

## 생물테러와 환경소독

정우동 · 문성민 · 윤제용<sup>†</sup>

서울대학교 화학생물공학부

(2007년 7월 30일 접수, 2007년 9월 17일 채택)

### Bioterrorism and Environmental Decontamination

Woodong Jeong · Sungmin Mun · Jeyong Yoon<sup>†</sup>

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

**ABSTRACT :** Bioterrorism intends to cause mass casualties and social panic by means of malicious pathogenic microorganisms. Environmental decontamination becomes very important as a follow-up measure if that happens. Conventional methods for decontamination is that aqueous disinfectants are being sprayed for killing or not spreading microorganisms with the purpose of preventing infection. However, these procedures are not enough to perfectly sterilize space or surface inside of building, requiring additional measures such as surface disinfection or gas treatment methods. This article deals with the issues about the present decontamination procedures, global trends, in order to formulate suggestion for advanced environmental decontamination.

**Key Words :** Bioterrorism, Pathogen, Environmental Decontamination, Surface Disinfection, Gas Sterilization

**요약 :** 병원성 미생물을 이용하여 인명살상과 사회적 혼란을 야기하는 생물학적 테러에 대응하기 위한 여러 방안 중에서 사후조치로써의 환경에서 생물무기 제독(환경소독)은 매우 중요하다. 이러한 상황에 대한 현재 우리의 환경소독 방법은 대부분 소독제를 물과 반응시킨 고농도의 수용액을 이용한 소독 방법을 적용하고 있다. 생물테러와 같은 고위험 병원성 미생물에 오염된 실내공간을 완벽하게 소독하거나 군사적인 목적의 제독작전을 위해서는 수용액을 이용한 표면의 제독방법과 더불어 가스 상의 멸균제를 혼합한 공간제독이 병행되어야 할 것이다. 이 글에서는 생물테러라는 특수한 상황을 전제로 하여 실내소독에 대한 현행 환경소독의 문제점과 해의 동향을 분석해보고 앞으로의 발전을 위한 제언을 하였다.

**주제어 :** 생물테러, 병원성미생물, 생물무기 제독, 표면소독, 가스멸균법

### 1. 개요

생물테러(Bioterrorism)라 함은 생물무기를 이용하여 정치적, 종교적 혹은 기타 이념적인 목적을 달성하기 위해 개인이나 단체가 사용하는 위협이나 공포수단을 말한다.<sup>1)</sup>

2001년 10월 미국에서 발생한 생물테러의 대표사례가 된 탄저테러는 21세기 새로운 위협으로써의 생물학 무기에 대한 경각심을 전 세계에 불러일으킬 만큼 큰 충격과 영향을 미쳤다.

생화학무기의 위협은 비단 어제 오늘의 문제가 아니었으며, 이런 종류의 대량살상무기(WMD : Weapons of Mass Destruction)의 위협에 대비해서 세계 각국은 준비와 대응방안의 마련에 고심하고 있다. 하지만 과연 어느 정도까지가 완벽한 준비라 할 수 있을지는 여전히 의문점이 남는다. 1993년 움진 리교에 의해서 발생한 동경 지하철 사린가스(Sarin, GB : Isopropyl methylphosphonofluoridate)사고와 2001년 미국에서 발생한 탄저(Anthrax) 테러 등 선진국에서 발생한 생화학무

기 테러 위협의 사례는 분명 우리사회의 준비수준을 되짚어 보게 하고, 향후 대응방향을 제시해 주는 중요한 단서가 될 지 모르는 일이다.

### 2. 생화학 테러 사례 및 분석

생화학무기를 이용한 역사적 사례를 보면(육군사관학교 화학대연구소 자료, 2003), 제1차 세계대전이후 1994년까지 26개국에서 총 244건의 화학 및 생물학 무기를 사용한 테러가 발생되었으며, 이중에서 정치적 목적과 관련된 경우는 25%에 불과하며, 대부분의 테러는 이단적 종교단체, 범죄자, 정신병자 등에 의해 일어났다고 한다. 또한 이러한 방식 테러의 횟수는 현재까지 계속 증가하고 있는데 1997년 1회에 불과하던 탄저균의 사용 위협이 1998년에 150여회로 크게 증가한 것이 그 예이다.<sup>6)</sup>

1968년 이후 발생한 52건의 생화학 테러에 사용된 방법을 분석해 보면, 주로 요인 암살 등의 목적으로 직접 접촉 또는 투입하는 경우가 13%이었으며, 음식물 오염, 의료용 약품 오염 및 식수원 오염 시도가 각각 15%, 16% 및 11% 발생하였고, 에어로졸 살포방법이 17%이었다.<sup>6)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jeyong@snu.ac.kr  
Tel: 02-880-8927

Fax: 02-876-8911

**Table 1.** Estimation of mass casualties by chemical and biological weapons<sup>6)</sup>

Chemical & biological weapons attack scenario				Number of deaths(people)
Target city	Delivery	Agent	Quantity	
Tokyo (population density: 14,500 people/km <sup>2</sup> )	Vehicles with fog machine	Anthrax	100 g	6,500 ~ 13,000
	Vehicles with fog machine	Botulinum Toxin	100 g	2 ~ 4
	Release from rooftop	Anthrax	1 kg	150,000 ~ 750,000
	Bomb	Sarin	10 kg	30 ~ 50
	Bomb	Anthrax	1 kg	5,000 ~ 11,000
Washington(D.C.) (population density: 3000 ~ 10,000 people/km <sup>2</sup> )	Missile	Sarin	300 kg	60 ~ 200
		Anthrax	30 kg	30,000 ~ 100,000
	Aircraft	Sarin	1 ton	300 ~ 700
		Anthrax	100 kg	130,000 ~ 460,000
		Sarin	1 ton	3,000 ~ 8,000
		Anthrax	100 kg	1,000,000 ~ 3,000,000
Reference	Tokyo : "The New Terror", Sidney D. Drell, Abraham D. Sofaer and George D. Wilson, Hoover Institution Press, Stanford Univ, Stanford, California, 1999, p. 111 Washington : "Proliferation of Weapons of Mass Destruction", Office of Technology Assessment, 1993, p.53 ~ 54			

여러 가지 전달 방법 중에서도 가장 효과적으로 생화학 무기를 확산 시킬 수 있는 방법은 에어로졸을 통한 호흡기 오염의 확산일 것으로 보인다. 큰 규모의 경기장, 건물, 지하철 및 항공기 내부 등 밀폐된 공간을 오염시키기 위한 생화학 작용제의 소요량은 1 g에서 수십 g의 비교적 소량의 작용제가 요구된다고 한다.<sup>6)</sup>

우리나라의 경우 예를 든다면, 탄저균 17 kg을 서울 상공에서 확산하여 오염시킬 경우 서울 시민의 50%를 살상할 수 있다고 평가된 바 있다. 이는 핵무기 2.6메가톤급이 폭발했을 경우와 맞먹으며, 사린가스 1,700 ton을 살포할 경우와 동일한 살상효과를 가진다. 그 만큼 생물무기는 다른 어떤 무기보다 위협적이라고 볼 수 있다.<sup>2)</sup>

앞서 언급된 피해예측보다 더욱 우려되는 것은 최근의 유전공학과 분자생물학의 발달로 인해서 더욱 치명적인 변종 미생물이 무기화되어지고 있다는 사실이다.

