

습부압착에 따른 수초지의 치수안정성과 침지신장성의 변화

박창순¹ · 이진호² · 길정하³ · 박종문^{4†}

(2011년 11월 11일 접수, 2011년 12월 21일 채택)

Change of Dimensional Stability and Dip Elongation of Handsheets Depending on Wet Pressing

Chang-Soon Park¹, Jin-Ho Lee², Jung-Ha Kil³, Jong-Moon Park^{4†}

(Received November 11, 2011; Accepted December 21, 2011)

ABSTRACT

One of the main drawbacks of wood fibers based composite materials are their tendency to swell due to moisture uptake in wet and moist environments. The main contribution to the hygroexpansion usually comes from the hydrophilic wood fibers. Recent trend toward the high speed printing, copying, and precision converting processes demands a high level of dimensional stability under various environmental conditions. The purpose of this study was to investigate the dimensional stability of softwood bleached kraft pulp handsheets depending on wet pressing conditions. By increasing the number of wet pressing, dimensional stability was decreased because of increased fiber-to-fiber bonding. Hygroexpansion of handsheets had a linear relationship with the relative bonded area and equilibrium moisture contents. Dip elongation was decreased when the number of wet pressing was increased because of increased fiber-to-fiber bonding to resist low load in water.

Keyword: *dimensional stability, hygroexpansion, dip elongation, wet pressing*

-
1. 한국 알스트롬 기술연구소 (Ahlstrom Korea, 7, keum-li, Yuga-myoun, Dalsung-County, Dae-Gu, 711-882, South Korea)
 2. 한국화학연구원 산업바이오화학연구센터(Korea Research Institute of Chemical Technology, Chemical Biotechnology Research Center, 141 Gaejeongro, Yuseong, Daejeon, 305-600, South Korea)
 3. 한국조폐공사 기술연구원, (KOMSCO, Technical Research Institute, 54 Gwahak-no Yuseong-gu, Daejeon, 305-713, South Korea)
 4. 충북대학교 농업생명환경대학 임산공학과 (Chungbuk National University, College of Agriculture, Life & Environment Science, Department of Forest Products & Engineering, Cheongju, Chungbuk, 361-763, South Korea)

† 교신저자 (Corresponding Author): E-mail: jmpark@cbu.ac.kr

1. 서론

종이는 다공체이며, 그 속에 자유수와 모세관 응축수 및 세포벽 흡착수의 형태로 수분이 존재하게 된다. 종이 팽창하고 수축하게 되는 원인은 모두 수분이 흡수 또는 탈수 과정을 거치면서 발생하는 흡착수의 표면 에너지 변화와 모세관의 메니스커스에 의한 음압 때문인 것으로 알려져 있다. 종이 팽창하면 종이 내부의 미세공극을 통하여 스며들거나 섬유간 결합지역 또는 섬유를 따라 팽윤됨으로써 종이는 팽창하게 된다.

종이는 대기 중의 기체상태의 수분을 흡수하거나 배출하고, 액체상태의 수분을 흡수하기도 한다. 따라서 섬유와 수분의 관계에 의하여 종이의 치수안정성이 좌우된다. 흡습팽윤도(hygroexpansion)^{1,2)}는 대기 중의 상대습도에 따른 기체상태의 수분에 의한 종이의 치수변화를 측정하는 것이고, 흡수팽윤도(hydroexpansion)²⁾는 액체상태의 수분에 의한 종이의 치수변화를 측정하는 것이다.

또한 종이는 외기의 수분을 흡수함에 따라 함수율이 증가하며, 수분에 의해 섬유의 팽윤 및 섬유 네트워크의 팽윤에 따라 치수의 변화가 발생하게 되는데 Jarrell³⁾의 연구에 의하면 습도의 변화가 큰 조건에서 종이는 4-5시간이 지나면 종이는 충분히 평형함수율에 도달한다고 발표하였다. 또한 종이는 구성요소인 섬유에 수분이 흡수되는데 제일 오랜 시간이 소요되며, 반면에 섬유와 섬유사이의 수분의 확산은 보다 빠른 시간에 이뤄진다⁴⁾. Larsson⁵⁾이 인용한 내용을 보면 Brecht 등⁶⁾은 종이는 대기의 수분과 열의 이동정도에 따라 흡수의 속도가 결정되며, 이에 따라 종이 치수의 변화도 발생하는 것이라고 하였다. 종이의 섬유간 결합력이 증가할수록 흡습팽윤성도 증가한다는 연구가 많이 진행되어왔다. Larsson²⁾은 역제조건한 종이의 있어서, 건조 또는 다충전해질의 흡착에 의한 섬유-섬유간 접촉(contact)의 증가가 흡습팽윤도와 흡수팽윤도에 끼치는 영향이 매우 작았다고 보고하였다. 또한 종이의 함수율이 동일했을 때, 흡습팽윤도가 흡수팽윤도보다 100-1000배 컸다고 하였다. 즉 종이의 함수율이 동일하다면 기체상태의 수분에 의한 치수변화가 액체상태의 수분에 의한 치수변화보다 매우 크다는 뜻이다. 가압상태에서 측정하는 흡수팽윤도에 대한 연구는 지금

까지 매우 제한적으로 이루어졌다⁷⁻¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 흡수팽윤도와 유사하지만 가압하지 않고 물에 완전히 침지한 상태에서 약한 하중으로 종이의 신장을 측정하는 침지신장성을 연구하였다.

