

寒冷氣候에서의 快感指數

全 景 殷

1. 序 言
2. 乾燥对流的 冷却強度에 관한 公式과 그 檢討
3. Siple-Passel公式의 意義와 問題點
4. 結 言

1. 序 言

氣候에 대한 인간의 快適感이란 氣溫, 輻射, 相對濕度 및 바람과 같은 氣候要素와 個個人의 人體에 기인되는 무수한 要因에 의하여 결정되기 때문에 모든 氣候에 공통되게 적용할 수 있는 指標의 설정은 곤란한 문제이다. 지금까지 알려진 指標들은 hot climates와 cold climates에 適用할 수 있는 것으로 兩分된다. 여기서 문제로 삼으려고 하는 것은 後者의 경우이다.

氣候가 寒冷할 때 인간의 快適感을 결정하는 氣候要素는 바람과 氣溫에 기인되는 冷却效果이다.

이 바람과 低温에 의한 人體의 熱損失은 乾燥对流的 冷却強度(dry convective cooling-power)라고 불리워지며,¹⁾ 그것은 數個의 實驗式으로 측정되어 왔다. 이 論文의 目的은 이들 實驗式을 비판적으로 比較 檢討하고, 그 중 Siple-Passel 公式가 가장 合理的인 것이라고 지적하는 것이다.

2. 乾燥对流的 冷却強度에 관한 公式과 그 檢討

人體의 冷却強度는 人體의 皮膚면이 직접 大氣에 노출되었을 때 體溫을 표준으로 하여 感知되는 熱損失을 말하며, 그 측정은 카타온도계(Katathermometer)가 제작되면서부터이다. 이 카타

온도계에서 얻어진 冷却의 속도는 單位面積당 單位時間에 손실되는 熱量에 비례하지만 乾球카타만을 사용할 경우의 냉각 강도는 氣溫과 風速의 函數이다. 왜냐하면, 一般 大氣下에서 어떤 實驗物의 냉각은 傳導, 对流, 輻射, 및 蒸發을 變數로 하기 때문에 그 實驗物이 直達輻射를 받지 않고, 또 水分을 증발하지 않는 限 輻射와 蒸發要因은 무시될 수 있기 때문이다.²⁾ Hill이 발표한 乾燥카타公式은 다음과 같다.

$v \leq 1\text{m/sec}$ 일 때

$$H = (0.20 + 0.40\sqrt{v})(36.5^\circ\text{C} - t_a) \dots\dots(1)$$

$v \geq 1\text{m/sec}$ 일 때

$$H = (0.13 + 0.47\sqrt{v})(36.5^\circ\text{C} - t_a) \dots\dots(2)$$

H : 열손실(mg cal cm⁻² sec⁻¹)

v : 풍속(m/sec)

t_a : 기온(°C)

특정한 지역에서 氣溫과 風速을 측정하여 Hill의 공식에 대입하여 계산한 값과 동일한 時間, 동일한 場所에서 구체적으로 측정된 人體의 冷却強度를 比較 檢討한 결과 兩者 사이에 차이를 발견할 수가 있다. 즉, 그 차이는 초속 1m 이상의 風速에서 僅少(H_{meas.}=0.9H_{comp.})하지만 초속 1m 이하, 특히 v=0 일 때 測定値는 計算値의 2 배(H_{meas.}=2.0H_{comp.})가 된다.

그리고, Hill의 공식에 두 가지 종류가 있다는 것은 분명히 불편하다. 그리하여 Hill의 그의 공

1) Critchfield, Howard J., 1968, *General Climatology*, Prentice-Hall, Englewood, p. 357.

2) Stone, R. G., 1943, "On the practical evaluation and interpretation of the cooling power in bioclimatology," *Bull. Amer. Met. Soc.*, vol. 24, pp. 295-305, 327-339.

