

돌발화염으로 인한 화상예측에 관한 수치해석적 연구

이준경[†] · 방창훈*

경남대학교 기계공학부, *경남대학교 소방방재공학과

Numerical Study on Skin Burn Injury due to Flash Flame Exposure

Jun-Kyoung Lee[†] · Chang-Hoon Bang*

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam University

*Dept. of Fire and Disaster Prevention Engineering, Kyungnam University

(Received March 26, 2012; Revised July 23, 2012; Accepted October 12, 2012)

요 약

매년 많은 소방공무원들이 화재나 고온 조건 등에 노출되어 화상으로 고통 받고 있어, 화상 예측에 대한 연구를 통해 화상을 방지할 수 있는 방법의 개발이 매우 중요하다. 그러나 피부조직의 비선형성, 혈류에 의한 열전달 분석의 불확실성 등 인체 내부의 복잡한 물리현상으로 인해 화상에 대한 연구는 매우 부족한 것이 실정이며, 특히 국내의 경우는 이에 대한 연구가 전무한 실정이다. 본 연구에서는 특히 심각한 화상을 유발할 수 있는 돌발화염(80 kW/m² 이상의 고열 유속 조건)하에서의 2도 화상 발생에 대한 예측을 수행하였다. 생체 열전달 방정식(Bio-heat transfer)을 이용하여 지배방정식을 유도하였으며, 유한차분법(Finite Difference Method)을 활용하여 화상에 대한 예측을 수행하는 수치해석 접근법을 사용하였다. 기존의 여러 연구결과로부터 인체 피부의 열물성치를 정리하였고, 그것을 바탕으로 계산을 수행하였다. 기존의 낮은 열유속에 대한 화상 실험 결과와 예측 결과를 비교하여 가장 오차가 적은 열물성치 모델을 파악하였고, 그 결과를 바탕으로 고열유속의 돌발화염에서의 2도 화상발생 노출시간을 예측하여 제시하였다.

ABSTRACT

Many fire-fighters suffer from the burn injuries, and the severe burns are the most catastrophic injury a person can survive, resulting in pain, emotional stress, and tremendous economic costs. It is important to understand the physiology of burns for prevention from skin burns and a successful treatment of a burn patient. But a few researches have been presented because the complex physical phenomena of our inside body like non-linearity characteristics of human skin make them difficult. Thus in this study, thermal analyses of biological tissues exposed to a flash fire causing severe tissue damage were studied by using a finite difference method based on the Pennes bio-heat equation. The several previous models for skin thermo-physical properties were summarized, and the calculated values with those models of tissue injury were compared with the results obtained by the previous experiment for low heat flux conditions. The skin models with good agreement could be found. Also, the skin burn injury prediction results with the best model for high heat flux conditions by flash flame were suggested.

Keywords : Skin burn injury, Flash flame, Bio-heat equation

1. 서 론

화재현장에서 소방공무원은 강렬한 화염과 뜨거운 열기로부터 신체를 보호하기 위하여 보호복을 착용하고 있으나 소방공무원 화상사고는 매년 지속적으로 발생하고 있다. 2008년 소방공무원 공사상 원인분석 자료에서 화염접촉에 의한 경우가 5.5%를 차지하고 있으나, 자가치료와 공사상미신청건을 고려하면 실제에는 이보다 많이 발생할 것으로 판단된다⁽¹⁾. 미국의 경우 2009년도 소방공무원 사

망원인의 6% 정도가 화상으로 나타났으며 이를 예방하기 위한 다양한 연구가 진행중이다⁽²⁾.

우리나라의 화상환자 발생현황을 국민건강보험공단에 급여청구된 자료를 중심으로 살펴보면 2005년부터 2009년까지 약 30.6% 증가하는 것으로 나타났으며, 인구 10만명당으로는 984명 발생하는 것으로 조사되었다⁽³⁾. 2011년 미국화상협회 자료에 의하면 화재사고는 우리나라가 미국보다 인구대비 약 6배 이상 많이 발생하며, 미국은 사고발생 경향이 지난 10년간 약 50% 감소한 반면 우리나

[†]Corresponding Author, E-Mail: jklee99@kyungnam.ac.kr
TEL: +82-55-249-2613, FAX: +82-505-999-2160

ISSN: 1738-7167
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.5.013

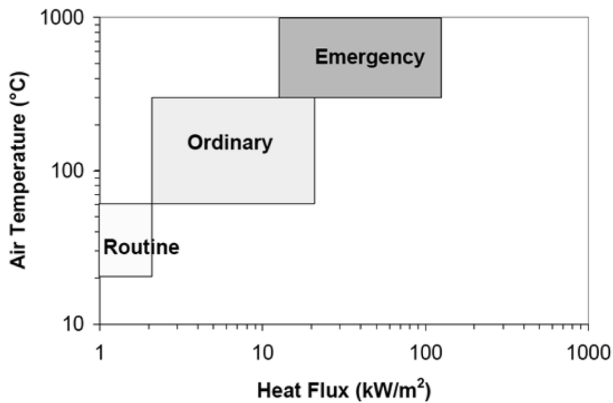


Figure 1. Classification of fire fighting conditions⁽⁵⁾.

