

< 논문 >

# 1 차원 비정상상태 복사열전달 해석을 위한 2 차 상류스킴 및 QUICK 스킴의 유한체적복사해법 적용 연구

변도영<sup>†</sup> · 이건호<sup>\*</sup> · 김만영<sup>\*\*</sup>

(2005년 3월 10일 접수, 2006년 2월 13일 심사완료)

## 1- Dimensional Transient Radiative Heat Transfer Using Finite Volume Method with 2-Order Upwind Scheme and QUICK Scheme

Doyoung Byun, Gun Ho Lee and Man Young Kim

**Key Words :** Transient Radiative Heat Transfer(비정상상태 복사열전달), Finite Volume Method(유한체적복사해법), Scheme(스킴), CPU Time(CPU 시간)

### Abstract

Transient radiative heat transfer is analyzed in a one-dimensional slab using finite volume method (FVM). In this study, the step, 2<sup>nd</sup> order upwind, and QUICK schemes are used for incident diffuse radiation and collimated beam, respectively. The results for diffuse radiation show that all schemes applied in this study give good agreements with available published results. In case of collimated beam, however, the results show deviations from the analytical solutions. To successfully describe the propagations of collimated beam, shock capturing schemes such as TVD scheme are need to be developed.

### 기호설명

$a$  : 이산화방정식의 계수  
 $b$  : 이산화방정식의 생성항  
 $c$  : 광속  
 $D_{ci}^m$  : 방향 가중치  
 $I$  : 복사강도,  $W/(m^2 \cdot sr)$   
 $I_b$  : 흑체 복사강도,  $W/(m^2 \cdot sr)$   
 $\vec{r}$  : 위치 벡터  
 $S_r^m$  : 생성항  
 $T$  : 온도, K

$\Delta V$  : 검사체적  
 $\Delta \Omega$  : 검사각도  
 $\Phi$  : 산란위상함수  
 $\theta$  : 극각  
 $\kappa_a$  : 흡수계수,  $m^{-1}$   
 $\sigma_s$  : 산란계수,  $m^{-1}$

### 1. 서론

최근 몇년간 비정상상태 복사열전달(Transient radiative transfer)에 관한 해석이 주목을 받아왔다. 예를 들면, 레이저 산업은 현대 의학 기술이나 재료처리 기술과 접목하여 비약적인 발전을 하고 있어 이의 해석이 요구되고 있다. 탁한 매질에서의 숏펄스 레이저(short-pulsed laser)<sup>(1,2)</sup> 재료처리과정<sup>(3,4)</sup>과 피부조직<sup>(5)</sup>에서의 펄스 레이저에 관한 연구가 진행되었다.

이와 같이 비정상상태 복사전달방정식[Transient radiative transfer equation(TRTE)]을 해석하기 위하여 다양한 해석 방법들이 제시되었다. 몬테칼로법 [Monte Carlo method(MCM)]<sup>(6)</sup>은 대표적인 TRTE의

그리스 문자

$\beta_0$  : 소멸계수,  $= \kappa_a + \sigma_s$ ,  $m^{-1}$

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 건국대학교 항공우주공학과, e-시스템 통합기술연구센터

E-mail : dybyun@konkuk.ac.kr  
 TEL : (02) 450-4195, FAX : (02) 444-6614

<sup>\*</sup> 회원, 건국대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 회원, 전북대학교 항공우주공학과

해석 방법이다.<sup>(7,8)</sup> Flock et al.<sup>(9)</sup>은 MCM을 사용하여 TRTE의 효과를 연구하였고, Jacques<sup>(10)</sup> 또한 MCM을 사용하여 생체조직에서 나노시간 단위에서의 복사열전달 과정을 시험하였다. Hsu<sup>(11)</sup>는 TRTE에 관하여 난반사와 평행입사광의 영향 등에 관하여 연구하였으며 이 결과들은 Tan과 Hsu<sup>(12)</sup>의 해석해와 잘 일치한다.

Wu<sup>(13)</sup>는 적분식[Integral Equation(IE) formulation]을 이용하여 등방성 산란에 관하여 해석하였고, Wu와 Wu<sup>(14)</sup>는 삼차원에서의 흡수, 비등방산란의 영향에 관하여 연구하였다.

