

플루트프로파일이 골판지의 재료역학적 특성에 미치는 영향 ①

(Effects of Flute Profile Conformation on the Material Mechanics of Corrugated Fiberboard)

한국포장기술사회 김 청 회장은 “플루트프로파일이 골판지의 재료역학적 특성에 미치는 영향(Effects of Flute Profile Conformation on the Material Mechanics of Corrugated Fiberboard)”이란 제목의 동국대학교 박사학위 논문을 통해 골판지 및 골판지상자의 재료 공학적 강도 특성을 해석하였다. 이에 우리 조합에서는 골판지포장업계에 도움이 될 수 있도록 이 논문을 3회에 걸쳐 발췌 요약 게재하오니 업무에 참고하시기 바랍니다.



김 청 회장 / (사)한국포장기술사회
www.packnet.co.kr

1. 서 론

지구상에 가장 많이 존재하는 천연자원인 목재로부터 제조되는 펄프는 종이·판지를 만들고, 이러한 소재는 문화용지로서, 산업용지로서 인류의 산업문화발전에 크게 공헌하고 있다. 특히, 판지류로부터 제조되는 포장용 골판지상자는 물품을 포장하여 유통되는 과정에서 외력에 의해 물품이 손상되지 않도록 보호·보전하는 역할을 하는 중요한 포장재료이다.

포장의 목적과 기능을 만족시키기 위하여 사용되는 포장재료는 골판지상자를 포함한 지류, 플라스틱, 금속캔, 유리병, 목재 상자 등이 있지만 특히 외부포장용 물류포장에서는 골판지상자가 주류를 이루고 있다.

이렇게 사용되는 골판지상자는 골심지(corrugating medium)에 파형의 골(flute)을 성형하고 여기에 라이너(linerboard)를 접착시킨 골판지(corrugated fiberboard)로 제조하고 있다. 여기에 사용되는 골심지는 회수된 고지(폐지)를 주원료로 하는 일반 골심지(waste medium)와, 반화학펄프를 원료로 한 반화학 골심지(semi-chemical pulp medium)가 있으며, 라이너원지에는 100% 크라프트 펄프(kraft pulp)로 만든 크라프트 라이너원지(kraft

linerboard)와, OCC(old corrugated container) 등 회수 고지와 일부 크라프트펄프(kraft pulp)를 혼용하거나 100% 회수고지를 사용하여 만든 주트 라이너원지(jute linerboard)가 있다. 이들 원지중에서 자원이 부족한 우리나라에서는 반화학 골심지나 크라프트라이너원지는 외국으로부터 수입에 의존하고 있고, 주트 라이너 및 일반 골심지는 국내에서 생산하여 보급되고 있다.

그런데 트리스구조로 이루어져 있는 플루트 프로파일(flute profile)의 골판지는 구성요소인 라이너와 골심지 자체의 물성과 이들의 성형가공 형상에 따라 다양한 구조역학적 성질을 가지고 있는 하나의 공학적 구조체(engineering structure)로서 역학적 변형의 기본적인 형태를 지니고 있다.

이렇게 만들어지고 있는 하나의 공학적 구조특성을 가진 골판지는 성형된 골의 구조역학적 강도가 강하고 완충성에 의한 물품의 보호기능이 우수하며, 지류소재의 장점인 재활용이 가능한 특성을 지니고 있어 산업 전반에 걸쳐 포장용 재료로서 그 사용 범위가 점차 확대되어 왔다.

