

축열 연소시스템의 최적화 구현을 위한 사용자 전용 해석 프로그램의 개발

강관구 · 유수열 · 유홍선* · 김혁주** · 노동순**

중앙대학교 대학원, *중앙대학교 기계공학부, **한국에너지기술연구원

The Development of User Oriented CFD Program for Optimum Design of a Regenerative Combustion Furnace

K. G Kang, H. S. Ryou, S. Y. Ryou*, H. J. Kim**, D. S. Noh**

Graduate School, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

*Mechanical Engineering School, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

**Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

Abstract In this study, a user oriented CFD program for optimum design of a regenerative combustion furnace, REBURN was developed. For user's convenience, user friendly Graphic User Interface was made and the renumbering interface program was developed in order to directly input any generated mesh system from ICM CFD/FEA. Also an automatic processing system for switching mode was developed. The program was verified through comparing with commercial CFD code about regenerative combustion furnace. Then, numerical simulation of real walking beam furnace used in real industry was performed and the parametric analysis was studied about the arrangement mode. As a results, the uniform temperature was appeared in the cross mode.

(Received April 20, 2003)

Key words: Regenerative combustion system, Regenerator, PISO algorithm, Heat and fluid flow, Industry furnace

1. 서 론

축열 연소는 연료-공기 노즐부와 연소기를 열설비 장치인 공업로(가열로, 단조로, 용해로, 전기로)에 2 대를 1조로 하여 장착하고 주기적으로 연소 운전을 절환시키면서 연소시키는 기술로 로내 온도 분포의 균일화를 이룰 수 있는 동시에 배가스 현열을 약 85%까지 회수할 수 있는 연소 기술이다[1]. 축열 연소시스템(Regenerative Combustion System)의 주된 장점은 고온 폐열 회수 성능이 우수하고 에너지 절약 효과가 매우 크다는 데에 있으며[2], 또한 주기적인 절환운전에 따른 로내 유동 교란(Floating Disturbance)으로 인해 난류 혼합을 증가시킴으로써 로내의 온도를 균일하게 유지할 수 있는 특징이 있다. 즉 에너지 절감 효과가 우수한 축열 연소 기술은 고온의 배가스 현열을 직접적인 열교환을 통해서 연소용 공기의 예열로 회수하고, 고온의 공기에 의한

연소를 통해 연소 화염의 고온화 및 연소로 내 분위기 온도의 고온화를 획득할 수 있게 된다. 따라서 연소로 조업 분위기 온도를 유지하기 위한 기존의 상온 또는 중온 공기 예열 연소의 경우에 비하여 상대적으로 연료 투입량을 저감할 수 있는 것이다. 이러한 특징을 갖는 축열 연소 기술은 이미 선진국에서는 상용화되어 연소로의 고성능화 또는 고효율화의 핵심 기술로 인식되고 있다[3].

일반적으로 연소시스템의 최적화를 위해서는, 연소로의 구조, 연소기 용량 및 댓 수, 연소기 배열 및 절환 방식의 변환에 따른 로내 온도 분포 결과로부터 피열물의 형태와 크기, 처리 용량을 고려한 최소 규모의 로 구조 설계가 이루어져야 한다. 또한 로의 최단 치수에 부합하는 연소기 용량 및 댓 수를 설정한 후 로내 혼합을 촉진할 수 있는 연소기 배열을 결정하여야 한다. 이외에도 연소기 운전 모드에 따른 로 구조의 최적화도 이루어져야 한다.

최근 에너지 절약에 대한 인식이 확산되면서 공업로의 에너지 절감율을 향상시키고자 하는 실험적 연구들이 진행되어 오고 있으나 공업로의 열 유동 현상에 대한 기본적인 데이터베이스가 매우 미약한 실정이며 실험 및 제작에 막대한 예산이 소요되고 있다. 실제로 국내에서의 공업로 시스템의 개발은 개별적인 경우들에 대한 최적화에 국한되어 개발되어 왔고 잦은 설계 변경에 의해 작업 수가 증가하면서 막대한 예산 및 시간을 소비하는 등 비효율적인 접근 방법에 주로 의존하여 왔다.

최근 컴퓨터의 급속한 발달은 기존에 불가능하였던 3차원 유동현상과 복합 열전달 해석을 가능하게 하였다. 이에 따른 수치 모델의 개발로 인해 과거의 결과에 비해 우수한 결과를 얻을 수 있게 되었으며, 이러한 수치 해석 모델의 발전을 토대로 해석 결과에 대한 중요성이 증대되면서 다양한 열 설비에 관한 이론적 데이터베이스의 구축은 설계시 매우 중요한 과정으로 인식되고 있다. 이미 선진국에서는 열 설비의 장치를 설계하기 이전에 다양한 인자들에 대한 현상 변화를 시뮬레이션을 통해 예비적으로 수행함으로써 실제 열 설비의 최적화를 위한 데이터베이스로 활용하고 있다. 또한 연소로 전용 프로그램을 통한 시뮬레이션은 연소시스템의 최적화를 위한 실험의 횟수를 줄이고 다양한 로에 대한 적용이 용이하기 때문에 개별적인 장치 구성을 위한 중복적인 재원의 낭비를 줄일 수 있다.

하지만, 실제로 국내에서 소개된 열 및 유동장에 관한 상용 프로그램들은 대부분 외국에서 개발된 것들이고 이러한 상용프로그램은 범용 프로그램이기 때문에 전문가가 아니면 다루기 힘들다. 따라서, 현장에서의 실제 기술자가 다루기 쉬운 연소로 전용 해석 프로그램의 개발은 매우 실용적이고 필수적이라 할 수 있다.

