

저농도 NaOH 팽윤과 고해에 따른 섬유특성 변화

김아람 · 최경화¹ · 조병욱[†]

접수일(2014년 6월 7일), 수정일(2014년 6월 15일), 채택일(2014년 6월 16일)

Changes in Fiber Characteristics by Low Concentration Sodium Hydroxide Swelling and Beating

Ah-Ram Kim, Kyoung-Hwa Choi¹ and Byoung-Uk Cho[†]

Received June 7, 2014; Received in revised form June 15, 2014; Accepted June 16, 2014

ABSTRACT

In this study, effects of alkali swelling at low concentration below 2 percent on properties of hardwood bleached kraft pulp (HwBKP) were elucidated. Swelling treatment of HwBKP was performed at various NaOH concentrations with/without beating. Then, the swelling characteristics of pulp fiber was evaluated by measuring the solvent retention values such as water retention value (WRV) and isopropyl alcohol retention value (LRV).

It was found that fiber characteristics were influenced by NaOH swelling even at low alkali concentration and beating treatment as well. The values of WRV and LRV were decreased when the alkali concentration was increased. It is the result from the decreased acidic groups of pulp which were formed during beating. The acidic groups could be neutralized and then removed by alkali. The difference between WRV and LRV was decreased with increasing alkali concentration while the difference was increased when the alkali swollen pulp was beaten. In addition, the crystalline structure of HwBKP was almost not changed while the crystallinity was influenced by swelling treatment at a low alkali concentration.

Keywords : *Alkali swelling, water retention value, isopropanol retention value, sodium hydroxide, beating*

• 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과 (Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea)

1 강원대학교 창강제지기술연구소 (Changgang Institute of Paper Science and Technology, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea)

† 교신저자 (Corresponding Author) E-mail : bucho@kangwon.ac.kr

1. 서론

현재 제지산업의 화두는 자원절감 및 환경오염 감소 등 크게 두 가지로 구분된다. 제지업계는 펄프의 대부분을 수입에 의존하고 있기 때문에 국내 제지업체의 국제경쟁력을 강화시키고, 제지기술을 환경 친화적인 기술로 발전시키기 위해서는 펄프의 사용량을 감소시킬 수 있는 기술을 개발하는 것이 상당히 중요하다. 종이의 벌크를 향상시키는 것은 펄프 사용량을 저감하는 주요 방법 중 하나이다. 현재까지 종이의 벌크를 증가시켜 펄프 사용량을 줄이기 위한 방법들로 저가의 충전제인 침강성 탄산칼슘(precipitated calcium carbonate, PCC)의 사용을 높이거나, 초지 시 화학열기계펄프(chemithermomechanical pulp, CTMP)를 혼합하거나, 벌키화제(bulking agents)를 첨가하여 하이-벌크지(high bulk paper)를 제조하는 방안 등 다양한 연구가 주를 이루어 왔다.¹⁻⁹⁾ 그러나 이와 같은 방법들은 종이의 벌크를 개선시키는데 한계가 있으며, PCC의 사용을 높이거나 벌키화제를 첨가하는 경우 종이의 강도적 특성이 감소되며, 또한 CTMP를 혼합하여 하이벌크지를 제조하는 경우 CTMP가 리그닌을 다량 함유하고 있는 기계펄프이기 때문에 황색화 및 강도 손상 등 내구성에 문제를 발생시킬 수 있다.⁹⁾ 따라서 현재 벌크 향상 기술의 한계를 넘기 위해서는 새로운 원천 기술을 필요로 하는 실정이다.

종이의 기본 골격은 펄프 섬유에 의해서 결정된다. 종이 제조 시 펄프 섬유가 많이 압착되면 밀도가 높은 종이가 생산된다. 벌크가 높은 종이를 생산하기 위해서는 초지 시 압착이 덜 발생하는 섬유를 선정하고, 섬유의 유연성에 적게 영향을 미치게 제지공정을 조절할 필요가 있다.

