

異相系 混合氣에서의 粉塵雲의 空間分布에 對한 評價

Evaluation for Space Distribution of Dust Cloud in Hybrid Mixtures

한 우 섭*·정 국 삼**

Ou-Sup Han·Kook-Sam Chung

ABSTRACT

This study dealt with problem to estimate the uniformity of dust clouds, as a fundamental study to estimate the ignition hazardous evaluation of hybrid mixtures.

The developed method was proposed to grasp space distribution of dusts, and also, an experimental apparatus considering with dispersion and reproduction of dusts were uniquely devised and studied.

1. 서 론

금속분 제조업, 석유화학 및 제약공업, 곡물 가공업 등에서의 같이, 원재료 등을 초 미분화하여 취급하는 공정의 발달 및 이의 취급량이 많아져, 이전에는 문제가 되지 않았던 공정상의 분진이 개재된 화재 및 폭발 사고가 발생하고 있다. 예를 들면, 유기용제와 같은 인화성 액체를 함유한 의약품용, 유동식 건조기에 의해 건조하는 공정에서 용제증기/의약품 분진 혼합물에 의한 폭발 등이 그 대표적인 예이다. 이와 같이, 가연성 가스/분진 혼합기(混合氣)[이상, hybrid 혼합기 또는 이상계(異相系) 혼합기라고 부른다]에 의한 폭발은, 분진폭발과 가스폭발에 비하여 아직 충분한 인식

이 되어 있지 않는 실정이다.

Hybrid 혼합기의 폭발·특성에 관한 연구는, 실용성의 관점에서 주로 탄진(炭塵)/메탄 혼합기의 실험적 연구가 많이 행하여져 왔다^{1,2,3}). 그러나, 실제로 간단히 해결되지 못하고 있는 분진의 비균일 농도 및 분진의 이상적(異常的)인 폭발하한계의 결정 등에 관한 평가 방법의 문제는 아직 미해결로 남아 있다.

따라서, 본 연구에서는 가연성가스 혼합기의 연소에 미치는 분진의 영향을 조사하기 위한 기초적인 연구로서, 분진운(粉塵雲)의 균일성을 평가하는 문제를 다루고자 하였다. 이를 위하여, 분진의 공간 분포를 파악하기 위한 새로운 평가 수법을 제안하고, 아울러 분진의 분산 분포 및 재현성을 고

* 일본 요코하마 국립대학 물질공학과

** 충북대학교 공과대학 안전공학과

러한 실험 장치를 독자적으로 고안하여 이의 타당성을 검토하여 보고자 하였다.

2. 분진운의 공간 분포 평가법

분진운의 형성과 그 분포 상태의 파악은, 분진 폭발 및 hybrid 혼합기의 폭발 특성의 연구에 있어 중요하다. 그러나, 일정한 (Δt)에서의 분진의 공간 분포에 대하여 분진운의 균일성 및 그 정량적인 평가를 구하는 것은 어렵다. 다만, 어느 일정량의 분진이 순간적으로 공간에 분산되어 있는 경우, 분진의 낙하 시간이 짧을 때의 단면 분포가 잘 이루어 졌다고 하면, 그 단면을 포함한 공간 분포는 균일한 분포를 하고 있다고 생각되어진다.

그러므로, 본 연구에서는 분진의 공간 분포를 수평 분포와 수직 분포로 나타내고자 하였다. 수평 분포를 파악하기 위한 방법으로서 면적법을 도입하고, 수직 분포에 관해서는 Fig. 3에서와 같이, 단일의 높이에서의 수평 분포를 고려한 다층 분포를 이용하여 공간 분포의 균일성을 평가하였다. 그리고, 분진의 공간 분포의 균일성 평가 방법으로서, 단위면적 당의 분진이 차지하고 있는 면적과 질량의 검토를 생각할 수 있으며, 이를 각각, 면적법과 중량법이라 부르기로 한다. 이들 평가방법의 개념은 다음과 같다.

2.1 면적법과 중량법

2.1.1 면적법

면적법은 수평 분포에서의 단위 면적에 대한 분진이 차지하고 있는 면적비로 나타낸 것으로, 단층 분포를 고려한 경우에는 단순하여 알기 쉽다. 그러나, 면적법은 Fig. 1에서와 같이, 분진이 다층으로 된 경우에는 단층 분포의 경우와 같은 결과가 되므로, 이에 대한 고려가 필요하다.

