

Phoenics를 이용한 옷감의 종류 및 두께의 변화에 따른 열전달 특성의 수치 해석적 연구

홍 지 명

서울대학교 가정대학 의류학과

A Numerical Study on Natural Convection Between Skin and Fabrics

Ji Myung Hong

Department of Clothing and Textiles, Seoul National University
(1994. 12. 28 접수)

Abstract

In this study, FVM (Finite Volume Method) which is one of the 2-dimensional numerical approach has been conducted to anticipate the temperature distribution between skin and clothes by the change of air temperature and fabric characteristics including fabric thickness. Several experimental works have been done to understand the thermal insulation effect of fabrics on a human body by measuring the averaged temperature in the air layer between skin and clothes or by measuring the thermal resistance of fabrics. However, the formal method is inconvenient to measure the temperature distribution in the air layer to evaluate the insulation rate of the clothes on the skin because the real size of the clearance between skin and the clothes is too small to place the temperature sensor, and in the latter method the relationship between human body and the fabrics are ignored. However, the numerical method will be very effective and economical way to evaluate the insulation efficiency of clothes when the computational result is in the reliable range.

As the result of this study, the temperature change in the air layer between skin and clothes was linear to the fabric thickness and this result coincides with many previous experimental results. Moreover, it is possible to predict the optimum fabric thickness for the best thermal insulation in the air layer between skin and clothes.

I. 서 론

지역에 따라, 계절에 따라 변화의 폭이 큰 자연환경에서 인체는 매우 작은 범위에서만 쾌적감을 느낄 수 있다. 그러나 주거나 의복을 통하여 인체가 쾌적하게

느낄 수 있는 기후의 범위는 넓어질 수 있다. 불리한 대기조건에 대한 방위가 가장 본질적인 의복착용의 목적이다라고 밀했듯이, 의복착용의 목적 중 첫번째로 들 수 있는 것이 보건위생상의 목적이다¹⁾.

넓은 의미의 기후에 대해서 의복 내에서 이루어지는 소기후를 의복기후라고 하고 이는 외기의 온도, 습도

에 따라 변화하며, $32 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도와 $50 \pm 10\%$ 의 습도 일 때가 쾌적한 상태의 의복기후이다¹⁾. 이러한 의복기후 조절능력은 의복지의 특성 및 착장 방법에 따라 달라질 수 있다.

인체에서의 보온성을 고려한 쾌적성은 인체대사로 생성된 열과 환경으로의 손실과의 평형현상에 의존하며²⁾, 안정된 상태 하에서의 인체는 전열(dry heat)의 75%를 전도, 대류, 복사에 의해 잃는다^{3,4)}. 그러므로 열전달에 대한 의복감의 저항성은 쾌적성과 밀접한 관계가 있다. 한 물질에서 수직으로의 두 점을 통과하는 단위 면적당 열량치에 대한 그 두 점에서의 온도 변화의 비율을 열저항성(thermal resistance)이라고 정의하고^{2,3,5,6)}, 어떤 물질의 단위 두께당 열저항성을 열전도(thermal conductivity)라고 하며 이는 열전도도 (thermal conductivity)와 역수의 관계를 갖는 개념으로 보온성과 관련한 괴복위생학적 연구에서 가장 빈번히 이용되어지고 있다.

섬유제품의 열저항성은 섬유의 열전도도 만으로 결정되어질 수는 없으며 섬유의 두께, 섬유구조의 밀도(packing density)나 섬유의 섬도 등이 영향을 미친다⁶⁾. 많은 연구^{6~8)} 결과에서 볼 수 있듯이, 섬유의 열저항성은 섬유의 다른 어떤 특성보다 섬유의 두께와 밀접한 관계가 있다. 즉 섬유의 두께와 열저항성은 선형적 비례 관계를 갖는다. 또한 의복을 착용한 인체에서의 열 교환과 보온현상을 실험으로 연구하거나⁹⁾, 섬유의 열저항성을 측정하여 그 특성을 살핀 기존 연구 사례가^{3,6)} 많이 있다.

본 연구에서는, Finite Volume Method (FVM)의 수치해석 기법을 이용해서, 피부와 섬유 사이의 공기층에서의 자연대류현상에 의한 열전달 문제를 예측해 보고 기존 연구 결과와 비교해 보았다.

