

전기오븐의 스팀 출구위치에 따른 내부유동에 대한 연구

Study on the Internal Flow of an Electric Oven with Variation of Steam Outlet Position

박영훈(Young Hun Park), 김유진(Yu Jin Kim), 정영만(Young Man Jung), 박원규(Warn-Gyu Park)[†]
부산대학교 기계공학부

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received April 22, 2013; revision received June 11, 2013)

Abstract The composite electric oven is one of the fixing utensil, various functions are required. Steam generating function, which is one of its functions, and allows various food cooking. The location of the outlet of the steam generator is designed around ease of installation, consideration of internal fluid is not. Distribution of the steam can not be non-uniformly. Accordingly, cooking time becomes longer, the energy consumption increases. As a result of the analysis, it was confirmed stagnation phenomenon of the internal flow through the interpretation of the calculations for the position of the outlet of the steam generator existing. Further, by computing the analysis of various locations of the outlet of the steam generator, we investigated the distribution and characteristics of the internal flow.

Key words Numerical simulation(수치해석), Electric oven(전기오븐), Steam generator(스팀발생기), Heat transfer(열전달)

[†] Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

기호설명

t : Time
 k : Turbulent kinetic energy
 u : Cartesian velocity
 x : Physical cartesian coordinates

그리스 문자

μ : Molecular viscosity
 ρ : Density
 ε : Coefficient of artificial dissipation
 τ : Derivative with respect to transformed time

하첨자

i, j : Indices in the computational domain associated with a node
 t : Derivative with respect to time

1. 서 론

조리기기는 다양성을 더해가고 있다. 조리기기중 하나인 전기오븐도 예외는 아니다. 특히 하나의 제품에 여러 가지 기능을 같이 구현한 복합제품은 대류오븐기능과 수분 보충 및 조리방법을 더해주는 스팀기능까지 다기능 모델들이 전기오븐의 사용범위를 넓혀주고 있다.

현재 대부분의 복합전기오븐의 스팀발생기의 위치는 장작의 편의성 위주로 설계되어 있으며, 내부유동을 고려하지 않은 설계로 인해 수분공급의 불균형이 발생한다. 과거 전기오븐의 경우 대부분 자연대류이며, 층류인 경우가 많다. 그러나 현재 대부분에 오븐에는 팬을 이용해 강제대류를 적용하여 전기오븐 내의 요리가 균일 하면서, 빠르게 될 수 있도록 하고 있다.

Abraham과 Sparoow⁽¹⁾는 실험을 통해 전기오븐의 온도 분포에 대해 연구를 하였으며 Verboven과 Scheerlinck와 Baerdemaeker 그리고 Nicolai⁽²⁾는 오븐에 강제대류에 대한 연구를 등온공기로 수행을 하여 유속에 대한 평가를 수행하였다. Choi yoon hwan와 Kim dong kyun⁽³⁾의 경우에는 구동조건에 따른 전기 오븐의 온도변화를 해석하여 온도변화에 따른 연구를 수행하였다. Noh Sun Joing과 Cho seong ho 그리고 Kim hyeong sik⁽⁴⁾은 오븐에 강제대류에 대해 온도변화에 대한 평가를 하였으며 정상상태 해석을 하여 난류모델에 따른 실험값과의 온도 차이에 대해 연구를 하였다. 이처럼 대부분의 전자레인지 유동연구는 매우 단순화된 모델로 연구를 수행하고 있다. 그러나 이러한 연구는 빨라진 전자레인지 개발 기간에 실질적인 도움이 어려우며, 단순화모델은 구조적인 형태를 변경하는 부분이 반영될 수 없다.

본 연구는 전산유체해석을 위한 경계조건 데이터를 확보하기 위해 고내 온도 분포 및 유속측정 실험을 하

였다. 해석모델의 내부형상을 단순화 하지 않고, 전기 오븐의 온도변화를 고려하기 위하여 Energy equation term을 적용시켰다. 그리고 스팀발생기출구 위치에 따른 기류 및 유동특성에 대한 연구를 통해 기류분포에 대해 확인을 하였다.

2. 실험장치 및 방법

온도측정은 900°C 이상까지 측정이 가능한 k-type 열전대를 이용하였으며, 데이터 로거를 통해 20분간 구동 후 실험값을 도출하였다. 내부유동측정실험은 Testo 435 측정장비에 Testo 437 Probe를 장착하여 측정을 하였다.

