

섬유의 컬화가 종이의 물성에 미치는 영향

이재훈 · 최영숙 · 원종명

강원대학교 산림과학대학 제지공학과

1. 서론

최근 제지업계에서는 품질개선 및 생산원가 절감을 위하여 표백, 펄핑 및 지료조성 공정에서 펄프를 중·고농도로 처리하는 것이 보편화되고 있다. 이러한 중·고농도 처리 기술로 지료조성 공정 중 펄프 현탁액의 부피를 감소시킬 수 있게 되었고 이로 인하여 생산원가와 운전비용의 절감, 부대장치의 용량감소뿐만 아니라 제지공정에서 사용되는 물의 양을 줄이는데 기여한 것은 사실이다. 반면에 고농도로 펄프를 처리함에 따라 섬유의 손상과 같은 부작용이 수반되는 경우도 있음이 보고된 바 있다.⁽⁸⁾

일반적으로 알려진 기계적 처리는 고해이며, 펄프를 고해하면 펄프섬유에 기계적 작용이 가해지면 펄프 현탁액에서의 섬유는 단섬유화, 외부 피브릴화, 내부피브릴화, 미세섬유의 생성 등 다양한 변화가 수반된다. 이 외에도 섬유가 꼬이거나, 비틀리는 현상, 접히는 변화, 길이 방향으로 갈라지는 현상, 펄프 섬유 길이방향으로 신장되거나 압축되는 변화, 세포벽 구성성분의 부분적 용해와 같은 다양한 변화가 발생할 수도 있다. 이렇듯 고해가 진행될수록 불투명도와 종이의 비용적은 저하하며, 인장강도, 파열강도, 내절도는 계속적으로 증가한다고 알려져 있다.⁽²²⁾ 오래 동안 섬유의 컬과 결함이 종이의 성질에 중요한 영향을 준다고 알려져 왔지만 이러한 섬유의 컬과 결함들이 종이의 성질에 미치는 영향에 대하여선 많은 논의가 이루어지지 않았으며 다만 화장지 제조공정에서 Bulk를 제공하기 위하여 섬유의 컬을 일부 이용하는 것으로 알려져 있다.⁽²⁰⁾

본 실험에서는 펄프섬유에 기계적 처리에 의한 섬유컬화의 경향을 알아보고 Mixing단계에서 형성된 장섬유의 컬이 종이의 물성에 어떠한 영향을 미치는지 실험하였으며 그 원인에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

펄프는 국내 K사에서 사용하는 침엽수 표백 크라프트 펄프를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 섬유의 컬화

Sw-BKP를 3%농도로 해리 하여 ADIRONDACK MACHINE COPR.에서 제작한 'FORMAX 450H Laboratory Pulper'로 로터속도를 1700rpm으로 하여 Table 1의 조건별로 처리하였다.

Table 1. Various treatment conditions

Consistency of stock (%)	1	5	10	15
Mixing time (min.)	5	10	20	30

2.2.2 섬유 특성

Image Analysis system을 이용하여 식(1) 및 Fig. 1과 같은 방법으로 Fiber Curl Index를 측정하였으며, 상기 처리된 펄프의 여수도 및 WRV를 측정하였다.

$$\text{Fiber curl index} = \left(\frac{L}{l}\right) - 1 \quad (1)$$

L : The fiber contour length,
l : The distance between the fiber end

Fig. 1

2.2.3 수초지 제조 및 습부 압착 압력

각 조건별로 TAPPI standard T205 om-88에 의거하여 초지하였으며 초지 전에 지료의 여수와 WRV를 측정하였다. 습부압착압력은 50, 100, 200 및 300psi로 조절되었으며, 수초지의 목표평량을 평량 60g/m²로하여 열풍 건조기에서 105℃로 건조하였다.

2.2.4 수초지의 물성측정

제조된 수초지는 TAPPI standard T402 om-83에 따라 온도 23±1℃, 관계습도 50±2%로 조절되는 항온·항습실에서 조습처리를 실시한 후 인장강도(T404 om-87), 인열강도(T414 om-98), Opacity(T519 om-96), 내부결합강도(T541 om-89) 및 겉보기밀도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Curl 발생 및 섬유변화

Table 2에서 볼 수 있듯이 섬유에 기계적 처리를 오래할수록, 처리 농도가 증가할수록 섬유의 굵이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 기계적 처리에 의하여 섬유들간의 마찰, 1차 세포벽의 제거 등의 변화에 의하여 섬유 팽윤의 정도, 외부 피브릴화, 세포벽간의 탈층 등의

섬유 자체의 변화에 의한 것이라 사료된다. Fig. 2는 해리 하여 기계적 처리를 하지 않은 섬유로써 섬유 외벽에 특별한 변화가 없음을 보여준다. Fig. 3은 650ml CSF로 고해한 한 섬유형상이며 약한 고해로 인하여 외부 피브릴화가 일어남을 보여주고 있다. Fig. 4와 5는 15%농도에서 30분간 처리한 섬유의 형상을 나타낸 것이며, 섬유에 기계적 처리를 함에 따라 부분적으로 섬유의 피브릴이 외부에 노출되거나 약간의 미세분이 형성됨을 관찰할 수 있었고 Fig. 5와 같이 섬유의 절단도 일부 관찰되었다.

Table. 2. The fiber curl index at various treatment conditions

Mixing time (min.)	Consistency, %				
	Control	1	5	10	15
Control	0.131	-	-	-	-
5	-	0.132	0.156	0.177	0.192
10	-	0.148	0.169	0.187	0.254
20	-	0.158	0.202	0.265	0.289
30	-	0.18	0.22	0.259	0.264

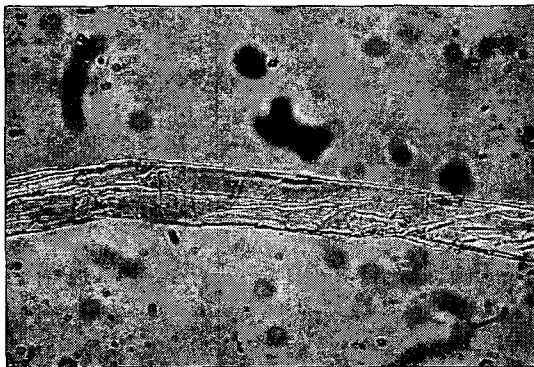


Fig. 2. Micrograph of untreated SwBKP(450×).

