

## 과산화수소증기 시스템을 이용한 야전용 천막 내 *Geobacillus stearothermophilus* 아포 제독

윤성녀<sup>\*,1)</sup> · 김윤기<sup>1)</sup> · 정정훈<sup>1)</sup> · 유현상<sup>1)</sup> · 민경률<sup>1)</sup> · 김민철<sup>1)</sup> · 김세계<sup>2)</sup> · 류삼곤<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 삼양화학공업(주) 분석기기연구소

<sup>2)</sup> 한양대학교 분자생명과학과

<sup>3)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

### Decontamination of Interior of Field Tent Employed *Geobacillus stearothermophilus* Spores using a Hydrogen Peroxide Vapor System

Sung Nyo Yoon<sup>\*,1)</sup> · Yun Ki Kim<sup>1)</sup> · Jeung Hoon Jeung<sup>1)</sup> · Hyun Sang Yoo<sup>1)</sup> ·  
Kyung Yool Min<sup>1)</sup> · Min Cheol Kim<sup>1)</sup> · Se Kye Kim<sup>2)</sup> · Sam Gon Ryu<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Analytical Instrumentation Research Institute, Samyang Chemical Co., Ltd., Korea

<sup>2)</sup> Department of Molecular and Life Science, Hanyang University, Korea

<sup>3)</sup> The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 26 February 2016 / Revised 2 May 2016 / Accepted 19 August 2016)

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to demonstrate the suitability of hydrogen peroxide(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) vapor system for platform interior decontamination. *Geobacillus stearothermophilus* biological indicator(BI) strips and a field tent were used as a biological simulant and as a simulated platform, respectively. Decontamination was performed based on injection rates and tent sizes with exposure time 60 minutes. We standardized the conditions for the field tent decontamination : 8.0 g/min for 30 m<sup>3</sup>(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vapor concentration of 150~500 ppm, relative humidity of 50 %) and 12.0 g/min for 60 m<sup>3</sup>(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vapor concentration of 250~400 ppm, relative humidity of 55 %). Thus we suggest the system is one of the possible candidates for decontamination of platform interiors.

Key Words : Decontamination(제독), Field Tent(천막), Platform(플랫폼), Biological Simulant(모의 생물학작용제), Hydrogen Peroxide Vapor(과산화수소증기), Injection Rate(주입량)

#### 1. 서론

생물학작용제 노출은 짧은 시간에 막대한 인명피해와 경제적 손실을 초래한다. 수년전만 하더라도 생물학작용제에 오염된 장비를 제독하는데 수많은 양의 물, 제독제 그리고 인력이 필요하였다. 그리고 첨단화

\* Corresponding author, E-mail: 9918348@samyangchemical.com  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

되고 복잡해진 전자, 광학장비 등으로 구성된 무기체계는 전통적인 제독방법을 사용할 경우 장비손상이나 오작동의 가능성이 있어 적용이 불가능하다. 따라서 야전에서 주요장비의 성능을 발휘하여 병사들의 전투능력을 최상으로 유지할 수 있는 정밀전자, 광학장비 및 플랫폼(항공기, 차량 등) 내부의 제독을 위한 새로운 성능의 제독기술이 필요하게 되었다. 미국은 2000년대 초 정밀전자장비 및 광학장비제독을 위한 새로운 제독기술을 개발하는 JSSED(Joint Service Sensitive Equipment Decontamination)프로그램을 시작하였고 이와 더불어 2000년대 중반부터 JPID(Joint Platform Interior Decontamination)프로그램을 통해 차량, 항공기, 선박 등 플랫폼 내부에 구성된 전자장비 등의 제독기술을 개발하고 있다.

제독매체와 관련하여 미국은 2001년 탄저균 테러 사건 당시 상용화된 과산화수소증기 제독기(VHP : Steris, Inc., United Kingdom)를 이용하여 미 연방 우편시설의 제독을 성공적으로 수행한 후 미 육군 ECBC(Edgewood Chemical Biological Center)에서는 과산화수소증기 기술을 더욱 발전시켜 생물학작용제 뿐 아니라 화학작용제에 오염된 전자장비 제독을 위한 기술을 개발하였고<sup>[1]</sup> 2004년에 이 기술을 사용하여 대형공간에 대한 제독성능 시험을 수행하였다<sup>[2,3]</sup>. 플랫폼 내부 제독기술을 위한 JPID 프로그램 역시 산화성 가스 중 과산화수소증기를 이용하여 개발하고 있고 2018년에 기술개발이 완료될 예정이다<sup>[4]</sup>. 과산화수소증기의 장점은, 제독효율은 좋지만 발암물질인 포름알데히드와 에틸렌옥사이드에 비해 대기 중에서 안전한 산소와 물로 분해된다는 것이다<sup>[5]</sup>.

