

유가증권의 접힘복원 특성분석

Analysis of Folding Restoration of Korea Bank Note

박용성¹⁾, 서영범²⁾, 전 양²⁾

1) 한국조폐공사 제지본부, 2) 충남대학교 임산공학과

Yong Sung Park, Yung Bum Seo, Yang Jeon

1) Korea Minting & Security Printing Corporation. 2) Chungnam National Univ.

Absrtact

Restoration behavior of folded Korea bank note was studied. The variables were folding radii (0.5, 1, 3, 5, 7, 9 mm) and folding time. Initially, bank note was completely folded to make 180° against predetermined radius panel, and restored angles were measured according to allowed restoration time. We found as folding radius was smaller and as folding time was longer, restoration speed of folding angle became slower and the amount of final restoration was smaller, respectively. Initial restoration angles were related to the elastic moduli of the bank notes, and final restoration angles were inversely related to the TEA of the bank notes, respectively.

1. 서론

복원율이란 지폐를 반지갑(접는 지갑)에 넣고 일정기간 이후에 꺼내었을 때 활처럼 구부러진다가, 손으로 구김을 가하였을 때 구김상태가 오랫동안 지속되지 않고 부분적으로 혹은 원래의 상태로 복원되는 현상을 말한다.

지폐의 복원력은 최근 들어 장지갑 보다는 반지갑을 선호하는 경향이 급속히 증가하고, 반지갑을 선호하는 젊은 세대가 많이 찾는 편의점이 증가추세에 있으며, 금융자동화기기의 사용이 증가하면서 현금 입출금기기 사용빈도가 급격히 증가하므로 더욱 중요한 요소가 되었다.

따라서 본 연구에서는 지폐의 복원율에 영향을 주는 종이의 특성을 분석하고, 이를 토대로 복원율을 측정하기 위한 측정방법을 제정한 다음, 종이의 탄성과 신장변형이 복원율에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 접합 복원

반지갑 속에서 변형된 지폐의 경우는 시간이 지나면서 서서히 복원되는데 반하여, 동전지갑 속에서 변형된 지폐의 경우는 반지갑에서의 복원속도 보다는 느리게 관찰된다. 그러나 인위적으로 구김을 가한 경우는 외부에서 힘을 가하기 전에는 스스로 복원되지 않는 경향이 있다.

따라서 본 연구에서는 반지갑과 동전지갑에서의 변형은 동일한 유형으로 분류하고, 인위적으로 접거나 구김을 가한 것은 용지의 유연특성과 관련한 것으로 하였다.

일반적으로 반지갑 속에는 신분증, 신용카드 등이 함께 보관되어 있으므로 통상 지갑내피의 두께를 포함하여 반경 4 mm 정도가 되므로 완전히 접히지는 않는다. 따라서 지폐를 주머니 속에 지갑이 없이 소지할 때와 신분증 등 내용물이 없는 상태를 고려하여 한쪽 끝이 반원으로 된 패널 두께를 0.5, 1, 3, 5, 7, 9 mm로 하였다.

압착하는 시간은 예비실험결과 48H 이상 압착 시 더 이상의 변화가 없으므로 최고시간을 48H로 하여 48H, 24H, 12H, 6H로 4단계로 구분하였으며, 압착을 위한 하중은 지폐가 충분히 응력을 받을 수 있도록 5 kgf 상태에서 보관하였다.

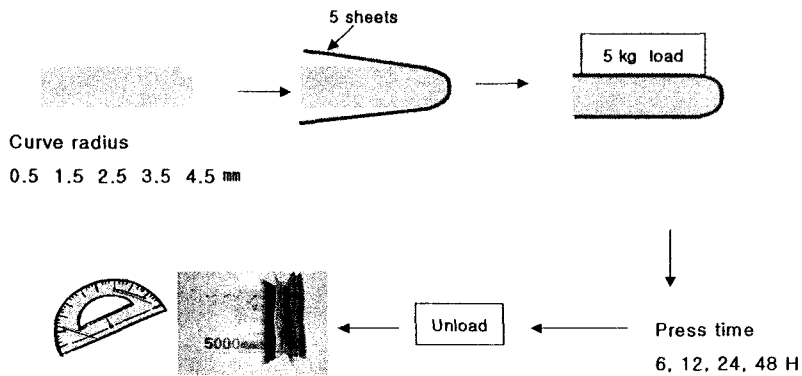


Fig. 1. The test method for restoration properties.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압착시간이 복원율에 미치는 영향

