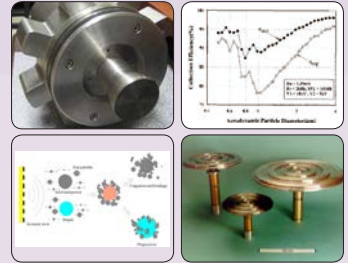


06호

해설이 있는

# 국민기술제안 인사이트

## INSIGHT



음파를 이용한  
미세입자 제어기술 연구동향



미세먼지 문제 해결을 위한  
국가기후환경회의

대통령 직속 자문기구인 국가기후환경회의는 미세먼지 문제해결에 필요한 국민의 아이디어 및 보유기술에 대한 창구 역할을 수행하는 「국민기술제안 자문 플랫폼」을 운영하고 있습니다.

이를 통해 국민의 미세먼지 해결 기술 제안을 적극 청취하고, 전문기관(연구개발, 특허, 인증, 사업화 등)을 통한 기술자문 및 대국민 서비스를 지원해 오고 있습니다.

본 ‘국민기술제안 INSIGHT’는 국민들이 제안한 미세먼지 문제 해결을 위한 기술아이디어 가운데 정책 반영 및 사업화 등이 필요한 아이템을 선별하여 심층적으로 분석하기 위해서 추진된 사업입니다.

앞으로, 다양한 국민들의 아이디어가 기술개발이 이루어지고 현장 적용이 확대되어 미세먼지 없는 푸른 하늘에서 숨쉴 수 있도록 적극 지원하도록 하겠습니다.

• 음파를 이용한 미세입자 제거기술 연구동향 관련 국민기술제안 내용 •

국민기술제안명	제안내용	주요사진
<p>전파 공진현상을 이용한 미세먼지 차단 방안 (19.7, 강*구)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전파 공진현상을 이용한 미세먼지 차단 방안</li> <li>• 수증기와 미세먼지의 공진 주파수 영역의 전파를 수증기와 미세먼지가 공존하고 있는 공간에 방사</li> <li>• 서로간의 공진운동으로 인한 충돌에 의하여 미세먼지와 수증기의 응집체를 형성</li> <li>• 질량이 증가된 응집체의 중력에 의한 낙하로 대기중의 미세먼지 제거 기술 개발</li> </ul>	



## 요약문

미세먼지 저감 및 제어기술은 매우 다양하게 개발되어 있으며, 본 글에서는 그 중에서 잘 알려지지 않은 기술인 음파에너지를 이용한 미세먼지 제어기술의 연구개발 동향에 대하여 소개함.

- ④ 대부분의 미세먼지 제거장치는 먼지의 크기가 클수록 높은 포집성능을 쉽게 기대할 수 있으나, 반면에 초미세먼지 (PM2.5) 등과 같이 크기가 매우 작은 경우에는 포집성능이 급격하게 감소하는 등 포집대상 먼지의 크기는 포집장치의 성능에 매우 민감하게 영향을 미침.
- ④ 미세먼지 포집기술 중 초미세먼지(PM2.5)를 미세먼지(PM10) 영역 또는 그 이상의 크기로 전환시키는 등 먼지의 크기를 증가시켜 포집성능을 높이는 기술도 다양하게 개발되고 있으며, 먼지의 크기를 증가시키는 방법으로 입자응집 기술을 사용함.
- ④ 응집 기술은 정전기 응집, 화학적 응집, 음파응집 등이 있으며, 이 중에서 음파응집은 반응속도가 매우 빠르고, 장치 구성이 단순하며, 대기 공간에 부유하고 있는 미세먼지 저감에 직접 대응 방안이 될 수 있는 잠재적 가능성 등의 특징으로 음파에 의한 미세먼지 제어기술이 새롭게 조명될 수 있을 것으로 사료됨.
- ④ 음파장 내에서 미세 입자의 운동은 1900년대 초부터 밝혀진 사실이며, 이를 대기오염 방지분야에 적용하기 위하여 미국 등에서 1970년대부터 활발하게 연구개발이 이루어졌으나, 실용화를 위한 여러 가지의 문제점들로 인하여 후속 연구들은 활발하게 이루어지지 못하였음.
- ④ 근래에 들어, 중국을 중심으로 음파에너지를 대기오염 방지기술에 적용하기 위한 연구가 비교적 활발하게 이루어지고 있으며, 이는 최근 대기 중의 초미세먼지 농도 저감의 중요성과 무관하지 않을 것으로 사료됨.
- ④ 그러나 음파에너지 활용에 대한 연구는 다양하게 시도되고 있지만, 음파와 미세입자 운동 사이의 상호 작용에 대한 불명확성, 기체 중에서 음파에너지의 소실, 저에너지 소모의 고성능 음파발생장치 설계기술의 부족, 반응장치 설계 최적화 기술 부족 등 실용화 장애요인은 많은 상태이나, 한편으로는 근래의 미세먼지 문제에 대응하기 위하여 새로운 연구개발의 방향이 될 수 있음.

- ④ 특히 개방된 공간에서의 음파응집 기술의 적용사례 등은 근래의 대기 중의 미세먼지 농도 증가로 인한 사회적 문제 해결의 유일한 방안이 될 수도 있는 잠재성을 가지고 있기 때문에, 실용화의 장애요소를 제거하기 위한 다음과 같은 부분에 대한 지속적인 연구개발의 필요성이 있음.
  - 기류의 조건(체류시간, 온도, 습도 등)과 미세입자의 조건(입경분포, 입자특성 등)에 따른 최적의 음파응집장치 설계기술
  - 음파에너지 소실 최소화, 임피던스 변화에 대응 가능한 넓은 주파수 범위, 높은 음압, 낮은 소음 및 소형 콤팩트화가 만족되는 음파발생기 설계기술
  - 다양한 적용처에 대한 Scale Up 기술 및 실증 연구



# CONTENTS

1. 서 론	4
2. 기술의 정의 및 배경	5
3. 연구 동향	9
4. 시사점	25



## 표목차

[표 1] 음파에너지의 대기오염 제어 분야 기술의 정의 및 범위	5
----------------------------------------	---

## 그림목차

<그림 1> orthokinetic collision	7
<그림 2> hydrodynamic collision	7
<그림 3> acoustic streaming	7
<그림 4> 입자직경, 주파수, 연동계수( $\mu_p$ ) 사이의 관계	7
<그림 5> 종자입자(seed particles)에 의한 응집의 촉진	8
<그림 6> 종자입자가 고체입자인 경우와 액적인 경우의 응집체	8
<그림 7> 초창기의 고출력 음파 발생기	10
<그림 8> 초창기의 음파응집기	10
<그림 9> 펜실버니아 대학에서 실험에 사용된 장치 및 응집기	11

<그림 10> 펜실버니아 대학에서 사용한 중고온 가스용 음파응집 장치	11
<그림 11> 원판형 대면적 방사판이 구비된 초음파발생기	12
<그림 13> 음파 응집의 효과로 1마이크론 이하 크기의 입자 포집 효율 상승	13
<그림 14> Semi-Pilot 시스템 구성도 및 음파응집부	14
<그림 15> Langevin 트랜스듀서(좌)와 평면 트랜스듀서(우)	15
<그림 16> 디젤 배기 입자의 음파 응집과 습도의 영향 Pilot System	15
<그림 17> 음압에 따른 수농도 감소(좌) 및 질량 농도 감소(우)	17
<그림 18> 상대 습도와 음압에 따른 플라이 애쉬 제거 효율	19
<그림 19> 습식탈황장치 후단에서의 입자 상태	20
<그림 20> 음파 응집에 의한 저성능 필터를 고성능 필터로 전환 가능	22
<그림 21> 음파(20kHz, 160db) 조사에 의한 매연의 응집 과정	24
<그림 22> 음파응집에 의한 전기집진기의 집진효율 상승	25

# 음파를 이용한 미세입자 제어기술 연구동향

정상현 한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원

미세먼지 저감 및 제어기술은 매우 다양하게 개발되어 있으며, 본 글에서는 그 중에서 잘 알려지지 않은 기술인 음파에너지를 이용한 미세먼지 제어기술의 연구개발동향에 대하여 소개함.

## 1. 서론

- ☑ 대기 중에는 **다양한 경로**[1]를 통하여 발생한 **입자상**[2] 또는 **가스상**[3]의 대기오염 물질이 포함되어 있으며, 이는 인간의 호흡기 건강에 매우 치명적인 영향을 미칠 수 있음.
- ☑ 대기오염물질 중 입자상 물질인 **미세먼지**[4]는 장기간 흡입 시 호흡기 질환 등 인체에 치명적인 질병 유발의 원인이 될 수 있으며, 특히 공기역학적 직경이 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 입자상 물질(PM<sub>2.5</sub>)인 초미세 먼지는 인체 내 기관지 및 폐의 깊은 곳까지 침투하여 암을 유발할 수 있는 위협 요인으로 알려져 있음.
- ☑ 대기 중의 미세먼지 농도 저감을 위하여 “**미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법**[법률 제16303호][5]이 2019년 2월부터 시행되어 자동차 운행제한, 대기오염물질 배출시설 가동 조절, 대기오염방지시설 효율 개선 등 미세먼지 저감 조치를 시행 중임.
- ☑ 거대한 크기의 대기공간을 대상으로 오염된 공기를 직접 정화하는 것은 불가능하고, 또한 만일 가능하다 하더라도 엄청난 규모의 비용이 요구될 것이기 때문에, 산업공정에서 발생한 미세먼지를 배출 전 단계에서 제거 후 청정한 상태로 배출하는 것은 대기오염 방지 측면에서 매우 중요한 문제임은 자명한 일이고, 현재의 **대기오염 방지기술**[6]은 대부분 배출 전 단계에서의 청정화 기술 개발에 치중하고 있으며 매우 다양하게 개발되어 있음.

[1] 자연적 발생: 화산폭발, 황사 등, 인위적 발생 :화학공장, 연소공장 등에 의한 발생.

[2] 입자상 오염물질: 미세먼지, 매연, 검댕이 등.

[3] 가스상 오염물질: 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소 등.

[4] 흡입성 먼지 중에서 공기역학적 직경이 10 $\mu\text{m}$ 이하(PM10)인 미세먼지, 2.5 $\mu\text{m}$  이하(PM 2.5)인 초미세먼지로 구분 됨.

[5] 미세먼지가 국민건강에 미치는 위해를 예방하고 대기환경을 적정하게 관리·보전하여 쾌적한 생활환경을 조성하는 것을 목적으로 하는 특별법[법률 제16303호].

[6] 대기로 배출되는 입자상 오염물질과 가스상 오염물질 제어를 위한 각종 집진장치와 유해가스 처리설비 제어 및 설계기술.



