Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 38, No. 2, pp. 30-35, April 2023
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2023.38.2.30

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

아세톤 누출사고 예방을 위한 아세톤 가스 조기감지 기술개발에 관한 연구

전승진[1] · 최영보[2†]

A Study on the Development of Early Acetone Gas Detection to Prevent the Acetone Leakage Accident

Seung Jin Jeon[1] · Youngbo Choi[2†]

†Corresponding Author
Youngbo Choi
Tel : +82-43-261-2458
E-mail : ybc@cbnu.ac.kr

Received : February 16, 2023
Revised : March 22, 2023
Accepted : April 5, 2023

Copyright@2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Acetone is a widely used Volatile Organic Compound (VOC) in industries and laboratories. However, acetone affects human health adversely and causes fires and explosions. Early acetone detection and improved personnel training in safety and emergency management are necessary to prevent acetone-related accidents. The multi-VOC acetone detectors used currently have a sensitivity and selectivity limit. In this study, we discovered that Pt-loaded iron oxide (a metal oxide semiconductor) conversely, has high detection and selectivity for very low-levels of acetone gas. The loaded Pt catalyzes the reaction between the sensing materials' surface and the oxygen molecules in the air; this optimizes acetone detection and can decrease acetone-related illnesses, fires and explosions.

Key Words : acetone, Pt loaded iron oxide, low-level acetone gas detection, good selectivity

1. 서 론

아세톤은 현대사회 여러 분야에서 널리 사용되고 있는 화학물질로서 특히 산업현장이나 실험실 등에서 솔벤트, 파라핀 정제, 의약품용으로 많이 활용되는 대표적인 휘발성 유기 화합물(VOCs) 이다[1]. 반면 아세톤은 사람에게 노출 시 건강에 유해할 뿐만 아니라 화재폭발에도 취약한 화학물질이기도 하다. 농도 173 ppm 이상의 아세톤은 사람의 중추신경계를 마비시킬 수 있어 미국 국립 직업안전위생연구소(NIOSH) 에서는 아세톤의 노출 허용농도를 1일 8시간 작업기준 250 ppm으로 지정하고 있다[2]. 뿐만 아니라 아세톤 가스는 폭발범위가 폭발하한계(LEL) 2.6% 및 폭발상한계(UFL) 12.8%인 가연성가스에 속하고 미국화재연방협회(NFPA) 기준 인화점이 -20℃로 화재폭발 위험이 아주 높은 물질로도 구분된다. 이렇듯 아세톤은 사용 빈도가 높음과 동시에 위험성 또한 높은 화학물질이므로 아세톤의 위험 특성치를 구체적으로 파악하기 위한 연구[3-5]와 아세톤의 노출에 대한 사용자의 인식개선 교육의 필요성 및 사고 발생시 사고대응 전문성 향상을 위한 제도적 개선과 같은 대응 방안을 제시하는 연구들도 지속적으로 이루어지고 있다[6,7].

반면 아세톤과 관련된 화재폭발 및 질환 발생 사고의 주요 원인은 아세톤 흄과 가스의 누출이므로 아세톤이 누출되었을 때 이를 조기에 감지하여 확산을 차단하는 것 또한 아세톤 사고를 예방하기 위한 가장 중요한 방법 중 하나이다. 가스누출을 조기에 감지하기 위한 방법으로는 확산 모델 분석을 통한 가스 감지기의 위치 최적화를 제시한 연구가 이루어지고 있다[8]. 하지만 뛰어난 반응성과 선택성으로 감지하고자 하는 특정 가스의 누출을 조기에 그리고 누출된 가스의 종류를 정확하게 파악할 수 있는 감지기술을 개발하는 것

[1]한국전자통신연구원 선임기술원 (Electronics and Telecommunications Research Institute)
[2]충북대학교 안전공학과 부교수 (Department of Safety Engineering & Department of Big Data, Chungbuk National University)

또한 무엇보다 중요하다.

