

# 아음속 풍동을 이용한 구조물 형상 변화에 따른 살리실산메틸 확산 유동 연구

홍창기\* · 엄환섭\*\* · 최승기\*\*\* · 김윤제\*\*\*\*†

## A Study on the Methyl Salicylate Dispersion in the Vicinity of Obstacles by Wind Tunnel Test

Chang-Ki Hong\*, Han-Sup Uhm\*\*, Seung-Ki Choi\*\*, Youn-Jea Kim\*\*\*\*†

*Key Words* : Chemical agent detection(화학작용제 탐지), Methyl salicylate(살리실산 메틸), Chemical agent dispersion(작용제 확산), 풍(화생방어), Wind tunnel test(풍동실험연구)

### ABSTRACT

To predict flow fields and chemical agent dispersion in urban area, wind tunnel experiments was performed. The agent was adopted MS (methyl salicylate) because the real chemical agent is unsafe. The exact concentration of methyl salicylate was generated by the commercial gas generator (STI-2500) and three different obstacle shapes were applied (i.e., rectangular, cylinder and pyramid). The concentration was measured with the qualified ion mobility sensor and gas chromatography. The data necessary for virtual test method of the real chemical agent were obtained.

### 1. 서 론

화생방 테러는 다양한 작용제가 존재하여 대응이 쉽지 않고 적은 양으로 많은 인명을 살생할 수 있다. 또한 짧은 시간 내에 사회적 혼란을 야기할 수 있어 경제적, 군사적으로 파급력이 큰 가공할 무기이다. 화학 테러를 방지하는 것은 실질적으로 불가능하기 때문에 가능성이 높은 화생방 테러 시나리오를 선점하고 작용제의 거동을 예측하여 테러에 의한 피해를 최소화해야 한다.<sup>(1)</sup>

특히 복잡한 도심지역에서 테러가 발생할 경우 지형적인 특성으로 인한 작용제의 거동과 확산량을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 따라서 도심지역에서 화생방 테러 발생초기 작용제의 확산 및 거동 방향을 예측하고 정확한 작용제의 농도를 파악하는 연구가 필요하다. 현재 사용되고 있는 군용 화생방 모델은 미국 DTRA(Defence Threat

Reduction Agency) 주관으로 이루어지고 있으며 대표적인 모델은 HPAC<sup>(2)</sup>, VLSTRACK와 CATS<sup>(3)</sup> 등이 있다.

현재 국내 연구 수준은 대부분 테러분야에 적용 가능한 것이 아니라 산업분야의 화학물질사고 대응에 주를 이루고 있다. 오염물질의 대기 확산 모델을 예측하기 전에 도심지형에 대한 기류 해석이 선행되어야 한다. 이장홍 등<sup>(4)</sup>은 전산유체역학 기법을 이용하여 중립대기 경계층의 풍향 특성을 파악하여 기류를 지표 조도에 따라 분석하였다. 문윤섭 등<sup>(5)</sup>은 전산유체역학을 이용하여 복잡한 도심지역에서 빌딩효과를 고려하여 바람길을 예측하였고, 도시 대기질의 공간적 특성을 모사하였다. Chu 등<sup>(6)</sup>은 전산유체역학 기법과 지리정보시스템을 연동하여 경계면 격자 생성의 중요성과 함께 대형건물의 열반사에 의한 영향을 고려하여 도심지역의 오염물질 확산연구를 수행하였다. 홍창기 등<sup>(7)</sup>은 화생방 모의유사 작용제인 SF6의 확산 모델링을 복잡한 도심지역에서 초고층 건

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

\*\* 광운대학교 전자물리학과(School of Physics of the Electron, Kwangwoon University)

\*\*\* 국방과학연구소 제5본부(The 5th R&D Institute, Agency for Defense Development)

