Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 15, No.1, 1996

발한 Thermal manikin과 국제 표준 7730을 이용한 원자력 발전소 작업복의 열적 쾌적성 판별

Determining Thermal Comfort properties of Coverall Worn in the Atomic Power Plant Using a Sweating Thermal Manikin and ISO 7730

홍 성 애*

ABSTRACT

For determining thermal comfort properties of work suit in an atomic power plant, three different coverall ensembles (PVC, PET/Rayon, PP Nonwoven) were selected and the resistance to dry and evaporative heat transfer were measured for each ensemble by using a sweating thermal manikin. Also, PMV(Predicted Mean Vote) and PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied) indices were predicted according to ISO 7730. As a result, ideal environmental conditions in an atomic power plant were suggested to make workers feel thermally comfortable. In addition, ideal intrinsic insulation values of coverall ensembles as a work suit under the present environmental conditions in the atomic power plant were provided. The information given in this paper can be used to control environmental conditions in the atomic power plant thermally comfortable and to select a proper work suit for providing thermal comfort to the workers.

1. 서 론

인체에 가장 밀접한 환경으로서 착용되는 의복은 고도의 산업 발달에 따라 단순한 미적 기능을 떠나 특수한 작업 조건 및 환경 등 각 기능에 맞는 의복의 설계를 요구하게 되었다. 그러나 방호성 등 특수 가능성에만 의복 설계의 역점을 두게 되면 산업체 작업 현장 등에서 오랜 시간 일하는 작업자들에게 heat stress를 쉽게 초래하여 결국은 이러한 의복의 착용시 열적 쾌적감을 상실하게 된다. 열적 쾌적감은 특

* 한성대학교 의류직물학과

이 논문은 1994년도 한국 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

히 정신적, 기술적, 육체적 노동의 성과에 직접적인 영향을 미치게 되므로 매우 중요하다고 할 수 있다(Olesen & Dukes-Dobos, 1984). 따라서 의복의 열적 쾌적감을 판단하는 척도로서 의복의 단열적 측정에 대한 연구가 정적인 상태(McCullough et al, 1985 ; Olesen, 1985 ; Seppanen et al, 1972 ; Sprague & Munson, 1974 등)에서 활발히 이루어져 왔고, 기존의 연구와 ISO (7933, 9920) 및 ASHRAE Standard(ANSI/ASHRAE 55-1992)에서 사용하는 단열력이 정적인 상태에서만 측정된 것이므로, 최근에는 동적인 상태(McCullough & Hong, 1992, 1994등)에서와 자세(McCullough et al, 1994)에 따른 단열력의 변화 등 다양하게 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이러한 연구 결과에서의 의복 단열력은 열 전달경로중 전도·대류·복사를 통한 것은 설명이 잘 되지만, 의복으로부터 환경으로의 열손실에 있어 또다른 중요한 경로인 발한에 의한 증발력은 설명이 되지 못한다. 이에 인체가 처한 환경에 맞는 의복의 적합도 판단의 중요한 척도로서 의복의 발한 증발력 측정이 요구되어짐에 따라 Mecheels과 Umbach(1976)등은 열판(Sweating Hot Plate)으로부터 직물의 발한 증발력을 측정하였으나 이는 2차원적 모델로 국한되었다. 실제로 의복이 인체에 입혀지게 되면 보다 많은 요인들이 복합적으로 영향을 미치게 되므로, 인체와 같은 3차원 모델에서의 측정이 요구되어져 왔다.

특히 많은 산업체 작업 현장(원자력 발전소내 관리 구역 ; 반도체 산업의 Clean Room ; 화학 공장 등)에서 착용되는 작업복으로서의 Coverall은 one-piece 형태로서 대부분의 다른 의복들과는 달리 허리 부분에 개구부(opening)가 없어 환기(Ventilation) 효과를 기대하기 어려워 실제적으로 땀의 방출이 더욱 어렵게 된다. 더욱이 연통 효과(Chimney Effect)로 인한 어깨 부분의 열 축적은 증대되므로 작업자가 오랜 시간 착용하고 일하게 될 경우 heat stress의 축적으로 더욱 불쾌감을 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 산업체 작업복중 원자력 발전소내 관리 구역에서 오랜 시간 착용되고 있는 Coverall을 선정하고, 발한 증발력 측정용 Sweating Thermal Manikin을 이용하여 Coverall의 단열력과 발한 증발력을 측정함으로써 Coverall의 열적 특성에 대한 정량적 지표로서 제시하고자 한다.

또한 실제로 같은 단열력을 지닌 작업복이라도 주어진 작업 현장에서의 열적 환경 조건들과 작업량 등에 따라 작업자가 느끼는 열적인 쾌적감 정도에는 차이가 있게 된다. 그러므로 작업자가 착용하는 작업복의 열적 특성들을 측정함과 동시에 작업자가 일하는 작업 현장의 열적 환경 조건들과 작업량을 조사하여 실제 작업자가 느끼게 되는 열적 쾌적감 정도를 판별하는 것이 필요하다. 따라서 열적 쾌적감 정도를 나타내기 위하여 ISO 7730에 제시된 방법에 따라 PMV(Predicted Mean Vote)와 PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied) 지수들을 산출하여 제시하고자 한다. 아울러 현재의 제반 작업 여건에서 작업자가 열적으로 쾌적성을 느낄 수 있는 이상적인 작업복의 단열치와, 환경 조건들을 산출하여 제시하고자 한다.

