

논문 99-8-4-3

수정진동자 미량저울을 이용한 공기 중 먼지의 온라인 측정

최광재, 김영한, 장상목

On-Line Measurement of Solid Particles in Air
Using a Quartz Crystal Microbalance

Kwang Jae Choi, Young Han Kim and Sang Mok Chang

요약문

공기중의 먼지를 수정진동자를 이용한 미량저울을 써서 측정하는 실험을 수행하였다. 측정장치를 컴퓨터에 연결하여 여러개의 센서를 활용함으로써 동시측정이 가능한 장치를 만들었다. 본 연구에서는 실험장치의 구체적인 사항을 자세히 설명하여 비슷한 장치를 이용한 다른 유사한 실험에 활용하는 데 도움을 주고자 하였다. 연구의 결과 본 측정시스템이 공기 중 먼지농도의 연속측정에 적합함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The measurement of solid particles suspended in air is conducted with a quartz crystal microbalance. The measurement system is connected to a personal computer and multiple sensors are utilized to make simultaneous measurement possible. In this paper, the detail of experimental setup is extensively explained for the possible future application of the system in other areas. It is found that the measurement system is suitable for an on-line continuous determination of the concentration of solid particles in air.

1. 서론

공기 중에 있는 먼지는 환경관리 규제의 항목으로 되어 있으나 그 측정에 많은 시간이 소요되고 측정장치의 부피가 클 뿐 만 아니라 측정인력이 많이 필요하여 문제점으로 지적되고 있다. 현재 가장 많이 사용하는 대용량 먼지 측정기의 경우 필터의 무게를 일일이 측정해야하고 24시간 연속적으로 장치를 가동하여야 하기 때문에 장치의 관리에 많은 인력이 소요되는 어려움이 있다.

수정진동자를 이용한 미량저울은 여러 가지 용도로 활용되고 있는데^{1,2)} 우선 나노그램 단위의 극미량의 질량측정에 이용할 수 있고 또 수정진동자의 표면의 미

세한 물성변화의 측정도 가능하여 고분자 물질의 물성 변화의 분석³⁾이나 금속표면의 부식연구⁴⁾에 사용되고 있다. 수정진동자를 이용하여 먼지를 불연속적으로 측정하는 소형장치는 개발되어 있으나 이를 온라인화하여 먼지의 양을 측정하는 것은 아직 알려져 있지 않다. 먼지의 양을 온라인으로 연속적인 측정을 한다면 먼지의 양을 측정하기가 용이하고 측정자료의 입력과 자료처리가 간편한 이점이 있다. 뿐만 아니라 개인용 컴퓨터에 의한 관리가 가능하기 때문에 관리에 필요한 인력을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 수정진동자에 의한 먼지의 측정을 다 채널로 동시에 여러 개의 측정이 가능한 장치를 제작하고 센서에 정지된 먼지의 양을 자동으로 측정하여 연속적인 먼지의 측정이 가능함을 제시하였다.

동아대학교 화학공학과 (Dept. of Chemical Eng., Dong-A Univ.)

<접수일자 : 1999년 1월 20일>

2. 이론

수정진동자의 모양과 진동모형을 그림 1에 나타내었다. 상부의 그림은 수정판에 금속이 증착되고 전극과 연결된 모양을 보여주고 있고 하부의 그림은 진동자에 전기가 가해졌을 때 진동을 일으키는 모형을 보여주고 있다. 이러한 모양의 수정진동자 표면에 먼지가 부착되면 진동이 억제되어 공진주파수가 감소되며 감소된 공진주파수와 부착된 먼지의 무게 사이에는 일정범위 내에서 직선적인 관계가 있다. 이러한 관계를 이용하여 공진주파수의 측정에 의한 먼지의 측정이 가능하여진다.

질량과 공진주파수의 관계는 Sauerbrey⁵⁾에 의해 다음과 같이 발표되었다.

$$\Delta F = \frac{-\Delta m F^2}{(\mu \rho Q)^{1/2} A} \quad (1)$$

여기서 F는 공진주파수, m은 질량, μ는 점도, ρQ는 수정진동자의 밀도 이고 A는 수정진동자의 표면적이다.

표준 수정진동자를 이용하고 수정의 물성을 알면 위 식은 주파수 변화량과 부착물질의 질량 사이에 간단한 관계가 얻어짐을 알 수 있다. 기본 주파수가 5 MHz인 수정진동자의 경우 감도 즉 1 μg 당의 주파수 변화량은 56.6 Hzcm² μg⁻¹ 임¹⁾ 이 알려져 있으므로 본 연구에서는 이 값을 사용하고자 한다.