- ☑ 대부분의 미세먼지 제거장치는 먼지의 크기가 클수록 높은 포집성능을 쉽게 기대할 수 있으나, 반면에 초미세먼지 (PM2.5) 등과 같이 크기가 매우 작은 경우에는 포집성능이 급격하게 감소하는 등 포집대상 먼지의 크기는 포집장치의 성능에 매우 민감하게 영향을 미침.
- ☑ 미세먼지 포집기술 중 초미세먼지(PM2.5)를 미세먼지(PM10) 영역 또는 그 이상의 크기로 전환시키는 등 먼지의 크기를 증가시켜 포집성능을 높이는 기술도 다양하게 개발되고 있으며, 먼지의 크기를 증가시키는 방법으로 **입자응집기** 기술을 사용함.
- ☑ 입자응집 기술은 정전기응집, 화학적응집 및 음파응집 등이 있으며, 특히 대기로의 배출 전과 배출 후 단계 모두 적용 가능성이 있는 음파응집 기술은 기존의 기술과는 차별화 될 수 있는 미세먼지 제어 기술임.
- ☑ 음파를 이용한 미세먼지 제어기술은 1900년대 초부터 미세먼지 포집기술의 성능향상을 위하여 적용이 시도되었으나, 에너지 소모, 음파의 안정성 등 기술적 제약으로 인하여 현재까지 실용화 기술로 발전되지는 못하였지만, 근래 중국을 중심으로 실용화를 위한 연구가 시도되고 있음.
- ☑ 본 글에서는 기존의 미세입자 제어기술 중 잘 알려지지 않은 기술인 음파를 이용한 미세입자의 제어기술의 연구개발 동향에 대하여 살펴봄.

## 2. 기술의 정의 및 배경

### 2.1 기술의 정의

- ☑ **음파에너지<sup>[8]</sup>**를 이용하여 유체 속에 포함된 미세입자의 응집, 분리, 파쇄 및 가스상 물질의 제거촉진 등을 위한 단독 또는 복합 기술

[표 1] 음파에너지의 대기오염 제어 분야 기술의 정의 및 범위

적용분야		정의 및 범위
미세입자 제어	응집	- 음파장 내에서 미세입자의 상대운동에 의한 충돌로 입자상 물질의 크기 증가
	분리	- 음파에 의하여 입자에 작용하는 힘이 입자의 운동 궤적을 변경하여 입자를 유체와 분리
가스상 물질 제어	촉진	- 탈황/탈질/CO <sub>2</sub> 포집 등 가스처리 장치의 성능 촉진

[7] 많은 수의 작은 입자가 소수의 큰 플록을 형성하여 큰 입자로 전환되는 공정.

[8] 음파의 전달 시에 같이 전달되는 에너지이며 크기는 음파강도(intensity)로 나타냄.

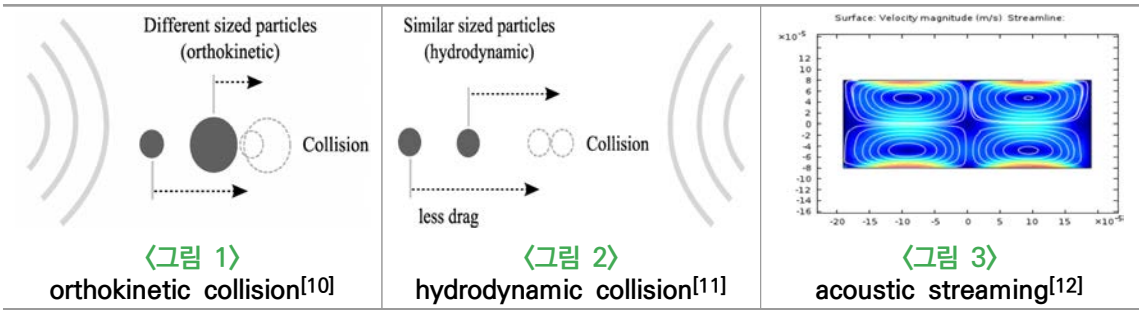
## 2.2 기술의 배경

- ☑ 음파장 내에 존재하는 물체와 음파의 상호작용으로 인한 물리적 현상인 **음향방사력**<sup>[9]</sup>을 미세 입자제어 분야에 응용하기 위한 연구는 1900년대 초부터 진행되어 왔음.
  - 1894년 Rayleigh에 의하여 음파가 조사되고 있는 유체 속에 존재하는 입자에 작용하는 방사 압력(radiation pressure)<sup>1)</sup>의 개념이 최초로 제안된 이후, 음파가 조사되고 있는 이상유체(ideal fluid) 내에 존재하는 강성입자(rigid particle)에 작용하는 힘의 이론적 계산<sup>2)</sup>, 입자의 압축성(compressibility)을 고려한 음향방사압력의 이론적 해석<sup>3)</sup> 등의 연구로 발전되어, 근래에는 음파장 내에 존재하는 다양한 재질과 형태의 입자 운동에 대한 연구로 일반화됨.
  - 1994년 평면진행파 및 평면정지파가 인가되는 점성유체(viscous fluid) 속에 존재하는 구(sphere)에 작용하는 방사압력에 의하여 발생하는 파의 진행방향 및 반대 방향으로 생성되는 입자운동이 Alexander<sup>4)5)</sup>에 의하여 연구되었고, 2012년 Mikkel Settnes<sup>6)</sup>에 의하여 음파장 내에 존재하는 입자의 직경과 입자에 형성되는 음파경계층 두께가 음파의 파장보다 매우 작은 경우에 대한 방사 압력의 이론적 표현이 제시됨.

## 2.3 음파응집의 원리

- ☑ 음파 응집의 기본적인 기작은 orthokinetic collision과 hydrodynamic interaction이며, acoustic streaming 및 난류 등 2차적 효과에 의하여 응집 과정은 촉진됨.<sup>7)</sup>
  - orthokinetic collision : 음파 변위의 진폭과 대략 동일한 크기의 거리 내에 존재하는 서로 다른 크기의 입자들이 진동방향과 평행한 방향의 상대 운동으로 인한 충돌에 의한 응집<sup>8)</sup>
  - hydrodynamic interaction : 음파 변위의 진폭보다 더 큰 거리에서 유사한 크기의 입자가 초기에 서로 분리되어 있는 경우 입자와 주변 매체 사이 점성의 상호작용으로 인한 충돌에 의한 응집
  - acoustic streaming : 음파의 파동이 전파될 때 음향 에너지는 유체에 소실되며, 이 결과 음압의 진폭은 음원으로부터 거리에 따라 감소하고, 유체에는 일정한 운동량 플럭스 생성에 의하여 발생하는 회전유동이며, 이러한 유동은 입자들의 응집을 촉진함.<sup>7)</sup>

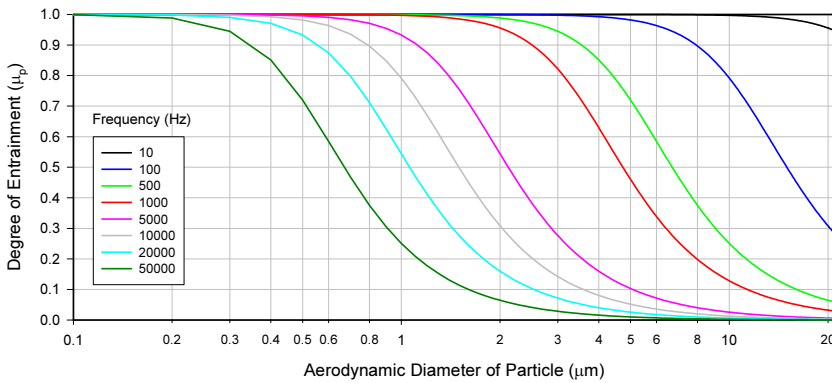
[9] 음파장 내에 물체가 존재할 때 음파의 압력에 의하여 물체에 가해지는 힘.



☑ 음파응집의 대표적인 변수는 음파의 주파수이며, 입자가 음파의 진동과 연동성이 클수록 입자 사이의 상호충돌 가능성이 크며, 이와 같은 연동성은 다음 식과 같은 연동계수 (Entrainment coefficient :  $\mu$ )로 나타내며<sup>8)</sup>,  $\mu=0$ 인 경우에는 음파 진동과 입자 사이의 상대운동이 없음을 나타내고,  $\mu=1$ 인 경우에는 음파의 진동과 입자가 완전히 연동하여 진동함을 의미함.

$$\mu_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi\rho_p r^2 f}{9\eta}\right)^2}}$$

$\rho_p$  : 입자의 밀도 ,  $r$  : 입자의 반지름  
 $f$  : 주파수 ,  $\eta$  : 유체의 점도



<그림 4> 입자직경, 주파수, 연동계수( $\mu_p$ ) 사이의 관계

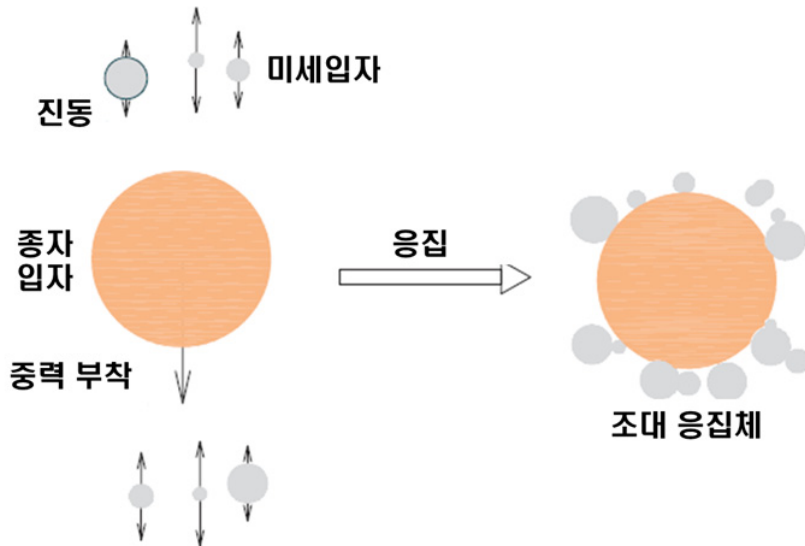
☑ 주파수 외에 음파응집에 영향을 미치는 인자는 음파강도, 음파장에서의 입자의 체류시간, 입자의 입경분포, 입자의 수 농도, 음파의 형태 등 다양하며, 응집을 촉진시키기 위하여 큰 직경의 고체입자 또는 액적 등의 **종자입자(seed particles)**<sup>[13]</sup>를 사용하기도 함.

