

저공해 도시 쓰레기 소각로의 연소특성 연구

- 다중블럭 해석 프로그램의 개발 및 검증 -

손영민* · 김만영** · 백승욱†

(2002년 12월 10일 접수, 2003년 2월 10일 심사완료)

A Study on Combustion Characteristics in a Low-Pollutant Municipal Waste Incinerator

- Development and Validation of a Multi-Block Simulation Code -

Young Min Sohn, Seung Wook Baek, and Man Young Kim

Key Words: Incinerator(소각로), Multi-Block(다중블럭), Turbulent Combustion(난류연소), Nongray Radiation(비회체 열복사), Validation(검증)

Abstract

To investigate the combustion characteristics in a low-pollutant municipal waste incinerator, the generalized multi-block simulation code that can be applied to turbulent reacting flow with gaseous hydrocarbon fuel in a 3D complex geometry has been developed with nongray radiation effects. To deal with the complex geometry, structured multi-block method and the scheme which treats interfaces implicitly are adopted. The developed code is validated through various engineering problems such as curved duct flow, driven cavity flow, gray multi-block radiation, nongray radiation, and combustion in a incinerator.

기호설명

$C_{p,k}$: 화학종 k 의 정압비열, 식 (3)
 D_{ci}^m : 방향가중치
 $H_{fu,i}$: 연료 i 의 반응열, 식 (2), (9), (10)
 I : 복사강도
 I_b : 흑체 복사강도
 k : 난류 운동에너지
 T : 온도

W_k : 화학종 k 의 분자량
 Y_k : 화학종 k 의 질량분율

그리스문자

ΔA_i : i -검사면의 검사면적
 ϵ : 난류에너지 소멸율, 또는 방사율
 x_a : 흡수계수
 ρ : 밀도
 ω_k : WSGGM의 가중치
 $\dot{\omega}_k$: 화학종 i 의 생성율, 식 (4)

* KAIST 대학원 항공우주공학전공
 ** 회원, 현대자동차 승용디젤엔진시험팀
 † 책임저자, 회원, KAIST 항공우주공학 전공
 E-mail : swbaek@sorak.kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3714 FAX : (042)869-3710

1. 서론

최근 선진기업들이 추구하는 소각로는 단순히 폐기물을 소각하는 소각로의 개념이 아니라 공해 물질의 분해 또는 발생억제를 통한 저공해 소각

로의 개념이다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 추세에 맞추어 소각기술의 개발에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있는데, 저공해 소각로의 가장 핵심적인 부위는 소각 연소실 부위로서 연소실의 형상 및 연소공기 주입방식에 의한 내부 유동장의 변화 뿐만 아니라 고형 폐기물의 연소특성에 대한 고찰과 함께 복사열전달, 특히 비회체 가스에 의한 열복사의 영향이 함께 고려되어야 한다.

일반적으로 소각로는 내부형상이 매우 복잡하여 정렬 단일격자 해석이 어렵거나 또는 불가능할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존 연구자들은 비정렬격자 방법, 그리고 정렬격자를 이용한 다중블럭 기법을 제시하였다.⁽⁴⁾ 비정렬격자 해석법은 보통 2차원에서는 삼각형, 그리고 3차원에서는 사면체의 형태가 일반적이고, 경계를 정해주기만 하면 자동적으로 내부를 채울 수 있는 방법들이 개발되었지만 고려하고 있는 임의 격자 주변의 정보를 가지고 있어야 할 뿐만 아니라 이를 저장하는 추가적인 배열이 필요하다. 한편, 정렬격자를 이용한 다중블럭 기법은 각각의 블럭에서 유동변수들을 배열에 의하여 쉽게 표현할 수 있을 뿐만 아니라 이들은 방향성을 가지고 있기 때문에 정렬격자를 위하여 개발된 효율적인 배열해석법(matrix solver)를 사용할 수 있다. 또한, 단일격자 적용에 따른 과도한 격자 짜그러짐을 방지할 수 있다.

다중블럭 기법은 이음격자(patch grid) 방법과 중첩격자(overlapped grid) 방법으로 구분할 수 있는데, 전자는 이웃하는 블럭의 각각의 격자가 서로 겹치지 않는 대신 격자선(grid line)을 공유하도록 하는 방법이고, 후자는 이웃하는 블럭의 격자들이 서로 침범하여 겹치도록 하는 방법이다. 일반적으로, 이음격자에 비하여 중첩격자는 격자생성에 있어서 더 유연하고 복잡한 형상의 격자를 쉽게 생성할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 블럭간의 정보교환이 복잡할 뿐만 아니라 유속의 보존이 유지되기 어렵다고 알려져 있다. 한편, 다중블럭의 경계면을 처리하는 방법으로 외재적 방법과 내재적 방법이 사용된다. 외재적 방법의 경우 하나의 블럭을 계산하여 해를 구한 후 그 해들 중에서 이웃하는 블럭이 필요로 하는 경계값을 제공하는 방식으로 해를 구한다. 이 경우 블럭 경계면의 질량 및 모멘텀 유속이 보존적으로 처리될 수 있도록 특별한 처리를 필요로 하기 때문에 각 블럭의 해를 위한 배열을 구성하여 해를 동시에 구하는 내재적 방법이 제안되었다.⁽⁴⁾

