

신생아 보육기 내에서의 삼차원 대류 열전달에 관한 수치해석

전성수 · 김영호

연세대학교 보건과학대학 의공학과, 의공학연구소, 의용계측 및 재활공학 연구센터

(2000년 6월 28일 접수, 2001년 1월 8일 채택)

A Numerical Study of the Three-Dimensional Convective Heat Transfer in an Infant Incubator

S.S. Cheon, Y.H. Kim

Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Institute of Medical Engineering,

Research Institute for Medical Instrument & Rehabilitation Engineering, Yonsei University

(Received June 28, 2000. Accepted January 8, 2001)

요약 : 압력기반의 유한체적법과 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 신생아 보육기 내의 삼차원 정상난류유동해석과 대류현상에 의한 열전달을 해석하였다. 보육기 내의 주된 공기유동은 입구에서 유입된 공기가 보육기 위쪽을 지나 출구로 이동하며 각진 구석에서 작은 와류들이 관찰되었다. 보육기의 입구부를 제외한 대부분에서의 유속은 0.1m/s 이하로 나타났으며, 신생아의 다리부분에서의 속도가 머리부분보다 다소 크게 관찰되었다. 입구쪽의 온도가 출구쪽의 온도보다 1~2°C 높게 나타났으며 속도 크기가 큰 다리부분에서의 온도가 머리 또는 목부분보다 다소 낮았다. 보육기 내의 온도변화는 약 3~4°C로 다소 크게 나타났는데 이는 입구에서 유입된 공기가 상벽과 직각으로 만나며, 보육기 외벽의 각진 구석부분에 의한 영향으로 생각된다. 따라서 입구속도를 적절히 줄이거나 유선형의 유동을 갖도록 설계하여 열손실을 최소화한다면 보다 효율적인 보육기가 될 것으로 생각된다.

Abstract : A three-dimensional convective heat transfer for the steady turbulent flow in an infant incubator was simulated using a pressure-based finite volume method and $k-\epsilon$ turbulent model. The temperature of the outer wall of the incubator was assumed by 27°C, and the inlet Reynolds number was 5140.

The inflow moved to the outlet through the upper part of the incubator, and several flow recirculations were observed in the corners. Velocity magnitudes except in the upper regions of the inlet were less than 0.1m/s. The velocity magnitude near the lower extremity of the infant slightly larger than those near the head or the neck. The change in temperature was about 3~4°C. This might result from the fact that there were many sharp corners and the inflow hit the upper wall at the right angle. Therefore, the appropriate reduction of the inlet flow velocity or the aerodynamic shape of the incubator might decrease heat losses in the infant incubator, and therefore result in more energy efficient design of the infant incubator.

Key words : infant incubator(신생아 보육기), convective heat transfer(대류 열전달), finite volume method(유한체적법), heat loss(열손실)

서 론

신생아는 성인과 마찬가지로 몸에서 생성하는 열과 주위에 빼앗기는 열, 그리고 신진 대사를 위해서 소모되는 열 등의 균

형을 섬세하게 맞추어 체온을 유지한다. 그러나, 신생아는 성인에 비해 열을 생성하는 능력이 한정되어 떨림(shivering)과 근육수축이 용이하지 못하고, 대신 생화학적으로 열을 생성한다. 이 때, 신생아는 산소가 많이 소모되며, 산소의 공급이 충분하지 않으면 산혈증을 일으킨다[1,2]. 미숙아(preterm)의 경우 체온을 조절하는 기능이 더욱 제한되어 있으므로 저체온이 되기 쉽다. 큰 체표면적, 피하 지방의 부족에 의한 열 생산의 부족, 떨림의 불능, 신체 활동의 감소 등에 의해서 체온유지가 어렵게 된다[1,2]. 이러한 신생아 또는 미숙아들은 보육기 내에서 종종 알몸으로 간호를 받기 때문에 보온이 필수적으로 요구된다.

본 연구는 과학기술부 한국과학재단 지정 의용계측 및 재활공학 연구센터의 지원에 의한 것임.

