

박물관에서의 저산소 농도를 이용한 살충 기술

오준석¹
국립민속박물관 보존과학실

Anoxia Techniques to Eradicate Insects for Conservation of Cultural Properties in Museums

Joonsuk Oh¹

Conservation Laboratory, The National Folk Museum of Korea, Seoul, 110-820, Korea

¹Corresponding Author: kcommune@yahoo.co.kr, +82-2-3704-3276

초 록 박물관에서 질소나 아르곤과 같은 불활성 가스를 사용한 저산소 농도 살충처리법은 메틸브로마이드나 유독성 살충제의 대체법으로써 성공적으로 사용되어 왔다. 저산소 농도 살충법의 살충 효과는 해충의 종, 산소 농도, 온도, 습도, 가스의 종류 등에 따라 영향을 받으며, 박물관에서의 문화재 보존 환경(온도 15~25℃, 습도 40~60%)에서 산소 농도를 0.03% 이하로 유지함으로써 1개월 이내에 가장 내성이 강한 문화재 해충의 살충이 가능하다. 그리고 살충 처리 대상 문화재의 수량이나 크기에 따라 소형·중형 백, 대형 텐트, 버블, 챔버 등 다양한 시스템을 적용할 수 있다.

중심어: 저산소 농도 살충법, 불활성 가스, 질소, 아르곤, 노출 시간, 산소 농도, 온도, 습도

ABSTRACT Anoxia Treatment using inert gas like nitrogen and argon has been used to eradicate insects successfully in museums as alternative of methyl bromide and toxic insecticide. Killing efficacy of insect for anoxia treatment is depend on species of insects, oxygen concentration, temperature, relative humidity and gas. It is possible to kill museum insects which are most tolerant in anoxia environment, within 1 month below 0.03% of oxygen concentration in temperature 15~25℃ and relative humidity 40~60% of museum environment. And various systems like bag, tent, bubble and chamber depending on size and quantity of objects, are used.

Key Words: Anoxia technique, Insect eradication, Inert gas, Nitrogen, Argon, Exposure time, Oxygen concentration, Temperature, Relative humidity

1. 개요

나무, 종이, 섬유 등과 같은 유기질 재질의 박물관 소장품이 직면하는 잠재적인 손상 요인 중의 하나가 생물(곤충, 곰팡이 등)의 침입에 의한 위협이다. 이러한 유해 생물이 출몰하면 효과적으로 제거하기 위한 방법 중의 한 가지가 살충과 살균과 같은 방제법이다. 그러나 방제에 사용되는

살충제나 살균제는 소장품의 재질에 바람직하지 않는 부작용(형태나 물질의 변형)을 일으킬 수 있으며, 인체나 환경에도 위협으로 작용해 왔다. 특히 훈증제로써 널리 사용되어 온 메틸브로마이드가 지구의 오존층 파괴물질로써 1997년 몬트리올의정서에서 최종 전폐 일정이 결정되어¹, 선진국은 2005년부터 사용이 금지되었으며, 우리나라를 포함한 개발도상국은 2015년 전폐 예정이다. 이에 따라 메틸브

로마이드의 대체법으로써 고온과 저온의 이용, 방사선 조사, 질소나 아르곤 가스를 이용한 저산소 살충법, 이산화탄소를 이용한 살충법 등에 대한 연구가 증가하게 되었다². 이 중에서 현재 질소나 아르곤을 이용한 저산소 살충법이나 이산화탄소 살충법, 저온법 등이 문화재 보존을 위한 살충법으로써 전 세계에 널리 보급되어 있다.

질소, 아르곤, 이산화탄소와 같은 조제된 공기(modified atmosphere)를 이용한 살충법에 대한 과학적인 연구는 1918년 곡물 공급에서 해충을 제거하기 위한 기밀 보관의 이용에 대한 연구 발표가 시초였다. 1950년대 들어 살충제에 의해 야기된 환경에 대한 위험성이 증가하면서 식품 보존을 위해 조제된 공기에 대한 관심과 함께 연구가 증가하게 되어³, 1970년대 이후 독성이 없는 가스(질소, 아르곤)나, 이산화탄소의 이용에 대한 수많은 연구가 이루어졌다⁴⁻⁸. 이러한 배경으로 이산화탄소를 이용한 살충법은 적어도 수십 년 이상 저장 곡물의 해충을 방제하는데 훈증제로써 사용되어 왔으며⁹, 질소로 대체된 저산소 농도의 공기로 해충을 질식사시키는 살충법도 수십 년 동안 곡물의 저장 사일로 의 해충 방제를 위해 사용되어 왔다². 이와 같은 인위적으로 산소 농도가 제어된 공기(controlled atmosphere)로 만든 저산소 환경을 이용한 살충에 대한 연구 성과와 기술은 문화재 보존분야에 직접적으로 전달되었다.