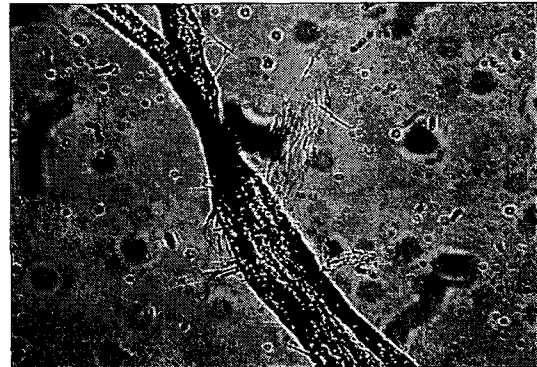


Fig. 3. Micrograph of mild beaten SwBKP (650ml CSF, 450×).

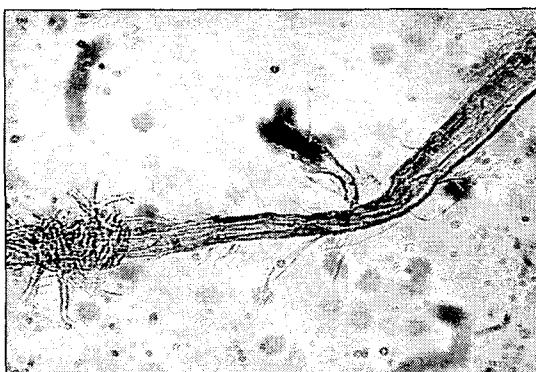


Fig. 4. Micrograph of SwBKP with extending mechanical treatment(450×).

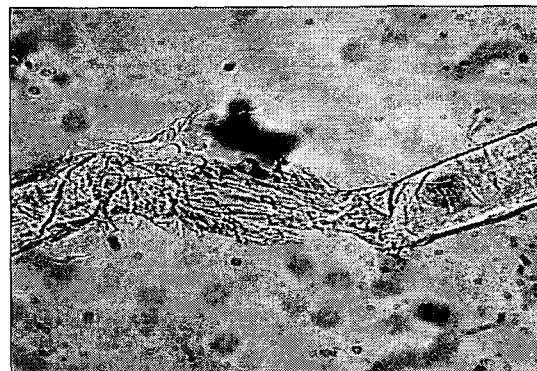


Fig. 5. Micrograph of SwBKP with extending mechanical treatment(450×).

3.2 여수도와 WRV변화

Fig. 6에서 보는바와 같이 처리농도와 시간이 증가할수록 여수도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 섬유에 기계적 처리가 가해짐에 따라 섬유가 유연해지고^(8,10) 외부 피브릴화가 일어나 여수도 측정시 섬유가 치밀한 매트를 형성하여 측정시 물빠짐이 늦어지기 때문이라 사료된다. Fig. 7은 curl index의 변화에 따른 여수도의 변화를 나타낸 것이며 섬유의 길이 증가할수록 CSF가 감소하는 경향을 보여준다.

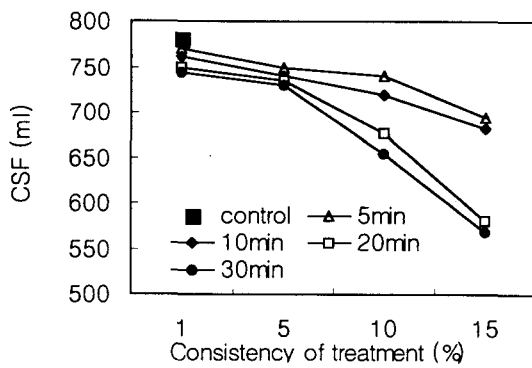


Fig. 6. The change of freeness at various condition.

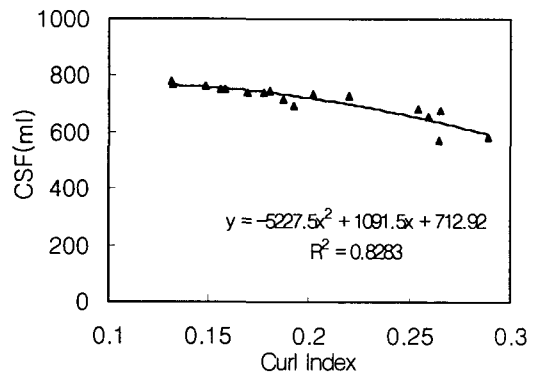


Fig. 7. The correlation between curl index and freeness.

다양한 처리조건이 섬유간 결합특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그 간접지표로 사용되는 WRV를 측정 한 결과는 Fig 8, 9와 같이 처리 농도와 처리시간이 증가할수록 curl index가 증가하였으며 또한 WRV값이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. WRV 즉 보수도는 펄프를 원심탈수 후 펄프 자체가 보유하고 있는 물의 양을 측정하여 펄프와 물과의 친화력을 측정 한 것이므로 기계적 처리를 많이 받은 섬유 세포벽이 부분적으로 제거되면서 물과 결합이 용이한 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 비결정 영역이 물에 노출되어 시료가 보유하는 물의 양이 증가된 것으로 사료된다.

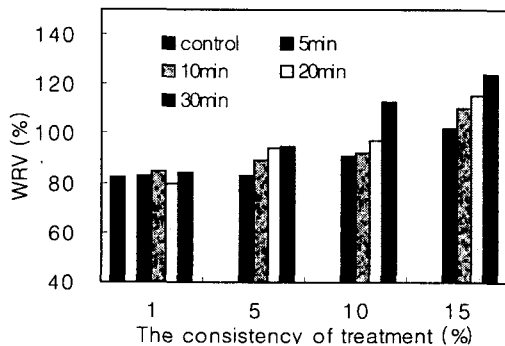


Fig. 8. The change of WRV at various conditions.

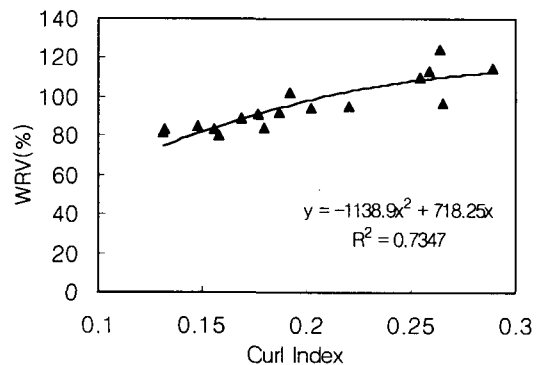


Fig. 9. the correlation between curl index and WRV.

