

# 건식초지기술의 가능성 평가를 위한 건식초지기 개발

김종민 · 윤혜정 · 이학래<sup>†</sup>  
(2006년 12월 22일 접수: 2007년 5월 22일 채택)

## Development of Dry Forming Mold for the Feasibility Study of Dry Forming of Paper

Jong Min Kim, Hye Jung Youn and Hak Lae Lee<sup>†</sup>  
(Received December 22, 2006: Accepted May 22, 2007)

### ABSTRACT

To examine the feasibility of dry forming technology for papermaking, a dry forming mold (DFM) was developed and evaluated. Main forming section of DFM was a cylindrical tube, and at the top of the mold a stirring equipment was placed to disperse dry fibers. These fibers were screened using a hole type screen plate placed just under the stirring equipment and dropped freely on the forming wire located 0.9 m below of the screen plate to form a dry fiber pad. The vertical and horizontal velocity of air flow in the forming cylinder were evaluated and analyzed to find the most effective method of air flow control in the cylinder. Humidification and pressing conditions to obtain a decent dry formed papers were examined. Results showed dry formed papers can be prepared with this dry forming mold. And this mold can be used to examine the effect of the papermaking process factors including pressing pressure, drying temperature, humidification on sheet quality of dry formed papers.

**Keywords** : *dry forming, dry forming mold(DFM), humidification, pressing, sheet quality*

## 1. 서 론

제지산업은 컴퓨터와 네트워크, 인터넷으로 대표되는 정보화 기술 산업의 확장과 최근들어 증폭되는 환경 보호와 에너지 절약에 대한 사회적 관심증가에 따라 새

로운 도전에 직면하고 있다. 기존의 제지산업은 다량의 용수와 에너지를 사용하는 장치산업의 대표적 형태로 인식되고 있어, 미래지향적 환경친화적 첨단산업으로 이미지를 전환시키는 것이 필요하다고 판단된다. 제지 산업에 관한 기존의 산업적 성격과 관련된 한계와 문제

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

<sup>†</sup> 주저자(Corresponding author): E-mail: lhakl@snu.ac.kr

들을 극복하기 위해서는 제지기술의 혁신적 발상 전환이 요청되고 있다. 이러한 혁신적인 발상 전환의 한 방법으로 제지산업이 가장 많이 사용하고 있는 용수의 사용을 억제하는 기술을 가질 수 있다.

물은 섬유를 분산하고 이송하며 와이어에 웹을 형성하는 역할을 하며, 건조과정에서는 섬유간의 결합을 가능하도록 매개 역할을 한다. 일반적으로 제지공정에서 헤드박스 내 지료의 농도는 1% 이하이다. 즉 99% 이상의 물이 1% 이하의 섬유를 분산하고 이송하는데 사용된다. 제지공정에서 물의 대부분은 재활용되지만 이러한 물의 재활용을 위해서는 많은 양의 에너지와 복잡한 설비가 요구되는 것이 현실이다. 또한 생산량의 증가와 품질향상을 위해서 제지공정의 용수 순환을 제어하기 위한 프로세스는 더욱 거대하고 복잡해지고 있다. 또한 사용된 용수를 처리하기 위한 폐수 및 재활용수 처리 시스템에 많은 연구개발이 행해지고 있다. 이러한 어려움은 제지공정에서 용수의 사용량이 많기 때문에 발생하는 현상이라 할 수 있다. 하지만 제지산업이 부단히 경주하고 있는 용수절감과 공정폐쇄화를 위한 지속적인 노력에도 불구하고 제지산업은 여전히 용수 다소비산업이며, 이러한 상황은 기술적 혁신이 없다면 앞으로도 마찬가지일 것이 자명하다.

제지공정에서 용수 소비를 줄이는 방법으로 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 행해진 바 있다.<sup>1-3)</sup> 고농도 초지는 제지공정의 용수 사용량을 줄이는 방안으로 연구되었으나, 이 개념을 확장한다면 용수를 사용하지 않는 건식초지기술은 불가능한 것인가 하는 원론적인 문제에 부딪히게 된다.

