

서고환경관리를 위한 보존성 평가지수 활용에 관한 연구

윤 대 현* · 신 현 창**

1. 서론
 - 1) 연구의 필요성과 목적
 - 2) 연구방법
2. 이론적 배경
 - 1) Donald K. Sebera의 보존성 평가지수모델
 - 2) IPI사의 PI 모델
3. 보존성 평가지수 분석 결과
 - 1) 기록물관리법 상의 온·습도 범위에서 종이기록물 보존성 평가
지수 비교
 - 2) 종이기록물 보존성 영향 인자
4. 결론 및 제언

* 주저자 : 한국정보화진흥원 조정관.

** 교신저자 : 이엔피 대표.

[국문초록]

Donald K. Sebera 모델은 다른 열화인자의 영향을 고려하지 않고 오직 온도와 습도만의 변화를 이용하여 두 개 이상의 서고환경에 대한 보존성 평가지수를 계산함으로써 기록물의 보존환경을 정량적으로 비교·평가하는데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 Donald K. Sebera 모델을 이용하여 기록물관리법에서 제시하고 있는 온·습도 범위에서 종이기록물 보존조건 중 가장 우수한 조건과 가장 열악한 조건에서의 보존성을 비교·분석하였다. 그 결과 기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위 내에서 보존조건이 가장 우수한 조건에서의 종이기록물 보존성 평가지수가 가장 열악한 조건에서 보다 2.47배 더 큰 것으로 나타났다. 또 가수분해반응 활성화에너지가 작을수록 종이기록물의 보존성은 온도보다는 습도에 의한 영향력이 크게 작용하였다. 따라서 보존성 평가지수는 서고의 온·습도 조건이 기록물 보존환경에 적합한지를 쉽게 판단할 수 있기 때문에 온·습도 변화에 대해 보존성 확보가 가능한 도구로 유용하게 활용될 수 있다.

주제어 : Donald K. Sebera 모델, 보존성 평가지수, 온도, 습도, 종이기록물

1. 서론

1) 연구의 필요성과 목적

종이기록물은 현존하는 기록물 중 가장 많은 부분을 차지하고 있다.

그러나 종이기록물은 온·습도, 빛, 곰팡이, 산성도, 유해기체 등 다양한 인자들로 인하여 훼손되는 경향이 있다¹⁾. 그중에서도 종이기록물에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 온도와 습도로 알려져 있다. 온도와 습도가 다른 영향인자에 비해 중요한 이유는 기록물의 주변에 항상 존재하면서 모든 유기물에 영향을 미치기 때문이다. 온·습도가 높으면 수분과 종이와 빠른 속도로 반응하여 셀룰로오스가 가수분해 됨으로서 종이의 열화가 촉진된다. 또 습도가 높으면 종이는 수분을 흡수하여 곰팡이 등 미생물이 발생하기 쉽고, 반대로 습도가 너무 낮으면 종이의 함유율이 낮아져 종이가 부스러지거나, 자료를 다룰 때 종이가 파괴되고, 도서의 외피가 수축되어 보드가 휘어지는 문제가 발생한다.²⁾ 따라서 종이기록물을 보존하고 있는 서고 온도와 습도의 변화에 관심을 가지고 모니터링 해야만 한다.

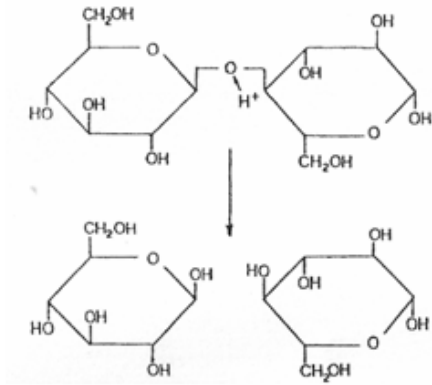
종이의 주성분은 500~1,500개의 글루코오스 단량체가 서로 결합된 셀룰로오스로 되어 있다. 그러나 셀룰로오스 분자가 수분과 만나면 글루코시드 결합이 절단되어 중합도가 저하되는 가수분해 반응이 일어난다. 가수분해 반응은 종이의 내구성을 잃게 하여 강도 약화의 원인이 된다. 이러한 가수분해 반응은 산성물질이 존재할 경우 <그림 1>에서와 같이 반응이 촉진되는 특징을 가지고 있다.³⁾ 따라서 종이기록물을 효과적으로 보존하기 위해서 온·습도 변화가 종이기록물에 미치는 영향을 모니터링 하는 방법들이 개발되고 있다.

1) 박지선, 「종이 기록물의 보존관리」, 『기록보존과 관리』, 4(1), 1999.

2) 윤대현 외, 『기록물 보존학』, 계문사, 서울, 2011.

3) 신중순 외, 『보존과학개론』, 세시, 대전, 2002.