이로써 의복의 쾌적성 규명이 특히 요구되는 많은 산업체 작업복 생산업체 및 착용자 등에게 열적으로 보다 쾌적한 작업 환경 및 의복을 선정하고 설계하는데 필요한 자료들을 제공하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 실험복 선정

원자력 발전소내 관리 구역에서 현재 착용되고 있는 Coverall들로서, 1) 가장 많이

착용되고 있으며 반복 세탁하여 착용하는 polyester 65%/Rayon 35%로 된 것(Reusable Coverall)과, 2) 100% Polypropylene Nonwoven으로 된 1회용(Disposable Coverall), 3) 작업 환경의 오염 정도에 따라 오염도가 높을 경우에 PET/Rayon Coverall 위에 겹쳐 입는 PVC Coverall 세 가지를 모두 선정하였다. 이때 PVC Coverall은 원자력 발전소에서와 마찬가지로 PET/Rayon Coverall위에 겹쳐 착용한 상태에서 실험하였다. 또한 원자력 발전소에서 작업시에 이러한 Coverall들과 함께 착용되는 의복 item들을 Table 1과 같이 선정하여 실제 작업시와 마찬가지로 Coverall 속에 착용시켰다. 본 연구를 위하여 실험의로 선정된 Coverall 소재의 물리적 특성들은 Table 2에 제시된 바와 같다.

Table 1. Clothing Items of Coverall Ensembles Worn in the Atomic Power Plant

Coverall Items	PVC Coverall over PET/Rayon Coverall
	PET/Rayon Coverall
	Polypropylene Coverall
Coverall과 함께 착용되는 의복 items	작 업 모
	안 전 화
	신 발 덮 게
	면 장 갑
	고 무 장 갑
	반 팔 면 내 의
	팬 티
	면 양 말

Table 2. Physical Characteristics of Coverall Materials

Physical properties / Coverall Materials	Weight (g/m^2)	Thickness (㎜)	Bulk Density (kg/m^3)	Air Permeability ($cc/cm^2/sec.$)
PVC	129.3	0.127	1018.11	0.01이하
PET 65/RAYON 35	251.4	0.457	550.11	4.6
PP	66.9	0.371	180.32	22.1

2.2 작업복의 열특성측정을 위한 실험 (Thermal Manikin Test)

원자력 발전소에서 착용하는 Coverall의 단열력과 발한 증발력을 측정하기 위하여 1995년에 Kansas State University의 Institute for Environmental Research에서 Environmental Chamber와 Sweating Thermal Manikin(Sam)을 이용하여 실험을 실시하였다. 이 때에 사용한 Thermal Manikin은 스칸디나비아 연구팀에 의하여 제작된 후 많은 미국의 연구에서 열특성측정실험에 사용되어 왔으며, 실험 장치의 구성도는 Figure 1과 같다.

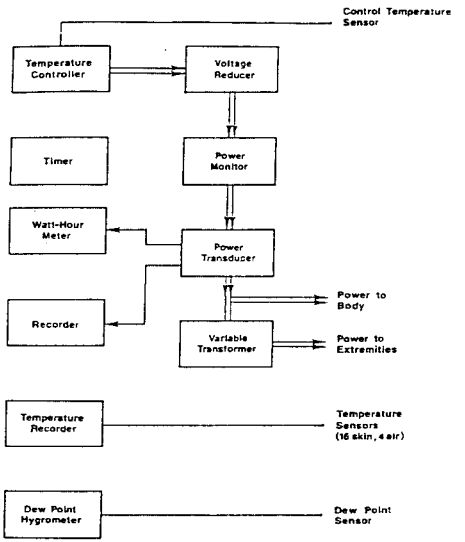

Figure 1. Instrumentation and Control Schematic for the Manikin

2.2.1 작업복의 단열력 측정

의복의 단열력(I_T) 측정을 위한 Thermal Manikin Test는 ASTM F 1291-90, Stan-

dard Test Method for Measuring the Thermal Insulation of Clothing Using a Heated Manikin(ASTM, 1993)에 제시된 방법에 따라 인공 기후실에서 실시하였다. 이때 기후실 내의 기온은 22±0.5℃, 기류는 0.15m/s 이내, 상대습도는 50±5%, Thermal Manikin의 평균 피부 온도는 33.2±0.5℃로 유지하였다. Coverall Ensemble의 단열치에 대한 실험데이타는 Thermal Manikin의 피부온과 인공기후실의 환경 변인들이 실험 조건에 도달하여 90분이상 안정 상태(steady state)에 있은 이후로부터 30분간 측정하였다. 각 실험마다 Thermal Manikin의 16부위 (Figure 2)에서 측정된 피부온과 인공 기후실 내의 각기 다른 높이 4군데에서 측정된 기온이 매 1분마다 기록되었다. 실험은 각 Coverall Ensemble을 3번씩 반복 측정한 후 평균치로써 단열력 값을 산정하였다.