건식초지란 용수와 관련된 모든 문제를 일거에 해결할 수 있는 혁신적 접근임이 분명하지만 이러한 건식초지 개념의 정착을 위해서는 건식초지에 가장 적합한 펄프섬유를 찾는 작업, 건식초지된 종이의 지합과 물성향상, 압착과 건조조건 등의 공정최적화 등 실현을 위해서는 풀어야 할 많은 근본적인 문제들이 산적해 있다.

본 연구에서는 건식초지와 관련된 이러한 중요한 문제를 풀기 위한 기초 연구를 위해 필수적으로 필요한 건식초지 물드를 개발하고 그 성능을 평가하고자 하였다.

## 2. 건식초지기

### 2.1 기본 구조

건식초지를 평가하기 위해서 건식초지기(DFM, dry forming mold)를 제작하였다. Fig. 1은 DFM의 모식도이다. 여기에서 보는 것과 같이 DFM은 원주 형태의 구조를 가지고 있다. 건조 섬유 덩어리는 분산장치(disperser)에서 교반에 의한 전단력에 의해 분산되도록 하였다. 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 포밍 존(forming zone)에서 공기의 흐름과 함께 낙하하게 된다. 천공스크린 하부에는 압축공기를 주기적으로 분출시켜 섬유가 스크린 홀과 하부에 침착되는 것을 방지하였다. 섬유 패드는 형성부 하부에 설치된 와이어 상에 형성된 후 에어로졸 형태로 물을 분사하는 가슴장치를 통해 조습하였다. DFM의 몸체는 건식초지과정에서 섬유의 움직임을 관찰할 수 있도록 투명한 플라스틱 파이프와 판으로 제작하고 이를 알루미늄과 철제 프레임에 설치하였다. 기기의 작동을 위하여 세 개의 전동기와 한 개의 가슴기가 설치되었다.

### 2.2 공기 유속 측정

DFM 내부에서 발생하는 공기의 흐름을 분석하기

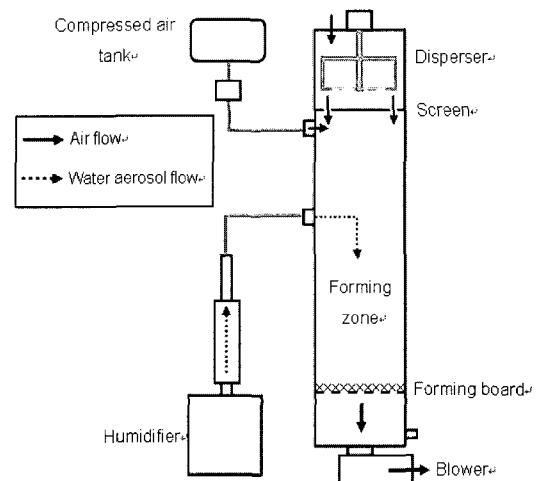


Fig. 1. Schematic drawing of DFM.

위하여 풍향풍속계를 통해 공기의 유속을 측정하였다. 측정은 분산장치의 내벽, 천공스크린 상하부, 형성부, 블로어(blower) 출구에서 실시하였다. DFM의 공기의 유속평가에는 열선풍향풍속계를 사용하였다. 가습시간에 따른 건식초지 된 섬유패드의 함수율을 측정하였다. 가습과정을 거친 섬유패드는 압착과 건조를 통하여 종이로 만들었다. 초지된 종이의 평량은  $80 \text{ g/m}^2$ 가 되도록 하였다. 평량은 포밍와이어 위에 형성된 섬유패드를 프레스로  $56 \text{ kgf/cm}^2$ 로 압착하고 표준조건에서 조습처리한 다음 측정하였다.

### 2.3 건식초지 방법

건식초지 과정 중 가습은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 섬유 패드 형성 이후 실시되었다.