국내의 제독연구로는 산화성 가스인 오존과<sup>[6]</sup> 소형 챔버 내에서 과산화수소증기를 이용한 생물학작용제와<sup>[6]</sup> 화학작용제에<sup>[7]</sup> 대한 제독연구 결과가 있으며 장비로는 의료기기의 미생물제독을 위해 과산화수소와 플라즈마를 이용한 것이 상용화되었다. 그러나 상용화된 장비는 진공챔버 내에서만 작동되기 때문에 대형공간에서 사용하기는 어렵다. 국내의 현 군용 제독체계도 아직까지는 부식성 염기용액이나 수용성 제독제를 사용하고 있어<sup>[8]</sup> 플랫폼 내부를 제독하기에는 부적합하다. 따라서 플랫폼 내부제독이 가능한 건식제독기술의 보유가 매우 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 시도된 바 없는 광학장비 및 전자장비 제독가능한 과산화수소증기 시스템을 이용하여 플랫폼 내부제독 가능성을 확인하고자 플랫폼을

모사한 야전천막 내 모의 생물학작용제인 *Geobacillus stearothermophilus* 아포<sup>[9]</sup>의 제독을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료 및 배지

본 실험에 사용된 모의 생물학작용제는 *G. stearothermophilus* 아포로서 스테인리스 스틸 쿠폰에 약  $10^6$  cfu(colony forming unit)로 접종된 biological indicator (BI)를 MesaLabs(Colorado, USA)에서 구매하여 사용하였다. 제독 후 제독여부는 쿠폰을 TSB(Tryptic Soy Broth)에 넣고 55~60 °C 배양기에서 7일간 배양 후 배양액의 색이 노란색으로 변한 경우 제독되지 않은 것으로, 보라색으로 색변화가 없는 경우 제독된 것으로 판정하였다(Fig. 1).

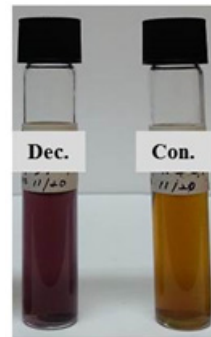


Fig. 1. Decision of decontamination based on color of culture medium after 7 days-culturing of BI : Dec.(Decontaminated) Con.(Contaminated)

### 2.2 야전용 대형천막

군용천막을 모사하기 위하여 폴리옥스포드 재질에 방수를 위해 내부에 PVC(Polyvinyl Chloride)코팅을 하여 10 m × 6 m × 3 m(L × D × H) 크기로 자체 제작하여 사용하였다. 30 m<sup>3</sup>, 60 m<sup>3</sup>, 90 m<sup>3</sup>, 150 m<sup>3</sup>로 격실화 할 수 있는 구조이고 전면과 후면은 통기할 수 있는 문을 배치하였다(Fig. 2).

### 2.3 과산화수소증기 시스템

본 실험에 사용된 과산화수소증기 시스템은 분사모듈(vaporizing module), 후처리모듈(catalytic/drying module)과 센서모듈(sensor module)로 구성된다(Fig. 3, 4).



Fig. 2. A form of field tent

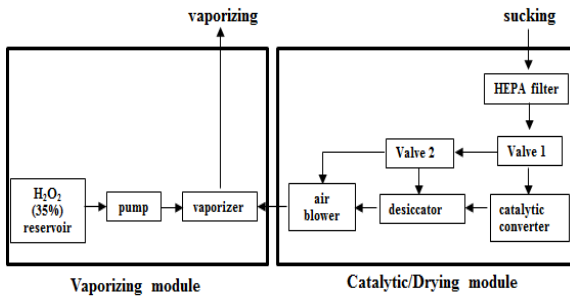


Fig. 3. Operating diagram of hydrogen peroxide vapor system



Fig. 4. Components of hydrogen peroxide vapor system

분사모듈의 정량펌프를 통해 35 %(w/w) 과산화수소를 기화기(vaporizer)로 공급한다. 공급된 액상 과산화수소는 노즐을 통해 140 ℃로 가열되어 있는 기화기 열판으로 분무되어 증기로 변환된다. 증기는 송풍기(air blower)에서 나오는 송풍량에 의해 제독공간 내로 분

