

캘린더링 종류와 종이물성에 미치는 영향

원종명[†]

Calendering Type and Its Effect on Paper Properties

Jong Myoung Won[†]

1. 온도경사 캘린더링

1.1 온도경사 캘린더링 운전

Kerekes와 Pye는 온도와 하중이 신문용지의 캘린더링에 미치는 영향에 대한 실험실적 연구를 통하여 고온 캘린더링의 잠재적인 장점을 확인하였으며, 후에 Crostogino가 소위 온도 경사 캘린더링이라 불리는 캘린더링 방법을 사용하여 그 가능성을 재차 확인하였다. 지필이 단지 님에서만 짧은 시간 동안 롤과 접촉을 하기 때문에 지필의 표면이 가열되는 반면, 지필의 내부는 찬 상태를 유지하게 되어 지필의 두께 방향으로 온도 경사를 이루게 된다. Fig. 1과 2는 각각 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링 시 지필 내에 형성되는 온도 경사의

정도를 나타내어 준다.

Fig. 3은 이러한 다른 온도 경사 경향에 따라 캘린더링에 의하여 얻어진 종이의 횡단면을 촬영한 SEM 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 온도 경사 캘린더링 시 종이의 내부가 거의 변형되지 않은 반면, 표면에서만 변형을 일으켜, 벌크를 유지하는데 매우 효과적임을 예상할 수 있다. 이와 같이 온도 경사 캘린더링을 할 경우 종이 표면에 위치한 섬유는 내부에 있는 섬유보다 더 많이 연구 변형을 일으키기 때문에 동일한 벌크와 강도 수준에서 보다 우수한 표면 특성을 제공하는 것이 가능하다. 특히 온도 경사 캘린더링을 통하여 보다 우수한 벌크를 지니면서도 광택이 개선될 수 있는 가능성을 Fig. 4로 설명될 수 있다.

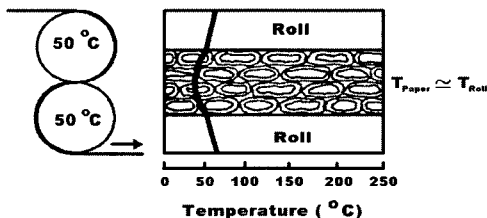


Fig. 1. 머신 캘린더링 시 지필 내에서의 온도 경사.

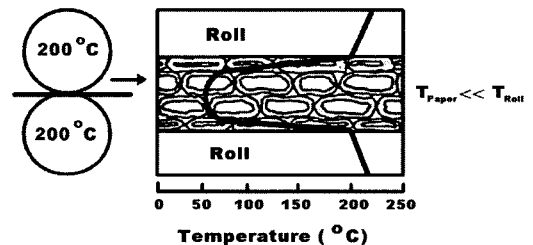


Fig. 2. 온도 경사 캘린더링 시 지필 내에서의 온도 경사.

• 강원대학교 산림과학대학 제지공학과 (Dept. of Paper Science & Engineering, Kangwon National University, Chunchon, 200-701, Korea)

† 주저자(Corresponding author): E-mail: wjm@kangwon.ac.kr

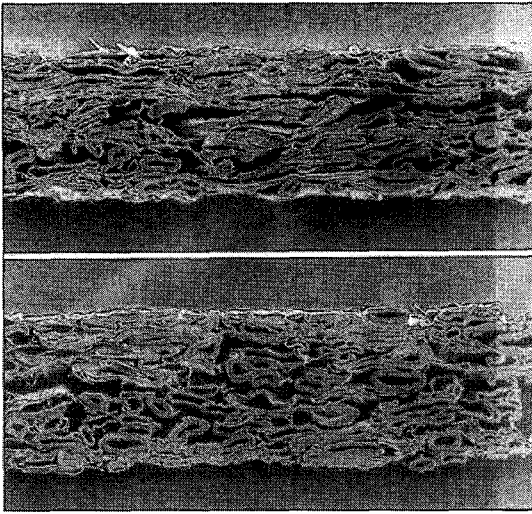


Fig. 3. 전형적인 머신 캘린더링(위)과 온도 경사 캘린더링(아래)한 신문용지의 횡단면.

이러한 온도 경사 캘린더링의 효과는 연질 롤과 금속 가열 롤로 이루어진 연질 롤 캘린더링 시에도 얻을 수 있음이 확인되었다. 라벨지, 편지 봉투 및

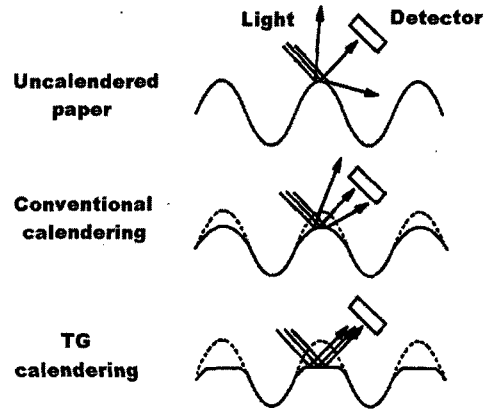


Fig. 4. 캘린더링 방법과 광택도 측정 원리.

기타 많은 포장용 판지 등과 같은 제품의 경우에는 단면 처리만으로도 충분한 효과를 만끽할 수 있다. 그러나 그 이외의 대부분의 종이 제품들은 양면에서 동일한 표면 특성의 개선 효과를 얻기 위하여 최소한 2개의 연질 닙 처리를 필요로 한다.

캐나다 펄프종이연구소(Paprican)에서 파일릿

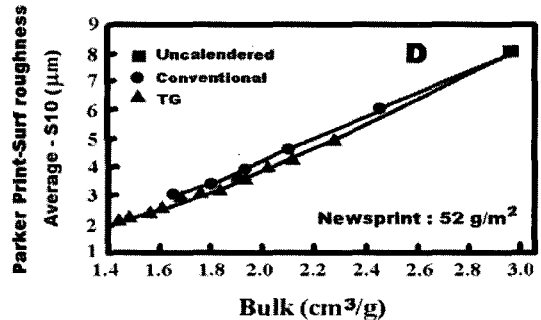
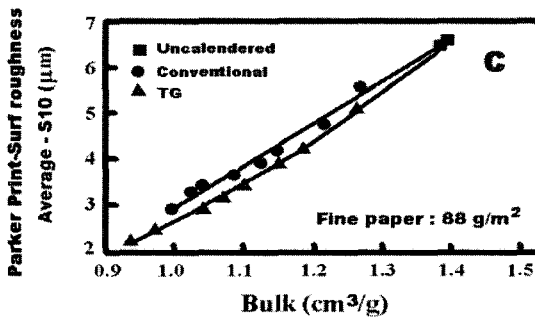
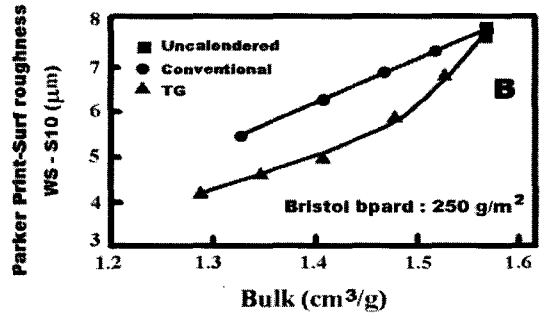
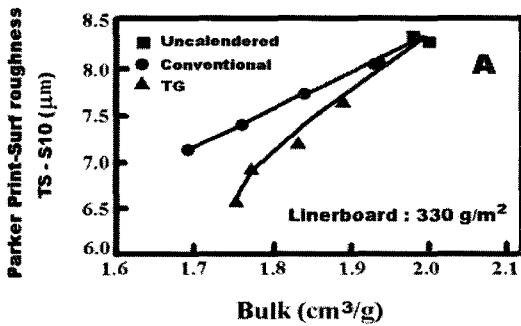


Fig. 5. 각 지종별 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링 후 얻어진 종이의 벌크와 평활도와와의 관계.

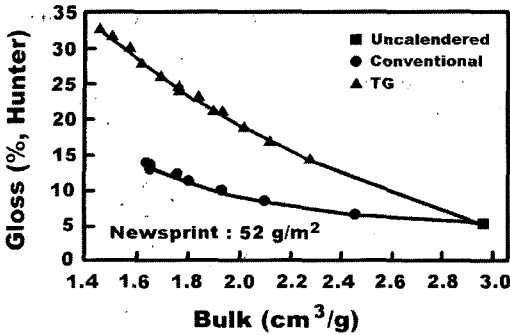


Fig. 6. 신문용지의 온도 경사 캘린더링에 의한 광택도 개선 효과.

