

미세 매연입자의 응집을 위한 초음파장의 적용

정상현*, 홍원석*, 심성훈*, 김용진* · 이성범**

Application of Ultrasonic for agglomeration of fine soot particles

Sang Hyun Jeong, Won Seok Hong, Sung Hun Shim, Yong Jin Kim and Sung Bum Lee

ABSTRACT

Ultrasonic field of 28kHz with sound pressure level 162dB has been employed to agglomerate the fine soot particle produces in a diffusion flame in a chamber. The agglomeration process has been investigated with digital camcorder and analysed in terms of the decrease of number density with exposure time. From the observation of agglomeration process, the initial agglomeration has been carried out during the short time, and it has been dominated by the orthokinetic collision. Thereafter, a slower agglomeration mechanism, driven by acoustic streaming in the chamber takes over and agglomeraters grew to diameters of several millimeters were levitated at the pressure node of the acoustic wave. And, the circular disk shape of large agglomeraters with the rotational and translational motion is observed.

Key Words : Soot, Ultrasonic field, Agglomeration, Particle size distribution

1. 서론

연소 과정 후의 배출 가스 속에 포함된 입자상 오염 물질인 미세 입자는 다양한 크기 분포를 가지는 미세한 입자군으로 형성되어 있으며, 대기 오염의 주된 요인으로 작용한다. 이러한 미세 입자들의 제어 및 제거를 위한 장치는 다양하게 개발되어 있으며, 유동의 조건, 외기의 조건, 입자의 종류 및 농도 등에 따라 다양한 장치로 설계될 수 있다. 장치의 성능은 제거 대상 입자의 직경에 매우 크게 의존하는 것이 일반적인 경향이며, 입자의 직경이 클수록 제어 및 제거가 용이해진다. 일반적으로 유동 또는 공기 중에 존재하는 입자들은 입자에 작용하는 외력에 의하여 운동이 유발 되는데, 운동의 형태는 입자의 직경에 따라 다양하게 나타난다.

입자의 직경이 매우 작은 경우(직경 < 0.1 μ m), 한 지점에서의 입자군과 주위 지점에서의 입자군 사이의 농도차에 의하여 입자의 운동이 유발되며, 대표적인 경우가 Brown확산, 난류확산 등에 의한 입자의 운동이다. 입경이 10 μ m 이상의 입자

들은 자체의 중력에 의한 침강으로 제거되어 공기 중에서의 수명이 짧아지나, 입경이 0.5~10 μ m 범위의 입자들은 공기 또는 유동속에 매우 오랜 시간 동안 유지되고 자체적인 제거가 어렵다. 이와 같은 관점에서 생각하면, 배출 가스 속에 포함된 미세 입자를 쉽게 제거할 수 있는 적절한 방법 중의 한가지는 미세 입자 사이의 응집에 의하여 입자의 직경을 증가시키는 것이다. 미세 입자의 직경 증가는 인위적인 외력에 의하여 입자와 입자 사이의 상호 충돌 빈도를 증가시킴으로써 달성될 수 있으며, 입자 상호간의 충돌 빈도 증가를 위한 잘 알려진 방안 중의 하나는 부유하는 입자 군들에 강력한 음파 에너지를 인가하는 방법이다. 기체 속에 부유하고 있는 입자군에 인가되는 음파 가진은 입자 사이의 상대 운동을 유발시키고, 이때의 상대 운동으로 인한 입자 사이의 충돌에 의하여 입자들은 응집된다. 음파장에서 미소 입자 응집의 주된 기구는 음파장에서 서로 직경이 다른 입자 사이의 상호 병진 운동으로 인한 입자 상호간의 직접적인 충돌에 의한 응집(orthokinetic agglomeration), 운동하는 입자와 주위 유체 사이의 점성 등에 의한 유체역학적인 상호 작용에 의한 입자 사이의 응집(hydrdynamical agglomeration) 및 음파장에서 서로 근접한 입자 사이의 서로 작용하는 음파 압력에 의한 응

* 한국기계연구원 환경기술연구부

† 연락처, E-mail : shjeong@kimm.re.kr

** (주) TENOPS, 개발부

집(radiation pressure) 등이다.

이와 같은 음파 에너지를 이용한 미세 입자의 응집에 대한 연구는 Andrade(1936), Stokes(1950) 등에 의하여 기초적인 연구가 시작되었으며, 음파 응집 기구의 규명 및 적용에 대한 연구가 근래에 매우 활발하게 수행되고 있다. 대표적인 연구의 동향으로는 입자 사이의 직접 충돌(orthokinetic interaction)에 의한 순간적인 초기 응집 및 음파 유동에 의한(hydrodynamic interaction) 매우 큰 응집체의 형성에 대한 연구(Margil et al., 1990), 음파 응집을 전기집진기에 적용하여 입경 2-3 μ m 범위 입자의 집진 효율 특성에 미치는 영향에 관한 연구(Margil et al., 1993) 등 음파 응집 현상을 미소 입자의 제거에 적용하기 위한 기초 연구가 수행되었다.

또한 음파 후류 효과(acoustic wake effect)라고 불리는 새로운 응집 기구에 대한 개념의 도입(Hoffmann, 1996) 및 음파 응집 기구의 규명을 위한 이론적인 연구(Song et al., 1994; Dainov et al., 1995; Hoffman and Kooperman, 1996) 등 직접 충돌에 의한 응집과 유체역학적인 응집의 상호 작용에 대한 다양한 연구가 수행되었다.