II. 수치 해석 기법

벽면 경계 조건은 변면에서 속도가 없는 no-slip boundary condition을 적용했으며, 질량보존의 법칙에 기초한 연속 방정식, 에너지 보존의 법칙과 운동량 보존의 법칙에 기초한 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유동장에서의 유동 특성을 예측하기 위해 열 유체 해석의 대표적인 상용 program인 Phoenics¹¹⁾를 사용했다.

본 연구에서 사용된 공기 및 열유동장의 수치해석을 위한 지배방정식¹⁰⁾은 아래와 같다.

(지배 방정식)

-Conservation of Mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0$$

-Conservation of Momentum:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho U_i U_j + p \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = \rho g_i$$

-Conservation of Energy:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho T U_i) = 0$$

-State Equation of Ideal Gas:

$$P = \rho R T$$

where ρ : density (kg/m^3)

t : time (sec)

μ : viscosity ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

g : gravitational acceleration (m/s^2)

p : pressure (Pa)

T : temperature (K)

Fig. 1은 피부와 천 사이의 공기장 유동 해석을 위한 모형의 기하학적 형상과 그 형상의 격자계를 보여준다. 이에서 보는 바와 같이 피부와 천사이의 공기층은 밀폐된 공간으로 가정했으며, model내에서의 유동현상을 예측하기 위해서 총격자수를 $40 \times 20 \times 1$ 로 한 2차원적 방법으로 해석했다.

본 연구의 해석기법에 사용된 섬유의 종류 및 특성은 Table 1과 같다. 해석기법에서 사용되어진 주요변수는 섬유의 두께, 외기 온도와 섬유의 종류이며, 각각 3, 4, 3 종류의 변화를 주어 총 36 조합으로 하였고, 그 범위는 Table 2와 같다.

III. 결 과

섬유의 특성에 따라 선별한 Table 1의 데이터를 이용해 피부와 옷감 사이 공기층의 온도를 예측해 보았다. Fig. 2는 이를 옷감의 두께에 따라 도식화한 결과이다. 피부와 옷감 사이 공기층의 온도는 옷감의 종류와는 무관하고 옷감의 두께에 따라 증가하고 있는데, 이는 섬유의 열저항성을 측정한 여러 실험들^{6~8)}의 결과와 일치한다.

외기가 여름기온의 대표치로 설정한 $+30^\circ\text{C}$ 일 때는

Table 1. Characteristics of Fabrics

Fiber composition	construction	weight (g/m ²)	thickness (mm)	thermal conductivity (w/m°C)	specific-heat (J/Kg°C)
cotton 1	single	84	0.84	50.4	1.21×10^3
cotton 2	brushed interlock	210	2.26	46.2	1.21×10^3
polyester /cotto (75/25)	single jersey honeycomb	277	2.37	48.0	1.34×10^3
polyester /cotton (65/35)	brushed interlock	227	3.87	38.3	1.34×10^3
wool 1	single jersey	226	1.59	42.9	1.36×10^3
wool 2	modified interlock	211	3.33	37.0	1.36×10^3

Table 2. Parameters

Fabrics	Fabric Thickness (mm)	Ambient Temp.	Air Layer Thickness (mm)
cotton (c)	0.84, 1.59, 2.26, 3.87	Winter : -10°C	15 mm
Polyester/cotton(p/c)		Spring·Autumn : 15°C	
wool (w)		Winter : 30°C	

섬유 두께에 따른 피부와 옷감 사이 공기층의 온도 변화가 매우 적게 나타났고, 모든 경우에서 34°C 정도로 높게 나타났다. 이 결과로, 외기가 높을 때는 의복의 보온성만으로 폐적성의 지표로 삼을 수 없으며, 오히려 의복을 통한 방열을 고려해야함을 알 수 있다.

봄, 가을 기온의 대표치로 설정한 15°C의 외기일 때 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 섬유의 두께에 따라 약간씩 점진적으로 변화함을 볼 수 있다. 또한 실험에 사용된 모든 섬유의 종류와 두께에서, 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 31°C 정도로 나타나, 폐적한 외복 기후가 32±1°C인 것을 고려하면 온도의 측면에선 대체로 폐적한 상태이다.

