

# 건열처리 인공노화가 시판지의 색상변화에 미치는 영향

최은연 · 이용규 · 조병욱<sup>†</sup>

접수일(2014년 8월 14일), 수정일(2014년 8월 20일), 채택일(2014년 8월 22일)

## Effects of Artificial Thermal Aging on Variations in Color of Commercial Papers

Eun-Yeon Choi, Yong-Kyu Lee and Byoung-Uk Cho<sup>†</sup>

Received August 14, 2014; Received in revised form August 20, 2014; Accepted August 22, 2014

### ABSTRACT

Effects of artificial thermal aging on color variations of various commercial papers (fine paper, coated paper, newsprint and filter paper) were investigated. With thermal aging at 105°C, most of papers showed a special trend in a<sup>\*</sup>-b<sup>\*</sup> plane: the a<sup>\*</sup> (red-green) values of the samples were initially reduced (heading to -a<sup>\*</sup> side) and after a turning point they increased to +a<sup>\*</sup> side while the b<sup>\*</sup> (blue-yellow) values were kept increased to +b<sup>\*</sup> side (yellowing of paper). Different papers had different turning points for a<sup>\*</sup> value. The filter paper consisted of a pure chemical pulp and the copy paper with OBA (optical brightening agent) showed the latest turning points. In addition, the papers without OBA showed less reduction in brightness compared with that with OBA, suggesting that OBA could adversely influence the brightness stability during thermal aging.

**Keywords:** Thermal aging, brightness, optical brightening agent, color differences, CIE L<sup>\*</sup>a<sup>\*</sup>b<sup>\*</sup>

### 1. 서론

종이가 제조된 후, 시간의 흐름에 따라 종이의 노화가 발생한다. 종이가 노화됨에 따라 종이의 물리적, 화학적 성질이 어떻게 변화하는지는, 종이의 보존 측면에서 또는 종이를 재생하는 측면에서 여러 연구자들에

의해서 연구되어져 왔다.<sup>1-12)</sup> 종이가 노화됨에 따라 가수분해, 산화분해 등에 의해서 셀룰로오스의 저분자화가 발생하여 섬유 강도가 저하하고, 결과적으로 종이의 강도적 성질이 감소한다는 것은 잘 알려진 사실이다.<sup>1-4,6-8,11)</sup> 산성지의 경우, 산 촉매 가수분해에 의한 노화가 주로 발생하고, 중성지의 경우, 온도, 습도 등 외부

• 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과 (Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chunchon, Republic of Korea)

† 교신저자(Corresponding Author): E-mail: bucho@kangwon.ac.kr

인자들에 의한 셀룰로오스에 존재하는 수산기에 기인한 산화분해가 노화의 주요 원인이다.<sup>12)</sup> 산화분해의 결과물인 카르복실산 등의 약유기산들이 생성되면서 종이 내 산가수분해가 진행하게 된다.<sup>8,10,12)</sup>

종이의 광학적 성질도 변화하는데, 종이의 백색도 저하와 변색은 주요한 노화의 지표로 알려져 있다. 종이가 노화됨에 따라 황색화(yellowing)되어 백색도가 감소하다는 것은 여러 연구자들에 의해서 보고되었다.<sup>6,7,10,13)</sup> Jeong과 Cho<sup>6,7)</sup>는 자외선 처리 및 건열처리에 의해서 시판지를 인공노화시킨 연구에서, 열화에 의해서 복사지 및 한지의 백색도가 감소하였고, 신문용지의 백색도 감소가 복사지 및 신문용지보다 크다고 보고하였다. 또한 불투명도와 백감도(whiteness)는 열화 시 증가되는 경향을 나타냈다고 보고하였다. Jablonský 등<sup>10)</sup>은 신문지를 98℃에서 60일 동안 건열처리에 의해서 강제 열화시킨 연구를 진행하였고, 종이 표면의 색은 빠르게 어두운 색상으로 변화하고, 명도(lightness)는 감소하고, CIE  $a^*$  및  $b^*$ 은 증가한다고 보고하였다. 종이의 황색화는 여러 인자들에 의해서 영향을 받는데, 특히 종이의 pH와 리그닌 함량에 크게 영향을 받는다.<sup>13)</sup> 리그닌 함량이 높은 기계펄프를 사용하여 제조한 종이에서 황색화가 심하다는 것은 잘 알려진 사실이다.<sup>14)</sup> 리그닌은 카르보닐기와 방향족 케일리중결합(conjugated bond)같은 발색단을 많이 함유하고 있고, 산소의 존재 하에서 발색단과 빛과의 반응이 기계펄프가 황색화되는 주요 원인으로 알려져 있다.<sup>15)</sup> 화학펄프로 제조한 종이도 노화 시 백색도 감소가 발생할 수 있다. 셀룰로오스보다 중합도가 낮은 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스보다 빠르게 산화반응을 발생시켜 펄프를 황색화시킨다.<sup>15)</sup> Kim과 Yoon은 여과지를 glucuronoxylan과  $Fe^{2+}$  이온으로 처리하였을 시 백색도가 빠르게 감소됨을 보였다.<sup>16)</sup>