\*\*\*\* 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : yjkim@skku.edu

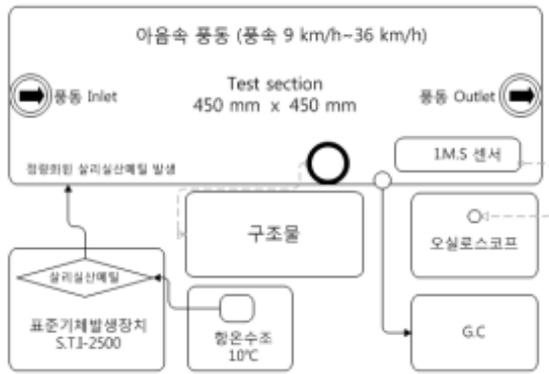


Fig. 1 Schematic of the wind tunnel test

Table 1 Properties of Methyl Salicylate

Physical & Chemical Property	Value
Molecular Weight	152.16
Formula	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>
Boiling Point	223 °C
Vapor Density	5.24
Solvent Solubility	Alcohol, Ether

물의 영향에 따른 체적분율 변화를 전산유체역학을 이용하여 연구하였다.

도로 협곡의 기하학적인 인자가 분산 패턴을 결정하는 또 하나의 원인이 되기도 하며 이와 관련된 연구는 상당한 진척을 이루어왔다. 김재진과 백종진<sup>(8)</sup>은 도로 협곡의 외관비와 비대칭성이 물질 분산 패턴에 미치는 영향을 분석하였고 Yoshihide 와 Ted<sup>(9)</sup>는 도로 협곡 구조에서 오염물질 확산을 LES 와 RANS 모델을 통하여 모사하고 풍동 실험을 통하여 LES 와 RANS 모델의 정확도를 비교하였다. 일반적으로 전산유체역학을 이용한 수치모사의 정확도는 풍동 실험 혹은 실증 실험을 통한 검증이 수반되어야 한다. 심우섭 등<sup>(10)</sup>은 산악 계곡지형에서의 오염 확산에 관한 풍동실험을 수행하여 이를 바탕으로 전산유체역학 기법의 타당성을 검증하였다.

이에 본 연구에서는 아음속 풍동과 균용센서를 사용하여 장애물의 기하학적인 인자변화에 따른 작용제의 확산 유동 특성을 분석하는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 화학 작용제 발생시 장애물 형상 변화에 따른 작용제의 확산 분포 및 변화를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 일정한 풍속 조건을 고려하기 위하여 0~45 m/s까지 적용 가능한 아음속 풍동 내에서 실험



Fig. 2 Experimental apparatus and devices.



Fig. 3 Configurations of the modeled obstacles.

을 수행하였으며, 정량의 작용제를 발생시키기 위하여 표준기체발생장치 S.T.I-2500(Sensortech 사)을 사용하였고<sup>(11)</sup>, 항온수조를 사용하여 작용제 발생온도를 10 °C로 고정하였다. 실 작용제에 의한 실험은 위험성 때문에 불가능하여 유사 작용제인 살리실산메틸(Methyl Salicylate)을 사용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에 관련된 살리실산메틸의 물리, 화학적 특성<sup>(12)</sup>을 Table 1에 기술하였다. 작용제의 농도 변화를 분석하기 위하여 Ion Mobility Spectrometry(IMS) 인 S.T.I-100(Sensortech 사)을 사용하였다.<sup>(13)</sup> IMS 센서를 이용하여 측정된 신호는 오실로스코프를 통하여 전기적인 신호로 변환되어 측정된다. 실험에 사용된 아음속 풍동은 개방형 풍동으로 0~45 m/s 풍속 범위를 가지고 있고 시험부의 크기는 450 mm × 450 mm이며 풍속은 ±1% 이내의 오차를 가지며, 난류 요소는 25 m/s에서 ±1% 이내의 오차를 갖도록 설계되었다. 축류환을 통한 블로어를 가지고 있으며 최대 유량은 750 m<sup>3</sup>/min이다. 구동모터는 직류모터이며 50~1750 rpm의 회전수를 갖고 있으며 최대속도에서 0.5% 이내의 정확도를 갖는다. 각 실험 장치 및 기기는 Fig. 2에 나타내었다.

구조물은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 정육면체(case 1)와 정사각뿔(case 2), 원통(case 3)의 3가지 형태를 사용하였다. Case 1과 case 2의 밑면은 100 mm × 100 mm이며 높이 또한 100 mm로 설정하였다. Case 3은 밑면의 지름을 100 mm로 설정하였고 높이는 동일하게 100 mm이다.