생물테러는 단순히 몇 명의 사람이 죽고, 사는 문제가 아니라 테러가 발생한 지역, 도시, 심지어 국가 전반에 걸친 사회적 혼란과 대중의 심리적인 공포로 인한 패닉현상 등으로 국가전체의 위기로 이어질 수 있다.

본 논고에서는 현재 우리나라의 생화학 테러에 대한 대비 상황과 문제점은 무엇이며, 또한 이에 대한 환경제독의 기술적인 해결책은 무엇인지에 대한 고찰을 해보고자 한다.

### 3. 생물학 무기(Biological Weapon)의 종류

생물학 무기는 인간이나 동식물에 해로운 미생물(microorganism)이나 독소(toxin)를 사용하여 적을 살상하거나 적의 전쟁수행의지 및 능력을 저하하게 하고 전황을 유리하게 하는데 사용되는 무기체계이다. 생물테러(Bioterrorism)라 함은 생물무기를 이용하여 정치적, 종교적 혹은 기타 이념적인 목적을 달성하기 위해 개인이나 단체가 사용하는 위협이나 공포수단을 말한다.<sup>1)</sup>

지구상에 존재하는 수많은 미생물과 독소 중에서도 현재까지 알려진 생물무기로서의 사용이 예상되는 미생물의 종류는 Table 1, 2(육군사관학교 화학대연구소 자료)에서 보는 바와 같으며, 전쟁 혹은 테러에 사용이 예상되는 미생물의 종류는 이보다 더 많다. 최근에는 내성이 더욱 강하고, 특정 생물체만 선택적으로 공격하는 변종, 돌연변이 미생물들(mutant)을 생산할 수 있는 단계에 이르렀으며, 급성호흡기 증후군(SARS : Severe Acute Respiratory Syndrome)이나 조류인플루엔자(AI : Avian Influenza)같은 신종전염병의 출현 등으로 예기치 못한 미생물의 위협이 더욱 증가되고 있다.

천문학적인 비용을 투자해서 개발 및 비축해 놓은 각종 항생제와 약품들이 변종 미생물의 무기화에 따라서 최악의 경우 무용지물이 될 수도 있다는 점은 우리가 생물테러 대응의 측면에서 깊이 있게 고려해야할 문제점 중의 하나이다.

현재까지 알려진 여러 종의 미생물 중에서도 특히 테러 목적으로 사용 우선순위가 높을 것으로 판단하고 있는 것은 탄저균(Bacillus Anthracis, Anthrax)와 천연두균(Smallpox)으로 보인다.<sup>2)</sup>

### 4. 탄저(Anthrax)와 천연두(Smallpox)의 위협

탄저는 9·11 테러 이후의 생물테러의 대명사로 이미 널리 알려진 생물무기의 한 종류이다. 지구상에 존재하는 수많은 미생물 중에서 굳이 탄저균을 생물테러용 작용제로 선정한 이유는 무기로써, 혹은 테러를 위해 사용하는데 있어 매우 많은 장점을 지니고 있기 때문이다.

미생물이 무기로서 사용되어 그 목적을 달성하기 위해서는 몇 가지 고려할 요소가 있는데, 첫째는 인간을 감염시키거나 독성이 있어야 하며, 둘째는 목표를 달성할 수 있을 정도로 충분한 양을 제조하기 용이해야하며, 셋째는 운반, 살포 및 확산기간동안에 안정해야 한다는 점이다.<sup>1)</sup>

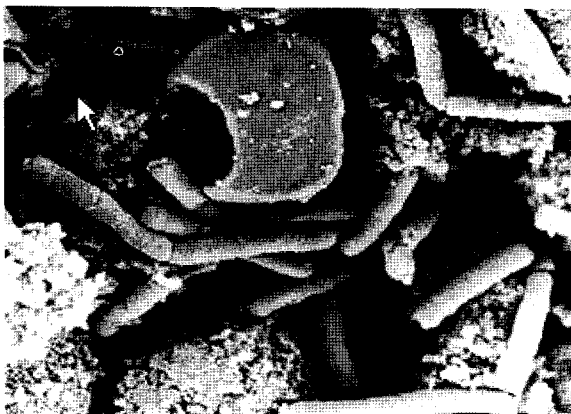
**Table 2.** Toxicity and symptom of disease by biological weapons<sup>1)</sup>

Agents	Delivery methods	Epidemic	Period of incubation	Period of symptoms	Fatality
Anthrax	spore / aerosol	cutaneous (inhalation : none)	1 ~ 5 day	3 ~ 5 days	high
Cholera	food or water / aerosol	low	12 hrs ~ 6 day	more than 1 week	medical treated → low, untreated → high
Plague	aerosol	high	1 ~ 3 days	1 ~ 6 days	if untreated within 12 ~ 24 hour → high
Tularemia	aerosol	none	1 ~ 10 days	more than 2 week	medium
Q Fever	food / aerosol	low	14 ~ 26 days	more than 2 week	low
Ebola	contagion / aerosol	modest	4 ~ 16 days	death within 7 ~ 16 days	high
Smallpox	aerosol	high	10 ~ 12 days	4 weeks	high
Venezuelan equine encephalitis	infected animals / aerosol	low	1 ~ 6 days	days ~ weeks	low
Botulinum Toxin	food or water / aerosol	none	various (hrs ~ days)	death within 24 ~ 72 hrs	high
Mycotoxin	aerosol	none	2 ~ 4 days	days ~ months	modest
Ricin	food or water / aerosol	none	hrs ~ days	days (death within 10 ~ 12 hrs : oral infection)	high
Staphylococcus Enterotoxin B	food or water / aerosol	none	6 days	hours	low

탄저균은 이러한 목적을 만족시켜주는 매우 적합한 병원성 미생물로 알려져 있다. 탄저균이 속한 Bacillus 계열의 bacteria는 외부의 환경이 생존에 적합하지 않을 때 아포(spore)를 형성하여 열, 태양광선, 방사선 등에도 견딜 수 있는 견고한 보호막을 가진다. 그리고 환경이 다시 좋아지면 발아(germination)하여 생존활성을 지니고 인수공통감염을 유발한다. 또한 아포로 형성된 분말은 이동 및 살포가 용이하고, 살포 후에도 소독 및 멸균의 절차가 매우 까다롭다는데서 테러분자들에게는 여러 측면에서 많은 이점을 제공할 수 있다.