Coverall Ensemble 주의의 공기층을 포함한 총 단열치(Rt)의 산출방법은 다음과 같다.

$$R_t = \frac{(T_s - T_a)A}{Q} \quad (1)$$

R_t=resistance to dry heat transfer provided by the clothing system and outer air layer(total insulation), ㎡ · ℃/W
T_s=skin temperature, ℃
T_a=ambient air temperature, ℃
A =surface area, m^2
Q =dry heat flow, w

의복 고유 단열치(intrinsic clothing insulation, R_{cl})는 총단열치에서 주변의 공기층이 제공하는 단열력을 제외시키고, 의복 착용으로 인하여 3차원적으로 증가되는 표면적(A)의 영향(f_{cl})은 포함시킨 의복 자체만의 단열치로서 다음과 같이 산출하였다.

$$R_{cl} = R_t - \frac{R_a}{f_{cl}} \quad (2)$$

R_{cl}=resistance to dry heat transfer provided by the clothing alone(intrinsic clothing insulation), ㎡ · ℃/W
R_t=resistance to dry heat transfer provided by the clothing system and outer air layer(total insulation), ㎡ · ℃/W
R_a=resistance to dry heat transfer provided by the outer air layer, ㎡ · ℃/W
f_{cl}=clothing area factor, dimensionless

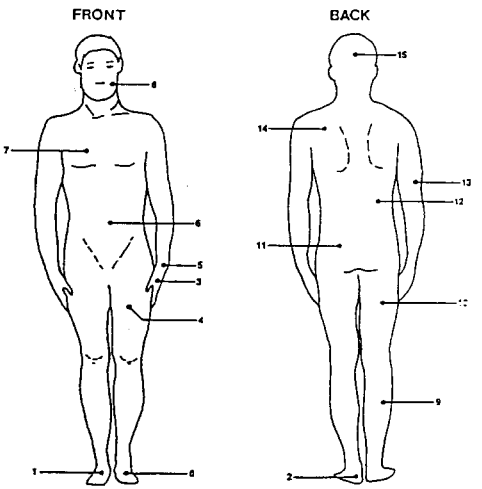

Figure 2. Thermistor Locations on Sam the Thermal Manikin

2.2.2 작업복의 발한 증발력 측정

작업복에 대한 발한 증발 저항력은 U.S. Military Ergonomics Lab.의 R. Goldman에 의해 개발된 후 McCullough 등(1989)에 의해 확립된 방법에 따라 발한 증발력 측정이 가능한 Thermal Manikin에 cotton knit skin을 입히고 증류수로 모의 발한 상태를 만들어 측정하였다. 이때 Thermal Manikin의 평균 피부 온도는 32.8±0.5℃로 유지하였고, 인공기후실내의 기온은 26.7±0.5℃, 상대습도는 50±5%, 기류는 0.15m/s 이내로 유지하였다. Sweating Thermal Manikin을 이용한 작업복의 총 발한 증발

저항력은 다음과 같이 산출하였으며, 이때 필요한 환산 수치들은 ASHRAE Fundamentals (1993)를 이용하였다.

$$R_{e,t}=\frac{(P_s-P_a)A}{H-\frac{(T_s-T_a)A}{R_t}} \quad (3)$$

단, $R_{e,t}$ = total resistance to evaporative heat transfer provided by the clothing system and outer air layer, m² · kPa/W
P_s = water vapor pressure at the skin, kPa
P_a = water vapor pressure at the air, kPa
A = manikin surface area, m²
H = total power input, W
T_s = skin temperature, ℃
T_a = ambient air temperature, ℃
R_t = resistance to dry heat transfer provided by the clothing system and outer air layer(total insulation), m² · ℃/W

인체주변 공기층의 영향을 제외한 작업복 자체만의 발한 증발 저항력(intrinsic evaporative resistance, $R_{e,cl}$) 산출방법은 다음과 같다.

$$R_{e,cl}=R_{e,t}-\frac{R_{e,a}}{f_{cl}} \quad (4)$$

단, $R_{e,cl}$ = resistance to evaporative heat transfer provided by clothing alone, m² · kPa/W
$R_{e,t}$ = total resistance to evaporative heat transfer provided by the clothing system and outer air layer, m² · kPa/W
$R_{e,a}$ = resistance to evaporative heat transfer porvided by the outer air layer, m² · kPa/W
f_{cl} = clothing area factor, dimensionless

2.2.3 작업복의 수분 투과도

수분 투과도 지수(moisture permeability index, i_m)는 의복을 통한 수분통과의 효율성을 나타내므로, 의복의 발한 증발력에 대한 지표로 많이 사용되어 왔고(Havenith et al, 1990 ; McCullough et al., 1989 ; Oohori et al, 1984 ; Woodcock, 1962), 그 산출방법은 다음과 같다.

$$i_m=\frac{R_t\ /\ R_{e,t}}{R'_T\ /\ R'_E} \quad (5)$$

단, i_m = moisture permeability index for a clothing system, including the air layer resistance, dimensionless
R_t = resistance to dry heat transfer provided by the clothing system and outer air layer(total insulation), m² · ℃/W
$R_{e,t}$ = total resistance to evaporative heat transfer provided by the clothing system and outer air layer, m² · kPa/W
R'_T = the thermal resistance of thin air film, m² · ℃/W
R'_E = the evaporative resistance for the same air film, m² · kPa/W

인체주변의 공기층을 제외한 작업복 자체만에 대한 수분 투과도 지수(i_{cl}) 산출 방식은 다음과 같다.

