

화물 컨테이너 내 IMS 신호를 이용한 적응 윈도우 기반 마약 및 폭발물 검출[☆]

Adaptive Window-based Detection of Narcotics and Explosives using IMS Signals in Cargo Containers

주희송¹ 김동현¹ 조성윤¹ 박경원¹ 김양섭¹ 전원기¹ 권기원^{1*}
Heesong Ju Donghyun Kim Sungyoon Cho Kyungwon Park Yangsub Kim Wongi Jeon Kiwon Kwon

요약

선박 또는 항공기 화물을 이용한 국제적인 마약 및 폭발물 반입 시도가 증가하는 추세이다. 최근 우리나라에서도 마약 및 폭발물의 검출 사례가 증가하고 있어 주 경로인 항만, 공항의 컨테이너 검색을 통해 위험물질(마약 및 폭발물)을 탐지하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이온 이동도 분광법(Ion Mobility Spectrometry: IMS)의 샘플링 된 출력신호를 이용하여 컨테이너 내부의 위험물질을 검출하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 초기화 단계에서 알고 있는 물질을 사용하여 목표 위험물질의 이온 검출을 위한 문턱값, 윈도우 길이, 잡음 수준 등의 파라미터를 사전에 추정한다. 추정된 파라미터는 컨테이너 내부의 목표 위험물질의 이온 검출에 사용된다. 제안된 기법은 컨테이너 환경에 의해 IMS 신호 최대값과 이온 이동도가 변동하는 경우에 적용될 수 있다.

☞ 주제어 : 마약 및 폭발물, 이온 이동도 분광법, 화물 컨테이너, 적응 윈도우, 검출 기법

ABSTRACT

International attempts to smuggle narcotics and explosives using ship or aircraft cargoes are on the rise. With the recent increase in the number of detection cases of narcotics and explosives in Korea, it is important to detect dangerous material (narcotics and explosives) through container searches at ports and airports, which are the main routes. This paper proposes a technique to detect dangerous material in cargo containers using the sampled output signal of ion mobility spectroscopy (IMS). The proposed technique estimates parameters such as a threshold, a window length, and a noise level for ion detection of the target dangerous material by using known materials in the initialization stage. The estimated parameters are used to detect the ions of the dangerous target material inside the containers. The proposed technique can be applied when the peak value of the IMS signal and the ion mobility are varying due to container environments.

☞ keyword : narcotics and explosives, ion mobility spectrometry, cargo container, adaptive window, detection technique

1. 서론

최근 들어 선박 또는 항공기의 화물 컨테이너를 통한 국제적인 마약밀매 및 폭발물 테러 시도가 증가하고 있다. 2021년 9월 부산세관이 멕시코에서 출발하여 부산항

을 거쳐 호주로 수출 예정인 컨테이너에서 역대 최대 규모인 404.23kg의 필로폰을 적발하였다[1]. 또한, 같은 해인 1월 부산신항에 입항한 라이베리아 국적 컨테이너 화물선의 타기실에서 코카인 35kg을 압수했으며, 2020년 11월경 국제화물로 위장하여 필리핀을 거쳐 부산항으로 반입한 대마 3.83kg을 적발하기도 하였다[2][3]. 이처럼 대량의 마약밀수가 컨테이너를 통해 시도되고 있으며, 밀수 방식도 다양해지고 있으므로 마약류 검출을 위한 검색기술 확보가 요구되고 있다. 마약이나 폭발물과 같은 위험물질의 위법적인 이동을 방지하기 위해서는 주요 경로인 항만이나 공항 단계에서 컨테이너의 반입 또는 반출시 컨테이너 검색을 통해 사전에 위험물질을 탐지하는 것이 중요하다. 현재 화물 컨테이너의 검색에는 고에너지(6MeV, 9MeV)를 이용한 컨테이너 투과 영상을 관측하는

¹ Smart Network Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI), Seoul, 03924, Korea.

* Corresponding author (kwonkw@keti.re.kr)

[Received 23 February 2022, Reviewed 25 February 2022(R2 12 May 2022), Accepted 25 May 2022]

☆ 이 논문은 2022년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20200611, 컨테이너 위험화물 자동검색 및 복합탐지 시스템 개발)

☆ 본 논문은 2021년도 한국인터넷정보학회 추계학술대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임.

기법이 주로 사용되고 있는데, 이 기법은 매우 높은 해상도의 검색 영상을 통한 판독은 가능하지만, 원자번호가 낮은 마약 및 폭발물은 판독이 어려운 문제가 있다[4].