그런데, 포장사용자의 포장만족을 위한 품질 기준으로는 종전 파열강도를 주기능으로 해왔지만, 상자의 압축강도기준으로 변환되고, 이것은 물품을 포장하여 외부로부터의 압축하중에 충분히 견디어 내용물품이 안전하게 보

호·보전 될 수 있는 적절한 강도를 가진 골판지상자를 수요자가 선택하고자 한다. 특히 환경친화적 포장을 요구하고 있는 현대의 자원순환형 산업사회에서는 골판지의 박물화 및 경량화를 통하여 재료절약 및 원가절감과 함께 환경만족을 위한 추세에 있고 이것은 결과로서 골판지상자의 압축강도에 대한 중요성이 강조되고 있으며, 압축강도 향상을 위한 기술개발과 이에 따른 원지의 재질, 평량 등의 다양화가 이루어지고 있다.

골판지상자의 압축강도에 영향을 미치는 인자는 크게 나누어, 제품포장된 골판지상자가 유통과정에서 일어나는 환경(온도·습도), 낙하, 충격, 진동 등의 외적요인과, 골판지 원지 및 골판지의 물성, 골형상인 플루트프로파일의 성형상태, 골판지상자의 구조적 설계특성(상자의 장·폭·고와 주변장 등) 및 제조기술 등의 내적요인으로 구분한다. 외적요인은 많은 유통상의 인자가 복합화되어 복잡하지만 내적요인은 분석과 예측을 통한 이론적 정립이 가능할 것으로 본다.

회수된 고지로 만들고 있는 우리나라의 골판지용 원지는 외국 수입원지에 비해 상대적으로 품질이 낮다. 우리나라에서 생산된 라이너 및 골심지로 만든 골판지는 원래로 인 고지펄프의 섬유 품질이 떨어지기 때문에 기본적으로 요구품질인 압축강도가 약하다. 따라서 이의 품질 보장을 위하여 이중양면 골판지상자를 많이 사용하고 있는 경향이이며, 이러한 결과는 원지의 사용량 증가로 인하여 재료소모량 증가와 수송비 가중, 적재공간의 과다 등 여러 문제점들이 발생되고 친환경적 설계의 기본인 재료의 사용량 절감측면에서 역행되며, 원가의 부담도 가중시키는 결과가 된다. 이러한 점에서 압축강도의 개선에 관심이 집중되면서 지구자원의 사용량을 최소화하는 사용원지의 경량화 및 박물화를 통하여 자원절약을 기하고 압축강도의 향상을 위한 연구를 통하여 원가절감과 환경대응을 기해야 하는 현실에 직면하고 있다.

이상에서 언급한 바와 같이 골판지상자의 포장용 소재로서의 품질평가 기준은 압축강도이며, 이것은 사용되는

라이너원지, 골심지의 품질 특성과 제조 조건, 골판지 골모양의 구조역학적 특성, 골판지상자의 형태적 조건 등 여러 가지 요인이 복합되어 있다. 골판지용 라이너와 골심지의 초조를 포함한 원지특성에서부터, 골판지의 제조 및 가공공정을 거쳐 만들어지는 골판지상자의 압축강도 특성의 메커니즘 및 골판지 제조공정의 핵심인 골성형 플루트 프로파일의 공학적 해명과, 그것이 재료역학적 강도에 미치는 영향과 상관성에 관하여 포장공학적 측면에서 해석하고 성형가공 특성과 골판지의 역학적 제반 강도특성을 이문화하는 것은 대단히 중요하다. 특히 플루트 프로파일의 인자인 골 높이, 골의 파장, 골팁의 각도, 골판지 원지의 두께 등이 골판지의 역학적 강도특성에 미치는 영향을 규명하는 골판지상자의 압축강도 향상을 위한 골 성형 구조의 합리적 설계를 위한 기본이다. 골판지상자의 압축강도 관련기술과 이론에 관하여 많은 학자들이 저명한 논문을 발표하고 있지만, 이러한 구조역학적인 공학적 해석에 있어 골판지의 플루트 프로파일 인자들이 골판지의 재료역학적인 강도특성에 미치는 영향에 관련되는 보고서는 눈에 보이지 않는다.

