

현대 한국 해녀에서 수중운동시 열전도도의 변화

고신대학 의학부 생리학교실 및 잠수과학연구소

연동수 · 최장규 · 박양생

Changes in Thermal Insulation during Underwater Exercise in Korean Women Wet Suit Divers

Dong Soo Yeon, Jang Kyu Choi and Yang Saeng Park

*Department of Physiology and Diving Science Institute,
Kosin Medical College, Pusan, Korea*

= Abstract =

Steady-state body insulation was measured in 4 women divers during rest and exercise for 3 hrs in water of critical temperature.

The average critical water temperature of the subjects was $16.5 \pm 1.2(\text{SE})^{\circ}\text{C}$ with suits and $28.8 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ with swim suits. At rest, the total peripheral insulation of the subjects was higher with wet suits ($0.499 \pm 0.039(\text{SE})^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr} \cdot \text{m}^2)$) than with swim (0.156 ± 0.015) by about $0.343^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr} \cdot \text{m}^2)$, a value significantly greater than the physical insulation of the wet suit ($0.12^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr} \cdot \text{m}^2)$). With exercise, the total insulation declined as an exponential function of the exercise intensity in both wet suited and swim suited subjects, the effect being more pronounced in the later. In wet suited subjects, the extra-insulation due to wet suit decreased from about $0.28^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr} \cdot \text{m}^2)$ at rest to $0.12^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr} \cdot \text{m}^2)$ at exercise levels above 200% of the resting metabolism.

These results suggest that in resting subjects immersed in cold water the overall thermal Insulation is dramatically increased by wearing wet suits not only due to the physical insulation provided by the suit itself, but also due to more effective physiological regulation of peripheral circulation. The later effect of the wet suit is lost during exercise. There practical significance of the finding is discussed.

I. 서 론

물은 공기에 비해 열전도도가 25배가 크며 비열이 약 1000배나 크기 때문에 물속에서는 같은 온도의 공기중에서 보다 체표를 통한 열 손실이 막대하게 크다 (Beckman, 1963). 따라서 잠수부에서 체온 보존 문제는 잠수 시간을 결정하는 가장 중요한 요인으로 대두되고 있다 (Kang 등, 1965). 그러므로 잠수시 저체온증에 빠지는 것을 방지하고 잠수 시간을 연장하기 위하여 여러가지 형태의 잠수복이 개발되었는데 일반적으로 널리 이용되고 있는 것으로는 foamed neoprene wet suit가 있다.

한국 해녀들은 1970년대 중반부터 neoprene wet suit을 착용하기 시작하였는데 그에 따라 과거 면수영복 착용시에 비해 작업 시간이 현저히 연장되었으며, 작업 중 열손실이 격감되었고 심한 저체온증에 빠지는 일이 없게 되었다. 이러한 결과는 물론 잠수복의 착용으로 총 외각 절연도 (total shell insulation)가 증가되어 체열 손실이 감소 되기 때문이다 (Kang 등, 1983)

잠수복의 절연도는 Goldman 등 (1966)이 구리로 만든 마네킨을 이용하여 측정한 바 있는데, 5mm neoprene wet suit의 경우 약 $0.12^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{hr. m}^2)$ 인 것으로 보고되어 있다. 그러나 생체는 마네킨과는 달리 환경 온도 및 운동 상태에 따라 말초혈관의 수축도가 변하며 그에 따라 피부 온도가 부위에 따라 달라질 것이므로 전기적으로 가열하여 표면 온

도가 일정하게 유지된 마네킨에서 측정된 값을 생체에 직접 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. Craig 및 Dvorak (1976)은 생체에서 잠수복 착용의 영향을 연구한 바 있는데, 24°C 물속에 침수된 피검자에서 잠수복 착용시 총 외각 절연도 (즉 조직 절연도+잠수복 절연도)는 수영복 착용시의 총 외각 절연도 (이 경우에는 총 외각 절연도=조직 절연도)와 차가 없다고 하였다. 즉 잠수복을 착용함으로써 외각 조직에 혈액 순환이 증가하여 조직 절연도는 오히려 떨어진다고 하였다. 따라서 그들은 잠수복 착용의 장점은 외각 절연도를 증가시키는데 있지 않고 피부 온도를 높게 유지시켜 shivering을 방지하고 잠수부에게 편안감을 주는데 있다고 하였다. 만일 이것이 사실이라면 잠수복 착용은 체열 보존에 크게 도움이 되지 못할 것이며 따라서 해녀에서 관찰한 바와 같은 잠수복 착용에 의한 잠수 시간 및 체열 손실의 극적인 변화 (Kang 등, 1983)를 설명할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 잠수복 착용이 찬물에서 안정시 및 운동시에 해녀들의 총 외각 절연도에 어떠한 영향을 미치는지를 계통적으로 연구 하였다.

II. 방 법

부산시 해운대구 동백섬 지역의 해녀들 중 4명을 선정하여 실험 대상으로 하였는데 그들의 신체적 특성은 표 1에 요약 되어 있다. 이들은 1977년부터 잠수복을 착용하였으며, 또한 각종 측정장치에 익숙해 있었다.