이와 같은 문제를 극복하기 위해 이온 이동도 분광법 (Ion Mobility Spectrometry: IMS)을 이용할 수 있다. IMS는 검사 대상 물질의 이온화 및 가속화 과정을 통해 물질 고유의 이온 이동도를 측정함으로써 특정한 물질의 존재 여부를 파악할 수 있다[5]. IMS를 화물 컨테이너에 적용하기 위해서 컨테이너 내부와 연동할 수 있는 흡입부와 IMS 센서 개발 및 자동화된 검출 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 IMS 장비를 이용하여 화물 컨테이너의 위험물질을 검출하는 방법을 제안한다. 2절에서는 이온 이동도 분광법과 기존 검출 기술의 문제점을 소개하고, 3절에서는 IMS 장비의 출력을 이용하여 검출 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 4절에서는 본 논문의 결론을 내린다.

2. 관련 연구

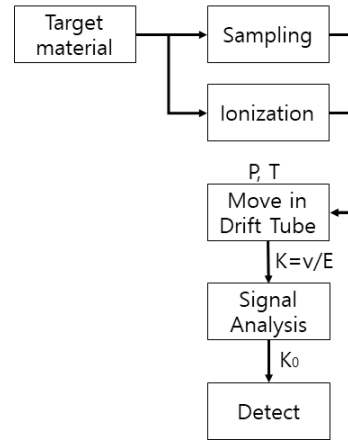
이 절에서는 마약 및 폭발물 검출에 쓰이는 IMS 기술을 소개하고 기존 이온 검출 방식에 대해 간단하게 설명한다.

2.1 IMS에서의 이온화

IMS는 널리 이용되고 있는 위험물질 탐지 방법이다 [6]-[9]. IMS에서는 흡입된 대상물질이 코로나 방전에 의해 이온화된 후, 전기장에 의해 이온 이동관 또는 이동 채널(drift tube)을 통과하여 최종적으로 전극에 도달한다. 이 때, 이온의 종류에 따라 도달 시간에 차이가 발생하고, 이를 이용하여 대상물질의 이온 구성을 분석한다. IMS를 이용하여 대상물질의 반응을 측정하는 블록도를 그림 1에 나타내었다.

IMS에서 시료 주입은 smear matrix에 고체상 시료를 묻히거나 공기 흡입을 통해 진행하며, 고온의 시료 주입부에서 시료가 기화되어 이온화 영역으로 도입된다. 이후 코로나 방전에 의해 이온화 과정이 진행되고, 생성된 이온은 이동 채널을 통과하여 이동 시간에 따라 분류된다.

IMS에서는 대기 중의 공기와 수분 성분이 먼저 이온화되어 이들이 반응 이온(reactant ion, RI)이 되어 분석물과 화학적 이온화 과정을 거쳐 분석물 이온이 생성된다[10]. 이 때 양이온과 음이온이 모두 생성될 수 있다. 대기 성분에서 생성되는 양이온은 수분과 관련되어 주로 물분자 집합체(water molecule cluster)인



(그림 1) IMS 시스템 구조
(Figure 1) IMS system structure

$H^+(H_2O)_n$ 이 생성되어 분석 물질과 반응하여 분석물 분자 M 을 $[M+H]^+$ 과 같이 양이온화 시킨다. 음이온의 경우에는 산소가 전자를 취하여 음이온이 되는 것이 가장 잘 일어나는 RI인데 수분 함량에 따라 물 분자가 여러 개 붙은 형태가 된다. 음이온인 경우에는 분석물 분자에서 양성자가 빠진 $[M-H]^-$ 가 생성될 수 있다.

2.2 이온 이동도와 이온 검출

위와 같이 이온화 과정을 통해 이온화 된 물질은 이동 채널에 인가된 전압에 의해 이동하게 되는데, 이 때 이온의 이동속도는 전기장 세기에 의해 영향을 받는다. 이온의 이동도는 수식 1과 같이 표현된다[11].

$$K = \frac{v_d}{E} = \frac{L}{t_d E} = \frac{L^2}{t_d \Delta V} \quad (1)$$

여기서 v_d 는 이온의 이동속도(m/s), E 는 전기장의 세기, L 은 이동 채널의 길이(m), t_d 는 이온의 이동시간(s), ΔV 는 인가 전압(V)을 나타낸다. K 는 실험을 통해 구할 수도 있고, 이온의 화학적 특성을 알면 계산에 의해 구할 수도 있다[12].

이온의 이동속도는 전기장 이외에 이동 채널 내의 온도와 압력의 영향을 받는다. 온도는 이온과 중성 분자들의 운동 에너지와 관련되어 있고, 압력은 이온이

이동할 때 충돌 정도에 영향을 미친다. 이온의 이동도가 압력과 온도에 영향을 받으므로 이에 대한 보정이 필요하며, 이를 보정한 결과를 환산 이온 이동도 (reduced ion mobility, K_0)라고 하고, 수식 2를 통해 구할 수 있다[5].