식을 수정하여 발표하였는데 그것은 다음과 같다.³⁾

$$H = (0.15 + 0.182\sqrt{v})(98F - t_a) \dots\dots\dots(3)$$

H : 열손실(mg cal cm⁻² sec⁻¹)

v : 풍속(mph)

t_a : 기온(°F)

그림 1은 Hill의 공식(3)에 기초를 둔 nomogram으로서 Gold의 연구에서 전제하였다. Taylor는 이 nomogram에 기초를 두고 相对湿度와 氣温을 가지고 climogram을 작성하였고, Eaton도 이 방법에 따라 美国 南東部 諸州의 氣候를 分析하였다.⁴⁾

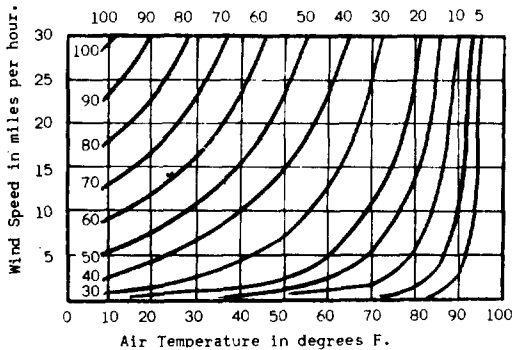


그림 1. cooling-power nomogram

그런데 Hill의 공식(3)에 대하여 다음과 같은 短点を 지적할 수가 있다. 즉 카타온도계 그 자체가 몇 가지의 문제점을 갖고 있다. 유리와 알코올의 熱傳導率이 다르기 때문에 氣温에 의한 변화에 현저한 차이가 있다. 또 球의 円柱形態가 非對稱的이어서 角에 따라 바람의 영향이 다르다. 이와 같은 카타온도계에 기초를 둔 Hill의 實驗式은 실제의 冷却率보다 0.3~4.0배로 과장된 값을 보여 준다. 최근 Vinje는 南極大陸에서 Hill의 공식으로 측정된 人體의 熱損失率이 별로 유효하지 못하다는 것을 지적하고 있다.⁵⁾

Hill에 이어 Dorno와 Thilenius는 大氣에 의한 人體의 冷却強度를 측정하기 위한 冷却器(Dorno or Davos frigorimeter)를 創案하고, 스위스 Davos에서 실험한 결과를 다음의 式(4)로 발표하였다. 그 후 Dorno는 이집트의 Aswan에서 행한

실험에서 冷却器의 表面溫度를 33°C에서 36.5°C로 변경하였기 때문에 그의 식을 다음의 式(5)로 수정하였다.

$$H = (0.22 + 0.25^{1/5}\sqrt{v})(33.0^\circ\text{C} - t_a) \dots\dots\dots(4)$$

$$H = (0.22 + 0.20^{1/3}\sqrt{v})(36.5^\circ\text{C} - t_a) \dots\dots\dots(5)$$

H : 열손실(mg cal cm⁻² sec⁻¹)

v : 풍속(m/sec)

t_a : 기온(°C)

이 Dorno의 공식들은 氣温이 -12°C이하이거나, 風速이 15m/sec이상일 때 計算値와 測定値 사이에 큰 誤差를 보여 준다. 또 人體의 快適感에 의한 氣候分類에 있어서 Dorno의 방법과 Hill의 방법을 사용한 Conrad사이에 상당한 차이가 있다. 즉 冷却強度의 平均値와 人體의 快適感과의 관계에서 Dorno의 冷涼氣候(cool climate)가 Conrad의 酷熱氣候(hot climate)로 나타나 있는 차이가 있기 때문에 氣候型의 단순한 對應關係는 나타나 있지 않다(표 1).

표 1. 乾燥冷却強度에 의한 氣候分類
Conrad의 氣候分類

氣候類型	冷却強度(mg cal cm ⁻² sec ⁻¹)
Hot Climate	10
Relaxing Climate	10-20
Mild Climate	20-30
Very Bracing Climate	30-40
Very Cold Climate	40

Dorno의 氣候分類

氣候類型	冷却強度(mg cal cm ⁻² sec ⁻¹)
Sultry Climate	2.5
Warm Climate	5
Mild Climate	7.5
Cool Climate	10
Cold Climate	12.5
Very Cold Climate	15
Extremely Cold Climate	20

* Conrad, V. and Pollak, L. W. 1968, *Methods in Climatology*, Harvard Univ. Press, p. 198.

** 福井英一郎, 1951, 氣候学, 古今書院, 東京, p. 436.

3) Gold, E., 1935, "The effect of wind, temperature, humidity, and sunshine on the loss of heat of a body at temperature 98°F," *Quat. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 61, pp. 316-331.

