

# Condebelt 건조시 미세분이 층분리 현상에 미치는 영향

정태민·이학래

서울대학교 임산공학과

## 1. 서론

현재 다량의 국산고지를 원료로 사용하고 있는 산업용지는 재생섬유의 사용으로 인한 심각한 강도 저하 문제를 겪고 있다. 이러한 재생 섬유 강도적 저하 현상을 극복할 수 있는 신 기술로서 고온압착건조방식을 도입한 Condebelt 건조 방식을 들 수 있다. Condebelt 건조란 고온 압착 기술의 하나로 건조효율을 높힘으로써 건조에너지를 절감시킬 뿐 아니라 섬유간 결합을 증대시켜 종이의 제반 물성을 증가시킬 수 있는 새로운 제지 기술이다. Condebelt 건조는 지필의 두께방향으로 압력을 가함으로써 지필을 압착함과 동시에 고온 고압의 수증기에 의해 가열된 스틸벨트 표면에 지필을 접촉시킴으로서 습지필의 온도를 100℃ 이상으로 상승시킨 상태에서 건조가 진행된다.

Condebelt 건조방식의 특징으로는 높은 건조효율과 제반 물성의 향상을 들 수 있는데 이러한 제반 물성의 향상은 고온, 고압 하에서 펄프 섬유의 유연성이 증가되어 섬유간 결합면적이 증가되며, 건조 시 발생하는 지필의 수축을 근원적으로 억제할 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 Condebelt 건조 공정 중 습지필에서 발생된 수증기가 지필 외부로 배출되지 못하고 지필을 붕괴시키는 층분리 현상이 발생하여 운전에 많은 제약을 받고 있는 실정이다. 압착 건조 시 발생하는 층분리 현상은 이미 1980년대에 impulse drying에 대한 연구 과정에서 실험실적으로 또 파일로트 시설을 이용한 연구를 통하여 보고되어 왔다. 압착시간이 30 ~ 40 ms 정도로 극히 짧은 impulse drying에서는 층분리 현상이 상업화의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있으나 Condebelt 건조공정은 건조시간이 길기 때문에 층분리 현상의 문제점은 보고된 바 없다. 하지만 국산 고지를 원료로 사용하는 Condebelt 공정에서 지필의 층분리 현상이 발생되고 있어 그 원인 구명과 대책 마련이 시급히 요청되고 있다.

본 연구에서는 국산 골판고지에 다량으로 함유되어 있는 미세분이 이러한 층분리 현상의 주된 원인이라 판단되어 이를 실증코자 미세분의 종류, 함량 및 분포에 따른 Condebelt 건조시 지필의 층분리 현상을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 연구에서는 (주)동일제지에서 분양받은 AOCC 20%와 KOCC 80%로 제조된 라이너지를 OCC 원료로 사용하였다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1 치료조성

#### 2.2.1.1 장섬유 분급

미세분이 제거된 장섬유를 얻기 위하여 먼저 라이너지를 고농도 펄퍼에서 30분간 해리한 후 실험실용 Valley beater를 이용하여 여수도 290 mL CSF가 되도록 고해하였다. 이후 미세분 제거장치를 이용하여 미세분을 제거하고 장섬유를 얻었다. 미세분 제거를 위해 하부에 100 mesh 와이어가 설치된 치료통에 펄프 슬러리를 넣은 후, 배출수가 완전히 투명해질 때까지 연속적으로 여과시켰다. 와이어 상부에는 브러시를 설치하여 지속적으로 회전시킴으로써 섬유매트가 형성되는 것을 방지하였다.

#### 2.2.1.2 미세분 분급

본 실험에서는 AOCC 20%와 KOCC 80%로 제조된 라이너지를 고해하거나, 단순 해리한 다음 분급하여 얻어진 두 종류의 미세분을 실험에 사용하였다. 라이너지를 고농도 펄퍼에서 30분간 해리하고 Valley beater에서 여수도 10 mL CSF가 되도록 고해시킨 치료로부터 분획한 미세분을 미세분 A로 칭하였다. 미세분 분급을 위해서는 200 mesh 와이어가 설치되어 있는 미세분 콜렉터를 사용하였다. 200 mesh 와이어를 통과한 배출수는 400 mesh 와이어를 이용하여 10% 정도의 농도로 농축시켜 미세분을 수집하였다. 라이너지를 단순히 해리한 후 얻어진 미세분 B는 저농도 펄퍼에서 30분간 해리한 후 200 mesh 와이어를 통과한 배출수를 침전시킨 후 농축하여 준비하였다.