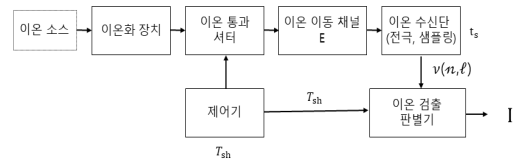
$$K_0 = K \left(\frac{P}{760 \text{ torr}} \right) \left(\frac{273K}{T} \right) \quad (2)$$

여기서 P 는 이동채널 내의 압력(torr)이고, T 는 측정 시 이동도관 내의 온도(K)이다. 수식 2에서 알 수 있듯이 압력이 증가하고 온도가 감소하면 이동도는 증가한다. 즉, 이동도는 환경에 의한 영향을 받게 된다.

기존의 이온 검출 방법에서는 위험물질의 각 이온에 대해 수식 1과 수식 2를 통해 구한 이온 도달 시간 t_d 근처에서 전압의 최대값을 검출한 후, 사전 관측에 의해 설정한 수동 문턱값과 비교하여 이온의 존재 여부를 판별하고 있다[8][13]. 이 방법은 가장 간단한 방법이지만, IMS 파라미터, 주변 환경, 이온 농도 등의 변화에 대응하기 어려운 문제가 있다. 또한, 검출 실패를 방지하기 위해서는 문턱값을 최대한 낮추어야 하며, 이 경우 오 검출율이 증가하는 문제점도 안고 있다. 따라서, 문턱값을 자동으로 설정하기 위해 공기중에 존재하는 기준 이온을 이용하는 방법이 최근 제안되었다[14]. 그러나, 컨테이너 환경에서 위험물질의 양이 변하면 이온 농도가 변하여 기준 이온과 위험물질 이온의 비가 달라지는 문제가 발생할 수 있다. 3절에서는 이와 같은 문제를 개선하기 위해 사전 잡음측정에 의한 적응 문턱값 설정과 다수결에 의한 판별 기법을 제안한다.

3. IMS 기반 위험물질 검출 기법

이 절에서는 IMS 장비의 출력신호를 이용하여 위험물질의 존재를 적응적으로 검출하는 알고리즘을 제안한다. IMS는 다양한 원리를 기반으로 DTIMS, TIMS, DMA 등 여러 종류로 나눌 수 있는데[5][9], 이 중 DTIMS는 이온이 균일한 전기장에서 대기를 통과하는데 걸리는 시간을 측정하는 기술이며, 본 논문에서는 DTIMS를 이용한 검출 기법을 제안한다.



(그림 2) IMS 기반 이온 검출 기법 블록도
(Figure 2) A block diagram for an IMS-based ion detection technique

3.1 기본 검출 기법

그림 2는 DTIMS 방식의 IMS 기반 위험물질 검출 기법의 전체 블록도를 나타내고 있다. 먼저 흡입 장치를 통해 입력된 물질은 이온화 장치에 의해 여러 성분의 이온으로 이온화 되고, 제어기로 주기가 조절되는 이온 셔터가 열리는 순간 전계에 의해 이동 채널을 통과하게 된다. 셔터가 최초로 열리는 시간을 $t=0$, 셔터가 열리는 주기를 T_{sh} 라고 정의한다. 이동 채널 말단의 이온 검출단에서는 전극에 도달한 이온에 의해 전압 변화 $v(t)$ 가 나타나며, 이를 샘플링하여 신호처리를 통해 이온의 도달 여부를 판단한다. l (은 0 이상의 정수)번째 셔터 주기의 시간 T_{sh} 동안 주기 t_s 로 샘플링 하여 N 개의 전압 샘플을 얻는다고 가정하면, 샘플링된 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(n, l) = v(nt_s + lT_{sh}), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3)$$

여기서 $N = T_{sh}/t_s$ 이고, n 은 정수이며, 양이온 검출을 가정하였다.

검출을 원하는 위험화물의 이온이 여러 종류인 경우, 압력, 온도, 이온 농도 등의 특정 조건의 사전 측정 환경에서 각 이온별로 이온 이동도, 전압이 최대가 되는 이온 도달 시간 및 최대 전압값을 미리 측정할 수 있다. 검출을 원하는 이온의 종류가 N_s 개인 경우, i ($i=1, 2, \dots, N_s$)번 이온의 최대 전압을 $v_{\max, i}^*$ 전압이 최대가 되는 샘플링 시간을 n_i^* 라고 하면, 전압은 $v(n_i^*, l) = v_{\max, i}^*$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 *은 사전 측정 환경에서 구한 값을 의미한다. 여기서 $v_{\max, i}^*$ 은 i 번 이온만이 존재하는 상황에서 IMS 장비가 오류 없이 검출해 낼 수 있는 최소 전압값을 나타낸다. 즉 i 번 이온의 농도가 낮거나 다른 원인이 발생하여 $v(n_i^*, l) < v_{\max, i}^*$ 인 경우에는 이온 검출이 불가

