의류의 화상 위험도 평가를 위한
온도 계측용 마네킹의 설계 및 제작

요 약

대부분의 화상은 의류를 착용하고 있을 때 일어 난다. 따라서 옷에 불이 붙였을 때 의류가 연소하며 인체 각 부위에 전달하는 열량을 측정할 수 있는 실험설계에 대한 관심이 최근 높아지고 있다. 이러한 요구에 응하기 위하여 마네킹 모형을 이용하여 인체 각 부위의 열을 측정할 수 있는 실험장치가 개발되었다. 이 마네킹에는 1도, 2도, 3도 등의 화상을 측정할 수 있는 온도감지 장치들이 인체 각 부위별로 부착되었다. 설계 및 제작에 관한 자세한 내용이 본 논문에 소개 되였고 유사한 실험을 수행할 때 필요한 제반절차가 자세히 설명되어 있다.

1. 서 론

옷에 불이 붙으므로서 야기되는 화상위험은 일반산업계의 안전관리, 법정문제, 의학적 치료는 물론 섬유산업에도 밀접한 관계가 있다. 현재 섬유의 가연성에 대한 표준은 발화의 근원이나 발화에 노출될 가능성을 기준으로 설정되어 있다. 이와 관련하여 점화 가능성과 자연진화를 측정하는 시험 방법이 이미 공표되어 있다.

현재의 보통 의류의 가연방지 기준 (General Wearing Apparel Flammabi1ity Standard)은 의류의 점화율과 점화후의 화상가능성을 근거로 하여 설정되었다. 그러나 지난 수년 간 위 정의에 의한 의류 화재율의 개념은 섬유산업, 학계 및 미 연방정부등에 의해 심각한 의구심을 야기시켰다. 또한 의학계에서는

섬유의 가연성을 화상의 치료와 결부시켜 독자적인 기준을 주장하고 있다. 즉 화상의 정도와 화상을 입은 신체의 %을 화상의 심각도로 평가하고 있다. 화상의 정도는 피부에 전달된 열의 총량과 이 열에 대한 피부의 반응에 따라 좌우된다. 인체의 화 상 정도를 결정하기 위한 가장 현실적인 방법은 직물 및 그 디자인에 따라 인체모형 위에서 이 의복을 실제로 태워보는 방법이다.

인체의 모양과 유사한 실험용 인형을 사용하면 의류에서 불꽃이 퍼지는 비율과 의류디자인에 따라 신체부위에 미치는 열량전달 효과를 측정할 수 있으며, 디자인과 관련된 문제인 의류의 피부밀착 효과에 대한 정보도 함께 얻을 수 있다. 본문에 소개하는 실험에는 한 개의 인체 마네킹과 표준 의상 디자인을 사용하여 화상정도를 측정하였다.

2. 실 험

2.1 설계의 기준

먼저 일반적 실험설계 조건에 대한 설명이 필요하다. 다음에 설명되는 내용은 Mehta와 Wong의 연구 결과를 토대로 하고 있다. 이들은 폴리에스터/글래스 파이버로 된 전시용 마네킹에 어떠한 종류의 표면처리를 하여야 인간의 피부와 열에 대한 반응이 인체피부와 비슷할 것 인가를 연구하였다. 또한 마네킹의 표준처리가 불 붙은 섬유에서 발생될 온도에 견딜 수 있어야 할 것이다. 위의 두 가지 조건을 모두 만족시키는 물질로 에폭시 수지가 선정되었다. Mehta와 Wong은 연구보고에서 인체피부와 유사한 반응을 내는 마네킹 표면처리는 열이나 온도에 노출되었을 때 인체피부와 같은 열 흡수율을 갖도록 하는 점을 중요한 기준으로 택하였다. 이 조건이 만족되어야만 마네킹에 입힌 섬유가 연소할 때 열, 증기, 습기, 열분해, 융해 및 응고 등에 대해

인체 피부와 동일한 변화를 관측할 수 있을 것이다.

만일 이러한 열 흡수의 조화가 이루어지지 않으면 의류의 연소와 마네킹 표면의 화상은 실제 인체피부의 반응과는 다른 결과를 나타낼 것이다. Mehta 와 Wong 은 나아가 피부의 모의 화상실험을 위한 필요충분 조건을 다음과 같이 제시하였다.

$(\kappa c\rho)_{\text{유사피부}} = (\kappa c\rho)_{\text{피부}}$

여기서 k = 열 전도도,

$c\rho$ = 열용량 (volumetric heat capacity)을 나타낸다.

그들은 또 " 마네킹 피부의 k, c 및 ρ 가 각각 모두 인체피부의 k, c, ρ 값과 꼭 같을 필요는 없으나 이들 셋을 곱한 값은 같아야 한다 " 고 지적했다.

실제 피부에서의 $\kappa c\rho$ 값은 1.49×10^{-2}W · J/cm^4 ° K^{2}인 반면 코팅재료로 선택된 에폭시 수지의 값은 1.51 $^{-2}$W · J/cm^4 ° K^2 이었다. 에폭시는 또한 316℃의 열에 단시간 동안 견딜 수 있다는 것이 밝혀졌는데 이 온도는 경험에 비추어 볼 때 단시간 동안 의복이 불탈 때의 마네킹 표면온도를 훨씬 웃도는 것이었다.