질소나 아르곤은 독성이 없고 비가연성 물질이며 불활성 가스로 물질과 반응을 일으키지 않아 문화재의 살충에 적합하다. 문화재 가해 해충을 제어하기 위해 불활성 가스로 제어된 공기의 사용은 1985년 처음 언급되었다¹⁰. 그리고 문화재 보존과학자에 의한 연구는 두 기관(오스트레일리아박물관, 게티연구소)에서 시작되었다³. 1989년 문화재 보존분야에서는 최초로 오스트레일리아박물관의 Gilberg가 박물관에 적합한 방법으로 권연벌레, 인삼벌레, 넓적나무좀, 흥피수시렁이, 애웃좁나방의 성충에 대한 질소 저산소 농도 살충법에 관한 연구 결과를 보고하였고¹¹, 이어서 1991년에는 같은 종에 대해 모든 성장 단계(알, 애벌레, 고치, 성충)에 대해 질소의 살충 효과를 확인하였다¹². 1990년의 탈산소제를 이용한 저산소 살충법의 연구는¹³ 탈산소제를 사용한 저산소법이 널리 사용하게 되는 계기가 되었다. 한편 게티연구소의 과학프로그램에 참가한 Valentin 등은 1989년에 질소 저산소 농도 살충법을 이용하여 해충 방제를 실험한 결과 저산소 환경에서의 살충 효과를 확인하였다¹⁴. 이후 여러 연구자들은 박물관 해충에 대한 질소 저산소 농도 살충법 연구를 통해 산소 농도, 처리 시간, 온도, 습

도, 해충의 발달 단계 등에 따른 살충 효과를 평가하였다¹⁵⁻¹⁹. 이러한 연구 성과를 바탕으로 질소를 이용한 저산소 농도 살충법은 박물관에서 해충 방제를 위해 널리 사용되고 있다. 또 다른 불활성 가스인 아르곤은 미국 독립선언문의 보존을 위해 사용되어온 가스이다². 아르곤에 대한 평가를 통해 질소에 비해 살충 시간을 25~50% 줄일 수 있음을 발견하였으나^{20,21}, 아르곤 살충법에 대한 연구 부족을 질소를 이용한 방법에 비해 널리 보급되고 있지는 않고 있다.

이산화탄소를 이용한 살충법은 이산화탄소의 독성에 의해 살충하는 방법이다. 질소나 아르곤 저산소 살충법이 저산소 환경을 유지하기 위해 고도의 밀폐성이 요구되는 것(산소 농도 0.3% 이하)과 달리, 고도의 밀폐성이 요구되지 않아(산소 농도 8%) 작업이 용이하고 단시간에 많은 수량의 문화재의 살충처리가 가능하여 널리 이용되고 있는 방법이다. 일반적으로 대부분의 저장 곡물 해충의 모든 발달 단계를 제어하는데 가장 효과적인 60-80%의 이산화탄소로 조제된 공기를 문화재 해충의 살충에도 적용하고 있다^{9,22,23}. 그러나 이산화탄소는 일부 해충(애청삼나무하늘소, *Callidiellum rufipenne* (Motschulsky))에는 살충 효과가 없어²³, 문화재 가해 해충에 대한 정확한 동정 후 이산화탄소 살충법을 적용해야하는 신중함이 필요하다.

본고는 박물관의 소장품 보존을 위해 산소 농도가 제어된 공기를 이용하는 저산소 농도 살충법을 소개하는 것으로, 여러 요인(해충의 종, 산소 농도, 온도, 습도, 가스 종류 등)과 해충의 살충 효과와의 관계, 작업 방법 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 곤충의 죽음 메커니즘

곤충은 복부의 측면을 따라 작은 구멍 즉 기문(spiracle)을 가지고 있고 이 공기구멍을 통해 산소와 이산화탄소의 교체와 수분의 보존을 조절할 수 있다. 기문을 통해 들어온 공기는 체내로 확산되어 장기로 공급된다. 산소가 부족하거나 적절한 양의 이산화탄소가 체내에 쌓이면 기문을 열어 산소를 흡입한다. 그러나 과도하게 산소가 결핍되면 계속 기문을 열어놓기 때문에 체내의 수분의 급격한 증발(당했을 때보다 7-10배의 속도)에 따른 건조에 의해 죽게 되며, 고온에서는 호흡이 증가하여 수분 손실에 의해 죽음에 이르게 된다³. 저산소 농도 살충법은 곤충의 이러한 죽음 메커니즘을 이용한 것이다.

3. 저산소 농도 살충법의 제 요인과 해충의 살충 효과와의 관계

3.1. 해충의 종과 성장 단계

문화재 가해 해충에는 딱정벌레목, 바퀴목, 좀목, 흰개미목, 나비목, 다듬이벌레목 등이 있으며 이 중에서 딱정벌레목의 많은 종이 다양한 충해를 일으키고 있다. 저산소 농도 환경에서의 반응은 종마다 차이가 크며, 가장 긴 살충 시간이 필요로 하는 종은 딱정벌레목의 하늘소과이다²¹. 온도 20°C, 습도 40%, 산소 농도 0.03%의 질소 환경에서 소나무(12×5×5cm)나 책(4×11×8cm)에 오염시킨 하늘소과의 Old House Borer(*Hylotrupes bajulus* (Linnaeus))를 100% 살충하기 위해서는 20일, 권연벌레는 9일간이 필요하다(Figure 1)²¹. 반면 바퀴과의 알은 습도 55%, 산소 농도 0.1%에서 1~5일밖에 걸리지 않는다(Table 1)¹⁸.

곤충은 성장함에 따라 알, 애벌레, 번데기, 성충과 같은 완전변태, 알, 약충, 성충과 같은 무변태 또는 불완전변태를 거친다²⁴. 이러한 곤충의 성장 단계에 따라 저산소 환경에서의 살충 효과는 다르다. 온도 25.5°C, 습도 55%, 산소 농도 0.1%에서 나무 조각(8×8×14cm) 속에 매립하거나 밀가루로 덮은 유리병에 넣은 알, 애벌레, 번데기, 성충에 대한 실험 결과 알이 가장 살충 시간이 긴 것을 확인할 수 있다(Table 1)¹⁸. 이러한 결과는 흔히 보이는 죽은 성충으로부터 완전한 살충 효과를 판단하는 것은 위험하며, 눈에 보이지 않는 알이 살아남아 수주 후 부화하여 다시 충해를 일으

킬 수 있음 보여준다.