3.3 종이의 물성

3.3.1 Apparent Density

밀도는 종이의 가장 중요한 물리적 특성중의 하나다. Fig10~13은 습부 압력변화별 겔보기 밀도를 측정한 것이다. 여수도가 감소함에 따라 밀도가 증가하는 것은 Mixing에 의하여 섬유유연성 증가, 외부 피브릴화 및 섬유 붕괴(collapse)⁽¹⁷⁾에 의한 Campbell effect의 증가에 인하여 섬유 결합이 증가하여 공극이 적어짐에 따라 종이의 구조가 치밀하게 이루어 졌기 때문이라 생각된다. 또한 습부압력의 증가에 따라 밀도도 증가하는 경향을 볼 수 있다. Fig14은 Curl index의 증가에 따른 겔보기밀도 증가 경향을 보여주고 있다.

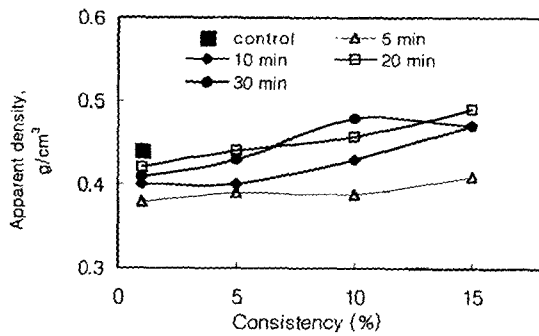


Fig. 10. The change of apparent density(wet pressing pressure : 50 psi).

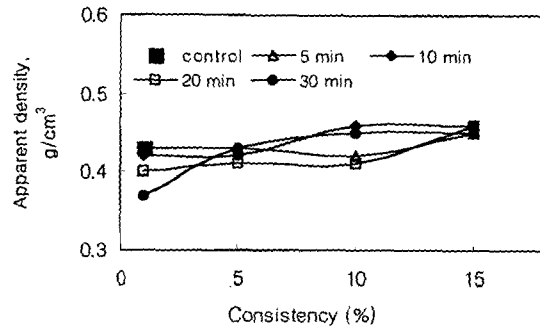


Fig. 11. The change of apparent density(wet pressing pressure : 100 psi).

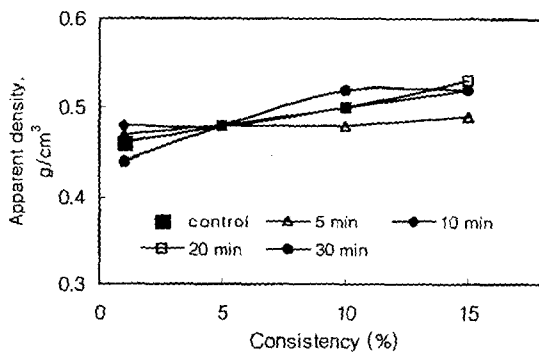


Fig. 12. The change of apparent density(wet pressing pressure : 200 psi).

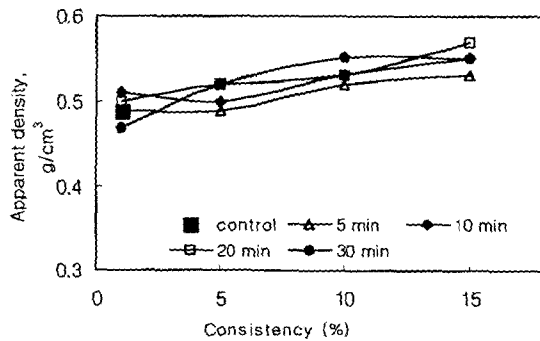


Fig. 13. The change of apparent density(wet pressing pressure : 300 psi).

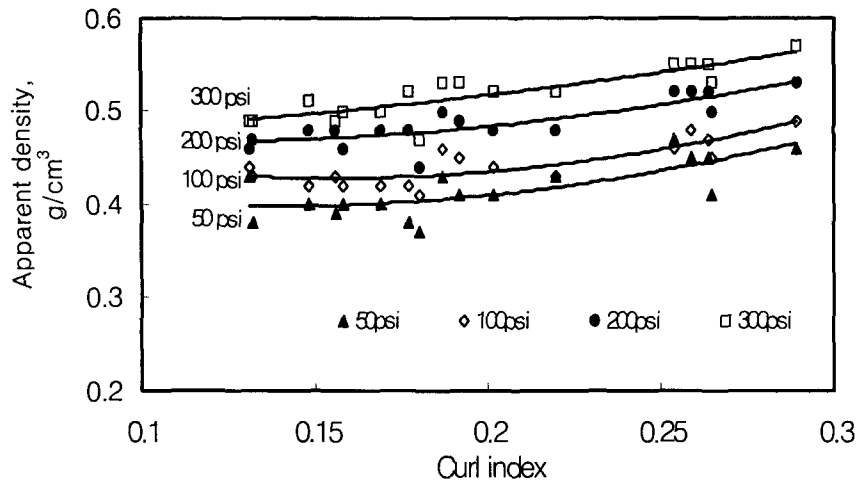


Fig. 14. The correlation between curl index and apparent density.

3.3.2 Opacity

불투명도는 종이의 광산란계수 및 광흡수도계수에 의해 크게 영향을 받는다. 본 실험에서는 Fig 15~19에서 볼 수 있듯이 처리시간과 농도 컬발생이 증가할수록 불투명도는 감소하였으며 밀도의 증가에 따라서도 불투명도가 감소하였다. 이는 섬유에 기계적 처리를 하여 섬유간 결합이 증가하여 지필이 치밀해져 빛의 산란과 굴절이 많이 일어나는 공극의 감소로 Opacity가 감소하였다고 사료된다. 또한 습부압착압력이 변화함에 따라 겉보기밀도가 증가하여 opacity는 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig 20은 각 습부압력변화별로 겉보기밀도가 증가함에 따른 불투명도의 감소경향을 나타낸다.

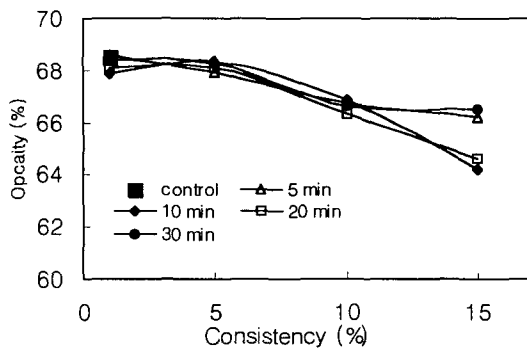


Fig. 15. The change of opacity(wet pressing pressure : 50 psi).