2001년 10월 미국에서 발생한 탄저우편물 사건은 무기용으로 특수 제작된 직경 3 μm의 탄저균 분말을 이용해서 100 μm 크기의 봉투 접합부를 통해 확산시킨 사례로 판명되었다. 미국의 우편물 분류기는 대량의 우편물을 신속하게 분류하기 위해 우편물 봉투에 상당한 압력을 가하는데, 이러한 압력으로 인해서 내부의 탄저가루가 밖으로 확산되어 우편업무 종사자, 다른 분류장비를 오염시킨 경우라 볼 수 있다. 이 사건으로 인해서 인명손상은 10명도 되지 않지만 혼란을 수습하는데 10억 달러 이상의 비용이 소요되었다고 한다.<sup>6)</sup>

탄저는 잠복기가 1~5일 정도로 짧고, 초기 진단이 매우



**Fig. 1.** Anthrax is a disease caused by spore-forming bacteria.<sup>20)</sup>



**Fig. 2.** Photographs of a child with smallpox.<sup>21)</sup>

어려우며, 일단 임상징후가 나타나면 항생제 효과가 미약할뿐더러 의학적인 조치가 있기 이전에 사망할 확률이 높다.<sup>1)</sup> 따라서 초기 환자가 발생한 이후부터 야기될 사회적 혼란과 공포는 테러분자들이 필요로 하는 요건을 충분히 만족시켜 줄 수가 있게 된다.

천연두(Smallpox)는 천연두 바이러스에 의해서 발병하며, 심한 열과 피부에 작은 수포를 발생시키고 피부 및 점막에 출혈을 일으키는 병이다. 1967년 WHO의 천연두 박멸운동으로 결과 1977년 마지막 환자가 발생한 이래 천연두 바이러스는 지구에서 종말을 맞이하였고, 미국의 CDC(Centers for Disease Control and Prevention)와 구소련의 Ivnovsky 두 개의 연구소에서만 천연두 바이러스 샘플을 보관하게 되었다.

하지만 냉전시대 생물학무기 개발 프로젝트에 의해서 천연두 바이러스는 다시 무기화되어 은밀하게 나타나기 시작하였으며, 1998년의 미연방 비밀평가보고서에 의하면 북한, 이라크, 러시아 3국이 천연두균을 은닉하고 있을 가능성이 크며, 이를 무기화하여 사용할 수도 있다는 결론을 내린 바 있다.<sup>2)</sup>

2002년 12월에는 부시대통령이 해의 주둔 전 미군에게 천연두 백신 접종계획을 발표하기도 하였으며, 1999년 6월 13일자 New York Times에서는 한국으로 납파된 북한군인의 혈액에서 최근에 접종한 천연두 예방접종 흔적을 발견했다는 보도도 있었다.<sup>2)</sup>

우리나라에서는 1972년 이후에 태어난 사람은 천연두 예방접종을 하지 않았기 때문에 만약에 이 바이러스가 테러에 이용된다면 35세 이하의 젊은이들(2007년 기준)은 천연두 바이러스의 공격에 무방비 상태가 되어버린다. 천연두는 전염성이 매우 높아 사람과 사람사이의 2차 전염이 가능하다고 알려져 있다. 1972년 유고슬라비아에서 1건의 천연두 감염자가 발생한 이래 150명의 2차 감염자가 발생하였고, 이로 인해 전 국민(2000만 명)이 백신을 접종하였으며, 도로와 항만이 수 주 동안 차단된 사례를 보면 이 작은 미생물로 인해서 얼마나 큰 국가적 손실을 입을 수 있는가를 쉽게 알 수 있다. 아직까지 생물테러에 대한 경험과 준비가 부족한 우리사회에서도 언젠가 발생할 가능성이 있는 시나리오이며, 이에 대해서 철저한 준비를 하여야 할 것이다.

## 5. 생물테러에 대한 기술적 대응방안

생물테러가 발생하게 되면 준비가 잘된 조직사회라 할지라도 이를 해결하기 위한 조치는 군과 경찰, 소방대원이 해결할 수 있는 한계를 넘어서게 될 것으로 보인다.

여기서 우리가 좀 더 관심을 가져보고자 하는 것은 생물테러의 징후를 신속하게 탐지하여 추가적인 오염 환자가 발생하지 않도록 조기경보체계를 발전시키는 것과 만약에 발생할 오염지역에 대해서는 효과적이고 안전하게 소독하는 기술적인 방법에 관한 것이다.

생물학 작용제는 인체감염 후 일정기간 잠복기를 거치기 때문에 방어의 측면에서 가장 우선시해야 할 것은 생물테러의 징후를 즉시 확인하고 조기 경보함으로써 시간지연에 따라 기하급수적으로 발생할 수 있는 감염보균자 및 감염자를

최소화해야 한다는 것이다. 이를 위해서 우리나라에서는 응급실 증후군 감시체계와 감염전문가 네트워크를 구성하여 이 증감시체계를 유지하고 있다.<sup>4)</sup>

생물학 무기의 오염으로부터 조기경보를 위한 탐지체계(Biological weapon detection system)는 생화학전을 대비하는 군부대(Military) 및 국가주요 기관에 국한되어 운용되고 있으나, 민간시설장에서의 테러에 대비한 보다 광범위한 네트워크의 구성이 필요할 것으로 보고 있다. 우리나라의 생물테러 발생 책임부서는 보건복지부 산하 질병관리본부에서 전담하고 있으며, 이를 위해서 생물테러대비 초동조치요원에 대한 주기적인 교육과 장비 및 물자의 확보에 주력하고 있다. 하지만 테러대상이 될 민간인 다중복합시설에 대한 방호계획과 사후처리문제해결에 대한 기술적 방법의 접근은 보다 많은 투자와 발전이 필요할 것이라고 본다.