Fig. 2는 압착시간별 접힘 반경에 대한 값을 평균하여 접힘각도의 복원을 나타낸 것으로 압착시간과 복원각도는 상관관계가 매우 높으며 압착시간이 길수록 상관계수는 높았다. 물론 접힘각도의 초기값은 180° 이며 순간적으로 Fig. 2의 0 분시 접힘각도를 기록하였다.

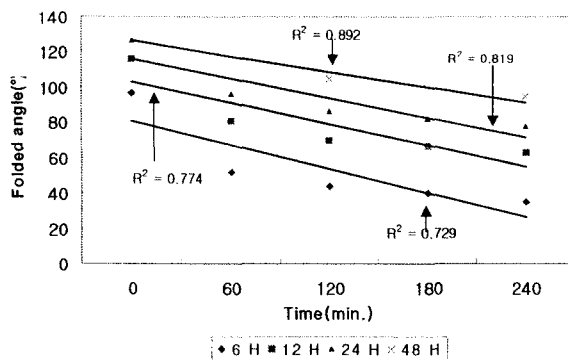


Fig. 2. The relationship between restoration angle, restoration time, and pressing time in folded bank note.

Fig. 3은 응력제거 후 시간의 경과에 따른 복원각도를 변수로 하여 분석한 것으로, 응력제거 직후의 복원이 빠른 반면 응력제거 후 120분 이후부터는 복원속도가 낮게 나타났다.

3.2 접힘 반경이 복원에 미치는 영향

Fig. 4는 접힘 반경과 접힘각도의 관계를 분석한 것으로, 분석결과 굽힘 반경이 0.5 mm일 때와 1.5 mm일 때의 접힘 상태가 큰 것으로 나타났고 3.5 mm와 4.5 mm에서는 상대적으로 낮은 것으로 나타나 접힘 반경과 접힘각도와 관계는 곡선관계에 있음을 확인하였다.

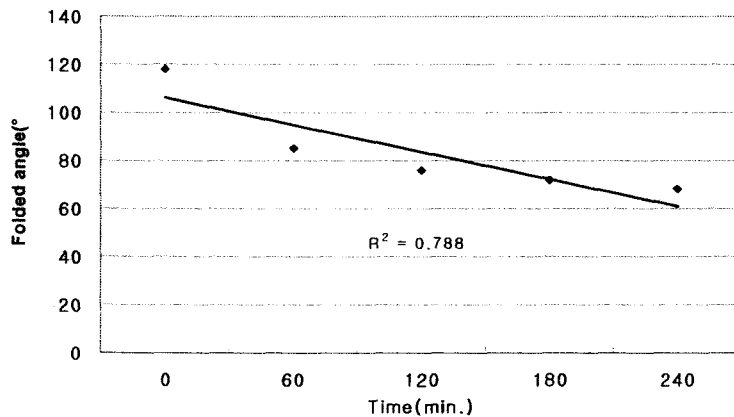


Fig. 3. The relationship between restoration angle versus restoration time.

3.3 복원율의 기계적 특성 고찰

응력을 제거한 이후 복원되는 과정은 크게 3단계로 나누어 설명할 수 있다. 순간탄성(instant elastic) 영역은 압착했던 응력을 제거했을 때 순간적으로 회복되는 탄성회복 영역이라고 할 수 있다. Fig. 2에서 0분 시 측정된 접힘각도는 순간탄성에 의한 복원이 이루어진 후에 측정한 것이다. 지연탄성(delayed elastic)은 순간적인 탄성은 아니지만 회복속도가 빠른 탄성영역이라고 할 수 있다. 즉, 지압으로부터의 응력이 제거

됨으로 짧은 시간동안 회복되는 것이다.