해석결과 온도와 실험 온도와 비교를 위해 고내의 온도 분포에 대하여 실험을 수행하였다. 측정위치는 5 곳으로 음식물이 주로 놓이는 a1지점을 중심으로 조리 가능한 최대높이 a4까지를 기준으로 하여, 각각의 벽면에서 10 mm 떨어진 곳에서 측정을 수행하였다. 평균온도의 측정은 고내 내부가 충분히 가열된 400초 이후의 구간을 이용하였으며 측정위치는 Fig. 1과 같다.

고내유동은 Fig. 2와 같이 1개의 입구와 4개의 출구로 이루어진 뒷면에서 이루어지며, 시간에 따른 속도의 변화가 없기 때문에 고정값으로 사용하였다. 각 포인트에 Testo 437 probe를 이용하여 각 지점의 유속을 오버랩 시켜 평균값을 도출해 경계조건에 이용하였다.

히터표면온도의 편차 및 경계조건의 도출을 위해 피복이 철로 이루어진 열전대를 이용하여 Fig. 3과 같이 히터의 표면온도를 측정하였다. 히터표면의 위치에 따른 온도 편차를 알기 위해 4개의 포인트를 사용하였으며 아론 세라믹 접착제를 이용해 고열에 대응한 접착을 하였다.

3. 해석방법

3.1 지배방정식

지배방정식은 아래식과 같고, 비정상상태 해석을 수행하였으며 난류에 대해서는 Standard k-ε model을 적용 하였다.⁽⁶⁾ 실험과 비교를 하기 위해서 공기의 밀도는 비압축성가스를 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - p\epsilon \quad (3)$$

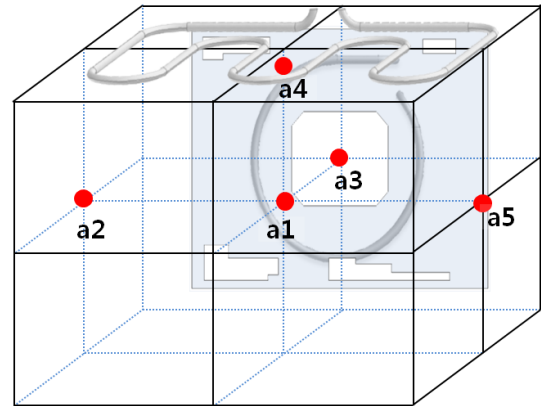


Fig. 1 Measurement point of temperature on oven.

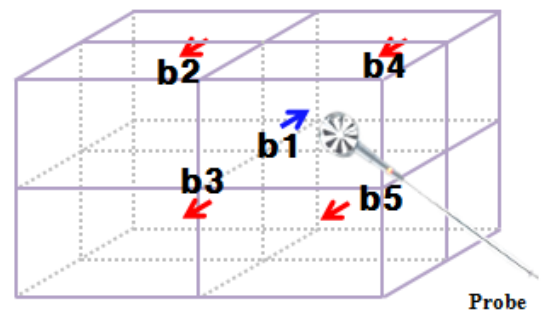


Fig. 2 Measurement point of convection fan velocity on oven.

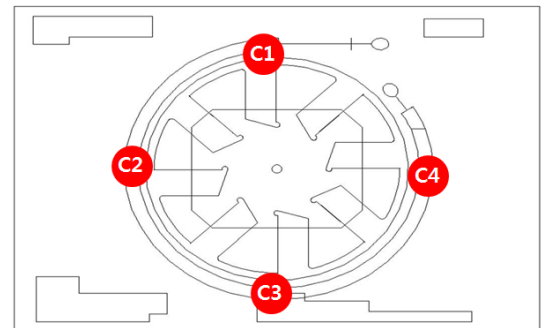


Fig. 3 Measurement point of heater surface.

여기서,

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i}$$

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

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

여기서, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$,
 $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ 의 Constant 값을 사용한다.

본 연구에서 상용 소프트웨어인 Fluent V.14를 이용하였으며, 팬의 조건은 실험으로 측정 후 경계조건에 적용하여 해석을 수행하였다.