능할 수 있다. 또한, 임의의 검출 구간 동안 환경의 변화를 무시할 수 있다고 가정하면 사전 측정 환경에서의 i 번 이온의 최대값 검출 시간은 다음과 같이 J_n 주기에 대한 평균으로 구할 수 있다.

$$n^{i*} = \frac{1}{J_n} \sum_{l=0}^{J_n-1} n_l^{i*} \quad (4)$$

IMS 규격과 환경 파라미터를 미리 알고 있다면 이온 이동도 식에 의해 각 이온에 대한 n^{i*} 을 산술적으로 구하는 것도 가능하다. 표현을 간결하게 하기 위해 이후부터는 수식에서 i 를 생략하기로 한다. 즉, $n^{i*} = n^*$, $v_{\max,l}^{i*} = v_{\max,l}^*$ 로 표기한다.

일반적으로 공기중에는 검출을 원하는 물질 이외에 다른 물질이 존재하여 이온 검출 시 잡음의 역할을 하게 되므로 이에 대한 대처가 필요하다. 검출을 원하는 물질을 IMS에 주입하기 전에 먼저 주변 공기 주입을 통한 초기화 과정을 수행하여 잡음의 크기를 추정한다. 그림 3은 위험물질이 존재하지 않는 환경에서 측정한 IMS의 출력 전압을 나타낸다. 그림 3(a)에서 공기 중에 다수 존재하면서도 검출하려는 위험물질에 대응하지 않는 질소와 같은 별개의 이온 신호인 반응물 이온 피크(Reactant Ion Peak: RIP)와 잡음들이 존재함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 3(b)는 위험 물질인 RDX가 존재할 때의 환경에서 측정한 IMS의 출력 전압을 나타낸다. 그림을 통해 위험물질이 존재하는 환경에서 출력 전압이 변화하는 것을 알 수 있다. RIP의 위치는 사전에 알 수 있으므로 쉽게 제거할 수 있으나 잡음의 영향을 무시할 수 없으므로 잡음과 이온 반응 전압을 구분할 수 있는 방안이 필요하다.

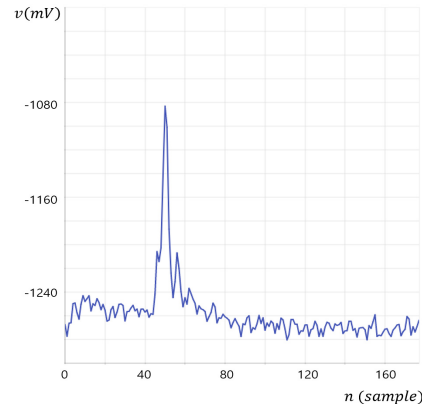
각 이온의 n^* 에 대해 $v(n^*, l)$ 을 J_z 주기 평균하면 공기 중 물질에 의한 평균잡음레벨을 구할 수 있다.

$$z^* = \frac{1}{J_z} \sum_{l=0}^{J_z-1} v(n^*, l) \quad (5)$$

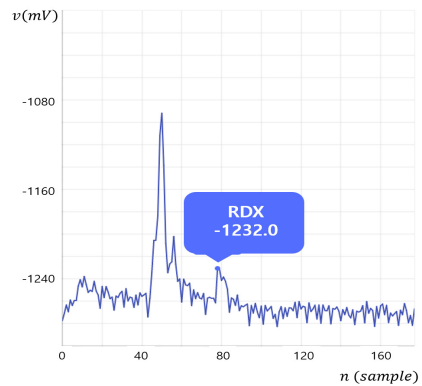
컨테이너 내부에 대한 실제 검출 단계에서는 각 이온에 대해 수식 5를 기준값으로 설정하여 이보다 큰 값이 검출될 경우 이온이 존재하는 것으로 판단하면 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_i = \begin{cases} 1, & \text{if } v(n^*, l) > \alpha z^* \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $I_i = 1$ 은 이온이 검출되었음을, $I_i = 0$ 은 불검출