음파에너지를 이용한 미세 입자의 응집 현상에 대한 연구는 위에서 언급된 것처럼 다양하게 수행되었으나, 음파 응집의 기본적인 개념에 대한 많은 의문점은 남아있으며, 특히 대부분의 연구는 응집 과정에서의 입자의 거동에 집중되어 있으며, 입자가 응집 후 응집된 입자와 응집되지 않은 입자 사이에서의 부가적인 응집 및 상호영향 등에 대한 연구의 결과는 미미한 상태이다. 이에 따라 본 연구에서는 제한된 공간에서 초음파 에너지의 인가에 의하여 매연 입자의 초기 응집 및 응집이 진행됨에 따라 나타나는 응집체의 거동에 대한 거시적 또는 미시적인 고찰을 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

초음파 에너지가 인가된 공간 내에 부유하는 매연 입자의 응집현상에 대한 실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와같이, 확산 화염에서 발생하는 매연 입자의 응집 현상을 고찰하기 위한 응집 챔버, 초음파발생기, 음파 신호 분석을 위한 마이크로폰과 신호분석기, 그리고 음파에너지에 의한 매연 입자의 수 농도 변화를 측정하기 위한 입자계수기로 구성된다. 응집 챔버는 폭400×높이400×길이1000mm의 체적을 가지는 사각형 형상의 아크릴로 제작되었으며, 응집 챔버 길이 방향의 한쪽 끝단에는 초음파 발생기의 방사판, 그리고 다른 한쪽의 끝단에는 반사판을 설치하였다. 초음파

발생기의 방사판과 응집 챔버의 반사판 사이의 거리인 방사거리 조절을 위하여, 방사판에 이송 장치(screw)를 설치하였으며, 응집 챔버의 측면에는 측정을 위한 측정구 및 연소에 의한 매연 입자를 발생용 시료의 장입을 위한 출입구를 설치하였다. Fig. 1에서 D 및 DL은 방사거리 및 방사판과 측정구 사이의 거리를 각각 나타내며, 응집부의 체적은 방사판의 위치 조절에 의하여 변화시켰다.

응집 챔버에 초음파 에너지를 인가하기 위한 초음파 발생기는 Gallego(1978)의 연구에서 사용한 초음파 발생기와 동일하게 제작하여 사용하였으며, Fig. 2 및 Fig. 3에 초음파 발생기 구조의 개략도 및 제작된 초음파 발생기를 각각 나타내었다. 초음파 발생기는 세라믹 압전 소자(piezoelectric transducer)를 사용하였으며, 압축 응력을 받는 반과장의 원통형 트랜스듀서로 구성하였고, 반대극을 가진 환형 압전 소자(piezoelectric ceramic ring)의 짝을 두 개의 동일한 진동부에 삽입하였다. 압전 소자는 두께 3mm 외경이 40mm 그리고 내경이 8mm인 원통형이며, 압전 소자에 전기적 에너지를 인가하는 전극봉은 고전압 선으로 연결하였다. 압전 소자는 축 방향의 압축 응력이 최대 출력에서 진폭의 급격한 증가를 허용해야 하며, 또한 피로 파괴에 대한 충분한 안전성을 가져야 하므로, 길이 55mm 외경 40mm의 강철봉 사이에 에폭시를 결합하였다. 초기 진동부에서 발생하는 압전 소자의 진동을 증폭시키기 위한 증폭부(amplifier)는 길이 방향으로 반과장의 공명이 발생될 수 있도록 $\lambda/4$ 길이의 두 개의 평행한 원통부분으로 구성되어 있으며, 증폭부에서의 진폭의 변화는 부분의 면적비와 같다. 발생된 초음파를 최대출력으로 방사하기 위하여 방사판은 단이진 3개의 nodal 원판으로 제작하였다. 방사판의 두께는 진동모드와 작동 주파수의 선택에 의해 결정되어지며, 본 연구에서 제작한 방사판의

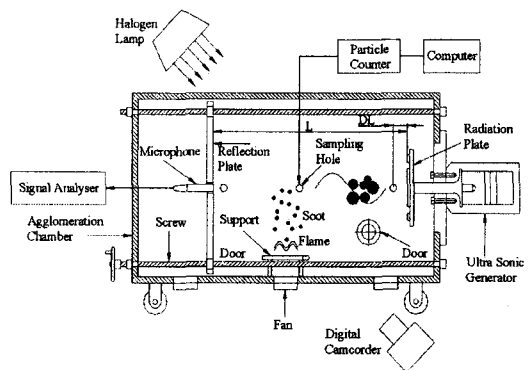


Fig. 1 Schematic of experimental set up

판의 재질은 알루미늄을 사용하였으며, 직경 200mm와 두께 5mm의 판에 8mm의 단높이를 가진 것을 사용하였다. 압전소자에 전기적인 에너지가 인가되면 압전소자의 연속적인 변형으로 인하여 진동하게 되며, 이 진동은 증폭기 부분에서 증폭되어 중앙에 있는 방사판(radiating plate)을 구동시켜 요구되는 넓은 범위의 초음파를 발생하게 된다. 이 때 발생하는 초음파의 출력을 최대로 하기 위하여 공진 주파수에서 발진시키며 본 연구에서 설계/제작되어진 초음파 발생기는 28kHz에서 공진 주파수를 형성한다. 초음파 발생기의 재원을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Spec. of ultrasonic generator

항목		단위	사양
공진 주파수		kHz	28
출력	nominal	Watt	200
	max		400
방사판	diameter	mm	200
	material	-	Al