[10] 그림 출처: 참고문헌 7)

[11] 그림 출처: 참고문헌 7)

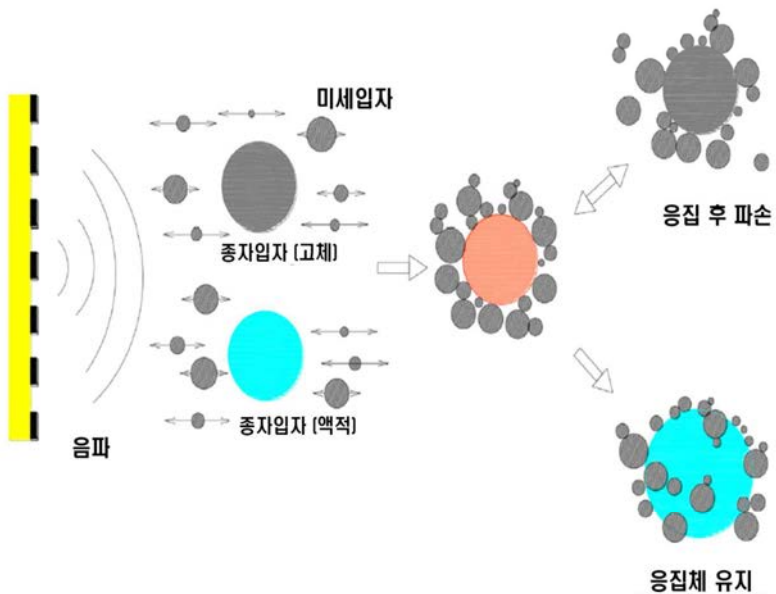
[12] 그림 출처: <https://expdyn.ethzresearch/past-research-projects/baasch.html>

[13] 응축 또는 응집을 촉진시키기 위하여 첨가하여주는 입자 또는 미스트 등이며 응집대상의 입자 직경보다 큰 직경의 입자 사용



음파에 의한 미세입자(fine particles)와 종자입자(seed particles)의 충돌, 종자입자의 중력침강에 의한 미세입자와의 충돌 등에 의하여 응집

〈그림 5〉 종자입자(seed particles)에 의한 응집의 촉진<sup>[14]</sup>



〈그림 6〉 종자입자가 고체입자인 경우와 액적인 경우의 응집체<sup>[15]</sup>

[14] 그림 출처: 참고문헌 34)

[15] 그림 출처: 참고문헌 34)

### 3. 연구 동향

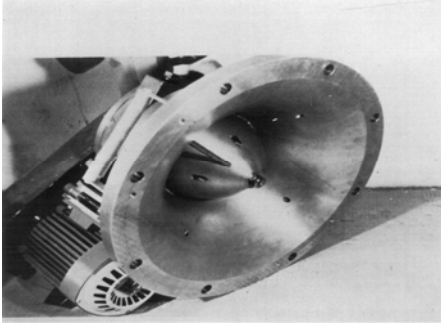
#### 3.1 국외의 연구 사례

- ④ 음파에너지를 대기오염 방지기술에 적용하기 위한 연구는 2000년대 이전의 초창기에 미국, 스페인이 중심이 되어 연구가 활발하게 수행되었으나, 높은 소모에너지, 주파수와 음압 및 저소음 동시 만족의 난이성, 기체 속에서 음파에너지의 손실, 그리고 처리대상 조건에 대한 응집기 설계 최적화 기술 부족 등 여러 가지 장애요인으로 인하여, Pilot급 규모 이상의 실 적용 또는 상용화 사례는 거의 없고 또한 지속적인 후속 연구도 이루어지지 못하였으나, 2000년대 이후 중국에서 비교적 활발히 연구가 재시도되고 있음.
- ④ 음파에너지를 대기오염 방지 분야에 적용하기 위한 대부분 연구의 목적은 배출가스가 대기로 배출되기 전단계에서 미세먼지 포집장치의 성능 증가에 활용하기 위함이었으나, 개방된 공간에서의 미세입자 농도 저감, 안개 제거, 방사능 오염 입자의 제거, 독성 가스 속에 포함된 입자 제거 등 특수한 목적으로의 사용 가능성에 대한 연구 사례도 있음.
- ④ 또한 직접 대기 중에 확산된 미세먼지 제거 목적의 기술로 발전될 가능성이 있어, 현재 심각한 사회문재인 대기 중의 미세먼지 문제 해결의 시발점이 될 수도 있는 잠재적 가능성을 가지고 있기 때문에 지속적인 연구의 필요성은 있음.
- ④ 음파에너지를 대기오염 방지기술에 적용하기 위한 초창기의 연구에서는 음파에너지만 사용하여 미세 입자의 응집이 연구 목적이었으나, 근래에는 seed particles의 사용으로 응집 촉진 등 음파응집 효율 향상을 위한 복합적인 기술의 적용으로 실용화 장애요인을 극복하는 방향의 연구가 주요 내용임.

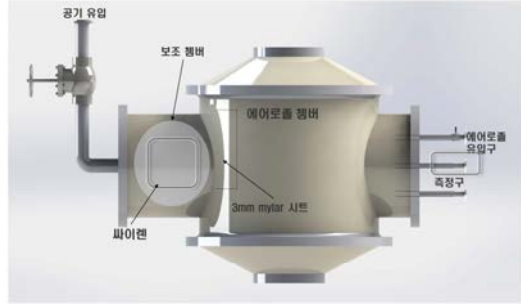
#### ④ 미국

- ④ 음파 응집 현상을 대기오염 방지설비에 접목시키기 위하여 초창기에는 정부의 지원 등 매우 활발한 연구가 수행되었으나 1900년대 후반부터 관련 연구가 감소하는 경향이며, 이는 다른 종류의 대기오염 방지기술의 발전으로 음파에너지를 활용하는 기술 개발에 대한 관심도가 상대적으로 감소하였기 때문인 것으로 사료됨.
- ④ 1950년 수십 kW 출력의 사이렌을 사용하여 최초의 상용 가능한 음파 응집기를 개발하여, 액체입자, 시멘트 플랜트, 개방된 공간에서의 먼지제거, 카본 블랙 및 기타 먼지 등의 응집에 적용하였으나<sup>9)10)</sup>, 그 시대의 환경오염에 대한 인식 부족과 경제성 등으로 인하여 상용화 완성

으로 이어지지는 않았지만 실적용의 경험 및 중요한 연구의 배경을 제공하였음.



〈그림 7〉 초창기의 고풍력 음파 발생기<sup>[16]</sup>



〈그림 8〉 초창기의 음파응집기<sup>[17]</sup>

- ☑ 1970년대 뉴욕주립대학에서 음파응집에 필요한 에너지의 크기에 대한 연구가 수행되어, 160dB 이상의 높은 음압(SPL) 조건에서는 주파수 변화가 응집에 크게 영향을 미치지 않음을 보였고, 이 결과는 800Hz 정도의 가청 주파수에서도 음파 응집기 설계의 가능성을 제시하였음.<sup>11)</sup>
- ☑ 그러나, 1974년 미국 EPA의 지원으로 Braxton Corporation<sup>12)</sup>에서 음압 165dB 주파수 366Hz의 조건으로 음파 응집기의 실용화 연구가 수행되었으나 응집이 이루어지지 않았으며, 그 원인으로 음파의 강도는 충분하였으나 주파수가 너무 낮아 음파에너지가 미세입자의 응집 보다는 분산에 기여한 결과이기 때문이고, 이 결과는 음파응집기의 설계에서 음압과 주파수의 동시 만족은 매우 중요한 사항을 나타냄.
- ☑ 1976년 고정 오염원에서 발생하는 0.1~3.0 $\mu$ m 범위의 입자상 오염물을 대상으로 기존의 포집 장치로 제거가 가능한 크기의 입자 크기로 증가시키기 위한 음파응집 효과의 평가에 관한 연구가 미국의 EPA에서 시도되었으며<sup>13)</sup>, 다음과 같은 결론을 제시하였음.
  - 배출가스 처리장치로 저효율 집진장치(싸이클론 등)를 사용할 경우 음파응집 기술은 소모에 너지의 과다로 인하여 크게 유망하지 않은 것으로 의견 제시함.
  - 그러나, 에너지 소모가 높더라도 포집 성능의 고효율성이 요구되는 경우, 또는 독가스 등에 포함된 미세입자의 제거 등에 적용할 경우에는 매우 유용한 수단이 될 것으로 의견 제시함.

[16] 그림 출처: 참고문헌 11)

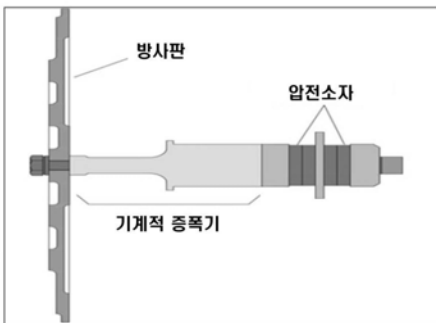
[17] 그림 출처: 참고문헌 11)



## 스페인

음파에너지를 대기오염 방지 기술에 적용하기 위한 연구는 스페인의 국립연구소인 CSIC<sup>[20]</sup>에서 1970년대 후반부터 활발하게 수행되었으며, 음파의 방향성, 주파수 상승 등 기존의 음파 응집장치에서 사용되었던 음파 발생기의 문제점 개선을 위하여, 방향성이 우수하고 효율이 80% 이상이 되는 새로운 형태의 초음파 발생기를 개발하여<sup>16)17)18)</sup> 실용성에 대한 다양한 연구가 수행되었음.

- 음파의 증폭을 위하여 중심으로부터 일정 거리에 보강용 단이 구비된 원판형의 대면적 방사판을 사용하여, 기존의 초음파 혼에 비하여 방사 면적이 크게 증가된 음파 증폭 장치가 구비된 원판형 초음파 발생기를 개발하였음.<sup>16)</sup>
- 또한, 산업용으로 적용을 위하여, 등방성 음파장 생성, 진동 변위 분포의 균일성을 더욱 증가시키고, power 용량을 크게 증가시킬 수 있는 사각 형상의 타타늄 재질 방사판도 개발함.<sup>17)</sup>



〈그림 11〉 원판형 대면적 방사판이 구비된 초음파발생기<sup>[21]</sup>

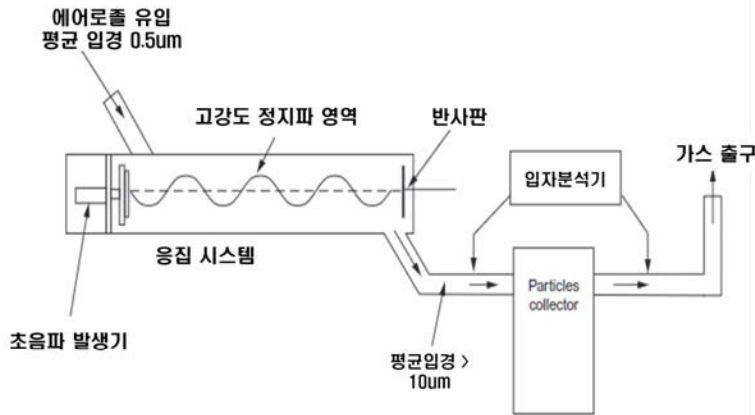
- 또한, 산업용으로 적용을 위하여, 등방성 음파장 생성, 진동 변위 분포의 균일성을 더욱 증가시키고, power 용량을 크게 증가시킬 수 있는 사각 형상의 타타늄 재질 방사판도 개발함.<sup>17)</sup>
- 개발된 원판형 초음파 발생기(주파수 20kHz, 출력 150W, SPL 160dB)가 적용된 음파응집기로 평균입경 1 $\mu$ m인 매연을 응집부 유속 0.73m/s, 질량부하 4-14g/m<sup>3</sup> 조건에서 응집실험 결과 포집 효율 93% 달성되는 결과를 보임.<sup>18)</sup>
- 0.73m/s의 유속 조건에서 반응기 출구에서의 입자의 평균 입경은 초기직경 0.6 $\mu$ m에서 음파를 인가한 경우 9.6 $\mu$ m로 크게 증가하였음을 제시하였음.