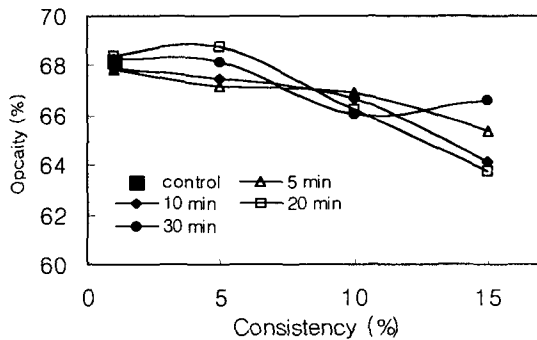


Fig. 16. The change of opacity(wet pressing pressure : 100 psi).

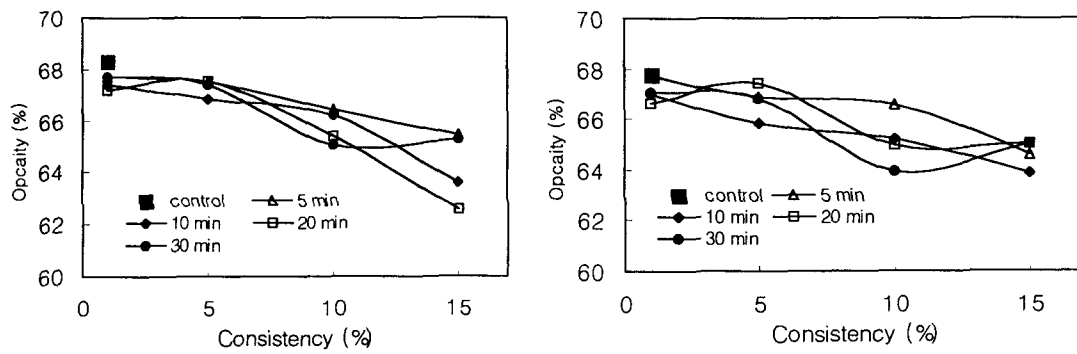


Fig. 17. The change of opacity(wet pressing pressure : 200 psi). Fig. 18. The change of opacity(wet pressing pressure : 300 psi).

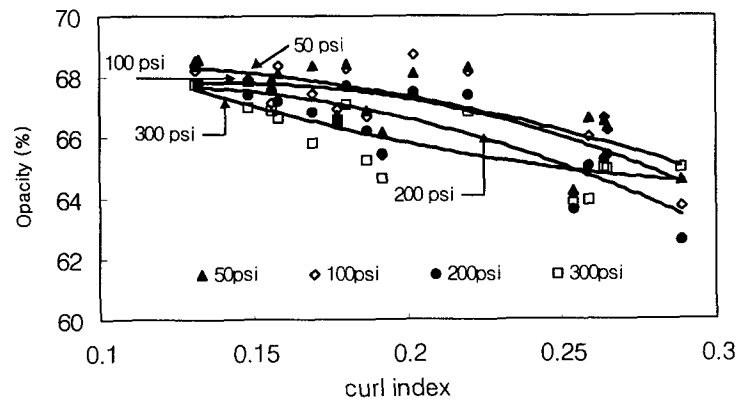


Fig. 19. The correlation between curl index and opacity.

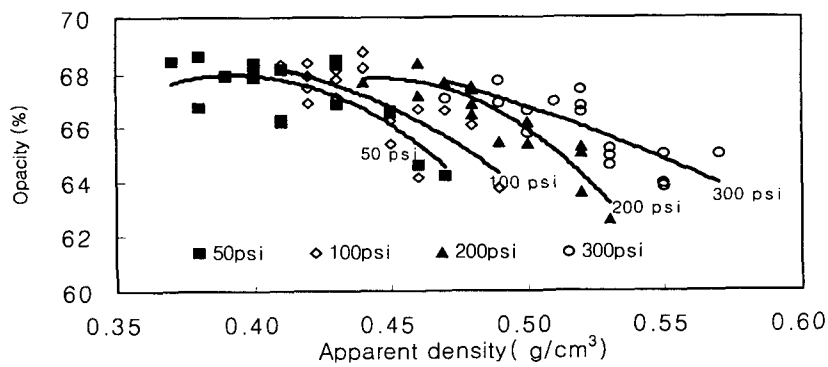


Fig. 20. The relationship between apparent density and opacity.

3.3.3 인장강도

인장강도는 종이의 가장 기본적인 물리적 성질이다. Fig21~24는 기계적 처리가 가해짐에 따라 인장강도의 증가를 보여주고 있다. 이러한 현상은 기계적 처리에 의하여 섬유들의 응성이 좋아지고 유연해져서 섬유결합이 향상되었기 때문이라 사료된다.

Fig. 25에서 볼 수 있듯이 습부압착압력이 증가할수록 인장지수는 증가하는 경향을 보이는데 이는 습부압착압력의 증가에 따른 섬유간 결합증가에 의한 것이라 사료된다.

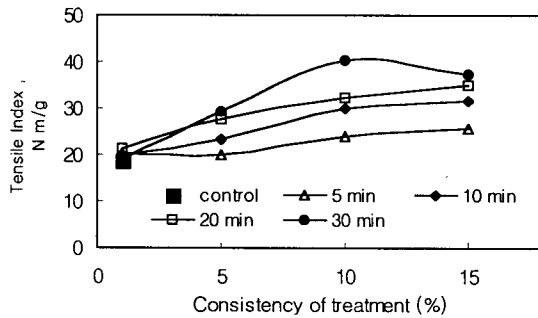


Fig. 21. The change of tensile index(wet pressing pressure : 50psi).

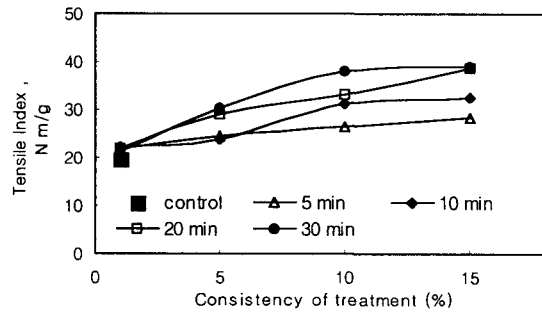


Fig. 22. The change of tensile index(wet pressing pressure : 100 psi).