침지신장성은 물에 완전히 적신 상태에서의 크리프라고 볼 수 있다. 크리프란 물체에 일정한 힘을 가할 때 탄성적 변형이 즉각적으로 일어난 다음 시간이 경과함에 따라 변형이 점차 증가하는 현상이므로, 침지신장성도 크리프의 전형적인 변형추세를 따를 것이라고 생각할 수 있다. Coffin 등¹²⁾은 크리프의 영향인자는 하중의 크기, 온도와 수분이며, 크리프 변형은 순간적 탄성(instantaneous elastic) 변형, 지연 탄성(delayed elastic) 변형과 영구(permanent) 변형으로 나뉜다. Coffin에 의하면 크리프는 시간경과에 따른 크리프 변형 속도가 감소하는 1차 지역(primary regime), 크리프 변형 속도가 직선적으로 증가하는 2차 지역(secondary regime)과 크리프 변형 속도가 급격히 증가하는 3차 지역(tertiary regime)으로 나누었다. 그리고 일정한 상대습도에서의 크리프, 반복적인 상대습도 변화에 따른 크리프, 가속 크리프, 압축 크리프, MD-CD 크리프 등에 대하여 심도 있게 연구하였다.

Nordman¹³⁾은 압착변화를 주어 각각 34%, 60%의 고형분 함량을 가지는 종이의 흡습팽윤성을 측정할 결과, 높은 고형분 함량의 종이 높은 흡습팽윤변화율을 가진다고 밝힌 바 있다. 또한 Salmén 등¹⁴⁾은 습부압착의 변화에 따라 밀도가 다른 종이의 흡습팽윤을 연구하였는데, 종이의 밀도가 높을수록 흡습팽윤성이 증가함을 알아냈다.

제지공정은 지료 조성부, 습부, 압착부, 건조부와 같이 크게 4단계로 나눌 수 있으며, 종이를 생산하는 과정은 섬유를 물에 해리한 후 균일한 매트를 형성시키면서 습지필의 탈수를 유도하는 것이라 할 수 있다. 때문에 종이 제조에 있어서 탈수 공정은 매우 중요한 공정이며, 공정상 건조기의 건조 부하를 줄이기 위해 압착부의 수분 제거는 매우 중요한 공정 요소로 인식되고 있다.

압착부는 물리적인 힘에 의한 탈수공정으로 Wahlstrom^{15,16)}이 압착개념을 최초로 제시하였고 최근 더욱 개선하였다. Reese¹⁷⁾는 중요한 압착 영향인자로 압착하중, 습지필의 재습윤, 닢폭과 체류시간, 톨카바의 형태, 펄트형태, 지필 온도, 수분 제거량, 이중펠트, 전체적 프레스 구성, 초속, 지필 품질, 진공, 펄트 콘디

서닝, 롤 크라운, 펠트 수분, 스무딩 프레스 등으로 자세히 제시하였다. Baum¹⁸⁾은 압착부에서 기계적 하중을 가하면 섬유 루멘(lumen)이 찌그러지고 섬유간 교차점에 강한 압축응력이 발휘되어, 습지필의 고품분농도가 증가하게 되고 섬유간 결합이 증가하여 강도가 상승한다고 하였다. 최근 들어서는 Gustafsson 등¹⁹⁾은 습부압착에 대한 그 동안의 모델연구를 총정리하고 그동안의 연구와 차별화되도록 불균일하게 압착되는 (compressed non-uniformly) 습지필의 구조에 대하여 연구하여 좀더 현장에 가까운 실제적인 거동을 모사하였다고 평가된다.

