

원주형 건식초지기를 이용한 건식초지 가능성 평가

김종민*¹ · 이학래[†]

(2008년 9월 19일 접수: 2009년 2월 25일 채택)

Feasibility Study of Dry Forming with Dry Forming Mould

Jong Min Kim*¹ and Hak Lae Lee[†]

(Received September 19, 2008: Accepted February 25, 2009)

ABSTRACT

Cylindrical dry forming mould was developed to carry out a feasibility study of dry forming of papers. The effect of disintegration, forming, humidification and pressing on dry formed papers was examined. Dry disintegrated fibers showed the similar fiber length distribution to wet disintegrated fibers, but they showed distortion and damaged appearance on the surface. Process parameters required to form a uniform fiber pad was investigated. A proper screening and air dispersion method was selected that gives proper formation. Humidification and pressing conditions were examined to get a good dry formed papers in dry forming. Results showed that dry forming method can be used to make a sheets with reasonable formation and properties.

Keywords : *dry forming, dry former, disintegration, air dispersion, humidification*

1. 서론

제지산업은 컴퓨터와 네트워크, 인터넷으로 대표되는 정보화 기술 산업의 확장과 최근 들어 증폭되는 환경보호와 에너지 절약에 대한 사회적 관심증가에 따라 새로운 도전에 직면하고 있다. 기존의 제지산업은 다량의 용수와 에너지를 사용하는 장치산업의 대표적 형태로 인식되고 있어, 미래지향적이며 환경친화적 첨단산업으로 이미지를 전환시키는 것이 필요

하다고 판단된다. 제지산업에 관한 기존의 산업적 성격과 관련된 한계와 문제들을 극복하기 위해서는 제지기술의 혁신적 발상전환이 요청되고 있다. 이러한 혁신적인 발상 전환의 한 방법으로 제지산업이 가장 많이 사용하고 있는 용수의 사용을 억제하는 기술을 생각해 볼 수 있다.

물은 섬유를 분산하고 이송하며 와이어에 웹을 형성하는 역할을 하며, 건조과정에서는 섬유간의 결합을 가능하도록 매개 역할을 한다. 일반적으로 제지공

• 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 환경재료과학전공 (Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 151-921, Seoul)

*1 현주소: 유한김벌리주식회사 (Yuhan-Kimberly, Ltd.)

† 교신저자(Corresponding author): E-mail: lhakl@snu.ac.kr

정에서 헤드박스 내 섬유지료의 농도는 1% 이하이다. 즉 99% 이상의 물은 1% 이하의 섬유를 분산하고 이송하는데 사용된다. 헤드박스과 제지공정에서 물의 대부분은 재활용되지만 이러한 물의 재활용을 위해서는 많은 양의 에너지와 복잡한 설비가 요구되는 것이 현실이다. 또한 생산량의 증가와 생산품질 향상을 위해서 제지공정의 용수 순환을 제어하기 위한 프로세스는 더욱 거대해지고 복잡해지고 있다. 또 사용된 용수를 처리하는 폐수 처리 시스템과 재활용수의 처리에 많은 연구개발이 환경규제 충족과 용수소비 절감을 위해서 행해지고 있다. 이러한 시설과 노력은 제지공정에서 용수의 사용량이 그만큼 많기 때문에 발생하는 현상이라 할 수 있다. 하지만 제지산업이 부단히 경주하고 있는 용수절감과 공정폐쇄화를 위한 지속적인 노력에도 불구하고 제지산업은 여전히 용수 다소비산업이며 이는 기술적 혁신이 없다면 앞으로 도 마찬가지일 것이 자명하다.

제지공정에서 물의 소비를 줄이는 방법으로서 초지농도를 높이는 방안이 시도된 바 있다. 그 예로 지료의 농도와 유체역학적 성질 사이의 관계분석, 지료농도 증가에 따른 초지공정에서 에너지 절약 가능성, 새로운 고농도 초지기의 개념 등에 대한 연구가 이루어져 왔다.¹⁻³⁾ 고농도 초지는 제지공정의 용수 사용량을 줄이는 방안으로 연구되었으나, 만일 우리가 고농도 초지 개념을 확장한다면 건식초지기술과 같은 섬유의 웹을 형성하는 과정에서 물을 사용하지 않는 것도 가능할 것이다.