본 연구의 주된 목적은 축열 연소 시스템 설계 시 요구되는 최적화를 구현하기 위한 연소 시스템 전용 해석 프로그램을 개발하여 다양한 설계 인자에 대한 파라미터 해석을 수행하는 데에 있다. 수치 해석적 파라미터 해석은 연소시스템의 최적화를 위한 실험적 연구들에서 수행하기 힘든 장치 변경에 의한 변화 등을 손쉽게 예측할 수 있고, 이로 인한 재정적인 손실을 줄일 수 있다[4].

본 연구에서 개발된 프로그램은 연소 시스템의 최적화를 위한 연소로(Combustion Furnace) 전용 코드로서 열 해석 및 유동 가시화, 실제 작업 현장에서 요구하는 다양한 파라미터들을 도출할 수 있으며, 3차원적인 유동장을 해석하고 대류(Convective) 및 전도 열전달(Conductive Heat Transfer)을 고려할 수 있다. 개발된 프로그램은 실제 연소시스템을 해석하고 산업체에서 사용하기 용이하며 폭 넓은 영역(가열로, 용해로, 단조로 등)에 적용할 수 있도록 고안되었다. 따라서 연소시스템 설계시 유용한 데이터베이스를 미리 제공함으로써 불필요한 물적 자원의 낭비를 줄이고 보다 효과적인 연소시스템 최적화를 설계할 수 있다.

2. 이론 해석

2.1. 개요

본 연구 기술은 그 동안 산업체 기술연구소 등과 공동 연구 및 독자 연구를 통해서 계속적으로 발전되어왔다. 이러한 3차원 형상에서의 열 및 유동장에 대한 수치해석 알고리즘 및 연구 개발[5-8]을 토대로 축열 연소시스템의 열·유체 해석 프로그램인 REBURN(REgenerative comBUstion fURnace)을 개발하였다.

REBURN 프로그램은 축열 연소시스템의 최적화를 위한 사용자 전용 해석 프로그램으로서 다음과 같은 특색을 가지고 있다.

① 2차원 및 3차원의 층류 및 난류 유동장을 해석하고 대류(Convective) 및 전도 열전달(Conductive Heat Transfer)을 계산할 수 있기 때문에 실제 작업 현장에서 요구하는 다양한 파라미터들을 도출할 수 있도록 하였다.

② 비정상 유동의 해석을 위한 PISO 알고리즘 적용하여 난류 유동장을 해석할 때, 유효점성계수의 시간적 후행 적용 부분을 개선하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다[8].

③ 절환 주기에 대한 단순한 입력 방법을 개발하여 사용자의 편의성을 도모하였다.

④ 간편한 사용자 친화적 GUI(Graphic User Interface) 환경을 개발하여 사용자의 친근감을 도모하였다.

⑤ 격자 인터페이스 프로그램을 개발하여, ICEMCFD/FEA[9]에서 생성된 격자를 주해석프로그램이 인식할 수 있는 격자로 자동 변환이 가능하게 하여 사용자의 편리성을 도모하였다. 또한 후처리프로그램과의 인터페이스 프로그램을 개발하여, 각종 후처리 프로그램에서 결과를 출력할 수 있다.

REBURN 프로그램에서 사용된 구체적인 수치해석 방법 및 특징 등을 다음에서 서술하고자 한다.

2.2. Graphic User Interface

REBURN 프로그램의 Graphic User Interface 창은 Fig. 1과 같다. 그래픽 성능을 최대화하기 위하여 Visual C 언어로 만들었고, 주메뉴(Main Menu) 및 부메뉴(Serve Menu)로 나누어 졌으며, 편리성을 도모하기 위하여 단축 아이콘을 삽입하였다. 사용자는 GUI를 통해서, 각종 물질의 물성치와 경계조건, 계산시간 등 수치해석에 필요한 변수들을 쉽게 조작할 수 있다.

2.3. 전처리(Pre-processing), 후처리(Post-processing)

전처리 과정으로는 CAD 및 격자 생성 소프트웨어로 널리 알려진 ICEMCFD/FEA 프로그램을 적용하였으며, 이 프로그램에서 생성된 격자를 어떠한 수정 없이 바로 입력하기 위한 데이터 인터페이스를 개발하였다. ICEMCFD/FEA에서 생성된 격자는 Vertex, Cell 및 Bnd라는 확장자를 가지는 파일로

생성되며, 이 파일들은 REBURN으로 입력된다. 개발된 Interface는 ICEMCFD/FEA에서 임의적으로 생성된 다중 블록에 따른 육면체 격자의 절점 번호(Node Number)를 자동적으로 빠르게 재배열하여 디스플레이하며, ICEM CFD/FEA에서 적용된 CAD 경계면은 자동적으로 REBURN 프로그램의 경계조건으로 입력되어 사용되는 경계값(Boundary Value)만 입력하면 된다.

주해석프로그램에서 계산된 결과를 후처리하기 위하여, 전문적인 후처리 코드인 ICEM Visual3[10] 내지 Tecplot[11]과 연결하여 결과데이터를 가시화하는 방법을 도모하였다.

2.4. 주해석프로그램

실제로 로내에서의 열 유동장을 계산하는 프로그램이다. 주해석프로그램에서 적용된 수치해석적 기법들은 아래와 같다.

2.4.1. 지배방정식

뉴턴 유체의 비압축성 난류 유동에서 질량, 운동량, 에너지 및 스칼라량들에 대한 지배방정식을 일반 좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

(1) 질량보존방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^i} [J \alpha_m^i (\rho u_m)] = 0 \tag{1}$$

(2) 운동량보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_m) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^i (\rho u_m u_i - \tau_{mi} + P \delta_{mi})] = 0 \tag{2}$$

u_m : Cartesian 속도 성분

J : 비직교 좌표계로의 변환에 따른 Jacobian

α_m^i : 일반좌표계의 contravariant 기본벡터 \vec{e}^i 와 직교 좌표계의 단위벡터 \vec{i}_m 의 내적을 의미한다.

