

화생방 개인보호체계 시험평가용 화학증기 흡착 샘플러의 개발

정현숙^{*,1)} · 이규원¹⁾ · 가동하¹⁾ · 정희수¹⁾ · 고청아¹⁾ · 최근섭¹⁾ · 박현배¹⁾ · 이해완¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Development of Chemical Vapor Sampler for Man-in-Simulant Test(MIST)

Hyunsook Jung^{*,1)} · Kyoo Won Lee¹⁾ · Dongha Kah¹⁾ · Heesoo Jung¹⁾ ·
Chung Ah Ko¹⁾ · Geun Seob Choi¹⁾ · Hyen Bae Park¹⁾ · Hae Wan Lee¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 13 November 2014 / Revised 1 June 2015 / Accepted 3 July 2015)

ABSTRACT

We have recently developed a cost-effective and pouch-type chemical vapor sampler which consists of a selectively permeable high density polyethylene(HDPE) membrane, aluminum/nylon barrier film, and adsorbents. Since the sampler mimics the actual adsorption process that occurs when the skin is exposed to chemical vapors, it can be applied to man-in-simulant test(MIST) to determine the protective capability of individual protective ensembles for chemical warfare agents. In this study, we describe the manufacturing process of samplers and results for performance testing on MIST. Methyl salicylate(MeS) is used to simulate chemical agent vapor and the vapor sampler was used to monitor chemical concentration of MeS inside the protective suit system while worn. Values of protection factors(PF) were also analyzed to provide an indication of the protection level of the suit system evaluate by MIST. The results obtained by home-made samplers(ADD samplers) and commercially available ones(Natick samplers) showed no significant differences.

Key Words : Chemical Vapor Sampler(화학증기 흡착 샘플러), Man-in-Simulant Test(유사작용제 인체 시험), Methyl Salicylate(메틸 살리실레이트), Protection Factor(보호지수)

1. 서 론

화생방 개인보호체계는 방독면, 상/하 보호의, 보호

장갑 및 덧신 등으로 구성되어 화학작용제 뿐만 아니라 생물학작용제, 방사성 낙진 등에 대하여 방호성능을 가져야 한다. 이러한 개인보호체계의 방호성능 평가는 대상 작용제의 종류 즉, 화학(기체 또는 액체)물질 또는 생물학 바이러스 물질인지 등에 따라 오염환경을 체계적으로 구성하여 시험평가를 진행한다. 이

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

때, 시험평가 단위는 보호체계를 구성하는 각 재료 또는 구성품 뿐 만 아니라 체계 단위를 통합적으로 평가해야 한다^[1].

보호의 및 보호장비가 개별적으로 적절한 방호성능을 갖는다 하더라도 각각의 구성품이 체계로 구성되었을 때 이음새와 지퍼 등의 불연속 부분 또는 구성품 간의 맞는 부분에서 개구부등이 발생하게 된다. 특히, 보호장비를 착용한 병사들이 여러 형태의 임무를 수행하면서 움직일 때, 신체운동에 따라 바람 및 동작에 의한 폴무효과로 등으로 인해 외부로부터 화생방 등의 위험에 노출될 수 있는 문제점이 더욱 증가한다. 따라서, 화생방 개인보호체계의 방호성능은 재료 및 구성품에 대한 정적상태의 성능 뿐 만 아니라 개인보호체계 전체를 착용 후 동적인 상태에서의 통합방호 성능까지 만족시켜야 한다^[2].

1990년대 중반 U. S. Army Chemical and Biological Defense Command(CBDCOM)에서 동적 조건에서 화생방 개인보호체계의 방호성능을 평가하는 체계적인 시험평가 기법인 Man-in-Simulant Test(MIST)를 개발하였다^[1]. 간단히, 개인보호체계를 모두 착용한 시험참여자는 독성이 없는 유사화학작용제인 methyl salicylate (MeS) 증기로 오염된 환경에 직접 들어가서 정해진 시간표에 따라 여러 가지 동적인 활동을 하게 된다^[3]. 이 때, 보호체계를 투과하는 MeS 증기를 흡착하는 흡착 샘플러를 피부의 여러 부위에 부착해 놓는데 시험이 종료된 후 흡착 샘플러에 흡착된 증기의 양을 분석하여 투과농도를 계산한다. 최종적으로 투과농도 데이터는 인체 부위별 유해도 분석(BRHA : Body Region Hazard Analysis) 모델에 적용하여 개인보호체계의 통합방호 성능을 평가한다^[1].