(a) 위험물질 없는 공기



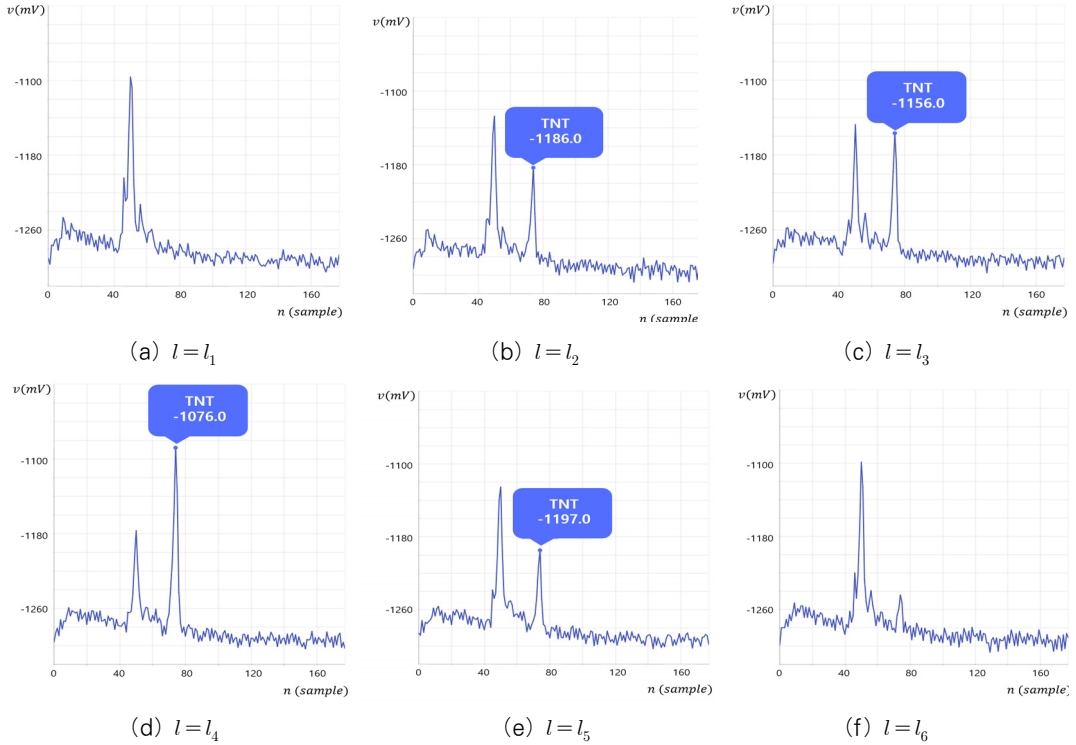
(b) RDX가 존재하는 공기

(그림 3) IMS 출력 비교

(Figure 3) A comparison of IMS outputs

을 나타낸다. 또한, α 는 $\alpha > 1$ 인 실수이며, 실험에 의한 경험으로 얻을 수 있다.

α 는 작을수록 이온을 검출할 확률이 향상되어 FRR(False Rejection Rate)이 감소하지만, 잡음이나 유사한 이동도를 갖는 이웃 이온의 간섭에 의해 FAR(False Acceptance Rate)이 증가할 수 있으므로 시스템의 요구사항에 적합하게 조절할 필요가 있다. $\alpha \approx 1$ 인 경우 FRR이 매우 낮아 대부분의 위험물질을 검출하는 것이 가능하다. 그러나, FAR이 매우 높아 불필요한 정밀 조사를 수시로 수행해야 하는 번거로움이 발생한다. $\alpha \gg 1$ 인 경우 FAR은 낮출 수 있으나, FRR이 증가하여 이온 검출에 실패할 확률이 높다. 이 경우에는 컨테이너 내부의 공기를 흡입하기 전에 컨테이너 외부에서 초기화 과정을 통해 α 를 변화시키면서 FRR과 FAR을 비교하여 시스템이



(그림 4) 주기에 따른 TNT의 최대 전압 비교 ($l_1 < l_2 < l_3 < l_4 < l_5 < l_6$)

(Figure 4) Maximum voltage comparison of TNT as a function of periods ($l_1 < l_2 < l_3 < l_4 < l_5 < l_6$)

요구하는 FRR과 FAR을 만족시키는 α 를 구하면 된다.

