

저발열량 폐기물 소각용 유동층 소각로의 Scale-Up에 관한 연구

박 승호*, 김 종억**, 박 범성***

A Study on the Scale-Up of Fluidized Bed Combustors for Low-Calorific Value Wastes

S.H. Park, J.E. Kim, B.S. Park

Key Words: scale-up methodology, bubbling fluidized bed combustor, low-calorific value wastes, lateral mixing, diffusion Fourier number, scale-up factors

ABSTRACT

An effective scale-up methodology of fluidized bed incinerators for low calorific value industrial wastes such as paper sludge and sewage sludge has been developed based on the similarity rules. Conventional scale-up theories are briefly reviewed and a new simple theory defining the diffusion Fourier number is established taking account of the lateral mixing of fuels in the fluidized bed. From the design and the operating conditions of the pilot FBC plant at Incheon, important design data for the full-scale incinerators are calculated and discussed.

1. 서론

상용화 규모의 유동층 소각로를 설계제작하기 위하여는 실규모급 또는 대규모 pilot 소각로를 설계 제작하고, 이의 실험을 통하여 성능을 측정하여 발생하는 현상을 이해하는 것이 가장 좋은 설계 자료를 얻고 설계에 대한 확신을 할 수 있다. 그러나, 이는 많은 시간 및 경제적부담을 요구하기에 비현실적이다^[1]. 따라서, 다른 분야와 마찬가지로 lab-scale 또는 pilot-scale의 작은 시스템을 설계제작하여 이로부터 실제 설계에 필요한 자료 및 경험을 축적한 후, 적절한 scale-up 기법으로 상용화 규모의 시스템을 설계하여야 한다.

유동층 연소에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만, 유동층내의 복잡한 수력학적 및 열 화학적 현상 때문에 제반현상을 정확히 파악하여 이를 적절히 응용하기란 상당히 어렵다. 더구나, 소규모 유동

층의 설계 및 실험자료를 이용하여 동일한 성능이상의 대규모의 유동층으로의 scale-up은 현상의 비선형성 때문에 단순하지 않고, 또한 설계목적에 따라 실규모의 형태가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 scale-up의 기본개념 및 기존의 scale-up에 대한 결과를 검토하고 제지스러지 또는 하수스러지와 같이 수분 및 회(ash) 성분이 많아 덩어리가지고, 발열량이 낮은 연료를 사용하는 기포 유동층 소각로(bubbling FBC)의 scale-up에 대하여 초점을 맞춘다.

유동층 소각로의 scale-up과정^[2]은 Fig. 1에 간략히 설명되어 있다. 유동층소각로를 설계하는데 있어 첫번째로는 기존의 자료를 이용하여 실규모 plant의 개념설계(conceptual design)를 수행한다. 그리고 이를 적절한 scale-down/up 기법으로 lab/pilot-scale plant를 설계제작하여 실규모 plant