한편 구분좌법(Discrete-Ordinates Method) 또한 TRTE를 해석하는데 사용되었다. Sakami et al.<sup>(15)</sup>는 DOM을 사용하여 비정상 복사열전달 문제를 1차원으로 해석하였다. 또한 Sakami et al.<sup>(16)</sup>는 DOM을 사용하여 사각형 내부에서 평행입사광에 관한 TRTE를 해석하였고, 생체조직을 통과하는 초펄스 레이저(short-pulsed laser)<sup>(17)</sup>에 관하여 해석하였다.

앞서 살펴본 것과 같이 TRTE를 해석하는 방법에는 적분식법, 몬테칼로법, 구분좌법 등 여러가지가 있다. 그리고 구분좌법과 유사한 방법으로서 비직교좌표계 적용 가능성, 전산유체역학과의 호환성, 해의 정확도, 비교적 짧은 계산시간 등의 장점을 가지고 있는 유한체적복사해법(Finite - Volume method (FVM))<sup>(18-20)</sup>도 최근에 비정상상태 복사열전달 해석에 적용되었다. Chai<sup>(23)</sup>는 FVM을 이용하여 1차원 및 2차원 형상에서 비정상 복사열전달을 해석하였다. 흡수, 비등방성 산란을 하는 매질에 대한 해석을 수행하였다.

이와 같이 현재까지 TRTE에 대한 다양한 접근 방법과 연구가 있었다. 그러나 비정상상태 복사열전달 해석에서는 DOM 또는 FVM을 이용할 경우 적용하는 스킵이 매우 중요하다. 특히 레이저와 같은 평행광이 입사하는 문제의 경우에는 스킵에 따라 해의 정확도와 계산 비용 면에 있어서 큰 차이가 날 수 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 활용되고 있는 여러가지 스킵들을 비교 분석한 연구가 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 비정상 복사 전달 방정식을 유한체적복사해법을 이용하여 해석하는데 있어서 중요한 요인이 되는 여러가지 스킵들을 1차원 문제에 적용하여 비교 분석하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 비정상 복사전달방정식

경로  $\bar{s}$ 의 임의의 지점  $\bar{r}$ 에서 흡수, 방사, 산란하는 회체 매질에서의 복사 강도를 나타내는 지배 방정식은 다음과 같다.<sup>(18-22)</sup>

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\bar{r}, \bar{s}, t)}{\partial t} + \frac{\partial I(\bar{r}, \bar{s}, t)}{\partial s} = -\beta_0 I(\bar{r}, \bar{s}, t) + \kappa_a I_b(\bar{r}, t) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(\bar{r}, \bar{s}', t) \Phi(\bar{s}', \bar{s}) d\Omega' \quad (1)$$

여기에서  $c$ 는 광속이며,  $\kappa_a$ 와  $\sigma_s$ 는 흡수계수와 산란계수이고,  $\beta_0 = \kappa_a + \sigma_s$ 는 소멸 계수이다.  $\Phi(\bar{s}' \rightarrow \bar{s})$ 는  $\bar{s}'$  방향으로 들어와서  $\bar{s}$ 으로 산란되는 산란위상함수이다. 식 (1)의 우측 항에서 첫 번째 항은 흡수와 산란으로 인한 복사강도의 소멸항이고, 나머지 두 항은 방사와 산란으로 인해 복사강도가 증가하는 것을 나타낸다. 식 (1)을 다음과 같이 나타내고 이산화한다.

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I^m}{\partial t} + \frac{\partial I^m}{\partial s} = -\beta_0 I^m + S_r^m \quad (2)$$

윗첨자  $m$ 은 포톤이 날아가는 각 방향을 나타내며 여기서, 소멸계수  $\beta_0^m$ 과 생성항  $S_r^m$ 은 다음과 같다.

$$S_r^m = \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m'=1, m' \neq m}^N I^{m'} \Phi^{m', m} \Delta\Omega^m \quad (3a)$$

$$\beta_0 = \kappa_a + \sigma_s - \frac{\sigma_s}{4\pi} \Phi^{m, m} \Delta\Omega^m \quad (3b)$$

### 2.2 TRTE의 이산화

TRTE는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 식 (2)를 시간간격  $\Delta t$ 와 제어각, 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 이산화할 수 있다. 식을 간결하게 나타내기 위해 윗첨자  $m$ 을 생략하여 표기하기로 한다. 다음이 식 (2)를 적분한 식이다.