통신저자 : 김영호, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234

연세대학교 보건과학대학 의공학과

Tel. (033)760-2492, Fax. (033)760-2197

E-mail. yhkim@dragon.yonsei.ac.kr

보육기 내의 신생아에 대한 열손실은 전도, 대류, 복사에 의하여 발생하며, 보육기 내부의 공기 속도가 상대적으로 빠른 경우에는 대류에 의한 열 손실이 큰 비중을 차지한다[3]. 보온의 효과를 높이기 위하여 최근에 개발되는 신생아 보육기는 단열이 잘되는 재료를 사용하며, 외부로의 온도 전달을 차단시키려고 외벽 안쪽에 내벽을 만든 제품이 사용되고 있다.

Telliez 등[4]은 다양한 보육기 초기내부 온도에 따라서 열평형상태에 도달할 때의 온도와 신생아의 체표면 온도를 측정하였다. 서로 다른 보육기 내부의 초기 온도와 관계없이 평형상태에서 일정한 온도를 나타냈다. Hey 등[3]은 자연대류(natural convection)와 강제대류(forced convection)방식의 보육기에서 내부온도를 측정하여 다양한 실내온도에서 보육기 내부의 온도를 제시하였다. Karlsson 등[5]은 중성온도 환경에 노출되어 있는 미숙아의 국부적 체표면 온도를 측정할 결과 체표면 온도는 머리부분에서 높고, 다리부분에서 낮게 나타났다.

컴퓨터가 급속도로 발전함에 따라 전산유동해석을 이용한 유동연구가 활발히 진행되어 왔다. Yamaguchi 등[6]은 신생아의 기하학적인 형상을 고려하여 간단한 이차원 신생아 보육기 모델에서 공기유동과 압력분포를 해석하였다. Hasegawa 등[7]은 신생아의 기하학적인 형상을 고려하여 굴곡된 전방벽에 따른 영향과 이에 따른 공기유동을 해석하였고, 접혀있는 보육기 모델이 유동학적으로 유리하다고 보고한 바 있다. 그러나 위 연구들에서는 대류 열전달을 고려하지 않아서 보육기 내의 온도분포에 관해서 어떤 결과도 제시하지 못했다.

본 연구의 목적은 전산유동해석을 이용하여 신생아 보육기 내에서의 삼차원 대류 열전달을 해석하여 문제점을 제시하고 이를 향후 효율적인 보육기 설계에 적용하고자 함에 있다.

방 법

본 연구에서는 신생아 보육기인 CHS-950SCA(중외메디칼)를 기반으로 기하학적인 모형을 구성하였다.

신생아가 보육기 내에 있는 경우의 유동 및 열전달을 해석

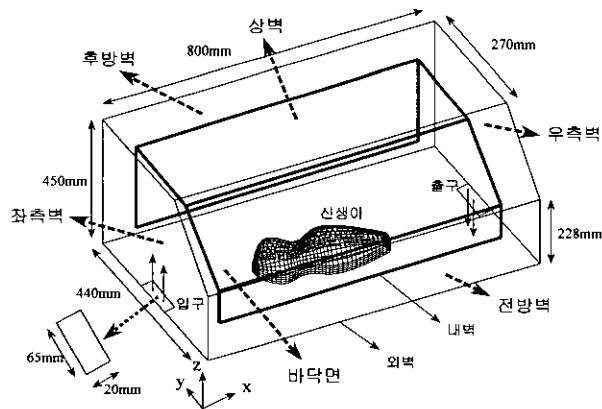


그림 1. 보육기 후드부분의 개략도
Fig. 1. The schematic of an infant incubator hood

하기 위하여 신생아가 위치하는 후드부분의 모형을 가로 800 mm, 세로 440 mm, 높이 450 mm으로 구성하였다. 신생아 보육기의 후드부분은 공기가 유입되는 입구부와 공기가 나가는 출구부, 신생아를 올려놓는 매트리스 부분, 그리고 보육기 내부의 보온을 위해서 이중벽 구조로 되어 있다. 신생아가 보육기 내에서 치료를 받는 동안 일반적으로 벌거벗은 채 누워있게 되며, 손과 발의 자세는 다양한 자세를 취하고 있다. 그래서 본 연구에서는 신생아의 간략화 된 삼차원 형상(키 360 mm, 폭 160 mm, 높이 100 mm)을 구성하였다.

수치해석의 정확성을 위해서 body-fitted 격자와 다중도메인 방법을 사용하였으며, 구성된 총 도메인 수는 29개이었다. 수치해석의 오차를 줄이기 위하여 신생아 주위의 격자분포를 조밀하게 하였으며 구성된 총 격자 수는 83,648이다.

