전기오븐의 강제대류 열전달 특성 연구

노 선 종[1], 조 성 호[2], 김 형 식[2], 곽 동 성[2]

A numerical analysis of forced convection heat transfer in an electric oven

Sun Jong Noh, Cho seong ho, Hyeong Sik Kim, Dongseong Kwag

The heat transfer rate in an oven is very important for the quality of cooking food. For a robust performance design in an electric oven, forced convection has been used rather than natural convection, in bake and convection mode. Forced convection heat transfer in a vented electric oven has been numerically evaluated using the commercial software FLUENT. CFD modeling of the electric oven involves three-dimensional, steady state, MRF fan model and DO radiation model. In this study, the electric oven cavity and fan modules are not simplified. Other research shows that the boundary condition can often lead to non-physical solutions, such as reverse flow at the top vent. To remove this non-physical solution, control volume has been expanded at the nearby vent. This numerical analysis has been performed with dedicated experimental support. The results show that there is less than a 2.2% difference between the simulation and experimental data for the temperature profile of food. From this research we can use this oven simulation technique to make a better convection system in an electric oven.

Keywords: 전산유체역학(CFD), 복사열전달(radiation), 전기 오븐(electric oven), DO model

1. 서 론

현재까지 전기오븐을 개발 하는데 있어서 시험적인 방법이 수치 해석 적인 방법 보다. 제품 개발에 더 많이 사용 되고 있지만, 하드웨어의 발달과 수치해석 기법의 발달로 인하여, 제품 개발에 있어 점점 수치해석에 의존도가 높아져가고 있다. 그러나 여전히 어려움이 존재 한다. 전기오븐은 형상이 복잡하며, 매우 작은 틈 사이로의 유동이 중요하고, 복사 열전달이 수반되고 있어 수치해석은 개발에 적용하기 힘들다. 제품 자체가 복사 열전달이 수반되는 자연대류인 경우가 많고, 열전달은 제어 로직에 의하여 비정상상태 특성을 나타내고 있다. 그러한 이유로 많은 연구들이 비정상상태 수치해석에 관해서 이루어지고 있다. Hitesh Mistry et all.(2006)은 비정상상태에서 broil과 bake cycle에 대한 연구를 수행하였고, 전기 오븐 자연대류 해석에서 발생하는 수치적인 오류, 즉 상단에 있는 vent를 통해서 공기가 내부로 들어오는 물리적으로 맞지 않는 결과를 해결하기 위하여 vent에 압력을 하단 부의 gasket이 없는 부분을 통해서 들어오는 부분보다 낮은 압력 경계조건을 설정함으로써 연구를 수행하였다. John P. Abramham과 Ephraim M. Sparrow(2002)는 단순화된 시험을 시작으로 복잡한 실제 모델에 대한 시험을 하여 vent의 유무에 따른 영향도에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 매우 단순화되어 있는 부하의 영향을 수치해석적인 연구를 추가적으로 수행하여, 새로운 부력 모델에 대하여 제시 하였다. Piter verboven et all.(2000)은 오븐에 강제대류에 대한 연구를 등온 공기로 수행을 하여, 유속에 대한 평가를 수행하였다. 많은 연구원들이 이처럼 비정상상태 혹은 매우 단순화된 모델로 연구를 수행하고 있다. 그러나 이러한 연구들은 빨라진 전기 오븐 개발 프로세스에서 실질적인 도움을 주기 힘들다. 비정상상태 해석의 경우는 해석시간의 과도함이 원인이며, 단순화 모델의 경우, 설계 변수로 모델의 구조적인 형태를 변경하는 경우가 많은데 그러한 부분이 반영 될 수 없기 때문이다. 이러한 부분을 보안하고자 전기 오븐 내의 요리가 균일하면서, 빠르게 될 수 있도록 fan으로 강제대류를 일으켜 적용하는 요

1 LG전자 AE본부 CAC 연구소
2 LG전자 HA연구소 / HA본부
* TEL : 055) 269-3517
* Corresponding author E-mail: sunjong.noh@lge.com

리 모드를 정상상태 수치해석으로 적용하고, 형상을 단순화 하지 않고 연구를 수행하였다.

