

보일러 화로내 3차원 복사열전달의 공학적 해석

이진욱*, 마수만, 임동렬
고등기술연구원 전력에너지연구소

요 약

보일러 화로내의 3차원 복사열전달 현상을 비교적 간단하게 수행할 수 있는 프로그램을 개발하여 중유를 연료로 사용하는 산업용 보일러의 화로해석을 수행하였다. 프로그램 개발시에는, 공학적으로 수용이 가능한 범위내에서의 경험값 및 가정을 도입하여 화로내에서 존재하는 현상들을 해석하기 위한 연립편미분방정식을 가능한 분리(decoupling)시켜 3차원 복사열전달 현상을 비교적 간단하게 수행할 수 있게 하였으며, 특히 보일러 제조업체의 설계부서에서 직접 화로해석을 수행하고 그 결과를 기본설계에 반영할 수 있게 시도하였다. 실제 보일러의 화로에 대한 설계자료를 이용하여 화로해석을 수행하였으며, 그 결과의 신뢰성을 입증하였다.

1. 서 론

보일러의 화로(furnace)내에서는 난류유동장하에서 연료(중유, 석탄)의 각종 물리/화학반응이 일어나게 된다. 즉 화로내로 투입된 입자(중유의 경우 액적이며 석탄의 경우는 미분탄, 본 연구에서는 중유를 대상으로 한다)는 중력, 유동장내에서의 유체의 항력 및 선회유동이 존재하는 경우에는 입자의 원심력 등의 여러가지 힘에 의한 복잡한 물리적 거동을 하게 된다[1]. 또한 고온의 분위기로 유입된 중유액적은 가열에 의한 증발, 증발 후에는 투입된 공기중에 포함된 산소와의 화학반응(연소), SOx 및 NOx 등의 공해물질 생성반응 등 각종 복잡한 반응을 일으키게 된다[2]. 또한 연소의 결과로 생성된 고온가스의 유동에 의한 대류열전달 및 고온가스와 미연탄소 성분인 슈트(soot)에서 수관벽면으로 화로벽면으로 복사열전달에 의하여 에너지가 전달된다. 일반적으로 화로내로 투입된 화학적 에너지의 약 40-50% 정도가 화로벽면의 구성하는 수관벽으로 전달되어 수관벽을 따라 흐르는 포화수를 포화수증기로 변화시킨다. 특히 화로벽면으로 전달되는 에너지의 90% 이상이 복사열전달에 의존한다. 이와 같이 화로내에서는 각종 복잡한 물리/화학적 반응이 존재하므로, 보일러 화로의 보다 정확한 설계를 위해서는 이들 반응들을 고려하여야 한다. 즉 중유 액적의 거동, 화로내에서의 체류시간 및 연소반응 특성 등의 측정 또는 예측에 의하여 화로의 크기 및 형상 등의 설계자료에 반영하여야 할 것이다.

화로내에서의 중유 액적의 유동, 연소 및 복사열전달 현상을 비교적 정확하게 예측하기 위해서는 이들 현상을 지배하는 연립편미분 방정식을 해석하여야 할 것이다. 또한 보일러 화로내의 현상은 기하학적 구조상 3차원 해석이 불가피하며, 이의 해석을 위해서는 현존하는 가장 진보된 슈퍼컴퓨터를 이용하더라도 보통 몇시간 이상 또는 경우에 따라서는 몇백시간의 계산시간이 요구된다. 이러한 어려움 때문에 현재 화로내의 복사열전달 해석에 대한 연구는 주로 학계 및 연구계에 의해서 이루어지고 있으며, 국내 보일러 제조업체의 설계부서에서는 주로 경험적인 자료 또는 열 및 물질정산 계산에 의존하고 있다.