하지만 이러한 건식초지 개념의 정착을 위해서는 건식초지에 가장 적합한 펄프섬유를 찾는 작업, 건식초지된 종이의 지합과 물성 향상, 압착과 건조조건 등 공정의 최적화 등 건식초지기술의 실현을 위해 풀어야 할 많은 근본적인 문제들이 산적해 있는 것이 사실이다. 본 연구에서는 건식초지와 관련된 이러한 중요한 문제를 풀기 위한 기초 연구로 건식초지된 종이를 만들기 위한 건식초지 몰드를 개발하고, 이를 이용하여 건식초지의 가능성을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 건식초지 지필의 가습, 압착압력, 압착 온도와 시간 등이 건식초지의 일반 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

활엽수 표백 크라프트 펄프(Hw-BKP)를 공시 펄프로 사용하였다. 공시펄프는 건식해리기를 이용하여 해리하거나, 일반적인 습식고해 방법으로 고해한 후 유기용매를 이용한 용매치환 건조 방법으로 건조한 후 사용하였다. 또 일반 실험실적 고해기로 고해한 습식 고해섬유도 사용하였다. 건조된 고해섬유를 얻기 위해서 용매 치환을 실시하였다. 물을 에탄올로 치환하고 에탄올은 다시 헥산으로 치환하였다. 에탄올과 헥산의 순도는 각각 99%와 96%였다.

2.2 방법

2.2.1 건식 및 습식해리

건식해리 된 섬유를 만들기 위하여 약 300 g의 Hw-BKP를 작은 조각으로 만들어 Fig. 1의 사진과 같은 건식해리기에 넣고 30분간 해리하였다. 내부에 위치한 두 부분으로 구성된 로터를 700 rpm으로 회전시켜 해리하였다. 로터에 의한 기계적인 힘과 섬유들의 마찰력에 의하여 펄프는 섬유들로 분리가 되었다. 막대 모양의 상부 로터와 디스크 모양의 하부 로터는 마찰효과를 일으켜 펄프를 해섬시키고, 셀 안의 펄프섬유를 교반하도록 설계하였다. 건식해리 된 섬유는 40 mesh를 가지는 진동스크린을 통해 미해리분을 걸러내었다.

습식해리는 농도 1.2%의 슬러리 2000 mL를 저농



Fig. 1. Dry disintegrator with two rotors.

도 해리기에 넣고 3000 revolutions 동안 해리하여 준비하였다. 이후 건조해리 된 섬유와 습식해리 된 섬유는 각각 섬유장과 분포, 외형을 현미경과 섬유장 측정기(Kajaani FiberLab V.3)를 통하여 평가하였다.

2.2.2 건식초지

건식초지를 평가하기 위해서 원주형 건식초지기(DFM, dry forming mold)를 제작하였다(Fig. 2). 건조 섬유 덩어리는 분산장치(disperser)에서 분산시켰다. 다양한 형태의 교반장치를 이용하여 평가한 결과 가벼운 무게와 넓은 교반 면적을 가지는 알루미늄제 사각 교반장치가 가장 효과적이었다. 분산된 섬유는 1.5 mm 홀의 천공스크린을 통과한 다음 형성부(forming zone)에서 공기의 흐름과 함께 낙하되도록 하였다. 천공스크린 하부에는 압축공기를 주기적으로 분출시켜 섬유가 스크린 홀과 하부에 부착되는 것을 방지하였다. 형성된 섬유 패드는 에어로졸 형태로 물을 분사하는 가습장치를 통해 조습하였다.

DFM 내부에서 발생하는 공기의 유속을 열선풍속계를 통해 측정하였다. 측정은 분산장치의 내벽, 천공스크린 상하부, 형성부, 블로어(blower) 출구에서 이루어졌다. 또 가습시간에 따른 건식초지 된 섬유패드의 함수율을 측정하였다.

Fig. 3은 DFM을 통해 종이를 만드는 공정을 보여주고 있다. Hw-BKP는 건식해리 되고 스크린 되어져 미해리분을 제거하였다. 이후 해리된 건조섬유는

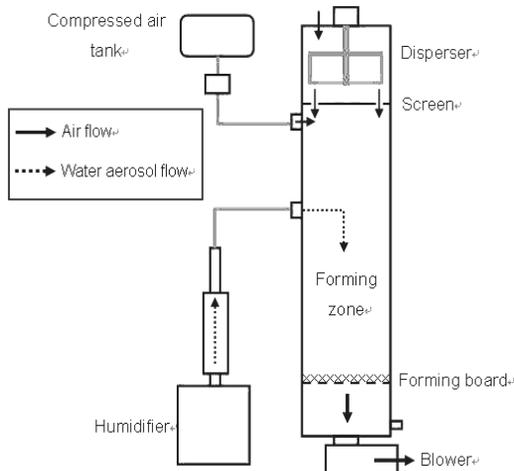


Fig. 2. Schematic drawing of DFM.

