수평원관 사이 환상유로에서의 복사열전달 연구

한 조 영[1*], 박 응 식[2], 전 형 열[2], 유 명 종[3]

RADIATION HEAT TRANSFER IN HORIZONTAL CYLINDRICAL ANNULUS

C.Y. Han, E.S. Park, H.Y. Jeon and M.J. Yu

Thermofluid flow analysis is major subject in most computational fluid dynamics applications. Accompanying convective and conductive heat transport phenomena, radiation plays an important role in high temperature operating systems. Cases in which the radiation dominates are found in such systems as boilers, furnaces, rocket engines, etc. In this paper the finite-volume method (FVM) are employed to simulate two-dimensional radiation problems in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli with general body-fitted coordinates. In that case the simplest and intuitive remedies are proposed for mitigation of ray effect.

Keywords: 열유체유동(Thermofluid flow), 전산유체역학(CFD), 복사열전달(Radiation), 유한체적법(Finite-Volume Method), 환상유로(Cylindrical Annuli), 광선효과(Ray Effect)

1. 서 론

복사열전달은 보일러, 연소로 및 로켓 엔진 등의 다양한 고온환경에서 작동하는 시스템에 있어 지배적인 열전달 모드이다. 따라서 이 같은 시스템을 설계시 복사열전달의 정확한 예측은 매우 중요한 설계 인자이다.

시스템 설계를 위해 수치적으로 모델링시 복사열전달에 의해 영향 받는 온도장, 압력장 및 화학종의 변화는 미지이므로 복사전달방정식(radiative transfer equation, RTE)과 유체역학 방정식들을 동시에 연계해 해를 구해야만 한다. 이는 복사전달 모델이 타 수치 모델에의 적절한 삽입이 가능하도록 수치 계산적으로 효과적이어야 하며, 복사전달방정식의 수치해법도 다른 이동방정식(transport equation)의 수치해법과 적합해야 한다는 것이다. 그러나 불행히도 복사전달방정식은 적분-미분방정식(integro-differential equation)인 본질적 특성을 지니고 있어, 대부분의 복사모델은 단순한 기하학적 형태에만 적용이 가능하며 일반좌표계의 사용이 요구되는 복잡한 형상에는 적용이 용이하지 않다.

최근 수 십년동안 복사전달방정식의 여러가지 이론 및 수치해석적 근사해법들이 제시되어 왔지만, 요근래 가장 널리 사용되는 방법은 유한체적복사해법(finite-volume method, FVM)[1,2]이다. 이 방법은 복사방향을 유한한 개수의 제어각도(control angle)로 나누고, 제어각도에 대해 복사전달방정식을 직접 수치적분하여 복사전열량을 구한다. 이 해법은 제어각도를 선택함에 있어 제약이 없고 복사에너지의 보존을 보증할 수 있다는 이점이 있으며, 비직교좌표계에도 큰 어려움 없이 적용 가능한 장점이 있다.

반면 이러한 종류의 근사 해법에서는 피할 수 없는 단점인 광선 효과(ray effect)가 발생한다. 이 광선 효과는 방사 각도에 연속성을 지니는 복사의 특징을, 이산화된 특정 각도의 유한한 집합으로 근사하기 때문에 발생하는 근본적인 문제[3]이다. 이에 다양한 종류의 치유법[4,5]들이 제시되어 왔으나 어느 것도 완벽한 치유법은 될 수 없으며, 다만 광선 효과를 얼마나 감소시켜 해의 정확도를 높이는 데에 대부분의 연구의 중점을 두고 있다.

본 논문에서는 일반 비직교 좌표계에서 언급한 유한체적복사해법과 구분종좌법(discrete ordinates method, DOM)[6]을 이용해 복사열전달 해석시에 발생되는 광선 효과에 대해 연구한다. 그리하여 본 연구를 통해 가장 간단하며 직관적인 치유법을 제시하고자 한다.

1 정회원, 한국항공우주연구원 사업종합관리단
2 정회원, 한국항공우주연구원 위성연구본부
3 한국항공우주연구원 위성연구본부
* TEL : 042) 860-2033
* Corresponding author E-mail: cyhan@kari.re.kr

2. 해 석

본 연구에 사용된 복사 수치해법의 자세한 설명은 기존 연구[7]를 참조하기 바란다.

3. 결과 및 검토

본 연구는 2차원 환상유로로 국한하며, 이 문제는 일반좌표계를 사용하는 가장 일반적인 문제의 범주에 속한다. 투명매질 문제는 비회체 기체(nongray gas) 해석에서 기본적이며, 매질의 흡수에 의한 복사감쇠(attenuation)를 배제하므로 광선효과 산정에 있어 효율적이다. 그러므로 본 연구에서는 투명매질만을 고려한다. 더불어 두 원통의 배치에 따른 편심율을 바꿔가며 격자에 따른 영향도 검토한다.