<그림 1> 산촉매에 의한 셀룰로오스의 가수분해3)



종이기록물을 보존·관리하기 위해서 서고 내 온도와 습도를 정확하게 측정하고 항온·항습을 유지하는 것이 중요하지만, “온도와 습도가 변했을 경우 종이기록물의 수명에 어떤 영향을 미치는지?”를 측정하는 것은 기록물을 보존·관리하는데 중요한 핵심 요소 중 하나이다. 예를 들어 공공기록물관리예관법률 시행령(이하 기록물관리법)에서는 종이기록물의 적정 보존 온·습도 범위를 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 40~55%로 규정하고 있다.⁴⁾ 만약 종이기록물을 보존하고 있는 두 서고의 온·습도가 한 곳은 18°C , 55%를 유지하고 있고, 다른 한 서고는 22°C , 40%의 습도를 유지하고 있는 때 종이기록물을 장기간 보존하기 위해서는 어느 서고가 더 적합한 온·습도를 유지하고 있는지 판단하기가 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 외국의 전문 기관에서는 온·습도의 영향을 정량화하여 서고의 환경을 비교 평가하는 보존성 평가지수를 사용하여 온·습도의 변화가 종이기록물에 미치는 영향을 모니터링하고 있다.⁵⁾

4) 공공기록물관리예관법률 시행령 제60조 제1항.

5) Yale University Library Preservation Department 35th Annual Report July 2005-June

온·습도가 종이기록물에 미치는 영향을 정량화하여 보존성 평가지수로 나타내는 방법으로는 Donald K. Sebera 모델⁶⁾과 IPI(Image Permanence Institute)사의 보존지수(Preservation Index, PI)⁷⁾가 대표적인 모델이다. 두 모델은 기록물 보존에 영향을 미치는 많은 인자들 중에서 온도와 습도 인자만을 고려하여 종이기록물의 가수분해되는 속도를 계산함으로써 기록물 보존환경에 대한 보존성 평가지수로 활용하였다. Donald K. Sebera 모델은 온·습도가 동시에 변하는 두 개 이상의 보존 조건을 서로 비교 평가하기에 적합한 모델이며, IPI사의 보존지수는 유기기록물(종이, 필름 등)의 기대수명을 예측하는데 유용한 모델로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 이 두 모델에 대해 소개하고, 온·습도가 변하는 두 조건의 보존성을 비교 평가하는데 유용한 Donald K. Sebera 모델을 활용하여 기록물관리법에서 제시된 온·습도 범위 내의 온·습도변화가 종이기록물의 보존성에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

2) 연구방법

종이기록물을 열화시키는 다양한 인자들 중에서 온도와 습도만의 영향을 고려할 경우 종이가 수분과 반응하여 가수분해 되는 열화속도를 계산할 수 있다. 이 열화속도의 역수는 그 온도와 습도를 유지할 경우 기록물의 기대수명을 정량적으로 나타낼 수 있는 보존성 평가지수로 활용될 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 온도와 습도가 기록물에 미치는 영향을 정량적으로 계산함으로써 지수화 하여 서고의 보존성을 평

2006.

6) Donald k. Sebera, "Isoperms: An Environmental management Tool", *The Commission on Preservation and Access*, Washington DC, 1994.

7) J. M. Reilly et al., "New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections", *The Commission on Preservation and Access*, Washington DC, 1995.

가할 수 있도록 개발된 것이 Donald K. Sebera 모델과 IPI사의 PI 모델이다. 본 연구에서는 이 두 모델에 대한 이론적 배경을 소개하고, 기록물 관리법에서 제시된 온·습도 범위 내에서 온·습도 변화가 종이기록물에 미치는 보존성을 평가하는데 적합한 모델을 선정하였다.

두 모델은 기록물 열화인자들 중 온도와 습도만을 고려하였기 때문에 보존환경에 대해 절대적으로 신뢰할 수 있는 것은 아니지만 현재 서고의 온도와 습도가 기록물에 미치는 영향을 정량적으로 보여줌으로써 우리가 서고환경을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. Donald K. Sebera 모델은 온·습도가 다른 두 개 이상의 서고 또는 조건에서 종이기록물이 가수분해되는 반응속도의 비를 계산하여 보존환경을 상대적으로 평가하는데 적합한 모델이다. 반면 IPI사의 PI 모델은 실험을 통하여 얻어진 결과를 토대로 온·습도의 변화에 따른 기록물의 기대수명을 예측하는데 적합한 모델이다. 따라서 본 연구에서는 기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위(온도 18~22℃, 습도 40~55%) 내에서 온·습도의 변화에 따른 종이기록물의 보존성을 비교 평가하는 것이기 때문에 두 개 이상의 조건을 서로 비교 평가하기에 적합한 Donald K. Sebera 모델을 선정하여 보존성 평가지수를 계산하였다. 이때 종이기록물에 영향을 미치는 다른 영향 인자들은 고려하지 않았으며, 오직 온·습도의 변화가 종이기록물의 가수분해 반응에 미치는 영향만을 고려하였다. 보존성 평가지수 계산에 필요한 온·습도 변화는 온도 1℃ 씩, 습도는 5% 씩 변화시켰으며, 종이기록물의 가수분해 반응에 필요한 활성화에너지는 많은 종이기록물에서 측정된 값인 25 kcal/mol로 계산하였다. 또한 낮은 활성화에너지를 갖는 산성지의 보존조건을 비교 평가하기 위하여 활성화에너지를 20 kcal/mol로 변화시켜 보존성 평가지수를 계산함으로써 온도와 습도 중 산성화된 종이기록물에 많은 영향을 미치는 인자가 무엇인가를 분석하여 장기보존에 적합한 보존조건을 확인하였다.

