대량 공공 기록물의 선별적 소독을 위한 미생물 활성화도 분석 연구

김대운 | 박가영 | 김지원* | 강대일**,¹

젠헤리티지 문화재병리연구소

*한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과

**한국전통문화대학교 기술과학대학 문화재보존과학과

Microbial Activity Analysis for the Selectively Sterilizing of Government-controlled Bulk Public Archives

Dae Woon Kim | Ka Young Park | Ji Won Kim* | Dai Ill Kang**,¹

GEN.heritage Pathobiology Lab. for Cultural Heritage, Nonsan, 32974, Korea

*Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage,
Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea

**Department of Cultural Heritage Conservation Science, College of Science and Technology,
Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo, 33115, Korea

¹Corresponding Author: conserva@nuch.ac.kr, +82-41-830-7361

초록 기록물이란 기록이 남아있는 다양한 형태 및 재질을 총칭하며, 현재 종이로 구성된 기록물이 가장 많이 존재한다. 종이는 재질적 특성상 생물학적 손상인자에 의해 쉽게 열화되며, 이를 제어하기 위하여 화학약제 소독처리 및 환경조절을 통해 관리해 왔다. 국가에서 관리하는 대량 기록물 보관처의 경우 입고되는 모든 기록물은 전소독을 원칙으로 하고 있다. 그러나 공적 기록물의 생산량은 매년 증가되어, 이로 인해 대량 기록물 보관처의 보존관리가 점차 한계에 이르고 있다. 본 연구는 선별적 소독기준 제시를 위한 기초연구로써 보존서고 내 미생물 60종을 대상으로 유전학적 종 분석을 수행하였으며, 현장에서 즉각 사용 가능한 미생물 오염도 분석법인 ATP 생물 발광 반응(ATP bioluminescence)법을 제안하였다. 이를 위해 생물량에 따른 미생물 활성화도 검량선을 작성하였으며, 실제 기록물 보존서고에 보관중인 미소독 기록물 1951점을 대상으로 미생물 활성화도분석을 수행하였다. 이를 통해 연중 향온향습이 유지되는 조건에서 미생물 활성화도는 억제 또는 감소되는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과가 향후 합리적이고 경제적인 소독처리 방안 및 세부기준수립의 기반자료로 활용되기를 기대한다.

중심어: 기록물, 미생물 활성화도, 선별적 소독처리, ATP 생물 발광 반응, 보존 환경

ABSTRACT An archive is a collection of documents or records. Currently, most archived documents are made of paper. Paper is susceptible to biological damage and deterioration due to its material properties. To control the biological damage, treatment with chemical disinfectants and control of the storage environment are often used. In government-controlled bulk public archives, all documents are chemically sterilized before storage. However, an extremely large quantity of public records have been produced, and storage space and conservation management are gradually reaching their limits. In this study, 60 species of microbes were identified using a genetic method. We successfully applied the adenosine triphosphate (ATP) bioluminescence method to detect microbial contamination on paper documents. A calibration curve of the ATP

bioluminescence as a function of the microbe quantity was obtained, and the microbial activity on non-sterilized paper archives from 1951 was analyzed using an ATP luminometer. It was found that the microbial activity was suppressed or reduced in climate-controlled storage environments at 22°C and 55% relative humidity. We anticipate that these results will be used to establish selective sterilization systems for government-controlled bulk public archives.

Key Words: Archive, Microbial activity, Selectively sterilizing, ATP bioluminescence, Conservation environment

1. 서 론

기록물이란 기록이 적힌 책, 사진, 그림 따위를 통틀어 이르며 넓게는 그 재질이 목재, 섬유 등 다양한 재질로 이루어져 있다. 일반적으로 취급하는 기록물로는 문화적, 역사적, 입증 가능한 가치를 지닌 분야에서 영구적이거나 장기간 보존된 것을 의미한다. 기록물은 사본이 존재하는 책이나 잡지와는 달리 일반적으로 출판되지 않으며 고유성을 지닌다(Pearce-Moses and Baty, 2005).

국내에서 공공의 기록물을 대량으로 보유하고 있는 대표적 기관은 행정안전부의 국가기록원을 들 수 있다. 국가기록원은 대통령기록물, 공공기록물, 나아가 해외기록물까지 다양한 기록물을 수집한다. 국가기록원 기록물 보유 현황에 의하면 국가기록원의 기록물은 크게 일반문서류, 시청각류, 행정박물류, 간행물류로 구분되며 이 중 재질이 종이로 구성되어 있는 종이기록물은 일반문서류와 간행물류로 전체 기록물(6,668,707건)의 62.8%(4,189,984건)에 해당한다(National Archives of Korea, 2018).

종이기록물은 그 재질의 특성상 보관 상태 및 조건에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 손상 등 다양한 유형의 열화가 발생된다. 이 중 생물학적 손상은 곰팡이와 같은 미생물에 의한 손상과 곤충에 의한 섭식 손상으로 나눌 수 있다. 종이 재질에 손상을 유발하는 해충과 미생물은 국내에서 약 100여 종이 보고되고 있다(Hong, 2008). 특히 국가기록원과 같이 영구기록물관리기관으로 이관되어지는 기록물의 경우 보존기간이 준영구 이상인 중요기록물이 대다수를 차지하고 있어 원본 재질의 훼손 뿐 아니라 기록 자체의 보존도 매우 중요하다(National Archives of Korea, 2011).

기록물을 유해생물 피해로부터 지키기 위해 현재 약제에 의한 소독처리 및 서고 내 온습도조절을 통해 관리하고 있다. 각 중앙정부기관 및 지방자치단체에서 국가기록원으로 이관된 기록물은 분류 및 평가, 기술 과정 후 안전한 보존을 위하여 서고로 입고되며, 이후 공공기록물관리에 관한 법률 제19조 및 동령 제44조,령 제48조, 제60조, 규칙

제28조, 제29조, 제31조에 따라 소독처리 및 편철 및 제본 작업을 거치도록 규정되어있다(Ministry of the Interior and Safety, 2017). 기록물은 입고된 이후에도 지속적인 항온항습 및 공기정화를 실시하여 기록물 열화에 대한 철저한 예방보존적 관리를 수행한다(National Archives of Korea, 2011).