현재 아세톤 누출을 감지하기 위한 방식으로는 복합형 VOC 감지기가 주로 활용되고 있지만 복합형 VOC 감지기의 경우 누출물질을 정확하게 파악하기가 어렵다는 한계가 있다. VOC 감지기는 현재 안전, 보건 및 환경 분야에 널리 활용되고 있는 만큼 VOC 감지기의 성능개발 역시 활발하게 이루어지고는 있지만 가스 누출시 보다 빠른 시점에 구체적인 누출원을 파악하기 위해 VOC 감지기의 반응성 및 선택성은 더욱더 개선되어야 할 과제가 아직 남아 있다[9,10].

여러 형태의 가스 감지기 중 금속산화물 반도체 가스 감지기는 감지 물질과 공기 중 노출된 가스의 표면 반응으로 인한 전기저항 변화를 이용한 방식으로 비교적 저렴한 가격, 작은 크기, 간단한 작동원리 및 비교적 손쉬운 제작이 가능하다는 장점이 있다[11]. 금속산화물 반도체 가스 감지기의 종류는 크게 n타입 가스 감지기와 p타입 가스 감지기로 구분되며 n타입 가스 감지기의 대표적인 감지 물질은 SnO_2, ZNO, TiO_2 등이 주로 사용되고 p타입 가스 감지기의 경우는 CuO, NiO, Cr_2O_3 등이 주로 사용된다. n타입과 p타입 가스 감지기는 공기 중에서 환원성 가스에 노출될 때 전기저항의 변화가 정반대로 나타나는 특징이 있는데 n타입의 경우에는 전기저항이 감소하는 현상이 나타나는 반면 p타입의 경우는 그와 반대로 전기저항이 증가한다. 이는 감지 물질에 전자가 이동하는 경로가 다르기 때문이다. 또한 금속산화물 반도체 가스 감지기의 감지 성능을 향상시키기 위해 물질의 형태를 변화시키거나 이중 접합 방식을 사용한 다양한 방법이 이루어지고 있으며, 물질의 첨가를 통한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그중 물질을 첨가하는 방식에는 주로 귀금속(Pt, Pd, Ag)들이 가스와 감지 물질 사이의 흡탈착 에너지를 줄이는 역할을 하여 금속산화물 반도체 가스 감지기의 성능을 향상시키는 방식으로 많이 사용되고 있다[12].

본 연구에서는 금속산화물 반도체인 다공성 Fe_2O_3에 대표적 귀금속 물질인 Pt 나노 입자를 첨가한 감지 물질을 활용하여 아세톤 가스에 대한 반응 특성을 분석한 결과 ppb 단위의 낮은 농도 에서부터 아세톤을 조기에 감지 수 있는 뛰어난 반응성과 다른 휘발성 유기 화합물과 대비하여 상대적으로 높은 반응성을 보이는 등 우수한 선택성을 나타낸 것을 확인 함으로써 아세톤 가스의 감지기술 개발에 기여하는 것을 목적으로 한다.

2. 가스 감지 메커니즘

Pt가 첨가된 Fe_2O_3와 같은 p타입의 금속산화물 반도체 가스 감지기는 공기 중에 노출되면 산소분자가 감지 물질의 표면에 흡착되어 전자(e^-)를 가져가므로 감지 물질에 정공층(Hole accumulation layer)이 형성되며 반응식은 다음과 같다[13].

$$O_{2(ads)} + e^- \rightarrow O_{2(ads)}^- \quad (1)$$

$$O_{2(ads)}^- + e^- \rightarrow 2O_{(ads)}^- \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}O_{2(ads)}^- + e^- \rightarrow O_{(ads)}^{2-} \quad (3)$$

이러한 상태에서 아세톤과 같은 환원성 가스가 감지 물질에 노출되게 되면 다음 반응식과 같이 이온화된 산소분자가 전자를 내어놓고 노출된 전자는 정공층으로 들어가게 되어 정공과 결합하게 된다.