2. 이론적 배경

1) Donald K. Sebera의 보존성 평가지수 모델

Donald K. Sebera는 온·습도가 다른 2개 이상의 서고 환경을 비교하기 위하여 보존환경 요소 중 온·습도 만 적용된 정량화된 지수를 구하는 모델을 만들었다. 이 모델의 기본 개념은 상대습도와 온도가 높아질수록 셀룰로오스의 가수분해 반응속도는 빨라지고, 그 결과 종이의 수명이 단축된다는 것을 기초로 하고 있다. 이 개념을 이용하여 서로 다른 온·습도 조건에서 보존되고 있는 종이의 가수분해 속도를 예측함으로써 종이를 보존하는 서고의 보존환경을 정량적으로 평가하는 식을 다음과 같이 유도하였다.

화학반응속도에 영향을 미치는 인자 중의 하나는 반응물의 농도이다. 일반적으로 셀룰로오스의 가수분해 반응은 상대습도의 농도가 높을수록 촉진된다. 따라서 상대습도(이하 습도라 함)에 의한 셀룰로오스의 가수분해 반응속도식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = - \frac{\Delta [H_2O]}{\Delta t} = k [H_2O] \quad (1)$$

여기서, r 은 화학반응속도, t 는 반응시간, $[H_2O]$ 는 수분의 농도, k 는 반응속도상수이다. 그러므로 습도가 서로 다른 두 서고에서 수분에 의한 가수분해 반응의 화학반응속도 비는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{H_2O \text{ Concentration}_2}{H_2O \text{ Concentration}_1} = \frac{[\%RH_2]}{[\%RH_1]} = \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

여기서, [%RH]는 상대습도, P는 종이의 기대수명을 나타낸다. 습도가 서로 다른 두 조건에서 가수분해에 대한 반응속도를 비교하면 식(2)와 같이 상수 k는 소거되면서 반응속도 비는 습도의 농도비와 비례하는 것을 볼 수 있다. 앞서 기술하였듯이 종이기록물의 기대수명은 습도가 낮으면 가수분해 반응속도가 늦어져 열화가 천천히 진행되기 때문에 기록물의 수명은 길어지고, 반대로 습도가 높으면 가수분해 반응속도가 빨라져 기록물의 수명은 단축된다. 따라서 종이기록물의 가수분해 반응속도와 수명은 서로 반비례적인 관계를 가지고 있기 때문에 두 습도 조건에서 가수분해 반응을 통한 기대수명 비는 상대습도 농도 비의 역수로 나타낼 수 있다.

기록물의 수명에 영향을 미치는 가수분해 반응속도에 영향을 미치는 또 다른 인자는 온도이다. 온도에 대한 반응속도의 영향은 전이상태이론을 기초로 하여 식 (3)과 같이 유도된다.⁸⁾

$$r = \left(\frac{kT}{h} \right) \left(\frac{f_{product}}{f_{reactant}} \right) e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \quad (3)$$

여기서, k 는 볼츠만 상수, h는 플랑크 상수, T 는 절대온도(K), f는 분자 분배 함수, ΔH는 활성화에너지, R은 기체상수이다. 식(3)에서도 볼 수 있듯이 가수분해 반응속도에 대한 온도의 영향은 습도에 의한 영향보다 훨씬 복잡한 것을 알 수 있다. 그러나 두 서로 다른 온도 조건에서 반응속도식을 비교하면 같은 값을 갖게 되는 상수 및 분자 분배 함수 값이 소거되어 식 (4)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

8) G. W. Castellan, 안운선 역, 『물리화학』, 탐구당, 서울, 1987.

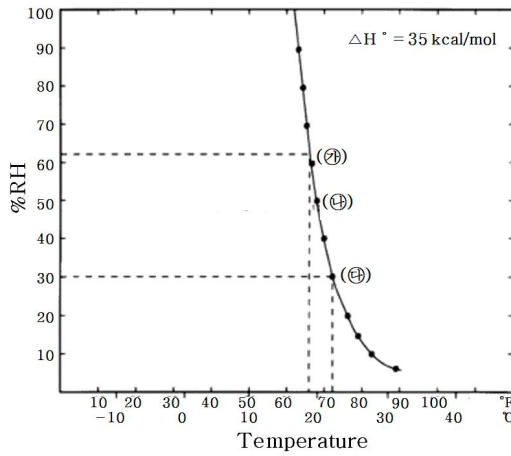
$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right) e^{-\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (4)$$

위에서 제시된 속도반응식은 다른 조건은 같은 상태에서 습도만 다른 조건 또는 온도만 다른 조건에서 셀룰로오스의 가수분해 반응속도를 구하는 수식이다. 그러나 가수분해 반응은 온도와 습도 모두에 영향을 받기 때문에 Donald K. Sebera는 식 (2)와 식 (4)를 조합하여 식 (5)를 제시함으로써 온도와 습도가 다른 두 조건의 서고에서 셀룰로오스의 가수분해반응속도의 비를 구하였으며, 이는 서로 다른 서고의 온·습도 조건에서 보존환경을 정량적으로 비교·평가할 수 있는 보존성 평가지수로 활용되었다.

$$\frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{[\%RH_2]}{[\%RH_1]} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right) e^{-\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (5)$$