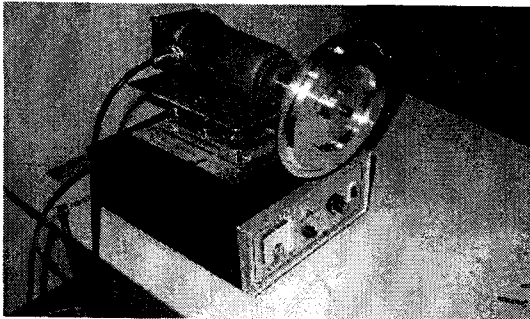


Fig. 2 Ultrasonic generator

2.1 실험 방법

초음파 발생기로부터 발생된 응집부 내부의 음파장의 주파수 및 음압(SPL : Sound Pressure Level)은 방사판에 설치된 직경 1/8inch의 microphone(B&K, Model 3047)을 통하여 측정된 신호를 음파신호 분석기(B&K, Model 3550)를 사용하여 분석하였다. 음파 응집 실험에 사용된 매연 입자는 다음과 같은 방법에 의하여 발생을 시켰다. 먼저 동일한 치수를 가지는 polypropyren 재질의 섬유상의 시편을 경유에 담근 후, 응집부 내부에 설치된 지지대 위에 놓고, 시편을 점화시키면, 시편의 점화 순간 화염과 함께 발생된 매연으로 인하여 응집부 내부는 매연 입자로 충전하게 되고, 이 후 시편의 화염이 자연적인 소화가 되면 매연 입자는 응집부 내부에서 Brown 운동을 하게 된다.

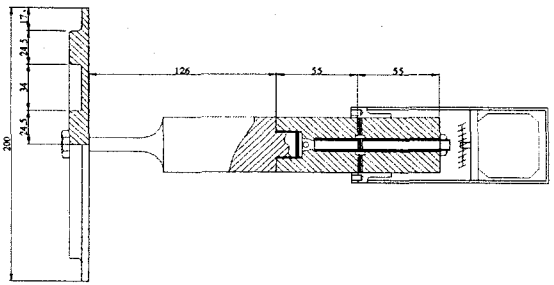


Fig. 3 Structure of Ultrasonic generator

이때의 매연 입자의 수 농도는 시편의 개수에 따라 다르게 되나 약 10^5 개/ m^3 의 범위를 가진다. 발생한 초기 매연 입자의 수 농도 및 입경 분포는 입자 계수기(APS, TSI Model 3310)를 사용하여 측정하였다. 주어진 출력의 초음파 에너지에 대하여 방사거리(L)를 0.15m, 0.3m, 0.45m 3가지의 경우에 대하여 응집 실험을 수행하였으며, 또한 응집되는 입자의 수 농도의 측정 위치(DL)는 초음파 발생기의 방사판으로부터 2cm, 22cm의 2지점에서 측정하였다. 먼저 시료의 연소에 의하여 발생된 매연 입자는 Brown 운동에 의하여 자체적으로 응집을 하게 되므로, Brown 응집과 음파에 의한 응집을 분리하기 위하여 시편의 화염이 자연 소화된 후 약 3분 동안 음파에너지를 인가하지 않고 정지상태로 유지시켰다. 충분한 Brown 운동이 일어난 후, 초음파 발생기의 작동으로 응집부내에 음파장을 형성시키고, 음파에너지의 인가 시간이 30초, 2분, 5분, 및 10분에서 매연 입자의 수 농도 변화를 측정하였으며, 음파 에너지의 인가 시간이 10분 30초 인 때에 초음파 발생기의 작동을 중지하였다. 이후 초음파 발생기의 작동이 중지된 채로 10분 동안 연속적으로 수 농도의 변화를 측정하였으며, Fig. 4에 수 농도 측정 과정을 도식적으로 나타내었다.

매연 입자의 수 농도를 측정하기 위한 샘플링 시간은 1회 측정 당 30초로 하였으며, 측정된 데이터는 컴퓨터에 의하여 분석하였다. 또한 음파에 의한 응집 과정을 가시화 하기 위하여 400W의

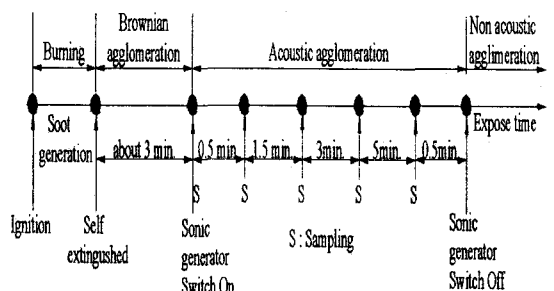


Fig. 4 The process of experiments

할로겐 램프를 응집챔버 내부로 조사한 후, 음파장에서의 매연 입자 및 응집체들의 거동을 디지털 캠코더를 사용하여 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

앞 절에서 언급된 실험 장치 및 실험 과정에 의하여, 방사거리, 방사 압력, 주파수 및 음파에너지의 인가 시간 등이 매연 입자의 응집에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 실험에 사용된 초음파 발생기의 특성을 고찰하기 위하여, 방사판과 반사판 사이의 거리 즉 응집부의 방사거리(L)가 0.15m, 0.3m 및 0.45m인 경우에 대한 주파수와 방사 압력과의 상관 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 나타나는 바와 같이, 방사거리가 0.15m인 경우, 공진 주파수 28kHz 방사 압력의 크기는 각각 162dB 임을 볼 수 있다. 방사 거리가 0.3, 0.45m 로 증가함에 따라 거리 손실에 의한 방사 압력의 감소가 나타남을 볼 수 있으나 그 손실의 크기는 5%이내임을 볼 수 있다.

