

유동층 연소로 안전조업을 위한 진동 공급기내의  
고체입자 혼합특성에 관한 연구

A Study on the Mixing Characteristics of Solid in Vibrating Feeder  
for Stable Operations of Fluidized Bed Combustion

김미영\* · 조병렬\*\* · 박상찬\*\* · 이동규\*\*\* · 김의식\*

M.Y. Kim · B.R. Jo · S.C. Park · D.K. Lee · E.S. Kim

(1998년 4월 30일 접수, 1998년 8월 21일 채택)

ABSTRACT

This work has been carried out to study the mixing characteristics of solid in vibrating feeder for stable operations of fluidized bed combustion. The system consisted of two particles such that fine particles were located on the top of the coarse particles before vibratory mixing had started. Effect of particle size, particle densities, vibration amplitude and vibration frequency were experimentally obtained. Also, a diffusion model was applied in interpreting the experimental results. From these results, the following empirical equation for the diffusivity was obtained.

$$D = 0.87 \left( \frac{d_c}{d_f} \right)^{0.73} \left( \frac{\rho_f}{\rho_c} \right)^{0.53} (A^2 f)$$

1. 서 론

유동상 소각로는 보통 원통형의 노내부에 모래 등의 유동매체를 넣고 저부로 공기를 주입시

켜 매체를 유동시키면서 쓰레기를 투입하여 유동연소를 수행하는 방식이다<sup>1)</sup>. 이와같은 방식은 유동 매체의 열용량이 크고 소각물인 쓰레기는 끊임없이 유동 상태를 유지하므로, 혼합이 양호

\* 충북대학교 화학공학과

\*\* 충주대학교 환경공학과

\*\*\* 충북대학교 공업화학과

하여 유동매체가 산소와의 접촉 효율이 높고 건조 속도가 대단히 빠른 장점이 있다. 유동층은 예로부터 화학공업 방면에서 가스발생로, 건조 등의 조작에 넓게 이용된 바 있으나, 쓰레기 조각로용으로 개발된 것은 그리 오랜 것이 아니다. 소각 효율이 좋다는 장점과 더불어 공기량도 적고 배기가스 처리도 용이하며 유동 매체의 축열량이 크기 때문에 단기간 정지하여도 재시동시 약간의 재가열로서 다시 가동시킬 수 있는 장점도 갖고 있다<sup>2~5)</sup>. 그러나 조각재를 배기가스 속에서 포집하기 때문에 집진기의 부하가 큰 것과 전처리로서 쓰레기를 파쇄할 필요가 있는 것, 매체인 모래를 보충할 필요가 있는 것, 매체의 유동과 연소용 공기와의 정량적인 급송량 조절의 어려움, 파쇄입경과 불연물의 제거율과의 관계 등 단점도 많이 있다. 한편, 유동층은 분체의 연소나 배소에 최적인 연소 특성을 발휘하여 그 성과가 입증되었으나 쓰레기처럼 불균일하고 질량에 비해 부피가 큰 폐기물의 연소에는 많은 난제 때문에 스톡아식 연소로에 비해 뒤늦게 사용되기 시작하였다. 쓰레기와 같은 폐기물은 정량 공급이 어렵기 때문에 연소 조건을 균일하게 조정하기가 어렵다. 또한, 유동층 연소로에서는 대규모로 수송되어 온 석탄이나 폐기물을 연소공정에 사용하기 전에 유동층 연소로에 적합하게 전처리 즉, 분쇄, 건조, 분급 등의 기계적인 공정을 거쳐 연소로에 공급한다. 일반적으로 피상이나 분체의 수송 공정에서는 공정의 형태나 용량에 따른 적절한 수송 공정의 선택만 잘 이루어지면 전체 공정의 조작에는 큰 문제가 없으나, 호퍼나 싸일로 같은 저장 공정은 취급하는 물질들의 흐름 거동에 따라 그 조작 형태가 매우 큰 영향을 받는다. 싸일로 조작에서 자주 발생하는 문제점들은 불규칙한 분체물질의 공급, 물질들의 싸일로 내에서 분리 현상 그리고 싸일로 내부에서 취급 물질들의 흐름이 생기지 않는 정체 영역의 존재, 출구가 막히는 현상들을 들 수 있다<sup>6~8)</sup>. 이와 같은 문제들은 싸일로와 같은 분체나 피상의 저장 공정에 대한 이해 부족이나 불합리한 설계에 기인하며, 또한 취급하고자 하는 물질들의 물리적 특성을 고려하지 않았기 때문인 경우가 많다. 따라서, 피상이나 분체들의