Table 2 Measured data of the concentration

Sensor level	Voltage [mV]	Avg. Concentration [ppb]	Avg. Concentration per unit voltage [ppb/mV]
1	75	344	4.59
2	110	393	3.57
3	130	430	3.31
3	140	461	3.29
4	160	579	3.63
4	170	692	4.06
4	180	778	4.33
5	220	906	4.11
5	260	1056	4.06
Avg. Value			3.88

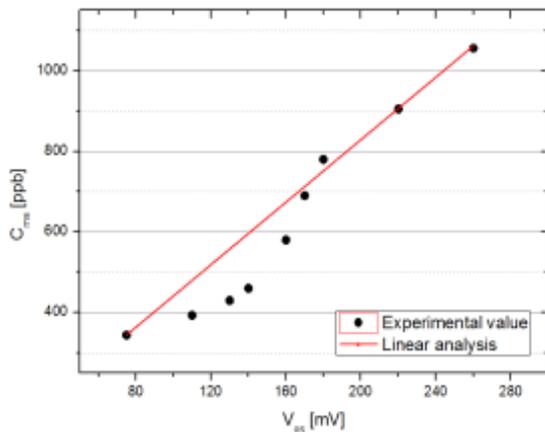


Fig. 4 Correlation between voltage and concentration

농도 측정에 사용된 GC(Gas Chromatography)는 GC-2010(Shimadzu 사)을 사용하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 표준농도 측정

본 연구에서는 오실로스코프 신호( $V_{oc}$ )와 살리실산메틸 농도( $C_{ms}$ )의 상관관계를 확인하기 위하여 신호의 세기에 따른 농도를 GC를 통하여 분석하였다. 살리실산메틸의 표준농도발생기 발생유량은 0.75 l pm이며 증발온도 10 °C에서 각 조건별 10분씩 농축하여 평균화하는 기법을 사용하였다. 농축용매로는 에탄올 3 ml를 사용하였다. 각 전압별로 10회씩의 실험을 통하여 평균값을 측정하였고 이의 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 선형 분석법을 통하여 상관식을 식(1)과 같이 도출하였고, 이를 Fig. 4에 도시하였다.

Table 3 Measured voltages for three different obstacles( $U_i=1$  m/s).

Distance from obstacle, d [mm]	Cases		
	1	2	3
10	×	×	×
50	142	25	121
100	13	18	60
150	90	120	138

× : no detection



Fig. 5 Grid of test section

$$C_{ms} = 3.88 V_{oc} + 53 \quad (1)$$

오실로스코프 전압과 평균 농도는 선형적인 경향을 보였으며 상관식 대비 최대오차는 15.4%이며 평균오차는 4.8% 이내이다.

전압신호로 변환된 작용제의 검출 농도를 상관식(1)을 통하여 분석하고 이를 바탕으로 정속 조건에서 장애물의 형상 변화에 따른 농도 분포를 분석하였다.

#### 3.2 구조물 형상변화에 따른 농도 측정

앞선 표준농도 측정 결과를 바탕으로 1 m/s와 2 m/s의 정속조건에서 구조물 형상변화에 따른 농도변화를 측정하였고 Table 3에 결과를 작성하였다. 표준 농도 조건을 적용하기 위하여 아음속 풍동내의 시험부에서 실험을 수행하였고, 실험의 용이성을 위하여 시험부에 Fig. 5와 같이 50 mm 간격으로 11 × 11개의 격자를 조성하였다. 실험의 정확성을 위하여 하단부에서부터 4번째 격자까지 총 44개의 격자 중 양 끝단을 제외한 36개의 격자에서 모두 150 mV의 오실로스코프 전압이 나오도록 표준기체발생장치를 조절하였다. 또한 풍속의 경우 지표 조도를 고려하지 않았고 동일하게 36개의 격자에서 1 m/s의 조건이 나오도록 하였고 각 격자별 풍속은 Table 4에 정리하였다. 격자별 풍속은 대칭형이기 때문에 6

Table 4 Velocity distributions at each grid point (m/s)

