

## 원거리 화학영상탐지시스템의 시야각에 대한 연구

이종민<sup>\*,1)</sup> · 강영일<sup>1)</sup> · 김주현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

### A Study on the Field of View of the Remote FTIR Chemical Imaging Detection System

Jong-Min Lee<sup>\*,1)</sup> · Young-Il Kang<sup>1)</sup> · Ju-Hyun Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 16 October 2013 / Revised 23 December 2013 / Accepted 17 January 2014)

#### ABSTRACT

Remote fourier transform infrared(FTIR) chemical imaging detection system allows detection and identification of gases in the atmosphere from long distances. In this paper, the appropriate field of view(FOV) of the FTIR imaging system was examined and the main performance of the system for the interferometer was described. For the determination of the FOV, simulations of gas dispersion range were performed with the NBC reporting and modeling software(NBC-RAMS) developed by ADD. As a result, minimum 192 mrad of FOV was required for the remote FTIR imaging system to visualize chemical warfare agents dispersed in several hundred meters. At the same time, 0.75 mrad of instantaneous field of view(IFOV) for a linear interferometer proper to take a FOV for the chemical agent imaging.

Key Words : FTIR Chemical Imaging Detection System(푸리에변환 적외선 분광 화학영상탐지시스템), Remote Sensing(리모트 센싱), Interferometer(간섭계)

#### 1. 서론

최근 북한의 도발 가능성과 국내의 유해가스 누출 사고 등으로 환경에 대한 경각심이 증대되면서 원거리에서 실시간으로 대기 환경오염의 모니터링 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 유해가스나 화학 오

염운의 탐지와 그 구성성분의 분별 및 공간적인 분포 분석을 위하여 원거리에서 오염 확산의 실시간 감시와 오염수준의 매핑이 가능한 원거리 화학 오염을 영상화 장치 개발이 시급히 요구되는 실정이다.

지난 수십 년간 실험실 환경에서만 사용되어져 왔던 분광기술이 주변기기의 기술향상으로 야외 환경에서도 운용 가능하게 됨에 따라 유해가스 누출사고, 환경오염 모니터링 및 화생방 테러 대비책으로 원거리에서 조기 경보가 가능한 장비의 수요 증가와 관심

\* Corresponding author, E-mail: jminlee@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

이 증가되고 있다. 특히 화학무기는 적은 비용과 소량으로 막대한 인명피해를 줄 수 있는 무기이기 때문에 오염 가능지역 뿐만 아니라 많은 인원이 밀집해 있는 장소를 실시간으로 모니터링 하는 기술이 필요하다.

푸리에변환 적외선 분광 분석법은 원거리에서 대기 중의 오염물질이나 화학 독성가스를 정성 및 정량적으로 분석하여 탐지할 수 있는 방법 중의 하나이다<sup>[1]</sup>. 특히 화생방 상황 발생 시 원거리에서 화학작용제 운을 탐지하고 조기에 경보를 제공하여 인원을 보호할 수 있는 전장 감시 장비로 운용이 가능하다.

현재까지 개발된 수동형 원격 화학탐지기술은 단일 적외선 검출기를 사용하기 때문에 한번 측정 시 한 점 또는 영역의 정보만을 탐지하여 제공한다. 따라서 오염운의 분포 정보를 획득하기 위해서는 스캐너를 사용하여 공간적인 정보를 순차적으로 얻어야만 한다. 이로 인해 유동성을 갖는 오염운의 실시간 분포를 파악하는데 어려움이 있으며, 주사 영역에 대한 공간 분해능이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 이에 비해 초점면 배열 검출기(FPA : Focal Plane Array)를 사용하는 초분광 영상화 기술은 오염운의 정보를 실시간으로 동시에 획득이 가능한 진보된 첨단 기술이라 할 수 있다. 원격 화학탐지용 초분광 영상화 기술은 수동형 FTIR 분광기술을 기반으로 화학전에서 발생하는 독성 화학가스운의 식별 및 분포에 대한 정보를 실시간으로 영상화하여 모니터링이 가능하다. 현재 적외선 초분광 영상화 기술은 선진국에서 많은 연구가 수행 중에 있다<sup>[2,3]</sup>.