[20] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (스페인국립 연구위원회)

[21] 그림 출처: 참고문헌 16)



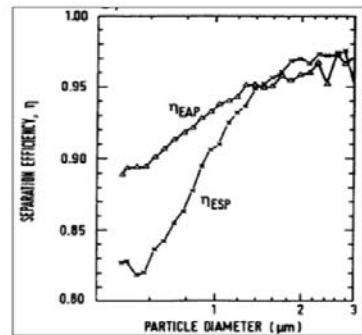
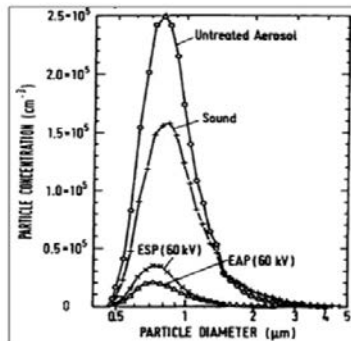
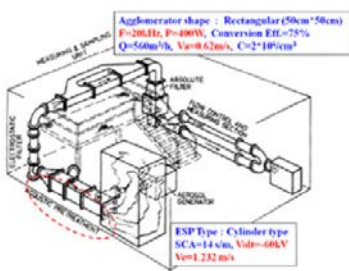
- 사용된 소비동력은 1.5kW/1000m<sup>3</sup>의 저에너지로 기존 집진기의 전처리 장치로 활용 가능성을 제시하였음.<sup>18)</sup>



〈그림 12〉 원판형 대면적 방사판을 사용한 음파 응집기가 설치된 집진장치<sup>[22]</sup>

- ☑ 1992년 CSIC에서 평균 입경 0.8μm, 표준편차 1.4인 정규 분포를 가지는 먼지 입자를 대상으로 Pilot 규모의 음파 전기집진기 성능실험이 수행됨.<sup>19)</sup>
  - 운전조건 : 150~1500m<sup>3</sup>/hr, 응집부 유속 0.17-1.7%, 전기집진부 유속 0.33-3.3 m/s
  - 음파발생기 : 주파수 21kHz, 전환율 75%, 출력 400W
  - 집진효율 : 0.8μm의 입자에 대하여 당초 포집효율 87%이었으나, 음파응집부 운전 시 집진효율 92%로 증가

J. Margill [1992] : Acousto-Electrostatic Precipitator

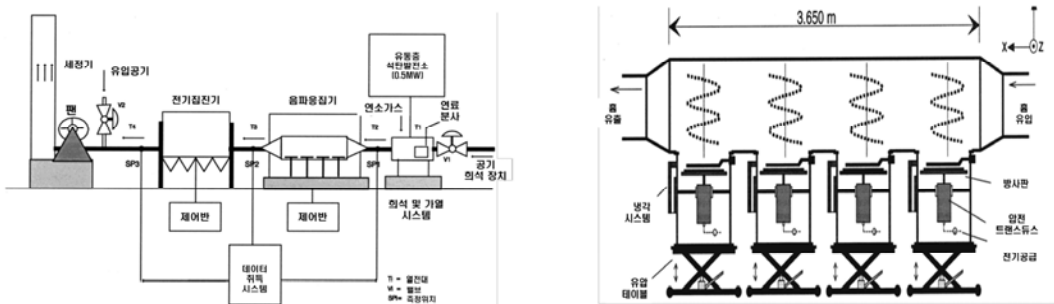


〈그림 13〉 음파 응집의 효과로 1마이크론 이하 크기의 입자 포집 효율 상승<sup>[23]</sup>

[22] 그림 출처: 참고문헌 18)

[23] 그림 출처: 참고문헌 19)

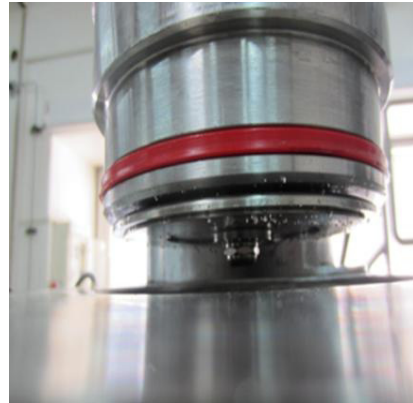
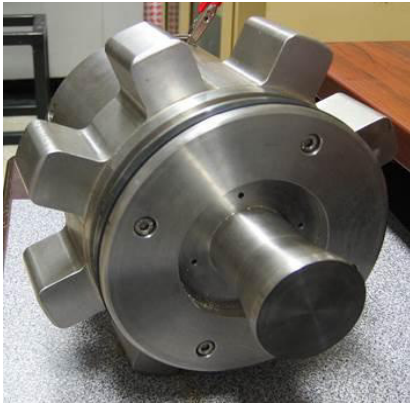
- ✔ 1999년 CSIC에서 석탄 연소가스의 배출입자 감소에 음파에너지의 적용을 위하여 유동층 석탄 연소장치, 직사각형 단면을 가진 음파응집 챔버, 4개의 10kHz 및 20 kHz의 고풍력 음파 트랜스듀서 및 전기집진기(ESP)로 구성된 처리유량 2000CMH, 가스온도 150°C, 입자 질량농도 범위 1~5g/m<sup>3</sup> 규모의 음파 집진장치의 semi-pilot 플랜트에서의 실험적 연구가 수행됨.<sup>20)</sup>
  - 음파 집진은 광범위하게 연구되어왔지만 적절한 고강도, 고효율 음파 발생기 및 full scale의 응집 챔버 설계기술 및 경제성 등의 이유로 산업 공정으로의 적용이 미진하였는데, 미세 입자의 제어가 필요한 모든 산업 공정에 적용될 수 있는 새로운 음파집진 시스템을 제시함.
  - 사이클론, 백하우스 또는 세라믹 필터와 같은 다른 집진 시스템에도 적용이 가능하고 석탄 가스화 공정 등의 고온, 고압 환경에도 적용 가능하여, 대용량의 음파 응집 시스템의 응용에 대한 매우 긍정적인 전망을 제시함.



〈그림 14〉 Semi-Pilot 시스템 구성도 및 음파응집부<sup>[24]</sup>

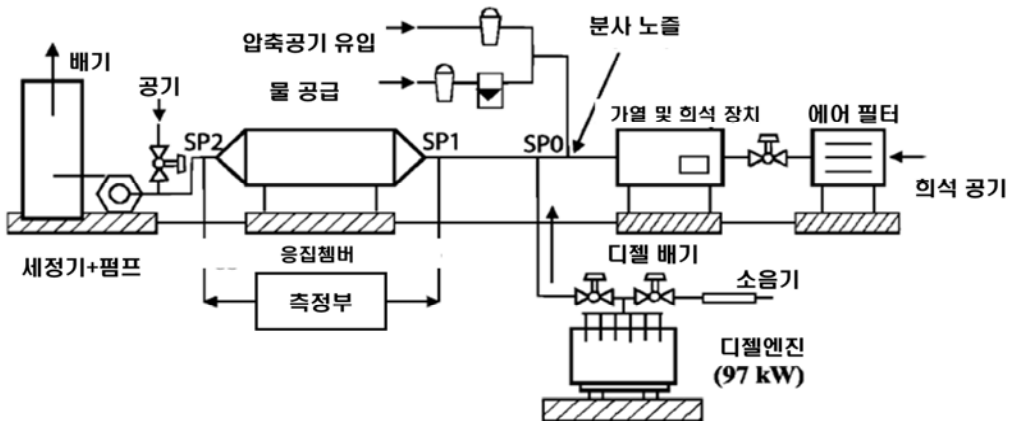
- ✔ 스페인의 CSIC와 초음파 응용 전문회사인 Pusonics에서 2015년 원자력 발전소 사고 대응을 위하여 낮은 음향 임피던스 및 높은 음향 흡수를 특징으로 하는 초음파 트랜스듀서를 개발하여 파일럿 플랜트 규모의 음파응집 시스템을 제시함.<sup>21)</sup>

[24] 그림 출처: 참고문헌 20)



〈그림 15〉 Langevin 트랜스듀서(좌)와 평면 트랜스듀서(우)<sup>[25]</sup>

- ☑ 2003년 스페인의 CSIC에서 21kHz의 초음파를 이용하여 나노미터 크기 범위의 디젤 배기 입자의 음파 응집 시 습도의 영향에 대하여 파일럿 규모의 플랜트를 대상으로 실험적 연구를 수행하였음.<sup>[22]</sup>
  - 응집 챔버는 900Nm<sup>3</sup>/h의 유량으로 4개의 고출력 스텝형 플레이트 트랜스 듀서의 선형 배열에 의해 21kHz, 151dB의 정지파를 형성하여 챔버 출구에서 입자의 수 농도 감소는 최대 25% 정도로 나타났으나, 챔버 유입구 전단에서 물 분사에 의해 유입가스의 습도를 0.06%로 증가시켜 챔버 출구에서의 입자 수 농도를 최대 56%까지 감소시켰으며, 습도가 응집 속도를 크게 향상시킬 수 있음을 보고하였음.