리는 오히려 증가하는 것으로 나타나 이에 대한 방지대책이 시급한 실정이다⁽⁴⁾.

Veghte⁽⁵⁾는 화재시 열유속이 10 kW/m²이며, 온도가 300 °C 이상인 경우에 대해 화상 발생가능성이 매우 높다고 분류하였다(Figure 1). 최근 기술의 발전과 더불어 도시의 건축물은 고층밀집화, 대심도화 및 고발열 신소재 사용으로 화재 발생시 이전과는 비교할 수 없는 빠른 연소속도와 많은 열에너지를 방출한다. 이에 따라 화재진압을 담당하는 소방공무원의 화상 발생 가능성은 매우 증가하였으며, 특히 Lawson⁽⁶⁾은 5초 미만의 짧은 시간에 고열유속(80 kW/m² 이상)을 방출하는 돌발화염이 매우 심각한 화상을 일으킨다고 보고하였다. 그러므로 이로 인한 화상을 예방하기 위하여 돌발화염에 대한 화상발생 조건의 예측 및 분석, 보호복 개발 등 자세한 연구가 필요하다.

1~3도 화상 중 1도 화상은 표피(Epidermis, Figure 2 참조) 내에서만 발생하며, 일광욕으로 인한 화상처럼 3~7일 안에 표피세포의 재생에 의해 자연적으로 치유되며, 2도 화상은 표피 및 진피(Dermis) 일부분에 발생하며, 물집이 잡히게 되고 극도로 고통스럽다. 3도 화상은 표피, 진피의 손상 모두 포함하고, 그 아래의 피하조직(Subcutaneous tissue)에 까지 일부 손상이 되며, 넓은 부분에 걸쳐 화상이 발생하고, 피부의 변성이 발생한다. 또한 화상을 입은 조

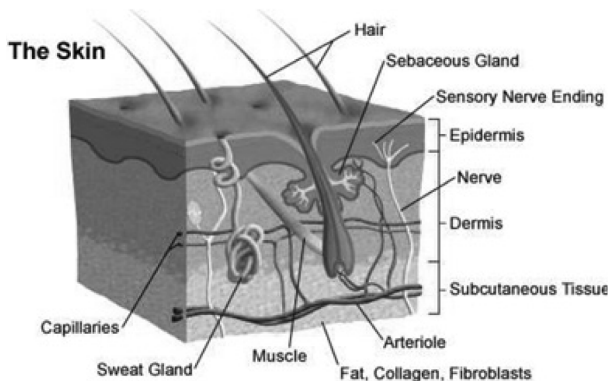


Figure 2. Normal cross-sectional anatomy of the skin⁽⁸⁾.

직은 신경종말에까지 손상이 발생하였기 때문에 고통은 없지만, 피부 주위는 매우 고통스럽다⁽⁷⁾.

지금까지 화상관련 연구들은 대부분 의학 및 약학계에서 화상 발생 후의 치료를 목적으로한 연구가 주로 수행되었다. 그러나 화재나 고온 조건, 또는 그 외의 여러 조건에 따른 화상의 원인과 정도를 열 및 물질전달과 생체역학을 이용하여 체계적으로 분석하고, 객관적인 데이터에 의한 화상의 유무 및 정도를 파악하려는 시도는 불과 20 여년 전부터 공학자들에 의해 수행되어 이에 대한 분석 방법 및 결과가 보고되고 있다. 그러나 피부조직의 비선형성, 혈류에 의한 열전달 분석의 불확실성 등 신체 내부의 복잡한 물리현상으로 인해 화상에 대한 연구는 매우 부족한 것이 실정이며, 특히 국내의 경우는 이에 대한 연구가 전무한 실정이다.

화상과 관련된 연구에서 많이 인용되는 기존 연구 중 Stoll and Chianta⁽⁹⁾는 일정한 열유속 환경에의 노출시간과 2도 화상과의 관계를 인체를 대상으로 한 실험으로 밝혀내었다. 정해진 화상 정도에 대해 열유속이 낮아짐에 따라 노출시간(t)은 다음과 같이 대수적으로(logarithmically) 증가함을 보고하였다(Figure 3).

$$t = 247.46(q'')^{-1.4052} \quad (1)$$

예를 들어 어떠한 보호구 없이 20 kW/m²의 열유속에서 4초 정도 노출된다면 2도 화상을 입는다는 사실을 알 수 있다. 그러나 열유속 조건이 42 kW/m² 이하에서 실험을 수행하여 구한 경험식으로 돌발화염의 경우에는 위의 식을 이용하는 데에는 한계가 존재한다.

