

돌발화염으로 인한 화상의 예측을 위한 수치해석 접근법에 대한 기초 연구

이준경* · 방창훈**

경남대학교 기계공학부*, 소방방재공학과**

A Numerical Study on Prediction of Skin Burn Injury due to Flash Flame Exposure

Lee, Jun Kyoung* · Bang, Chang Hoon**

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

요 약

화재현장에서 소방공무원은 화염, 증기, 또는 고온물 등에 의하여 화상사고를 당하고, 이로 인하여 극심한 고통 받고 있다. 따라서 화상 예측에 대한 연구를 통해 화상을 방지할 수 있는 방법을 개발하여야 한다. 본 연구에서는 화재시 고온 열유속 조건하에서의 화상 발생에 대한 예측을 수치해석적 방법으로 수행하였다. 생체 열전달 방정식(Bio-heat transfer)을 이용하여 지배방정식을 유도하였으며, 유한차분법(Finite Difference Method)을 활용하여 피부 조직에 대한 온도분포를 얻었다. 이를 바탕으로 한 손상함수를 이용하여 2도 화상의 발생 유무를 예측하였으며, 기존의 실험 결과[Stoll and Chianta²⁾]와 비교하여 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

화재현장에서 소방공무원은 강렬한 화염과 뜨거운 열기로부터 신체를 보호하기 위하여 보호복을 착용하고 있으나 소방공무원 화상사고는 매년 지속적으로 발생하고 있다.

1~3도 화상 중 1도 화상은 표피(Epidermis, Figure 1 참조) 내에서만 발생하고, 2도 화상은 표피 및 진피(Dermis) 일부분에 발생하며, 물집이 생겨 매우 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.¹⁾

Stoll and Chianta²⁾은 일정 고열유속 환경에의 노출시간과 화상과의 관계를 실험적으로 밝혀내었다. 정해진 화상 정도에 대해 열유속이 낮아짐에 따라 노출시간은 대수적으로(logarithmically) 증가함을 보고하였다. Figure 2에 일정 열유속 하의 노출시간과 2도 화상 발생 관계에 대한 Stoll and Chianta²⁾의 실험 결과를 간단한 식으로 나타내었다.

본 연구에서는 Stoll and Chianta²⁾의 2도 화상에 대한 측정결과를 해석적 접근법으로 예측하고자 한다. Pennes³⁾가 제안한 생체열전달 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하고, 사람 피부의 열물성치는 기존의 연구결과^{5~8)}들을 정리하고, 이를 활용하기로 한다. 이렇게 만들어진 지배방정식은 유한차분법(Finite Difference Method)을 활용하여 2도 화상에 대한 예측을 수행한다. 그리고 기존 연구^{5~8)}들의 열물성치에 따른 예측결과를 각각 비교하여 가장 예측오차가 적은 열물성치 결과를 제안하도록 한다.