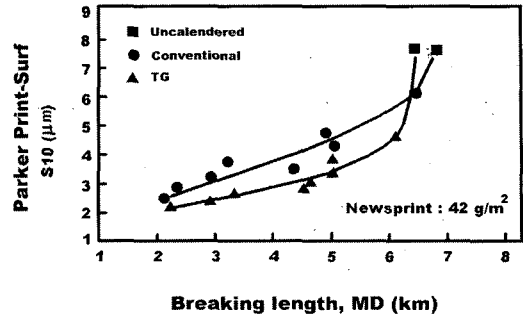


Fig. 7. 100% TMP로 제조된 신문용지의 TG 캘린더링에 의한 거칠기 감소 효과와 열단장.

캘린더를 이용하여 다양한 온도 경사 캘린더링 실험을 실시하였다. 이 연구에서 사용된 파일럿 캘린더의 폭은 1400 mm, 직경이 600 mm인 롤 5개, 선압은 최대 250 kN/m, 속도는 1350 m/min까지 적용 가능하다. 2개의 SHW Aquitherm heat transfer roll, 한 개의 Tokuden induction heated roll, 한 개의 Nipco controlled crown roll이 사용되었다. 또한 연질 님 시험을 위하여 2개의 Appleton-Valmet blue denim cotton-filled roll (85 Shore D hardness)가 사용되었고, 2개의 Devronizer 증기 샤워가 사용되었다. 또한 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링을 병용하여 광택과 벌크를 조절하는 방법도 검토되었다.

Fig. 5는 4종의 종이에 대하여 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링을 실시하여 평활도를 측정한

결과이다. 본 연구에 사용된 모든 지종, 즉 라이너 판지, 브리스틀 판지, 백상지 및 신문용지에서 모두 동일한 벌크를 기준하여 비교할 때 모두 온도 경사 캘린더링을 통하여 얻어진 평활도 개선 효과가 머신 캘린더링에 의하여 얻어진 것보다 우수하였으며, 특히 라이너판지와 브리스틀 판지의 경우 그 효과가 매우 현저하다.

그러나 정량급 종이의 경우 공기 누출을 이용한 거칠기 측정 방법으로 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링의 효과를 비교하기 어렵기 때문에 광택도를 측정하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 평량 52 g/m²인 신문용지를 두 가지 방법으로 캘린더링을 실시한 결과 머신 캘린더에 의한 동일한 벌크 대비 광택도 개선 효과가 매우 미미한 반면 온도 경사 캘린더링에 의하여 매우 높은 개선 효과를 얻을 수

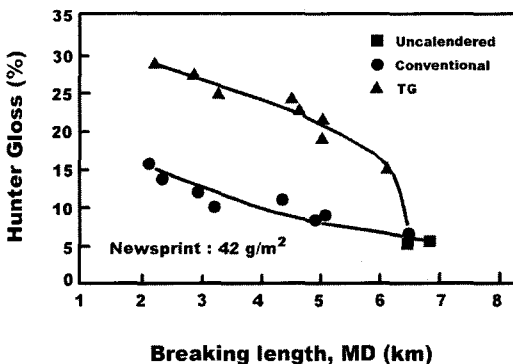


Fig. 8. 100% TMP로 제조된 신문용지의 TG 캘린더링에 의한 광택도와 열단장 개선 효과.

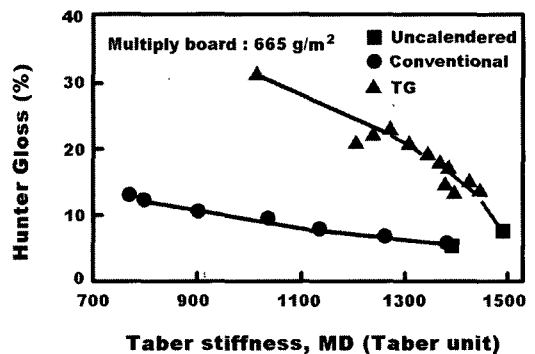


Fig. 9. 다층판지의 온도 경사 캘린더링에 의한 광택도와 휨강도 개선 효과.

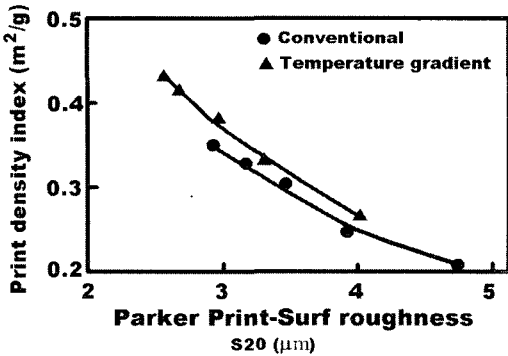


Fig. 10. 캘린더링 처리한 신문용지의 인쇄 밀도 지수와 거칠기와의 관계.

있었다.

평활도와 광택도 개선 효과 이외에도 중요한 것은 강도적 성질의 감소가 최소화되어야 한다는 것이다. Figs. 7과 8은 열단장 대비 거칠기와 광택도의 개선 효과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 동일 열단장에서 온도 경사 캘린더링에 의하여 얻어진 거칠기가 머신 캘린더링에 의하여 얻어진 거칠기보다 약 30% 낮았으며, 광택도는 거의 2배에 달하였다. Fig. 9는 평량 665 g/m²의 다층 판지를 캘린더링 처리하여 얻은 결과로써 머신 캘린더링의 경우 광택도 개선에 비하여 휨강도가 크게 감소된 반면, 온도 경사 캘린더링에 의하여 상당히 높은 휨강도를 유지하면서도 광택도를 크게 개선할 수 있는 가능성을 보여주어 특히 고평량의

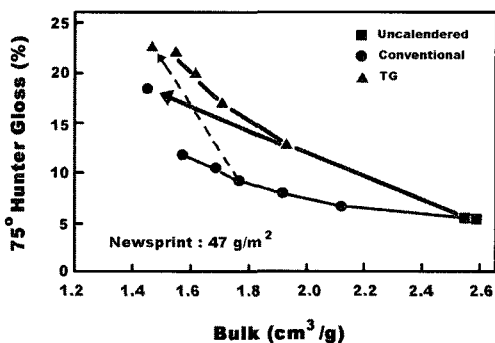


Fig. 12. 신문용지의 캘린더링 시 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링의 병용이 벌크와 광택의 관계에 미치는 영향.

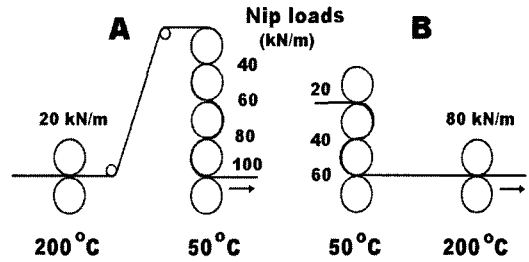


Fig. 11. 머신 캘린더링과 온도 경사 캘린더링의 병용 예.

판지에서 그 효과가 더욱 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 온도 경사 캘린더링 처리한 신문용지의 인쇄 품질을 평가하기 위하여 종이의 거칠기 대비 인쇄 밀도를 나타낸 것으로 머신 캘린더링에 비하여 우수한 인쇄 품질이 얻어질 수 있음을 보여준다. 캘린더링은 일반적으로 잉크의 흡수를 감소시키는 반면에 표면 화학에 의하여 좌우되는 물의 흡수에는 거의 영향을 미치지 않는다. 온도 경사 캘린더링의 경우에도 잉크 흡수를 감소시키기 때문에 보다 우수한 set-off를 제공하며 특히 heatset offset 인쇄에 적합하다. 캘린더링 처리한 종이의 벌크와 광택의 관계를 조절하기 위하여 Fig. 11과 같은 방식으로 머신 캘린더와 온도 경사 캘린더를

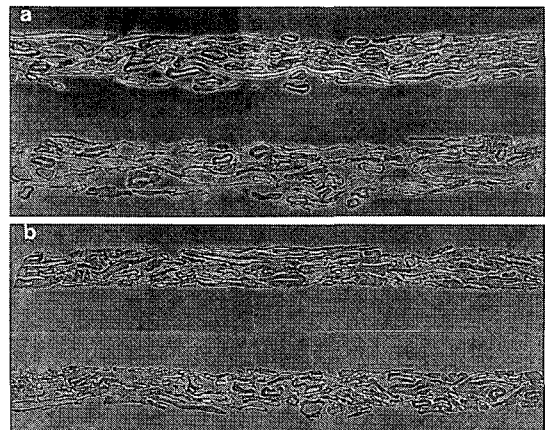


Fig. 13. 캘린더링 방법이 LWC 원지의 물에 의한 팽윤 거동에 미치는 영향.
(a) 머신 캘린더링, (b) 온도 경사 캘린더링

조합하여 신문용지를 처리한 결과 Fig. 12와 같이 매우 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. 만약 두 방법이 사용될 경우 TG를 2차 처리로 사용하는 것이 유리한 것으로 평가되었다.