이러한 화상은 피부에서의 온도 분포와 이에 의한 피부 손상을 각각 수학적으로 모델링하여 예측을 수행할 수 있으며, Pennes⁽¹⁰⁾는 피부에서의 온도분포를 구하기 위하여 생체열전달 방정식(Bio heat equation)을 제안하였고, 모델의 단순함과 결과가 비교적 정확하여 화상연구에 주로 사용이 되는 식이다. Henriques and Moritz⁽¹¹⁾는 피부 내 온

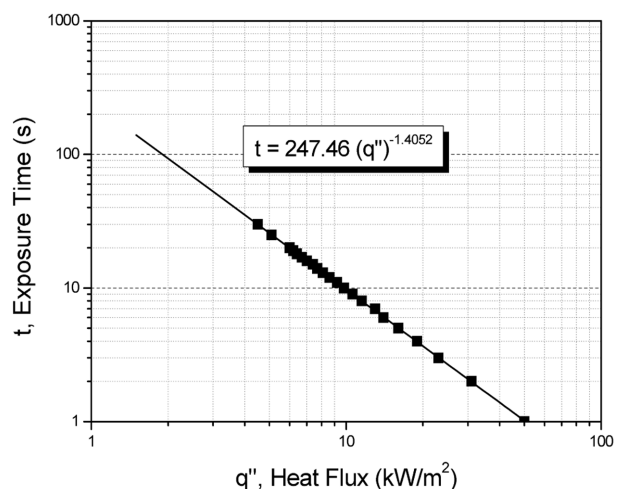


Figure 3. Criteria for the onset of 2nd degree skin burn injury⁽⁹⁾.

도와 화상과의 관계를 밝혀내고, 이를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 그러나 인체 피부의 두께 및 열물성치가 명확하지 않으며, 해석 방법에 따라 결과의 차이가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 돌발화염으로 인한 고열유속조건 하에서의 화상 예측을 수행하고자 한다. 이를 위해 Pennes⁽¹⁰⁾가 제안한 생체열전달 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하고 유한차분법(Finite Difference Method)을 활용하여 2D 화상에 대한 예측을 수행하는 수치해석 접근법을 사용한다. 이 때, 인체 피부의 열물성치는 기존의 여러 연구결과를 정리하여, 이를 활용하기로 한다. 그리고 Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 비교적 낮은 열유속에 대한 실험과 본 연구의 예측결과를 비교, 평가하여 가장 예측오차가 적은 열물성치 결과를 제안하도록 한다. 이를 바탕으로 돌발화염(80kW/m² 이상의 고열유속 조건)에서의 2D 화상발생 노출 시간을 예측하여 제시한다. 그리고 열유속 조건에 따른 피부조직 내 온도분포 및 손상함수 값의 시간변화를 나타내고, 피부조직 내의 화상이 발생하기까지의 변화를 살펴본다.

2. 화상예측 계산

2.1 수학적 모델

Figure 4는 Figure 2의 인체의 피부조직을 간략하게 나타낸 그림이며, 연속체로 이루어져 있고, 두께 또한 균일하지 않음을 볼 수 있다. 그리고 피부조직의 열전달과 관련해서는 피부조직의 열전도도, 밀도, 비열 등이 조직과 온도에 따라 달라지는 비선형 문제가 발생하게 된다.

이러한 비선형이 존재하는 피부조직의 열전달 문제를 Pennes⁽¹⁰⁾는 다음과 같은 가정을 바탕으로 열전달 지배 방정식을 제시하였다. 첫째, 피부조직을 통한 열전도와 열저장은 선형 열전도 이론에 의해 지배된다. 둘째, 피부조직에 대해 보통의 경우 표피(epidermis), 진피(dermis), 피하(subcutaneous) 3개의 층으로 구성이 된 1차원 다중 피부(multi-layer tissue) 모델로 가정한다. 그리고 각각의 층은

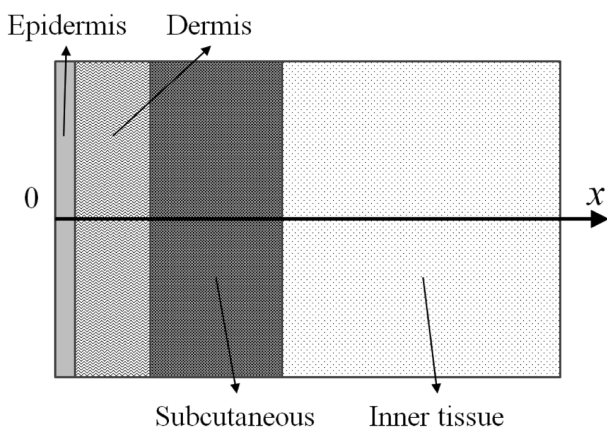


Figure 4. Schematic diagram of the multi-layer tissue.

균질한 특징을 지니며, 따라서 각층의 물성치는 각각 다른 일정한 값을 갖는다. 셋째, 혈액은 조직으로 들어가지만 체온과 같이 일정한 온도를 가진다. 마지막으로 혈류는 일정하므로 조직내에 쌓이지 않는다. 이러한 가정을 바탕으로 혈류의 중요한 기능 중 하나는 피부조직을 가열하거나 냉각시키는 것이며, 이것은 피부조직 온도에 따라 달라질 것이다. 피와 조직간 온도차가 존재하면 열을 제거하거나 공급하는 열전달 현상이 나타나고, 이러한 현상을 바탕으로 Pennes⁽¹⁰⁾는 생체 열전달 방정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k_t \nabla^2 T + q''_{\text{blood}} + q''_m \quad (2)$$