사된다. 제독공간 내부에는 과산화수소증기 농도, 온도 및 습도 측정을 위한 센서모듈(sensor module)이 배치된다. 제독공간 내로 분사된 과산화수소증기는 다시 HEPA filter를 통해 후처리모듈로 들어온다. 그 다음 밸브 1, 2를 통해, 과산화수소 주입단계에서 습도제어가 필요없는 경우는 바로 송풍기로 이동하고, 습도제어가 필요한 경우는 건조기(desiccator)를 통과해서 송풍기로 이동한다. 후처리 시에는 제독공간에 남아있던 과산화수소 증기가 촉매전환기(catalytic converter)를 통해 산소와 물로 분해된다. 제작된 과산화수소증기 시스템 1대의 최대 주입량은 8 g/min이고 최대 송풍량은 500 lpm(liter per minute)이다.

#### 2.4 제독실험

제독과정은 증기를 주입하는 초기 주입단계(injection), 주입과 반응이 일어나는 반응단계(reaction) 그리고 제독 후 남은 과산화수소증기를 제거하는 후처리 단계(aeration)로 구성된다. 제독실험은 2015년 4월에서 6월에 걸쳐 야외에서 수행되었다.

본 실험에서는 천막의 내부 중앙에 장비를 배치하고 과산화수소증기 확산을 위해 장비의 좌우측에 ‘약 52 m<sup>3</sup>/min 풍량’의 팬(fan)를 배치하였다. 그리고 천막 내부 과산화수소증기 농도와 온·습도 확인을 위해 천막의 상단과 하단 각 5곳에 센서를 배치하였다. 시료는 상단 4곳과 하단 4곳 그리고 중앙 1곳을 합하여 모두 9곳에 배치하였다(Fig. 5).

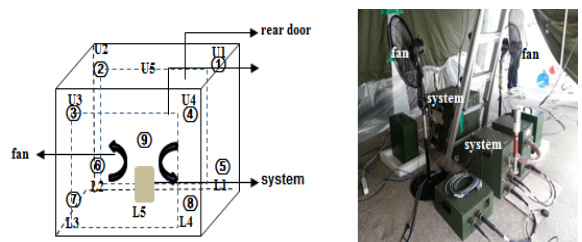


Fig. 5. Positions of sensors, samples, systems and fans in the field tent(U1~U5 : sensors for upper positions, L1~L5 : sensors for lower positions, ①~⑨ : sample positions)

천막공간의 크기에 따라 30 m<sup>3</sup>의 경우 장비 1대, 60 m<sup>3</sup>의 경우 1대와 2대, 90 m<sup>3</sup>과 150 m<sup>3</sup>의 경우 2대를 배치하였다. 후처리 단계는 천막 전 후면 문을 개방함으로써 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 천막크기에 따른 주입조건 및 제독결과

천막크기에 따라 수행된 제독조건은 Table 1에 나타내었다. 천막크기 30 m<sup>3</sup>에서 주입량 6.0 g/min과 8.0 g/min으로 제독을 할 경우 1대의 장비를 사용하였다. 천막크기 60 m<sup>3</sup>의 경우 8.0 g/min에서는 1대의 장비를, 12.0 g/min에서는 2대의 장비를 사용하였다. 천막크기 90, 150 m<sup>3</sup>에서는 주입량 16.0 g/min으로 각각 2대의 장비를 사용하였다.

Table 1. Injection conditions applied to different tent sizes

Injection rate (g/min)	Injection time (min)	Air flow rate (lpm)	System quantity/tent size (m <sup>3</sup> )	
6.0	60	300	1	30
8.0	60		1	60
8.0	60		2	
12.0	60		2	90
16.0	60		2	150
16.0	60		2	150

Aeration is conducted by opening the front and rear doors.