δ_{mi} : Kronecker's delta

τ_{mi} : 응력 텐서(Stress Tensor)

(3) 에너지보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^i} \left[J \left(\rho u_m T - \gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x^m} \alpha_m^n \right) \alpha_m^i \right] = \vec{q}^m \tag{3}$$

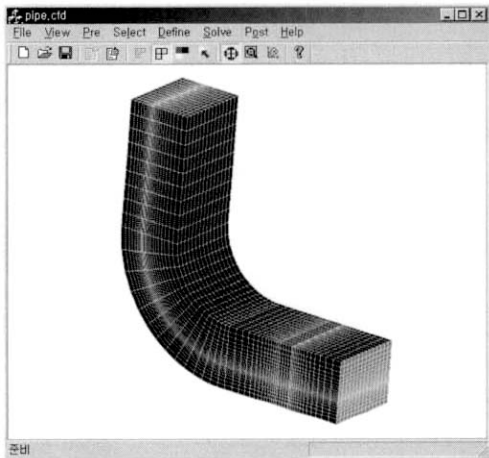


Fig. 1. Main Graphic User Interface of REBURN Program.

여기서, γ_{eff} 는 난류 유동의 에너지방정식을 시간 평균 할 때 나타나는 난류에 의한 열확산 및 분자에 의한 열확산을 포함하는 유효 열확산 계수이다.

2.4.2. 난류 모델

시간 평균된 보존방정식에서 나타나는 레이놀즈 응력을 모델화하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

(1) 난류에너지 수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho k) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^i} \left[J \alpha_m^i \left(\rho u_m k - \frac{\mu_t}{\sigma_k^t} \frac{\partial k}{\partial x^n} \sigma_m^n \right) \right] = (G - \rho \xi) \tag{4}$$

(2) 난류에너지 소멸율방정식

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho \epsilon) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^i} \left[J \alpha_m^i \left(\rho u_m \epsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon^t} \frac{\partial \epsilon}{\partial x^n} \sigma_m^n \right) \right] = C_1 \frac{\epsilon}{k} g - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

여기서 G는 난류에너지 생성항이며 다음과 같이 나타낸다.

$$G = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_n} \alpha_j^n + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_m} \alpha_i^m \right] \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_n} \alpha_j^n \right] \tag{6}$$

또한 C_m , C_1 , C_2 , σ_k , σ_ϵ 는 표준 k-ε 난류 모델에서 사용되는 경험 상수로 Table 1에 주어진다.

2.4.3. 지배방정식의 이산화

계산을 수행하기 위하여 비엇갈림(non-staggered) 격자계를 사용하여 모든 변수들을 단위체적의 중앙에 위치하도록 하였으며, 2.4.1에 나타난 지배방정식들을 단위체적에 대하여 적분하는 유한체적법(finite volume method)을 이용하여 이산화하였다. 이 과정에서 확산항에 대하여는 중앙차분 도식(central differencing scheme)을, 대류항에 대하여는 중앙차분 도식과 상류 도식(upwind scheme)을 속도에 따

라 적용시키는 혼합 도식(Hybrid scheme)을 사용하였으며, 최종적으로 이산화된 지배방정식의 형태는 다음과 같다.

$$a_p \phi_p = \sum_m a_m \phi_m + C_p \tag{7}$$

여기서 $a_p = \sum_m a_m + S_\phi$ 이다.

위 형태의 방정식을 SIP(Stone's implicit procedure)행렬 해법을 이용하여 전체 영역에 대하여 계산을 수행함으로써 최종적인 해를 얻는다.

3. 축열 연소시스템의 최적화 구현을 위한 해석 프로그램의 검증

3.1. 단순 축열 시스템에의 적용

단순 축열 시스템에서 수치해석을 수행한 이유는 이미 검증된 일반 상용 소프트웨어와의 비교를 통해서 REBURN 프로그램의 타당성을 입증하고자 함이다. REBURN 프로그램과 비교 검토할 소프트웨어는 국내외적으로 널리 사용되고 있는 상용 열·유체 해석 코드인 STAR-CD이다. 비교 계산은 동일한 해석 조건과 계산 영역에 적용하였다.

단순한 축열 시스템에 대한 연소실의 형상은 사각 박스 내에 각각 두 개의 입구부 및 출구부를 적용하였으며, 전체 크기는 4000×2000×4000 mm의 시

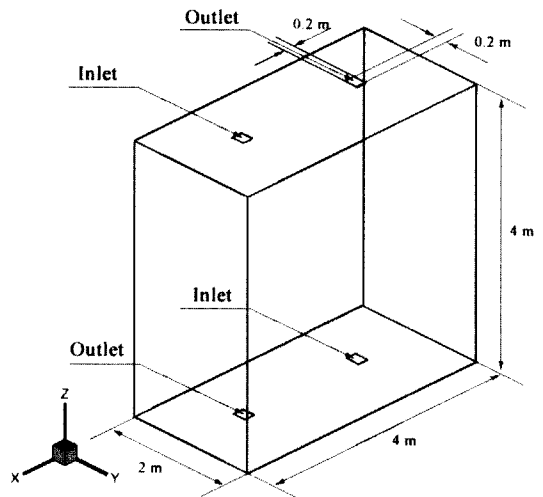


Fig. 2. Schematic diagram of simple regenerative combustor.

Table 1. Empirical constants of Standard k-ε mode

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

스텝으로서 Fig. 2에 도시하였다. 계산에 사용된 격자는 $50 \times 30 \times 40$ 로서 Fig. 3에 나타낸 바와 같이

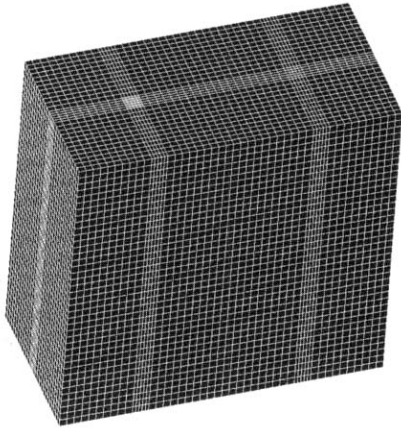


Fig. 3. 3 Dimensional grid system ($50 \times 30 \times 40$).