비압축성(incompressible) 유체의 삼차원 정상유동(steady

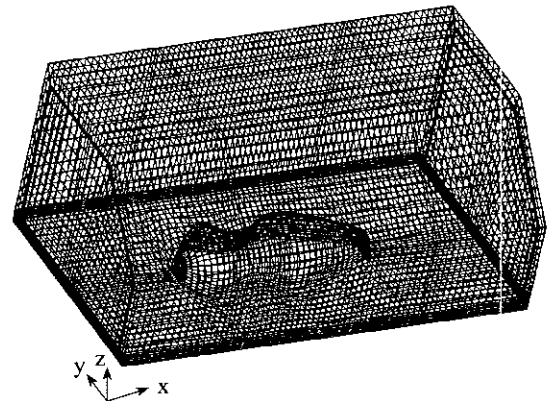


그림 2. 신생아 보육기의 삼차원 격자분포
Fig. 2. The three-dimensional grid distribution of an infant incubator

flow)의 지배방정식을 텐서형으로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho c_p} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

위 식에서 u_i 는 속도벡터, p 는 압력, ρ 는 공기의 밀도, μ 는 점성계수(viscous coefficient), T 는 온도, α 는 열 확산계수(thermal diffusivity), c_p 는 비열(specific heat), τ_{ij} 는 점성응력 텐서이다. 위 세 식을 풀기 위하여 압력기반의 유한체적법을 이용한 상용 소프트웨어인 CFD-ACE(CFD Research

Corporation[8], 미국)를 사용하였고, 압력-속도의 연결성을 위하여 SIMPLEC[9]을 적용하였다.

신생아실의 온도는 24~27 ℃이므로 보육기 외벽의 온도를 27 ℃로 가정하였으며 입구에서의 공기의 온도는 32 ℃로 설정하였다[1,3]. 입구에서의 평균 공기속도는 실험을 통해서 측정된 값인 1 m/s를 사용하여 입구 레이놀즈 수를 5140으로 하였다. 난류유동해석을 위해서 k-ε 모델을 사용하였다. k는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)이며, ε는 손실 비율(dissipation rate)이고, 값은 각각 0.5, 64.3으로 하였다.

보육기 내에서의 전도와 복사에 의한 열전달 현상은 비교적 작으므로[3], 본 연구에서는 다음과 같은 대류현상만을 고려하였다.

$$q_c = h_c A (\theta_o - \theta_a) \tag{4}$$

여기서 q_c 는 대류에 의한 열손실의 비율, A는 체표면적, θ_o 는 체표면온도, θ_a 는 주위온도, h_c 는 대류계수이다. 본 연구에서 사용된 신생아 모델의 체표면적은 0.1714 m²이었으며 이는 Telliez 등[4]이 제시한 체표면적 0.1600±0.0203 m²와 매우 유사하였다. 신생아의 표면온도와 주위온도 차를 5 ℃로 가정한다면 공기 속도가 1 m/s일 때의 대류계수 9.0 W/m²[10]을 사용하여 식(4)을 통해서 계산된 신생아 체표면에서의 열유속은 7.713 W/s이었다. 따라서, 신생아 체표면에서의 열유속은 7.713 W/s로 일정하다고 가정하여 열전달을 해석하였다.

결과 및 토의

1. 공기유동

그림 3은 신생아의 시상면(sagittal plane)과 일치하는 단면(y=0.22m)의 속도분포이다. 입구에서 유입된 공기가 좌측벽에서는 뒷방향으로, 상벽과 내벽 사이에서는 우측방향으로, 우측벽에서는 아랫방향으로, 바닥면에서는 좌측방향으로의 공기유

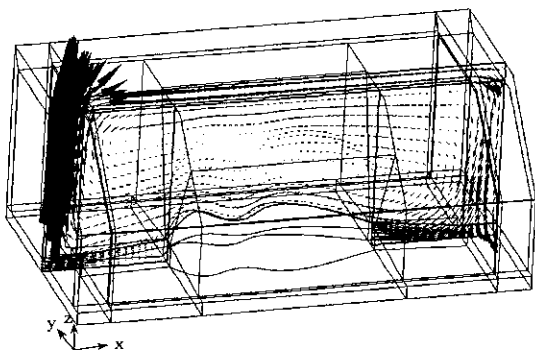


그림 3. 신생아 시상면과 일치하는 단면(y=0.22m)의 속도분포
Fig. 3. The velocity distributions in corresponding plane to the infant's sagittal plane(y=0.22m)

동이 지배적이었고, 이에 따라서 커다란 와류를 형성하였다. 이 단면의 중앙부에서는 w방향의 속도(z축 방향의 속도성분)에 의해서 매우 복잡한 공기유동이 나타났다. 내벽 바로 아래부분에서의 공기유동은 좌측에서 우측으로 진행하였고, 크기는 매우 작게 나타났다.