$$C_3H_6O_{(gas)} + 8O_{(ads)}^- \rightarrow 3H_2O + 3CO_2 + 8e^- \quad (4)$$

순수 Fe_2O_3와 Pt를 첨가한 Fe_2O_3(Pt-Fe_2O_3)의 아세톤 가스 노출 시 정공층의 변화에 대한 메커니즘을 묘사한 Fig. 1과 같이 적절한 농도의 Pt는 아세톤 가스의 반응성을 향상시키는데 기여하는 것으로 판단된다. 여러 연구 결과에서 나타난 바와 같이 감지 물질의 표면과 산소가 반응할 때 Pt와 같은 귀금속은 촉매 역할을 하여 감지 물질의 활성화에너지를 낮춤으로써 산소분자의 흡착과 이온화를 향상시킨 것으로 판단된다[12]. Fig. 1a에서 보여지는 바와 같이 공기 상태에서 Pt-Fe_2O_3의 정공층이 순수 Fe_2O_3보다 더 넓게 형성된다. 즉 Pt-Fe_2O_3의 표면에 아세톤 가스와 반응할 수 있는 이온화된 산소를 더 많이 가지고 있다는 것을 의미한다. Fig. 1b는

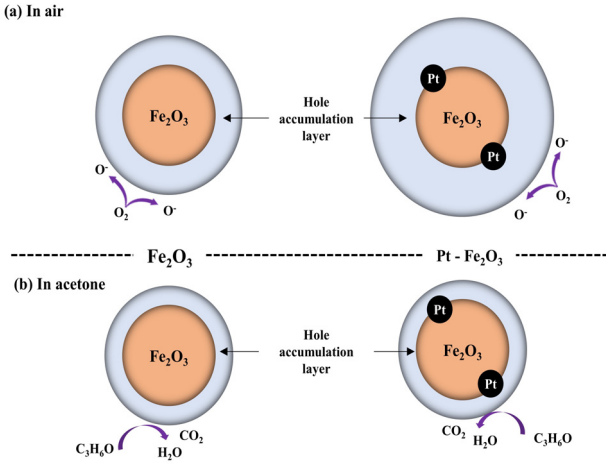

Fig. 1. Schematic of gas sensing mechanism for pristine Fe_2O_3 and Pt–Fe_2O_3 (a) in air and (b) in acetone conditions.

감지 물질이 아세톤 가스와 접촉했을 때 줄어든 정공층을 보여주고 있고 정공층이 줄어든 비율은 Pt-Fe_2O_3가 Fe_2O_3보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

즉, 정공층의 변화가 크다는 것은 그만큼 전기저항의 변화가 크다는 것을 의미한다. 금속산화물 반도체 가스 감지기의 반응성은 전기저항의 변화의 크기에 따라 결정되고 이는 감지 물질과 측정가스 사이의 표면 반응의 양에 따라 결정된다. 결과적으로 첨가된 Pt가 Fe_2O_3 가스 감지기의 아세톤 가스 반응성 향상에 결정적인 역할을 할 것으로 판단된다.

3. 실험방법 및 결과분석

3.1 아세톤 가스 감지기 제작

Poly vinyl pyrrolidone(PVP, 0.12 mol)과 D-(+)-glucose (0.08 mol)를 증류수에 용해 시켜 100℃에서 20 min 동안 가열한 후 Iron(III) nitrate nonahydrate를 주입하고 공기 중 400℃에서 4 h 동안 가열하여 다공성 Fe_2O_3를 제작하였다. 이후 제작된 Fe_2O_3과 Pt분말을 모르타르에서 몇 min 동안 갈아주면서 혼합한 이후 공기 중에 400℃의 온도에서 4 h 동안 가열하였고 질소 상태에서 동일한 온도와 시간 동안 열처리하여 Pt가 첨가된 다공성 Fe_2O_3를 제작하였다. 이렇게 제작된 감지 물질(Pt가 첨가된 Fe_2O_3)을 다시 glues(α-terpineol)와 함께 모르타르에서 10 min 동안 혼합하여 반죽 형태로 만들었고 이를 아세톤, 에탄올, 초순수 순서로 세정 한 실리콘 기판 위에 스크린 프린팅을 통해 발라 주었다. 이후 감지 물질이 올려져 있는 실리콘 기판의 안정화를 위해 2 h 동안 400℃의 온도로 한번 더 열처리해 줌으로써 아세톤 가스 감지기를 완성하였다.