저장 공정들을 안전하게 설계하기 위해서는 저장 공정에서 취급하고자 하는 대상물질의 흐름 특성 및 혼합 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 그러므로 분체들이 저장 장소로부터 이들을 효과적으로 다른 곳으로 보내는 장치에 부착되어 있는 입자들의 공급기는 설계나 선정시 고려해야 할 사항들이 많이 있으며, 아무리 잘 설계된 공급기라 할 지라도 연결된 호퍼가 적절하게 설계되어 있지 않은 경우에 잘 작동하지 않는 경우가 많다. 좋은 입자 공급 기의 특성은 기본적으로 분체들을 균일 흐름으로 유지할 수 있어야 한다. 입자 공급기들은 다루는 분체의 흐름 속도를 되도록 넓은 범위에서 조절할 수 있어야 하며, 사용하고자 하는 입자의 물리적 성질과 입도 분포에 적합하여야 하고, 주어진 연결 장치에 안정적으로 입자를 공급할 수 있어야 한다. 분체의 흐름 속도 조절이 용이하고, 설치하고자 하는 공간에 적합하여야 한다. 입자공급기는 공급되는 입자의 형태와 성질 등에 따라서 최대 처리 용량과 성능 등이 결정되며, 일반적으로 입자 공급기는 입자들이 한꺼번에 쏟아져 버리는 현상이 일어나지 않도록 하기 위하여 호퍼와의 연계를 잘 하여야 한다<sup>9~14)</sup>. 문헌에 의하면 석탄 및 폐기물을 유동층 연소로에 공급하는 공정도 아직 많은 문제점들을 내포하고 있으며, 최적화 등의 해결책이 아직 강구되지 못하고 있는 실정이다<sup>15,16)</sup>. 비록 유동층 연소로가 내부에서 입자들의 확산, 거동, 연소 등의 측면에서 많은 장점들이 있다고 보고되어지고 있지만, 유동층 연소로 자체의 자연적인 제한점이 없는 것은 아니다. 유동층 연소로 내부에서의 좋은 연소 효율과 열의 균일한 분산 및 분포 등을 위해서는 연소로에 공급되는 석탄 입자들을 될 수 있는 한 균일하게 연소로 내부에 분포되도록 하여야 한다. 현재 사용되어지고 있는 유동층 연소로의 석탄입자 공급 방법은 하강 주입관을 사용한 공급법, 공기를 사용한 운송식 공급법, 살포식 화격자를 사용하는 방법 등이 있다. 그러나 유동층 연소로의 국부적 과열점의 발생, 제한된 입자 크기, 공급 입자의 불 균일 등 각기 다른 장·단점이 있다<sup>14,16)</sup>.

따라서 본 연구에서는 유동층 안전 조업을

위한 기본 연구로 이들 공급 장치와 다른 형태의 진동공급기를 이용하여 유동층 연소로에 고체 입자를 공급하고자 할 때 공급기내에서 고체 입자들의 혼합특성을 고체 입자의 확산계수를 이용하여 해석하였다.