연소에 의하여 생성된 초기 매연 입자들은 Brown 운동에 의한 응집을 일으키며, 본 실험에서 Brown 운동에 의한 응집과 음파에너지에 의한 응집 사이의 분리를 명확하게 하기 위하여, 매연 입자의 발생 후 시간의 증가에 따른 수 농도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 매연의 초기 농도는 연소 대상인 섬유 시편 크기에 의하여 조절하였으며, 각각의 초기 농도에 대한 수 농도의 측정은 섬유 시편의 화염이 완전히 소멸된 직후부터 측정을 하였다. Fig. 6으로부터, 연소에 의하여 발생된 초기 매연 입자는 예상되었던 바와 같이 Brown 응집에 의하여 급격하게 수 농도가 감소함이 나타나, 매연의 발생 약 3분 후 부터는 시간의 증가에 대한 무차원 수 농도 감소의 기울기는 매우 완만하게 나타남을 볼 수 있고, 매연 입자의 초기 수 농도의 크기에 크게 의존하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 연소에 의

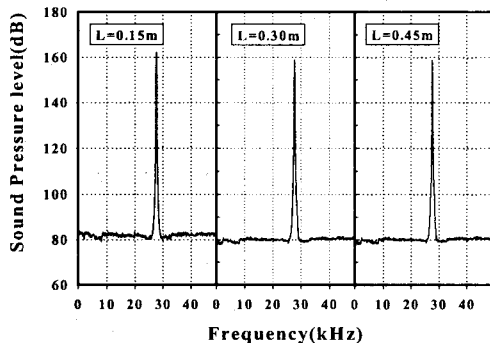


Fig. 5 SPL for different radiation distance

하여 발생된 초기 매연 입자는 Brown 응집에 의하여 급격하게 수 농도의 변화를 수반하나, 초기 매연 입자의 발생으로부터 약 3분 정도 이후부터는 Brown 응집이 매연의 응집 과정에 미치는 영향이 크지 않음을 나타낸다. 본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 매연의 응집 과정 중에 Brown 운동에 의한 영향과 음파의 영향을 최대한 명확하게 분리하기 위하여, 화염의 소멸 시점으로부터 3분 후에 음파발생기를 작동하여 음파에너지를 인가하였다.

연소에 의하여 생성된 초기 매연 입자의 공기역학적 직경 분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 음파 에너지가 인가되지 않은 초기 매연은 공기역학적 직경이 0.6 μ m 부근에 집중적으로 분포되어 있음을 볼 수 있다. 초음파 발생기의 작동에 의한 음파 에너지의 인가로 매연의 수 농도는 매우 급격하게 감소하며, 음파 에너지의 인가 시간이 약 5분 이내에 0.6 μ m 부근의 공기역학적 직경을 가지는 매연 입자의 수 농도는 음파에너지가 인가되기 전의 초기 매연입자의 수 농도에 비하여 약 80% 이상 감소됨을 보인다. 방사 거리의 변화 즉 응집부 체적과 음파 응집 사이의 상관 관계를

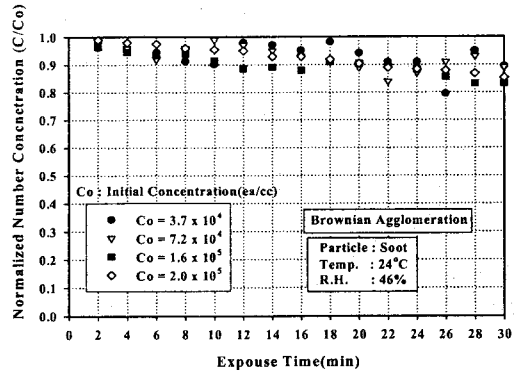


Fig. 6 Brown agglomeration for different initial number concentrations

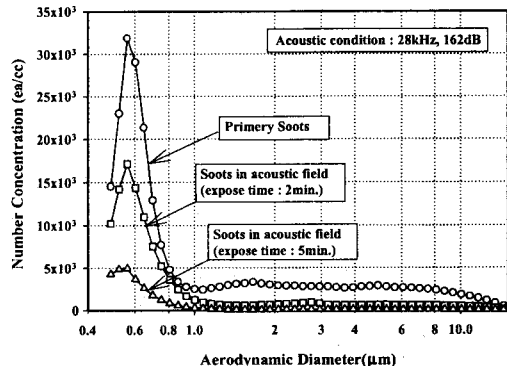


Fig. 7 Number concentration of soot particles

고찰하기 위하여 공진 주파수 28kHz의 음파발생기를 사용하여 방사거리(L)가 0.15m, 0.3m 및 0.45m일 때 음파에너지 인가 시간의 증가에 대한 수 농도 변화에 대한 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 음파 발생기의 방사판으로부터 0.02m 거리에서 수 농도를 측정하였으며, 매연 입자의 초기 농도는 105 범위의 농도(105 order)로 실험을 수행하였다. 또한 음파발생기는 작동 시작으로부터 10분 30초 후에 작동을 중지하여 응집부내에서의 음파에너지를 제거하였다.

Fig. 8에서 나타나듯이, 음파에너지의 인가로 인하여 매연 입자의 응집은 매우 급격하게 일어남을 알 수 있으며, 특히 방사거리(L)가 0.15m인 경우 음파에너지의 인가 시간 약 3분 정도에서 수 농도는 초기 농도에 비하여 95% 이상 감소되었음을 볼 수 있으나, 방사거리(L)가 0.3, 0.45m로 증가할수록 음파 에너지에 의한 수 농도의 감소율은 점점 약해짐을 볼 수 있다.