### 2.4 재료

활엽수 표백 크라프트 펄프(Hw-BKP)를 공시 펄프로 사용하였다. 공시펄프는 건식해리기를 이용하여 해리한 후 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 분산장치

섬유의 플러프 덩어리를 분산시키기 위하여 정역회전이 가능한 스테러(stirrer)를 포밍 실린더 상부에 위치한 분산기 내부에 설치하였다. 스테러의 회전 속도와

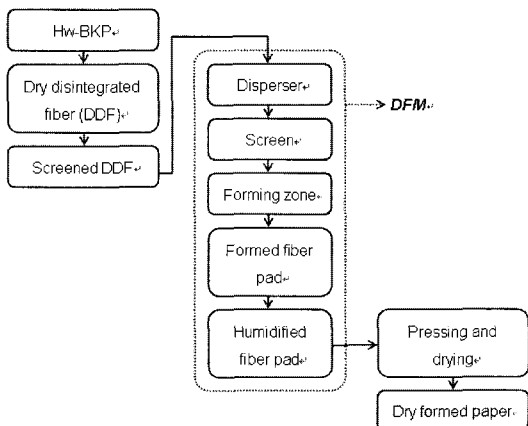


Fig. 2. Papermaking process with DFM.

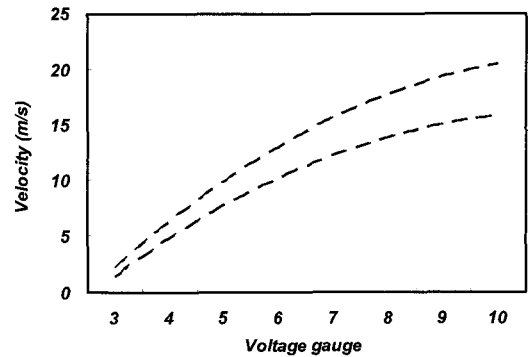


Fig. 3. Change of air velocity in the disperser as a function of the voltage control.

회전방향을 바꾸는 시간간격 조정에 따른 섬유의 분산 정도를 파악하였다. Fig. 3은 회전속도 결정을 위하여 스테러에 공급되는 전압을 조정함에 따라 일어나는 분산장치 내벽에서의 공기 속도를 도시한 것이다. 이때 정역회전의 시간 간격은 2초로 하였다. 두 개의 점선은 최고 공기유속과 최저 공기유속을 나타낸다. 플러프 상의 섬유덩어리는 전압 게이지가 8 이상일 때 원활하게 분산되는 것으로 나타났다. 전압이 9 이상에서는 강한 원심력으로 인하여 섬유의 스크린 통과가 감소하였으므로, 초지 시에는 전압을 8로 조절하여 분산을 실시하였다. 이때 공기의 유속은 14.1-18.1 m/sec 였다.

### 3.2 천공 스크린

Fig. 4는 부분적으로 막혀진 천공 스크린 판의 모식도이다. 스크린은 분산장치의 스테러 밑에 위치하여 있

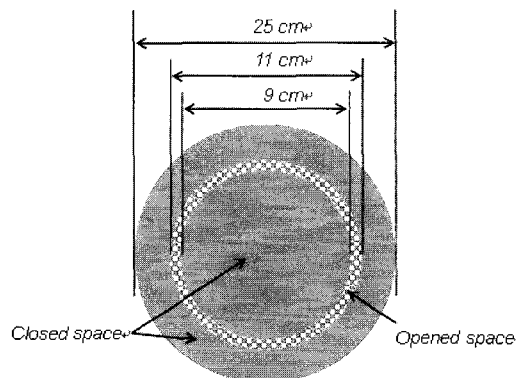


Fig. 4. Partly closed screen plate.

으며 직경 2mm의 천공이 뚫려 있는 것을 사용하였다. 천공판의 설치로 스크린 상부와 하부의 압력차가 발생하였고, 또한 분산장치에서 분산된 섬유유의 정선 및 균일성 제고가 가능하였다.

### 3.3 압축공기

Fig. 5는 스크린에서 침착되는 섬유유에 의해 스크린 구멍이 막히는 현상을 나타낸다. 공기는 밀도가 낮기 때문에 건조된 섬유유가 스크린의 구멍을 통과할 때 드래그 힘이 약하여 스크린 구멍이 쉽게 막히는 현상이 발생되었다. 이를 방지하기 위해 압축공기를 스크린 하부에서 적용하였다. 0.5초 동안 1650 cm<sup>3</sup>의 압축공기를 5초 간격으로 분사하면 공기는 순간적으로 상부로 흐르게 되며 이때 스크린 구멍에 걸린 섬유유 덩어리를 다시 분산장치 내부로 밀어내게 된다 (Fig. 6).