그림 4는 신생아의 횡단면(transverse plane)과 평행한 단면의 속도분포이다. 입구부의 단면(1 : x=0.012 m)에서는 입구를 통하여 강하게 유입되는 공기가 보육기의 상벽에 이르러 전방벽과 후방벽쪽으로 양분되어 커다란 와류를 형성하였다. 위벽과 뒷벽이 직각으로 만나는 부분에서 작은 와류가 발견되었다. 신생아 머리 끝부분의 단면(2 : x=0.222 m)에서는 입구부의 단면(1 : x=0.012 m)에서 유입된 공기에 의해 나타났던 두 개의 커다란 와류가 관찰되지 않았으며, 좌표(0.012, 0.4, 0.356)를 중심으로 형성된 작은 와류가 신생아 머리 끝부분의 단면(2 : x=0.222 m)에서는 와류 중심이 좌표(0.222, 0.35, 0.313)로 이동하여 좀 더 크고 확실하게 나타났다. 신생아 몸부분의 단면(3 : x=0.4 m)에서는 보육기 중앙의 뒷부분에서의 상승하는 공기와 보육기 중앙 앞부분에서의 하강하는 공기가 만나면서 중앙부분에서 복잡한 유동이 나타났다. 신생아 다리 끝부분

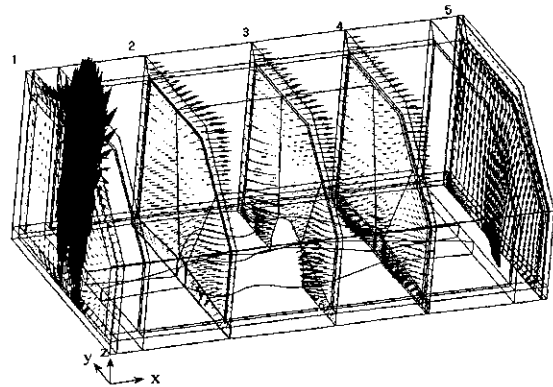


그림 4. 신생아 횡단면과 평행한 단면의 속도분포

1 : 입구부분의 단면(x=0.012m), 2 : 신생아 머리 끝부분의 단면(x=0.222m), 3 : 신생아 몸부분의 단면(x=0.4m), 4 : 신생아 다리 끝부분의 단면(x=0.576m), 5 : 출구부의 단면(x=0.787m)

Fig. 4. The velocity distributions in parallel planes to the baby transverse plane

1 : The cross-section at the inlet(x=0.012m),
2 : The cross-section near the end of a head of the infant(x=0.222m) 3 : The cross-section near the infant's trunk(x=0.4m) 4 : The cross-section near the end of the infant's leg(x=0.576m) 5 : The cross-section at the outlet(x=0.787m)

의 단면(4 : x=0.576 m)에서는 중앙 뒷부분에서 내벽의 후방벽을 따라 올라가는 유동과 중간부분에서 내려가는 유동이 만나 복잡한 공기유동을 나타냈다. 출구부의 단면(5 : x=0.787 m)에서는 보육기의 하부로 향하는 유동이 지배적이거나, 뒷벽 아래부분에서 좌표 (0.787, 0.403, 0.097)를 중심으로 작은 와류가 나

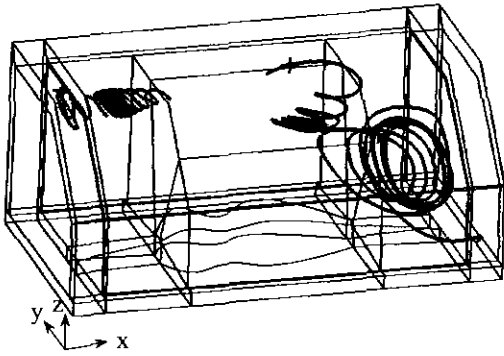


그림 5. 보육기 내의 복잡한 회전유동
Fig. 5. The complicated rotation of flow in an infant incubator

타났다.