### 2.2.2 섬유 특성 측정

각 미세분의 평균 입자 크기는 Malvern사의 입도 분석기로 측정하였다. 또 보수도(Water Retention Value, WRV)는 TAPPI um 256에 의거하여 측정하였고, 회분 함량은 TAPPI Test Method T 211 om-93에 의거하여 평가하였다.

### 2.2.3 수초지 제작

#### 2.2.3.1 단층지

장섬유에 대한 미세분의 배합 비율을 30, 40, 50%로 변화시켜 지료를 조성하고, 교반기를 이용하여 충분히 교반시킨 후 실험실용 사각 수초지를 이용하여 크기 25 × 25 cm, 평량 150 g/m<sup>2</sup> 이 되도록 초지하였다. 수초지기상에서 쿠치된 습지필은 실험실용 평판압착기를 이용하여 3.5 kg/cm<sup>2</sup>의 압력에서 5분간 압착하였다.

### 2.2.3.2. 이층지

상층지의 경우 평량 50 g/m<sup>2</sup>이 되도록 장섬유과 미세분을 일정량 혼합하여, 장섬유에 대한 미세분 함량이 30, 40, 50, 60, 70%가 되도록 초지하였다. 초지시 장섬유는 완전히 보류된다고 가정하고 여기에 미세분을 평량이 50 g/m<sup>2</sup>가 될 수 있도록 가하였다. 예를 들어 미세분 함량이 50%인 경우에는 장섬유를 25 g/m<sup>2</sup>가 되도록 하고 미세분을 평량이 50 g/m<sup>2</sup>이 될 수 있도록 가하고 초지하였다. 하층지는 장섬유와 미세분의 양을 조절하여 장섬유에 대한 미세분 함량이 20, 25, 30, 35, 40%이 되도록, 평량은 100 g/m<sup>2</sup>이 되도록 초지하였다

이와 같이 초지된 평량 50 g/m<sup>2</sup>의 상층지와 평량 100 g/m<sup>2</sup>의 하층지의 습지필을 와이어가 이면에 있는 상태에서 표면이 서로 마주하도록 겹친 다음 쿠치를 거치지 않은 채 실험실용 평판압착기를 이용하여 3.5 kg/cm<sup>2</sup>의 압력에서 5분간 압착하였다.

### 2.2.4 Condebelt 건조

압착이 완료된 습지필을 절단기를 사용하여 12.5 × 12.5 cm로 절단한 후 실험실용 Condebelt를 이용하여 압착건조하였다. 본 실험에서는 Condebelt의 상부 플레이트의 온도와 하부 플레이트의 온도는 각각 180℃와 80℃로, 압체 압력은 7 bar로 고정시켰으며 유입지 건조도는 40%로 조절하였고, 층분리 현상을 관찰하기 위해서 압체 시간을 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

단층지의 경우 미세분 분포에 따른 영향을 확인하기 위하여 상부 플레이트와 접촉되는 면을 수초지상에서의 top면과 wire면을 구별하여 압착건조 하였다.

### 2.2.5. 강도적 물성 측정

TAPPI Test Method T 402 om-83에 의거 시편을 조습처리한 후, TAPPI 시험법에 의거 밀도(T 220 om-88), 인장강도(T 494 om-88), 파열강도(T 403 om-85), Short Column Test 압축강도(T 826 pm-92) 및 투기도(T 536 pm-79)를 측정하였다.