외기가 겨울의 대표치로 설정한 -10°C일 경우 피부 온으로 설정한 35°C와 큰 차이가 있어서 비교적 명확하게 피부와 옷감 사이 공기층의 온도와 섬유의 두께가 직선적인 비례관계를 보여주고 있다.

Fig. 3-1에서 Fig. 3-3은 섬유의 열전도도 및 밀도, 비열 등의 특성을 그대로 지닌 Table 1에서의 옷감을 단지 섬유의 두께만을 임의적으로 1.00 mm에서 4.00 mm까지 변화시켜 본 결과를 옷감과 피부 사이 공기층의 온도와 섬유 두께와의 관계로 도식화한 것으로 이때 외기온을 30°C, 15°C, -10°C 각각에 대해 계산한 것이다. 이러한 계산으로 어떤 특정 옷감에 대해 열전도도의 측정만으로 그 옷감에서 최대의 보온성을 보이는 두께를 예측할 수 있겠다. Fig. 3에서는 Fig. 2의 결과와 같이, 피부와 직물 사이 공기층의 온도와 섬유 두께는 거의 직선적으로 비례관계를 보인다. 섬유의 두께가 3.0 mm를 기점으로 기울기가 변화하는데 이는 피부온이 35°C로 설정되어 있으므로 점점 그 경계에 수렴해 가는 것으로 보인다. 세가지 외기온의 경우에서 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 섬유의 종류에 따라 일정한 순서로 나타나 있다. 이것은 옷감의 열

(A)

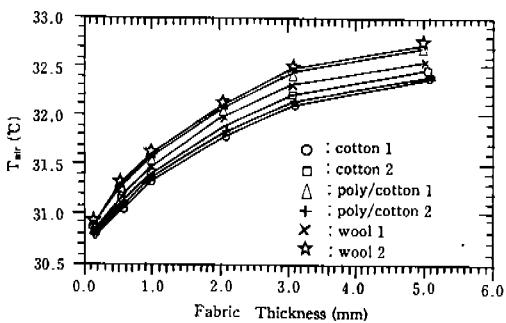
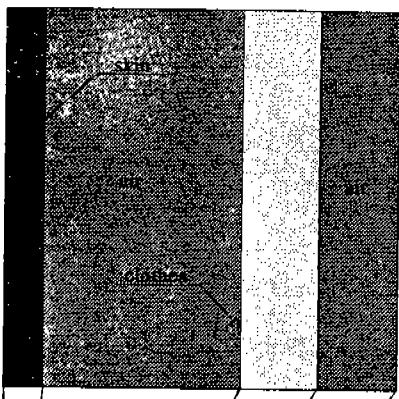


Fig. 3-1. Variation of Air Temperature (T_{air}) between Skin and Clothes to the Change of Fabric Thickness (mm); Ambient Temperature: 15°C.

(B)

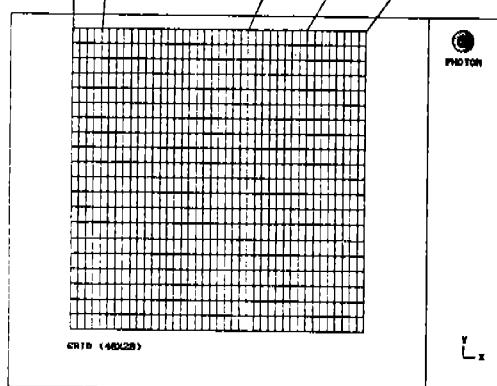


Fig. 1. Typical Geometry (A) of Model and Numerical Grid (B) (40×20).

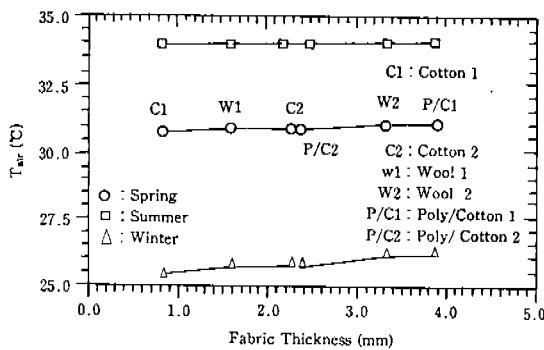


Fig. 2. Variation of Air Temperature (T_{air}) between Skin and Clothes to the Change of Season and Fabric Thickness (mm).