그림 5는 보육기 내의 복잡한 회전유동(rotational flow)을 나타낸다. 후방벽과 상벽과 좌측벽이 직각으로 만나는 부분에서 하나의 와류가 나타났고, 접혀있는 전방벽의 우측에서 또 하나의 와류가 나타났다. 후방벽과 상벽과 좌측벽이 직각으로 만나는 부분에서 나타난 와류는 크기는 작지만 x축에 평행하게 길게 늘어난 나선형의 와류로 나타났다. 접혀있는 전방벽의 오른쪽에서 나타난 와류는 다른 것보다 크게 나타났고, 접혀있는 전방벽과 평행하게 나타났다.

2. 온도분포

그림 6은 $y=0.22\text{m}$ 인 신생아의 시상면(sagittal plane)과 일치하는 단면의 온도분포이다. 머리부분에서 최고 $34\text{ }^\circ\text{C}$ (307 K)의 온도를 나타냈지만, 발부분에서는 $29\text{ }^\circ\text{C}$ (302 K)의 온도분포를 나타냈다. 중앙부분에서도 약 $29\text{ }^\circ\text{C}$ (302 K)의 온도가 넓게 분포하였다.

그림 7은 $z=0.08\text{m}$ 인 신생아의 전두면(frontal plane)과 일

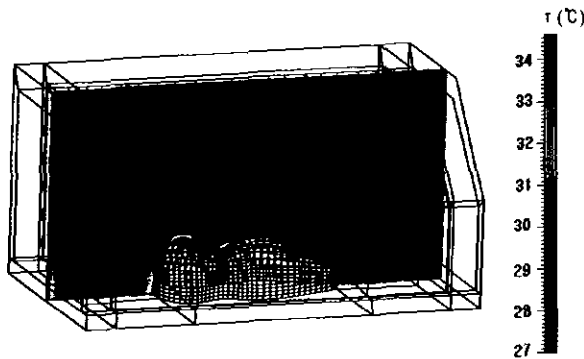


그림 6. 신생아 시상면과 일치하는 단면($y=0.22\text{m}$)의 온도분포
Fig. 6. Temperature distributions in corresponding plane to the infant's sagittal plane($y=0.22\text{m}$)

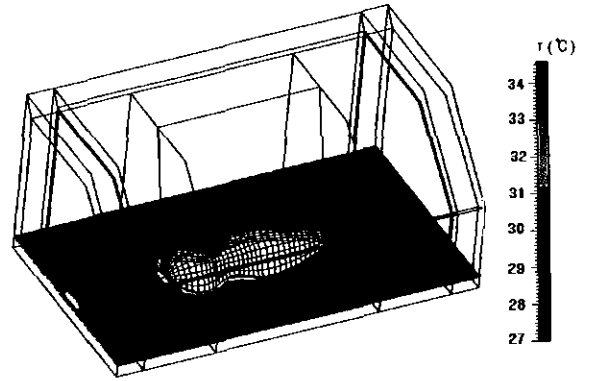


그림 7. 신생아 전두면과 일치하는 단면($z=0.08\text{m}$)의 온도분포
Fig. 7. Temperature distributions in corresponding plane to the infant's frontal plane($z=0.08\text{m}$)

치하는 단면이다. $34\text{ }^\circ\text{C}$ (307K)의 높은 온도가 머리부분과 우측 목부분에서 나타났으며, 좌측 목부분에서는 $33\text{ }^\circ\text{C}$ (306 K)로 나타났다. 신생아 주위의 일부를 제외하고 외벽의 온도인 $27\text{ }^\circ\text{C}$ (300 K)가 넓게 분포하였다. 신생아 좌측주위는 후방벽으로 진행하면서 온도가 급격히 감소하였으나, 신생아 우측주위는 전방벽으로 진행하면서 온도변화가 비교적 완만하였다.

그림 8은 신생아의 체표면 온도분포로 전체적으로 $30\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$ (303~307 K)의 온도분포를 나타냈고, 목부분과 머리의 정수리 부분에서 가장 높은 온도가 관찰되었다. 신생아의 정면보다 측면의 온도가 상대적으로 낮게 나타났으며, 머리부분보다 다리 부분의 온도가 상대적으로 낮게 나타났다. 좌측보다 우측의 온도분포가 약간 낮게 나타났다. 머리부분의 온도는 $32\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$ (305~307 K)의 온도분포를 나타냈고, 목부분에서는 $33\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$ (306~307 K)의 온도분포를 나타냈으며, 몸과 다리부분에서는 $30\sim 33\text{ }^\circ\text{C}$ (303~306 K)의 온도분포를 나타냈다.