일반적으로 펄프섬유의 팽윤성은 섬유의 수화도 및 유연성 등에 영향을 미치며 궁극적으로 종이의 밀도에 영향을 미칠 수 있다. 이전 연구에서 펄프 섬유를 물에 침적시키는 자유팽윤에 의해서는 섬유의 팽윤이 뚜렷하게 발생하지 않고, 펄프 섬유에 물리적인 힘(고해)을

가하여 섬유벽의 피브릴간 결합을 깨뜨려 궁극이 형성되어야 팽윤성에 뚜렷한 변화가 발생함을 보였다.¹⁰⁾ 또한 펄프섬유의 알칼리처리는 섬유의 특성 및 종이의 구조에 영향을 미친다.¹¹⁻¹²⁾ Mun과 Jang은 6-20%의 고농도 알칼리로 침엽수 표백 크라프트펄프(SwBKP)를 처리하여 알칼리 농도의 증가는 셀룰로오스 II로 결정 구조를 변환시키고, 종이의 투기도를 증가시킴을 보였다.¹¹⁾ Won과 Kim은 목재펄프를 여러 종류의 알칼리로 처리하여 활엽수펄프를 가성소다 처리 시 WRV(water retention value)가 증가하였으나, 고해가 진행됨에 따라 그 효과가 상쇄된다고 보고하였다.¹²⁾

본 연구에서는 2% 이하의 저농도 알칼리 팽윤처리 및 고해가 섬유 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 0-2%의 저농도 수산화나트륨(sodium hydroxide, NaOH) 용액으로 섬유를 팽윤시킨 후 WRV(water retention value), LRV(liquid retention value), 점도, 결정화도 등을 분석하여 펄프 섬유의 특성 변화를 분석하였다. 또한 고해가 알칼리 팽윤 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 미고해 펄프(non-beaten pulp) 및 고해 펄프(beaten pulp)의 알칼리 팽윤처리를 실시하였으며, 알칼리 팽윤처리가 섬유의 고해 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 알칼리 팽윤된 펄프의 고해를 실시하여 각 조건별 섬유 특성을 비교분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

2.1.1 펄프

본 연구에서 사용된 펄프 시료는 인도네시아에서 수입한 아카시아 활엽수 표백 크라프트 펄프(hardwood bleached kraft pulp, HwBKP)를 사용하였다. Fiber wall thickness analyzer (MorFi, Techpap)를 사용하여 펄프의 섬유벽 두께를 측정하였고, 섬유장, 섬유폭, coarseness는 Fiber analyzer (MorFi, Techpap)을 사용하여 분석하였다. 사용한 펄프 섬유의 특성은 Table 1

Table 1. Dimensional characteristics of HwBKP fiber used in experiment

	Coarseness (mg/100 m)	Fiber length* (mm)	Fiber width (μm)	Fiber wall thickness (μm)
Contents	16.65	0.77	12.00	4.81

*Length weighted average

과 같다.

2.1.2 알칼리 팽윤제

펄프의 알칼리 팽윤을 위한 팽윤제로 분석용 시약인 수산화나트륨(sodium hydroxide, NaOH)을 사용하였다.

2.1.3 기타 약품

알칼리 팽윤 처리된 펄프 섬유의 팽윤특성 분석을 위한 LRV(liquid retention value)는 증류수와 이소프로필알코올(isopropyl alcohol)을 사용하여 측정하였으며, 점도 측정을 위해 CED(cupriethylenediamine, Cu(En)₂)용액을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 시약은 모두 분석용 시약을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 알칼리 팽윤처리

HwBKP의 알칼리 팽윤처리 공정은 Table 2에서 보는 바와 같이 세 가지 공정으로 구분하여 실시하였다. 고해가 알칼리 팽윤 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 미고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(A) 및 고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(BA)를 실시하였다. 또한 알칼리 팽윤처리가 섬유의 고해 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 알칼리 팽윤된 펄프를 고해(AB)하였다. 고해는 실험실용 비터 (Valley beater)를 사용하여 행하였고, 450 mL CSF (캐나다 표준 여수도)로 여수도를 조정하였다. 알칼리 팽윤처리는 0-2%로 조절된 수산화나트륨 용액을 사용하여 펄프 농도를 5%로 조절하고, 상온(23℃)에서 1시간 동안 실시하였다.