3.2. 산소 농도

산소의 농도는 해충의 살충 시간에 영향을 미친다. 저장 곡물 해충에 대한 산소 농도의 영향에 대한 평가에서 산소 농도가 낮을수록 살충 속도는 증가하며, 2% 이상의 산소 농도에서는 많은 종의 해충을 죽이는데 효과가 없다¹⁸고 알

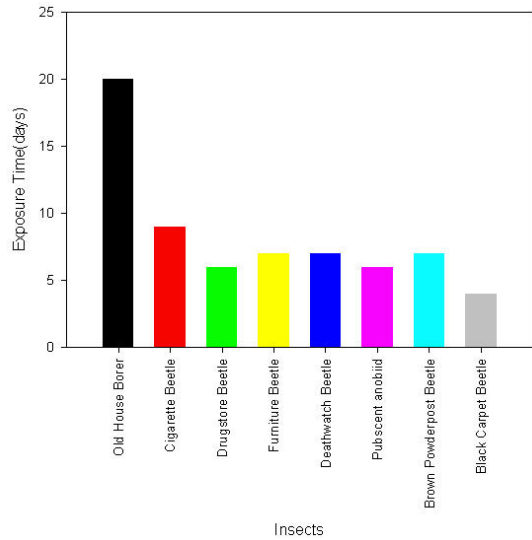


Figure 1. Exposure time to nitrogen to kill insects at 20°C temperature, 40% RH and 0.03% oxygen concentration²¹.

Table 1. Comparison of exposure time to nitrogen to kill different life stages of insects at 25.5°C temperature, 55% relative humidity and 0.1% oxygen concentration¹⁸.

Species	Common Name	Exposure Time(Days)			
		Egg	Larva/Nymph	Pupa	Adult
<i>Lasioderma serricorne</i>	Cigarette Beetle	8	8	8	8
<i>Lyctus spp.</i>	Powderpost Beetle	-	5	5	6
<i>Trogoxylon prostomoides</i>		-	-	-	6
<i>Anthrenus flavipes</i>	Furniture Carpet Beetle	3	3	3	3
<i>Dermestes lardarius</i>	Larder Beetle	4	4	4	4
<i>Trogoderma inclusum</i>	Cabinet Beetle	4	5	5	5
<i>Tribolium castaneum</i>	Confused Flour Beetle	3	2	3	2
<i>Blattella germanica</i>	German Cockroach	1	-	-	-
<i>Supella longipalpa</i>	Brown-banded Cockroach	3	-	-	-
<i>Periplaneta americana</i>	American Cockroach	5	-	-	-
<i>Thermobia domestica</i>	Firebrat	2	2	4	-
<i>Incisitermes minor</i>	Western Drywood Termite	-	4	-	-
<i>Tineola bisselliella</i>	Webbing Clothes Moth	2	2	4	-

Table 2. Effect of oxygen concentration on exposure time to nitrogen to kill insects at 25.6°C temperature and 55% relative humidity²⁵.

Insects		Life Stage	Oxygen Concentration (%)	Exposure Time(Days)
Species	Common Name			
<i>Lasioderma Serricorne</i>	Cigarette Beetle	Egg	0.1	8
			0.3	8
			0.62	12
<i>Anthrenus flavipes</i>	Furniture Carpet Beetle	Larva	0.1	3
			0.3	8
			0.62	20

Table 3. Effect of temperature on exposure time to nitrogen to kill insects at 40% relative humidity and 0.03% oxygen concentration²¹.

Insects		Exposure Time(Days)		
Species	Common Name	20°C	30°C	40°C
<i>Hylotrupes bajulus</i>	Old House Borer	20	10	1
<i>Lasioderma serricorne</i>	Cigarette Beetle	9	6	1
<i>Stegobium paniceum</i>	Drugstore Beetle	6	4	1 below
<i>Anobium punctatum</i>	Furniture Beetle	7	5	1
<i>Xestobium rufovillosum</i>	Deathwatch Beetle	7	5	1
<i>Nicobium castaneum</i>	Pubscent anobiid	6	4	1 below
<i>Lyctus brunneus</i>	Brown Powderpost Beetle	7	5	1
<i>Attagenus piceus</i>	Black Carpet Beetle	4	3	1 below

Table 4. Effect of temperature on exposure time to argon to kill insects at 40% relative humidity and 0.03% oxygen concentration²¹.

Insects		Exposure Time(Days)		
Species	Common Name	20°C	30°C	40°C
<i>Hylotrupes bajulus</i>	Old House Borer	14	7	1
<i>Lasioderma serricorne</i>	Cigarette Beetle	6	4	1
<i>Stegobium paniceum</i>	Drugstore Beetle	4	3	1 below
<i>Anobium punctatum</i>	Furniture Beetle	5	4	1
<i>Xestobium rufovillosum</i>	Deathwatch Beetle	5	3	1
<i>Nicobium castaneum</i>	Pubscent anobiid	4	2	1 below
<i>Lyctus brunneus</i>	Brown Powderpost Beetle	4	3	1
<i>Attagenus piceus</i>	Black Carpet Beetle	3	2	1 below

려져 있다. 흔히 발견되는 문화재 해충인 권연벌레의 알과 Furniture Carpet Beetle의 애벌레에 대한 연구에서도 질소 환경에서 산소 농도가 증가함에 따라 살충에 필요한 시간이 증가함을 보여주고 있다(Table 2)²⁵. 권연벌레의 알은 산소 농도 0.1%나 0.3%에서 살충 시간이 큰 차이를 보이지 않지만 0.62%에서는 50% 이상 살충 시간이 증가한다. 반면 Furniture Carpet Beetle의 애벌레는 0.1%에서는 3일의 살충 시간이 필요하지만 산소 농도가 증가하면서 살충 시간이 급격히 늘어나 0.62%에서는 약 7배의 시간이 소요된다. 이와 같은 결과에서 이 조건(온도 25.6°C, 습도 55%)에

서의 해충의 살충을 위해서는 산소 농도를 0.3% 이하로 유지할 필요가 있음을 보여주고 있다.