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

** 홍익대학교 기계공학과

*** 동부건설(주) 환경사업 팀

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME95-A-10)에 의하여 연구되었음

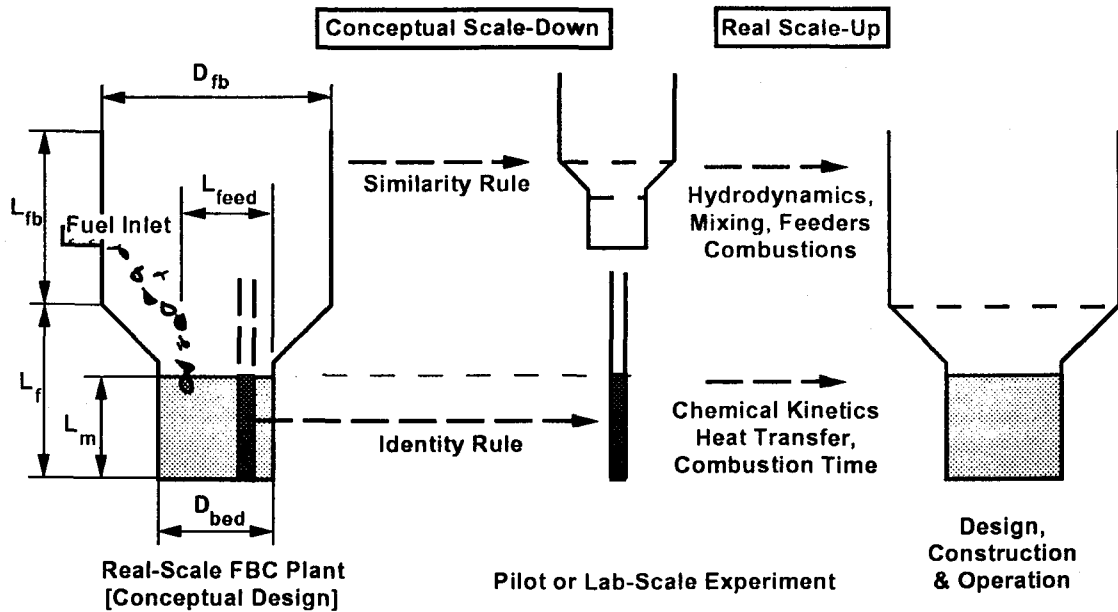


Fig.1 Scale-up Procedure for Fluidized Bed Incinerators

의 성능을 예측하고, 보완점을 파악한다. 그리고, scale-up하여 실규모 plant를 설계한다. Scale-up의 가장 기본적 원리는 소각로내 유동층부분의 직경 (D_{bed})을 제외한 다른 기하학적조건, 연소상태, 층물질, 유동화공기속도 등의 다른 모든 조건들을 일정하게하고, 오직 층의 직경만을 연료의 투입량에 따라 증가 또는 감소시키는 것이다^[2-3]. 이는 기포의 크기 및 분포가 크게 변하지 않는 경우, 예를 들면, 층의 높이 대 직경비가 상당히 작고 연료가 층에 균일하게 투입될 수 있을 경우에 적용할 수 있고, 이를 동일의 법칙 (identity rule) 이라고 한다. 그런데, 유동층 소각로에 동일법칙을 적용시켜 lab-scale 또는 pilot-scale의 시스템을 설계할 경우에는 층의 높이 대 직경비가 너무 커져 실제 상용화 규모에서는 발생하지 않는 slugging이 일어날 수 있고, 또한 벽면의 영향이 너무 커져 층물질 유동의 효과가 극히 감소되어 실규모급 시스템에서의 현상과 크게 다르므로 이는 동일의 법칙의 한계를 의미한다. 이 법칙으로는 연료가 층내에 균일하게 분포되었다는 가정하에 연소율, 열전달, 연소시간 등을 파악하는데 주로 사용되나, 본 연구와 같이 연료가 국부적으로 투입되어 유동층과의 혼합과정이 연소를 지배하는 경우에는 이 동일의 법칙으로 제반 현상을 파악하기는 불가능하다.

실제 상용화 규모의 소각로에서 일어나는 현상을 lab-scale 또는 pilot-scale의 시스템에서 체계적으로 관찰할 수 있거나, slugging이 발생하지 않고, 같은 유동화 특성을 갖도록 하는 scale-up 기법이 요구된다. 이는 상사의 법칙으로 Horio, Fitzgerald, Glicksman 등이 1980년대 초반부터 독립적으로 연구를 진행하여 정리되고 있다^[4-6]. 이는 모두 유동층에서의 수력학적 움직임에 관점을 둔 것으로 이론 및 실험적으로 타당성이 증명이 되었으나, 이들은 연소를 배제한 cold-test를 기본으로 하고 또한 연료의 투입특성을 고려치 않은 이론이므로 실제 소각로에서의 연소 특성을 설명하기는 부족하다.

유동층 소각로에서의 연소도 일반적인 연소^[7-8]와 마찬가지로 확산연소 (diffusion combustion) 및 예혼합 연소 (premixed combustion)로 크게 구분될 수 있다. 투입된 연료가 유동층내에 균일하게 잘 분포된다면, 연료 입자의 관점에서는 확산연소 또는 고체연소이지만 유동층의 전체적인 면, 즉, 거시적으로는 이는 예혼합 연소로 분류될 수 있다. 그리고, 이는 화학적 연소조건, 즉, 유동층온도, 유동층내 산소 및 연료의 연소성에 따라 연소현상이 지배를 받게된다. 그런데, 입자크기가 다양하고, 여러 가지 물질이 섞여있는 일반적 폐기물을, 연소를 방해하지 않고, 유동층내에 균일한 분포를 갖도록 투

입하는 것은 상당히 어렵고 복잡한 투입설비를 요구하기에 비현실적이므로 거시적 예혼합 연소를 이루기는 어렵다.

실제적으로는 Fig.1의 개념설계도에 나타난 것처럼 고품 폐기물 연료를 투입장치를 통하여 연소를 방해하지 않도록 유동층의 상부에 국부적으로 뿌린다. 유동층의 유동이 활발하지 않을 경우에는 층내의 연료농도가 불균일해지고 공기와의 원활한 접촉이 이루어 질 수 없어, 또한 투입된 연료의 낮은 온도와 높은 함수를 때문에 국부적으로 온도가 낮아지게 되어 양호한 연소가 진행될 수 없다. 따라서, 이와같은 경우에 양호한 연소를 얻기 위하여는 연료가 층내에 균일토록 분포되고 고온의 유동매체와 공기와의 접촉이 원활 하도록 유도하여야 한다. 유동층 연소에서는 발생된 기포에 의한 층물질의 유동이 투입된 연료의 확산 및 이동을 지배하므로 확산연소로 분류될 수 있다.

본 연구에서는 일차적으로 기존의 scale-up 기법에 대하여 논하고, Horio의 상사법칙으로부터 유동 특성을 보존하며 slugging의 가능성을 줄이고, 연료의 분포 및 여러 특성시간을 고려한 새로운 scale-up 기법을 도출하였다. 이 기법을 이용하여 본 연구진이 현재 실험중인 pilot-plant의 운전조건^[9]으로 실제 상용화 규모의 소각로를 설계한 결과 기존의 상용화 규모의 소각로와 비슷한 특성을 얻을 수 있었고, 역으로 현재 운전중인 소각로의 규모와 운전조건을 scale-down 하여 pilot-plant의 운전조건을 도출하여 pilot-plant를 운전하여 양호한 결과를 얻어 본 연구의 타당성을 확인 할 수 있었다.

2. Scale-up

2.1 Scale-up 대상

유동층식 소각로를 lab-scale 또는 pilot-scale로부터 상용화 규모의 소각로로 scale-up 하기 위하여, scale-up 대상을 결정하여야 한다. 이 중에서 대표적인 것은 소각 연료의 투입율, 유동화 속도 (superficial velocity, u_o) 및 유동화 공기량, 소각로의 내경 (D_{bed}), 정지층, 최소 유동화 및 유동화 층높이 (L_m , L_{mf} , L_f), 자유유동영역 (freeboard)

의 높이 (L_b), 유동화 공기의 분산장치 (air distributor), 그리고 각종 부속 설비인 버너, 연료 투입구, 연소가스 배출구 등을 들 수 있다. 이중 본 연구에서는 소각로의 기하학적 형상을 scale-up 대상으로 한다. 이렇게 scale-up된 형상치수는 유동화공기의 유동층내의 체류시간의 비 및 연료의 연소시간의 비를 검토함으로써 상대적인 평가를 하여 실규모의 소각로를 설계할 수 있다.