**2. 이론적 배경**

고체 입자 공급기내에서 아래 부분에 큰 입자를 넣고 위 부분에 작은 입자를 넣고 진동기를 사용하여 진동을 시키면 작은 입자들이 큰 입자들 사이로 분산되어 들어갈 것이다. 이때 작은 입자의 분산은 진동기의 회전 속도와 진폭 비 큰 입자와 작은 입자의 입경비와 비중비 등과 관계가 있으며 일반적으로 유체에 적용하는 Ficks의 법칙을 적용하면 다음과 같이 표현할 수가 있다(Fig. 1 참조).

$$\frac{\partial C(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, C(z, t)=작은 입자 농도  
 Z=축방향거리, cm  
 D=분산계수, cm<sup>2</sup>/s

식(1)에서 수평 방향의 분산은 일정하다고 간주하고 축방향의 분산만 고려하고 본 연구 조건에 해당되는 초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

초기조건; C(z, 0)=0  
 경계조건; 1) C(0, t)=C<sub>0</sub>  
 2)  $\frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0$

여기서, z = l 은 최하단의 위치

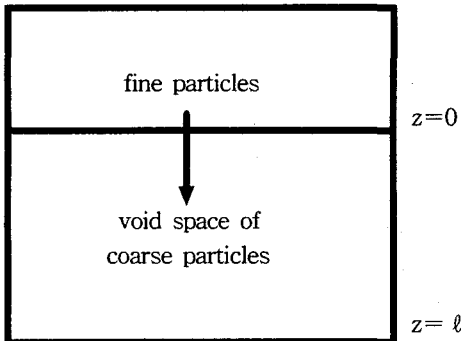


Fig. 1 Theoretical model

한편 다음과 같은 무차원군을 도입하여 보자

$$L = \frac{z}{l}, \quad \theta = \frac{Dt}{l^2}, \quad G = \frac{C}{C_0} \dots\dots\dots (2)$$

식(1)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial G(L, \theta)}{\partial \theta} = \partial^2 \frac{G(L, \theta)}{\partial L^2} \dots\dots\dots (3)$$

이 때 초기 및 경계 조건도 다음과 같다.

초기조건; G(L, 0)=0  
 경계조건; 1) G(0, θ)=1  
 2)  $\frac{\partial G(L, \theta)}{\partial L} \Big|_{L=1} = 0$

위의 경계조건을 이용하여 식(3)을 θ에 대해 Laplace transformation하면 다음과 같다.

$$SG(L, S) - G(L, 0) = \partial^2 \frac{G(L, S)}{\partial L^2} \dots\dots (4)$$

식(4)의 해를 Laplace inverse transformation table을 이용하고, 초기조건과 경계조건을 이용해서 구하면 다음과 같다<sup>17)</sup>.

$$G(L, \theta) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[ -\pi^2 \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \theta \right] \sin \left( \frac{2n+1}{2} \right) \pi / (2n+1) \dots\dots (5)$$

**3. 실험 장치 및 방법**

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 2와 같이 혼합기와 진동계로 구성되어 있다. 혼합기는 20개의 단으로 이루어져 있으며, 각 단은 가로 12.4cm, 세로 12.4cm, 높이 1.23cm인 아크릴 판을 중심에서 직경 7cm인 원판을 도려내고 남은 판이다. 이 판 네 귀퉁이에 볼트 구멍을 내어 볼트와 너트를 사용하여 20개의 단을 차례로 쌓아 올리면 혼합기의 내부 모양이 직경 7cm, 높이 24.6cm인 실린더 모양이 된다. 진동계는 모터 부분과 진동을 시키기 위한 편심, 혼합기의 상하 운동을 지지하는 상자와 그 상자 내에 혼합기를 올려놓는 판으로 되어 있다. 혼합기를 올려놓는 판이 상자 내에서 상하로 진동하게 하기 위해 이판 바로 아래 직경 10cm, 두께 1cm, 길이 40cm인 축을 넣어 만든 편심원 판이 있으며, 이 축과 1/2Hp모터의 회전축을 커플링으로 연결하여 모터가 회전하면 편심원판이 회전하고

이로 인해 혼합기를 올려놓는 판이 상자 내에서 상하로 진동하도록 되어 있다. 실험을 할 때 편심원판의 회전수를 조절할 수 있도록 전원을 회전속도 조절기에 연결하였고 혼합기를 올려놓는 판과 편심원판과의 마찰을 줄이기 위해 혼합기를 올려놓는 판 아래 부분에 베어링을 부착시켰고 혼합기가 상하로 진동하는 동안 혼합기를 지지하는 상자와 혼합기 사이의 마찰을 줄이기 위해 상자벽 한면에 4개씩 총 16개의 베어링을 부착시켰다.