폴리에스터/글래스 파이버 마네킹은 계속적인 코팅/건조작업에 의하여 평균 1㎜의 에폭시(Epoxy) 수지가 코팅되었다. 이 코팅 두께는 마네킹이 피부와 같은 반응을 할 수 있는 두께라고 생각되었다. 에폭시가 코팅된 폴리에스터/글래스 파이버의 $\kappa c\rho$ 값은 실제 피부의 $\kappa c\rho$ 값의 20% 이내이다. 또 같은 에폭시수지로 온도감지기가 제작 되었는데 자세한 것은 마음에 설명하는 열감지기 장치 부분에 상술되어 있다. 완성된 온도 감지 마네킹의 모습은 <그림 1>과 같다.

<그림 1> 온도측정장치가 부착된 마네킹의 모습

마네킹 내부의 온도 측청장치는 16개씩 5 그룹으로 나누어져 총 80 개이다. 실험 중 최대 64 개의 온도 감지장치가 동시에 사용되었다. 인체부위별 감지장치는 다음과 같다. 그룹 1은 8개의 감지기가 머리에, 양쪽 팔에 각각 4개씩 장치되었으며, 둘째, 셋째, 넷째 그리고 다섯째 그룹은 각각 몸통 상부, 몸통 하부, 허벅다리 및 다리 아랫 부분에 위치되었다. A- 라인 드레스를 실험하기 위해서는 그룹 1에서 그룹 4까지가 이용되었으며, 바지의 실험에는 그룹 2에서 그룹 5까지가 사용되었다.

2.2 온도 감지 장치

마네킹내의 고장난 온도감지기는 대체할 수 있도록 설계되었다. 신속한 온도반응, 손쉬운 교정, 열전달의 격차를 최소로 하기 위하여 열전대(thermocouple) 열접점은 가능한 한 감지기 표면에 위치하도록 하였다. 반무한 고체 *(semi-infinite solid)의 특성을 얻도록 하기 위하여 감지기가 클 것이 요

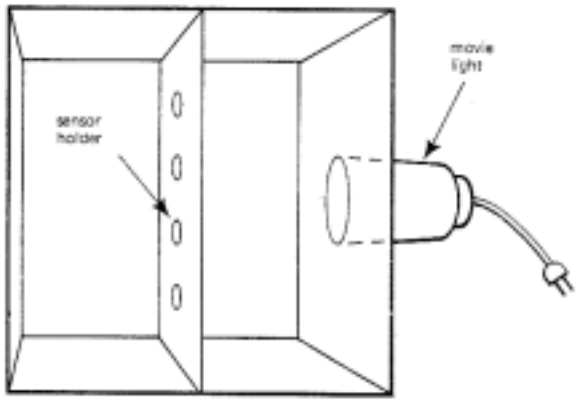
구되었으나, 그렇다고 마네킹의 표면을 뚫고 나와서는 곤란하므로 크기가 최대한도로 조절 되었다. 앞에서도 기술하였듯이 열 감지기 역시 온도상수가 인간의 피부와 매우 유사한 값을 갖는 온도저항성 에폭시 수지로 제작되었다.

이 수지의 두 가지 장점은 가공이 용이한 점과 균일한 물리적 성질이라 할 수 있다. 또한 에폭시는 열전대 주위를 감싸 열처리함으로써 보통의 고무 절연체 모양으로 만들 수도 있다. 따라서 온도감지기를 마네킹에 꽂고 그 주위의 표면을 쉽게 메울 수 있었다.

열전대의 바깥 표면인 에폭시가 습기에 의해 손상되는 것을 방지하기 위하여 열전대의 플러그는 18㎜ 직경에 0.000139㎜ 두께를 가진 파이렉스 7740 유리로 포장되었다. 파이렉스 7740은 온도에 대한 반응특성이 피부와 비슷하기 때문에 선택되었다. 실제의 감지기 제작은 파이렉스 유리 위에 열전대를 접착시킨 다음 툴에 에폭시수지를 틀에 부어 넣었으며, 제작 및 가공이 끝난 후 유리 표면은 검정 페인트로 코팅 되었다. 완성된 플러그는 대략 길이 20㎜ 직경 25㎜ 이었다.

감지기의 재료로는 단위온도 변화에 대해서 큰 기전력의 변화를 나타내는 Chromel-Constantan 열전대가 사용되었다. 이 열전대는 측정시의 잡음을 최소로 줄여주므로 감지기와 측정장치 사이의 효율을 높일 수 있다. 반무한 고체로 된 감지기는 <그림 2>와 같은 캘리브레이션 챔버(calibration chamber)에서 캘리브레이션 되었다. 방열원은 일정한 방열밀도 ($I_{0\alpha}$) 를 갖는 영사기용 전구가 사용되었으며 감지기의 위치를 네 가지로 하여 각기 다른 밀도의 열을 받도록 하였다.

이 때의 방열밀도는 Gardon형의 복사계(radiometer)로 측정되었다.



<그림 2> 열방출량에 대한 온도상승 효과 결정장치

실제의 실험과정은 각 감지에 80초 동안 열을 방사하면서, Honeywell 디지털 볼트 메타를 사용하여, 10초 간격으로 열전대의 기전력값을 기록하였다. 다음 이 기록된 전압값은 섭씨온도로 변환되었다.