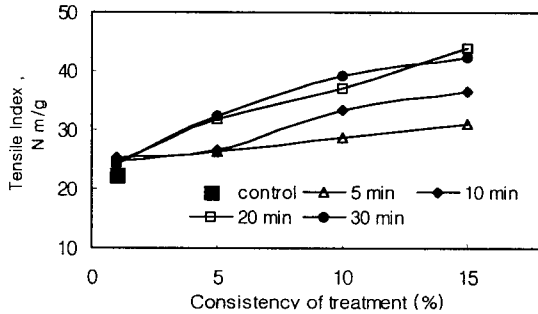


Fig. 23. The change of tensile index(wet pressing pressure : 200 psi).

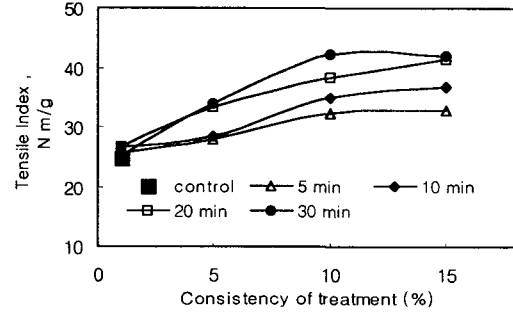


Fig. 24. The change of tensile index(wet pressing pressure : 300 psi).

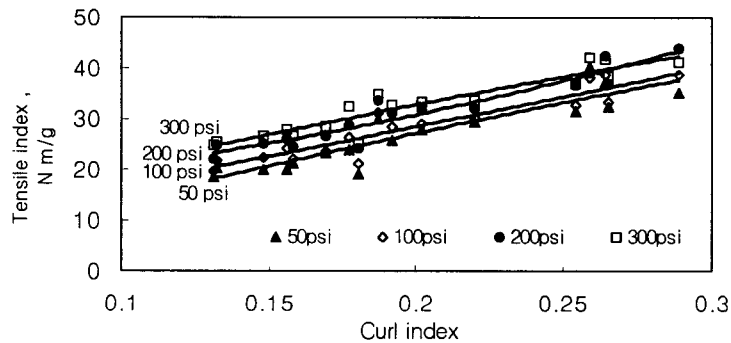


Fig. 25. The correlation between curl index & tensile index.

3.3.4 Strain

Fig. 26~29에서 볼 수 있는 것과 같이 미처리시와 처리시 Strain에 커다란 차이를 보이는 것은 처리에 의하여 섬유질의 쪼개짐이 증가 되었기 때문이라 사료된다. 또한 Strain은 통상 고해함에 따라 증가하고 short, free stock의 사용과 heavy pressing등에 의하여 감소하지만 본 실험에서 습부압력이 변하여도 수초지의 신장성이 커다랗게 변하지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 Fig. 30에서 볼 수 있듯이 쪼개짐 증가에 따라 strain이 증가하는 경향을 나타내는데 이는 종이에 인장하중이 가해질 때 쪼개진 섬유가 스트레칭 되기 때문이다. Table 3은 섬유를 고해할 경우와 mixing을 통한 기계적 처리를 할 경우 종이의 물성을 비교한 것으로 고해에 의하여 종이의 강도적 특성은 향상되나 신장성은 오히려 Mixing에 의하여 더 향상되는 것이 관찰되었다.

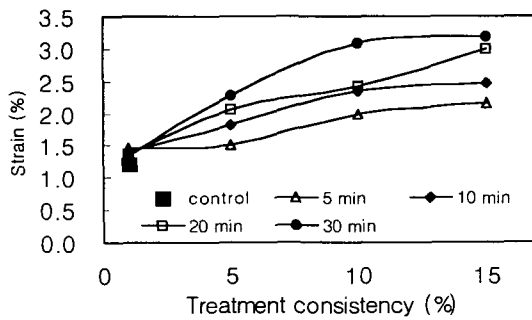


Fig. 26. The change of strain(wet pressing pressure : 50 psi).

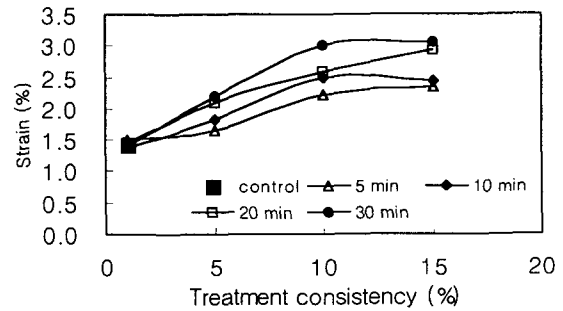


Fig. 27. The change of strain(wet pressing pressure : 100 psi).

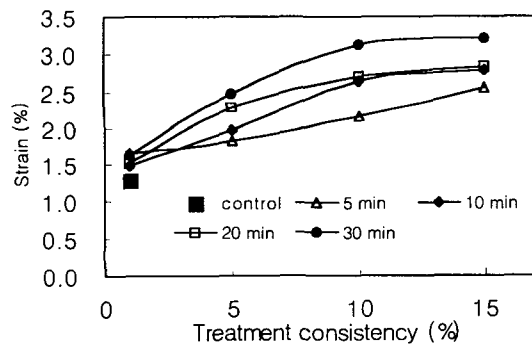


Fig. 28. The change of strain(wet pressing pressure : 200 psi).

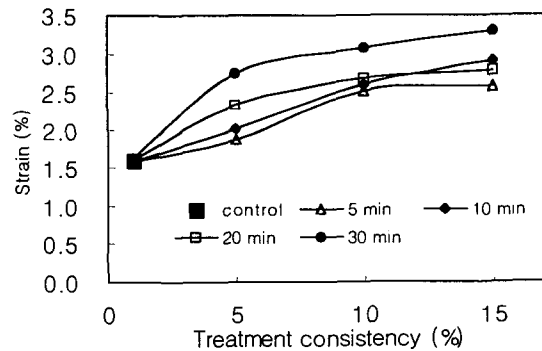


Fig. 29. The change of strain(wet pressing pressure : 300 psi).