그림 9는 신생아의 좌측, 좌측 앞, 정면, 우측 앞, 우측부분에서의 속도크기와 온도분포를 동시에 나타내고 있다. X축의

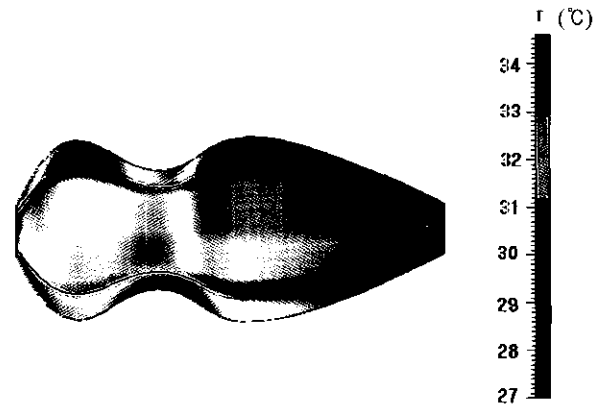


그림 8. 신생아의 체표면 온도분포
Fig. 8. The skin temperature distribution of the infant

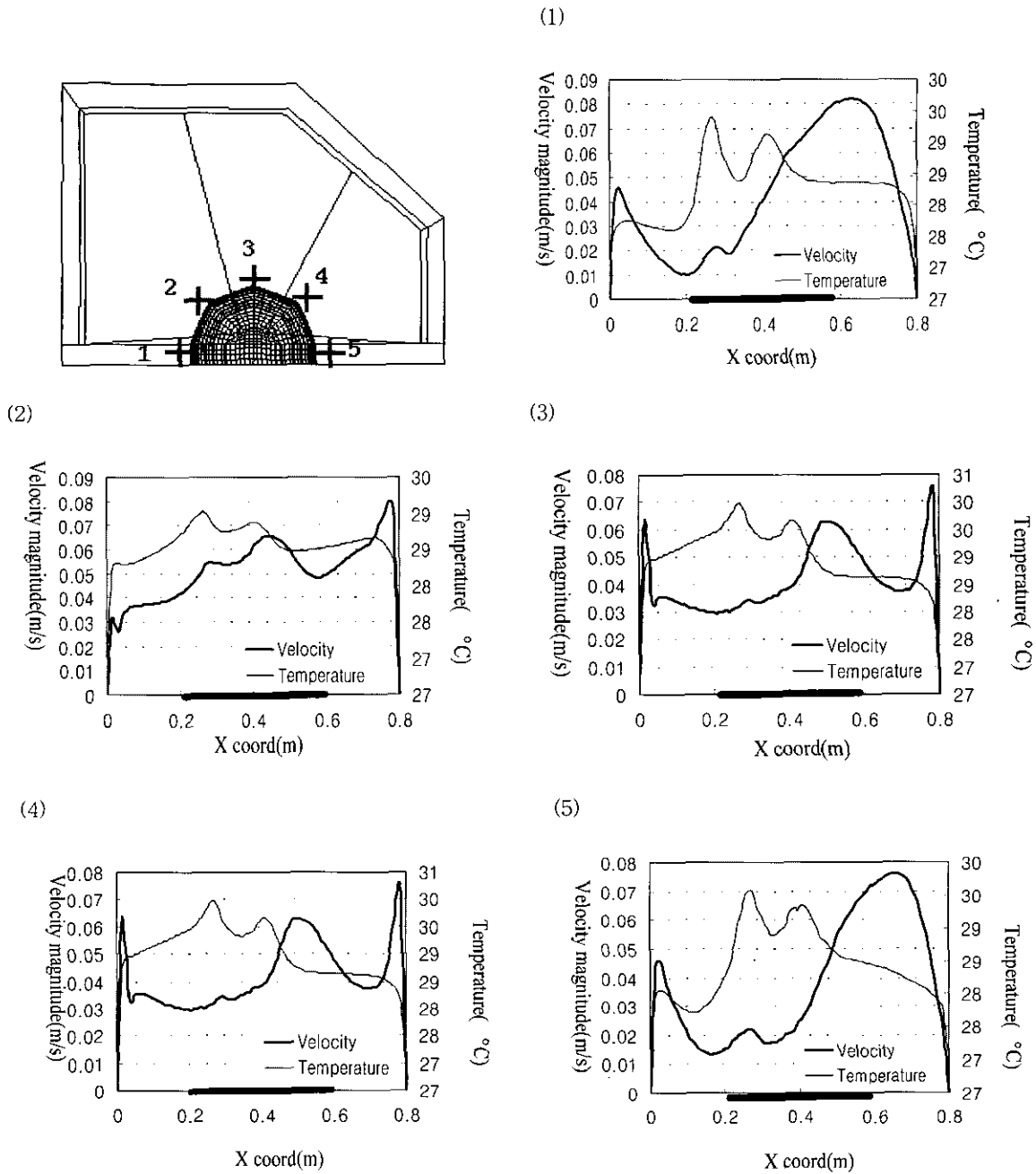


그림 9. 신생아 주위에서의 속도크기와 온도분포

- 1 : 신생아의 좌측부분($y=0.305m, z=0.07m$) 2 : 신생아의 좌측 앞부분($y=0.284m, z=0.132m$)
- 3 : 신생아의 정면부분($y=0.22m, z=0.16m$) 4 : 신생아의 우측 앞부분($y=0.16m, z=0.13m$)
- 5 : 신생아의 우측부분($y=0.132m, z=0.007m$) 주 : x축의 굵은 선부위는 신생아의 위치를 나타냄

Fig. 9. The velocity magnitude and the temperature distribution near the infant

- 1 : The left side of the infant($y=0.305m, z=0.07m$) 2 : The left anterior side of the infant($y=0.284m, z=0.132m$)
- 3 : The frontal side of the infant($y=0.22m, z=0.16m$) 4 : The right anterior side of the infant($y=0.16m, z=0.13m$)
- 5 : The right side of the infant($y=0.132m, z=0.007m$) Note : Thick lines in the x-axis indicate the location of the infant

굵은 선은 신생아의 위치를 나타내고 있다. 신생아 주위에서의 최대 속도크기는 0.082 m/s 로 나타났으며, 전체적으로 신생아의 다리에서 머리부분으로 이동하는 유동의 크기가 작을수록 높은 온도분포를 나타내고 있다. 신생아 정면인 1번 그래프는