이와 같은 방사 거리의 증가에 따른 수 농도 감소율이 감소되는 원인은 방사거리의 증가에 따른 음파 압력의 감소가 일차적인 원인이 될 수 있으나, 본 실험 조건에서 서로 다른 방사거리에 대하여 수 농도는 동일한 지점(0.02m)에서 측정되었다는 점을 고려하면, 방사 거리의 증가 자체도 응집율을 감소시키는 원인으로 작용한다고 볼 수 있다. 즉 다시 말하면, 동일한 주파수의 음파에너지를 인가하는 경우, 응집부 체적의 증가는 음파에 의한 매연 입자의 응집 성능을 감소시키는 효과로 나타남을 알 수 있다. 한편 Fig. 8에서 음파발생기의 작동을 중지한 이후의 시간 영역에서의 무차원 수 농도의 변화는 음파발생기가 작동하고 있는 동안의 수 농도 감소에 비하여 매우 느린 감소 또는 수 농도 감소에 큰 변화를 보이지 않음을 볼 수 있고, 이것은 음파 에너지가 매연 입자의 응집에 지배적으로 기여하였음을 의미한다. 한편 Fig. 8에서 방사거리가 0.15m인 경우,

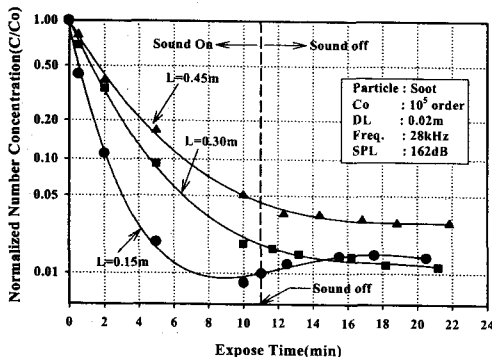


Fig. 8 The effect of radiation distance on the acoustic agglomeration(DL=0.02m)

음파에너지 제거 후의 영역에서 매연 입자의 무차원 수 농도는 음파에너지를 제거하기 직전 영역에서의 수 농도에 비하여 약간 증가함을 보이나, 이것은 음파에너지의 제거로 인하여 응집되었던 매연 응집체들이 파손되어 인하여 발생된 입자들로 인한 순간적인 수 농도의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 Fig. 8을 재구성하여 동일한 수 농도의 감소에 대하여 응집 시간과 방사거리 사이의 관계 Fig. 9에 나타내었다. 동일한 농도 감소율에 필요한 음파에너지의 인가 시간은 방사거리에 비례하여 증가하는 경향을 나타내며, 요구되는 수 농도의 감소율이 클수록 기울기가 증가 함을 알 수 있다. Fig. 10은 방사거리가 0.3m 및 0.45m인 경우, Fig. 8의 경우와 동일한 음파발생기를 사용하여 음파 발생기의 방사판으로부터 0.22m 거리에서 수 농도를 측정된 결과이며, 매연 입자의 초기 농도는 105 범위의 농도(105 order)로 실험을 수행하였다. 그림에서 나타나듯이 방사 거리의 증가에 대한 수 농도의 감소량은 Fig. 8의 경우에서와 동일한 경향을 나타냄을 볼 수 있고, 특히 Fig. 8의 L=0.3m 및 0.45m인 경우와 Fig. 10의 L=0.3m 및 0.45m의 경우를 서로 비교하여 보면 거의 동일한 결과를 나타냄을 볼 수 있다.

Fig. 10의 경우에는 측정 위치(DL)가 0.22m인 점을 고려할 때 응집부에서의 음파에 의한 수 농도의 감소는 주어진 조건에 대하여 응집부 내부의 공간 전체 영역에서 비교적 균일하게 발생하는 경향을 가짐을 예측 할 수 있다.

음파에 의한 매연의 초기 응집, 성장 및 응집체의 거동 등 응집 과정을 정성적으로 고찰하기 위하여, 응집과정을 가시화 하였으며, 전체적인 응집 과정을 Fig. 11에 나타내었다.

먼저 섬유 시편의 화염 소멸 후, 브라운 운동에 의한 매연 입자들의 거동을 Fig. 11(a)에 나타내었으며, 예상한 바와 같이 Brown 운동 시에

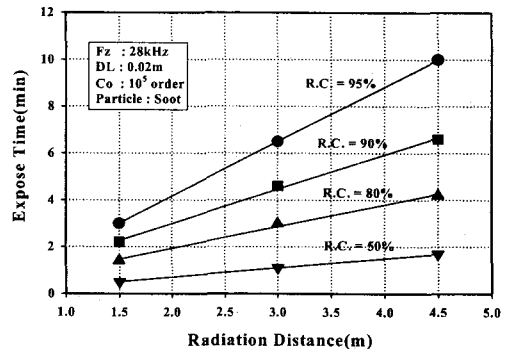


Fig. 9 Relation between radiation and expose time for various reduction of concentration

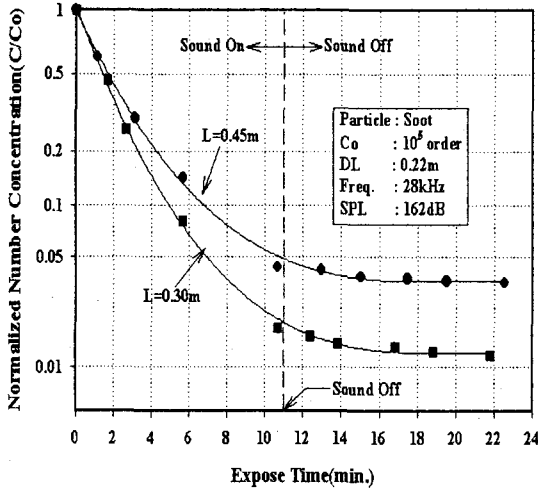


Fig. 10 The effect of radiation distance on the acoustic agglomeration(DL=0.22m)

는 관측되어 질 수 있을 정도의 매연 입자들의 응집체는 발견되지 않았다. 3분 동안의 Brown 운동 후 음파 발생기의 작동을 시작하면 응집 과정은 매우 급격하게 일어난다. 음파 발생기의 작동 시작 첫 번째 단계에서는 초기 매연 입자들은 음파에 의하여 매연 입자들의 운동이 매우 활발하게 진행됨을 볼 수 있었으며, 음파의 진동으로 인하여 상호 병진 운동 및 이로 인한 충돌을 하며, 10초 후의 응집부 내부에는 매우 작은 그러나 눈으로 관측되어 질 수 있을 정도 크기의 초기