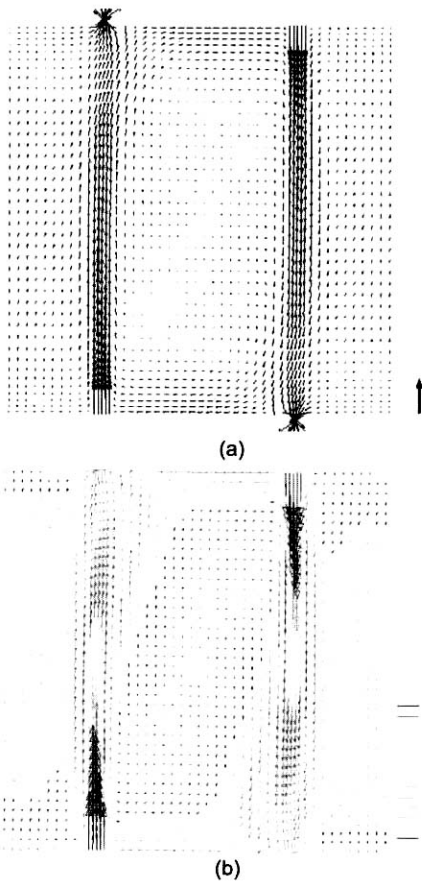


Fig. 4. Section velocity profile at $t = 30s$: (a) REBURN (b) commercial code.

격자 분포는 전체적으로 균일하게 적용하였으며, 입구 및 출구 부분에서 조밀 격자를 사용하였다.

경계조건으로 모든 벽면에서 점착 조건(Adhesive Condition)에 따른 벽법칙(Wall Law)을 적용하였으며, 입구에서의 속도 및 온도는 각각 20 m/s 및 1873.15 K 로 가정하였고, 또한 벽면의 온도는 등온으로 1523.15 K 로 하였다. 질량 보존을 만족시키기 위하여 출구에서의 속도는 전체에 유입되는 유량의 절반으로 나누어 출구 직전 Cell에서의 유량으로 나누어 준 값을 곱해 주었으며, PISO 알고리즘[12]을 적용하여 비정상 및 비압축성 유동으로 계산하였다. 계산시간은 Pentium IV, CPU 1.7 MHz, 1 GB 메모리를 가진 시스템에서 상용 코드의 경우 3시간 25분 정도이며, REBURN의 경우에는 3시간 15분 정도의 CPU 시간이 소요되었다.

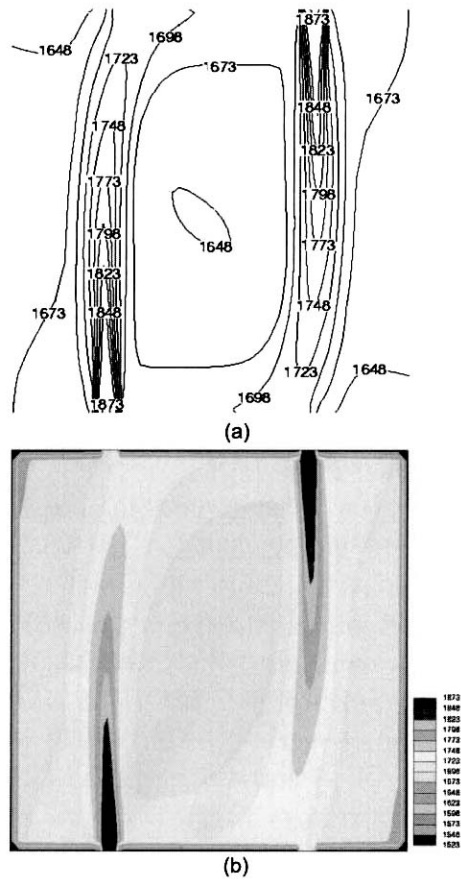


Fig. 5. Section temperature profile at $t = 30s$: (a) REBURN (b) commercial code.

단순 연소실 형상에 대한 계산 결과로서, Fig. 4(a) 및 Fig. 5(a)는 REBURN 프로그램에서 해석한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 4(b) 및 Fig. 5(b)은 상용 코드의 결과이다.

Fig. 4는 각각 $y=1\text{m}$ 인 지점의 단면에 대하여 $t=30\text{초}$ 에서의 속도 분포를 나타낸 것으로서, 비교의 편의를 위하여 오른쪽 하단 부근에 20m/s 의 길이를 가지는 기준 벡터를 표시하였다. Fig. 4(a)에서 상단 및 하단의 입구부에서 유입된 유동은 두 개의 상반된 입구 속도의 영향으로 연소실 중앙에 넓은 회전 유동을 유도하면서 출구로 유동을 배출하는 현상을 나타낸다. 이러한 경향은 Fig. 4(b)에서도 동일한 유동 분포의 결과를 보여 주고 있으며, 벡터 크기 또한 거의 동일한 양상을 나타내었다. 또한 출구부의 유동은 중앙부의 회전 유동의 영향으로 인하여 배출 직전에 유동 형태가 회전 방향으로 쏠리고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5도 또한 $y=1\text{m}$ 인 지점에서의 $t=30$ 초 일때의 온도 분포이다. REBURN의 해석 결과를 보면 입구와 출구의 중심점에서 온도는 1773K 정도로서 상용 코드 결과와 동일 온도 분포를 나타내고 있다. REBURN 해석 해의 전체 시스템의 중앙부에서의 온도는 상용 코드 결과와 다소의 차이는 있으나 전체적인 고온의 온도 분포를 고려할 때 무시할 정도의 차이이다. 또한 상반된 동일 입구 유동으로 인하여 고온의 입구 유동이 연소실 중심부에 영향을 주면서 회전하다가 배출하는 양상을 보이고 있다. 그리고 출구부의 배출 영향으로 인하여 상하의 벽면 온도 분포는 좌우의 벽면 온도 분포보다 전반적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

