

운전조건에 따른 전기집진장치의 특성관계 연구

하상안* · 김일배

*독일 Paderborn대학교 공정공학 연구소, 동아대학교 환경공학과

A Study on the Characteristics for Electrostatic Precipitator by Operating Conditions

Sang-An Ha* and Il-Bae Kim

*Verfahrenstechnik Institute of Paderborn University, Germany
Dept. of Environmental Eng., Dong-A University

ABSRTACT

This study was carried out to investigate the loss amount of collection at the different of precipitation time, high voltage and gas speed. This work has focused on the dependence of the collection efficiency in the collector zone with gas speed and high voltage. This advanced Model is developed by research of the different parameter as the conventionnal modem of study. In order to investigate collection efficiency of electrostatic precipitator, the loss amount of knocking was measured with Monitek-Treibung and the particle size was analyzed by He-Ne laser diffraction spectroscopy.

Keyword : Collection efficiency, Loss amount of knocking, Laser diffraction spectroscopy

I. 서 론

도시의 집중과 산업발달에 의하여 매년 증가되는 산업시설, 건설현장, 자동차 매연 등에 의해서 미세입자의 농도가 증가되는 반면, 1999년 이후에는 화력발전소나 산업체에서 배출되는 미세입자 허용기준이 50% 강화될 전망이다.¹⁾ 이에 따라서 입자상 물질을 제어하는 기존의 집진시설은 기술적인 개선과 아울러 이들의 집진장치에 대한 좀더 정확한 인식과 장치에서 실행되어지는 매개변수들을 물리, 화학, 전기적인 원리에 따라서 묘사를 하는 것이 중요하다.

특히 미국이나 선진 유럽에서는 1980년 이후 이미 미세입자를 제거하기 위한 전기집진 장치개발 분야에서 배출되는 가스의 물리적인 특성인 온도, 함수율, 먼지비저항계수의 관계에 따른 전기집진장치의 운전관계와 전기집진 장치의 형태에 따른 가스상 입자물질의 제거 효율관계 등이 연구되었고, 그외 장치내 집진체의 극성구조에 따라서 코로나방전의 발생에 의한 입자 하전관계가 제거효율 증가에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되었다.^{2,4)}

1990년 이후로는 이들 기술개발에 따른 정확한 효율을 측정하기 위한 입자측정기술이 Mie와 Frounhofer^{5,6)}의 레이저 굴절과 분산 이론을 적용한 여러 분석장치들이 개발되어졌고, 아울러 연속적인 운전 상태에서 미세입자는 온라인 분석시스템을 통해서 정확하게 분석되어졌다. 특히 장치의 운전비용을 절감하기 위해서 본 연구에서는 집진장치의 포집구역이 약간 짧은 구간에서 미세입자가 집진되기 위해 코로나방전극을 전형적으로 사용하고 있는 집진체에서 코로나방전이 2단형으로 발생하도록 변형하여 설치되어졌다.

본 연구의 목적은 전형적으로 사용하는 코로나방전극 형태를 변형하여 장치의 운전조건에 따른 효율을 측정하는데 있다. 전기집진기의 효율을 측정하기 위해 사용된 기존의 Deutch모델은 처리가스내의 분진밀도와 이동속도가 균일하고, 분진의 퇴적현상이 동일하다고 가정한 이론적인 효율 추정 방법이다. 이와는 달리 본 연구에 사용된 효율측정 방법은 입자가 포집되지 않고 배출된 입자를 단위시간당 연속적으로 변화되는 농도 값을 이용하여 loss amount

of knocking의 관계를 본 연구에서는 집진손실량에 따라서 실제로 포집효율을 묘사하는 방법이 적용되어졌다. 포집된 입자를 측정하기 위해서 He-Ne 레이저 굴절장치^{5,6)}를 온라인 시스템으로 장치에 연결하여 입자분포경의 변화를 통해서 입자들이 장치에서 포집되는 동안 부착되거나 응집되는 과정을 운전 조건에 따라 측정하고자 한다.

II. 실험 및 장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 공기의 공급은 흡입송풍기(V1)에 의해서 공급되었고, 공기량은 벤튜리관을 이용하여 정확한 량이 측정되었다. 공급되어진 가스의 온도조절은 전기전열기(H1)에 의해서 조절되었고, 이 온도는 온도측정기에 의해서 자동적으로 측정되었다. 전기집진장치의 corona발생과 입자하전을 위한 고전압 발생장치는 난파전류에 직류고전압을 발생시켜 0~100 KV로 가변시켜 공급되었다.

