초음파-메쉬를 이용한 분진 최소 착화에너지 측정 장치의 개발

최광석 · 정재희* · M. Takeuchi · M. Yamaguma · T. Kodama** · 황명환*****

*국립이바라키대학대학원 이공학연구과 · *국립서울산업대학대학원 안전공학과*

***일본 노동성 산업안전 연구소 물리안전연구부 · ****인천대학교 안전공학과*

1. 서론

과거에는 정전기에 의한 분진 폭발이 사이로 등을 이용해 대량의 분진을 취급하는 기업에서만 발생하는 것으로 인식되어졌다. 그러나, 근래에 와서 정전기에 의한 분진 폭발은 그 취급하는 양에 관계없이 기업의 보편적인 관심의 대상이 되고 있다. 분진 폭발을 방지하기 위한 계획에는 취급 분진의 최소 착화 에너지(Minimum Ignition Energy: 이하 MIE라고 함)측정이 필수적으로 요구되어진다[1]. MIE 측정에는 압축공기를 이용하는 하트먼 튜브 방식이 널리 이용되어지고 있다[2]. 그러나, 그 방식은 비중 및 입경이 큰 분진인 경우 압축공기에 의해 부유한 뒤, 빠르게 침강하기 때문에 방전 전극 주변의 농도가 현저하게 변화할 가능성을 가지고 있다[3]. 또한, 측정기기가 고가이며, 측정에 숙련된 기술 및 장시간 등이 필요하다. 이에, 실험변수의 최소화, 농도의 안정화, 저가이면서 보다 손쉽게 MIE를 측정할 수 있는 초음파-메쉬형 측정 장치를 개발했다. 따라서, 본 연구에서는 신기술을 도입, 응용한 초음파 측정 장치를 사용하여 lyocopodium의 MIE 측정한 후, 기기의 기초 특성 및 적합성에 대해 실험했다.

2. 실험 장치의 개요 및 방법

초음파-메쉬를 이용한 MIE 측정 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 실험 장치는 폭발 용기(방풍용 아크릴), 초음파 발생장치 및 진동자(Ultrasonic Sieve Vibrator, USS-2010, Pillip), 분진 호퍼 및 메쉬(스테인레스), 전극(텅스텐, 라운드형, 2φ)으로 구성했다. 보조 장치로는 고전압 dc 발생장치(R=100kΩ, C=100pf~5000pf), 디지털 오실로스코프(Textronix TDS520), 전류 증폭기(Textronix AM 503), 데이터 분석 컴퓨터(PC)를 사용했다. Figure 2에 분진 호퍼 및 진동 혼의 구조를 나타냈다. 호퍼는 얇은 막의 분진 운을 형성시키도록 하부를 V자에 가까운 형상으로 했다. 이로 인해, 방전 전

극 사이로 분진 운을 3mm정도로 낙하시켜, 분진의 퇴적에 의한 방전특성의 변화를 최소화했다. 초음파(28㎑)에 의한 진동을 전달하기 위해 호퍼하부에 평판 메쉬를 부착했다. 또한, 효율적인 진동 전달을 위해 진동 혼의 다리를 호퍼 하부와 메쉬사이(spacing: 1mm)에 삽입하였으며, 진동 혼의 원형 중앙부(하부: 메쉬)에 원형 판(φ25, 2㎜)을 장착했다. 메쉬 크기와 낙하 분진의 농도는 비례 관계로서, 본 연구에서는 예비실험을 통해 lycopodium의 MIE에 영향을 주는 200 ㎛ 메쉬(Tyler mesh No. 65)를 사용했다. 전류를 최소 0 ㎃~ 최대 230 ㎃(0, 30, 50, 90, 130, 190, 230 ㎃: 총 7구간)로 조절하여 진동의 변화에 따른 분진의 농도 조절 및 안정화가 가능하도록 했다. 호퍼의 1/3정도 분진이 남아있을 때까지 연속 측정이 가능하게 했으며, 착화되지 않은 분진은 재 실험이 가능하도록 용기의 저부를 이중 용기로 설계했다. 또한, 호퍼 및 폭발용기의 하부에 플레임 어레스터를 부착하여 착화된 화염의 전파를 억제하도록 했다. 급격한 폭발로 인한 위험성을 최소화하기 위해 측정장치의 상부에 안전 판넬을 부착했다. 본 실험에 사용한 분진은 IEC규격의 착화 실험용 분진[4]중 독성 및 응집성[5]을 고려하여 lycopodium을 선정했다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 분진을 건조기에 50℃, 24시간 이상 방치한 후, 착화 실험을 행했다. lycopodium의 입경 분포를 마이크로 카메라(CS5330, Surface Finish Microscope, NIH Image)를 사용하여 측정한 결과, 28 ㎛로 나타났다.