단순 축열 시스템에 대한 상용 코드와의 비교 결과로서, 전체적인 속도 분포 및 온도 분포가 거의 유사한 양상을 나타내는 결과를 얻었다. 또한 축열 연소 시스템 전용 프로그램으로 개발하여 사용자가 편리하게 적용할 수 있기 때문에, 고효율 공업로의 기본 설계 시 유동장 및 온도장 해석에 있어서 가열로 내 열 유동장 전용 해석 프로그램으로 REBURN의 사용이 가능하다고 사료된다.

3.2. Walking Beam 가열로에의 적용

앞에서 언급한 바와 같이 Walking Beam 가열로

는 연소기의 개수, 용량 그리고 운전 모드, 피열물의 배열 및 크기 등이 매우 중요한 요인으로 인식되고 있으며, 연소시스템 내부에서는 3차원 난류 유동과 대류, 전도 열전달이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이 Walking Beam 가열로를 주 모사 대상을 하여 연소기의 배열 방식 따른 파라미터 해석과 장입물(피열물)의 표면 온도에 끼치는 영향에 대하여 해석을 수행하였다.

3.2.1. 계산 격자 및 해석 조건

계산에 사용된 실제 형태의 축열 연소시스템의 개요도를 2차원 및 3차원에 대한 형상에 대하여 Fig. 6 및 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 원형의 형태는 버너(Burner)이며, 0.3m 직경을 가진 8개의 작은 버너 및 0.6m 의 직경을 가진 8개의 큰 버너로 구성되어 있다. 각 버너들은 해석의 편의성을 위하여 A Burner, B Burner, C Burner 및 D Burner로 명명하였으며, 가열로는 2구간으로 나누어 작은 버너인 A, C와 큰 버너인 B, D 사이에 장애물을 설치하였고, 버너들 사이에 X축 방향으로 가로 및 세로의 길이가 0.16m 인 28개의 장입물이 등 간격

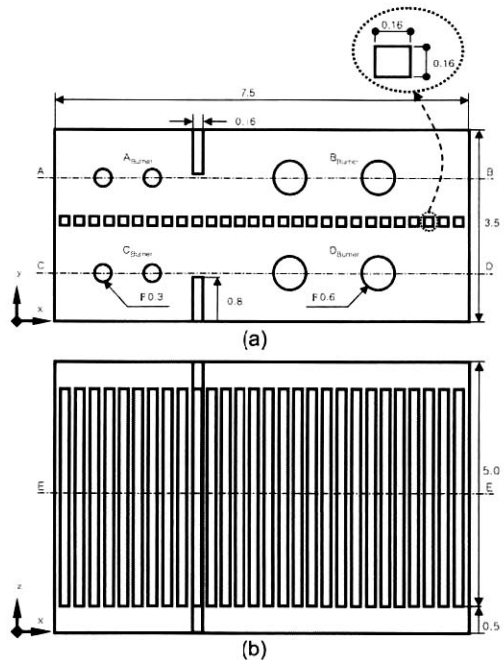


Fig. 6. 2-Dimensional Scheme with real burner system : (a) 2D scheme of x-y axis (b) 2D scheme of x-z axis.

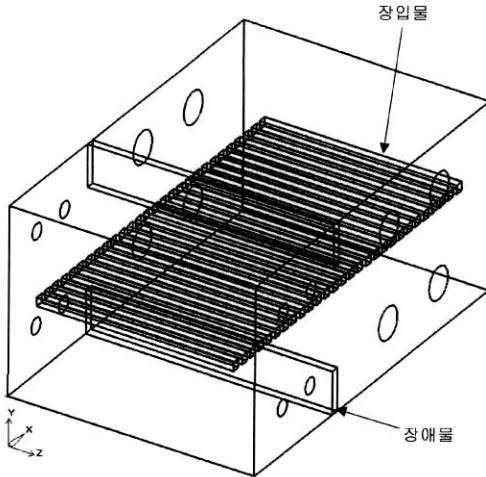


Fig. 7. 3D scheme of Real Regenerative Combustion Furnace.

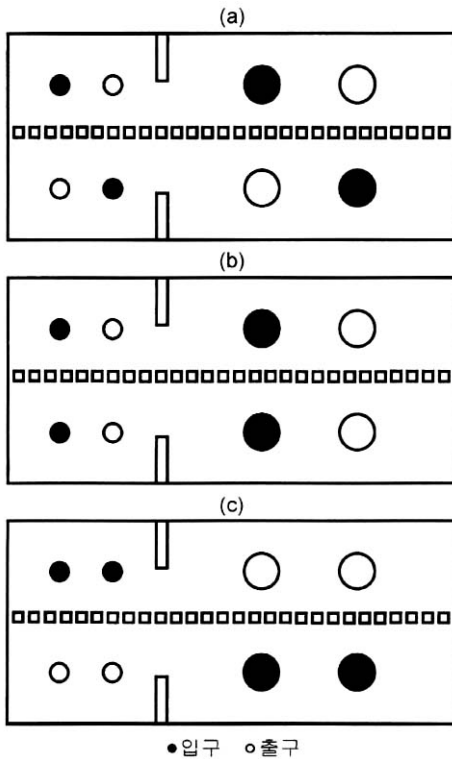


Fig. 8. Arrangement with locations of burner.