그런데, 그림 4를 통해 알 수 있듯이 특정 위험물질이 존재해도 전압의 최대값 $v_{\max,l}$ 은 특정한 주기에서만 나타나는 것이 아니라, 물질이 주입되어 이온화가 시작되는 시점부터 이온이 모두 사라지기까지의 여러 주기에 걸쳐 증가하고 감소하는 현상을 보이게 된다. 즉 $v(n^*,l) > \alpha z^*$, $l_I \leq l \leq l_F$ 가 발생할 수 있다. 여기서 l_I 와 l_F 는 각각 $I_l = 1$ 이 시작되는 순간의 주기와 끝나는 순간의 주기를 나타낸다. 이 때 증가-감소 주기는 물질에 따라 다르다. 따라서, 하나의 주기에 대한 I_l 만을 단독으로 이용해서 최종 이온 검출 여부를 판정하지 않고 여러 주기에 걸친 I_l 을 이용하면 검출 성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 결국, 최종 판정은 다음과 같이 이루어진다.

$$I = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{N_T} \sum_{l=l_I}^{N_T-1} I_l > \Gamma \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 N_T 는 주기 수, Γ ($0 < \Gamma < 1$)는 판정 기준을 나타내며, 모두 이온의 종류에 따라 다른 값을 가질 수 있다. l_F 를 정확히 알기 어려우므로 실험을 통해 각 이온마다 적절한 N_T 를 구해야 한다.

3.2 개선된 검출 기법

그런데, 실제 컨테이너 환경에서는 사전 측정 환경과 온도, 기압, 이온 농도 등이 다를 수 있으므로 이온 이동도에 차이가 나타날 수 있다. 실제 환경에서 최대 전압값과 샘플링 시간을 각각 $v_{\max,l}$ 과 n_l 이라고 하면, $v_{\max,l} = v_{\max}^* + \Delta v_l$ 과 $n_l = n^* + \Delta n_l$ 이 되어 검출시 성능이 감소할 수 있다. 즉, Δv_l 에 의해 $v(n^*,l) < v_{\max}^*$ 이 될 수 있고, Δn_l 에 의해 $v(n^*,l) < v_{\max}^*$ 또는 $v(n^*,l) > v_{\max}^*$ 일 수도 있다. 최대값 샘플 시간이 변경되어 여기서 Δv_l 과 Δn_l 은 각각 최대값 오차와 시간 오

Algorithm 1 Proposed detection algorithm for the i -th ion

Input: Voltage signal samples $v(n, l)$

Output: Ion detection indicator I

Parameters: Noise threshold α , window size W , detection period N_T , decision threshold Γ

Define: T_{ion} as a set of l while the i -th ion exists, T_{noise} as a set of l while only noise exists, and $T_{ion} \cap T_{noise} = \emptyset$

Set $\alpha = 1$, $W = 0$, $N_T = 1$, $\Gamma = 0.5$

Stage 1: Initial noise level estimation with known ions

for $l \in T_{ion}$

 Find sampling time \hat{n}_l maximizing $v(n, l)$

 Find the average of \hat{n}_l , resulting in \hat{n}

for $l \in T_{noise}$

 Estimate average noise level z^* for \hat{n}

return \hat{n} , z^*

Stage 2: Initialization of detection parameters known ions

for $l \in T_{ion}$

 Find α , N_T , Γ maximizing detection performance on I

if the detection performance satisfies the system requirement

return \hat{n} , α , N_T , Γ , W

else

$W \leftarrow W + 1$

go to Stage 1

Stage 3: On-line detection in a container

for $l \in T_{ion}$

$I_l \leftarrow [\text{sign}\{v(\hat{n}, l)\} - \alpha z^* + 1] / 2$

 Calculate I according to (7)

return I

(그림 5) i 번째 이온 검출 알고리즘

(Figure 5) The detection algorithm for the i -th ion

차를 나타내는 확률 변수로 모두 평균이 0이고, 각각의 분산이 $\sigma_{\Delta v}^2$ 과 $\sigma_{\Delta n}^2$ 이라고 할 수 있다. 수식 7의 N_T 가 작은 경우에는 환경 변화를 무시할 수 있다고 가정할 수 있으므로 $\Delta n_l \simeq \Delta n$, $\Delta v_l \simeq \Delta v$ 로 표현할 수 있다. 사전 측정 환경과 실제 컨테이너의 환경 조건이 동일하지 않은 경우에는 $\Delta v \neq 0$ 과 $\Delta n \neq 0$ 이 된다. 또한, 검출 단계에서 개폐 시작 시간 $t = 0$ 을 모르는 비동기 방식이거나 개폐 주기 T_{sh} 에 오차가 발생하는 경우에도 이와 같은 현상이 발생할 수 있다. 이온 이동도가 유사한 이온들이 존재할 경우 서로 다른 종류의 이온들이 유사한 시간에 검출단에 도달하게 되어 간섭을 야기하므로 마찬가지로 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 실제 환경에서는 이를 극

복할 수 있는 개선된 검출 방법이 필요하다.