미국의 경우에는 국가지정연구실(National Laboratory), 민간업체 등에서 생물학작용제 탐지용 방어시스템 및 이를 제거하기 위한 소독제의 개발을 위한 지속적인 R&D와 관련 상품을 개발 하고 있다. Real-time PCR, 휴대용 실시간 DNA 분석 식별기(Hand Portable for Real time DNA Identification of Biological Agents), LIDAR(Lidar Detection of Chemical and Biological Weapons), BMS-2000(Bacterial spore detection system) 등 실시간 바이오에어로졸(bioaerosol)을 탐지할 수 있는 장비들이 공항, 항만, 다중이용시설 등 유동인구가 많은 교통의 중심지역에 설치되어 작용제가 탐지될 경우, 이를 신속하게 네트워크에 연결된 대응기관에 공동 전파함으로써 위협에 대응하는 시간을 최소화 할 수 있도록 운용되고 있다고 한다.

## 6. 환경소독 기술

### 6.1. 생물제독의 정의 및 고려사항

생물제독이라함은 소독(disinfection) 혹은 멸균(sterilization)을 통하여 오염된 지역을 안전하게 사용하기 위해서 취해지는 제균차라고 정의할 수 있다. 소독(disinfection)은 병원성 미생물의 확산과 피해를 방지하기 위한 미생물의 선택적인 제거이자 위협의 수준에 도달하지 않을 정도의 낮은 수준으로의 병원성 미생물의 제거를 의미하며, 멸균(sterilization)은 미생물이 존재할 확률이 0%로 완전히 깨끗한 상태를 말하는 것이다.

대규모 시설에 대한 생물학적 제독을 위해서는 어느 수준의 소독개념을 적용할 것인지 아니면 멸균의 개념에 입각해서 제독을 할 것인지를 결정은 매우 중요하다.

생물학테러의 상황 하에서 군사작전적 의미의 제독수준은 백만분의 일 이하의 확률( $10^{-6}$ )을 의미한다고 하기도 한다.<sup>10)</sup>

생물테러오염지역에 대한 제독시 고려해야할 많은 요소들 중에서 특히, 오염된 지역이 민간인이 사용하는 시설이라는 데 초점을 맞추어야 한다. 이는 방독면과 같이 개인 보호 장비를 갖추지 않은 민간인에 대한 고려와 오염지역을 환경 소독한 후에 안전하게 재사용할 수 있는지 여부 등의 여러 가지 문제들이 포함된다.

6.2. 현행 제독기술과 문제점

우리나라에서 생물테러지역에 대한 제독방법은 소독제를 물과 반응시킨 수용액을 이용하여 환경소독을 하는 것이 주를 이루고 있다. 하지만 이러한 방법은 에어로졸로 살포된 병원성 미생물의 확산에 대해서 100% 완벽한 처리방법이라고 보기 어렵고, 수용액을 이용할 수 없는 특수한 환경에 대한 완전한 제독절차가 제한된다는 문제점을 내포하고 있다.

보건복지부 질병관리본부에서 제시하고 있는 탄저오염지역에 대한 환경제독의 방법은 Table 3(질병관리본부 생물테러대비 초동대응요원 교육자료, 2005)에서 보는 바와 같이 밀폐가능한 장소와 개방된 장소에서의 제독방법 두 가지를 제시하고 있다.

질병관리본부에서 제시하고 있는 소독 방법 외에도 육군에서 제시하고 있는 생물학 오염지역에 대한 제독방법은 군용가용자산을 이용하는 방법과 대체소독제를 이용하는 두 가

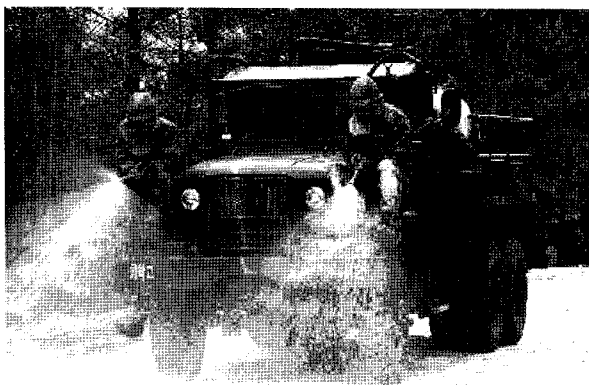


Fig. 3. Area decontamination operation Army KM9 vehicle. (Source : Army Chemical School in Korea)



Fig. 4. Equipment decontamination operation Army K10 vehicle.

Table 3. Environmental decontamination guide by National Institute of Health<sup>8)</sup>

Target area	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anthrax contaminated area : inside of building, ventilation system, soil, etc.</li> </ul>
Methods and procedures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• If area can be sealed hermetically                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sterilize by fumigator inside of building</li> <li>- 37% formaldehyde solution 15~50 mL in 1~3 m<sup>3</sup> volume of fumigator(maintain temperature over 15°C)</li> </ul> </li> <li>• Soil decontamination                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generally incinerate grass(weed etc) in nearby contaminated area</li> <li>- Excavate soil up to 20 cm depth and incinerate(121°C, 20 min)</li> <li>- Spray Cleaning 50 L/m<sup>2</sup> with 5% formaldehyde solution</li> </ul> </li> </ul>

지 방법이 있다(Table 4, 육군교범 대화생방테러작전, 2003). 육군에서 제시하고 있는 대체소독제의 종류로는 차아염소산 칼슘(CaClO<sub>2</sub>), 차아염소산 나트륨(NaClO<sub>3</sub>), 포르말린, 가성소

Table 4. Alternative decontaminant of biological agents<sup>7)</sup> (Source : Army Chemical School in Korea)

Detergent	Application methods	Caution
CaClO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aqueous solution(area / personnel)</li> <li>- Small area surface(5~10%)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※ HTH : water = 3 : 97(flat ground)</li> <li>※ decon area : 7 m<sup>2</sup>/gallon</li> </ul> </li> <li>- Personnel(0.5%)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※ HTH : water = 1 : 99</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosive(metal)</li> <li>• Prevent inhalation or skin / eye contact</li> <li>• Put on protective glove and mask</li> </ul>
NaClO <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Swabbing with undiluted solution</li> <li>• Spraying diluted solution(50%)</li> <li>- decon area : 7 m<sup>2</sup>/gallon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caution : skin / clothes</li> <li>• Corrosive(metal) metal surface should be rinsed out and dried</li> </ul>
Formaldehyde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spraying by fumigator(aerosol)</li> <li>• Condition : Temp &gt; 21°C, Relative humidity &gt; 85%</li> <li>• Formaline undiluted solution 1.1 L or formalin-methanol mixed solution (formaline5%+methanol3%) 0.88 L can decontaminate 1,000 ft<sup>3</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>- contact time &gt; 16 hrs</li> <li>- relative humidity &gt; 70%</li> <li>- temperature &gt; 16°C</li> </ul> </li> <li>• Ventilate inside of air(after decontamination)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vapor has toxicity / flammable</li> <li>• Put on protective glove and mask</li> <li>• No contact to sensitive equipment</li> </ul>
NaOH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10% solution</li> <li>- decon area : 1 m<sup>2</sup>/gallon(flat ground)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicity, metal corrosive</li> <li>• Caution : skin / clothes</li> </ul>