Fig. 1에서 나타낸 바와같이 사용된 집진체의 형태는 전형적으로 사용되는 코로나방전의 발생 형태와 다르게 코로나방전이 2단형으로 설치되었다. 실험의 운전조건은 고전압이 일정한 U=100 kV 조건에서 가스의 공급속도를 1~1.8 m/s 변화하여 포집시간의 증가에 따라서 집진손실량의 관계가 연구되었고, 포집시간 t=140분과 고전압 U=100 kV이 일정한 조건에서 공급되어지는 가스속도에 따라서 집진효율 관계를 실험하였다. 그리고 고전압 발생장치에서 직류고전압을 0~100 kV로 가변시켜 포집시간 t=140분과 가스공급속도 v=1.4 m/s의 일정한 조건에서 집진손실관계 또한 실험되어졌다.

집진과정에서 입자가 집진되는 동안 손실량을 측

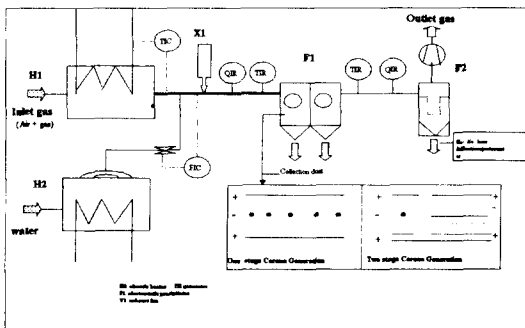


Fig. 1. Schematic diagram of electrostatic precipitator.

정하기 위해서 Monitek-Treubung측정 장치를 사용하여 연속적으로 변화되는 단위시간당 농도변화의 흐름량을 정확하게 측정하여 포집되지 않는 손실량을 계산할 수 있다. 포집부에 포집된 미세입자의 전기대전에 의해서 변화된 과정을 측정하기 하기 위해서 He-Ne 레이저 굴절장치를 온라인 시스템으로 설치하여 입자분포를 통해서 전기적인 특성에 따라서 미세입자가 변화된 과정을 실험하였다.

III. 결과 및 고찰

Knocking현상이란 전기집진 장치에서 입자의 집진을 위해서 전기적인 대전에 따라서 입자운동 방향의 반대되는 힘과 전계내의 대전체에서 발생하는 대전력에 의한 흔들림의 현상을 의미한다. Knocking 현상이 발생하는 동안 입자가 포집극에 떨어진 량을 포집량으로 정의하고^{7,8)} 장치의 출구에서 포집되지 않는 입자량을 loss amount of knocking으로 정의할 수 있다.⁹⁾ 전기집진 과정에서 전기대전에 의해서 발생하는 loss amount of knocking을 측정하기 위해서는 출구의 정화 가스에서 Monitek-Treubung측정장치를 이용해서 정화가스 중에 포함된 입자의 농도가 시간적으로 변화되는 C(t)값을 측정한 후에 이 값을 적분하여 입자의 량의 관계에 따라서 loss amount of knocking m_k 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$m_k = V \int_0^t C(t) dt \quad (1)$$

여기에서 C(t)는 단위시간당 농도의 변화량, V는 전체용적흐름을 의미한다. 설치된 실험장치에서 운전 조건인 집진시간, 고전압, 가스공급속도를 변화시켜 발생되어진 집진손실량을 이들의 loss amount of knocking으로 결과를 고찰하였다.

포집된 입자의 특성을 실험하기 위해서 Fraunhofer 이론을 적용한 He-Ne 레이저 굴절장치를 온라인 시스템으로 입자크기를 측정하여 입자무게분포경을 측정 한 후에 공식 (2)의 관계식에 따라 입자수분포경으로 나타낼 수 있다.^{3,6)}

$$q_3(d) = \frac{d^{-3} q_0(d)}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} d^{-3} q_0(d) dd} \quad (2)$$

여기에서 $q_3(d)$ 는 입자무게누적분포, $q_0(d)$ 는 입자수분포경을 나타낸다. 공식 (2)의 관계에 따라서 측정

된 입자분포경 곡선을 통해서 집진장치내의 입자들이 변화하는 과정을 추정할 수 있다.