Column \ Row	1	2	3	4	5	6
1	0.35	0.75	0.87	0.85	0.85	0.87
2	0.50	0.97	0.99	1.00	1.01	1.00
3	0.50	0.99	1.00	1.00	1.01	0.99
4	0.48	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01
5	0.53	0.99	1.00	1.00	1.01	0.99
6	0.47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02

Table 5. Measured voltages for three different obstacle ( $U_i=2\text{ m/s}$ )

Distance from obstacle, $d$ [mm]	Cases		
	1	2	3
10	127	85	no detection
50	45	36	35
100	32	55	97
150	94	120	149

행  $\times$  6열만 표기하였고 36개의 유효영역에서 오차는  $\pm 1\%$  이내로 측정되었다.

모든 경우 동일하게 10 mm일 때, 즉 구조물의 뒷면 하단부에서는 살리실산메틸이 전혀 측정되지 않았다. 50 mm일 때 case 2은 25 mV, case 3는 121 mV이고 특히 case 1의 경우 142 mV로 전면과 큰 차이가 없었다. 이는 case 1의 경우 후면 하단부에서 유속이 주변보다 급격히 감소하며 정체점이 형성된다는 전산 유체역학 선행연구결과<sup>(14)</sup>와 일치한다. 구조물로 부터의 유격거리  $d=150\text{ mm}$ 인 경우 case 1, case 2, case 3 모두 전압이 증가하였다. 따라서 유동 내의 재순환 영역이 존재하며 case 3의 경우 유격거리 50 mm에서 100 mm 사이에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한 150 mm에서 이미 경계층을 빠져나온 것을 확인할 수 있다.

풍속 조건이 2 m/s인 경우의 오실로스코프 전압은 Table 5에 작성하였다. 유격거리가 10 mm인 경우 case 2에서 미세한 양이 측정되었으며 case 1에서는 높은 전압이 측정되었다. 유격거리의 증가에 따라 모든 case에서 전압이 함께 증가하였다. Case 1의 경우 재순환 영역이 50 mm에서 100 mm 사이에 존재하며 case 2, case 3의 경우 재순환영역이 50 mm 이내에 존재함을 유추할 수 있는데, 선행연구<sup>(14)</sup>결과와 일치함을 알 수 있다.

오실로스코프에서 측정된 전압을 상관 관계식(1)에 적용하여 살리실산메틸 농도로 변환하였고 Figs. 4-5에 나타내었다. Fig. 6를 보면 case 1과 case 3의 경우 50 mm 부근에서 감소상태로 변화되고 100-120 mm 부근에서 다시 증가상태로 변화된다. 이는 case 1과 case 3의 경우 강한 재순환영역이 생성됨을 확인시켜준다. 반면 case 2의 경우 완만한 증가곡선을 갖는다. 유속이 2배로 증가한 Fig. 7에서는 모든