한편, 소각로와 같이 고온을 수반하는 연소공

학 문제에서 강조되는 복사열전달 해석 역시 단일격자의 적용이 어려운 경우 비정렬격자 또는 정렬격자를 이용한 다중블럭 기법이 필요하다. 또한 탄화수소계열 연료의 연소에 따른 H₂O 및 CO₂에 의한 비회체의 영향에 대한 고찰이 필요하며,^(6,7) 이를 위한 모델은 적절한 계산시간과 함께 다차원 문제로의 확장이 용이해야 할 뿐만 아니라 유체의 유동 및 연소해석을 위한 격자계를 공유할 수 있어야 하겠다.

본 연구는 복잡한 형상을 갖는 소각로의 연소특성 해석을 위하여 비회체 열복사를 고려한 다중블럭 해석 프로그램의 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 유동 및 연소반응, 그리고 비회체 열복사에 대한 지배방정식과 물성치를 소개하고 다중블럭 해석 방법 및 개발된 프로그램의 검증에 관한 3가지 예제를 해석하였다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

연소실 안으로 유입된 쓰레기는 화격자 아래쪽에서 피소각물을 통하여 들어온 공기와의 예혼합 화염 및 연소실의 중간 부위에서 주입되는 2차 공기와의 혼합을 통한 확산 화염의 형태로 화학반응이 일어나며, 이러한 화학반응 유동장을 해석하기 위해서는 연소기 내부의 유체의 난류 유동, 화학반응 및 복사열전달 현상 등에 대한 지배방정식을 동시에 해석해야 한다.⁽⁷⁾ 이 때, 화학반응 유동장을 지배하는 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 각 화학종의 보존 방정식으로 구성되며 이들을 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_k} \right) \right] \quad (1)$$

한편, 화학반응 및 복사열전달이 존재하는 경우의 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k h) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_k} \right] + H_{fu} \dot{\omega}_{fu} - \nabla \cdot q^R \quad (2)$$

여기에서,

$$h = \sum_k Y_k h_k = \sum_k Y_k \int_{T_{ref}}^T C_{p,k}(T) dT \quad (3)$$

로서 엔탈피를 나타내며, $C_{p,k}$ 는 각 화학종들의 정압비열로서 JANAF 테이블에 주어진 값을 1차식으로 근사하여 사용하였다. 또한, 위의 에너지

방정식에서 우변 둘째항은 연소에 의한 생성항이며 셋째항은 복사열전달에 의한 에너지 소멸을 나타내는 생성항이다. 한편, 화학종의 보존방정식은 다음과 같다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_k} \right] + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

여기에서 Y_i 와 $\dot{\omega}_i$ 는 고려하고 있는 각 화학종의 질량분율 및 생성률을 나타낸다. 본 계산에서 사용된 Pr_T 와 Sc_T 는 각각 1이다.

한편, 난류해석을 위하여 다음과 같은 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다.⁽⁸⁾ 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + P_T - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_T - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기에서 P_T 는 난류생성항이다. 한편 난류점성계수 μ_i 는 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$\mu_i = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

하지만 위 난류모델은 완전 난류영역에서만 사용할 수 있으며 벽면 부근에서는 잘 알려진 벽함수를 사용한다. 한편, 이 난류 모델에 사용된 모델 상수는 각각 다음과 같다.⁽⁸⁾

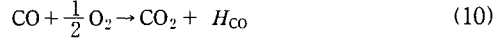
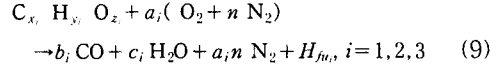
$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.3, C_\epsilon = 1.0 \quad (8)$$

2.2 연소 모델

화격자 조각로의 경우 대부분 기체상 연소로 가정한다. 실제 쓰레기의 성분은 C, H, O, N, S, 그리고 Cl의 6개의 원자가 대부분이고, 이 중에서 실제 연소반응에 참여하는 것은 C, H, O 세 가지이다. 이들 성분이 어우러져서 일어나는 반응은 매우 복잡할 것으로 예상될 뿐 자세한 반응에 대한 정보는 거의 없는 실정이다. 현재 발표되고 있는 것은 쓰레기 조성분석에 의한 각 원소의 성분비와 발열량, 쓰레기 발열량 및 공기유량, 그리고 온도이다.^(2,3)

본 연구에서는 가연분에서 나오는 기체를 물질수지와 에너지수지에 맞는 가상의 기체로 가정하며 반응속도 등을 조절하기 위하여 몇 개의 그룹으로 분류한다. 즉, 연소실 내 폐기물의 가연분을 $C_xH_yO_z$ 의 형태로 가정하고 아래와 같이 2단 반응으로 모델링한다.⁽³⁾ 또한, 폐기물 속에 함유되어 있는 액상의 수분은 연소실 내의 에너지를 흡수하며 증발하며, 이러한 쓰레기 내 수분의 증발을 모사하기 위하여 $(C_xH_yO_z)_w \cdot H_2O$ 을 도입하여,

3개의 연료로 구성된 반응식을 도입한다. 즉,



여기에서, H 는 각 반응의 반응열을 나타낸다.