Donald K. Sebera는 20℃, 50% 조건일 때 가수분해 반응속도 값과 동일한 값을 갖는 온·습도 조건을 계산하여 <그림 2>와 같이 그래프로 나타내었다. 따라서 <그림 2>의 곡선 상의 각 포인트는 20℃, 50%일 때와 동일한 속도로 가수분해 반응이 진행되어 종이기록물의 보존성이 동일한 조건으로 볼 수 있다. 즉 종이기록물을 열화 시키는 다른 인자들의 영향이 없다고 가정할 경우, 온도와 습도가 각각 18.9℃, 62% 조건(㉞)과 22.2℃, 30% 조건(㉟)은 20℃, 50% 조건(㉠)에서와 동일한 가수분해 속도를 나타내어 종이기록물의 보존성은 같다고 볼 수 있으며, 따라서 이 세 조건의 보존환경은 동일하다고 할 수 있다.

<그림 2> 20℃, 50%와 동일한 가수분해 속도를 갖는 온도와 습도 조건의 곡선(6)

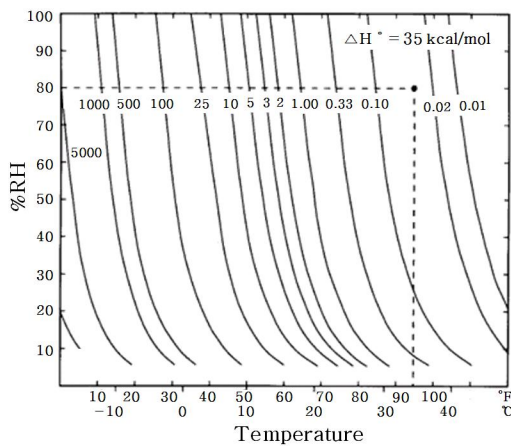


<그림 2>의 곡선을 그리는 것과 동일한 방법으로 보존성 평가지수가 다른 곡선을 그래프로 표현한 것이 <그림 3>이다. <그림 3>에서 동일한 곡선 위에 있는 온·습도는 가수분해 반응 속도가 동일한 조건이며, 따라서 종이기록물의 보존성 평가지수도 같기 때문에 보존환경의 영향도 동일하다고 볼 수 있다. 그러나 각 곡선에 있는 숫자는 식(5)를 이용하여 각 곡선에 해당되는 온·습도 조건에서 가수분해 속도를 20℃, 50%의 온·습도 조건(기준조건)에서의 가수분해 속도로 나누어 보존성 평가지수를 계산한 것이다. 그래프 내 숫자가 커지면 종이기록물의 보존성 평가지수는 증가하며, 그 만큼 보존환경이 우수하다는 것을 의미한다. 반대로 그래프 내 숫자가 작아지면 종이기록물의 보존성 평가지수는 감소하며, 그 만큼 보존환경이 열악하다는 것을 보여준다. 따라서 <그림 3>의 그래프는 식 (5)를 활용하면 서로 다른 보존 조건 또는 서로 다른 서고의 환경을 비교 분석하여 평가할 수 있다는 것을 보여준다. 예를 들어 온·습도가 35℃, 80% 조건일 때의 보존성 평가지수

는 20℃, 50% 조건의 0.03배이다. 이것은 온·습도가 20℃, 50%일 때의 종이기록물의 기대수명이 35℃, 80%일 때 보다 약 33배 좋다는 말이다. 따라서 20℃, 50%의 환경조건에서 종이의 기대수명을 100년이라면 35℃, 80% 환경조건에서는 3년 밖에 되지 않는다는 것을 의미한다.

그러므로 식(5)와 같이 종이기록물을 열화 시키는 다양한 인자들 중에서 온·습도의 영향만을 고려하여 종이기록물의 보존성 평가지수를 계산함으로써 온·습도가 다른 두 보존환경의 보존성을 비교 평가할 수 있는 유용한 모델로 활용할 수 있다.

<그림 3> 동일한 보존성 평가지수를 갖는 온도와 습도 조건의 곡선(6)



2) IPI사의 PI 모델

Donald K. Sebera의 종이기록물 보존성 평가 지수는 서로 다른 두 환경 조건을 비교·평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 이 모델은 두 환경 조건의 보존성을 비교·평가할 수 있을 뿐 기록물의 기대수

명을 예측하는 데는 한계가 있다. IPI사에서는 셀룰로오스아세테이트 필름을 이용하여 필름의 기대수명을 예측하는 방법을 연구하였다. 그들은 필름의 가속열화실험을 통해 얻어진 데이터와 식 (6)과 같은 Arrhenius 식을 이용하여 필름의 활성화 에너지를 계산하고, 이것을 이용하여 필름의 기대 수명을 예측하는 PI 모델을 만들었다.

$$r = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (6)$$

여기서, r 는 반응속도, A 는 온도에 영향이 없는 상수, E 는 활성화에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도(K)를 나타낸다. 일반적으로 Arrhenius 식은 온도의 변화에 따른 반응속도를 계산할 때 많이 사용 된다. Arrhenius 식을 이용한 기대수명은 일정한 습도에서 온도를 변화시키면서 기록물을 가속 열화시키는 방법에 의해 계산될 수 있다.