$$\int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} \int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} dt dz d\Omega + \int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} \int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} \frac{\partial I}{\partial s} dt dz d\Omega = \int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} \int_{\Delta\Omega\Delta z\Delta t} (-\beta_0 I + S_r) dt dz d\Omega \quad (4)$$

식 (4)를 일련의 이산화 과정을 거친 후 다음과 같은 이산화된 TRTE를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{c} (I_p - I_p^c) \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta\Omega + D_{cz} (I_e - I_w) = (-\beta_0 I_p + S_{r,p}) \Delta z \Delta\Omega \quad (5)$$

$D_{cz}$ 는 방향 가중치이며 다음과 같다.

$$D_{cz} = \int_{\Omega} (\bar{s} \cdot \bar{n}_z) d\Omega \quad (6)$$

식 (5)는  $D_{cz} > 0$ 인 경우의 이산화 결과이며  $D_{cz} < 0$ 인 경우도 같은 방법으로 가능하다.

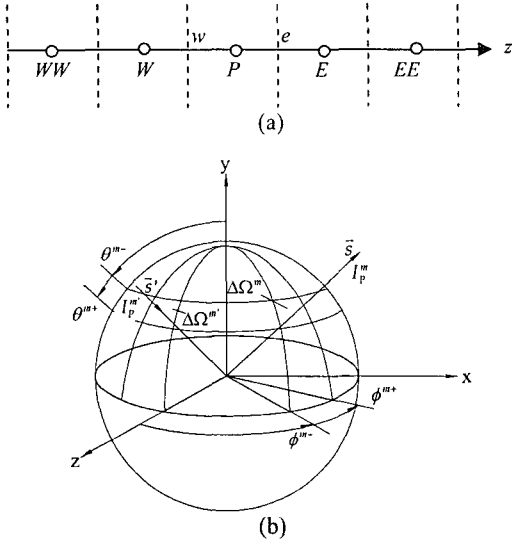


Fig. 1 (a) One-dimensional control volume (b) Schematic of solid angle and scattering angle

2.3 스킴

본 연구에서도 보통의 복사열전달 해석과 유동 해석에 사용되는 3가지 스킴에 대하여 분석하였다. Fig. 1(a)에서 보이는 제어체적의 경계 면에서의 값을 계산할 때 적당한 스킴을 선택할 수 있다.

1차 상류 스킴 (First-Order Upwind Scheme)<sup>(25)</sup>

식 (5)의 두 번째 항에서 경계 면에서의 값  $I_e, I_w$  는 상류 쪽 격자 점에서의 값과 같다, 즉

$$I_e D_{cz} = I_p \max(D_{cz}, 0) - I_E \max(-D_{cz}, 0) \quad (7a)$$

$$I_w D_{cz} = I_W \max(D_{cz}, 0) - I_P \max(-D_{cz}, 0) \quad (7b)$$

방향 가중치에 값에 따라 상류의 방향이 바뀐다. 식 (7a), (7b)를 식 (5) 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$a_p I_p = a_w I_W + a_E I_E + b \quad (8a)$$

$$a_p = |D_{cz}| + \beta_0 \Delta z \Delta \Omega + \frac{1}{c} \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (8b)$$

$$a_w = \max(D_{cz}, 0) \quad (8c)$$

$$a_E = \max(-D_{cz}, 0) \quad (8d)$$

$$b = S_{r,p} \Delta z \Delta \Omega + \frac{1}{c} I_p^0 \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (8e)$$

2차 상류스킴 (Second-Order Upwind Scheme)

2차 상류스킴에서<sup>(25)</sup>는 경계면 값이 다음과 같다.

$$I_e D_{cz} = [I_p + 0.5(I_p - I_W)] \max(D_{cz}, 0) - [I_E + 0.5(I_E - I_{EE})] \max(-D_{cz}, 0) \quad (9a)$$

$$I_w D_{cz} = [I_W + 0.5(I_W - I_{WW})] \max(D_{cz}, 0) - [I_P + 0.5(I_P - I_E)] \max(-D_{cz}, 0) \quad (9b)$$