원거리에서 화학 오염운을 영상화하고 오염 확산의 실시간 감시를 위해서는 오염운의 크기 분석과 이를 탐지할 수 있는 시스템의 시야각 설계가 중요하다.

이에 따라 본 연구에서는 화생방 오염예측 모델인 NBC Reporting and Modeling Software(NBC-RAMS)를 적용하여 화학전에 대표적으로 쓰이는 작용제인 사린과 증류겨자의 오염운 크기를 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 화학 상황 발생 시 광역으로 화학작용제 운을 영상화 탐지 할 수 있는 원거리 화학영상탐지시스템의 적정 시야각과 그에 따른 시스템의 주요 성능지수인 Noise Equivalent Differential Temperature(NEDT, 잡음등가온도차)에 대해 알아보았다.

## 2. NBC-RAMS 모의실험 결과

### 2.1 사린에 의한 화학사건 모의실험 결과

NBC-RAMS는 국방과학연구소에서 개발한 것으로 적의 화생방 공격에 신속히 대응하기 위해 화생방 보고관리 기능과 모델링 기능을 통합하여 효율적인 화생방 작전통제를 지원하기 위한 시스템이다. NBC-RAMS를 이용하여 화학사건을 고려한 대기 확산 정보를 통해 원거리 화학영상시스템이 가져야 할 적정 시야각을 알아보았다. 원거리 화학영상시스템은 화생방 상황 시 최대한 조기에 감지하고, 그 확산 이동 경로를 파악하여 2차의 피해를 예방함과 동시에 오염이 예상되는 지역의 인원을 대피시키는 데에 그 목적이 있다. 따라서 화학사건 발생 모의 실험시 오염운의 방향 이동경로를 중심으로 확산실험을 수행하였다.

Table 1은 NBC-RAM에서의 화학사건 및 기상에 대한 모의실험 조건을 나타낸 것이다.

배출조건으로 자탄형 SCUD(D)에 의해서 사린이 2.8 kg 탑재된 100개의 자탄이 투발된 것으로 가정하였고, 기상정보는 지상 2m 고도에서 풍향이 서풍이고, 풍속은 한반도 최근 3년간의 평균풍속을 고려하여 2m/s인 경우를 가정하였다.

Table 1. Simulation condition of sarin chemical warfare

작 용 제		사린(GB)
탑재 질량		2.8kg
무 기 정 보	투발수단	SCUD(D) 자탄형
	자 탄 수	100개
	폭발고도	0m
기 상 정 보	풍 향	서풍
	풍 속	2m/s

Fig. 1과 2는 화학작용제인 사린이 배출된 후 10분, 30분 경과후의 사린 농도 변화에 대한 각각의 확산모델 결과를 나타낸 것이다.

농도 0.200mg/m<sup>3</sup>의 수치는 급성노출 농도지표 수준을 나타내는 AEGL(Acute Exposure Guideline Levels)에서 AEGL-3\_30min의 수준이다. AEGL-3\_30min은 30분 노출시 신체에 치명적 이상 또는 사망에 이를 수 있는 농도 수준으로 이농도 이상에서는 보호 장비 미착

용시 전투력에 치명적 영향을 끼칠 수 있게 된다.

화학사건 발생 후 10분이 경과되었을 때  $0.200\text{mg}/\text{m}^3$ 의 농도를 가지는 오염운의 크기는 약  $1,600\text{m}$ 이며 30분 경과 후에는 약  $1,100\text{m}$ 이다.

농도  $0.083\text{mg}/\text{m}^3$ 의 수치는 AEGL-2\_10min으로 10분 노출 시 신체에 회복 불가능한 심각한 이상을 초래하는 농도수준으로 이농도 이상에서는 보호 장비 미착용시 전투력에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 농도  $0.034\text{mg}/\text{m}^3$ 의 수치는 AEGL-2\_1hr의 농도수준이다.

화학사건 발생 후 10분과 30분 경과되었을 때 농도가  $0.083\text{mg}/\text{m}^3$ 인 화학 오염운의 직경은 각각 약  $1,900\text{m}$ 와  $3,000\text{m}$ 이다.