Table. 1. Physical characteristics of divers

Diver No.	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	BSA ^a (m ²)	SFT ^b (mm)
1	41	167	52.5	1.57	4.95
2	31	152	52.0	1.46	5.58
3	36	156	57.0	1.55	9.50
4	38	155	53.0	1.49	6.53
Mean	36.5	157.5	53.6	1.52	6.64
SE	±2.1	±3.3	±1.1	±0.03	±1.01

a : Body surface area

b : Subcutaneous fat thickness

1. Critical water temperature (T_{cw})의 측정
피검자의 T_{cw} 는 Rennie등 (1962)의 방법에 의거 측정하였다. 피검자는 수영복 또는 잠수복 (5mm foamed neoprene jacket, pants 및 boots)을 착용하고 특수 제작된 항온 수조 내에서 3시간 동안 머리만 내어 놓고 앉은 자세로 휴식을 취했다. 수온은 0.1°C 이내로 조절되었다. 피검자의 산소 소모량 ($\dot{V}O_2$)과 체온은 각기 30분 및 10분 간격으로 측정되었다. 산소 소모량은 9-liter Collins spirometer를 이용한 폐쇄 회로법으로 측정하였으며, 직장 온도는 thermister probe 및 telethermometer (Yellow Spring Instruments Co. Model 46)를 이용하여 측정하였다. 피검자가 잠수복을 착용했을 경우 가슴 (T_c , left sternal border), 다리 (T_l , gastrocnemius muscle 위), 팔 (T_a , Triceps muscle 위) 및 손등 (T_h)의 피부 온도를 각기 측정하여 다음과 같이 평균 피부 온도를 산출하였다.

$$T_s = 0.5T_c + 0.36T_l + 0.09T_a + 0.05T_h$$

수영복을 착용할 때는 피부 온도가 수온과 동일한 것으로 간주했다 (Rennie등, 1962). Critical water temperature (T_{cw})는 수영복 및 잠수복을 입고 침수될 때 각기 피검자가 떨지 않고 3시간을 견딜 수 있는 최저의 수온으로 규정하였다. 실험 중 shivering의 유무는 피검자를 관찰함으로써, 또 산소 소모량의 변화를 통하여 판정하였다.

2. 열 절연도 (Thermal insulation)의 측정

각 피검자의 T_{cw} 를 결정한 후 그 온도의 물속에서 휴식시 및 운동시에 측정한 체온 및 산소 소모량 측정치로부터 다음과 같이 절연도를 산출하였다.

조직 절연도: $I_{body} = (T_R - T_s) / \dot{H}_s \dots$ (수영복 및 잠수복 착용시)

총 절연도: $I_{total} = (T_R - T_w) / \dot{H}_s \dots$ (잠수복 착용시)

단, T_R = 직장 온도, T_s = 평균 피부 온도, T_w = 수온, $\dot{H}_s$ = 피부를 통한 열 손실 (kcal/hr.m^2). 피부를 통한 열 손실은 대사율 ($\dot{M} = 4.83\dot{V}O_2$)과 호흡기를 통한 열 손실 ($0.08\dot{M}$)의 차로 규정하였는데 직장 온도가 변할 때는 체열 함량의 변화 ($S = \Delta T_R \times 0.83 \times 0.6 \times \text{체중}$)를 보정한 후 산출하였다 (즉, $\dot{H}_s = 0.92\dot{M} \pm S$). 모든 계산은 피검자가 거의 열평형 상태 (thermal steady-state)에 있을 때의 측정치를 이

용하여 시행하였는데, 열 평형 상태는 안정시에는 보통 침수 후 2시간 이후에, 그리고 운동시에는 1시간 이후에 이루어졌다.

수중 운동에는 수조 속에 장치된 bicycle ergometer가 이용되었으며, 각 피검자에 대한 운동량은 회전속도 (pedal frequency)를 변화시키면서 측정된 산소 소모량 변화를 기초로 조절되었다.

III. 결 과

1. 안정시 Critical water temperature 및 열 절연도

각 피검자에 대해서 수영복 착용시와 잠수복 착용시에 각각 T_{cw} 를 측정하였는데, 후자의 경우 피검자들은 그들이 일상 잠수 작업시 착용하는 잠수복 차림 그대로였다. 즉, neoprene제 바지, 저고리 및 버선을 신었으나 장갑을 끼지 않았으므로 손만은 찬물에 직접 노출되었다. 그림 1에 도시된 바와 같이 4명의 피검자에서 모두 잠수복 착용시의 T_{cw} 는 수영복 착용시에 비하여 10°C 이상 낮았다. 수영복 및 잠수복 착용시의 평균 T_{cw} 는 각기 28.8°C 및 16.5°C 였다.

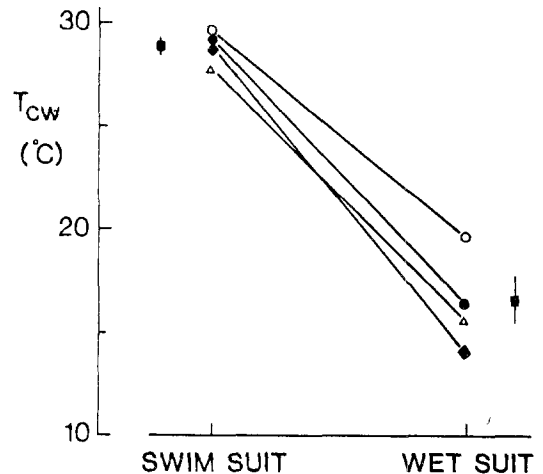


Fig. 1. Comparison of the critical water temperature (T_{cw}) in 4 divers with swim suits and wet suits on.

Each symbol represents an individual diver.

그림 2는 수영복 및 잠수복 착용시 각자의 T_{cw} 에서 측정된 피점자들의 직장 온도 (T_R), 피부온도 (T_s) 및 대사량 ($\dot{M}$)의 평균치를 침수 시간에 따라 나타낸 것이다. 수영복 착용시나 잠수복 착용시 모두 직장 온도는 침수 후 1시간 반 동안에는 비교적 빨리 떨어졌으나 그 후에는 아주 서서히 감소하였다. 처음 1시간 반 동안의 직장 온도 감소는 수영복 착용시에는 평균 0.83°C 이었으나 잠수복 착용시에는 0.26°C 로서 전자의 경우 후자보다 3배나 빨랐다. 마지막 1시간 반 동안의 감소량은 양자의 경우 모두 0.1°C 이하로서 그 기간 동안에는 체열 함량의 변화가 극히 미미 했음을 나타낸다 ($1.2 \text{ kcal/hr}\cdot\text{m}^2$ 이하). 잠수복 착용시 평균 피부 온도 (T_s)는