본 연구에서는 완전한 연립편미분방정식에 비하면 간단하면서도 비교적 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 프로그램을 개발하여 그 결과를 보고하고자 한다. 특히

본 연구의 초점은, 전산유체역학(computational fluid dynamics) 분야에 경험이 없는 설계원들도 개인용 컴퓨터 또는 work-station 수준의 컴퓨터를 이용하여 화로내의 3차원 복사열전달 현상에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 기본설계에 응용할 수 있게 하는데 있다. 특히 화로크기 결정의 주된 인자인 수관벽으로의 열전달량 및 화로 후부의 열교환기(superheater, economizer 등) 설계에 필수불가결한 입력인 화로출구온도를 정확하게 예측하고자 시도하였다.

2. 이론적 고찰

가. 연소해석

일반적으로 화로내부에서는 투입된 연료(중유)가 공급된 공기중의 산소와 반응하게 된다. 연료속의 주성분인 탄소(C)와 수소(H₂)는 대부분 완전연소하여 이산화탄소와 수증기로 변환하게 된다. 본 연구에서도 투입된 연료는 완전연소되었다고 가정하였으며 이는 공화적인 허용오차의 범위내에서 들 것으로 판단된다. 완전연소의 가정하에 화로내의 주된 연소반응은 간단히 다음과 같이 표현할 수 있다.



이와 같은 화학반응식과 연료주입량 및 과잉공기비(excess air ratio) 등의 입력 자료를 이용한 열 및 물질수지에서 생성물질의 질량분율, 체적분율, 평균밀도 및 생성가스의 단열화염온도(adiabatic flame temperature) 등을 계산할 수 있다.

유동장내에서 국부적인 연소율을 구하는 것은 매우 방대한 작업이며, 정확한 해를 구하기도 힘들다. 본 연구에서는 유동장과의 수화적인 분리(decoupling)를 위하여, 1차로 화염은 타원형으로 가정하고 이 타원형과 동일한 체적을 가지는 직육면체내에서 균일하게 연소하는 것으로 가정하여 해석의 편리를 도모하였다.

나. 유동해석

본 연구에서는 주된 현상이 복사열전달인 화로내에서 존(zone)방법을 적용할 계획이며, 존 방법에서는 유동장을 입력으로 이용한다. 비교적 복잡한 형상의 화로내의 3차원 유동장을 정확하게 해석하기 위해서는 물체적합좌표계(BFC, Body Fitted Coordinates)내에서 유동장을 해석하여야 한다. 그러나 보일러의 화로는 형상이 비교적 복잡하지만 전반적으로 직육면체의 형상에서 크게 벗어나지 않으므로 직육면체로 가정하였으며, 그림 1과 같은 방법으로 등간격 격자를 생성하였다. 그림 1에 나타난 각 격자는 존 방법에서의 공간요소(volume element) 및 표면요소(surface element)로 취급되며, 유동해석에서는 이들 요소가 각 축 방향으로 세분되어 제어체적(control volume)으로 이용된다. 직교좌표계(x,y,z)상에서 유동장을 지배하는 방정식을 텐서(tensor) 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (j=1,2,3) \quad (2)$$

위 식에서 난류에 의한 운동량 전달의 특성인 등가점성계수(effective viscosity)는 공화적인 단순한 가정하에서 평균온도에서의 점도의 1000배를 입력으로 이용하였다. 또한 연소 및 복사열전달과 유동장의 해석을 분리(decoupling) 시키기 위하여 화로내부의 근사적인 평균온도에 근거한 밀도를 입력으로 이용하여 등온유동장을 해석하였으며, 유동장의 해석결과를 존(zone)방법에 의한 복사열전달 해석의 입력으로 이용하였다. 이와 같은 가정하에 유동해석은 SIMPLE 알고리즘을 이용하여

해석하였다[3].