인쇄용지에 있어서 강한 습부 압착은 건조기로 들어가는 습지필의 고품분 농도를 최대한 높이고, 압착 이후 지필의 높은 고품분 함량은 강한 습지필의 형성과 건조기에서의 수분 제거량 감소로 초지 속도 상승을 유도하며 이는 생산성 향상으로 나타나게 된다^{20,21)}. 이와 같이 종이의 제조에서 압착 탈수 공정은 전체 공정의 효율과 종이의 품질에 큰 영향을 미치는 대단히 중요한 공정이며, 특히 에너지 다소비 산업의 하나로 분류되는 제지공정의 경우 에너지절감과 이를 통한 이산화탄소 배출량 감소 등이 현재 중요한 당면과제로 인식되고 있다^{22,23)}. 습부압착에 관한 국내의 연구로는 김 등²⁴⁾이 습부압착에 따라 섬유의 보수도가 개선됨을 보고하였고, 이 등²⁵⁾은 초지기의 압착부 조절시 전단부보다는 후단부에 압력을 향상시키는 것이 지필의 두께방향구조에 안정적임을 보고하였고, 성 등²⁶⁾은 습지의 건조도와 밀도는 압착탈수압력의 증가에 따라 직선적으로 증가함을 보고한 바 있지만 현재까지 상대습도의 변화에 따른 수초지의 치수안정성과 습부압착 정도에 따른 수초지의 침지신장률의 변화를 언급한 논문은 부족한 상태이다.

따라서 본 연구는 습부압착에 따른 수초지의 습윤 팽창성 및 상대 습도에 따른 수초지의 평형함수율을 측정하여 습부압착의 정도가 수초지의 치수안정성에 끼치는 영향을 평가하고, 습부압착 정도가 증가함에 따라 변화하는 수초지의 상대결합면적 및 섬유결합강도와 치수안정성의 관계, 그리고 침지신장률을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

Sw-BKP를 실험실용 Valley beater를 이용하여 400 mL CSF로 고해하여 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 수초지 제작 및 습부 압착

고해한 섬유를 0.4%로 희석하여 지료를 조성한 후 원형수초기를 이용하여 평량 80 g/m²으로 초지하여 습지필을 제작하였고, 실험실용 롤 프레스를 이용하여 프레스의 속도 3.21 m/min, 압력 40 psi의 조건으로 1-4회로 순차적으로 압착횟수를 증가시켜 지필의 고품분 함량을 변화시켰다.

2.2.2 건조도 측정

습부압착 과정을 마친 습지필 무게를 측정하고, 건조 후 수초지의 무게를 측정하여 건조도를 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\text{Dryness (\%)} = \frac{A}{A'} \times 100 \quad (1)$$

A= 건조 후 수초지 무게 (g)

A'= 습부압착 후 습지필 무게 (g)

2.2.3 평형함수율 측정

수초지를 항온항습기에 넣어 온도는 23℃로 고정하고, 습도는 33, 50, 60, 84% 조건에서 항량에 도달한 수초지의 무게를 측정하여 평형함수율(Equilibrium Moisture Contents, EMC)을 계산하였다.

2.2.4 치수안정성 실험

수초지의 치수안정성(dimensional stability)을 평가하기 위하여 흡습팽윤성(hygroexpansion)을 측정하였다. 흡습팽윤성의 측정법은 TAPPI useful method UM 549(25-50%, 50-86%)의 방법과 SCAN-P 28:88(33-66%, 33-84%)의 방법이 있으며, 이 두 가지 방법은 모두 변화하는 상대습도 조건에서 치수가 얼마만큼 변하는지 그 변화량을 측정하는 방법이다. 시험법은 SCAN-P 28:88 RH 33-84% 조건을 선택하였으며, 좀더 명확한 분석을 위해 RH 50%, 66%를 추가하여, Fibro사의 DST(dimensional stability tester) 1250을 이용하여 33, 50, 66, 84% 조건에서 실험하였다. 수초

지를 먼저 RH 33% 이하의 조건 즉, RH 19%에서 24시간 이상 충분히 조습한 후 각 단계별로 4시간동안 총 20시간을 거쳐서 조습에 따른 변화를 실험하였다.

2.2.5 상대결합면적

상대결합면적(relative bond area, RBA)은 결합강도에 대한 광산란계수를 외삽한 뒤, 계산된 회귀식에 결합강도가 zero일 때의 광산란계수 S0값을 구한 후 다음 식 (2)에 의하여 계산하였다.

$$RBA = 1 - \left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (2)$$

RBA : 상대결합면적 (unitless)

S : 광산란계수 (m²/kg)

S0 : 섬유간 결합이 zero일 때의 광산란계수 (m²/kg)

2.2.6 침지신장성 측정

국내 S제지사의 침지신장시험기(Fenchel expansion tester)를 이용하여 수초지의 침지신장성(dip elongation)을 측정하였다. 침지신장시험법은 ISO 5635(Measurement of dimensional change after immersion in water)를 참고하였으며, 본 실험에서는 5 g의 추를 이용하여 종이 시편에 하중을 주었으며, 20℃의 물에 완전히 침지시킨 후 5, 10, 15, 30, 45초의 간격으로 변형된 길이를 측정하였다.