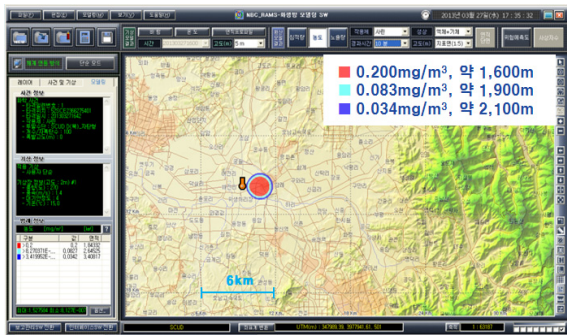


Fig. 1. Simulation result of sarin concentration after 10 minutes

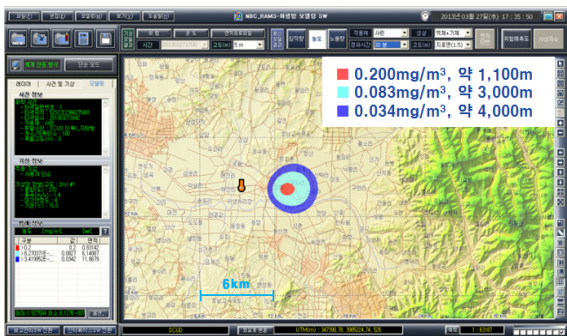


Fig. 2. Simulation result of sarin concentration after 30 minutes

Fig. 3은 화학사건 발생 후 사린의 노출량 확산을 예측한 것이다. 화학작용제의 노출량 LCt90은 작용제 증기 또는 에어로졸 환경에서 보호 장비 미착용 개인에 대해 90% 치사율을 나타내는 노출량= 농도( $\text{g}/\text{m}^3$ ) × 시간(min) 량]으로 보호 장비 미착용시 노출 작용제

농도 × 체류시간 값이 이 수치 이상이면 90% 이상 사망하게 된다. LCt50은 작용제 증기 또는 에어로졸 환경에서 보호 장비 미착용 개인에 대해 50% 치사율을 나타내는 노출량이다. ICt50은 작용제 증기 또는 에어로졸 환경에서 보호 장비 미착용 개인에 대해 50% 무능화율을 나타내는 노출량이다. 사건 발생 후 LCt90, LCt50, ICt50에 해당하는 노출량의 크기는 각각 약  $700\text{m}$ ,  $720\text{m}$ ,  $780\text{m}$ 이다.

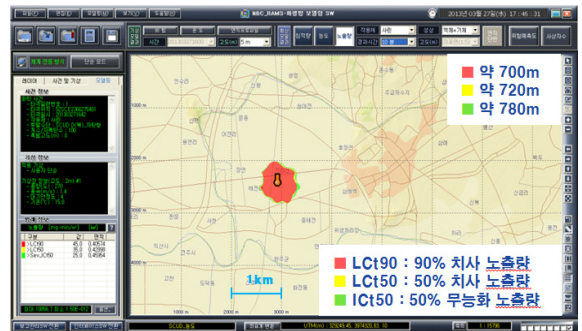


Fig. 3. simulation result of sarin exposure value

### 2.2 증류겨자에 의한 화학사건 모의실험 결과

Table 2는 증류겨자에 의한 화학사건 및 기상에 대한 모의실험 조건을 나타낸 것이다. 벌크형인 SCUD(B)에 587kg의 증류겨자가 투발된 것으로 가정하였고, 기상정보는 풍향은 서풍이고 풍속이 2m/s로 사린에 의한 화학사건과 동일한 기상조건으로 가정하였다.

Table 2. Simulation condition of sulfur mustard chemical warfare

작용제		증류겨자(HD)
탑재 질량		587kg
무기 정보	투발수단	SCUD(B) 벌크형
	개 수	1발
	폭발고도	100m
기상 정보	풍 향	서풍
	풍 속	2m/s

Fig. 4, 5는 화학사건 발생후 10분과 30분이 경과된 후의 농도를 예측한 것으로 사건 발생 10분 경과후  $0.200\text{mg}/\text{m}^3$ 의 농도를 가진 오염운의 크기는 약  $1,500\text{m}$

이고, 농도  $0.034\text{mg}/\text{m}^3$ 의 오염운의 크기는 약 2,300m이다. 사건 발생 30분 경과후의 오염운의 크기는 농도가  $0.200\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $0.083\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $0.034\text{mg}/\text{m}^3$ 인 경우 각각 약 960m, 1,640m, 2,540m이다.