제독결과는 Table 2에 나타내었다. 천막크기 30 m<sup>3</sup>, 6.0 g/min의 제독조건에서는 시료 위치가 하단인 5, 6, 7, 8번에서는 제독되지 않았으나 8.0 g/min에서는 모두 제독됨을 확인하였다. 천막크기 60 m<sup>3</sup>의 경우, 8.0 g/min에서는 모든 위치에서 제독되지 않았으나 12.0 g/min에서는 모든 위치에서 제독됨을 확인하였다. 천막크기 90 m<sup>3</sup>, 주입량 16.0 g/min에서는 8번과 9번 위치에서만 제독되었다. 천막크기 150 m<sup>3</sup>, 주입량 16.0 g/min에서는 모든 위치에서 제독되지 않음을 확인하였다.

이는 제작된 과산화수소증기 시스템 1대의 최대 주입량인 8.0 g/min으로 제독했을 때 천막크기 30 m<sup>3</sup>에서는 1대의 장비로 주입시간 60분 내에 제독 가능하며 60 m<sup>3</sup>에서는 2대의 장비로 60분 내에 제독할 수 있음을 의미한다. 그러나 90 m<sup>3</sup>과 150 m<sup>3</sup>의 경우 2대의 장

비로는 주입시간 60분 내에 완전제독 할 수 없음을 의미한다. 미국은 건식제독기술 선행연구 과정에서 모듈화된 시스템의 mVHP™(Steris)로 C-141B 항공기 내부 제독을 시도하였다<sup>[3]</sup>. 항공기 내부에 분사모듈과 순환용 팬(풍량 약 198 m<sup>3</sup>/min)을, 항공기 외부에 건조기, 송풍기를 배치하여 시험하였다. 조종석에서 꼬리부분까지 약 408 m<sup>3</sup> 공간에 6대의 VHP와 각 VHP 양 옆으로 2대의 순환용 팬을 설치하여 제독가능성을 시험하였다. 항공기 내부 온도는 주입되는 공기의 온도를 높이는 가온장치(pre-heater)를 사용하였다. 그리고 주입 60분에 250 ppm까지 도달하는데 과산화수소 4517 g을 소모하였다. 이는 408 m<sup>3</sup> 공간에 VHP 6대를 사용한 것을 감안할 때 VHP 1대는 약 68 m<sup>3</sup> 공간을 주입 60분 만에 250 ppm까지 높이기 위해 과산화수소 752 g을 소모했다는 것을 의미한다(이때 분당 주입량은 12.5 g/min으로 환산됨). 본 실험에 사용된 과산화수소증기 시스템의 경우는 60 m<sup>3</sup> 공간을 주입 60분에 공간 내 최저농도 250 ppm까지 도달시키는데 주입량 12.0 g/min(1대의 최대 주입량 8.0 g/min을 고려할 경우 과산화수소증기 시스템 1.5대에 해당)이 필요했고 소모되는 과산화수소 양은 720 g이었다. 본 실험에 사용된 시스템을 VHP와 비교할 때 분사효율은 비슷하나 최대 주입량이 낮은 것은 장비의 소형화와 경량화(VHP : 227 kg, 과산화수소증기 시스템 : 50 kg) 때문이라 생각된다. 따라서 현 제독시스템의 무게나 크기를 증가하여 최대 주입용량을 늘린다면 대형공간의 플랫폼 내부제독도 가능하다고 생각된다.

Table 2. The efficacy of decontamination of BI under following conditions

Injection rate (g/min)	BI position									Tent size (m <sup>3</sup> )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6.0	○	○	○	○	×	×	×	×	○	30
8.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	30
8.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	60
12.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	60
16.0	×	×	×	×	×	×	×	○	○	90
16.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	150

3.2 각 제독조건에서 형성된 농도, 습도 그리고 온도 증기를 이용한 제독시스템 효율은 주입량에 따라 제독공간에 형성된 증기농도, 습도, 온도의 영향을 받는다<sup>[10]</sup>. 과산화수소증기의 제독효율과 제독 시 형성된 증기농도, 습도, 온도와의 상관관계를 확인하기 위하여 각 제독실험 조건에서 얻어진 농도, 온도와 습도를 Table 3에 나타내었다. 온도와 습도는 천막 내 주입 시작시점과 끝나는 시점의 수치를 나타내었다. 과산화수소증기 농도는 포화시점의 최저, 최고농도를 나타내었다.