그러나 Arrhenius 식에는 습도의 영향과 관련된 인자가 없기 때문에 IPI사는 20%, 50%, 60%, 80%로 각 조건의 습도를 일정하게 유지시키면서 온도의 변화에 따른 셀룰로오스아세테이트 필름의 가수분해 실험을 행하였다. IPI사는 여러 습도에서 셀룰로오스아세테이트 필름의 가속열화실험을 통하여 이 필름의 활성화 에너지는 약 22 kcal이며, 20°C, 45%RH 조건에서 기대수명이 약 50년이라고 보고하였다.⁹⁾ 그리고 이들은 이 데이터를 토대로 온도와 습도가 변함에 따라 모든 유기 기록매체의 기대수평을 예측할 수 있는 PI(Preservation Index) 모델을 만들었다. PI 모델은 Arrhenius 식이 가지고 있던 단점을 보완하여 식(7)과 같이 온도뿐만 아니라 습도의 변화에 대해서도 기록물의 기대수명을 비교적 정확하게 계산할 수 있도록 만든 것으로 기록물의 기대수명을 예측하는데

9) I. A. Leenson, "The Arrhenius Law and Storage of Food in a Freezer", *J. Chem. Educ.*, 76, 1999.

매우 유용하게 사용될 수 있다¹⁰⁾.

$$r = [\%RH] A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (7)$$

여기서, r 은 가수분해 반응속도, $[\%RH]$ 는 상대습도, A 는 상수, E 는 활성화에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도(K)를 나타낸다.

그러나 PI 모델은 수명이 50년인 유기 재료를 선택하여 온·습도 변화에 따른 실험을 통해 만든 것이기 때문에 기대수명이 약 50년인 기록물은 온·습도 변화에 따른 PI값이 그 기록물의 기대수명을 나타낼 수 있으나, 수명이 긴 재료에 대해서는 기대수명이 잘 맞지 않는 것이 단점이다. 따라서 기대수명이 긴 기록물의 경우 PI 값은 기록물의 절대적인 수명이 아닌 Donald K. Sebera의 모델과 같이 서로 다른 보존환경을 비교 평가할 때만 사용이 가능하다. 예를 들면 20℃, 45%에서의 PI값은 50년이고, 5℃, 45%에서의 PI값은 360년이다. 이것은 수명이 긴 유기물 재료의 경우 이 환경 조건에서 50년과 360년 보존될 수 있다는 의미가 아니라, 20℃, 45% 조건보다는 5℃, 45% 조건이 보존환경이 더 우수하며, 같은 재료를 보존할 경우 그 수명이 5℃, 45%에서 약 5.2배 길다는 것을 의미한다. 따라서 긴 수명을 가지고 있는 유기기록매체의 PI지수는 Donald K. Sebera의 모델로 구해진 지수와 비슷한 의미를 가지고 있다.

10) http://www.padfield.org/tim/cfys/twpi/twpi_02.php.

3. 보존성 평가지수 분석 결과

1) 기록물관리법 상의 온·습도 범위에서 종이기록물 보존성 평가지수 비교

기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위에서 온도와 습도 변화에 따른 보존 환경의 변화를 비교 평가할 수 있는 모델 중 Donald K. Sebera 모델을 활용하였다. 앞서 기술하였듯이 Donald K. Sebera 모델은 온·습도가 다른 두 개 이상의 조건에서 종이기록물이 가수분해되는 반응속도의 비를 계산하여 보존환경을 상대적으로 평가하는데 적합한 모델이고, IPI사의 PI 모델은 종이기록물의 기대수명을 예측하는데 유용하게 사용되는 모델이다. 본 연구에서는 특정 종이기록물의 기대수명을 평가하기 위한 것이 아니라 기록물관리법상에 제시된 서고 허용 온·습도 범위에서 온도와 습도 변화에 따른 보존 환경의 변화를 비교 평가하는 것이기 때문에 IPI사의 PI 모델 보다는 Donald K. Sebera 모델을 활용하는 것이 더 적합하다.

Donald K. Sebera 모델을 적용하기 위해서는 종이기록물의 가수분해를 발생시킬 수 있는 활성화에너지를 구해야 된다. 일반적으로 수분에 의한 셀룰로오스의 가수분해 반응활성화에너지는 40~45 kcal/mol로 비교적 높은 값을 가지고 있는 것으로 B. Girisuta 등에 의해 보고되었다¹¹⁾. 그러나 종이의 경우 제조된 방법이나 사용된 원료에 따라 20~35kcal/mol을 가지고 있는 것으로 J. M. Reilly는 보고하고 있다⁷⁾. 일반적으로 활성화에너지가 높으면 반응에 많은 에너지가 필요하여 반응이 잘 진행되지 않기 때문에 종이기록물의 수명은 길어지게 된다. 따라서 순수한 셀

11) B. Girisuta, "Kinetic Study on the Acid-Catalyzed Hydrolysis of Cellulose to Levulinic Acid", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 2007.

물로오스의 경우 활성화에너지가 높아 수명이 길지만 종이의 경우 여러 첨가물의 영향으로 활성화에너지가 셀룰로오스 보다 낮아 가수분해 속도가 빨라져 기대 수명이 순수한 셀룰로오스 보다 짧아지게 된다. 본 연구에 적용할 종이의 가수분해 반응에 대한 활성화에너지는 많은 종지에서 보고되고 있는 25 kcal/mol의 값을 적용하였다. 온·습도의 변화는 기록물관리법에서 제시된 종이기록물 보존 온·습도 조건인 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 40~55% 범위 내에서 온도는 1°C 씩 변화시켰고, 습도는 5% 변화시키면서 식(5)를 활용하여 보존성 평가지수의 변화를 계산한 결과를 <표 1>에 나타내었다.