점성(viscous) 영역에서는 시간의 경과에 비하여 회복력이 뚜렷하지 않은 특성을¹¹⁾ 지니는 영역이다. 순간탄성과 지연탄성의 합이 90°를 넘으면 종이는 자체 자중에 의하여 아랫방향으로 향하려는 성질이 있으며 결국 지폐는 퍼지게 된다. 하지만 이들의 합이 90°를 넘지 못하면 지폐는 자중에 의해 퍼질 수 없게 된다. 지폐는 지갑에서 꺼낸 직후에는 종이의 탄성에 의하여 복원속도가 빠르게 작용하고, 일정시간 이후에는 탄성이 소진되어 복원속도가 늦어지거나 회복되지 못할 수가 있다.

파괴(failed) 영역은 복원이 대부분 이루어진 그 다음의 영역으로 볼 수 있다. 접힘에 의한 종이의 변형량이 종이의 강도적 한계를 벗어났기 때문이다. 접힘 부분 옆으로 웨이브(wave)가 발생하는 것은 접힘 부분이 탄성을 잃었고 압축변형이 발생하였기 때문이며 종이의 자중에 의하여 가장자리가 지면을 향하게 되기 때문이다.

복원과정에서 안쪽으로 wave 현상이 발생하는 것은 지폐의 굴곡면에 변형이 일어났기 때문이다. 응력이 축방향(axial)으로 가해졌을 때 변형은 바깥쪽은 신장이 발생하고 안쪽은 압축이 발생할 것이다.²⁰⁾ 즉, 압력을 가할 때 종이의 두께방향 안쪽은 압축이 발생하고 바깥쪽은 신장이 발생할 것이다.¹¹⁾

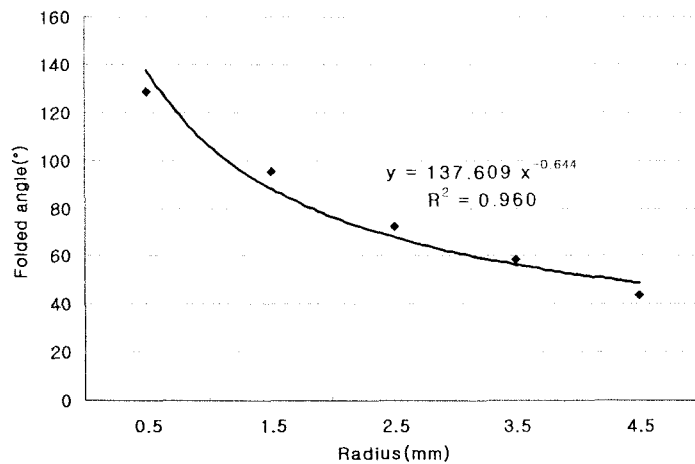
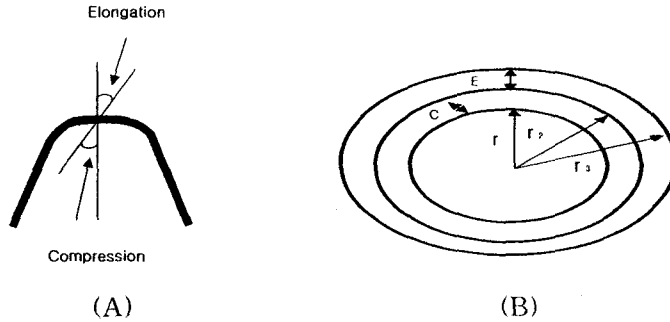


Fig. 4. The analysis result of restoration versus curve radius in folded bank note.

지폐가 지갑 속에서 접힐 때의 특성변화는 Fig. 5(A)과 같이 설명할 수 있으며, 이

런 현상을 상세화 하면 Fig. 5(B)과 같다. 즉, 지폐의 두께방향 중앙의 아래쪽으로는 압축특성(C)이 작용하고, 두께방향 중앙의 위쪽으로는 신장특성(E)이 작용할 것이다.