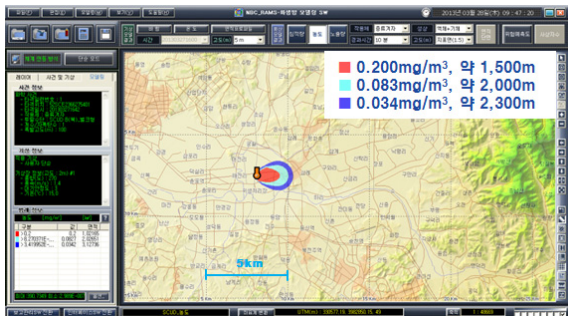


Fig. 4. Simulation result of sulfur mustard concentration after 10 minutes



Fig. 5. Simulation result of sulfur mustard concentration after 30 minutes

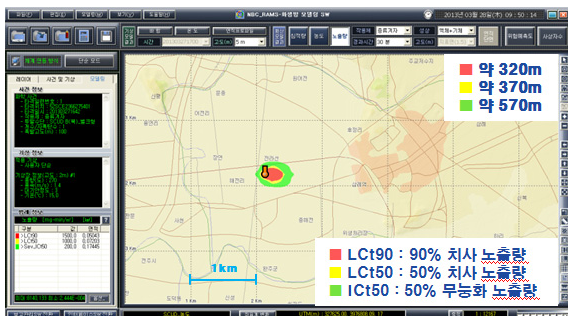


Fig. 6. simulation result of sulfur mustard exposure value

한편 Fig. 6에서와 같이 노출량의 경우, 사건 발생 후 90% 치사 노출량의 크기는 약 320m, 50% 치사 노

출량의 크기는 약 370m, 50% 무능화 노출량의 크기는 570m이다.

증류겨자가 사린에 비해 침적속도가 약 3배정도 더 크기 때문에 증류겨자 화학 사건후 30분이 경과되었을 때의 오염운 크기는 사린에 비해 확산이 크지 않다고 판단된다.

이상은 NBC-RAMS를 적용하여 화학공격 종류에 따른 오염운의 농도 변화와 그 크기에 대한 검토 결과로 화학 오염운 크기는 상황에 따라 수백 미터 이상이 됨을 확인하였다.

### 3. 시스템 시야각 및 시스템 간섭계 비교

#### 3.1 시스템 시야각

시야각(FOV : Field of View)은 광학계에 의해 관측할 수 있는 범위로 입사동의 중심이 관측창의 지름에 대한 각도이고, 순시 시야각(IFOV : Instantaneous Field of View)은 검출기 단위 픽셀이 보는 시야각이다.

Fig. 7은 원거리 화학영상탐지시스템의 시야각을 나타내는 개념도이다. 여기서 F는 시스템 결상 광학계의 유효 초점거리이고, d는 초점면 배열 검출기의 직경으로 픽셀크기 a를 픽셀 개수만큼 곱한 값이다. 시야각은 검출기 직경을 초점거리로 나눈 값이고, 순시 시야각은 픽셀크기를 초점거리로 나눈 값이다.

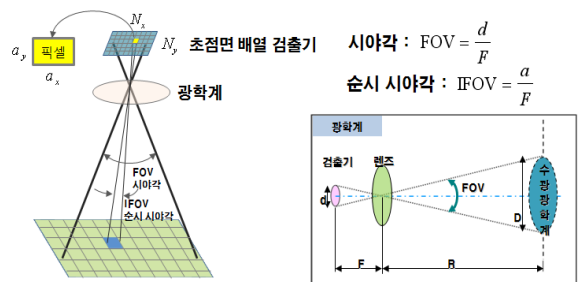


Fig. 7. FOV of the remote chemical imaging detection system

예로 순시 시야각이  $0.35\text{mrad}$ 이고 검출기 픽셀크기가 128픽셀인 경우에는 시야각은  $44.8\text{mrad}$ 이므로 거리 1km에서 탐지할 수 있는 오염운 크기는 44.8m이고 3km에서는 134.4m, 5km에서는 224m가 된다. 이 경우 앞 절에서 분석된 오염운 크기를 적용할 때 시야각 전체를 오염운이 가득 채우기 때문에 오염운의 이동