Fig. 13은 캘린더링 방법을 달리 했을 때 물에 대한 종이 및 섬유에 팽윤 특성을 나타낸 것이다. (a)는 머신 캘린더링 처리한 LWC 원지를 물로 코팅하기 전후에 촬영한 SEM 사진이며, (b)는 온도 경사 캘린더링 처리 후 물로 코팅하기 전후의 SEM 사진이다. 이 사진을 통하여 캘린더링 방법에 따라 물과의 수화 특성이 달라질 수 있음을 확인할 수 있다. 머신 캘린더링 처리한 원지의 경우 물에 의하여 크게 팽윤된 것이 확인된 반면, TG 캘린더링 처리한 종이는 큰 변화를 나타내지 않았다. 이러한 경향은 경량 도공 시 물과 원지와 반응은 매우 중요한 성질로서 온도 경사 캘린더링을 통하여 도공 시 원지의 물에 대한 안정성이 우수함을 확인할 수 있다.

1.2 캘린더링 nip에서의 열 전달

캘린더링에 있어서 기술적으로 추구해야 할 사항은 적절한 벌크를 유지하면서 동시에 용도에 따라 요구되는 평활도와 기타 표면 특성을 얻는 것이다. 경험에 의하면 종이 표면의 평활도는 선압을 증가 시킴으로써 개선될 수 있다. 반면에 선압의 증가는 밀도를 증가시키고, 섬유의 붕괴 및 섬유간 결합의 파괴를 수반하여 종이의 강도적 성질이 감소되는 결과를 초래하기도 한다. 온도 경사 캘린더링은 이러한 바람직하지 않은 부작용을 감소시키고자 하는 차원에서 개발되었다. 온도 경사 캘린더링은 열과 수분을 단지 종이의 바깥층에만 가하여줌으로써 그 층의 탄성계수를 감소시키고, 낮은 선압에서 섬유의 영구 변형이 얻어질 수 있다는 원리에 근거한 것이다.

온도 경사 캘린더링에서 열은 일반적으로 한쪽 롤의 온도를 250°C 정도의 고온으로 유지하고, 다른 롤은 연질 롤로써 낮은 온도를 유지함으로써 전달된다. 종지로 전달되는 열의 양은 nip 체류 시간에 의하여 좌우된다. 캘린더의 운전 속도는 30 m/s까지 가능하며, nip의 폭은 5 mm 정도, 체류 시간은 1 ms 이하이다. 반면에 열이 종지로 침투되는데 걸

리는 시간은 종이 두께가 100 μm 이고, 열 확산도가 10-7 m^2/s 라고 가정할 경우 약 100 ms 이다.

2. 캘린더 nip에서의 종이의 변형

2.1 두께 및 평면 내 변형

비록 캘린더링의 주 목적이 종이의 표면 특성을 개선하기 위한 것이기는 하지만 종이 전체 크기에 있어서 영구적인 변화가 수반된다. 즉 캘린더링은 두께의 감소와 더불어 평면에서의 치수 증가를 가져온다. 또한 종이의 점탄성적인 성질로 말미암아 캘린더링 후에도 시간이 경과됨에 따라 이들 치수의 변화가 이루어진다.

종이의 표면 특성을 개선하기 위한 목적으로 캘린더링 처리하는 과정에서 종이의 두께 감소는 피할 수 없는 부산물이라 할 수 있다. 이미 전술한 바와 같이 종이는 점탄성체적 성질을 지니기 때문에 캘린더 nip 중간에 도달했을 때의 두께가 최종 두께라 할 수 없다. 캘린더링 후 종이의 최종 두께는 캘린더링 방정식을 사용하거나 종이 성질의 영향(온도, 함수율, 지료 구성)을 평가할 때 중요하다. 쇠목펠프를 사용한 특수지의 회복된 두께는 캘린더링 압력과 속도에 따라 캘린더 nip 유입 시 두께의 약 80%에 달하기도 한다.

평면 및 두께 방향에서 종이의 치수 회복 속도는 캘린더링, 릴링 및 와인딩과 같은 건부 작업에 영향을 미칠 수 있다. 종이 롤은 와인딩 후 압축 응력에 있기 때문에 두께 회복의 영향을 평가하기는

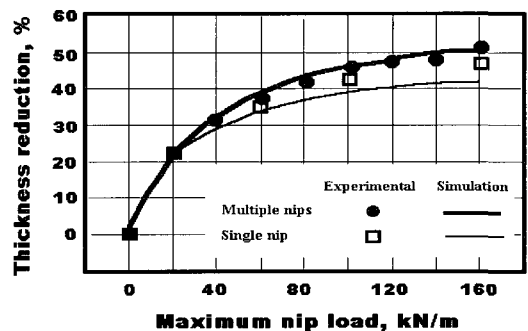


Fig. 14. 다중 nip 및 싱글 nip 캘린더링 시 최대 하중에 따른 신문용지의 두께 감소.

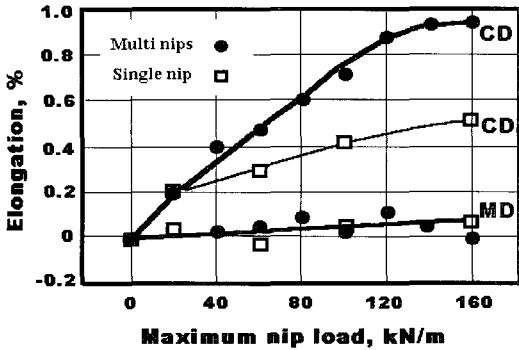


Fig. 15. 다중 닙 및 싱글 닙 캘린더링 시 최대 닙 하중에 따른 신문용지의 신장성.

어렵다. 그렇지만 저장하는 동안 롤의 밀도를 유지하는데 기여할 수 있다. 치수 회복의 정도에 대하여 확보된 정보는 목표로 하는 종이 두께를 결정하는 방법과 종이를 실험실적으로 캘린더링 처리한 효과를 평가하는 방법을 제공해준다.

Fig. 14는 캘린더링 후 즉시 싱글 닙 및 다중 닙 캘린더에 대하여 최대 닙 하중에 따른 종이의 두께 감소를 측정하였다. 두께의 감소는 캘린더링 초기 단계에 가장 크게 일어나며, 닙 하중이 증가됨에 따라 두께 감소 비율이 감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 싱글 닙과 다중 닙에서 유사하게 나타났다. 이들 결과에 대하여 시뮬레이션을 한 결과 다중 닙의 경우는 유사한 경향을 나타내었으나, 싱글 닙의 경우는 다소 편차를 나타내었다. 한편 Fig. 15는 최대 닙 하중에 따른 MD와 CD에서의 신장률을 나타낸 것이다. CD 신장률은 싱글 닙보다 다중 닙에서 더 크게 나타났다.

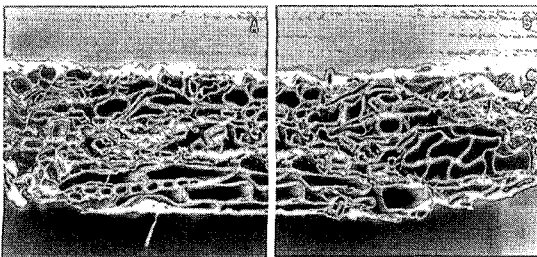


Fig. 16. 캘린더링 하지 않은 TMP 시트.