3.2 아세톤 가스 감지 측정

아세톤 가스의 감지 특성을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 측정대상 가스의 농도 및 온도 조정 기능이 있는 가스 감지 측정 시스템을 사용하였으며, 제작된 감지기를 측정 시스템의 반응챔버 내에 위치시킨 후 밀봉하였다. 측정용 가스는 농도 10 ppm의 아세톤 샘플 가스를 사용하여 공기 유량 조정을 통해 100 ppb에서 2,000 ppb까지의 농도로 희석하여 측정하였고 필요에 따라서 반응챔버 내 히팅 코일을 통하여 필요한 온도로 조정하며 실험을 진행하였다. 또한 금속산화물 반도체 가스 감지기의 감지 성능을 파악하기 위하여 가스 감지기의 공기 중 전기저항과 아세톤 가스 노출 시의 전기저항을 측정한 데이터를 분석하였다.

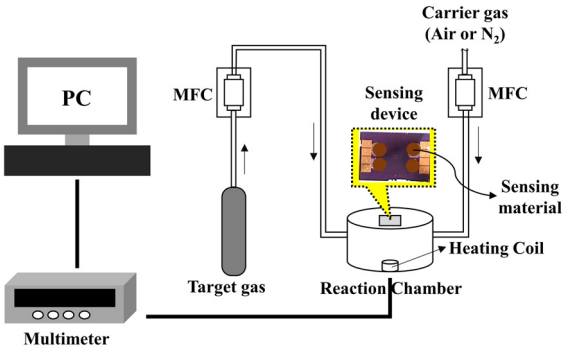

Fig. 2. Schematic of gas sensing measurement system.

3.3 아세톤 가스 감지 결과분석

금속산화물 반도체 가스 감지기는 감지 물질의 표면과 노출된 가스의 반응으로 발생한 전기저항의 변화로 가스의 노출을 감지하는 방식이다[14]. 그 중 p타입의 금속산화물 반도체 가스 감지기의 경우 환원성 가스에 노출 시 전기저항이 높아지는 특성이 있으므로 반응성은 다음과 같이 계산되었다.

$$R = R_{gas} / R_{air} \quad (5)$$

R은 가스 감지기의 반응성, R_{gas}는 측정대상 가스가 노출 되었을 때 감지 물질의 전기저항 값, R_{air}는 측정대상 가스에 노출되기 전 공기 중에서의 감지 물질의 전기저항 값이다. 즉, 가스 감지기의 반응성 수준은 공기 중 전기저항 값과 감지하고자 하는 가스의 노출 시 전기저항 값의 변화율로 정해지며, n타입의 금속산화물 반도체 가스 감지기의 경우는 환원성 가스에 노출 시 반대로 전기저항이 낮아지는 특성이 있으므로 p타입과 반대 방식으로 반응성이 계산된다($R = R_{air} / R_{gas}$).

우선 Pt가 첨가되지 않은 순수 Fe_2O_3와 0.2%의 중량비율로 Pt를 첨가한 Fe_2O_3(0.2% Pt-Fe_2O_3), 0.4%의 중량비율로 Pt를 첨가한 Fe_2O_3(0.4% Pt-Fe_2O_3)의 3가지 감지물질의 반응성과 측정온도와의 관계를 파악하기 위해 260℃ 부터 320℃까지의 온도 범위에서 100 ppb 아세톤 가스의 반응성을 측정한 결과 275℃의 온도에서 가장 좋은 반응성이 나타남에 따라 275℃를 적정 측정온도로 결정하고 추가적인 아세톤 가스의 감지 특성에 대해 실험하였다.

Fig. 3은 측정온도 275℃에서 100 ppb의 아세톤 가스 노출 시 순수 Fe_2O_3, 0.2% Pt-Fe_2O_3, 0.4% Pt-Fe_2O_3의 저항 변화를 각각 나타낸 그래프이다. 우선 순수 Fe_2O_3에 비해 귀금속인 Pt가 첨가되고 그 첨가된 Pt의 농도가 높아질수록 공기 중 기본 전기저항이 더욱 낮다는 것을 알 수 있다. 그리고 아세톤 가스가 주입된 이후에