Table 3. Environmental parameters(temperature, relative humidity, concentration) during decontamination with each injection rate

Injection rate (g/min)	Conditions			Tent size (m <sup>3</sup> )
	Tem(°C)	RH(%)	Con(ppm)	
6.0	28-30	30-33	50-250	30
8.0	27-25	39-50	150-500	30
8.0	30-30	40-40	150-250	60
12.0	31-33	55-55	250-400	60
16.0	30-30	48-40	100-150	90
16.0	35-40	15-20	380-550	150

Tem(Temperature), RH(Relative Humidity), Con(Concentration)

실험이 수행되었던 4월에서 6월에는 천막 내 시작시점의 온도가 27~35 °C로 과산화수소증기 제독 시 권장 온도인 25 °C 이상<sup>[3]</sup>이었다. 반면 습도는 시작시점에 15~55 %로 다양했다. 완전 제독된 30 m<sup>3</sup>(8 g/min)과 60 m<sup>3</sup>(12 g/min) 텐트크기의 경우 습도는 각각 50, 55 %까지 형성되었고 농도는 각 150~500 ppm, 250~400 ppm이었다(Table 2, 3). 그러나 150 m<sup>3</sup>(16 g/min) 텐트 크기의 경우 완전 제독된 위 두 조건에 비해 상대적으로 증기농도는 높았지만 습도가 20 %로 약 30 % 정도까지 낮았고 배치한 모든 위치에서 제독되지 않았다(Table 2, 3). 이는 50 % 정도의 습도에서 완전 제독되는 최저농도는 150 ppm이며 습도가 20 % 정도에서는 550 ppm에서도 제독되지 않는다는 것을 의미한다. 이는 농도 뿐 아니라 습도 역시 중요한 요인임을 나타낸다. 이 결과는 습도가 제독효율에 영향을 준다는 Unger-Bimczok의 연구결과와 일치한다<sup>[10]</sup>.

### 3.3 농도와 습도에 따른 제독결과

제독에 미치는 농도와 습도의 관계를 알아보기 위해 각 조건 별 모든 위치에서의 제독결과를 그래프로 나타내었다(Fig. 6). 과산화수소증기 농도 100 ppm 미만에서는 습도에 관계없이 제독되지 않았다. 과산화수소증기 농도 100~250 ppm 경우, 습도 20 % 이하에서는 제독되지 않았으나, 습도 40~55 %에서는 11개 중 8개가 제독되어 약 73 %의 제독효율을 보였다. 농도 350 ppm 이상, 습도 45~55 %에서는 모두 제독되었다. 농도 350 ppm 이상, 습도 20 % 이하의 환경조건은 수행되었던 제독조건에서 형성되지 않았다. 그러나 이전 연구에서 농도 350 ppm 이상, 습도 20 % 이하 조건에서는 완전 제독되지 않음을 확인할 수 있었다<sup>[11]</sup>.

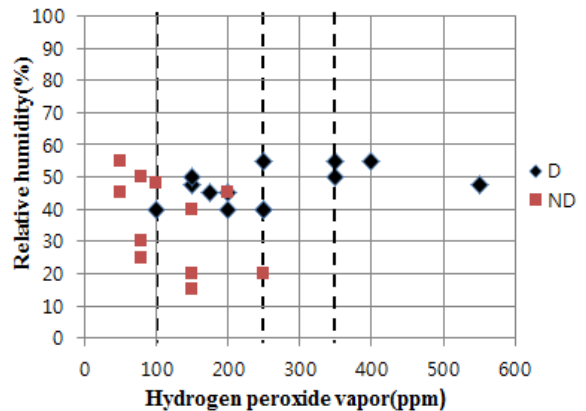


Fig. 6. The effect of concentration of hydrogen peroxide vapor and relative humidity on decontamination of BI : D(Decontaminated), ND(Not Decontaminated)

대형공간의 경우 소형공간에 비해 제독 시 상대적으로 습도가 낮게 형성된다. 초기습도가 비슷하고 주입량이 같은 30 m<sup>3</sup>(8 g/min)과 60 m<sup>3</sup>(8 g/min)의 경우를 비교하면 예상할 수 있듯이 30 m<sup>3</sup>에서는 주입이 끝나는 시점에 습도가 약 10 % 증가하나 60 m<sup>3</sup>에서 거의 증가하지 않는다. 또한 90 m<sup>3</sup>, 16.0 g/min에서는 오히려 초기습도에 비해 낮아지는 경향을 보인다(Table 3). 이는 야전천막 외부의 바람세기와 같은 환경요인에 기인한 것이라 생각된다. 본 실험은 야전에서 손쉽게 대형 제독공간을 확보할 수 있는 수단으로 야전천막을 사용하여 수행한 결과이며 외부 환경요인을 배제하도록 밀폐를 완전히 하였을 시는 결과가 다소 차이가 있

