화학탐지 최적화를 위한 유동 및 압력 특성 연구

손인성^{*,1)} · 윤순민¹⁾ · 김학신¹⁾ · 육영호¹⁾ · 박병황²⁾ · 김주현²⁾

¹⁾ (주)에이치케이씨

²⁾ 국방과학연구소

A Study on Characteristics of Sampling Flow and Pressure Conditions for Chemical Detection Optimization

In-Sung Son^{*,1)} · Soon-Min Yoon¹⁾ · Hak-Sin Kim¹⁾ · Young-Ho Yuk¹⁾ ·
ByeongHwang Park²⁾ · JuHyun Kim²⁾

¹⁾

²⁾ Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 November 2013 / Revised 10 January 2014 / Accepted 21 February 2014)

ABSTRACT

In terms of chemical detection performance related with chemical material sampling, this investigation shows optimized values, resulted from minimizing loss from air turbulence and other reasons when pressure changes on the basis of sampling flow rate Based on simulations and pressure control of the outside conditions it became possible to obtain ion mobility detection optimum values, and to derive standard pressure conditions that is appropriate for DMS characteristic.

Key Words : Method(수치해석), Differential Mobility Spectrometry(이온이동도법), Computational Fluid Dynamics(전산 유체역학), M&S(가상모델해석), Orifice(유량가변장치)

기 호 설 명

K_L : 미소손실계수

D : 수력학적지름

f : 마찰계수

V_{rf} : 인가전압

V_c : 보상전압

$K(E)$: 이온이동도

$K(\theta)$: 이동도

L : 관내길이

V : 유체평균유속

그리스 문자

* Corresponding author, E-mail: hkc1959@hkci.co.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

η : 포화효율

η_{tr} : 전열회수효율

w : 절대습도 [kg/kgDA]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 μ : 점성

하첨자

a : 공기
 w : 물
 c : 전하량

1. 서론

최근 우리나라의 첨단국방기술의 발전이 세계적인 수준으로 발돋움함으로써 기술강국의 현실화가 여실히 이루어지고 있다. 첨단전자산업기술의 일면인 이온이동도법에 의한 화학탐지기술은 세계적인 기술수준에 올라 있으며, 향후 전력화를 통한 국내 화학탐지기술의 점진적인 발전과 보급을 기반으로 기술수출의 미래가 예견되는 상황이다. 한편 이 기술의 도입 단계에서부터 발전은 이온이동도에 대한 물질의 식별법과 더불어 탐지, 식별을 위한 안정적인 유동제어가 필수적으로 추가되어야 한다. 정밀하고 연동관계적 변수에 의한 유동제어는 일부 오작동의 요인이 되는 간섭물질의 일부배제와 탐지, 식별의 전제조건으로 부여되는 온/습도, 압력, 증류형 흐름제어의 핵심사항이다.

Fig. 1. Chemical detector structure

본 연구는 소형화학탐지기술에 있어서 탐지기 내/외부 유동에 대한 특성을 해석하고 그 특성과 탐지성능에 대한 최적화 설계에 대한 신뢰성을 분석하였다. 또한 모델링과 시뮬레이션을 통한 해석에 있어서 구조체 내/외부의 저속 유동에 의한 확산의 영향적 관계를 포함한 표준 유동을 분석하여 적용하였다.

2. 이론해석

흡입구의 유동장부터 미소 유로의 유동형태를 분석한 내용을 전제로 흡입단의 압력강화와 화학탐지 최적화를 풀어내기란 상당히 까다롭고, 미세한 종속변수들의 영향 속에서 압력 값에 따른 최적 이동거리에 대한 탐지성능 도출은 수많은 실험과 불규칙성을 내포하고 있다.

사실 이러한 연구의 기술적 의미는 예전 기술로는 풀어내기에도 어렵고, 이론적 근거를 바탕으로 수치해석의 방법으로 예상되는 사항이었다. 전자기적 특성과 압력에 관한 변환 계수를 확보 하고, 이온 이동도에 따른 특성을 고려하여 전단 유체유동 제어 시스템을 구축하기 까지 개별적 학문에 대한 고찰이 수없이 시행되고 유동제어시스템의 발전이 없었더라면 불가능하다고 볼수 있는 일이었다.