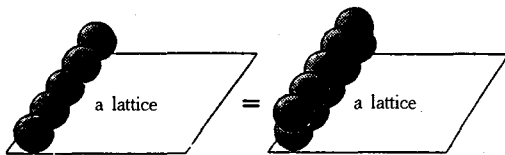


Fig. 1 An example of the evaluation method that the space distribution of dust represents by the area of dust per a unit lattice

2.1.2 중량법

단일 면적당의 수평 및 수직으로 분포한 분진을 무게 [g/cm^3]로 나타낸 것을 중량법(또는 질량법)이라 한다. 이는 수직 분포에서의 분진의 단일층 뿐만 아니라, 분진이 겹쳐 있는 다층 분포도 고려되고 있다.

그러나, 중량법에서의 수평 분포는 Fig. 2와 같은 경우도 생각할 수 있어, 질량은 동일하지만 수평 분포비는 분명히 다르므로, 이에 대한 고려가 필요하다.

따라서, 중량법은 면적법이 갖고 있는 결점을 보완하는 평가법으로서 도입하여, 분진의 과잉 질량분포를 평가할 수 있는 수법으로서 이용될 수 있다고 사료된다.

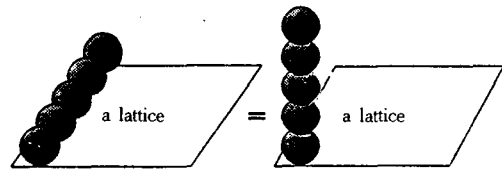


Fig. 2 An example of the evaluation method that the space distribution of dust represents by the weight of dust per a unit lattice

2.2 다층 면적법

이상에서 설명한 바와 같이, 분진운의 공간 분포를 파악하기 위한 개념 모델(concept model)로서 중량법과 면적법을 고려하고 있지만, 이 두 방법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 평가법을 제안하는데, 이를 다층면적법이라 부르기로 한다. 이 방법은 Fig. 3에서와 같이, 각 단면에서의 면적법이 갖고 있는 수평 분포(A, B, C, D)의 정의를

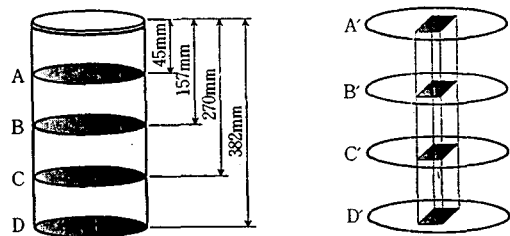


Fig. 3 The new definition that represents the space distribution of dust

기반으로 하고, 수직 분포에 관해서는 다층에 의한 수평 분포(A, B, C, D)로서 정의하는 바, 수평분포의 변화(A→B→C→D)에 의해 분진의 공간 분포의 균일성을 평가한다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었는 바, 실험 장치는 크게 폭발용기, 펌프 및 압력계로 구성되어 있다. 즉, 용기는 내경 200mm, 두께 5mm, 길이 382mm의 윗 부분의 뚜껑이 개폐가 가능한 아크릴제의 투명 원통형으로, 윗부분 뚜껑의 중심에서 약 35mm 아래의 위치에 있는 3쌍 joint에는 3개의 분진 분산 접시를 각각 수평을 유지하도록 설치하여, 분진 시료를 분산접시 위에 올려 놓을 수 있도록 하였다. 그리고, 용기의 상부는 분진의 충진을 위해서 개폐가 가능하게 하고, 충진 후에는 silicon grease로 밀착하여 닫히게 하였다. 또한, 용기의 측면을 통하여 공기를 도입할 수 있도록 하였다.

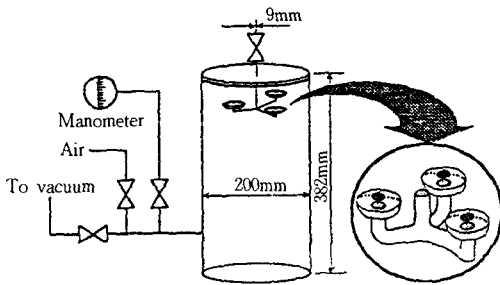


Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

3.2 시 료

본 실험에서 사용한 시료는 75~90 μ m(200~160 mesh)의 입경을 갖는 순수한 저밀도 polyethylene(LDPE)으로서, Table 1에서와 같은 물성값을 갖고 있다. 이 polyethylene 분진은 silica gel로 건조시켜 습도의 영향에 의한 덩어리 생성을 방지하였다. 또한 polyethylene은 정전기가 발생하기 쉬우므로, 정전기 억제제를 용기 벽에 도포하여 사용하였다.