공학적 구조체인 골판지상자의 강도적 특성을 최적화하기 위하여 골판지 플루트 프로파일 성형(flute profile conformation)의 재료역학적 강도 특성에 미치는 영향과 역학적 상관관계를 확보하여, 원지자체의 물성보강보다도 골성형 구조인자를 포함하는 플루트 프로파일의 합리적 설계에 의한 강도의 최적화기법이 보다 더 합리적이고 경제적이라고 하겠다. 이것은 골판지상자의 품질규격화, 표준화 및 원가절감효과와 환경적합성에도 큰 관련성이 있다.

그러므로, 골판지의 공학적 구조체로서의 이론적인 재료역학적 구조해석과 함께, 골판지를 형성하고 있는 구조체로서의 플루트 프로파일이 골판지의 재료역학적 강도 특성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 플루트 프로파일의 구성인자인 골판지의 골 형상과 골조율, 골 높이, 골의 수와 골간의 거리, 골심지 및 라이너의 두께, 골의 단면 형

상에 따른 단면2차모멘트와 휨응력, 휨강성 등이 골판지의 재료역학적 강도특성에 미치는 영향에 관한 상관관계를 연구하여 플루트 프로파일 콘포메이션의 최적화 설계를 위한 기초를 구하고자 했다.

II. 연구사

1. 골판지 원지의 물성과 압축강도

Koning와 Godshall은 골판지상자의 강도와 성능에 대한 반복된 리사이클링 효과를 연구한 논문에서 100 % 재생섬유가 사용될 경우, 강도와 성능이 저하되었고, 연속 리사이클링 중 최초 1회의 리사이클링이 강도적 성질이 가장 크게 저하되었으며, Fahey와 Bormett는 버진펄프를 전량 회수 골판지상자로 대체할 경우 상자압축강도와 골판지, 라이너, 골심지의 성능이 저하되었으며 특히 평면압축강도, 수직압축강도 등의 강도적 성질이 저하되었다고 보고하였다.

골판지는 라이너원지와 골심지로 만들어진 구조역학적인 복합 샌드위치 구조체(Fig. 1)로서 가볍고, 무게에 비하여 스티프니스가 높다. 라이너원지는 코루게이터(corrugator)에서 주로 전분접착제를 사용하여 골 성형된 골심지와 싱글 페이스(single-facing)과 더블 페이스(double-facing)의 2단계로 접착되어진다. 골판지는 여러형태의 골(flute)로 만들어지며 한국산업규격(Korean Industrial Standard, KS)에서 A, B, C 플루트 등에 대하여 규정하고 있고, 이러한 골은 단일골로 이루어진 양면골판지(single-wall corrugated fiberboard)와, 골의 조합에 의한 이중양면 골판지(double-wall corrugated fiberboard), 3중골판지(triple-wall corrugated fiberboard) 등이 있다.

라이너는 주로 침엽수(softwood)로 만든 장망초지형 라이너와 활엽수(hardwood)를 복합한 라이너(kraft linerboard, KL), 또는 회수고지(recycled paper)를 혼

합하거나, 회수고지를 100 % 사용하여 만든 장망초지형 또는 환망초지형 라이너(jute linerboard, JL)가 있다. 골심지(corrugating medium, CM)는 SCP(semi-chemical pulp)로 만든 반화학 골심지(SCP medium), 또는 100 % 회수고지로 만든 일반골심지(waste medium)가 있다.

펄프를 사용하는 경우 재료절감의 차원에서 원지의 평량을 줄이려는 업계의 경향에서 골판지 구성원지인 라이너와 골심지의 평량이 물성에 미치는 효과에 대하여 Jakowski 등은 라이너의 재반물성과 평량은 밀접한 관계에 있으며, 골심지의 경우에도 파열강도를 제외한 골심지의 물성과 평량은 깊은 상관관계를 보였다고 보고한 바 있다.