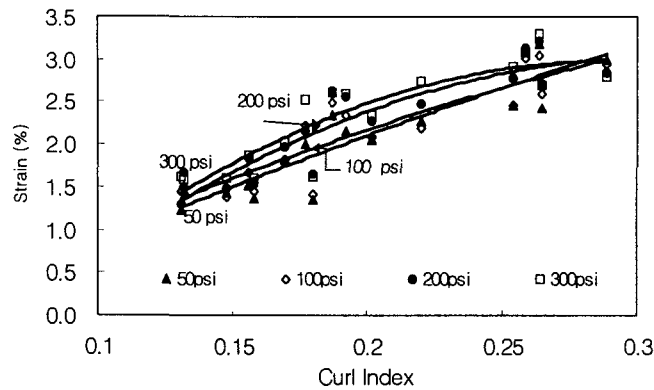


Fig. 30. The correlation between curl index and strain.

Table 3. Comparison mixing with beating at the similar freeness.

	Freeness (ml, CSF)	WRV (%)	AD (g/cm ³)	opacity (%)	TI (Nm/g)	Strain (%)	Scottbond (psi)
Mixing	569	124	0.45	66.53	37.29	3.18	69.8
Beating	550	134	0.61	66.32	79.23	1.8	153.25

주)* AD : Apparent density TI : Tensile index

* mixing은 15%농도에서 30분간 행하여 졌으며 습부압착압력은 50 psi를 기준으로함.

3.3.5 응력-변형곡선

Fig. 31은 습부압력이 50psi 일 때 각 조 건별 stress & strain 곡선은 그린 것이다. 일반적으로 종이의 strain이 증가하면 stress는 감소하는 경향을 보이나 본 실험에서는 처리시간과 농도가 증가할수록 stress와 strain이 모두 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 32는 미처리 펄프와 15%농도에서 30분간 Mixing처리를 한 펄프로 만든 수초지의 습부압착압력 변화에 따른 stress & strain 곡선을 그린 것이다. 펄프를 미처리한 경우 습부압착압력을 증가시킬 경우 Stress와 Strain이 모두 증가하는 경향이 있으나 기계적 처리를 할 경우 습부압착압력을 증가시킬수록 Strain은 감소라고 Stress는 증가하였다.

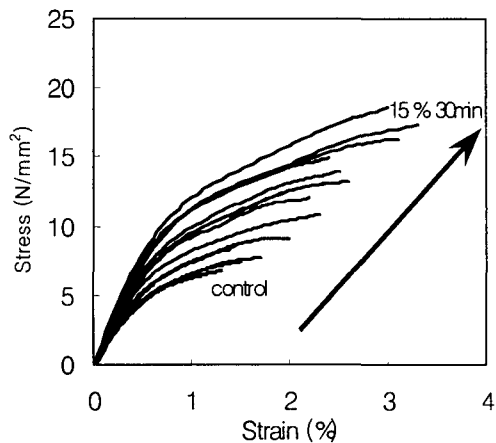


Fig. 31. Variation of Stress-strain curve (wet pressing pressure : 50psi).

3.2.6 인장에너지 흡수

Fig. 33~36은 처리조건의 변화에 따른 TEA변화를 나타낸 것이다. TEA는 기계적 처리 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주었다. Fig. 37에서 볼 수 있듯이 습부압착압력과 컬이 증가할수록 TEA는 증가하며 특히 이러한 특성은 포장재료를 사용하거나 인장하중을 많이 받는 인쇄용지의 경우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

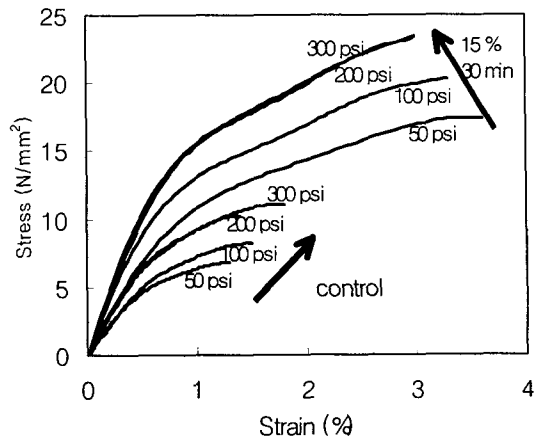


Fig. 32. The stress & strain curve at different wet pressing pressure.

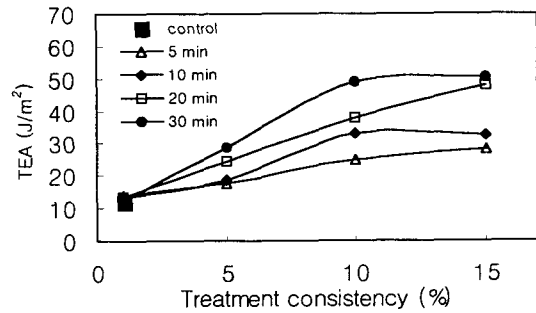
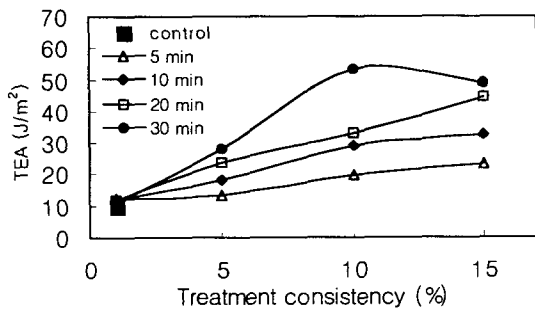


Fig. 33. Change of TEA by mechanical treatment (wet pressing pressure : 50 psi).

Fig. 34. Change of TEA by mechanical treatment (wet pressing pressure : 100psi).

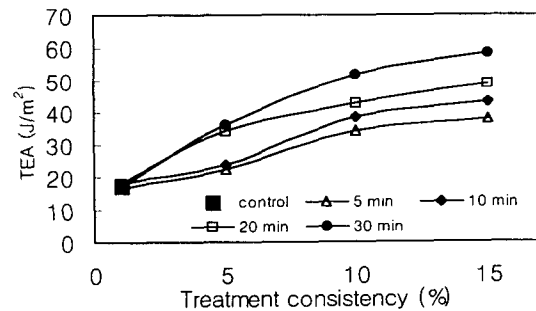
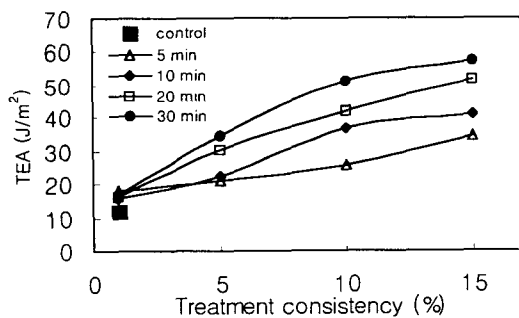


Fig. 35. Change of TEA by mechanical treatment (wet pressing pressure : 200psi).