한편, 에너지 방정식의 연소 생성항 및 연료의 화학종 방정식에 나타나는 반응률 $\dot{\omega}_{fu}$ 은 아래와 같이 eddy dissipation 모델⁽⁹⁾을 적용한다. 즉,

$$\dot{\omega}_{fu_i} = A_{mix} \rho \frac{\epsilon}{k} \left(Y_{fu_i}, \frac{Y_{O_2}}{s_i}, B_{mix} \frac{Y_{H_2O} + Y_{CO_2}}{1 + s_i} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_{O_2} = \sum_i s_i \dot{\omega}_{fu_i}, \quad \dot{\omega}_{N_2} = - \sum_i (s_i + 1) \dot{\omega}_{fu_i} \quad (12)$$

여기에서 $A_{mix} = 24$, $B_{mix} = 12$ 로서 Fluent⁽¹⁰⁾에 적용된 값을 따른다. 한편, s_i 는 각각

$$s_1 = \frac{(x_1/2 + y_1/4) W_{O_2}}{W_{fu_i}}, \quad s_2 = \frac{(x_2/2 + y_2/4) W_{O_2}}{W_{fu_i}}, \quad s_3 = \frac{(x_3 + y_3/4 - z_3/2) W_{O_2}}{W_{fu_i}} \quad (13)$$

이며, CO 반응의 경우 $\dot{\omega}_{CO}$ 와 s_{CO} 는 각각

$$\dot{\omega}_{CO} = A_{mix} \rho \frac{\epsilon}{k} \left(Y_{CO}, \frac{Y_{O_2}}{s_{CO}}, B_{mix} \frac{Y_{CO_2}}{1 + s_{CO}} \right) \quad (14)$$

$$s_{CO} = 0.5 W_{O_2} / W_{CO} \quad (15)$$

을 적용한다.

2.3 복사열전달 모델

에너지 방정식의 복사생성항 $-\nabla \cdot \mathbf{q}^R$ 은 단위 체적당 순 복사열손실에 해당하는 것으로서 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}^R = -x_a \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (16)$$

여기에서 매질의 복사강도 I 를 구하기 위하여 임의의 위치 \vec{r} 에서 경로 \vec{s} 를 따라 흡수, 방사 및 산란하는 매질의 복사에너지의 보존식, 즉 다음과 같은 복사전달방정식을 해석한다.

$$\frac{dI}{ds} = -(x_a + \sigma_a) I + x_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I^m \phi^m \cdot m d\Omega \quad (17)$$

윗 식 우변 첫째항은 흡수 및 산란에 의한 복사강도의 감소, 둘째항과 셋째항은 각각 방사 및 산란에 의한 복사에너지의 증가를 나타낸다. 한편, 본 연구에서는 실제의 흡수계수를 크기가 다른 몇 개의 구간으로 나누어 넓은 파장역 모델에서 계산된 실제의 기체 방사율과 비슷해지도록 온도의 함수로 표현되는 가중치를 최적화한 회계가스가중합산모델(WSGGM)을 적용하여 다음과 같이 가중치와 흡수계수를 구한다.^(8,11) 즉,

$$\epsilon = \sum_{k=1}^K \omega_{\epsilon,k}(T) [1 - \exp(-x_{a,k} PS)] \quad (18)$$

여기에서, $\omega_{\epsilon,k}$ 와 $x_{a,k}$ 는 기체 온도 T 에 대한 k 번째 회체 가스의 가중치 및 흡수계수를 나타내며, P 와 S 는 각각 흡수기체들의 분압의 합과 광선의 이동거리를 나타내는데, 가중치는

$$\sum_{k=1}^K \omega_{\epsilon,k}(T) = 1, \quad \omega_{\epsilon,k} = \sum_{j=0}^L b_{\epsilon,k,j} T^{j-1} \quad (19)$$

로 구한다. 여기에서 $b_{\epsilon,k,j}$ 는 다항식의 계수로서 Smith 등⁽¹¹⁾의 값을 적용한다.

한편, 이와 같은 각 흡수계수와 가중치를 이용하면 산란이 없는 경우 회체일 때의 방정식 (17) 및 복사생성항 (16)은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\frac{dI_k(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -x_{a,k} I_k(\vec{r}, \vec{s}) + x_{a,k} \omega_k I_b(\vec{r}) \quad (20)$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}^R = - \sum_{m=1}^M \left[x_{a,i} \left(4\pi \omega_k I_b - \sum_{m=1}^M I_r^m \Delta \Omega^m \right) \right] \quad (21)$$

3. 수치해석

본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 바와 같은 이음 격자를 이용한 정렬 다중블럭을 적용함과 동시에 블럭간의 경계면을 내재적으로 처리하였다. 아래에서는 이러한 다중블럭 수치해석법과 경계조건을 간략히 살펴보기로 한다.