2.2.7 수초지 강도 측정

제조한 수초지를 TAPPI standard T402 om-83에 따라 온도 23±1℃, 상대습도 50±2%로 24시간 조습처리한 후 SCAN-P67/P77에 의거하여 L&W사의 tensile tester with fracture toughness 설비를 이용하여, 수초지의 인장 강도(T)를 측정하였다.

수초지의 섬유 강도(F)의 경우 zero-span tensile tester를 이용하여 섬유 자체 강도를 측정한 후 간단한 Page 식 (3)을 이용하여 수초지의 결합강도(B)를 계산하였다.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{F} + \frac{1}{B} \quad (3)$$

T: Tensile strength (km)

F: Fiber strength (km)

B: Bonding strength (km)

3. 결과 및 고찰

3.1 건조도 변화

압착부의 건조도 증가는 습지의 수분제거에 따른 표면 장력 효과를 증대시켜 섬유간 결합 증가를 유도하며, 이에 따라 건조이후의 종이의 강도를 증가시키는 효과적인 방법이며, 압착부 건조도 증가에 따라 건조부의 건조 에너지 절감에도 매우 효과적인 방법이다. 높은 평량의 경우 과도한 압착탈수는 종이의 밀도 증가 및 기공도를 감소시켜 종이 내부에 크러싱(crushing)과 같은 내부 할렬로 인한 물리적 강도 저하에 영향을 끼칠 수 있다는 단점이 있기 때문에 수초지는 80 g/m²으로 제작하여 실험하였다. Fig. 1은 습지의 압착부 횡수 증가에 따른 수초지의 습부 건조도 변화를 나타낸 것으로 압착부의 압착 횡수 증가에 따라 습지의 건조도가 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 평형함수율의 변화

상대습도에 따라 변화하는 수초지의 평형함수율(EMC)을 Fig. 2에 나타냈다. 상대습도가 증가함에 따라 평형함수율도 증가하였고, 또한 압착탈수횡수가 증가할수록 평형함수율이 증가하였다. 이는 압착횡수가 증가할수록 물리적인 외력에 의해 섬유간 결합정도가 증가하며, 압착횡수가 증가할수록 섬유와 섬유간의 결합면적이 증가함을 의미한다. 즉, 상대습도 증가에 따라 수분이 섬유간 수소결합된 부분에 침투하여 수산기들의 결합을 해체하거나 약화시킬 수 있는 수분의 양이

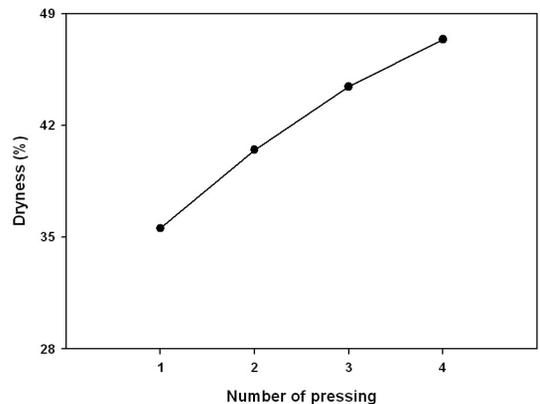


Fig. 1. Dryness of handsheet depending on the number of pressing.

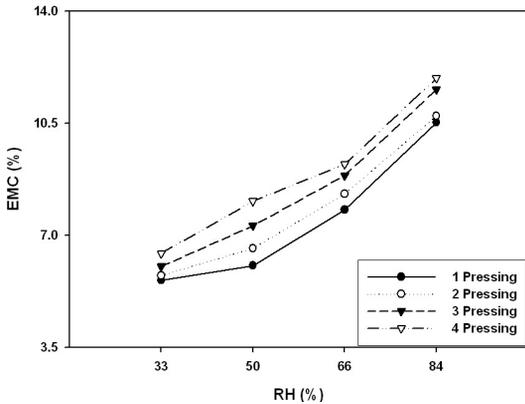


Fig. 2. EMC of handsheet depending on relative humidity and pressing.

증가한 것으로 판단되며, 그 결과 종이 가질 수 있는 수분의 양이 증가하여 평형함수율이 증가한 것으로 사료된다.