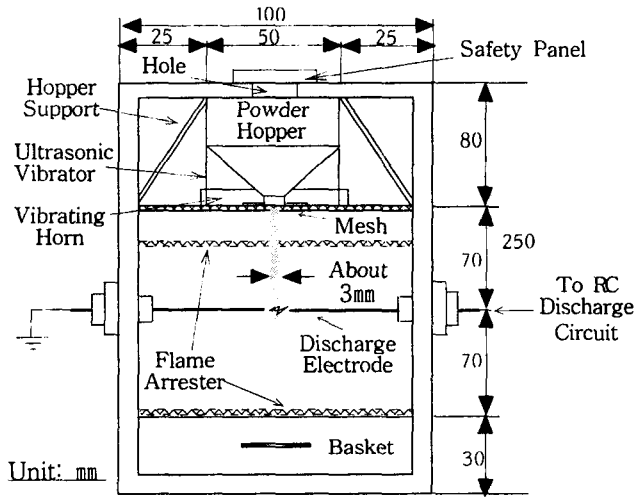

Fig. 1 Prototype new MIE measurement apparatus using ultrasonic-sieve.

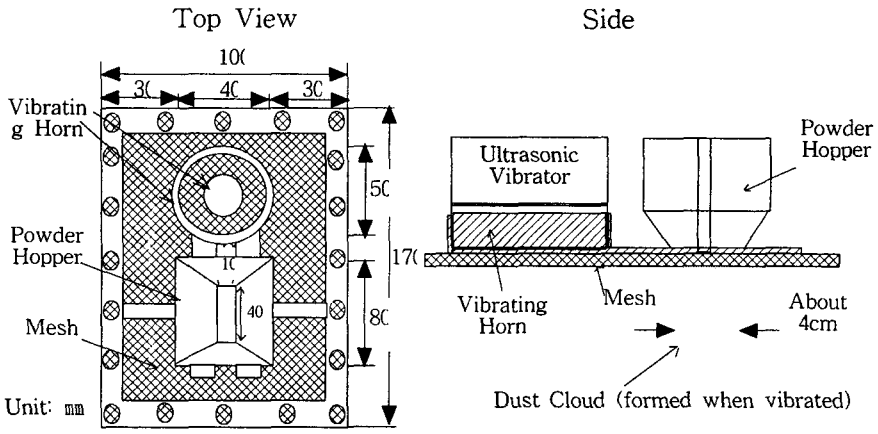

Fig. 2 Structures of the powder hopper and vibrating horn.

신 개발된 측정 장치를 이용한 MIE의 실험방법을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 호퍼와 메쉬 사이에 진동 혼을 삽입하여 일체화한다. 진동 혼 내부에 원형 판을 장착시킨 후, 진동자를 올려놓는다.

(2) 샘플링된 분진 일정량을 분진호퍼에 삽입한다.

(3) 전류를 조절하여 초음파의 진동과 함께 분진의 농도 및 안정도를 확인한다.

(4) 초기 인가전압(V_1) 및 정전용량(C)를 선정한다.

(5) 낙하 분진 운에 정전기 방전을 인가하여 착화를 시도한다.
만약 20회에 이르기까지 점화가 일어나지 않는다면, (3)과(4)를 재 선정, 반복한다.

(6) 최종적으로 데이터 분석용 컴퓨터를 이용해 분진의 MIE를 산출한다.