식 (9a), (9b)를 식 (5)에 대입하여 정리하면,

$$a_p I_p = a_w I_W + a_E I_E + b \quad (10a)$$

$$a_p = |D_{cz}| + \beta_0 \Delta z \Delta \Omega + \frac{1}{c} \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (10b)$$

$$a_w = \max(D_{cz}, 0) \quad (10c)$$

$$a_E = \max(-D_{cz}, 0) \quad (10d)$$

$$b = -0.5 |D_{cz}| I_p + a_E I_E + a_W I_W + S_{r,p} \Delta z \Delta \Omega - 0.5 (a_E I_{EE} + a_W I_{WW}) + \frac{1}{c} I_p^0 \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (10e)$$

QUICK 스킴 (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics Scheme)

QUICK스킴<sup>(25)</sup>에서는 경계면 값을 다음과 같이 처리한다.

$$I_e D_{cz} = \left[ I_p + \left( -\frac{1}{8} I_E - \frac{1}{4} I_P + \frac{3}{8} I_E \right) \right] \max(D_{cz}, 0) - \left[ I_E + \left( -\frac{1}{8} I_{EE} - \frac{1}{4} I_E + \frac{3}{8} I_P \right) \right] \max(-D_{cz}, 0) \quad (11a)$$

$$I_w D_{cz} = \left[ I_E + \left( -\frac{1}{8} I_{EE} - \frac{1}{4} I_E + \frac{3}{8} I_P \right) \right] \max(D_{cz}, 0) - \left[ I_P + \left( -\frac{1}{8} I_E - \frac{1}{4} I_P + \frac{3}{8} I_W \right) \right] \max(-D_{cz}, 0) \quad (11b)$$

식 (11a), (11b)를 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$a_p I_p = a_w I_W + a_E I_E + b \quad (12a)$$

$$a_p = |D_{cz}| + \beta_0 \Delta z \Delta \Omega + \frac{1}{c} \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (12b)$$

$$a_w = \max(D_{cz}, 0) \quad (12c)$$

$$a_E = \max(-D_{cz}, 0) \quad (12d)$$

$$b = \frac{5}{8} |D_{cz}| I_p - \frac{1}{8} \{ 3 \max(D_{cz}, 0) + \max(-D_{cz}, 0) \} I_E - \frac{1}{8} \{ \max(D_{cz}, 0) + 3 \max(-D_{cz}, 0) \} I_W - \frac{1}{8} \{ \max(-D_{cz}, 0) I_{EE} + \max(D_{cz}, 0) I_{WW} \} + S_{r,p} \Delta z \Delta \Omega + \frac{1}{c} I_p^0 \frac{\Delta z}{\Delta t} \Delta \Omega \quad (12e)$$

이산화된 방정식은 매 시간단계에서 반복 계산된다. 수렴의 판정은 다음과 같은 기준으로 판단하였다.

$$\frac{|I_p - I_p^0|}{I_p} \leq \varepsilon \quad (13)$$

여기서  $I_p^0$  는 전 시간단계의 복사강도를 의미하며  $\varepsilon$  은  $10^{-6}$  으로 선택하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 코드 검증

본 연구에서 고려한 FVM 을 검증하기 위하여 1 차원 평판사이에서의 복사열전달 문제를 해석하여 복사강도와 복사열유속 결과를 적분식을 이용한 해석결과<sup>(12)</sup>와 비교하였다. 복사강도와 복사열유속에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$G(z,t) = \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega = \sum_{m=1}^N I^m \Delta\Omega^m \quad (14)$$

$$q(z,t) = \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega = \sum_{m=1}^N I^m \int_{\Delta\Omega^m} \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega^m \quad (15)$$

평판은 난반사와 흑체라고 가정하였으며 온도는 0K 로 고정하였다. 시간 t=0 에서 왼쪽 경계 (z/L=0)로부터 π 만큼의 복사열이 방사될 경우의 복사열전달 과정을 시간에 따라 비교하였다. π 만큼의 열을 가하면 경계조건 계산시에 복사강도가 1 로 계산되어 편리하기 때문이며 제어체적 수에 대한 영향은 검증한 후, 300 개의 제어체적과 40 개의 제어각을 이용하여 계산을 수행하였다. 기존 연구들과 비교하기 위하여 산란 알베도는 0.5 로 고정하여 계산을 수행하였다.