3.3. 온 도

곤충은 온도가 높을수록 신진대사가 빨라져 산소 소비가 증가한다. 극한 온도에 도달하면 곤충은 체내의 온도를 조절하기 위해 기문을 열어 수분의 증발에 의한 냉각을 이용함으로써 체내 수분 손실의 증가를 촉진시킨다²⁶. 습도 40%, 산소 농도 0.03%의 조건의 질소 환경에서 온도의 변

Table 5. Effect of relativity humidity on exposure time to nitrogen to kill insects.

Insects		Life Stage	Oxygen Concentration (%)	Temperature (°C)	Ralative Humidity (%)	Exposure Time (Days)	Reference
Species	Common Name						
<i>Lasioderma serricorne</i>	Cigarette Beetle	Larva	0.32	26.5	33	4	27)
					55	4	
					75	6	
<i>Hylotrupes bajulus</i>	Old House Borer	Egg, Larva, Pupa, Adult	0.03	20	40	20	17)
					30	10	
					20	20	
			0.05	30	60	20	20)
					50	10	

화에 따라 소나무(12×5×5cm)나 책(4×11×8cm)에 오염시킨 여러 종의 해충에 대한 살충 시간은 Table 3과 같다²¹. 온도를 20°C에서 30°C로 높였을 때 25~50% 살충 시간이 단축되며, 30°C에서 40°C로 높였을 때에는 33~90% 단축되었다. 마찬가지로 아르곤 환경에서도 온도의 상승과 함께 살충 시간이 단축됨을 확인할 수 있다(Table 4)²¹. 그러나 문화재를 30°C 이상의 고온에 노출시켰을 때에 일어날 수 있는 손상을 고려하면 살충력을 높이기 위해 30°C 이상으로 온도를 올리는 것은 어려운 일이다.

3.4. 습도

저산소 환경에서 해충은 수분의 증발에 의한 탈수에 의해 죽음에 이르게 된다. 주위의 습도에 따라 증발 속도가 다르며 보통 건조 환경에서 증발 속도가 빠르다²⁶. 권연벌레의 애벌레에 대해 산소 농도 0.32%, 온도 26.5°C에서 질소로 살충하였을 때 습도 33%와 55%에서는 살충 시간이 차이가 없지만, 75%에서는 50%가 증가하였다²⁷. 산소 농도 0.03~0.05%, 온도 20~30°C에서 소나무(12×5×5cm)에 오염시킨 하늘소과의 Old House Borer(*Hylotrupes bajulus* (Linnaeus))에 대한 살충 시험에서는 습도 40~60%에서 살충 시간의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다^{17,20}. 따라서 습도 30~60%에서의 저산소 환경에서는 살충 효과에서 큰 차이가 없으며, 그 이상의 습도에서는 살충 효과가 느려짐을 알 수 있다.

3.5. 가스의 선택

박물관에서 해충을 억제하거나 제어하기 위해 질소, 아르곤, 헬륨과 같은 불활성 가스가 사용되어 왔다. 각각의 가스는 장단점이 있지만 가장 장점이 많고 단점이 적은 가

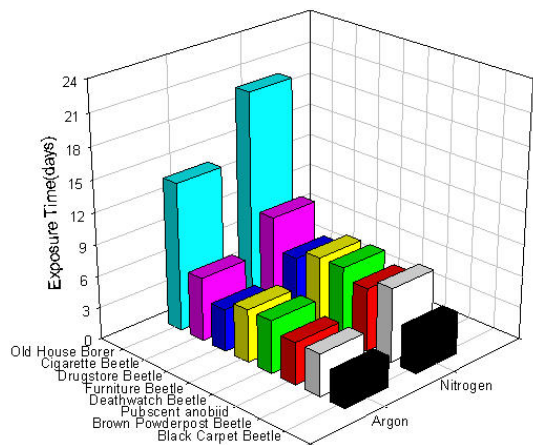


Figure 2. Comparison of exposure time to argon and nitrogen to kill insects at 20°C temperature, 40% relative humidity and 0.03% oxygen concentration²¹.

스가 아르곤이다.

헬륨은 완전 불활성 가스이며 가장 비싼 가스이다. 미국에서는 대부분의 중요 역사 문헌의 보존을 위해 45년 이상 사용되어 왔다. 그러나 헬륨은 대부분의 재질에서 쉽게 확산되어 가스 누출 문제가 있어 가스 누출이 덜한 아르곤으로 대체 중이다. 아르곤은 헬륨과 같이 불활성 가스이지만 헬륨에 비해 가격이 싸며, 큰 분자량 때문에 헬륨보다 밀폐성이 좋다. 그리고 질소처럼 미생물의 영양분이 아니며, 산소보다 무거워 밀폐상태에서 바닥에 가라앉는다². 질소는 이집트 박물관에서 미라를 해충으로부터 보호하기 위해 밀폐 보관장을 충전하는데 사용된 가스이다²⁸. 그러나 질소는 완전한 불활성 가스가 아니며, 습도 조건이 갖추어진다면 어떤 혐기성 세균에게는 성장에 필수 요소이다². 아르곤은 질소에 비해 곤충의 건조가 더 빠르기 때문에 살충 시간이 25~50% 더 빠르다(Figure 2)^{20,21}. 이는 질소보다 아르곤이

Table 6. Recommended exposure time for nitrogen anoxia treatment.