### 3.4 포밍 존

분산되어 스크린을 통과한 섬유유는 재응집 없이 포밍 존을 지나 포밍 보드위에 섬유패드를 형성하게 된다. Figs. 7, 8, 10, 11은 포밍 존 내부의 공기의 속도와 변화를 보여주고 있다. 이들 다이어그램은 섬유유가 없는 상태에서 실제 건식초지 공정에서 적용되는 조건으로 60개의 위치에서 측정되어 분석된 것이다. 유속 데이터는

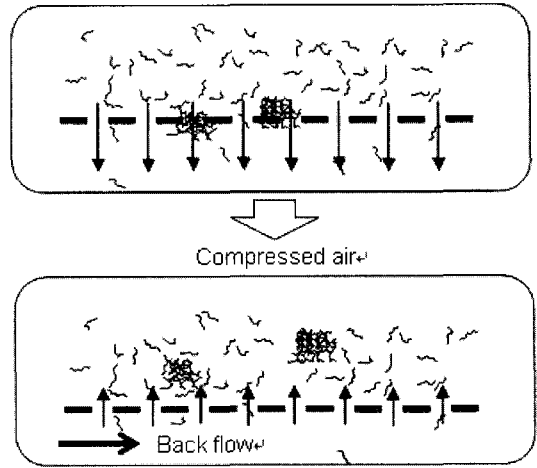


Fig. 6. Phenomena when compressed air is applied.

수평방향으로 5개 수직방향으로 12개의 지점에서 측정되었다.

Fig. 7은 공기의 유량이 4000 cm<sup>3</sup>/sec이고 5초 간격으로 압축공기가 1650 cm<sup>3</sup>/0.5sec의 유량으로 분사될 때, 포밍 존에서 수직방향의 공기의 유속과 변화를 보여주고 있다. 공기 유속의 변화는 유속이 30초 동안 변화하는 최대값과 최소값의 차이를 나타낸다. 포밍 보드와 압축공기 노즐의 위치는 Y축의 0과 90 cm의 높이

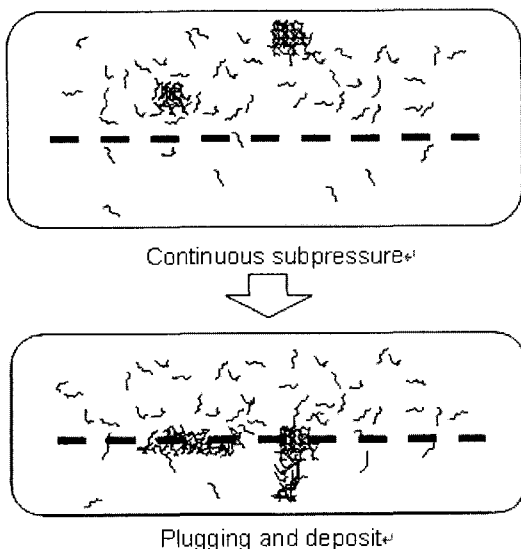


Fig. 5. Plugging and deposit of fiber flocs in the screen plate.

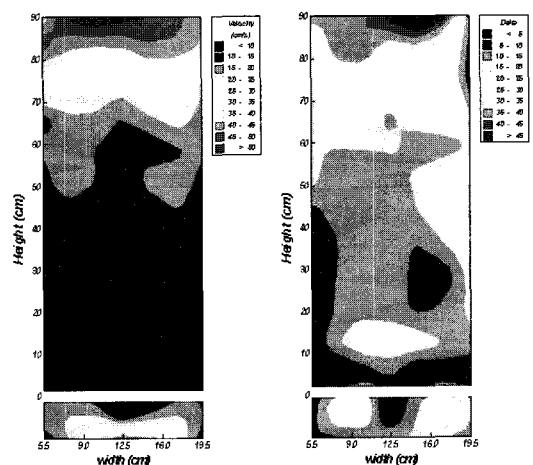


Fig. 7. Perpendicular air velocities and their variation in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were 4000 cm<sup>3</sup>/sec and 1650 cm<sup>3</sup>/0.5 sec, respectively.