2.2.2 펄프 섬유의 팽윤 특성 분석

(가) WRV(water retention value) 분석

TAPPI Useful Method UM 256과 Yiannos¹³⁾의 연

구에 의거하여 알칼리 팽윤처리에 따른 펄프 섬유의 WRV 변화를 분석하였다. 분석과정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 각 펄프 시료를 2 g 정량한 후 250 mL 광구병에 넣고 증류수 100 mL를 첨가하여 20분 간 팽윤시킨 후, 글라스 필터(1G2)를 이용하여 펄프슬러리를 여과시켜 주었다. 글라스 필터 내 펄프 패드를 원심분리기에 넣고 1250 G로 40분간 원심 분리시킨 후, 105℃의 건조기에서 12시간 동안 건조시켜 주었으며, 건조 전·후 펄프 패드의 무게를 측정하여 Eq. 1에 의해 WRV 값을 계산하였다.

$$WRV(g/g) = \frac{A-B}{B} \quad [1]$$

여기서, A: 펄프 패드의 건조 전 무게 (g), B: 펄프 패드의 건조 후 무게(g).

(나) LRV(liquid retention value) 분석

유기 용매는 물에 비해 표면 장력이 낮거나 거의 없으므로 섬유포화점까지 달하는데 필요한 원심력이 물보다 낮아 원심분리 시 섬유의 붕괴와 압착을 피할 수 있으며, 섬유 내강이나 모세관에 용매가 잔류될 가능성이 적어 섬유 팽윤 특성을 분석하는데 있어 오차를 줄일 수 있다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 팽윤 특성 분석을 위해 WRV 이외에 LRV를 분석하여 주었다

LRV를 분석하기 위해 TAPPI Useful Method UM 256과 Yiannos¹³⁾의 연구에 의거하여 이소프로필알코올(isopropyl alcohol)을 사용하였다. 분석과정은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 각 펄프 시료를 2 g 정량한 후 250 mL 광구병에 넣고 증류수 100 mL를 첨가하여 20분 간 팽윤시킨 후, 글라스 필터(1G2)를 이용하여 펄프슬러리 내 증류수를 감압 여과시키고, 이소프로필알코올로 치환될 때까지 여과를 지속하였다. 이소프로필알코올

Table 2. Processes and conditions for the alkali swelling treatments

		Contents
	Processes	Alkali treatment only (A) Beating after alkali treatment (AB) Alkali treatment after beating (BA)
Conditions	NaOH solution concentration (%)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
	Temperature (°C)	23 (at room temperature)
	Reaction time (min)	60
	Pulp concentration (%)	5