시험참여자 피부에 직접 붙이는 화학증기 흡착 샘플러는 U. S. Army Natick Soldier Research Development and Engineering Center(NSRDEC)에서 개발되었다^[4,5]. 이러한 Natick 샘플러는 직사각형 포켓 모양으로 고밀도 폴리에틸렌(두께 0.025 mm)을 MeS 증기를 선택적으로 통과시키는 투과막으로 사용한다. 이러한 투과막을 통과한 MeS 증기는 샘플러 안에 충전되어 있는 흡착체에 흡착되는 원리를 이용하였다. 샘플러의 뒷면은 비투과성 알루미늄/나일론 호일재질의 파우치로 구성되어 있다. 알루미늄/나일론 파우치의 뒷면은 인체에 무해한 의료용 양면 점착제가 부착되어 있어 피부에 부착할 수 있는 형태로 되어있다. 그러나 Natick 샘플러는 M&C specialties 미국회사에서 독점으로 주문제

작 형태로 판매되고 있는데 수입에 의존해야 할 경우 최소 개당 미화 25 달러(원화 25,000 원 정도)의 고가의 샘플러를 일정 수량 이상으로 구입해야 하는 실정이다.

본 연구실험실에서는 최근에 국내에서 구입 가능한 저가의 고밀도 폴리에틸렌 재료를 이용하여 실험실에서 간단한 공정으로 누구나 제작하여 사용할 수 있는 화학증기 흡착 샘플러 즉, ADD 샘플러를 개발하였다^[6]. 즉, MeS 증기를 선택적으로 통과시키는 고밀도 폴리에틸렌(두께 0.02 mm)을 투과막으로 사용하여 나일론/알루미늄 배리어 백(barrier bag) 재질을 사용하여 파우치를 구성한 후 3M 의료용 양면코팅의 점착테이프를 뒷면에 부착하는 형태의 샘플러를 개발하였다. 흡착체는 Natick 샘플러의 경우 Tenax TA[®] 한 종류만 사용 하지만 ADD 샘플러는 분석하고자 하는 화학 증기의 종류에 맞게 흡착제를 다양한 방식으로 구성할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 ADD 샘플러와 Natick 샘플러를 이용하여 MIST를 수행한 결과를 비교 기술하고자 한다. 특히, 상용제품인 Natick 샘플러와 비교해 볼 때 ADD 샘플러는 MeS 증기에 대하여 Natick 샘플러와 유사한 흡수율을 갖고 있는 것으로 측정되었고 MIST 시험평가 적용 결과 같은 보호체계에 대하여 유사한 방호성능 결과를 도출할 수 있었다.

2. 화학증기 흡착 샘플러의 제작

2.1 재료 및 치구

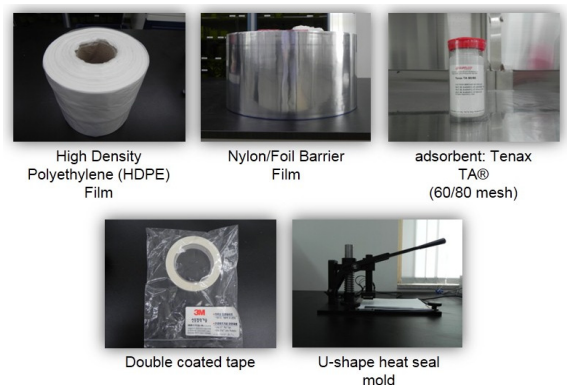


Fig. 1. Materials and tools for chemical vapor samplers

ADD 샘플러를 제작하기 위해 필요한 재료는 고밀도 폴리에틸렌 필름(두께 0.02 mm, 브라보팩, 한국), 나일론/호일 필름(한도신소재, 한국), 흡착제는 Tenax TA[®](60/80 mesh, 미국), 의료용 양면테이프(3M Medical Specialities, 미네소타, 미국)이다(Fig. 1). 흡착제는 메탄올(HPLC 등급) 등으로 세척한 후 오븐에서 70 °C에서 1-2 시간 정도 건조 한 후 사용한다. 흡착 샘플러를 제작하기 위한 열접착 치구는 U 형 금형부에 전기적 가열장치를 부착하여 가압할 수 있는 장치로 제작하였다.