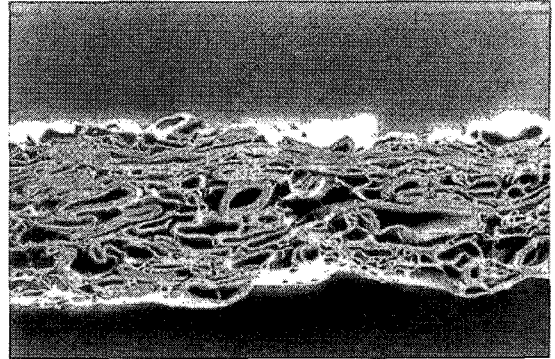


Fig. 17. 가볍게 캘린더링을 실시한 TMP 시트.

2.2. 종이의 구조가 캘린더 닙에서의 거동에 미치는 영향

종이는 이미 잘 알려진 바와 같이 점탄성을 지니고 있다. 따라서 캘린더 닙을 통과 후에 시간이 지나감에 따라 비록 크지는 않지만 변형된 부분의 일부가 회복되는 특성을 나타낸다. 이러한 점탄성 및 캘린더 닙에서의 변형 거동은 섬유 특성에 의하여 많은 영향을 받는다.

Fig. 16은 TMP로 제조된 종이의 횡단면을 나타낸다. 큰 섬유속이 보이고, 부위 별 밀도가 낮은 부분들이 분포해 있다. 작고 섬유막이 두꺼운 섬유도

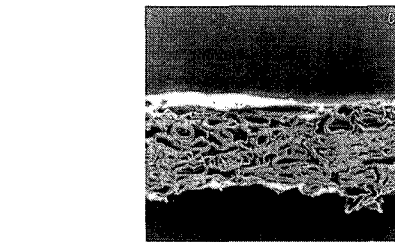
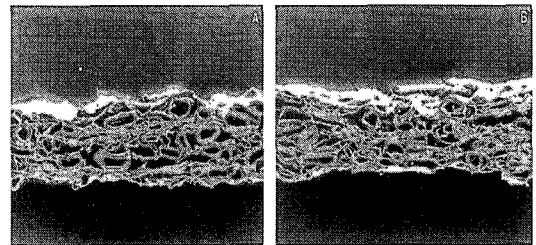


Fig. 18. 심하게 캘린더링 처리한 TMP 시트.

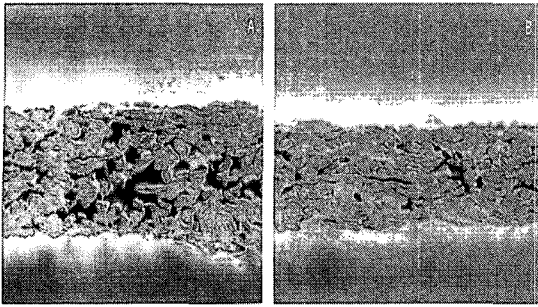


Fig. 19. 캘린더링 전후의 표백 크라프트 시트의 횡단면.
프리 캘린더링(Pre-calendering)

관찰된다. Fig. 17은 28 kN/m의 선압과 519 m/min의 속도로 캘린더링을 실시한 것이다. 시트의 중간 부분뿐만 아니라 시트의 상하부에서도 일부 섬유가 붕괴된 것이 보인다. 그림 39는 보다 강하게 캘린더링을 실시한 것이다. 캘린더링 조건은 선압 206 kN/m, 속도 304 m/min.이 적용되었는데, 이 조건은 실제 현장보다 가혹한 조건이다. 닙에서의 시트의 평균 밀도가 거의 1.1 g/cm³에 달하였다.

Fig. 18은 가혹한 조건으로 캘린더링 처리한 TMP 시트이다. 사진 A와 B의 차이점은 섬유의 유연성, 강직성, 브리틀 특성 등이다. 사진 A에서는 오른쪽에서 붕괴된 섬유가 많이 보이고, 특히 시트의 위쪽에서 섬유가 많이 붕괴된 것을 관찰할 수 있다. 사진 B에서는 시트의 오른쪽 윗 표면 부분의 섬유가 심하게 붕괴되었다. 사진 C는 원지 자체의 불균일성이 반영된 결과이다. 오른쪽의 유연한 섬유가 많이 붕괴되었으며, 공극이 현저히 매우 적은 것이 관찰되었다. 닙에서의 평균 종이의 두께는 42

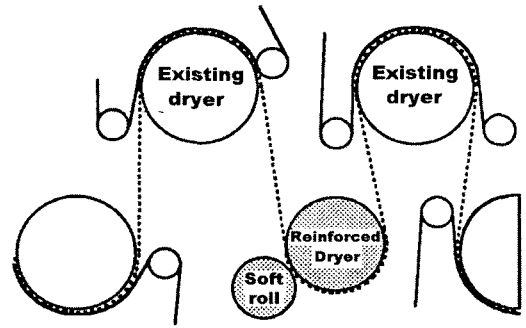


Fig. 20. 건조부의 일부를 하이드라 닙으로 대체한 예.

μm이며, 닙에서의 밀도는 거의 섬유의 것에 근접하였다.

Fig. 19는 침엽수 및 활엽수 표백 크라프트 펄프로 혼합 초지한 시트의 횡단면을 찍은 사진이다. 평량은 68.5 g/m²이며 충전제가 13.5% 함유되었다. 초기 두께는 103 μm, 겉보기 밀도는 0.67 g/cm³이었다. TMP의 경우와는 달리 캘린더링 하기 전에 이미 대부분의 섬유가 붕괴되어 있으나, 비교적 균일한 두께와 밀도 분포를 나타내었다. 캘린더링을 통하여 더욱 치밀한 구조가 만들어졌고 일부 섬유의 탈층과 같은 파괴 현상이 일부 관찰되었다.

일반적으로 종이는 인쇄 또는 용도에 부합되는 표면 특성을 얻기 위하여 초지, 압착, 건조 후 캘린더링을 거의 필수적으로 실시한다. 그러나 우수한 표면 특성을 얻기 위하여 높은 가열된 높은 닙 하중으로 처리를 하기 때문에 버블(bubble), wrinkle, 컷(cut), blackening 등과 같은 문제들이 유발될 수 있다. 또한 강도의 손실 등도 머신 캘린더를 이용한

Table 1. TMP 시트의 하이드라 닙 프리 캘린더링 결과

조건 및 성질	Uncalendered	Hydranip only		Machine calender only	Hadra nip + machine calendering	
First hydra nip load (kN/m)		35	70		35	70
2nd Hydra nip load (kN/m)		70	35		70	35
Basis weight (g/m ²)	48.9	48.6	48.5	48.3	47.9	48.2
Bulk (cm ³ /g)	3.10	1.94	1.84	1.82	1.52	1.55
Hunter gloss (%)	3.5	12.5	12.7	10.2	17.5	16.7
PPS S10 (μm)	7.8	3.3	3.1	3.1	2.3	2.3

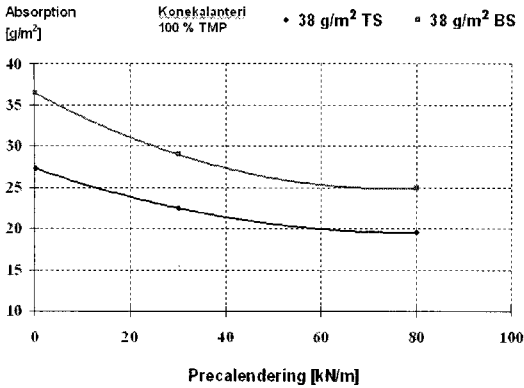


Fig. 21. 프리 캘린더링이 흡수성에 미치는 영향.

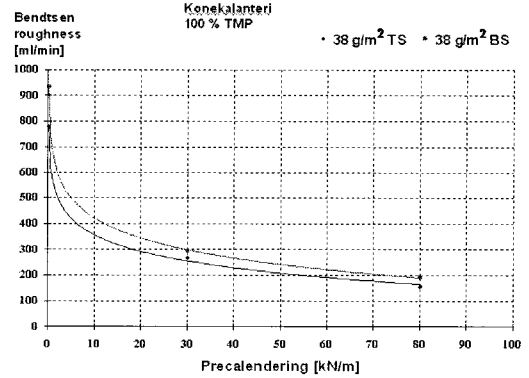


Fig. 22. 프리 캘린더링이 종이의 평활도에 미치는 영향.

평활도와 광택의 개선에 제한 요소로 작용한다.

상기 문제를 해결하기 위한 일환으로 강도의 손실을 최소화하면서 광택 또는 평활도를 개선하기 위하여 온도 경사 캘린더링, 슈퍼 캘린더링, 연질 캘린더링과 같은 기술들이 개발되었다. 프리 캘린더링(Hydra nip)도 상기 문제를 해결하기 위하여 시도된 on-machine 공정이라 할 수 있다.