### 2.2.6. 층분리 현상 확인

층분리가 발생한 시편은 육안적으로 관찰이 가능하였으며 이를 정량화 하기 위해서, 층분리가 발생한 시편에서 10 cm × 10 cm 을 scanner를 이용하여 scan 한 후 image analyzer를 이용하여 육안적으로 층분리가 발생한 것으로 관찰되는 면적을 전체면적에 대한 백분율로 계산하여 층분리 면적을 구하였으며, 층분리가 발생한 경우 강도의 평균값이 급격하게 떨어지거나 측정부위간 변이가 크게 나타날 것으로 예상되어 각 시편에서 다섯 지점에 대한 파열강도를 측정하여 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 미세분 종류에 따른 영향

본 실험에서는 200 mesh 와이어를 통과한 물질을 미세분으로 사용하였다. 지료 조성 방법에 따라 실험에 사용한 미세분을 장시간 고해를 통해 얻어진 미세분 A와 해리만을 통해 얻은 미세분 B로 나누었다. 미세분 A와 미세분 B의 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristic of fines

Types	Particle size( $\mu\text{m}$ )	WRV(g water/g pulp)	Ash content(%)
Fines A	38.48	3.81	6.1
Fines B	38.93	1.99	34

두 종류의 미세분을 광학현미경으로 관찰한 결과 미세분 A에는 피브릴 형태의 미세분이, 미세분 B에는 플레이크 형태의 미세분이 상대적으로 많이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다. Table 1에서 미세분 A의 보수도가 미세분 B에 비해 2배 이상 큰 것으로 보아 미세분 A는 이차 미세섬유, 미세분 B는 일차 미세섬유의 성질을 가지고 있다고 생각할 수 있다. 이러한 WRV의 차이는 미세분 B에 34%의 회분이 함유되어 있기 때문이기도 하다.

이러한 미세분의 형태와 보수도의 차이가 지필의 투기도와 탈수성에 영향을 주는 것으로 나타났다.

미세분의 종류와 함량 차이에 의한 종이의 투기도 차이가 Condebelt 건조 시 발생하는 지필의 수증기에 대한 투과성을 변화시킴으로 층분리 현상에도 영향을 미칠 것이라 예상되었다. 특히 Condebelt 건조시간이 충분하지 못했을 경우에는 지필 밖으로 배출되지 못한 지필 내의 기화 수증기가 층분리를 유발할 것으로 예상되었다. 이를 평가하기 위해 미세분 A와 미세분 B를 이용하여 미세분 함량이 40%, 평량 150 g/m<sup>2</sup>인 단층지를 제작하고 Condebelt 건조하였다.

미세분 종류에 따른 단층지의 층분리 현상을 파열강도와 층분리 발생 면적으로 평가한 결과 미세분 A가 미세분 B에 비해 강도는 낮으나 층분리 현상은 적게 발생시켰다. 미세분 A의 경우 건조시간이 4초 이하로 짧아질 경우 층분리 현상이 발생하였으며, 미세분 B의 경우에는 1.5초 이하로 건조시간이 줄어들 경우 층분리가 발생하였다. 피브릴 형태의 미세분 함량이 높은 미세분 A에서 층분리 현상이 심하게 발생하는 것은 피브릴 형태의 미세분들이 플레이크 형태의 미세분에 비해 두께가 얇고 섬유간 결합이 유리하여 지필의 공극을 더욱 채워줌으로써 지필의 투기도를 감소시키기 때문이다. 이러한 미세분 A의 특성은 시트의 밀도가 증가한 것으로도 확인할 수 있었다.

결과적으로 고해에 의해 발생된 퍼브릴 형태의 미세분이 Condebelt 건조 시 층분리 현상에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 Condebelt 공정 상 미세분 분급 운용 시 이를 고려하여야 할 것으로 판단되었다. 즉, 강도향상을 위하여 고해를 과도하게 할 경우 이로부터 유래된 미세분에 의한 층분리 현상이 발생하지 않도록 건조 공정 변수를 적절하게 조절하여야 할 것이다.

### 3.2. 미세분의 함량이 미치는 영향

#### 3.2.1. SEM 관찰

지필 내 미세분의 함량이 증가하면 탈수성과 투기도가 모두 감소한다. 이는 미세분이 섬유 사이의 공극을 차단하기 때문이다. 미세분의 이러한 영향은 SEM으로 촬영한 표면 사진에서도 확인할 수 있었다. 미세분이 첨가되지 않은 경우, 섬유와 공극의 구별이 명확하지만 미세분이 증가할수록 미세분이 섬유 사이의 공극을 메우고 더 나아가 섬유 위를 덮고 있어 섬유간의 구별이 점점 불명확해지고 있는 것을 알 수 있다.