2. 지배 방정식 및 수치해석 방법

지배방정식은 아래와 같고, 정상상태 해석을 수행하였으며, 난류에 대해서는 standard $k\epsilon$ model을 적용 하였고, 난류모델의 적절성을 평가하기 위하여 realizable과 rng model에 대해서 비교를 해보았다. 습기가 있는 부하가 없는 상태에서의 건공기 시험과 비교를 하기위해서 공기의 밀도는 incompressible idea gas를 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overline{u_i u_j}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho k \overline{u_j})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G - \rho\epsilon \tag{3}$$

여기서, $G = \mu_t\left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right]\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_1\frac{\epsilon}{k}G - C_2\rho\frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$: turbulent eddy viscosity

여기서, σ_k=1.0, σ_ϵ=1.217, C_1=1.44, C_2=1.92, C_μ=0.09

$$\frac{\partial(\rho U_i \Theta)}{\partial x_i} = \frac{\partial J_i}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \overline{u_i \theta}\right) \tag{5}$$

전기오븐 내에서 복사의 영향을 반영 하기위하여 식(6)과 같이 회체복사로 가정하여, DO model을 적용 하였다. Hitesh Mistry et all(2006)은 복사 모델 중 DO model과 S2S model를 비교하여 오차가 0.2%정도 나타났지만, 해석수행 시간이 절반 정도인 S2S model을 사용 하였다. 그러나 S2S model을 사용하기 위해서는 geometry를 단순화해야 하고, view factor 계산이 추가로 요구되며, 그 계산시간이 본 해석을 수행하는 시간과 거의 같은 수준이서 본 연구에서는 비효율 적이라고 판단되었다. Geometry 변경이 설계인자인 경우에는 view factor를 재 계산 해야함으로 S2S는 비효율적이며, 그러한 경우에는 DO 모델이 적합하다고 할 수 있다

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r},\vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r},\vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r},\vec{s}')\Phi(\vec{s}\cdot\vec{s}')d\Omega' \tag{6}$$

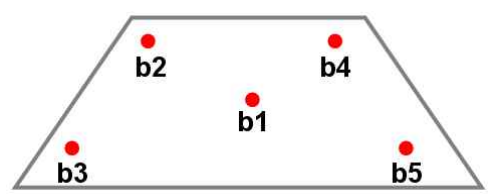
본 연구에서 상용 S/W인 FLUENT 12.1으로 수행되었으며, 강제대류는 fan에 의해서 발생되며, 이를 해석하기 위하여 MRF 기법을 사용하였다. 격자수를 줄이기 위하여 3,684,676개의 polyhedral mesh를 이용하였고, simple algorithm을 적용하였다. 수렴성을 판단하기위하여 scaled residual을 이용하여 energy는 1.0×10^{-8}, DO는 1.0×10^{-6} 나머지는 모두 1.0×10^{-4} 이하로 수렴 시켰다.

3. 결과 및 고찰

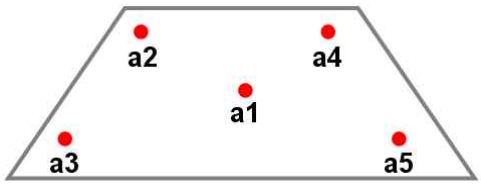
3.1 시험측정 위치

시험에서 측정은 k type의 thermocouple을 사용하였고, Fig. 1과 같이 벽면온도 6곳, 바닥으로부터 2단 wire rack에서 공간온도 5곳, 4단위치의 wire rack에서 공간온도 5곳을 측정 하였다. 벽면 온도는 경계조건을 평가하기 위하여 값이며, 성능평가를 위한 부분은 공간 2단과 4단의 공간 온도이다.

(a) wall points



(b) 4th wire rack points



(c) 2nd wire rack points

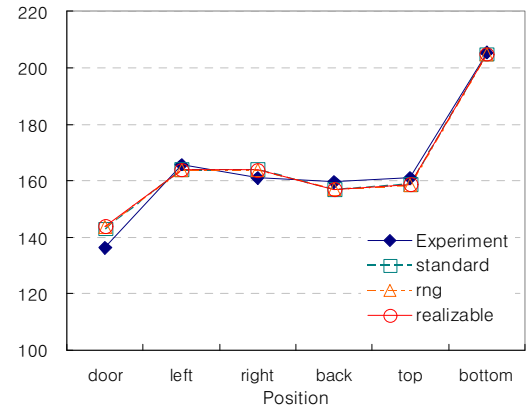
Fig. 1 measurement points on electric oven