여기서, q''_{blood} 는 혈류(동맥 및 정맥)의 영향으로 인한 단위 피부조직당 열발생(손실)이고, q''_m 은 신진대사를 통해 나타나는 피부조직내 열발생(손실)이다. q''_{blood} 와 관련하여 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$q''_{\text{blood}} = \omega \rho_b C_b (T_a - T_v) = \omega \rho_b C_b (T_c - T_t) \quad (3)$$

여기서, ω 는 초당 혈관류량(the volumetric rate of blood perfusion to the tissue per unit volume), T_a 는 동맥류 온도, T_v 는 정맥류 온도가 된다. Pennes⁽¹⁰⁾는 미세 혈관의 면적이 매우 크기 때문에 T_a 는 인체의 심부 온도 T_c 와 같다고 보았다. 정맥에 대한 온도(T_v)는 피부조직 내부를 유동하다가 다시 정맥으로 모아지므로 피부조직 온도(T_t)와 같다고 볼 수 있다.

따라서 Pennes⁽¹⁰⁾ 생체열전달 방정식은 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k_t \nabla^2 T + \omega \rho_b C_b (T_c - T_t) + q''_m \quad (4)$$

기술된 편미분 방정식에 대해 다음의 경계조건 및 초기 조건을 설정하였다.

초기조건:
 $T(x, t=0) = T_i(x) \quad (5)$

경계조건:
 $T(x=L, T) = T_c(t>0) \quad (6)$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + q''(t) = 0 \quad (x=0, t) \quad (7)$$

조건에 대해 인체의 심부온도 T_c 는 37 °C로 설정하였고, 초기에는 피하조직 기저까지 피부중심온도가 유지되고, 피하조직 및 진피와 표피, 그리고 피부조직까지는 32 °C로 선형적으로 감소하는 것으로 기존연구결과를 바탕으로 가정하였다⁽⁹⁾. 또한 Figure 1에서와 같이 화염은 온도와 열유속 조건이 동시에 주어지지만, 일정한 온도의 물, 증기 또는 물체에 직접 접촉이 발생한 경우는 온도의 조건을, 돌발화염 등의 화염인 경우는 열유속 조건을 주어 모사하게

된다⁽⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 화염 발생에 의한 화상 예측에 대한 계산을 수행하므로 후자에 해당되며, 식(7)과 같이 열유속 조건을 경계조건으로 설정하였다.

Henriques and Moritz⁽¹¹⁾는 일정한 온도로 유지되는 물에 사람과 돼지피부를 접촉시키고 노출시간에 따라 피부조직의 온도와 화상의 정도를 비교하여 화상에 대한 실험을 수행하였다. 그들은 피부손상은 화학반응에 의해 발생하는 것으로 표현할 수 있고, 따라서 1차 Arrhenius 화학 반응속도 방정식을 이용하여 조직 손상의 시간변화율에 대해 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{d\Omega}{dt} = P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) \quad (8)$$

식(8)을 적분하면 다음과 같은 손상함수(damage function)를 얻을 수 있다.

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (9)$$

고온 또는 고열유속 조건에서 온도가 44 °C 이상이 되면

피부조직의 변성이 발생하게 됨을 발견하였고, 따라서 기준값(threshold)인 44 °C를 기점으로 피부조직의 변성 정도에 따라 손상함수의 값을 정하였다. 즉, 고온 또는 고열유속 노출시간에 대해 44 °C를 초과할 때부터 이후 노출시간까지를 위의 함수에 대해 적분하면 손상함수에 대한 값을 얻을 수 있고, 2도 화상에 대해 피부를 시작으로 표피 기저 부분에 대한 손상함수의 값이 1.0이라는 임의의 값을 가정하였다. 그로부터 지수앞자리인자(pre-exponential)인 P는 3.1×10^{98} (단위 s⁻¹)이고, ΔE는 활성화에너지(activation energy)이며, 627,900 J/mol로 결정하였다. R은 일반기체 상수이며, 그로부터 ΔE/R=75,000 K이다. 이러한 결과를

Table 1. Thermophysical Properties of Blood⁽¹⁴⁾

Parameters	Values
Blood density (kg/m ³)	1060.0
Blood specific heat (J/kgK)	3770.0
Arterial blood temperature (°C)	37
Core temperature (°C)	37

Table 2. Thermophysical Properties of Human Tissue

Physical Properties	ASTM 1930 ⁽¹⁵⁾	Torvi and Dale ⁽¹⁶⁾	Xu et al. ⁽¹⁷⁾	Dale et al. ⁽¹⁸⁾
Thickness of layer (m)				
Epidermis (×10 ⁻⁵)	5	8	10	8
Dermis (×10 ⁻³)	1.5	2	1.5	2
Subcutaneous Tissue (×10 ⁻²)	1	1	0.44	1
Thermal Conductivity, k (W/m K)				
Epidermis	0.255	0.24	0.235	0.255
Dermis	0.523	0.45	0.445	0.523
Subcutaneous Tissue	0.167	0.18	0.185	0.167
Specific Heat, C _p (J/kg K)				
Epidermis	3600	3600	3600	3598
Dermis	3225	3300	3300	3222
Subcutaneous Tissue	2760	2500	2700	2760
Density, ρ (kg/m ³)				
Epidermis	1200	1200	1190	1200
Dermis	1200	1200	1116	1200
Subcutaneous Tissue	1000	1000	971	1000
Blood Perfusion Rate, ω (m ³ /[s m ³])				
Epidermis	-	0	-	0
Dermis (×10 ⁻³)	-	1.25	-	1.25
Subcutaneous Tissue (×10 ⁻²)	-	1.25	-	1.25
Metabolic heat generation, q _m ^{''} (W/m ²)				
Epidermis	-	-	368.1	-
Dermis	-	-	368.1	-
Subcutaneous Tissue	-	-	368.3	-