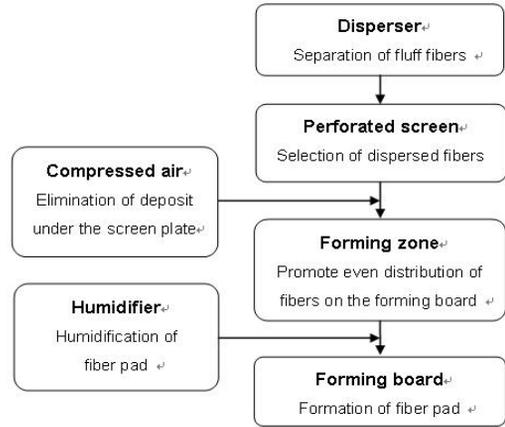


Fig. 3. Forming process of DFM.

disperser와 천공스크린을 통하여 forming zone을 거치게 되고 forming wire에 평량 80 gsm의 섬유패드를 형성토록 하였다. 이후 가습과정을 거친 섬유패드는 압착과 건조를 통하여 종이로 만들어졌다.

지름 25 cm의 원형의 형태를 가지는 압착된 섬유 패드는 지름 20 cm로 외곽을 제거하고 컨디셔닝을 거쳐 평량을 측정하였다. DFM에서 얻어진 섬유패드는 두개의 압지가 상하로 위치된 프레스에서 압착하였다. 압착압력은 28-113 kgf/cm²으로, 압착시간은 1-5 분간으로 하였다. 일반적인 수초지 제조에서 압착공정은 3-4 kgf/cm²이 적용되나 건식초지 된 섬유패드는 이보다 훨씬 높은 압력조건에서 압착되었다.

열압을 적용할 경우, 온도는 120°C, 시간은 10초를

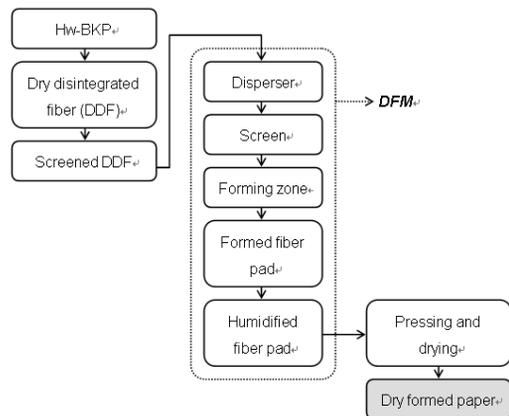


Fig. 4. Papermaking process with DFM.

적용하였다. 열압 시 섬유패드와 프레스의 열판 사이의 상부에 100 mesh 와이어를 둠으로써 섬유패드가 둘러붙는 현상을 막았고 수분과 수증기의 흡수를 위하여 하부에 2장의 압지를 두었다. 압착과정 이후 종이는 건조도를 측정하고 실린더 드라이어를 통해 완전건조 시켰다. Fig. 4는 건식초지공정을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 건식해리와 습식해리

건식해리 된 섬유를 만들기 위하여 약 300 g의 Hw-BKP를 작은 조각으로 만들어 건식해리기에 넣고 해리하였다. 로터에 의한 기계적인 힘과 섬유들의 마찰력에 의하여 펄프는 섬유들로 분리가 되었다. 건식해리 된 섬유들은 잘 분산되어 있음에도 불구하고 물리적인 얽힘으로 인하여 서로 덩어리진 채 뭉쳐있는 모습이였다. 건식해리 된 섬유의 경우 크게 굵어지고 접혀져 있는 모습을 볼 수 있었다 (Fig. 5). 이것은 건식해리 동안에 발생한 스트레스에 의한 것으로 보이며, 반면에 습식해리 된 섬유의 경우 그다지 꼬이거나 꺾인 모습은 보이지 않았다.