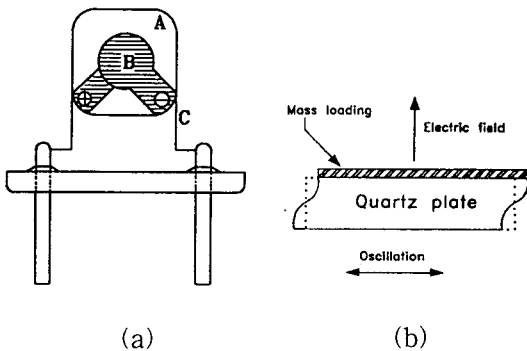


Figure 1. Schematic diagram of AT-cut quartz crystal.
 (a) structure of oscillator, A: quartz plate
 B: metal electrode C: lead wire
 (b) oscillation model of piezoelectric quartz crystal

3. 실험

3.1 수정진동자

실험에 사용한 수정 진동자는 AT-cut 5 MHz 용으로 미국 International Crystal Manufacturing사 제품을 사용하였으며 전극의 직경은 6.81 mm 이고 수정판 위에 100 Å의 크롬과 그 위에 1000 Å의 금을 진착한 것을 사용하였다. 여기서 AT-cut 이라는 말은 수정진동자의 수정판을 만들 때 수정봉을 얇게 깎아 만드는 데 그 깎는 각이 종축에 대해 약 35 도의 각을 갖도록 가공한 것을 말한다.

3.2 실험장치

실험에 사용한 장치의 전체 개략도는 그림 2와 같다. 수정진동자를 먼지포집의 셀내에 설치하고 고전압의 직류전원을 공급한 상태에서 소형 진공펌프로 공기를 흡입하면 공기는 포집셀을 거쳐 유량계를 지나게 된다. 이때 먼지 만 포집셀의 바닥에 설치된 수정진동자의 표면에 모이는 데 모인 먼지가 공기의 흐름에 의해 밖으로 배출되는 것을 방지하기 위해 8,400 볼트의 직류전기를 가하였다. 직류전기는 소형 TV의 브라운관에 사용하는 전원을 사용하여 얻었다. 주파수측정기에 또 하나의 수정진동자가 연결되어 있는 데 이는 측정셀의 주위의 온도변화가 주파수의 변화에 영향을 주는 것을 측정하여 보정하기 위해 설치하였다. 수정진동자의 주파수는 진동자 표면의 온도에 따라 1 °C 에 약 1 Hz 씩 변하므로 온도를 동시에 측정하여 보정을 해 줄 필요가 있으나 온도보정용 수정진동자를 사용함으로써 이를 대체하였다. 온도보정용 수정진동자는 별도의 공수정진동자를 사용하며 온도변화에 따라 주파수가 변하는 것을 측정하여 온도보상을 하도록 하였다. 측정된 주파수는 연속으로 PC로 보내져서 메모리에 저장되고 실험이 끝나면 자료해석에 사용하였다.

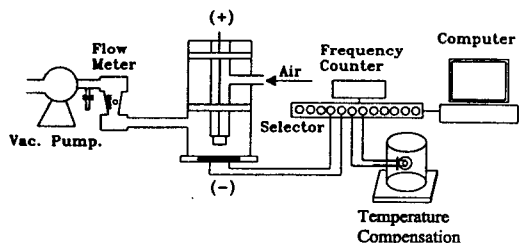


Figure 2. Schematic diagram of experimental setup.

먼지포집셀의 상세한 구조는 그림 3과 같다. 셀에 들어가는 공기가 일정한 경로를 거치면서 먼지가 고압의 전기에 의해 대전이 될 수 있는 구조를 갖고 있다. 셀은 폴리에틸렌의 재질을 가지고 있으며 전기봉은 1.2mm의 스테인레스 철선을 사용하였다. 마이너스 전극판과 수정진동자를 절연하기 위하여 유산지를 사이에 넣고 두 개의 판이 밀착되게 하였다.