3.2 수치해석 방법

각 위치에 따른 경계조건은 Table 1과 같다. 전기오븐의 상부와 뒷면에 존재하는 열원에 대한 처리는 열원 표면에 실험으로 측정 후 시간에 따른 Heater profile을 적용하여 경계조건에 이용하였다.

전기오븐의 내부의 벽면경계조건으로 Coupled boundary condition을 적용시켰다. Coupled boundary condition은 Thin wall이 Computational domain안에 존재 할 때 자동적으로 Shadow wall이 생성되게 된다. 내부의 온도 및 유속을 이용해 열전달 계수를 산정되는 방식으로 본 연구의 벽면 열전달조건으로 사용하였다.

전기오븐에 사용하는 대류 팬의 유동속도는 축을 기준으로 반경 방향으로 서로 다른 속도분포를 가지게 된다. 가장 정확한 경계조건을 적용하려면 3차원 Fan 형상을 모델링하여 실제 팬구동에 의한 유동을 구현하는 것이 해석의 정밀도를 향상시키는 방안이다.⁽⁵⁾ 그러나 본 연구에서는 스팀발생기에서 나오는 유동위치에 대한 것을 변수로 하기 때문에 Fan 형상은 고려하지 않고 실험을 통해 Fan에서 토출되는 유속을 측정하여 경계 조건에 대입시켜 해석시간의 단축을 꾀하였다.

3.3 해석모델

전기오븐 내부유동 해석을 위하여 3차원 CAD프로 그램인 UG NX를 이용하여 모델을 형성하였다.

유동에 영향을 주지 않는 부분에 대하여 간략화를 하였으며, Fig. 4는 전자레인지 내부의 유동에 대한 3차원 모델이며 상부 및 뒷면에는 각각 출력 1300 W, 700 W의 시즈 히터가 부착되어 있다.

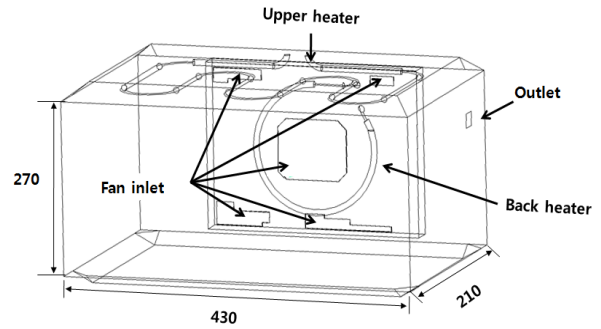


Fig. 4 Computational domain of electric oven.

해석시간 단축 및 해석의 정확도를 위해 정렬격자를 이용했으며, 격자수는 130만 개, Time step은 0.05 초, 각 Step의 반복계산 횟수는 15회로 해석을 수행하였으며, Physical time은 실험과 같은 1200초 구동 기준으로 해석을 수행하였다.

스팀발생기의 출구 위치는 현재 전기오븐에서 사용하고 있는 모델을 기본으로 하여 설치를 하였으며 출구의 크기는 직경 6.3 mm로써 현실적으로 설치가 가능한 고내 좌측 및 뒷면 좌측에 출구를 생성하였다.

4. 실험 및 해석결과

4.1 고내 온도분포 및 유속측정 실험

고내의 온도를 일정하게 제어해주는 써미스트가 작동하는 시점은 400초 이후로 써미스트를 통해 Sheath heater의 on/off를 제어한다. 써미스트 처음 작동하는 400초를 기준으로 하여 평균온도를 측정하였다.

고내의 각 지점의 온도분포실험 결과 써미스트가 작동하는 400초 이후 평균온도는 209°C~260°C사이에서 분포하며 고내의 좌우측에서의 온도가 다른 지점에 비해 낮다. 이는 Sheath heater의 위치의 영향으로 인해 발생하게 되는데, 시즈히터가 위치한 부근에서 온도가 높게 발생하였다. 좌우 위치 a2와 a5의 온도편차는 약 12°C가 발생하였다.

유속측정 결과 고내 좌측에서 유속값이 비교적 빠르게 분포되어 있다. Table 2에서 각 지점의 평균 유속 값을 나타내었다.