Fig. 6은 건식해리와 습식해리 된 섬유들의 섬유장의 분포를 보여주고 있다. 건식해리와 습식해리 된 섬유의 평균 섬유장(length-weight)은 0.73과 0.74 mm 이었다. 건식해리 된 섬유는 습식해리 된 섬유보다 1

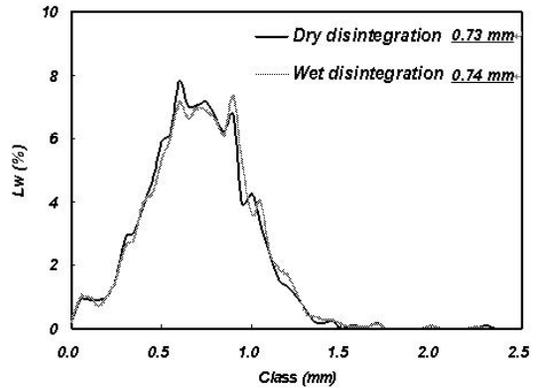
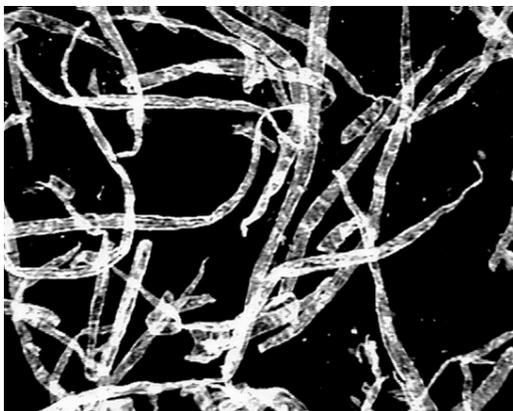


Fig. 6. Fiber lengths of dry and wet disintegrated fibers.

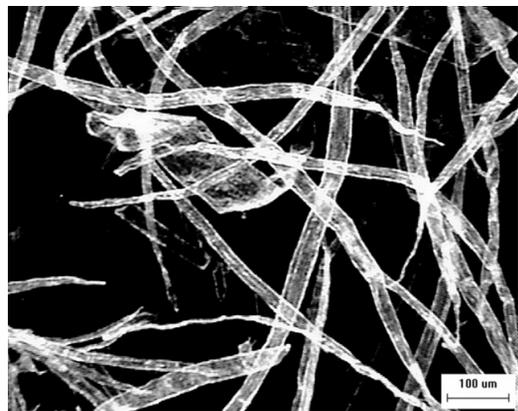
mm 이상의 길이를 가지는 섬유들이 약간 적었다. 하지만 건식해리와 습식해리 된 섬유들의 평균 섬유장과 분포는 매우 유사하였다. 다만 그 외형적인 모습은 크게 차이가 있었다.

3.2 Dispersing

건식해리 된 섬유는 물리적으로 여전히 서로 얽혀 있으며 플러프(fluff) 덩어리의 형태를 띠고 있어 이의 효과적 분산을 위해서 disperser 내부에 스테러를 설치하였다. 스테러의 회전 속도와 회전방향을 바꾸는 시간간격을 조정함에 따라 섬유의 분산정도를 조절할 수 있었다. 적절한 분산이 얻어진 때의 공기 유속은 14.1-18.1 m/sec, 정역회전의 시간간격은 2초였다.



<Dry disintegrated fibers>



<Wet disintegrated fibers>

Fig. 5. Microscopic images of dry and wet disintegrated fibers.

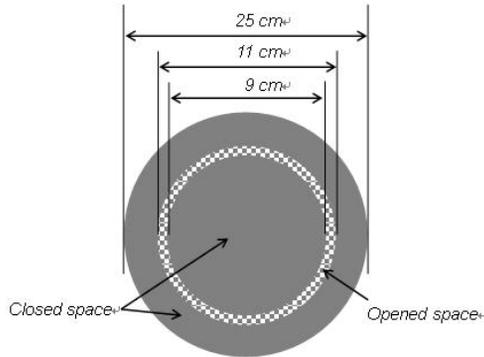


Fig. 7. Schematic diagram of partly closed screen plate.

Fig. 7은 건식초지기에 사용된 부분 천공 스크린판의 모식도이다. 스크린은 disperser의 스테러 밑에 위치하여 있으며 2 mm의 천공이 뚫려 있는 것이었다. 스크린의 열린 공간을 제한함으로써 스크린 상부와 하부의 압력차를 유지할 수 있었고, 또한 disperser에서 효과적으로 분산된 섬유를 스크린을 통한 이동경로를 균일하게 할 수 있었다.