3.2 난류모델 평가

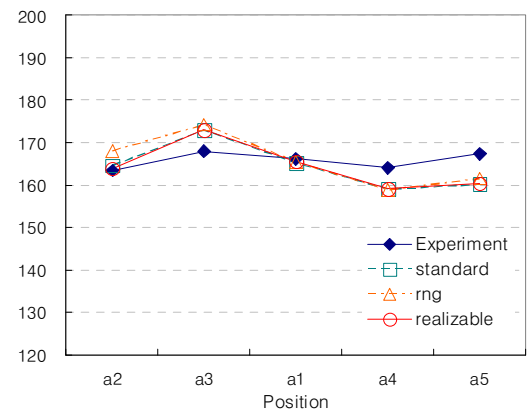
전기오븐의 경우 대부분 자연대류이며, 층류인 경우가 많다. Hitesh Mistry et all(2006)은 경우 transient 해석을 수행하여 Rayleigh number가 매우 다양하게 나타나고 있고, 이에 bake cycle과 broil cycle에서 층류일 때와 난류일 때를 해석을 수행한 결과, cavity 내부 온도가 3%정도의 차이가 발생하였지만, 층류로 해석한 결과가 온도 장에 있어 더 물리적으로 타당하여 층류로 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 fan에 의한 강제대류가 지배적이고, Reynolds number가 특성길이를 cavity 높이로 했을 경우 1,52,185이어서, 난류로 해석을 수행 하였다. 전기 오븐 convection bake mode 해석 수행 시 향후 계속 적용될 난류 모델을 선정하기 위하여 Fig. 2와 같이 난류 모델별 비교를 수행 해보았다. 벽면 온도는 Fig. 2(a)를 보면 door쪽 온도가 가장 시험 값과 오차가 크며, standard model은 5%, rng model은 5.4%, realizable은 5.6%으로 난류 모델별 차이는 매우 작은 것을 알 수 가 있다. 공간 온도는 Fig. 2에서 2단이 4단 보다 경향이 더 비슷하게 나오고 있으며, 2단 wire rack에는 rng model이 최대 오차가 3.8%로 가장 시험 값과 유사하며, 그 point는 a3 좌측 전방 부분이다. 그러나 rng model의 경우 a2위치에서도 다른 model에 비해서 오차가 큰 부분이 존재를 하기 때문에 경향성은 다른 model에 비해서 좋다고 말하기 어렵다. 4단 wire rack에서의 경우는 standard model이 최대 오차가 3.8%로 가장 작으며 그 point는 b1이며 측정 위치에 가운데 부분이다. 4단에서도 rng 모델의 경우 b5 point에서 다른 model에 비해서 튀는 모습이 보인다. 이러한 이유로 벽면 온도와 공간온도를 평가를 해보았을 때 난류 모델은 convection bake cycle의 경우 standard model이 가장 적합하다고 판단된다. Fig. 3은 센서가 있는 부분에 온도 분포이다. 전체적인 온도 분포는 난류모델 별로 큰 차이가 보이지 않는다.

3.2 Discretization

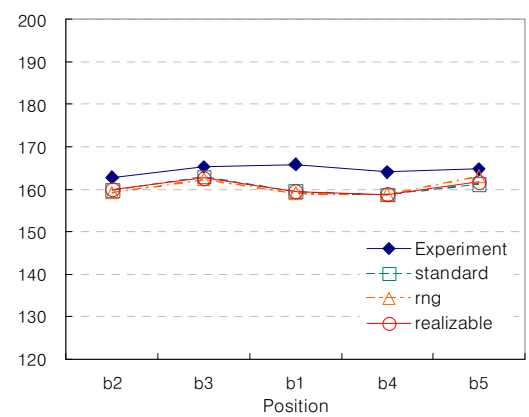
Tetrahedral mesh 혹은 polyhedral mesh와 simple algorithm을 사용하는 경우 공간 차분은 수렴성 문제로 first order upwind