$$i_{cl}=\frac{R_{cl}/R_{e,cl}}{LR} \quad (6)$$

단, i_{cl} = permeability index for clothing alone (dimensionless)
R_{cl} = resistance to dry heat transfer provided by clothing, m² · kPa/W
$R_{e,cl}$ = resistance to evaporative heat transfer provided by clothing, m² · kPa/W
LR = Lewis Relation, ℃/kPa

2.3 PMV · PPD 지수 산출

2.3.1 PMV 지수 산출

ISO 7730에서 제시하는 PMV(Predicted

Mean Vote) 지수는 Fanger(1970)에 의해 개발된 열적 쾌적성 정도를 나타내는 지표로서 PMV 지수중 '+'값은 더운 정도(warmth)를, '-'값은 서늘한 정도(coolness)를 나타내게 되며, 다음의 7점 thermal sensation scale로 나타낸다(+3 ; hot, +2 ; warm, +1 ; slightly warm, 0 ; neutral, -1 ; slightly cool, -2 ; cool, -3 ; very cold).

이때에 PMV 지수는 ISO 7730에 제시된 대로 산업체 작업 현장의 열적 환경 조건들 4가지와, 착용하는 작업복의 단열력 및 작업량 등 모두 6가지 변인들을 이용하여 산출되었으며, 그 산출방법은 다음과 같다.

$$PMV=(0.303e^{-0.036M}+0.028)\{(M-W)-3.05\times10^{-3}\times[5733-6.99(M-W)-p_a]-0.42\times[(M-W)-58.15]-1.7\times10^{-5}M(5867-p_a)-0.0014M(34-t_a)-3.96\times10^{-8}f_{cl}\times[(t_{cl}+273)^4-(t_r+273)^4]-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\}$$

이때에,

$$t_{cl}=35.7-0.028(M-W)-I_{cl}\{3.96\times10^{-8}f_{cl}\times[(t_{cl}+273)^4-(t_r+273)^4]+f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\}$$

$$h_c=2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25} \text{ for } 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}>12.1\sqrt{V_{ar}}$$
$$12.1\sqrt{V_{ar}} \text{ for } 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}<12.1\sqrt{V_{ar}}$$

$$f_{cl}=1.00+1.290I_{cl} \text{ for } I_{cl}<0.078 m^2\cdot℃/W$$
$$1.05+0.645I_{cl} \text{ for } I_{cl}>0.078 m^2\cdot℃/W$$

단, M=metabolic rate, W/m²
W=external work, W/m²
I_{cl}=thermal resistance of clothing, m²·℃/W
f_{cl}=ratio of man's surface area while clothed, to man's surface area while nude
t_a=air temperature, ℃
t_r=mean radiant temperature, ℃
V_{ar}=relative air velocity, m/s
p_a=partial water vapour pressure, Pa
h_c=convective heat transfer coefficient, W/m²·℃
t_{cl}=surface temperature of clothing, ℃
h_c=convective heat transfer coefficient, W/m²·℃

2.3.2 PPD 산출

PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)는 덥거나 서늘하여 열적으로 쾌적감을 느끼지 못하는, 즉, PMV 지수가 +3(hot), +2(warm), -2(cool), -3(cold) 등으로 나온 사람들의 수를 예측하기 위하여 개발된 지수로서, 이 PPD지수는 ISO 7730에 따라 PMV 지수 산출 후에 다음과 같이 산출하였다.

$$PPD=100-95\times e^{-(0.03353\times PMV^4+0.2179\times PMV^2)}$$

2.4 자료 분석

Data 분석은 SAS를 이용하여 separate one-way ANOVA로 단열력 및 발한 증발력에 대한 Coverall Ensemble Type의 차이 검정을 하였으며, $p<0.01$ 수준에서 통계적으로 유의적인 차이를 보인 data들은 Post-Hoc test로서 Fisher's Least Square Differences(LSD)를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

원자력 발전소 관리 구역에서 착용되는 작업복 종류에 따른 단열력, 발한 증발력, 수분 투과도 지수등 열적 쾌적성 변인들에 관하여 분산 분석을 실시한 결과는 Table 3과 같다. 또한 F-test 결과 $p<0.01$ 수준에서 모두 통계적으로 유의적인 차이를 보여서 Post Hoc Test로 Fisher's LSD를 실시하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Analysis of Variance for the Effect of Coverall Type on the Thermal Properties

Source of Variation	DF	Sum of Squares	F Value
Total Insulation(I_T)	2	0.29449	509.69**
Total Evaporative Resistance($R_{e,t}$)	2	0.00075	559.50**
Evaporative Resistance of Clothing($R_{e,cl}$)	2	0.00072	811.00**
Intrinsic Insulation(I_{cl})	2	0.29449	509.69**
Permeability Index(i_m)	2	0.02669	600.50**

**significant at 0.01 level.

Table 4. LSD Tests for the Effect of Coverall Type on the Thermal Properties

Coverall Type	Mean	LSD Grouping[a]
Total Insulation(I_T)	(clo)	
PVC with PET/RAYON	1.65	A
PET/RAYON	1.25	B
PP	1.28	B
Total Evaporative Resistance($R_{e,t}$)	(m^2 · kPa/W)	
PVC with PET/RAYON	0.047	A
PET/RAYON	0.030	B
PP	0.026	C
Evaporative Resistance of Clothing($R_{e,cl}$)	(m^2 · kPa/W)	
PVC with PET/RAYON	0.040	A
PET/RAYON	0.023	B
PP	0.019	C
Intrinsic Insulation(Icl)	(clo)	
PVC with PET/RAYON	1.21	A
PET/RAYON	0.81	B
PP	0.84	B
Permeability Index(i_m)	(dimensionless)	
PVC with PET/RAYON	0.327	C
Pet/RAYON	0.397	B
PP	0.460	A

[a]Means with the same letter designation are not significantly different at 0.05 level.

