



화상에측 모델 개발을 위한 피부 조직 열물성치 연구에 관한 고찰

이준경* · 방창훈** · 권정숙*** · 방영준*
경남대학교 기계공학부*, 소방방재공학과**, 패션의류학과***

Review - Bio-thermal properties of human skin tissue layers for burn prediction model

Lee, Jun Kyoung* · Bang, Chang Hoon** · Kwon, Jung Suk*** · Bang, Young Jun*
Dept. of Mechanical Engineering, Dept. of Fire and Disaster Prevention
Engineering, Dept. of Fashion and Clothing, Kyungnam University

요 약

다수의 소방공무원이 화재나 고온 조건 등에 노출되어 화상을 입고 심리적·신체적 고통 받고 있다. 화상 관련 연구는 피부조직의 비선형성, 혈류에 의한 열전달 분석의 불확실성 등 신체 내부의 복잡한 물리현상으로 인하여 국내에서는 연구가 매우 미흡한 실정이다. 이에 따라 화상 예측에 대한 연구를 기반으로 화상을 방지할 수 있는 예방법이 필요하며, 화상 예측의 기초 연구로 피부조직의 형상 모델링 및 열물성치를 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구는 피부조직의 형상 및 열물성치와 관련된 기존 연구를 수집 및 정리하여 향후 화상 예측시 좋은 결과를 얻을 수 있도록 하는 데에 그 목적이 있다.

1. 서 론

화재현장에서 소방공무원은 강렬한 화염과 뜨거운 열기를 차단하기 위하여 보호복을 착용하고 있으나 소방공무원 화상사고는 매년 지속적으로 발생하고 있다. 2008년 소방공무원 공사상 원인분석 자료¹⁾에서 화염접촉에 의한 경우가 5.5%를 차지하고 있으나, 자가 치료와 공사상 미신청건을 고려하면 실제에는 이보다 많이 발생할 것으로 판단된다.

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.²⁾

사람의 피부 조직은 표피, 진피, 피하조직 등 불연속체로 이루어져 있고, 두께 또한 균일하지 않다. 이러한 복잡한 피부조직의 열전달 문제에 대해 Pennes³⁾는 다음과 같은 열전달 지배 방정식을 제시하였다.

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

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)(Metabolic heat generation)이다.

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

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (2)$$

여기서 P 는 주파수계수(Frequency factor), ΔE 는 활성화에너지(Activation energy)이며, R 은 일반기체상수이다.

Pennes 생체열전달 방정식을 정확하게 풀기 위해서는 피부조직의 모델링 및 피부조직의 열물성치를 정확하게 파악하는 것이 중요하고, 본 연구는 그들과 관련된 기존 연구를 정리하여 향후 화상 예측시 좋은 결과를 얻을 수 있도록 하는 데에 그 목적이 있다.

2. 핵심 변수 정리

2.1 조직 두께 (Thicknesses of various tissue layers, mm)

우선 몸의 각 부위에 따라 피부조직에 대한 구조가 다르며, 이에 대한 관련 논문을 조사하여 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 표피와 진피에 대한 두께가 몸의 각 부위에 따라 다르며, 엉덩이의 표피와 견갑상의 표피와 진피의 두께가 다른 부위에 비해 두껍다는 것을 알 수 있다. 생체열전달 모델에 대해 몸의 각 부위의 피부조직이 상이함으로 인해 화상예측의 결과도 차이를 알 수 있으며, 화상 발생이 빈번한 부위나 대표 부위를 이용하여 화상 예측의 결과를 제시해야 할 것이다.

2.2 열전도도 (Thermal conductivity of tissue layers, W/m °C)

피부조직에 대한 열전도도에 대해 기존 연구결과를 Table 2와 같이 조사하였다. 각 부분에 대한 값들이 약간의 차이가 나지만, 표피는 0.20 ~ 0.24, 진피는 0.37~0.45, 피하조직은 0.16 ~ 0.21, 근육은 0.39 ~ 0.5 W/m °C의 값을 가졌다. 진피 및 근육의 열전도도가 가장 크며, 피하조직의 열전도도는 진피의 값에 비해 50% 정도의 값을 가진다.

Table 1. Thicknesses of various tissue layers (mm)

몸 부위	피부	두께 (mm)	Ref.
허벅지(Thigh)	표피와 진피	1.59 - 1.64	5
허리 (Waist)	표피와 진피	1.90 - 2.01	5
삼각근(Deltoid)	표피와 진피	2.09 - 2.13	5
견갑상(Suprascapular)	표피와 진피	2.55 - 2.6	5
팔뚝(Forearm)	표피	0.0749	6
어깨(Shoulder)	표피	0.0813	6
엉덩이(Buttock)	표피	0.0965	6
몸통(Trunk)	표피	0.0424	7
상박(Upper-arm)	표피	0.0524	7
볼(Check)	표피	0.0388	7
등(Back)	표피	0.0646	8
얼굴(Face)	표피	0.0520	8
등(Back)	진피	2.36	8
얼굴(Face)	진피	2.27	8