Insects		Exposure Time (Days)				
		Relative Humidity 55% Oxygen Concentration 0.1% 25.5°C	Relative Humidity 55% Oxygen Concentration 0.2% 25°C	Relative Humidity 55% Oxygen Concentration 0.2% 30°C	Relative Humidity 55% Oxygen Concentration 0.3% below 20°C	Relative Humidity 55% Oxygen Concentration 0.3% below 25°C
Species	Common Name					
<i>Lasioderma serricorne</i>	Cigarette Beetle	8	-	21	22	14
<i>Stegobium paniceum</i>	Drugstore Beetle	-	-	21	-	-
<i>Nicobium castaneum</i>	Pubescent anobiid	-	-	21	-	-
<i>Gastrallus immarginatus</i>	Book-borer anobiid	-	-	21	-	-
<i>Lyctus brunneus</i>	Brown Powderpost Beetle	6	-	21	14	10
<i>Anthrenus flavipes</i>	Furniture Carpet Beetle	3	-	-	7	5
<i>Trogoderma inclusum</i>	Cabinet Beetle	5	-	-	14	10
<i>Dermestes lardarius</i>	Larder Beetle	4	-	-	7	5
<i>Attagenus japonicus</i>	Japanese Black Carpet Beetle	-	14	7	-	-
<i>Anthrenus verbasci</i>	Varied Carpet beetle	-	14	7	-	-
<i>Tribolium confusum</i>	Confused Flour Beetle	-	-	-	10	7
<i>Tineola bisselliella</i>	Webbing Clothes Moth	4	7	-	7	5
<i>Tinea translucens</i>	Casemaking Clothes Moth	-	7	-	-	-
<i>Thermobia domestica</i>	Firebrat	2	7	-	7	5
<i>Ctenolepisma villosa</i>	Oriental Silverfish	-	7	-	-	-
<i>Periplaneta americana</i>	American Cockroach	5	14	7	14	10
<i>Supella longipalpa</i>	Brown-banded Cockroach	3	-	-	10	7
<i>Blattella germanica</i>	German Cockroach	1	7	-	5	4
<i>Incisitermes minor</i>	Western Drywood Termite	4	-	-	11	8
<i>Reticulitermes speratus</i>	Japanese Termite	-	7	-	-	-
<i>Liposcelis bostrychophilus</i>	Banded psocid	-	7	-	-	-
Reference		18)	33)		29)	

더 가벼운 산소 분자를 곤충 체내로 부터 밀어내는 능력에 의한 것 같다. 질소의 가격이 아르곤에 약간 더 비싸다고 하더라도 빠른 살충 시간은 매력적이다.

그러나 질소에 비해 아르곤을 이용한 문화재 해충의 살충 연구는 부족하여 한정된 수의 해충에 대해 제한된 조건에서 이루어진 결과로 살충 시간을 예측하는 것은 어렵 짐작 수준이다²⁹. 현재 전 세계적으로 박물관 등에서는 질소를 이용한 저산소 살충법이 널리 사용되고 있지만, 아르곤 저산소 살충법은 메트로폴리탄박물관^{30,31}과 스미소니언 박물관보존연구소를 포함한 일부 박물관에서 사용하고 있다³².

4. 권장 살충 시간

여러 연구자들에 의한 연구 결과를 기초로 질소를 이용한 살충에서의 각종 해충에 대한 권장 살충 시간이 제안되

었다(Table 6, Table 7). Maekawa 등²⁹이 제안한 살충에 필요한 시간은 가장 내성이 강한 권연벌레를 기준으로 하였을 때 20°C에서 22일, 25°C에서 14일인 반면, 木川 등³³이 제안하는 시간은 훨씬 가혹한 조건(온도 30°C)에서 21일이 었다. 이와 같이 木川 등이 제안하는 시간이 Maekawa 등의 제시하는 시간뿐만 아니라 Rust 등¹⁸이나 Valentin^{20,21}이 제시하는 시간보다 훨씬 긴 것은 산소 농도가 약간 높을 뿐만 아니라 야생의 해충의 강한 내성을 고려하여 살충 시간을 길게 설정하였기 때문이다. 따라서 木川 등이 제시한 살충 시간은 안전성을 고려한 가이드라인이라 할 수 있다.

한편 Valentin은 최근 발표³⁴에서 그동안 살충 실험과 충해를 입은 문화재에 대한 실제 살충 작업을 통해 얻은 데이터^{14-17,20,21,35,36}를 기초로 각종 문화재 해충에 대해 살충 시간을 제시하였다(Table 7). Valentin의 권장 살충 시간은 해충의 속(屬, Genus)에 따른 저산소 환경에서 저산소 환경

Table 7. Recommended exposure time for nitrogen anoxia treatment⁵⁴.