매연 응집체 들이 형성되기 시작함을 볼 수 있으며, 이 과정을 Fig. 11(b)에 나타내었다. 응집체의 크기와 수는 음파에너지의 인가 시간이 증가함에 따라 점점 증가하고, 음파의 인가 시간이 30초인 경우 초기의 응집체 들은 계속된 병진 운동에 의하여 눈으로 분명하게 보일 정도로 성장하고 있음을 볼 수 있었으며(Fig. 11(c)), Fig. 11(d) 및 Fig. 11(e)에서 나타낸 바와 같이 인가 시간이 약 1-2분 후에는 매연 응집체는 크기가 약 0.5-1cm 정도로 성장함을 볼 수 있었다. 매연 응집 과정에서 응집체의 크기는 무한정 증가하는 것은 아니고, 응집체의 크기가 증가하여 중력의 영향이 상대적으로 커지는 최대 크기가 되면 응집체는 응집부 바닥으로 중력에 의하여 낙하하고, 본 실험 조건에서는 중력의 영향으로 떨어지는 매연 응집체의 최대 크기는 약 0.5-1cm 정도로 관측되었고, 음파 에너지를 제거한 후 응집체가 중력에 의하여 낙하되는 과정을 Fig. 11(f)에 나타내었다.

Fig. 12는 본 연구에서 매연의 응집 과정에서 관찰된 특이한 사항에 대하여 각각의 단계별로 도식화한 그림이다. 첫 번째 단계에서 화염에 의하여 발생된 초기 매연 입자들은 음파의 진동에 의하여 상호 병진 운동을 하며, 이때 매연 입자들은 상호 충돌에 의하여 매우 작은 그러나 눈으로 보일 정도 크기의 초기 응집체들이 형성된다.

형성된 초기 응집체들은 음파 에너지 인가 시간의 증가에 따라 계속된 병진 운동에 의하여 눈으로 분명하게 관측될 정도로 성장하며, 또한 음파장 방사 압력의 영향으로 비정형의 판(plate)형