- r = 패널의 커브반경
- r_2 = 반경의 중심에서 종이두께 중앙까지의 길이
- r_3 = 반경의 중심에서 종이 바깥 두께까지의 길이
- C = 압축변형(compression strain)
- E = 신장변형(elongation strain)

Fig. 5. Schematic of paper strain at curve radius.

따라서 본 실험에서 패널의 반경중심에서 지폐의 바깥 두께까지의 거리에 대한 신장률을 계산하면 Fig. 6에서와 같이 패널의 반경이 작을수록 신장률의 급격한 증대가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4와 비교해 볼 때, 패널 반경에 대한 복원율 실험결과와 이론적 계산에 의한 신장률과의 관계는 유사한 곡선을 형성하고 있었다. 지폐의 복원율 측정방법의 기준은 지갑의 일반적인 형태를 고려하고, 지폐의 사용빈도수 등을 고려할 때, 압착 시 접힘 반경 2.5mm를 사용하여 6시간 압착 후 응력이 제거된 직후 복원율을 측정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

또한 패널의 커브반경이 0.5 mm일 때 복원이 어려운 것은 인장시험에서 지폐의 CD 방향 신장률이 4.5%인데 비하여 접힘시험에서 응력이 가해졌을 때 바깥쪽의 신장률이 5.12%로 더 높기 때문이다.

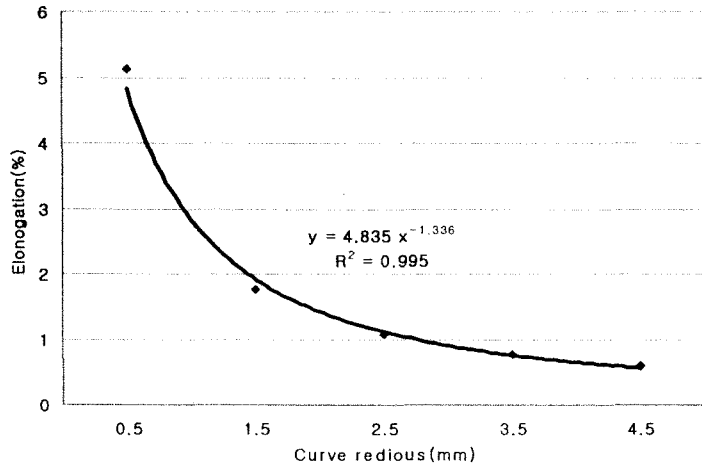


Fig. 6. Curve radius versus calculated tensional strain

3.4 지폐의 기계적 성질과 복원과의 상관관계

응력-변형률 곡선에서 응력을 제거한 직후 바로 회복되는 순간탄성은 초기 복원에 해당되고, 시간의 경과에 따라 서서히 회복되는 지연탄성은 후기 복원에 해당한다 할 수 있다. 여기서 우리는 인장강도시험시 종이의 탄성률은 응력을 제거한 초기 복원율과 밀접한 관계가 형성될 수 있다고 가정하고, 후기 복원력은 신장변형과 관련한 TEA와 상관관계가 높다고 가정할 수 있다.

Fig. 7은 접힘시험후 일정시간 경과했을 때의 접힘각도 (folded angle)를 측정한 것이다. 여러 가지 상이한 탄성계수값과 접힘각도와 관계를 나타내 본 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 탄성률이 높을수록 복원이 빠른 것을 확인할 수 있으며, 응력을 제거한 이후에는 시간이 경과 할수록 상관계수가 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8 역시 접힘시험후 일정시간 경과했을 때의 접힘각도 (folded angle)를 측정한 것이다. 여러 가지 상이한 TEA 값과 접힘각도와 관계를 나타내 본 결과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 TEA 값이 높을수록 복원은 저하되는 것을 확인할 수 있으며, 상관관계가 높은 것을 확인할 수 있었다. TEA 는 점성영역이 커질 때 크게 증가할 수 있기 때문에 Fig. 8과 같은 결과를 초래 했다고 판단된다