다 및 양젯물(NaOH) 등인데, 이러한 대체소독제는 비교적 쉽게 구입이 가능하고, 적당한 비율로 물과 희석하여 오염된 지역이나 인원에 대한 제독을 할 수 있다.<sup>7)</sup>

군용 제독제는 이러한 대체 소독제들보다 훨씬 강력한 산화력을 지니는 소독약품을 이용하는데, 야지에서 물을 급수하여 신속하게 혼합 후 작전의 목적에 따라 장비 혹은 지역을 제독하게 된다(Fig. 3, 4).

군사작전에서 사용되는 군용 표준제독제는 매우 강한 염소 계열의 소독약품으로써 이는 단시간 내에 제독작전을 완료하여 작전의 지속성을 보장하기 위한 것이므로 민간시설의 소독목표와는 목적 및 방법 면에서는 사뭇 다르게 접근을 하고 있다.

그렇다면 우리는 어떠한 방법을 이용해서 생물테러오염지역을 안전하게 소독할 수 있을지, 그리고 고려해야 할 요소들은 어떠한 것이 있을지에 의문을 가지지 않을 수 없다. 앞서 소개했던바와 같이 생물오염지역에 대한 소독방법은 널리 알려진 소독제를 물과 반응시킨 수용액 상태로 사용하여왔다. 하지만, 최근에는 바이오에어로졸 형태의 미생물을 소독하는 방안으로 가스 상의 소독제를 활용하는 방법이 더욱 많이 연구되고 있다.

공기 중으로 확산된 미생물은 수용액이 닿을 수 없는 곳에 분산되어 제독의 소요를 증가시키고, 수용액이 닿으면 문제가 생길 수 있는 표면(예를 들어, 컴퓨터 내부, 민감한 전자장비 등)에는 제독의 어려움이 발생하기 때문이다. 게다가 이러한 방법들이 사용 후의 환경적 안정성 문제와 인체 유해성문제를 야기하기 때문에, 최선의 방법은 인체에 무해하고 환경 친화적인 가스 상의 소독제를 이용하는 방법일 것이다.

### 6.3. 최근 연구동향

선진국에서는 기존에 사용되어왔던 산화제를 대신할 수 있고, 가스형태로 사용할 수 있으며, 소독 후에 발생하는 문제를 최소화 할 수 있는 방법들에 대한 연구 중이다. 대표적인 예로 과산화수소 증기법이나 오존 가스 멸균법을 이용하거나, UV에 의한 공기정화 등이 있다. 이러한 방법은 비단 생물테러에 대비한 것일 뿐만 아니라 병원과 같은 미생물에 의한 감염의 위험이 있는 모든 곳에서 적용이 가능한 기술들이다.

외국의 빌딩환풍기 시설에는 내부공기를 정화하기 위한 HEPA 필터를 설치하거나 UVGI(Ultraviolet germicidal irradiation)시스템을 적용하여 실내공기 중의 병원성 미생물을 UV에 의해 실시간 살균하고, 설치된 필터에서 오염된 공기를 깨끗이 정화하여 사무실 내부로 재순환시키는 공기정화장치 등을 적용하고 있다.<sup>10)</sup>

하루 중 대부분의 일과를 건물 내에서 보내고 있는 근로자의 실내공기질 향상을 위해서 이러한 공기정화장치를 활용하고 있으며, 유사시 생물테러에 의해 오염된 공기 제독을 위해서 곧바로 적용 가능한 시스템이 적용되어있다는 점은 우리가 관심을 가져야 할 부분이다.

우리나라의 생물테러 및 생물학전 대응조직에서는 오래전

부터 다양한 대응방법을 모색해왔으며 지금도 보다 효과적인 방법을 위한 다방면의 노력을 경주하고 있다. 하지만 최근 미국의 탄저소동 이후에 급속도로 발전된 생물테러대응 체제와 준비과정을 볼 때 우리사회가 준비해야 할 부분은 매우 많음을 알 수 있다.

1998년 미국에서 작성된 “생물테러 민간시설에 대한 제독방안”이라는 보고서에서는 앞으로 발전되어야 할 생물테러 제독방안을 제시하였다.<sup>9)</sup>

당시의 미국에서는 미생물을 연구하는 소규모의 실험실 조건에서의 제독절차 있으나 큰 빌딩의 경우 혹은 민간 공공시설의 경우에 있어서는 특별한 제독절차가 없을뿐더러 이러한 내용을 직접 훈련해본 경험도 매우 희박하였다고 한다.

미 육군 전염병 연구소(USAMRIID: US Army Research Institute and Infectious Diseases)에서는 제독절차(Decon Procedure)에 있어서 한 가지 방법보다는 두 가지 이상 제독방법을 적용하도록 제시하였는데 예를 들면, 증기를 이용한 제독(vapor method)과 표면제독(surface decon), 멸균(sterilization), 소각(incineration) 등을 혼합한 방법을 말한다. 더불어 미생물 사멸에 보다 효과적인 자외선, X선, 감마 방사선 조사를 이용한 방법도 적용 가능하리라고 예상하고 있다.

하지만 어떠한 방법도 완벽하다고는 장담할 수 없고, 이상적인 것은 없다고 하였다. 더욱이 대부분의 제독제들은 사람에게 독성이 있거나, 특정 표면을 부식 또는 연화시키는 등의 결점을 가지고 있어, 더욱 어렵고 예상치 못한 다른 특별한 문제들에 직면하게 된다고 하였다.

제독 후 조치과정에서도 어떠한 상태가 정말로 깨끗한 상태(clean)인가에 대해서는 많은 논쟁의 여지를 남긴다. 100% 사멸(sterilization)이냐 아니면 적절한 수준의 제독(disinfection)으로 감염자 발생을 최소화하느냐의 의미는 제독의 방법론적인 측면에서 매우 다른 결과를 가져올 수 있다. 따라서 일정 수준까지 제독을 함에 있어서 제독과정에 소요되는 비용과 시간 등의 다각적 요소들이 고려되어야 할 것으로 보인다.<sup>9)</sup>

탄저소동이 있고난 후부터 최근까지 발전된 민간시설에 대한 생물오염지역 제독방법은 가스 상의 멸균제를 활용하는 방법으로 많은 발전이 이루어졌다. 이는 비단 생물테러오염지역 뿐만 아니라 병원에서 공기 중으로 전파되는(nosocomial disease) 바이러스 감염을 최소화하기 위한 실내소독방안으로도 발전이 되었다.