<표 1>에 나타난 보존성 평가지수는 활성화에너지가 25 kcal/mol인 종이기록물이 온·습도가 20°C , 50% 일 때 가수분해 속도를 기준으로 계산된 것이다. 즉 기록물관리법에서의 온·습도 범위 중 18°C , 40%의 조건에서 기록물을 보존할 경우 20°C , 50% 일 때 보다 보존성 평가지수가 1.68배 증가한 것을 볼 수 있다. 반면 가장 가혹한 보존 조건인 22°C , 55%에서 종이기록물을 보존할 경우 20°C , 50% 일 때 보다 보존성 평가지수는 0.68배 감소하였다. 따라서 20°C , 50%의 환경조건에서 종이기록물의 기대수명이 100년이라고 가정한다면, 18°C , 40% 환경조건에서 보존할 때는 168년 동안 종이기록물의 보존이 가능하지만, 22°C , 55%에서 보존할 경우 종이기록물의 기대수명은 68년으로 추정할 수 있다. 이는 기록물관리법에서 허용하고 있는 조건 중 보존성이 가장 우수한 조건인 18°C , 40%에서 종이기록물을 보존하는 것이 가장 가혹한 보존조건인 22°C , 55%에서 보존하는 것보다 2.47배 높은 보존성을 가지고 있다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 현재 기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위 내에서 기록물을 보존한다고 하여도 어떤 조건에서 기록물을 보존하는가에 따라 기대수명이 크게 달라질 수 있다는 것을 보여준다. 기록물관리법 상에서는 종이기록물을 온·습도가 22°C , 55%에서 보존하여도 허용된 범위 내에서 보존하는 것이다. 그러나 20°C ,

50%의 환경에서 종이기록물의 기대수명이 100년이라 가정할 때 22℃, 55%와 18℃, 40%의 조건에서 종이기록물의 보존수명을 비교하면 100년이라는 차이가 난다. 물론 Donald K. Sebera 모델은 기록물의 열화에 영향을 미치는 다른 열화인자들의 영향을 배제하고 오직 온·습도의 영향만을 고려한 것이고, 온도와 습도가 낮을수록 종이기록물의 수명은 더 길어진다는 문제점을 가지고 있다. 하지만, 기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위 내에서도 종이기록물 기대수명에 차이가 크게 나타난다는 것은 ‘우리가 왜 서고 온·습도 보존 조건의 정밀한 유지에 관심을 가지고 관리해야 되는가?’에 대한 답을 잘 보여주는 결과이다.

<표 1> 20℃, 50%에서의 가수분해속도를 기준으로 온도와 습도의 변화에 따른 보존성 평가지수 (종이의 가수분해 활성화에너지 = 25kcal/mol)

온도(℃)	습도(%)	보존성 평가지수	온도(℃)	습도(%)	보존성 평가지수
18	40	1.69	20	50	1.00
	45	1.50		21	55
	50	1.35	40		1.08
	55	1.23	45	0.96	
19	40	1.45	21	50	0.86
	45	1.29		55	0.78
	50	1.16		22	40
	55	1.06	45		0.82
20	40	1.25	22	50	0.74
	45	1.11		55	0.67

2) 종이기록물 보존성 영향 인자

<표 1>은 ‘종이기록물이 보존되는 환경에서 온도와 습도의 변화 값

이 종이기록물의 수명에 얼마나 영향을 미치는가?’를 보여주고 있다. 일반적으로 같은 온도에서는 습도가 높을수록 기대수명이 낮아지며, 같은 습도에서는 온도가 높을수록 기대수명이 낮아지는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 ‘낮은 온도와 높은 습도 또는 높은 온도와 낮은 습도 중 종이기록물의 보존환경으로 어느 조건이 더 적합한가?’라는 물음에 답하기는 어렵다. <표 1>은 이러한 질문에 대해 어느 정도 답을 주고 있다. 예를 들어 ‘19℃, 50%와 20℃, 45%의 조건 중 어느 조건이 종이기록물을 보존하는데 더 적합한 조건인가?’라는 질문에 <표 1>은 19℃, 50%의 조건이 종이기록물을 보존하는데 더 적합한 조건이라고 답을 주고 있다.

그러면 ‘온도와 습도 중 종이기록물의 보존성에 더 큰 영향을 미치는 인자는 무엇인가?’라는 질문에는 <표 1>만 가지고서는 답하기가 어렵다. 25 kcal/mol의 활성화에너지를 가지고 있는 종이기록물의 경우 온도를 1℃ 변화하는 것이 습도 5% 변화하는 것보다 기대수명에 더 큰 영향을 주고 있음은 <표 1>을 통해서 알 수 있다. 20℃, 50%의 값을 기준으로 비교해 볼 때 습도가 5% 낮은 20℃, 45%의 보존성 평가지수는 1.11로 20℃, 50%일 때의 값 보다 11% 증가한 것으로 나타나고 있다. 반면 온도를 1℃ 낮춘 19℃, 50%일 때의 보존성 평가지수는 1.16으로 기대수명이 16% 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이렇듯 습도 5%의 변화 보다 온도 1℃의 변화가 기록물 보존성에 더 큰 영향을 미친다는 것은 18~22℃, 40~55%의 보존조건 범위에서 동일하게 나타났으며, 이러한 차이는 종이기록물의 활성화에너지가 클수록 더 크게 나타났다.