공기를 일정한 방향으로 흐르게 하면 스크린에서 침착되는 섬유에 의해 스크린 구멍이 막히는 현상이 나타났다. 공기가 건조된 섬유를 이송할 때 섬유에 작용하는 항력은 매우 약하며 따라서 분산된 섬유가 스

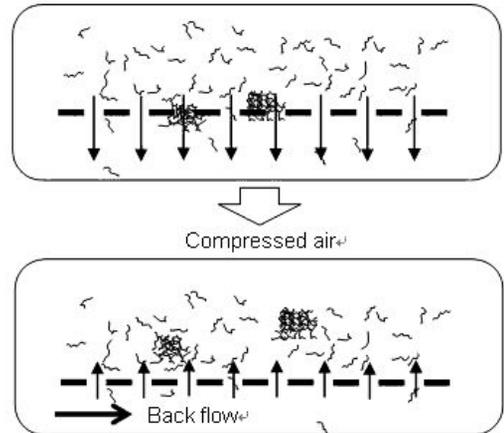


Fig. 8. Phenomena when compressed air is applied.

크린의 구멍과 같은 좁은 틈을 지날 때 쉽게 막히는 현상이 발생되었다. 이를 방지하기 위해 1.65 L의 압축공기를 스크린 하부에 5초 간격으로 0.5초 동안 분사하였다. 이때 공기는 순간적으로 역방향으로 흐르게 되어 스크린에 침착된 섬유를 다시 disperser 내부로 밀어내는 효과가 있었다 (Fig. 8).

3.3 Forming

분산되어 스크린을 통과한 섬유는 재응집 없이

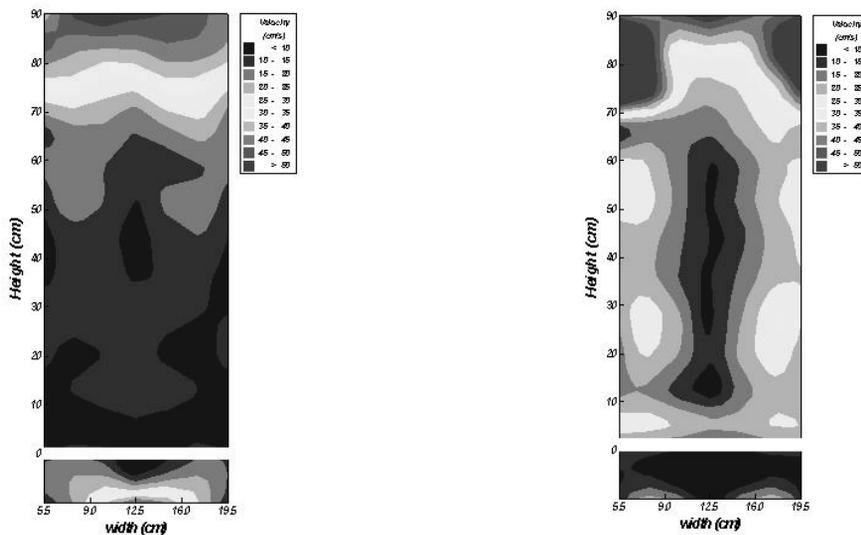


Fig. 9. Perpendicular and horizontal air velocities in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were $4000 \text{ cm}^3/\text{sec}$. and $1650 \text{ cm}^3/0.5 \text{ sec}$, respectively.