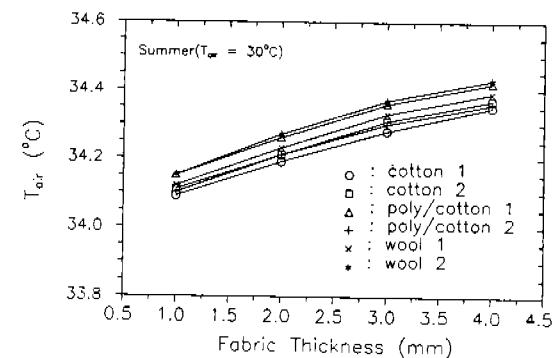


Fig. 3-2. Variation of Air Temperature (T_{air}) between Skin and Clothes to the Change of Fabric Thickness (mm); Ambient Temperature: 30°C

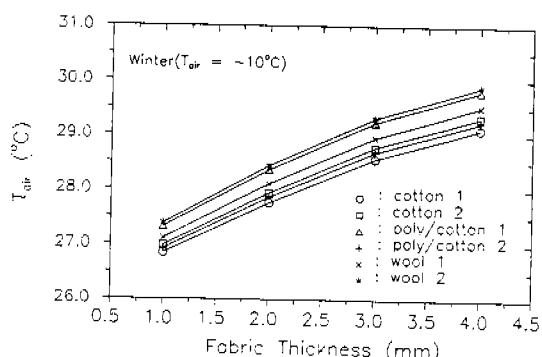


Fig. 3-3. Variation of Air Temperature (T_{air}) between Skin and Clothes to the Change of Fabric Thickness(mm); Ambient Temperature: -10°C

저항성의 차이에 의한 것이며, 외기온이 15°C 인 Fig. 3-1의 경우 실험에 사용된 모든 종류의 옷감에서 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 31°C 에서 33°C 사이에 분포하고 있어 온도의 측면에서는 패적함이 예상되나, 외기온이 30°C 인 Fig. 3-2의 경우 가장 두께가 얇고 열전성성이 낮은 cotton의 경우에서도 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 34°C 를 넘고 있어서 불쾌감이 예상된다. 외기온이 -10°C 인 Fig. 3-3의 경우, 피부와 옷감 사이 공기층의 온도가 모든 종류의 옷감에서 30°C 미만으로 더 많은 보온이 요구됨을 알 수 있다.

모직 섬유가 일반적으로 더 보온성이 좋을 것으로 생각되지만, 이 결과로 보면 섬유의 종류와는 그다지 상관없는 듯하다. 섬유 자체의 열전도도 등의 특성보다는 제작된 직물의 구조적 특성이 그 직물의 열전도도를 결정하게되고, 그것으로 피부와 옷감 사이 공기층의 온도를 예측할 수 있으며, 최대의 보온성을 나타내는 두께를 계산할 수 있다.

외복기후를 측정할 때는 센서를 피부와 옷감 사이에 삽입하거나, 피부와 옷감 사이 공기층의 두께가 얕을

Cotton 1

Spring
($T_{air} = 15^{\circ}\text{C}$)

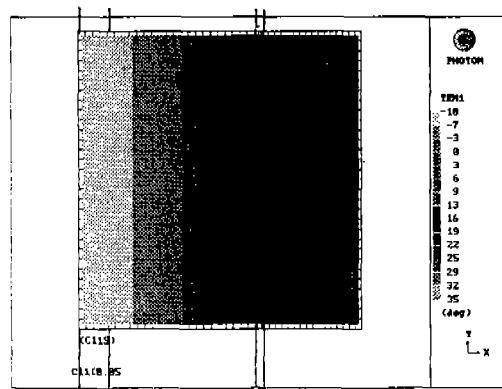


Fig. 4. Variation of Temperature Distribution.