3.1 다중블럭 유동장 해석

우선, 계산영역을 몇 개의 블럭으로 나누고, 각 블럭의 격자는 정렬격자로 생성하고 블럭인식기를 도입하여 각 블럭의 모든 물리변수를 1차원 배열에 저장한다. 예를 들어, 세 번째 블럭 내의 격자점 (i, j, k) 의 변수값이 1차원 배열에 저장될 경우 변수는 다음과 같은 인덱스를 갖는다. 즉,

$$l = O_3 + (k-1)N^2 + (j-1)N + i \quad (22)$$

여기에서 O_3 는 세 번째 블럭의 시작을 표시하는 것으로서 앞의 두 블럭에 있는 모든 노드들의 합, 즉, $N^3 + N^2 + N$ 이다. 또한, N^m 과 N^n 는 각각 m -번째 블럭에서 i 및 j 방향으로의 격자수를 나타낸다.

Fig. 2는 블럭 경계면(surface)을 나타내는데, 경계면은 격자점 L에 대하여 e , 그리고 R에 대하여 w 에 해당한다. 본 연구에서는 블럭간의 경계면을 경계(boundary)로 처리하지 않고 블럭 내부의 격자면(cell face)으로 다루기 때문에 격자점 L과 R 사이의 격자면의 면적적분은 블럭 내부의 격자면의 경우와 동일하게 처리한다. 이를 위하여 블럭의 경계면에 접하는 격자면과 관련된 모든 데이터는 윗 식(22)와 같은 인덱스를 사용하

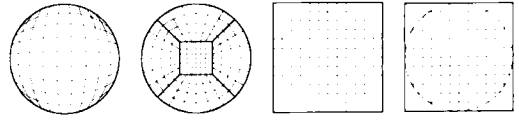


Fig. 1 Grid system used in CFD : body-fitted, multi-block, blocked-off, and embedded boundary methods (from left)

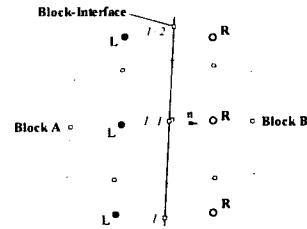


Fig. 2 Interface between two blocks with matching grids, showing interface CV faces

여 저장한다. 여기에서, 블럭 경계면을 격자면으로 처리하여 내재적 방법을 적용하기 위하여 (1) 경계면에 접한 L과 R의 배열인덱스, (2) L에서 R로 향하는 면적벡터성분, 그리고 (3) 경계면의 물리량을 구하기 위한 인자가 필요하다.⁽⁴⁾

한편, 지배방정식은 내재적 차분항과 외재적 차분항들을 분리하면 다음과 같은 대수방정식을 얻을 수 있다. 즉,

$$A_P \phi_P + \sum A_i \phi_i = Q_P, \quad i = E, W, N, S, T, B \quad (23)$$

여기에서 대수방정식의 계수, A_P 와 A_i , 그리고 원천항, Q_P 는 격자점의 데이터이다. 하지만 블럭 경계면 물리량의 적분에 따라 계수 A_L 과 A_R 이 존재하며, 이는 식 (22)의 인덱스 l 의 함수로 표현된다. 한편, 모든 보존적 처리에서 계수 A_P 는 다음의 두 개 항으로 구분할 수 있다. 즉,

$$A_P^b = - \sum A_i^b + \sum_k m_k, \quad A_P^d = - \sum A_i^d \quad (24)$$

여기에서 $k = e, w, n, s, t$, 그리고 b 를 나타내며, 윗첨자 c 와 d 는 각각 대류항과 확산항의 영향을 의미한다.

전술한 수치해법을 적용한 대수방정식은

$$A \phi = Q \quad (25)$$

로 표현된다. 여기에서 A 는 $(N \times N)$ 배열, ϕ 와 Q 는 각각 구하고자 하는 미지수와 원천항을 위한 열(column) 벡터이다. 이 때, A 배열의 불규칙성(irregularity)은 N 개의 대수방정식의 계산에 축차법(iteration)을 적용하여 해결한다.⁽¹²⁾

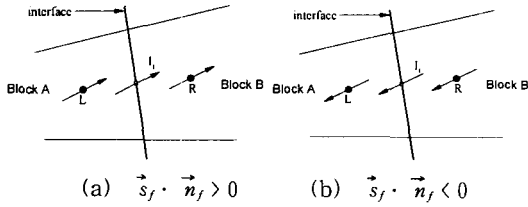


Fig. 3 The radiation intensity on interface between two blocks

한편, 본 연구에서는 대수방정식 배열 계산을 위하여 ILU(Incomplete LU decomposition)를 기본으로 하는 SIP 해법을 적용한다.⁽⁴⁾ 즉,

$$LU(\phi^{n+1} - \phi^n) = Q - A\phi^n \quad (26)$$

여기에서 윗 식의 우변항은 n 번 내부반복계산 후의 잔류항을 나타낸다. 최종적으로, 다음과 같이 정렬 다중격자제를 적용한 SIP 해법의 알고리즘을 정리할 수 있다.⁽¹²⁾