Table 2. Thermal Conductivity of human tissue (W/m °C)

표피	진피	피하조직	근육	Ref.
0.21 - 0.26	0.37 - 0.52	0.16 - 0.21		9
0.21	0.37	0.16		10
0.21	0.37	0.16		11
0.24	0.45	0.19	0.5	12
0.26	0.52	0.21		13
0.21	0.39 - 0.32			14
0.23 - 0.41	0.23 - 0.41		0.385	15
0.376	0.376			15
0.209				15
0.335				15
		0.16	0.46	15
0.26	0.52	0.21		16
0.21	0.37	0.16		17

2.3. 기타 물성치 및 물리량

Table 3은 피부조직의 비열, 밀도 및 혈관류량, 신진대사 열 발생량 등에 관한 기존 결과를 정리하였다. 비열과 관련하여 표피는 3.58~4.0 kJ/kg °C, 진피는 3.2~4.0 kJ/kg °C, 피하조직은 2.28~4.0 kJ/kg °C, 근육은 3.77~4.0 kJ/kg °C의 값을 가졌다. 피하조직의 비열이 가장 작은 값을 가진다. 밀도는 표피와 진피가 다른 조직에 비해 20% 정도 크며, 혈관류량은 표피를 제외하고 같은 값을 가지며, 열 발생량은 피부조직에 대해 같은 값을 가진다.

2.4 활성화 에너지 및 주파수 계수

식 (2)에서 언급한 활성화 에너지 및 주파수 계수 관련 기존 연구를 Table 4에 정리하였다. 각 결과들은 피부에 작용하는 열량 및 피부온도 분포 등 조건에 따라 값들이 각각 다르게 나타났다. 일반적으로 Henriques and Moritz⁴⁾의 결과를 많이 사용하지만, 위의 결과를 잘 활용할 수 있기 위해서는 주파수 계수와 활성화 에너지간의 관계를 좀 더 자세히 살펴볼 필요가 있다.

Table 3. Heat Capacity, Density, Blood perfusion rate and Metabolic heat generation

Heat capacity (kJ/kg°C)				
표피	진피	피하조직	근육	Ref.
4.0	4.0	4.0		11
3.58 - 3.60	3.2 - 3.4	2.28 - 3.06		18
3.6	3.4	3.06	3.77	9
3.58 - 3.60	3.2 - 3.4	2.29 - 3.06		9
3.59	3.3	2.5	4.0	12

Density, ρ (kg/m ³)				
표피	진피	피하조직	근육	Ref.
1200	1200	1000	1000	18
1190	1116	971	971	17

Blood Perfusion Rate, ω (m ³ /[s m ³])				
표피	진피	피하조직	근육	Ref.
0	0.00125	0.00125	0.00125	18

Metabolic heat generation, q'_m (W/m ³)				
표피	진피	피하조직	근육	Ref.
368.1	368.1	368.3	368.3	19

Table 4. Activation energy and frequency factor for skin tissue

온도범위	조직	활성화에너지, ΔE (J/mol)	$\Delta E/R$ (K)	주파수계수, P	Ref.
$44 \leq T \leq 70$	표피	6.27×10^5	75,000	3.1×10^{98}	4
$T \leq 55$		6.27×10^5	75,000	3.1×10^{98}	20
$T > 55$		2.96×10^5	35,406.7	5.0×10^{45}	20
$44 \leq T \leq 50$	표피	7.82×10^5	93,540.7	2.185×10^{124}	21
$T > 50$	표피	3.27×10^5	39,114.8	1.823×10^{51}	21
		5.5×10^8		7.6×10^{76}	22
Whole range	표피	4.57×10^5	55,000	1.43×10^{72}	23
Whole range	진피	4.61×10^5	55,000	2.86×10^{69}	23
$44 \leq T \leq 50$	진피	4.18×10^5	50,000	4.322×10^{64}	24
$50 \leq T \leq 60$	진피	6.69×10^5	80,000	9.389×10^{104}	24
$T \leq 55$		6.27×10^5	75,000	3.1×10^{98}	25
$T > 50$		6.27×10^5		3.1×10^{98}	25
		$5.10 \times 10^2 \times (T - 53)$			
$48 \leq T \leq 57$		3.39×10^5	40,550.2	4.11×10^{53}	26
$40 \leq T \leq 60$		3.06×10^5	36,602.9	1.606×10^{45}	27

3. 결 론

1. 화상 예측에 대한 기초 연구로 피부조직의 형상 및 열물성치, 손상함수와 관련된 주요 변수와 관련된 기존 연구를 수집 및 정리하여 향후 관련 연구에 도움이 되도록 하였다.
2. 후속 연구에서는 본 연구에서 정리한 피부조직의 물성치 및 물리량 등 주요 인자가 화상에 미치는 영향을 정량적으로 살펴볼 것이다.