으로 위치시켰다. 연소기 배열은 가열로에 대한 최적의 균일한 온도 분포를 갖는 배열을 찾을 수 있도록 Fig. 8와 같이 수직 방향(Vertical Direction), 교차 방향(Cross Direction) 및 수평 방향(Horizontal

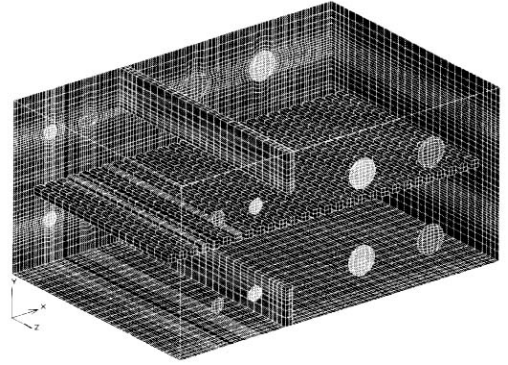


Fig. 9. 3D Grid System of Real Combustion System (120x27x43).

Direction)의 3가지로 구조를 바꾸어 가면서 파라미터 해석을 수행하였다. 여기에서 검게 안이 채워진 부분은 버너의 유입구이다.

계산 격자는 REBURN 프로그램과 직접 연계된 ICEMCFD/FEA에 의하여 생성되었으며, 격자 생성을 위한 블록 및 생성된 격자계는 Fig. 9에 나타내었다.

축열 연소시스템의 운전시, 8개의 버너에서는 고온의 공기가 유입되고 마주보고 있는 8개의 버너들을 통해서 연소 가스를 배출한다. 이때, 유입되는 연소 화염은 1300°C 온도만으로 가정하였고, 속도는 작은 버너인 경우 20 m/s 및 큰 버너인 경우 30 m/s로 주었다. 연소실 내의 초기 조건을 위하여 가열로 및 장입물의 온도는 1250°C로 하였다. 연소기 절환은 30초 주기로 절환 하도록 하였으며, 60초까지 계산 하였다. 해석 조건은 비정상상태 및 PISO알고리즘이 적용되었으며, 난류 모델을 위하여 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

3.2.2. 교차 배열 (Cross arrangement)

Fig. 10은 교차 배열 일 때 운전 시작 후, 6초일 때의 온도 분포이며 (a), (b) 및 (c)는 각각 연소실의 상부(A-B), 하부(C-D) 및 축 방향(E-E)에 대한 절단면이다. 좌측 벽에서는 전체 영역의 분포와 13°C 정도 차이의 저온이 나타났다. 유입된 연소 화염은 불꽃 형상을 출구부를 향하고 있으며, 큰 버너에서의 온도 분포는 작은 버너보다 길이가 큰 온도 분포를 형성하고 있고, 연소실의 중심부는 대체적으로 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 전반적으로 버

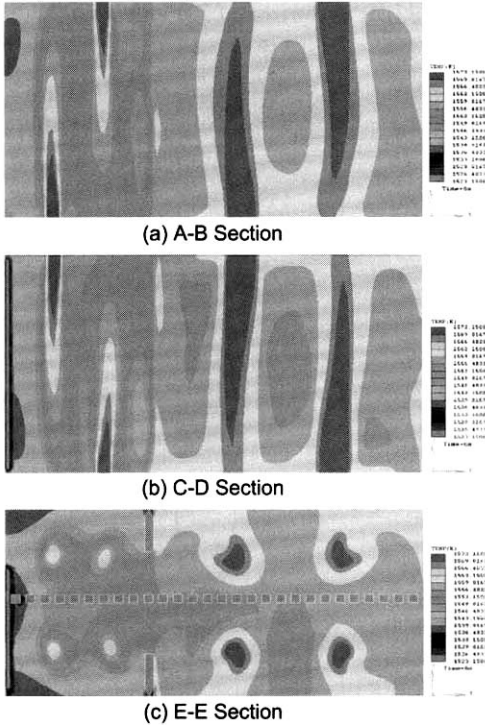


Fig. 10. Temperature distribution with cross arrangement at t = 6 sec.

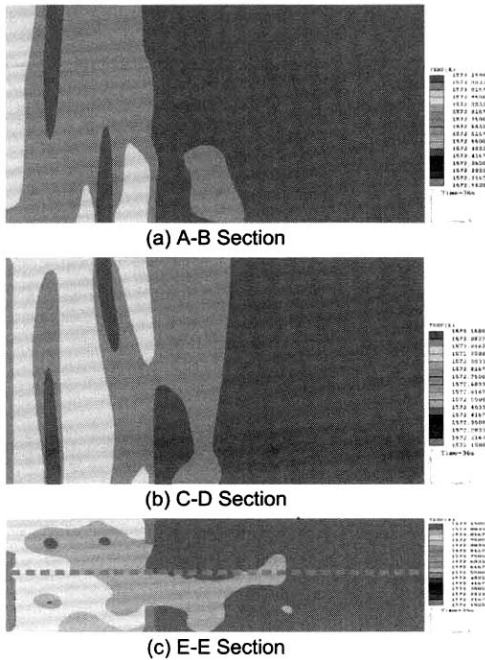


Fig. 11. Temperature distribution with cross arrangement at t = 36 sec.

너의 입구 주위로 높은 온도 분포를 보이고 있으며, 장입물 주위 온도 분포는 전체적인 영역에 비하여 적은 온도 구간을 나타내어 아직 가열 초기의 온도 분포를 형성하고 있다. 전반적으로 초기 조건에서 연소실 내부의 온도가 1250°C로 주어진 것을 비추어 볼 때, 약 30-40°C정도의 가열된 상태를 확인할 수 있다.

Fig. 11은 절환 후, 6초 지났을 때에서의 온도 분포이다. 온도 분포는 이미 충분히 가열된 상태로 최고 온도와 비교할 적에 1°C 정도밖에 차이를 나타내지 않으며, 큰 버너의 온도 분포는 유입된 온도와 비교할 적에 차이는 없다. 1300°C의 고온을 고려할 적에 1°C 차이는 의미가 거의 없다고 볼 수 있다.