황색화는 노화 초기부터 발생하는 가장 대표적인 노화현상 중 하나로, 종이의 노화된 정도를 평가하는 하나의 지표로서 사용되어져 왔다. 노화에 따른 종이의 황색화는 백색도(brightness)의 변화로 나타내거나, CIE  $L^*a^*b^*$  표색계에서  $L^*$ 값의 저하 또는  $b^*$ (blue-yellow)값의 증가로 평가되어져 왔다.<sup>1,12)</sup> 반면에, 종이의 색상(hue)은 주로  $a^*-b^*$  평면에서 표현되어져 왔음에도 불구하고,  $b^*$ 값에 비하여  $a^*$ (red-green)값의 변화는 큰 주목을 받지 않아 왔다. 또한, 대부분의 연구자들

은 종이의 강제 노화 시  $a^*$ 값이 양의 값으로 증가한다고 보고하였다.<sup>10,12,17,18)</sup> 그러나 Kim 등<sup>19)</sup>은 강제 열화 시 라텍스의 특성이 도공지의 광학적 특성에 미치는 영향을 평가한 연구에서, 라텍스의 첨가량이 증가할수록 백색도, 백감도, CIE  $L^*$  및  $b^*$  값은 감소하였고,  $a^*$  값은 열화기간에 따라 초기엔 감소하다가 일정기간 이후에 증가하는 경향을 나타내었다고 보고하였다.

본 논문에서는 건열처리 가속노화가 시판지의 색상에 어떠한 영향을 미치는 지를 평가하고자 하였다. 특히 노화가 진행됨에 따라  $a^*$ (red-green)값이 어떤 경향을 보이는지에 중점을 두고자 하였다. 시판되는 여러 종이들(백상지, 도공지, 신문지, 여과지 등)을 분양받아 105℃의 건조기에서 30일 동안 가속 노화시키면서, 2일 간격으로 백색도 및 종이의 색상변화를 측정, 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

시판되고 있는 14종의 종이를 제공받아 공시재료로 사용하였다. A사의 아트지, MFC(machine finished coated paper), 백상지등 6종을 사용하였고, 일본 A사의 여과지, H사의 백상지, D사의 복사지와 신문용지 코팅지 등 6종을 제공받아 사용하였다. 실험에 사용된 각 종이 샘플들의 특성은 Table 1에 나타내었다. A1 샘플은 순수 면섬유로 제조된 여과지이고, A2와 A3는 천연펄프로 제조한 백상지(A3는 기계펄프인 BCTMP(bleached chemi-thermo mechanical pulp, 표백 화학열 기계펄프) 함유)이고, A4-A6는 재생펄프(DIP, deinked pulp)로 제조한 종이들이다. A시리즈 샘플 중, A1, A5, A6 샘플들에는 형광증백제가 사용되지 않았고, 나머지 샘플들에는 사용되었다. B시리즈의 종이샘플들은 도공지인데, B1에서 B5까지는 천연펄프로 제조한 원지(BCTMP도 사용됨)를 사용하였고, B6에서 B8까지는 DIP가 사용된 원지로 제조되었다. B4와 B5, B7 샘플들은 MFC이다. B1부터 B6샘플까지 형광증백제가 사용되었고, DIP로 제조된 도공지인 B7과 B8은 형광증백제가 사용되지 않은 샘플들이다.