3.3 치수안정성

DST를 이용하여 수초지의 습도변화에 따른 치수변화를 Fig. 3에 나타내었다. 습부 압착 횟수의 증가에 따라 표면 장력 효과에 따른 섬유간 결합 증가를 유도하여 지필의 고밀화 및 강도 증가를 유도하게 되는데 이는 Back²⁷⁾와도 동일한 결과를 나타내었다. 이 경우 유도된 섬유간 결합의 증가는 섬유간 결합 면적 증가에 따른 것으로, 섬유간 결합은 수소 결합을 하게 되며, 수소 결합은 수분의 흡수에 따라 약화되거나 해체된다. 그러므

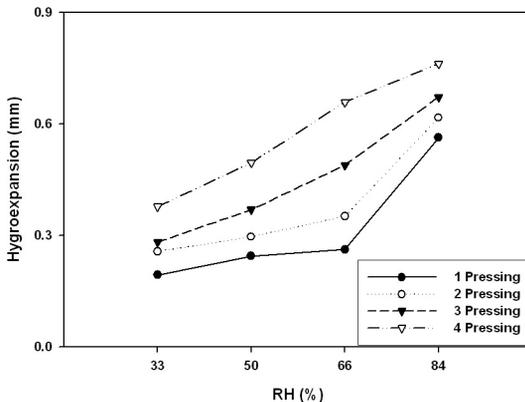


Fig. 3. Hydroexpansion of handsheet depending on relative humidity and pressing.

로 습부압착이 진행될수록 수초지의 치수안정성을 떨어지게 하는데, 이는 습부 압착 증가에 따라 고밀화된 수초지의 증가된 결합 면적 증가만큼의 수분 흡수에 따른 결합 면적의 변화가 커지기 때문에 치수 변형양이 커지는 것으로 판단된다.

3.4 평형함수율과 흡습팽윤성의 관계

종이내의 섬유간 결합 및 결합력은 함수율 증가에 의해 감소하고, 또한 섬유 자체의 팽윤이 발생하기 때문에 종이의 치수변화는 종이의 수분 흡수에 따른 섬유의 팽윤 및 섬유간 결합의 변화에 의한 것이라고 할 수 있다. 종이의 수분 흡수와 치수 안정성과의 관계를 평가하기 위해 평형함수율과 흡습팽윤성의 상관성을 Fig. 4에 나타냈다. 이는 그동안의 많은 연구¹⁻¹¹⁾와 동일한 결과이지만 본 실험의 결과 그 상관관계가 매우 뚜렷하게 나타났다.

종이의 함수율이 커질수록 흡습팽윤성도 커지게 되는데, 이에 따라 종이의 밀도 증가에 따른 지층 내 공극 구조의 변화가 일어나게 된다. 따라서 공극이 작아짐에 따라 모세관 힘이 커지고 대기 중의 수분을 흡수할 수 있는 힘이 커지기 때문에 압착 횟수 증가에 따라 평형함수율과 흡습팽윤성 모두 증가하는 것을 알 수 있었다.

3.5 섬유간 결합강도와 흡습팽윤성의 관계

습부압착을 1-4회로 단계별로 증가시켜 제조한 수초지의 섬유간 결합력과 흡습팽윤성의 상관성을 Fig. 5에 나타냈다. 습부압착의 횟수가 증가할수록 섬유간 결

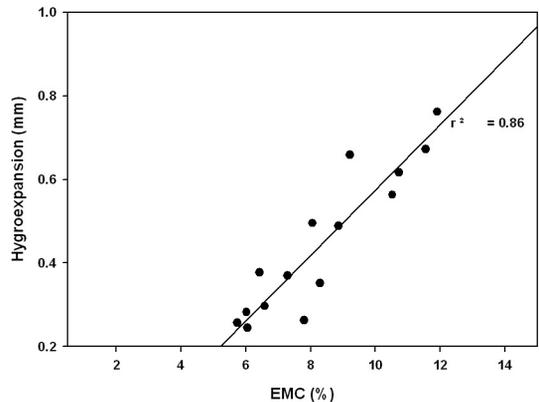


Fig. 4. Relationship between EMC and hydroexpansion.

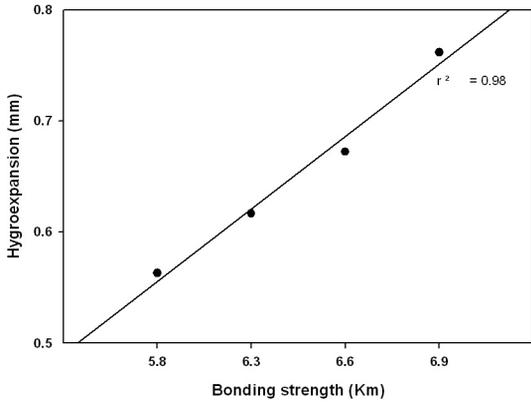


Fig. 5. Relationship between bonding strength and hydroexpansion.

합력은 증가하였고 흡습팽윤성도 비례적인 관계를 보였다. 섬유간 결합 강도의 증가 특히, 압착횟수 증가에 의한 섬유간 결합 강도의 증가는 결합 면적의 증가에 의한 것으로 수분 흡착시 결합 면적이 증가된 것일수록 수분 흡착에 따른 변화량이 커지는 것으로 분석된다.