방향 및 경로의 예측에 어려움이 있다. 한편 순시 시야각이 0.75mrad이고 검출기 픽셀크기가 256픽셀인 경우 시야각이 192mrad이므로 5km에서는 960m까지 오염운을 영상으로 탐지할 수 있다.

오염운을 영상화하기 위해서는 물론 시스템 시야각의 크기가 크면 클수록 좋지만 시야각의 증가에 따라 수광되는 빔의 크기도 비례하여 증가하기 때문에 간섭계의 광부품과 광경로상에 간섭이 생겨서 시스템 크기와 중량이 커질 수밖에 없게 된다. 또한, 좁은 시야각으로 제한되어 있으면 광역 탐지를 위해서 방위각 변화를 주는 별도의 장치가 필요하게 되어 운용 환경에 제한을 두게 된다. 따라서 화생방 상황 발생 시 화학 오염운의 크기를 고려할 때 원거리에서 수백 미터 이상의 화학 오염운을 광역으로 영상화하기 위해서는 192mrad급의 시야각이 적절한 것으로 판단된다.

3.2 시스템 간섭계 비교

FTIR 기반의 원거리 화학영상탐지시스템은 통상 마이켈슨 형 간섭계를 사용하는데 마이켈슨 형 간섭계는 신호광을 두개로 분할하여 두 빔간의 광경로차에 의해 발생하는 간섭신호를 얻는 방식이다. 마이켈슨 간섭계는 형태에 따라 회전형과 선형으로 구분된다.

Fig. 8은 회전형 간섭계와 선형 간섭계의 형태를 나타낸 것으로 회전형 간섭계는 회전판의 회전에 따라 광경로차를 발생시키는 간섭계이고, 선형 간섭계 회전판 대신 이동거울을 사용하여 광경로차를 발생시키는 간섭계이다.

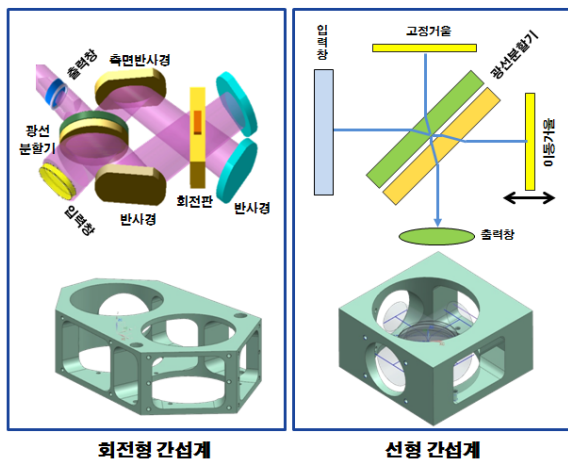


Fig. 8. Configuration of rotary and linear type interferometer

회전형 간섭계는 광경로를 결정하는 모든 광학요소들이 고정되어 있어서 외부의 진동이나 충격 등에 견고하지만 선형 간섭계에 비해 같은 시야각 기준 광경로 길이가 길고 광학요소들이 커질 수 있다. 반면 선형 간섭계는 이동거울의 선형운동이 진동, 충격 등 외부 환경에 민감하기 때문에 정밀한 광축 정렬 기술이 요구된다.

