

## 메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 유동해석에 관한 연구

이진석\*,이용후\*,김균석\*\*,윤정인\*\*\*,이도형\*\*\*

### A Study on the Flow Analysis of Flat Burner using Metal Fiber

Jin Seok Lee\*, Young Hoo Lee\* and Do Hyung Lee\*\*

**Key Words :** Flow Analysis(유동해석), Flat Burner(플랫 버너), Metal Fiber(메탈화이버)

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the flow analysis for the optimum design of flat burner using the surface combustion technique. The numerical analysis for flows were compared with the experimental results in order to get a basic database for establishing the integrated numerical method of combustion flows. As results, we knew the current numerical calculation method had confidence with error range under 6% in compare with the experiments.

#### 1. 서론

현재의 산업용 연소기는 고효율, 저공해, 고른 열플럭스 등 에너지 획득과 저공해 연소를 통한 환경적인 면에서 많은 개발이 진행되고 있다. 최근 들어 냉난방기기에서는 공간적인 제약을 극복하기 위한 콤팩트화도 많이 시도되고 있다. 하지만 기존의 확산 연소방식에 의한 연소기기의 경우, 연소효율과 환경오염의 상반되는 경향과 함께 화염에 의한 국부적인 가열로 인해 최적의 연소기기 개발에 많은 제약을 받고 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해 다공성 물질인 세라믹을 이용한 예혼합 연소방식이 개발되었지만 가공의 어려움과 연소기 형상의 다양화에 부합하지 못하면서 최근 들어서는 내열합금섬유를 이용한 연소기가 많이 개발되고 있다. 내열합금섬유를 이용할 경우, 연소면에서의 고른 열플럭스를 얻을 수 있으며 사용조건에 따라 복사 및 대류 에너지를 이용하므로 고효율과 저공해가 가능하다. 또한 화염면이 아주 짧기 때문에 연소기기를 콤팩트화 할 수 있다. 하지만 이와 같은 내열합금섬유나 다공성 세라믹 등의 다공성 재료를 이용한 연소기기의 경우 연소부에 유입되는 연료와 공기의 혼합도나 속도분포의 균일성이 연소효율을 높이는 중요한 인자가 되므로 주의할 필요가 있다.

본 연구는 내열합금인 메탈화이버를 이용하여 표면연소용 플랫버너를 개발하기 위한 기초 연구로써, 연소부에 유입되는 혼합류의 속도를 균일하게 하기 위해 연소기 내부에 설치된 막힘판과 천공판 전후, 그리고 메탈화이버 전후에서의 유동실험 및 상용코드를 이용한 수치해석을 통해 수치해석의 신뢰성을 확보하고 확보된 신뢰성을 바탕으로 보다 경제적인 연소기를 개발하기 위한 기초 자료를 확보하기 위해서 본 연구를 수행하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 플랫 버너의 실험장치도를 나타낸 것이다. 연소용 공기는 원심형 송풍기(5 HP)의 모터에 장착된 인버터(3.75 kW)를 통해 1차 제어된다. 공급된 공기는 유로의 밸브와 함께 디지털 유량계(KFC DIG-SID)를 통해 최종적으로 실험에 필요한 공기를 공급한다. 대표단면에서의 속도측정은 열선 풍속계(Nihon Kagaku)의 Hot-wire Probe(Kanomax 02521R-T5)를 자동 3축 이송대에 설치하여 측정하였다. 측정 데이터는 저장용 Computer에 저장되고 Hot-wire의 보정은 Pitot tube(Dwyer model 167-12")를 통해 보정하였다.