1. 집진시간에 따른 변화

집진장치에서 실험이 실행되는 동안 공급된 가스의 물리적인 특성에 따라서 처리가스내의 분진의 입도와 이동속도가 균일하지 못하고, 분진이 퇴적되거나 재비산된다. 집진시간의 변화에 따라서 일반적으로 분진퇴적이 증가 하므로서 loss amount of knocking은 증가하지만, 2단형의 코로나방전 조건에서 시간의 증가에 의해서 큰 영향을 미치지 않았다. 여기서 먼지층의 입자들이 전계형성 시간의 증가에 의해서 집진장치 벽면의 층에서 부착력과 입자층내에서 응집력이 증가되기 때문에 입자들의 축적에도 불구하고 손실량의 변화는 거의 없음을 볼 수 있다.

Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 포집시간의 변화에 따른 포집손실량은 일정하게 발생되었다. 이들의 관

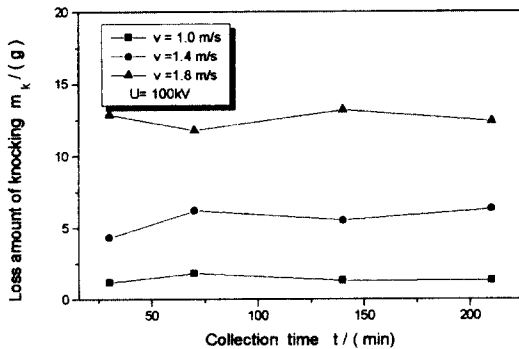


Fig. 2. Variation of loss amount of knocking as a function of precipitation time.

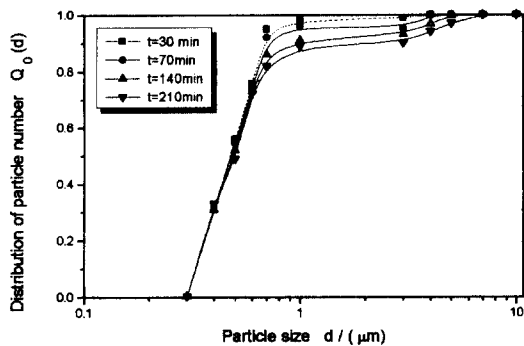


Fig. 3. Variation of distribution of particle number as a function of precipitation time.

계를 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 입자수 분포경에서 보면 집진을 위한 측정시간 30분과 210분과 비교하면 입자크기의 분포 상태변화는 거의 일정하지만, 입자 분포경이 0.4~6 μm범위에서는 집진을 위한 측정시간이 30분보다 210분의 조건에서 입자분포수가 적은 이유는 시간의 증가에 따라서 입자의 축적보다는 전계내의 전계력의 증가에 의해서 입자응집력의 증가에 따라서 입자크기가 증가되어지므로써 입자수가 감소되어 짐을 볼 수 있다.

2. 가스공급속도에 따른 변화

전기집진 장치에서 특히 가스속도는 입자들의 흐름관계에 큰 영향을 미치며, 이 흐름 관계는 가스속도 1~1.8 m/s, 온도는 80°C, 동점도가 $v=21.36 \cdot 10^{-6}$ g/cms의 조건에서 Re수는 13396에서 24112 정도를 가지므로 흐름의 조건은 난류상태를 의미한다.

Fig. 4에서는 다시 포집극에서 포집된 입자 분포도에서 보면 knocking현상은 일정한 가스 공급속도에서 집진시간의 변화에 의해서는 응집된 입자들이 많이 파괴되지 않기 때문에 포집된 입자분포는 거의 일정하다. 가스의 공급속도의 증가에 따라서 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 정화가스속에 포함된 입자량이 증가되므로써, loss amount of knocking는 증가되어진다.

난류상태의 흐름은 가스공간에 소용돌이 현상이 존재하고, 흐름속도의 증가에 의한 가스는 높은 동력학적 에너지를 가지므로써, 이들 입자들은 가스흐름 방향으로 강하게 가속되고, 이 영향에 의해서 집진극의 구간에서 체류시간이 짧게 되고, 입자들은 파쇄되는 현상이 생기므로써, 집진효율에 큰 영향을 미치게 한다.