### 2.2 실험방법

**Table 1. Basic characteristics of samples tested**

No	Type	Basis weight (g/m <sup>2</sup> )	Pulp types	Ash content (%)	Coating	OBA
A1	Filter paper	100	Cotton cellulose	0	x	x
A2	Fine paper	90	LBKP, NBKP	25.5	x	O
A3	Copy paper	80	LBKP, NBKP, BCTMP	19	x	O
A4	Copy paper	75	LBKP, DIP	10	x	O
A5	Newsprint	45	DIP	7	x	x
A6	Fine paper	70	DIP	15	x	x
B1	Art paper	90	LBKP, NBKP, BCTMP	20	One-side coating	O
B2	Art paper	150	LBKP, NBKP, BCTMP	25	Double-side coating	O
B3	Matte paper	120	LBKP, NBKP, BCTMP	23	Double-side coating	O
B4	MFC	80	LBKP, NBKP, BCTMP	16	Pre-coating	O
B5	MFC (pale yellow color)	80	LBKP, NBKP, BCTMP	19	Pre-coating	O
B6	Coated paper	70	DIP	13	Coating	O
B7	MFC	70	DIP	15	Pre-coating	x
B8	Coated paper	75	LBKP, DIP	10	Coating	x

각 지종 별 샘플들을 105℃의 열풍건조기에서 30 일 간 열화시켰다. 강제 열화시키는 동안, 2 일(48 시간) 간격으로 샘플들의 색상(CIE L\*a\*b\*)과 백색도(ISO brightness)를 Elrepho 3300(Datacolor International, USA)을 사용하여 측정하였다. 백색도의 변화 ΔB는 Eq. 1에 의해서 계산하였다.

$$\Delta B = B_t - B_0 \quad [1]$$

여기서 B<sub>0</sub>는 샘플의 초기 백색도이고 B<sub>t</sub>는 t일 동안 건열처리 가속노화 시킨 샘플의 백색도이다. 가속노화 t

일후의 샘플의 명도변화 ΔL은 Eq. 2에 의해서 계산하였다.

$$\Delta L^* = L_t^* - L_0^* \quad [2]$$

그리고 t 일 동안 강제 열화된 샘플의 색차(color differences, ΔE)는 Eq. 3에 의해서 계산하였다.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad [3]$$

여기서 a\*, b\*는 색도 다이어그램으로 +a\*는 빨강, -a\*는 초록 방향을 나타내고, +b\*는 노랑, -b\*는 파랑 방향을

**Table 2. Initial values of color of the samples**

No	Brightness (%)	L*	a*	b*	No	Brightness (%)	L*	a*	b*
A1	97.25	100.16	-0.11	2.78	B1	101.08	95.96	-0.55	0.99
A2	97.37	97.83	-0.32	3.53	B2	99.69	95.63	-0.57	0.96
A3	111.11	96.25	-0.43	-0.20	B3	99.60	96.18	-0.63	1.53
A4	98.09	93.19	-0.60	-0.32	B4	96.26	95.97	-0.88	3.62
A5	58.35	78.01	-0.02	-2.83	B5	87.82	97.23	-0.67	5.95
A6	73.79	91.22	-1.56	8.20	B6	90.89	93.98	-1.12	3.38
					B7	81.88	92.08	-1.00	3.60
					B8	83.94	95.77	0.25	6.58

나타낸다. 샘플들의 초기 백색도 및 CIE L\*a\*b\* 값들은 Table 2에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 백색도에 미치는 영향