먼저, $\Delta n \neq 0$ 인 경우에 대하여 알아본다. 이 경우에는 n^* 을 중심으로 일정한 크기를 갖는 윈도우를 설정하여 그 구간내에서 전압 검출을 시도한다. 동일한 이온인 경우에도 모든 이온이 동일한 시간에 전극에 도달하여 임펄스 모양을 나타내는 것이 아니라 시간차를 두고 도달하게 된다. 그 결과 전압의 파형은 최대값을 중심으로 좌우로 비대칭 감소하는 형태를 나타내며, 이 때 파형의 분산은 이온의 종류에 따라 다르므로 윈도우의 크기도 이온마다 다를 수 있다. 윈도우의 크기가 분산에 비해 작을 경우 최대값을 벗어날 가능성이 있으며, 큰 경우에는 이웃 이온의 파형을 포함할 수 있으므로 적절한 값을 찾아야 한다. 윈도우의 크기가 $2W + 1$ (W 는 윈도우 길이

로 0 이상의 정수이며, 이온에 따라 다른 값을 가짐)라고 하면, 먼저 그 구간 내에서 다음과 같이 최대값을 갖는 샘플링 시간을 찾는다.

$$\hat{n}_l = \max_{n \in N_W} v(n, l) \quad (8)$$

여기서 $N_W = \{n^* - W, \dots, n^*, \dots, n^* + W\}$ 이다. 수식 2와 마찬가지로 수식 8도 $\hat{n}_l = \hat{n}$ 으로 표현할 수 있다. 그러면, 수식 6은 다음과 같이 변경된다.

$$I_l = \begin{cases} 1, & \text{if } v(\hat{n}, l) > \alpha z^* \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

수식 9를 수식 7에 대입하면 이온 존재 여부에 대한 최종 판정을 내릴 수 있다. 지금까지 설명한 검출 알고리즘을 그림 5에 pseudocode로 정리하여 나타내었다.

다음으로 $\Delta v \neq 0$ 인 경우에는 3.1절에서 $v_{\max, l}^*$ 가 시스템이 검출할 수 있는 최소 이온 농도의 전압값이라고 하였으므로 $\Delta v > 0$ 인 경우에는 검출 성능 저하가 발생하지 않는다. 그러나, $\Delta v < 0$ 인 경우에는 최소 검출값 이하로 전압이 감소하여 검출이 불가능하게 되며, 이는 문턱값 검출 방식에서는 극복하기 어려운 현상이므로 별도의 검출 기술이 필요하다.

4. 결 론

IMS 장비를 활용하여 위험물질을 검출하는 방법을 제안하였다. 검출 성능 향상을 위해 이온 도달 시간을 알고 있다는 가정하에 초기화 과정의 잡음값을 이용한 적응형 기준값을 사용함으로써 환경 변화에 강인한 검출 알고리즘을 제안하였다. 또한, 잡음에 의한 이온 도달 시간 변동에 대응하기 위해 윈도우 기반 최대값 검출 기법을 제안하였다. 향후 연구에서는 실험실과 실제 컨테이너에서 다양한 마약 및 폭발물 시료 데이터를 확보하여 본 논문에서 제안한 검출 기술의 검출 성능을 정량적으로 분석할 계획이다. 또한, 여러 종류의 이온이 동시에 존재하는 경우에 이온간 간섭(Inter-Ion Interference)에 의한 성능 열화를 방지할 수 있는 기술도 연구할 계획이다.

참고문헌(Reference)

[1] Government, "Announcement of Comprehensive Measures for Narcotics Management in 2022," 2021. https://www.mfds.go.kr/brd/m_99/view.do?seq=45962&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=6

[2] Government, "Crackdown on the Distribution of Drugs in Daily Life," 2021. https://www.mfds.go.kr/brd/m_1084/view.do?seq=12&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=1

[3] Government, "We will Make Korea Safe from Drugs!," 2021. https://www.mfds.go.kr/brd/m_99/view.do?seq=45002&srchFr=&srchTo=&srchWord=%EB%A7%88%EC%95%BD&srchTp=0&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&Data_stts_gubun=C9999&page=4

[4] D. Kim, S. Cho, K. Park, and K. Kwon, "IMS based Container Hazardous Material Data Management System Design," Academic Presentation Contest of Korean Society for Internet Information in Autumn, Vol. 21, No. 02, pp. 375-376, 2020. www.cseric.or.kr

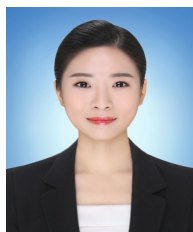
[5] A. E. Ashcroft and F. Sobott, Ion Mobility-Mass Spectrometry: Fundamentals and Applications, pp. 1-25, Royal Society of Chemistry, 2021. <https://doi.org/10.1039/9781839162886>

[6] T. Keller, A. Keller, E. T.-Bauer, and F. Monticelli, "Application of Ion Mobility Spectrometry in Cases of Forensic Interest," Forensic Science International, Vol. 161, Issues 2-3, pp. 130-140, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.03.032>