다른 위치에서의 온도-속도분포 특징과 매우 다르게 공기 입구부분에서의 속도-온도분포가 가장 높은 값을 나타내며, 유입된 따뜻한 공기의 영향으로 입구와 머리부분의 사이의 온도분포가 신생아 다리부분의 온도분포보다 높게 나타났다. 신생아

위치(X축의 굵은 선)에서의 온도분포는 5개의 모든 그래프에서 29~30 °C로 1 °C의 온도차이를 나타냈으며, 보육기 설계의 주요한 요소인 매트리스의 10 cm 위의 단면에서도 같은 결과를 나타냈다. 이것은 신생아 주위에서의 온도차이가 작다는 것을 의미한다. 하지만, 벽근처에서는 벽에 가까울수록 온도차이가 크게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구에서 신생아 보육기 내의 주된 공기유동과 온도분포를 해석할 수 있었다. 입구에서 유입된 공기가 상벽과 직각으로 만나면서 매끄럽지 못한 공기유동을 나타냈고, 벽과 벽들이 직각으로 만나는 구석부분에서 크고 작은 와류가 발생하였다. 이와 같이 원활하지 못한 공기유동에 의하여 보육기에서 에너지 손실이 예상된다. 이러한 에너지 손실을 최소화하기 위하여 보육기 설계 시에 각진 구석부분을 최소화하고 가능하면 유체의 흐름에 저항이 적게 보육기를 유선형으로 설계하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 그러나 보육기 외벽의 가공에 따른 어려움으로 이와 같은 구조가 바람직하지 않다면 신생아의 측면으로부터 유입되어 반대쪽 측면으로 유출되는 공기유동이 보다 효율적일 수 있다. 또한 유입된 대부분의 공기가 상벽쪽으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 입구 속도를 적절히 줄여서 보육기의 윗부분으로 공기가 서서히 흐르도록 설계하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 습도 문제가 고려되지 않았으므로 이에 대한 영향은 알 수 없었으나 향후 계속된 연구에서 이를 고려할 예정이다.