Hydra nip 프리 캘린더링의 개념은 연질 탄성 nip을 이용하여 지필이 너무 건조되기 전(18~30%)에 압착하는 것으로 기존에 사용해 오던 머신 캘린더의 전처리 과정이라 할 수 있다. 지필이 높은 함수율과 온도를 지니고 있고, 섬유가 유연성이 좋고 잘 변형될 수 있을 때 압착 변형을 시키기 때문에 강도

의 손실 없이 표면 특성을 개선시키는 것이 가능하다. 또한 Fig. 20과 같이 건조 실린더를 하이드라 nip으로 대체함으로써 최소의 경비로 설치하는 것이 가능하다. Table 1은 하이드라 nip으로 프리 캘린더링 한 결과를 예시한 것이다.

Figs. 21-23은 프리 캘린더링에 의하여 얻어지는 종이의 특성으로서, 흡수성, 평활도 및 투기도의 변화를 나타낸 것이다. 프리 캘린더링은 종이가 충분히 건조가 이루어지기 전에 적용됨으로서 낮은 선압에서도 높은 효과를 나타내어 흡수성과 투기도의 감소 효과가 매우 높으며, 평활도도 크게 개선되는 것을 확인할 수 있다.

3. 롱 닙(Long nip) 캘린더링

거칠기, 다공성 등과 같은 종이의 표면 특성을 인쇄하기 위해 요구되는 수준으로 개선시켜 주는 것이 캘린더링의 중요한 목적이다. 제지 및 판지회사에 의한 대부분의 투자 목적은 생산 용량을 증가시키고, 종이의 표면 특성과 인쇄적성을 개선하기 위한 것이다. 따라서 캘린더링은 제지 및 판지제조 의 부공정으로서 더욱 그 수요가 증가되고 있다.

보다 빠른 종이 생산 속도와 보다 우수한 종이 품질에 대한 요구로 말미암아 전형적인 기존의 캘린더와 기술만으로는 만족시켜줄 수 없는 지경이 이르게 되었다. 1970년대 말과 1980년대 초에 이루어진 연질 닙 캘린더의 도입은 고분자 재료의 사용

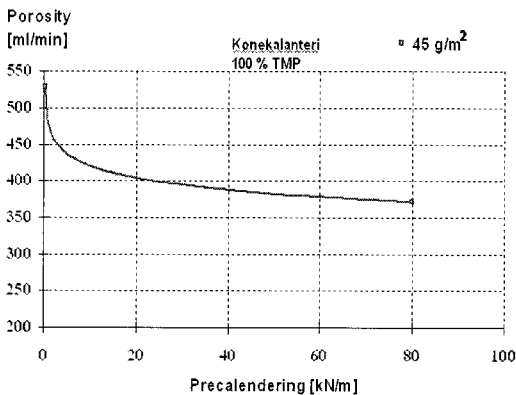


Fig. 23. 프리 캘린더링이 종이의 투기도에 미치는 영향.

을 유도하게 되었고, 이 재료들은 곧 연질 닙 캘린더와 탄성 커버를 사용하는 다른 캘린더의 효율을 개선시키는데 중요한 역할을 하게 되었다.

1980년대 초에 라이너 공장에 첫 번째 슈 프레스(shoe press)가 설치되었고, 이것이 익스텐디드 닙(extended nip)을 이용하는 새로운 압착 기술의 효시를 이루었다. 이 새로운 개념은 Albany International에 의하여 채택된 새로운 고분자 기술의 결과라고 할 수 있다. 슈 프레스 벨트는 고분자 수지로 코팅된 강화 yarn system과 roll shell의 표면과 비교될 정도의 표면으로 이루어진다.

1990년대 초에 이 새로운 개념의 벨트 캘린더(belt calender)가 스웨덴 STFI에서 도입되었으며, 이 아이디어가 후에 오늘날 Shoe calender로 알려진 Valmet(Metso)의 OptiDwell calender가 만들어지게 했다. 이 새로운 개념의 캘린더를 1994년 스웨덴의 Korsnäs AB사에서 처음 도입하여 가동하였다. 이 개념은 Valmet, Korsnäs, 그리고 Albany International의 공동 개발 프로그램을 통하여 개발되었다.

롱 닙 체류시간(long nip dwell time)은 캘린더링 효과를 크게 개선시켜 주었다. 즉 같은 압력에서 닙 체류시간을 증가시켜 줌으로써 지속적인 종이의 변형이 얻어질 수 있다.

기존에 제지 공정에서 사용하던 머신 캘린더나 연질 닙 캘린더를 롱 닙 캘린더로 교체함으로써 힘강도와 벌크를 유지하거나 개선시키고 동시에 종이와 판지의 인쇄적성을 크게 개선시킬 수 있다. 롱 닙 캘린더링을 적용할 경우 인쇄적성과 광택 균일성 개선을 통하여 연질 닙 캘린더링에 비하여 7%의 비용 절감 효과가 얻어질 수 있었다.

3.1 연질 롤 캘린더링

종이 및 판지용 연질 롤 캘린더는 연질 롤/연질 롤, thermo 롤/연질 롤 또는 이들을 조합한 다중 닙 롤로 구성될 수 있다. 연질 롤 캘린더링 기술은 최근 크게 발전되어 오늘날 350 kN/m를 초과하는 선압, 1500 m/min 이상의 속도 및 200°C 이상의 표면 온도가 동시에 적용될 수 있다. 그러나 그중 가장 큰 발전은 경도가 65~95 ShD 사이에서 조절될 수 있는 연질 롤 커버의 개발이다. 각 공정에서

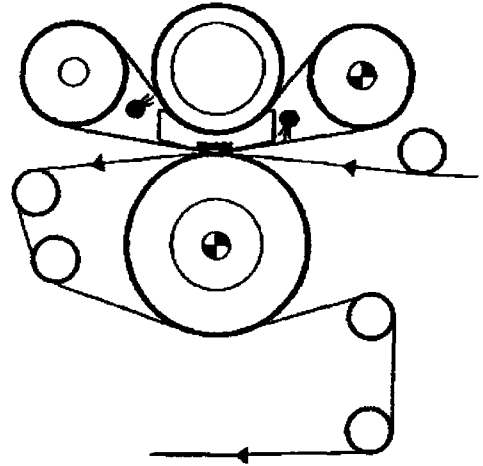


Fig. 24. STFI에 설치된 익스텐디드 닙 캘린더.

그에 적절한 롤의 경도를 적용해 줌으로써 밀도를 최소한으로 증가시키면서 원하는 수준과 균일성을 지니는 표면 특성을 얻는 것이 가능하다.

초지기와 도공기의 속도가 증가됨에 따라 연질 롤 캘린더가 무광지와 광택지를 모두 생산할 수 있는 유일한 캘린더로 남게 되었다. 연질 롤 캘린더의 가장 연한 경도는 약 98 ShA 또는 10 P&J에 해당되는 60~65 ShD의 범위이다. 롤 커버는 수명 때문에 더 이상 연하게 만드는 것이 쉽지 않다.

분자를 코팅한 롤을 사용하는 고속 캘린더의 다른 단점은 MD에서의 작은 스케일의 종이 두께 변이에 의하여 야기되는 barring의 발생이다. 이 변이는 특히 연질 캘린더 롤을 사용할 때 롤 표면과 종

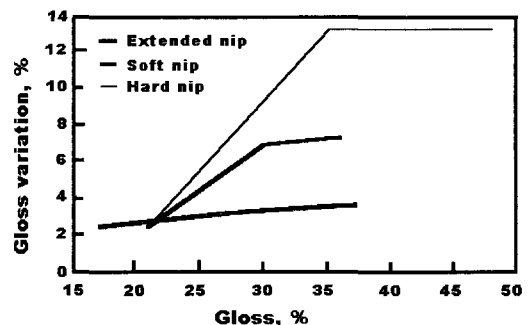


Fig. 25. 다른 캘린더링 방법에 의하여 얻어진 광택도에 따른 변이 정도.