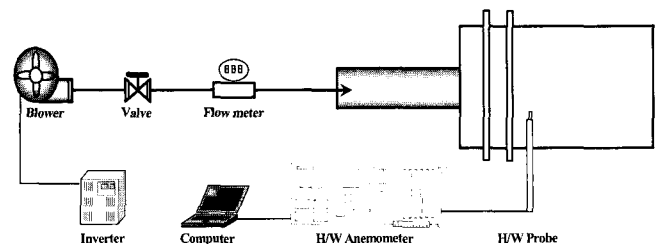


Fig. 1 The experimental apparatus including Hot-wire anemometer system

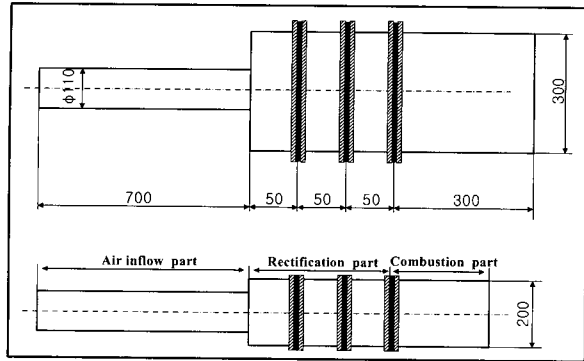
Fig. 2는 본 연구에서 사용된 메탈화이버를 이용한 플랫 버너의 상세도를 나타내었다. (a)에 나타낸 전체 연소기는 크게 공기유입관부(Air infow part), 정류부(Rectification part), 연소부(Combustion part)의 3부분으로 나눌 수 있다. 공기유입관부는 길이 700 mm, 직경 110 mm이다. 정류부에는 배플(Baffle), 천공판(Perforation Panel), 메탈화이버의 전단부로 나누어지고, 각각의 설치물 간의 간격은 50 mm이다. 연소부의 내부면적은 300×200×300 mm이며 공기유입부를 제외한 연소기의 전체길이는 450 mm인 직사각형의 형상으로 실제 연소기와 동일하게 아크릴로 제작하였다. (b) 배플의 경우 공기유입관에서 유입되는

\* 부경대학교 대학원, jinstone@mail1.pknu.ac.kr

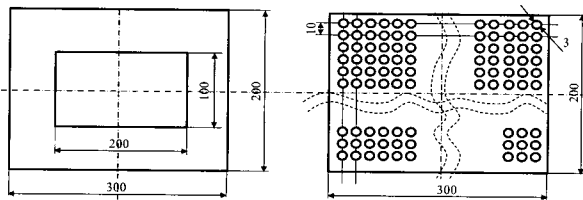
\*\* LG전선 기계연구소, ilas@ofmail.lgmach.co.kr

\*\*\* 부경대학교 기계공학부, leedh@pknu.ac.kr

혼합류가 연소기의 중심에 집중되어 유입되는 것을 분산시키기 위해서 설치된다. (c) 천공판의 경우 직경 3 mm의 구멍을 10 mm 등간격으로 551개를 뚫었으며, 이는 배플에서의 흐트러진 혼합류를 연소부의 메탈화이버에 안정적이고 균일하게 전달하기 위해 설치된다. (d)는 본 실험에 사용한 메탈화이버의 직접사진으로 Acotech, Ltd의 NIT 100S를 사용하였다.

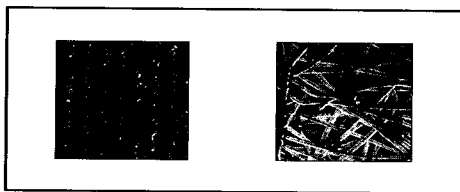


(a) Detail of Flat Burner



(b) Baffle

(c) Perforation Plate



(d) Picture of Metal Fiber

Fig. 2 Detail of Flat Burner

## 2.2 실험방법 및 조건

본 실험은 열선풍속계를 이용한 유동실험이므로 유동장 내의 유속측정은 앞에서 설명한 것과 같은 측정 프로브를 자동 3축 이송대에 설치하여, 축방향의 대표단면에 대해 5 mm 등간격으로 10회에 걸쳐 측정하여 실험의 재현성을 확보하였다. 공기유입구에 Wire mesh를 설치하여 유동해석의 입구조건과 동일한 조건을 만들었으며, 열선풍속계의 경우 주위온도에 대하여 민감한 반응을 하므로 보정실험 당시의 실내온도와 같은 조건에서 실험을 실시하였다. 공기유입구의 속도는 0.876 m/s로 일정하게 하였고 이 조건은 연소실험을 통해 그 속도값을 정하게 되었다.

## 3. 수치해석 방법

### 3.1 수치해석

연소류의 수치해석을 위해서는 에너지방정식 및 연소모형을 포함하여 계산해야 한다. 그러나 본 연구에서는 유동해석을 목적으로 하였으므로 이때의 지배방정식은 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 난류 운동에너지 수송방정식, 난류 운동에너지 소산율방정식이 사용되었다. 난류모형은 표준 k-ε모형을 사용하

였고 중력은 무시한다. 그리고 유동은 축대칭 3차원 정상상태의 난류로 가정한다. 본 연구에서는 상용 열유체 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다.