(a)wall temperature



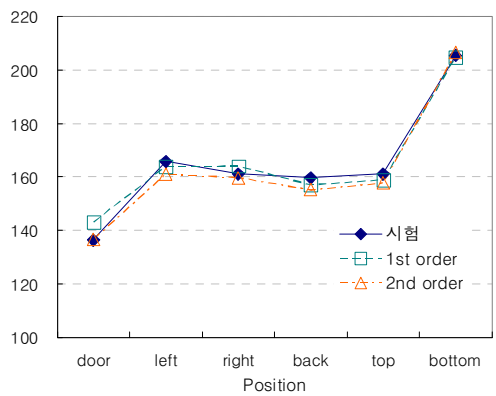
(b) air temperature on 2nd wire rack



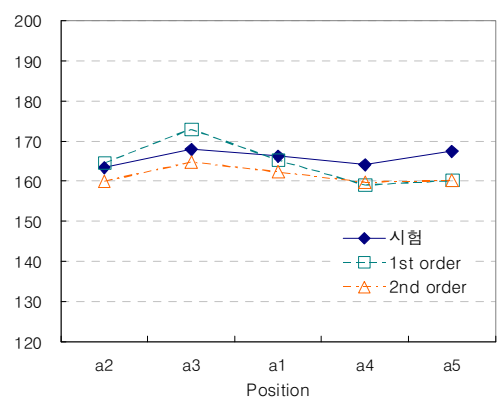
(c) air temperature on 4th wire rack

Fig. 2 comparison temperature at various turbulent model

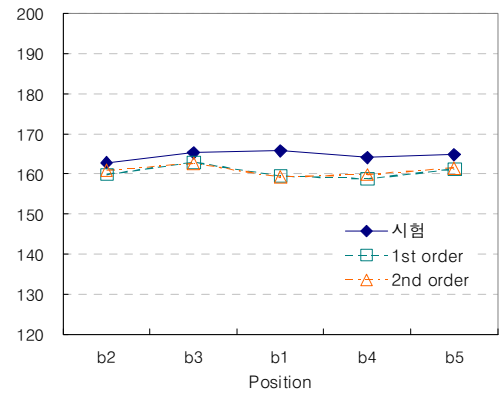
scheme을 적용 하는 것이 대부분이다. 본 연구에서는 second order upwind scheme과의 비교를 하기위하여, first order upwind scheme으로 수렴을 시킨 후, momentum, turbulence, energy, DO radiation 모두 second order upwind scheme으로 설정을 하고 residual은 first order upwind scheme과 같은 수준으로 수렴을 시켰다. Fig. 3(a)에서 벽면온도가 second order up wind scheme으로 변형 후 door 부분의 온도가 시험과 더 유사하게 변화가 되었으며, right 부분이 시험 보다 높게 예측되던 부분이 시험 값보다 낮게나왔다. 공간온도의 경우 Fig. 3(c)와 같이 4단에서는 거의 변화가 없다. 그러나 2단에서는 Fig. 3(b)와 같이 a3 point에서 시험값 보다 해석이 높게 예측 되던 부분이 second order upwind scheme을 적용하였을 때 낮게 나오게 되었다. 공간온도에서 최대오차는 2.2%이고, 절대 값 차이는 3.6℃ 수준으로 매우 양호하다. Fig. 3에서 난류 모델 변화에 따른 온도 분포 차이는 작지만, 공간 차분에 대한 영향이 큰 것을 알 수 있으며, high order scheme으로 적용 하였을 경우, bake chamber에서부터 전달되는 온도구배가 완화되는 모습을 보여준다.