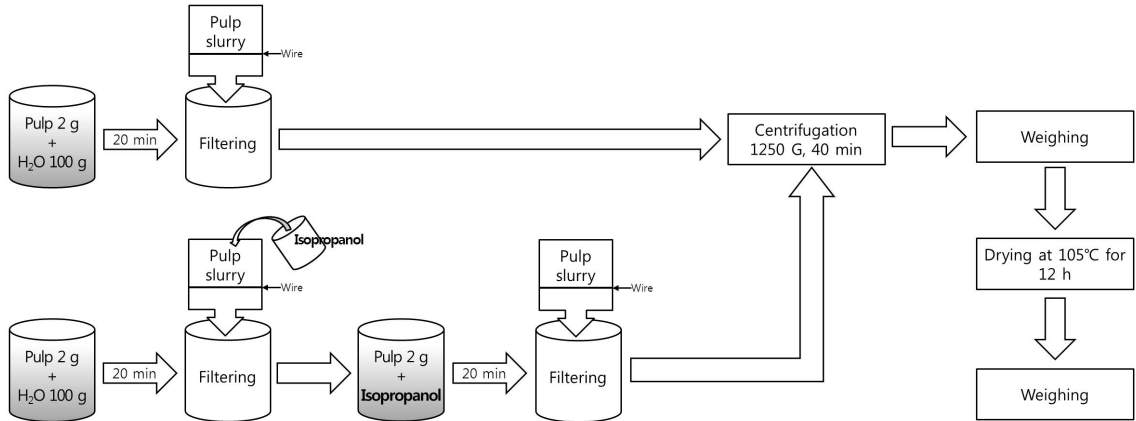


Fig. 1. Water retention value (top) and isopropyl alcohol retention value (bottom) measurement process.

로 치환된 펄프는 250 mL 광구병에 넣고 이소프로필 알코올 100 mL를 첨가하여 20분 간 팽윤시킨 후, 글라스 필터(IG2)를 이용하여 감압 여과 시켜 주었다. 이후 WRV 분석에서와 같이 글라스 필터 내 펄프 패드를 원심분리기에 넣고 1250 G로 40분간 원심 분리시킨 후, 105°C의 건조기에서 12시간 동안 건조시켜 주었으며, 건조 전후 펄프 패드의 무게를 측정하여 Eq. 2에 의해 LRV 값을 계산하였다.

$$LRV(g/g) = \frac{A-B}{B} \quad [2]$$

여기서, A: 펄프 패드의 건조 전 무게 (g), B: 펄프 패드의 건조 후 무게(g).

(다) 점도분석

알칼리 처리된 펄프들의 셀룰로오스 분자량 변화를 비교 분석하기 위해 Tappi standard T230에 의거하여 각 펄프시료의 점도를 측정하였다. 점도 분석을 위해 각 전건펄프 시료 0.25g을 CED 용액으로 용해시킨 후 모세관 점도계(No 150)를 사용하여 25°C의 항온수조에서 점도를 측정하였다.

(라) 결정구조 분석

각 알칼리 처리된 펄프 섬유의 결정구조 분석을 위해 네덜란드 PANalytical의 고분해능 X선 회절 분석장비(High resolution X-ray diffractometer, X'pert-pro)를 이용하여 각 시료의 XRD 분석을 실시하였으며,

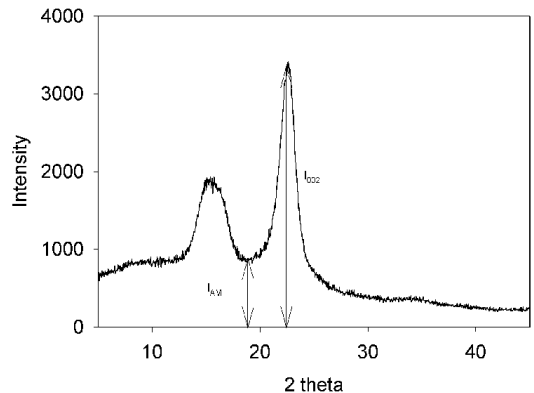


Fig. 2. Measurement of crystallinity index (CI) using a peak height in X-ray diffraction spectra.

Segal 법¹³⁾에 따라 상대결정화도(CI)를 Eq. 3에 의해 계산하였다(Fig. 2).

$$CI(\%) = \frac{I_{200} - I_{AM}}{I_{200}} * 100 \quad [3]$$

여기서, I₂₀₀: (200)의 회절강도 (2θ = 22.7°), I_{AM}: 비결정부분의 회절강도 (2θ = 18°).