기준으로 1도 화상은 표피 기저의 손상함수 값이 0.53임을 밝혔고, 3도 화상은 진피 기저의 손상함수 값이 10^4 이 되면 발생됨을 발견하였다. 이후 Mehta and Wong⁽¹²⁾, Pearce et al.⁽¹³⁾ 등이 P, ΔE에 대해 조금씩 다른 값들을 제안하였으나, 가장 일반적으로 Henriques and Moritz⁽¹¹⁾의 결과가 사용되며, 본 연구에서도 그 결과를 사용하였다.

2.2 피부조직의 물성치

인간의 피와 피부조직 각각에 대한 열 물성치를 정확하게 파악하려는 연구가 지속적으로 진행되었으며, 이를 Table 1 및 2에 정리하였다.

열물성치는 인체 각 부분에 따라 차이가 나며, 그것을 균질 물질에 대한 물성치처럼 일반적으로 사용할 수 있는 데이터는 사실상 존재하지 않는다. 따라서 기존의 연구를 분석하여 열물성치를 정리하고, 각각의 결과를 본 해석에 사용하여 예측치가 가장 높은 열물성치를 찾아보기로 한다.

2.3 수치해석적 접근

1차원 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 Pennes의 생체열전달 지배방정식(식(4))을 다음과 같이 풀었다. 비균일 공간 메쉬(Non-uniform space meshes)와 균일 시간차(uniform time steps)를 활용하였고, 메쉬 크기에 독립적으로 온도분포를 얻을 수 있도록 충분히 작은 최대 노드수 300개, 최소 시간차 0.001초를 사용하였다. 그리고 (신진대사에 의한 발열량)은 다른 항의 크기에 비해 1% 미만으로 본 연구에서는 생략하였다. Implicit time scheme을 활용하여 식(4)를 다음과 같이 차분화하였다.

$$\rho C \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta t} \Delta x = k_c \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta x} - k_w \frac{T_i^k - T_{i-1}^k}{\Delta x} + \omega \rho_b C_b (T_c - T_i^k) \Delta x \quad (9)$$

여기서 k_c , k_w 는 산술평균된 유효열전도(effective thermal conductivity)이다. TDMA(Tridiagonal Matrix Algorithm)를 활용하여 위의 방정식을 풀이하여 온도분포를 얻었다. 손상함수의 경우는 다음과 같이 계산을 수행하여 해당 지점에 대한 기준값으로 활용하였다.

$$\Omega = \sum_{k=k_i}^{k_f} P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT_i^k}\right) \Delta t \quad (10)$$

해당 지점의 손상 함수의 값이 기준값을 넘는 순간 계산은 중지되며, 그 순간까지의 시간을 화상에 대한 노출시간으로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 돌발화염에 의한 2도화상 예측

Table 2의 열물성치 모델들을 이용하여 계산을 수행하였

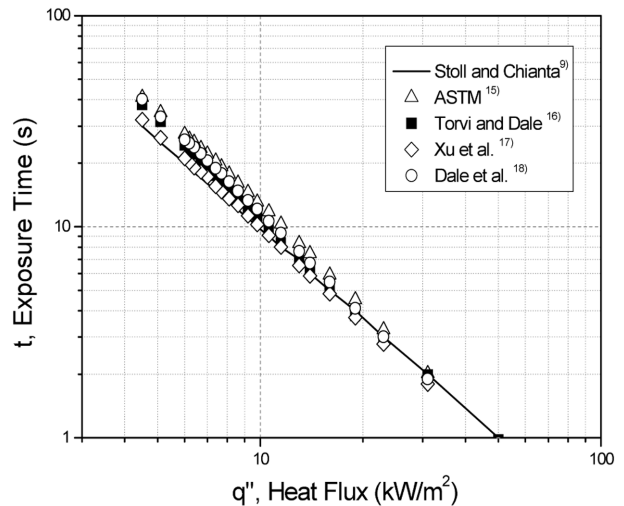


Figure 5. Comparisons of different models for skin layer thermo-physical properties with experiments.

으며, Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 2도 화상에 대한 실험 결과와 비교하여 Figure 5에 나타내었다.

그림에서처럼 대부분의 열물성치 결과들에 대하여 Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 실험결과를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 결과에 대해 고열유속 조건에서는 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾의 경우가 저열유속 조건에서는 Xu et al.⁽¹⁷⁾의 열물성치에 대한 예측 결과가 가장 적은 오차를 나타내었다.