Figs. 1과 2는 105°C에서 건열처리 가속노화가 A 시리즈 및 B 시리즈 샘플들의 백색도에 미치는 영향을 보여준다. 30일 동안 노화가 진행됨에 따라 모든 샘플들에서 백색도가 감소하였다. 즉, 백색도 변화( $\Delta B$ )가 음(-)의 값으로 증가하였다. 백색도 감소폭의 정도는 종이의 종류에 따라서 다르게 나타났다. 여과지인 A1과 백상지 중, A5와 A6 샘플들이 상대적으로 백색도 감소가 작았고, 나머지 세 샘플들이 상대적으로 컸다(Fig. 1). 도공지 중 B7와 B8 샘플들의 백색도 감소가 작았고, B1, B3, B2, B4 네 종이 샘플들의 백색도 감소폭이 크게 나타났다(Fig. 2). 흥미로운 점은 백색도 감소폭이 상대적으로 작은 다섯 샘플들은 형광증백제를 사용하지 않은 샘플들이었다는 것이다. 즉, 형광증백제를 사용한 종이들의 백색도 저하가 형광증백제를 사용하지 않은 종이들보다 상대적으로 크게 나타났다. 위 결과들은 백색도를 향상시키기 위해서 사용한 형광증백제가, 종이가 노화되는 경우에는 종이의 백색도 안정성을 오히려 감소시킬 가능성이 있다는 것을 의미한다.

형광증백제는 열 및 빛에 대한 안정성이 낮다고 보고되었다.<sup>14) Kim 등<sup>20)</sup>은 50°C와 75°C의 열을 24 시간 가하였을 경우에, 형광증백제의 형광저하에 의해서 상</sup>

업용 인쇄용지의 백색도와 백감도가 저하된다고 보고하였다. 또한 형광증백제 종류가 열적 안정성에 영향을 미친다고 하였는데, 헥사타입 형광증백제가 열적 안정성이 가장 높고, 테트라타입이 가장 낮다고 보고하였다. 이 연구결과들에 의하면 열적 가속노화 시, 형광증백제의 사용이 종이의 백색도 안정성을 감소시킬 가능성이 있다고 판단된다.

편면도공과 양면도공(Fig. 2의 B1과 B2 비교), 아트지와 매트지(B2과 B3 비교), 오프라인 도공과 MFC(B1과 B4 비교)는 백색도 저하 정도에 큰 영향을 미치지 못하였다. 미색(pale yellow color) 염료를 사용한 경우에 열적 노화에 따른 백색도 감소는 둔화되었다(B4와 B5 비교). 탈목펄프(DIP)를 도공원지에 사용한 B6, B7, B8이 상대적으로 안정적인 백색도를 나타내었다. 이는 탈목펄프를 도공원지에 사용하면 종이의 초기 백색도는 낮아지나, 백색도의 노화 안정성과는 무관하다는 것을 의미한다. B6 샘플의 경우, 형광증백제를 사용하여 백색도 안정성이 B7과 B8 샘플들 보다 낮게 나타났다.

#### 3.2 명도에 미치는 영향

열적 노화가 진행됨에 따라 거의 모든 종이 샘플들의 명도(L\*)는 저하하였다(Figs. 3과 4). 신문지인 A5 샘플만 건열처리 가속노화를 시킴에 따라 명도가 증가하였고, 나머지 샘플들에서는  $\Delta L^*$ 이 음의 값으로 증가(즉, 감소)하였다. 30일 동안 열적 노화시킨 경우에, 백색도는 10-35% 정도 변화된 반면 명도는 최대변화가 4포인트 정도 변화하였다. 즉, 열적 노화 시 명도는

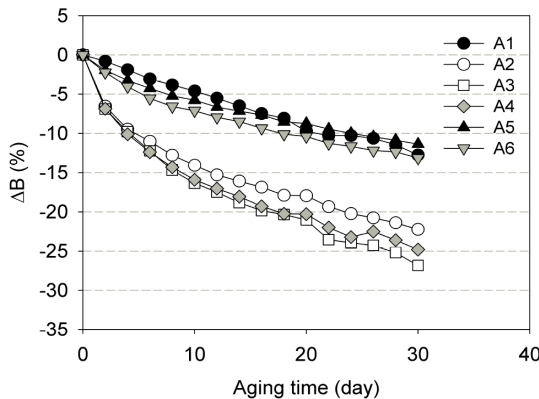


Fig. 1. Effect of thermal aging on the brightness of fine papers.