열에 노출되어 있는 동안 이 유리-에폭시 감지기가 표면변화가 거의 없는 반무한 고체와 같이 동작된다면 시간(θ) 에에 대한 온도상승(ΔT)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta T / I_{0\alpha} = 2\sqrt{\theta / \kappa c \rho \pi} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

$\sqrt{\theta}$ 에 대한 $\Delta T / I_{0\alpha}$ 의 값을 그래프에 나타내면, 다음의 식에 의한 기울기 S로 부터 $\kappa c \rho$가 계산될 수 있다.

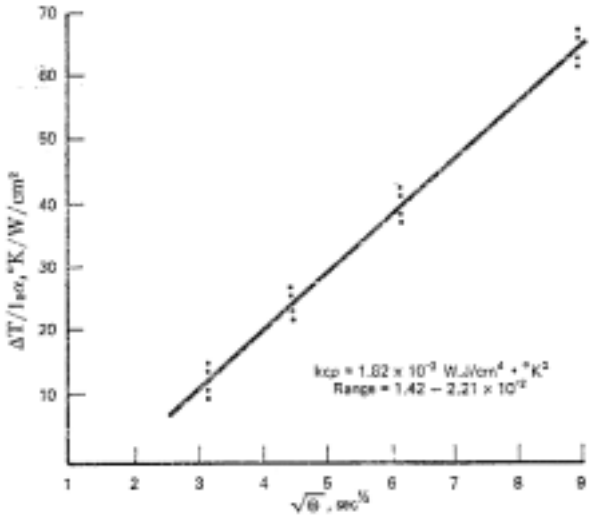
$$\kappa c \rho = 4 / \pi S^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (3)$$

마네킹에 장치된 80개 감지기중 하나의 측정자료가 <그림 3>에 나타나 있다. <그림 3>에서 각 시점에서의 4개의 점은 각 시점에서 4개의 서로 다른 방열밀도($I_{0\alpha}$)로 방사하였음을 나타내며, 시간의 경과에 따른 온도 증가의 회귀직선 기울기가 8.4임을 알 수 있다. 따라서

$\kappa c\rho = 4/\pi(8.4)^2$

$=1.82\times10^{-2}\mathrm{W}\cdot\mathrm{J/m^4}\cdot{}^{\circ}\mathrm{K}^2$ ····· (4)

의 값이 되며 그 변화 범위는 1. 42~2. 21 × 10^{-2}W · J/cm^4 ° K^2가 된다.



<그림 3> 파이렉스-에폭시 열 감지기의 열에 대한 관성 결정

이 직선이 원점을 통과하지 않는데 그 이유는 감지기의 표면과 열전대 사이의 거리 때문에 약 2~3초의 시간 지연이 생기기 때문이다. 이 시간지연은 감지기마다 각기 다른 값을 가지는데 이 때의 각 지연계수는 수식으로 표현될 수 있다. 실제 실험에 의하여 결정된 $\kappa c\rho$ 의 값은 인간의 피부가 갖는 값인 1.40~2. 2 × 10^{-2}W · J/cm^4 ° K^2의 범위 내에 포함되었다.

2.3 자료수집

실험을 위한 자료수집 장치는 열전대에 의해 발생되는 전기신호의 성질, 측정 자료의 양 및 온도변화 비율 등을 기준으로 하여 설계되었다.

실험에서 온도가 변함에 따라 열전대에서는 5~20mV의 저전압이 발생한다.

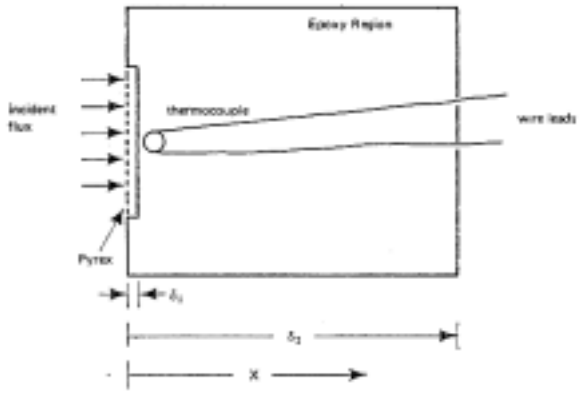
높은 온도에 의해 자료수집장치가 손상되는 것을 방지하기 위해서 저전압을 마네킹의 머리 뒷 부분에서 테프론이 피복된 2~3 m의 두 겹 피복선을 통하여 나오게 하였다. 전선들은 접합부에 모여 16개의 신호가 한 그룹을 이루어 자료수집장치의 연결단자에 접속 되었으며, 이 단자를 통해 64개의 전압신호가 A - D 변환장치 (analog- digital conversion system)에 입력되었다. 자료의 정확성을 기하기 위하여 자료는 가능한 한 빨리 디지털 형태로 변환하였다. 열전대의 온도는 마이크로 컴퓨터에 의해 주거적으로 기록되었으며, 이 때 사용된 측정빈도는 초당 10회이었다. 자료의 기록과 동시에 실험명세가 종이테이프에 프런트 및 천공 (punching) 되었다. 이들 자료는 장치의 정밀분석을 위한 컴퓨터 입력자료를 영구보관하기 위해 만들어졌다.