Fig. 36. Change of TEA by mechanical treatment (wet pressing pressure : 300psi).

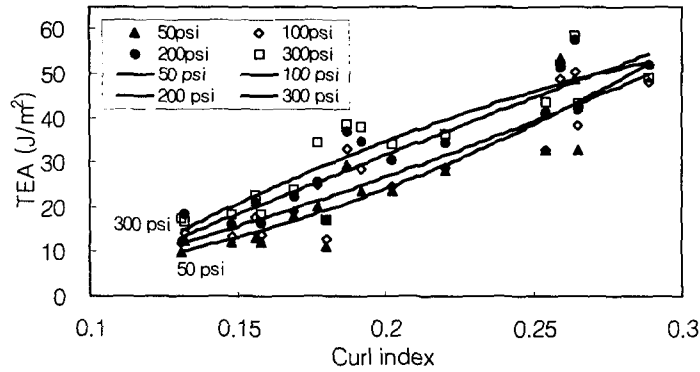


Fig. 37. The correlation between curl index and TEA.

3.2.7 인열강도

인열강도는 주로 두 가지 이유에 의하여 나타나는데, 섬유간 결합이 적을 때는 섬유간 마찰에 의하여, 섬유간 결합이 충분할 때는 섬유가 끊어지면서 인열강도를 나타내게 된다. 이때 필요한 일량이 인열강도가 되며, 위의 두 가지 경우 중에 마찰이 인열강도에 훨씬 더 많은 영향을 끼친다.

인열강도는 고해의 정도, 섬유장, 섬유간 결합정도 및 평량에 따라 달라지며 섬유의 길이가 증가할수록 함께 증가한다. Fig. 38~42에서 볼 수 있듯이 처리농도의 증가에 따라 초기에 인열강도가 증가하였다 현상을 유지하거나 감소하는 경향을 보여주며 또한 모든 습부압 착조건에서 curl index가 증가할수록 인열이 증가하다가 어느 수준 이상에서는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

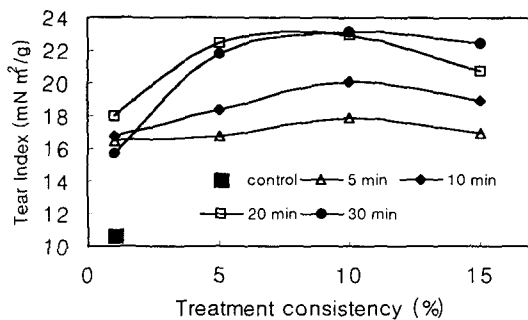


Fig. 38. The change of tear index(wet pressing pressure : 50psi).

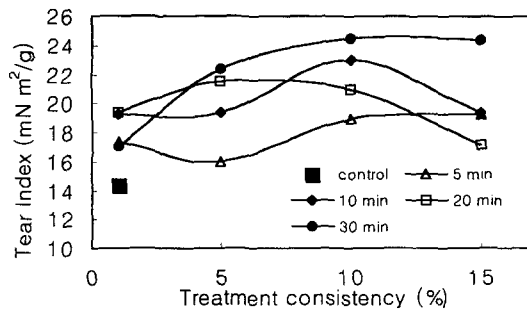


Fig. 39. The change of tear index(wet pressing pressure : 100psi).

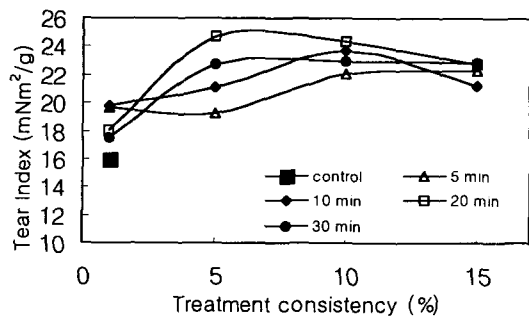


Fig. 40. The change of tear index(wet pressing pressure : 200psi).

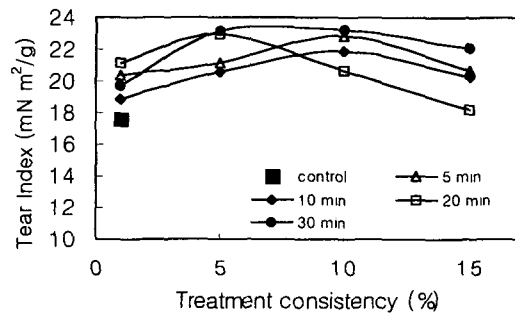


Fig. 41. The change of tear index(wet pressing pressure : 300psi).

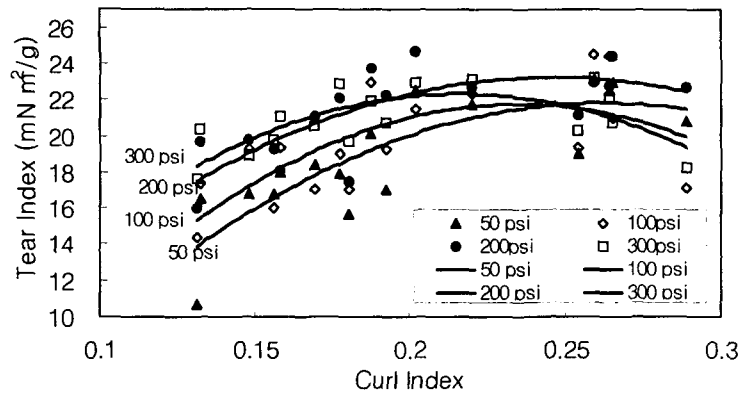


Fig. 42. The correlation between curl index and tear index.

3.2.8 내부 결합강도

Fig. 43~47은 펄프에 기계적 처리 및 습부압착압력의 증가에 따라 내부결합강도가 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 Sheet 내부 섬유간 결합증가에 의하여 내부결합강도가 증가하였기 때문이다. Fig. 42.는 섬유의 curl index가 증가할수록 내부결합강도가 향상되는 것을 보여주고 있으며 이러한 경향은 습부압착압력의 증가 시에도 동일하게 관찰되었다.