### 3.2 격자생성 및 경계조건

Fig. 3는 수치해석을 하기 위한 연소기의 격자형상이다. 본 연구에서는 해석영역의 격자생성을 위해 격자생성 프로그램인 ICEM-CFD를 사용하였다. 격자는 차후에 진행될 연소해석을 위해 사각격자를 사용하였고 연소기는 3차원 축대칭이므로 1/4영역에 대해서만 격자생성을 수행하였으며 이때 전체격자수는 60만셀이다. 공기 유입부의 입구 속도는 실험과 동일한 속도 0.876 m/s로 전체 유입단면에 걸쳐 균일한 속도분포를 경계조건으로 주었다. 입구에서의 난류운동에너지는 평균 입구유속의 3%로 가정하였다. 메탈화이버의 경우 그 형상이 섬유조직과 같은 형상을 가지므로 격자생성을 통한 해석이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 유동실험에서 얻은 속도변화에 따른 메탈화이버 전후에서의 차압을 속도변화에 대한 차압선도로 변환하고 이것을 3차원 다항식으로 만들었다. 이러한 다항식을 메탈화이버의 위치에 있는 격자의 경계조건으로 처리하여 해석을 수행하였다.

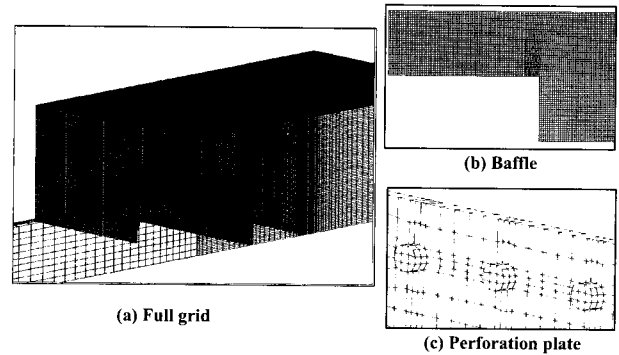
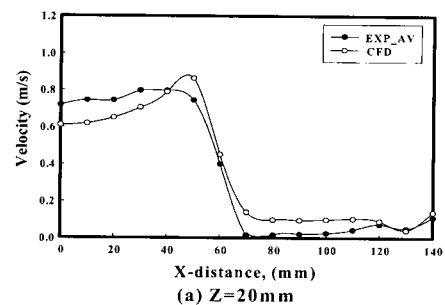


Fig. 3 Computational grid of Flat Burner

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 유동해석결과와 실험결과와의 비교

천공판의 경우 상류에서의 물리량을 하류로 전달하는 중요한 역할을 하므로, 다공에서의 셀 수가 지나치게 적으면 각 셀에 적용되는 보존방정식 중의 대류 및 확산항이 정확히 계산되지 못해, 하류에서의 물리량은 실제상황과 맞지 않게 된다. 그러므로 천공판에서의 다양한 경계조건 처리와 두께방향의 격자의 수를 결정하기 위한 예비테스트를 실시하였다. 그 결과 구멍의 면적에 9개의 격자로 하였고, 그리고 두께방향의 격자수를 4개로 결정하였다.



(a) Z=20mm

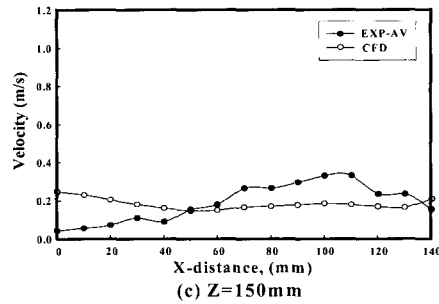
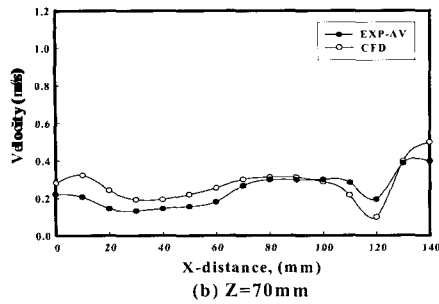


Fig. 4 Comparison of computation and experiment results for X-distance variation (Z=20, 70, 150 mm)