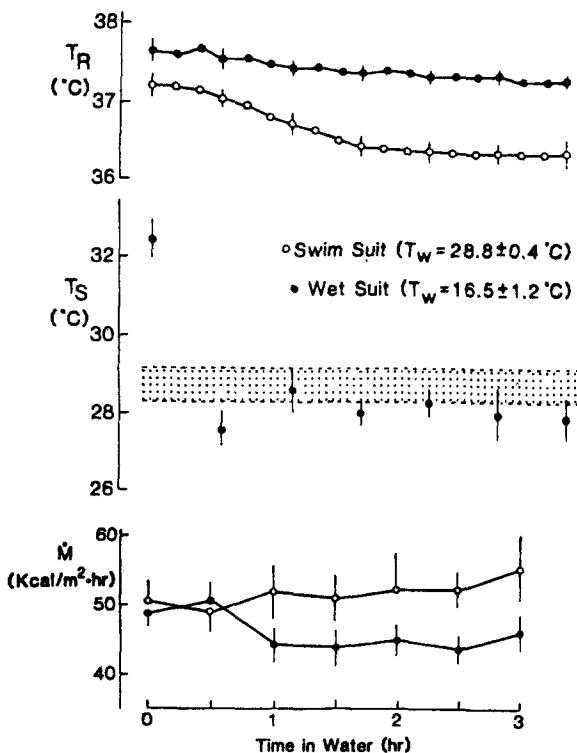


Fig. 2. The average time course of rectal temperature, T_R (top), the mean skin temperature, T_s (middle) and metabolism, $\dot{M}$ (bottom) of 4 divers with swim suits and wet suits on while resting in water of critical temperature (T_{cw}). Values are mean $\pm$ S. E. Stippled area represents the mean $\pm$ S. E. of T_{cw} (hence T_s) for subjects with swim suits on.

잠수 초기 30분 동안에 33°C 에서 약 28°C 까지 급격히 하강 한 후 대략 같은 수준으로 침수 종료시까지 유지 되었다. 따라서, 잠수복 착용시 T_{cw} 에서의 steady-state T_s 는 약 28°C 인데, 흥미롭게도 이 값은 수영복 착용시의 T_{cw} ($28.8 \pm 0.4 (\text{SE})^\circ\text{C}$)와 대략 유사하였다. 수영복 착용시의 steady-state T_s 는 아마 T_{cw} 와 큰 차가 없었을 것이다. Rennie등 (1962)에 의하면 수영복만 착용하고 잘 유동되는 물속에 1시간 이상 침수된 사람의 피부 온도는 수온과 별 차이가 없다고 한다. 대사율의 경우, 수영복 착용시에는 3시간 침수 기간 동안 큰 변화가 없었으나 잠수복 착용시에는 초기 30분 간은 약 $50 \text{ kcal/hr}\cdot\text{m}^2$ 로 유지되었으나 그 후 약 $45 \text{ kcal/hr}\cdot\text{m}^2$ 로 감소된 후 침수종료 시간까지 그 수준에 머물러 있었다

표 2는 T_{cw} 에서 피점자들의 열 교환이 steady-state 상태를 유지할 때 (침수 개시 후 2-3시간) 측정된 직장 온도 (T_R), 피부 온도 (T_s), 대사율 ($\dot{M}$) 및 이로부터 산출된 피부를 통한 열 손실량 ($\dot{H}_s$)과 열 절연도 (I_{body} 및 I_{total})를 보여준다. 직장 온도는 잠수복 착용시 ($37.31 \pm 0.1 (\text{SE})^\circ\text{C}$)가 수영복 착용시 ($36.34 \pm 0.09^\circ\text{C}$)에 비해 1°C 정도 높았으나 ($P < 0.05$), 평균 피부 온도 (수영복, $28.84 \pm 0.37^\circ\text{C}$; 잠수복, $27.97 \pm 0.46^\circ\text{C}$)는 양자간에 유의한 차이가 없었다. 그러므로 체심부와 피부간의 온도차는 수영복 착용시에 비해 잠수복 착용시가 다소 높게 유지되었다. 더구나 대사율 ($\dot{M}$), 따라서 피부를 통한 열 손실량 ($\dot{H} = 0.92\dot{M} \pm \text{S}$), 은 잠수복 착용시 ($\dot{M} = 44.93 \pm 2.47$, $\dot{H} = 42.29 \pm 2.57 \text{ kcal/hr}\cdot\text{m}^2$)가 수영복 착용시 ($\dot{M} = 52.30 \pm 5.47$, $\dot{H} = 44.39 \pm 5.04 \text{ kcal/hr}\cdot\text{m}^2$)보다 15% 정도 낮았으므로 체조직의 절연도 ($I_{body} = (T_R - T_s) / \dot{H}_s$)는 수영복 착용시 ($0.156 \pm 0.015^\circ\text{C} / (\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$)보다 잠수복 착용시 (0.225 ± 0.022)에 유의있게 높았다. 잠수복 착용시에 산출된 총 절연도 ($I_{total} = (T_R - T_w) / \dot{H}_s$)는 약 $0.499 \pm 0.039^\circ\text{C} / (\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$ 로서 수영복 착용시의 shell insulation에 비해 3배 이상이나 되었다.