4) Eaton, M. A., 1940, *The Climates of the Southeast*, Unpublished thesis, Univ. of North Carolina.

5) Vinje, T. E., 1962, *The Cooling power in Antactica*, Norsk Polar Institute, Arbok, Oslo, pp. 7-22.

6) Stone, R. G., 1943, op. cit.

上述한 Hill과 Dorno의 公式를 검토하여 보면 상당한 差異가 있는 것을 알 수가 있다. 그것은 實驗常數를 결정하는 데 있어서 Hill은 平方根法을 사용한 데 대하여 Dorno는 風速의 冪수를 사용하였다. 이러한 차이를 배제하기 위하여 Siple-Passel은 relative comfort thermometer를 고안하고, 그것이 直達輻射를 받지 않는 一般大氣下에 노출되었을 때 1m²에 상당하는 面積에서 1hr의 열손실이 人體의 열손실과 일치하는 사실을 實驗結果로 발표하고, 그 熱損失率을 kg cal m⁻² hr⁻¹로 표시하였다.

$$K_o = (\sqrt{100v} + 10.45 - v) (33^\circ\text{C} - t_a) \dots\dots (6)$$

Ko: windchill (kg cal m⁻² hr⁻¹)

v: 풍속 (m/sec)

ta: 기온 (°C)

이 Siple-Passel 공식은 平方根의 項을 級數에 우선하도록 하고, 또 風速의 1次項을 갖고 있다. 또 이 공식은 大氣의 平穩狀態(1.5m/sec 이하의 風速)에 적용할 때 計算値는 실제의 測定値보다 1°C에 대하여 1 cal 程度 적다. 이 경우 誤差는 4%이다. 그리고 風速이 25m/sec일 때 氣溫이 1°C 증가함에 따라 3.5 cal 증가하여, 風速 25m/sec를 臨界風速으로 한다.

Siple-Passel 公式은 그들 자신의 公式을 전개할 때 人體의 熱損失率을 표시하는 單位의 선택에서 과거의 方法을 의식적으로 피하였다. 지금까지 研究員들은 그 單位로서 mg cal cm⁻² sec⁻¹를 사용한 데 대하여 Siple과 Passel은 그 크기에 있어서 36倍나 되는 單位, kg cal m⁻² hr⁻¹를 사용하였다. 이 單位를 사용하게 된 原因을 生理學者, 특히 Pierce Hygiene Laboratory의 研究員들이 신진대사와 體溫의 放出과의 關係를 연구할 때 이 單位를 일반적으로 사용한다. 그러므로 Siple-Passel 공식으로 계산하여 얻은 windchill index는 人間의 활동과 快適感에 직접 관련시킬 수가 있다.

지금까지 생각하여 본 人體의 對流的 熱損失에 관한 諸公式을 비교하여 본 결과 표 2와 같은 一般式을 얻을 수가 있다.

$$H = (a + bv^m + cv^n) (t_s - t_a)$$

H: 열손실(mg cal cm⁻² sec⁻¹)

v: 풍속(m/sec)

ts: 피부온도(°C)

ta: 기온(°C)

a, b, c, m, n: 상수

표 2. H=(a-bv^m-cVⁿ) (ts-ta)에 의한 諸實驗式의 비교.

研究者	a	b	m	c	n	ts	H
Hill-1	0.20	0.40	0.50	-	-	36.5°C	-
Hill-2	0.13	0.47	0.50	-	-	36.5°C	123.6
Hill-3	0.15	0.182	0.50	-	-	98.0°F	-
Dorno-1	0.22	0.25	0.667	-	-	33.0°C	84.9
Dorno-2	0.22	0.20	0.769	-	-	36.5°C	90.0
Siple	0.29	0.278	0.50	-0.0278	1	33.0°C	65.0

Hill-1은 風速이 초속 1m 이하, Hill-2는 초속 2m 이상 일때의 값이고,

Hill-3은 영국의 單位를 사용했을 때의 값이다.

H는 기온 -40°C, 풍속 10m/sec로 계산한 값(mg cal cm⁻² sec⁻¹)이다.