Fig. 2 는 평판내부에서의 복사강도와 복사열유속을 나타내고 있다. 시간이 지남에 따라 매질 내부로 복사열이 전달되어 정상상태로 접근하는 것을 알 수 있다. 그러나 후방산란(back scattering) 때문에 복사열이 유입되는 왼쪽 벽에서의 복사열유속은 시간이 지남에 따라 감소하고 있다. 기존의 적분식을 이용한 연구결과와 본 연구에서의 FVM 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 3.2 스킴 비교 분석

스킴들의 성능을 분석하기 위하여 앞 절과 같은 1 차원 평판사이의 매질 내부에서 전달되는 비정상상태 복사열을 여러 스킴을 적용하여 해석하였다. 평판은 난반사와 흑체라고 가정하였으며 온도는 0K 로 고정하였고 왼쪽 경계(z/L=0)로부터 π 만큼의 복사열이 방사될 경우의 복사열전달을 해석하였다.

본 연구에서 적용한 스킴은 전산유체역학에서 일반적으로 많이 적용되고 있는 1 차상류 스킴, 2 차상류스킴, Quick 스킴 등 3 가지이다. 유동 해석을 위한 수치해석기법은 공간차분형태에 따라 크게 중앙차분법과 상류스킴으로 분류될 수 있다. 중앙차분기법은 각 계산지점의 특성만을 반영하여 계산하는 기법으로 비교적 간단하지만 불연속 흐름을 해석할 수 없다는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 해결할 수 있는 방법이 상류스킴인데 각 지점의 특성선 특성에 따라 공간차분을 변화시켜

주기 때문에 변화하는 흐름을 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 복사열전달의 경우에도 포톤(photon)의 전달과정은 매우 빠른 유동과 유사한 특성을 지니고 있으므로 일반적으로 1 차 상류스킴을 이용하여 해석되어 왔다.<sup>(19,24)</sup> 특히 복사열전달은 정상상태를 가정하고 해석을 수행하여 왔으므로 1 차 상류스킴으로도 엄밀해와 매우 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.<sup>(24)</sup> 그러나 레이저와 같은 비정상상태의 복사열전달은 충격파와 같은 비연속 경계면이 정확하게 묘사되어야 하므로 다양한 스킴에 대한 분석이 필요하다.

Fig. 3 은 스킴에 따른 복사강도와 복사열유속을 비교하고 있다. Fig. 3(a)는 복사 강도의 시간에 따른 변화를 나타낸 그림으로 1 차 상류 및 2 차 상류 스킴, QUICK 스킴 모두 엄밀해와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 복사 강도가 작은

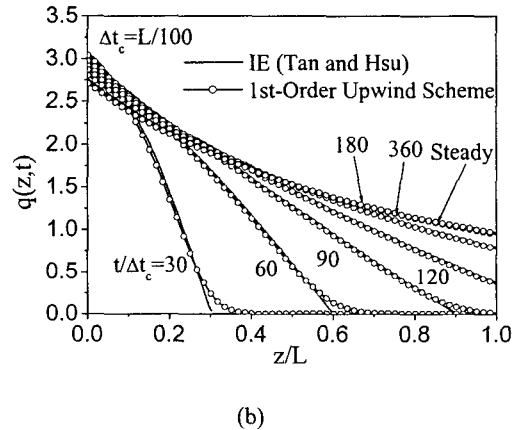
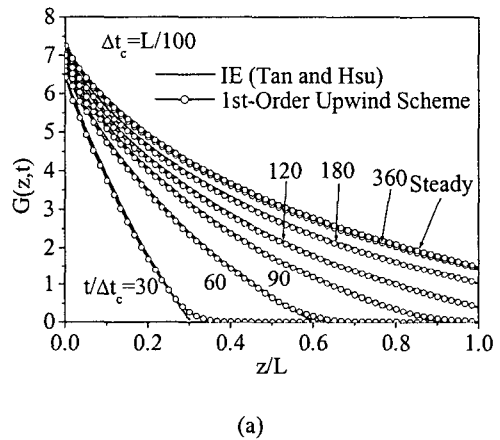