Fig. 4은 메탈화이버를 설치하지 않았을 경우 플랫 버너의 유입되는 속도분포를 Y=20 mm에서 축방향으로 배플 이전인 Z=20 mm, 배플과 천공판 사이인 Z=70 mm, 그리고 천공판 이후 Z=150 mm의 대표단면에서 X축방향의 변화에 따른 평균속도의 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 결과에서 나타나듯이 해석결과와 실험결과는 천공판 이전에서는 대체로 경향이 잘 일치하지만, 천공판 이후에서는 유동실험에서의 공간 분해능의 제약으로 다소 차이가 발생하였다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타낸 결과와 동일 단면에 대해 2차원 평면으로 나타낸 것이다. 천공판 이전의 Z=70 mm에서는 Y=70 mm부근에서 빠른 속도분포가 해석결과와 비교해 연소기 벽면 쪽으로 다소 치우침을 제외하고는 전체적인 해석과 실험의 정성적인 경향이 일치함을 확인하였다.

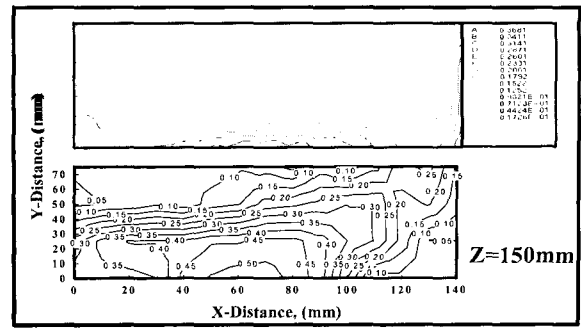
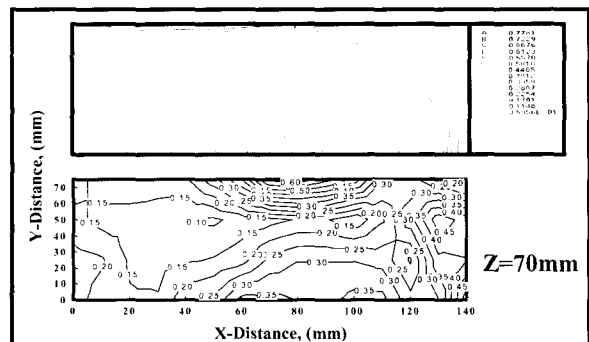
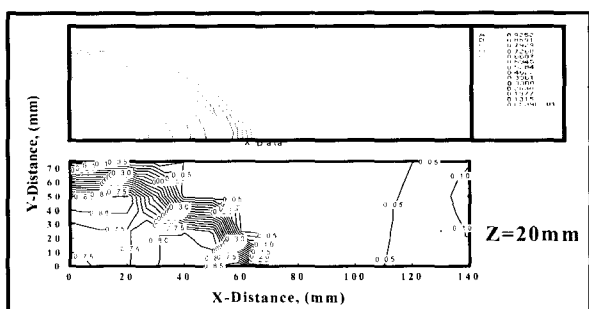
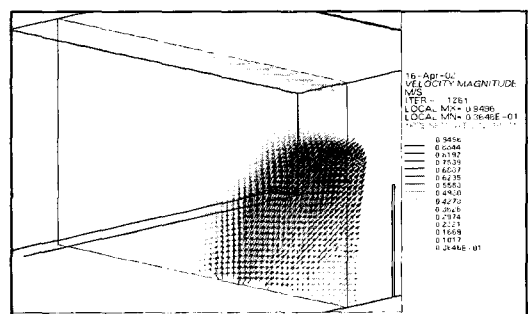


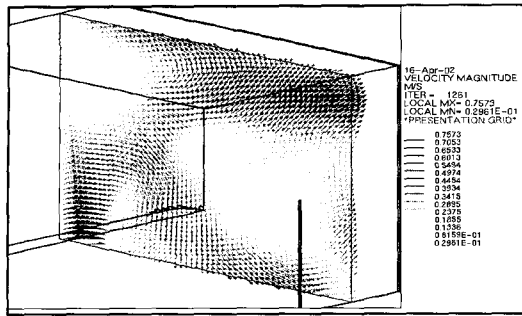
Fig. 5 Comparison of computation and experiment results for uniform velocity distribution (Z=20, 70, 150 mm)