2. 수중 운동이 열 절연도에 미치는 영향

4명의 해녀에서 수중 운동시 열 절연도의 변화를 수영복 착용시와 잠수복 착용시에 각기 측정하였다. 각 피점자는 자신의 T_{cw} 에서 2시간 동안 수

Table 2. Steady-state body temperatures, skin heat flux and insulations at rest in water of critical temperature(mean of 4 divers $\pm$ SE)

Measured	Swim suit	Wet suit
T_R ($^{\circ}\text{C}$)	36.34 $\pm$ 0.09	37.31 $\pm$ 0.10*
T_S ($^{\circ}\text{C}$)	28.84 $\pm$ 0.37 ^a	27.97 $\pm$ 0.46
$\dot{M}$ (kcal/hr $\cdot$ m ²)	52.30 $\pm$ 5.47	44.93 $\pm$ 2.47
Calculated		
$\dot{H}_s$ (kcal/hr $\cdot$ m ²)	44.39 $\pm$ 5.04	42.29 $\pm$ 2.57*
I_{body} ($^{\circ}\text{C}/(\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$)	0.156 $\pm$ 0.015	0.225 $\pm$ 0.022*
I_{total} ($^{\circ}\text{C}/(\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$)		0.499 $\pm$ 0.039
$I_{suit}(I_{total}-I_{body})$		0.275 $\pm$ 0.021

a: assumed to be equal to T_w

* significantly different ($p < 0.05$ in one-tailed paired t-test) from the corresponding value with swim suit

중 운동 (bicycle ergometry)을 수행하였다. 그림 3은 한 피검자에서 $\dot{M}=95-100\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2$ 의 운동량으로 운동시 측정된 T_R , T_S 및 $\dot{M}$ 의 변화를 나타낸다. 이 피검자의 T_{cw} 는 수영복 착용시에는 29.6°C 였으며 잠수복 착용시에는 19.5°C 였다. 수영복 착용시나 잠수복 착용시나 T_R 은 운동 개시 1시간 후부터, T_S 및 $\dot{M}$ 은 30분 후부터 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러므로, 1시간 후에는 완전한 열평형 (thermal balance) 상태에 있음을 알 수 있었다. 이러한 경향은 운동량 부하가 다를때도 관찰 할 수 있었으며, 또 다른 피검자에서도 그 경향은 동일 하였다.

그림 4는 잠수복 착용시 (곡선)와 수영복 착용시 (그늘진 부분)에 운동 강도에 따라 열 절연도 (I)가 변화 되는 양상을 보여 주는데, 운동 강도는 안정시 대사율에 대한 백분율 (% resting $\dot{M}$)로 표시하였다. 4명의 피검자에서 모두 운동 강도가 증가함에 따라 절연도는 지수 함수적으로 감소하였다. 잠수복 착용시 총 절연도 (I_{total})는 안정시에는 평균 0.5 (range 0.39-0.56) $^{\circ}\text{C}/(\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$ 였으나 운동 강도가 200 및 250% resting $\dot{M}$ 일때는 각기 0.25 및 0.18 $^{\circ}\text{C}/(\text{kcal/hr}\cdot\text{m}^2)$ 로 나타났다. 마찬가지로 잠수복 착용시와 수영복 착용시에 체조직에 의한 절연도 (I_{body}) 역시 운동 강도 200% resting $\dot{M}$ 이하의 경한 운동시에 심하게 감소되었으며 이보다 운동 부하가 높을때는 절연도 감소율이 낮았다. 일반적으로

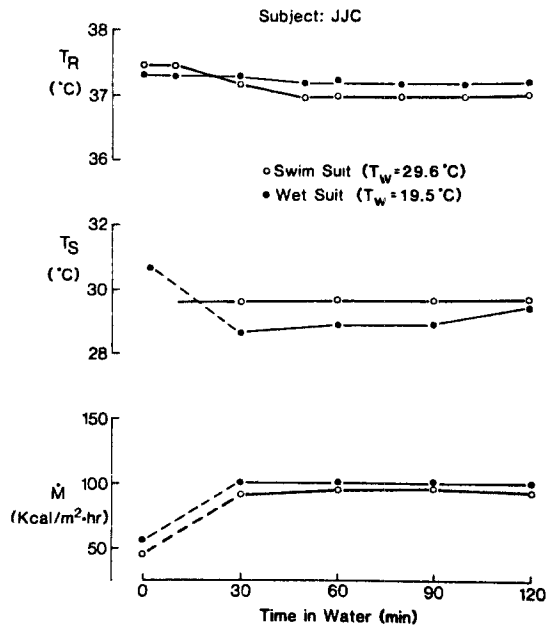


Fig. 3. Time course of rectal temperature, T_R (top), the mean skin temperature, T_S (middle) and metabolism, M (bottom) in one subject at rest and while exercise in water of critical temperature (T_{cw}). The T_{cw} was 29.6°C with swim suits and 19.5°C with wet suits.

로 운동 강도에 따른 잠수복 착용시의 조직 절연도는 수영복 착용시의 절연도 보다 운동량이 경할때

는 높았으나 200% resting $\dot{M}$ 이상일때는 차가 없었다. 놀랍게도 잠수복 착용시 잠수복에 의하여 첨가된 절연도(즉, $I_{total} - I_{body}$)는 그 크기가 일정하지 않고 운동량이 증가함에 따라(특히 경한운동시) 감소되었다(그림 4 우상단). 즉 $I_{total} - I_{body}$ 차는 안정시에 평균 $0.28^{\circ}\text{C} / (\text{kcal/hr. m}^2)$ 이었으나 운동을 함에 따라 감소 하였으며 운동량이 250% $\dot{M}$ 이

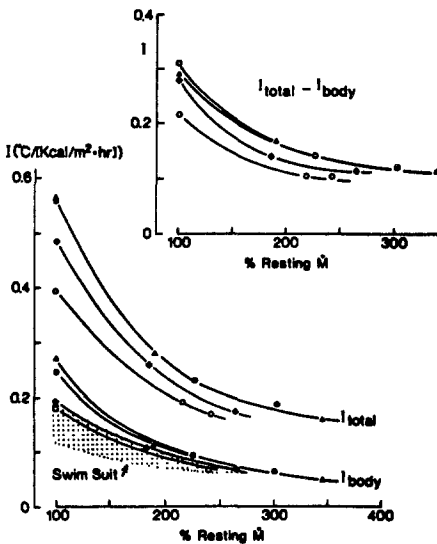


Fig. 4. Total peripheral insulation(I_{total}) and body tissue insulation(I_{body}) of 4 subjects with wet suits on, measured during the final 1 hr immersion in water of critical temperature ($16.5 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$), plotted as a function of exercise intensity. The exercise intensity was expressed as a percent of resting metabolic rate(% Resting $\dot{M}$). I values of resting subjects are shown at the far left when the % Resting $\dot{M}$ is 100. Each subject was studied during 2 hr exercise on two different levels and the I value for each subject are connected by a curvilinear line drawn by eye.