2.2 ADD 샘플러의 제작

ADD 샘플러의 제작은 다음과 같다. 우선, (a) HDPE 필름과 나일론/알루미늄 필름을 같은 크기로 자른 후 겹쳐 준비한다. (b) HDPE 필름이 위로 향하도록 나일론/알루미늄 재료와 겹친 후 U 형 열접착치구의 금형 하부에 놓고 알맞은 시간과 압력으로 용착 한다. (c) U 형으로 용착 한 후에 접착부의 외곽선을 따라 기준크기(가로 25 mm, 세로 35 mm)의 샘플러의 모양으로 절단한다. (d) 샘플러의 접착이 되지 않은 부위(입구)를 벌린 후 갈때기 입구에 끼운 다음 흡착제(Tenax TA[®])를 채울 준비를 한다. (e) 약 40 mg의 흡착제는 저울을 이용하여 사전에 계량한다. (f) 흡착제를 샘플러의 입구 쪽에 묻어나지 않도록 갈때기를 통해서 샘플러 안쪽으로 깊숙이 충전 한다. (g) 흡착제가 채워진 샘플러의 입구는 U 형 열접착치구의 금형에 직각방향으로 넣고 용착하여 봉합시킨다. (h) 나일론/알루미늄 필름의 뒷면에 양면테이프를 샘플러 크기에 맞게 붙인 후 (i) 각 모서리를 45°로 잘라내어 샘플러를 완성한다(Fig. 2).

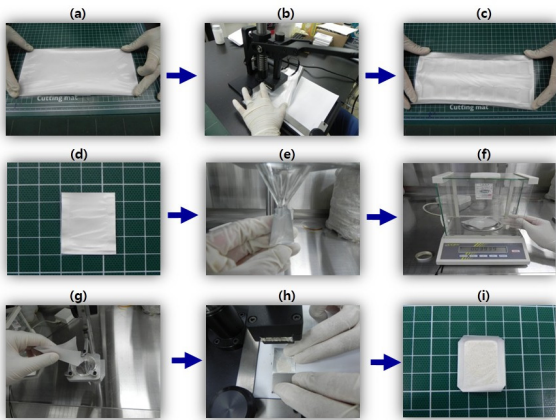


Fig. 2. Preparation of chemical vapor ADD samplers (a) - (i)

이와 같은 방법으로 제작하면 한번에 2개 이상 샘플러를 제작할 수 있고, 다양한 흡착제를 충전 하여 여러 가지 화학물질을 실험목적에 맞게 응용할 수 있다. 또한, 금형의 크기와 모양을 조절하여 다양한 형태의 흡착 샘플러의 제작이 손쉽게 이루어 질 수 있다.

2.3 샘플러의 흡수율을 측정

샘플러의 흡수율(u)은 ADD 샘플러와 Natick 샘플러를 MeS 증기(농도는 약 10 mg/m³)로 오염된 소형챔버 안에 일정시간 동안 노출하여 외부 노출 농도에 대비하여 각각의 샘플러로 흡착된 MeS의 양을 비교하여 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$u = \frac{m}{ACt}$$

- u : 흡수율 (cm³/min)
- m : 샘플러에 흡착된 증기량 (ng)
- A : 흡착 면적(cm²)
- Ct : 오염농도 (mg·min/m³)

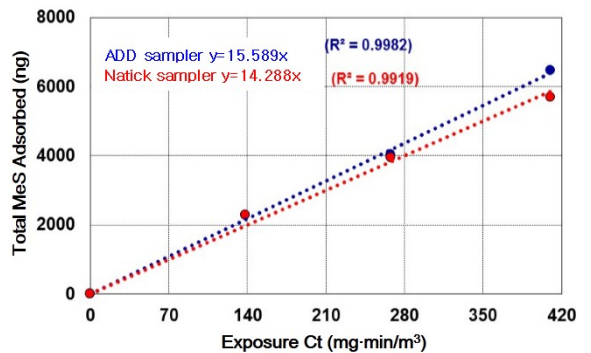
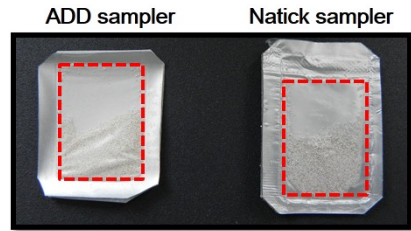


Fig. 3. Total methyl salicylate uptake(ng) vs. exposure C_t(mg·min/m³). Each data point is the average of two samplers. Slope corresponds to a sampler's sampling flow rate of 15.6 cm³/min for ADD and 14.3 cm³/min for Natick sampler