#### 3.2.2. 단층지 평가

지필에 함유된 미세분 함량이 Condebelt 건조 시 층분리 발생에 미치는 영향을 확인하기 위해서 미세분 함량을 30%에서 40%, 50%까지 변화시켜가며 단층지를 제작하였고, 건조 시간 변화에 따른 층분리 현상을 평가하였다. 미세분 함량이 50%인 경우 층분리 현상을 억제하기 위해서는 미세분 A의 경우 5초 이상의 건조시간이 필요하였으나, 미세분의 함량이 30%로 감소하였을 경우에는 4초 이상의 건조시간으로도 충분히 층분리 현상을 억제할 수 있었다. 따라서 지필 내 미세분을 감소시킨다면 층분리 현상을 억제할 수 있을 것이라고 판단되었다. 미세분 B의 경우에도 미세분 A와 동일한 경향을 나타내었다.

또한 미세분 함량이 Condebelt 건조 효과에 미치는 영향을 확인하기 위해서 일정한 장섬유(평균 90 g/m<sup>2</sup>)에 미세분 A의 양을 20 g/m<sup>2</sup>씩 증가시켜 가며 각각 실린더 건조와 Condebelt 건조한 후 제반 물성을 측정하고 Condebelt로 건조된 종이의 강도 증가 비율을 구하였다. 그 결과 밀도, 인장강도, 압축강도 모두 미세분 함량이 증가할수록 실린더 건조한 종이에 비해 Condebelt로 건조한 종이의 강도 증가폭이 감소하였다.

앞서 언급했듯이 Condebelt 건조는 고온, 고압하에서 펄프섬유의 유연성을 증가시켜 섬유간 결합면적을 상승시킴으로써 제반 강도를 증가시키는 공정이다. 따라서 Condebelt 건조 시 미세분 함량이 증가할수록 Condebelt에 의한 강도 증가폭이 감소하는 것은 장섬유에 비해 미세분은 Condebelt 건조에 의해 유연성 증가가 적게 발생하기 때문이라고 판단된다.

그러므로 지필 내의 미세분양을 감소시키면 지필의 탈수성과 투기도 개선은 물론 층분리 현상도 억제할 수 있으며 Condebelt 건조에 의한 강도 향상 효과도 더욱 크게 발휘 될 수

있을 것이다. 그러나 재활용이 반복되는 국산골판지에는 미세분이 다량 함유되어 있으며 강도 개선을 위해 고해를 실시할 경우 또한 다량의 미세분이 발생하므로 미세분을 제거시켜 계 외로 배출시키는 것은 효율적이지 못하다. 따라서, 장섬유와 미세분을 분급하여 활용하는 방안을 마련하는 것이 바람직하다고 생각되었다. 이러한 방법의 일환으로 분급된 미세분을 상, 하층에 달리 분포시켜 이층지를 제조하는 방안을 검토하였다.

### 3.3. 미세분의 분포에 따른 층분리 현상

#### 3.3.1 단층지 평가

단층지에 있어 두께방향으로의 미세분 분포가 Condebelt 건조 시층분리 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해서 와이어 면(wire side)과 상부 면(top side)이 각각 상부 플레이트에 접하도록 하여 건조하고 층분리 면적을 측정하였다.

미세분 A의 함량이 증가함에 따라 동일 조건에서 층분리 현상이 더 심하게 발생하였으며 같은 미세분 함량의 경우에는 top 층을 상부 플레이트에 접하도록하여 건조한 경우 층분리가 심하게 발생하였다. 특히 미세분 함량이 40%인 경우, 와이어 면이 상부 플레이트에 접했을 경우에는 3초 이하로 건조하였을 때 층분리 현상이 발생하였으나, 상부면이 상부플레이트에 접했을 경우에는 4초 동안 건조해도 층분리 현상이 발생하였다.