가장 적은 오차를 나타내는 2개 모델에 대해 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾과 Xu et al.⁽¹⁷⁾의 Table 2에 기술된 열물성치 비교 시 그 값이 유사하고, 따라서 이들의 물성치를 바탕으로 예측을 수행하면 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 두 모델과 다른 모델과의 비교시 진피의 열전도도 값의 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾과 Xu et al.⁽¹⁷⁾의 모델 비교시, 전자는 혈관류량(blood perfusion rate)의 영향이 후자는 신진대사에 의한 발열에 대한 영향이 각각 고려되고, 피부 두께도 각 모델 간 차이가 발생하고 있어, 고열유속 및 저열유속에 대한 화상발생 예측시간의 정확도가 차이가 남을 알 수 있다.

그리고 대부분의 피부 모델에 대해 저열유속 조건에서 (노출시간이 길어질수록), 예측시간의 부정확도가 커짐을 확인할 수 있다. 그 이유는 열유속이 낮은 경우 2도 화상을 입는 노출시간이 길어지는데, 그 동안 땀을 흘리거나, 신진대사에 의한 발열이 발생하는 등 피부조직의 온도를 예측하는데 대한 불확실성이 증가하기 때문으로 사료되며, 따라서 화상에 대한 예측의 부정확도가 커질 수 있다.

따라서 넓은 열유속 조건에 대해 보다 정확한 화상 예측을 위해서는 피부 열물성치 및 각 조직 두께, 땀이나 신진대사에 의한 발열에 대한 영향 등을 자세히 살펴볼 필요가 있고, 이는 향후 연구에서 다루도록 할 것이다.

비교적 낮은 열유속 조건에서의 예측 결과를 바탕으로 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾의 피부모델이 고열유속 조건에 대해 비

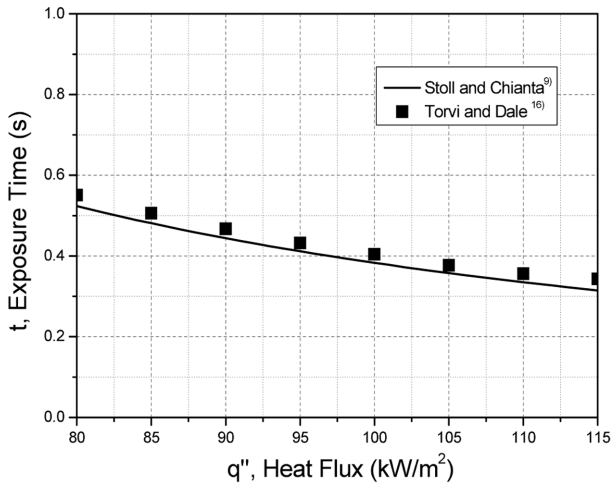
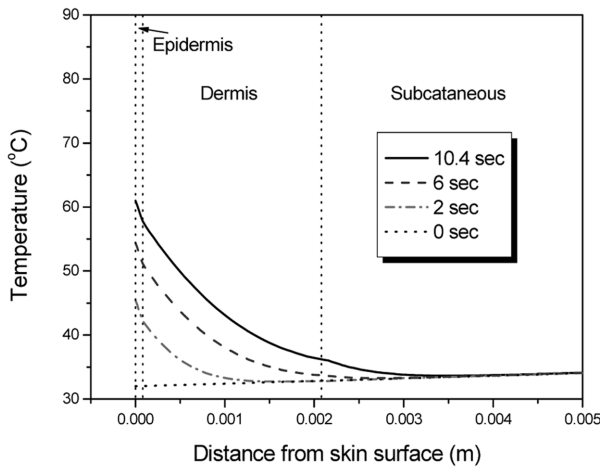


Figure 6. Prediction results of 2nd degree skin burn injury due to flash flame exposure (above 80 kW/m²).

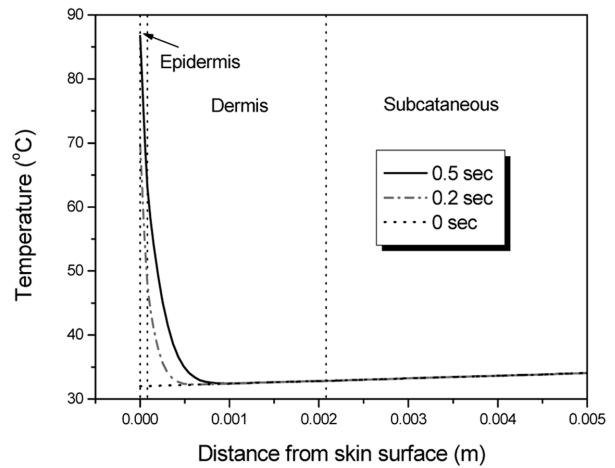
교적 2도 화상의 예측 정확도가 높으므로 이 모델을 활용하여 돌발화염이 발생하는 경우(80 kW/m² 이상의 고열유속인 경우)에 대해 예측을 수행하였고, 이를 Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 실험결과 예측식과 비교하였다(Figure 6). 계산의 결과가 예측식의 값보다는 조금 컸지만, 노출시간이 +5% 이내로 매우 유사함을 알 수 있어, 돌발화염이 발생하는 경우에도 Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 2도 화상 예측식(식(1))을 그대로 사용할 수 있음을 확인하였다.