3.2.3 수직 배열(Vertical Arrangement)

Fig. 12와 같이 운전 시작 후, 6초에서의 온도 분

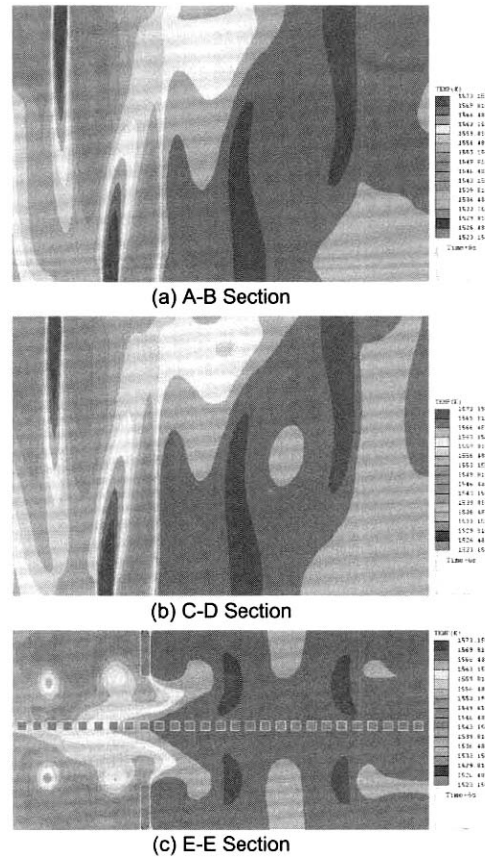


Fig. 12. Temperature Distributions with vertical arrangement at t = 6 sec.

포를 보면 작은 버너 영역에서는 초기 온도에서 20°C 정도 가열되었으며, 큰 버너 영역에서는 40°C 정도로 상당히 가열되었다. 장애물을 중심으로 각 영역에서의 온도 분포는 균일화되는 과정을 볼 수 있으나 좌우 온도 분포를 비교할 적에 평균 20°C 정도의 차이를 나타내었으나 다른 배열보다 매우 고른 온도 분포가 나타났다. 또한 작은 버너 영역의 저온이 큰 버너 영역의 고온으로 유입되는 온도 양상을 보였다.

Fig. 13의 절환 후 6초일 때의 온도 분포는 절환 전인 운전 시작 후 6초일 때와 다소 차이를 나타내고 있으나, 시스템의 최고 영역의 온도(1300°C)를 고려할 적에 최저 온도 영역과 최대 차이가 1°C 이내의 차이를 나타내어 완전히 가열된 상태를 확인할 수 있었다.

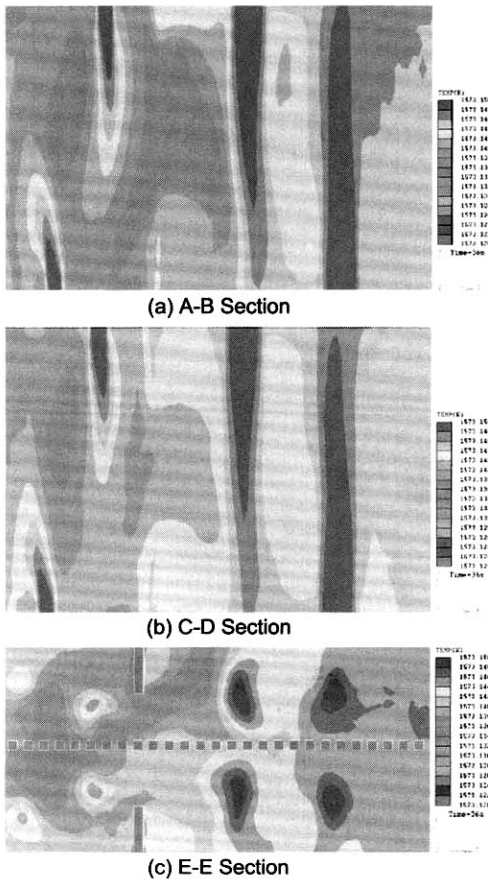


Fig. 13. Temperature Distributions with vertical arrangement at t = 36 sec.

3.2.4 수평 배열(Horizontal Arrangement)

Fig. 14에서 운전 시작 후, 6초일 때의 온도 분포를 볼 때에 큰 버너에서의 유입된 고온의 공기는 출구까지 직선적으로 영향을 미치고 있으며, 작은 버너에서는 약 절반 크기로 큰 버너의 고온 영역 구간보다 작게 나타났다. 축 방향(E-E Section)의 온도 분포를 볼 때에, 큰 버너 영역에서는 어느 정도 균일화된 가열을 보이고 있으나 작은 버너 영역의 장입물 주위에 저온의 온도 구간을 형성되었다. 가열 온도는 작은 버너(A,C burner)에서는 초기 온도와 비교할 때에 20°C 정도의 차이를 보였고, 큰 버너(B, D burner)에서는 평균 32°C 정도의 가열된 상태를 확인할 수 있다.