Table 1 Physical properties of LDPE^{4,5)}

Production	General Science Corp.
Molecular equ.	$[-CH_2-CH_2-]_n$
Molecular weight	about 1100
Viscosity(140°C)	180 cps(0.18 Pa·s)
Specific gravity	0.88~0.94
Density	0.91g/cm ³ (LDPE)
Specific heat(C)	1.56J/g·K(at 300K)
Fusion point	92~117°C

3.3 실험 방법

실험의 조작 순서는, 먼저, 3쌍 joint에 설치된 분산 접시에 3등분한 polyethylene 시료를 올려 놓고, 진동에 의해 접시 위의 시료가 균등히 분포되도록 한 후, 용기 윗 부분의 뚜껑을 실리콘 그리스를 사용하여 밀폐시킨다. 이때, 실험에 사용한 polyethylene의 시료량은 각각 0.03g, 0.3g, 1.2g을 취하였다.

또한, 압력계로 분압을 측정하면서 용기 내를 진공으로 한 다음, 용기 측면의 도입구로 부터 분진 접시의 분진이 부유되지 않게 천천히 공기를 도입하여 용기 내의 압력을 0.803 atm(610 mmHg)로 하고 밸브를 닫은 후, 약 10분간 방치하여 둔다.

이 0.803 atm의 압력 설정은 용기 내의 압력과 유입 공기에 의한 분진의 분산도의 관계를 정성적으로 조사하여, 분진 cup의 분진을 모두 분산시키는데 필요한 최소 압력으로 결정된 값이다.

특히, polyethylene 및 아크릴제 원통형 용기는 정전기가 발생하기 쉬우므로, 실험에 사용한 아크릴제 용기의 벽에는 polyethylene과의 정전기 방지를 위해, 정전기 억제제를 사용하였다. 또한, 실험 후의 polyethylene 시료의 제거에는 유연성이 큰 특수 전도성 섬유(상품명: 日製サンダロン)의 부러쉬(OAC-6 eraser dust brush S)를 사용하였다. 이는, 부분 방전의 일종으로 기체 중의 도체 표면 침단에 발생하는 국소적인 방전인 코로나 방전에 의해 정전기를 완전히 제거하고, 폭발용기 벽에의 분진의 부착 및 부유하여 있는 분진의 재부착 등을 막을 수 있기 때문이다.

이와 같이 하여, 감압 상태의 폭발용기 윗부분의 밸브를 완전히 열어 이에 따른 유입 공기에 의해 분진을 분산시키도록 하였다. 그리고, 분진 시료의 양을 변화시키면서, Fig. 3에 나타낸 바와 같

이, 높이 A, B, C, D에서의 분진의 수평 분포 및 수직 분포를 촬영하고 그 화상으로부터 분포 상태를 해석하였다. 또한, 높이 A, B, C, D에서의 분진의 분포 촬영은 동일 측정조건 하에서 각각 따로 행하였다. 또한, 검은 아크릴 원반은 수준계(수평계)를 사용하여 용기 내에서 완전 수평이 되도록 하였다. 참고로, 흑색 원반과 폭발 용기와의 간격의 면적은 용기의 전치 단면적의 약 4%에 상당하지만, 이것은 측정 신뢰 면적에서 제외한다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 화상 데이터는 검은 원반 위에 흰 분진이 놓여 있는 형의 화상으로, 이의 예를 Fig. 5에 나타내었다. 얻어진 화상은 Nikon-601S로 촬영(500~1000sec/코마)된 것으로, 화상 정보는 담농(淡濃) level(휘도level)을 다치(多值)로 나타낸 모노크로의 담농화상이다. 이 화상 정보는 18.0cm×18.0cm의 공간에 대하여 640×480 pixel의 해상도(解像度)로, 1 pixel당의 정보량은 담농 256계조(階調)로 되어 있다.

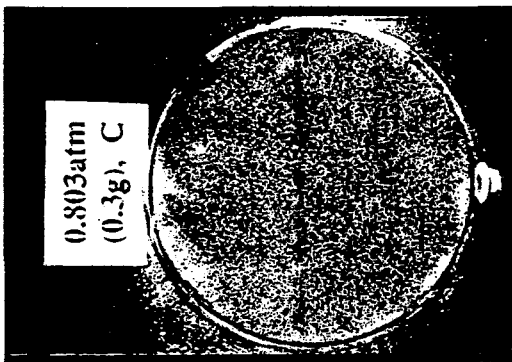


Fig. 5 An example of sectional distribution of dust

그러나, 화상데이터의 상(像)의 농도(화상상의 색의 밝기)의 수치가 그대로 실험 화상의 빛의 강도를 나타내고 있지는 않으므로, 여기에서의 해석은 컴퓨터에 입력된 후의 상대 농도로 하고, 또한 Fig. 6에서와 같이, 단위 단면적 당의 격자를 설정하여 흑과 백의 색비(色比)에 의한 농도 분포의 해석을 행하였다. 그리고, Fig. 7은 분진의 수평 분포의 화상 해석의 하나의 예를 나타낸 것이다.