3. 결과 및 고찰

3.1 펄프 섬유의 수화도 변화

알칼리 팽윤처리 공정은 상기 기술된 바와 같이 미

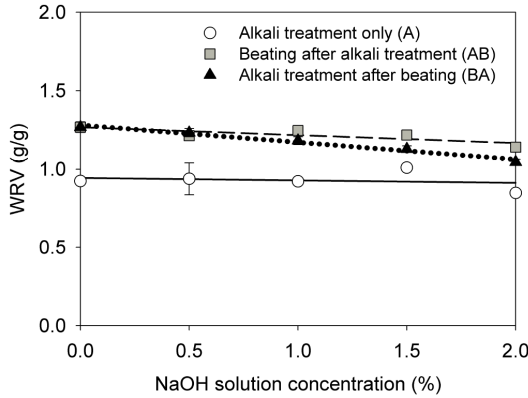


Fig. 3. Changes in WRV according to NaOH concentration in different alkali swelling processes.

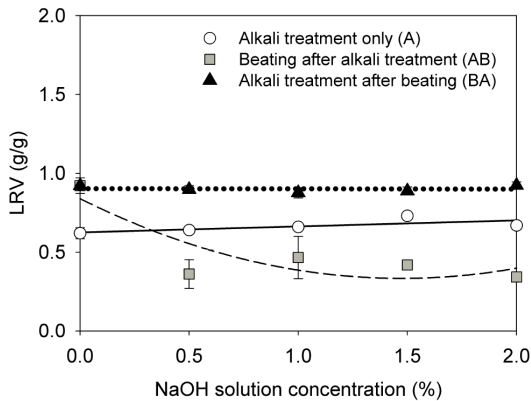


Fig. 4. Changes in LRV according to NaOH concentration in different alkali swelling processes.

고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(A), 고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(BA), 알칼리 팽윤된 펄프의 고해 처리(AB) 등 3가지 공정으로 나누어 실시하였다. HwBKP의 저농도 알칼리 팽윤처리 공정에 따른 펄프 섬유 팽윤특성 변화를 분석하기 위해 WRV와 LRV를 분석한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다.

미고해 펄프를 알칼리 팽윤처리 한 경우(Fig. 3의 A), WRV 값은 수산화나트륨 용액 농도가 증가함에 따라 거의 변화하지 않았다. 이는 2% 이하의 저농도 알칼리 처리 시, 펄프섬유의 팽윤은 거의 발생되지 않았음을 의미한다. 반면에 여수도 450 mL CSF로 고해된 펄프를 알칼리 팽윤 처리한 경우(BA)에 수산화나트륨 용액 농도가 증가할수록 WRV가 감소되었다. 이러한

결과는 Warwicker와 Clayton¹⁵⁾의 연구결과와도 일치하는 것으로 고해에 의해 발생된 카르복실기 등 고해 펄프의 WRV 값에 일부 기여하고 있는 산성 물질들이 저농도 알칼리 처리에 의해 중화·제거되어 WRV의 감소를 발생시키는 것으로 판단된다. 또한 펄프의 고해 특성에 미치는 알칼리 팽윤처리 효과를 분석하기 위해 농도별로 알칼리 팽윤 처리된 펄프를 고해한 경우(AB)에도 알칼리 농도가 증가할수록 고해에 의한 WRV를 소폭 감소시키는 것으로 나타났다.

미고해 펄프를 알칼리 팽윤 처리한 펄프 섬유(A)의 LRV는 수산화나트륨 용액 농도가 증가할수록 소폭 증가되는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 고해한 펄프 섬유의 알칼리 팽윤 처리한 경우(BA)에는 알칼리 농도에 따른 펄프 섬유의 LRV는 거의 변화하지 않았다. 2% 이하의 저농도 알칼리 팽윤처리가 섬유의 LRV에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 반면에 알칼리 팽윤 처리한 후 450 mL CSF로 고해한 펄프 섬유(AB)의 LRV 값은 알칼리 처리 농도가 증가할수록 다소 감소되었다. 이러한 결과로 볼 때 0-2%의 수산화나트륨 용액으로 처리된 펄프를 고해할 경우 처리 농도가 증가할수록 섬유의 고해효율을 감소시키는 것으로 보인다. 실제 각 농도별로 알칼리 처리한 펄프를 여수도 450 mL CSF로 고해할 경우 알칼리 농도가 높을수록 고해 시간이 더 오래 걸렸다.