2.2 기존의 scale-up 이론

2.2.1 Fitzgerald 와 Crane의 이론

Fitzgerald and Crane의 이론^[3]은 Reynolds 수, Froude 수 등 여러 scaling 무차원수에 기초를 두고 있고 이의 타당성은 많은 실험적인 증명 또는 연구에 의해 뒷받침되고 있다. 이 scale-up 기법은 유동화현상의 실험을 위한 cold test 일 때는 적용이 가능하나 연소현상을 측정하기 위한 hot test의 경우에는 적용이 불가능하다. 또한, cold test의 경우에도 유동사 및 scale-up 인자에 제한이 있기에 본 기법을 본 연구에서는 선택을 하지 않았다.

2.2.2 Glicksman 의 Scaling 이론

Glicksman^[5]은 유동층의 수력학적 움직임을 지배하는 힘을 해석하여 입자에 대한 Reynolds 수가 작을때, 클때, 중간일때를 각각, 점성영역 (viscous limit), 관성영역 (inertial limit), 중간영역 (intermediate region)으로 구분하였다. 그리고 각각의 영역에서 중요한 무차원 scaling 변수를 구하였다. 중간영역에서는 점성력과 관성력이 다 중요하므로 무차원 변수를 다 포함하고 있고, 이는

$$\frac{\rho_s \rho_g d_p^3 g}{\mu_g^2}, \frac{u_o^2}{g d_p}, \frac{\rho_g}{\rho_s}, \frac{L}{d_p}, \frac{D_{bed}}{d_p}, \phi_s \quad (1)$$

와 입자의 크기 분포 및 bed의 기하학적 형태이다. 여기서 ρ_s 와 ρ_g 는 유동매체와 공기의 밀도를 각각 의미하고, d_p 와 ϕ_s 는 유동매체입자의 직경과 구형도(sphericity)를, g 는 중력가속도를, μ_g 는 공기의 점도를, L 은 유동층의 기하학적 크기를 의미한다.

Glicksman의 이론은 hot-test bed과 cold-test bed에서의 수력학적 현상의 상사성을 설명하고 있어서 유동화의 특성을 분석케한다. 그러나, 소각로

에서는 유동화도 중요하지만 더욱더 중요한것은 연소상태의 상사성인데 Glicksman의 이론은 이를 포함하지 않고 있다. 더우기 hot-test bed과 cold-test bed의 규모 및 운전조건이 서로의 관계에 의하여 상당히 제한을 받고 있어서, pilot 또는 lab-test의 수행에 제약을 주고 있다. 또한 규모가 다른 소각로의 설계에 각각의 규모에 따른 cold-test bed를 설계 운전하여야 한다. 또한, 충물질인 유동사 직경이 중요한 기하학적 크기이므로 소각로의 규모가 다를 때에 다른 크기의 유동사를 사용하여야 한다. 설사 소각로의 규모에 따라 유동사의 크기를 초기에는 분류하여 투입 할 수 있으나, 장시간 운전 후에는 유동사의 크기 및 분포가 변하므로 이 이론을 정확히 적용하기는 어렵다.

2.2.3 Horio의 이론

Horio의 이론^[2,6]은 유동층내에서 유동사의 움직임이 기포의 거동에 크게 지배받기에 기포의 분열 및 합체에 대한 상사를 기준으로 한다. 기포의 형태, 크기, 발생빈도, 압력의 변화 등을 실험적으로 측정함으로써 이 이론의 타당함이 보여졌다. 그리고, 유동층의 유동에 대한 많은 상관관계식과의 비교에서도 이의 적합함을 알 수 있다. 또한, 앞의 Fitzgerald 및 Crane의 이론과 Glicksman의 이론과 비교 할 때 훨씬 사용하기에 단순하다. Horio의 scaling 변수는 다음과 같다.

$$u_o - u_{mf} = \sqrt{M_G} (u_o - u_{mf})_p \quad (2)$$

$$u_{mf} = \sqrt{M_G} u_{mf,p} \quad (3)$$

여기서 u_o 는 유동화공기의 걸보기 속도를, u_{mf} 는 최소유동화 속도를 의미하고 M_G 는 기하학적 scale-up인자이고, 하첨자 p 는 pilot-scale을 의미하고, 실규모급 소각로에 관계된 자료는 첨자를 붙이지 않았다. 위의 관계식의 적용가능성을 다음과 같이 검토하였다.

(1) 식 (2)은 발생된 기포들의 합체(coalescence)에 대한 상사조건으로 Geldart group^[3] A와 B에 대하여 이론적으로 유도되고 실험적으로 타당성이 증명되었다.

(2) 식 (3)는 기포의 분열(splitting)에 대한 상사조건이다. 이는 group A의 유동사에 대한 scale-up

조건이되나, group B의 유동사의 경우에는 기포의 분열이 무시될 수 있으므로 고려의 대상에서 제외시킬 수 있다.

(3) 또한 이 기법은 group B의 영역에서 운전 할 때에는 유동사의 직경에 의존하지 않으므로^[6] scale-up 과정 및 기초 실험을 단순화 한다.

일반적인 유동층 소각로에서의 유동사는 group B에 속하므로 본 연구에서는 Horio의 법칙중 기포들의 합체에 대한 상사법칙 식 (2)를 선택하여 유동화 공기 속도 및 소각로 직경을 계산하였다.