전기저항이 공기 중일 때의 전기저항 보다 증가하는 것으로 보아 전형적인 p타입의 가스 감지기라는 것 또한 알 수 있다. 아세톤 가스를 100, 300, 500, 700, 1000, 1500, 2000 ppb의 농도 순으로 연속적인 저항 변화를 측정한 결과 0.2% Pt-Fe_2O_3의 경우 아세톤 가스에 노출되기 전 공기 중 전기 저항값은 13.20 MΩ으로 측정된 반면 아세톤 가스가 노출된 이후 전기 저항값은 각각 농도별로 24.18, 29.49, 36.98, 45.22, 50.13, 52.55, 53.41 MΩ으로 점점 더 증가하여 아세톤 가스의 농도가 높아질수록 전기저항의 증가 폭이 커진다는 것을 알 수 있다(Fig. 4 inset). 이러한 전기저항 측정값을 바탕으로 식 (5)에 따라 반응성을 계산하면 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 0.2% Pt-Fe_2O_3의 경우 반응성이 각각 1.83, 2.23, 2.80, 3.43, 3.80, 3.98, 4.05로 계산되어 순수 Fe_2O_3의 반응성(각각 1.49, 1.78, 2.34, 2.71, 2.93, 3.08, 3.22)에 비해 반응성이 향상된 것으로 나타났다. 반면 0.4% Pt-Fe_2O_3의 경우에는 각각 1.04, 1.10, 1.27, 1.41, 1.49, 1.56, 1.71로 오히려 반응성이 나빠지는 것이 확인되었다. 이는 적절한 양의 Pt가 첨가된 경우 Pt가 감지 물질과 산소와의 표면반응을 더욱 활성화시키는 촉매 역할을 하기 때문에 반응성이 향상되지만 Pt의 양이 너무 많아질 경우 첨가된 Pt의 뭉침 현상 등으로 인해 오히려 반응성에 악영향을 준 것으로 판단된다[15]. 특히 100 ppb의 아세톤 가스 농도에서 반응성이 1.83으로 나타난 0.2% Pt-Fe_2O_3의 경우 Table 1에서 비교한 바와 같이 기존의 아세톤 가스 감지용 금속산화물 반도체 가스 감지기와 비교해도 반응성이 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. 반응성이 1.2 이상일 경우 가스 감지기로써 유용한 것으로 평가되기 때문에 100 ppb 이하의 낮은

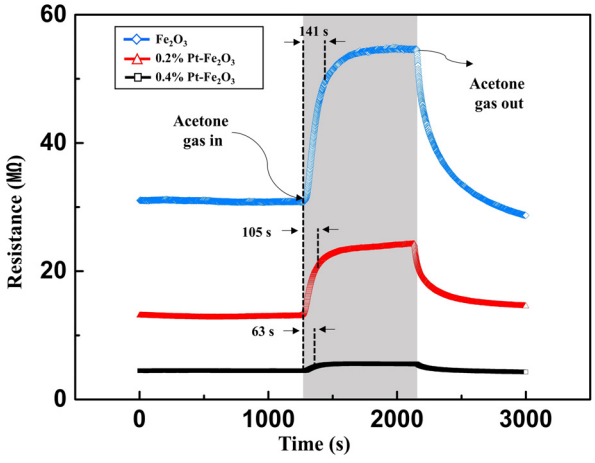

Fig. 3. Resistance change and Response time of the pristine Fe_2O_3, 0.2% and 0.4% Pt–Fe_2O_3 toward 100 ppb acetone gas at 275℃.

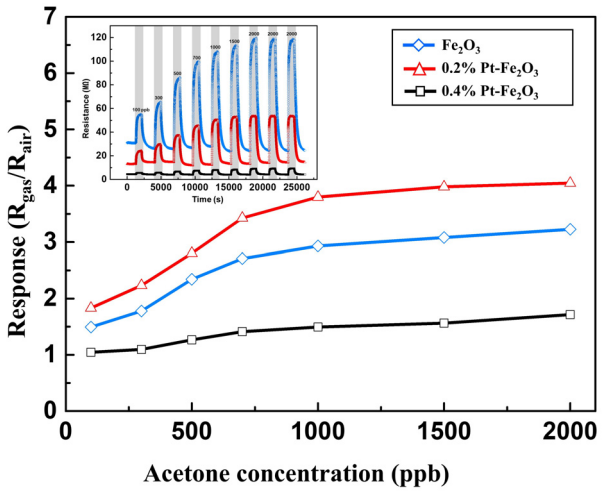

Fig. 4. The response value (the inset was resistance changes) of the pristine Fe_2O_3, 0.2% and 0.4% Pt–Fe_2O_3 toward acetone gas concentration from 100 to 2,000 ppb at 275℃.