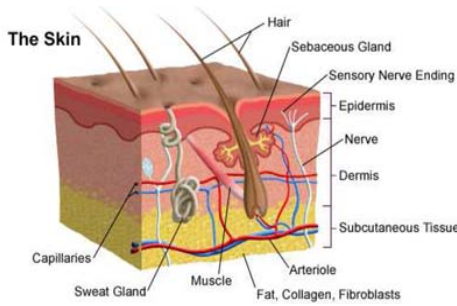


Figure 1. Normal cross-sectional anatomy of the skin¹⁾

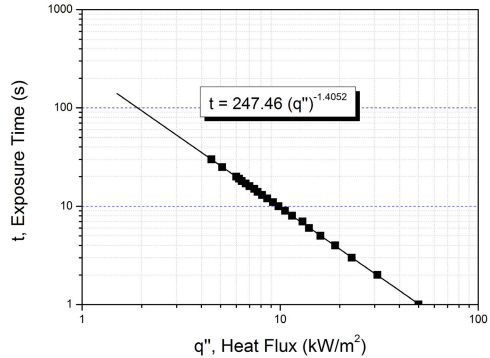


Figure 2. Criteria for the onset of 2nd degree skin burn injury²⁾

2. 화상예측 계산

Figure 3은 사람의 피부조직을 간략하게 나타낸 그림이며, 표피, 진피, 피하조직 등 불연속체로 이루어져 있고, 두께 또한 균일하지 않음을 나타내고 있다. 더욱이 피부조직의 열전달과 관련해서 열전도도, 밀도, 비열 등도 조직과 온도에 따라 달라지는 비선형성이 존재한다. 그러한 복잡한 피부조직의 열전달 문제에 대해 Pennes³⁾는 다음과 같은 열전달 지배 방정식을 제시하였다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k_t \nabla^2 T + \omega \rho_b C_b (T_c - T_t) + q''_m \quad (1)$$

여기서, ω 는 초당 혈관류량(the volumetric rate of blood perfusion to the tissue per unit volume), T_c 는 몸의 중심온도, T_t 는 피부 표면온도가 된다. q''_m 은 신진대사를 통해 나타나는 피부조직 내 열발생(손실)이다. 식 (1)에 대해 다음의 경계조건 및 초기조건을 설정하였다.

$$\text{초기조건 : } T(x, t=0) = T_i(x) \quad (2)$$

$$\text{경계조건 : } T(x=L, t) = T_c (t > 0), \quad k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + q''(t) = 0 (x=0, t) \quad (3)$$

위의 식을 활용하여 Henriques and Mortiz⁴⁾가 제안한 손상함수(damage function)를 이용한 화상예측 방법을 본 연구에서 활용하기로 한다.

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (4)$$

여기서, 2도 화상의 경우 P 는 지수앞자리인자(pre-exponential)로 $3.1 \times 10^{98} \text{ s}^{-1}$ 이고, Δ

E 는 활성화에너지(activation energy)이며, 627,900 J/mol 이다. R 은 일반기체상수이다. 따라서 $\Delta E/R = 75,000K$ 이다.

위의 함수와 화상을 연관시켜 생각해보면, 고온 또는 고열유속 조건에서 온도가 44도가 넘을 때까지의 노출시간까지를 위의 함수에 대해 적분하면 손상함수에 대한 값을 얻을 수 있으며, 1, 2도 화상의 경우 피부를 시작으로 표피 끝 부분에 대한 손상함수의 값이 각각 0.53, 1.0이 되면 발생하는 것으로 가정하고, 3도 화상의 경우 진피의 끝 부분에 대한 손상함수의 값이 10^4 이 되면 발생하는 것으로 하면 타당한 가정이 된다.

1차원 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 Pennes³⁾의 생체열전달 지배방정식을 풀었다. 비균일 공간 mesh(Non-uniform space meshes)와 균일 시간차(uniform time steps)를 활용하였고, mesh 사이즈에 독립적으로 온도분포를 얻을 수 있도록 충분히 작은 공간 및 시간차를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Table 1의 열물성치를 이용하여 계산을 수행하였고, Stoll and Chianta²⁾의 실험 결과와 비교하였다. (Figure 4) 대부분의 열물성치 결과들에 대해 경향이나 값을 잘 예측함을 알 수 있다. 특히 고열유속 조건에서는 Torvi⁶⁾의 경우가 그 이후의 저열유속 조건에는 Xu et al.⁷⁾의 열물성치에 대한 예측 결과가 가장 적은 오차를 나타내었다.

전반적으로 고열유속 조건의 경우 노출 시간을 예측하기 어렵고, 열유속이 낮은 경우에는 2도 화상을 입을 노출시간이 부정확할 수 있다. 즉, 노출시간이 길어지면 땀을 흘리며 신진대사에 의한 발열 등 불확실성이 증가하기 때문에 예측에 대한 부정확도가 커질 수 있다. 본 연구결과에 대해서도 저열유속 조건에서 노출시간이 길어질수록, 예측시간의 부정확함이 커짐을 확인할 수 있었고, 조금 더 정확한 예측을 위해 향후의 연구에는 땀이나 신진대사에 의한 발열에 대한 영향을 살펴보는 것이 필요하다.