- (1) 각 블록에서 배열 A 와 원천항 Q 의 원소를 구한다. 단, 블록 경계면의 영향은 무시한다.
- (2) 블록 경계면 적분을 수행하여 격자점 L 과 R 의 A_P 와 Q_P 를 갱신하고 A_L 과 A_R 을 구한다.
- (3) 각 블록에서 이웃하는 블록을 무시하고 하나의 블록에서 구하는 것과 동일한 방법으로 L 과 U 배열을 구한다.
- (4) 각 블록에서 계수배열(즉, A_P , A_i , 그리고 Q_P)을 이용하여 잔류항(residual)을 구한다. 하지만 블록 경계면 주위 격자점은 아직 불완전하다. 이는 이웃하는 블록에 영향을 주는 계수가 0이기 때문이다.
- (5) 블록 경계면 계산을 수행하여 $A_L\phi_R$ 및 $A_R\phi_L$ 을 추가하여 격자점 L 과 R 의 잔류항을 개선한다. 이로써 모든 격자점의 잔류항은 완전하게 된다.

(6) 각 블록내의 변수를 계산하여 개선한 후 단계 (1)로 돌아간다.

(7) 수렴조건이 만족할 때까지 단계 (1)-(6) 과정을 반복한다.

3.2 다중블록 복사열전달 해석

한편, 블록 경계면의 복사강도를 구하기 위하여 본 연구에서는 Chai and Moder⁽¹³⁾ 방법을 적용한다. 여기에서, 아래와 같은 블록 경계면에서의 복사열유속이 보존되어야 한다는 조건, 즉,

$$Q = \left[\int_{\Delta A} \int_{2\pi} I(\vec{s}, \vec{n}) d\Omega dA \right]_A = \left[\int_{\Delta A} \int_{2\pi} I(\vec{s}, -\vec{n}) d\Omega dA \right]_B \quad (27)$$

을 적용하여 다음과 같은 관계식을 도입한다.

$$\left[\sum_{j=1}^M \sum_{m=1, D_m > 0}^M I_j^m D_{G_j}^m \Delta A_j \right]_A = \left[\sum_{k=1}^M \sum_{m=1, D_m < 0}^M I_k^m D_{G_k}^m \Delta A_k \right]_B \quad (28)$$

여기에서, $M, \Delta A, J$, 그리고 K 는 각각 제어각도의 개수, 격자면의 면적, 블록 A 와 B 사이의 경계면을 따라 존재하는 제어체적의 개수를 나타낸다. 한편, Fig. 3와 같이 연결된 블록 경계면이 동일한 경우 윗 식은 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$I_f(x_f, y_f, z_f, \theta, \phi) = I_f(x_L, y_L, z_L, \theta, \phi), \quad \vec{s}_f \cdot \vec{n}_f > 0 \quad (29)$$

$$I_f(x_f, y_f, z_f, \theta, \phi) = I_f(x_R, y_R, z_R, \theta, \phi), \quad \vec{s}_f \cdot \vec{n}_f < 0 \quad (30)$$

여기에서, 하첨자 f 는 경계면을 의미하고, L 과 R 은 경계면 양쪽 격자점의 복사강도를 위한 인덱스를 나타낸다. 한편, \vec{s}_f 와 \vec{n}_f 는 각각 경계면의 복사강도의 방향과 단위 수직벡터로서, 다중블록 복사열전달에 대한 보다 자세한 내용은 Chai and Moder⁽¹³⁾ 및 Byun 등⁽¹⁴⁾에서 찾을 수 있다.

3.3 경계조건

입구에서 각 변수의 경계조건은 다음과 같다.

$$u, v, w, \phi = \text{given} \quad (31)$$

$$k = \frac{3}{2} I_T^2 U_{ref}^2, \quad \epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{I_{ref}} \quad (32)$$

여기에서 I_{ref} 와 U_{ref} 는 각각 특성길이와 특성속도를 나타내며, I_T 는 난류강도이다. 한편, 출구의 경우 시스템의 질량보존이 만족되도록 유량을 조절한다. 대칭 경계면의 경우, 경계면을 통한 질량의 유출입이 없도록 조절한다.