지금까지의 결과를 통해, 본 연구에서의 경계조건을 적용한 유동해석의 신뢰성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 연소기에 설치된 정류부에서의 유동특성을 알아보기 위하여 Fig. 6에 각각의 설치물의 중간지점인 대표단면(Z=25, 75, 125 mm)과 천공판 전단면(Z=95 mm)에서의 등속도 벡터를 나타낸 것이다. (a) Z=25 mm는 공기유입관과 배플의 중간지점으로 공기유입관에서 강하게 유입된 축방향의 중심에 집중된 속도분포가 배플의 저항에 의해 분산되는 것을 확인할 수 있다. 배플은 연소기 내의 중심부에 집중되는 속도성분을 분산시키면서 동일한 유로면적을 확보하기 위해 설계하였으며, 이로 인해 배플의 Y방향의 길이가 공기유입관의 길이보다 10 mm로 작게 제작되어 졌다. 이러한 원인으로 인해 배플의 상층면에서 다소 빠른 속도성분이 나타난다. (b) Z=75 mm는 배플과 천공판의 중간지점으로 배플의 저항에 의해 지나는 속도성분들이 연소기 벽부에서 다소 빠른 속도분포를 나타내며 배플의 뒷면에서는 몇 개의 큰 재순환영역을 발생되고 있다. (c) Z=95 mm는 천공판의 바로 전단면으로 (b) Z=75 mm단면에서 확인할 수 있었던 연소기 벽면에서의 축방향의 빠른 속도성분들이 공극율이 낮은 천공판의 저항에 의해 벽면의 빠른 속도성분들이 연소기의 중심으로 향하게 되고 중심부로 유입된 속도성분들은 서로 만나 중심부에서 강한 재순환영역을 형성시키고 있다. 이와 같은 천공판 이전에서의 속도분포의 복잡한 형태와 재순환 영역의 발생은 연소에서의 공기와 연료의 혼합을 더욱 촉진시킬 것으로 사료된다. (d) Z=125 mm는 천공판 이후의 속도분포로서 천공판 이전의 복잡한 속도분포에 비해 천공판의 구멍을 지나면서 복잡한 속도성분들이 많이 안정화 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 천공판을 지나면서 천공판에서의 강한 난류가 생성되므로 연료와 공기의 혼합도 촉진에 더욱 기여할 것으로 사료된다.

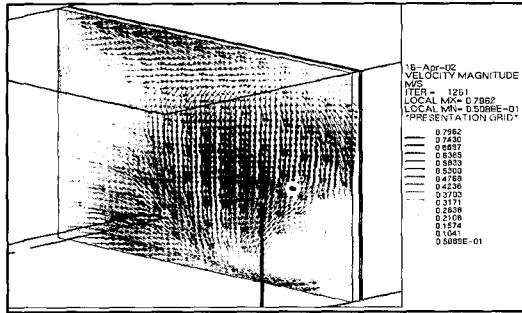
이와 같은 해석결과는 입구 속도를 증가 시켰을 때도 동일한 형태의 속도분포가 나타남을 확인하였다.



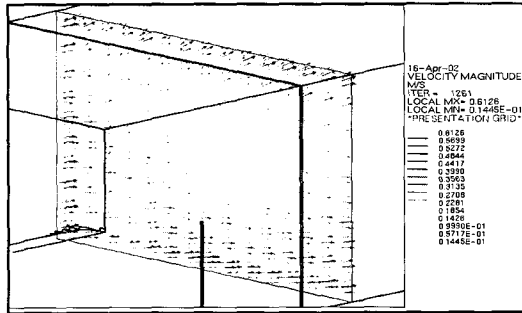
(a) Z=25 mm



(b) Z=75 mm



(c) Z=95 mm



(d) Z=125 mm

Fig. 6 Distribution of velocity vector (Z=25, 75, 95, 125 mm)

Fig. 7은 다공성 물질에 대한 경계조건 처리를 위해 연소기 내부에 메탈화이버를 설치하였을 경우, 메탈화이버 이후 대표단면(Z=160, 170 mm)에서의 유동실험 및 유동해석결과를 비교하여 나타낸 결과이다. 그림에서 굵은 점선은 천공판 이전에 설치되었던 배플의 위치를 나타낸 것이다. 해석과 실험의 등속도 결과는 정성적인 경향이 일치하는 것을 확인 할 수 있지만 실제 유동실험에서는 평균속도가 0.1~0.15 m/s의 분포를 나타내고 유동해석에서는 약간 낮은 값으로 나타났다.