〈그림 16〉 디젤 배기 입자의 음파 응집과 습도의 영향 Pilot System<sup>[26]</sup>

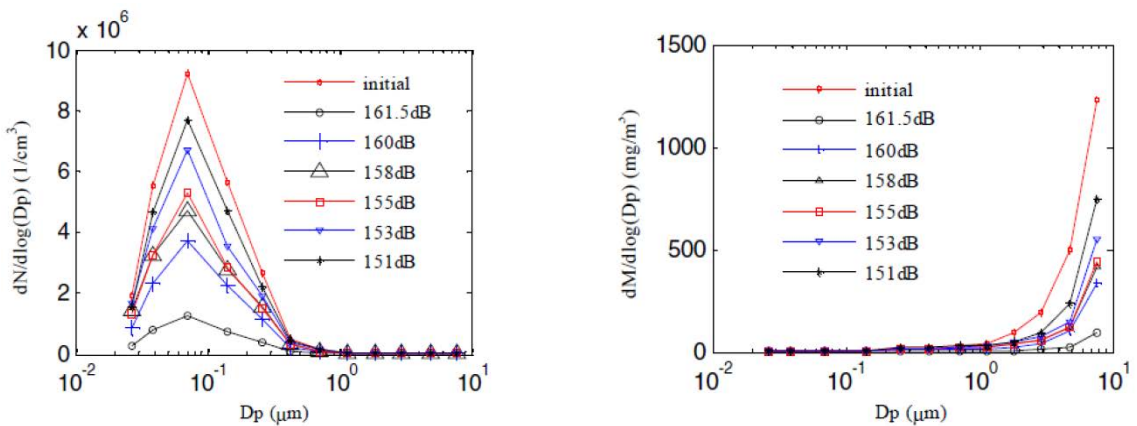
[25] 그림 출처: 참고문헌 21)

[26] 그림 출처: 참고문헌 22)

- ④ 1989년 스페인의 CSIC에서 방사성물질 또는 독성물질의 공기확산에 대응하기 위하여 음파 에너지의 사용 가능성에 대한 연구가 수행되었음.<sup>23)</sup>
  - 특정 직경(수 밀리미터) 보다 크게 응집되면 더 이상 음향 스트리밍으로 인한 챔버의 공기 순환에 참여하지 않지만, 음향 방사 압력의 작용하에 압력 노드에서 볼륨 전체에 걸쳐 부양 되고, 음파 조사를 정지시키면 응집체는 중력침강되었으며, 이 점은 대기 중에 방출된 미세 입자상 물질의 제거 가능성을 제시하였음.
  - 실외의 공기 중에 부유되어 있는 미세 입자상 물질 제거를 위하여 seed nuclei를 제거대상의 미세입자에 분사시켜 대기정화 센터 역할을 하는 방안을 제안함.
  - Power 28kW, 주파수 1kHz 및 SPL 140dB의 음원으로 1.6분 동안에 280m<sup>2</sup> 영역을 정화할 수 있음을 예측하였으며, 음파 응집을 대기정화에 직접 적용할 수 있는 아이디어를 제시함.
- ④ 2016년 스페인의 CSIC 공동으로 원자력 발전소의 방사성 에어로졸 배출완화 시스템인 여과 배기 설비의 효율 증가 목적으로, 여과제에 유입되는 방사능 입자의 전처리를 위한 고강도 초음파 시스템의 적용 가능성에 관한 실험적 연구와 예측 시뮬레이션이 수행됨.<sup>24)</sup>
  - 직경 0.3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m 및 2.5 $\mu$ m의 SiO<sub>2</sub> 입자 및 다분산 TiO<sub>2</sub> 입자를 시험 입자로 사용하여, 21kHz의 초음파를 사용한 음파응집에 의하여 입자의 수 농도를 91%까지 감소시키는 등 여과재로 유입되는 입자의 농도부하 감소에 의하여 방사능 유출 등의 사고 대응 기술로의 사용 가능성을 제시함.

**중국**

- ☑ 2000년대부터 중국 Zeh Jiang University를 중심으로 응집성능 개선 효과를 위한 Seed particle의 첨가 등 음파응집 관련하여 활발한 연구가 수행되고 있고, 최근에 출판되는 대부분의 관련 논문들도 중국에서 연구된 것으로, 이는 중국의 미세먼지(초미세먼지) 문제 해결을 위한 연구 개발과 무관하지 않을 것으로 생각됨.
- ☑ 2008년 중국의 Zeh Jiang University에서 주파수 범위 180-5500Hz, 출력 80W의 진행파를 사용하여 석탄화력 발전소에서 배출되는 비산재의 음파응집 연구를 수행함.<sup>25)</sup>
  - 실험은 응집기 체류시간 3~7초, 음압 130-150dB, 소모동력 3-8W의 조건으로 상온에서 수행되었음.
  - 실험의 결과 응집된 입자는 직경 10 $\mu$ m 이상으로 증가하였으며, 음압 147dB, 주파수 1400Hz에서 약 68.4%의 수 농도 감소 결과를 보였음.
  - 각각의 입경에 따른 응집의 최적 주파수가 존재하고, 최적 주파수 보다 낮거나 높으면 응집 효능이 급격하게 감소함을 보였으며, 효율적인 응집을 위하여 SPL 140dB 이상의 음파강도 조건을 제시함.
  - 음파 응집에 의한 미세입자의 수 농도는 응집기 내의 체류 시간의 증가에 따라 선형적인 감소를 보였으며, 초기 입자농도가 높을수록 응집 성능은 증가하는 결과를 제시함.



**<그림 17> 음압에 따른 수농도 감소(좌) 및 질량 농도 감소(우)<sup>[27]</sup>**

[27] 그림 출처: 참고문헌 26)

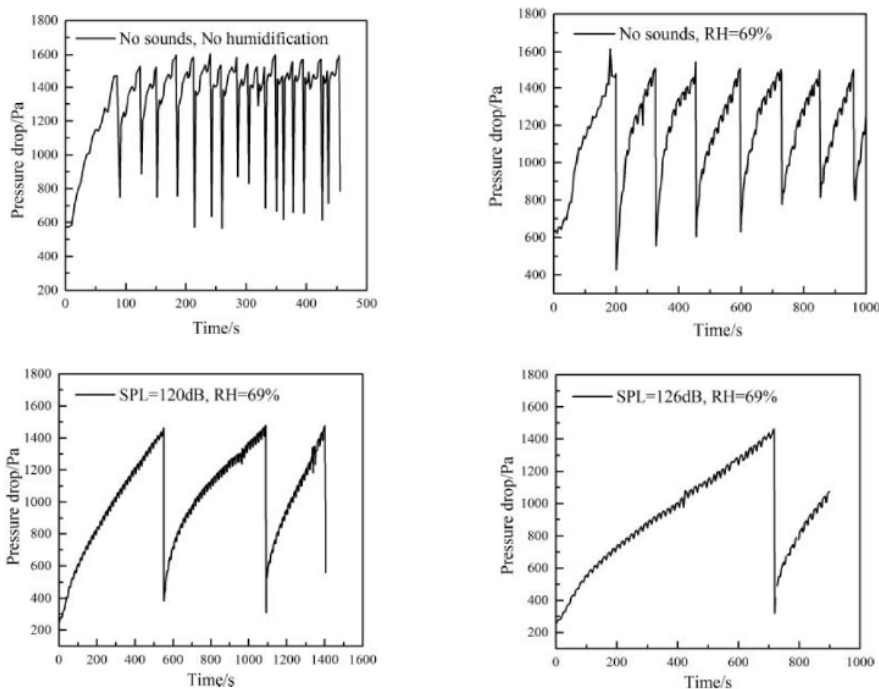
- ④ 2010년 Hunan 전력회사에서 평균 직경이 0.07 $\mu$ m인 미세한 크기의 유동층 석탄 연소기에서 배출되는 입자를 대상으로, 주파수 1000Hz, 음압 161.5dB의 조건에서 음파응집을 시킨 결과, 입자의 수 농도 감소가 85.2%, 질량 농도 감소는 92.5%로 극미세한 크기의 배출입자에 대하여도 음파응집의 적용 가능성을 제시함.<sup>26)</sup>
- ④ 2015년 중국의 국방과학기술대학에서 음파에 의한 미세입자 제거효율과 에너지 소모 사이의 상반되는 관계를 해결하기 위하여, 음파 공명을 사용한 고효율 및 저에너지화 시스템 개발 연구가 수행되었음.<sup>27)</sup>
  - 주파수 500Hz~2kHz, SPL 145dB~165dB 범위의 고강도 정재파가 형성된 단면이 급변하는 튜브형 응집 챔버를 사용함.
  - 에너지 소모보다 포집 성능의 고효율성이 요구되는 경우 또는 독가스 등에 포함된 미세입자의 제거 등에 적용은 매우 유용한 수단이 될 것으로 의견 제시함.
- ④ 2015년 중국의 Zeh Jiang University에서는 진행파의 방사력을 이용하여 전기집진기 내부에서 입자궤적의 변경에 의한 포집성능 증가효과에 대한 연구가 수행되었음.<sup>28)</sup>
  - 음파로 인하여 전기집진기 내부의 전류 전압 특성 변화는 없지만, 음파에너지로 인한 입자의 궤적 변화에 의하여 집진효율이 상승 가능성을 입증하였음.
  - 전기집진과 음파응집의 시너지 효과를 나타내는 최적의 주파수와 음압(SPL)이 존재하며, 인가전압이 증가할수록 최적 주파수는 증가하는 반면에 최적의 음압(SPL)은 감소하는 결과를 보임.
- ④ 2015년 중국 Zeh Jiang University대에서 기존의 집진기에서 PM2.5 제거 효율이 낮은 점을 보완하는 방안으로 진행파를 사용한 음파응집 기술의 적용에 대한 연구가 수행되었음.<sup>29)</sup>
  - 유동 방향과 동일한 방향으로 진행파가 조사되며 체류시간 약 4초인 수직형 음파응집기를 사용하였으며, 동 조건에서 최적 주파수가 1400Hz 임을 제안하였고, 음파응집의 성능은 음압과 선형적 관계가 있음을 보임.
  - 응집대상 미세입자의 초기 수 농도가 높을수록 응집 효과를 증가시킬 수 있으나, 초기 농도가 높아짐에 따라 응집 효과의 증가속도는 감소함을 보임.
- ④ 2016년 중국의 제3해양연구소에서 음파응집과 증기응축의 결합 효과를 사용하는 새로운 전처리 공정을 제시하여, 미세입자 크기의 증가 및 제거 효과에 대한 연구가 수행되어 다음과 같은 결과를 제시하였음.<sup>30)</sup>
  - 음압 150dB의 조건에서 음파만 적용된 경우에 미세입자 제거효율이 약 10-23%로 나타났

으나, 동일한 음파조건에서 과포화도가 1.2 상태인 증기 분사가 복합된 경우에 제거효율은 최대 53-80%로 크게 개선되었고, 130dB의 낮은 음압에서도 과포화도 1.2인 경우 제거 효율이 63%로 증가되었음.

- 이 점은 음파응집과 증기응집의 복합 효과에서 증기의 과포화도는 매우 중요한 변수임을 암시하며, 저장도 음파장에서도 음파응집 및 증기 응축성장의 결합 효과를 이용하면 미세입자의 제거효율을 크게 개선시킬 수 있음을 제시함.

☑ 2017년 텐진대학에서 석탄 연소에서 발생하는 비산재를 대상으로, 상대 습도(RH) 69%, 음압 100dB~135dB 범위에서 음파응집과 물 분사에 의한 가습이 플라이 애쉬의 제거 효율, 필터에 포집된 플라이 애쉬 입자층의 압축성 및 필터 탈진 등에 미치는 영향에 대한 실험이 수행되었음.<sup>31)</sup>

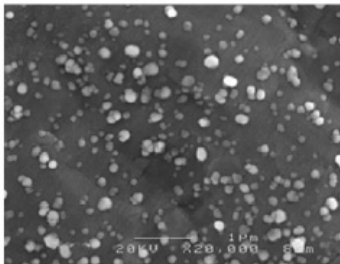
- 적절한 양의 분무 가습 및 음압에 의하여 음파-분무 전처리가 필터의 눈 막힘을 지연시켜 필터의 탈진 주기를 증가시키고, 또한 탈진 후 필터의 잔류저항을 감소시켜 필터 재질의 수명을 증가시킬 수 있음을 제시함.