The stippled area includes all values of I_{body} obtained in swim suited subjects immersed at T_{cw} ($28.8 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$).

Inset: Changes in the $I_{total} - I_{body}$ (i.e., apparent wet suit insulation) in wet suited subjects as a function of exercise intensity.

상이 되면 약 $0.12^{\circ}\text{C} / (\text{kcal/hr. m}^2)$ 로 일정한 값을 보였다.

IV. 고찰

침수된 사람에서 체표를 통한 열 손실은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{H}_s = A(T_c - T_s) / I \quad \dots\dots\dots 1$$

단, $\dot{H}_s$ = 체표를 통한 열손실 (skin heat loss, kcal/hr)

T_c = 심부 온도 (core temperature, $^{\circ}\text{C}$)

T_s = 평균 피부 온도 (mean skin temperature, $^{\circ}\text{C}$)

I = 체 외자 절연도 (shell insulation, $^{\circ}\text{C} / (\text{kcal/hr. m}^2)$)

A = 열 교환이 일어나는 체표 면적 (effective heat exchange surface area, m^2)

공기중과는 달리 체표에 접촉된 물층은 절연효과가 거의 없기 때문에 체표 온도는 실제적으로 수온과 대차가 없다(Rennie등, 1962; Keatinge, 1969).

외자 절연도(I_{shell})는 보온복을 입지 않을 경우 말초 조직의 절연도(I_{body})를 나타내며 보온복(예를 들면 잠수복) 착용시에는 조직절연도와 보온복 절연도(I_{suit})의 합이된다. 따라서 수영복 착용시와 잠수복 착용시의 체열 손실량은 자기 다음과 같이 표시된다.

$$\text{수영복 착용시: } \dot{H}_s = A(T_R - T_W) / I_{body} \quad \dots\dots\dots 2$$

$$\text{잠수복 착용시: } \dot{H}_s = A(T_R - T_W) / (I_{body} + I_{suit}) \quad \dots\dots\dots 3$$

만일 I_{suit} 이 잠수복의 물리적 특성에 의해서만 결정된다면 이는 항상 일정할 것이며 I_{body} 는 혈액순환이 차단된 외자 조직층(주로 지방, 피부 및 근육층)의 두께에 의하여 결정되므로 피하 지방층이 두꺼울수록, 또 말초 혈관 수축이 심할수록 크다. 따라서 한 개인에서 I_{body} 는 critical water temperature(T_{cw})에서 최고치를 보이며 멀거나 운동을 하여 근육층의 혈류량이 증가하면 그 값이 떨어진다(Rennie등, 1962; Burton 및 Edholm, 1969). 그러므로 T_{cw} 는 찬물에 대한 내성(tolerance) 및 최대절연도(I_{max}) 연구에 사용되고 있다.

수식 2 및 3에서 T_W 를 T_{cw} 로 대치하고 $\dot{H}_s$ 를

0.92 $\dot{M}$ (즉 steady-state skin heat loss)로 대치한 후 정리하면 T_{cw} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\text{수영복 착용시: } T_{cw} = T_R - (I_{body} \times 0.92M/A) \dots\dots\dots 4$$

$$\text{잠수복 착용시: } T_{cw} = T_R - (I_{body} + I_{suit})(0.92M/A) \dots\dots\dots 5$$

만일 steady-state T_R , $\dot{M}$ 및 I_{body} 가 잠수복 착용시와 수영복 착용시에 차이가 없다면 잠수복 착용으로 인한 T_{cw} 의 변화는 상기 두식의 차가 될 것이다. 즉

$$\Delta T_{cw} = - (I_{suit} \times 0.92M/A) \dots\dots\dots 6$$

본 연구에서 해녀들의 T_{cw} 는 수영복 착용시에 평균 28.8℃였으며 (그림 1 참조) 이때 열 생산량은 체표면적 1m²당 52.3kcal/hr였다 (표 2 참조). 이 값과 Goldman등 (1966)이 구리로 만든 마네킨을 이용하여 측정한 5mm neoprene wet suit의 절연도 (약 0.12℃ / (kcal/hr. m²))를 상기 수식 6에 대입하여 산출하면 잠수복 착용시의 T_{cw} 는 수영복 착용시 보다 5.8℃가 낮은 23℃가 되어야 한다.

그러나 실제 측정에 의하면 이보다 6.5℃가 낮은 16.5℃로 나타났다 (그림 1 참조).

잠수복 착용시 T_{cw} 가 이처럼 낮은 것은 무엇보다 total shell insulation (I_{total}) 이 기대한 것 보다 월등히 컸기 때문이다. 수식 3에 의거 산출된 I_{total} ($=I_{body} + I_{suit}$)은 0.499℃ / (kcal/hr. m²)로서 수영복 착용시 ($I_{body} = 0.156℃ / (kcal/hr. m^2)$)에 비해 0.343℃ / (kcal/hr. m²)가 컸다 (표 2 참조).