그러나 활성화에너지가 낮은 종이기록물의 경우 온도의 영향보다는 습도의 영향이 더 커진다는 것을 <표 2>를 통해 알 수 있다. <표 2>는 기록물관리법 상의 온·습도 범위 내에서 가수분해 반응에 대해 활성화에너지 20 kcal/mol을 갖는 종이기록물에 대한 온·습도 변화에 따른 보존성 평가지수를 나타낸 것이다. 20 kcal/mol의 활성화에너지를 가

지고 있는 종이기록물의 경우 온도를 1℃ 변화시켰을 경우 보존성 평가 지수의 변화와 습도를 5% 변화시켰을 때 보존성 평가지수의 변화에 큰 차이가 없음을 <표 2>에서 볼 수 있다. 예를 들어 20℃, 50%의 값을 기준으로 습도를 5% 낮춘 20℃, 45%에서의 보존성 평가지수는 1.11인 반면 온도를 1℃ 낮춘 19℃, 50%일 때의 보존성 평가지수는 1.13으로 나타났다. 이것은 20 kcal/mol의 활성화에너지를 가지고 있는 종이기록물의 경우 25 kcal/mol의 활성화에너지를 가지고 있는 종이기록물 보다 온도에 의한 영향이 줄어들고 습도에 의한 영향이 커지고 있다는 것을 보여준다. 실제로 활성화에너지 값을 더 낮추어 계산을 할 경우 온도의 영향보다는 습도에 의한 보존성 평가지수의 변화가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

<표 2> 20℃, 50%에서의 가수분해 속도를 기준으로 온도와 습도의 변화에 따른 보존성 평가지수 (종이의 가수분해 활성화에너지 = 20kcal/mol)

온도(℃)	습도(%)	보존성 평가지수	온도(℃)	습도(%)	보존성 평가지수
18	40	1.59	20	50	1.00
	45	1.42		21	55
	50	1.28	22		40
	55	1.16		45	0.99
19	40	1.41		50	0.89
	45	1.25	22	55	0.81
	50	1.13		40	0.98
	55	1.03		45	0.87
20	40	1.25	22	50	0.79
	45	1.11		55	0.72

이러한 현상은 ‘산성지로 되어있는 종이기록물의 보존을 위해 서고 환경 조건을 어떻게 해야 되는가?’에 대한 답을 주고 있다. 일반적으로

산성지는 종이 제조 시 산성물질을 첨가한다. 이 산성물질은 종이 내에서 셀룰로오스의 가수분해 반응에 대한 활성화에너지를 낮추는 촉매 역할을 하며, 이로 인해 종이의 열화반응이 촉진된다. 이러한 산성지로 제조된 기록물의 경우 활성화에너지가 낮기 때문에 온도의 변화보다 습도의 변화에 더 민감하게 작용한다. 따라서 온도의 제어도 중요하지만 습도를 관리하는 것이 더욱 중요하게 된다.

4. 결론 및 제언

온도와 습도의 영향만을 고려한 종이기록물 보존성 평가 방법으로는 Donald K. Sebera 모델과 IPI사에서 개발한 PI 모델이 있다. IPI사에서 개발된 PI 모델은 종이기록물의 기대수명을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있으나, 실험에 의해 기록물의 기대수명을 측정해야 정확한 기대수명을 예측할 수 있다. 그러나 Donald K. Sebera 모델은 온·습도가 다른 두개 이상의 서고 환경을 서로 비교하기 위하여 온도와 습도만을 적용하여 정량화된 보존성 평가지수를 구하는 모델이다. 따라서 기록물관리법에서 허용하고 있는 종이기록물 보존 온·습도 범위에서 온도와 습도가 종이기록물의 보존성에 미치는 영향을 정량적으로 계산하여 비교 분석하기 위한 본 연구에는 Donald K. Sebera 모델을 적용하는 것이 더 적합했다.

Donald K. Sebera 모델을 이용하여 온·습도 변화에 따른 종이기록물 보존환경을 비교평가하기 위해서는 셀룰로오스 가수분해 반응에 대한 활성화에너지를 구해야 되는데, 본 연구에서는 종이의 가수분해 반응에서 보고 되어 있는 25 kcal/mol의 값을 적용하였다. 또 온·습도의 변화는 기록물관리법에서 제시된 종이기록물 보존 온·습도 조건인 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,

40~55% 범위 내에서 온도는 1℃씩 변화시켰고, 습도는 5%씩 변화시키면서 계산하였으며, 20℃, 50% 조건에서의 기대수명을 기준으로 각 온·습도 조건에서 보존성 평가지수를 계산함으로써 상대적인 보존수명을 비교 평가하였다.