Table 1 Boundary condition of electric oven

Position	Boundary condition
Fan inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Wall	Thickness effect
	Shell conduction
	Coupled condition

Table 2 Inlet velocity

위치	유속(m/s)
b1	1.44(유입)
b2	2.81(유출)
b3	2.63(유출)
b4	1.46(유출)
b5	2.02(유출)

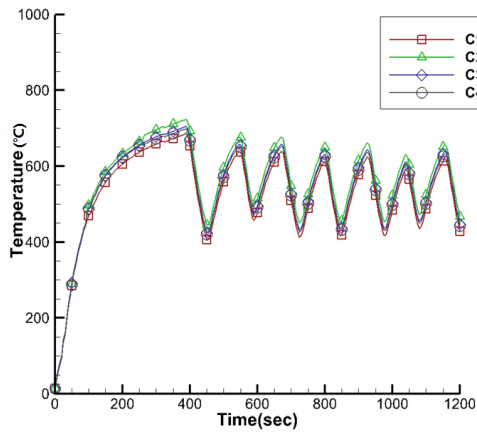


Fig. 5 Heater surface temperature.

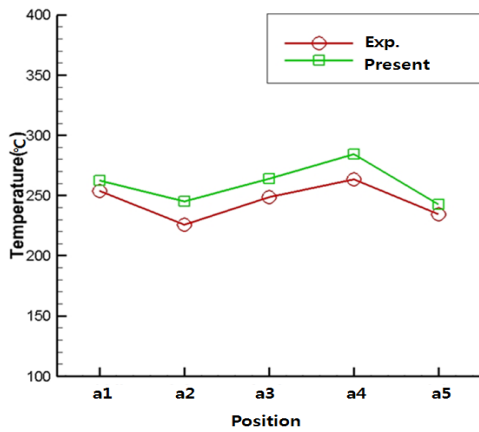
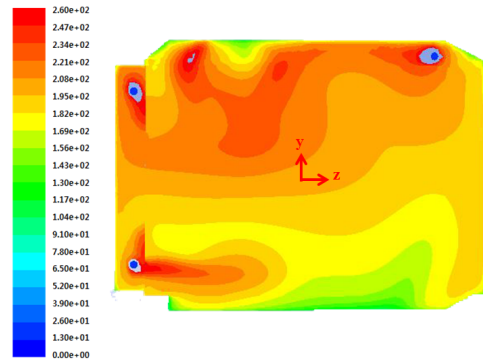


Fig. 6 Comparison average temperature at various positions.

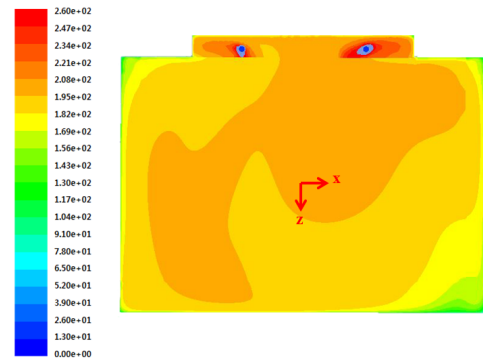
Fig. 5는 시간에 따른 각 위치별 온도 그래프이며, 히터표면의 온도분포 실험 결과 400초 이후 평균 온도는 520°C~560°C이며 최고온도는 730°C로 측정되었다. 히터의 위치에 따른 온도 편차는 약 10°C 내외였으며, 시간에 따른 온도 측정을 통해 히터표면의 경계조건에 사용하였다.

4.2 내부유동 해석

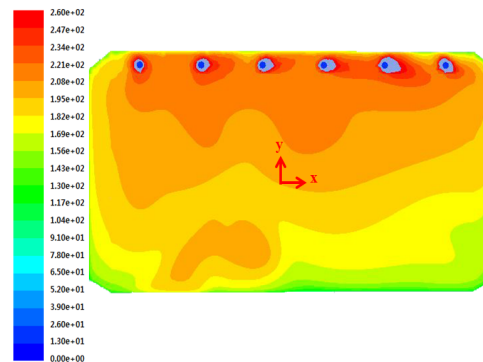
내부유동 해석을 통하여 실험값과 비교를 하였다. 온도변화에 따른 유속의 영향을 표현하기 위해 온도에 대한 실험값과 해석값의 비교가 필요하다. Fig. 6를 통해 실험값과 해석값의 비교를 하면 실험값과 해석값 온도의 오차는 0.8%~6.0%사이로 나타났다. 전체적으로 해석값이 실험값에 비해 온도가 높게 나타났는데, 원인은 실험시 전기오븐의 도어 틈과 제품의 유격 부위로 인한 열 손실로 인해 오차가 발생하여 오차가 발생하였다. Fig. 7는 고내 중앙을 중심으로 각 평면마다



(a) y-z cross section



(b) x-z cross section



(c) x-y cross section

Fig. 7 Temperature distribution at 500 seconds in numerical result.