유체 유동 연구에서 유로 길이에 따른 압력 강하량 측정은 기본적인 분석법인데 이런 논리로부터 압력과 전자기적 특성의 상호관계에 최적화 특성을 찾아간다고 하겠다. 일정 단면을 갖는 수평형태의 유로에서 비압축성 유동에 대한 압력의 변화값은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} \left[f \frac{L}{D} + \sum K_L \right] \quad (1)$$

$$f Re = \frac{\pi}{2} \frac{\Delta P D^4}{Q \mu L} - \frac{4}{\pi} \frac{\rho Q}{L \mu} \sum K_L \quad (2)$$

관로 표면의 미세한 형태에 따라 마찰계수 정의가 되겠지만 확대 표면의 유동형태는 ROD형태의 변화에 따른 난류유동장을 형성하며, 새로운 유동장 해석을 필요로 하는 부분이다. 다만 일정 증류흐름을 통한 벽면 마찰의 해석으로 전체 유동 형태의 미세한 부분을 차지하고 있으므로 무시 하도록 한다.

유입구에서 membrane filter에 이르기까지의 유동에 따른 압력강하값이 화학작용제의 이온화를 통한 탐지 control volume 내에서의 이동도에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 해석을 주목해 볼 필요가 여기서 생긴다.

층류 흐름제어를 통한 일정 압력 강하에 대한 제어 시스템의 구축이 이루어졌다고 한다면 이온화 후단부의 탐지에 대한 연관관계를 어떻게 풀어 낼 것인지에 대한 논리를 정립하는데 상당한 어려움이 따른다.

문제는 일정 온·습도와 압력, 유동형태, 이온화량, 인가전압의 전위차 안정성, 보상전압의값 등의 요인들이 이온이동도에 영향을 미칠 수 있는 변수로 작용하는데 각각의 영향요소에 따른 한계성을 명확하게 규정 할 수 없기 때문이다.

다만 전단 유입유체의 압력에 따른 탐지성능의 변화가 다른 요소들에 대한 영향에 비해 상당히 크고 다른 요소의 변화값은 무시 할 수 있는 격차를 보이고 있으므로 핵심사항인 압력변화에 따른 탐지최적화 값을 주 해석 부분으로 도출하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 가장 영향요소가 큰 압력 변화에 따른 이온이동도의 최적화를 구현하는 시스템의 연구를 목적으로 하고 각각의 요소들에 대한 상호영향요소는 일정 조건으로 부여하여 해석값들에 대한 표준환경으로 설정 하였다.

관내 흐름의 유동을 해석하고 압력의 변화에 대한 값을 설정 하였다면 탐지부에서 어떠한 원리로 탐지 되고 전단값 변화에 대응 할 수 있는지 알아볼 필요가 있다. 화학탐지를 위한 이온이동도법(DMS)에 대한 개략도는 다음과 같다.

Fig. 2. Chemical detector principle

① 펌프의 가동으로 이동도관 외부 유입공기가 순환하여 유입 배출되고, 탐지부 내부순환을 통해 이온 이동형태의 유동장을 형성하게 된다. ②를 통해 내부 순환 공기의 정화 및 오염제어가 이루어지게 되고, ④의 멤브레인을 통해 습기가 제어되고 기타 오염물을 차폐하게 된다. ⑤ VENT를 통해서서는 이동도관 내부 압력 평형을 제어 할 수 있게 구성되어 있다.

③의 이온화원에 의해 방사능에 의한 방법과 비방사능에 의한 방법으로 탐지물질의 이온화가 이루어지게 된다. 이온화된 물질은 비대전 전기장과 보상전압이 인가된 전기장내 흐름에 놓이게 되고, DMS chip에 의해 비선형으로 이동하다가 전극에 부딪혀 소멸하거나 통과하게 된다. 인가전압에 따른 보상전압의 부가값에 따른 이온의 분리 현상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3. DMS detection spectrum

Fig. 4. 2D scan data

이온이동도(K(E))를 나타내는 영역이동의존성에 대한 수식은 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

이 수식들은 이온 이동도는 전기장에 의해 제어되고 전위차가 낮은 형태의 필드보다 전위차가 높은 필드에서의 영향을 미치는 $\alpha(E)$ 에 연관한다고 볼 수 있다.

$$K(E) = K(0)[1 + \alpha_2(E/N)^2 + \alpha_4(E/N)^4 + \dots] \quad (3)$$

$$= K(0)[1 + \alpha(E/N)]$$

α 값에 따른 이온이동도의 정의는 $\alpha > 0$, $\alpha = 0$, $\alpha < 0$ 로 구분하여 크거나 작을 때는 전극에 충돌하여 전기적 성질을 잃게 되고, $\alpha = 0$ 일 경우에만 양이온 검출기나 음이온 검출기에서 검출된다.