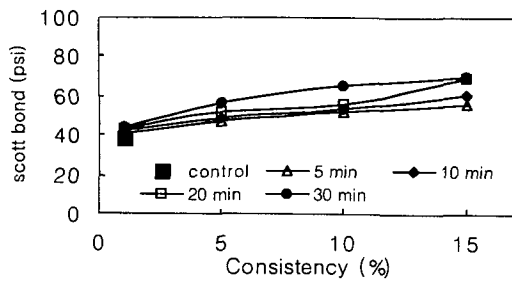


Fig. 43. Change of internal bonding strength by mechanical treatment(wet pressing pressure : 50psi).

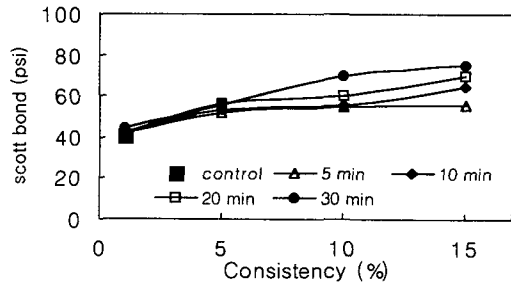


Fig. 44. Change of internal bonding strength by mechanical treatment(wet pressing pressure : 100psi).

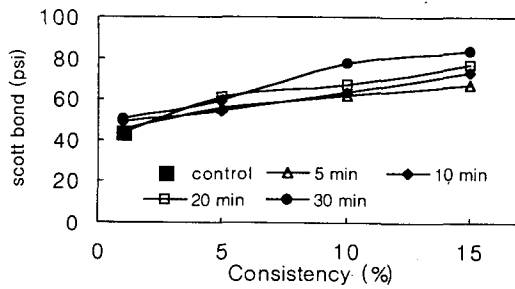


Fig. 45. Change of internal bonding strength by mechanical treatment(wet pressing pressure : 200psi).

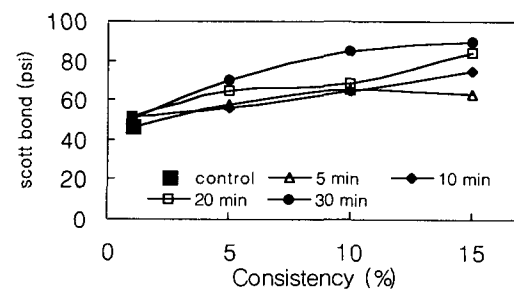


Fig. 46. Change of internal bonding strength by mechanical treatment(wet pressing pressure : 300psi).

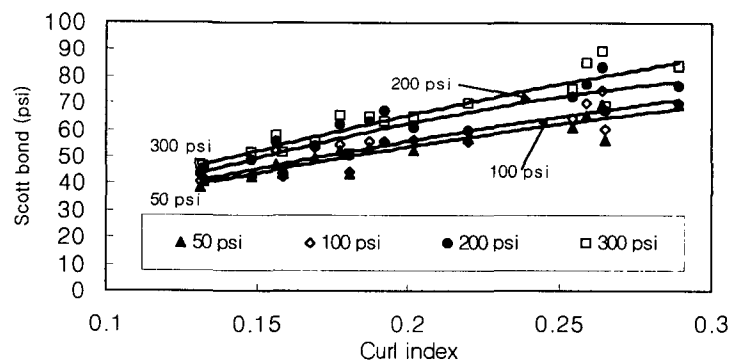


Fig. 47. The correlation between curl index and internal bonding strength.

4. 결 론

본 실험에서는 펄프섬유를 실험실용 펄퍼를 이용하여 Mixing과 같은 기계적 처리를 가하였을 때 섬유의 형상변화 즉 섬유의 컬화와 종이의 특성에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 펄프를 기계적 처리할 경우 섬유의 컬화는 증가하며 지료의 여수도는 감소하였고 WRV는 증가하였다.
2. 섬유에 기계적 처리가 가해짐에 겉보기 밀도는 증가하고 불투명도는 감소하였다.
3. Mixing에 의하여 종이의 인장강도와 내부결합강도는 증가하였고, 인열강도는 초기에 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 나타내었다.
4. 섬유의 컬화가 진행됨에 따라 종이의 strain과 TEA는 계속적으로 증가하는 경향을 보였다.

REFERENCES

1. Beghell, L. and D. Eklund, Nord. Pulp Pap. Res. J. 12(2): 119-123(1997).
2. McKinney, R.W.J. and M. Roberts, 96 Conference, London: 17(1996).
3. McKinney, R.W.J. and M. Roberts, 1997 Recycling symposium: 279-290(1997).
4. Jangmain, A., Royal Institute of Technology: 39(1996).
5. Jangmain, A. and S. Ostlund, Nord. Pulp Pap. J. 10(3): 156-166(1995).
6. Hartler, N., Nord., Pulp Pap. Res. J. 10(1): 4-7(1995).
7. Nguyen, N. and B. Jordan, J. Pulp Pap. Sci. 20(8): 226-230(1994).
8. Seth, R.S., D.W. Francis and C.P.J. Bennington, International Paper Physics Conference, Book 2: 525-534(1991).
9. Ruud, A., O. Bottegaard, International Paper Physics Conference: 463-472(1991).
10. Abitz, P.R., International Paper Physics Conference, Book 1: 358(1991),.
11. Salmen, L., Boman Rolf, Feller Christer and Htun Myat, Nord. Pulp Pap. Res. J. 2(4): 127-131(1987).
12. Mohlin, U.B. and C. Alfredsson, 24th EUCEPA Conference, Pulp Technology Energy: 207-221(1990).
13. Pelletier, L.J., J. Pulp Pap. Sci. 13(4): J121-125(1987).
14. Jordan, B.D. and N. Nguyen, Paperi ja Puu, 68(4): 313-318(1986).
15. Page, D.H., International Mechanical Pulping conference: 271-275(1983).
16. Hill, S.H., J. Edwards and L.R. Beath, CPPA, 35th Annal meeting: 124-134(1949).
17. Ellis, M.J., G.D. Geoffrey, R.W. Allison and R.P. Kibblewhite, Appita 51(1):29-35(1998).
18. Kibblewhite, R.P, TAPPI, 60(10): 141-143(1977).
19. Fineran, W.G. Jr., 1997 Recycling symposium: 291-295(1997).
20. McKinney, R., Pre-symposium of 10th ISWPC: 9-18(1999).
21. 이학래, 이복진, 신동소, 서영범, 임기표, 원종명, 손창만. 제지 과학: PP114-116(1996).