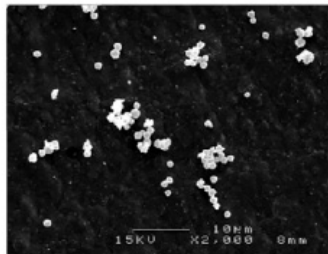
〈그림 18〉 상대 습도와 음압에 따른 플라이 애쉬 제거 효율<sup>[28]</sup>

[28] 그림 출처: 참고문헌 31)

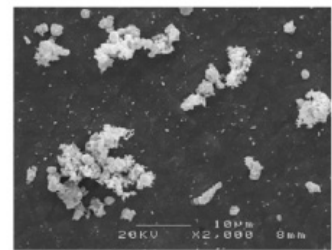
- ☑ 2017년 중국의 후난 대학교에서 대부분의 미세 입자군 (예: 석탄화력 발전소 배출 비산재 등)의 크기 분포는 전형적인 바이모달 구조인 점을 고려하여, 500Hz~2000Hz의 주파수 범위, 음압이 145~165dB 범위의 미세입자 응집챔버를 개발하였음.<sup>32)</sup>
  - 응집챔버는 급격한 단면 변화를 가지는 구조의 정지파 발생 튜브이며, 미세입자 응집에 민감한 주파수인 1000Hz~2000Hz 범위에서 복수의 공진 주파수가 존재하며, 공진 (Resonance)이 발생했을 때 음압이 약 10dB 증가함을 보임.
  - 1100-1300Hz의 주파수 조건에서 음파응집 실험 결과 PM2.5의 질량은 90% 이상 감소하였음.
  - 향후 PM2.5 입자 제거 효과에 대한 실증 테스트를 위하여 석탄화력 발전소의 백 필터에 적용 계획임.
- ☑ 2017년 중국의 제3해양연구소는 과포화 증기응축과 음파 응집의 동시 효과가 습식탈황장치의 미세입자 제거에 대한 효과를 조사하였음.<sup>33)</sup>
  - 습식탈황장치 후단의 가스는 습기가 높고 작은 droplet을 포함하고 있기 때문에 음파응집의 적용에 유리함.
  - 음파응집에 의한 미세먼지 제거에 있어서 과포화 증기는 시너지 효과로 작용함.
  - 음파 응집 단독으로 미세입자 제거가 가능한 음압은 150dB 이상이 되어야 하지만, 습도와 의 복합적인 효과로 130-150dB 정도의 낮은 음압에서도 효과적인 미세입자 제거가 가능함을 입증함.
  - 음파장 및 과포화 증기 응축의 동시 효과는 체류시간의 증가에 따라 증가하지만, 체류시간이 3초 이상인 경우에는 시간에 대하여 제거효율이 일정하게 유지되었음.
  - 낮은 음파강도의 음파발생기를 사용하는 경우에 과포화 증기와 복합적으로 사용하면 미세입자 제거 성능 증가와 소모에너지 감소의 동시 효과를 기대할 수 있음을 제시함.



음파, 습도 작용 전



음파 작용



음파+습도 동시작용 시

〈그림 19〉 습식탈황장치 후단에서의 입자 상태<sup>[29]</sup>

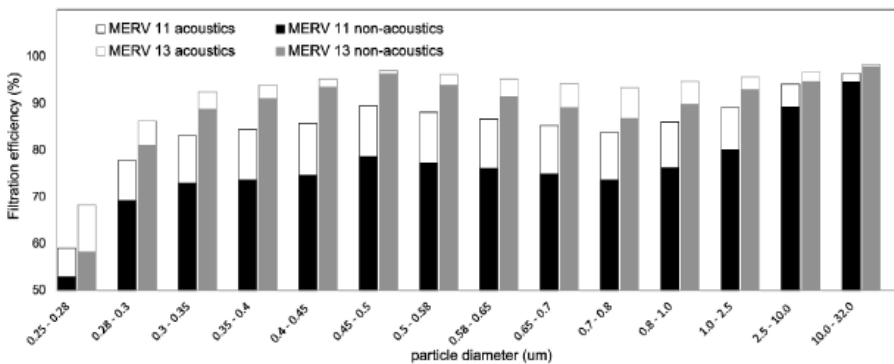
[29] 그림 출처: 참고문헌 33)



- ✔ 2018년 중국의 제3해양연구소에서 액적 또는 고체입자와 같은 종자핵(seed nuclei)이 음파 응집 촉진 효과에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었음.<sup>34)</sup>
  - 음파와 종자핵을 복합한 경우의 미세입자 제거효율은 음파 단독인 경우에 비하여 20% 이상 증가하였으며, 음파와 종자핵의 복합효과는 음파만 사용하였을 경우에 비하여 더 낮은 음압의 조건에서도 제거효율은 증가함을 보임.
  - Nuclei 직경이  $10\mu\text{m}$ 에서  $30\mu\text{m}$ 로 증가하면 미세입자 제거효율은 20%에서 50%로 상승하였지만,  $30\mu\text{m}$  이상일 때는 제거 효율은 더 이상 증가하지 않았음. 즉 미세입자의 제거효율은 Nuclei 직경이 증가할수록 증가하지만, 특정한 한계 직경 이상에서는 더 이상의 효과 상승은 없고 최적의 seed nuclei 직경은  $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 로 나타났음.
  - 입자 제거효율은 제거 대상 입자의 수 농도와 관계가 크며, 낮은 수 농도 조건에서는 droplet을 nuclei로 사용한 경우와 고체입자를 nuclei로 사용한 경우의 제거효율은 비슷하게 나타났지만, 높은 수 농도 조건에서는 droplet을 사용하였을 경우가 고체입자를 사용하는 경우에 비하여 제거효율이 더욱 높게 나타났음.
  - 음파와 seed nuclei의 복합 효과는 낮은 음파강도에서 더욱 크게 기대할 수 있는 방법이며, 음파응집기술의 실용화에 새로운 가능성을 제공함.
- ✔ 2019년 Zeh Jiang University에서 음파장에 노출된 입자의 움직임을 고속 카메라를 사용하여 두 입자의 응집과 분리를 직접 가시화하여 음파응집의 이론적 모델을 구축하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 제시함.<sup>35)</sup>
- ✔ 2020년 Zeh Jiang University에서는 건식 전기집진기의 초미세먼지 포집성능 저하, 습식전기집진기의 경제성 문제 등에 대한 대응 수단으로 음파응집과 펄스코로나 방전의 복합시스템에 대한 연구를 수행함.<sup>36)</sup>
  - 음파와 펄스 코로나가 복합적으로 작용하는 경우에는 단일 효과에 비하여 응집효율이 크게 개선되었으며, SPL이 143dB, 주파수 1.6kHz의 음파조건과 50kV의 펄스 코로나가 작용하는 경우 직경  $4\mu\text{m}$ 의 입자 직경의 수농도 감소율이 91.8%로 매우 높게 나타나 음파 응집에 의한 미세입자의 전처리 효과를 명확하게 입증하였음.

**기타**

- ☑ 2007 폴란드의 Rzeszow 대학에서 공항의 안개 제거에 음파 응집을 적용하기 위한 시뮬레이션을 수행<sup>37)</sup>하여, 음파에 의한 안개 입자의 응집 침강으로 안개 제거와 동시에 안개로부터 물을 수집하는 방안을 제시하였으며, 또한 연구의 결과를 근거로 음파응집 기술이 거대한 규모의 개방된 공간(실외, 대기 등)의 공기 정화에 대한 응용 가능성을 제시함.
- ☑ 2016년 리투아니아의 Vilnius Gediminas Technical University에서는 응집 대상의 입자 직경과 음파응집 주파수 사이의 관계에 대한 실험에서, 1 $\mu$ m 미만 크기의 입자는 초음파 영역의 주파수가 효과적이고, 1 $\mu$ m 이상 크기의 입자는 가청 주파수 영역의 주파수로도 응집이 가능함을 제시하였음.<sup>38)</sup>
- ☑ 2017년 스웨덴의 왕립공과대학에서는 음파의 제어 및 조작의 원활성을 위하여 음향 메타물질을 사용하여, 자동차 디젤매연 저감을 위한 음파에너지 이용을 제시함.<sup>39)</sup>
- ☑ 2017년 싱가포르의 난양기술대학에서는 실내공기 중의 미세먼지 제어를 위하여 사용하는 필터링 시스템에서, 공기의 유동 저항을 증가시키지 않고 미세먼지의 포집 효율을 향상시키기 위한 방안으로 음파응집을 이용한 실험이 수행되어 다음과 같은 결과를 제시하였음.<sup>7)</sup>
  - 필터의 압력손실 증가없이 PM2.5의 포집효율이 최대 10% 향상되었으며, 이 결과는 저성능 필터로 인한 팬전력 절감 효과는 음파응집 시스템의 추가 전력 요구사항을 상쇄할 수 있어, 공조시스템 고성능화에 방안이 될 수 있음을 입증함.
  - 실용화 적용을 위하여 음파장에서의 체류시간 연장, 덕트 내에 인위적 난류 도입, seed nuclei 및 습도의 도입 등 추가적인 방안 사용도 제안함.