가스 상의 소독은 액상에서의 소독반응보다 사용하는 조건이 까다롭기는 하지만 실내를 100% 완벽하게 소독하기 위해서는 더 많은 장점이 있다. 갈라진 틈, 천정, 책상아래, 환풍기 등 사람의 손이 닿지 않을 곳에 대한 적절한 소독이 가능하며 실내에 놓인 물건들을 방치한 상태로도 적용이 가능하기 때문이다.

가스 상의 소독제의 종류는 액상에서 소독하는 것을 증기화 한 염소계열, 포름알데히드계열의 소독방법이 전통적으로 많이 사용되어왔고, 최근에는 인체유해성 및 소독후의 환경친화적인 방법을 적용하기위해 과산화수소, 오존가스를 이용한 소독방법이 발전되고 있다.

전통적으로 많이 사용되어왔던 포르말린 증기법은 미생물의 단백질 산화와 보툴리눔 독소를 효과를 저해하는 특성이 있다. 하지만, 포르말린 자체는 발암성 물질로 분류되어 있고, 그 독성으로 인해서 사용이 제한되며, 또한 사용 후에는 공간내부를 탄화수소암모늄(Ammonium Bicarbonate)으로 재처리해야하는 번거로움이 발생한다.

또 다른 가스멸균제로써 클로린 디옥사이드(chlorine dioxide: CD)가스를 이용할 수 있는데, 클로린 디옥사이드 가스는 독성이 비교적 낮으면서도 선택성이 강해 실내에 존재하는 각종 금속의 표면을 산화시키지 않는 범위 내에서 실내 소독이 가능한 것으로 알려져 있다. 미국의 EPA 환경대응팀에서는 2001년 탄저균에 오염된 워싱턴주 The Hart Senate Office Building을 2001년 12월에 2회, 2002년 1월에 1회(총 3회)의 클로린 디옥사이드 증기를 이용하여 빌딩내부 소독을 한 바 있다.<sup>10)</sup>

최근에는 과산화수소 증기법(vaporized hydrogen peroxide: VHP)의 장점이 크게 부각되면서 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다고 한다. 과산화수소의 증기화에서 발생하는 OH 라디칼은 미생물의 멤브레인, DNA, 그리고 셀에 있어 필수적인 요소들을 파괴하여 미생물 불활성화를 초래한다. 최근에는 과산화수소 증기를 작은 공간에서 비교적 밀폐된 큰 공간까지로의 내부를 소독하는 실험을 통해 그 성능이 입증된 바 있다. 이는 4~80℃ 온도에서 적용가능하고, 사용에 따른 금속의 부식, 산화반응 최소화 할 수 있으며, 사용 후에도 물과 산소로 분해되기 때문에 환경적으로 매우 유익한 가스상 제독방법이라고 볼 수 있다.<sup>10)</sup>

오존가스는 높은 산화력을 지니고 있으며, 대부분 정수처리공정에서 미생물을 소독하기 위해 사용되어왔으나, 최근에는 오존을 가스 상의 멸균제로 사용하여, 생물학 테러의 대상이 되는 밀폐된 실내공간을 1,500 ppm 정도의 오존을 이용한 제독방법이 연구되고 있다.<sup>14)</sup>

이러한 방법 외에도 고 에너지 전자를 이용한 E-beam이나 감마선을 의심되는 물체에 조사(irradiation)하여 내부를 소독하는 방법들도 연구되어지고 있다.

#### 6.4. 새로운 소독기술의 적용

본 연구실(생물막공학 연구소)에서도 생물테러에 대비한 소독과정의 하나로써 과산화수소와 오존을 이용한 효과적인 제독방법을 연구하고 있다. 탄저 스포어에 대한 지표미생물으로써 실험의 대상이 되는 *Bacillus subtilis* spore를 이용하여 여러 가지 재질 표면에 부착시킨 후 가스 상의 소독제를 이용하여 불활성화를 측정함으로써 실제상황에서도 적용 가능한 예상 데이터를 추적 할 수 있다.

가스 상의 오존을 이용하여 spore의 소독에 관한 연구는 1986년 Ishizaki에 의해서 발표된 바 있다.<sup>12)</sup> Ishizaki에 의하면 오존가스를 이용하여 spore를 불활성화 시키는데는 습도(relative humidity)의 영향이 매우 중요한 요인임을 밝혀냈고, 상대습도가 높을수록 불활성화율이 크게 일어나며, 건조된 spore의 표면에 일정한 양의 수분이 포함될 수 있도록 전처리(preconditioning)를 하였을 경우에는 초기에 발생하는 지연기(lag phase)를 최소화 할 수 있다고 하였다. 2006년 Ahmet Aydogan과 Mirat D. Gurol의 연구에서는 *Bacillus subtilis* spore를 오존의 농도별, 상대습도별, 표면의 재질에 따라서 발생하는 불활성화율을 구체적으로 분석하여 오존가스를 이용한 생물테러 오염지역에 대한 제독 개념을 보다 현실화하였다.<sup>13)</sup>

본 연구실에서는 고도산화법(AOP)을 공기나 표면으로의 반응으로 유도하여 바이오테러리즘에 대한 대비책의 하나로써 적용가능한 과산화수소와 오존을 혼합한 가스형태의 제독방안에 대해서 심도 깊은 연구를 진행하고 있다.