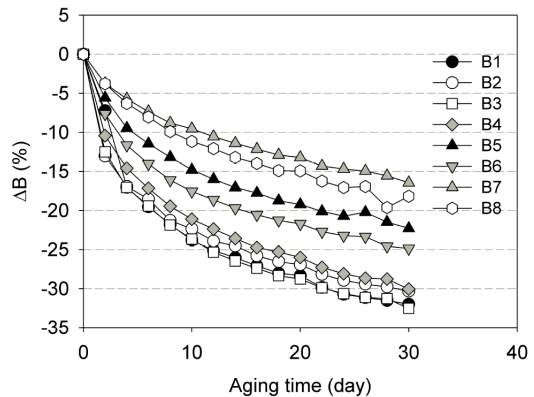


Fig. 2. Effect of thermal aging on the brightness of coated papers.

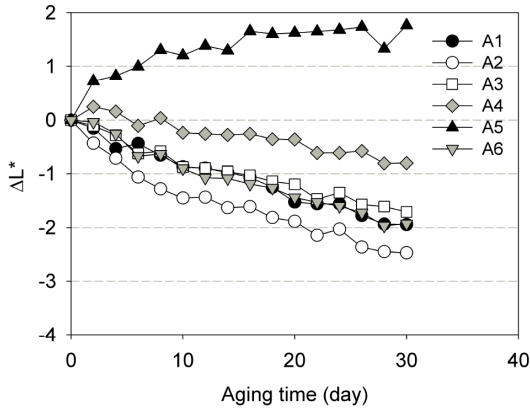


Fig. 3. Effect of thermal aging on the  $L^*$  value of fine papers.

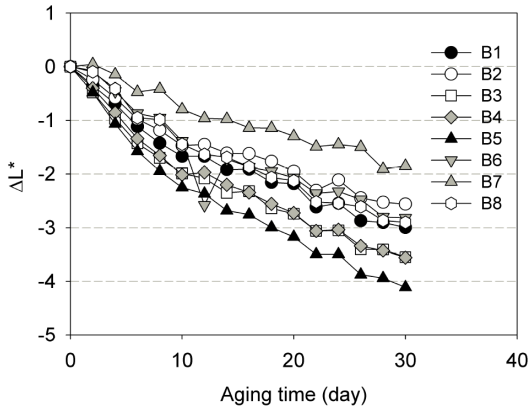


Fig. 4. Effect of thermal aging on the  $L^*$  value of coated papers.

백색도에 비해 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 백색도와는 다르게 형광증백제 사용은 종이의 명도에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다. 형광증백제를 사용하지 않은 B7 샘플의 경우에는  $\Delta L^*$ 의 변화가 작았으나, A6 샘플의 경우에는 크게 나타났다.

### 3.3 색상에 미치는 영향

Figs. 5와 6은 건열처리 가속노화가 종이의 색상에 미치는 영향을 보여준다. 모든 지종에서 노화시간이 증가 할수록  $b^*$ 값은 양(+)의 값으로 꾸준하게 증가하여 황색화가 발생한 것을 알 수 있었다. 반면에, 모든 종이에서  $a^*$ 값은 노화 초기에는 감소(즉, 음(-)의 값으로 증가)하다가 증가(양(+)의 값으로 증가)하는 역전현상을 나타내었다. 즉,  $a^*-b^*$  평면에서 좌상귀로 변화하다

가 우상귀로 진행되는 경향을 나타내었다.  $a^*$  및  $b^*$  값의 증가는 적색 및 황색을 띠는 착색물질이 생성됨을 의미한다.  $a^*$ 값의 역전이 발생하는 시간은 지종별로 조금 차이를 보였다(Table 3 참조). Table 3에서 turning point는  $a^*$ 값이 가장 작은(음의 값이 가장 큰) 시간을 선택하였다. A1 샘플의 경우 14일, A3 샘플의 경우 20일, A4 샘플의 경우 8일, B1, B2 샘플의 경우 6일에  $a^*$ 값이 양의 값으로 전환되었고, 나머지 샘플들은 2일 또는 4일에 역전이 발생하였다. A1 샘플의 경우에 여과지로 순수한 화학펄프(면린터)로 제조되었기 때문인 것으로 사료된다. 복사지(A3 샘플)의 경우에 30일 동안 열적 노화시켰음에도 뚜렷한 전환점은 관찰되지 않았다. 샘플 A3의 초기 백색도는 111.11로 다른 종이샘플들에 비해 매우 높았다. 이는 복사지의 백색도를 증가시키기 위해서 사용된 형광증백제의 영향으로 추측된다.