**<그림 20> 음파 응집에 의한 저성능 필터를 고성능 필터로 전환 가능<sup>[30]</sup>**

[30] 그림 출처: 참고문헌 7)

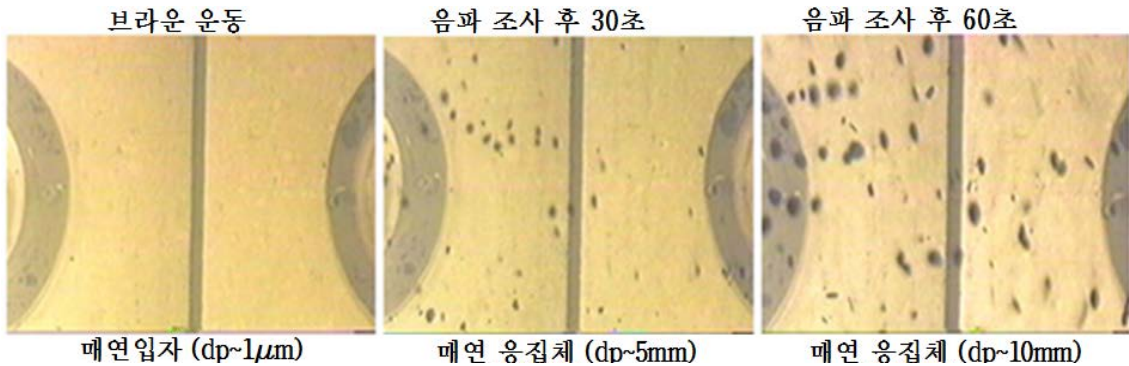
- ☑ 2017년 호주의 아델레이드 대학에서는 중국의 Jiliang University와 공동연구로, 산업체 배출 가스 전처리에 사용되는 음파 응집의 단점인 높은 소모에너지 문제의 개선을 위하여 음파와 액적 분사의 복합적인 효과를 실험하였음.<sup>40)</sup>

  - 물 액적 분사에 의하여 음파응집 효율이 최대 55%까지 개선될 수 있음을 보였음.
  - 음파의 주파수가 미세입자 포집효율에 미치는 영향은 물 액적의 존재 여부에 무관하게 기본적으로 변하지 않으며, 가장 높은 포집 효율에 해당하는 최적 주파수가 존재하나, 주파수가 최적값에서 이탈할 때 물 액적이 없는 경우에는 응집효율이 급격하게 감소하지만, 이에 비하여 물 액적이 있는 경우에는 응집효율의 급격한 감소가 나타나지 않음. 즉, 물 액적의 분사에 의하여 음파 응집의 주파수 밴드 폭을 넓힐 수 있음.
  - 음파 단독으로 사용할 경우 응집효율 50%를 달성하기 위하여 필요한 SPL은 146dB인 반면, 물 액적 분사와 복합적인 경우에는 SPL 140dB에서 응집효율 55%~73%를 달성할 수 있어, 음파응집의 적용 시 소모에너지를 감소시키는 방안이 될 수 있음을 제시함.
- ☑ 2018년 이탈리아의 로마대학에서는 디젤엔진에서 배출되는 에어로졸을 저감시키기 위하여 온도 튜닝이 가능한 음파응집장치를 개발하여 온도가 음파응집에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었음.<sup>41)</sup>

  - 특정 온도(66℃)에서 발생하는 공진은 음압 증가효과가 있으므로, 이와 같은 온도 조절에 의한 응집효과 증대 현상은 고온가스 처리용 음파 응집장치의 설계에 적용 가능성을 제시함.
- ☑ 2018년 스웨덴의 왕립공과대학에서는 트럭 배기관에 장착되어 배출되는 매연을 응집시키기 위하여 사용된 음파 응집장치의 음파 발생부에서 발생하는 노이즈 문제 해결을 위한 측정 및 시뮬레이션을 수행하였으며<sup>42)</sup>, 배기관이 음파 강도를 크게 증가시키는 역할을 할 수 있음을 제시하였고, 이 결과는 저주파수와 높은 음파 강도를 동시에 만족시킬 수 있는 음파발생기의 설계에 응용될 수 있으나, 후속 연구에 대한 보고는 없음.
- ☑ 가장 최근인 2020년 리투아니아의 Vilnius Gediminas Technical University에서 디젤엔진에서 배출되는 매연을 응집하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 응집 시간의 이론적 추정 가능성을 제시하여 음파 응집장치의 설계에 적용 가능성을 제시하였음.<sup>43)</sup>

### 3.2 국내외 연구사례

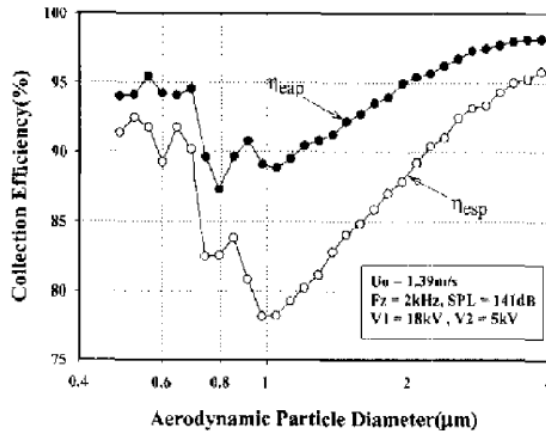
- ☑ 음파에너지를 미세입자 제어 분야에 적용한 국내의 기술개발 사례는 미미하며, 또한 실용화 적용 및 실증 사례 역시 현재까지 전무함.
- ☑ 국내에서는 2003년 한국기계연구원에서는 제한된 공간에서 정지파의 초음파(20kHz, 160db) 인가에 의하여 매연 입자의 응집 및 응집체의 거동에 대한 거시적 관점의 연구가 수행되었음.<sup>44)</sup>
  - 응집부의 체적이 감소할수록 응집효과는 뚜렷하게 나타났으며, 응집은 주파수에 비하여 음파 압력에 더욱 민감하게 영향을 받음.
  - 응집체는 원판형의 형상으로 성장하고 병진 및 회전의 복합적인 운동을 수반하며 응집시간의 증가에 따라 약 5~10mm의 거대 응집체로 성장함이 관찰되었음.



〈그림 21〉 음파(20kHz, 160db) 조사에 의한 매연의 응집 과정<sup>31)</sup>

- ☑ 2003년 한국기계연구원에서 2단전기집진기에 주파수 2kHz, 음압 141dB의 진행파 음파를 전기집진기의 유동 방향으로 조사하여 집진효율 특성에 대한 실험이 수행되었으며<sup>45)</sup>, 음파 응집의 영향으로인한 집진효율의 증가는 집진부의 유속이 증가할 때 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 음파 응집의 효과는 전기집진기의 비집진 면적을 증가시키는 효과로 나타남.

[31] 그림 출처: 참고문헌 44)



〈그림 22〉 음파응집에 의한 전기집진기의 집진효율 상승<sup>[32]</sup>

- ☑ 2019년 한국세라믹기술연구원에서는 음파를 이용하여 미세먼지를 응집시키고, 응집된 미세먼지의 침강에 의하여 미세먼지 농도 감량에 관한 연구가 진행됨.<sup>[46]</sup>
- ☑ 2019년 한국생산기술연구원에서는 20Hz~50Hz의 저주파수의 음파를 사용하여 정지유동 속에서 음파에 의한 미세입자의 응집 실험을 수행함.<sup>[47]</sup>

#### 4. 시사점

미세먼지 저감 및 제어기술은 매우 다양하게 개발되어 있으며, 본 글에서는 그 중에서 잘 알려지지 않은 기술인 음파에너지를 이용한 미세먼지 제어기술의 연구개발 동향에 대하여 살펴보았으며, 다음과 같이 요약됨.

- ☑ 대부분의 미세먼지 제거장치는 먼지의 크기가 클수록 높은 포집성능을 쉽게 기대할 수 있으나, 반면에 초미세먼지(PM2.5) 등과 같이 크기가 매우 작은 경우에는 포집성능이 급격하게 감소하는 등 포집대상 먼지의 크기는 포집장치의 성능에 매우 민감하게 영향을 미침.
- ☑ 미세먼지 포집기술 중 초미세먼지(PM2.5)를 미세먼지(PM10) 영역 또는 그 이상의 크기로 전환시키는 등 먼지의 크기를 증가시켜 포집성능을 높이는 기술도 다양하게 개발되고 있으며, 먼지의 크기를 증가시키는 방법으로 입자응집 기술을 사용함.

[32] 그림 출처: 참고문헌 45)

- ☑ 응집 기술은 정전기 응집, 화학적 응집, 음파응집 등이 있으며, 이 중에서 음파응집은 반응속도가 매우 빠르고, 장치 구성이 단순하며, 대기 공간에 부유하고 있는 미세먼지 저감에 직접 대응 방안이 될 수 있는 잠재적 가능성 등의 특징으로 음파에 의한 미세먼지 제거기술이 새롭게 조명될 수 있을 것으로 사료됨.
- ☑ 음파장 내에서 미세 입자의 운동은 1900년대 초부터 밝혀진 사실이며, 이를 대기오염 방지분야에 적용하기 위하여 미국 등에서 1970년대부터 활발하게 연구개발이 이루어졌으나, 실용화를 위한 여러 가지의 문제점들로 인하여 후속 연구들은 활발하게 이루어지지 못하였음.
- ☑ 근래에 들어, 중국을 중심으로 음파에너지를 대기오염 방지기술에 적용하기 위한 연구가 비교적 활발하게 이루어지고 있으며, 이는 최근 대기 중의 초미세먼지 농도 저감의 중요성과 무관하지 않을 것으로 사료됨.
- ☑ 그러나 음파에너지 활용에 대한 연구는 다양하게 시도되고 있지만, 음파와 미세입자 운동 사이의 상호 작용에 대한 불명확성, 기체 중에서 음파에너지의 소실, 저에너지 소모의 고성능 음파발생장치 설계기술의 부족, 반응장치 설계 최적화 기술 부족 등 실용화 장애요인은 많은 상태이나, 한편으로는 근래의 미세먼지 문제에 대응하기 위하여 새로운 연구개발의 방향이 될 수 있음.
  - 특히 개방된 공간에서의 음파응집 기술의 적용사례 등은 근래의 대기 중의 미세먼지 농도 증가로 인한 사회적 문제 해결의 유일한 방안이 될 수도 있는 잠재성을 가지고 있기 때문에, 실용화의 장애요소를 제거하기 위한 다음과 같은 부분에 대한 지속적인 연구개발의 필요성이 있음.
  - 기류의 조건(체류시간, 온도, 습도 등)과 미세입자의 조건(입경분포, 입자특성 등)에 따른 최적의 음파응집장치 설계기술
  - 음파에너지 소실 최소화, 임피던스 변화에 대응 가능한 넓은 주파수 범위, 높은 음압, 낮은 소음 및 소형 콤팩트화가 만족되는 음파발생기 설계 기술
  - 다양한 적용처에 대한 Scale Up 기술 및 실증 연구.