Table 3은 회전형 간섭계와 선형 간섭계의 크기 비교를 나타낸 것으로 앞 절의 분석 결과인 수백 미터 이상의 오염운의 영상화 탐지를 위한 시야각이 192 mrad인 경우에 대해서 계산하였다. 표에서 알 수 있듯이 간섭신호 발생을 위한 최소 광경로 길이는 선형 간섭계가 회전형 간섭계보다 6.8배 짧다. 그 결과 간섭계 크기는 선형 간섭계가 회전형 간섭계에 비해 가로와 세로에서 각각 4.6배, 2배 작게 되어 크기와 중량의 제한이 있는 환경에 유리하다. 따라서 유리한 선형 간섭계를 적용한다면 영상화 탐지를 위한 192mrad의 시야각 확보가 가능하리라 판단된다.

Table 3. Size comparison of rotary and linear type interferometer

구 분	회전형 간섭계		선형 간섭계	
광집속렌즈	Φ25.0mm		Φ25.0mm	
반사경	측면 반사경	Φ170.0 mm	고정 반사경	Φ32.1 mm
	후면 반사경	Φ73.7 mm	이동 반사경	Φ32.1 mm
광선분할기 / 보상판	Φ170.0mm		Φ55.1mm	
회전판	Φ126.6mm		-	
입력창	Φ124.0mm		Φ39.3mm	
최소 광경로	1057.7mm		155.9mm	
크 기 (가로×세로)	484.7mm × 212mm		104.5mm × 104.5mm	

4. 간섭계에 따른 시스템의 NEDT 비교

FTIR 간섭계의 성능 지수는 광신호의 잡음과 전자 신호 잡음이 결합된 총체적인 잡음인 NEDT의 특성이

중요한 성능지수가 된다. 또한, 온도차에 의한 분광신호는 밝기온도 또는 플랑크 복사로 각각 표현이 가능한데, 측정결과와 표현 방법에 따라 다른 잡음지수로서 Noise Equivalent Spectral Radiance(NESR, 잡음등가복사량)로도 표현되기도 한다.

NESR은 시스템이 감지하는 복사선의 최소 변화량으로 시스템 잡음과 같은 수준의 복사 변화량으로 정의된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다<sup>4,5)</sup>.

$$NESR(\nu) = \frac{L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low})}{SNR(\nu)} \quad (1)$$

SNR을 신호크기와 잡음크기의 비율로서 표현하면 다음과 같다.

$$SNR = \frac{(L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low}))\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}D^*\xi}{A_D^{1/2}} \quad (2)$$

SNR 표현을 관계식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$NESR(\nu) = \frac{(A_D)^{1/2}}{D^*\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}\xi} \quad (3)$$

- $A_D$  : 검출기 면적
- $D^*$  : 검출기 감도(detectivity)
- $\Theta$  : 광학계의 광배출율(optical throughput)
- $\Delta\nu$  : 분광분해능
- $t$  : 측정 시간
- $\xi$  : 시스템 간섭계 투과효율

NEDT는 최소 분해 가능한 온도 차이이므로 온도차이가 NEDT 이상인 복사 신호 크기 차이가 NESR이 되며, 이때는 SNR이 1이 될 때의 상호 관계식에서 상호 변환이 가능하다. 여기서 NEDT가 충분히 작다고 가정하면, NESR과 NEDT는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$NESR(\nu) = L(\nu, T + NEDT) - L(\nu, T) \approx \left| \frac{\partial L}{\partial T} \right| \cdot NEDT(\nu) \quad (4)$$

$$NEDT(\nu) = \frac{NESR(\nu)}{\left| \frac{\partial L}{\partial T} \right|} \quad (5)$$

위로부터 얻은 식으로부터 시스템 설계변수를 적용하면 각각의 NESR, NEDT 값을 이론적으로 계산할 수 있다. 시스템의 시야각 및 순시 시야각을 각각 192mrad, 0.75mrad으로 가정하고 이론적으로 계산된 회전형 및 선형 간섭계의 NESR, NEDT 값은 Table 4와 같다.