그러나 국가기록원의 경우 이미 400만건 이상의 종이 기록물을 보관하고 있고, 현재까지도 지속적으로 기록물이 반입되고 있는 상황에서 입고되는 기록물 전체를 대상으로 진행되는 소독처리는 현실적인 한계점을 가질 수밖에 없다. 또한 소독처리에 의한 기록물 재질의 안정성 측면에서도 훈증가스를 이용한 소독처리의 경우 재질의 열화, 색상 변화 등 2차적인 손상의 결과로 이어질 수 있는 위험성을 갖는다는 보고가 있었으며(Kang, 2009a; 2009b), 식물 천연추출물을 이용한 소독처리 약제의 경우에도 염색된 재질의 색상 변화가 심각하게 발생된다고 보고 된 바 있다(Oh, 2007).

더욱이 훈증소독가스의 국제적 제한, 친환경성 정책 기조 등 친환경 방제대책이 대두되고 있는 현재 점차 화학 소독의 빈도를 낮추는 방제대책을 수립해야 하는 단계에 이르렀다. 즉, 생물손상 방지대책을 무조건적으로 소독처리에 의존하기 보다는 반드시 소독이 필요한 기록물만을 선별할 수 있는 현실적 대안이 필요한 실정이다.

현재 재질 표면에 존재하는 미생물을 측정할 수 있는 생물학적 방법으로는 표면부착미생물을 직접 포집하여 배양하는 평판배양법과 세포 내 존재하는 ATP(adenosine triphosphate)를 측정하는 생물 발광 반응(ATP bioluminescence)법을 들 수 있다. 평판배양법의 경우 미생물 포집 후 24-48 시간이 소요될 뿐 아니라 생물학적 배양기술을 가진 전문 인력만이 수행할 수 있다는 한계점이 존재한다. 그에 반해 ATP 생물 발광 반응법은 측정시간이 수 초정도로 짧고 현장에서 누구나 쉽게 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Larocco *et al.*, 1986; Stannard and Gibbs, 1986; Stanley *et al.*, 1989; Griffiths, 1993).

Table 1. Chemical component of microbial culture medium

Media	Chemical components		Remark
PDA**	Potato infusion from 200 g	4 g*/L	Final pH: 5.6±0.2 at 25℃
	Dextrose	20 g/L	
	Agar	15 g/L	
NA**	Enzymatic digest of gelatin	5 g/L	Final pH: 6.8±0.2 at 25℃
	Beef extract	3 g/L	
	Agar	15 g/L	

*4 g of potato extract is equivalent to 200 g of infusion from potatoes

**All medias sterilized at 121℃, over 15 psi for 15 minutes before use

ATP 생물 발광 반응 분석법은 최근 활용범위가 급속도로 확산 되었다. 과거 식품분야에서 주로 사용되던 활용범위가 실내 주거환경의 오염도 분석, 공공시설의 오염도 분석 등으로 확대되고 있다. 특히, 최근 문화재 보존분야에서는 석조 문화재의 생물막(biofilm)을 제거하기 위해 사용된 천연살생물질의 효과를 판정하기 위하여 국내 및 동남아시아 열대 몬순기후 지역을 대상으로 ATP 생물 발광 반응 측정법을 사용하고 그 적용 가능성을 보고한 바 있다(Jeong *et al.*, 2018).

현재 공공 기록물을 대상으로 수행되어지는 전수소독체계에서 선별적 소독으로의 전환을 위해서는 종합적인 진단 체계 및 세부적인 평가기준이 마련되어야 한다. 이를 위해서는 현재 보관 중인 기록물에 존재하는 미생물 현황, 오염도 지표, 보존환경 분석 등 기초조사가 우선적으로 이루어져야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 유전학적 동정기술을 적용하여 기록물 표면에 존재하는 미생물의 현황을 파악하고, ATP 생물 발광 반응 분석법을 적용하여 기록물 내 미생물 오염도를 객관적인 지표로 산정하고자 한다. 또한 서고 내 보존환경을 분석하여 향후 미생물의 생육가능성을 파악하고자 한다. 이를 근거로 향후 합리적이고 경제적인 소독 처리 기준마련의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 연구 대상

연구의 대상은 대량 기록물 보관처(행정안전부 국가기록원) 내 미소독 보존서고 9개실과 미소독 기록물 1,951점이다. 미소독 기록물은 기록물 입고 후 소독을 수행하지 않은 기록물을 의미하며, 미소독 보존서고는 미소독 기록물만을 보관하는 공간을 의미한다.

2.2. 미소독 보존서고 내 미생물 분포 분석

2.2.1. 미소독 보존서고 내 공기 중 미생물 분석

미소독 보존서고 9개실과 서고 복도 1지점, 외부 1지점을 대상으로 서고 내 공기 중에 분포하는 미생물(air-borne microbes)을 포집하였다. 공기 중 부유미생물은 30~120 LPM의 flow range(accuracy ±5%) 갖는 공기포집기(B30120, Bio-Culture™, USA)를 사용하였다. 미소독 보존서고의 명칭은 임의적으로 보존서고 1-9로 명명하였다. 미생물 포집 지점은 보존서고 내 3곳이며, 20분 간격으로 각 지점별 1회 포집하였다. 포집방법 및 포집량은 환경부에서 제시한 실내공기질공정시험기준(Ministry of Environment, 2017)을 적용하여, 5분간 50 L/min의 속도로 공기 중의 미생물이 배양배지를 충돌하는 방식을 적용하였다. 공기 중 부유 미생물 포집을 위하여 사용된 배양배지는 PDA(potato dextrose agar)와 NA(nutrient agar)이다. 배양배지의 조성은 Table 1과 같다. 포집한 미생물은 미생물 배양기에서 26±2℃의 조건으로 약 3-4일간 균집의 형태가 발생될 때까지 1차 배양을 진행하였다. 1차 배양 이후 발생된 균집을 계수하여 공간별 미생물량을 상대적으로 비교하였다. 미생물의 개체수 측정은 집락형성 단위인 CFUs(colony forming units)를 적용하였으며, 배양된 미생물 균집(colony)은 진균류와 세균류로 분류하여 계수하였다. 1차 배양 이후 균집의 형태를 기준으로 진균류와 세균류로 분류하였으며, 진균류의 경우 26±2℃, 세균류의 경우 38±2℃ 조건에서 2차 배양(단일균집분리)을 실시하였다. 2차 배양된 진균류와 세균류는 단일 균집으로 분리될 때 까지 단일균집분리를 시행하였으며, 최종적으로 순수 분리된 미생물은 균집의 형태, 색상, 크기 등의 차이를 기준으로 분류하였다.