Fig. 2 Incident radiation and radiative heat flux in homogeneous medium with diffusely emitting boundary: (a) incident radiation distribution, (b) radiative heat flux distribution

영역에서는 스킴에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. 1차 상류스킴은 기울기가 급격하게 떨어지는 부분에서 정확성이 떨어지고 있으며, 2차 상류스킴은 1차 상류스킴보다는 정확히 예측하고 있지만 Quick 스킴이 보다 더 정확함을 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서는 이 특징이 좀 더 두드러지게 나타난다. 특히 1차 상류스킴은 복사에너지가 감소하는 부분에서 명확한 차이를 보이고 있다. 한편 왼쪽 경계에서 시간이 지남에 따라 복사열유속이 감소하는 것은 후방산란 때문에 매질에서부터 왼쪽 벽면방향으로 전달되는 복사열이 증가하기 때문이다. 식 (15)에서 보는 바와 같이 복사열유속은 전달 방향을 고려하여 적분되기 때문이다.

두번째 해석 문제로서 1 차원 평판의 한쪽 면으로부터 입사광(collimated beam)이 가해지는 비정상상태 복사열전달 문제를 1차 상류 스킴, 2차 상류 스킴, QUICK 스킴을 이용하여 해석하였다. 레이저의 복사전달과정이 가장 대표적인 예로서 입사광

(collimated beam)의 특성은 충격파처럼 불연속성이 존재한다는 사실이다. 1 차원 평판 사이의 매질 내부에서 복사열전달이 해석되었으며 왼쪽 경계로부터  $\pi$  만큼의 복사열이 축방향으로 유입된다. 경계면은 흑체라고 가정하였으며 온도는 0 K 로 고정하였다.

Fig. 4는 복사열유속이 시간에 따라 변화하는 결과를 보여주고 있다. 1차 상류스킴은 엄밀해와 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이상적인 경우에는 1차 상류 스킴도 불연속 흐름을 잘 계산할 수 있으나 작은 생성항이라도 포함되는 경우 이로 인해 오차가 발생하거나 수렴하지 못하는 한계를 가지고 있다. Fig. 4의 결과도 1차 상류 스킴은 비정상상태의 복사열전달에는 적용에 한계가 있음을 보여준다. 2차 상류 스킴과 Quick 스킴은 해의 정확도를 높이기 위한 고차의 스킴으로서 1차 상류 스킴보다 정확한 결과를 보여주고 있으나 불연속면을 정확하게 묘사하지는 못하고 있다.

충격파를 묘사할 수 있는 방법은 수치기법에서 발생하는 인공감쇠를 고려하는 방법으로 불연속점 근처에서 발생하는 특성을 반영할 수 있다. 유한 차분기법 중에서 중앙차분기법에 기반하고 있는 Beam-Warming 기법 등이 개발되어 적용되었으나 흐름의 전파특성을 물리적으로 반영하지 못하는

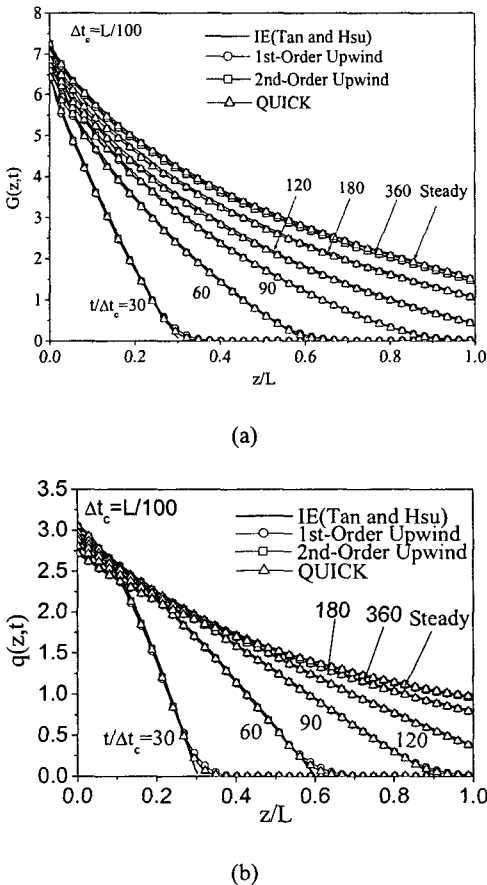


Fig. 3 Comparison of Incident radiation and radiative flux about diffuse radiation