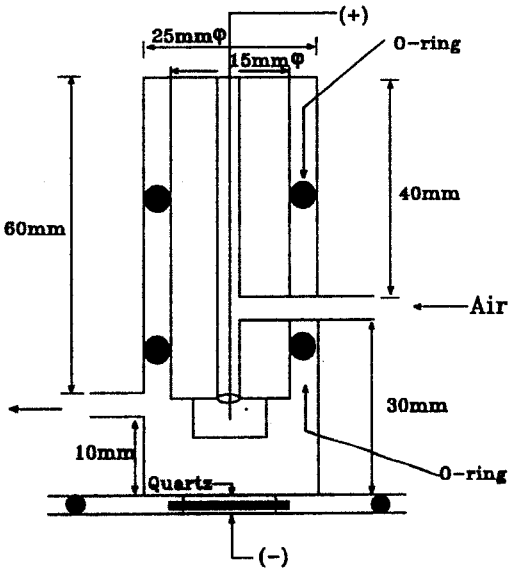


Figure 3. Detail of dust collection cell.

셀구조를 쉽게 설명하기 위하여 입체적 모형을 그림 4에 나타내었다. 셀의 중간으로 들어간 공기는 플러스 전극봉이 있는 가운데 판을 거쳐 수정판을 지난 다음 하부의 출구로 빠져나가게 되어 있다. 위쪽의 검은 테는 O형 고무링으로 공기가 위로 올라가는 것을 막으면서 측면으로 들어온 공기가 가운데 판을 따라 밑으로 내려오도록 하고 밑으로 나온 공기 중의 먼지 만 수정진동자의 표면에 모이고 나머지는 옆으로 빠져 나가도록 되어 있다. 맨 밑의 수정진동자는 음극의 전극판으로 사용되고 그 위에 절연판 그리고 측정용 수정진동자가 맨 위에 설치되어 있는 구조를 보여주고 있다. 맨 밑의 수정진동자는 별도의 수정진동자를 음극의 전극판으로 사용하였다. 공기흡입구의 크기는 먼지의 크기에 비해 대단히 크므로 흡입구의 크기는 측정에 영향을 미치지 않으며 유량만 영향을 미친다.

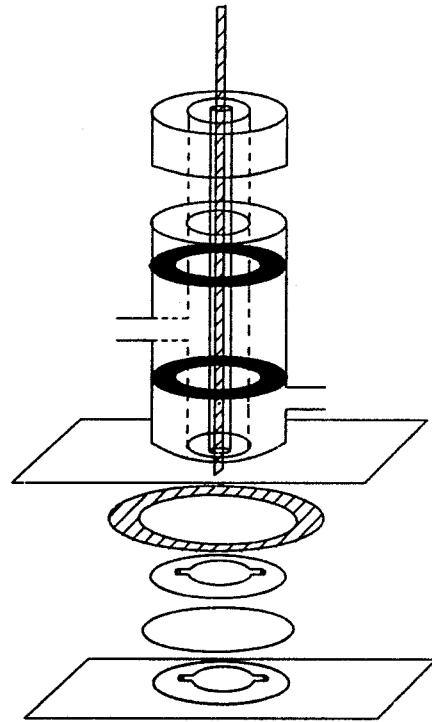


Figure 4. Three dimensional arrangement of dust collection cell.

3.3 발진회로

수정진동자의 발진을 위하여 그림 5와 같은 발진 회로를 사용하였다. 여기서 사용하는 IC 는 고속용을 사용하여야 발진이 잘 되는 것을 예비실험을 통하여 알 수 있었으며 센서와 발진회로의 연결선은 가능한 짧게 하는 것이 좋고 선은 서로 꼬이지 않는 것이 안정한 발진을 하게 하였다. 발진회로는 6 개를 병렬로 배열하여 PC 에서 그 중 한 채널을 선택한 후 주파수를 측정하도록 구성하였다. 본 실험에서는 그 중 두 채널을 사용하여 한 채널은 먼지의 측정에 사용하고 한 개의 채널은 온도 보정을 위한 공실험 채널로 사용하였다.

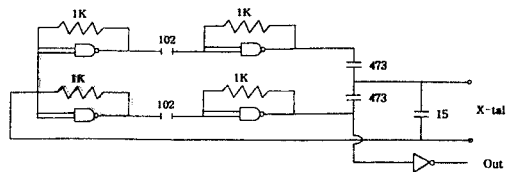


Figure 5. Schematic diagram of frequency counter circuit.

3.4 진동주파수의 측정

수정진동자는 수정판의 두께와 전극의 크기에 따라 고유의 값으로 정해지지만 전극의 표면에 다른 물체가 부착되면 고유의 진동수가 변화하게 되고 이 변화량으로부터 부착물체의 무게를 얻을 수 있다. 그러므로 진동주파수를 측정해야 하는 데 기존의 주파수측정기를 사용하면 설비가 비싸고 동시에 여러 개의 센서를 이용한 측정이 불가능하며 개인용컴퓨터와 연결하여 사용하는 데는 많은 어려움이 있어 본 연구에서는 그림 6과 같은 측정회로⁶⁾를 제작하여 사용하였다.