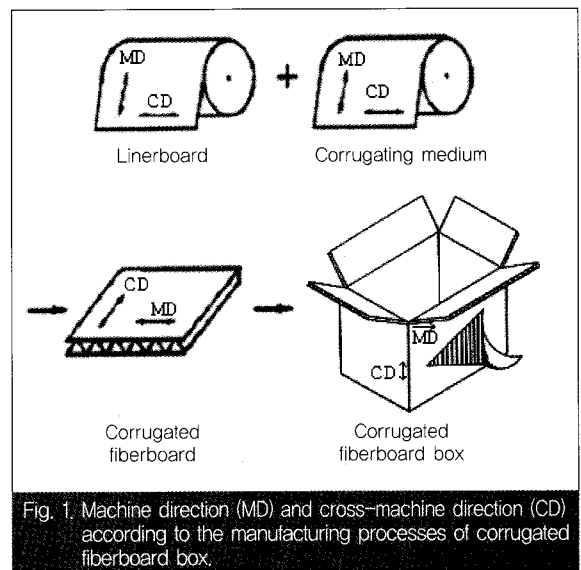


Fig. 1. Machine direction (MD) and cross-machine direction (CD) according to the manufacturing processes of corrugated fiberboard box.

라이너의 평량은 강도에 큰 영향을 미치기 때문에 기술적인 인자의 변화 없이 라이너 평량을 감소시킬 경우 골판지품질이 저하되고, 골심지의 여러 물성 또한 골판지 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 골심지의 평량은 매우 중요한 인자로서 기술적인 인자의 변화없이 평량을 감소시키는 것은 골판지의 품질저하를 유발시킬 수 있다.

골판지 및 골판지상자의 품질은 여러가지 물성과 인자들이 관련되어 있으나 근래에 와서 포장업계나 골판지원

지, 골판지 및 골판지상자 메이커, 포장사용자들을 중심으로 상자의 압축강도(compression strength)에 대한 중요성이 강조되고 있다. 그것은 골판지상자의 압축강도가 상자의 적재능력과 외부로부터의 충격하중, 완충성 등과 직접, 간접으로 연관되어 있기 때문이다. 라이너와 골심지 제조업자들은 일차적으로 원지의 압축강도에 관심을 두고 있으며 탄성계수와 두께도 중요한 요소로 생각하는 반면, 골판지 및 골판지상자 가공생산업자들은 골판지의 수직압축강도와 두께로부터 접착력과 골성형 상태에도 큰 비중을 두고 있다.

골판지상자와 관련되는 라이너의 압축특성을 조사한 연구에 따르면, 골판지상자의 구성원지로서 이상적인 압축특성을 가진 라이너의 조건은, 두께가 두껍고 높은 탄성계수를 가지고 있으며, 모든 골 꼭대기(flute tip)에 정상적으로 결합접착되어야 하고 파괴에 대해 직선적으로 탄성적이어야 한다고 하였다. 두께의 감소없이 라이너의 탄성계수를 증가시킨다면 추가적인 섬유 사용없이 골판지상자의 압축강도를 상당히 개선할 수 있고, 이를 위해서는 섬유결합을 개선하는 등의 방법이 적용될 수 있으며, A골 양면골판지 경우 337 g/m² 혹은 그 이상의 평량을 가진 라이너를 사용할 경우 라이너지보다 골심지에 섬유를 첨가하는 것이 더 효과적인 것으로 보고 된 바 있다. 골심지는 효과적인 조업을 위해 종이의 변형에 관련되는 영구변형(permanent set)이나 소성유동(plastic flow)이 필수적이다.

골판지생산의 주행성(runnability)은 휨강성(bending stiffness), 인장강도(tensile strength) 등이 중요한 인자이며 골판지 제조시 발생하는 지필(web)의 파열(fracture)에는 인장강도, 탄성률(elastic modulus), 하중-신장(load-elongation) 등에 관계된다.

종이의 탄성(elastic properties)에서 포아송 비(Poisson's ratio)도 중요한 관계가 있다.

