

# 섬유간 결합강도 발현의 총괄적 이해

박종문

충북대학교 산림과학부

## I. 서론

종이의 특성들은 주로 섬유간의 결합에 의해 결정된다. 종이 내의 결합수(number of bonds)에 직접 관련된 강도적 특성은 특히 그러하다. 종이의 불투명도, 평활도, 기공성, 치수안정성, 기공크기 분포, 지분발생 경향, 밀도, 강직성, 지합, 압축성 등도 섬유간 결합에 의해 결정된다.

일반적으로 결합수를 변경하는 방법은 섬유원료 선택과 고해처리이다. 그러나 고해공정 또는 기타 공정에 의해 신제품 생산과 초지기 생산성 향상시키는 데에는 한계가 있기 때문에, 지금도 새로운 방법을 찾기 위해 많은 노력을 경주하고 있다.

결합(bonding)과 조인트 강도(joint strength)는 같은 뜻의 용어로 보고, 이것은 adhesion zone(2차원적 결합)과 cohesion zone(3차원적 결합)을 포함한다.

근래에 들어 결합강도에 대한 이해도 상당한 변화가 있었다. 그동안 수많은 노력을 하였지만 결합의 분자적 메카니즘(molecular mechanism)은 아직도 초보 단계이다. 아직도 여러 가지 상황에서 수소결합(hydrogen bonds), 이온결합(ionic bonds), 그리고 이극성 상호작용(dipolar interactions : 극성 상호작용(polar interaction), long-range van der Waals forces, 공유력(covalent forces))의 상대적 공헌도에 대해 근본적인 논쟁이 있다. 극단적 예를 들어 보면, 예전에는 리그닌이 많은 펄프섬유의 결합에 리그닌은 수소결합에 공헌을 하지 못하므로 섬유결합에 약간밖에 공헌을 하지 못한다고 알려져 왔었다. 그러나 이제는 기계적으로 처리된 펄프섬유간에 강한 결합이 형성됨을 인식하게 되었다.

따라서 이 논문에서는 현재의 종이강도 이론과 adhesive failure 메카니즘과 cohesive failure 메카니즘을 리뷰해 보고자 한다.

## II. 본론

### 1. 종이의 건조강도

일반적 이해

종이의 강도를 단순화시켜 이해한다면 다음과 같은 영향인자에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

- 섬유강도와 길이
- 섬유 결합(fiber bond)의 강도(즉 specific bond strength(SBS)와 상대결합면적(RBA))
- 지합
- 응력 분포 - 잔여 응력(residual stresses)

시판되는 건조지력 증강제 첨가효과는 섬유의 고해효과보다 일반적으로 작다. 따라서 건조지력 증강제를 평가할 때는 지합, 미세분 보류도, 습윤압착을 일정하게 유지하는데에 유의해야만 한다. 지합은 강도에 큰 영향을 끼치므로 주의해야 하는데, 많은 건조지력 증강제가 양성(cationic)을 띠고 있어서 보류가 변하고, 또 그에 따라 지합이 악화되기 때문이다.

Leech(1954)에 의하면 locust bean gum의 첨가에 의한 강도향상은 결합강도의 향상이 65%, 지합향상이 25%, 결합수의 증가가 15%이라고 하였다. Stratton and Colson(1993)은 약한 결합(weak bond)의 경우 섬유와 섬유의 인터페이스에서 섬유표면에 손상을 입히지 않고 파괴된다고 하였다. 강한 결합(strong bond)의 경우 한쪽 또는 양쪽 섬유 표면에서 마이크로 피브릴이 뜯겨져 나오면서 파괴된다고 하였다. 가장 강한 결합의 경우에는 한쪽 또는 양쪽 섬유의 표면에서 S1-S2 인터페이스에서 파괴가 일어나며, S1층의 상당한 전단(shearing)이 일어난다고 하였다.

건조지력 증강제가 섬유벽 내(act internally in the cell wall of fibers)에서 작용을 하는 것인지, 섬유표면에서 흡착을 돕는 것인지 아주 명확치는 않지만, 많은 현상(고분자량의 건조지력 증강제의 강도향상 효과가 더 큼, 용액내로 더 빨어나간 저전하밀도의 PAM가 고전하밀도의 PAM보다 효과가 큼)을 관찰해 볼 때, 표면 흡착(surface adhesion) 메카니즘으로 보여진다.