3.1 작업복의 단열력

원자력 발전소 관리 구역 작업복으로서 착용되는 Coverall Ensemble에 대한 단열력 실험 결과는 Table 5와 같다. 이때, 'R'은 SI 단위(℃ · m^2/W)로 단열력을 나타내고, 'I'는 clo 단위로 나타낸다. Table 4에서 제시되었던 바와 같이 단열력(I_T와 I_{cl})에 대한 LSD Test 결과, 반복 세탁 가능한 PET/Rayon Coverall Ensemble과 1회용인 PP Coverall Ensemble 간에는 $p<0.01$ 수준에서 통계적으로 유의적인 차이가 나타나지 않았다. PET/Rayon Coverall의 경우, 세탁 후에도 오염 자국이 잔존하는 경우가 많아서 작업자들이 착용을 우려하는 경우가 있는 데, 그럴 경우 단열력 면에서 차이가 없는 1회용 Coverall로 대체하여 착용하는 것이 가능하다고 할 수 있겠다. 그러나, 이 두 가지 Coverall Ensemble은 비교적 오염도가 높은 작업 환경에서 PVC Coverall을 PET/Rayon Coverall위에 겹쳐 입는 Ensemble과는 $p<0.01$ 수준에서 통계적으로 유의적인 차이를 보여, 겹쳐 입는 Coverall Ensemble에서 그렇지 않은 경우보다 훨씬 더 높은 단열력을 나타내었다.

Table 5. Insulation Data for Coverall Ensembles Measured with a Thermal Manikin

Ensemble	Total Dry Resistance R_t(℃ · m^2/W) I_t(clo)	Intrinsic Clothing Insulation[a] R_{cl}(℃ · m^2/W) I_{cl}(clo)
PVC over PET/RAYON	0.256 1.65	0.187 1.21
PET/RAYON	0.195 1.25	0.126 0.81
PP	0.198 1.28	0.129 0.84

[a]Calculated based on an air layer resistance of 0.087 ℃ · m^2/W(0.56 clo) measured on the nude manikin.

3.2 작업복의 발한 증발력

Sweating Thermal Manikin을 이용한 발한 증발력 실험으로 산출된 발한 증발 저항력($R_{e,t}$와 $R_{e,cl}$)에 대한 LSD Test 결과, 세 가지 Coverall Ensemble 모두 각기 $p<0.01$ 수준에서 유의적으로 차이를 나타내었으며, 각 Coverall Ensemble에 대한 발한 증발 저항력 및 수분 투과도 지수값(i_m, i_{cl})은 Table 6과 같다. 특히 수분 투과도는 의복에 대한 수분통과 효율성을 판단하는 지수로서 '이상적인 증발 냉각'에 대한 '실제 의복을 통한 증발 냉각'을 비교하여 그 비율을 지수로 나타내어 준다. 즉, 의복 자체가 지닌 단열력 수준에서 볼 때 냉각 효과가 클수록 이 지수는 높은 값을 나타낸다(Havenith et al, 1990 ; McCullough et al., 1989 ; Oohori et al, 1984 ; Parsons, 1993 ; Tamura, 1991).

PET/Rayon Coverall 위에 PVC Coverall을 겹쳐 입은 Ensemble의 경우에 발한 증발 저항력이 가장 높게 나타나고 수분 투과도는 가장 낮게 나타나서, 이 Ensemble을 착용하였을 경우가 의복을 통한 땀 방출이 가장 어려운 것으로 나타났다. 반면에 100% Polypropylene Nonwover으로 만들어진 1회용 Coverall Ensemble의 경우에는 발한 증발 저항력이 가장 낮고 수분 투과도는 가장 높으므로, 현재 원자력 발전소에서 착용하고 있는 Coverall Ensemble 중에서 가장 땀 방출을 잘 시키는 작업복으로 나타났으므로, 이를 착용하는 작업자들에게 열적 불만족을 경감시켜 줄 것으로 기대된다.

따라서 반복 세탁 착용이 가능한 PET/Rayon Coverall과 1회용인 PP Coverall에 대하여 전도·대류·복사를 통한 건열에 대한 단열력(Resistance to Dry Heat Transfer)면에서 비교하여 볼 때는 두 가지 다른 종류의 Coverall Ensemble에서 차이가 없었으나, 발한 증발력까지 같이 고려하여 볼 때는 Polypropylene Coverall의 발한 증발력이 더 뛰어나므로 착용자에게 열적 쾌적성을 보다 더 제공하여 줄 수 있다고 할 수 있겠다. 특히 반복 세탁하여 착용하는 작업복의 경우에는 세탁 후에도 작업복에 남아 있기 쉬운 오염 자국 문제를 고려하여 볼 때 더욱 1회용 Coverall로 대체하

Table 6. Moisture Permeability Data for Coveralls Measured with a Sweating Manikin

Ensemble	Total Evaporative Resistance $R_{e,t}$($m^2 \cdot kPa/W$)	Moisture Permeability Index i_m	Evaporative Resistance of Clothing[a] $R_{e,cl}$($m^2 \cdot kPa/W$)	Moisture Permeability Index for Clothing[b] i_{cl}
PVC with PET/RAYON	0.047	0.33	0.040	0.28
PET/RAYON	0.030	0.39	0.023	0.33
PP	0.026	0.46	0.019	0.41

[a]Calculated based on an air layer evaporative resistance of 0.0088$m^2 \cdot kPa/W$.