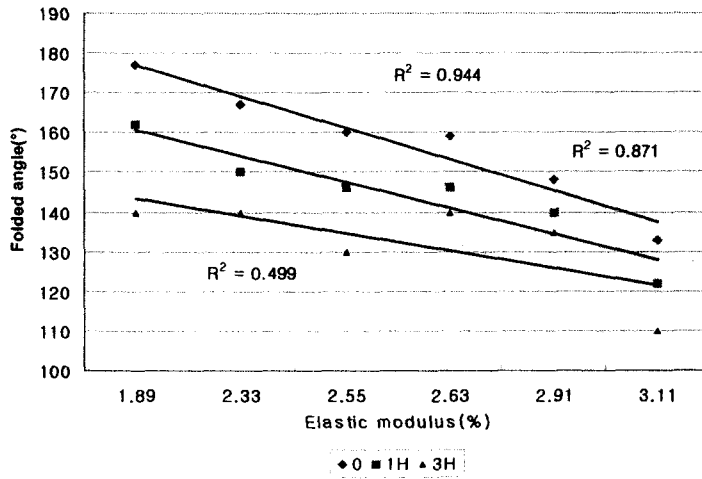


Fig. 8. Correlation of elastic modulus versus the first restoration ratio.

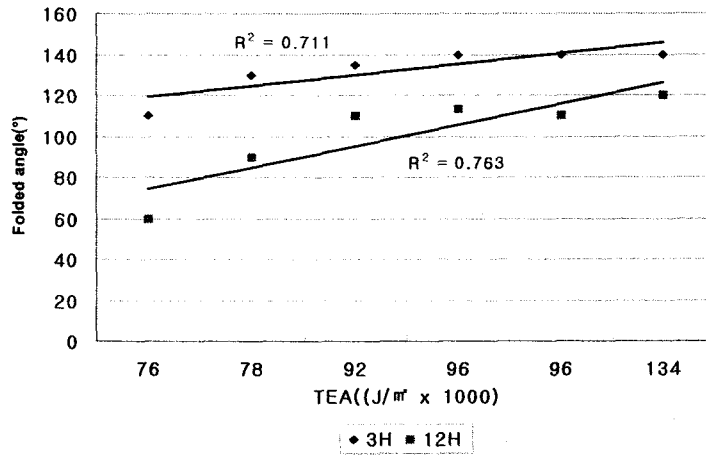


Fig. 9. Correlation of TEA versus restored angle.

4. 결론

지폐 및 유가증권 용지의 접힘복원 특성 분석을 위하여 지폐에 응력을 가한 시간 경과에 따른 복원각도를 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접힌 지폐의 복원은 응력을 제거한 초기상태에서는 복원이 빠르게 진행되는 탄성영역이 있었으며, 그 후에는 천천히 복원되는 지연탄성영역, 다음에는 점성영역이 존재하였다.
2. 지폐의 복원은 접힌 지폐의 압착시간 접힘패널의 반경과 밀접한 상관관계가 있으며, 압착시간이 클수록, 접힘 반경이 작을수록 복원이 급격히 어려워짐을 확인하였다.
3. 접힘패널의 반경 0.5mm 에서는 바깥쪽 접힘신장율이 지폐의 인장신장율을 초과하여 영구적인 파괴를 발생시켰다.
4. 종이의 탄성률이 높을수록 초기 복원은 높은 것으로 확인되었으며, 신장변형률에 의한 TEA값이 클 경우 장시간 경과후의 최종복원이 낮은 것으로 확인되었다.

References

- 1) Kolseth, P., Design Criteria for Paper Performance, 1984 Seminar on Progress in Paper Physics, August, pp. 121-124(1987)
- 2) Jayne, B. A., Orthotropic Elasticity " Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials, Syracuse Univ. Press, pp. 326-327(1972).
- 3) Jayne, B. A., Bodig, J., Mechanics of Wood and Wood Composites, Van Nostrand Reinhold Co.(1982).
- 4) Stockmann, V. E., Measurement of Intrinsic Compressive Strength of Paper, Tappi 59(7):93-97(1976).