2.3 Scale-up 인자

Horio의 scaling 식 (2)를 이용하여 유동화 공기 속도 및 소각로 직경에 대한 scale-up 인자를 구한다. 그러나, 층높이에 대하여 소각로 직경에 대한 scale-up 인자를 적용하면 비현실적인 규모가 나오기 때문에 적용키 어렵고, 또한 송풍기의 동력, 소각로의 크기 등이 너무 커지기에 비경제적이고, 또한 이는 적절한 연소를 보장하는 조건이 아니므로, 다른 대안이 요구되어 졌다. 따라서, 서론에서 언급한 것과 같이 소각대상물질의 연소를 위한 중요한 현상은 확산연소와 마찬가지로 소각대상물질과 유동사의 혼합이라는 관점에서 찾을 수 있었다. 혼합은 유동화 속도 및 기포의 크기에 의하여 지배되고, 기포의 크기는 다시 유동화 속도 및 유동층의 높이에 지배되므로 혼합과 층높이에 대한 상관관계식을 유도하여 scale-up 인자를 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 2.1 절에서 언급된 scale-up 대상에 대한 scale-up 인자는 아래와 같이 구할 수 있다. 여기서 scale-up 인자는 대상 변수의 실규모 값 대 pilot 규모 값의 비를 의미한다. 본 연구에서의 대상 연료는 저발열량 폐기물이므로 석탄 유동층과는 달리 안정된 연소를 얻기 위하여 세심한 주의를 요하고, 유동층이 과열될 염려가 거의 없으므로 유동층의 내부에 전열관을 설치하지 않는다고 가정을 하였다. 전열관은 유동화를 억제하므로 유동사와 연료의 혼합을 약화시켜 연소에 좋지 않은 영향을 끼치므로, 일반적으로는 전열관을 배제한다. 단, 유동층이 과열될 경우는 연료 또는 공기의 투입량 조절, 수분사 등으로 유동층의 온도를 제어할 수 있다.

2.3.1 연료의 scale-up 인자

연료의 투입량에 대한 scale-up 인자는 다음과 같다.

$$M_f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{f,p}} \quad (4)$$

여기서 M 은 scale-up 인자를, \dot{m}_f 은 연료의 시간당 소각로내 투입량을 나타낸다.

2.3.2 소각로 직경 및 운전공기속도

연료의 투입량에 따른 공기 공급량을 계산하면

$$\dot{m}_a = \rho_g u_o A = M_f (\rho_g u_o A)_p \quad (5)$$

이 되고 소각로 면적 A 및 공기 운전 속도의 관계식 (2)를 식 (5)에 대입하면 소각로의 직경의 scale-up 인자 M_G 는

$$M_G = \sqrt{\frac{A}{A_p}} = \left\{ \frac{(M_f u_{o,p} - u_{mf} M_G^2)}{(u_o - u_{mf})_p} \right\}^{0.4} \quad (6)$$

이 된다. 이 방정식은 음함수의 형태로 되어있어 반복법으로 풀수 있다. 그리고 공기운전속도 및 이의 scale-up 인자 M_u 는

$$u_o = \frac{M_f u_{o,p}}{M_G^2} \quad (7)$$

$$M_u = \frac{u_o}{u_{o,p}} = \frac{M_f}{M_G^2} \quad (8)$$

가 된다.

2.3.3 유동층의 높이

유동층의 높이의 scale-up 인자를 계산하는 기법으로는 여러가지가 있는데, 대부분 체류시간, 연소 효율, 소각로 직경의 scale-up 인자, 또는 연료와 유동사의 혼합율을 기준으로 한다. 본 연구에서의 연소 대상 물질은 고수분 저 발열량의 각종 폐기물 이기에 연소가 대단히 불량해질 수 있다. 따라서, pilot plant에서의 연소현상을 관찰하고^[9], 연료의 혼합시간에 대한 여러 연구결과를 검토한 후 확산 연소와 같이 연료의 층내 확산속도가 연소를 지배한다고 가정하였다. 즉, 연료와 유동사의 혼합의 특성을 하나의 중요한 scale-up 변수로 인식하여, 이를 토대로 유동층의 높이의 scale-up 인자를 계산

하였다.

2.3.3.1 수평 방향 혼합과 수직방향 혼합

연료의 분포를 지배하는 방정식은

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

으로 대표할 수 있다. 여기서 C 는 연료의 농도이고 D_s 는 연료의 혼합계수 또는 확산계수이다. 노내 연료의 균일한 분포를 기준으로 무차원화 하면

$$\frac{C}{C_{uniform}} = f(Fo, \zeta) \quad (10)$$

가 되고, 이로써 무차원 혼합 계수, 즉 확산 Fourier 수 $Fo = D_s t / L^2$ 및 무차원 위치 $\zeta = x/L$ 가 연료의 분포를 지배함을 알 수 있다.

여기서 t 는 시간을 나타낸다. 그러나 공기의 유동 방향이 등방성(isotropic)이 아니므로 공기의 유동방향과 일치하는 수직방향의 혼합과 공기의 유동방향과 수직인 수평방향의 혼합의 정도가 크게 다를 수 있으므로 직관적으로 알 수 있고 여러 참고문헌에서 설명되고 있다^[3,10,11]. 즉, 수평방향의 혼합계수 D_{sh} 는 수직방향의 혼합 계수 D_{sv} 보다 훨씬 작기 때문에 수직방향으로의 혼합은 매우 빠를 것이므로 D_{sv} 는 중요한 변수가 될 수 없다. 따라서 연료의 혼합이 수직방향으로 잘 이루어진다고 가정할 수 있고 연료의 혼합을 지배하는 인자는 $Fo_h = D_{sh} t / L^2$ 가 된다. 여기서 L 은 수평방향의 규모를 의미하므로 유동층의 직경과 관계가 있다.

2.3.3.2 수평방향의 혼합

수평방향의 혼합을 지배하는 인자는 Fo_h 이므로 이를 혼합에 대한 scale-up 변수로 정하면

$$Fo_h = (Fo_h)_p \quad (11)$$

가 되고, 즉

$$\frac{D_{sh} t}{L_{feed}^2} = \left(\frac{D_{sh} t}{L_{feed}^2} \right)_p \quad (12)$$

를 만족하는 scale-up 인자를 찾아야한다. 특성길이 L 은 bed의 기하학적 특성길이 L_{bed} 또는 연료

가 투입된 후 연소과정 중 이동하는 거리 L_{feed} 를 의미하므로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 연료의 투입의 형태에 따라 달라질 수 있다. 우선, 수평방향의 혼합계수 D_{sh} 는

$$D_{sh} = \frac{3}{16} \frac{\delta}{1-\delta} \frac{\alpha^2 u_{mf} d_b}{\epsilon_{mf}} \quad (13)$$