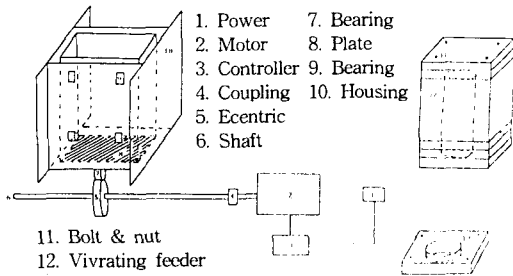


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용한 시료의 평균 입도는 Tyler 표준체의 분류에 따라 쓰며 밀도는 Gay-Lussac 피코노메터를 사용하여 측정하였다.

실험의 변수로는 집진기의 진동시간, 편심원판의 회전수 고체 입자의 입경비, 비중비, 혼합기의 진폭으로 하였으며, 실험할 때 편심원판의 종류에 따른 회전수와 공급 전압의 관계를 알기 위해 실험할 때와 같은 양의 시료를 혼합기에 넣고 편심원판의 종류를 바꾸어가며 회전속도를 조절기 전압을 변화하여 이에 따른 회전수를 Shimpo사의 모델 EE-1 Tachometer를 사용하여 측정하여 공급 전압과 회전수의 관계를 얻었다. 실험은 혼합기에 10단 보다 높은 위치까지 시료를 채우고 모터를 사용하여 30분간 진동시킨다. 이는 실험하는 동안 시료가 되도록 이면 안정한 상태로 유지되게 하기 위함이다. 진동후 10단 보다 위에 있는 시료를 제거하고 그 위에 5단까지 실험 조건에 맞는 각기 다른 시료를 채우고 일정시간 진동시킨 후에 진동계로부터 혼합기를 분리하여 볼트 너트를 풀고 혼합기 위에서부터 차례로 각 단을 수평 방향으로 민 다음 큰 입자와 작은 입자를 체로 분리하여 작은 입

자의 농도를 구하였다. 이때 작은 입자의 농도는 큰 입자의 공급률에 해당되는 양을 작은 입자가 모두 채울 때의 농도를 1로 기준하여 얻었다. 이와 같은 방법으로 편심원판의 종류를 바꾸어가며 진동시간과 위에 채우는 작은 입자의 입경과 비중을 변화하며 실험을 하였으며, 실험 조건에서 진동시간은 60분에서, 입자의 직경 비는 11.3에서 18.9까지, 입자의 밀도비는 1에서 1.89까지, 진동수는 4.2Hz에서 5.4Hz까지, 진폭은 1cm에서 3cm까지 하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

이론적 배경에서 유도한 식(5)와 실험 결과를 이용하여 고체입자 진동기내에서 고체 입자 혼합에 중요한 확산계수를 구하여 혼합 상태를 해석하였다.

##### 4.1 진폭과 진동 빈도수의 영향

진폭에 따른 각단에서 구한 작은 입자의 농도와 거리와의 관계에서 구한 자료를 이용하여 진폭에 따른 확산 계수를 구하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 진폭이 조금만 변화하여도 확산 계수는 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 한편 회전수를 매개 변수로 하여 각단에서 작은 입자의 농도와 거리와의 관계를 이용하여 확산 계수를 구하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 나타나 있는 바와 같이 회전수가(진동빈도수) 증가할수록 증가하는 경향을 알 수 있다. 진폭의 영향과 진동 빈도수의 영향을 동시에 생각하면 진동공급기에 전달되는 에너지와 연관을 지을 수가 있다. 이와 같은 방법은 맥동탑에서 많이 이용되는 방법이며, 같은 결과를 본 연구장치인 진동 공급기에 적용 가능하다고 하면, 진동 공급기에서 소모되는 에너지량에 의해 작은 입자들이 큰 입자들 사이로 분산되어 간다고 생각할 수 있다. 이때 소멸 에너지식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다<sup>18)</sup>.