분진의 착화 유무판정에 있어서는 방전에 의해 착화된 화염이 호퍼 하부의 플레임 어레스터에 도달한 경우를 착화라고 판정하였으며, 동일 에너지 20회 이내에 전술한 상태가 나타나지 않은 경우를 착화가 되지 않았다고 판정했다[6]. 방전에너지 W[mJ]는 방전지속시간의 전류 및 전압 파형을 오실로스코프로 관찰한 후, 식(1)으로부터 구했다.

$$W = \int_0^{\tau} \nu(t) \cdot i(t) dt \text{----------(1)}$$

where ν(t)[V] and i(t)[A] are the voltage and the current of the spark, respectively, and τ[s] is the duration of the spark.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 lycopodium의 착화에너지 및 방전 특성

방전 전극간 거리(Gap: 4mm) 및 기타 실험 조건을 일정하게 유지한 채, 진동자의 전류의 변화(진동강도)와 분진의 착화에너지의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 ●는 착화된 최소방전에너지를, ■는 착화되지 않은 최대의 방전에너지를 의미한다. MIE의 값은 ●와 ■의 사이에 존재함[1]을 알 수 있으며, 그 값은 3~4.88 mJ 사이에 존재했다. 기존 발표된 문헌[3]의 결과와 비교해볼 때 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 전류 130~190 ㎃의 진동강도에서 MIE에 영향을 주는 분진 운이 형성되는 것으로 나타났다.

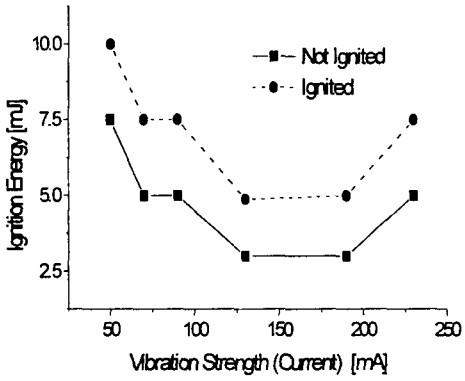

Fig. 5 Relationship between Ignition energy of lycopodium and change of electric current.

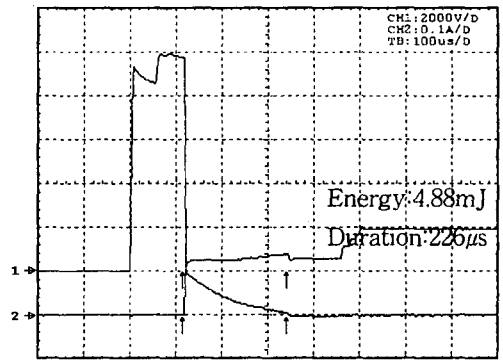

Fig. 6 Wave forms of discharge current and voltage, which influence MIE of lycopodium (100kΩ, 4mm, 1000pF, 10kV).

본 실험에서 lycopodium의 MIE에 영향을 준 방전 전류 및 전압 파형을 Fig. 6에 나타냈다. 전압인가 직후, 불꽃 지연시간이 나타난 후에 주방전이 일어났다. 주 방전의 방전 전류는 개시 직후, 최대치에 도달하여 그 후부터는 지수 함수적으로 감소했다. 또한, 전압 파형은 방전개시 직후에 최저치가 된 후, 시간에 따라 조금씩 상승하여 전류의 종식과 함께 최대치에 달하는 것으로 나타났다. 방전회로에 충전되어진 에너지 Wc[mJ], 식(2)와 방전에 사용되어진 에너지 W[mJ], 식(1)으로부터 충·방전에너지 비 Er[%]를 구하면 식(3)에 의해 9.72 %가 산출된다. 충·방전 에너지 비 Er[%]는 본 실험에 사용한 회로가 RC(R=100kΩ)회로임을 고려하여, 방전지속시간내의 등가저항 Re [kΩ]을 식 (4)에 의해 산출 한 결과, 10.76 kΩ로 대체로 동일한 값을 얻을 수 있었다.