이다^[3,12,13]. 여기서 δ 는 유동층 내에서 기포가 차지하는 비율이고, d_b 는 기포의 크기로서 분산판으로부터 높이의 함수이다. 이때, 기포의 분열 효과는 무시하였다. 윗식에서의 다른 변수들은 같은 성질의 유동사를 사용할 경우에는 scale-up과 상관없이 일정하므로 수평방향의 혼합계수의 비는

$$\frac{D_{sh}}{D_{sh,p}} = \frac{\frac{\delta}{(1-\delta)} d_b}{\left\{ \frac{\delta}{(1-\delta)} d_b \right\}_p} \quad (14)$$

이 된다. 물론, 수평방향으로의 혼합은 식 (13)이외에도 여러 다양한 관계식이 있어 확산계수의 절대값이 서로 다른 경우는 있지만, 현상 자체는 정성적으로 (qualitatively) 일치하므로 혼합계수의 비는 크게 달라지지 않는다.

2.3.3.3 유동층 높이의 scale-up

식 (12)에서 특성시간은 연료의 유동층내의 체류시간 t_f 로 다음과 같이 구할 수 있다. 우선 층내 연료의 농도가 pilot-scale과 real-scale에서 서로 같다 가정하면 층내 총 연료량의 비는

$$\frac{W_f}{W_{f,p}} = M_G^2 M_{Lm} \quad (15)$$

이 되고, 여기서

$$W_f = t_f m_f \quad (16)$$

$$W_{f,p} = t_{f,p} m_{f,p} \quad (17)$$

의 관계가 있다^[3]. 식 (6), (10) 와 (15)를 이용하면 연료의 체류시간의 비는

$$RT_f = \frac{t_f}{t_{f,p}} = \frac{M_G^2 M_{Lm}}{M_f} = \frac{M_{Lm}}{M_u} \quad (18)$$

로 정리된다. 그리고, 혼합특성 길이의 비는

$$M_{feed} = \frac{L_{feed}}{L_{feed,p}} = f_f M_G \quad (19)$$

이다. 여기서 f_f 는 연료투입에 대한 인자 (fuel feeding factor)로써 0과 1 사이에 존재하게 되고

$$f_f = \frac{L_{feed}}{D_{bed}} \quad (20)$$

이다. 예를 들면, 연료가 한쪽 벽면으로부터 투입되어 바로 밑으로 떨어질 경우에는 f_f 가 1이 되고, 양쪽벽에서 또는 노의 중심에서 투입 할 경우에는 f_f 가 0.5가 된다. 만약 노상에 균일하게 투입할 경우에는 f_f 가 0이 될 수 있다. 이 경우는 수평방향의 혼합특성은 중요치 않은 거시적인 예혼합 연소가 되므로 연소는 연료의 연소성에 크게 의존하게 된다. 그리고, pilot plant에서는 연료가 한쪽 벽면에서 투입되고 벽면을 따라 낙하하여 유동층 상부에 떨어지기에 $f_{f,p}$ 는 1이다. 따라서 고정층 높이의 scale-up 인자는 식 (12), (18), (19)로부터

$$M_{Lm} = \frac{M_u M_{feed}^2}{D_{sh}/D_{sh,p}} \quad (21)$$

이 된다. 그리고 각종 유동층 높이는

$$\begin{aligned} L_{mf} &= \frac{L_m (1-\epsilon_m)}{(1-\epsilon_{mf})} = \frac{L_f (1-\epsilon_f)}{(1-\epsilon_{mf})} \\ &= \frac{L_f (1-\epsilon_e)(1-\delta)}{(1-\epsilon_{mf})} \end{aligned} \quad (22)$$

로 계산된다. 여기서 ϵ 는 유동층내의 기공율을 나타낸다.

2.3.3.4 유동층내에서의 특성시간

공기의 유동층내 체류시간의 비는 유동화가 충분히 된 상태의 유동층 높이를 유동사사이로의 공기의 투과속도 (emulsion velocity: u_e) 로 나눈 체류시간의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RT_a = \frac{t}{t_p} = \frac{L_f/u_e}{(L_f/u_e)_p} = \frac{M_{Lf}}{M_{ue}} \quad (23)$$

이를 연료의 체류시간의 비 식 (18)과 비교하면 $M_{Lf} \cong M_{Lm}$ 이기에 실제로는 M_{ue} 와 M_u 의 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 특히 연소과정 및 연소효율이 중요하므로 이를 고려하기 위하여 무차원 반응 변수를 정의한다. 연소효율 X 와 무차원 반응 변수 K, t 와의 관계는

$$X = 1 - f(K, t) \tag{24}$$

이다^[3]. 여기서 함수 $f(K, t)$ 는 유동층의 특성에 따라 달라지나 K, t 의 증가에 따라 단조 감소하는 함수이기에 여기서는 이의 비만 관찰한다. 이를 정리하면

$$RT_c = \frac{K_r t}{(K_r t)_p} = \frac{M_{Lm}}{M_u} \tag{25}$$

이 된다. 여기서 K_r 는 반응율이므로 같은 열역학적 조건하에서는 일정하고, 시간 t 는 연료가 연소에 참여하는 시간으로써 무차원 반응변수는 연료의 유동층내의 체류시간에 비례하게되므로 식 (18)과 (25)는 같아지게 된다. 동일한 연소환경하에서 적어도 pilot-plant 이상의 연소효율을 가지려면 유동층내의 체류시간의 비가 1 이상이어야 한다. 즉, 본 연구에서의 scale-up은 정상적으로 운전되고 있는 pilot plant를 기준으로 하였고, 실규모 소각로의 성능이 pilot plant보다 뒤지지 않기 위해서는 본 절에서 제시된 특성시간의 비가 모두 1 보다 커야 할 것이다.