3. 실험방법

3.1 탐지모듈 구성

Fig. 5. Differential Mobility Spectrometry detection devices

Fig. 6. Differential Mobility Spectrometry circulation control

DMS를 이용한 소형 이온탐지센서 시스템은 화학작용제 탐지를 위해서 두 개의 펌프, 즉 샘플펌프와 순환펌프를 사용한다. 샘플펌프는 시료도입부에 위치하

여 외부 공기를 시스템의 시료도입부로 흡입하여 ‘외부 → 시료도입부 → 샘플펌프 → 외부’와 같은 샘플 루프를 형성한다. 순환펌프는 시스템 내부에 위치하여 ‘센서 → 차콜 → 압력센서 → 순환펌프 (→ 시브 →) → 차콜 → 센서’와 같은 순환 루프를 형성한다. Fig. 6은 두 개의 펌프를 제어하는 회로이다.

MCU로부터 PWM 신호에 의해서 제어되는 두 개의 스위칭 소자로 구성되어 있으며 PWM 신호에 의해서 펌프의 유량을 제어할 수 있다. 펌프의 유량제어는 센서와 순환펌프 사이에 위치한 압력센서에 의해서 제어된다. 시료도입부의 외부공기 중 항상 일정한 양의 시료가 센서로 들어오기 위해서는 내부의 순환루프의 압력(약 9psi)은 일정해야하며 압력은 순환펌프의 유량에 의해서 결정된다.

Fig. 7. The output voltage of the pressure sensor according to pressure

예를 들어, 압력센서의 출력전압은 62kPa(9Psi)일 때 출력 전압인 약 1.3V가 항상 유지 되어야 한다. 순환 루프의 압력이 낮아져 압력센서의 출력 전압이 낮아지면 MCU에서 펌프 제어부로 보내는 PWM 신호의 듀티비를 증가시켜 펌프의 유량을 감소시켜 순환루프의 압력을 높인다. 반대로 센서의 출력 전압이 높아지면 PWM 신호의 듀티비를 감소시켜 펌프의 유량을 증가시켜 압력을 낮춘다. 다음은 압력센서의 회로이다.

3.2 탐지모듈 시뮬레이션

유동해석 시뮬레이션을 통하여 노즐부의 유동흐름이 손실없이 멤브레인 전단까지 이동하여, 멤브레인 전단의 최대압력이 102887.61Pa(약 14.92psi) 임을 확인 하였다. 필터함 압력을 9psi로 유지 시 원활하게 내부로

화학작용제들의 이온 입자들이 유입될 수 있는 조건이 형성되었다. 이때의 입력 조건은 흡입유량 350ml/min 배출압력 30mbar이며, 3D 모델링 SolidWorks 12, Meshing FloEFD 11, 열/유동 해석 FloEFD 11을 사용하였다.

Fig. 8. Nozzle velocity distribution

Fig. 9. Nozzle pressure distribution

이온화부 및 탐지부의 내부로 유입되는 공기의 속도에 따른 압력 분포에서 시뮬레이션한 값을 살펴보면 Fig. 10의 그림에서와 같이 오리피스를 통과한 공기의 압력은 급속히 감소하며, 공기의 속도는 증가한다. 이를 통하여 비대칭 전기장 센서로 공기와 혼합되어 있는 작용제가 손실없이 유입되는 것을 볼 수 있다. 오리피스 압력의 변환 값을 그래프화 시켜보면 Fig. 11과 같으며 이때의 조건은 흡입 유량 260ml/min, 배출 압력 610mbar 으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10. Around the orifice of the velocity distribution

Fig. 11. Orifice pressure variation graph

Fig. 12. Velocity distribution inside the filter box

Fig. 12에서와 같이 필터함 내부의 공기 흐름 궤적 분석을 통하여 유동흐름이 체적 손실없이 원활하게 흐르고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 압력은 약 10psi를

유지하고 있다. 필터함에 필요한 압력은 9psi로 이는 금속필터 및 충전재(폴리콜라시브, 차콜)를 고려한 것이다.

Fig. 13. Pressure distribution inside the filter box

Fig. 14에서와 같이 필터함의 흐름방향은 2가지로 구분되어 진다. 첫 번째는 일반흐름방향이고, 두 번째는 습도가 높을 때의 흐름방향이다. 흐름방향이 변경되어 질 때 유량 흐름 길이가 변화되어, 압력 또한 변화가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 다음 Fig. 15와 같이 습도가 높을 때의 압력분포는 약 10psi가 발생되고 있다.