Physical time 500sec 기준으로 고내 온도분포를 나타내었다. Fig. 7(a)에서 그림의 우측이 도어부분이며, 히터가 위치한 윗면과 뒷면에 고온이 분포함을 확인 할 수 있다. Fig. 7(b)에서는 경계조건에서 주어진 유속으로 인해 좌우 온도편차가 발생함을 확인 할 수 있다. Fig. 7(c)의 온도분포를 살펴보면 (a)에서와 마찬가지로 히터와 가까운 윗면에 고온이 분포함을 확인하였다.

4.3 스팀발생기 출구 위치에 따른 해석

스팀발생기 출구부의 최적지점을 찾기 위해 유동해석을 하였다. 출구는 기존의 스팀발생기의 크기를 고려하여 위치를 선정하였다.

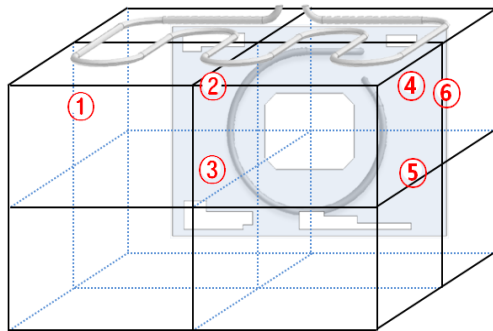
출구의 위치는 Fig. 8(a)와 같으며 기존의 스팀 출구부는 '①' 위치이며 Fig. 8(b)에서 출구의 위치에 대한 자세한 치수를 나타내었다.

스팀출구에서의 물성치는 비압축성 가스이며 정밀저울을 이용해 스팀발생기에 들어가는 유량을 측정할 결과 10초당 1.2 g의 유량이 측정되었다. 이 유량이 100% 스팀변환으로 가정하여 스팀출구부의 경계조건을 Mass flow inlet으로 사용하였으며, 연속방정식을 통해 직경 6.3 mm 기준의 유속은 3.84 m/sec을 구할 수 있었다.

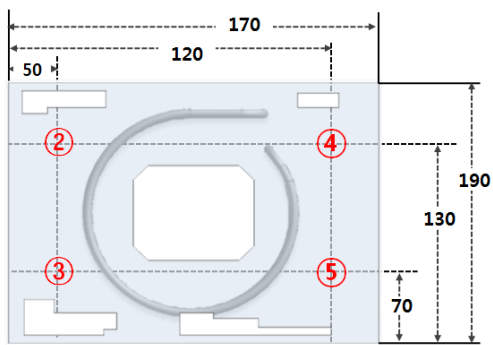
기존 스팀발생기의 유동을 Fig. 9(a)를 통하여 확인하면 왼편에서 나온 유동이 Fan의 입구 유속으로 인해 왼편에서 정체되어 있는 모습을 볼 수 있다.

그로 인해 고내 내부의 스팀전달이 느리며 음식이 놓이는 중앙에 수분의 불균형이 생긴다. Fig. 10(f)의 경우에는 Fig. 9(a)와 마찬가지로 유동정체가 발생하였다. Fig. 9(b), Fig. 9(c)를 보면 스팀발생기의 유동이 기존의

스팀발생기에 비해 넓게 분포됨을 알 수 가 있다. 그에 비해 Fig. 10(d), Fig. 10(e)는 유동이 우측에 정체되어 스팀발생기출구를 변경한 효과가 크지 않았다. 그 원인은 정면에서 바라봤을 때 유속이 좌측에 비해 우측이 낮으며, 우측의 Inlet 면적이 좌측의 Inlet 면적에 비해 적어 유량에서 큰 차이가 발생하였다. 그로 인해 고내 우측에 정체현상이 발생하였다.