3.6 상대결합면적과 흡습팽윤성의 관계

상대결합면적과 흡습팽윤성의 관계를 Fig. 6에 나타냈는데, 습부압착 횟수의 증가는 물리적으로 섬유간의 거리를 더욱 좁히게 되며, 이는 동일 면적 내에 더 많은 결합을 유도하게 된다. 이러한 결합면적의 증가는 치수 안정성을 감소시키는 것으로 분석되었다.

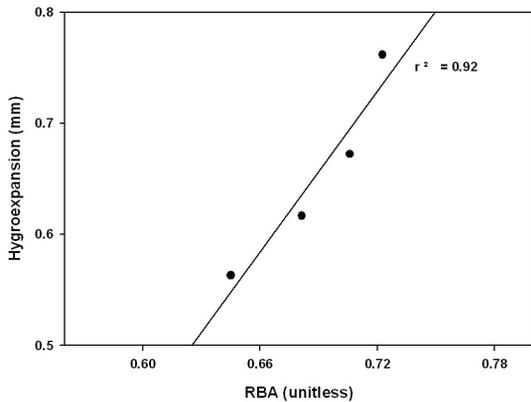


Fig. 6. Relationship between RBA and hydroexpansion.

3.7 침지신장성

흡습팽윤성과 침지신장성(dip elongation)은 모두 수분에 의해 변화하는 수초지의 변형률을 측정하는 것으로 흡습팽윤성 시험은 수분에 노출시키는 정도가 다소 완만하다면, 침지신장성은 20℃의 물에 완전히 적신 후 늘어나는 길이를 측정하는 것으로 수분에 노출시키는 정도가 가혹하다고 말할 수 있다. 즉, 종이가 최종적으로 사용되는 기간 또는 보관기간 중에 변화하는 습도조건에 대한 변형률을 측정하는 것이 흡습팽윤성이라면, 침지신장성은 종이가 물에 완전히 적셔진 후 외부하중을 가했을 때 종이의 변형을 측정하는 것이다. 습부압착 정도에 따라 변화하는 침지신장성을 Fig. 7에 나타냈다. 압착횟수를 증가할수록 섬유간의 결합력이 증가하며, 그에 따라 물에 완전히 적셔진 후에도 섬유간의 결합력에 의해 크게 신장하지 않는 것이다. 넓은 의미로 볼 때 침지신장성도 물에 완전히 적신 상태에서의 크리프라고 볼 수 있는데, Fig. 7의 침지신장성 결과도 전형적인 크리프 변형추세를 따르는 것을 확인할 수 있었다. 압착횟수가 증가할수록 섬유간 결합이 증가하여 외력에 견디는 능력이 증가하게 되고 침지신장성이 감소하였다. 이는 섬유간 결합이 물에 적셔진 후에도 역할을 하고 있음을 나타내는 것이라 판단되었다.

3.8 수초지의 물리적 성질

Figs. 8-11에 각각 수초지의 벌크, 투기도, 열단장, 섬유간 결합력을 나타냈다. 습부압착 횟수가 증가함에 따

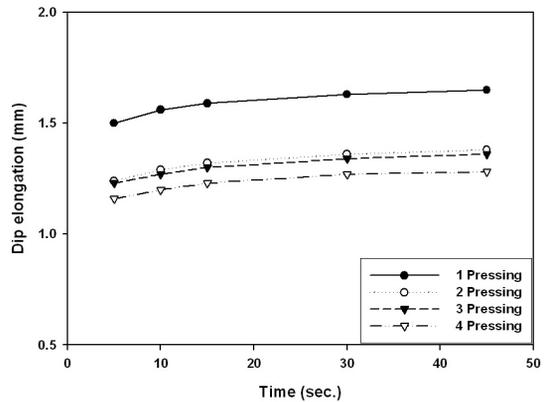


Fig. 7. Dip elongation depending on the time and the number of pressing.

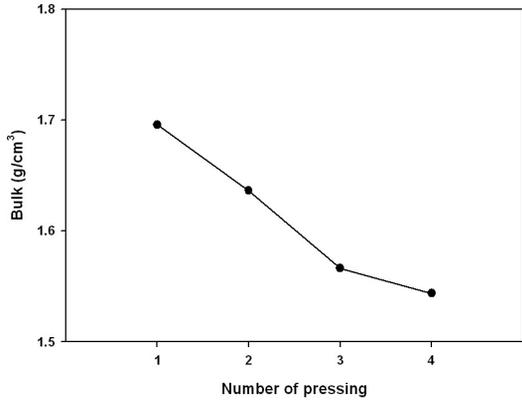


Fig. 8. Bulk depending on the number of pressing.