실험은 다음의 절차를 통해 이루어졌다. 먼저 마네킹의 온도감지기가 실내온도 (23~27 ℃)를 유지하도록 조정한 후 옷에 불을 붙였다. 이 때 온도감지기의 기전력은 기호화되고 온도로 변환된 다음 Digita1 Equipment Corporation PDP 8 E microcomputer의 디스크에 저장되었다. 기호화된 정보는 다음 Digita1 Equipment Corporation PDP 11/70 computer에 별도로 입력시키기 위하여 종이테이프에 부가적으로 천공되었다.

자료수집 장치 의 구조는 Intal Corporation System 80/10 microcomputer 시스템에 준하여 설계되었다. 즉 Intal Corporation SB C 80/10 컴퓨터 온도자료를 저장하기 위한 Intal Corporation SBC-016 16K 단어 기억 용량의 기억판, 64 채널 Burr- Brown Corporation MP8632 A-D 변환장치, 그리고 온도자료를 수집하는 속도를 조정하는 Intal Corporation SBC-905 Universal Prototyping Board 들로 구성된다. Teletype Corporation ASR-33은 컴퓨터 프로그램과 연결되어 종이테이프에 천공할 자료를 제공한다.

2.4 수학적 모델과 감지기의 기준조정

먼저 감지기와 수학적 모델에 대하여 설명하여 보자. <그림 4>에 나타난 바와 같이 온도감지기는 실린더 형태로 직경 0.025m 길이 0.030m의 크기를 가진다. 모든 감지기의 한 쪽면은 0.000139m의 두께를 가진 파이렉스 유리로 덮여있고 그 위에는 열 발생시의 반사율을 최소로 하기 위하여 검게 칠하여져 있다. 열전대는 감지기의 에폭시 부분 중 파이렉스와 에폭시의 경계부분 가까이에 위치하고 있으며 이 열전대로부터 나온 전선이 에폭시 부분을 통과하여 감지기의 뒷면을 통하여 밖으로 나간다.



<그림 4> 열 감지기 모형

파이렉스 유리부분을 영역 1, 감지기의 나머지 부분을 영역 2라고 정의하면 이 때의 감지기의 온도반응은 다음과 같은 Fourier 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{xx}(x,\theta)_i = \frac{1}{\delta_i} T\theta(x,\theta)_i, x \in R_i = 1, 2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

여기서 δ_i는 영역 i의 열 발산율이며, x와 θ는 각각 공간과 시간을 나타내는 독립변수이다. 첨자 i는 파이렉스 또는 에폭시의 영역을 나타내며 x와

θ가 첨자로 사용되면 편미분을 의미한다. 감지기와 조정 기간에 적용되는 제약조건식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$k_1 \mathrm{T}_x(0,\theta)_1 = k(\mathrm{T}(0,\theta)_1 - \mathrm{Ta}) - \Psi, \qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (6)$$

$$k_1 \mathrm{T}_x(\delta_1,\theta)_1 = k_2 \mathrm{T}_x(\delta_1,\theta)_2, \qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (7)$$

$$\mathrm{T}(\delta_1,\theta)_1 = \mathrm{T}(\delta_1,\theta)_2 \qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (8)$$

$$\mathrm{T}(\delta_2,\theta)_2 = \mathrm{T}_a, \qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (9)$$

위의 제약조건식 (6)~(9) 는 (a)열 방출의 세기가 일정할 때 파이렉스 표면과 대기온도(T_α) 사이의 자연대류를 통한 에너지 교환, (b)파이렉스-에폭시 경계($x=\delta_2$)에서의 열 방출과 온도의 연속성, (c) 감지기의 내부표면($x=\delta_2$)에서의 일정한 온도들을 나타내고 있다. 위의 제약조건식은 열전대의 온도를 60℃ 올리는데 필요한 열 방출시간 ϕ에 적용된다. 식 5에 나타나 있듯이 수학모형은 1차원식이며 열전대의 전선에 의한 효과는 고려되지 않았다.

식 5의 한계값을 구하는 방법은 제약조건 6~9의 계차식으로 구성되어 있다. 공간변수 x는 각 감지기의 내부가 두 개의 층으로 분리되고 두 층 사이에 에너지 평형을 이룬다고 가정하여 얻어진다. 따라서 부분 적분식인 식-5는 행렬 방법에 의하여 수식적으로 간단히 풀릴 수 있는 연립 1원 1차 미분 방정식으로 축소된다. 공간을 숫자로 표현하고 시간을 고정시킨 이 해는 혼성해(hybrid Solution)라고 불리 우는데 그 이유는 변수의 분리에 의한 해인 분석적 해와, 공간과 시간이 대략 일치하는 순수 수치적 해의 중간에 위치하고 있기 때문이다. 일반적으로 혼성해는 비교적 정확한 결과를 산출해 낼 수 있다고 알려져 있다. 유한 계차식에 의하여 축소된 식 5는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[D]\left\{\frac{dT}{d\theta}\right\}-[CON]\{T\}=\{b\},\qquad 0\langle\theta\langle\varphi \quad \cdots\cdots \quad (10)$$

식 10에서 나타난 대괄호 [ ]와 중괄호{ }는 각각 행렬과 벡터를 표현하고 있다. 행렬 [D]는 열 행렬과 그 대각 행렬이며 [CON]은 대칭인 전도행렬, 벡터 {b}는 제약 조건식들과 관련되는 비균질성을 나타낸다.