[b]im for the nude manikin is 0.48.

여 착용하는 것이 바람직하다고 하겠다.

3.3 PMV와 PPD 지수 산출

ISO 7730은 작업자 또는 작업환경이 열적으로 쾌적한지 그 여부를 판별하는 방법을 효과적으로 제시하여 준다. 열적 쾌적감은 정신적, 기술적, 육체적 노동의 성과에 직접적인 영향을 미치게 되므로 매우 중요하다고 할 수 있다(Olesen and Dukes-Dobos, 1984). 덥지도 춥지도 않는 열적 중립(neutral) 상태로서 가장 이상적인 PMV 값은 0이지만, 비교적 작업자가 만족하는 수용 가능한 열적 환경으로서 ISO 7730에서 제안하는 범위는 PMV≤±0.5이며, 이 범위 안에서 PPD는 10%를 넘지 않는다.

현재 원자력 발전소에서 착용하고 있는 Coverall Ensembles중 가장 많이 착용하고 있는 반복 세탁 가능한 Coverall과, 세탁 후에도 잔존할 수 있는 오염 문제 해결을 위한 대안책으로써 착용이 가능한 1회용 Coverall, 두 종류의 Ensemble을 선정하여 PMV 및 PPD 지수를 산출한 결과를 Table 7에 제시하였다. 이때에 PMV 산출을 위한 의복의 단열력 값은 인공기후실에서 Thermal Manikin을 이용하여 측정한 값(Table 5)을 사용하였고, 신진대사량은 원자력 발전소 관리 구역 내에서의 작업량을 고려하여 ANSI/ASHRAE 55-1992 (ASHRAE, 1992)와 ISO 7730에서 제시한 값들을 선정하여 사용하였다. 관리 구역 잡업자들중 방사선 관리자들은 계측기 등을 들고 측정하는 정도의 아주 가벼운 작업(Light activity)을 주로 하게 되므로 신진대사량이 93.1W/m^2에 해당되며, 발전소 유지·보수자의 경우에는 장비 해체 및 조립 등과 같은 작업으로 방사선 관리자들 보다는 상대적으로 더 높은 강도의 일(Medium Activity, High Activity)을 하게 된다. 작업환경 조건으로는 현재 원자력 발전소 관리구역에서 유지하고 있는 실질적인 열적 작업환경조건(T_a=25℃, RH=50%, Va=0.1 m/s)을 그대로 이용하여 PMV 및 PPD 지수를 산출하였다. 그 결과, Coverall을 착용하고 일하는 작업자들중 방사선 관리자들과 같은 가벼운 작업을 하는 사람들도 열적 쾌적감을 느끼게 되는 범위인 PMV≤±0.5 수준을 벗어나서 약간 덥게 느끼는 것으로 나타났으며, 이 때에 열적으로 불만을 느끼는 사람에 대한 수를 예측한 PPD 지수는 25% 정도로 나타났다. 같은 종류의 Coverall Ensemble을 착용하고 작업하여도, 발전소 유지·보수자가 하는 작업과 같이 작업 강도가 가중되면 착용자는 더 무덥게 느끼는 것으로 나타나서 Medium Activity의 작업을 하는 경우 PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)가 40% 정도나 되는 것으로 나타났다. 또한 High Activity의 경우에는 80% 가까운 작업자들이 열적으로 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 7. PMV·PPD Indices of workers Wearing the Coveralls in the Atomic Power Plant

Ensemble	Intrinsic Clothing Insulation I_{cl} (clo)	Metabolic Rate (W/m^2)		PMV	PPD (%)
PET/RAYON	0.81	Light Activity,	93.1	0.99	25
		Medium Activity,	114.4	1.28	39
		High Activity,	165.0	2.05	79
PP	0.84	Light Activity,	93.1	1.00	26
		Medium Activity,	114.4	1.30	40
		High Activity,	165.0	2.06	79

3.4 열적으로 쾌적하게 느낄 수 있는 조건 제시

현재 원자력 발전소 관리 구역에서 Coverall Ensemble을 작업복으로 착용하고 있는 작업자들이 작업중에 열적으로 쾌적감을 느끼지 못하고 있는 것으로 나타났으므로 ISO 7730에서 사용되는 6가지 변인들 중 조절 가능한 변인들을 중심으로 주어진 작업 조건에서 작업자가 열적 쾌적감을 느낄 수 있는 범위인 PMV≤±0.5 산출을 위한 각 변인별 조절치를 제시하고자 한다.