샘플러의 흡수율은 증기를 통과시키는 투과막의 두께, 흡착 면적, 그리고 샘플러 안에 충전 되어 있는 흡착제의 양에 비례한다. 본 시험평가에서 제작된 ADD 샘플러의 투과막의 두께는 0.02 mm이고 Natick 샘플러의 투과막은 0.0225 mm의 두께이다. 이 외에 ADD 샘플러는 Natick 샘플러와 같은 미국 표준 규격을 따라 제작되었다⁷⁾. 즉, ADD 샘플러의 흡착 면적은 $4.48 \pm 0.09 \text{ cm}^2$ 으로 Natick 샘플러와 유사하게 제작되었다 ($4.31 \pm 0.24 \text{ cm}^2$). 그리고 흡착제의 양도 약 40 mg으로 정량하여 ADD 샘플러에 충전 하였다.

이러한 ADD 샘플러의 흡수율은 $15.6 \pm 2.3 \text{ cm}^3/\text{min}$ 으로 얻어지고 같은 조건에서 Natick 샘플러는 $14.3 \pm 0.9 \text{ cm}^3/\text{min}$ 으로 각각 얻어졌다(Fig. 3). 이때, ADD 샘플러의 흡착 속도는 3.5 cm/min이고 Natick 샘플러는 3.3 cm/min으로 두 샘플러 간의 MeS에 대한 유사한 흡수율과 흡착속도를 갖는 것을 알 수 있다.

3. Man-in-Simulant Test(MIST)

3.1 Methyl salicylate(MeS)의 증기발생

시험 챔버 내부의 MeS 증기는 증기발생장치(Brooks Instrument, DLI 200)를 이용하여 생성하여 발생시켰다. 액체 상태의 MeS가 증기발생기 장치 내부로 주입되면 운반기체에 의해서 원자화 된 후 뜨거운 공기와의 접촉에 의해서 증기가 되는 장치이다. 액체 MeS의 유량(최대 1000 g/h)과 공기의 유량(최대 50 L/min)을 질량유량제어기(MFC : Mass Flow Controller)로 조절하여 시험 챔버 안으로 공급되는 MeS 증기의 농도를 선택적으로 조절할 수 있다. 본 실험에서는 약 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 의 MeS 증기의 농도가 2시간 정도 유지되도록 조절하였다. 시험 챔버 내부의 MeS 농도는 Miniature Infrared Analyzer(MIRAN : SapphiRe Portable Ambient Air Analyzer)를 이용하여 측정 및 제어하였다(농도 범위에서 $\pm 2.5 \%$ 이내의 오차 범위).

3.2 샘플러의 부착위치

시험참여자가 보호체계를 탈/착의를 하는 곳의 한쪽 벽에 샘플러를 부착하여 실험이 진행되는 동안 배경농도(background concentration)를 측정하였다. 시험참여자는 20대 성인남성(평균 키 : 175.5 cm, 몸무게 : 70.7 kg) 6명으로 구성되어 1회에 2명이 참여하여 총 3회 시험을 진행하였다.

샘플러는 시험참여자의 특정 신체 부위 24 곳에 부착하는데(Fig. 4) 신체 부위 및 치수와 상관없이 동일한 크기의 샘플러를 부착하였다. 또한, 개개인에 대한 차이를 최소화하기 위하여 ADD 샘플러와 Natick 샘플러 동시에 같은 신체부위에 부착하여 진행하였다. 이때, 샘플러를 부착하기 전에 신체 부위의 피부를 아이소프로필 알콜 솜으로 오염을 제거한 후 부착하여 시험이 진행되는 동안 탈착되는 것을 방지하였다.

샘플러의 부착 위치는 다음과 같다: 1. 콧등, 2. 방독면 이마 안쪽, 3. 귀, 4. 턱 아래, 5. 명치, 6. 왼쪽 팔 안쪽, 7. 왼쪽 팔 목 안쪽, 8. 배꼽, 9. 아랫배, 10. 음낭, 11. 왼쪽 허벅지 안쪽, 12. 왼쪽 장단지 안쪽, 13. 오른쪽 장단지 안쪽, 14. 발등, 15. 정수리, 16. 왼쪽 뒷목, 17. 오른쪽 뒷목, 18. 왼쪽 팔 바깥쪽, 19. 왼쪽 겨드랑이, 20. 등 중앙, 21. 등 골반 위, 22. 왼쪽 엉덩이, 23. 오른쪽 엉덩이, 24. 손등⁷⁻¹⁰⁾.

