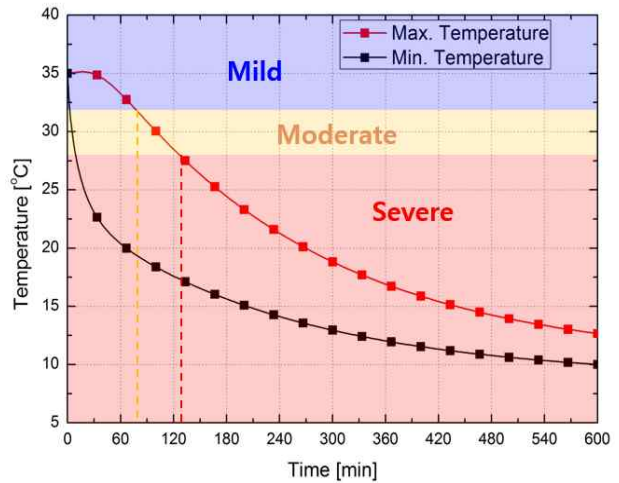


Fig. 16 Hypothermia diagnosis results based on thigh

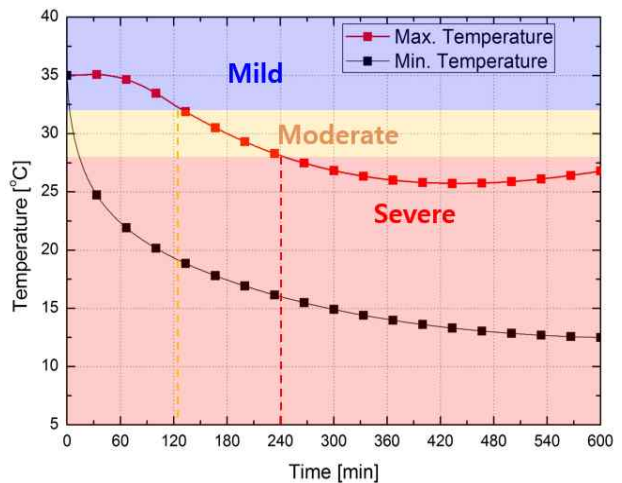


Fig. 17 Hypothermia diagnosis results based on head

Table 5 Hypothermia time

Status	Thigh	Head
Moderate (min)	90	120
Sever (min)	120	240

4. 결론

본 논문에서는 새로운 구명정을 개발하기 위해서 단열성능

평가 및 열전달 해석방법을 제시하고 그 결과에 대해서 검토하였다. 단열성능 평가는 열저항을 이용한 평가방법을 제시하였다. 그리고 그 결과를 실험적으로 증명하였으며, 시제품의 단열성능이 Thermal manikin의 Total Heat Flow Rate가 약 390 W로 가장 낮게 나타났다.

또한 조난자가 구명정 내부에서의 생존성을 보장하기 위해 체온 변화를 분석하고 저체온증에 도달하는데 걸리는 시간을 예측하기 위한 실험과 수치해석 결과를 소개하였으며, 그 과정에서 저체온증 예측에 대한 유한요소해석 모델을 제시하였다. 그 결과 대퇴부는 약 90분 뒤에는 Moderate상태에 빠지고, 약 120분 뒤에는 Severe상태에 빠지게 된다고 나타났으며 머리부는 각각 약 120분, 240분으로 나타났다. 본 결과를 통해서 본 연구에서 제시한 저체온증 예측방법을 통해 구명정의 단열 성능 및 인체의 저체온증을 판단할 수 있는 지표를 만들었다고 판단되지만, 추후 저체온증 예측을 위해서 정밀한 인체 모델에 대한 연구가 필요할 것이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학사업 및 해양수산부의 미래해양산업기술개발사업의 지원으로 수행된 ‘저체온증 예방을 위한 20m 미만 연근해어선용 다기능성 구명뗏목 개발(과제번호 2013080)’연구의 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 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.
- [2] Hwang, S. Y., Kim, K. W., and Lee, J. H.(2014), “Evaluation of Thermal Insulation of life raft and Initial Experiments on the Hypothermia”, *KSOE Annual Fall Conferences*.
- [3] 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*.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Pennes, H. H.(1948), “Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 1, pp. 93-122.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

Received 22 August 2015

Revised 14 September 2015

Accepted 22 September 2015