알칼리 팽윤 조건에 따른 펄프 섬유의 WRV 값과 LRV 값의 차이 변화를 Fig. 5에서 나타냈다. 그림에서

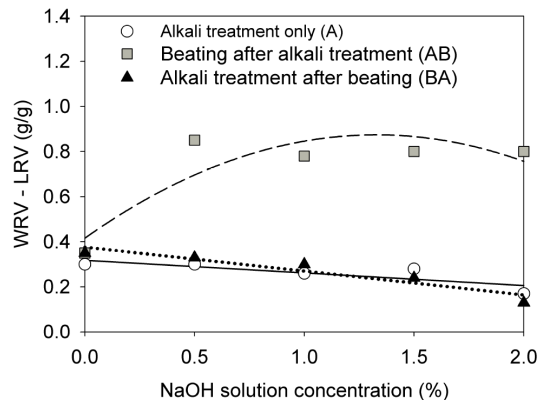


Fig. 5. Changes in the difference value between WRV and LRV according to sodium hydroxide concentration in different alkali swelling processes.

보는 바와 같이 공정에 상관없이 LRV의 값이 WRV에 비해 낮게 나타났다. 이러한 결과는 이소프로필알코올이 물에 비해 극성이 낮은 것에 기인하는 것으로 Stamm¹⁶⁾의 연구에 의하면 α -셀룰로오스의 각 용매에 대한 최대 수용성(受容性)이 물, 메탄올, 에탄올, 프로판올 순이라고 보고된 바 있다. 알칼리 처리 공정별 변화를 살펴보면, 미고해 펄프를 알칼리 팽윤 처리한 경우(A)와 고해한 펄프 섬유를 알칼리 팽윤 처리한 경우(BA) 모두 알칼리 처리농도가 증가할수록 WRV와 LRV의 편차가 감소하였으며, 고해된 펄프가 미고해된 펄프의 경우보다 그 감소율의 조금 더 높게 나타났다. 반면에 알칼리 팽윤 처리한 후 고해한 펄프 섬유(AB)의 경우에는 알칼리 팽윤 처리 농도가 증가할수록 고해에 따른 WRV와 LRV의 편차가 증가하는 것으로 나타났다.

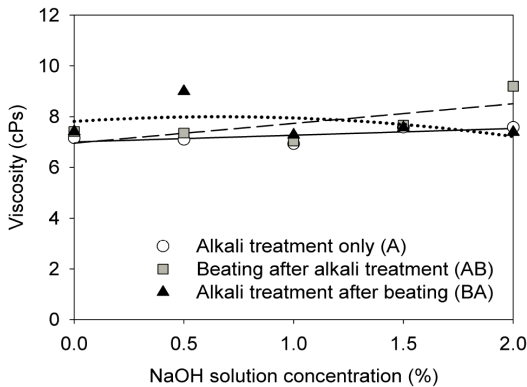


Fig. 6. Changes in pulp viscosity according to sodium hydroxide concentration in different alkali swelling processes.

3.2 점도 변화

HwBKP의 알칼리 팽윤처리 공정에 따른 펄프 섬유의 분자량 변화를 분석하기 위해 점도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 미고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(A) 및 고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(BA) 모두 알칼리 팽윤에 따른 점도 변화는 거의 관찰되지 않았다. 반면에 알칼리 팽윤된 펄프의 고해 처리(AB)의 경우 알칼리 처리 농도가 증가할수록 소폭 증가하였는데, 이는 알칼리 팽윤처리 농도가 높을수록 고해효율을 감소시키는 것에 기인하여 고해에 의한 펄프 점도 손실이 소폭 감소된 것으로 판단된다.