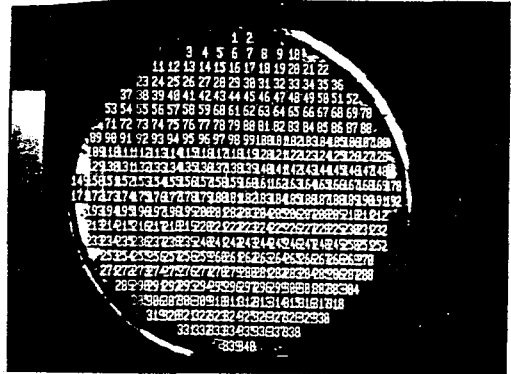


Fig. 6 The unit lattice for image processing

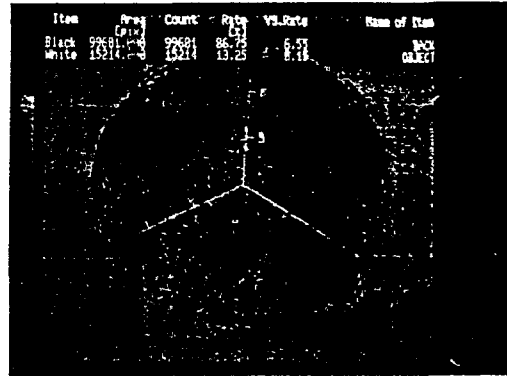


Fig. 7 An example of image processing

본 연구에서 제안한 분진운의 공간 분포의 평가는 높이에서의 분진의 수평 분포의 변화에 의한 방법을 취하고 있다. 이 방법을 이용하여 다른 실험장치에 대해서는 평가를 행하지 않았으므로, 본 장치 만에서의 높이에 의한 수평 분포의 변화에 의해 분진의 분산 분포 및 재현성을 검토하는 것으로 하였다. 이를 위해 분진의 수평 분포의 화상 해석을 행하여 얻어진 결과를 Fig. 8의 (section A)~(section D)에 3차원 그래프 화하여 나타내었다.

그리고, 화상 해석에서 얻어진 각각의 수평 단면에서의 분진 농도 변화의 표준편차를 구하여, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 즉, 높이에 의한 농도는 분진이 쌓여 있는 접시에 가장 가까운 A에서 가장 크고, 분진이 분산되어 용기 아랫 부분으로의 진행에 따라 일정하게 되는 경향을 보여주고

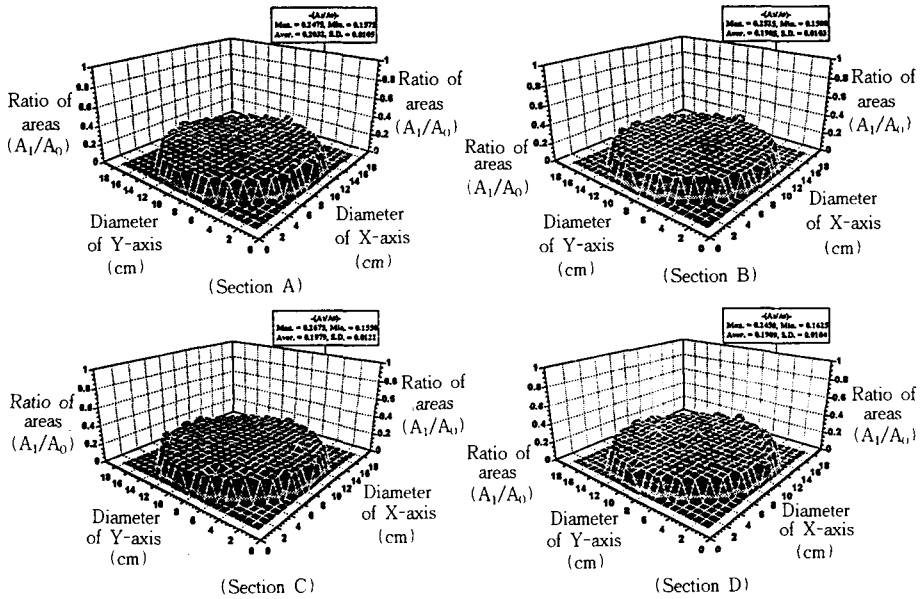


Fig. 8 Sectional distribution of dust(0.3g)(A₀; Areas per mesh, A₁; Areas covered with dust per mesh)