감지기의 기준조정 기법은 다음과 같다.

먼저 각각의 감지기에 일정량의 열을 가하면서 감지기의 온도-시간 곡선을 기록한다. 이 곡선과 식 (5)에서 얻은 두 한계값을 기초로 하여 적절한 열전대의 위치가 결정된다. 공간변수 x는 유한 계차방정식에 의해 정하여지므로 열전대의 정확한 위치는 결정 할 수 없다. 그러므로 적절한 열전대의 위치는 측정된 온도반응에 가장 접근된 온도 반응을 하는 노드(node) 부근에 위치한다고 정한다.

식 5의 추가 해들로부터 열전대의 최종위치가 결정되는데 이 때에는 에폭시를 더 칠하여 두께를 조정함으로써 얻어진다. 이렇게 계산된 조정값과 실제 방출열량 값이 주어진 한계 내에서 일치되면 조정작업은 끝난다.

2.5 열량의 결정

마네킹에 입한 옷이 불타는 동안 감지기의 반응온도가 기록된다. 각 감지기의 시간-온도 곡선을 근거로 시간에 따라 감지기가 받는 단위 표면적 당의 열량을 다음과 같이 결정할 수 있다. 즉 감지기의 조정 과정을 나타내는 식 10은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[D]\left\{\frac{dT}{d\theta}\right\}-[CON]\{T\}=\{b\},\qquad 0\langle\theta\langle\tau, \quad \cdots\cdots (11)$$

여기서 {b}는 대기온도와 열방출량과 같은 제약조건의 비균질성을 나타낸다. 매우 짧은 기간의 열 방출량을 식 11에 의해 풀면 이 양은 식 6의 순간

적인 평균값 Ψ라 할 수 있다. 위 방법을 되풀이하면 시간에 따른 열 방출량 곡선이 거의 정확하게 계산될 수 있다. 다시 말하면 식 11의 해인

$$\{T\} = [VE] \cdot \{A \exp(\lambda\theta)\} + \{T\}_p, \qquad 0 < \theta < \tau_1 \quad \cdots\cdots (12)$$

로 부터 $0 < \theta < \tau_1$의 기간내의 Ψ의 평균값이 얻어진다. 단 $\theta = \tau_1$에서 열전대의 온도가 $\theta = \tau_1$에서 실험실내의 실제 기록된 온도와 같아야 한다.

식 12에서 τ_1은 첫 방출기간이 끝나는 시간을 나타낸다. 적분상수의 벡터인 {A}는 다음 식을 풀어서 계산되는데

$$[VE]\{A\} = \{T\}_i - \{T\}_p, \qquad \cdots\cdots\cdots (13)$$

여기서 $\{T\}_\rho$는 식 11의 부분해이며 다음의 식으로부터 얻어진 것이다.

$$[CON]\{T\}_p = \{b\} \qquad \cdots\cdots\cdots (14)$$

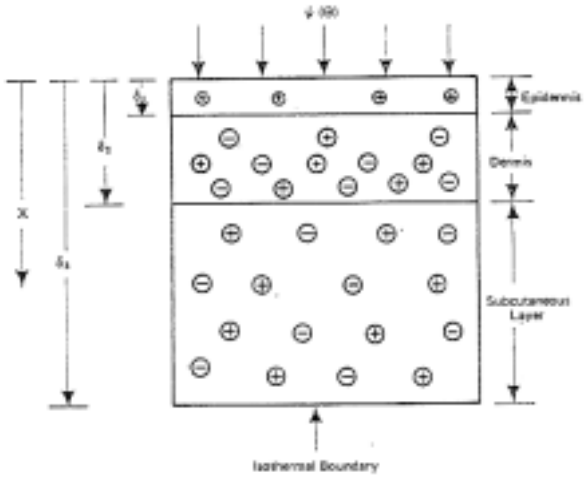
또 식 13에서 $\{T\}_i$는 고려된 시간 간격 밖에서의 초기온도를 나타내는 벡터이다. 식 14에서 {b}는 시간간격 $0 < \theta < \tau_1$에서의 평균 열 방출량의 측정값을 나타내는데, 이 때의 값에서 열전대의 위치에 대응되는 노드(node)의 계산된 $\theta = \tau_1$에서 측정된 온도가 같음을 알 수 있다.

2.6 피부의 다층 모형

본 연구에 응용된 수학적 모델은 Martha와 Wong이 개발한 내용과 동일하며 <그림 5>에 모형이 도식화 되어 있다. 대략 이 모델은 3개의 피부 층으로 구성되어 있는데 이들은 표피, 진피와 피하의 3부분이며 그 두께는 각각 0.008㎝, 0.2㎝와 1㎝이다.