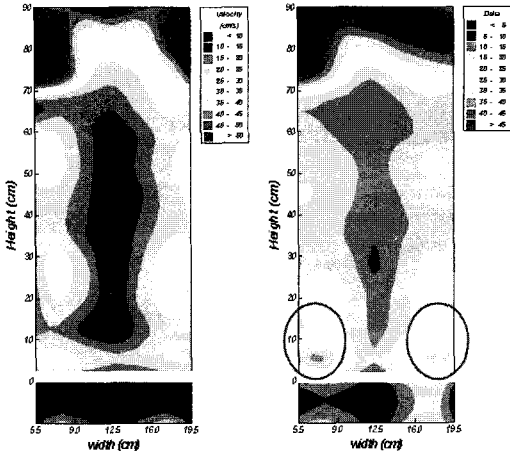


Fig. 8. Horizontal air velocities and their variation in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were 4000 cm<sup>3</sup>/sec and 1650 cm<sup>3</sup>/0.5 sec, respectively.

해당한다. 압축공기 분사로 인한 공기의 속도 변화는 Y 축 70 cm 이상에서 매우 크게 나타났다. 그리고 전반적인 공기의 속도 변화는 크고 불규칙하였다.

Fig. 8은 수평방향 공기의 유속과 그 변화를 보여주고 있다. 석선과 압축공기의 조건은 Fig. 7과 동일하였다. 포밍 존에서 공기는 회오리치는 경향을 나타냈으며 특히 포밍 보드 위에서 그 경향이 강하게 나타났다. 이러한 회오리 현상은 강한 감압조건에서 유속의 증가에 따른 전향력의 발생에 기인하며 포밍 보드 위의 회오리 현상은 균일한 섬유패드 형성을 막는 매우 안 좋은 결과를 나타내었다. Fig. 9는 이러한 현상을 모식적으로 보여주고 있다.

Fig. 10은 공기의 유량을 2400 cm<sup>3</sup>/sec와 압축공기 유량을 1650 cm<sup>3</sup>/0.5 sec로 줄이고 분사 간격을 5초로

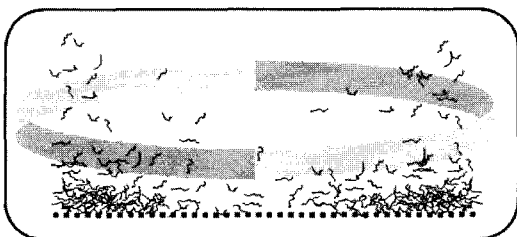


Fig. 9. Fiber landing on the forming board by swirling flow.

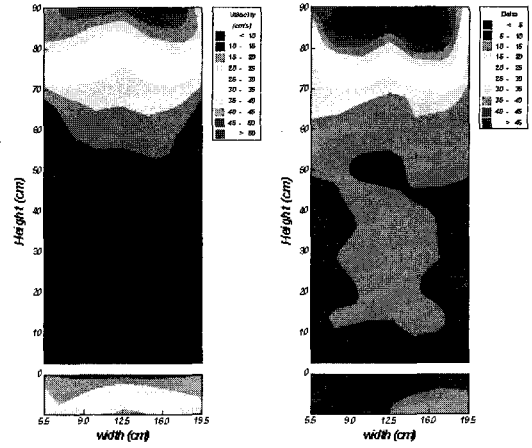


Fig. 10. Perpendicular air velocities and their variation in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were 2400 cm<sup>3</sup>/sec and 1650 cm<sup>3</sup>/0.5 sec, respectively.