경우 피부온이나 외복 최외층의 온도로 대신 측정해 왔다. 피부와 옷감 사이의 공기층 두께가 얕다하더라도 그 사이에 온도 변화가 있을 것이므로 그 공기층의 온도 분포를 예측해 보았다. 피부와 옷감 사이의 공기

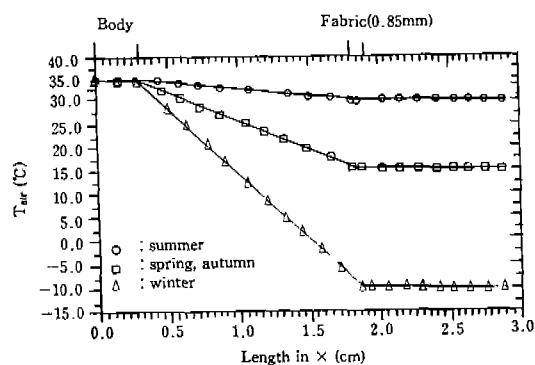


Fig. 5-1. Variation of Temperature Distribution to the Change of Season. (Material: Cotton 1, Thickness: 0.85 mm)

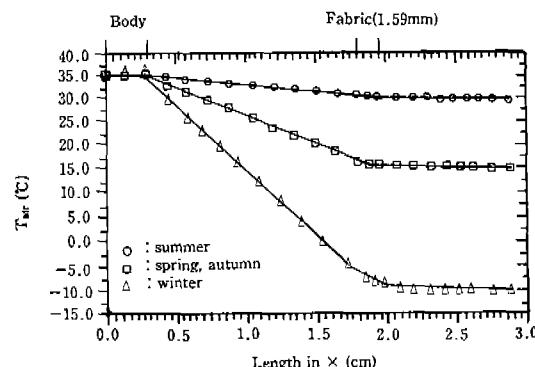


Fig. 5-2. Variation of Temperature Distribution to the Change of Season. (Material: Wool 1, Thickness: 1.59 mm)

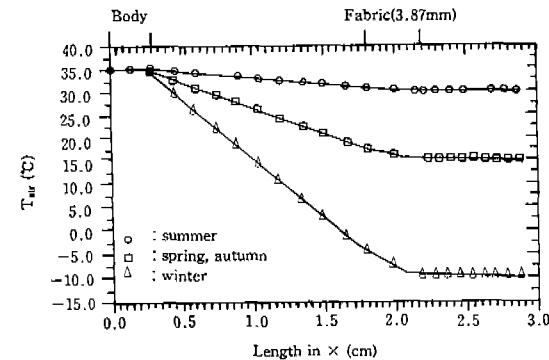


Fig. 5-3. Variation of Temperature Distribution to the Change of Season. (Material: Polyester/Cotton (65/35), Thickness: 3.87 mm)

총 두께는 15 mm로, 피부 온도는 35°C로 설정했고, 외기온은 봄, 가을, 여름 그리고 겨울을 나타내도록 각각 +15°C, +30°C와 -10°C로 설정했다. 이런 조건 하에서 피부와 옷감 사이의 온도 변화를 각각의 섬유 별로 예측해 본 결과 중 하나를 Fig. 4에 나타내었다. 의복기후를 직접 측정했던 경우의 결과와는 달리 비록 작은 공간 안이지만 그 안에서도 온도분포의 범위가 넓음을 알 수 있다. Fig. 5-1에서 Fig. 5-3은 Fig. 4와 같은 온도분포선을 피부로부터 X방향으로의 거리 변화에 따른 피부와 옷감 사이 공기층에서의 온도 변화 값의 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 외기의 변화에 따른 의복기후의 변화 및 피부에서 옷감에 이르는 공기층에서의 온도 저하 현상을 명확히 볼 수 있다. 또한 기존의 실험 값과의 비교를 위해 온도 분포 범위의 중간지점을 대표적 의복기후로 선택했다.

Fig. 5에서 비교한 의복기후 중 외기온이 -10°C 일 때의, 두께가 다른 세 종류의 옷감에 대한, 피부와 옷감 사이 공기층의 온도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 옷감의 두께가 두꺼울수록 옷감과 피부 사이 공기층의 온도가 높고 피부에서 옷감에 이르는 온도 분포의 기울기가 작음을 알 수 있다.