예를 들어 앞에서 구한 평균 열 방출량을 단위시간 동안 피부표면에 쪼인다 하자. 피부는 외부열량을 통과시키기도 하고 내부 열량을 발산하기도 한

다. 가령 부호다 단위부피-시간당의 열량흡수를 의미한다고 정의하면 이 흡수는 피부의 세 층을 모두 관통한 방열효과를 나타낸다. 만일 과도한 내부열 발생이 일어나면 열 평형을 유지하기 위해 일부 열이 혈액순환에 의하여 진피 및 피하 층을 통과하여 발산된다. <그림 5>의 부호가 이러한 열의 발산을 나타내고 있다.



<그림 5> 인간의 피부모형

피부의 표면에서는 대기와 피부 사이에 대류에 의한 열 교환이 이루어진다. 그러나 피하 층의 가장 깊은 부분은 체온과 같은 온도가 유지되고 있다. 피부 각 층의 열 교환 온도 반응은 다르지만 각 피부 층 내에서의 온도적 성질은 균일하다고 가정한다. 이제까지 설명된 피부의 열 교환이 다음 식에 나타나 있다.

$$\mathrm{T}_{xx}(x,\theta)_i - \frac{\rho_b C_b G_i}{k_i}(\mathrm{T}(x,\theta)_i - \mathrm{T}_b) + \frac{A\Psi(\theta) f(x)_i}{k_i} = \frac{1}{\alpha_i}\mathrm{T}\theta(x,\theta)_i$$

$$\text{단, } x \in \mathrm{R}_i, \quad i = 1,2,3 \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (15)$$

식 15에서 ρ_b, C_b, T_b는 밀도, 비열 및 순환 혈액온도(37℃라 가정)를 각

각 나타내고 k_i, α_i, G_i는 영역 i에 대한 열용량, 열 확산율과 혈액순환율을 나타낸다. 또 $\Psi(\theta)$는 임의의 시간간격 동안의 순간 방열강도를 표현하며 상수인 A는 피부에 의해 흡수되는 순간 발열량의 비율을 나타낸다. Mehta와 Wong에 의해 발전된 에너지 감쇠 함수는

$$f(x)_1 = \gamma_1 \exp(-\gamma_1 x), (0 \le x < \delta_1, \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

$$f(x)_1 = \gamma_2(-\gamma_1\delta_1)\exp[-\gamma_2(x-\delta_1)], \quad i = 2,3, \quad x \ge \delta_1 \quad \cdots\cdots (17)$$

와 같이 표현되며 γ_1, γ_2는 표피와 진피의 방열흡수 계수를, δ_1은 표피의 두께를 나타낸다. 단, 진피층과 피하층의 흡수 계수는 같다고 가정하였다. 또 내부에너지 발생 함수는 표피와 진피의 경계에서는 부분연속이며 이외 부분에서는 연속이라 가정한다. 표 1에 이러한 상수들에 대한 수치 값이 나타나 있다. 해 $T(x,\theta)_i$에 의하여 만족되는 제약조건 식들은 다음과 같다.

$$k_i T_x(0,\theta) = h[T(0,\theta) - T_a], \quad 0 < \theta < \infty \cdots\cdots (18)$$

$$k_i T_x(\delta_i,\theta)_i = k_{i+1} T_x(\delta_i,\theta)_{i+1}, \quad i = 1,2 \quad 0 < \theta < \infty \cdots\cdots (19)$$

$$T(\delta_i,\theta)_i = T(\delta_i,\theta)_{i+1}, \quad i = 1,2,\delta \quad 0 < \theta < \infty, \quad \cdots\cdots (20)$$

$$T(\delta_i,\theta) = T_b, \quad = 3 \quad 0 < \theta < \infty \cdots\cdots (21)$$

식 18 에서 21까지는 피부표면에서의 온도 T_α의 대기와 대류에 의한 열교환을 표현하는 것으로 표피와 진피($x = \delta_1$), 진피와 피하($x = \delta_2$) 경계 면에서 열 방출의 연속성 및 피하의 하단에 있는 항온층과의 온도에 대한 연속성이 나타나 있다.

2.7 해 법

식 15를 풀기 위한 기법은 감지기를 모형화하는데 사용된 기법과 동일하

다. 따라서 공간변수 x외 유한 계차식 내에 존재 하는데 x는 내부에 3 층의 피부층으로 나누어진 각 노드(node)에 대한 에너지균형을 이루므로 서 얻어진다. 이러한 방법에서 편미분 방정식인 식 15는 행렬 방법으로 해결이 가능한 연속 1원 1차 미분방정식의 집합으로 축소된다. 유한 계차식에 의해 축소된 식 15는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[\mathrm{D}]\left\{\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{d}\theta}\right\}-[\mathrm{CON}]\{\mathrm{T}\}=\{\mathrm{b}\} \qquad \theta_i\langle\theta\langle\theta_{i+1} \cdots\cdots\cdots (22)$$

행렬 [D]는 열 용량 행렬이며 대각 행렬인 [CON]은 열전도 행렬로 대칭행렬(sysmetric)이며 동시에 삼중대각행렬(triduagonal)이다. {b}는 단위기간 동안의 내부 발생을 나타내는 것으로 제약조건에 명시된 비균질성과 혈액순환에 의한 열제거를 포함한다. 식 15에서와 같이 온도의 일차함수인 혈액순환 부분은 행렬[CON]의 조합에서 다루어지고 있으며 대각선 요소에만 영향을 미친다.