결 론

압력기반의 유한체적법을 이용하여 신생아 보육기 내의 삼차원 정상난류유동과 열전달을 해석하였다.

신생아의 시상면과 평행한 단면(y축 단면)의 속도분포는 입구에서 유입된 공기가 좌측벽에서는 윗방향으로, 상벽에서는 우측으로, 우측벽에서는 아랫방향으로, 바닥면에서는 좌측으로 커다란 와류가 주된 공기유동이었다. 신생아의 횡단면과 평행한 단면(x축 단면)의 속도분포는, 좌측벽에서는 입구에서 강하게 유입되는 공기의 영향으로 나타난 커다란 두 개의 와류가 보육기 중앙부분에서는 관찰되지 않고 서로 다른 방향의 공기가 섞이면서 매우 복잡한 유동을 나타냈다. 전두면과 평행한 단면(z축 단면)의 속도분포는 출구에서 입구쪽으로의 공기유동이 지배적이었다. 신생아 주위의 속도크기는 0.076 m/s 이하로 나타났고 신생아 좌우측의 속도성분은 굴곡져 있는 전방벽의 영향으로 대칭적으로 나타나지 않았다.

신생아 보육기 내의 온도분포는 27~34 °C(300~307 K)로 나타났고, 신생아의 목에서 최대온도를 나타냈고 외벽에서 최저온도를 나타냈다. 입구부분의 온도분포가 출구부분의 온도분포보다 약 1~2 °C 정도 높게 나타났으며, 신생아 주위에서의 온도분포는 301~303 K의 온도분포를 나타냈다. 신생아 체표면은 29~34 °C(302~307 K)의 온도분포를 나타냈으며, 속도 크기가 큰 다리부분에서의 온도분포가 속도 크기가 작은 머리부분에서의 온도분포보다 낮게 나타났다.

입구에서 유입된 공기가 상벽과 직각으로 만나면서 매끄럽지 못한 공기유동을 나타냈고, 벽과 벽들이 직각으로 만나는 구석부분에서 크고 작은 와류가 발생하여 열손실이 다소 많음을 알 수 있었다. 보육기 내의 열손실을 최소화하기 위하여 보육기 외벽의 각진 구석부분을 최소화하고 유체의 흐름에 저항이 작은 유선형으로 제작하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 또한 강하게 유입된 대부분의 공기가 상벽쪽으로 이동하여 에너지가 손실된 공기가 신생아의 위치로 이동하는 것을 방지하기 위하여 입구 속도를 적절히 줄여서 신생아가 위치한 부분으로 공기가 직접 이동할 수 있도록 설계하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 이러한 단점들을 보완한다면 좀더 효율적인 보육기 설계가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. 홍창의 편, "소아과학", 대한교과서 주식회사, 1993
2. 이상주 편, "소아과 개요", 현문사, 1991
3. E. N. Hey and L. E. Mount, "Heat losses from babies in incubators", Arch. Dis. Childh., Vol. 42, pp. 75-84, 1967
4. F. Telliez, V. Bach, S. Delanand, B. Bouferrache, G. Krim, and JP Libert, "Skin derivative control of thermal environment in a closed incubator", Med. Biol. Eng. Comput., Vol. 35, pp. 521-527, 1997
5. H. Karlsson, R. Olegard and K. Nilsson, "Regional skin temperature, heat flow and conductance in preterm neonates nursed in low and in neutral environmental temperature", Acta. Paediatr., Vol. 85, pp. 81-87, 1996
6. T. Yamaguchi, S. Hanai, H. Horio, and T. Hasegawa, "An application of computational fluid mechanics to the air flow in an infant incubator", Ann. Biomed. Eng. Vol. 20, pp. 497-503, 1992
7. T. Hasegawa, H. Horio, H. Okino, TW. Taylor, T. Yamaguchi, "Three - dimensional visualization of air flow in infant incubators using computational fluid mechanics", Biomed. Instrum. Technol., Vol. 27, No. 4, pp. 311-317, 1993
8. CFD Research Corporation, "CFD-ACE theory manual version 4.0", 1998
9. J. P. Van Doormaal, and G. D. Raithdy, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows", Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp. 147-163, 1984
10. A. T. Johnson, "Biomechanics and exercise physiology", Wiley & sons, 1991