을 것으로 판단된다. 따라서 대형 플랫폼 내부를 제독하기 위해서는 외부환경의 영향을 줄일 수 있는 플랫폼 내부공간의 밀폐와 더불어 시스템의 주입용량 증가 혹은 사용대수 증가를 통해 증기농도와 습도를 동시에 높임으로서 보다 효율적 제독이 가능하다고 사료된다.

#### 4. 결론

과산화수소증기 시스템을 이용하여 야전천막 30 m<sup>3</sup> 공간에서는 주입량 8.0 g/min으로 주입시간 60분 만에, 60 m<sup>3</sup> 공간에서는 주입량 12.0 g/min으로 주입시간 60분 만에 모의 생물학작용제가 완전 제독됨으로서 과산화수소증기 시스템의 플랫폼 내부제독 가능성을 확인하였다. 또한 시스템의 주입용량 증가 혹은 사용대수를 증가한다면 더 큰 대형 플랫폼 내부도 전자장비 손상 없이 제독 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 건식제독기술사업(UC13002320)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] G. W. Wagner, "Modified Vaporized Hydrogen Peroxide(mVHP<sup>®</sup>) Decontamination of VX, GD and HD," Edgewood Chemical Biological Center, 2007.
- [2] G. W. Wagner, "Large Scale Tests of Vaporous Hydrogen Peroxide(VHP) for Chemical and Biological Weapons Decontamination," Edgewood Chemical Biological Center, 2007.
- [3] M. D. Brickhouse, "Vaporous Hydrogen Peroxide of a C-141B Starlifter Aircraft: Validation of VHP and mVHP Fumigation Decontamination Process via VHP-sensor, Biological Indicator, and HD Simulant in a Large-scale Environment," Edgewood Chemical Biological Center, 2005.
- [4] "Joint Platform Interior Decontamination : Fact Sheet," Chemical, Biological, Radiological, & Nuclear Information Resource Center, 2010.
- [5] W-D. Jeong, S-M. Mun, M. Cho and J-Y. Yoon, "Application of Gaseous Ozone for Cleaning Biological Weapon Agent Contaminated Building," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 101-108, 2008.
- [6] Y. K. Kim, M. C. Kim, S. N. Yoon, H. C. Hwang and S. G. Ryu, "A Study on Microorganisms Decontamination using a Vapor-phase Hydrogen Peroxide System," J Environ Health Sci, Vol. 39, No. 3, pp. 278-287, 2013.
- [7] Y. K. Kim, H. S. Ryu, M. C. Kim, H. C. Hwang and S. G. Ryu, "Decontamination of Chemical Warfare Agent Simulants using Vapor-Phase Hydrogen Peroxide," Korean Chemical Engineering Research, Vol. 52, No. 3, pp. 360-365, 2014.
- [8] B. S. Kim, S. E. Cheon and J. Ryu, "Application of Water-soluble Decontaminant for Multi-purpose," National Defense and Technology, Vol. 324, pp. 72-79, 2006.
- [9] J. A. Otter and S. Yezli, "Are Commercially Available *Geobacillus stearothermophilus* Biological Indicators an Appropriate Standard for Hydrogen Peroxide Vapour Systems in Hospitals?," J Hosp Infect, Vol. 80, pp. 272-273, 2012.
- [10] B. Unger-Bimczok, V. Kottke, C. Hertel, J. Rauschnabel, "The Influence of Humidity, Hydrogen Peroxide Concentration and Condensation on the Inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* Spores with Hydrogen Peroxide Vapor," J Pharm Innov, Vol. 3, pp. 123-133, 2008.
- [11] S. N. Yoon, Y. K. Kim, M. C. Kim, S. K. Kim, K. H. Jung, Y. G. Chai, S. G. Ryu and H. W. Lee "A Study on Condition of Microbial Sterilization using a Vapor-phase Hydrogen Peroxide System," Proceedings of the Korean Environmental Health Society Conference(39<sup>th</sup>), p. 257, April, 2015.