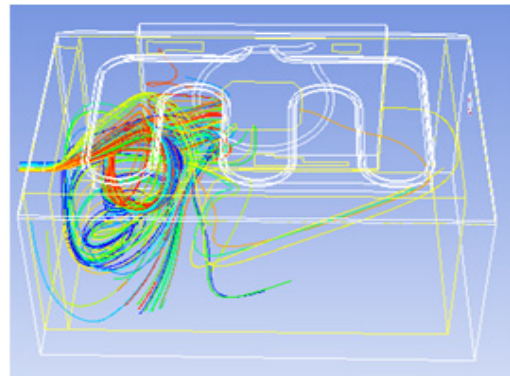


(a) Steam generator location points

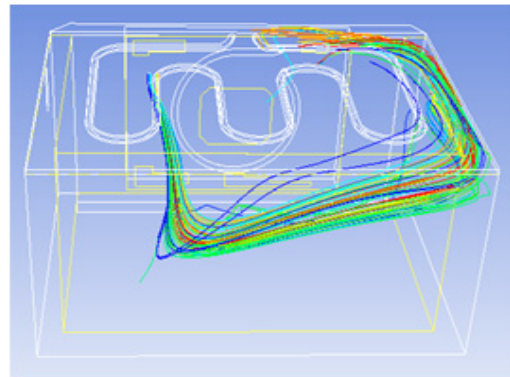


(b) Dimension of steam generator points

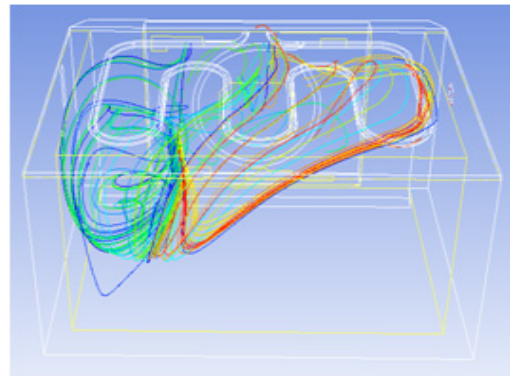
Fig. 8 Steam generator outlet positions.



(a) Outlet point ①

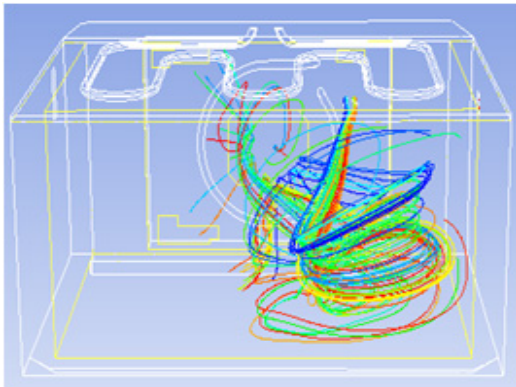


(b) Outlet point ②

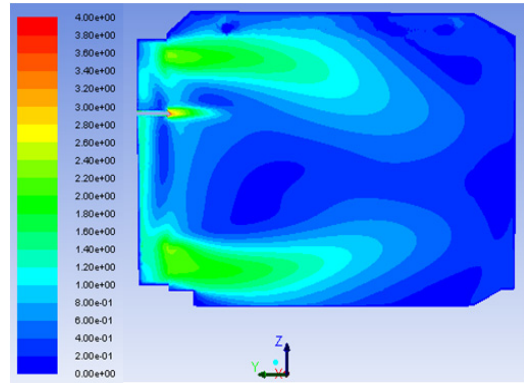


(c) Outlet point ③

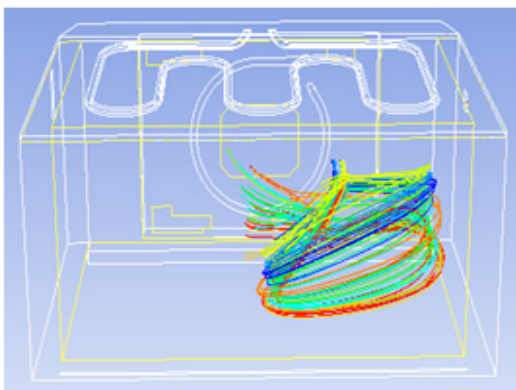
Fig. 9 Steam generator outlet positions(left).