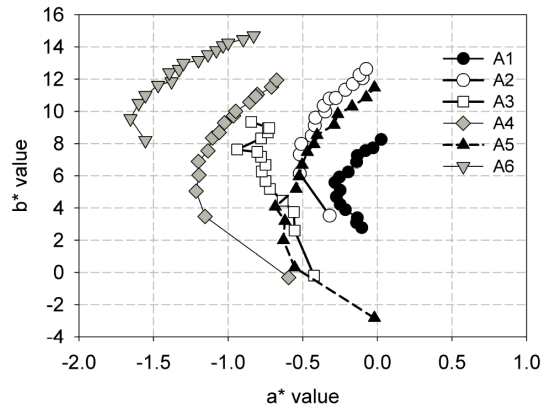


Fig. 5. Effect of thermal aging on  $a^*$  and  $b^*$  values of fine papers.

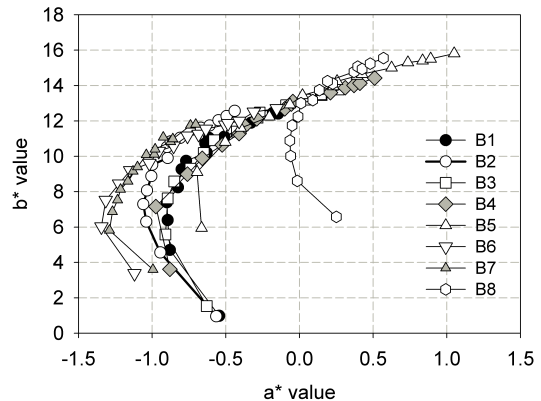


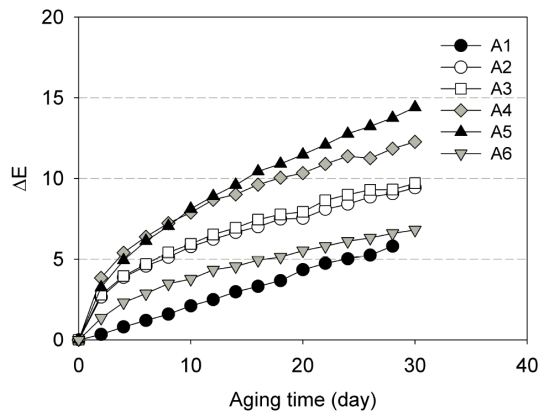
Fig. 6. Effect of thermal aging on  $a^*$  and  $b^*$  values of coated papers.

**Table 3. Color variations of paper samples after the artificial thermal aging process**

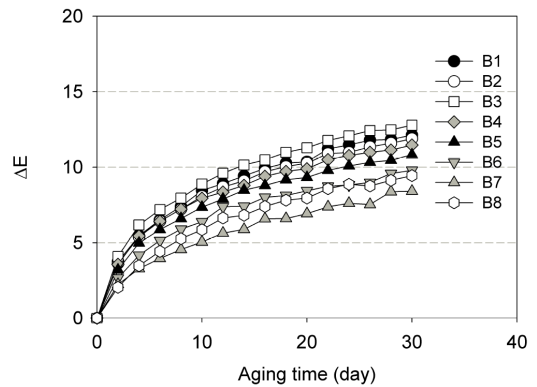
No	$\Delta E$	$a^*$ at a turning point	$b^*$ at a turning point	Turning point (day)	No	$\Delta E$	$a^*$ at a turning point	$b^*$ at a turning point	Turning point (day)
A1	5.82	-0.29	5.59	14	B1	12.13	-0.90	7.40	6
A2	9.43	-0.52	7.34	4	B2	11.88	-1.06	7.30	6
A3	9.71	-0.94	7.63	20	B3	12.78	-0.91	5.58	2
A4	12.28	-1.22	5.05	4	B4	11.47	-0.98	7.16	2
A5	14.41	-0.69	4.08	8	B5	10.82	-0.70	9.11	2
A6	6.82	-1.66	9.55	2	B6	9.79	-1.35	6.03	2
					B7	8.42	-1.29	5.82	2
					B8	9.44	-0.07	10.89	6