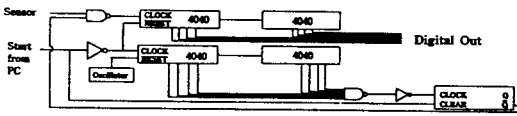


Figure 6. Schematic diagram of oscillation circuit.

고주파수의 측정이 가능하여야 하므로 두 개의 12비트 카운터(74HC4040)를 사용하였으며 주파수의 측정개시는 PC에서 신호를 보내고 1초 후에는 자동적으로 측정이 끝나도록 하기 위하여 별도의 카운터 2개를 사용하여 여기서 나오는 신호를 측정신호의 차단에 이용하였다. 측정이 끝나면 PC에서 감지하여 결과치를 입력하도록 설계하였다. 주파수의 측정은 7 자리의 유효숫자로 측정되었으며 오차는 ± 1 이나 공기의 흐름에 의한 진동으로 주파수의 변화가 심하여 측정단계에서 지수형 디지털필터⁷⁾를 사용하였다. 수정진동자의 주파수감도는 1 μg 의 먼지무게를 측정할 수 없어서 문헌에 있는 값을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

실내에 설치된 장치로부터 얻은 실험결과를 그림으로 나타낸 것이 그림 7과 8 이다. 그림 7 과 8의 자료는 서로 다른 시간에 측정한 값들 이다. 그림 7은 공기의 유량이 분당 9 리터이고 실온에서 6초 간격으로 9분 간 측정된 자료이다. 다른 수정진동자를 써서 동일한 방법으로 측정된 결과가 그림 8이다. 이들 자료는 실제 측정치에서 온도보정용 측정치를 뺀 값을 사용하였기 때문에 온도의 영향은 보정된 결과이다. 본 연구에서 온라인 측정이라고 한 것은 측정치를 눈으로 읽지 않고 바로 컴퓨터에 입력되기 때문이며 측정된 먼

지의 양은 시작부터 6 초 간격으로 누적하여 측정된 값이다.

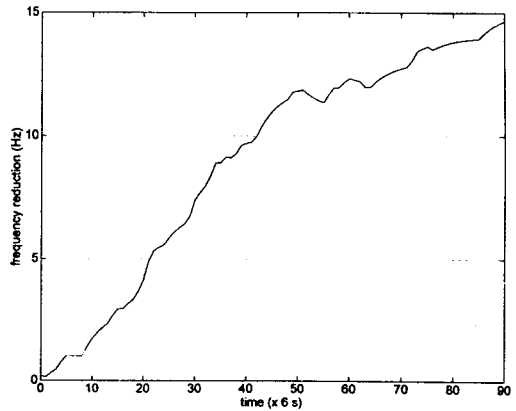


Figure 7. Frequency variation with dust collection in experimental run 1.

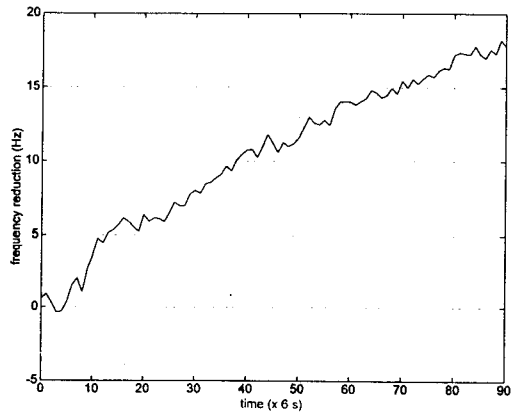


Figure 8. Frequency variation with dust collection in experimental run 2.

처음 약 5분 간은 약간 급한 경사의 직선적 변화를 보이다가 후반에서는 다소 줄어든 경사를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 8에서도 비슷한 경향임을 알 수 있고 측정센서의 표면에 먼지가 많이 쌓일수록 감도가 떨어지기 때문이다.¹⁾ 5 MHz 수정진동자의 표준감도(56.6 Hz cm²/μg)로 부터 수정진동자의 전극지름이 0.681 cm 이므로 처음 5분 간 포집된 먼지의 총량은 76 ng 이다. 공기의 공급유량을 이용하여 표준농도로 환산하면 먼지농도가 1.7 μg/m³임을 알 수 있다. 그림 8의 경우에도 동일한 계산방법에 의하면 1.9 μg/m³의 먼지농도임을 알 수 있다.