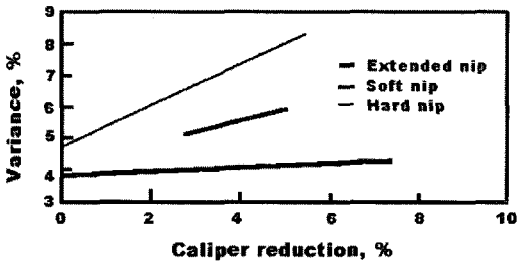


Fig. 26. 다른 캘린더링 방법에 의하여 일어난 두께 감소별 변이.

이에 자국을 남기는 진동을 야기할 수 있다. 이러한 결함은 캘린더 롤의 수명과 롤 연마 주기를 단축시키며, 특히 온-머신 캘린더의 생산 용량을 감소시키는 결과를 가져올 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 캘린더링 개념인 슈프레스 캘린더링이 개발되었고, 스웨덴 STFI에 설치되었다. 이때 2개의 매우 직경이 큰 롤 사이에 shoe를 설치하고 벨트를 이용하여 종이에 하중을 전달하는 방식을 이용하였다. 기존의 연질 롤 캘린더와 새로운 익스텐디드 닙 캘린더링 사이의 차이를 조사하기 위하여 파일럿 캘린더가 사용되었는데, 300 kN/m까지 선압을 올릴 수 있었다.

연질 익스텐디드 닙 캘린더의 장점은 Fig. 25와 26로부터 관찰할 수 있다. 즉 익스텐디드 닙 캘린더링 처리한 종이의 광택도와 두께 감소의 변이가 경질 닙 및 연질 닙 캘린더링 시에 비하여 현저히 낮음을 보여주어 인쇄적성 개선에 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

3.2 OptiDwell shoe calender

롱 닙 캘린더는 SymBelt shoe press의 디자인에 기초한 것으로 연질의 유연한 벨트 안에서 유

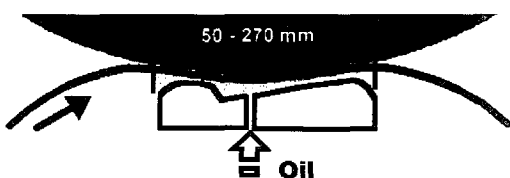


Fig. 27. Shoe 캘린더의 구조.

체역학적으로 하중이 가해지는 shoe와 가열된 상부 롤이 롱 닙을 형성한다. SymBelt는 유체 정역학 부위에서 농축 기름 막을 주는 독특한 기름 순환 시스템을 가지고 있어서 닙을 통과하는 벨트를 연속적으로 순환시켜 마찰없이 작동될 수 있도록 해준다. 이렇게 순환을 시켜줌으로써 종이 뭉치가 닙에 끼거나, 마찰열 및 다른 열이 지나치게 올라가게 하는 원인에 의한 벨트 손상의 위험이 최소화될 수 있다.

Shoe의 폭은 닙의 폭, 즉 닙에서의 체류 시간을 결정해 준다. 실제로 닙의 폭을 50 mm에서 300 mm까지 조절이 가능하다. 벨트를 교환하는 동안 다른 shoe를 쉽게 설치할 수 있다. 일단 어떤 shoe가 설치되던 간에 롤의 직경, 벨트의 경도와 두께 또는 어느 정도의 선압이 가해지든 상관없이 닙의 폭은 일정하게 유지된다.

롱 닙 이외의 다른 중요한 장점은 닙압과 닙 체류 시간이 각기 최적화 될 수 있다는 것이다. 닙압/압력 펄프는 하중 비를 변경시키는 방법으로 최적화될 수 있으며, 2~15 MPa 범위 내에서 변동이 가능하다. 이러한 방법을 통하여 벌크를 유지하고 양호한 인쇄적성과 외관을 위한 균일한 표면을 만들어 줄 수 있는 최적의 닙 조건을 만들어 줄 수 있다.

3.3 Process Belt(GlossBelt)

롱 닙 캘린더에 사용되는 벨트는 연질로서 유연하며 탄성을 지닌다. 이러한 재료의 성질은 이 벨트

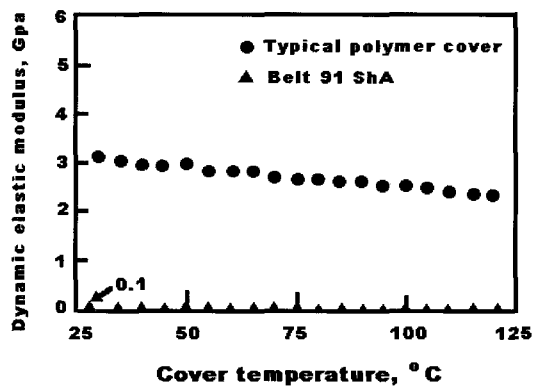


Fig. 28. 전형적인 고분자 커버와 Belt 91 ShA의 동적 탄성계수.

개념에 있어서 중요한 인자이다. 연질 벨트의 성질은 특히 낮은 nip압에서 벌크가 중요한 판지를 표면 처리하기 위한 요구를 만족시킬 수 있도록 설계되었다. GlossBelt에 사용된 수지의 압축 동적 탄성계수를 전형적으로 사용되는 고분자 커버와 비교한 결과 Fig. 28과 같이 보다 연한 벨트 수지가 더 높은 흡수 능력을 지니고 있고, 더욱 중요한 것은 높은 변형 속도에서도 이 성질이 유지된다는 것이다. 따라서 이 벨트는 높은 하중, 높은 속도에서 shoe nip을 작동하는 높은 동적 하중에도 견딜 수 있다.

벨트를 구성하는 매트릭스 재료는 내구성을 지녀야 하며, 특히 shoe와 접촉하는 쪽의 양호한 마찰 특성을 지녀야 한다. 또한 벨트는 우수한 표면 특성과 캘린더링 성질을 지녀야 하는데, 이러한 성질은 연하면서도 강한 재료를 주입하는 방법으로만 얻을 수 있다. 이러한 목적으로 사용되는 재료로서 고무와 TPUs가 있다.

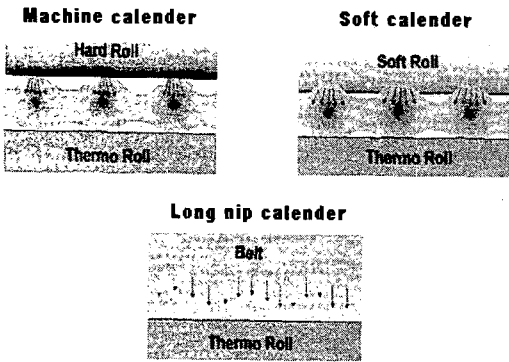


Fig. 29. 머신 캘린더, 연질 캘린더 및 롱 nip 캘린더의 비교.

- 1) 경질/경질 nip은 nip 폭이 작고, 높은 압력이 가해져서 일정한 두께를 갖는 종이 얻어질 수 있으나, 밀도가 불균일하다
- 2) 경질/연질 nip은 경질 nip보다 밀도가 보다 균일한 종이 얻어질 수 있으나, 두께가 불균일하다.
- 3) 롱 nip은 탄성 Process Belt가 연질 롤보다 연하기 때문에 보다 균일한 밀도를 지니는 종이를 얻을 수 있다. 그 결과 보다 벌크가 우수하고 강도가 높은 종이 얻어지며, 작업성 및 인쇄적성이 우수하다.

3.4 주요 캘린더링 방법의 비교

nip에서 발생하는 현상을 이해하기 위하여 Fig. 29에 도시된 바와 같이 세 가지 다른 캘린더링 기술을 비교하였다. 전형적인 연질 캘린더에서 사용되는 연질 커버의 탄성계수는 최소한 Process Belt의 탄성계수의 10배 정도에 해당된다. Process Belt는 연질 롤보다 더 연하고, 탄성이 낮기 때문에 nip에서 종이 표면의 윤곽을 따라 쉽게 변형된다.

4. 수분 경사 캘린더링

수분 경사 캘린더링의 개념은 펄프 섬유가 친수성을 지니고 있는 점에 착안하고, 온도 경사 캘린더링과 매우 유사하게 종이 두께 방향에서 수분 경사를 인위적으로 야기시켜 유리 전이 온도와 소성을 조절함으로써 벌크는 유지하여 주면서 표면의 평활도를 개선시키기 위한 것이다. 그 결과 섬유의 파괴보다는 섬유의 변형을 유도함으로써 종이의 강도 손실을 최소화하고, Fig. 30과 같이 미세적 거칠기를 감소시켜주는 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다. 그림 51은 머시 캘린더링과 수분 경사 캘린더링한 각각의 종이 표면을 나타낸 것으로 비슷한 수준의 거칠기에서 얻어진 종이의 밀도는 각각 1143 kg/m³와 1128 kg/m³로 수분 경사 캘린더링을 적용함으로써 벌크 향상에 도움이 됨을 알 수 있다.