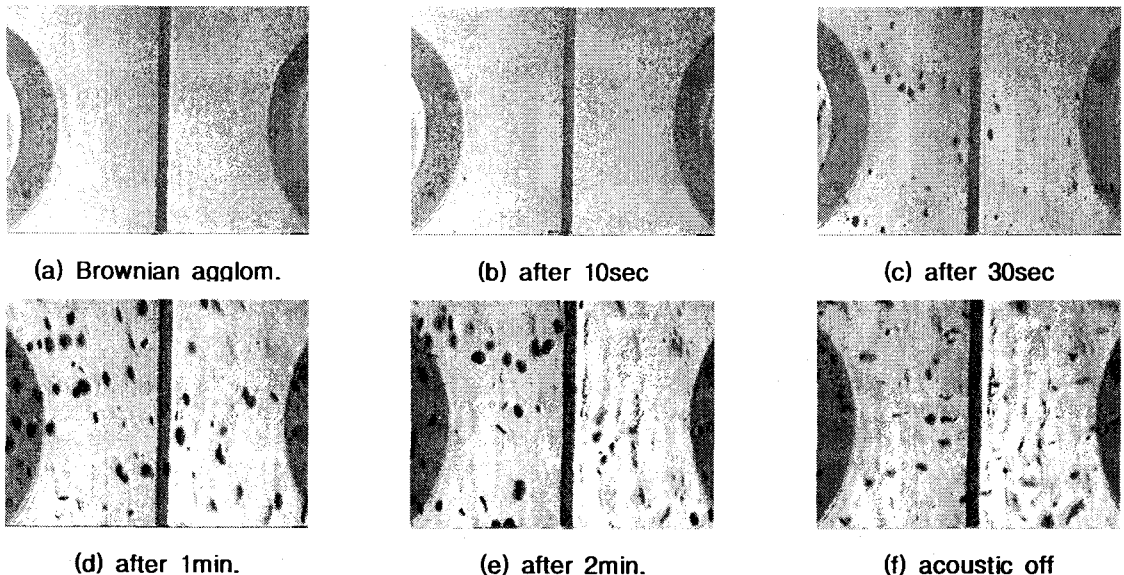


Fig. 11 Visualization of soot agglomeration process

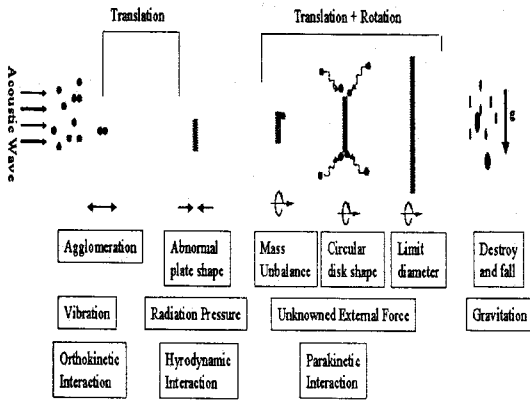


Fig. 12 Schematic of acoustic agglomeration process

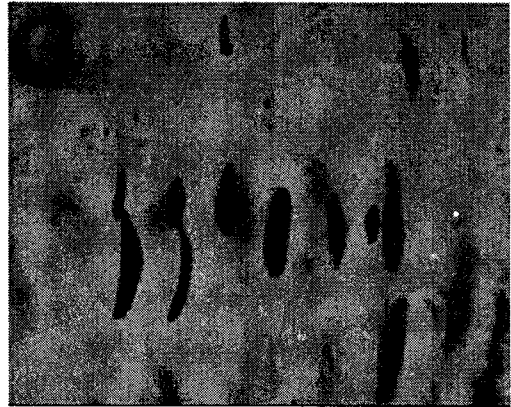


Fig. 14 Circular disk shape aggregate

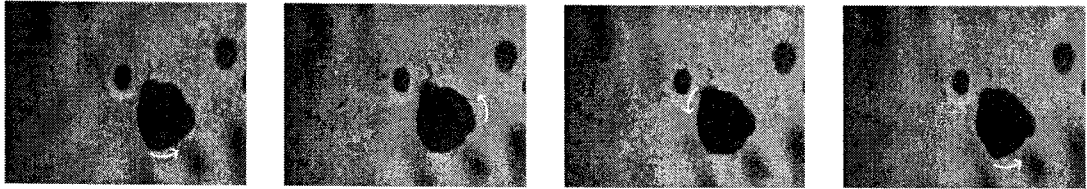


Fig. 13 Rotational motion of soot aggregate

상으로 응집부의 일정한 공간에 떠 있게 된다. 응집체가 응집부의 일정한 공간에 떠있는 원인으로, 음파의 진동에 의하여 응집부 내의 기체가 이동하고, 이때 매연 입자들도 기체와 함께 거동하게 된다. 음파 에너지에 의한 기체의 이동은 음파의 변위가 영인 마디와 변위가 최대인 배 사이에서 일어나며, 이때 마디에서는 압축과 팽창이 최대이고 변위(displacement)가 영이기 때문에 기체의 이동은 없고, 따라서 매연 입자들은 마디에 모이게 되고, 마디에 모인 매연 입자들은 방사판의 축 방향으로의 변위가 없기 때문에 움직이지 않고 고정된 위치의 공간에 떠 있게 된다. 한편 압력배(pressure antinode)는 항상 마디에 위치하고, 마디에서는 변위가 영이기 때문에 병진 운동을 하지 않으므로, 마디에 놓인 매연들은 마디에서의 최대 방사 압력에 의하여 판 형상으로 성장하게 된다. 즉 음파장에서 미소 입자 응집체의 형상은 구형(spherical)으로 성장하는 것이 아니며, 판(plate) 형상으로 성장한다. 초기 응집체의 발생과 초기 응집체들이 비정형의 판 형상으로 성장할 때 까지의 소요 시간은 수초 이내로 매우 짧은 시간에 일어남을 관찰 할 수 있었다. 두 번째 단계에서는 비정형의 판 형상으로 성장한 응집체들은 각각 자체의 중심축에 대하여 회전운동이 일어남이 관측되었다. 이와 같은 응집체들의 독립적인 회전운동에 대한 원인은 명확

하게 설명 할 수는 없지만, 응집체와 주위 매연 입자 사이의 지속적인 충돌에 의한 질량 불균일, 방사판과 반사판 사이의 음파장에 의하여 생성되는 회전 유동 등에 기인하는 것으로 추론할 수 있다. 즉 각각의 마디에 위치한 비정형의 판 형상의 응집체는 주위의 작은 입자의 매연 입자들의 충돌에 의하여 판의 축에 대한 질량 불균일 상태를 이룰 것이고, 이때 질량 불균일 상태에 놓인 비 정형의 판 형상 응집체의 운동은 회전 운동으로 변함을 예측 할 수 있으며, 이 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이후 회전 운동 하고 있는 응집체 주위 입자들은 판 형상의 응집체 주위에 부착되고, 이와 같은 부착 과정에 의하여 비정형의 판 형상의 응집체 들은 원형판(circular disk) 형상으로 변함을 관측 할 수 있었다. 원형판 형상의 회전하고 있는 응집체의 사진을 Fig. 14에 나타내었다. 회전하고 있는 원형판 형상의 응집체의 성장은 다음과 같이 추론 할 수 있다.

원형판 형상의 응집체는 매우 짧은 거리의 병진 운동과 회전 운동을 동시에 수행하며, 응집체의 회전 운동으로 인한 원형판 응집체 주위의 압력은 감소하고, 이때 발생하는 부의 압력 구배는 원형판 주위의 매연 입자들을 응집체 방향으로 흡입하는 구동력이 될 수 있으며, 이로 인하여 응집체 주위의 매연 입자들은 원형판의 원주 상에 부착되어 원형판 형상의 응집체는 점점 크게