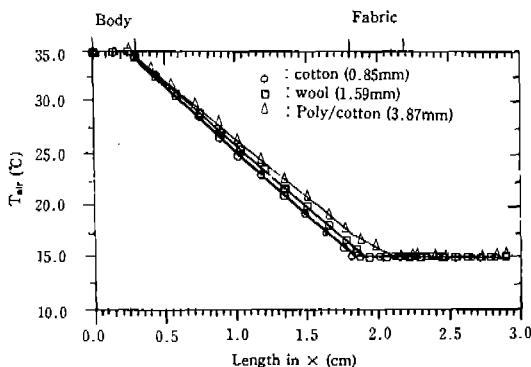


Fig. 6. Variation of Temperature Distribution to the Change of Fabric and Thickness. ($T_{air} = -10^{\circ}\text{C}$)

IV. 결 론

2차원 수치해석 기법의 하나인 FVM (Finite Vol-

ume Method)을 이용하여 피부와 옷감 사이 공기층의 온도 변화를 예측해 보았다.

본 연구의 결과, 외기온의 변화에 따른 피부와 옷감 사이의 공기층 온도 분포 상태 변화를 확인할 수 있었다. 그리고 섬유의 종류보다는 옷감의 두께가 보온 특성을 결정짓는 중요 변수임을 알 수 있었으며, 이는 기존 연구⁶⁻⁸⁾의 결과들과도 일치한다.

옷감 두께의 변화가 피부와 옷감 사이 공기층의 온도 변화에 미치는 영향을 알아봄으로써, 옷감의 최대 보온 효과를 나타내는 최적 두께를 예측해 볼 수 있었다.

본 연구에서는 밀폐된 공간을 가정하여 실험하였으나, 좀 더 실질적인 연구를 위해서는 좌장 형태에 가까운 모델의 설정 및 인체의 생리적 상태를 고려한 연구가 계속되어야 하겠다. 이러한 수치 해석적 기법에 의한 연구를 통하여 직접적인 인체 실험을 하지 않고도 의복과 인체에서의 열전달 및 보온성 문제를 객관적으로 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) 渡邊ミチ著, 沈富子譯, 新版 衣服衛生과 着裝, 태화출판사, 1984
- 2) F.T. Peirce and W.H. Rees, The Transmission of Heat Through Textile Fabrics-part II, *J. Text. Inst.*, 37, T181, (1946)
- 3) B. Holcombe, The Thermal Insulation Performance of textile Fabrics, *Wool Science Review*, 60, (12), p. 22, (1984)
- 4) W.H. Rees, The Protective Value of Clothing, *J. Text. Inst.*, 37, p. 132, (1964)
- 5) B.N. Hoschke, Some Comfort Aspects of Wool Textiles; Prickliness and Warmth, Objective Specification and Fabric Quality, Mechanical Properties and Performance, Edited by S. Kawabata, R. Postle and M. Niwa, The Textile Machinery Society of Japan, (1982)
- 6) B.V. Holcombe and B.N. Hoschke, Dry Heat Transfer Characteristics of Underwear Fabrics, *Tex. Res. J.*, 53, p. 368, (1983)
- 7) B.N. Hoschke, The Conflicting Requirements of Protection and Comfort in Protective Clothing, Objective Evaluation of Apparel Fabrics, Ed. by R. Postle, S. Kawabata and M. Niwa, The textile

- Machinery Society of Japan, p. 509 (1983)
- 8) B. Farnworth, Mechanisms of Heat Flow Through Clothing Insulation, *Text. Res. J.*, 53, p. 717, (1983)
- 9) I. Holmer, Heat Exchange and Thermal Insulation Compared in Woolen and Nylon Garments During Wear Trials, *Textile. Res. J.*, 9, p. 511, (1985)
- 10) S. Grundberg, Simulation of the Surface Layer of a Stratified Atmosphere Using Phoenics, *The Phoenics Journal of Computational Fluid Dynamics and Its Application*, 7, p. 8, (1994)
- 11) N. Baltas, D. Radosavljevic, Phoenics User Guide (CHAM TR217), (1993)