다. 연소가스의 파장별 복사특성

연소가스의 에너지 방출 및 흡수를 가장 간단하게 해석하는 방법으로서 전 파장 영역에 걸쳐서 흡수계수가 일정하다고 보는 회기체모델(gray gas model)을 들 수 있다. 그러나 실제로 연소가스는 다양한 파장의 에너지를 방출하며 에너지의 밀도는 파장에 따라 다르다. 이러한 파장에 따른 특성을 정확하게 해석하기 위하여 여러가지 시도가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 비교적 정확하다고 알려진 회기체 중합모델(weighted sum of gray gas model)[4]을 주로 사용하였으며, 보다 간단한 해석을 위하여 회기체 모델에 의한 해석도 병행하여 그 결과를 서로 비교하였다.

라. 복사열전달 해석

3차원 직교좌표계에서의 복사열전달은 존(zone) 방법으로 해석하고자 하며 복사해석에 대한 골격이 완성되어 있는 프로그램(bora2.f)을 보일러 화로해석 전용으로 수정하여 이용하였다[5]. 전체 화로는 공간 요소와 벽면요소로 나누어지며 각 영역에서 열이 전달되는 간략한 개략도는 그림 2와 같다. 이와 같은 벽면요소 및 공간요소에서의 에너지 정산식은 다음과 같다.

$$Q_{rad} + Q_{conv} - Q_{sink} - Q_{radio} - Q_{convoo} = 0 \quad (3)$$

각 벽면요소 및 공간요소에서 이와 같은 방정식이 세워지면 대수 연립방정식이 되며 복사열전달이 온도의 4승에 비례하므로 비선형 방정식이 된다. 비선형 대수 연립방정식은 일반화된 뉴턴 방법(generalized Newton's method)을 적용하여 계산할 수 있다. 즉,

$$X^{new} = (1 - \gamma)X^{old} + \gamma X^{cal} \quad (4)$$

여기서 γ 는 이완계수(relaxation factor)이며 본 연구에서는 0.5를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

위에서도 언급한 바와 같이 본 연구는 보일러 제조업체의 설계원들이 직접 3차원 복사열전달을 수행하고 그 결과를 기본설계에 반영할 수 있게 하는데 있다. 따라서 연소/유동/파장/복사해석을 사용자가 쉽게 수행할 수 있게 사용자 편의 프로그램 개발하였다. 그림 3은 해석을 수행하기 위하여 사용자가 입력하여야 할 입력화일의 예로서, 비교적 간단한 내용만 입력하면, 나머지 상세부분은 사용자 편의 프로그램 내부에서 처리할 수 있게 하였다.

그림 4는 시간당 증기 생산량이 10톤인 비교적 소형 보일러의 화로에 대한 해석 결과중 일부로서 수관벽의 국부 열전달량 및 열정산을 나타내고 있다. 이 경우에는 비교적 작은 화로내에서 연소 및 열전달이 일어나기 때문에 고온 열전달량 분포를 보여주고 있으며, 화로출구온도도 설계목표치인 1373K에 비교적 접근하는 값이다.

다음은 모델에 따른 차이, 유동방향에 따른 영향 및 대형 보일러에의 적용성 등을 고찰하고자 비교적 용량이 크고(시간당 176톤 증기생산) 버너를 여러개 장착한 보일러의 화로에 대한 해석을 수행하였다. 그림 5(a)는 회기체중합모델을 사용한 해석결과로서 화염과의 형상계수(view factor)가 큰 영역에서 복사열전달량이 많으