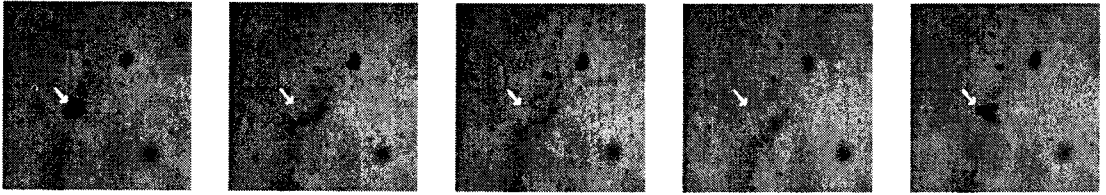


Fig. 15 Recombination process of destroyed aggregate

성장할 것이다. 원형판 응집체의 회전 속도는 원형판의 직경이 증가할수록 느려짐을 관찰할 수 있었으며, 원형판 응집체의 질량이 중력의 영향보다 크게되어 되면 응집체는 음파장 내에서 자유 낙하에 의한 파괴가 관측되었다. 음파장에서의 매연 입자의 응집 과정을 요약하면 첫 번째 단계에서는 초기 생성된 매연 입자들은 음파의 진동으로 인하여 상호 병진 운동을 하고 이로 인한 충돌에 의하여 서로 응집되며, 이 단계는 입자사이의 직접충돌(orthokinetic interaction)에 기인한다. 두 번째 단계는 응집체가 비정형의 판형상으로 성장하고, 비정형의 판형상의 응집체는 회전운동에 의하여 원형판 형상으로 변한 후 시간의 증가에 따라 점점 성장하며 이 단계는 유체역학적 작용(hydrodynamic interaction)에 기인한다. 이후 원형판 형상의 응집체의 질량이 중력의 영향을 무시할 수 없을 정도로 성장하면 응집체는 중력에 의하여 떨어진다. 응집 과정에서 관측된 또 하나의 특이한 현상으로는, 응집체의 생성은 방사판 부근에서 가장 먼저 생성되고, 방사판 주위 그리고 방사판과 방사판 사이의 공간의 순서로 순차적으로 생성되며, 이후 응집부 공간 전체적으로 분포됨을 관측할 수 있었다. 또한 원형판 응집체들 사이의 간격은 반파장의 일정한 간격을 유지하고, 만일 응집체의 이동이 일어날 경우 원형판 응집체는 매우 불안정하게 진동하고, 응집체의 운동은 부드러운 운동이 아니고 한 위치에서 다른 위치로(한 마디에서 다른 마디로) 매우 급격한 움직임이 일어나며, 응집체 사이에 위치하는 응집체가 파괴되어 떨어질 때는 파괴된 큰 입자는 떨어지나, 눈으로 관측될 수 있을 정도의 작은 입자는 가까이 있는 다른 응집체로 급격하게 이동하여 부착된다. 심지어는 작은 입자가 중력방향으로 떨어지다가 중력의 역방향으로 다시 올라와서 다른 응집체에 부착되는 경우도 관측되었으며, 또한 응집체의 파손으로 인하여 생긴 작은 응집체들은 다시 재결합하여 다른 회전 원판을 생성하기도 함을 관찰할 수 있었으며, Fig. 15에 파손된 응집체의 재결합하는 과정을 나타내었다. 결론적으로 응집체들의 거동에 대한 관찰의 결과, 매연의 초기 응집과정에서는 음파에 의한 입자간의 직접 충돌(orthokinetic agglomeration)이 중요한 응집 기구가 되나, 응

집체가 형성되고 응집체의 성장이 일어난 경우에는 진동수와 방사압력, 유체역학적인 거동 등의 이유로 인한 회전 운동, 파손, 재결합 등 응집체의 거동은 매우 다양한 형태로 나타남을 알 수 있다.

4. 결론

초음파 에너지가 매연 입자의 응집에 미치는 영향 및 응집 현상에 대한 실험적인 고찰을 하였으며, 음파에 의한 응집의 특성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 응집부의 체적이 감소할 수록 즉 방사거리가 작을 수록 초음파 에너지에 의한 매연의 응집 효과는 뚜렷하게 나타난다.

(2) 음파에 의한 매연 입자의 응집 효과는 주파수의 영향에 비하여 음파압력의 영향에 더욱 더 민감하게 작용함을 알 수 있었다.

(3) 초음파 장에서의 매연 응집 과정의 관찰 결과, 초기 응집체의 형성은 음파 진동에 의한 입자사이의 직접 충돌에 의하여 나타나나, 이후 응집체의 성장은 유체역학적인 거동, 방사압력 등의 매우 복합적인 요인에 의하여 나타난다.

(4) 응집체는 형상이 구형이 아닌 원형판의 형상으로 성장하고, 병진 및 회전의 복합적인 운동을 수반하며, 약 5-10mm의 거대 응집체로 성장함을 관찰할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Andrade, E. N. D., "The Coagulation of Smoke by Supersonic Vibrations," *Pro. Royal Society*, Vol. 134, 1936, pp. 1111-1115.
- [2] Dianov, D. V., Poldolskii, A. A. and Turubarov, V. L., "Calculation of the Hydrodynamic Interaction of Aerosol Particles on a Sound Field under Ossen Flow Conditions," *Sov. Phys. Acoust.*, Vol. 13, 1968, pp. 314-319.
- [3] Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G. and Gaete-Garretton, L., "An Ultrasonic Transducer for High Power Applications in

- Gases," *Ultrasonics*, Vol. 16, 1978, pp. 267-221.
- [4] Hoffmann, T. L. and Koopmann, G. H., "Visualization of Acoustic Particle Interaction and Agglomeration ; Theory and Experiments," *J. of Acoustic Sci.*, part 1, 1996, pp. 2130-2141.
- [5] Hoffmann, T. L., "An Extended Kernel for Acoustic Agglomeration Simulation Based on the Wake Effect," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, No. 6, 1997, pp. 919-936.
- [6] Mednikow, E. P., "Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols," Translated from Russian, Consultants Bureau, 1965.
- [7] Magill, J., Pickering, S. and Fourcaudot, S., "Ultrasonic Aerosol Agglomeration," *Ultrasonics International Conference Proceedings*, 1989, pp. 244-249.
- [8] Magill, J., Richter, K., Fourcaudot, S. and Barraux, P., "Agglomeration of Aerosol Mixtures in a Sound Field," *Frontier of Nonlinear Acoustics, Proceedings of 12th ISNA*, 1990, pp. 615-620.
- [9] Magill, J., "On the Optimization of Acoustic Cavities for Aerosol Conditioning," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 24, No. 4, 1993, pp. 437-443.
- [10] Stokes, C., "Sonic Agglomeration of Carbon Black Aerosols," *Chemical Eng. Process*, Vol. 46, No. 8, 1950, pp. 423-432.
- [11] Shaw, D. T. and Tu, K. W., "Acoustic Particle Agglomeration Due to Hydrodynamic Interaction Between Monodisperse Aerosols," SUNY at Buffalo, NY, 1979.
- [12] Song, L, Koopmann, G. H. and Hoffmann, T. L., "An Improved Theoretical Model of Acoustic Agglomeration," *Trans. ASME*, Vol. 116, pp. 208-214.
- [13] Tjwary, R. and Reethof, G., "Hydrodynamic Interaction of Spherical Aerosol Particles in a High Intensity Acoustic Field," *J. Sound and Vibration*, Vol. 108, No. 1, 1986, pp. 33-49.