Baum은 판지의 탄성이 기계적 파괴성질에 영향을 미친다고 기술하고, 종이의 탄성률은 EMD(Ex), ECD(Ey), ETD(Ez)의 방향에 따라 다르며 포장분야에서는 모두 판

련이 있다고 보고했다. 종이는 두께방향(z방향)으로 압축성이 있는데 z방향에서는 압축(compression)모드가 인장(tension)보다 더 사용된다.

휨강성은 골판지시트 두께를 통한 탄성률의 분포에 민감하며, 최소평량으로 휨강성을 최대화할 수 있는 초지공정이 목표가 된다. 평량은 기본적으로 휨강성에 상관하고 높은 평량은 높은 휨강성이나, 평량을 증가시켜 휨강성을 올리기보다는 평량을 감소해야하는 것이 경제적 목표이다.

휨강성은 기본적으로 두께의 3승에 비례하고 $S_b = Ed^3/12$ (여기에서, S_b : 휨강성, E : 탄성률, d : 두께)로 나타내고, 밀도와와의 관계에서는 $S_b=(E/bd^2)/12$ (여기에서, ρ : 밀도, b : 평량)이므로 평량별 원지의 비교를 위한 휨강성지수(bending stiffness index)는 $S_{bs}=S_b/b^3$ (여기에서, S_{bs} : 휨강성지수, Nm⁷/kg³, S_b : 휨강성, b : 평량)으로 나타낸다. 휨강성은 골판지생산의 주행성에도 중요한 인자이다. 주어진 고정 평량에서 밀도와 탄성률은 고해(beatng), 습윤압착(wet pressing), 펄프 혼합(pulp blending) 등이 영향을 미친다.

골판지의 특성은 사용하는 소재인 라이너와 골심지의 물성과, 이것을 접착가공해서 생산하는 제조기술에 의하여 결정된다.

제지원료인 섬유(fibers)와 그 망상구조(network structure)는 탄성률과 인장강도, 압축강도에 영향을 미치고, 이것은 기계적 성질에 따라 변한다. 섬유는 섬유의 길이, 유연성, 결합능력이 큰 인자이며 이들은 목재의 종류, 펄프화 방법, 고해정도 등에 따르고, 망상구조를 가진 지질의 성질은 섬유의 배향, 구조밀도(network density), 결합(bonding)정도가 중요하다. 섬유의 압축강도는 판지의 압축강도에 큰 영향을 미치는데, Seth R. S. 등은, 섬유 길이가 2.1mm에서 1.25mm로 감소하면 인장지수가 22% 떨어지고, 압축지수는 8%저하한다고 보고하고 있다.

섬유의 압축강도는 셀룰로오스(cellulose)의 양과 함께 리그닌(lignin)의 양도 중요하다는 보고가 있다. Fellers는 섬유 손상이 압축강도를 저하시키고 섬유의 벽공

(pores) 또한 섬유유 압축강도를 저하시키며, 고해와 습윤압착은 압축강도를 증가시키는데, 고해에서는 압축강도 증가가 밀도에 거의 직선상으로 비례한다고 했다. 내침 사이징도 압축강도를 증가시키지만 전분 사이징은 수분을 흡수하기 때문에 수분으로 결합강도를 저하시킨다.

종이를 구성하고 있는 섬유유 배향은, 초지기의 종류나 속도에 따라 차이가 있지만 일반적으로 초지기의 진행방향으로 병렬된다.