Kim 등<sup>19)</sup>은 라텍스 함량, 라텍스의 Tg와 gel content가 열화에 따른 도공지의 황색화에 영향을 미치는 요인 중 하나라고 보고하였다.  $a^*$ 값은 초기에 감소하다고 일정 기간 후 다시 증가하는 경향을 보였고, 라텍스 첨가량이 증가할수록 역전되는  $a^*$ 의 값이 작아짐을 보고하였다.

Figs. 7과 8에 건열처리 가속노화가 종이 샘플들의 색차(color differences,  $\Delta E$ )에 미치는 영향을 나타내었다. 노화 시 탈목펄프로 제조한 신문용지인 A5 샘플과 탈목펄프를 혼합하여 제조한 복사지인 A4 샘플의 색상 변화가 크게 나타났다. 화학펄프만으로 제조한 여과지의 색상 변화가 가장 작았고, 탈목펄프로 제조한 중질지인 A6 샘플도 상대적으로 색상변화가 작게 나타났다. A1과 A6는 형광증백제를 사용하지 않은 지종이다. 도공지의 경우에 탈목펄프로 제조한 MFC인 B7 샘플의 색상변화  $\Delta E$ 가 가장 작았고, 그 다음에 B8 (탈목펄프 + LBKP 혼합, 도공지)와 탈목펄프로 제조한 도공지인 B6 순이었다. 형광증백제를 사용하지 않



**Fig. 7. Effect of thermal aging on color differences of fine papers.**



**Fig. 8. Effect of thermal aging on color differences of coated papers.**

은 종이 샘플들의 색상 변화가 일반적으로 작았으나, A5(신문지, 형광증백제 미사용)의 색상변화가 가장 크게 나타나서, 형광증백제의 영향이라고 단정하긴 힘들다고 사료된다. 도공지의 경우에 기계펄프인 BCTMP를 포함하는 B1에서 B5 샘플들의 색상변화가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 탈목펄프로 제조된 A4와 A5 샘플들 보다는 정도가 덜 하나, BCTMP가 포함된 A3 샘플의 경우에 색상변화가 그 다음 순으로 나타났다. 위의 결과들은 리그닌을 상대적으로 많이 함유하는 기계펄프로 제조한 종이의 색상안정성이 상대적으로 떨어진다는 것을 의미한다.

## 4. 결론

시판되는 종이들(백상지, 아트지, MFC, 신문지, 여과지 등)을 공시재료로 하여, 건열처리 가속노화가 종이의 색상에 미치는 영향을 CIE  $a^*b^*$ 값의 변화에 중점

을 두고 평가하였다. 대부분의 종이에서 열화가 진행됨에 따라 일정한 경향이 발견되었다. 강제 열화가 진행됨에 따라  $a^*$ - $b^*$  평면에서  $b^*$  값은 꾸준히 증가하였으나,  $a^*$  값은 초기에는 감소하다가, 일정한 전환점 이후에 증가하는 경향을 나타내었다. 전환점이 나타나는 시기는 종이의 종류에 따라서 다르게 나타났다. 순수한 화학펄프로 제조한 여과지와 형광증백제를 많이 사용한 복사지의 경우에  $a^*$  값의 전환점이 늦게 나타났다. 또한, 형광증백제를 사용하지 않은 샘플들의 백색도 저하 폭이 형광증백제를 사용한 종이들 보다 작게 나타났다. 이 결과에 의하면 종이의 백색도를 향상시키기 위해서 사용되는 형광증백제가 건열처리 인공노화 시 종이의 백색도 안정성을 오히려 저하시킬 수 있는 것으로 판단된다.