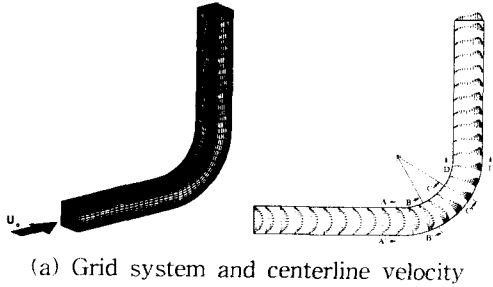
한편, 벽면에서는 속도에 대한 점착조건, 그리고 난류량 및 열유속에 대한 벽함수를 적용한다.⁽⁸⁾

4. 결과 및 고찰

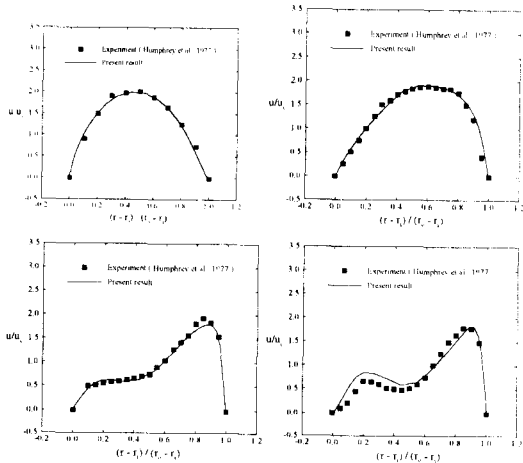
개발된 다중블록 프로그램을 소각로의 연소특성 고찰에 적용하기 위하여 본 절에서는 유동장, 복사열전달, 그리고 소각로 연소문제를 해석하여 각각 기존 연구자의 결과 및 상용코드의 해석 결과와 비교하여 프로그램을 검증한다.

4.1 유동장 해석

본 연구에서 개발된 다중블록 프로그램의 검증을 위한 첫 번째 예제로서 3차원 곡관의 내부유동장을 해석하였다. Fig. 4(a)는 사용된 격자계($22 \times 22 \times 41$) 및 중심면에서의 속도분포를 보여

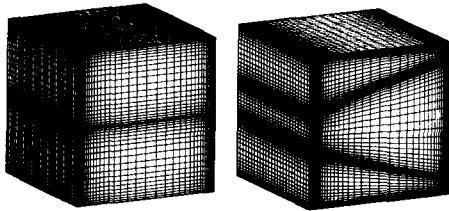


(a) Grid system and centerline velocity

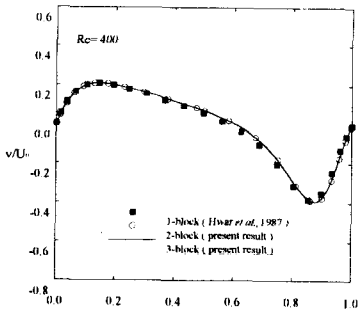


(b) Velocity profiles at various section

Fig. 4 A 3D curved duct flow for $Re = 790$

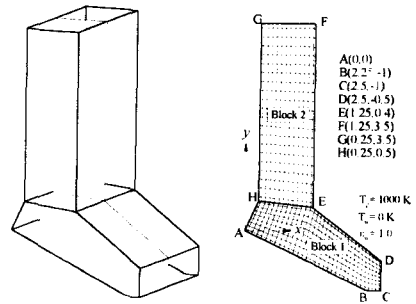


(a) 2- and 3-block grid system

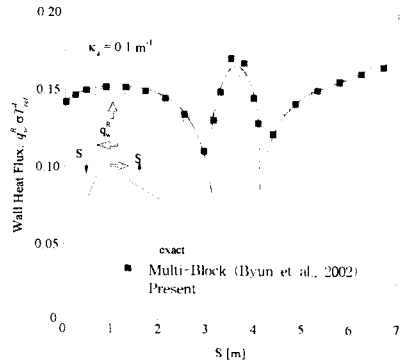


(b) velocity profiles on horizontal centerline

Fig. 5 A 3D driven cavity flow for $Re = 400$



(a) Schematic and grid system



(b) Heat flux

Fig. 6 Analysis of multi-block radiation

주고 있다. 곡관 입구의 경계조건을 부여하기 위하여 실험에 사용된 것과 동일한 길이의 사각덕트의 출구속도 분포를 적용하였으며, 출구에서는 Neumann 조건을 적용하였다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 A, B, C, 그리고 D 단면 (각각, 0, 30, 60, 그리고 90°)에서의 속도분포를 Humphrey 등⁽¹⁵⁾의 실험결과와 함께 보여주고 있으며, 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

유동해석의 두 번째 예제는 3차원 공동 유동으로서, Fig. 5(a)에 격자선이 벽면으로 밀집되어 있는 각각 두 개 및 세 개의 블럭을 적용한 격자계를 도시하였다. 사용된 격자계는 $(22 \times 22 \times 41)$ 이며, $Re = 400$ 인 경우를 해석하였다. Fig. 5(b)는 수평중심선에서의 속도분포를 나타낸 것으로서 단일격자계를 사용한 Hwar 등⁽¹⁶⁾의 계산결과와 함께 도시하였다.