Fig. 15는 절환 후, 6초일 때의 온도 분포로 이미 시스템은 1°C 이내로 가열화된 상태를 볼 수 있는

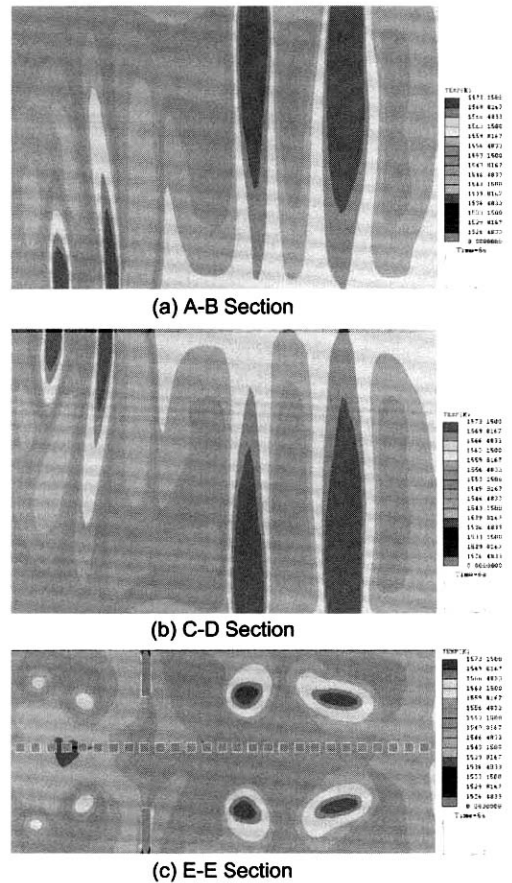


Fig. 14. Temperature Distributions with horizontal arrangement at t = 6 sec

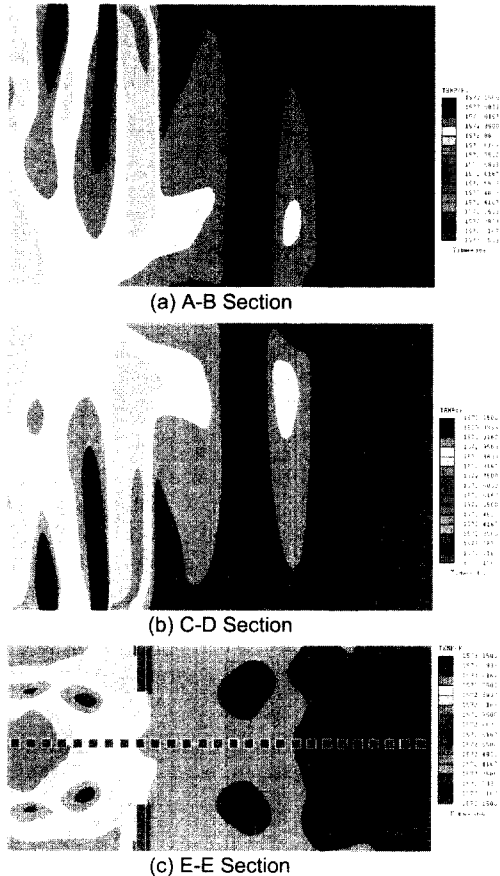


Fig. 15. Temperature Distributions with horizontal arrangement at $t = 36$ sec.

며, 미소한 차이지만 장애물을 중심으로 작은 버너 영역보다는 큰 버너 영역이 완전 가열 상태로서 만 일 유입 온도 및 속도를 보다 적게 주면 비대칭적으로 온도 영역을 나타낼 수 있다.

4. 결 론

축열 연소로의 복잡한 물리적 현상인 3차원 난류 유동 및 열전달 해석을 통한 시스템 설계의 최적화를 구현하기 위하여 사용자 전용 해석 프로그램의 개발하였고, 이에 대한 타당성을 확보하기 위하여 상용코드와 비교 계산을 수행한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 설계자가 소스코드를 직접 다루지 않고, 축열 시스템에 대한 도면만을 통하여 3차원 모델링, 해

석 및 가시화를 수행할 수 있는 사용자 전용 해석 프로그램인 REBURN을 개발하였다.

2. 편리한 작업 환경의 구축을 위하여 사용자 친화적인 GUI를 개발을 하였으며, 임의의 격자계의 재배열을 하여 주해석프로그램이 인식할 수 있는 격자계로 자동 전환 시키는 인터페이스 프로그램을 개발하여 프로그램의 효율을 증대시켰다.

3. 아울러 축열 시스템의 주요 인자인 절환 주기의 자동적 절환 처리 방법을 개발하였고, 공업로의 기본 설계에 따른 열·유동장 해석을 위한 이론식들을 정립하였다.

4. 단순 및 실제 축열 시스템에 대한 상용 해석 코드와의 비교를 통하여 유동 분포 및 온도 분포가 거의 근접한 양상을 나타내어 그 타당성이 입증되었다. 또한 Walking Beam 가열로에 적용하여 배열 방식 대한 파라미터 해석을 수행하여 연소기의 교차 배열(Cross Arrangement)이 수평 및 수직 배열보다 연소실의 전체에 걸쳐 균일한 온도 분포를 나타낸다는 결론을 얻었다.

후 기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 고효율 저공해 공업용 가열로 개발, 연구보고서, 산업자원부, 2000.
2. 축열 연소시스템의 Matching 기술 및 축열 구조 설계 기술 개발, 연구보고서, 포항산업과학연구원, 1998.
3. Development of High Performance Industrial Furnaces, Report on R&D, NEDO, 1998.
4. T. Tanigawa and H. Mitsukwa : High Temperature Air Combustion, 35 (1998) 45.
5. 로 본체 열정산 Program 개발 및 연소기 열응력 해석, 연구보고서, 삼천리 M&C, 1998.
6. 강관구, 유홍선, 김충익, 노동순, 홍기배 : 한국식품공학회지 1 (2001) 64.
7. D.S. Noh, S.K. Hong, H. S. Ryou and S. H. Lee, : KSME International Journal, 15 (2001) 357.
8. 이재원, 유홍선, 강관구 : 한국전산유체공학회지, 7 (2002) 1.

9. ICEM CFD/FEA Meshing Manual, Version 4.2.2, ICEM CFD Engineering, 2002.
10. ICEM Visual3 Manual, Version 4.2, ICEM CFD Engineering, 2002.
11. Tecplot Manual, Version 8, Amtec Engineering, 2001.
12. Issa R.I.: Journal of Computational Physics, 62 (1985) 40-65.