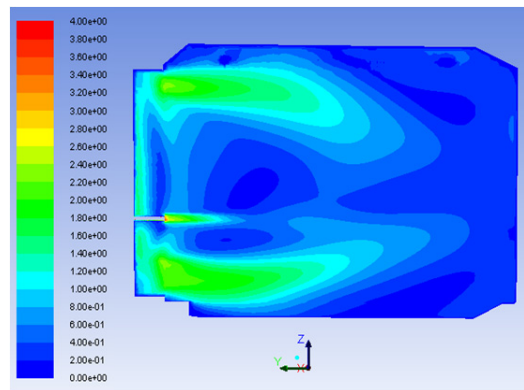
(d) Outlet point ④



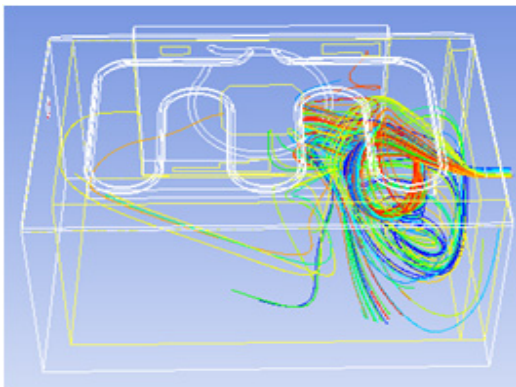
(a) x-z plane velocity point ②



(e) Outlet point ⑤



(b) x-z plane velocity point ③



(f) Outlet point ⑥

Fig. 10 Steam generator outlet positions(right).

Fig. 11은 Fig. 9의 (b), (c) 출구면의 x-z의 속도분포를 나타내었다.

Point ②, ③을 비교해 보면 Point ③의 경우 Fan 유속의 영향으로 인해 스팀발생기 출구의 유동이 Point ②에 비해 고내 중앙에 더욱 길게 분포함을 알 수 있었다.

Fig. 11 Velocity distribution with outlet location at x-z plane velocity.

5. 결 론

본 연구에서는 스팀발생기의 출구위치에 따른 전자레인지 내부 유동을 조사하였으며 아래와 같은 결론을 도출 할 수 있다.

- (1) 기존의 스팀발생기 출구위치에서는 해석결과 고내 좌측부에 유동이 머물러 있으며 그로 인해 음식 조리 시 수분의 함유량의 차이가 발생한다.
- (2) 전기오븐의 유동해석에 대한 해석모델을 제시함으로써 해석시간의 단축을 기대 할 수 있다.
- (3) 전기오븐 고내의 스팀발생기 출구위치에 따라 유동의 분포의 차이가 발생하였으며, 위치에 따라 큰 차이가 발생하였다.
- (4) 좌우대칭의 형상이라도 유속과 유량의 차이로 인해 유동분포가 달라졌으며, 기존의 위치보다 뒷면에 출구위치를 설정하는 것이 보다 효과적이다.
- (5) 스팀발생기의 출구는 정면기준으로 우측보다 좌측

위치에서 유동정체현상이 적었으며, 스팀발생기의 설치는 전기오븐의 옆면보다 뒷면에 장착하는 것이 유동분포에 유리하다.

참고문헌

1. John P, Abraham and Ephraim M. Sparrow, 2002, 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, pp. 2255-2263.
2. Pieter Verboven, Nico Scheerlinck, Josse De Baerdemaeker and Bart M. Nicolai, 2002, Computational fluid dynamics modelling and validation of the isothermal airflow in a forced convection oven, *Journal of Food Engineering*, Vol. 43, pp. 41-53.
3. Yoon Hwan Choi and Dong Kyun Kim, 2002, Temperature distributions of inner microwave for various working conditions, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 792-797.
4. Sun Jong Noh, Seong Ho Cho, and Hyeong Sik Kim, 2011, A numerical analysis of forced convection heat transfer in an electric oven, *Proceeding of the Korean Society for Computational Fluids Engineering*.
5. Veli, D., Planini, M., Tomas, S., and M. Bili, 2003 Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying, *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp. 97-102.
6. ANSYS FLUENT User's Guide, 2010.