Table 1. Comparisons of metal oxide semiconductor type gas sensor of acetone

Sensing materials	Working Temp.(℃)	Limit of Detection (ppb)	Ref.
NiO/ZnO hollow spheres	275	800	17
hematite nanotube array	350	500	18
In_2O_3 microspheres	275	83.3	19
TiO_2 nanoparticles	270	500	20
hierarchical ZnO spheres	230	250	21
Eu-doped SnO_2 nanofibers	280	300	22
Ir-GO-CO_3O_4 nanofibers	300	120	23
0.2% Pt-Fe_2O_3 micro cubes	275	100	in this study

농도의 아세톤 가스 감지기로도 활용이 가능할 정도로 반응성이 뛰어난 것으로 판단된다[16].

가스의 누출을 조기에 빠르게 감지하여 조치하기 위해서는 반응성의 크기 외에 가스 감지기의 감지 속도 역시 중요한 요소 중 하나이다. 감지 속도는 공기 중 가스 감지기의 기초 전기저항과 가스에 노출된 후 가스 감지기의 전기저항 변화가 90%에 도달하는데 소요된 시간으로 계산된다. Fig. 3에서와 같이 100 ppb의 아세톤 가스를 주입했을 경우 감지 속도는 순수 Fe_2O_3는 141 s, 0.2% Pt-Fe_2O_3의 경우는 105 s, 0.4% Pt-Fe_2O_3의 경우는 63 s로 나타나 귀금속인 Pt의 함유율이 높을수록 반응속도가 빨라지는 특성을 나타냈다.

VOC 감지기의 경우 누출된 가스의 종류를 정확하게 파악하기 어려운 단점이 있으므로 이를 보완하기 위해 특정 가스의 반응성이 타 가스와의 반응성과 비교하여 상대적으로 높게 나타나도록 선택성을 개선하는 것

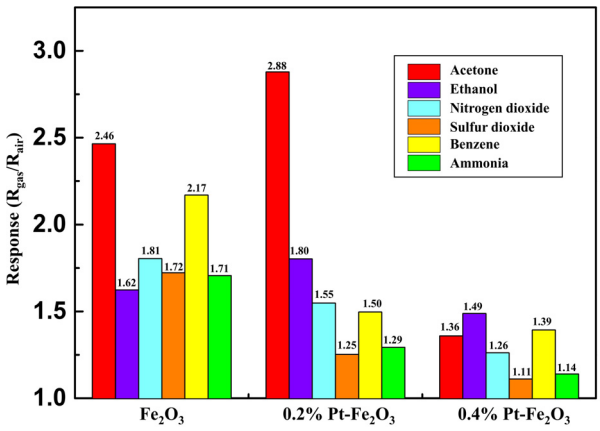

Fig. 5. Response of the pristine Fe_2O_3, 0.2% and 0.4% Pt–Fe_2O_3 toward 500 ppb of several kinds of gases at 275℃.

역시 중요한 요소이다. Fig. 5는 순수 Fe_2O_3와 0.2% Pt-Fe_2O_3, 0.4% Pt-Fe_2O_3에 대한 아세톤 가스의 반응성과 타 가스(에탄올, 이산화질소, 아황산가스, 벤젠, 암모니아)의 반응성을 비교하기 위해 모두 500 ppb의 동일한 농도로 주입하여 반응성을 비교한 그래프이다. 그래프에서 나타나는 것처럼 모든 감지 물질에서 아세톤과의 반응성이 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있고 특히 0.2% Pt-Fe_2O_3의 경우는 아세톤 가스의 반응성이 타 가스에 비해 대체로 2배가 넘는 차이를 나타내어 아세톤 가스에 대한 높은 선택성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

산업현장과 실험실 등에서 많이 사용되고 있는 대표적인 휘발성 유기 화합물(VOCs)인 아세톤은 사람의 건강에 유해한 물질일 뿐만 아니라 넓은 가연성 범위 및 낮은 인화점으로 인해 화재폭발이 쉽게 일어날 수 있는 위험물질이다. 아세톤과 관련된 사고사례들은 주로 아세톤 가스의 노출로 인해 발생하는 것으로 아세톤 가스의 누출을 초기에 정확히 감지하는 것은 아세톤으로 인한 사고를 방지하는 가장 중요한 방법 중 하나이다.