수분 경사 캘린더링을 효과적으로 하기 위해서

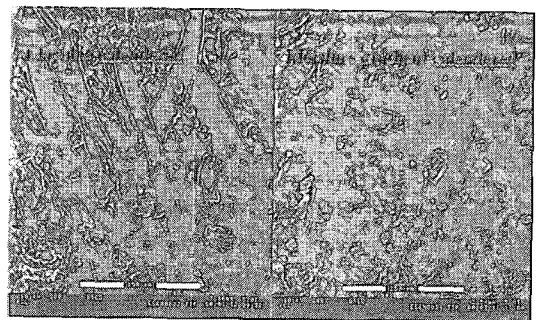


Fig. 30. 머신 캘린더링 및 수분 경사 캘린더링한 종이의 표면.

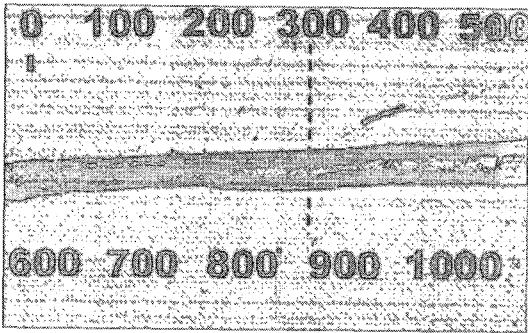


Fig. 31. 펄프 섬유 의 팽윤 거동.

는 종이 표면에 적용된 물은 다음과 같은 사항들이 만족시켜야 한다.

- 섬유막에 흡수되어 수분 경사를 이루어야 한다.
- 충분히 짧은 시간 내에 흡수되어야 한다.
- 종이 표면이 손상을 입지 않을 정도의 물방울의 크기를 제공하는 기술이 필요하다.
- 수분이 균일하게 적용되어 흡수되어야 한다.

Fig. 31과 32는 물이 섬유와 접촉한 후 시간이 흐름에 따라 수반되는 섬유의 팽윤 거동을 나타낸 것이다. 이 자료에 의하면 300 ms이면 화학펄프 섬유의 경우 90~95%의 섬유 팽윤이 이루어진다. 현실적으로 이와 같은 매우 짧은 시간 내에 섬유가 충분히 팽윤되지 않을 경우 생산성 문제 때문에 실용화가 어렵다고 할 수 있다.

Fig. 33은 적용된 물의 양과 침투 깊이에 따른

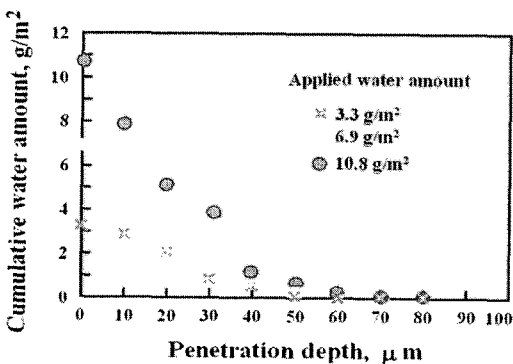


Fig. 33. 적용된 물의 양과 종이 두께 방향에서의 위치에 따른 물의 양.

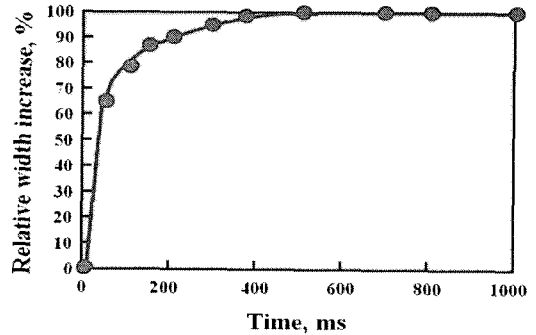
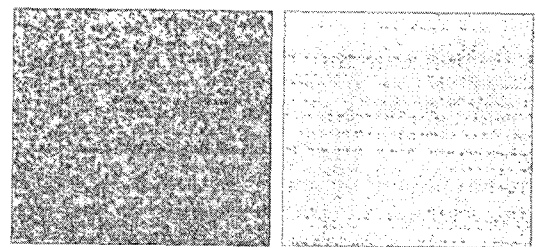


Fig. 32. 물의 접촉 시간에 따른 섬유 폭의 증가율.

누적된 물의 양을 나타낸 것으로 적용된 물이 많을수록 표면에 누적된 물의 양이 증가하여 수분 경사가 더 크게 나타났으나 침투 깊이가 깊어짐에 따라 그 차이는 점차적으로 감소되어 60 μm 이상에서는 거의 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 34는 종이 표면에 분무된 물방울의 크기에 따른 도포된 물 분포의 균일성과 물에 의하여 얻어지는 표면의 특성을 나타낸 것으로 물방울 입자의 크기가 20 μm 미만인 경우에는 물이 균일하게 도포될 뿐만 아니라 종이 표면에 물방울 자국이 거의 나타나지 않은 반면, 물방울의 입자 크기가 80 μm 이상인 경우에는 물의 분포가 불균일할 뿐만 아니라 물방울 자국이 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 35는 수분 경사 캘린더와 일반 머신 캘린더를 이용하여 처리한 종이의 평활도를 동일 밀도 수준에서 비교한 것으로 수분 경사 캘린더링을 적용



Particle size $\geq 80 \mu\text{m}$

Non-uniform water layer
Water drop mark

Particle size $< 20 \mu\text{m}$

Uniform water layer
No water drop mark

Fig. 34. 물방울의 크기가 물의 분포 균일성과 종이 표면의 상태에 미치는 영향.

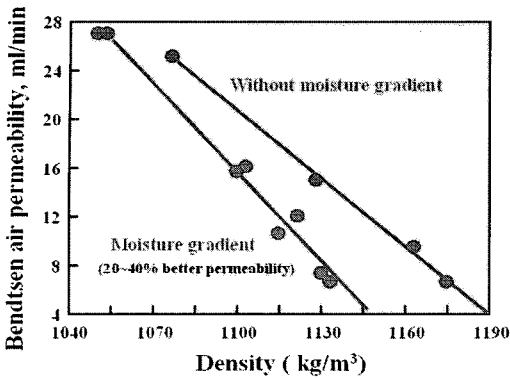


Fig. 35. 수분 경사 캘린더링이 종이의 투기도에 미치는 영향.

함으로써 Fig. 30에서 설명된 바와 같이 수분 경사, 가소성 및 유리 전이온도의 변화에 의하여 벌크가 유지되면서도 표면이 매우 평활하게 되는 효과에 의하여 머신 캘린더링을 적용했을 때에 비하여 20~40% 더 우수한 투기도가 얻어졌다.

수분 경사 캘린더링은 강도적인 측면에서도 유리하다. 일반적으로 머신 캘린더링을 적용할 경우 섬유간 결합의 파괴로 강도가 다소 감소되는 경향을 나타내지만 수분 경사 캘린더링을 적용할 경우 캘린더링은 Fig. 36에서 보는 바와 같이 약 6% 더 높은 인장강도를 얻을 수 있음이 보고된 바 있다.

5. 캘린더링 기술에 따른 종이 성질의 변화

종이와 판지를 캘린더링 처리하는 주요 목적을 간단히 말하자면 인쇄적성을 개선하는 것이다. 일반적으로 평활한 표면을 갖는 종이인쇄 품질이 우수하다. 스티프니스를 크게 손상시키지 않으면서 평활도를 개선하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 특히 포장용의 경우 강도와 가공적성은 인쇄만큼 중요하다.

롱 님 캘린더를 사용할 경우 동일한 압력을 가한다 할지라도 님 체류시간이 짧은 캘린더로 처리했을 때보다 더 큰 영구 변형이 일어난다. 즉 이러한 현상은 롱 님 캘린더를 사용함으로써 비교적 낮은 압축력을 가하더라도 동일한 수준의 변형을 일으킬

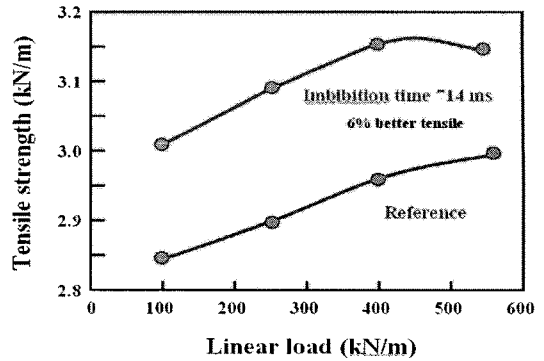


Fig. 36. 수분 경사 캘린더링이 종이의 인장강도에 미치는 영향.