## 국민기술제안 제언

### ◆ 국민기술제안 주요 내용

- 대기 중의 미세먼지 제거는 거대한 공간의 개념으로 접근하여야 하며, 전파는 거대한 공간에 영향을 줄 수 있고, 또한 물질을 움직이는 에너지가 있다는 점에 착안하여 “전파의 공진을 이용한 미세먼지 차단 방안”에 대하여 제안함.
- 제안기술은 “물 분자와 미세먼지의 공진 주파수 영역의 주파수를 가지는 전파를 해수면에 방사하여 해수면에서 수증기를 발생시키고, 발생된 수증기를 전파 영역 내로 상승시키면, 기류에 의하여 전파 영역 내로 유입된 미세먼지와 수증기의 공진에 의하여 상호 충돌하여 질량이 큰 수증기와 미세먼지의 응집체가 형성되고, 이를 자유 낙하시켜 미세먼지를 제거”한다는 개념임.
- 대기 중에 확산된 미세먼지의 제거가 어려운 이유는 대기 공간의 크기가 너무 거대하기 때문이며, 이와 같은 관점에서 생각하면, 본 제안된 아이디어는 대기 중 미세먼지 제거를 위한 독창적인 아이디어로 볼 수 있음.
- 전파장 내에서 수증기와 미세먼지의 공진운동 발생 유무가 제안기술 실현 가능성의 판단 기준이 될 것이며, 실현 가능성 확인을 위한 관련 기초연구 수행의 필요성 있음

### ◆ 총평 / 전문가 의견

- 본 제안된 아이디어의 현실화를 위하여 다음과 같은 사항들에 대한 선행적인 확인이 필요할 것으로 생각됨.
  - 현재 공기 중에는 수많은 전파가 존재하지만, 전파가 미세먼지 또는 수증기의 거동에 영향을 미친다는 연구 보고가 없는 점에 대한 심층 조사.
  - 해수면에 물 분자의 공진 주파수와 동일한 주파수의 전파를 방사할 때 해수면 아래의 수 생물에 미칠 수 있는 영향에 대한 조사.
  - 사용 예정인 공진주파수(10GHz~100GHz)의 전파가 기존의 활용되고 있는 전파(예 : 통신용 전파 등)에 미치는 영향에 대한 사전 검토.

## 참·고·문·헌·

- 1) Rayleigh, O. RD., The theory of sound, Macmillan London, pp.43-45 (1894).
- 2) King, I. V., On the acoustic radiation pressure on spheres. Proc. R. Soc. Lond, a 147,212-240,(1934).
- 3) Yosioka, Acoustic radiation pressure on a compressible sphere., Acustica 5., 167-173 (1955).
- 4) ALEXANDER A. DOINIKOV, Acoustic radiation pressure on a compressible sphere in a viscous fluid, J. Fluid Mech. (1994), vol. 267, p p . 1-21.
- 5) A. A. Doinikov, Acoustic Radiation Pressure on a Rigid Sphere in a Viscous Fluid, Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 447, No. 1931 (Dec. 8, 1994),pp. 447-466
- 6) Mikkel Settnes and Henrik Bruus, On the forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid, Department of Micro- and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Physical Review E. January 2012
- 7) Bing Feng Ng, Jin Wen Xiong, Man Pun Wan, Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in airconditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems, PLoS ONE 12(6): e0178851 (2017)
- 8) Mednikov EP. Acoustic coagulation and precipitation of aerosols. 1st ed. USA: Springer; 1965
- 9) Neumann. E. P., Soderberg, C. R. and Fowle, A. R., "Design Application, Performance and Limitations of Sonic Type Flocculators and Collect,or, International Committee on Air Pollution, Air Pollution Proc.-U.S. Technical Conference, 388-393, (1950).
- 10) Neumann, E. P. and Norton, T. L., "Application of Sonic Energy to Commercial Aerosol Collection Problems," Chem. Eng. Progr. Symp. Sec. 1, Vol. 47, No. 1, 4.10, (1951).
- 11) Shaw, D. T., Acoustic particle agglomeration due to hydrodynamic interaction between monodisperse aerosols, J. Aerosol Sci. vol 10(1978). pp317-328
- 12) Braxton Corporation, "Sonic Agglomeration," Report to Environmental Protection Agency, Report No. PB234146, 1974.
- 13) Evaluation of Sonic for Fine particle Control, 1978, EPA Report EPA-600/1-76-001
- 14) Volk, Jr., M. and R. Hogg, "Sonic Agglomeration of Aerosol Particles" CAES Report 465-77, The Pennsylvania State University, March 1977.)
- 15) Final Report DOE/MC/16359-1521(DE84004863), The Pennsylvania State University, G. REETHOF, 1984 O.H. McDANIEL
- 16) J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez-Corral and L. Gaete-Garreton, An ultrasonic



- transducer for high power, applications in gases, Ultrasonics. November 1978, 267-271
- 17) J. A. Gallego-Juárez, et. sl., Development of industrial models of high-power stepped-plate sonic and ultrasonic transducers for use in fluids, 2001 IEEE ultrasonics symposium-572
  - 18) Gallego-Juarez, J.A., Riera, E., Rodriguez-Corral, G., 1979. Evaluation of an ultrasonic agglomerator as a preconditioner for the removal of aerosol particles. In: Ultrasonics International'79 Conference Proceedings, Guildford, Surrey. IPC Science Technology Press, Guildford, Surrey, England, pp. 227-232.
  - 19) Characteristics of an electro-acoustic precipitator(eap) J. Magill, PH. Caperan, J.Somers, K.richter, K.Fourcaudot, P.Barraux, P.Lajarge j. aerosol sci., vol. 23, suppl. 1, pp. s803-s806, 1992 0021-8502
  - 20) Gallego-Juarez, et., al, Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants , Environ. Sci. Technol. 1999, 33, 3843-3849
  - 21) E. Rieraa, et., al, Recent advances in the development and application of power plate transducers in dense gas extraction and aerosol agglomeration processes, Physics Procedia 63 (2015) 67-72
  - 22) E. Riera-Franco de Sarabia, et., al. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts, Ultrasonics 41 (2003) 277-281.
  - 23) J. MAGILL, S. PICKERING and S. FOURCAUDOT, ACOUSTIC AEROSOL SCAVENGING, Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Institute for Transuranium Elements, Postjach 2340,D-7500 Karlsruhe I, Fed. Rep. Germany
  - 24) Manuel Aleixandre, et., al, Study about the application of acoustic agglomeration of aerosols for source term mitigation in nuclear accidents, Sonochemistry and Sonoprocessing: Paper ICA2016-59
  - 25) Jianzhong Liu et., al, "Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies", Powder Technology 193 (2009) 20-25
  - 26) Houtao Chen, Wulin Liu, Jingbo Li, Xin Xun, Xianglin Shen, Experimental study on acoustic agglomeration of fine particles from coal combustion, 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation
  - 27) Yun Zhaoa et. al, Acoustic agglomeration of fine particles based on a high intensity acoustical resonator, AIP Conference Proceedings 1685, 060005 (2015).
  - 28) Hao Chen, Zhongyang Luo, Jianping Jiang, Dong Zhou, Mengshi Lu, Mengxiang Fang, Kefa Cen, Effects of simultaneous acoustic and electric fields on removal of fine particles emitted from coal combustion, Powder Technology, Powder Technology 281 (2015) 12-19

- 29) Dong Zhoua, et., al. Preliminary experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fine particles, The 7th World Congress on Particle Technology (WCPT7) 2015
- 30) Jinpei Yan, Liqi Chen, Linjun Yang, Combined effect of acoustic agglomeration and vapor condensation on fine particles removal, Chemical Engineering Journal 290 (2016) 319-327
- 31) Degang Ma, Qiqi Zheng, Weiqiang Lin & Mingyu Guo, Improvements to dust filtration through acoustic agglomeration and atomization, AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY 2017, VOL. 51, NO. 7, 824-832
- 32) Chen-hao SHI, Jian ZHANG, Yun ZHAO, Jie LIANG, Acoustic Agglomeration Process of Fine Particles in a Resonance Structure, Earth and Environmental Science 78 (2017) 012001
- 33) Jinpei Yan, Liqi Chen, Qi Lin , Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation
- 34) Qi Lin, Shuhui Zhao, Liqi Chen, Effect of seed nuclei combined with acoustic field on fine particles removal, Powder Technology 340 (2018) 8-16
- 35) Mengshi Lu, Mengxiang Fang, Mingchun He, Shuxin Liu and Zhongyang Luo, Insights into agglomeration and separation of flyash particles in a sound wave field. RSC Adv., 2019, 9, 5224-5233
- 36) Zhongyang Luo, et., al. The Influences of Acoustic and Pulsed Corona Discharge Coupling Field on Agglomeration of Monodisperse Fine Particles. Appl. Sci. 2020, 10, 1045
- 37) H. Czy, T. Markowski, Acoustic method of airport fog precipitation, ISSN 1648-7788. AVIATION, vol XI, no 3, 2007.
- 38) A. Čereška1, et., al. Investigation of effect of acoustic field to coagulation of particles in air flow, Journal of vibroengineering. May 2016, vol. 18, Issue 3
- 39) Zhe Zhang, Mats Abom, Hans Boden, and Mikael Karlsson, Particle Number Reduction in Automotive Exhausts Using Acoustic Metamaterials , SAE Int. J. Engines / Volume 10, Issue 4 (October 2017)
- 40) Guangxue Zhang, Lili Zhang, JieWang, Eric Hu, Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets., Powder Technology 317 (2017) 181-188
- 41) Zhenghui Qiao1, Wei Dong1,Yaji Huang1, Vincenzo Naso, Effect of temperature tuning on the aerosol acoustic aggregation process, Journal of Environmental Sciences 67 (2018) 161-170
- 42) Experimental analysis of whistle noise in a particle agglomeration pipe., Proceedings of the ASME 2018, Noise Control and Acoustics Division Session.

- 43) Kristina Kilikevičienė, et.,al, Experimental investigation of acoustic agglomeration of diesel engine exhaust particles using new created acoustic chamber, Powder Technology 360 (2020) 421-429
- 44) 정상현외 4인, 미세 매연 입자의 응집을 위한 초음파 장의 적용, 한국연소학회지 8(2), 2003.6, 41-49
- 45) 정상현외 3인, 음파에너지가 전기집진기의 집진효율에 미치는 영향, 한국에너지공학회 2003 제 12 권 제 3호, 207-215
- 46) 엄누시아, 김범성, 이해중, 이효수, 음파를 이용한 미세먼지 저감을 위한 연구, 한국세라믹학회 춘계 학술대회, 2019, G2. 에너지 환경 세라믹스
- 47) 한국생산기술연구원 홈페이지, (<https://www.kitech.re.kr/webzine/view.php?idx=395&m=01>)

---

## 저자소개

### 정상현

한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원  
T. 042-868-7321, shjeong@kimm.re.kr

---

## 기획편집

### 국가기후환경회의

**이동규** 국장(국제과학기술국)

**윤영기** 과장(과학기술협력과)

담당 **오상열** 선임(과학기술협력과) / **김종익** 민간4급(과학기술협력과)

T. 02-6744-0513, kji804@korea.kr

※ 본 자료는 국가기후환경회의([www.ncca.go.kr](http://www.ncca.go.kr))에서 다운로드 가능합니다.

2021-06

미세먼지 기술분야 이슈페이퍼

## 음파를 이용한 미세입자 제어기술 연구동향

발행일 | 2021년 3월

발행처 | 국가기후환경회의  
서울 종로구 새문안로 7 콘코디언빌딩 13층  
T. 02-6744-0500

문 의 | 국가기후환경회의 과학기술협력과

본 보고서의 내용은 연구자 등의 견해이며, 국가기후환경회의의 공식입장과 다를 수 있습니다



미세먼지 문제 해결을 위한  
국가기후환경회의



본 인쇄물은 친환경용지와 공기름 잉크를 사용하여 만들어졌습니다.