3.3 시험참여자의 신체활동

MIST 시험 챔버에서 시험참여자들은 다음과 같은 일련의 신체 활동을 수행하였다(Fig. 4): 팔 벌려 높이 뛰기(2분) - 앉아서 휴식(2분) - 제자리 걷기(4.8 km/h, 2분) - 앉아서 휴식(2분) - 물건 옮기기(2분) - 웅크리며 숨는 동작(2분) - 제자리 걷기(4.8 km/h, 2분) - 앉아서 휴식(2분) - 사다리 오르고 내리기(2분) - 앉아서 휴식(2분). 한 사이클 당 20분 소요되며 총 6회 반복으로 2시간의 시험평가를 진행하였다.



Fig. 4. Representatives of test participant's exercises for Man-in-Simulant Test(MIST)

4. 샘플러부터 MeS 흡착량의 분석

4.1 흡착제(Tenax TA[®]) 추출

샘플러의 윗면을 잡고 잘 흔들어서 모든 흡착제가 샘플러 아래로 있게 하여 진공펌프로 추출할 때 흡착제의 손실이 없도록 하였다. 샘플러의 윗부분을 칼로 잘라낸 후 뾰족한 도구를 이용하여 샘플러의 고밀도 폴리에틸렌 투과막을 벌린 후 그 안으로 흡착제를 옮겨 담을 유리관을 넣었다. 이때, 유리관의 다른 한 쪽은 유리솥과 테프론 튜브로 막아 놓고 진공펌프에 연결 시켜 놓는다. 진공펌프를 천천히 가동하여 흡착패드 안의 흡착제를 손실 없이 모두 옮긴 후 유리솥으로 흡착제 위를 막은 후 양쪽에 튜브 캡을 씌웠다. 이렇게 샘플러로부터 추출된 흡착제가 채워진 유리관은 열 탈착기와 가스크로마토그래피 장비로 옮겨 탈착 및 분석 준비를 하였다.

4.2 흡착제 분석

유리관으로 추출된 흡착제는 열탈착기와 가스크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. 우선, 흡착제가 채워진 유리관을 열탈착기 안으로 넣은 후 250 °C에서, 1분 그리고 300 °C에서 8분 동안 흡착제로부터 MeS를 탈착시켜서 가스크로마토그래피 분석 장비로 보냈다.

가스크로마토그래피의 분석조건은 칼럼온도를 80 °C에서 3분 유지한 후 15 °C/min의 속도로 260 °C까지 승온하여 총 15분 동안 분석이 진행되도록 하였다. 유량은 1.2 mL/min이고 10.3 psi의 일정압력 모드로 분석이 진행되었다. 이러한 조건에서 MeS의 가스크로마토그래피 내 머무름지수(R_t)는 6.7분이었고(Fig. 5) 이 피크 면적에 대한 적분 값을 준비된 검량선에 대입하여 샘플러로부터 탈착된 MeS의 양을 정량하였다^[11,12].

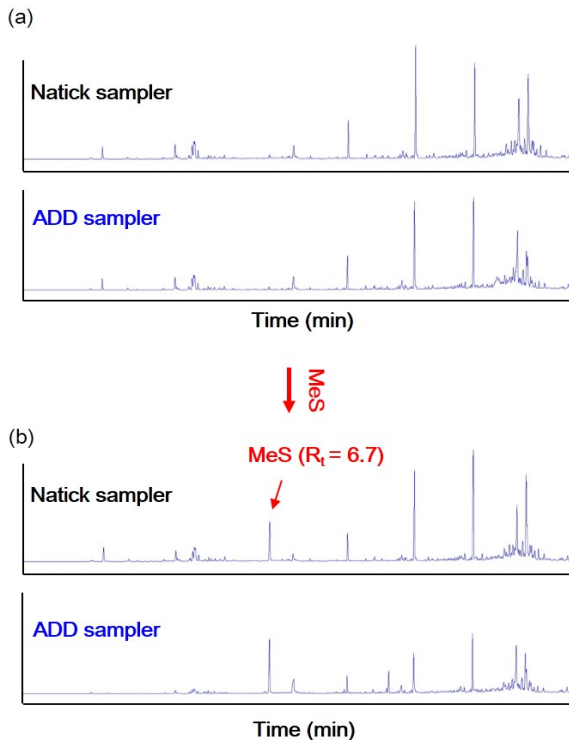


Fig. 5. Spectra of Gas Chromatograph(GC) of MeS vapor. (a) GC of blank sampler(Natick sampler vs. ADD sampler) (b) GC of the MeS vapor adsorbed sampler(Natick vs. ADD) with R_t = 6.7 min