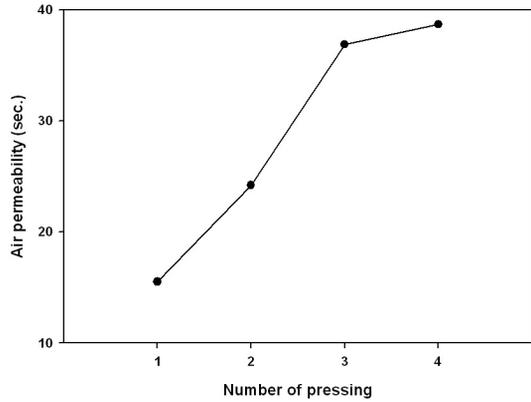


Fig. 9. Air permeability of handsheets depending on the number of pressing.

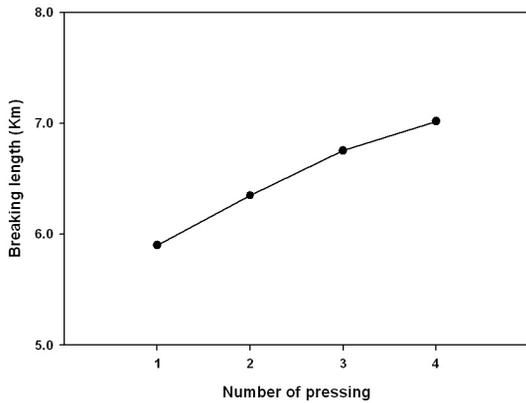


Fig. 10. Breaking length of handsheets depending on the number of pressing.

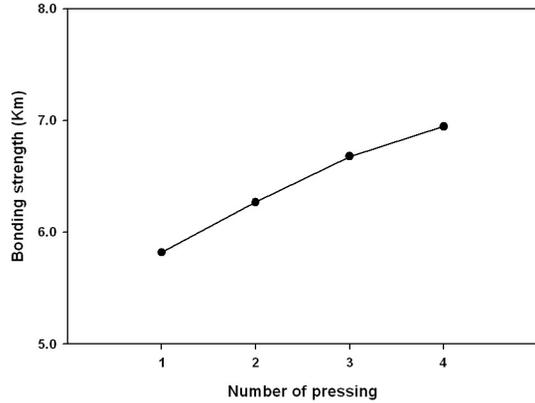


Fig. 11. Bonding strength of handsheets depending on the number of pressing.

라 벌크와 투기도가 감소하였다. 습지필이 와이어를 떠나 압착부에 들어가면 계속 탈수됨에 따라 섬유 사이의 거리가 더욱 좁혀지고, 섬유 사이에 불연속성의 물 층이 존재하게 되면, 섬유를 당겨주는 힘은 더욱 강해지며, 섬유간 간격이 좁혀짐에 따라 더욱 증가하게 된다. 이에 따라 습부압착 횟수의 증가에 따라 종이는 밀도가 증가하며 상대적으로 강도는 증가하게 된다.

4. 결론

외기조건에 습도변화에 따른 종이의 치수안정성은 섬유의 특성과 섬유와 섬유간의 결합에 따라 달라지는 것으로, 흡습팽윤도로 치수안정성을 평가한 결과 습부

압착 횟수가 증가할수록 흡습팽윤도가 증가하므로 이는 섬유간의 결합이 증가하여 외기변화에 따른 섬유결합의 변화 정도가 증가하여 치수안정성이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 섬유간의 결합면적이 증가한다는 것은 외기의 물분자와 결합할 수 있는 면적이 증가한다는 것과 연결 지을 수 있으며, 종이의 평형함수율이 증가한다는 것은 치수안정성이 감소한다는 것을 의미한다. 종이를 완전히 물에 적신상태에서 외부하중에 견디는 정도인 침지신장성은 압착탈수 횟수를 증가할수록 섬유간 결합력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 분석되었다. 강도를 우선적으로 생각할 때 건조부에 들어가기 전에 습지필의 고형분 함량을 증가시키는 것이 중요하지만, 종이의 사용에 있어서 높은 치수안정성을 가

지려면 압력이나 헛수가 지나치지 않고 적절한 습부압 착을 하는 것이 필요하며, 건조부의 건조효율과의 연관성도 반드시 생각해야 한다. 또한 이미 만들어진 종이 가 대기 중에서 습도에 의해 변화하는 치수안정성과 인쇄 시 잉크에 포함되어있는 습수액이 종이를 적실 때 저항할 수 있는 침지신장성을 연계하여 상호보완적인 종이를 생산할 수 있어야 하겠다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2011-0026734)).