Genus	Oxygen Concentration(%)	Temperature(℃)	Relative Humidity(%)	Exposure Time (Days)		
<i>Hylotrupes</i>	0.005	20	35~60	24		
		25		14		
		20	60~80	40		
		25		30		
<i>Anobium</i> <i>Lasioderma</i> <i>Lyctus</i> <i>Nicobium</i> <i>Stegobium</i> <i>Xestobium</i> <i>Anthrenus</i> <i>Attagenus</i>	0.03	20	35~60	20		
		25		15		
		20	60~80	30		
		25		15		
		<i>Blattella</i> <i>Periplaneta</i>	0.2	20	35~60	14
				25		5
				20	60~80	25
				25		10
<i>Tribolium</i>	0.1	20	35~60	28		
		25		14		
		20	60~80	30		
		25		20		
<i>Dermestes</i> <i>Trogoderma</i>	0.1	20	35~60	30		
		25		18		
		20	60~80	40		
		25		25		
<i>Tineola</i>	0.2	20	35~60	14		
		25		16		
		20	60~80	25		
		25		15		
<i>Liposcelis</i>	0.3	20	35~60	15		
		25		8		
		20	60~80	20		
		25		28		

에 대한 해충의 내성을 기준으로 산소 농도를 달리 설정하는 것을 특징으로 하고 있다. 그녀는 해충의 종에 따라 산소 농도 0.005~0.3% 조건에서 온도 20~25℃, 습도 35~60%에서 5~30일, 그리고 습도 60~80%의 환경에서는 10~40일의 살충 시간을 제시하고 있다. 특히 내성이 강한 하늘소(*Hylotrupes*)나 빗살수염벌레(*Anobium*, *Lasioderma*, *Nicobium*, *Stegobium*, *Xestobium*), 넓적나무좀(*Lyctus*), 수시렁이(*Anthrenus*, *Attagenus*)의 살충을 위해서는 다른 연구자들의 권장 살충 시간^{18,29,33}에 필요한 산소 농도(0.2~0.3%)에 비해 산소 농도를 0.005~0.03%까지 내려야하는 극한 조건이 필요하다. 그리고 습도 조절이 되지 않는 고습도 환경에서는 통상적

인 습도 조건(35~60%)에 비해 해충의 속에 따라 살충 시간이 250%까지 증가하며, 특히 내성이 강한 해충을 살충하기 위해서 40일까지 소요된다. 이는 고습도 환경의 실내나 실외에서는 다른 연구자들의 권장 살충 시간^{18,29,33}으로 살충 처리를 하였을 때 완전한 살충은 어렵다는 것을 시사한다.

5. 저산소 농도 살충 시스템

저산소 농도 살충처리를 위해서는 살충 처리 대상의 문화재의 크기와 수량에 따라 여러 가지 시스템이 이용되고 있다.



Figure 3. Anoxic treatment using oxygen absorber.

5.1. 소형·중형 백 시스템

이 기술은 수십 점의 크기가 작은 문화재, 평평한 회화나 섬유재질의 문화재의 살충 처리에 이용되는 시스템이다. 살충 처리 대상물을 열 밀봉(heat sealing) 산소 불투과 필름으로 만든 백에 넣은 후, 불활성 가스를 주입하거나, 불활성 가스를 주입해서 산소를 뺀 후 탈산소제와 산소 지시계와 함께 넣거나 또는 탈산소제와 산소 지시계만을 넣고 열로 밀봉하여 일정 시간 동안 살충처리를 한다. 백 내부의 정확한 산소 농도와 상대 습도 변화를 측정하기 위하여 산소 센서와 상대 습도 센서를 삽입하여 모니터링을 한다. 저산소 농도 살충 처리에 적합한 산소 불투과 필름은 단일 성분의 폴리머 필름이 아닌 복수의 필름을 층으로 결합한 라미네이트 필름으로 산소투과속도(oxygen transmission rate)는 20~50cc/m²/day 이하가 적합하며, Poly(ethylene terephthalate)(PET), Polyvinylidene chloride(PVDC), Ethylene-Vinyl Acetate(EVA)-Ethylene-Vinyl Alcohol(EVOH) 공중합체, Polychlorotrifluoroethylene(CTFE)의 라미네이트 필름이 주로 사용된다. 탈산소제는 Ageless[®], Atco[™], FreshPax[™], RP system[™]이 사용되고 있다²⁹. 백 시스템은 값이 싸고 이동이 가능하며 빨리 만들 수 있어 효과적이다.

5.2. 대형 텐트 시스템

이 기술은 수백 점의 작은 문화재나 큰 가구, 민속품, 카펫 등의 살충 처리에 이용되는 방법으로, 지지용 틀에 산소 불투과 필름을 씌우고 열로 밀봉한 후 습도가 조절된 불활



Figure 4. Anoxic treatment using argon (Photo by Tsukada Masahiko).

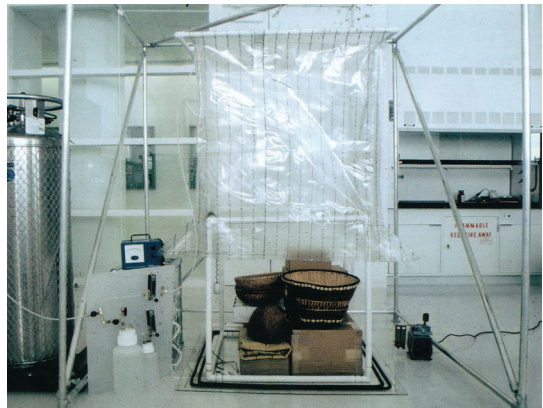


Figure 5. Completed tent anoxic system using nitrogen²⁹.