3.3 펄프 섬유의 결정 구조 변화

HwBKP의 알칼리 팽윤처리 공정에 따른 펄프 섬유의 결정구조 변화를 분석하기 위해 XRD 분석을 실시하고, 상대결정화도를 계산한 결과를 Figs. 7과 8에 나타내었다. 저농도 알칼리 팽윤처리 시 섬유의 결정구조에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 7). 반면에 각 조건에 따른 결정화도의 경우 각각 다르게 나타났다(Fig. 8). 미고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(A)와 알칼리 팽윤된 펄프의 고해 처리(AB) 등의 경우에는 수산화나트륨 농도 1.5%를 임계점으로 감소 후 증가되는 경향을 나타냈다. 반면 고해 펄프의 알칼리 팽윤처리(BA)된 펄프는 알칼리 농도가 증가함에 따라 결정화도가 소폭 증가하였다.

4. 결론

2% 이하의 저농도 알칼리 팽윤 조건에 따른 섬유 특

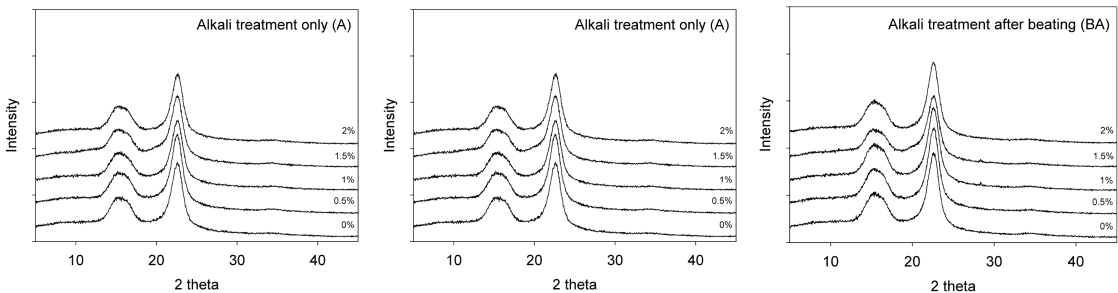


Fig. 7. Changes in the XRD spectra according to sodium hydroxide concentration in different alkali swelling processes.

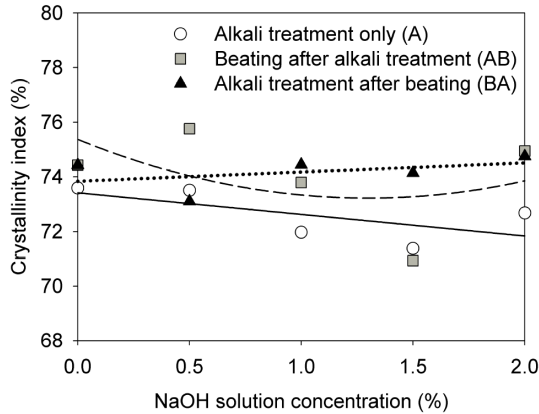


Fig. 8. Changes in the crystallinity index according to sodium hydroxide concentration in different alkali swelling processes.

성 변화에 대한 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 섬유특성은 저농도 알칼리 처리와 고해처리 유·무 및 처리순서에 의해서 영향을 받는 것으로 판단된다. 섬유의 수화특성(WRV와 LRV값)은 저농도 알칼리 처리만으로는 큰 변화가 없었고, 고해처리가 수반되었을 시 다소 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 저농도 알칼리 팽윤 처리가 고해에 의해 발생되어진 산성기들을 중화·제거시킨 결과로 사료된다. 알칼리 팽윤처리가 펄프의 WRV와 LRV의 차이를 감소시키는 것으로 나타났으며, 알칼리 팽윤된 펄프를 고해할 경우에는 WRV와 LRV의 차이를 증가시키는 것으로 나타났다. 2%이하의 저농도 알칼리 처리는 섬유 셀룰로오스의 점도에는 큰 영향을 미치지 않았다. 저농도 알칼리 처리는 펄프 섬유의 결정구조에는 영향을 미치지 않으나, 섬유의 결정화도는 알칼리 농도와 고해에 의해서 영향을 받았다.