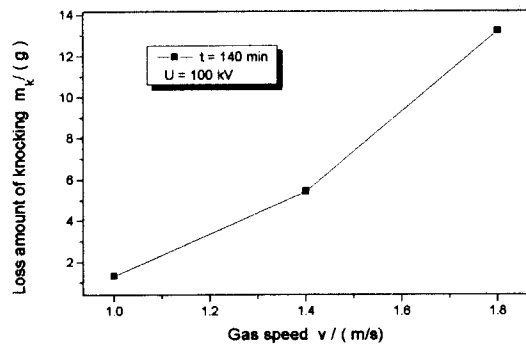


Fig. 4. Variation of loss amount of knocking as a function of gas speed.

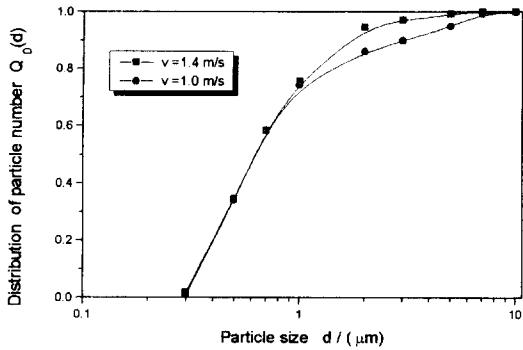


Fig. 5. Variation of distribution of particle number as a function of gas speed.

Fig. 5에서 나타난 입자분포의 측정에서 보면 입자크기가 약 0.65 μm 이상 크기에서는 흐름속도의 증가에 따라서 미세입자수가 강하게 증가 된다. 흐름속도의 증가는 입자자체의 응집작용과 침강현상을 방해하고, 미세입자는 전기 대전에 의해서 집진되지 않고, 전기풍에 의해서 집진 작용에 영향 크게 미치므로써 집진에 요구될 가스의 공급속도는 입자 크기에 따라서 적절한 조절이 필요하다.

3. 고전압에 따른 변화

전기집진기에서 분리된 분진의 충전과 이들의 이동에 필요한 힘의 원동력은 전기(electric field)이기 때문에 전계는 전기집진기에서 가장 중요하다. 집진효율은 이론적으로 분진의 충전과 전기 형성에 따라서 결정된다. Ruckelshausen은 고전압의 증가에 따라서 전계력의 변화로 입자의 움직임은 편향이 발생되고, 응집체의 견고성이 손실되며, 입자층의 전계력에 대립적인 전단응력의 감소로 침강하는 입자 덩어리는 파괴되고, 입자층의 파괴로 포집부의 침강하는 입자의 cloud현상을 방해하고, 집진효율에 큰 영향을 미치므로써 loss amount of knocking은 증가된다고 하였다.¹⁰⁾ 전극사이의 전압을 상승시키면 전압강도와 이온형성은 증가되나, 계속해서 전압이 상승하면 불꽃방전(spark over)이 발생하므로 불꽃방전이 일어나기 직전까지 전압을 올릴 수 있다.^{11,12)} 고전압의 증가는 불꽃방전이 증가하므로 집진극과 방전극 사이의 가스층(gas layer)을 통하여 국소화된 전류의 돌진현상이 발생된다. 따라서 불꽃방전의 횟수가 너무 많아지면 제한되어야 할 분진이 대전되지 않기 때문에 집진효율은 감소된다. 불꽃방전 현상에 의해서 잠시동안 전계내에 전장이 저하되므로서

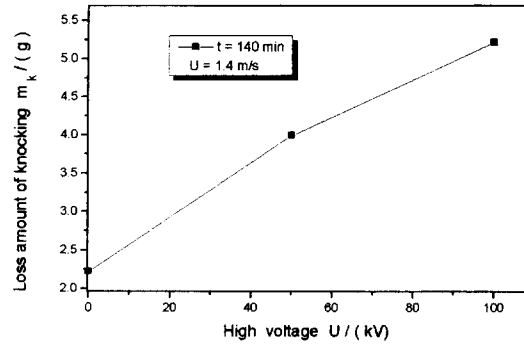


Fig. 6. Variation of loss amount of knocking as a function of high voltage.