전체해는 균일해에 부분해를 더해서 얻어지며 그 결과는 다음과 같다.

$$\{\mathrm{T}\}=[\mathrm{VE}]\{\mathrm{A}\exp(\lambda\theta)\}+\{\mathrm{T}\}_{\mathrm{p}}, \qquad \theta_i\langle\theta\langle\theta_{i+1} \cdots\cdots (23)$$

여기서 식 22 에 나타난 벡터 {b}는 시간간격 $\theta_i<\theta<\theta_{i+1}$에 대응되는 것임을 유의해야 한다. 이 간격에서의 적분상수 A는 다음 식으로부터 계산되며

$$[\mathrm{VE}]\{\mathrm{A}\exp(\lambda\theta)\}=\{\mathrm{T}_i\}-\{\mathrm{T}\}_{\mathrm{p.}} \cdots\cdots\cdots\cdots (24)$$

여기서 $\{T\}_i$는 단위기간의 실제온도 벡터이며, $\{T\}_p$는 이 기간의 순간방열수준에 대응 되는 내부 열발생을 나타내는 식 15의 부분 해이다. 다음 시간간격 $\theta_{i+1}<\theta<\theta_{i+2}$를 위해서 시간간격 θ_{i+1}의 끝에서 계산된 온도가 초기조건 $\{T\}_i$가 된다.

부분해의 시점을 재조정하고 적분상수를 계산한 다음, 해는 다음 시점으로 다시 이동한다. 이러한 방법을 계속하여 화상을 입을 수 있는 최소온도인 44℃ 이하로 모든 노드 node의 온도가 감소될 때까지 반복된다. 해의 시간영역은 가열시간 뿐만 아니라 $(\theta)=0$인 휴식시간도 함께 포함한다.

2. 8 피부손상 정도의 정량적 산출

Mehta 와 Wong 의 결과를 이용하여 피부화상의 깊이를 결정하는 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\Omega = P\int_0^{\theta} \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT(x,\theta)}\right)d\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

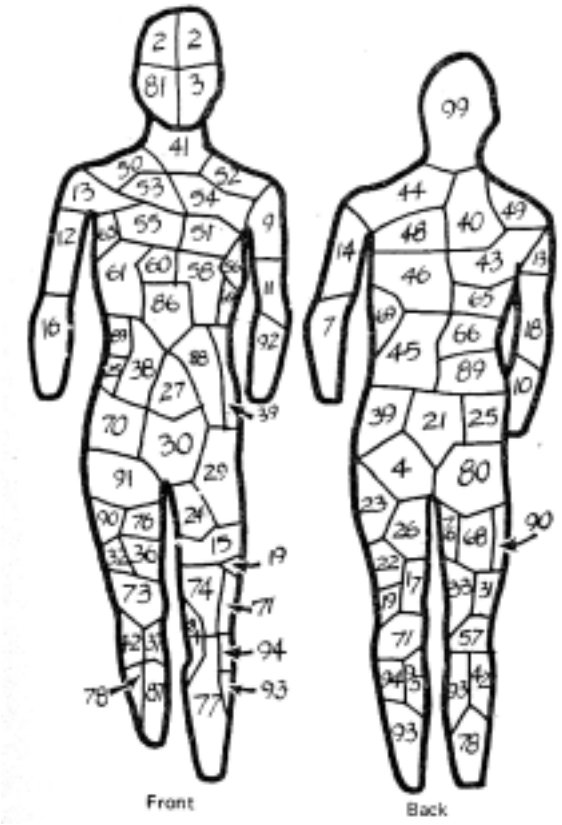
단 Ω는 일정한 깊이 x의 화상을 나타내며 θ는 시간, 표피의 경우 P=1.43 × 10^{72} S^{-1}, 진피의 경우 P=2.86 × 10^{69} S^{-1}, ΔE=1.1 × 10^{5}ca1/mo1e° K라 정한다. P는 선지수 요소이며 E는 활동에너지이다. Ω의 값이 1과 같거나 이보다 크면 피부형체의 열분해가 발생되어 재생 불능의 손상을 입는다고 가정한다. 식 25 는 $T(x,\theta)$가 화상가능 최대온도인 44℃를 넘으면 모든 시간 동안에 걸쳐 성립되며, 따라서 가열과 냉각 모두에 대한 적분이 가능하다. 식 25의 적분은 Gauss-Legendre 구적법에 의하여 수치적으로 수행될 수 있다. Digital Equipment Corporation PDP 11/70 전자계산기 프로그램은 깊이가 0.01208m(12080 ㎛)까지의 여러 간격에 대한 저항값 (Ω)을 프런트 하도록 작성되었다. 이렇게 프런트 된 값과 <그림 6>에 나타난 기준치들을 비교하여 화상의 치명도를 판단한다.