4. 결 론

1. 화재시 고온 열유속 조건하에서의 2도 화상의 발생 유무에 대한 예측을 수치해석 방법을 이용하여 수행하였다.
2. 기존의 열물성치 연구결과를 정리하였고, 그것을 활용하여 Stoll and Chianta²⁾의 실험

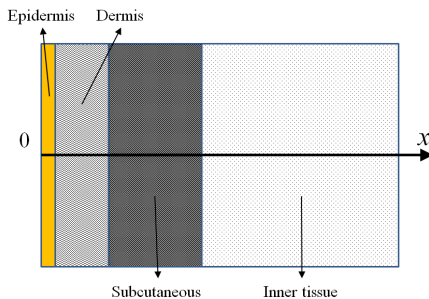


Figure 3. Schematic diagram of the multi-layer tissue

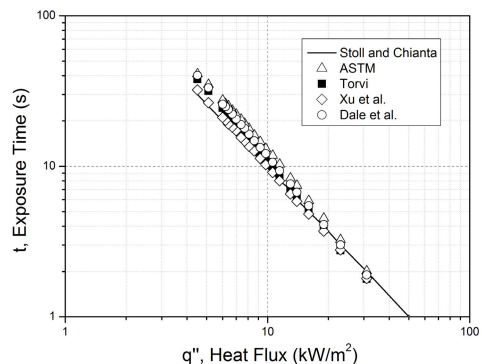


Figure 4. Comparisons between different models^{5~8)} and experimental results²⁾

Table 1. Thermophysical Properties of human tissue

Physical Properties	ASTM ⁽⁵⁾	Torvi ⁽⁶⁾	Xu et al. ⁽⁷⁾	Dale et al. ⁽⁸⁾
Thickness of layer (m)				
Epidermis ($\times 10^{-5}$)	5	8	10	8
Dermis ($\times 10^{-3}$)	1.5	2	1.5	2
Subcutaneous Tissue ($\times 10^{-2}$)	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, Cp (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 ($\times 10^{-3}$)	-	1.25	-	1.25
Subcutaneous Tissue ($\times 10^{-2}$)	-	1.25	-	1.25
Metabolic heat generation, q''_m (W/m ³)				
Epidermis	-	-	368.1	-
Dermis	-	-	368.1	-
Subcutaneous Tissue	-	-	368.3	-

결과와 각각 비교하였다. 대부분 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었으며, 고열유속 조건에서는 Torvi⁽⁶⁾의 경우가 그 이후의 저열유속 조건에는 Xu et al.⁽⁷⁾의 열물성치에 대한 예측 결과가 가장 적은 오차를 나타내었다.

참고문헌

1. J.M. Black, J.H. Hawks, A.M. Keene (2001), "Medical-Surgical Nursing", Elsevier,
2. Stoll A.M. and Chianta M.A. (1969), "Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection", Aerospace Medicine
3. Pennes, H.H. (1948), "Analysis of tissue and arterial blood flow temperatures in the resting forearm", J of Appl Physiology., No 1, pp.93-122.
4. F.C. Henriques, A.R. Moritz (1947), "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.
5. ASTM F 1930. (2008), "Standard Test Method for Evaluation of Flame Resistant Clothing for Protection Against Flash Fire Simulations Using an Instrumented Manikin", ASTM International
6. D. A. Torvi and J. D. Dale. (1994), "A finite element model of skin subjected to a flash fire", Journal of Biomechanical Engineering, Vol.116, pp.250-255.
7. F. Xu, T. J. Lu, K. A. Seffen (2008), "Biothermomechanical behavior of skin tissue", Acta Mechanica Sinica, Vol.24, No.1, pp.1-23.
8. Dale, J.D., Crown, E.M., Ackerman, M.Y., Leung, E., and Rigakis, K.B. (1992), "Instrumented Mannequin Evaluation of Thermal Protective Clothing", Performance of Protective Clothing: Fourth volume, ASTM STP 1133, American Society for Testing and Materials, Philadelphia