수 있다는 것을 의미한다. 체류시간이 길고, 비압력 (specific pressure)이 낮을수록 지필의 벌크와 stiffness를 유지하는데 도움이 되며, 특히 thermo roll의 온도가 지필 온도보다 높거나, 캘린더링 처리를 하기 전에 수분을 공급하여 지필이 수분 경사를 이루고 있을 때 더 현저하다.

Shoe calender에 탄성의 plastic belt를 사용함으로써 탄성을 지니는 지필의 중간 부분의 압축을 최소화하는데 필요한 낮은 님압과 긴 체류시간을 제공할 수 있으며, 또한 보다 우수한 평활도를 지니며, 광택, 밀도 및 다공성의 변이가 적은 종이 표면을 제공할 수 있다. 특히 동적인 상황에서 그 효과는 더욱 두드러진다. 즉 롱 님 캘린더는 어느 다른 캘린더보다 님에서 보다 균일한 압력 분포를 제공

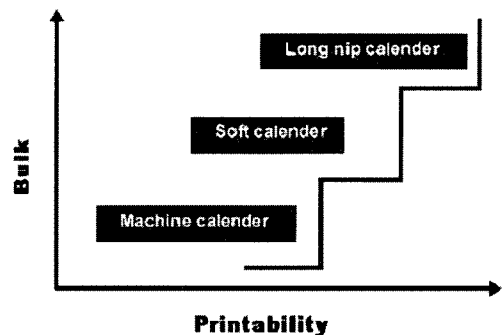


Fig. 37. 캘린더링 방법이 벌크와 인쇄적성에 미치는 영향.

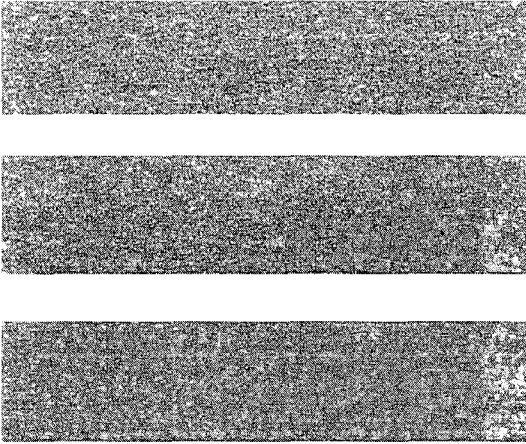


Fig. 38. 라이너 판지의 캘린더링 방법이 인쇄 균일성에 미치는 영향.

- 위 : 캘린더링 하지 않은 것으로 인쇄 균일성이 불량
- 중간 : 연질 님 캘린더로 처리했으나 아직 인쇄 얼룩이 있음
- 아래 : Belt 캘린더로 처리한 결과 양호한 인쇄 균일성이 얻어졌음

해 줄 수 있다. 따라서 보다 균일한 광택 분포와 보다 우수한 마이크로 수준의 평활도를 제공해 줄 수 있다. 또한 지필이 동질성의 다공성을 지니도록 해줌으로써 보다 균일한 잉크의 전이와 흡수를 가져와 인쇄 얼룩(print mottle)을 감소시켜준다.

5.1 인쇄의 균일성

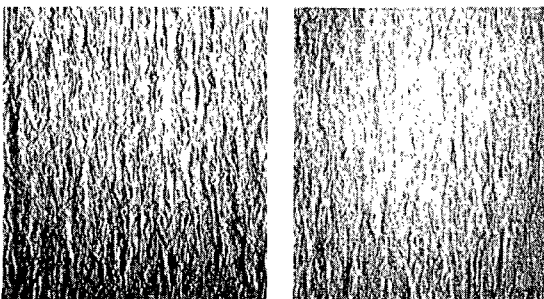


Fig. 39. 연질 캘린더(왼쪽)와 롱 님 캘린더(오른쪽)에 의하여 얻어진 종이의 표면 평활성.

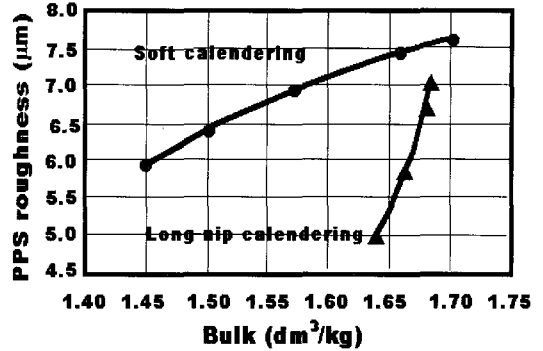


Fig. 40. 롱 님 캘린더에 의한 벌크 보존과 평활도 개선.

롱 님 캘린더링의 가장 큰 장점은 이미 앞에서 언급한 바와 같이 균일한 표면, 벌크 및 다공성을 제공하는 것이다(Fig. 38). 따라서 어느 캘린더링 방법에 비하여 보다 균일한 인쇄가 가능하다.

5.2 평활도의 균일성

탄성의 process belt를 사용한 롱 님 캘린더는 균일한 표면 평활도를 제공해준다(Fig. 39). 마이크로 수준의 평활도 변이는 연질 캘린더 사용 시에 비하여 1/10 수준도 되지 않는다. 이와 같은 개선 효과는 종이뿐만 아니라 판지에서도 확인되었다.

5.3 벌크 유지

판지뿐만 아니라 종이의 경우에도 동일한 평량

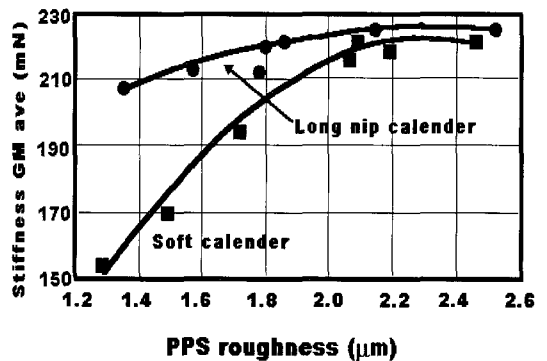


Fig. 41. 롱 님 캘린더링에 의한 stiffness 보존.

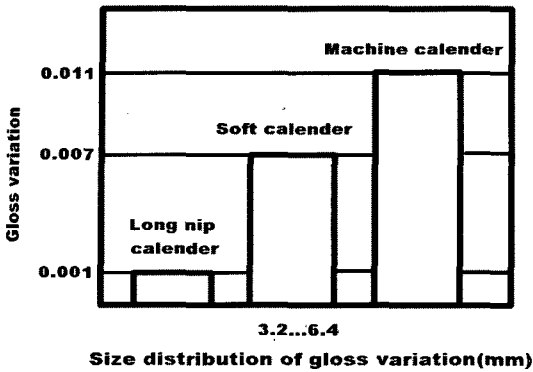


Fig. 42. 롱 닙 캘린더에 의한 광택 변이의 감소.

에서 높은 벌크를 제공할 수 있다면 스티프니스가 개선될 수 있기 때문에 펄프 사용량 감소에도 도움

이 될 수 있다. Fig. 40은 연질 캘린더와 롱 닙 캘린더로 처리한 결과 얻어진 벌크와 평활도와의 관계를 나타낸 것이다. 롱 닙 캘린더의 경우 벌크를 별로 감소시키지 않으면서도 평활도를 크게 개선시켜 주어 약 7%까지 펄프 사용량 절감이 가능한 것으로 평가되고 있다. 특히 stiffness의 차이는 높은 평활도에서 더 현저했다(Fig. 41).

5.4 광택의 균일성

롱 닙 캘린더는 전술한 바와 같이 다른 캘린더링 방법에 비하여 광택의 변이를 감소시켜줄 수 있다 (Fig. 42). 연질 캘린더와 비교할 때 광택 변이의 감소는 탄성의 process belt를 사용하는 롱 닙 캘린더링보다 연질 캘린더에 의하여 보다 균일한 압축이 일어나기 때문으로 설명될 수 있다.