Table 2. List of paper recordings for collection of surface-attached microbes

Room No.	Column ¹	Row ²	Production year	Page	Microbial contamination
Room 1 (Basement 1F)	1	2	2001	107	Absence
	1	2	2006	8	Absence
	1	2	1997	3	Absence
	3	4	1991	262	Absence
	1	3	1975	2	Absence
Room 2 (1F)	4	2	1918	–	Absence
	1	3	1985	1	Absence
	1	3	1999	3	Absence
	6	4	1900	4	Absence
	4	3	2000	6	Absence
Room 3 (2F)	6	3	1971	2	Absence
	4	4	1950	238	Absence
	4	3	1971	1	Absence
	5	3	2004	219	Absence
	2	3	2001	44	Absence
Room 4 (2F)	4	5	–	–	Presence
Room 5 (3F)	1	3	1976	3	Absence
	5	4	1980	21	Absence
	1	2	1993	5	Absence
	4	3	1988	1	Absence
	7	1	1992	66	Absence
Room 6 (5F)	1	6	1960	18	Absence
	1	3	1972	443	Absence
	7	5	1990	72	Absence
	1	3	1979	1	Absence
	1	2	1990	78	Absence
Room 7 (6F)	6	2	1976	6	Absence
	2	1	1969	96	Absence
	2	3	1966	122	Absence
	3	3	1990	67	Absence
	1	2	1971	76	Absence
Room 8 (6F)	1	3	1976	396	Absence
	5	2	1982	2	Absence
	2	4	1982	150	Absence
	1	2	1978	13	Absence
	1	3	1951	39	Absence
Room 9 (7F)	6	2	1949	21	Presence
	6	2	1949	3	Presence
	6	2	1948	17	Presence
	7	3	1946	67	Presence
	7	3	1947	66	Presence
	7	3	1948	67	Presence
	7	3	1949	2	Presence
	7	3	1946	32	Presence
	7	3	1947	37	Presence
	7	3	1948	41	Presence
	7	3	1949	18	Presence
	7	4	1947	31	Presence
	7	4	1949	25	Presence
	7	4	1947	34	Presence
	5	2	1946	8	Presence

¹Column: Horizontal location number of book-shelf(No. 1 from the left)²Row: Vertical location number of book-shelf(No. 1 from the top)

Table 3. Primer information

Primer name	Seq. information	Direction	Cell type
ITS1	TCCGTAGGTGAACCTGCGG	Forward	Fungal cell
ITS4	TCCTCCGCTTATTGATATGC	Reverse	Fungal cell
24F	AGAGTTTGATCCTGGCTCAG	Forward	Bacterial cell
1492R	GGTTACCTTGTTACGACTT	Reverse	Bacterial cell

Table 4. Gene amplification condition(polymerase chain reaction condition)

Step	Temp.	Time	Cycles
Predenaturation	94℃	10 min	1
Denaturation	94℃	45 sec	30
Annealing	55℃	40 sec	
Extension	72℃	1 min	
Final extension	72℃	10 min	1

2.2.2. 미소독 기록물의 부착 미생물 분석

기록물 표면 부착 미생물(surface attached microbes)은 2017년 국가기록원에서 기 분석한 육안조사 결과서(국가 기록원 내부자료 참조, 비공개)를 바탕으로 선정하였다. 선정기준은 육안 상으로 확인되는 심각한 미생물 오염이 발생한 기록물(16점) 및 분석이 허용된 기록물(35점) 총 51점이다(Table 2). 기록물 표면에 부착된 미생물의 포집을 위하여 면균봉(sterilized cotton swab)을 이용하였다. 면균봉은 감마선(gamma ray)으로 멸균된 상태이며, 길이 10 cm 정도의 면봉(cotton swab)형태이다. 기록물 표면 미생물은 강열화로 판단된 종이 기록물의 표면에서 면균봉을 활용하여 포집을 진행하였으며, 포집이 완료된 면균봉은 주변의 오염원으로부터 차단시키기 위해 멸균된 15 mL conical tube에 넣어 즉시 실험실로 이동하였다. 실험실에 가져온 면균봉은 PDA 배지에 도말하여 접종하고, 28±2℃에서 균집의 형태가 나타날 때 까지 약 3-4일간 배양하였다. 2차 배양(단일균집분리)의 경우 공기 중 부유미생물 배양법과 동일한 방법을 적용하였다.

2.2.3. 미소독 보존서고 내 균주 분석

포집된 미생물의 유전학적 동정을 위하여 염기서열 분석을 수행하였다. 포집된 미생물의 세포 내 DNA의 추출을 위하여 Intron Biotechnology(Korea)의 i-genomic BYF DNA Extraction Mini Kit을 이용하였다. 추출된 gDNA(genomic deoxyribonucleic acid), 유전자 증폭 개시자(primer),

Takara Ex Taq™ 혼합물 50 uL 이용하여 18S와 16S ribosome DNA의 ITS(internal transcribed spacer) 영역을 증폭 증폭하였다. 증폭된 PCR product는 불순물을 정제한 후 XENOTECH Inc.(Korea)에 sequencing을 의뢰하였다. Sequencing은 Perkin-Elmer(USA)에서 제작된 자동염기서열 결정기(automatic DNA sequencer)를 통하여 분석되었다. 이후 확보된 염기서열은 미국국립생물공학정보센터(National Center for Biotechnology Information Search database, 2018)의 데이터베이스를 활용하여 blast search 하였다. 분석에 사용된 유전자 증폭 개시자(primer)의 정보와 유전자 증폭 조건(gene amplification condition)은 Table 3, 4와 같다.