(a) wall temperature

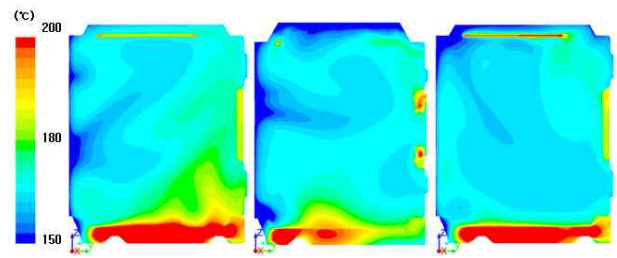


(b) air temperature on 2nd wire rack

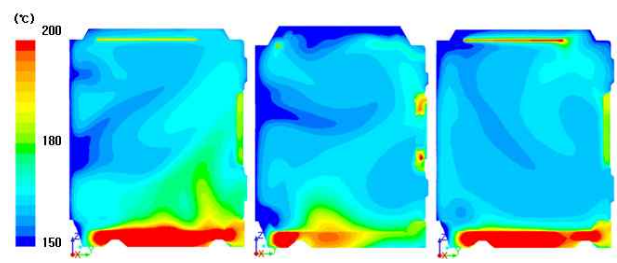


(c) air temperature on 4th wire rack

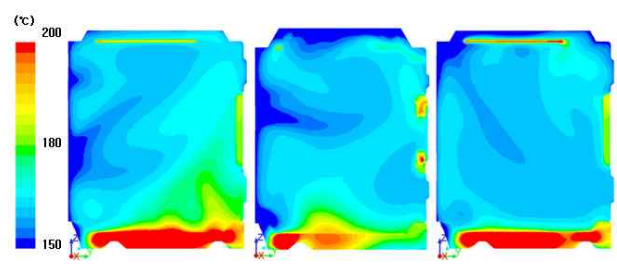
Fig. 3 comparison temperature at various turbulent model



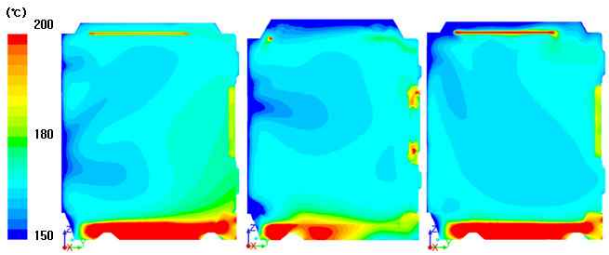
(a) temperature distribution of standard $k\epsilon$ mode with 1st order upwind scheme



(b) temperature distribution of rng $k\epsilon$ mode with 1st order upwind scheme



(c) temperature distribution of realizable $k\epsilon$ mode with 1st order upwind scheme



(d) temperature distribution of standard $k\epsilon$ mode with 2nd order upwind scheme

Fig. 4 temperature distribution with turbulent model and discretization

4. 결론

시험에 의존성이 높은 전기오븐 개발에 있어 수치해석을 적용하기 위하여 난류 모델 및 공간 차분에 대한평가를 수행하였다. 난류 모델은 $k\epsilon$ model 중 standard $k\epsilon$ model이 가장 적절하였고, 공간 차분에서 second order upwind scheme을 적용하는 것이 전체적으로 시험 값보다 높게 나오거나, 위치별로 차이가 크게 나던 것이 완화되고 있기 때문에 high order scheme을 적용하는 것이 적합하다고 판단된다. 난류 모델의 영향보다는 이산화의 영향이 큼을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 전기 오븐 convection bake mode 해석 수행을 위한 검증을 할 수 있었고, 해석 기술 방법을 정립하였다.

참고문헌

[1] 2006, Hitesh Mistry, Ganapathi-subbu, Subhrajit Dey, Peeush Bishnoi, Jose Luis Castillo, “Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens" *Applied Thermal Engineering,* Vol.26, p.2448-2456.

[2] 2002, John P. Abraham, Ephraim M. Sparrow, “Experiments on discretely heated, vented/unvented enclosures for various radiation surface characteristics of the thermal load, enclosure temperature sensor, and enclosure walls" *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol.45, p.2255-2263.

[3] 2002, Ephraim M. Sparrow, John P. Abraham, “Heat transfer coefficients and other performance parameters for variously positioned and supported thermal loads in ovens with/without water-filled or empty blockages" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, p.3597-3607.

[4] 2003, Ephraim M. Sparrow, John P. Abraham, “A new buoyancy model replacing the standard pseudo-density difference for internal natural convection in gases" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.46, p.3583-3591.

[5] 2004, John P. Abraham, Ephraim M. Sparrow, “A simple model and validation experiments for predicting the heat transfer to a load situated in an electrically heated oven" *Journal of Food Engineering*, Vol62, p.409-415.

[6] 2000, Pieter Verboven, Nico Scheerlinck, Josse De Baerdemaeker, Bart M. Nicolai, “Computational fluid dynamics modelling and validation of th isothermal airflow in a forced convection oven" *Journal of Food Engineering*, Vol43, p.41-53.