유지한 경우이다. 수직방향으로의 공기의 속도와 변화는 공기의 흐름이 줄어들에 따라 크게 낮아졌으며 Fig. 11의 수평방향 결과에서도 보였듯이 포밍 존에서 완화된 공기의 흐름을 나타내었다. 회오리 현상이 발생하지 않는 이러한 완화된 조건에서 DFM의 건식초지를 실시하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

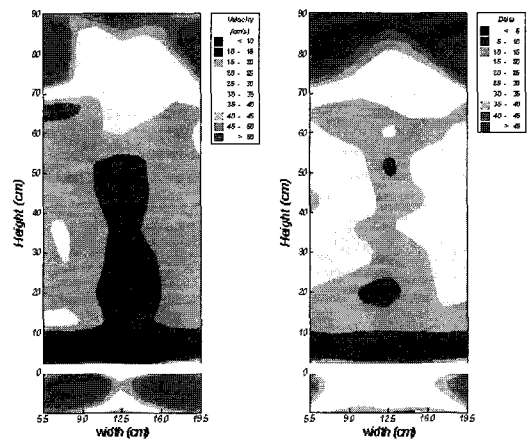
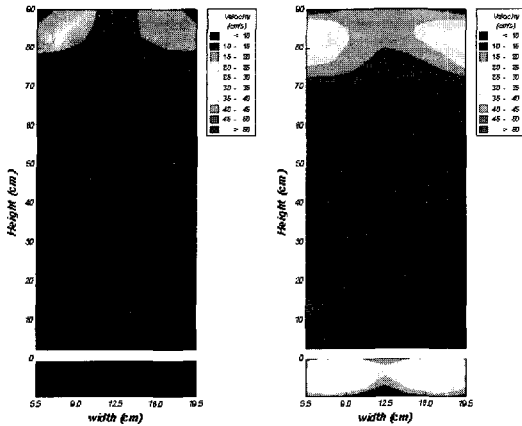


Fig. 11. Horizontal air velocities and their variation in the forming zone when the flow rates of the blower and the compressed air were 2400 cm<sup>3</sup>/sec and 1650 cm<sup>3</sup>/0.5 sec, respectively.



<Perpendicular direction> <Horizontal direction>

Fig. 12. Air velocities to perpendicular and horizontal directions in the forming zone (Flow rate by the suction blower was 1250 cm<sup>3</sup>/sec).

### 3.5. 가슴장치

Forming board에 형성된 섬유패드는 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 분 동안 가슴하였다. 가슴은 초음파 가슴기로 실시하였다. Fig. 12는 가슴 시 포밍 존에서의 수직방향 유속과 그 변화를 나타내고 있다. 측정 당시 석션유량은 1250 cm<sup>3</sup>/sec이 되도록 하였고 압축공기는 작동시키지 않았다.

Fig. 13은 섬유패드의 함수율을 보여주고 있다. 함수율의 기준은 가슴 이후의 섬유패드의 무게 기준에 대한 퍼센트를 나타내었다. 가슴시간에 따라 섬유패드의 함수율은 증가하였으며 섬유패드의 평량에 따른 함수율

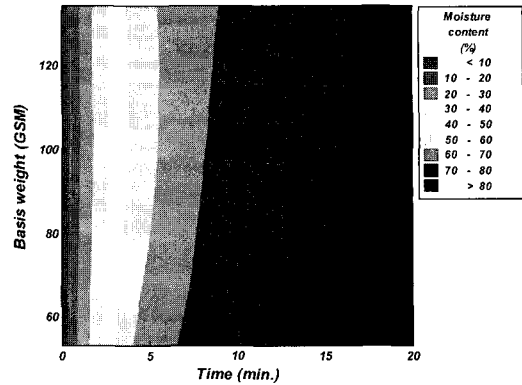


Fig. 13. Gradation of moisture content of fiber pads as a function of humidifying time and basis weight of fiber pads.

의 변화는 상대적으로 그다지 크지 않았다.

Fig. 14는 가슴 전에 forming board에 형성된 섬유패드의 단면과 표면의 사진이다. 섬유는 포밍 보드 위에 눈처럼 쌓여져 있었고 섬유패드의 평량은 80 gsm 이었다. Figs. 15와 16은 가슴된 섬유패드로 이때 함수율은 각각 39%와 73%였다. 함수율이 증가함에 따라 섬유에 더 많은 응결 현상이 나타났으나 섬유 패드의 다공성 구조는 73%라는 높은 함수율 조건에서도 유지되고 있었다.