잠수복 착용시 shell insulation의 이러한 증가는 부분적으로는 조직 절연도 (I_{body})가 다소 (44%) 증가된데도 그 원인이 있지만 (표 2 참조) 대부분은 잠수복에 의한 절연도가 기대치 이상으로 컸기 때문이다. I_{total} (0.499)과 I_{body} (0.225)의 차로써 추산된 I_{suit} 은 평균 0.275℃ / (kcal/hr. m²)로서 Goldman등 (1966)의 수치 (0.12)보다 2배 이상 컸다 (표 2 참조). 그러나 흥미롭게도 $I_{total} - I_{body}$ 차는 운동시에 감소되며, 운동강도가 안정시 대사량의 250% 이상으로 되면 약 0.12℃ / (kcal/hr. m²)로 일정하게 되었다 (그림 4 참조). 이러한 사실은 온도차와 체열 손실량을 기초로 측정된 잠수복 절연도는 피검자의 운동여부에 따라 달라짐을 나타낸다.

잠수복 자체의 물리적 절연도는 그 두께가 감소

되지 않는 이상 감소 될수 없다. 본 실험에서 피검자는 안정시와 운동시에 같은 수위에 잠수되어 있었으므로 잠수복에 가해진 수압은 양자간에 차가 없을 것이고 따라서 그 두께 역시 마찬가지 일 것이다. 그러면 운동에 의하여 잠수복의 절연도가 어찌하여 변화 되는 것일까?

본 연구에서 피검자는 잘 유통되는 수조 내에 침수되긴 했지만 혹시 안정시에 잠수복 표면에 존재할지도 모를 정체된 물층 (unstirred water layer) 이 운동시 대류작용의 증가로 인하여 제거된다면 잠수복의 절연도가 감소될 수 있다. 그러나 Goldman등 (1966)의 마네킨 실험에 의하면 neoprene wet suit의 절연도는 정체된 물속에서나 급히 유통하는 물속에서나 대차가 없으며 잠수복 표면의 boundary water film에 의한 절연도는 극히 적을 뿐만 아니라 유속에 의해서도 변화되지 않는다고 함으로 상기 가능성은 배제될 수 있다.

또 다른 가능성은 운동 강도에 따라 실제 열 교환이 일어나는 체표 면적의 증가이다. 잠수복 착용시 effective heat exchange area (A)는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\text{단, } A = I_{suit} \times 0.92M / (T_s - T_w) \dots\dots\dots 7$$

$$M = \text{대사율 (kcal/hr)}$$

$$T_s = \text{평균 피부 온도 (℃)}$$

그림 5는 $I_{suit} = 0.12℃ / (kcal/hr. m^2)$ 로 일정하다고 가정하고 휴식시와 운동시에 측정된 해녀들의 M, T_s 및 T_w 의 평균치를 상기 수식에 대입하여 산출한 열 교환 면적을 나타내는데, 안정시에는 그 값이 약 0.66m²로서 잠수복 표면적의 불과 40%에 해당 했으나 운동량이 증가함에 따라 폭선적으로 증가하여 M=200kcal/hr의 운동시에 잠수복의 실제 표면적과 유사하게 되었다. 이러한 사실은 안정시 잠수복에 의한 절연도 증가가 운동시에 비해 월등히 큰 것은 체열 발산이 일어나는 체표면적이 운동시보다 적기 때문임을 명백히 제시한다.

열 교환 면적의 이러한 차이는 아마도 한냉 환경에 대한 인체의 생리학적 반응의 결과일 것이다. 인체가 한냉에 노출되면 말초혈관의 수축을 통해 체절연도를 증가 시키는데, 혈관 수축은 체간보다 사지에서 심하게 일어난다. 예를 들면 Barcroft 및 Edholm (1943)은 손이 물속에 침수될 때 혈액 순환

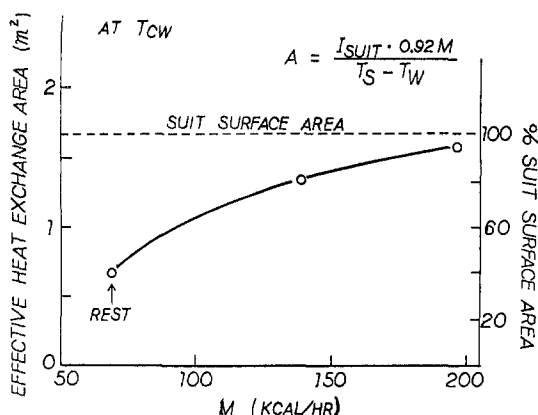


Fig. 5. Estimation of effective surface area of heat exchange in wet suited subjects as a function of metabolism in water of critical temperature. The heat exchange area (A) was calculated using the following formula: $A = I_{\text{suit}} \times 0.92 M / (T_s - T_w)$. I_{suit} was assumed to be constant at $0.12^\circ\text{C} / (\text{kcal/hr} \cdot \text{m}^2)$ in conditions. Mean values of metabolism ($\dot{M}$), The mean skin temperature (T_s) and water temperature (T_w) of 4 subjects obtained during the steady-state period at the final 1 hr of immersion with wet suits on were plugged in to the equation

량은 수온이 43°C 때, 17.6ml/min , 100ml tissue 이던 것이 30°C 이하에서는 2ml/min , 100ml tissue로 격심하게 감소됨을 보고한 바 있으며, Cannon 및 Keatinge (1960)은 전신이 침수된 피검자에서 수온이 35°C 에서 22°C 로 변할 때 조직의 열 전도도 (conductance = $1/\text{insulation}$)가 가슴 (sternum)에서는 $0.028\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C}$ ($I = 0.06^\circ\text{C} / (\text{kcal/hr} \cdot \text{m}^2)$)에서 0.018 ($I = 0.09$)로 36% 감소 (I 는 증가)되지만 손과 발에서는 0.048 ($I = 0.035$)에서 0.01 ($I = 1.7$)로 98% 감소됨을 보고 한 바 있다. 이처럼 사지의 혈류량이 격감 될 경우 체간내의 장기에서 생성된 열이 사지로 이동되는 양이 적어질 뿐만 아니라 사지에서는 countercurrent heat exchange가 효과적으로 일어날 것이므로 (countercurrent heat exchange는 혈류량이 적을수록 효율이 커짐, Keatinge 1969) 체열 손실은 주로 체간 표면에서만 일어날 것이다. Hayward등 (1977)과 Wade 및 Veghte (1977)가 맨

몸으로 침수된 피검자에서 시행한 infrared thermography 연구에 의하면 안정시 체열 손실은 주로 흉곽 측면 (lateral thorax), 가슴 상부 (upper chest), 어깨 사이 (upper back) 및 사타구니 (groin) 윗쪽에서 일어나는 것으로 나타났다.