Fig. 6에서 나타난 바와 같이 전압의 증가에 따라서 집진효율은 감소되고, 따라서 loss amount of knocking은 증가된다. 본 연구결과에서 보면 전압의 증가에 따라서 loss amount of knocking은 Fig. 6와 같이 증가 되어진다. 고전압의 변화에 따라서 전계력에 대립적인 입자의 분리력인 전단응력에 영향을 미친다. 고전압 $U=0$ kV에서는 입자형체가 포집부에 침강하는데 영향을 미치지 않지만 전계력의 변화, 즉 고전압의 변화에 의해서는 영향을 미치게 된다.

실제적으로 고전압의 변화에 의한 전계의 변화에 따라서 입자분포도를 보면, 전계력이 $U=0$ kV와 $U=100$ kV에서 미세입자 분포가 비슷하지만 $U=50$ kV에서 미세입자 분포가 높은 이유는 $U=100$ kV에서 입자 전체 덩어리의 파괴가 발생되지만, $U=50$ kV에서 입자의 일부 미세 모서리 부분만 쪼개짐으로써, 실제로 Fig. 7에서 측정되어진 바와 같이 미세입자는 고전압을 $U=50$ kV로 공급할 때가 많이 존

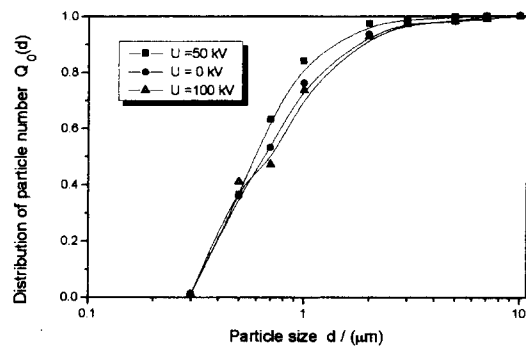


Fig. 7. Variation of distribution of particle number as a function of high voltage.

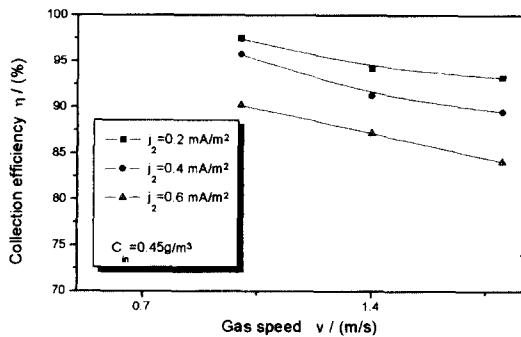


Fig. 8. Variation of collection efficiency as a function of gas speed and flow density of corona discharge A (mA/m^2).

재한다. 이 의미는 loss amount of knocking은 전계의 높이에 따라서 증가 되지만, 실제로 미세입자는 집진 포집부에서 입자경의 분포도는 $U=50$ kV와 $U=100$ kV를 비교했을때 $U=50$ kV의 전계력을 공급할 때가 크며, 입자수의 분포에 따라서 전계내에서 입자가 파괴되는 관계를 정확하게 분석 할 수 있다.

실제로 먼지입자가 하전되는 과정에서 주요한 역할을 하는 전계강도는 집진체의 전극간 평균전계 값으로 측정되는데, 집진기 가동 상태에서 전계형성은 코로나전류에 따라서 변화한다.

본 연구 결과에서 보면 전압의 강도에 따라 발생하는 코로나전류는 전계에 영향을 미치기 때문에 일정한 공급가스 속도에서 corona방전전류는 $0.2\sim 0.4$ mA/m^2 정도에서 입자가 효과적으로 충전되어지기 때문에 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 집진효율이 증가되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전기집진 장치의 운전조건에 따라서 발생하는 입자충전에 따른 입자크기의 변화와 집진손실량을 측정된 결과를 다음과 같이 요약·정리하였다.

1. 집진시간에 따라서 loss amount of knocking은 일정한 가스공급속도 조건에서 큰 영향을 미치지 않으며, 입자분포경 관계의 측정결과에서 보면 입자크기가 0.45 μm 이하 범위에서 집진시간에 따라 변화가 없고, 입자분포경의 그림에서 입자크기가 약 0.65 μm 이상 범위에서 측정시간의 증가에 따라서 입자분포수가 적었다.