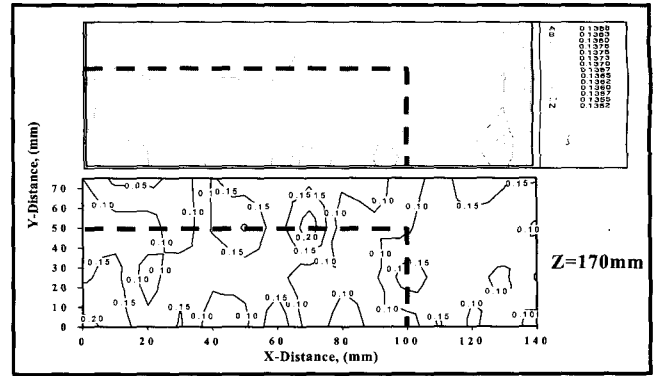
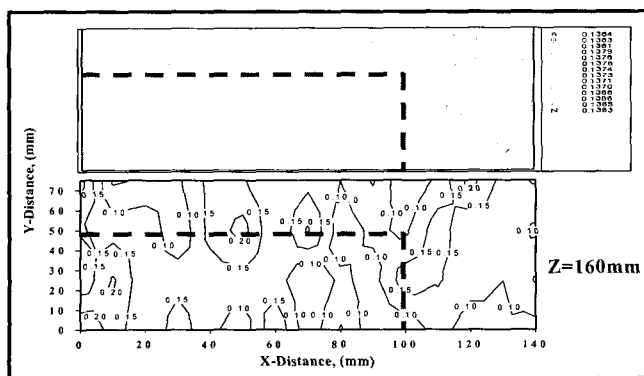


Fig. 7 Comparison of computation and experiment results for uniform velocity distribution (Z=160, 170 mm)

## 5. 결론

메탈화이버를 이용한 플랫폼 버너를 개발하기 위한 기초 연구로써 유동실험과 유동해석의 비교를 통해 해석의 신뢰성을 확보하고, 해석결과를 통한 연소기 내부의 정류부와 연소부의 유동 특성에 관한 결론들을 요약하면 다음과 같다.

1. 표면연소용 플랫폼 버너의 유동실험 및 유동해석을 통해 천공판 이전에서는 실험결과와 잘 일치하지만 천공판 이후에서는 다소 차이가 발생하였다. 그러나 전체적으로 유동실험과 해석의 결과들이 정성적으로 일치하므로 본 연구에서 설정한 격자 및 경계조건의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

2. 정류부의 각각의 설치물에서의 유동해석을 통한 유동특성은 각각의 설치물이 정류기능을 충분히 하고 있으며, 천공판 이전에서는 설치물의 저항에 의해 유동이 아주 복잡하고 재순환 영역이 많이 발생하며 천공판을 지나면서 강한 난류가 발생하므로 실질적인 연소에서는 연료와 공기의 혼합도를 촉진시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3. 메탈화이버는 다공성 물질이지만 그 조직의 특징인 섬유 조직의 형태는 실질적인 격자생성을 통한 해석을 불가능하여 본 연구에서는 메탈화이버의 차압특성을 통한 경계조건으로 해석을 수행하였으며 그 결과 정성적으로 유사한 결과는 얻을 수 있었지만 실질적인 속도 값에는 차이가 약간 발생하였다.

## 참고문헌

- [1] Shin, H. D. and Min, D. K., "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic", Int. J. Heat Mass Transfer, (1991) Vol. 34, No. 2, pp. 341-356.
- [2] Sathe, S. B. et al., "An Experiment and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance", 23rd Symp. on Combustion, (1990) pp. 1011-1018.
- [3] Kawaguchi, O., "Premixed Combustion at a Fiber Mat", 23rd Symp. on Combustion, (1990) pp. 1019-1024,
- [4] 한국에너지기술연구소, "산업용 공해, 고부하 표면연소시스템기술 개발에 관한 연구(I)", 1993.
- [5] ICEM-CFD Ver. 4.1+ Manual, 2001.
- [6] STAR-CD Ver. 3.1 Manual, 2001.