인용문헌

- KS M ISO 8226-1:2008, 종이 및 판지-흡습팽윤도 측정-1부 : 최대상대습도 68%까지의 흡습팽윤도.
- Larsson, P., Hygro- and hydroexpansion of paper, Doctoral Thesis, KTH Royal Ins. of Technology, Sweden, (2010).
- Jarrell, T.,D., Effect of atmospheric humidity on the moisture content of paper, Paper Trade, J. 85:47-51 (1927).
- Leisen, J., Hojjatie, B., Coffin, D., W., Lavrykov, S., A., Ramarao., B., V. and Beckham, H., W., Through-plane diffusion of moisture in paper detected by magnetic resonance imaging, Ind. Eng. Chem. Res., 41:6555-6565 (1978).
- Larsson, P. A., and Wagberg Lars, Influence of fibre-fibre joint properties on the dimensional stability of paper, Cellulose 15(4): 515-525 (2008).
- Brecht, W., Hildebrand, W. and Über die flächenbeständigkeit der Papiere. Das Papier 14(10A):610-624 (1960).
- Thalén, N., Kolmodin, H., and Glasare, K. Dimensional changes of newsprint in offset printing, In Moisture-Induces Creep Behaviour of Paper and Board, Fellers, C., and Laufenberg, T. L. (ed.), pp. 149-165, (1994).
- Tattari, H., and Niskanen, K., Mechanical deformation of paper in the printing nip, PSC Communication 115, KCL, Helsinki, Finland, (1998).
- Tattari, H., and Niskanen, K., Dynamic dimensional changes of paper in the printing nip, PSC Communication 119, KCL, Helsinki, Finland, (1998).
- Boström, B., How to measure dimensional stability, In PITA Coating Conference, pp. 45-50, (2001).
- Ketoja, J. A., Kananen, J., Niskanen, K. J., and Tattari, H., Sorption and web expansion mechanisms, In The Science of Papermaking: Transactions of the 12th Fundamental Research Symposium held in Oxford, Vol. 2, pp.1357-1366, (2001).
- Coffin, D. W., The creep response of paper, In Advances in Paper Science and Technology: Transactions of the 13th Fundamental Research Symposium Held in Cambridge Vol. 2, pp.651-747, (2005).
- Nordman L., Laboratory investigations into the dimensional stability of paper, Tappi 41:23-30 (1958).
- Salmén L., Boman R., Fellers C. and Htun M., The implications of fiber and sheet structure for the hygro-expansivity of paper, Nordic Pulp Paper Res. J. 2:127-131(1987).
- Wahlstrom, B. P., Our present understanding of the fundamentals of pressing, P & P Mag. Canada 70:19:T349, Dec. 20, (1969).
- Wahlstrom, B. P., Wet pressing in the 20th century: evolution, understanding and future, P & P Mag. Canada 102:12:T133, Dec. (2001).
- Reese, R. A., Pressing operations, Pulp and Paper Manufacture, Vol. 7, Paper Machine Operations, Thorp, B. A., and Kocurek, M. J. (ed.), Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI & CPPA, pp. 278-280, (1991).
- Baum, G. A., Sheet structure considerations - Paper as an engineered material, Pulp and Paper Manufacture, Vol. 7, Paper Machine Operations, Thorp, B. A., and Kocurek, M. J. (ed.), Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI & CPPA, pp. 69-70, (1991).
- Gustafsson, J.-E., and Vomhoff, H., Modelling of mechanical dewatering in contact with rough permeable surfaces, In Advances in Paper Science and Technology: Transactions of the 13th Fundamental Research

- Symposium Held in Cambridge Vol. 1, pp.109-128, (2005).
20. McDonald, J. D., Pikulik, I. I., Mentele, C. J. and Lange, D. V., A pilot paper machine evaluation of the effect of pressing on newsprint quality, *Tappi J.* 81(6):131-137(1998).
 21. Casey, J. P., *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*, Third Ed. Vol II, pp. 1065-1077 (1980).
 22. 명소영, 제지 산업의 기후변화협약 대응방안, 한국펄프종이공학회 2008년 춘계학술논문발표집, pp. 25-37 (2008).
 23. 서동준, 제지업체의 에너지 절감 추진 동향, 2009년 한국펄프종이공학회 콜로кви엄, pp. 47-67 (2009).
 24. 김은영, 원종명, 습부압착과 건조 조건이 종이의 해리 특성 및 물성에 미치는 영향, *J. Korea TAPPI* 35(2): 12-17 (2003).
 25. Lee, J. H., and Park, J. M., Influences of Wet-Pressing Types on Internal Structure of Paper, *J. Korea TAPPI* 37(4):32-37(2005).
 26. 성용주, and Keller, D. S., 습지압착 조건에 따른 압착 탈수 공정효율과 종이구조변화, 한국펄프종이공학회 2010년 춘계학술논문발표집, pp. 9-15 (2010).
 27. Back, E., A review of press drying, *STFI Meddelande Series D.*, No. 224, Sept. (1984).