동심 환형유로(concentric annulus)의 경우는 정해(exact solution)가 존재하지만, Fig. 1과 같은 편심 환형유로(eccentric annulus)의 경우는 정해가 존재하지 않아 본 연구와 같이 수치적으로 해를 구할 수밖에 없다.

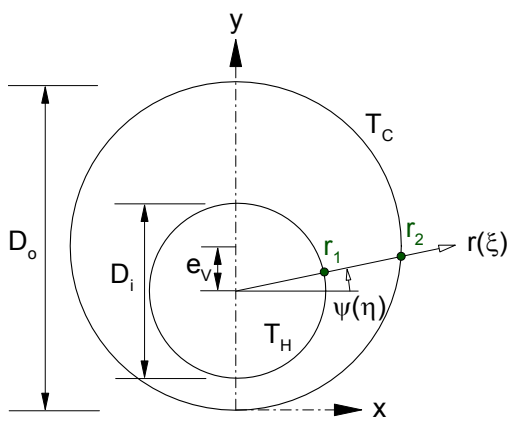


Fig. 1 Schematic of a given problem

보통 연소기 등의 공학시스템에서 경계면은 확산적(diffuse)이다. 따라서 평행광(collimated beam)의 조건에서 비균일 제어각도를 써서 계산의 효율을 꾀한다 하더라도 경계는 확산적이므로 계산시 광선 효과가 생길 소지는 항상 존재한다. 실제 많이 사용되는 상용 코드인 FLUENT에 탑재되어 있는 복사솔버(radiation solver) 중 FVM(또는 DOM)은 일반적인 해법을 이용하며, 더욱이 제어각도는 등각분할만 제공한다. 즉 FVM에서 비등각 분할시 어떤 영향이 있는지는 아무도 연구한 바 없다.

본 연구는 문제 해결에 필요한 전략적인 제어각도 분할을 어떻게 수행할 것인지에 대한 논리적인 근거를 제시하고자 하는 것이 또 하나의 목적이다.

일반적인 FVM 접근법에서 이산화된 방향수의 증가를 통해 광선 효과를 줄일 수 있는 방법을 연구하며, FVM의 장점인 제어각도 분할의 자유도에 있어, DOM의 이산화 방향과 동등하게 제어각도 분할을 하여 결과를 비교한다. 이 경우 두 방법의 이산화 방향각은 동등하게 할 수 있으나, 두 방법의 차이상 가중치(weight)는 서로 달라진다.

DOM 유형의 풀이법에서 대표적 단점은 광선 효과와 가산란(false scattering)이다. 가산란은 공간 차분 방법에 따라 나타나는 현상으로 본 연구에서는 모든 경우에 동일한 공간 차분법인 계단 스킴(step scheme)을 이용했으므로, 모든 결과에 동일한 가산란 현상을 가정 가능하다. 격자수의 영향도 전 계산 과정에서 (41 × 63)의 동일 격자를 이용하므로 격자수의 영향은 본 연구에서 논외로 한다. 그러나 격자의 왜곡도(skewness)는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 편심율의 차이에 따라 존재한다. 따라서 본 연구는 순수하게 광선 효과만을 고려한 논문이라 할 수 있다.

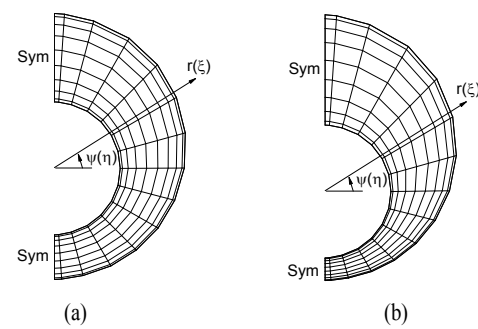
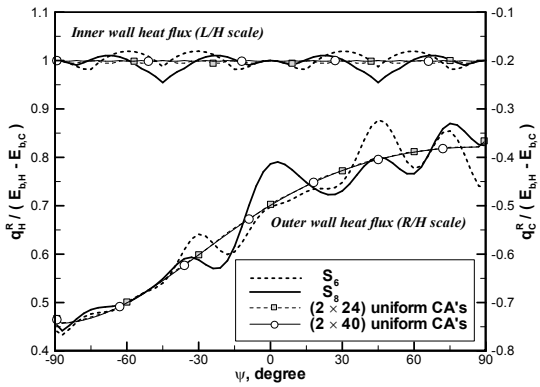