그 결과 가장 보존조건이 좋은 18℃, 40% 조건에서의 기대수명이 22℃, 55% 조건에서의 기대수명보다 2.47배 높게 나타났다. 이것은 20℃, 50% 조건에서 종이기록물의 기대수명을 100년이라 가정할 때 18℃, 40% 조건에서는 168을 보존할 수 있으며, 22℃, 55% 조건에서는 68년을 보존할 수 있어 기록물관리법에서 허용하고 있는 온·습도 범위에서도 보존 조건에 따라 100년의 차이가 날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 기록물관리법에 제시된 온·습도 범위 내에서 종이기록물을 보존하는 것도 중요하지만, 허용범위 내에서도 온·습도가 변함에 따라 기대수명이 크게 차이가 날 수 있음을 고려해야 한다.

또한 이 지수를 활용하면 종이기록물이 온도와 습도 중 어느 쪽에 좀 더 민감하게 반응하는지를 알 수 있다. 순수한 셀룰로오스의 활성화에너지는 40~45 kcal/mol로 높은 편이라 가수분해 반응이 쉽게 일어나지 않는다. 그러나 종이를 제조할 때 들어가는 첨가물, 특히 산성물질에 의해 종이의 활성화에너지는 20~30 kcal/mol로 낮아지게 된다. Donald K. Sebera 이론에 의해 계산된 <표 1>과 <표 2>를 비교하면 활성화에너지가 낮은 종이의 보존성 평가지수는 온도의 변화 보다는 습도의 변화에 더 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 산성지의 경우 첨가된 산성물질이 촉매로 작용하여 가수분해반응에 대한 활성화에너지를 낮춰 기록물이 쉽게 가수분해 되는 특성을 가지고 있다. 이런 기록물의 경우 가수분해반응이 빨리 진행되지 않도록 온도를 낮추어야 하지만 온도 보다 습도의 관리가 더 중요하다. 반대로 활성화에너지가 높은 종이기록물의 경우 습도의 관리도 필요하지만 온도의 제어가 더 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 따라서 기록물을 장기간 보존하기

위해서는 종이기록물의 특성을 먼저 파악하여 온도와 습도 중 좀 더 신경 써서 관리해야 하는 인자가 무엇인지 확인하여 이에 적합한 보존환경을 유지하는 것이 중요하다. 특히 온·습도 제어가 일정하게 유지되지 않는 서고에서는 종이기록물을 안전하게 장기 보존하기 위해서 종이기록물이 산성지로 되어있는지, 중성지로 되어있는지 먼저 확인한 후 온·습도를 기록물 특성에 맞게 관리하는 것이 필요하다.

종이기록물의 보존환경에 영향을 미치는 인자로는 온·습도 외에 빛, 공기질, 미생물 등 다양한 인자가 존재하기 때문에 온·습도만 제어하여 보존성 평가지수를 계산하는 것만으로 기록물의 보존환경 전체를 단언하는 것은 무리가 있다. 그러나 보존성 평가지수를 활용함으로써 현재 서고가 유지하고 있는 온·습도 조건이 기록물의 보존환경에 적합한지를 쉽게 판단할 수 있다. 또 보존성 평가지수는 서고 환경을 쉽게 모니터링하기 때문에 기록물의 보존성을 확보할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

[참고문헌]

박지선, 「종이 기록물의 보존관리」, 『기록보존과 관리』, 4(1), 1999.

윤대현 외, 『기록물 보존학』, 계문사, 서울, 2011.

신중순 외, 『보존과학개론』, 세시, 대전, 2002.

공공기록물관리에 관한 법률 시행령 제60조 제1항.

Yale University Library Preservation Department 35th Annual Report July 2005-June 2006.

Donald k. Sebera, "Isoperms: An Environmental management Tool, The

- Commission on Preservation and Access”, Washington DC (1994).
- J. M. Reilly, D. W. Nishimura, and E. Zinn, “New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections”, *The Commission on Preservation and Access*, Washington DC, 1995.
- http://www.padfield.org/tim/cfys/twpi/twpi_02.php.
- G. W. Castellan, 안운선 역, 『물리화학』, 탐구당, 서울, 1987.
- I. A. Leenson, “The Arrhenius Law and Storage of Food in a Freezer”, *J. Chem. Educ.*, 76, 1999.
- B. Girisuta, “Kinetic Study on the Acid-Catalyzed Hydrolysis of Cellulose to Levulinic Acid”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 2007.

ABSTRACT

Study on Application of the Preserving Valuation Index for Environmental Management of a Stack Room

Dai-Hyun Yoon, Hyun-Chang Shin

Donald K. Sebera model can quantitatively compare the preserving environment by calculating the preserving valuation index with changing only the temperature and humidity. In this study, Donald K. Sebera model was used in order to compare and evaluate the preserving valuation index on the best condition and the worst condition in the temperature and humidity range of public records management act. As the results, the preserving valuation index in the best conditions was larger 2.47 times than the worst conditions within the preserving environment permitted in public records management act. Also, the influence of the humidity on the preserving valuation index of a paper archives as decreasing the activation energy for the hydrolysis reaction was larger rather than temperature. Thus the preserving valuation index can easily evaluate the suitability of the temperature and humidity conditions for preserving a archives. Therefore it can be used as useful tool for preservation of archives on change of the temperature and humidity.

Key word : Donald K. Sebera model, Preserving Valuation Index, Temperature, Humidity, Paper Archives