2.3.4 자유유동영역의 scale-up

자유유동영역 (freeboard)에서는 2차 공기 및 유동층에서 미연소되어진 가스가 서로 섞여 2차연소가 되는 부분으로 주로 기체상태의 연료 및 공기의 체류시간이 연소를 지배할 것으로 가정하면 자유유동영역부의 scale-up 인자는

$$M_{Lfb} = \frac{L_{fb}}{L_{fb,p}} = M_u \tag{26}$$

이 된다. 따라서 자유유동영역의 높이는

$$L_{fb} = M_u L_{fb,p} \tag{27}$$

가 된다. 또는 소각로내의 연소가스의 체류시간으로 자유유동영역의 높이를 결정할 수 있다^[14,15]. 그러나 실제로는 자유유동영역에서 제 2차 공기에 의한 연소과정이 연소효율을 증가시킬 뿐만아니라 배

기가스 제어에 있어서도 중요한 역할을 하므로 이를 고려한 scale-up기법이 앞으로의 과제라 할 수 있다.

3. 결과 및 토론

본 연구에서는 수분 40 %, 저위 발열량 1500 kcal/kg의 D사의 제지 슬러지를 대상연료로 선정하여 pilot 규모로부터 실규모로의 scale-up을 위한 계산을 수행하였다. Pilot 소각로의 규모는 유동면적 0.4 m x 0.4 m이고 고정층의 높이 0.4 m로 가정하였다.

Figure 2는 pilot 소각로에 연료를 시간당 22.4 kg을 투입하였을 때, 연료투입량의 증가에 따라 scale-up 된 규모 (Fig. 2(a)), 특성시간의 비 및 노상부하율 F_{bed} (Fig. 2(b))를 보여준다. 이때, pilot 소각로에서는 연료가 벽근처로 투입되고 scale-up

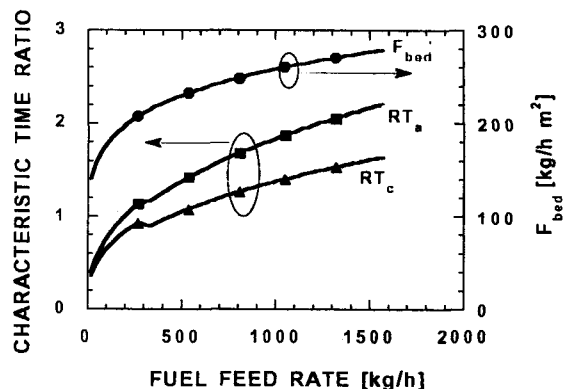
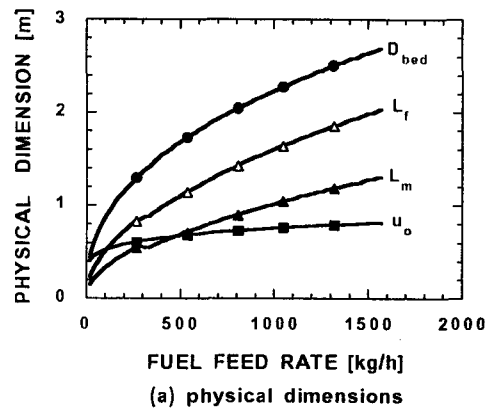


Fig. 2 Basic design data of a scaled-up FBC from a pilot plant under the operating conditions of $u_{o,p} = 0.41 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{f,p} = 22.4 \text{ kg/h}$

된 규모의 소각로에서는 유동층의 중심에 투입된다고 가정하여 식 (20)에서의 f_f 를 0.5로 하였다. 이 경우에는 노상 부하율 F_{bed} 가 기준부하율^[9,16] 450 kg/hm²에 크게 못미침을 알 수 있다. 또한 운전공기 속도 u_o 가 1.0 m/s 보다 작으므로 일정 연료량을 소각하려면 소각로의 면적이 상대적으로 넓어져야 한다. 또한 작은 유동화 속도로 넓어진 면적에 연료를 골고루 분포시키기 위해 층의 높이가 높아져야 한다.

본 연구에서 설계목표를 30t/16hrs 규모의 소각로라 가정하면 시간당 연료투입율이 1875 kg이다. Figure 3에서는 pilot 소각로에 연료를 시간당 34.4 kg 을 투입하였을 때에 연료투입량의 증가에 따라 scale-up된 규모를 보여준다. 이때, scale-up된 규모의 소각로에 1875 kg/h로 연료를 투입하였을 경우 노상 연소율이 450 kg/hm²부근이고 유동화 공

기속도도 1.3 m/s 이고, 고정층 높이도 1.2 m 정도 되어 기존의 설계기준^[9]을 만족한다. 그리고, RT_a 와 RT_c 가 1 보다 크므로 공기의 체류시간 및 연료의 체류시간이 pilot 소각로의 경우보다 길어 양호한 연소를 기대할 수 있다. 참고로 실규모의 폐기물 유동층 소각로의 경우, 노상 연소율 450 kg/hm², 유동화 공기속도 1-2 m/s, 정지층 높이 1m가 일반적인 운전조건^[9]이다.

Figure 4에서는 pilot 소각로에 연료를 시간당 42.7 kg을 투입하였을 때에 연료투입량의 증가에 따라 scale-up된 규모를 보여준다. 이때, scale-up된 규모의 소각로에 1875 kg/h로 연료를 투입하였을 경우 노상 연소율이 450 kg/hm² 이상이나 상한치^[16]인 600 kg/hm²를 넘지않고 다른 조건들이 앞의 경우와 같이 양호하므로 설계자료로써 선택될 수 있다.