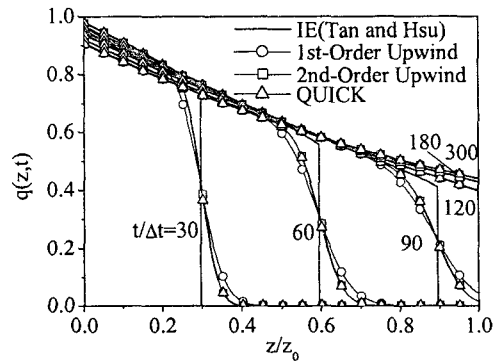


Fig. 4 Comparison of radiative fluxes for collimated beam

Table 1 CPU time for convergence for a variety of scheme

	Diffuse (CPUs)	Collimated Beam (CPUs)
First-Order Upwind Scheme	148.4	124.0
Second-Order Upwind Scheme	5103.5	3582.8
Quick Scheme	327.2	203.6

한계가 있다. 이어서 중앙차분기법의 전파특성 한계를 극복하기 위해 연구된 것이 flux vector 분할 방법과 Godunov 방법으로 알려져 있는 flux difference 분할방법이다. 본 기법은 흐름의 전파특성을 정확하게 반영할 수 있기 때문에 충격파나 불연속 흐름을 수치진동이 발생하지 않게 해석할 수 있는 특징을 지니고 있다. 불연속흐름에서 발생하는 수치진동을 방지할 수 있는 또 다른 방법은 TVD(Total Variation Diminishing) 방법이다. TVD 기법은 비선형 제어자(limiter)에 의해 수치해의 변동이 통제되기 때문에 수치진동의 발생을 방지할 수 있는 고정확도의 방법이다.<sup>(25)</sup> 따라서 위에서 언급한 바와 같이 입사광(collimated beam)의 불연속성을 정확히 해석하기 위해서는 충격파에 적용할 수 있는 TVD와 같은 스킴의 개발과 평가가 요구된다.

Table 1 은 스킴에 따른 계산 시간(펜티엄 2.4 GHz)을 보여주고 있다. 2 차 상류 스킴이 수렴도에 걸리는 시간의 증가때문에 다른 스킴들에 비해 계산 시간이 월등히 많다. 1 차 상류 스킴은 시간은 가장 적게 걸리나 정확성이 떨어진다. 계산 결과나 계산 시간을 종합적으로 고려해보았을 때 QUICK 스킴이 가장 정확하고 빠른 해를 제공하고 있다.

#### 4. 결론

최근 주목을 받아온 비정상상태 복사열전달을 유한체적법을 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 스킴들의 영향을 살펴보기 위하여 1차 상류스킴, 2차 상류스킴 및 QUICK 스킴을 적용하여 해석을 수행하였다. 난반사 복사의 문제에서는 위 스킴들이 엄밀해와 유사한 해를 제공하고 있으나 불연속면을 갖고 있는 입사광(collimated beam)에 대해서는 엄밀해와 차이가 있음을 보여주었다.

#### 후 기

본 연구는 2004 년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Guo, Z. and Kumar, S., 2001, "Two-Dimensional Transient Radiative Heat Transfer Using Discrete Ordinates Method," *Proc. CHT'01: The second International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, Palm Cove, Queensland, Australia, pp. 1073-1080.
- (2) Guo, Z. and Kumar, S., 2002, "Discrete-Ordinates Solution of Short-Pulsed Laser Transport in Two-