3.2 열유속 크기에 따른 온도분포

열유속 조건의 변화에 따른 2도 화상 발생의 관계를 보다 더 정확히 파악하기 위해, 돌발화염 발생시의 고열유속(80 kW/m²)과 미발생시의 저열유속(10 kW/m²) 조건에 대해 피부조직 내부 온도 분포를 각각 살펴보았다. 계산은 Table 2의 열물성치 중 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾의 물성치를 활용

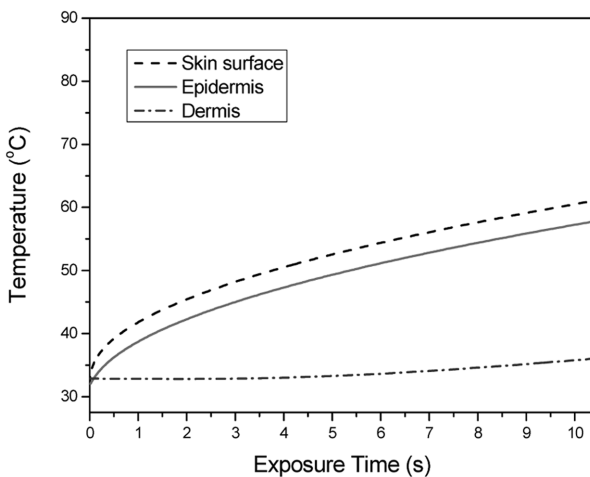


(a) $q'' = 10 \text{ kW/m}^2$

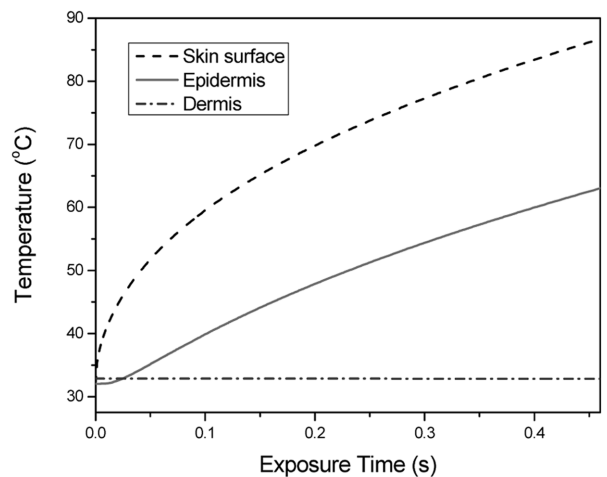


(b) $q'' = 80 \text{ kW/m}^2$

Figure 7. Temperature distribution along the skin depth due to the exposure time variation.



(a) $q'' = 10 \text{ kW/m}^2$



(b) $q'' = 80 \text{ kW/m}^2$

Figure 8. Temperature distribution at each skin layer due to the exposure time variation.

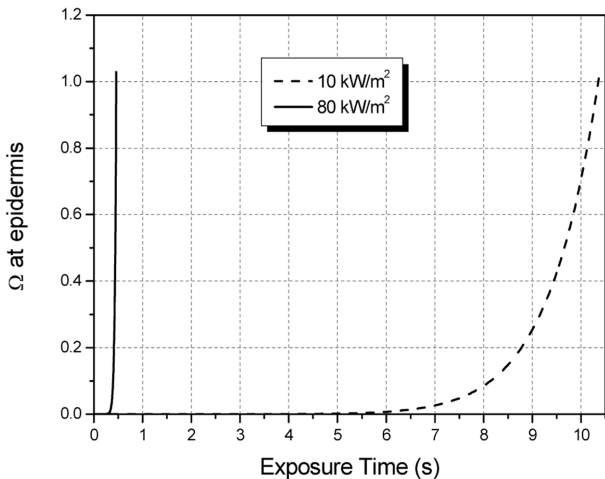


Figure 9. Loss function values at epidermis due to the exposure time variation.

하여 수행하였다.

Figure 7은 저, 고열유속 조건 각각에 대해 2도 화상 발생시까지 피부표면(0 m)부터 피하조직까지의 피부조직에 대해 시간의 경과에 따른 피부 온도 분포의 변화를 나타내었고, Figure 8는 피부 표면과 표피 및 진피의 기저 부분에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타내었으며, Figure 9는 시간에 따른 표피 기저 부분의 손상함수 값을 각각 나타낸 그림이다.

열유속에 관계없이 화염이 발생하지 않는 초기에는 선형적인 온도분포이지만, 저열유속이 유입되는 경우(Figure 7(a)과 8(a)), 온도가 완만히 상승하고, 진피 및 피하조직까지 열전달이 이루어져 각 조직의 기저에서의 온도가 서서히 상승함을 알 수 있다. 이로 인해 열유입 후 10.4초 후에 피부에서의 최고온도가 약 60°C가 되며 손상함수 값이 1이 되어 2도 화상이 발생하게 된다.