3.4.1 이상적인 작업복의 단열력

ISO 7730에 따라 산출한 바에 의하면, 현재 원자력 발전소 내의 관리 구역에 주어진 열적 환경 조건에서 작업자가 가벼운 작업중(Metabolic Rate, 93.1 W/㎡)일 때에 I_{cl} 값이 0.38 clo 이하인 경우로 나타났다. 이 정도의 단열력을 지닌 의복은 일상복중 반팔 T-shirts · 반바지 차림의 여름옷(ANSI/ASHRAE 55-1992 ; ISO 7933)에 해당되며, 이는 현재 착용되고 있는 작업복이 상대적으로 가벼운 작업 중에도 착용자들이 덥게 느끼고 있는 종류의 작업복이라고 말할 수 있겠다. 물론 작업량이 이보다 가중되면 같은 단열력을 가진 작업복이라도 훨씬 더 무덥게 느낄 것이고, 열적 쾌적감을 느끼기 위하여는 가벼운 종류의 작업을 할 때 보다 훨씬 더 단열력이 낮은 의복을 요구하게 될 것이다.

그러나 I_{cl} 값이 0.38 clo 이하인 반팔 · 반바지 type의 의복을 작업복으로 착용하게 된다면 피부 노출 부위가 많아져서 그만큼 방사선 오염 물질에 인체가 노출될 위험이 커지므로 지금의 Coverall과 같이 인체의 대부분을 잘 피복시키면서도 단열력을 낮출 수 있는 방안이 필요하다고 하겠다.

3.4.2 이상적인 기류 조건

현재 원자력 발전소에서 다른 열적인 작업 환경 조건들은 현재의 조건 그대로 유지하면서 관리 구역내에서 기류의 속도 조절로 작업자가 열적 쾌적성을 느낄 수 있는 방법을 ISO 7730에 따라 산출하였다. 그 결과, 현재 가장 빈번하게 착용되고 있는 작업복(단열력, I_{cl}=0.81)을 입고 작업자가 가벼운 작업중(Metabolic Rate, 93.1 W/㎡)일 때에 바람직한 기류 속도는 1.5m/s이상으로 상당히 높은 풍속을 요구하는 것으로 나타났다. 이러한 풍속은 실내에서의 바람 속도 조절치로는 매우 높은 편이다. 이상적인 기류 속도가 이렇게 높게 제시된 것은 그만큼 현재 작업자가 열적으로 쾌적하지 못하다는 것을 말하여 준다고 할 수 있겠다.

3.4.3 이상적인 기온 제시

원자력 발전소 작업자가 현재의 작업복을 착용하고 작업할 때 PMV≤±0.5로 열적으로 쾌적성을 느낄 수 있는 기온의 범위를, 다른 열적인 작업 환경 조건들은 현재의 조건 그대로 유지하면서, ISO 7730 방법에 의해 산출하여 Table 8에 나타내었다. Table 8에 제시된 기온의 범위에서 상한 기온은 PMV=0.5일 때이며, 하한 기온은 PMV=-0.5일 때를 뜻한다. 현재 원자력 발전소 관리 구역 내의 평균 기온은 25℃로 조절되고 있으므로, 방사선 관리자가 주로 하는 작업들과 같은 가벼운 작업(Metabolic Rate=93.1 W/m^2)중일때는 기온을 3℃ 정도만 낮추어도 작업자가 열적으로 불편하지 않게 느낄 수 있게 되므로 아주 좋은 조절 방법이라고 할 수 있다. 물론 발전소 유지 · 보수자가 주로 하는 작업들과 같이 작업 강도가 가중되면 바람직한 온도는 더욱 낮아져서 Medium Activity의 작업을 할

Table 8. Ideal Air Temperatures for the Workers in the Atomic Power Plant

Coverall종류	Metabolic Rate, W/m^2	PMV≤±0.5를 가능하게 하는 기온, ℃
PET/RAYON	Light Activity, 93.1	16.9-22.4
	Medium Activity, 114.4	13.6-20.1
	High Activity, 165.0	6.3-13.7
PP	Light Activity, 93.1	16.6-22.2
	Medium Activity, 114.4	13.1-19.7
	High Activity, 165.0	6.7-14.0

경우에는 현재보다 5℃ 이상을 낮춘 기온(20℃ 이하)을 유지하여야 하며, High Activity의 작업을 할 경우에는 현재보다 11℃ 이상을 낮추어서 기온(14℃ 이하)을 유지하여야 작업자로 하여금 열적으로 불편하지 않게 느낄 수 있다.

4. 결론 및 제언

산업체에서의 다양한 작업 환경에서 착용하는 작업복의 설계와 제작 및 적합성 판단에 있어서 작업자의 정신적, 기술적, 육체적, 노동의 성과에 직접적인 영향을 미치게 되는 열적 쾌적성은 매우 중요한 자료를 제공하여 준다. 따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 관리구역에서 현재 작업복으로 착용되고 있는 Coverall Ensemble들을 선정하여 열적 쾌적성을 판별하기 위하여 의복의 단열력과 발한 증발력을 측정하였고, 수분 투과도를 산출하였으며, ISO 7730에 따라 PMV 및 PPD 지수들을 산출하였다.

그 결과, 1회용으로 제작된 Coverall도 현재까지 오랜 기간 가장 빈번하게 착용되어 온 기존의 Coverall과 단열력 면에서는 차이가 없었으며, 발한 증발력은 오히려 더 우수하여, 세탁 후에도 잔존하기 쉬운 오염 자국 문제를 가지고 있는 기존의 Coverall 대신에 교체하여 착용하는 것이 바람직하다.