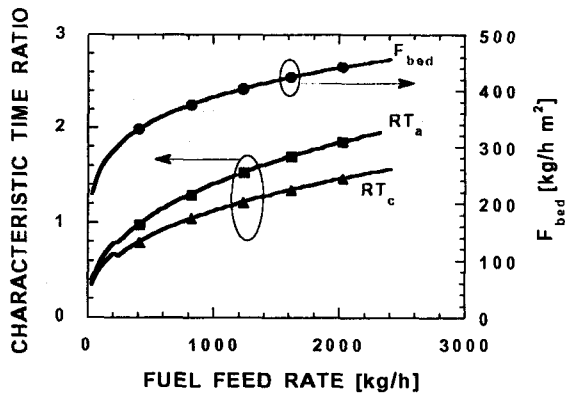
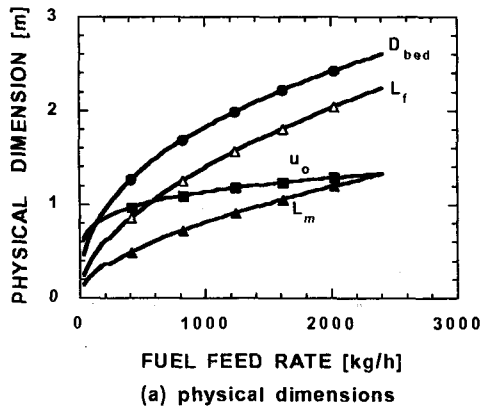


Fig. 3 Basic design data of a scaled-up FBC from a pilot plant under the operating conditions of $u_{o,p} = 0.63 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{f,p} = 34.4 \text{ kg/h}$

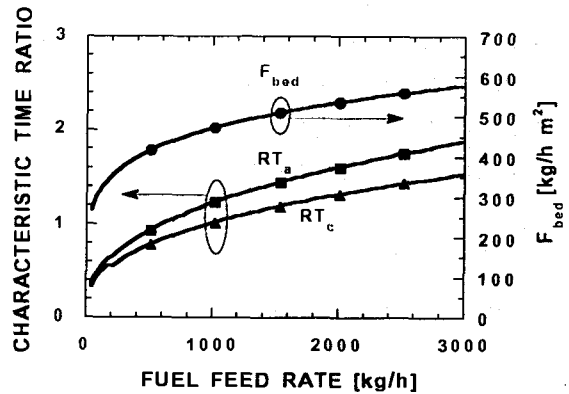
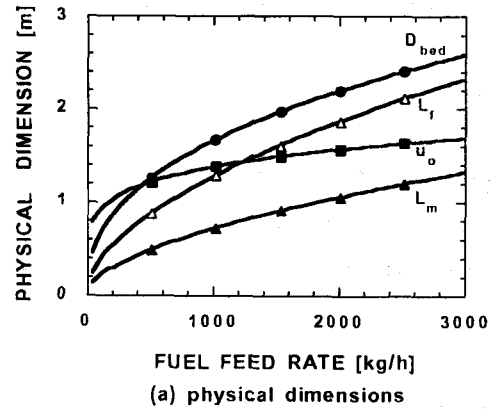


Fig. 4 Basic design data of a scaled-up FBC from a pilot plant under the operating conditions of $u_{o,p} = 0.78 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{f,p} = 42.7 \text{ kg/h}$

Figure 5에서는 pilot 소각로에 연료를 시간당 52.8 kg을 투입하였을 때에 연료투입량의 증가에 따라 scale-up된 규모를 보여준다. 이때, scale-up된 규모의 소각로에 1875 kg/h로 연료를 투입하였을 경우 노상 연소율이 600 kg/hm² 보다 크므로 과부하로 볼 수 있다. 또한 유동화 공기속도도 기준한계치인 2 m/s에 가까워지므로 소각량 증가에 대한 여유가 없다.

본 대상 스토리지소각용 소각로의 규모는 Figs. 3-4에 나타난 자료를 기준으로 설계할 수 있다. 여기서 pilot 소각로에서 주어진 연료를 잘 소화할 수 있다는 것을 기본전제조건으로 하였으므로 pilot 소각로에 연료량을 30-50 kg/h로 운전하여 양호한 연소가 되는 경우를 선택하여 이를 scale-up하면 된다.

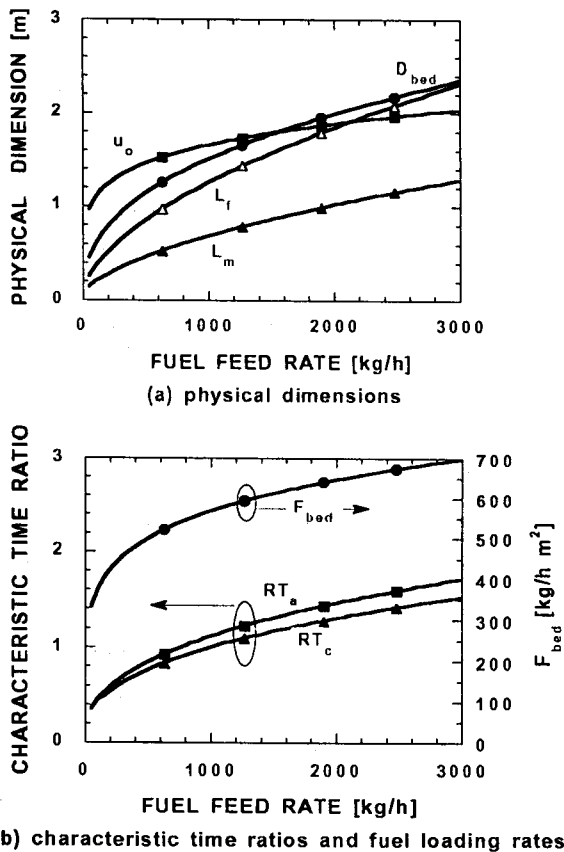


Fig. 5 Basic design data of a scaled-up FBC from a pilot plant under the operating conditions of $u_{o,p} = 0.96 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{f,p} = 52.8 \text{ kg/h}$