그러나 돌발화염이 발생하는 고열유속 조건의 경우(Figure 7(b)과 8(b)), 단시간에 피부표면 및 표피의 온도가 올라가 손상함수의 값이 1이 되어 2도 화상이 발생한다. 저열유속 조건과 달리 피부 표면과 표피의 기저는 온도변화가 급격한 것에 비해, 진피의 기저는 거의 변화가 없다. 진피의 두께가 표피에 비해 20~30배 정도 크기 때문에, 진피 및 피하조직까지의 열전달이 이루어지지 않은 결과라 볼 수 있다. 따라서 표면온도의 최고온도가 약 90°C에 이르는 현상을 살펴볼 수 있다.

결과적으로 저열유속의 경우 진피의 온도가 서서히 상승하며 완충작용을 통하여 화상이 지연됨을 볼 수 있으나, 고열유속의 경우 진피의 온도 변화가 없으며, 표피로 열전달이 집중되기 때문에 화상이 급격히 발생함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 돌발화염에 의한 고온 열유속 조건하에

서의 화상 발생에 대한 예측을 수치해석 방법을 이용하여 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 생체 열전달 방정식(Bio-heat transfer)을 이용하여 지배 방정식을 유도하고, 유한차분법(Finite Difference Method)을 활용하여 피부조직에 대한 온도분포를 얻었다. 이를 바탕으로 한 손상함수를 이용하여 2도 화상을 예측하였다.

2) 기존의 열물성치 연구결과를 간략하게 정리하였으며, 이를 활용하여 기존의 실험 결과와 각각 비교하였다. 대부분 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었으며, 그 중 고열유속 조건에서는 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾의 경우가 그 이후의 저열유속 조건에서는 Xu et al.⁽¹⁷⁾의 열물성치에 대한 예측 결과가 가장 적은 오차를 나타내었다.

3) 돌발화염발생의 고열유속 조건의 경우 Torvi and Dale⁽¹⁶⁾의 피부모델을 활용하여 2도 화상 예측을 수행하였고, Stoll and Chianta⁽⁹⁾의 화상 예측식을 그대로 적용할 수 있음을 확인하였다.

4) 저열유속 조건에서는 피부조직의 완충작용으로 화상이 지연되나, 돌발화염발생의 고열유속 조건에서는 표피에만 열전달이 발생하여 화상의 급격한 발생이 이루어짐을 확인하였다.

이상의 연구결과는 돌발화염으로 인한 화상 발생의 예측, 예방 및 화상을 입은 소방공무원의 전문적인 화상치료를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 연구에서는 주요 물성치 및 피부 두께 등이 화상예측에 미치는 영향을 살펴보고, 나아가 화상유발 요인에 대한 실험연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

이 결과물은 2012학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. An Analysis on Current Conditions of Occupational Casualties of Firefighters 2008, NEMA (2008).
2. Fire fighter Fatalities in the United States-NFPA (2009).
3. D. C. Kim and D. S. Na, "Epidemiology of Burns in Korea", Journal of Korean Burn Society, Vol. 14, No. 1, pp. 6-11 (2011).
4. American burn association. Burn incidence and treatment in the US: National health interview survey (2011).
5. J. H. Veghte, "Fire Fighter's Protective Clothing: Design Criteria", 2nd Edition, Lion Apparel, Dayton OH (1988).
6. J. R. Lawson, "Fire Fighter's Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting", NISTIR 5804 (1996).
7. J. M. Black, J. H. Hawks and A. M. Keene, "Medical-Surgical Nursing", 6th Edi., Elsevier (2001).

8. www.childrenhospital.org.
9. A. M. Stoll and M. A. Chianta, "Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection", *Aerospace Medicine*, Vol. 40, No. 11, pp. 1232-1238 (1969).
10. H. H. Pennes, "Analysis of Tissue and Arterial Blood Flow Temperatures in the Resting Forearm", *J. of Appl. Physiology*, No. 1, pp. 93-122 (1948).
11. F. C. Henriques and A. R. Moritz, "Studies of Thermal Injuries: The Conduction of Heat to and through Skin and the Temperatures Attained Therein. A Theoretical and Experimental Investigation", *The American J. Pathology*, Vol. 23, pp. 531-549 (1947).
12. A. K. Mehta and F. C. Wong, "Measurement of Flammability and Burn Potential of Fabrics", MIT, Summary report DSR Project 73884 NSF (1973).
13. J. A. Pearce, S. Thomsen, H. Vijverberg and T. McMurray, "Kinetics of Birefringence Changes in Thermally Coagulated Rat Skin Collagen", *Proc. SPIE*, pp. 180-186 (1993).
14. J. D. Cutnell and K. W. Johnson, *Physics*, 4th Edition, John Wiley & Sons (1997).
15. ASTM F 1930 "Standard Test Method for Evaluation of Flame Resistant Clothing for Protection Against Flash Fire Simulations Using an Instrumented Manikin", ASTM International (2008).
16. D. A. Torvi and J. D. Dale. "A Finite Element Model of Skin Subjected to a Flash Fire", *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 116, pp. 250-255 (1994).
17. F. Xu, T. J. Lu and K. A. Seffen, "Biothermomechanical behavior of Skin Tissue", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-23 (2008).
18. J. D. Dale, E. M. Crown, Ackerman, M. Y. E. Leung and K. B. Rigakis, "Instrumented Mannequin Evaluation of Thermal Protective Clothing", *Performance of Protective Clothing: Fourth volume*, ASTM STP 1133, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1992).