Condebelt 내에서 습지필의 수분은 상부 플레이트에 의해 가열되어 기화되고, 기화된 수증기가 지필을 통과하여 하부 플레이트 상의 와이어에서 응축된다. 이때 습지필의 하층의 투기도가 낮으면 낮을수록 수증기의 배출이 어려워지고, 이러한 지필 외로 배출되지 못한 과도한 수증기 압력이 종이의 내부결합강도보다 클 경우 종이의 층분리를 유발시키는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 실험에서는 지필 표면이 상부 플레이트에 접한 상태에서 건조될 경우 미세분 함량이 상대적으로 높은, 즉 투기도가 낮은 수층지의 와이어 면이 하층에 위치하게 되므로 층분리 현상이 더욱 심화된 것으로 판단된다.

#### 3.3.2. 이층지 평가

단층지의 건조 방향을 변화시킴으로써 지필 하부에 미세분 함량이 높은 경우 수증기의 투과가 불량하여 층분리가 발생한다는 사실은 지필 하부의 미세분 함량을 낮게 유지시켜 층분리를 방지할 수 있다는 것과 같다. 이에 하부 지필의 투기도를 조절하는 방안으로, 층별 미세분 함량을 다르게 조절한 이층지를 제조하여 평가하였다. 이러한 이층지 제조 방법은 미세분 분급이 가능한 공정에서 특히 효과적 원료 운용을 가능하게 할 것으로 판단된다.

이층지의 제조를 위해 우선 상층에는 평량  $50\text{g/m}^2$ , 하층에는 평량  $100\text{g/m}^2$ 의 습지필을 2.2.3.2항에서 제시된 방법에 의해 합지하여 압착한 후 Condebelt 건조하였다. 하층의 투기도를 향상을 위하여 하층의 미세분 함량을 감소시켰으며 상대적으로 감소한 양만큼의 미세분을 상층에 투입하여 상층의 미세분 함량을 증가시켜 지필 내 미세분 함량은 동일하게 유지하였다.

그 결과, 하층의 미세분 양이 감소할수록 층분리 현상이 완화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 미세분을 계 외로 배출시키지 않고도 섬유 분급을 통하여 미세분의 분포를 변화시킨다면 층분리 현상을 억제하며 공정에 투입되는 에너지를 절감시키고, 더욱 운전 가능한 공정변수의 폭을 넓힐 수 있다고 기대된다. 또한 현재 운전되고 있는 Condebelt의 경우 이러한 층분리 문제로 인해 유입지의 건조도를 높게 유지하고 있지만, 본 연구에서 얻어진 결과를 바탕으로 초지할 경우 유입지의 건조도를 낮추면서 최적의 Condebelt 건조 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

Condebelt 건조 시 지필에 함유된 미세분의 종류, 함량 그리고 두께 방향 분포에 따라 층분리 현상이 어떻게 영향 받는지 연구한 결과는 다음과 같다.

고해에 의해 생성된 미세분과 해리만 하여 얻은 미세분을 현미경을 통해 관찰한 결과 고해를 통해 얻은 미세분은 피브릴 형태의 미세분이며, 해리를 통해 얻은 미세분은 플레이크 형태의 미세분이 다량으로 포함되어 있음을 확인하였다. 이러한 미세분의 형태적인 차이에 의해서 고해에 의해 생성된 미세분을 장섬유에 혼합하여 초지하였을 경우 투기도가 크게 저하되었으며 이는 Condebelt 건조시 층분리 현상을 심화시키는 원인이 될 것으로 판단되었다.

미세분 함량이 증가함에 따라 미세분이 섬유간 공극을 메우고 있음을 SEM 사진을 통해 확인하였으며 이에 따른 투기도 저하로 층분리 현상이 심화됨을 확인하였다. 또한 이러한 미세분 함량이 증가함으로 Condebelt 건조에 의한 강도 향상 효과도 감소하였다.

미세분이 종이의 두께 방향으로 다르게 분포하고 있다는 종이의 양면성에 착안하여 수초지의 와이어면과 상부면을 각각 Condebelt의 상부 플레이트에 접촉하도록 하여 건조한 결과 지필 하부의 미세분 함량이 높을수록 층분리 현상이 심화됨을 확인하였다. 지필 하부의 미세분 함량을 변화시키기 위해서 이층지를 제작하여 하층의 미세분 함량을 감소시키고 그 양만큼을 상층지에 투입하여 지필내의 미세분 함량은 동일하게 유지하여 Condebelt 건조하였을 때 하층의 미세분양이 감소할수록 층분리 현상을 억제할 수 있었다.