다음에 각각의 감지기는 <그림 7> 에서 보는 바와 같이 신체의 각 부분에 배치된다. 마네킹에 입혀진 옷에 불이 붙여진 다음 화상의 정도가 <그림 8>과 같이 제 1 도, 2 도, 3도 화상으로 분류되어 신체도로 표현된다. <그림 8>은 가볍고 방염처리가 되지 않은 100 % 순면으로 된 전형적 A- 라인 드레스

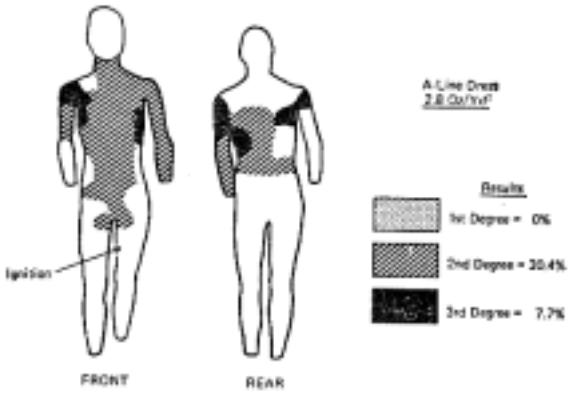
에 대한 실험결과를 나타내고 있다. <그림 8>의 오른쪽에 있는 기호의 면적은 화상의 동일 한 정도를 나타내며 의학적 척도로 사용될 수 있다.

$\Omega<0.5$ at 0.00008m	- 화상을 입지 않음
$0.5<\Omega<1.0$ at 0.00008m	- 1 도 화상
$\Omega\geqq1.0$ between 0.00008m and 0.002m	- 2 도화상
$\Omega>1.0$ at 0.002m	- 3 도 화상

<그림 6> 화상정도의 결정



<그림 7> 온도측정장치가 부착된 마네킹에서의 온도감지 영역



<그림 8> 온도측정장치가 부착된 마네킹을 이용한 화상범위 및 정도의 추정

3. 결 론

온도측정장치가 부착된 마네킹은 모의실험이라는 이점 때문에 의류에 의한 화상 가능한 측정에 가장 실용 가능한 방법이라 하겠다. 발화원에 대한 노출 가능성이나 화재를 당하는 희생자의 자기 보호 행동 등이 화상정도에 영향을 미치는 중요요소가 되겠으나 이러한 요소들은 본 연구 내용에 포함되지 않았다.

수학적 모델은 표피에 열이 가해졌을 때 생기는 피부의 특성변화를 고려하지 않았다. 여기서 말하는 특성변화란 물이 증기가 되는 증발과 극히 강한 노출에 의해 외부 피부조직이 탄화되는 것을 포함한다. 이러한 생략내용을 고려한다면 마네킹 모의 실험에 의한 화상예측치가 실제보다 약간 높게 산출되리라고 짐작할 수 있다.

이제까지 본 논문의 내용과 유사한 연구를 실행할 수 있도록 마네킹의 제작 방법을 자세히 설명하였다. 여기에 나타난 설계에 사용된 재료, 자료처리 시스템 및 수학적 기법과 마네킹에 의한 실험시스템의 제작 등은 매우 실용성이 높다고 믿는다.

본문의 식 10과 식 22를 푸는 방법이 다음에 설명되었다. 먼저

$$[D]\left\{\frac{dT}{d\theta}\right\}-[CON]\{T\}=\{b\},\qquad 0\le\theta\le\varphi \cdots\cdots (1)$$

에서 변환된 온도 {TE}의 벡터는 다음 식의 일차변환에 의해 결정된다.

$$\{T\}=[VE]\{TE\}, \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

여기서 [VE]는 $[D]^{-1}$ [CON]의 eigenva1ue에 대한 행렬이다. $[D]^{-1}$ 을 곱한 다음 식 10에 이 변환을 적용하면 결과는

$$[VE]\left\{\frac{dTE}{d\theta}\right\}-[D]^{-1}[CON][VE]\{TE\}=[D]^{-1}\{b\} \cdots (3)$$

이 되고, [VE]-1을 식 2에 곱하면 다음이 된다.

$$\left\{\frac{dTE}{d\theta}\right\}-[VE]^{-1}[D]^{-1}[CON][VE]\{TE\}=[VE]^{-1}[D]^{-1}\{b\} \cdots (4)$$

[VE]는 $[D]^{-1}$ [CON] 의 eigenva1ue 행렬이므로 식 4는 분해되어 다음과 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\left\{\frac{dTE}{d\theta}\right\}-\{\lambda\}\{TE\}=[VE]^{-1}[D]^{-1}\{b\} \cdots\cdots\cdots (5)$$

식 5에서 [λ]는 eigenvector[VE]와 관계되는 eigenva1ue의 대각행렬이다. 식 5의 homogeneous 부분에 대한 해는

$$\{TE\}=[VE]\{A\exp(\lambda\theta)\},\qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (6)$$

이 된다. 전체해는 다음의 식 8에 의해 계산되는 부분해를 균일해인 식 7에 더하여 얻어지며 결과는 식 9와 같다.

$$[CON]\{T\}_p=-\{b\} \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

$$\{T\}=[VE]\{A\exp(\lambda\theta)\}+\{T\}p,\qquad 0\langle\theta\langle\varphi \cdots\cdots (8)$$

적분상수 A는 다음을 풀어 구할 수 있다.

$$[VE]\{A\}=\{T\}_i-\{T\}_p \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

여기서 지수함수 $\exp(\lambda\theta)$ 는 $\theta = 0$ 에서는 1의 값을 가지며, $\{T\}_i$ 는 임의의 시간간격의 시점에서 초기온도의 벡터를 나타낸다.