며 화염과 거리가 먼 화로의 상부에서는 열전달이 원활하지 않는 결과를 보여주고 있다. 화로벽면으로 전달되는 열전달량은 총 투입 열량의 약 47%이며 화로출구온도도 설계목표치와 잘 일치하고 있다. 평균열전달량에 대한 최대 국부 열전달량은 약 2.3배로서 이는 설계에 필히 반영되어야 할 사항이다. 그림 5(b)는 모델링이 아주 간단하며 컴퓨터 계산시간도 훨씬 적게 소요되는 회기체모델을 이용한 결과이다. 부분적으로 열전달량의 급한 변화를 보이는 등 회기체중합모델에 비해서는 비교적 신뢰도가 떨어지는 경향을 보이지만, 최대 열전달량의 값 및 위치, 평균열전달량 및 화로출구온도 등에서는 회기체 중합모델을 사용한 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 회기체중합모델 및 회기체 모델을 사용한 결과중 화로출구온도는 설계자의 요구사항인 $\pm 30K$ 에 거의 접근하고 있다. 그림 5(c)는 유동방향에 따른 영향을 고려하기 위하여 버너의 선회방향을 그림 5(a)의 경우에 비교해서 모두 반대로 한 경우의 결과를 나타내고 있다. 전반적으로 고온가스가 하부 및 중앙으로 치우치는 유동방향의 영향으로 인하여, 그림 5(a)의 경우에 비해서 하부 벽면의 열전달량은 높아지고 좌우 벽면의 평균 열전달량은 비슷하나 최대 열전달량은 줄어드는 경향을 보이고 있다. 전반적으로는 화로의 성능을 좌우할 만한 영향은 보이지 않는 것으로 나타나고 있다.

4. 결 론

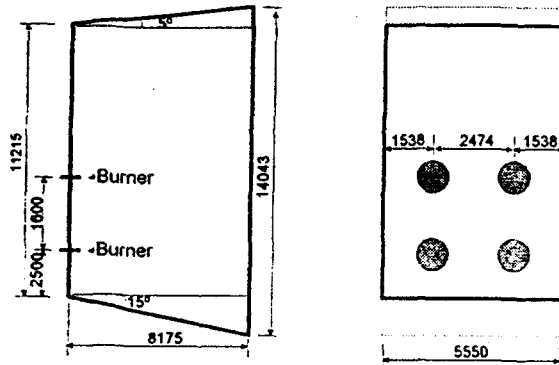
비교적 단순화된 접근 방법으로 보일러 화로내의 3차원 복사열전달 현상을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 산업용 보일러의 화로해석에 적용하였다. 회기체 모델에 비해서 회기체중합모델을 이용한 결과가 신뢰도가 높은 것으로 판단되었으며, 복사열전달량의 분포는 유동방향, 즉 선회방향에 따라 변하게 되나 그 영향은 심각하지 않는 것으로 판명되었다. 제조현장에서 쉽게 응용할 수 있도록 단순화된 가정이 많이 포함되었으나 그 결과는 기본설계에 반영할 수 있는 정도의 정확성을 지니는 것으로 판명되었다. 향 후에는 현장의 경험자료를 활용하여, 개발된 프로그램의 정확성을 높이는 방향으로 보완할 예정이며, 궁극적으로는 유동, 연소 및 복사열전달을 모두 연립하여 해석하는 전산유체역학 기법을 이용하여 보다 상세하고 정확한 결과를 얻을 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

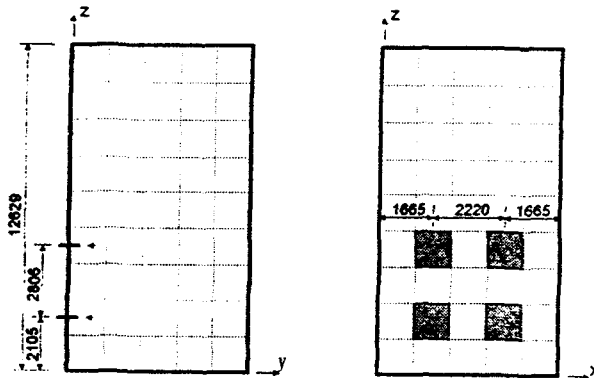
본 논문은 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하는 “석탄가스화 복합사이클 발전시스템 실용화개발” 과제의 일부 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 센터 관계자들에게 감사드립니다. 또한 본 연구의 주요 부분인 BORA2.F 프로그램을 공개하여 본 연구에도 활용할 수 있게 해주신 한국과학기술원 기계공학과 송태호 교수님께도 사의를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