PMV 및 PPD 지수 산출 결과, 현재 원자력 발전소 작업자들은 열적으로 쾌적하지 않게 느끼는 것으로 나타났다. 따라서 작업자에게 열적 쾌적성을 느낄 수 있도록 하기 위한 방안으로는, 1) 현재의 제반 작업 환경에서 I_{cl} =0.38 이하에 해당하는 단열력을 지닌 작업복을 선정하여 착용하는 방법, 2) 기온을 22℃ 이하로 현재보다 낮게 조절하되, 그 범위는 작업 강도에 따라 본 연구 결과에서 제시된 범위를 선정하여 유지시키는 방법, 3) 기류 속도를 현재보다 높여주는 방법 등 으로 결론을 내릴 수 있다.

본 연구 결과로 제시된 자료들은 일반 작업복 뿐만 아니라 산업체의 많은 방호복(각종 생화학 물질로 부터의 방호복, 병원 수술복, 소방서복, 반도체 산업내 clean room의 방진복 등)의 설계 및 기능 평가에 필요한 열적 쾌적성 판별에 적용할 수 있으며, 특수 기능복 착용자와 생산업체 및 열적 쾌적성 연구에 있어서 보다 쾌적한 의복 설계를 위한 방안으로 활용될 수 있다.

아직은 ISO 및 ASHRAE 등 열적 쾌적성에 관한 모든 국내·외 Standard들이 정적인 생태(Static State)에서의 자료들을 근거로하여 제정되어 있으나, 실제로 우리 인간은 작업 중은 물론 대부분의 시간을 작은 움직임이라도 가지며 보낸다는 것을 고려할 때, 앞으로는 ISO Standard 등이 동적인 상태(Dynamic Condition) 등을 포함하여 보다 실질적인 자료들을 근거로 하여 제정될 수 있도록 이 분야에서의 많은 후속 연구를 기대한다.

참 고 문 헌

[1] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1992.

[2] ASHRAE, ASHRAE Handbook of Fundamentals(SI), American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1993.

[3] ASTM, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1993.

[4] Fan, J., and Keighley, J. H., "A Fabric Manikin for Assessing the Thermal Insulation of Clothing," International Journal of Clothing Science and Technology, 2(2) : 14-19, 1990.

[5] Havenith, G., Heus, R., and Lotens, W. A., "Clothing Ventilation, Vapour Resistance and Permeability Index : Changes due to Posture, Movement and Wind," Ergonomics, 33(8) : 989-1005, 1990.

[6] ISO 7730, Moderate Thermal Environment : Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1984.

[7] ISO 7933, Hot Environments-Analytical determination and interpretation of thermal stress using calulation of required sweat rate, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1989.

[8] ISO 9920, Ergonomics of the Thermal Environment : Estimation of the Thermal Insulation and Evaporative Resistance of a Clothing Ensemble, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1992.

[9] McCullough, E. A., & Hong, S., "A Data Base for Determining the Effect of Walking on Clothing Insulation," Proceedings of The 5th International Conference on Environmental Ergonomics, Maastricht, The Netherlands, 1992.

[10] McCullough, E. A., & Hong, S., "A Data Base for Determining the Decrease in Clothing Insulation due to Body Motion," ASHRAE Transactions, 100(1) : 765-775, 1994.

[11] McCullough, E.A., Jones, B. W., and Huck, J., "A Comprehensive Data Base for Estimating Clothing Insulation," ASHRAE Transactions, 91(2) : 29-47, 1985.

[12] McCullough, E. A., Jones, B. W., and Tamura, T., "A Data Base for Determining the Evaporative Resistance of Clothing," ASHRAE Transactions, 95(2) : 316-328, 1989.

[13] McCullough, E. A., Olesen, B. W., & Hong, S., "Thermal Insulation Provided by Chairs," 100(1) : 795-802, 1994.

[14] Oohori, T., Berglund, L. G., and Gagge, A. P., "Comparison of Current Two-Parameter Indices of Vapor Permeation of Clothing-

Factors Governing Thermal Equilibrium and Human Comfort," ASHRAE Transactions, 91 : 85-101, 1984.

[15] Olesen, B. W., "A New Simpler Method for Estimating the Thermal Insulation of a Clothing Ensemble," ASHRAE Transactions, 91(2) : 478-492, 1985.

[16] Olesen, B. W., Dukes-Dobos, F. N., "International Standards for Assessing the Effect of Clothing on Heat Tolerance and Comfort," In S.Z. Mansdorf, R. Sager, & A. P. Nielsen (Eds.), Performance of Protective Clothing : ASTM Special Technical Publication 989, Philadelphia, PA : ASTM, 1988.

[17] Parsons, K. C., The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Taylor & Francis, London, 1993.

[18] Seppanen, O., McNall, P. E., Munson, D.M., & Spraugue, C.H., "Thermal Insulation Values for Typical Clothing Ensembles," ASHRAE Transactions, 78(1) : 120-130, 1972.

[19] Sprague, C.H. & Munson, D.M., "A Composite Ensemble Method for Estimating Thermal Insulation Values of Clothing," ASHRAE Transactions, 90(1) : 120-129, 1974.

[20] Tamura, T., & Tomizawa, M., "Skin Wettedness and Evaporative Heat Resistance of Clothing," Proceedings of the 2nd International Symposium on Clothing Comfort Studies, Mt. Fuji, Japan, 1991.

[21] Woodcock, A.H., "Moisture Transfer in Textile Systems(Part I)," Textile Research Journal, 32 : 628-633, 1962.