연료투입인자 f_f 의 변화에 따른 고정층의 높이를

계산하여 Fig. 6에 나타내었다. Scale-up된 소각로에 대하여 연료가 벽근처에 ($f_f = 1$), 벽으로 부터 직경의 1/3 배 만큼 떨어진 위치에 ($f_f = 2/3$), 또한 유동층의 중심에 투입될 경우에 ($f_f = 0.5$) 고정층의 높이, 유동화시의 높이를 나타낸다. 같은 혼합율을 유지하기 위하여 연료가 투입되는 위치에 따라 층의 높이가 크게 달라짐으로 연료의 투입의 문제는 상당히 중요하다. 유동층위에 연료가 골고루 분포되도록 투입할 수 있다면, 층의 높이는 연료 및 공기의 최소 체류시간을 기준으로하여 결정될 수 있고, 또한 pilot 소각로에서 이를 실험적으로 측정할 수 있다. 그러나, 이 경우 연소를 방해하지 않고 연료를 투입하는 것이 불가능하기에 실제로 구현하기 어렵다. 따라서, 실제적으로는 연료를 층의 중심 표면에 투입하는 것이 가장 효율적이고, 층의 높이가 낮아질 수 있기에 건설비 및 운전비가 작아지므로 경제적이다. 이와 같은 개념으로의 실제 운전되고 있는 전형적인 소각로는 일본의 Ebara 식^[3,17-19]을 들 수 있다.

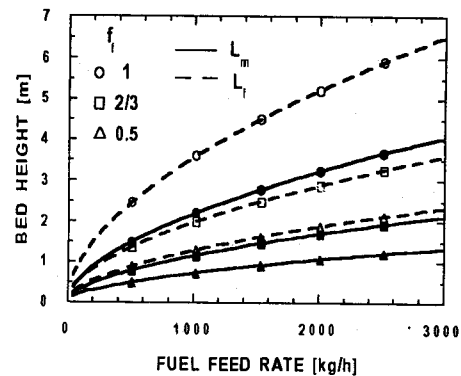


Fig. 6 Bed heights for three typical fuel feeding positions

그리고, 노의 구조 및 공기분산장치의 구조를 개선하므로 내부순환의 강도를 증가시켜 층의 높이를 증가시키지 않고도 높은 혼합율을 얻을 수 있는 장치도 실용화되고 있다^[19]. 이와 같은 경우에도 식 (13)만 달라질 뿐, 다른 사항들은 동일하므로 본 scale-up 기법을 적용시킬 수 있다.

4. 결론

소규모의 실험용 plant로부터 상용화규모의 plant로의 scale-up에 대한 이론적인 연구를 수행하였다. 기존의 연구는 유동층내의 수력학적 움직임에 바탕을 두었으므로 실제 연소현상에 대한 고려를 하기는 불충분하였다. 본 연구에서는 유동화속도와 관련된 Horio의 scale-up 관계식을 응용하고 연료의 투입과 연료와 유동사의 수평방향의 혼합 및 특성시간에 초점을 맞추므로 새로운 scale-up 기법을 유도하였고 이에 따라 여러 scale-up인자를 간단히 구할 수 있었다. 이때 중요한 무차원 수는 수평방향의 혼합에 대한 Fourier 수이다.

참고문헌

- Geldart, D., 1970, "Dropping the Pilot ? A Strategy for the Design of Fluidized Bed Chemical Reactors," *Chemical Engineer*, pp.147-155.
- Horio, M., 1987, "Scaling Law of Bubbling Fluidized Beds," *Fluidization 87: Proceedings of the First Korea-Japan Symposium on Fluidization*, pp. 239-248.
- Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991, *Fluidization Engineering*, 2nd Ed. Butterworth-Heinemann.
- Fitzgerald, T.J. and Crane, S.D., 1980, *Proc. 6th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, Vol. 3, p. 815.
- Glicksman, L.R., 1984, "Scaling Relationships for Fluidized Beds," *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, pp. 1373-1379.
- Horio, M., Nonaka, A., Sawa, Y., and Muchi, I., 1986, "A New Similarity Rule for Fluidized Bed Scale-up," *AIChE Journal*, Vol. 32, pp. 1466-1482.
- Glassman, I., 1977, *Combustion*, Academic Press.
- Kanury, A.M., 1977, *Introduction to Combustion Phenomena*, Gordon and Breach.
- 김종익 외, 1994, 산업폐기물 유동층 방식 소각장치 개발, 상공자원부.
- Van Deemter, J.J., 1985, "Mixing," in *Fluidization 2nd Ed.* by Davidson, J.F., Clift, R., and Harrison, D., pp. 331-355.
- Sitnai, O. and Whitehead, A.B., 1985, "Immersed Tubes and Other Internals," in *Fluidization 2nd Ed.* by Davidson, J. F., Clift, R., and Harrison, D., pp. 473-493.
- Bellgardt, D. and Werther, J., 1984, in *Proc. 16th Int. Symp. on Heat and Mass Transfer*, Dubrovnik.
- Tojo, K., Chang, C.C., and Fan, L.T., 1981, "Modeling of Dynamic and Steady-State Shallow Fluidized bed Coal Combustors. Effects of Feeder Distribution," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 20, pp. 411-416.
- Kestner, D.J. and Gielda, G.S., 1991, "Application of the Circofluid System to a Culm-Fired Retrofit," *Proceedings of the 1991 International Conference on Fluidized Bed Combustion*, pp. 817-824.
- 大藤恒久, 1982, 廢棄物 燒却爐 計劃-設計, 明現社.
- 이봉훈 역, 1992, 유동상식 쓰레기 소각로 설계의 실무, 동화기술.
- Hirose, T., et al, 1991, "Characteristics of the Internally Circulating Fluidized Bed Boiler," *Proceedings of the 1991 International Conference on Fluidized Bed Combustion*, pp. 559-570.
- Durante, J.L., Inumaru, N., and Nagato, S., 1993, "Industrial Waste and Sludge Fired FBC Experience," *Proceedings of the 1993 International Conference on Fluidized Bed Combustion*, pp. 743-749.
- 日本 化學工學會, 1992, 流動層, 化學工學의 進歩 26, 鎭書店.