1. H. Shida et al., "Development of Three Dimensional Numerical Analysis Method of Boiler Furnace Characteristics : Part 1, Flow Analysis", Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, pp. 18-23, Feb., 1984
2. 鷹此利公 등, "C 重油噴霧燃燒 シミュレーション", 日本化學工學論文集, 제14권 제3호, 1988
3. S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corp., 1980
4. T.H. Song, "Comparison of Engineering Models of Nongray Behavior of Combustion Products", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 36, pp. 3975-3982,



(a) 실제 화로형상



(b) 단순화된 화로형상

그림 1 단순화된 화로에서의 좌표체계 및 격자

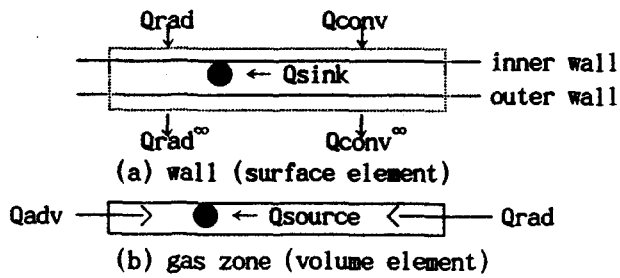


그림 2 벽면요소 및 공간요소에서의 에너지 정산 개략도

0.845	0.113	0.035	0.004	0.003	: C,H,S,O,N (C + H + S + O + N = 1.0)
711.16					: Fuel flow rate (kg/hr)
403.					: Fuel temperature (Kelvin)
9750.					: LHV of fuel (kcal/kg)
1.1					: Excess air ratio
442.14					: Combustion air temperature (Kelvin)
71.1					: Atomizing steam flow rate (kg/hr)
443.					: Atomizing steam temperature (Kelvin)
1.9	4.56	2.008			: Furnace width(x1), depth(y1), height(z1)
3	4	3			: Element numbers along x-, y- and z-dir. (lx, ly, lz)
1					: Number of inlet zone (number of burner)
2	2				: Inlet elements (x-start, x-end)
2	2				: Inlet elements (z-start, z-end)
1					: Swirl (0 for no swirl, 1 for ccw, 2 for cw)
3					: Outlet location (surface number)
3	4				: Outlet elements (x(or y)-start, x(or y)-end)
3	3				: Outlet elements (y(or z)-start, y(or z)-end)
2					: Spectral option (1, Gray Model : 2, WSGGM)
1.5					: Absorp. coef. for Gray, weighting factor for WSGGM
443.		443.			: Water-wall metal temp. & outlet metal temp. (Kelvin)
0.95		0.8			: Water-wall emissivity & refractory emissivity
0	0	0			: Symmetry in x-, y- and z-dir. (1 if yes)
3.0		1.4			: Shape of flame (length and diameter)
0					: number of refractory zones
2					: Refractory zone location (surface number)
2	2				: Refrac. wall elements (x(or y)-start, x(or y)-end)
3	3				: Refrac. wall elements (y(or z)-start, y(or z)-end)