4.2 복사열전달 해석

다중블럭 복사해법의 수치해를 검증하기 위하여 소각로 형상 내의 열복사 문제를 해석하였다.⁽¹⁴⁾ Fig. 6(a)는 형상 및 격자계를 나타낸 것으로서, 매질의 온도는 1000 K로 일정하며 벽면의

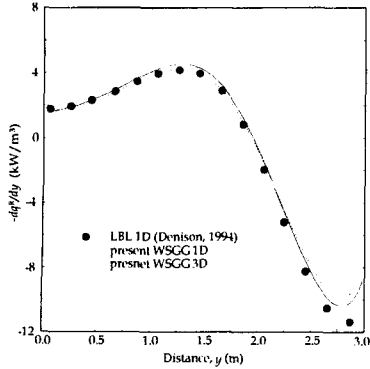


Fig. 7 The radiative source for a H₂O/CO₂ mixture with the cosine temperature and mole fraction profile

온도와 방사율은 각각 0 K 및 1.0이며, 매질은 산란하지 않으며 흡수계수는 $\kappa_a = 1.0 \text{ m}^{-1}$ 이다. 사용된 격자계는 $(22 \times 22 \times 41)$ 및 $N_\theta = 10$ 및 $N_\phi = 8$ 이다. Fig. 6(b)는 옆 벽면으로 전달되는 복사열유속을 도시한 것으로서, 벽면이 서로 맞닿는 지점에서 차가운 벽면의 영향으로 열유속이 급격히 감소하고 있다. 또한 형상의 비대칭성으로 인하여 보기계수(view factor)의 변화에 따라 오른쪽 벽면의 열유속이 보다 증가하고 있다. 한편, 본 연구결과는 엄밀해 및 기존의 연구결과⁽¹⁴⁾와 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, 일반적인 탄화수소계 연료의 연소시 H₂O 및 CO₂가 동시에 존재하게 되며, Fig. 7은 이러한 경우 1차원 채널 내의 기체 복사열전달을 해석한 것으로서, 이 경우채널 내부의 온도 및 H₂O의 물분율은 각각 아래와 같은 코사인 함수 형태를 갖는다.⁽⁶⁾

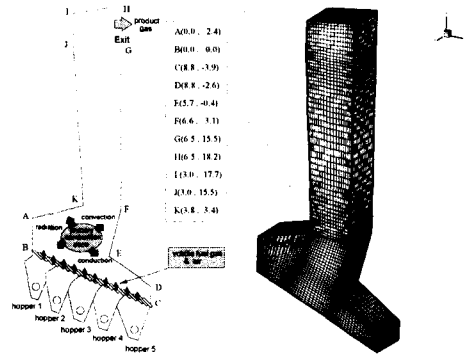
$$T = 700 - 300 \cos(\pi y / L_y) \quad (33)$$

$$Y_{\text{H}_2\text{O}} = 0.2 - 0.15 \cos(\pi y / L_y) \quad (34)$$

이고, $Y_{\text{CO}_2} = 0.667 Y_{\text{H}_2\text{O}}$ 이며, 벽면방사율 $\epsilon_w = 1$ 이고 $T_w = 400 \text{ K}$ 인 경우의 내부 매질에서의 복사열유속의 발산향을 보여주고 있는데, 본 프로그램에 적용한 회체가스가중합산모델은 각선계산법에 의한 기준해⁽⁶⁾를 잘 따라가고 있다. 즉, 내부 매질의 온도 및 연소 가스의 물분율이 비선형적으로 변하는 경우에서도 본 프로그램은 정확한 계산 결과를 예측하고 있음을 알 수 있다.

4.3 소각로 해석

본 연구에서 개발된 다중블럭 프로그램의 최종



(a) schematic (b) 4-block grid system

Fig. 8 A 3D complex incinerator geometry and multi-block grid system

Table 1 Comparison of the mass averaged value at the exit of the incinerator

variable	present	Fluent 5.5
Temperature	1222.412 K	1231.119 K
Fuel 1	1.7626×10^{-10}	2.1002×10^{-10}
Fuel 2	1.7626×10^{-10}	2.1002×10^{-10}
Fuel 3	4.1989×10^{-10}	4.4668×10^{-10}
CO	7.9106×10^{-9}	9.1111×10^{-9}
CO ₂	0.172012	0.173162
O ₂	0.044422	0.039733
H ₂ O	0.141033	0.149201

검증을 위하여 Fig. 8에 도시된 3차원 소각로의 연소현상 해석을 수행하였다. 입구 \overline{AB} 에서 투입된 쓰레기는 수분이 먼저 증발되며 이후 건조된 쓰레기는 온도가 상승함에 따라 가연성 기체를 발생하는 열분해 과정을 겪게 된다. 이 때 방출되는 기체는 호퍼(hopper)를 통하여 공급되는 공기와 혼합되어 가연성 혼합기를 형성하고 가열착화되어 화염을 형성한다. 열분해 과정이 끝난 후 고정탄소와 불연성 물질들이 화격자 상에 남게 되며 이중 고정탄소는 탄소와 공기중의 산소가 반응하는 고체연소 과정을 겪는다.^(2,3,12)