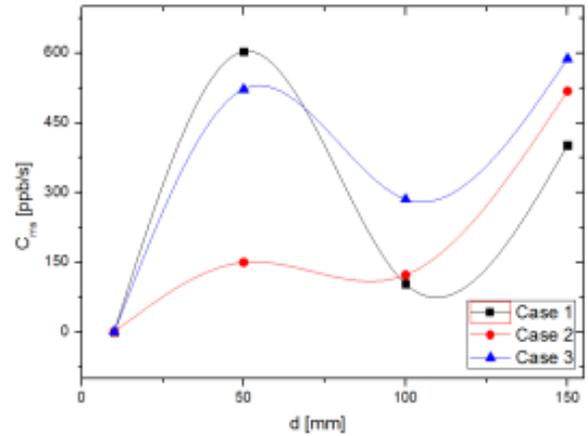


Fig. 6 Concentrations of Methyl Salicylate with  $U_i=1\text{ m/s}$

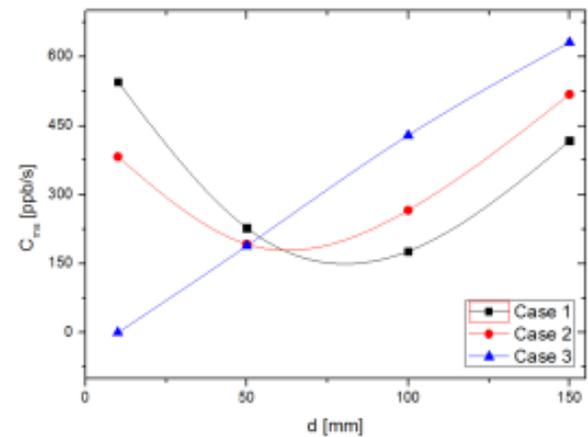


Fig. 7 Concentrations of Methyl Salicylate with  $U_i=2\text{ m/s}$

경우 50 mm 이전에서 재순환 영역을 나타냈다. 특히 case 1과 case 2의 경우 급격한 변화가 일어났으며 case 3의 경우 완만하게 증가하였다. 즉 기하학적인 형상과 속도 변화가 모두 농도 변화에 큰 영향을 주는 인자들임을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 아음속 풍동을 사용하여 모의화학작용제의 구조물 형상 변화에 따른 거동 특성을 파악하였다. 특히, 풍동 실험을 통하여 가상 모의작용제인 살리실산메틸의 농도변화를 분석하였다. 본 연구 결과는 향후 복잡한 도심지형에서 화학작용제의 거동방향을 예측하고 정확한 농도를 파악하는데 지표로 사용될 수 있을 것이며 기술된 자료는 향후 실작용제의 거동을 예측하는 지표자료로 사용이 가능할 것이다. 오실로스코프 전압에 따른 농도변화의 상관식은 최대 오차를 줄여 정확도를 높일 수 있는 비선형 분석이 추가적으로 필요하다.

## 후 기

본 논문은 국방화생탐지 특화연구센터를 통한 국방과학연구소에서 지원하여 연구하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

- (1) 계영식, 정우영, 김용준, 2008, “자연환기상태 실내공간에서의 화학작용제 확산 모델링 연구”, 한국군사과학기술학회지 제11권 제4호, pp. 133~140.
- (2) Defense Threat Reduction Agency, 2007, Hazard prediction and Assessment Capability(HPAC) User’s guide.
- (3) Defense Threat Reduction Agency, 2005, Consequences Assessment Tool Set(CATS) User’s guide.
- (4) 이장홍, 정진우, 김용구, 고석진, 2010, “ $k-\epsilon$  난류모델을 이용한 중립대기경계층 바람의 특성재현”, 한국풍공학회 논문집 제14권 제2호, pp. 71~78.
- (5) 문윤섭, 구윤서, 한창호, 2003, “복잡한 도시지역에서 CFD를 이용한 3차원 바람길 및 대기질의 수치모의”, 한국기상학회, 제13권 제3호, pp. 304~305.
- (6) Chu A.K.M., Kwon R.C.W. and Yu K.N., 2005, “Study of pollution dispersion in urban areas using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Geographic Information System (GIS)”, Environmental Modelling & Software, Vol. 20, Issue 3, pp. 273~277.
- (7) 홍창기, 서현석, 김인태, 엄환섭, 김윤제, 2012, “전산유체역학을 이용한 복잡한 도시 지형에서의 SF6확산모델링”, 군사과학기술학회 학술대회 초록집, pp. 126~127.
- (8) 김재진, 백종진, 1998, “Urban Street Canyon 에서의 유동과 오염물질에 관한 수치 실험”, 한국대기환경학회, pp. 113~114.
- (9) Yoshihide T. and Ted S., 2009, “CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS”, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 340~348.
- (10) 심우섭, 김석철, 유성연, 2005, “산악 계곡지형에서의 오염확산에 관한 연구”, 대한설비공학회, 설비공학논문집, 제17권 제11호, pp. 1060~1072.
- (11) www.isensor.co.kr, 센서테크 S.T.I-2500 표준기체발생장치 사용자 매뉴얼, 2013.
- (12) 한국산업안전공단, 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet), 살리실산메틸, 2003.
- (13) www.isensor.co.kr, 센서테크 S.T.I-100 센서 사용자매뉴얼, 2013.
- (14) Hong C.-K., Kim I.T., Uhm H.S., and Kim Y.-J., 2012, “CFD Modelling of SF6 Dispersion in the Vicinity of Various Obstacles”, National Congress on Fluids Engineering, pp. 256~257.