- Dimensional Turbid Media," *Appl. Opt.*, Vol. 40, No. 19, pp. 3156-3163.
- (3) Longtin, J. P. and Tien, C. L., 1996, "Saturable Absorption During High-Intensity Laser Heating of Liquids," *J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 924-930.
- (4) Qui, T. G. and Tien, C. L., 1992, "Short Pulse Laser Heating in Metals," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 719-726.
- (5) Yamada, Y., 1995, "Light-Tissue Interaction and Optical Imaging in Biomedicine," *Annu. Rev. Fluid Mech. Heat Transfer*, C. L. Tien (Ed.), Vol. 6, pp. 1-59.
- (6) Wilson, B. C. and Adam, G., 1983, "A Monte Carlo Model for the Absorption and Flux Distributions of Light in Tissue," *Med. Phys.*, Vol. 10, pp. 824-830.
- (7) Brewster, M. Q. and Yamada, Y., 1995, "Optical Properties of Thick Turbid Media from Pico-second Time-Resolved Light Scattering Measurements," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 2569-2581.
- (8) Hasegawa, Y., Yamada, Y., Tamura, M. and Nomura, Y., 1991, "Monte Carlo Simulation of Light Transmission through Living Tissues," *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 4515-4520.
- (9) Flock, S. T., Patterson, M. S., Wilson, B. C. and Wyman, D. R., 1989, "Monte Carlo Modeling of Light Propagation in Highly Scattering Tissues-I: Model Predictions and Comparison with Diffusion Theory," *IEEE Trans. Med. Eng.*, Vol. 36, pp. 4515-4520.
- (10) Jacques, S. L., 1989, "Time Resolved Propagation of Ultrashort Laser Pulses within Turbid Tissues," *Appl. Opt.*, Vol. 28, pp. 2223-2229.
- (11) Hsu, P. F., 2000, "Effects of Multiple Scattering and Reflective Boundary on the Transient Radiative Transfer Process," *Proc.2000 Natl. Heat Transfer Conf.*, August 20-22.
- (12) Tan, Z. M. and Hsu, P. F., 2001, "An Integral Formulation of Transient Radiative Transfer," *J. Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 466-475.
- (13) Wu, C. Y., 2000, "Propagation of Scattered Radiation in a Participating Planar Medium with Pulse Irradiation," *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, Vol. 64, No. 5, pp. 537-548.
- (14) Wu, C. Y. and Wu, S. Y., 2000, "Integral Equation Formulation for Transient Radiative Transfer in an Anisotropically Scattering Medium," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 43, pp. 2009-2020.
- (15) Sakami, M., Mitra, K., and Hsu, P. F., 2000, "Transient Radiative Transfer in Anisotropically

- Scattering Media Using Monotonicity-Preserving Schemes," *Proc. IMECE 2000*, November 5-10.
- (16) Sakami, M., Mitra, K. and Hsu, P. F., 2002, "Analysis of Light-Pulse Transport Through Two-Dimensional Scattering and Absorbing Media," *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, Vol. 73, pp. 169~172.
- (17) Sakami, M., Mitra, K. and Vo-Dinh, T., 2002, "Analysis of Short-Pulse Laser Photon Transport Through Tissues for Optical Tomography," *Opt. Lett.*, Vol. 27, No. 5, pp. 336~338.
- (18) Chui, E. H. and Raithby, G. D., 1993, "Computation of Radiant Heat Transfer on a Nonorthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 23, pp. 269~288.
- (19) Chai, J. C., Lee, H. S. and Patankar, S. V., 1995, "Finite Volume Radiative Heat Transfer Procedure for Irregular Geometries," *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 9, No. 3, pp. 410~415.
- (20) Baek, S. W., Kim, M.Y. and Kim, J. S., 1998, "Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 34, No. 4, pp. 419~437.
- (21) Chai, J. C., Lee, H. S. and Patankar, S. V., 1993, "Ray Effect and False Scattering in the Discrete Ordinates Method," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 24, pp. 373~359.
- (22) Byun, D. Y., Baek, S. W. and Kim, M. Y., 2000, "Radiation in Discretely Heated Irregular Geometry Using Monte-Carlo, Finite-Volume, and Modified Discrete-Ordinate Interpolation Method," *Numerical Heat Transfer, Part A (Applications)*, Vol. 37, pp. 1~18.
- (23) Chai, J. C., 2003, "One-Dimensional Transient Radiation Heat Transfer Modeling Using a Finite-Volume Method," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 44, pp. 187~208.
- (24) Byun, D. Y., Lee, C. J. and Baek, S. W., 2004, Radiative Heat Transfer in Discretely Heated Irregular Geometry with an Absorbing, Emitting, and Anisotropically Scattering Medium Using Combined Monte-Carlo and Finite Volume Method, *Trans. Of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 5, pp. 580~586.
- (25) Hoffmann, K. A., 2000, *Computational Fluid Dynamics*, A Publication of Engineering Education System, USA.