### 3.6. 압착된 섬유패드의 외형

Figs. 17-18은 압착된 섬유패드의 모습을 보여주고 있다. 39%의 함수율을 가진 섬유패드는 56 kgf/cm<sup>2</sup>로 3분간 압착한 섬유패드의 모습은 Fig. 17에 나타나 있다. 73%의 함수율을 가진 섬유패드의 압착 후 모습은

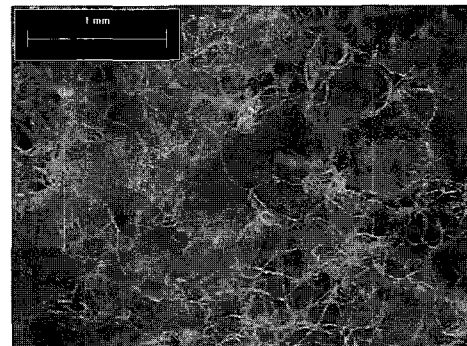
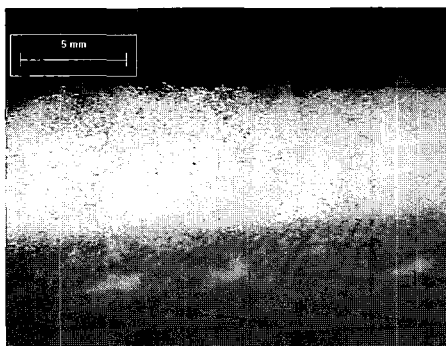


Fig. 14. Microscopic pictures of fiber pad on the forming board before humidification.

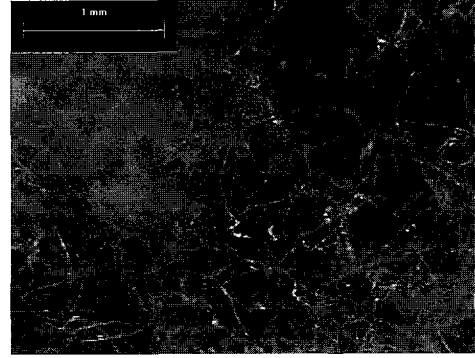
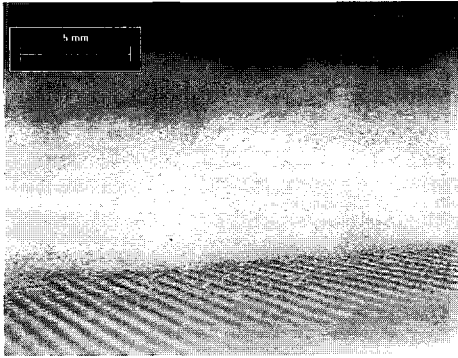


Fig. 15. Microscopic pictures of the humidified fiber pad with 39% moisture content.

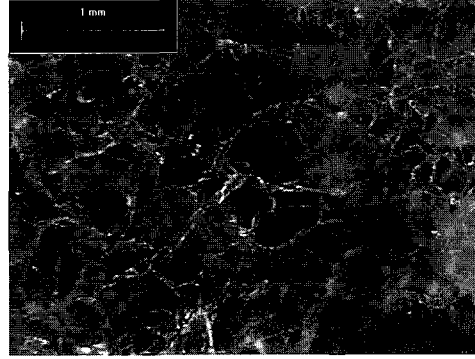
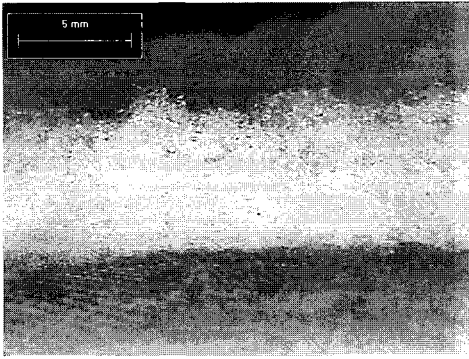


Fig. 16. Microscopic pictures of the humidified fiber pad with 73% moisture content.