실제 포집된 먼지의 상태를 관찰하기 위하여 측정

이 끝난 수정진동자의 표면을 주사전자현미경으로 촬영한 사진이 그림 9에 나타나 있다. 표면에 고루 먼지가 포집되어 있는 상태를 잘 관찰할 수 있다.

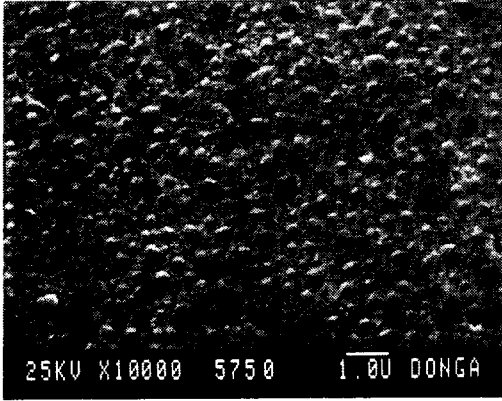


Figure 9. Photograph of dust collected on the surface of quartz crystal using scanning electron microscope.

수정진동자의 표면에 부착된 물질의 질량이 많아지면 감도가 떨어지기 때문에 어느 정도 측정이 끝나면 수정진동자의 표면을 청소하여 재사용하거나 여러 개의 채널에서 주파수를 측정할 수 있는 경우는 처음에 여러 개의 셀을 설치하여 차례대로 측정에 사용하면 장시간 연속적인 측정이 가능하다. 또 본 실험에서 알 수 있는 바와 같이 보통의 공기를 한 번에 6초씩 측정한다면 수정진동자 1개로 약 50회 정도 측정이 가능하다.

5. 결론

수정진동자를 이용하여 공기 중의 먼지의 농도를 연속적으로 측정하는 실험을 실시하였다.

5 개 수정진동자를 이용하여 실내공기 중 먼지농도를 2회 측정된 결과 각각 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 먼지농도를 얻었다. 실험의 결과로 부터 먼지의 농도를 연속적으로 측정할 수 있음을 알 수 있었고 PC를 이용한 측정이 가능하여 보다 간편한 먼지농도의 측정과 관리가 가능함을 제시하였다. 또 실험에 필요한 장치를 자세히 설명하여 수정진동자 미량저울의 유사한 용도에의 활용 가능성을 보였다.

사사

본 연구는 한국과학재단지정 동아대학교 지능형통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] Burttry, D. A., "Measurement of Interfacial Processes at Electrode Surfaces with the Electrochemical Quartz Crystal Microbalance," *Chem. Rev.*, **92**, 1355-1379 (1992).
- [2] Wilson, L. W., Hefher, M. J., Reilly, D., and Jones, J. D. C., "Development of a Personal Dust Monitor with a Piezoelectric Quartz Crystal Sensor," *Meas. Sci. Technol.*, **8**, 128-137 (1997).
- [3] Kim, J. M., Chang, S. M. and Muramatsu, H., "Monitoring Changes in the Viscoelastic Properties of Thin Polymer Films by the Quartz Crystal Resonator," *Polymer*, **40**, 3291-3299 (1999).
- [4] Choi, K. J., Kim, Y. H., Chang, S. M., Egawa, A. and Muramatsu, H., "Characterization of Aluminum Corrosion with a Quartz Crystal Analyzer," *Anal. Chim. Acta*, **386**, 229-236 (1999).
- [5] Sauerbrey, G. Z., "Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten und zur Mikrowagung," *Z. Phys.*, **155**, 206-222 (1959).
- [6] 김영한, 장상목, 장용근, "수정진동자 센서시스템," 한국특허 제164280호, (1998).
- [7] Seborg, D. E., Edgar, T. F. and Mellichamp, D. A., "Process Dynamics and Control," John Wiley & Sons, N. Y., p. 539 (1989).

 著 者 紹 介



최 광 재

1973년 동아대학교 화학공학과 졸업 (공학사)

1991년 동대학원 화학공학과 졸업 (공학석사)

현재 동대학원 박사과정

주관심분야:수정진동자 센서응용



김 영 한

1976년 동아대학교 화학공학과 졸업 (공학사)

1980년 한국과학기술원 화학공학과 졸업 (공학석사)

1984년 미국 Lamar Univ. 화학공학과 졸업 (공학박사)

현재 동아대학교 화학공학과 교수

주관심분야 : 수정진동자 센서시스템, 화학공정용 센서시스템 등

장 상 목

센서학회지 제 3권 2호 논문 94 3 2-05, p. 39 참조
현재