휘발성 유기 화합물의 공기 중 노출을 감지하는 대표적인 방식 중 하나인 금속산화물 반도체 가스 감지기의 감지 물질인 Fe_2O_3에 적절한 양의 Pt를 첨가한 방식으로 가스 감지기를 제작하여 아세톤 가스의 감지 특성에 대해 연구한 결과 0.2% 중량비율의 Pt를 Fe_2O_3에 첨가한 가스 감지기의 경우 100 ppb의 아세톤 가스에 노출되었을 때 반응성이 1.83으로 가장 좋은 것으로 나타났으며, 반응속도의 경우에도 순수 Fe_2O_3에서 141 s, 0.2% Pt-Fe_2O_3에서 105 s, 0.4% Pt-Fe_2O_3의 경우 63 s로 Pt를 첨가하였을 때 반응속도가 향상되었고 타 가스와의 반응성 비교에서도 0.2%의 Pt를 첨가한 Fe_2O_3의 아세톤 가스에 대한 반응성이 타가스에 비에 2배가 넘는 반응성을 나타냄으로 선택성이 가장 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이는 첨가된 적절한 양의 Pt가 촉매 역할을 하여 감지 물질의 표면과 공기 중 산소분자와의 반응성을 높여준 것이기 때문으로 분석된다.

ppb 단위의 낮은 농도의 아세톤 가스를 빠른 반응속도로 높은 선택성과 함께 민감하게 감지하는 0.2% Pt-Fe_2O_3 가스 감지기는 아세톤 누출로 인한 사고를 사전에 예방하기 위한 좋은 방안으로 활용될 수 있을 것이다.

References

1) A. Mirzaei, S.G. Leonardi and G. Neri, “Detection of Hazardous Volatile Organic Compounds (VOCs) by Metal Oxide Nanostructures-based Gas Sensors: A Review”, Ceram. Int., Vol. 42, No. 14, pp. 15119-15141, 2016.
2) X. Guan, Y. Wang, P. Luo, Y. Yu and D. Chen, “Incorporating N Atoms Into SnO_2 Nanostructure as an Approach to Enhance Gas Sensing Property for Acetone”, Nanomaterials, Vol, 9. No. 3, p. 445, 2019.
3) D. M. Ha, “The Measurement and Investigation of Fire and Explosion Properties for Acetone”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, p. 4, 2010.
4) H. M. Yusoff, L. K. Li, S. Izhar and M. S. M. Said, “Simulation of Acetone-water Explosion in Hydrothermal Extraction Reactor”, Case Stud. Therm. Eng., Vol. 28, p. 101631, 2021.
5) E. H. Kim, S. G. Lee and B. C. Ma, “Confirmation of the Efectiveness of Remote Chemical Spills and Leak Monitoring System through Acetone Pool Evaporation Experiments”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 37, No. 6, pp. 25-31, 2022.
6) S. Sim, J. I. Won, H. Jeon and D. Kim, “A Study on Health Risk Assessment by Exposure to Organic Compounds in University Laboratory”, The Journal of Korean Society for School & Community Health Education, Vol. 22, No. 4, pp. 49-60, 2021.
7) C. H. Cho, S. W. Choi, S. H. Lee, J. I. Kim and T. W. Kim, “Study on the Chemical Accidents Investigation and Effective Response System in Korea 2020”, Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 9, No. 2, pp. 68-75,

2021.