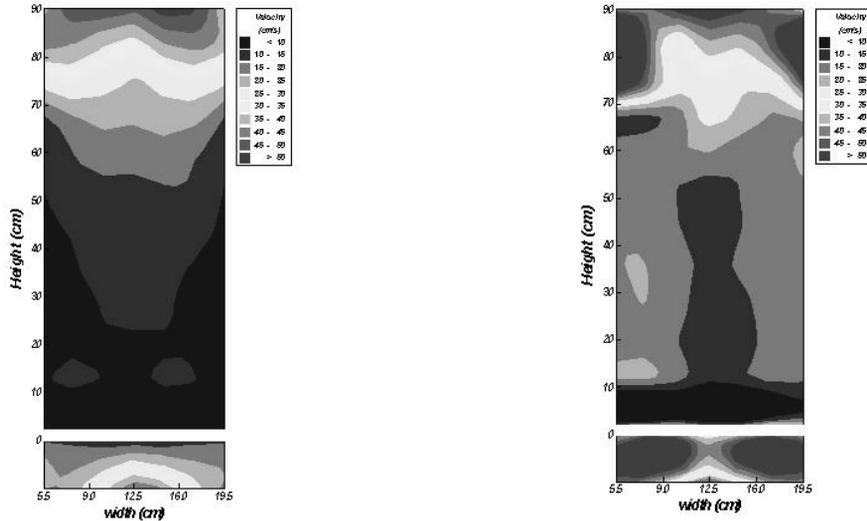


Fig. 10. Perpendicular and horizontal air velocities in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were 2400 cm³/sec. and 1650 cm³/0.5 sec, respectively.

forming zone을 지나 forming board 위에 섬유패드를 형성하였다. Fig. 9는 forming zone 내부의 공기의 속도와 변화를 보여주고 있다. 이는 섬유가 없는 상황에서 실제 건식초지 시의 조건으로 60개의 위치에서 측정된 것이다. 유속 데이터는 수평으로 5개 수직으로 12개의 지점에서 측정되었다.

Fig. 9의 왼쪽에는 공기의 유량이 4000 cm³/sec이고, 5초 간격으로 1650 cm³/0.5sec의 압축공기가 분사될 때 forming zone 내의 수직 및 수평방향 유속을 보여주고 있다. Forming board와 압축공기의 노즐은 Y축 상에서 0과 90 cm의 높이에 해당한다. 압축공기의 분사로 인한 공기의 속도와 변화는 Y축의 70 cm 이상에서 매우 크게 나타났다. Forming zone에서 공기는 회오리치는 경향을 나타냈으며 특히 forming board 위에서 강하게 나타났다. 이러한 회오리 현상은 강한 감압조건에서 유속의 증가에 따른 전향력의 발생에 기인하며 forming board 위에서의 회오리 현상은 균일한 섬유패드의 형성을 막는 매우 안 좋은 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 공기의 석선을 2400 cm³/sec로 낮추고, 5초 간격의 압축공기의 분사가 1650 cm³/0.5sec일 때, 수직 및 수평방향 유속을 나타낸다. 유속과 그 변화는 공기의 흐름이 감소함에 따라 크게 낮아졌으며 수평

방향의 결과에서도 보였듯이 forming zone에서 유속도 낮아졌다. 회오리 현상이 발생하지 않는 이러한 완화된 조건에서 DFM의 건식초지를 실시하였다.

3.4 가슴 및 압착

Forming board에 형성된 섬유패드는 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 분 동안 가슴하였다. 물 에어로졸과 수증기를 초음파 가슴기를 이용하여 발생시켰다. 측정당시 석선의 유량은 1250 cm³/sec 이고 압축공기는 작동시키지 않았다.

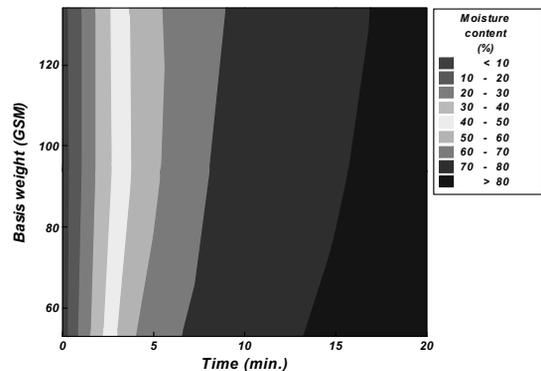


Fig. 11. Gradation of moisture contents of fiber pads as a function of humidifying time and basis weight of fiber pads.

Fig. 11은 섬유패드의 함수율을 보여주고 있다. 함수율의 기준은 가습이후의 섬유패드의 무게 기준에 대한 퍼센트를 나타낸다. 가습시간에 따라 섬유패드의 함수율은 증가를 하였으며 섬유패드의 평량에 따른 함수율의 변화는 상대적으로 그다지 크지 않았다.

가습 전에 forming board에 형성된 섬유패드의 섬유들은 board 위에 눈처럼 쌓여져 있었고 섬유패드의 평량은 80 gsm 이었다. 가습이 이루어짐에 따라 섬유에 응결된 물이 보였지만 섬유패드의 다공성 구조는 73%라는 높은 가습상황에서도 유지되었다.