5. MIST 적용 결과

5.1 샘플러의 MeS 흡착량 비교

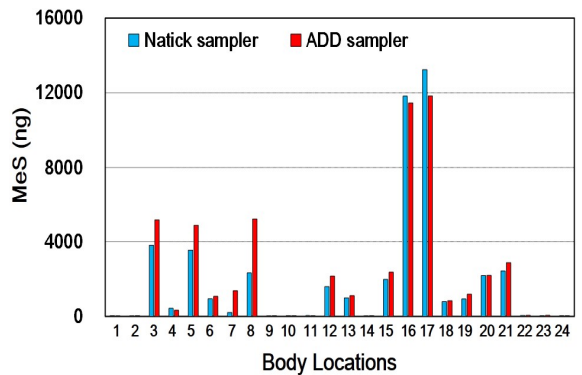


Fig. 6. MeS(ng) adsorbed into the chemical vapor samplers(Natick samplers vs. ADD samplers) depending on body locations: 1. nose, 2. mask, 3. left ear, 4. chin, 5. abdomen(upper), 6. left arm(inner upper), 7. forearm, volar, 8. abdomen(middle), 9. groin, 10. scrotum, 11. left thigh(inner), 12. left shin(inner), 13. right shin(inner), 14. left foot dorsum, 15. scalp, 16. left neck, 17. right neck, 18. left arm(outer upper), 19. left armpit, 20. back(middle), 21. back(lower), 22. buttocks(lower), 23. buttocks (right), 24. left hand dorsum

시험참여자의 개인보호체계 내부에 신체 부위별로 24 곳에 부착한 ADD 샘플러와 Natick 샘플러에 흡착된 MeS 증기 농도는 열탈착 후 GC 분석을 통해 각 샘플러에 흡착된 MeS의 질량(ng)을 구하였다(Fig. 6). 우선, 방독면과 보호의 상의가 접해지는 개구부인 목과 귀 부위에서 MeS 증기가 다량 흡착된 것으로 나타난다. 그리고 배 부위에서도 상당량의 MeS가 검출되었다. 이 부위는 신체 활동을 하는 동안 보호의 상의의 뒷부분을 통해서 다량의 MeS 증기가 들어간 것으로 여겨진다. 특히, 신체부위별로 같은 위치에 부착한 Natick 샘플러와 ADD 샘플러가 거의 유사한 량의 MeS 증기를 흡착한 것을 알 수 있다.

Table 1. Quantitative comparison of MeS(ng) adsorbed into the chemical vapor samplers(Natick samplers vs. ADD samplers) depending on body locations

No.	Body Region	Natick sampler MeS [ng]	ADD sampler MeS [ng]	MeS Δ (%)
1	nose	30 ± 2	22 ± 2	-26
2	Mask	30 ± 1	30 ± 1	1
3	Left Ear	3809 ± 403	5170 ± 81	36
4	Chin	426 ± 27	324 ± 37	-24
5	Abdomen(Upper)	3548 ± 509	4875 ± 701	37
6	Inner Upper Arm(Left)	941 ± 188	1072 ± 224	14
7	Forearm, Volar	208 ± 123	1374 ± 949	560
8	Abdomen(Middle)	2321 ± 1237	5217 ± 148	125
9	Groin	26 ± 1	34 ± 3	28
10	Scrotum	33 ± 1	36 ± 2	6
11	Inner Thigh(Left)	41 ± 7	36 ± 9	-12
12	Inner Shin(Left)	1591 ± 420	2157 ± 33	36
13	Inner Shin(Right)	989 ± 212	1107 ± 53	12
14	Foot dorsum(Left)	29 ± 6	37 ± 12	26
15	Scalp	1972 ± 608	2361 ± 506	20
16	Neck(Left)	11820 ± 699	11453 ± 508	-3
17	Neck(Right)	13246 ± 507	11828 ± 345	-11
18	Outer Upper Arm(Left)	785 ± 40	832 ± 48	6
19	Armpit(Left)	926 ± 119	1186 ± 256	28
20	Back(Middle)	2185 ± 475	2187 ± 270	0
21	Back(Lower)	2433 ± 19	2878 ± 42	18
22	Buttocks(Left)	39 ± 2	57 ± 1	44
23	Buttocks(Right)	36 ± 2	49 ± 5	36
24	Hand dorsum(Left)	32 ± 2	34 ± 7	3

MIST 시험평가의 특성상 시험참여자가 개인의 신체 사이즈, 활동크기 등에 따라 상당한 차이가 발생한다. 따라서, 본 시험평가에서는 이러한 차이를 최소화하기 위하여 시험평가자간의 신체사이즈의 차이를 최소화하였고 ADD 샘플러와 Natick 샘플러를 시험참여자의 신체 부위 24 곳에 같이 부착하였다. 또한, 신체 부위 및 치수와 상관없이 동일한 크기의 샘플러를 부착하여 샘플러간의 편차도 배제하였다.

