

압축성을 고려한 캘린더 님 내에서의 열전달 현상에 대한 해석

이학래 · 박선규

서울대학교 농업생명과학대학 임산공학과

제지공정의 마지막 단계인 캘린더는 지필의 표면을 평활하게 하고 두께를 감소시켜 균일하게 하는 역할을 한다. 하지만 캘린더링은 인장강도 등의 강도적 성질과 불투명도 등 광학적 성질을 저하시키는 공정이기도 하다. 따라서 캘린더링 공정에 의한 제품 품질의 저하를 극소화하기 위해서는 공정인자의 엄밀한 관리가 요청된다. 캘린더링의 주요 공정인자에는 온도와 압력, 님 체류시간, 유입지의 함수율, 유입지의 온도, 롤의 재질 등이 있다. 이 가운데 특히 캘린더링 온도와 압력은 주요한 공정 인자이다. 따라서 이들 변수에 의한 캘린더링 공정의 변화를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 캘린더링 공정의 속도와 관련된 님 체류시간과 유입지의 함수율, 유입지의 온도, 롤의 재질 등은 실제 공정에서 변화시키기 어려운 반면 온도와 압력은 조절이 비교적 용이한 특징도 지니고 있다.

캘린더링 전후의 종이의 물성 차이는 지필 내부로의 열 침투에 의한 열변형에 따라 크게 달라진다. 셀룰로오스는 유리전이온도 이상으로 가열되면 그 성질이 크게 변화하므로 캘린더링 시의 온도가 유리전이온도보다 높거나 낮은 경우 캘린더링된 종이의 물성 차이가 크게 달라질 수 밖에 없다. 캘린더링은 비정상상태에서 진행되기 때문에 지필의 내층보다는 표층으로부터 순차적으로 열변형이 발생하는 공정이다. 그러므로, 지필의 두께 방향으로의 열 침투 현상의 해석을 통하여 캘린더링 시 유리전이온도가 어느 깊이까지 도달하는가를 파악하는 것은 캘린더링 공정의 해석에 매우 중요하다.

캘린더링 공정에서 발생하는 열전달현상 해석 시 지필의 압축을 고려하지 않고 비압축성 물질로 가정하는 것은 캘린더링 공정 인자 중 압력에 의한 영향을 제대로 평가하지 못하는 한계를 지니게 된다. 따라서 본 연구에서는 지필의 압축성을 고려하여 캘린더링 모델을 정립하고, 이를 토대로 캘린더링 공정 조건에 따른 열 침투 현상을 해석코자 하였으며, 그 방법으로 수치해석기법을 도입하였다. 또 실제 캘린더링 전후의 두께 변화를 측정하여 유리전이온도의 도달 깊이와 비교하였다. 지필의 압축 정도는 롤의 직경과 님 폭을 이용하여 MD 방향으로 함수화하였으며, 열전달 계수로는 겉보기 값을 사용하였다. 이때 지필은 균질한 것으로 가정하였다. 함수율은 유리전이온도를 좌우하는 가장 큰 인자이나 본 연구에서는 항온항습처리를 통해 유입지의 함수율을 고정시켰으며 캘린더링 시 함수율의 변이는 없다고 가정하였다.

그 결과 열침투깊이가 증가할수록 지필은 보다 변형되기 쉬운 상태가 되어 주어진 압력 조건에 대해 소성변형 정도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 캘린더링 전후에 두께 변화를 측정하여 정량적으로 평가할 수 있었다. 수치해석기법을 통해 같은 압력 조건에서 온도가 증가함에 따라 혹은 같은 온도 조건에서 압력이 증가함에 따라 지필 내의 유리전이온도의 침투 깊이가 증가함을 알 수 있었으며, 이는 캘린더링 전후의 두께 변화의 측정 결과와 일치하였다. 또 NRT가 증가함에 따라서도 유리전이온도 침투 깊이가 증가하였다.