섬유패드의 가습은 Fig. 12에 묘사되어 있다. 물에 에어로졸과 수증기가 섬유패드를 공기의 흐름을 따라 지나가게 되며, 이 과정에서 일부 섬유에 흡착되었다. 하지만 상당량은 높은 다공성의 구조로 인하여 공기

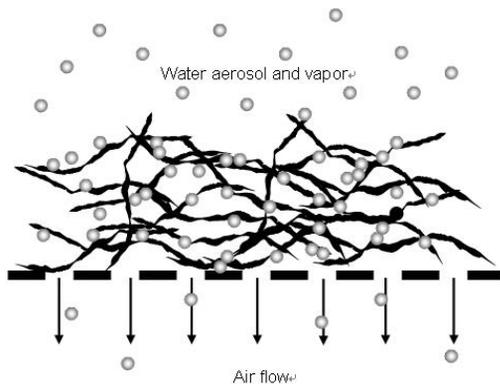


Fig. 12. Depiction of humidifying phenomena in fiber pad.

와 함께 통과하였다.

Fig. 13은 압착된 섬유패드의 모습을 보여주고 있다. 섬유패드는 압착 후 종이와 같은 모습을 나타내었으며 두 경우 모두 몇몇 섬유가 돌출되어 표면위로 올라간 모습이 보였다.

4. 결론

건식초지된 종이를 만들기 위한 건식초지 몰드를 개발하고, 이를 이용하여 건식초지의 가능성을 평가하였다. 건식초지를 위한 펄프 해섬, 포밍, 지층형성, 지필 가습, 압착 조건 등이 건식초지의 일반 특성에 미치는 영향을 파악하였다.

건식해리 섬유를 만들기 위하여 약 300 g의 Hw-BKP를 건식해리기에 넣고 30분간 해리한 결과 습식해리된 평균 섬유장과 매우 유사하였으나, 그 외 형적인 모습은 크게 차이가 있었다. 건식초지 가능성을 평가하기 위해서 원주형 건식초지기를 설계, 제작하고 섬유의 균일한 분산 및 포밍을 유도할 수 있는 방안을 도출하였다. 형성된 섬유 패드는 조습하고 압착함으로써 지필을 형성할 수 있었다. 결론적으로 물을 사용하지 않고 종이를 제조할 수 있음을 실증하였다.

사사

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

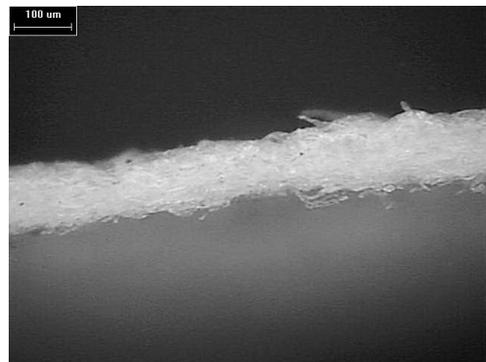
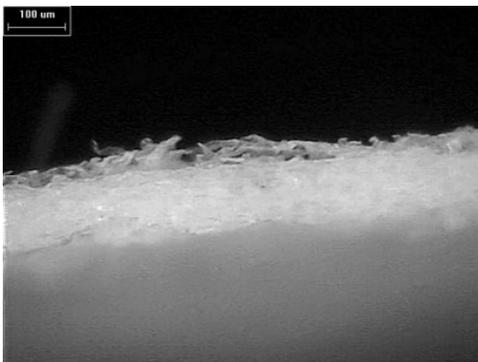


Fig. 13. Microscopic pictures of the pressed fiber pad which had 39% (left) and 73% of moisture contents pressed at a pressure of 56 kgf/cm² for 3 min.

인용문헌

1. Gullichsen, J., Harkonen, E., Medium consistency technology, TAPPI J. 64(6) : 69-72 (1981).
2. Paulapuro, H., Komppa, A., RAINA: Energy-efficient paper production, Final report on energy research programme 1988-1992. Ministry of Trade and Industry, Energy Department, Reviews B:165, Helsinki 1994.
3. Cichoracki, T., Gullichsen, J., Paulapuro, H., High consistency forming: a new concept, TAPPI J. 84(3) : 1-8, (2001); text available at www.tappi.org.