Table 4. NEDT comparison of rotary and linear type interferometer

파라미터	단 위	회전형 간섭계	선형 간섭계
광학배출	sr · cm <sup>2</sup>	2.17×10 <sup>-6</sup>	2.17×10 <sup>-6</sup>
간섭계 투과효율	-	0.24	0.31
검출기 면적	cm <sup>2</sup>	0.003×0.003	0.003×0.003
분광 분해능	cm <sup>-1</sup>	4	4
검출기 감도	cm·Hz <sup>1/2</sup> /W	4×10 <sup>10</sup>	4×10 <sup>10</sup>
측정시간	sec	0.11	1
NESR	W/cm <sup>2</sup> sr · cm <sup>-1</sup>	1.09×10 <sup>-7</sup>	2.79×10 <sup>-8</sup>
NEDT	K	0.677	0.174

광학배출 값은 검출기 단면적과 집속광학계의 단면적에 비례하는 값으로 회전형간섭계와 선형간섭계에서 2.17×10<sup>-6</sup>sr · cm<sup>2</sup>으로 계산되었다. 간섭계 투과효율은 광경로상의 수광된 신호가 회전판을 통과하는 회전형 간섭계의 경우 0.24로 회전판이 없는 선형 간섭계의 0.31보다 작게 계산되었다. 측정시간의 경우 회전형 간섭계는 Fig. 8의 회전형 간섭계 구조에서와 같이 광선분할기에 의해 나누어진 2개의 빔이 회전판에 입사된다. 이때 회전판에서 두 빔이 진행되는 경로에 의해 발생하는 광경로차에 의해 간섭신호가 발생하므로 간섭신호 발생을 위한 회전판의 유효 회전각은 정해져 있다. 따라서 구조상 선형 간섭계에 비해 측정시간이 짧다. NESR은 위의 관계식 (3)에 각 파라미터를 대입하면 회전형간섭계에서는 1.09×10<sup>-7</sup>W/cm<sup>2</sup>sr · cm<sup>-1</sup>, 선형간섭계에서는 2.79×10<sup>-8</sup>W/cm<sup>2</sup>sr · cm<sup>-1</sup>으로 계산된

다. 이는 관계식에서 알 수 있듯이 광검출기의 감도와 광학배출량, 그리고 간섭계 투과효율과 측정시간이 길수록 NESR은 작은 값으로 저잡음이 된다. 이에 따른 NEDT는 회전형과 선형 간섭계에서 각각 0.677K, 0.174K로 계산되었다.

## 5. 결론

푸리에변환 적외선 분광 분석법인원거리 화학영상 탐지 시스템의 적정 시야각에 대해 알아보았으며 그에 따른 간섭계의 비교를 통해 주요 성능지수에 대하여 분석하였다.

화생방 오염예측 모델인 NBC-RAMS를 적용하여 모의실험을 통해 화학전에 대표적으로 쓰이는 작용제에 대한 화학 오염운의 확산 크기를 분석하였고, 그 결과 화학 상황 발생 시 광역으로 화학작용제 운을 영상화 탐지 할 수 있는 원거리 화학영상탐지시스템의 적정 시야각은 192mrad으로 분석되었다. 순시 시야각 0.75mrad을 고려한 선형간섭계로 적용한다면 화학 오염운 영상화를 위한 시야각 확보가 가능하리라 판단 된다.

## References

- [1] Jack L. Koenig, "Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Chemical Systems," Applied Spectroscopy, Vol. 29, Issue 4, pp. 293-308, 1975.
- [2] William J. Marinelli, Michael L. Finson, John Hagge, Christopher M. Gittins, Teoman E. Ustun, Shing Chang, David C. Rossi and James O. Jensen, "ARIS Wade Area Detector for Integrated Early Warning," Presented at 6<sup>th</sup> Joint Conference on Standoff Detection for Chemical and Biological Defence (Williamsburg, VA), 2004.
- [3] Edward Naranjo, Shankar Baliga, and Philippe Bernascolle, "IR Gas Imaging in an Industrial Setting," Proc. of SPIE Vol. 7116, 76610K, 2010.
- [4] Peter R. Griffiths, James A. de Haseth, "Fourier Transform Infrared Spectrometry," John Wiley & Sons, New Jersey. pp. 161-163(second Ed.), 2007.
- [5] J. H. Rentz and J. R. Engel, "Passive Spectro-Radiometer Calibration : Radiance Responsivity, Sensitivity, and Radiation Reference," in Fourier Transform Spectroscopy : New Methods and Applications, OSA Technical Digest(Optical Society of America), paper FWE13, 1999.