추후 고농도에서의 알칼리 팽윤처리를 실시한 후 각 조건에 따른 섬유특성 변화를 살펴볼 필요가 있으리라 판단된다.

사 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A1043193).

Literature Cited

1. Ono, H., Watanabe, M., Nonomura, F. and Nanri, Y., High-bulk, wood containing printing paper, US patent, US007404876B2 (2008).
2. Nam, K., Chung, S. and Won, J. M., Effects of raw materials for papermaking and physical treatment on the pore structure and paper properties, *Journal of Korea TAPPI* 39(4):7-13 (2007).
3. Nam, K., Chung, S. and Won, J. M., Effect of raw materials of the papermaking and physical treatment on the pore structure and properties of the paper, *Proceedings of 2003 Fall Conference of the Korea TAPPI*, pp. 127-134.
4. Sousa, G. D. A., Abreu, C. T., Amaral, J. L. and Bras, C., Office paper bulk optimization in a paper machine using multivariate techniques, *O PAPEL* 72(8):50-55 (2011).
5. Gwak, H. J., Lee, J. Y., Kim, C. H., Back K. K., Shin, J. H., Lee, H. J., Kim, S. H., Shim, S. Y. and Kang, H. Y., Improvement of paper bulk and properties using modified precipitated calcium carbonate (PCC), *Proceedings of 2009 Fall Conference of the Korea TAPPI*, p. 313.
6. Ikeda, Y., Ishibashi, Y., Tadokoro, T. and Takahashi, H., Paper bulking promoter, US patent, US 006576085B2 (2003).
7. Sung, Y. J. and Keller, D. S., Evaluation of the changes in local paper structure and paper properties depending on the forming elements types, *Journal of Korea TAPPI* 41(1):17-23 (2009).
8. Eber, R. J. and Janda B. W., Multiple layer fibrous web products of enhanced bulk and method of manufacturing same, US patent, US005102501A (1992).
9. Takashi O., Challenge to the development of bulky paper in NPI(Nippon Paper Industries Co. Ltd), *Japan TAPPI J.* 61(1):50-53 (2007).
10. Choi, E.-Y. and Cho, B.-U., Effect of beating and water impregnation on fiber swelling and paper properties, *Journal of Korea TAPPI* 45(6):88-95 (2013).
11. Won, J. M. and Kim, M. H., Effects of alkaline treatment on the characteristics of chemical pulps for pa-

- permaking, Journal of Korea TAPPI 43(3):1-7 (2011).
12. Mun, S. P. and Jang, M. H, Morphological and physicochemical changes of NBKP by alkali pretreatment, Journal of Korea TAPPI 41(4):1-7 (2009).
 13. Yiannos. P. N., Swellability of pulps determined by isopropanol retention, Tappi J. 48(9):494-496 (1965).
 14. Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E. Jr. and Conrad, C. M., Empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using X-ray diffractometer, Tex. Res. J. 29:786-794. (1959).
 15. Warwicker. J. O. and Clayton, J. W., Reactivity of cotton after treatment in alkaline and acid swelling agents, J. Applied Polymer Sci. 13(5):1037-1048 (1969).
 16. Stamm, A. J., Shrinking and swelling of wood, Industrial & Engineering Chemistry 27(4):401-406 (1935).
 17. Mantanis, G. I., Young, R. A. and Rowell, R. M., Swelling of compressed cellulose fiber webs in organic liquids, Cellulose 2(1):1-22 (1995).