Fig. 14. Circulation velocity distribution inside the filter box

Fig. 15. Circulation pressure distribution inside the filter box

3.3 탐지성능 시험장치 구성

유동형태와 압력 변화에 따른 화학탐지 최적화를 위한 시험 구성도는 Fig. 16과 같다.

Fig. 16. Device according to pressure and flow schematic experiment

4. 결 과

Fig. 17. Pressure spectrum of sample introduction

Fig. 18. Changes in the intensity values of V_c

Table 1. Pressure changes introduced by the sample values

순번	압력(psi)	순번	압력(psi)	순번	압력(psi)	순번	압력(psi)	순번	압력(psi)
1	22.85	3	14.78	5	11.22	7	8.70	9	6.20
2	17.41	4	12.62	6	9.37	8	7.52	10	-

시료도입부의 압력 설정 값의 변화에 따라 분석을 하였을 때 압력값 9.37~14.78PSI 범위에서 높은 해상도의 스펙트럼을 확인할 수 있었다.

5. 결과해석 및 고찰

화학물질 탐지시 시료도입부의 유량, 유동형태, 압력 등에 따라 탐지성능에 막대한 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다. 압력 스펙트럼의 분포에서 나타난 것과 같이 탐지성능 최적화는 시료의 이온화 순도에 대한 영향과 더불어 안정적인 유동형태와 압력으로 이온을 유도 하는 것이 불순물제거와 내부관로 설계의 다음 단계로서 탐지성능의 결과를 좌우 할 수 있다고 봐도 무방하다. 내부 관로의 시뮬레이션을 통해 확인된 유동 형태와 압력 분포는 안정적인 이온의 유입과 탐지 성능의 기본을 마련한 것을 볼 수 있었으며, 화학탐지기 설계시 고려되어야 할 핵심 사항으로서의 표준을 제시 하였다고 볼 수 있다. 최적 압력값으로 9.37~14.78PSI 일 때 이온화된 시료의 유입과 탐지가 활성을 보였으므로 외부 압력 조건의 표준값이 14.78, 12.62, 11.22, 9.37 값을 나타내는 곳의 탐지기 성능이 최적화 된다고 볼 수 있겠다.

6. 결 론

DMS를 사용하는 화학탐지 장치는 이온화를 전제로 하는 원리를 내제 하고 있기 때문에 이온화를 수행하는 도입부의 환경적 요소가 탐지성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인 하였다. 전단 도입부의 하드웨어적인 유동제어 설계를 통해 난류생성을 억제하고 확산에 대한 간섭효과를 배제하는 유동 흐름제어 설계를 하고, 일정 압력 내에서 이온탐지 성능이 확연하게 차이를 나타내고 있기 때문에 유동흐름에 따른 압력 변화도 설계상 고려하여야 한다. 실제 시뮬레이션

값들에 대한 검증을 통한 실험에서 9.37~14.78이라는 압력 값을 도출함으로서 0.5~2.5mm 간격의 이온이동도관에 최적화된 압력 값이라 하겠다. 일정 전위차 값에 대한 이온이동도관내 직경의 고정 값이 주어진에 따라 유동분석 시뮬레이션값과 압력 값은 탐지기 크기변화에 대한 변화 값들의 기본 값으로 활용 할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 국방부과제 “소형이온화탐지센서개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 대한 관계자 분들께 감사드립니다.

References

- [1] 이동선 “이온이동도분석법의 원리와 응용에 관한 고찰,” Analytical Science & Technology, Vol. 13, No. 1, 11A-23A, 2001.
- [2] Carnahan, B., Day, S., Kouznetsov, V., Matyjaszczuk, M., Tarassov, A., “Proceeding of the International Conference on Advance in Instrumentation and Control,” ISA, pp. 87-95, 1996.
- [3] McDaniel, E. W., Mason E. A., “In The Mobility and Diffusion of Ions in Gases,” p. 372, 1973.
- [4] Lipej, A., Poloni, C., “Design of Kaplan Runner Using Multiobjective Genetic Algorithm Optimization,” Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, 2000.
- [5] 손인수, 안성진, “유체유동의 영향을 받는 구조물의 동특성에 대한 연구동향, 소음 · 진동, pp. 13-17, August 2011.
- [6] HKC, 국방과학연구소 “소형이온탐지시스템개발”, pp. 2-17, 2012.