2.3. 미생물 활성화도 분석

2.3.1. 생물량에 따른 미생물 활성화도 변화 분석

생물량에 따른 미생물 활성화도 변화 분석을 위하여 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*를 선정하였다. 표준균주(*E. coli*; KCTC 1682, *S. aureus*; KCTC 3881)는 한국생명공학연구원으로부터 동결 건조된 상태(inactivate)로 분양받아 사용하였다. 앰플 형태의 균주는 멸균증류수 0.3-0.5 mL를 첨가하여 골고루 현탁한 후 NA(nutrient agar)에 도말하였다. 이후 38±2℃ 조건에서 24시간 배양하였다. 미생물 활성화도 분석에는 배양배지 상에 발생한 단일 콜로니를 심진희석법으로 희석하여 정량화된 미생물을 사용하였다. 희석배율(dilution factor)은 1배에서 10,000배

($1X$, 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4})이다. 이후 각 희석배율의 표준균주를 대상으로 농도별 미생물 활성도 측정을 수행하였다. 미생물 활성도 분석에는 휴대용 ATP Bioluminometer (Clean-trace LM1, 3M, USA)를 적용하였으며, 제조회사에서 제시하는 안내사항에 따라 측정을 수행하였다. 측정기의 정확도는 0.5 pg , 측정범위는 $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ molATP/assay}$ 이며, 1회 측정시간 10초이다. 측정된 결과는 기술통계분석을 수행하였으며, 이를 통해 최솟값 (min), 최댓값 (max), 평균값 (m), 표준편차 (o)의 통계수치를 제시하였다.

2.3.2. 미소독 기록물의 미생물 활성도 분석

미소독 기록물의 미생물 활성도 분석을 위하여 국가기록원 내 미소독 보존서고 8개실에 보관 중인 1,951점의 기록물을 선정하였다. 표본 선정방식은 국가기록원에서 허용된

기록물을 대상으로 서고별 무작위적 선별방식을 채택하였다. 미생물 활성도 분석에는 휴대용 ATP Bioluminometer (Clean-trace LM1, 3M, USA)를 적용하였으며, 측정법은 측정하는 표면의 일정한 면적을 무작위로 채취하는 방법 (random swab method)으로 진행하였다. 이후 세부적인 측정법은 제조회사에 제시하는 안내사항에 따라 측정을 수행하였다. 측정된 결과는 기술통계분석을 수행하였으며, 이를 통해 최솟값 (min), 최댓값 (max), 평균값 (m), 표준편차 (o)의 통계수치를 제시하였다. 또한 보존서고별, 기록물 생산연도별, 기록물 재질별, 육안상 오염여부별로 구분하여 빈도분석을 수행하였다. 빈도분석의 범위는 1001-2000 RLU (relative light unit)이며, 계급구간은 9구간이다(0-100 RLU, 101-200 RLU, 201-500 RLU, 501-1000 RLU, 1001-2000 RLU, 2001-3000 RLU, 3001-400000 RLU, 4001-5000 RLU, 5000 RLU 이상).

Figure 1. Air-borne microbes collection and culture result by archive storage room.

2.4. 보존서고 내 보존환경 분석

2.4.1. 최적보존환경 공간의 보존환경 분석

국가기록원 내 모든 보존서고는 연중 항온·항습($22\pm 2^{\circ}\text{C}$, $50\pm 5\%$)이 유지되고 있는 공간이다. 따라서 항온·항습이 유지되는 최적 보존환경 조성 조건에서 환경인자를 수집하여, 공간 내 환경 변화 분석 및 균주 활성화와의 연관성을 유추하고자 한다. 환경인자 수집에는 시간대별 자동 기록이 가능한 온·습도계(Testo 174H, TESTO, Germany) 활용하였다. 환경데이터 수집장소는 국가기록원에서 측정

이 허용된 공간인 미소독 보존서고 9개실과 서고 복도 1지점이며, 데이터 수집기간은 2018년 7월 2일부터 2018년 7월 31일까지이다. 환경인자 데이터 수집항목은 각 공간 내 온도 및 상대습도이다.

2.4.2. 가변적 보존환경 변화 공간의 보존환경 분석

보존환경 변화조건은 공조시스템의 가변적 운영 조건을 가진 공간이다. 이러한 공간은 보존서고와 달리 최적의 항온·항습 시설이 구축되어 있지 않으며, 가변적으로 냉난방기의 가동이 진행 중인 공간을 의미한다. 이를 통해 공간

Table 5. Quantity and ratio of air-borne microbes by archive storage room

Room No.	Plate index	CFUs(colony forming units)			Volume of room (m ³)	CFUs/m ³
		Fungi	Bacteria	Total		
Room 1 (Basement 1F)	A	3	4	7	22	218.9
	B	1	7	8		
	C	2	5	7		
Room 2 (1F)	A	2	7	9	14	230.0
	B	1	1	2		
	C	0	3	3		
Room 3 (2F)	A	0	6	6	12	136.8
	B	1	2	3		
	C	1	2	3		
Room 4 (2F)	A	0	6	6	15	168.2
	B	1	4	5		
	C	0	4	4		
Room 5 (3F)	A	0	10	10	20	228.9
	B	0	4	4		
	C	2	4	6		
Room 6 (5F)	A	1	2	3	14	138.1
	B	2	3	5		
	C	1	5	6		
Room 7 (6F)	A	0	0	0	7	69.7
	B	0	5	5		
	C	0	2	2		
Room 8 (6F)	A	0	3	3	9	102.7
	B	0	2	2		
	C	0	4	4		
Room 9 (7F)	A	0	1	1	7	66.1
	B	0	3	3		
	C	2	1	3		
Corridor	A	0	1	1	14	7.8
	B	0	3	3		
	C	2	8	10		
Outside	A	17	0	17	68	-
	B	26	1	27		
	C	18	6	24		

내 환경 변화 분석 및 균주 활성도와의 연관성을 유추하고자 한다. 국가기록원 내 보존서고 이외의 공간이면서 기록물의 이동이 가능한 공간인 열람실, 마이크로필름실, 스캐닝실에서 환경데이터를 수집하였다. 데이터 수집기간은 2018년 7월 2일부터 8월 24일까지이며, 수집항목은 각 공간 내 온도 및 상대습도이다.