성 가스를 주입하여 살충처리를 한다. 백 내부의 정확한 산소 농도와 상대 습도 변화를 측정하기 위하여 산소 센서와 상대 습도 센서를 삽입하여 모니터링을 한다. 처음 불활성 가스를 주입하면서 산소와 함께 계속 불활성 가스를 빼내 텐트 내부의 산소 농도를 0.3% 이하의 원하는 값으로 맞추기 때문에, 가스 소요량이 많으며 안전을 위해 텐트가 위치한 작업 공간의 산소 농도를 계속 모니터링을 해야 한다. 원하는 산소 농도에 도달하면 불활성 가스 공급을 중단하지만, 살충 처리 과정에서 텐트의 밀폐도가 떨어져 산소 농도가 증가하면(0.3% 이상) 다시 불활성 가스를 주입해야 한다(Semi Dynamic법). 텐트 내부의 산소 농도의 변화가 심하면 살충력이 떨어지기 때문에 살충 처리 과정 동안 계속 불활성 가스를 흘려보내는 방법도 이용된다(Dynamic법).



Figure 6. Zip-loc bubble³⁷.

5.3. 버블 시스템

버블은 상업적으로 판매되는 시스템으로 텐트 시스템과 같은 방법으로 작업이 이루어진다. 버블은 열로 밀봉할 수 있는 알루미늄 박(箔)으로 처리한 필름으로 만들어진 1회용 버블과 재사용할 수 있는 지퍼락 타입의 PVC 버블이 있다. 지퍼락 타입의 버블은 지퍼락 부분에서 불활성 가스의 누출이 심하여 저산소 농도 살충법에는 이용이 힘들며 산소 농도가 높은 조건(8%)에서 이루어지는 이산화탄소법에 적합하다. 이 시스템의 장점은 대형 문화재가 있는 장소로 이동의 편리성이다.

5.4. 챔버 시스템

금속으로 만든 대형 살충 챔버 시스템은 대량의 문화재나 대형 문화재, 해충의 공격을 받기 쉬운 민속학 자료 또는 민족학 자료의 살충 처리에 적합하다. 챔버 시스템은 전자동 시스템으로, 질소 발생 장치, 습도 조절기, 불활성 가스의 공급 및 배기 라인뿐만 아니라, 온도, 습도, 산소 농도 측정 센서가 설치되어 있으며, 실시간으로 운전을 모니터링할 수 있을 뿐만 아니라 기록할 수 있다. 그리고 챔버는 밀폐도가 높아 백이나 텐트에 비해 불활성 가스의 누출이 적다. 초기 구입비용은 많이 들지만 백이나 텐트로 대량의 문화재나 대형 문화재를 살충 처리할 때 드는 노동력을 줄일 수 있다.

6. 맺음말

박물관에서 문화재 해충의 살충을 위해 사용되어온 훈



Figure 7. Chamber system of national museum of ethnology, Japan (Photo by Singo Hidaka).

중재인 메틸브로마이드가 오존층 파괴 물질로서 2015년 사용의 전폐에 따른 대체법 중의 하나인 저산소 농도 살충 처리법은 대부분의 문화재 해충에 대해 성공적인 살충 효과를 보여준다. 질소나 아르곤과 같은 불활성 가스를 이용한 저산소 농도 살충법은 해충의 중, 산소 농도, 온도, 습도, 가스 등에 따라 살충 효과에 영향을 받는다. 박물관의 문화재의 보존 환경(온도 15~25℃, 습도 40~60%)에서 산소 농도를 0.03% 이하로 유지함으로써 1개월 이내에 가장 내성이 강한 딱정벌레목까지 살충이 가능하다. 그러나 온습도가 제어되지 않는 실내나 실외에서는 권장 살충 시간 내에서 완전한 살충이 어려운 단점이 있다. 그리고 살충 처리 대상 문화재의 수량이나 크기에 따라 소형·중형 백, 대형 텐트, 버블, 챔버 등 다양한 시스템을 적용할 수 있다.

참고문헌

1. 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올의정서, (1997).
2. R.J. Koestler, Ā. Tavzes, F. Pohleven, A new approach on conservation of wooden heritage. *Paper for the 35th Annual Meeting of The International Research Group on Wood Preservation*, (2004).