실험에 사용된 방법으로써, 테러상황을 묘사하기위해 특정 표면위에 10<sup>6</sup> CFU/mL의 스포어 현탁액을 건조시킨 쿠펜을 이용하였으며, 이를 밀폐된 반응기에 넣은 후 water column

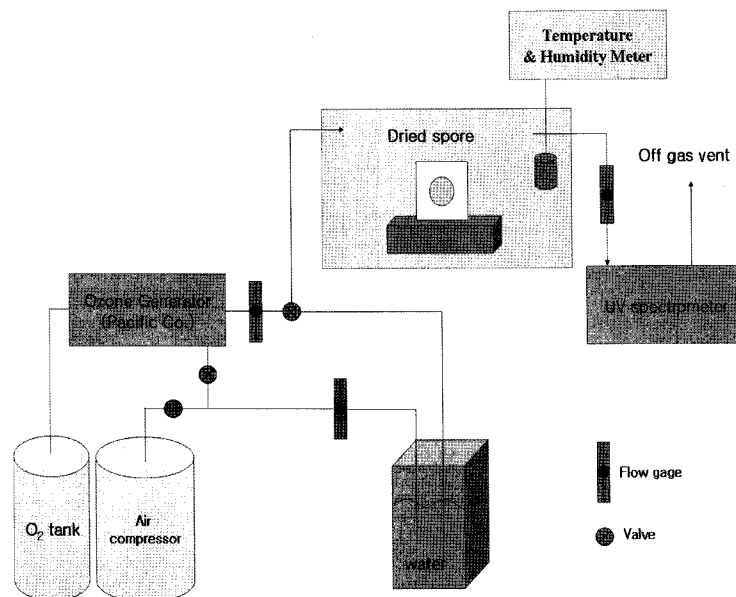


Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus.

을 통과한 습한 오존가스(wet gaseous ozone)를 일정시간 주입하였다. Fig. 5는 오존 소독의 개략적인 실험 장치를 나타낸 것이며, 오존발생장치와 연결된 2개의 라인중 1개 라인은 water column을 통과시켜 습한 상태의 오존가스를 발생시키는데 이용하였다. 오존 농도의 변화를 관찰하기 위해 반응기의 전후에는 일정한 오존농도의 모니터링을 위한 Ozone analyzer(INUSA, Model H1, USA)와 UV spectrophotometer (Agilent Model 8453, USA)를 설치하여 실시간 오존의 농도를 모니터링 하였다. 오존 처리된 스포어의 회수시에는 처리된 시편을 10 mL의 인산완충용액(tween 20 : 0.2%, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 0.1 M 포함) 으로 옮긴 후 sonication을 20분간 처리하여 건조된 스포어를 탈착시키고, 살아있는 포자의 수는 Spread Plate Method법에 의해 측정하였다.

이러한 방법에 의한 실험결과로써, 수분을 함유한 가스 상의 오존은 건조한 오존보다 매우 강력한 산화력을 지니고 있으며, 30분 이내에 6로그 이상의 불활성화를 달성할 수 있을 만큼 강력한 사멸효과를 나타내었다. 이 결과를 Ishizaki의 연구결과와 비교해 볼 때, 동일농도의 오존가스를 상대습도 95%에서 처리했을 때보다 3배 이상 빠른 불활성화를 유도할 수 있다는 결론에 도달하게 된다(Fig. 6, 7).

이렇듯 오존 가스를 이용 시에 영향을 미치는 요소로는 공기 중의 상대습도를 포함한 미생물 표면의 상대습도, 오존의 농도, 표면재질 등 여러 가지 요소가 영향을 미치는 것으로 보인다.

Fig. 8은 1,500 ppm의 Wet Ozone gas가 서로 다른 균용 피복류 표면위에서의 spore에 대한 불활성화 효과를 나타내고 있다. 사용된 표면의 재질은 침투성 보호의 외피, 방독면 보호두건, 페인트칠 된 금속의 표면이다. 이 실험 결과에서 보호의→방독면 보호두건→페인트 표면→유리표면 순으로 불활성화가 빠르게 진행되었다.

표면의 재질에 따라서 불활성화의 효과가 다른 이유는 표면의 거칠기(surface roughness)와 건조되는 과정에서 발생된 스포어의 응집(clumped)현상과 매우 깊은 관련이 있어 보이며, 이러한 표면의 요철현상으로 인해서 내부에 깊이 침투

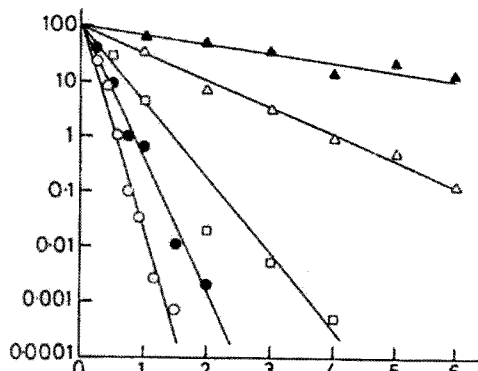


Fig. 6. Inactivation of spores of *Bacillus cereus* AHU 1357 by ozone. Spores were conditioned at 54% r.h.(relative humidity) and exposed to 3 mg/L ozone on filter paper at r.h. of : ○,95% : ●,90% : □,80% : △,70% : ▲, 50%.<sup>12)</sup>

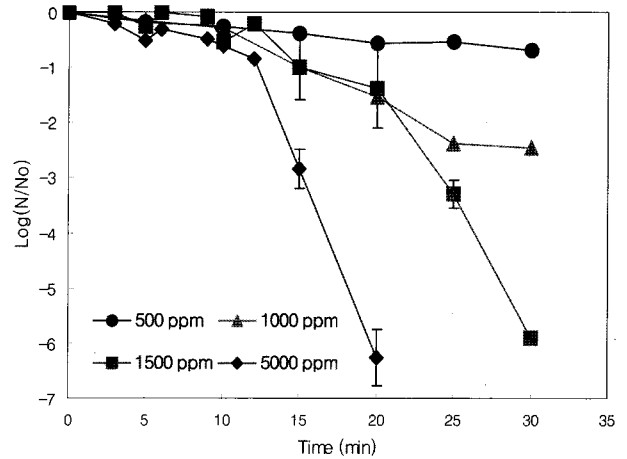


Fig. 7. Inactivation by wet gaseous ozone : dried *Bacillus subtilis*(ATCC 6633) spores on glass surface(Woodong Jeong, 2007, unpublished information).

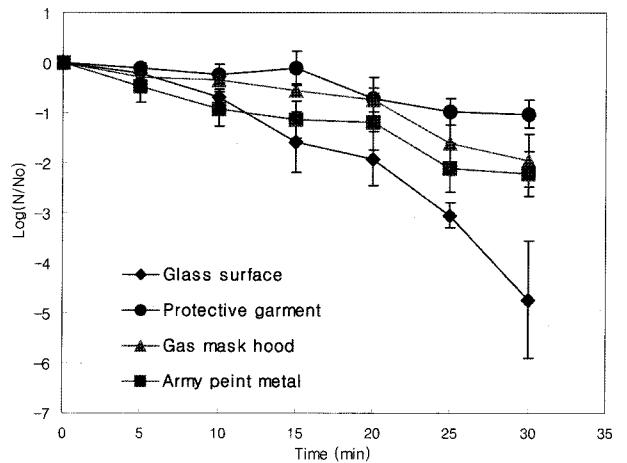


Fig. 8. Inactivation by wet gaseous ozone : dried *Bacillus subtilis*(ATCC 6633) spores on military material surface(Woodong Jeong, 2007, unpublished information).