한편, Fig. 8(a)의 \overline{BC} 는 소각로의 스토커 부분으로서 그 아래쪽에 있는 5개의 호퍼를 통하여 연소용 공기가 공급되고 스토커의 표면에서는 가연성 연료기체가 증발되는데, 본 연구에서는 연료와 산화제가 미리 섞여서 소각로 내부로 입사되는 예혼합 경계조건을 부여하였다. 소각로의 내부 벽면은 1113 K로 일정하게 두었으며, 출구면에는 대기압 조건을 부여하였다. Fig. 8(b)는

계산에 사용된 격자계를 보여주고 있다. 한편, Table 1은 출구면에서의 온도와 각 화학종의 평균 질량분율을 나타낸 것으로서 상용코드 Fluent 해석결과와 함께 나타내었다. 출구온도의 경우 본 연구결과 및 Fluent⁽¹⁰⁾ 해석결과는 주어진 조건에서 각 화학종을 고려한 이론 출구온도인 1232.4 K와 거의 일치하고 있으며, 각 화학종의 평균 질량분율 역시 본 해석과 상용코드 Fluent 해석은 상당히 유사한 결과를 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구는 소각로의 연소해석을 위한 선행연구로서 3차원의 복잡한 형상 내 비회체 열복사를 고려한 화학반응 난류 유동장 해석을 위한 다중블럭 프로그램을 개발하였다. 블럭 경계면의 내재적 처리를 위하여 정렬 블럭격자 기법을 적용하였으며 열복사 해석을 위하여 유한체적법과 회체가스가중합산 모델을 도입하였다. 개발된 프로그램의 검증을 위하여 다양한 유동해석, 복사열 전달 해석, 그리고 소각로의 연소해석을 수행하였으며, 기존의 연구결과 및 상용코드를 이용한 해석결과와 비교하였다. 본 연구의 제2보에서는 본 연구의 프로그램을 응용하여 소각로 내의 연소현상, 특히 다양한 유입공기 조건 및 비회체 열복사의 영향을 고찰하기로 한다.

참고문헌

(1) Choi, S. M., Kim, S. J., Kim, S. K., and Yoo, Y. D., 1994, "Topics in Waste Incinerator Research and Development," *J. KSME*, Vol.34, No.8, pp. 632~642.
 (2) Kim, H. Y., Chun, C. K., and Hwang, H. Y., 1998, "The Study on the Combustion Model and Combustion Characteristics for Stoker Type Incinerator," *Trans. KSME(B)*, Vol. 22, No. 5, pp. 627~639.
 (3) Lee, J. Y., Kim, S. B., Yun, Y. S., Kim, H. J., and Huh, I. S., 2001, "Flow Analysis for the Geometry Optimization of Combustion Chamber of Central Flow Type Waste Incinerator," *Trans. KSME(B)*, Vol. 25, No. 2, pp. 252~259.
 (4) Lilek, Z., Muzaferija, S., Peric, M., and Seidl, V., 1997, "An Implicit Finite-Volume Method using Nonmatching Blocks of

Structured Grid," *Numer. Heat Transfer, B*, Vol. 32, pp. 385~401.
 (5) Thakur, S., Shyy, W., and Udaykumar, H. S., 1998, "Multiblock Interface Treatments in a Pressure-Based Flow Solver," *Numer. Heat Transfer, B*, Vol. 33, pp. 367~396.
 (6) Denison, M. K., 1994, "A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary RTE Solver," Ph.D. Thesis, Brigham Young University.
 (7) Baek, S. W., Kim, H. S., Yu, M. J., Kang, S. J., and Kim, M. Y., 2002, "Application of the Extended Weighted Sum of Gray Gases Model to Light Fuel Oil Spray Combustion," *Combust. Sci. Tech*, Vol. 174, pp. 65~98.
 (8) Launder, B. E., and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, pp. 269~289.
 (9) Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1976, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Emphasis on Soot Formation and Combustion," *16th Symp.(Int.) Comb.*, Pittsburgh, pp. 719~729.
 (10) Fluent User's Guide, 2000, version 5.5.
 (11) Smith, T. F., Shen, Z. F., and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.
 (12) Sohn, Y. M., 2002, "A Numerical Study on the Combustion Characteristics of Solid Fuel in a Complex Geometry," Ph.D. Thesis, KAIST.
 (13) Chai, J. C. and Moder, J. P., 1997, "Spatial-Multiblock Procedure for Radiation Heat Transfer," *Numer. Heat Transfer, B*, Vol. 31, pp. 277~293.
 (14) Byun, D. Y., Baek, S. W., and Kim, M. Y., 2002, "Prediction of Radiative Heat Transfer in a 2D Enclosure with Blocked-Off, Multi-Block, and Embedded Boundary Treatments," *Numer. Heat Transfer, A*, in press.
 (15) Humphrey, J. A. C., Taylor, A. M. K., and Whitelaw, J. H., 1977, "Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature," *J. Fluid Mech.*, Vol. 83, pp. 509~527.