$$\Psi \sim A^2 \cdot f \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $\Psi$ : dissipation energy  
 A: amplitude  
 f: frequency

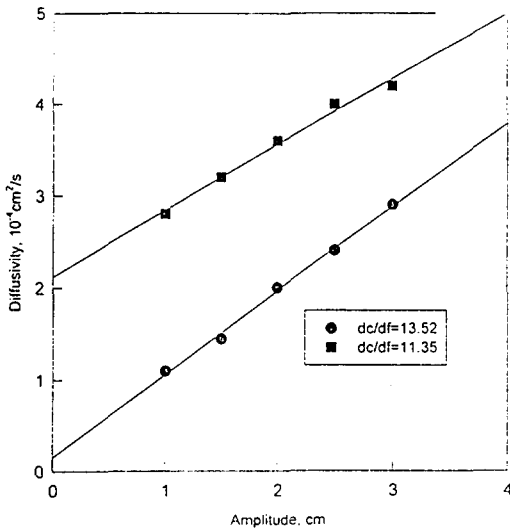


Fig. 3 Relationship between diffusivity and amplitude

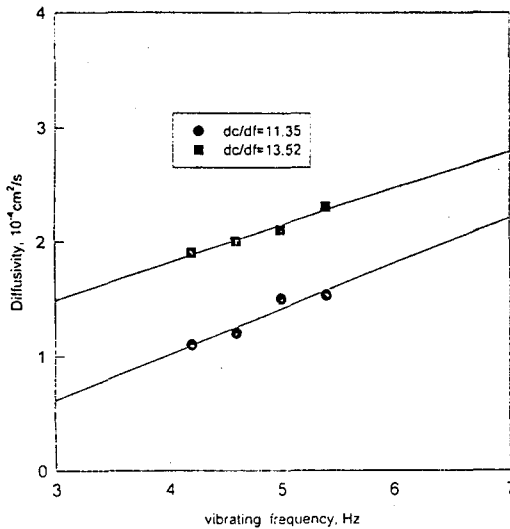


Fig. 4 Relationship between diffusivity and vibrating frequency

식(6)에서 장치조건이 같고, 진동수와 진폭의 곱은 계의 에너지 소멸과 관련이 있다. 진동수와 진폭의 곱의 증가는 에너지 소멸의 증대를 가져와 이 에너지 소멸이 큰 입자 사이로 작은 입자가 분산되어 가는 운동에너지 증대 역할을 하기 때문에 분산 계수가 증가하는 것으로 사료된다. 이들의 결과를 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 진동공급기에 전달되는 에너지 소멸이 크면 확산 계수도 증가함을 알 수 있다. 즉, 이들 관계는  $D \sim A^2 \cdot f$ 로 표현된다.