그림 3 10 ton/hr 보일러 화로해석을 위한 입력화일

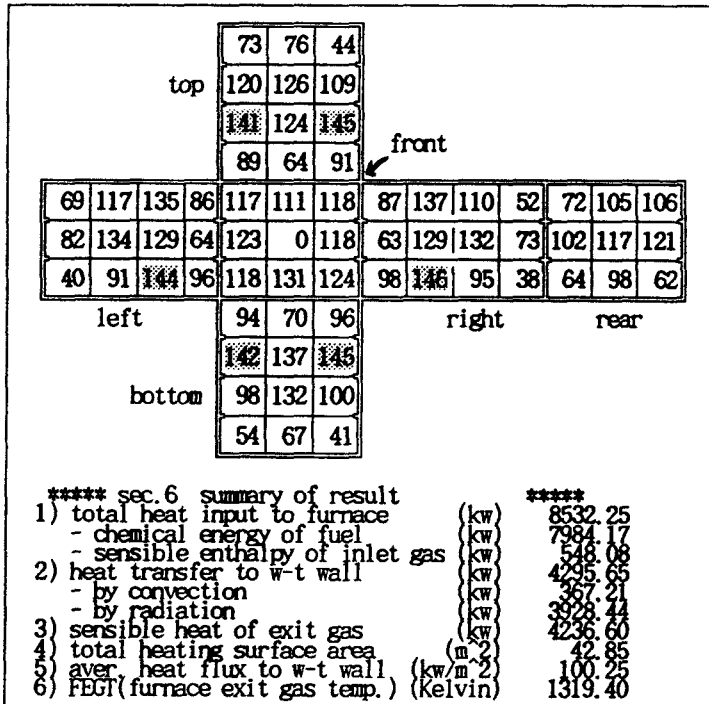


그림 4 10 ton/hr 보일러 화로의 수관벽 열전달량 및 해석결과 요약 (회기체 종합모델)

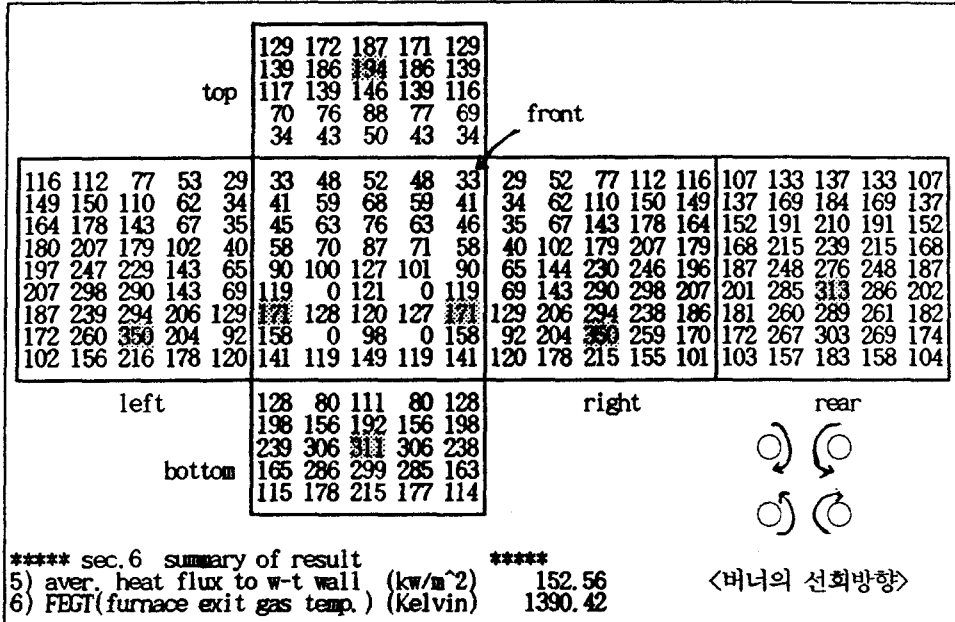


그림 5(a) 176 ton/hr 보일러 화로의 수관벽 열전달량 및 해석결과 요약 (회기체중합 모델)