한 채로 건조된 스포어의 경우에는 동일한 불활성화를 달성하는데 보다 많은 시간 혹은 높은 농도의 오존이 필요할 것으로 보인다.

이러한 결과는 비상시 제독작전을 수행해야하는 화학부대원의 생존성과도 밀접한 관련성을 찾을 수 있으며, 오염된 지역 혹은 균용물자를 제독하는데 소요되는 시간의 결정에도 큰 영향을 미칠 수 있는 요인이다.

## 7. 결론 및 제언

본고에서는 생물테러시 사용되고 있는 현행 소독기술과 보완되어야할 부분에 대해서 알아보았다. 현재까지 대부분의 생물소독기술은 산화제를 물과 반응시킨 수용액을 이용한 환경소독이 주를 이루고 있다. 하지만 인체 유해성, 사용 후 소독제의 중화과정, 에어로졸 형태로 곳곳에 흩어져 분포된 병원성 미생물의 멸균이라는 측면에서 현행의 소독기술과는 다른 새로운 대처방안이 필요하다.



2001년 미국에서 발생한 생물테러의 후속조치로서 큰 규모의 빌딩을 정화하는 과정에서 발생한 수많은 문제점을 바탕으로 최근 가스형태의 제독방법을 이용한 환경소독의 방법이 발전되고 있다. 여러 종류의 가스를 이용한 소독방법 중 본고에서는 오존가스를 이용한 소독방법을 적용해보았고, 탄저균의 지표미생물로서 바실러스 스포어를 대상으로 한 여러 종류의 실험을 해보았다.

실험결과 오존을 이용하여 실내소독을 하기 위해서는 상대 습도를 일정하게 유지한 상태에서 오존의 접촉시간을 보장하기 위한 밀폐시설이 보장되어야 한다. 또한 오존 가스 자체에 수분이 함유되도록 물속을 통과한 습한 오존가스를 주입하는 것도 매우 효과적일 것으로 보인다. 비록 가스형태의 소독방법이라 할지라도, 스포어가 존재하는 표면의 거칠기와 건조되는 과정에서 발생한 미생물의 증첩(clumped) 현상 등은 보다 높은 오존가스의 CT값이 필요한 요인으로 볼 수 있다.

아직까지 생물테러의 경험이 없는 우리사회로써는 어떠한 방법이 가장 합리적이고 효과적일지에 대해서 보다 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

앞서 언급된 소독기술은 밀폐 가능한 민간인 시설을 생물테러의 대상으로 하였을 때 효과적인 제독방법들이다. 철도, 공항, 항만 등 밀폐가 어려운 대규모 시설에 대해서는 또 다른 특성을 갖춘 생물제독제의 개발과 적용이 요구될 것이다.

이와 더불어 생물테러에 대한 사전 조기탐지 및 경보체계를 확보하고, 유전적으로 변형된(recombinant) 미생물에 대해서도 항생효과를 나타내는 새로운 항생제의 개발과 비축, 그리고 생물테러가 발생된 각종 시설을 적절한 방법으로 효과적으로 제거하는 제반 기술들은 지속적인 연구개발과 실제 상황을 묘사한 훈련을 통한 검증이 되어야 할 것이고, 이러한 내용들은 대국민 홍보활동을 통해서 적절하게 교육되어야 할 것이다. 이렇듯 다양한 분야에서 생물테러에 대한 준비는 우리사회를 좀 더 안전하고, 깨끗한 사회로 만들어 가는데 있어 반드시 필요한 부분이라는 생각이 든다.

### 참고문헌

1. 이승달, 양일우, 이남택, 정우영, 계영식, 김성일, 최돈성, 김동욱, "화학/생물학 작용제 특성 및 대응요령," 육군사관학교, pp. 75~80, pp. 82~84, pp. 143(2001).
2. 이남택, "국제적 생물무기 위협실태 - 생물무기의 위협과 대응방향," 한국화학방방어학회지, pp. 4~7(2004).
3. 한현우, "생물테러에 대한 정부의 대응방안," 대한의사협회지, 47(12), 1229~1235(2004).
4. 질병관리본부, 생물테러대비 초동대응요원 교육, pp. 12~17(2005).
5. 육군본부, "야전교범 37-5," 화학부대(2005).
6. 육군사관학교 화랑대 연구소, "화생무기테러 대응체계 개발," pp. 8~9, pp. 78(2003).
7. 육군교육사령부, "대화생방테러작전," pp. 부6-2(2003).
8. 질병관리본부, "생물테러대비 및 대응지침," pp. 71(2004).
9. Institute for Defense Analyses, "Decontaminating Civilian Facilities : Biological Agents and Toxins," pp. 22~27 (1998).
10. Robert J. Hawley and Joseph P. Kozlovac, "Decontamination," Biological Weapons Defense, Humana Press Totowa, New Jersey, pp. 333~344(2005).
11. Aakash Khurana, "Ozone treatment for prevention of microbial growth air conditioning systems," University of Florida, pp. 1~3(2003).
12. Kozo Ishizaki, Nariko Shinriki, Hidetoshi Matsuyama, "Inactivation of *Bacillus* spores by gaseous ozone," *J. Appl. Bacteriol.*,(1986).
13. Ahmet Aydogan and Mirat D. Gurol, "Application of Gaseous Ozone for Inactivation of *Bacillus subtilis* Spores," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*,(2006).
14. Currier, R. P., Torracco, D. J., Cross, J. B., Wagner, G. L., Gladden, P. D., and Vanderberg, L. A., "Deactivation of Clumped and Dirty Spores of *Bacillus globigii*," *Ozone Science & Engineering*(2001).
15. Rip G. Rice, Ph.D, "Ozone and Anthrax - Knowns and Unknowns," *Ozone Science & Engineering*, 24, 151~158 (2002).
16. Public Broadcasting Service Home Page, [http://www.pbs.org/wgbh/nova/bioterror/germs\\_01.html](http://www.pbs.org/wgbh/nova/bioterror/germs_01.html).
17. World Health Organization Home Page, [http://www.who.int/emc/diseases/smallpox/slideset/pages/spox\\_016.htm](http://www.who.int/emc/diseases/smallpox/slideset/pages/spox_016.htm).

1. 이승달, 양일우, 이남택, 정우영, 계영식, 김성일, 최돈성, 김동욱, "화학/생물학 작용제 특성 및 대응요령," 육군사