신체 부위별로 보호체계를 통과해서 흡착된 MeS의 양을 좀 더 자세하게 정량적으로 비교한 결과를 Table 1에 나타내었다. 즉, Natick 샘플러의 결과 값을 기준으로 ADD 샘플러의 결과를 상대적으로 비교하여 보면 샘플러의 부착한 인체 부위별로 ± 20 % 범위 내에서 유사한 MeS의 흡착량을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 왼쪽 팔목 안쪽 부위(No. 7)와 배꼽 부분(No. 8)에서 ADD 샘플러의 경우 Natick 샘플러와 비교해서 다량의 MeS 증기가 흡착되는 것으로 나타났다.

5.2 보호지수 비교

신체부위별 “보호지수(PF : Protection Factor)”는 외부의 오염 노출량을 샘플러로부터 분석되는 보호체계 내부로 침투한 노출량으로 나눠서 식 (1)과 (2)로 산출한다^{9,11)}.

$$PF = \frac{C_{t_{outside}}}{C_{t_{inside}}} \quad (1)$$

$$C_{t_{inside}} = \frac{m_{MeS}(sampler) - m_{MeS}(Background)}{SFR(sampler)} \quad (2)$$

즉, PF 값은 시험기간 동안 MeS 증기의 외부 노출량에 대한 보호의 내부로 침투된 증기 노출량의 비율을 의미한다. $C_{t_{outside}}$ 는 시험 챔버 안의 평균 MeS 증기 농도(즉, 보호체계 외부의 오염농도)로 MIRAN 데이터로부터 일정 시험시간 동안 얻어서 계산한다. 예를 들면, 외부의 일정 오염농도에 대한 내부의 오염비율이 낮으면 인체의 한 부위에서 계산된 보호지수(PF) 값이 크게 된다. 반대로 보호지수 값이 작으면 그 부위는 외부의 증기에 노출이 많이 발생한 것을 나타낸다.

시험 챔버의 고농도 MeS 증기에 노출된 샘플러의 정확한 흡착량을 계산하기 위해서 시험이 진행되는 동안 보호체계 착/탈의실로부터 측정된 배경(Background) 증기량을 빼고 계산하였다¹⁰⁾. 즉, 배경 증기량은 시험

챔버에 입실하기 전/후 보호체계를 착용하고 이동 및 탈의하는 동안 샘플러가 공기 중에 노출되는 샘플러 부착실, 보호의 탈의실, 샘플러 회수실에서 각각 흡착된 평균 증기량으로 계산하였다.

샘플러의 부착 위치에 따른 보호지수(PF)에 대한 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 Table 1의 결과로부터 알 수 있듯이 같은 위치에 부착한 ADD 샘플러와 Natick 샘플러간의 보호지수도 오차범위 내에서 상당히 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한, 개구부가 많이 발생하는 방독면과 보호의 상의가 만나는 곳의 보호지수가 낮은 것으로 나타났다. 또한, 시험참여자가 신체활동을 수행하는 동안 보호의 상/하의가 만나는 허리부분에 개구부가 다수 발생하게 되는데 배와 등 부분에 대한 보호체계의 방호성능 또한 상당히 취약한 것으로 나타났다.

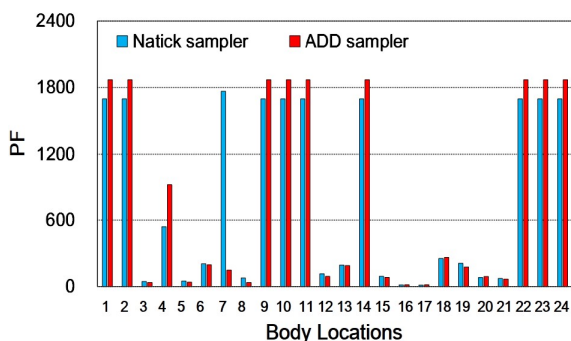


Fig. 7. Comparison of protection factor(PF) values for MIST trials with Natick samplers and ADD samplers depending on body locations