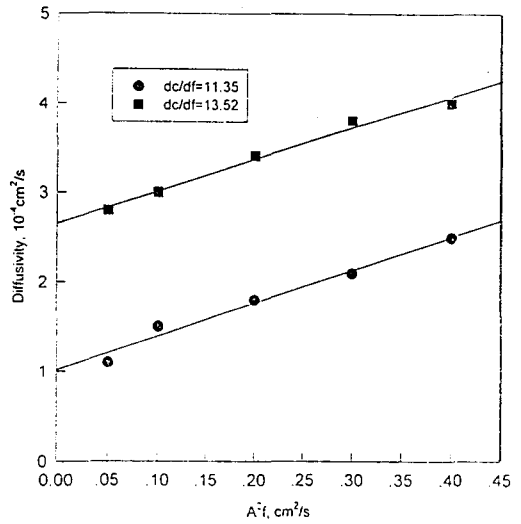


Fig. 5 Relationship between diffusivity and energy input

#### 4.2 입경비의 영향

고체 입자의 입경비의 따른 입자의 농도와 거리와의 관계 자료를 이용하여, 앞에서의 방법

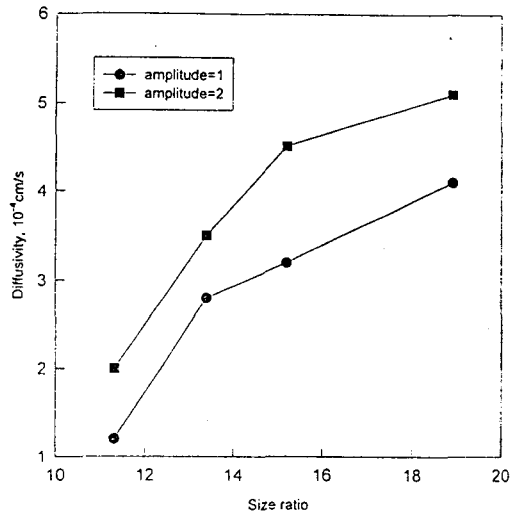


Fig. 6 Relationship between diffusivity and particle size ratio

과 동일한 방법으로 고체 입자의 확산 계수를 구하면 Fig. 6과 같다. 즉 고체 입자의 입경비가 증가하면 축방향 분산 계수도 증가함을 알 수 있다. 고체 입자의 입경비가 증가하는 것은 큰 입자의 공급률 증대로 작은 입자가 큰 입자 공급사이로 확산될 때 저항을 감소시키기 때문에 확산 계수가 증가되는 것으로 설명할 수 있다.

### 4.3 비중비의 영향

비중비와 축방향 확산 계수와의 관계는 Fig. 7과 같이 나타났다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 고체 입자의 비중비가 증가하면 확산 계수도 증가한다.

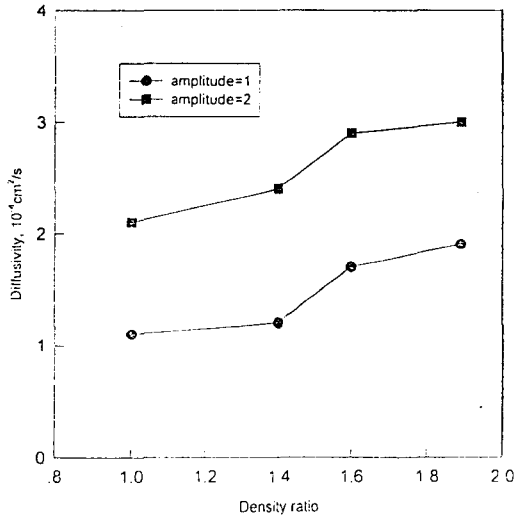


Fig. 7 Relationship between diffusivity and particle density ratio

본 연구 범위에서 얻은 실험데이터를 IMSL-PC용 subroutine 프로그램을 이용하여 중회귀분석(multiple regression)을 하여 확산 계수와 조업조건 간의 상관 관계식을 구하였다. 구해진 상관관계에서 중요하지 않은 변수 값의 제거를 위해 부분 F-검정(partial F-test)을 수행하였으며 이로부터 상관 관계식을 검정하였다. 모든 변수에 대한 검정통계량 값, Fo(Fo=MSR/MSE)의 값이 주어진 자유도에서 유의 수준값 즉, 기각치, Fc보다 크게 나타나면 유의(significant)하다고 판정하였다. 그러나 Fc의 값이 검