이 결과에서 loss amount of knocking은 일정한 이유는 시간의 증가에 따라 장치의 포집구역에서 입자의 축적현상 보다 입자가 포집부로 침강하여 포집되는 량이 우세하기 때문이고, 입자분포경의 결과치에서 210분의 집진시간에서 입자크기가 적게 분포하는 이유는 운전 시작점 보다 일정한 집진시간 동안 본 연구에서 설치된 2단형 코로나방전의 형태가 효과적으로 포집됨을 증명할 수 있다.

2. 가스공급 속도의 증가에 의해서 전계내의 포집구역에서 입자가 체류 할 수 있는 시간이 감소되고, 입자들이 과쇄되는 현상이 증가되므로, loss amount of knocking은 증가되었다. 가스공급의 조건은 전계내의 포집구역에서 흐름속도를 증가시키므로써 입자가 포집할 수 있는 체류시간을 방해하여 입자의 부착력과 응집력을 감소시키므로 집진손실량은 증가되었다. 입자분포경의 결과에서 보면 0.65 μm 이상의 범위에서 속도의 증가에 따라서 높게 분포함을 볼 수 있다.

3. 고전압의 증가에 따라서 전장강도와 이온형성이 증가되나 전압 상승에 의해서 불꽃방전이 크게 발생하므로 가스이온화의 감소로 인한 집진손실량 보다 불꽃방전에 의한 량이 증가하였다. 이 현상에 의해서 전압이 증가하면 loss amount of knocking은 많이 발생 된다. 그 외에도 전압의 증가에 따라서 전계력에 대립적인 전단응력의 감소로 침강하는 입자들의 응집력을 파괴하고, 입자층(cloud)의 파괴현상으로 포집부에 침강하는 입자들이 편향이 발생 함으로써, loss amount of knocking은 증가하였다.

일반적으로 고전압의 증가에 따라서 loss amount of knocking은 증가된다. 50 kV와 100 kV의 조건에서는 입자파괴 현상이 전압을 50 kV로 공급한 조건에서는 입자가 완전히 파괴되지 않고 모서리 부분이 더 많이 파괴 되어졌으며 정화가스내의 입자크기를 측정 한 결과를 보면 입자크기가 0.65 μm 이상에서는 입자분포수가 증가 됨을 볼 수 있다.

4. Deutsch모델에 의한 측정결과에서 보면 일정한 가스성분과 운전조건에서 corona방전 전류의 변화가 0.2 mA/m^2 정도에서 집진효율이 증가되었다.

참고문헌

- 1) 천중국, 박출재: 전정형 여과 집진방식에서 여과특성에 관한 연구. 한국대기 보전 학회, 11(4), 361-367, 1995.
- 2) R. Rennhack: Staubabscheidung im Elektrofilter;

- in Handbuch des Umweltschutzes II-2 10. 5.1
comed Verlag 1987.
- 3) H. J. White: Entstaubung industrieller Gase mit
elektrofilter, VED Dt, Verlag feur Grundstof-
findustrie. Leipzig 1969.
 - 4) S-A Ha: Auswirkung der Abreinigung der Plat-
tenelektoden den Abscheidegrad bei einem elek-
trofilter in zweisstufiger Bauweise. VDI -Fachta-
gung Verfahrenstechnik in Universitaet Pa-
derborn. 1995.
 - 5) F. Loeffler: Staubabscheiden, Georg Thieme Ver-
lag Stuttgart. New York 1-10, 1988.
 - 6) M. Pahl: Vorlesung Mechanische Ver-
fahrenstechnik 1, Universitaet-GH Paderborn
WS. 1992/93.
 - 7) J. Smorchevsky: electrostatic Precipitator Plate
Rapping, An approach to theoretical, combustion
V46 New York. 1975.
 - 8) G. Mayer-schwinnig: chemie-ing.-Tech. Nr. 57,
493-500, 1985.
 - 9) H. Plato: Ueber das Klofen von Nieder-
schlagsplatten im Elektrofilter, Staub-Reinhal-
tung der Luft n. 29, 321-327, 1969.
 - 10) K. Ruckelshausen: Uber die Besetigung von Stau-
bansaetzen auf technisch glatten Oberflaechen
durch Klopfen oder Virieren, Dissertation, Of-
fenbach. 1957.
 - 11) 김종석: 대기오염 제어공학, 1987.
 - 12) C. David cooper: Air Pollution control: A Disign
approach New York, 1994.