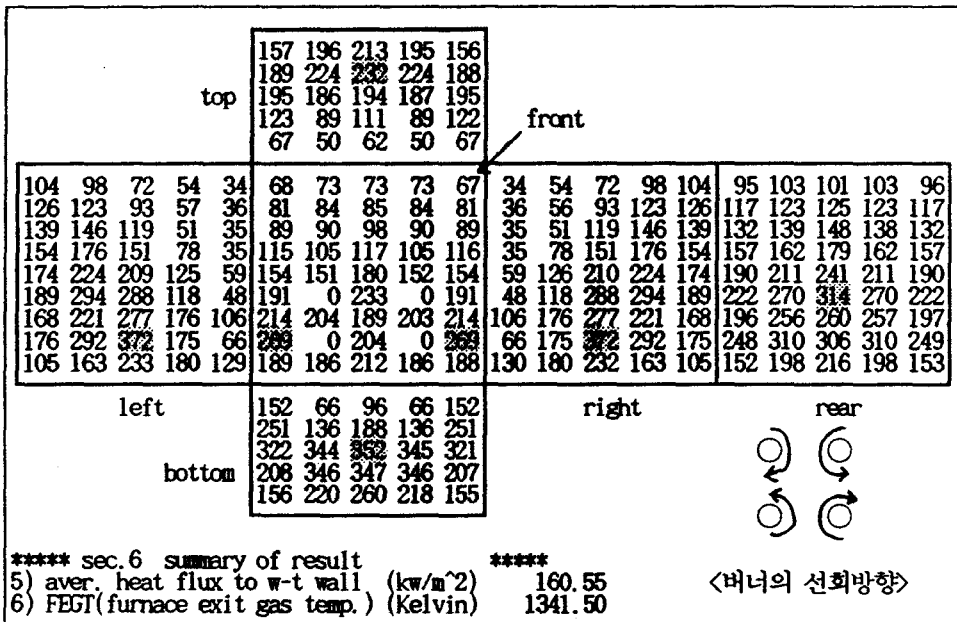


그림 5(b) 176 ton/hr 보일러 화로의 수관벽 열전달량 및 해석결과 요약 (회기체 모델)

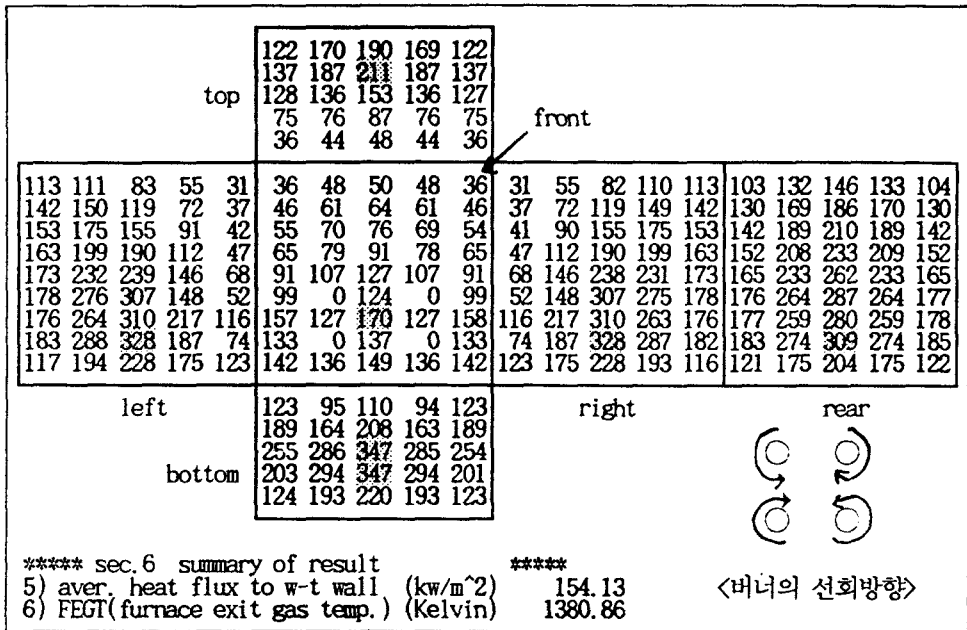


그림 5(c) 176 ton/hr 보일러 화로의 수관벽 열전달량 및 해석결과 요약
 ((a)의 경우와 선회방향 반대)