3. 연구결과

3.1. 미소독 보존서고 내 미생물 분포 분석 결과

3.1.1. 미소독 보존서고 내 공기 중 미생물 분석 결과

미소독 보존서고 9개실과 복도 1지점, 건물 외부 1곳에서 각 3회에 걸쳐 공기 중 부유 미생물물을 포집한 결과 다양한 진균류 및 세균류가 포집되었다(Figure 1). 포집된 미생물은 대조군인 외부가 가장 높았으며, 공간체적 대비 미생물량은 보존서고 B, 보존서고 E, 보존서고 A 등의 순으로 높았다. 외부 대비 보존서고 내 미생물량은 약 30%정도 수준으로 확인되었으며, 복도와 보존서고 내의 차이는 미미하였다. 보존서고의 층수가 높을수록 대체적으로 미생물량이 감소하는 경향을 나타냈다(Table 5). 다만, 보존서고

의 특성상 출입인원의 변동, 출입문의 개방여부 등에 따라 추후 측정시마다 다른 결과를 나타낼 수 있을 것으로 예상되었다.

3.1.2. 미소독 기록물의 부착 미생물 분석 결과

총 51점의 선정된 기록물 표본에서 미생물을 포집한 후 배양한 결과 진균류 보다 세균류의 양이 절대적으로 많음을 확인하였다. 포집된 미생물을 단일균집으로 분리하여 기록물 표면에 존재하는 진균류 12종, 세균류 39종을 분리하였다.

3.1.3. 미소독 보존서고 내 균주 분석 결과

단일균집으로 분리된 보존서고 내 공기 중 부유 미생물(진균류 26종, 세균류 41종)과 부착미생물(진균류 12종, 세균류 39종)을 대상으로 균집의 색상, 생장환의 형태학적 특징을 기준으로 중복되는 균주를 제외하였다. 그 결과, 최종적으로 부유 미생물에서는 진균류 16종, 세균류 27종(Figure 2), 부착미생물에서는 진균류 8종, 세균류 9종(Figure 3)이 선별되었다.

최종 선별된 진균류를 대상으로 유전학적 방법론을 적용하여 종 동정을 수행한 결과 공기 중 부유 진균류는

Figure 2. Single colony isolation of air-borning fungus and bacteria.

Figure 3. Single colony isolation of surface-attached fungus and bacteria.

Table 6. List of identified fungus

Type	Index	Description	Acc. No.	Identity	Query coverage	E-value
Air-borne fungi	AF 01	<i>Alternaria tenuissima</i>	MH594736	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 02	<i>Trametes cubensis</i>	MF363158	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AF 03	<i>Alternaria tenuissima</i>	MH594736	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 04	<i>Dicyma olivacea</i>	KF893287	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 05	<i>Penicillium sumatraense</i>	MG578441	96.2%	92.4%	0.00E+00
	AF 06	Fungal endophyte sp.	FJ176471	98.9%	100.0%	0.00E+00
	AF 07	<i>Pithomyces chartarum</i>	MF800911	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 08	<i>Aspergillus versicolor</i>	MF422157	97.7%	95.7%	0.00E+00
	AF 09	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	MG719633	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 10	<i>Pleosporales</i> sp.	HQ631015	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AF 11	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	MG719633	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 12	<i>Aspergillus niger</i>	MH591450	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 13	<i>Nothophoma quercina</i>	LT592929	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 14	<i>Alternaria tenuissima</i>	MH594736	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 15	<i>Alternaria tenuissima</i>	MH594736	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AF 16	Unidentified	-	-	-	-
Surface-attached fungi	SF 01	Unidentified	-	-	-	-
	SF 02	Unidentified	-	-	-	-
	SF 03	<i>Chaetomium spirochaete</i>	NR_144823	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SF 04	<i>Aspergillus hiratsukae</i>	MG748676	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SF 05	<i>Aspergillus niger</i>	MH591450	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SF 06	<i>Chaetomium globosum</i>	MH311558	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SF 07	<i>Penicillium chrysogenum</i>	MG786687	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SF 08	Uncultured endophytic fungus	EF505549	96.5%	98.9%	0.00E+00

Alternaria sp., *Trametes* sp., *Dicyma* sp., *Penicillium* sp., *Cladosporium* sp. 등이 확인되었으며, 표면부착 진균류는 *Chaetomium* sp., *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. 가 확인되었다(Table 6). 5종의 진균류는 blast search에서 정확하게 matching 되지 않았다.

또한 선별된 세균류를 대상으로 동일한 방법을 통해 중

동정을 수행한 결과, 공기 중 부유 세균류는 *Arthrobacter* sp., *Cohnella* sp., *Curtobacterium* sp., *Dermacoccus* sp., *Staphylococcus* sp. 등이 확인되었으며, 표면부착 세균류는 *Bacillus* sp., *Staphylococcus* sp. 가 확인되었다(Table 7). 6종의 세균류는 Blast search 에서 정확하게 matching 되지 않았다.