3. Siple-Passel 公式의 意義와 問題點

一般大氣下에서 人體에 대한 바람의 冷却效果를

측정하기 위하여 Siple-Passel 公式을 사용할 때 다음과 같은 네 가지 點이 문제가 된다.

첫째 大氣와 人體 사이에 일어나는 對流的 熱移動에 관한 어떤 공식이던 간에 하나의 有效直径

7) Siple, P. A., and Passel, C. F., 1945, "Measurement of dry atmospheric cooling subfreezing temperature," *Proc. Amer. Philos. Soc.*, vol. 89, pp. 17-99.

(effective diameter)을 기초로 하게 된다. 즉 인체를 여러 가지 크기의 圓筒 集合体로 생각하고, 大氣下에서 이 집합된 諸圓筒의 冷却率이 人體의 冷却率과 같다고 가정한다. 때문에 Siple-Passel 公式를 적용할 때 그 結果는 平常服을 착용한 人體의 有效直径을, 다시 말해서 生理的 實驗에서 얻은 結果와 實驗式을 사용하여 얻은 데이타가 일치하는 有效直径을 결정하였는가에 따라 左右된다.

Siple과 Passel은 有效直径을 5.74cm로 결정하는데 대하여 Winslow는 3인치(7.6cm)로 결정하고 있다.⁸⁾ 그러나, 이것도 거의 裸体이거나 아니면 室内에서 實驗服을 착용한 사람의 生理的 實驗에서 얻은 것이다. 野外에서 平常服을 착용했을 때 또, 모자나 장갑으로 귀와 손이 보호되었을 때 有效直径은 더욱 커질 것이다.

둘째, 人體의 对流的 熱損失은 人體와 大氣 사이에 일어나는 각종 熱損失 중 단지 그 하나에 불과하다는 문제이다. 人體로부터 熱이 손실되는 과정에는 다음과 같이 여섯 가지가 있다.

- (1) 皮膚로부터 蒸發(perspiration)
- (2) 对流的 熱損失(windchill)
- (3) 肺를 통한 熱損失(breathing)
- (4) 人體의 輻射的 熱損失
- (5) 人體에 접촉된 物体 혹은 地面으로 향한 傳導的 熱損失
- (6) 음식물에 의한 熱損失

그러하여 windchill 하나만으로서 人體의 모든 熱損失을 대표하는 것은 아니다.

Court는 windchill에 의한 熱損失이 全人體의 熱損失中 80%에 불과하다고 결론짓고 있다. (9)

세째 Siple과 Passel의 貢過가 어떠한지 간

에 그 公式은 동시에 測定된 氣溫과 風速을 사용하여야 된다는 문제이다. windchill index는 단순한 統計나 結果가 아니기 때문에 같은 場所·같은 時間에 측정된 氣溫과 風速의 값을 사용하게 된다.

네째, Siple-Passel의 公式를 사용하여 그것으로 人體의 熱損失率을 계산할 수 있다고 하더라도 그 값은 個個人의 조건에 따라 다르게 感知되는 문제이다. 즉, 性別·年令·健康狀態·氣候馴化·被服의 效果·氣分狀態에 따라 같은 windchill 값을 다르게 體感하게 될 것이다. 비록 人體의 熱損失에 대한 어떠한 객관적 公式이 정확하다고 인정되더라도 그 結果는 항상 계산된 값과 일치하지 않는 人間의 感情에 의하여 주관적으로 批判을 받게 마련일 것이다.

이상과 같이 Siple-Passel 公式에 대하여 지적된 네 가지 문제점이 해결될 때까지 비록 windchill index가 $kg\ cal\ m^{-2}hr^{-1}$ 로 표시되더라도 그것으로 바람에 의한 人體의 熱損失量은 측정될 수가 없다. Pratt도 Siple-Passel 公式의 값을 하나의 number로 생각하는 것이 합리적이라고 요약하고 있다.¹⁰⁾

그래서, windchill index를 次元이 없는 比로서 생각한다면 그 index와 體感氣候와의 관계는 의미가 있다. 그런 의미에서 볼 때 windchill index는 寒冷氣候에서 氣溫과 바람의 조건이 달라짐에 따라 변하는 人間의 快適感을 定量化하는 좋은 指標가 될 수 있는 것이다.