8) T. Jeong, D. H. Lim, M. S. Kim, J. G. Lee, B. T. Yoo and J. W. Ko, “Optimization of Gas Detector Location by Analysis of the Dispersion Model of Hazardous Chemicals”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 26, No. 2, pp. 39-48, 2022.
9) M. Khatib and H. Haick, “Sensors for Volatile Organic Compounds”, ACS Nano, Vol. 16, No. 5, pp. 7080-7115, 2022.
10) J. R. Ryu, H. J. Lee, M. G. Kim and M. H. Chu, “Calibration Method of Complex Gas Sensor for VOCs”, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 2020 Conference, pp. 947-950, 2020.
11) A. Dey, “Semiconductor Metal Oxide Gas Sensors: A Review”, Mat. Sci. Eng. B, Vol. 229, pp. 206-217, 2018.
12) V. Amiri, H. Roshan, A. Mirzaei, G. Neri and A. I. Ayesh, “Nanostructured Metal Oxide-based Acetone Gas Sensors: A review”, Sensors (Switzerland), Vol. 20, pp. 1-25, 2020.
13) P. Wang, T. Dong, C. Jia and P. Yang, “Ultraselective Acetone-gas Sensor based ZnO Flowers Functionalized by Au Nanoparticle Loading on Certain Facet”, Sens. Actuators, B, Vol. 288, pp. 1-11, 2019.
14) J. W. Yoon, R. Wang, J. S. Park and J. H. Lee, “Acetone Sensing Characteristics of ZnO Nanoparticles Prepared from Zeolitic Imidazolate Framework-7”, Journal of Sensor Science and Technology, Vol. 26, No. 3, pp. 204-208, 2017.
15) J. Chen, X. Tan, H. Liu, L. Guo, J. Zhang, Y. Jiang, J. Zhang, H. Wang, X. Feng and W. Chu, “Understanding the Underlying Mechanism of the Enhanced Performance of Si Doped $LiNi_{0.5}Mn_{0.5-x}Si_xO_2$ Cathode Material”, Electrochim. Acta, Vol. 228, pp. 167-174, 2017.
16) T. H. Kim, C. H. Kwak and J. H. Lee, “NiO/$NiWO_4$ Composite Yolk-shell Spheres with Nanoscale NiO Outer Layer for Ultrasensitive and Selective Detection of Subppm Level p-xylene”, ACS Materials & Interfaces, Vol. 9, pp. 32034-32043, 2017.
17) C. Liu, L. Zhao, B. Wang, P. Sun, Q. Wang, Y. Gao, X. Liang, T. Zhang and G. Lu, “Acetone Gas Sensor based on NiO/ZnO Hollow Spheres: Fast Response and Recovery, and Low (ppb) Detection Limit”, J. Colloid Interface Sci., Vol. 495, pp. 207-215, 2017.
18) D. H. Kim, Y. S. Shim, J. M. Jeon, H. Y. Jeong, S. S. Park, Y. W. Kim, J. S. Kim, J. H. Lee and H.W. Jang, “Vertically Ordered Hematite Nanotube Array as an Ultrasensitive and Rapid Response Acetone Sensor”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 6, pp. 14779-14784, 2014.
19) T. Wang, I. Can, S. Zhang, J. He, P. Sun, F. Liu and G. Lu, “Self-assembly Template Driven 3D Inverse Opal Microspheres Functionalized with Catalyst Nanoparticles Enabling a Highly Efficient Chemical Sensing Platform”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 10, pp. 5835-5844, 2018.
20) S. Navale, Z. Yang, C. Liu, P. Ca, V. Patil, N. S. Ramgir, R. Mane and F. Stadler, “Enhanced Acetone Sensing Properties of Titanium Dioxide Nanoparticles with a Sub-ppm Detection limit”, Sens. Actuators B, Vol. 255, pp. 1701-1710, 2018.
21) Q. Jia, H. Ji, Y. Zhang, Y. Chen, X. Sun and Z. Jin, “Rapid and Selective Detection of Acetone using Hierarchical ZnO Gas Sensor for Hazardous Odor Markers Application”, J. Hazard. Mater., Vol. 276, pp. 262-270, 2014.
22) Z. Jiang, R. Zhao, B. Sun, G. Nie, H. Ji, J. Lei and C. Wang, “Highly Sensitive Acetone Sensor based on Eu-doped SnO_2 Electrospun Nanofibers”, Ceram. Int., Vol. 42, pp. 15881-15888, 2016.
23) S. J. Choi, W. H. Ryu, S. J. Kim, H. J. Cho and I. D. Kim, “Bi-functional Co-sensitization of Graphene Oxide Sheets and Ir Nanoparticles on p-type Co_3O_4 Nanofibers for Selective Acetone Detection”, J. Mater. Chem. B, Vol. 2, pp. 7160-7167, 2014.