Table 7. List of identified bacteria

Type	Index	Description	Accession No.	Identity	Query coverage	E-value
Air-borne bacteria	AB 01	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	MH447972	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 02	<i>Sphingomonas kyungheensis</i>	NR_118263	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 03	<i>Arthrobacter</i> sp.	FN794213	99.8%	99.8%	0.00E+00
	AB 04	Unidentified	-	-	-	-
	AB 05	<i>Staphylococcus capitis</i>	MH393912	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 06	<i>Dermacoccus nishinomiyaensis</i>	MF952731	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 07	<i>Staphylococcus aureus</i>	KU922340	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 08	Unidentified	-	-	-	-
	AB 09	<i>Staphylococcus haemolyticus</i>	MH542264	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 10	Uncultured bacterium	KF104233	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 11	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	KY753228	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 12	<i>Enhydrobacter aerosaccus</i>	MG966295	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 13	<i>Leifsonia</i> sp.	MH141449	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 14	<i>Staphylococcus</i> sp.	MH141498	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 15	<i>Staphylococcus warneri</i>	MH426978	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 16	<i>Sphingomonas</i> sp.	KT005532	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 17	Uncultured bacterium	KF101192	99.8%	100.0%	0.00E+00
	AB 18	<i>Curtobacterium pusillum</i>	MH547412	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 19	<i>Staphylococcus hominis</i>	MH518227	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 20	<i>Dermacoccus profundus</i>	NR_043262	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 21	<i>Sphingomonas</i> sp.	AM900776	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 22	<i>Cohnella xylanilytica</i>	HE866503	99.8%	100.0%	0.00E+00
	AB 23	Unidentified	-	-	-	-
	AB 24	<i>Staphylococcus</i> sp.	MH518238	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 25	<i>Pseudomonas</i> sp.	KF147126	100.0%	100.0%	0.00E+00
	AB 26	<i>Staphylococcus edaphicus</i>	NR_156818	99.9%	100.0%	0.00E+00
	AB 27	<i>Staphylococcus</i> sp.	MH569474	99.9%	100.0%	0.00E+00
Surface-attached bacteria	SB 01	<i>Bacillus velezensis</i>	MH174291	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 02	<i>Bacillus velezensis</i>	MH174291	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 03	Unidentified	-	-	-	-
	SB 04	<i>Bacillus velezensis</i>	KY072765	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 05	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	MH454489	99.9%	100.0%	0.00E+00
	SB 06	<i>Bacillus licheniformis</i>	MH569340	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 07	<i>Bacillus velezensis</i>	KY072765	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 08	<i>Bacillus velezensis</i>	KY072765	100.0%	100.0%	0.00E+00
	SB 09	<i>Bacillus velezensis</i>	MH174291	100.0%	100.0%	0.00E+00

3.2. 미생물 활성도 분석 결과

3.2.1. 생물량에 따른 미생물 활성도 변화 분석 결과

미생물 정량을 통해 *E. coli* 2.2×10^8 CFUs/mL, *S. aureus* 4.6×10^8 CFUs/mL을 확보하였다. 생물량에 따른 미생물 활성도 수치는 세포수에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다(Table 8). 미생물량의 증가량에 따라 미생물 활성도는 초기 급격하게 증가하나, 점차 증가율이 둔화된다는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4, 5).

3.2.2. 미소독 기록물의 미생물 활성도 분석 결과

보존서고 2, 보존서고 4, 보존서고 9에서 보관 중인 일부 기록물에서 1000 RLU를 초과하는 미생물 활성도가 확인되었다. 특히 보존서고 9에서는 최고 미생물 활성도 수치인 5071 RLU가 확인되기도 하였다. 다만 이는 극히 일부 기록물에서만 확인되는 수치이며, 대부분(93.8%)의 기록물에서 미생물 활성도는 100 RLU 이하를 나타냈다(Table

9). 미생물 활성도 빈도분석을 결과에서도 모든 보존서고의 기록물에서 100 RLU 미만의 값이 약 86-98%를 차지하고 있었으며, 500 RLU를 초과하는 기록물은 약 0.46%(9점)만이 존재하였다(Table 10).

기록물 생산연도별 미생물 활성도 분석에서는 기록물 생산이 오래된 기록물일수록 평균 미생물 활성도가 높아지는 경향성이 확인되었으며, 특히 1900-1940년대 일제강점기에 생산된 기록물이 다른 생산연도에 비해 높은 미생물 활성도를 나타냈다(Table 9). 미생물 활성도 빈도분석 결과 모든 생산연도의 기록물에서 100 RLU 미만의 값이 절대적으로 많이 측정되었다(Table 10).

기록물 재질별 미생물 활성도 분석 결과 섬유로 제작된 도면류에서 미생물 활성도 평균값이 높았다. 또한 육안상 기록물 표면에서 미생물의 생장흔적이 확인되는 기록물을 대상으로 미생물 활성도 분석을 수행한 결과, 오염여부가 확인되는 기록물에서 평균 미생물 활성도와 최대 미생물 활성도 수치가 높은 것으로 확인되었다(Table 9). 다만, 표

Figure 4. Comparison of microbial activity by *E. coli* quantity.

Figure 5. Comparison of microbial activity by *S. aureus* quantity.

Table 8. Comparison of microbial activity according to biomass

Species	Dilution factor	Repeated measurement			Mean	Standard deviation
		1st	2nd	3rd		
<i>E. coli</i>	10-4	98	118	120	112	10
	10-3	847	642	720	736	84
	10-2	9,637	8,951	11,484	10,024	1,070
	10-1	44,237	54,263	50,281	49,624	4,083
	1X	57,149	83,836	69,875	70,153	10,905
<i>S. aureus</i>	10-4	131	80	140	117	26
	10-3	970	956	787	904	83
	10-2	8,817	9,567	9,438	9,274	327
	10-1	47,457	64,655	65,704	59,272	8,365
	1X	68,033	84,221	101,221	84,492	13,550

(Unit: RLU)

Table 9. Basic statistics analysis of non-sterilized documents in National Archives of Korea

Classification index	Sub-index	Minimum value	Maximum value	Mean (average)	Standard deviation
Room No.	Room 1(Basement 1F)	8.3	382.3	44.5	54.2
	Room 2(1F)	7.7	1686.7	64.7	148.3
	Room 3(2F)	8.3	208.7	31.9	27.8
	Room 4(2F)	6.0	2420.0	70.2	230.3
	Room 5(3F)	8.0	486.3	42.8	60.3
	Room 6(5F)	8.3	591.0	32.3	36.2
	Room 7(6F)	7.3	415.0	41.0	54.2
	Room 9(7F)	9.3	5071.0	68.2	417.1
Production year	1901-1920	18.7	1,541.3	329.8	527.9
	1921-1940	9.7	2,420.0	198.9	596.8
	1941-1960	13.0	84.0	29.3	14.6
	1961-1980	8.3	486.3	38.5	43.7
	1981-2000	6.0	5,071.0	51.9	191.6
	2001-2013	7.3	570.0	37.5	49.6
	Unrecorded	17.3	83.3	33.0	22.3
Material type	Paper document	6.0	5,071.0	42	134.27
	Blueprint(paper)	7.7	1,686.7	75.5	184.4
	Blueprint(fabric)	83.3	2,420.0	1,251.7	1,168.3
	Weather recording paper	11.3	47.0	20.7	13.3
Microbial contamination	Presence	11.3	5,071.0	533.9	1,139.3
	Absence	6.0	1,686.7	41.0	72.62