3. C. Selwitz, Anoxia as a Conservation Procedure. *Inert Gases in the Control of Museum Insect Pests*, Getty Conservation Institute, USA, p7-15, (1998).
4. D. Lindgren, "Effect of atmospheric gases alone or in combination on the mortality of granary and rice weevils". *Journal of Economic Entomology*, **63**, p6-1929, (1970).
5. S.W. Bailey, H.J. Banks, The use of controlled atmospheres for the storage of grain. *1st International Working Conference on Stored-Product Entomology*, p362-374, (1975).
6. S.W. Bailey, H.J. Banks, Review of recent studies of the effects of controlled atmospheres on stored product. *International Symposium on Controlled Atmosphere Storage of Grains*, p101-118, (1980).
7. H.J. Banks, Recent advances in the use of modified atmosphere for stored product pest control. *Proceedings of the 2nd International Working Conference on Stored-Product Entomology*, p198-217, (1979).
8. H.J. Banks, P.C. Annis, Comparative advantages of high CO₂ and low O₂ types of controlled atmospheres for grain storage. *Food Preservation by Modified Atmospheres*, M. Calderon, R. Barkai-Golan eds., p93-122, CRC Press, USA, (1990).
9. C.P. Smith, J. Newton, Carbon dioxide : the fumigant of the future. *The International Seminar on Research in Preservation and Conservation(IFLA/ICA)*, p11-17, (1991).
10. K.O. Story, *Approaches to Pest Management in Museums*, Smithsonian Institution, USA, (1985).
11. M. Gilberg, "Inert Atmosphere Fumigation of Museum Objects". *Studies in Conservation*, **34**, p80-84, (1989).
12. M. Gilberg, "The Effects of Low Oxygen Atmospheres on Museum Pests". *Studies in Conservation*, **36**, p93-98, (1991).
13. M. Gilberg, Inert atmospheres disinfection using Ageless oxygen scavenger, *Preprints of 9th Triennial Meeting of ICOM-CC*, **2**, p812-816, (1990).
14. N. Valentin, F. Preusser, Nitrogen for biodeterioration control on museum collections, *The Third Meeting of the Pan American Biodeterioration Society*, (1989).
15. N. Valentin, F. Preusser, "Insect Control by Inert Gases in Museums, Archives and Libraries". *Restaurator*, **11**, p22-33, (1990).
16. N. Valentin, Insect Eradication in Museums and Archives by Oxygen Replacement, A Pilot Project, *Preprints of 9th Triennial Meeting of ICOM-CC*, **2**, p821-823, (1990).
17. N. Valentin, Controlled atmospheres for insect eradication in library and museum collections, *International Seminar on research in Preservation and Conservation*, (1991).
18. M.K. Rust, J.M. Kennedy, *The Feasibility of using Modified Atmospheres to Control Insect Pests in Museums*, The Getty Conservation Institute Scientific Program Report, Getty Conservation Institute, USA, (1993).
19. G. Hanlon, V.D. Daniel, N. Ravenel, S. Maekawa, Dynamic system for nitrogen anoxia of a large museum objects : a pest eradication case study, *Proceedings of International Conference on Biodeterioration of Cultural Properties*, p86-90, (1992).
20. N. Valentin, M. Algueró, C. Martín de Hijas, Evaluation of Disinfection Techniques for the Conservation of Polychrome Sculpture in Iberian Museums, *IIC Preprints of the Contributions to the Madrid Congress, Conservation of the Iberian and Latin American Cultural Heritage*, H. W. M. Hodge, John S. Mills, Perry Smith eds., p165-167, (1992).
21. N. Valentin, "Comparative Analysis of Insect Control by Nitrogen, Argon and Carbon Dioxide in Museum, Archives and Herbarium Collections". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **32**, p263-278, (1993).
22. J. Newton, Carbon Dioxide as a Fumigant to Replace Methyl Bromide in the Control of Insects and Mites Damaging Stored Products and Artefacts, *Proceedings of the First International Conference on Urban Pests*, p329- 338, (1993).
23. N. Hideaki, K. Hiroshi, M. Hiroyuki, K. Rika, D. Hitomi, H. Shingo, "Examination of Various Conditions for Carbon Dioxide Treatment to Eradication of Museum Insects", *Bunkazaihozonshuhukugakaisi*, **48**, p1-15, (2004).
24. 정종철, 문화재 가해 해충, *박물관과 유해생물 관리*, 오준석 편저, 국립민속박물관, 대한민국, p66-85, (2008).
25. M. Rust, J. Kennedy, *Enhancing the Effectiveness of Modified Atmospheres to Control Insect Pests in Museums*, The Getty Conservation Institute Scientific Program Internal

- Final Report, USA, (1995).
26. E. Bursell, *An Introduction to Insect Physiology*, Academic Press, USA, (1970).
 27. D.A. Reirson, M.K. Rust, J.M. Kennedy, V. Daniel, S. Maekawa, Enhancing the Effectiveness of Modified Atmospheres to Control Insect Pests in Museums and Similar Sensitive Areas, *Proceedings of the Second International Conference on Urban Pests*, p319-327, (1996).
 28. S. Maekawa, Conservation of the Royal Mummy Collection at the Egyptian Museum, *Oxygen-Free Museum Cases*, Shin Maekawa ed., The Getty Conservation Institute, USA, (1998).
 29. S. Maekawa, K. Elert, *The Use of Oxygen-Free Environments in the Control of Museum Insects Pests*, The Getty Conservation Institute, USA, (2003).
 30. M. Tsukada 개인 메일
 31. Sherman Fairchild Center for Objects Conservation, "Biodeterioration in Museum Collections". *Met Objectives*, 3, p1-6, (2002).
 32. R. J. Koestler 개인 메일
 33. K. Rika, M. Yoshiko, Y. Katsuji, M. Sadatoshi, N. Hideaki, K. Hiroshi, T. Bunshiro, "Practical Protocols of Low Oxygen Atmosphere and Carbon Fioxide Treatments for Eradication of Japanese Museum Insects". *Bunkazaihozonshuhukugakaisi*, 45, p73-86, (2001).
 34. N. Valentin Rodrigo, Insects Elimination in Historic Collections using Low Oxygen Environments. Velocity System, *In and Out Air Strategies Conference - International Federation of Library Association and Institute, Core Activity on Preservation and Conservation*, (2009).
 35. N. Valentin, J. Bergh, R. Prtega, M. Åkerlund, A. Hallström, K. Jonsson, Evaluation of portable equipment for large-scale deinfestation in museum collection using a low-oxygen environment, *Preprints of 13th Triennial Meeting of ICOM-CC*, 1, p96-101, (2002).
 36. N. Valentin, Non-toxic methods and systems to control biodeterioration in historic objects of large size, *5th European Commission Conference*, Cultural Heritage Research, p52- 56, (2002).
 37. <http://www.powerplastics.co.uk>