## Literature Cited

- van der Reyden, D., Recent scientific research in paper conservation, *J. American Institution for Conservation* 31(1):117-138 (1992).
- Feller, R. L., Accelerated aging: Photochemical and thermal aspects, The J. Paul Getty Trust, USA (1994).
- Shin, J. S., and Jun, Y., An accelerated aging study on physico-chemical kinetic aspects of paper permanence (1) - Physical properties and kinetic aspect, *Journal of Korea TAPPI* 24(4):36-48 (1992).
- Shin, J. S., and Jun, Y., An accelerated aging study on physico-chemical kinetic aspects of paper permanence (part 2) - Chemical properties and morphological changes aspects, *Journal of Korea TAPPI* 25(4):34-42 (1993).
- Shin, J. S., and Jun, Y., An accelerated aging study on physico-chemical kinetic aspects of paper permanence (Part 3) - Thermal decomposition and kinetic aspects of cellulose, *Journal of Korea TAPPI* 27(3): 51-60 (1995).
- Jeong, S.-W., and Cho, N.-S., Optical & mechanical characteristics of papers by the artificial heat aging treatment, *Journal of Korea TAPPI* 27(2):7-15 (1995).
- Jeong, S.-W., and Cho, N.-S., Optical & mechanical characteristics of papers by the UV irradiation aging treatment, *Journal of Korea TAPPI* 27(3):42-50 (1995).
- Łojewska, J., Lubrańska, A., Łojewski, T., Miśkowiec, P., and Proniewicz, L. M., Kinetic approach to degradation of paper. In situ FTIR transmission studies on hydrolysis and oxidation, *e-PS* 2:1-12 (2005).
- Hubbe, M. A., Venditti, R. A., and Rojas, O. J., What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? a review, *Bioresources* 2(4):739-788 (2007).
- Jablonský, M., Katusčák, S., Kačík, F., and Kačíková, D., Changes in newsprint paper during accelerated ageing, *Cellulose Chemistry and Technology* 45(5-6): 405-411 (2011).
- Area, M. C., and Cheradame, H., Paper aging and degradation: recent findings and research methods, *Bioresources* 6(4):5307-5337 (2011).
- Choi, K.-H., and Lee, J.-K., Damaging factors and deterioration mechanism, In *Research on Restoration Technology for Beeswax-treated Annals of Joseon Dynasty*, Jo, B.-M. et. al.(ed.), National Research Institute of Cultural Heritage, South Korea, pp. 150-181 (2014).
- Lee, S. B., Bogaard, J., and Feller, R. L., Darkening of paper following exposure to visible and near-ultraviolet radiation, *J. American Institution for Conservation* 28(1):1-18 (1989).
- Forsskåhl, I., Brightness reversion, in *Book 3 of Papermaking Science and Technology series*, Stenius, P.(ed.), Fapet Oy, Helsinki, Finland, pp. 278-332 (2000).
- Carter, H. A., The chemistry of paper preservation: Part 2. The yellowing of paper and conservation bleaching, *J. Chemical Education* 73(11):1068-1073 (1996).
- Kim, Y.-S., and Yoon, B.-H., Yellowing of chemical pulp by glucuronoxylan, *Journal of Korea TAPPI* 38(3):23-28 (2006).
- Paulsson, M., and Ragauskas, A. J., Chemical modification of lignin-rich paper: Part 9. Effect of dry heat and moist heat on the accelerated yellowing of untreated and acetylated high-yield pulps, *Nordic Pulp & Paper Res. J.* 13(3):191-197 (1998).
- Karlovičs, M., and Gregor-Svetec, D., Durability of cellulose and synthetic papers exposed to various

- methods of accelerated ageing, *Acta Polytechnica Hungarica* 9(6):81-100 (2012).
19. Kim, S.-K., Cho, B.-U., and Lee, Y.-K., Studies on the aging behavior of coated paper (I) -Effect of latex on optical properties of coated paper during dry heat aging-, *Journal of Korea TAPPI* 43(1):11-16 (2011).
20. Kim, C.-H., Lee, J.-Y., Kim, B.-H., Choi, J.-S., Lim, G.-B., and Kim, D.-M., Study on the thermal fastness of fluorescent whitening agents, *Journal of Korea TAPPI* 44(1):10-15 (2012).