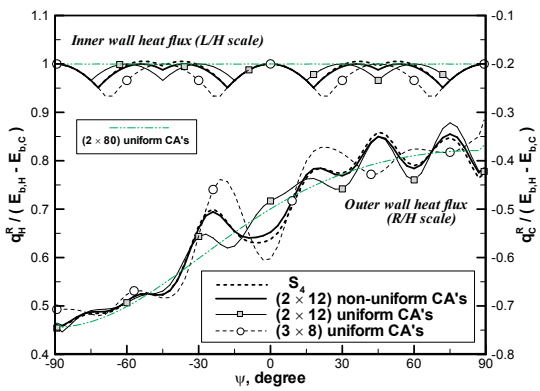
Fig. 2 Gris skewness with respect to eccentricities : (a) e_V = 0.33, (b) 0.66

Fig. 3에서는 편심율이 0.66의 경우 복사 각도의 개수와 제어각도의 비균일성에 따른 영향을 도시했다. DOM(S_N)에서는 총 방향수가 N(N+2)개이며 한 개의 팔분의(octant)에서의 방향수는 N(N+2)/8이다. 한편 이 방향들은 대칭성(symmetry)을 가지고 있다.

우선 Fig. 3 (a)에서 도시된, S_6와 (2 × 24) 균일 제어각을 비교하면 같은 방향수를 가지고 있으나 (2 × 24) 균일 제어각을 채택할 경우 기준해인 (2 × 40) 균일 제어각의 결과에 거의 근접한다. 반면 DOM의 경우 종좌수를 늘려 S_8으로 해도 상당한 변동(fluctuation)이 존재한다. 따라서 계산의 효율면에서는 방향수가 작은 (2 × 24) 균일 제어각을 채택하는 것이 유리하다.



(a)



(b)

Fig. 3 Effects of number of rays and non-uniformity of control angle

보다 상세한 설명을 위해 저차원의 DOM S_4와 같은 방향수의 FVM을 Fig. 3 (b)에 비교해 도시했다. (2 × 12) 비균일 제어각도는 S_4와 거의 동일한 변동 특성을 보인다. 이에 비해 격자가 성긴 외벽에서는 (2 × 12) 균일 제어각도를 채택한 경우 상당한 변동 감소를 보인다. 그러나 (3 × 8) 균일 제어각도를 채택한 경우는 오히려 변동이 더 심해짐을 관찰할 수 있으며, 이는 x-y 평면으로 사상되는 방향수가 1사분면에서 S_4의 경우는 4개임에 비해 (3 × 8) 균일 제어각도를 채택한 경우는 2개로 적기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 광선 효과를 줄이려면 x-y 평면으로 사상되는 1 사분면에서의 방향수가 많은 것이 유리하며, 또한 등각분할을 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

FVM이 제어각도를 임의로 분할 가능한 자유도가 있더라도 광선 효과를 줄이기 위해서는 일정한 수준의 등각 분할이 필요하며, 필요시 일부 제어 각도를 추가 분할하는 방식을 써야 할 것이다. 이는 DOM에서도 광선 효과를 줄이기 위해서는 고차원의 이산화 방향 조합(quadrature set)을 써야 함과 일맥상통하다. 그러나 DOM은 임의 방향을 선택할 수 있는 자유도가 없으므로, 그 면에서는 FVM이 훨씬 낫다.

한편 평행광에서 FVM을 사용하는 경우, 입체각을 마음대로 정할 수 있다고는 하나 확산 경계면을 고려하는 경우는 특정 입사각 이외의 복사 강도(intensity를) 계산해야 하고 이 경우 본 계산의 결과에 따르면 균일 제어각도를 사용하지 않을 경우 문제가 될 수 있다. 즉 평행광 해석시에는 입체각을 균일하게 많이 나눌 필요가 있다. 특히 2-D 문제에서 x-y 평면에 사상되는 유효 방향이 많은 것이 유리하고, 이 점에서 FVM은 DOM보다 우월한 특성을 보인다.

참고문헌

[1] 1993, Chui, E.H. and Raithby, G.D., "Computation of Radiant Heat Transfer on a Nonorthogonal Mesh Using Finite-Volume Method," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.23, pp.269-288.

[2] 1994, Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., "Finite -Volume Method for Radiation Heat Transfer," *J. Thermophysics*, Vol.8, pp.419-425.

[3] 1993, Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., "Ray Effect and False Scattering in the Discrete Ordinates Method," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.24, pp.373-389.

[4] 2000, Baek, S.W., Byun, D.Y. and Kang, S.J., "The Combined Monte-Carlo and Finite-Volume Method for Radiation in a Two-Dimensional Irregular Geometry," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.43, pp.2337-2344.

[5] 2003, Li, H., Flamant, G. and Lu, J., "Mitigation of Ray Effects in the Discrete Ordinates Method," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.43, pp.445-466.

[6] 1997, Liu, J., Shang, H.M., Chen, Y.S. and Wang, T.S., "Prediction of Radiative Transfer in General Body-Fitted Coordinates," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.31, pp.423-439.

[7] 2004, 한조영, "복사유체의 복사열전달 수치 적분에 관한 연구," *한국전산유체공학회지*, 제9권, 제2호, pp.43-51.