찬물에 침수될 때 사지혈관이 선택적으로 수축되는 현상은 잠수복 착용시에 극적으로 일어날 수 있다. Foamed neoprene의 물리적 절연도는 타 절연체의 경우와 마찬가지로 폭면 반경이 작을수록 감소될 것이므로 (Van Dilla등, 1949; Burton 및 Edholm, 1969) 잠수복의 절연도는 체간보다 사지부위에서 월등히 낮게 된다. 더구나 일반적으로 사용되고 있는 neoprene wet suit의 디자인은 바지 상단이 가슴 하부에까지 이르며 저고리 하단이 둔부 중간 이하에까지 이르게 되어 있으므로 잠수복 착용시 체간 표면의 반 이상은 실제 두 겹의 잠수복으로 싸이게 된다. 이러한 원인에 의하여 잠수복 착용시 체표로부터의 열 발산은 체간보다 사지에서 훨씬 용이하게 되므로 사지의 피부 온도는 심하게 떨어진다. 이러한 현상은 본 연구에서 명백히 관찰할 수 있었는데, 그림 6에서 보는 바와 같이 잠수복을 착용한 피검자에서 T_{cw} (16.5°C)에서의 안정시 피부 온도는 가슴에서는 31.7°C 로 비교적 높게 유지되었으나 사지에서는 이보다 6°C 정도 낮게 유지되었다. 즉, 잠수복을 입지 않을 때는 전신의 표면이 모두 동일한 온도의 물속에 노출되지만 잠수복 착용시에는 사지가 체간보다 더 낮은 온도의 물속에 노출된 것과 같게 된다. 따라서 사지 표면의 냉각 수용기 (cold receptor)만이 선택적으로 강하게 자극될 것이고 그 결과 혈관 수축은 사지에서만 심하게 일어날 것이다. 비록 본 연구에서 사지의 혈액 순환량을 측정하지는 않았으나 T_{cw} 에서의 평균 피부 온도가 잠수복 착용시와 면수영복 착용시간에 대차가 없음에도 불구하고 체 절연도 (I_{body})가 잠수복 착용시에 의의있게 증가된 것으로 보아 (표 2 참조) 사지의 혈관 수축이 수영복 착용시 보다 더 심하게 일어났음을 알 수 있다. 잠수복의 폭면 효과 및 디자인 상의 특성에 의하여 사지의 피부 온도가 선택적으로 낮아짐으로서 생리학적 조절 작용의 효율이 증대 되었다고 하겠다. 사지는 표면적/중량 비가 체

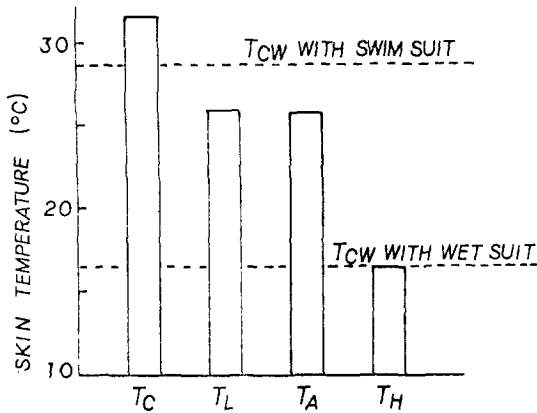


Fig. 6. The mean steady-state skin temperature at chest (T_C), lower leg (T_L), upper arm (T_A) and back hand (T_H) of 4 wet suited subjects immersed in water of critical temperature ($16.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$) at rest. T_H was assumed to be equal to the water temperature.

간보다 월등히 크므로 사지 혈관의 선택적 수축은 몸의 절연도를 증가 시킬 뿐 아니라 열 교환이 일어나는 체표면적을 감소 시키므로 체열 손실을 줄이는데 이중의 효과가 있다. 더구나 잠수복의 물리적 절연도는 곡면 반경이 큰 체간부에서 가장 크므로 사지 혈관 수축이 체열 보존에 미치는 효과는 잠수복 착용시에 더욱 증대된다.

잠수복의 이러한 효과는 수중 운동시 사라지게 된다. 운동시 사지의 골격근에 대한 혈액 순환의 증가는 체 절연도를 감소 시킬 뿐만 아니라 열 교환 면적을 사지 표면에까지 확대한다 (Hayward 등, 1973; Wade 및 Veghte, 1977). 더구나 안정시와는 달리 생산된 열이 체간으로 이동하기 보다는 상대적으로 표면적이 큰 사지에서 다량 손실된다. 특히 잠수복 착용시에는 잠수복의 절연도가 사지부에서 상대적으로 낮기 때문에 (곡면 효과 및 잠수복 디자인상의 특성) 그 영향이 더 클 것이다. 따라서 본 연구에서 관찰된 바와 같이 운동시 총 외각 절연도 (I_{total})의 감소는 수영복 착용시 보다 잠수복 착용시에 월등히 크게된다 (그림 4 참조).