Table 2 Distribution ratio in average area of dust

Dust Weight[g]	Average Area[%] (calculation) : A	Average Area[%] (image processing analysis)	Error Ratio[%] 100(A-B)/A
0.03	2.25	2.08	7.56
0.30	22.54	19.96	11.45
1.20	90.17	88.14	2.25

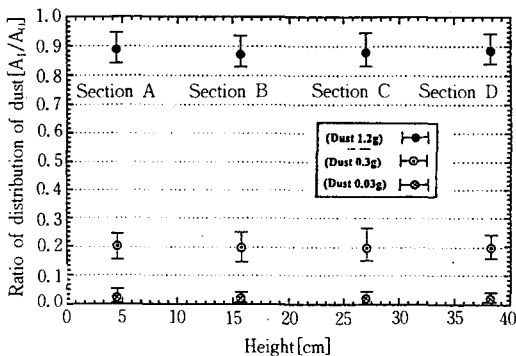


Fig. 9 Variation of sectional distribution of each height

있다. 또한, Fig. 5에서는 분진의 분산에 있어, 분진이 용기의 벽에 부딪치면서 떨어지기 때문에,

중심부의 농도보다 둘레쪽의 농도가 높게 되는 바, 화상 해석에 의한 3차원 그래프에서도 나타나고 있었다.

이는, 분진의 분산이 시작되는 용기 윗부분 쪽에서의 격렬한 교란에 의해, 분진의 이동거리가 짧기 때문에 용기의 벽과의 충돌이 빈번히 일어나, 전체적인 분진의 분포가 균일하지 못하기 때문이라고 판단된다. 따라서, Fig. 3의 A단면을 포함한 공간을 제외하고, 실험대상 면적을 벗어나 멀리 비산하는 분진을 무시한다면 보다 좋은 공간 분포가 형성되어 분진 농도 변화의 표준편차는 보다 작아지리라 생각된다.

또한, Table 2에는 분진이 차지하는 평균직경을 이용한 계산치와의 관계를 나타내었다. 여기에서, 평균면적[%]의 계산은 분진이 완전한 단층(斷層) 분포를 형성하고 있다고 가정한 것으로, 화상해석의 평균면적보다 큰 결과를 나타내었다. 이 평균면적의 차이는 Table 2에 나타난 바와 같이, 산술 평균하여 보면 약 7.1% 정도로, 이는 실제로 중첩되어 있는 분진이 존재하고 있는 것을 의미하고 있는데, 폭발용기와 사이에 간격을 통하여 떨어지는 분진의 양을 고려하면, 그 차이는 보다 작을 것

으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에 의한 내용을 종합하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 다층 면적법에 의한 분진의 수평 분포의 화상 해석에 의해, 분진의 공간 분포가 거의 일정하게 되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 새로운 실험 장치로 다층 면적법을 이용하여 검토한 결과, 공간적인 분포의 재현성은 평균 약 7.1%의 오차범위로 균일한 농도 분포를 나타내게 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Amyotte P.R., Pegg M.J., Sun Y.H., Examination of the Ignitability Characteristics of Coal Dust/Air and Methane/Coal Dust/Air Mixtures : Final Report, Energy, Mine and Resources Canada, Canada Center for Mineral and Energy Technology, Ottawa, 1991.
- 2) Amyotte P.R., Pegg M.J., Sun Y.H., Examination of the explosion characteristics of methane/coal dust /dolomite/air mixtures, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Cape Breton Development Corporation, Canada, 1990.
- 3) Franke H., Zuendunbg hybrider Gemische aus Kohlenstaub und Methan durch schwache Zuendquellen (Ignition of hybrid mixtures of coal dust and methane by weak sources of ignition), Deutsche Montan Technologie fuer Rohstoff-Energie-Umwelt e.V., Bochum, Germany F.R., 1990.
- 4) H.F.Mark et al., in M.Lewin, S.M.Atlas, E.M.Pearce(Eds.) : Flame-Retardant Polymeric Materials. Vol. 1, p. 1, Plenum Press, New York, 1975.
- 5) J.Brandrup, E.H.Immergut(Eds.) : Polymer Handbook. 2.Ed. John Wiley & Sons, New York, 1975.