비결합강도(specific bond strength)는 향상시키나 상대결합면적(RBA)을 증가시키지 않

는 지력증강제는 두께가 유지되나, 상대결합면적을 증사시키는 지력증강제는 밀도가 증가한다. 고해처리에 의하면 밀도가 상승하므로, 불투명도와 두께가 중요한 지종에서는 오히려 비결합강도를 향상시키는 지력증강제가 유리한 경우가 있다. 건조지력 증강제는 섬유 유연성에는 영향을 끼치지 않으며, 결합강도와 습지형성(consolidation)에 영향을 끼친다.

어떤 지력증강제는 건조과정 중에 응력집중 현상을 감소시키는 효과가 관찰되므로 건조지력 증강제 작용에는 최소한 다음의 3가지 메카니즘이 있다고 믿어진다.

- 습지형성(consolidation)
- 비결합강도의 향상
- 종이 내에서의 응력집중 감소 효과

Table 1에 요약하였는데, 중요한 것은 단일 메카니즘만 작용하는 것이 아니라 몇 가지의 메카니즘이 혼합적으로 작용한다는 것이다.

Table 1. 지력 증강제 작용 메카니즘

메카니즘	인장강도	탄성을	신장을	종이 밀도
습지형성 향상	+	+	+/-	+
결합강도 향상 작용	++	0	+	0
응력 완화 작용	+	+	++	0

건조지력 증강제 개발에 최고의 목표는 고해공정의 완전한 대체이다. 그러면 CD방향의 지필수축이 감소되고, 종이 모서리 품질 향상, 표면 평활도 향상, 치수안정성 향상 등의 결과가 나타나게 된다. 섬유의 고해는 섬유팽윤의 증가가 야기되므로 습윤압착에 근본적인 저해가 된다. 고해공정을 지력증강제로 대체한다면 습윤압착시 지필의 고형분 농도가 상승하고, 건조능력 한계의 초지기에 있어 생산성을 급격히 향상시킬 수 있다.

## 2. 섬유-섬유간의 결합형성과 결합면적의 특성

다음과 같은 사항을 이해할 필요가 있다.

### 섬유간의 접촉 형성

- 기계적 힘(mechanical forces)
- 화학적 힘(chemical forces)

### 섬유-섬유간의 결합형성

섬유간의 거리가 충분히 가까우면 다음 3가지 상호작용의 균형에 따라 섬유간의 상호작용이 일어난다.

- 모세관 힘
- attractive van der Waals forces
- repulsive electrostatic forces

### 분자적 접촉(molecular contact)

- partly joined area
- area not available for light scattering,  $d < \lambda/2$

### 섬유-섬유간의 표면결합 메카니즘

- 얽힘(interlocking) 메카니즘
- 확산(diffusion) 메카니즘
- 수소결합(hydrogen bonding) 메카니즘
- 정전기적 상호작용(electrostatic interactions) 메카니즘

### 결합부분의 특성

- 고체상(solid-like)
- 부정형상(amorphous)
- 액체상(liquid-like)

### 결합강도와 종이강도의 상호관계

- 결합면적(joined area)
- 결합강도(joint strength)
- 종이강도(sheet strength)

### III. 결론

종이의 많은 특성은 섬유간의 결합특성에 좌우된다. 최근 들어 기자재의 발달과 함께 섬유간의 결합에 대한 이해가 향상되었다. 섬유간의 접촉 형성, 섬유-섬유간의 결합형성, 분자적 접촉(molecular contact), 섬유-섬유간의 표면결합 메카니즘, 결합부분의 특성, 결합강도와 종이강도의 상호관계 등에 대한 이해를 바탕으로 신제품 생산 또는 생산성 향상을 위해 노력해야 하겠다.

\*본 논문은 2005년 9월 영국 캠브리지에서 열린 13차 기본연구심포지움에서 Lindstrom, T. 등이 발표한 내용과 본인의 이해를 바탕으로 작성되었음을 알립니다.

Lindstrom, T., Wagberg, L., Larsson, T., On the nature of joint strength in paper - Review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing, pp. 457-562, 13th Fundamental Research Symposium, Cambridge, September 2005.