(Unit: RLU)

Table 10. Frequency analyzed result of non-sterilized documents in National Archives of Korea

Classification index	Sub-index	Class section (RLU)									Total
		0 -100	101 -200	201 -500	501 -1000	1001 -2000	2001 -3000	3001 -4000	4001 -5000	5000 over	
Room No.	Room 1 (Basement 1F)	346	19	12	0	0	0	0	0	0	377
	Room 2(1F)	164	19	6	1	1	0	0	0	0	191
	Room 3(2F)	187	5	1	0	0	0	0	0	0	193
	Room 4(2F)	191	4	4	2	2	1	0	0	0	204
	Room 5(3F)	211	8	8	0	0	0	0	0	0	227
	Room 6(5F)	407	7	1	1	0	0	0	0	0	416
	Room 7(6F)	183	7	7	0	0	0	0	0	0	197
	Room 9(7F)	141	2	2	0	0	0	0	0	1	145
Production year	1901-1920	5	0	0	1	1	0	0	0	0	7
	1921-1940	13	0	1	0	0	1	0	0	0	15
	1941-1960	38	0	0	0	0	0	0	0	0	38
	1961-1980	325	11	3	0	0	0	0	0	0	339
	1981-2000	843	40	24	2	2	0	0	0	1	911
	2001-2013	599	20	13	1	0	0	0	0	0	633
	Unrecorded	7	0	0	0	0	0	0	0	0	7
Material type	Paper document	1,658	52	34	2	1	0	0	0	1	1,747
	Blueprint(paper)	166	19	7	2	2	0	0	0	0	196
	Blueprint(fabric)	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
	Weather recording paper	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Trace of microbial contamination	Presence	11	3	4	1	1	1	0	0	1	21
	Absence	1,819	68	37	3	2	0	0	0	0	1,929

(Unit: document quantity)

본으로 추출된 섬유로 제작된 도면의 수는 총 1951점의 기록물 중 단 2점, 육안으로 미생물 오염이 확인되는 기록물 수는 단 22점에 그쳐 보다 정확한 통계적 분석을 위해서는 더 많은 표본이 필요할 것으로 판단된다. 미생물 활성화도 최댓값(5171 RLU)을 나타낸 기록물 재질은 양지이며, 도면

(섬유), 도면(지류)에서 1000 RLU가 초과하는 기록물이 확인되었다. 미생물 활성화도 빈도분석 결과 모든 기록물에서 100 RLU 미만의 값이 절대적으로 많이 측정되었음을 확인할 수 있었다(Table 10).

Figure 6. Temperature changes in archive storage room and corridor.

Figure 7. Relative humidity changes in archive storage room and corridor.

3.3. 보존서고 내 보존환경 분석 결과

3.3.1. 최적보존환경 공간의 보존환경 분석 결과

미소독 보존서고에서 보존환경을 측정한 결과 온도는 20-22℃ 사이에서 변화되고 있었으며, 시간에 따른 온도의

편차는 0.1-0.5℃로 확인되었다(Figure 6). 상대습도의 경우 모든 서고에서 45-55% 범위 내에서 변화가 나타나고 있었으며, 시간에 따른 편차는 5-10% 사이에서 발생되고 있었다(Figure 7). 복도의 경우 보존서고보다 약 2℃ 정도 낮은 19.5-20℃ 범위에서 변화가 나타나고 있었으며, 상대습

Figure 8. Temperature changes in variable environmental condition room(microfilm room, reading room, scanning room).

Figure 9. Relative humidity changes in variable environmental condition room(microfilm room, reading room, scanning room).

도가 보존서고에 비해 월등히 높은 75-80%를 유지하고 있음이 확인되었다. 특히 일정기간동안 습도가 점차 낮아지거나 증가하는 경향을 보이기도 하였다(Figure 6, 7).

3.3.2. 가변적 보존환경 변화 공간의 보존환경 분석 결과

가변적 보존환경 변화조건 공간인 마이크로필름실, 열람실, 스캐닝실에서 보존환경을 측정된 결과 온도는 24-32℃ 사이에서 큰 차이로 변화되고 있었다. 시간에 따른 온도의 편차는 2-4℃로 확인되어 최적보존환경과 대조적인 결과를 나타냈다(Figure 8). 상대습도의 경우 50-80%의 범위에서 변화가 나타나고 있어 보존서고에 비해 최대 약 25% 고습조건을 나타냈다. 시간에 따른 편차는 10-20%이며, 스캐닝실이 가장 큰 편차를 나타냈다(Figure 9). 보존서고 내 복도와 유사하게 일정 기간 동안 습도가 낮아지거나 증가하는 경향을 보이기도 하였다(Figure 8, 9).

4. 고찰 및 결론

본 연구를 통해 미소독 기록물 및 보존서고에 존재하는 미생물 현황을 파악하였으며, 미생물량에 따른 미생물 활성도 변화의 정량적 평가가 수행되었다.

생물량에 따른 ATP는 세포수의 증가에 따라 비례하여 증가하는 양상을 나타냈으며, 일정 이상의 세포수가 증가되었을 때 미생물 활성도의 증가율이 둔화되는 것으로 확인되었다. 이는 ATP 측정 probe 내의 효소활성이 포화되었거나 높은 밀도로 존재하는 세포 간 자가사멸(apoptosis) 등이 원인으로 판단된다(Zamaraeva *et al.*, 2005).