정 통계량보다 크게 나타나며, 그 양을 기각한 후 얻은 상관 관계식을 구하였다. 이와 같은 방법으로 구한 진공계의 확산 계수는 무차원 변수들을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$D = 0.87 \left( \frac{d_c}{d_f} \right)^{0.73} \left( \frac{\rho_f}{\rho_c} \right)^{0.53} (A^2 f) \dots\dots\dots (7)$$

확산이란 일반적으로 농도구배에 의해 각 성분이 혼합물을 통해 이동하는 현상을 말하지만, 기체의 압력 구배나 온도구배 등의 외력장에 의해서도 확산이 일어난다. 고체에서의 경우 기체에서의 경우와 대응 상태로 생각하여, 추론하면 기체의 경우의 확산 계수는 압력에 반비례하며, 온도가 증가함에 따라 증가하고, 분자량에 따라 감소한다. 그러나 고체 입자의 경우 식(7)에서 알 수 있는 바와 같이 고체 입자의 입경비, 비중비, 계에 공급된 에너지 등과 관계가 있는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

유동층 연소로 내부에서의 좋은 연소 효율과 열의 균일한 분산 및 분포 등을 위해서는 연소로에 공급되는 석탄 입자들을 될 수 있는 한 균일하게 연소로 내부에 분포되도록 하여야 한다. 본 연구에서는 유동층 안정 조업을 위한 기본 연구로 진동 공급기를 이용하여 유동층 연소로로 고체 입자를 공급하고자 할 때 공급기내에서 고체 입자들의 혼합특성을 고체 입자의 확산 계수를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 진동공급 장치내에서 고체 입자의 농도 분포식은 다음과 같다.

$$G(L, \theta) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[ -\pi^2 \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \theta \right] \sin \left( \frac{2n+1}{2} \right) \pi / (2n+1)$$

- 2) 진동공급기내에서 고체 입자의 확산 계수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D = 0.87 \left( \frac{d_c}{d_f} \right)^{0.73} \left( \frac{\rho_f}{\rho_c} \right)^{0.53} (A^2 f)$$

### 참 고 문 헌

- 1) J.F. Davidson and D. Harrison, Fluidization, Academic press, 1985.
- 2) 이봉훈, 유동상식 쓰레기소각로 설계 실무, 동화기술, 1995.
- 3) Calvin R. Brunner, Hand book of incineration system, McGraw-Hill, 1991.
- 4) M. Radovanovic, Fluidized bed combustion, Hemisphere publishing corporation, 1986.
- 5) D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidization engineering, Butterworth-Heinemann, 1991.
- 6) 이봉훈, 쓰레기소각로 선정의 기술적 평가, 동화기술, 1994.
- 7) 김진섭 역, 폐기물소각기술, 성안당, 1996.
- 8) A.W. Jenike, Storage and flow of solids, Idem, Bull p.123., 1970
- 9) P.C. Arnold etc, Bulk solids; storage, flow and handling., TUNRA, 1979.
- 10) L.T. Fan, S.J. Chen and C.A. Watson, 62, 7, July, 1970, Inst. Eng. Chem.
- 11) I.H. Campbell, and W.C. Bauer, Chem. Eng. 73, 179, 1966.
- 12) N. Ouchiyama and T. Tanaka, Chem. Eng. 17, 3, 1977.
- 13) A. Patanker and G. Manval, Trans. J. Brit Ceram. Soci. 79, 59, 1980.
- 14) G.L. Messing and Georgey, J. Am. Ceram. Soci., 61, 12, 1978.
- 15) 전해수 등, 폐기물유동층소각, 동화기술, 1993.
- 16) B.R. Jo and K.Y. Kim, "The minimum fluidized velocity in fluidizing combustion bed of uniform particle size distribution system", Korean J. sanitation, Vol. 11, No. 1, 1996.
- 17) Oberhetlinger and L. Badii, Tables of laplace transforms, Berlin hedelberg New York, 1973.
- 18) Miyauchi,t.and Oya, H. "Longitudinal dispersion in pulsed perforated plate column", AIChE. J. 11, p. 395, 1965.