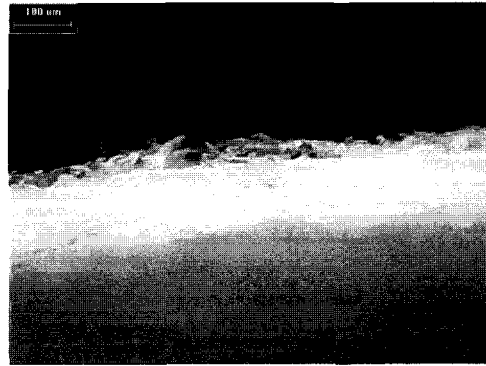
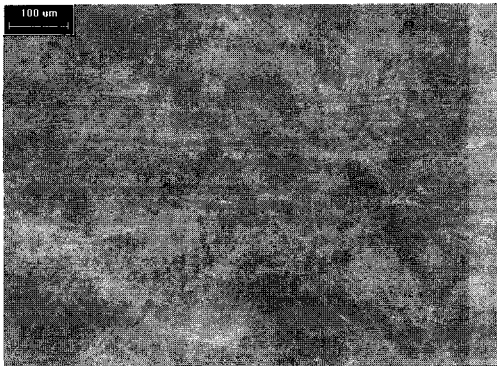
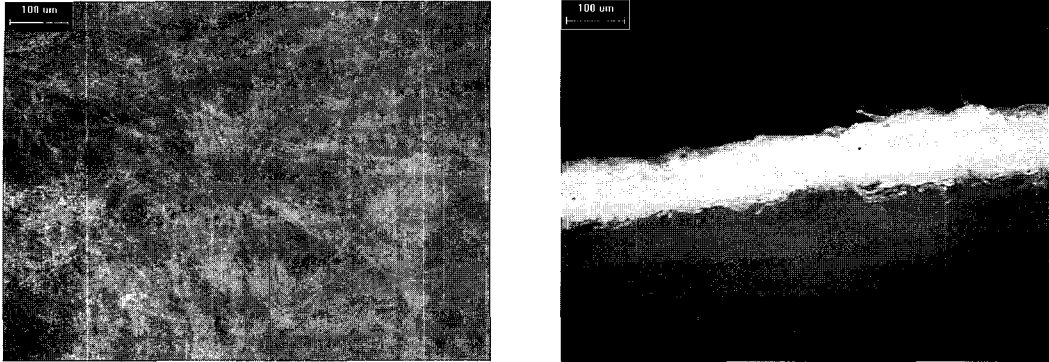


Fig. 17. Microscopic pictures of the pressed fiber pad which had 39% moisture content. It was pressed at a pressure of  $56 \text{ kgf/cm}^2$  for 3 min.

Fig. 18에 나타나 있으며 압착조건은 같았다. 섬유패드는 압착 후 종기와 같은 모습을 나타내었으며 두 경우 모두 몇몇 섬유가 돌출되어 표면위로 올라간 모습이 보였다.

#### 4. 결론

기존의 초지기술의 한계를 극복하기 위한 혁신 기술의 하나인 건식초지기술에 대한 가능성을 평가하기 위



**Fig. 18. Microscopic pictures of the pressed fiber pad that had 73% moisture content. It was pressed at a pressure of 56 kgf/cm<sup>2</sup> for 3 min.**

해 건식초지가 가능한 초지를 제작하고 그 성능을 평가하였다. 건식초지는 상부에 섬유를 분산시킬 수 있는 분산장치를 갖추고, 분산된 섬유를 정선할 수 있는 스크린과 포밍 존, 그리고 포밍 보드로 구성되어졌다. 섬유의 유동을 촉진하기 위해 하부에서 공기를 유입하기 위한 장치를 설치하였고, 스크린의 막힘현상을 방지하기 위한 압축공기 공급장치, 섬유간 결합을 촉진시키기 위한 가습장치 등의 기능을 갖추도록 하였다.

이러한 건식 초지를 이용하여 패드를 형성하기에 적합한 공기유량, 가습방식 및 패드의 함수율 등을 조사하였으며, 분산장치에 사용된 스티러의 형태, 스크린 홀의 크기 및 개방면적과 형태 등을 평가하였다. 그 결과 본 장치 이용하여 건식섬유의 균일한 패드 형성 및 초지조건에 따른 물성변화의 평가가 가능한 것으로 밝혀졌다.

## 사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 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](http://www.tappi.org)