또한 실제 보존서고 내에서 보관 중인 미소독 기록물 1951점을 대상으로 미생물 활성도 분석을 수행함으로써 기록물 표면의 미생물 오염도 현황을 파악할 수 있었다. 미생물 활성도 분석 결과 대부분(93.8%)의 기록물에서 미생물 활성도가 100 RLU 이하를 나타내었다. 이는 국가기록원으로 이관되기 이전에 오염도가 심각하지 않은 기록물이 대부분을 차지하고 있거나, 기록물 표면에 일부 미생물이 존재하더라도 연중 높은 습도가 유지되는 공간인 보존서고에 보관되는 과정에서 생육조건이 불리하게 작용한 것으로 판단된다(Cochrane, 1958). 국가기록원 보존서고의 보존환경 분석 결과 연중 22±2℃, 50±5%가 유지되는 공간에서 기록물을 보관하고 있어 미생물의 생육이 상당히 저해될 것으로 판단되었다.

국가기록원의 경우 이미 미생물 생장에 불리한 충분한

생육조건(보존환경)이 조성되어 있고, 미생물에 대한 오염도가 심각하지 않은 기록물이 86-98%를 차지한다. 따라서 현재의 전수소독 체제에서 선별적 소독처리 체제로 전환할 수 있는 가능성이 매우 높다. 따라서 추후 균주에 의한 재질 가해 위험도 평가, 우점균주의 발현 조건 분석 등 추가적인 분석 및 조사를 수행하고, 이를 통한 선별적 소독을 위한 세부판단기준을 구축하여, 예산 및 소요인력의 절감해야 한다. 모든 기록물에 일괄된 단일 기준의 설정 보다는 기록물의 중요도, 오염도 등 세부기준을 선정하여 소독빈도를 정하는 것이 현실적인 대안이 될 것으로 사료된다(National Archives of Korea, 2013). 이에 대한 구체적인 방안으로는 현재 국가기록원에서 보유하고 있는 기록물을 중요기록물(고기록물 포함)과 일반기록물로 등급을 구분하고, 중요기록물 및 고기록물의 경우 현재와 동일한 주기적 소독처리를 원칙으로 하며, 일반기록물의 경우 처리 빈도를 낮추거나 미생물 등 문제 발생 시 소독처리를 실시하는 이원화하는 합리적 방안을 도입해야 한다. 단, 일반기록물을 대상으로 하는 선별적 소독처리체제는 소독처리의 빈도를 줄이거나 소독처리를 선택적으로 수행하기 때문에 반드시 항온항습이 유지되는 공간에서 보관하고, 주기적으로 미생물 오염도를 모니터링 해야 한다.

ATP 생물 발광 반응 분석법은 누구나 쉽고 실시간으로 활용할 수 있는 미생물 오염도를 탐지 기술로 주기적인 모니터링에 활용도가 높다(Stanley *et al.*, 1989). 따라서 기록물 오염도 탐색을 위한 ATP 생물 발광 반응 분석법의 적극적인 활용과 최적 보존환경 조성 및 모니터링을 통해 선별적 소독처리 체제를 구축해야 할 것이다.

본 연구 결과가 향후 합리적이고 경제적인 소독처리방안 및 세부기준수립의 기반자료로 활용되기를 기대한다.

사 사

본 연구는 “2018년 행정안전부 국가기록원 국가기록관리·활용기술 연구개발사업”의 연구비를 지원받아 수행되었음.

REFERENCES

- Cochrane, V.W., 1958, Physiology of fungi. John Wiley and Sons Inc., New York and London.
- Griffiths, M.W., 1993, Applications of bioluminescence in the

- dairy industry. *Journal of dairy science*, 76(10), 3118-3125.
  - Hong, K.J., 2008, Museum and pest management. The National Folk Museum of Korea. (in Korean)
  - Jeong, S.H., Lee, H.J., Kim, D.W. and Chung, Y.J., 2018, New biocide for eco-friendly biofilm removal on outdoor stone monuments. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 131, 19-28.
  - Kang, D.I., 2009, The stability appraisalment on cultural property material the replacing fumigation gas of methyl bromide. *Journal of Conservation Science*, 25(3), 283-291. (in Korean with English abstract)
  - Kang, D.I., 2009, The 2nd stability appraisalment on cultural property material with the replacing fumigation gas of methyl bromide II. *Journal of Conservation Science*, 25(4), 465-471. (in Korean with English abstract)
  - LaRocco, K.A., Littel, K.J. and Pierson, M.D., 1986, The bioluminescent ATP assay for determining the microbial quality of foods, in *foodborne microorganisms and their toxins: Developing methodology*. Marcel Dekker, New York.
  - Ministry of the Interior and Safety, 2017, Public records management act & enforcement decree of the public records management act.
  - Ministry of Environment, 2017, Indoor air quality control act.
  - National Archives of Korea, 2011, Archive conservation the third volume. *Series of Records Management*. (in Korean)
  - National Archives of Korea, 2013, Diagnostic evaluation and improvement of sterilization system for archives. (in Korean)
  - National Archives of Korea, 2018, Total amount of archives in National Archives of Korea. <http://www.archives.go.kr/> (October 1, 2018)
  - National Center for Biotechnology Information Search database, 2018, Nucleotide database. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (May 1, 2018)
  - Oh, J.S., 2007, The effects of various vegetable pesticides on materials of cultural property -Dyed and undyed silk fabrics, cotton fabrics and Korean papers, undyed ramie fabric, pigments, painted plated. *Journal of Conservation Science*, 20, 9-22. (in Korean with English abstract)
  - Pearce-Moses, R. and Baty, L.A., 2005, A glossary of archival and records terminology. Society of American Archivists, Chicago.
  - Stanley, P.E., McCarthy, B.J. and Smither, R., 1989, ATP luminescence: rapid methods in microbiology. Wiley-Blackwell, Boston.
  - Stannard, C.J. and Gibbs, P.A., 1986, Rapid microbiology: Applications of bioluminescence in the food industry a review. *Journal of bioluminescence and chemiluminescence*, 1(1), 3-10.
  - Zamaraeva, M.V., Sabirov, R.Z., Maeno, E., Ando-Akatsuka, Y., Bessonova, S.V. and Okada, Y., 2005, Cells die with increased cytosolic ATP during apoptosis: a bioluminescence study with intracellular luciferase. *Cell death and differentiation*, 12(11), 1390.
-