이러한 결과는 실제 응용면에 있어서 중요한 의의를 갖는다. 즉 해녀뿐만 아니라 스קי다이버, 수쿠

바다이버, 기타 잠수부들 또는 해난 사고시 선박 승무원들에서 부득이한 경우에 쉽게 해안으로 나올수 없고 장시간 찬 해수 중에 침수되어 있게 될 경우 비록 잠수복을 착용한 상태라 하더라도 체온 보존을 위해서는 되도록 움직이지 않는 편이 유리하다고 하겠다. 잠수복을 입지 않을 경우 찬물에서 운동을 하면 안정시보다 체온 보존이 어려워 짐은 이미 잘 알려져 있으나 (Keatinge, 1969; Crittenden 등, 1974) 잠수복을 착용할 경우에는 일반적으로 운동에 의하여 열손실은 별로 증가하지 않고 열 생산만이 증가하여 체온 유지에 유리할 것으로 생각하고 있다. 이러한 생각은 잠수복의 절연도가 운동여부에 관계없이 항상 일정하다는 가정하에 이루어진 것인데 본 연구 결과는 그러한 가정의 부당성을 여실히 증명하고 있다.

본 연구에서 측정한 잠수복의 절연도는 피검자가 안정시 대사량의 250% 이상으로 운동할 때만 운동 강도에 무관하였으며 그 값이 Goldman 등 (1966)이 보고한 수치와 유사하였으나 운동 강도가 낮아짐에

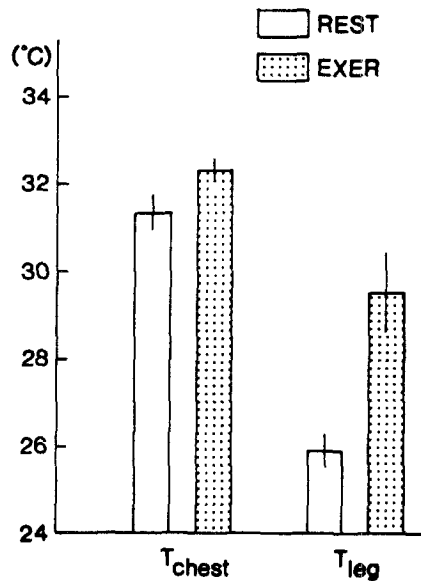


Fig. 7. Comparison of the steady-state skin temperature at chest (T_C) and a lower leg (T_L) of wet suited subjects during rest and exercise in water of critical temperature ($16.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$). Values are mean of 4 subjects $\pm$ S. E.

따라 점차 증가하였다(그림 4 상단). 이러한 결과는 그 기전 여하에 불문하고 잠수복의 생리학적 절연도는 운동 강도에 따라 규정되어야 함을 강력히 제시한다. Goldman 등의 실험에서는 사람 대신 구리로 만든 마네킨을 사용하여 전기적으로 마네킨 온도를 조절하였으므로 마네킨 표면 온도는 체간부와 사지 부위간에 별 차가 없었을 것이다. 따라서 이때 측정된 잠수복의 절연도는 심한 운동을 하는 사람에서 측정된 값과 유사할 수 밖에 없다.

그림 7은 본 연구에서 잠수복을 착용한 피검자의 T_{cw} 에서 안정시 및 운동시에 측정된 가슴 및 다리 표면의 온도를 비교한 것인데 운동시에 가슴 온도는 별로 증가하지 않지만 다리 표면의 온도는 현저히 증가하여 체간과 사지의 온도 차가 감소함을 보여준다. 따라서 Goldman (1966) 등이 보고한 잠수복 절연도는 잠수부가 심한 운동을 할 경우에는 적용될 수 있으나 안정하고 있을 때는 적용될 수 없다고 하겠다.

참고 문헌

1. Barcroft H, Edholm OG: The effect of temperature on blood flow and deep body temperature in the human forearm. *J Appl Physiol* 102:5, 1943
2. Beckman EL: Thermal protection during immersion in cold water. Second Symposium on Underwater Physiology, C. J. Lambertson and L. J. Greenbaum eds. Publ. 1181 NAS-NRC, Washington D. C., 1963. pp. 247~266
3. Burton AC, Edholm OG: Man in cold Environment, New York and London, Hafner Publ. Co., 1969.
4. Cannon P, Keatings WR: The metabolic rate and heat loss of fat and thin men in heat balance in cold and warm water. *J Physiol* 154:329, 1960
5. Craig AB Jr, Dvorak M: Heat exchange between man and the water environment. *Underwater Physiology V*, C. J. Lambertson ed. FA-SEB, Bethesda, 1976, pp. 765~773
6. Crittenden G, Morlock JF, Moore TO: Recovery parameters following underwater exercise. *Aerospace Med* 45:1225, 1974
7. Goldman RF, Breckenridge JR, Reeves E, Beckman EL: "Wet" versus "dry" suit approaches to water immersion protective clothing. *Aerospace Med* 37:485, 1966
8. Hayward JS, Collis M, Eckerson JD: Thermographic evaluation of relative heat loss areas of man during cold water immersion. *Aerospace Med* 44:708, 1973
9. Kang DH, Kim PK, Kang BS, Song SH, Hong SK: Energy metabolism and body temperature of the ama. *J Appl Physiol* 20:40, 1965
10. Kang DH, Park YS, Park YD, Lee IS, Yeon DS, Lee SH, Hong SY, Rennie DW, Hong SK: Energetics of wet suit diving in Korean breath-hold divers. *J Appl Physiol* 54:1702, 1983
11. Keatinge WR: Survival in Cold Water. Oxford and Edinburgh, Blackwell Scientific Pub., 1969
12. Rennie DW, Covine BG, Howell BJ, Song SH, Kang BS, Hong SK: Physical insulation of Korean diving women. *J Appl Physiol* 17:961, 1962
13. Van Dilla M, Day R, Siple PA: Special problem of hands. In: Physiology of Heat Regulation and the Clothing, L. H. Newburgh ed., Philadelphia, Saunders, 1949, pp. 374~388
14. Wade CE, Veghte JH: Thermographic evaluation of the relative heat loss by area in man after swimming. *Aviat Space Environ Med* 48:16, 1977