참고문헌

1. 2008년도 소방공무원 순직공상 통계 분석결과(2008), 소방방재청.
2. J.M. Black, J.H. Hawks, A.M. Keene (2001), "Medical-Surgical Nursing", Elsevier.
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. A. Laurent, F. Mistretta, D. Bottiglioli, K. Dahel, C. Goujon, J. F. Nicolas, A. Hennino, and P. E. Laurent (2007), "Echographic Measurement of Skin Thickness in Adults by High Frequency Ultrasound to Assess the Appropriate Microneedle Length for Intradermal Delivery of Vaccines," *Vaccine*, Vol.25, pp.6423 - 6430.
 6. J. Sandby-Mler, T. Poulsen, and H. C. Wulf (2003), "Epidermal Thickness at Different Body Sites: Relationship to Age, Gender, Pigmentation, Blood Content, Skin Type, and Smoking Habits," *Acta Derm Venereol*, Vol.83, pp. 410 - 413.
 7. J. T. Whitton, and J. D. Everall (1973), "The Thickness of the Epidermis," *Br. J. Dermatol.*, Vol.89, pp. 467 - 476.
 8. E. Southwood, (1955), "The Thickness of the Skin," *Plast. Reconstr. Surg.*, Vol.15, pp. 423 - 429.
 9. J. Liu, X. Chen, and L. Xu (1999), "New Thermal Wave Aspects on Burn Evaluation of Skin Subjected to Instantaneous Heating," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol.46, pp. 420 - 428.
 10. E. Y. K. Ng, and L. T. Chua (2002), "Prediction of Skin Burn Injury. Part 1: Numerical Modeling," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part H: J. Eng. Med.*, Vol. 216, pp. 157 - 170.
 11. K. R.. Diller (1998), "Modeling Thermal Skin Burns on a Personal Computer," *J. Burn Care Rehabil.*, Vol.19, pp. 420 - 429.
 12. S. Jiang, N. Ma, H. Li, and X. Zhang (2002), "Effects of Thermal Properties and Geometrical Dimensions on Skin Burn Injuries," *Burns*, Vol.28, pp. 713 - 717.
 13. K. C. Liu, and P. J. Cheng (2008), "Finite Propagation of Heat Transfer in a Multilayer Tissue," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol.22, pp. 775 - 782.
 14. M. L. Cohen (1977), "Measurement of the Thermal Properties of Human Skin. A Review," *J. Invest. Dermatol.*, Vol.69, pp. 333 - 338.
 15. H. F. Bowman, E. G. Cravalho, and N. Woods (1975), "Theory, Measurement, and Application of Thermal Properties of Biomaterials," *Annu. Rev. Biophys. Bioeng.*, Vol.4, pp. 43 - 80.
 16. W. Dai, H. Wang, P. M. Jordan, R. E. Mickens, and A. Bejan (2008), "A Mathematical Model for Skin Burn Injury Induced by Radiation Heating," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.51, pp. 5497 - 5510.
 17. F. Xu, T. J. Lu, and K. A. Steffen (2008), "Biothermomechanics of Skin Tissues," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.56, pp. 1852 - 1884.
 18. D. A. Torvi, and J. D. Dale, (1994) "A Finite Element Model of Skin Subjected to a Flash Fire," *ASME J. Biomech. Eng.*, Vol.116, pp. 250 - 255.
 19. W. Roetzel, Y. Xuan (1998) , Transient response of the human limb to an external stimulus, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.41(1), pp.229 - 239.
 20. C. E. Fugitt (1955), "A rate process of thermal injury. Armed Forces Special Weapons Project" AFSWP-606.
 21. A. M. Stoll, L.C Greene (1959), "Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation.," *J. Appl. Phys.* Vol.14(3), pp. 373 - 382.
 22. J. A. Weaver, A. M. Stoll, (1969), "Mathematical model of skin exposed to thermal radiation.," *Aerosp. Med.*, Vol.40(1), pp. 24 - 30.
 23. A. K. Mehta, F. C. Wong (1973), "Measurement of Flammability and Burn Potential of Fabrics. Massachusetts Institute of Technology," Cambridge.
 24. A. N. Takata, J. Rouse, T. Stanley (1973), "Thermal Analysis Program. I.I.T.," Chicago.
 25. Y. C. Wu (1982), "A Modified Criterion for Predicting Thermal Injury. National Bureau of Standards," Washington.
 26. J. A. Pearce, W. F. Cheong, L. Pandit, et al. (1991), "Kinetic models for coagulation processes: determination of rate coefficients in vivo. Lasers in Dermatology and Tissue Welding, SPIE," Los Angeles, CA, USA, pp. 27 - 33.
 27. J. A. Pearce, S. Thomsen, H. Vijverberg, et al. (1993), "Quantitative measurement of thermal damage: birefringence changes in thermally coagulated collagen." *ASME*, New York, NY, USA, New Orleans, LA, USA, pp. 141 - 144.