[7] K. C. To, S. B.-Jaber, and I. P. Parkin, "Recent Developments in the Field of Explosive Trace Detection," ACS Nano, Vol. 14, No. 9, pp. 10804-10833, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01579>

- [8] P. Madhusudhan and M. M. Latha, "Ion Mobility Spectrometry for the Detection of Explosives," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2, Issue 10, pp. 1369-1372, 2013.
<https://www.ijert.org/ion-mobility-spectrometry-for-the-detection-of-explosives>
- [9] J. N. Dodds and E. S. Baker, "Ion Mobility Spectrometry: Fundamental Concepts, Instrumentation, Applications, and the Road Ahead," J. Am. Soc. Mass Spectrom., Vol. 30, No. 11, pp. 2185-2195, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s13361-019-02288-2>
- [10] R. Cumeras, E. Figueras, C. E. Davis, J. I. Baumbach, and I. Gràcia, "Review on Ion Mobility Spectrometry. Part 1: Current Instrumentation," Analyst, Vol. 140, pp. 1376-1390, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1039/c4an01100g>
- [11] R. F.-Maestre, "Ion Mobility Spectrometry: History, Characteristics and Applications," Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, Vol. 15, No. 2, pp. 467 - 479, 2012.
<http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.848>
- [12] V. Gabélica and E. Marklund, "Fundamentals of Ion Mobility Spectrometry," Curr. Opin. Chem. Biol., Vol. 14, pp. 51-59, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.10.022>
- [13] J. R. Verkouteren, G. Gillen, R. M. Verkouteren, R. A. Fletcher, E. S. Etz, G. A. Klouda, A. A. Fatah, and P. J. Mattson, IMS-based Trace Explosives Detectors for First Responders, National Institute of Standard and Technology, 2005.
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7240.pdf>
- [14] H. Ju, D. Kim, S. Cho, K. Park, Y. Kim, W. Jeon, and K. Kwon, "IMS-based Real-time Narcotics and Explosives Detection Scheme for Shipping Containers," Academic Presentation Contest of Korean Society for Internet Information in Autumn, Vol. 22, No. 02, pp. 197-198, 2021.
www.eiric.or.kr

● 저 자 소 개 ●



주 희 송(Heesong Ju)

2017년 서울여자대학교 공예학과(학사)
 2020년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 연구원
 관심분야 : 데이터 베이스
 E-mail : jhscm0335@keti.re.kr



김 동 현(Donghyun Kim)

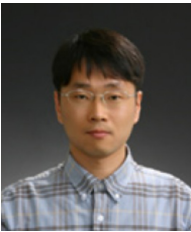
2015년 한신대학교 정보통신공학과(공학사)
 2017년 한신대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사)
 2015년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 연구원
 관심분야 : 임베디드 시스템
 E-mail : ditel89@keti.re.kr

◎ 저 자 소 개 ◎



조 성 윤(Sungyoon Cho)

2006년 연세대학교 전기전자공학과(공학사)
2008년 연세대학교 대학원 전기전자공학과(공학석사)
2013년 연세대학교 대학원 전기전자공학과(공학박사)
2013년~2020년 삼성전자 시스템 LSI사업부 책임연구원
2020년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 책임연구원
관심분야 : 5G/6G 통신시스템, 적응적 신호처리, 딥러닝
E-mail : sycho@keti.re.kr



박 경 원(Kyungwon Park)

1999년 중앙대학교 전기공학과(공학사)
2001년 중앙대학교 대학원 전자전기공학부(공학석사)
2005년 중앙대학교 대학원 전자전기공학부(공학박사)
2005년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 책임연구원
관심분야 : 무선/유선 통신 시스템
E-mail : kwpark@keti.re.kr



김 양 섭(Yangseob Kim)

1997년 중앙대학교 컴퓨터공학과(공학사)
1999년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
2008년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
2005년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 책임연구원
관심분야 : 데이터베이스
E-mail : likant@keti.re.kr



전 원 기(Wongi Jeon)

1994년 중앙대학교 전자공학과(공학사)
1996년 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1999년 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
1999년~2001년 중앙대학교 BK21 계약교수
2001년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 수석연구원
관심분야 : 융합신호처리, 차세대통신
E-mail : jeonwg@keti.re.kr



권 기 원(Kiwon Kwon)

1997년 광운대학교 컴퓨터공학과(공학사)
1999년 광운대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
2011년 중앙대학교 대학원 전자전기공학부(공학박사)
1999년~현재 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터 센터장
관심분야 : 디지털트윈, 유무선디지털통신시스템, 해양수산ICT융합
E-mail : kwonkw@keti.re.kr