따라서 충·방전 에너지의 비는 회로의 저항에 관련된 방전지속시간내의 등가저항에 의존하는 것으로 사료되며 향후 이에 대한 보완 연구가 필요하다.

$$W_C = \frac{1}{2} C(V_1 - V_2)^2 \text{------(2)}$$

where C[F] is the capacitance of the capacitor, and V_1[V] and V_2[V] are the voltage of the power source before and after sparking, respectively.

$$Er = \frac{W}{Wc} \text{----------(3)}$$

where W[J], Wc[J] are discharge and charge energies, respectively.

$$Re = R \cdot W/(Wc - W) \text{---- -----(4)}$$

where R[Ω] is the resistance of the circuit. W[J], Wc[J] are discharge and charge energies, respectively.

3.2 분진 농도의 추정(평가)

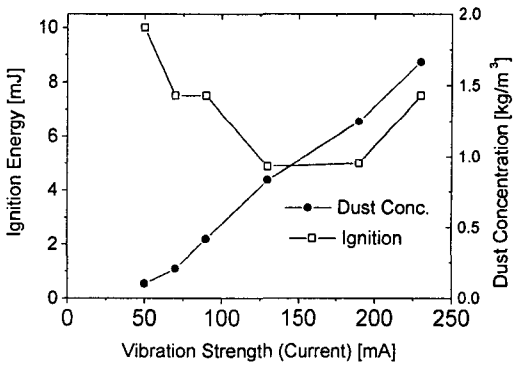

Fig. 3 Dust concentration and MIE of lycopodium with respect to the vibration strength.

진동 강도의 변화에 있어서 분진의 농도와 MIE의 관계를 Fig 6에 나타냈다. 그림에 의하면 초음파의 진동 단계가 증감함에 따라 분진의 농도는 증감하였으며, 본 실험에서의 MIE는 분진 농도 0.833~1.25 kg/m³의 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 분진의 농도계산에 있어서는 분진의 초당 낙하량, 단면적, 낙하속도(Full Color High-Speed Video Camera, 600 Frames/sec)을 고려하여 식(5)에 의해 산출했다. 분진농도 계산의 일례로 전류 130 mA의 진동강도인 경우, 분진의 초당 낙하량 0.04×10^{-3} kg/s, 낙하속도 0.40 m/s, 단면적 0.00012 m²을 측정한 후, 식(5)을 통해 분진의 농도 0.833 kg/m³을 산출했다.

$$C = M/(V \cdot S) \text{----------} (5)$$

where C[kg/㎥] is the dust concentration, M[kg/s] is the weight of powder per second fed from the hopper, V[㎧] is the average velocity of the particles, and S[㎡] is the horizontal cross-sectional area of the dust stream.

4. 결론

초음파의 신기술을 도입한 분진 MIE 측정장치를 사용하여 lycopodium의 MIE를 측정했다. 그 기초적인 장치의 특성 및 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 초음파에 의한 진동을 전달하기 위해 호퍼하부와 평판 메쉬를 일체화했다. 또한, 효율적인 진동 전달을 위해 진동 혼의 다리를 호퍼 하부와 메쉬 사이에 삽입하였다.

(2) 전류를 최소 0 ㎃~최대 230 ㎃로 조절하여 진동의 변화에 따른 분진의 농도 조절 및 안정화가 가능하도록 했다.

(3) 분진 호퍼는 얇은 막의 분진 운을 형성시키도록 하부를 V자에 가까운 형상으로 했다.

(4) 본 실험에서, lycopodium의 MIE는 3~4.88 mJ의 사이에 존재했다(약 0.833~1.25kg/㎥). 이것은 기존 발표된 문헌과 비교해볼 때 대체로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 1999년 학술진흥 재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 장치 개발에 있어서 주식회사 필립(Pillip)의 도움을 받았기에, 여기에 기입하여 감사를 표함.

참고문헌

1) 일본 정전기 학회, "Handbook of Static Electricity", p.159, p170, 1998.
2) BSI Code of practice for Control of Undesirable Static Electricity.
3) M.YAMAGUMA "Effect of Discharge Condition on Measuring Dust Minimum Ignition Energy" NIIS-SRR, 1998.
4) IEC, International Standard 1241-2-3, 1994.
5) K.S CHOI "Effect of the Powder Agglomeration on Vibration MIE Measurement System for Powder", 산업안전학회지 제 14권 3호, pp48-55, 1999.