그래서 Court¹¹⁾, Monlar¹²⁾의 비판에도 불구하고 寒冷氣候에서 人間의 快適感을 定量的으로 表現할 수 있는 유용한 指數라는 점에서 영국¹³⁾ 켈

8) Winslow, C. E. A., Herington, L. P., and Gagge, A. P., 1940, "Heat exchange and regulation radiant environment above and below air temperature," *Amer. Jour. Physi.*, vol. 131, pp. 79-92.

9) Court, A. 1948, "Wind chill," *Bull. Amer. Met. Soc.*, vol. 29, pp. 487-495.

10) Pratt, R. L., 1969, *Windchill*, Earth Science Laboratory, U. S. Army, Natick, Mass.

11) Court, Arnold, 1948, op. cit.

12) Monlar, G. W., 1960, "An evaluation of windchill," *In Cold Injury*, Horvath, S. M., ed., Trans. Sixth Conf., 1958, Fort Knox Josiah Macy Foundation, New York, pp. 175-221.

13) Howe, G. M., 1962, "Windchill, absolute humidity and cold spell of Christmas 1961," *Weather*, vol. 17, pp. 349-358.

14) Terjung, W., 1966, "Physiological climates of alifornia," *Yearbook of Pacific Geogrs.*, pp. 55-73.

15) Terjung, W., 1966, "Physiological climates of conterminous United States," *Ann. Ass. Amer. Geog.*, vol. 56, pp. 141-179.

리포오니아¹⁴⁾, 미국¹⁵⁾, 아프리카¹⁶⁾, 한국¹⁷⁾, 北半球¹⁸⁾, 그리고 全世界¹⁹⁾를 대상으로 하여 wind-chill index가 마련되고 그 결과를 기초로 하여 그의 氣候가 分析 혹은 分類되었다. 그리고 Lee와 Lemons²⁰⁾, Landsberg²¹⁾, Wilson²²⁾ 등은 大氣條件이 人體에 미치는 영향을 객관적으로 표시하기 위하여 Siple-Passel 공식을 사용하였다.

4. 結 言

氣候가 寒冷하다는 조건하에서 바람에 의한 人

體의 熱損失率을 측정하기 위한 수개의 實驗式이 발표되었다. 그리고 이를 기초로 하여 人間의 快適感을 定量的으로 표현하려고 한 수개의 試圖가 있었다. 이들 實驗式을 비교 검토한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

Siple-Passel 공식이 가장 合理的이며, 또 그 자체로서는 人體의 熱損失量을 測定할 수가 없다. 다만 이것이 $\text{kg cal m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 로 표시되더라도 하나의 數로서, 혹은 次元이 없는 比로서 사용될 때 의미가 있다고 하겠다.

(韓國科學院)

Comfort Index in the Cold Climates

Kyoung Eun Chun

Summary:

The cooling effects of the human body by wind and low air temperature has been termed the "dry convective cooling power." Several formulas have been devised to express this cooling power in terms of the observed values of air temperature and wind speed. This paper

discusses the formulas critically, pointing out that windchill index is sufficiently representative of human comfort in the cold climates. Siple-Passel's formula is compared with others, and the use of the formula is discussed.

16) Terjung, W., 1967, *The geographical application on some selected physio-climatic indices to Africa*, Ph.D. Dissertation, Univ. of California-Los Angeles.

17) 全景段, 1971, "Windchill에 의한 남한 기후의 分析", 氣象學論文集, 第7卷, pp. 33-40.

18) Falkowski, S. J. and Hasting, A. D., 1958, *Windchill in the Northern Hemisphere*, Technical Report EP-82, Quartermaster Research and Engineering Center, Natick, Mass.

19) Terjung, W., 1968, "World patterns of the distribution of the monthly comfort index," *Inter Jn. Biomet.*, vol. 12, pp. 119-151.

20) Lee, D. H. K. and Lemons, H., 1949, "Clothing for global man," *Geog. Rev.*, vol. 39, pp. 181-213.

21) Landsberg, H., 1960, "Bioclimatic work in the Weather Bureau," *Amer. Met. Soc.*, vol 41, pp. 184-187.

22) Wilson, O., 1967, "Objective evaluation of windchill index by records of frostsites in the Antractica," *Inter. J. Biomet.*, vol 11, pp. 29-23.