6. 결론

본 연구는 화학증기용 흡착 샘플러를 저가의 재료 및 치구로 실험실에서 간단한 공정으로 제작할 수 있는 ADD 샘플러를 제작하여 화생방 개인보호체계 시험평가에 적용한 결과를 나타낸다. 즉, 고밀도 폴리에틸렌(두께, 0.02 mm)을 샘플러의 투과막으로 사용하였는데, Natick 샘플러의 투과막 보다 약 0.005 mm 정도로 얇아서 샘플러의 흡수율은 약간 높은 값으로 측정되었다. 투과막의 두께는 실험 목적에 따라 언제든지 변경이 가능하며 샘플러에 충전되는 흡착제의 종류도 한 가지 또는 다양한 것을 혼합하여 여러 종류의 화

학물질을 분석할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 ADD 샘플러와 Natick 샘플러를 이용하여 화생방 개인 보호체계의 동적인 시험평가 기법인 MIST에 적용한 결과 두 샘플러간의 MeS 증기에 대한 흡착 성능이 유사함을 알 수 있었다.

본 결과로 증기 샘플러의 공정을 간소화 하였고 언제 어디서나 사용 목적에 맞게 다양한 형태로 대량 생산이 가능하게 되었다. 향후, 여러 종류의 흡착제를 혼합하여 한 개의 샘플러에 넣은 후 다양한 화학증기의 흡착 성능에 따른 MIST 평가도 용이하게 되었다. 더 나아가 ADD 샘플러는 화학 뿐 만 아니라 생물독성 물질, 인체에 유해한 산업용 가스의 위험 분석에도 널리 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] Technical Assessment of the Man-in-Simulant Test (MIST) Program. Standing Committee on Program and Technical Review of the U. S. Army Chemical and Biological Defense Command, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, National Academy, Press, Washington, D. C., 1997.
- [2] B. Givoni and R. F. Goldman, "Predicting Rectal Temperature Response to Work, Environment, and Clothing", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 32, pp. 812-822, 1972.
- [3] J. E. Riviere, C. E. Smith, K. Budsaba, J. D. Brooks, E. J. Olajos, H. Salem and N. A. Monteiro-Riviere, "Use of Methyl Salicylate as a Simulant to Predict the Percutaneous Absorption of Sulfur Mustard," *Journal of Applied Toxicology*, No. 21, pp. 91-99, 2001.
- [4] US patent 5726068, "Diffusive Sampler System for Determining Chemical Vapor Levels".
- [5] T. Gorecki and J. Namiesnik, "Passive sampling," *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 21, No. 4, pp. 276-291, 2002.
- [6] H. Jung, K. W. Lee, G. S. Choi, M. K. Park and H. W. Lee, "Facile Fabrication of Chemical Vapor Samplers with Various Adsorbents for Man-in-Simulant Test(MIST)," *Journal of the KIMST*, Vol.

- 17, No. 1, pp. 129-134, 2014.
- [7] F2588-07, "A Standard Test Method for Man-In-Simulant Test(MIST) for Protective Ensembles," 2007.
- [8] Robert B. Ormond, "Advancement in the Man-In-Simulant-Test Methodology and Development of Next Generation Manikin for Chemical and Biological Protection Research," Dissertation, Fiber and Polymer Science, Raleigh, North Carolina State University, 2012.
- [9] E. J. S. Duncan and E. F. G. Dickson, "A New Whole-Body Vapor Exposure Chamber for Protection Performance Research on Chemical Protective Ensembles," AIHA Journal, Vol. 64, pp. 212-221, 2003.
- [10] E. F. Dickson, "Estimates of Percutaneous Toxicity of Sulfur Mustard Vapor Suitable for Use in Protective Equipment Standards," Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, Vol. 71, No. 20, pp. 1382-1391, 2008.
- [11] H. Jung, S. M. Myung, M. K. Park, H. W. Lee and S. G. Ryu, "Study on Evaporation Characteristics of a Sessile Drop of Sulfur Mustard on Glass," Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 88, No. 5, pp. 788-792, 2012.
- [12] H. Jung and H. W. Lee, "Understanding Evaporation Characteristics of a Drop of Distilled Sulfur Mustard (HD) Chemical Agent from Stainless Steel and Aluminum Substrates," Journal of Hazardous Materials, Vol. 273, pp. 78-84, 2014.