섬유유가 병렬하고 있는 흐름방향을 종방향 MD(Machine Direction), 여기에 직각인 방향을 횡방향 CD(Cross-machine Direction)이라 구분하고, 이 섬유유 배향성에 따라 물성이나 신축률이 다르며, 일반적으로 인장강도, 압축강도는 MD > CD 이고, 인열강도, 신장률은 MD < CD 의 경향이 있다. 또한 파열강도 시험에 있어서 MD와 CD의 배향성차이가 클수록 종이의 파열상태는 Fig. 2와 같은 H형의 파괴가 일어나는데, 여기에서 종이의 섬유배향성이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은, 종이는 섬유유 흐름방향이 인장강도가 강하고, 신장도가 적은 것이 보통이므로, 이 종 · 횡의 비율은 초지방법에 따라 다소 차이가 있다. H형으로 찢어지는 것은, 흐름방향의 신장이 적고, 단단하기 때문에 파단에 대하여

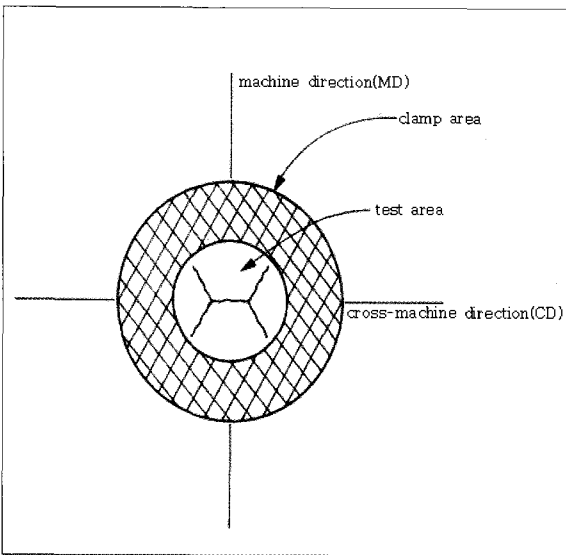


Fig. 2. Typical failure pattern of paper from a burst test.

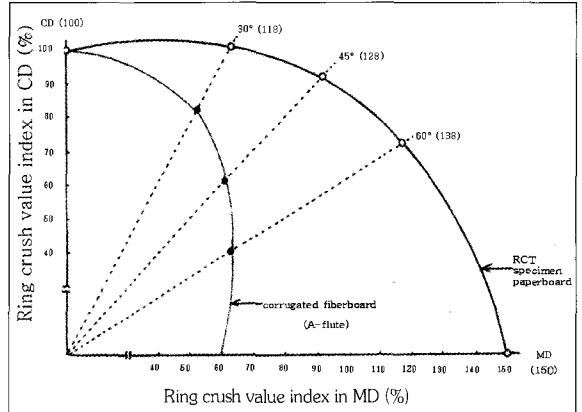


Fig. 3. Fiber orientation angle change in ring crush value according to the down force direction.

견디는 에너지가 적기 때문이다.

원지의 물성으로서 가장 중요한 압축강도에 있어서, 구조체로서의 골판지를 상징해서 원지를 압축시험하는 경우, 이들 압축시험은 수직방향의 압축시험인 RCT(Ring Crush Test), CLT(Concora Liner Test), CCT(Corrugated Crush Test)가, 수평방향은 CMT(Concora Medium Test)가 있다. 이 중에서 기본적으로 대표적인 것이 RCT이다.

RCT는 라이너, 골심지의 압축강도로서 일반적으로 링 크라시강도라고 부르고, 골판지 상자의 압축강도에 관계하는 중요한 물성의 하나이며, 양자는 정비례관계에 있고, 그 계수는 연구자에 따라 차이가 있다. RCT는 골심지의 밀도에 따라 다르게 영향을 받는다.

그런데 상자가 받을 수 있는 상하방향의 압축강도는 원지면에서 볼때 CD방향이 되므로 원지의 압축강도는 CD 방향의 압축강도가 중요하다.

골판지 원지는 제조과정에서 섬유유 배향에 따른 방향성이 생기며 MD방향을 y, CD방향을 x, 두께방향을 z방향으로 구분 표시하고, 원지를 구성하고 있는 섬유배향이 압축강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 대표적인 원지 몇 종류를 선정해서 각 섬유방향에 대하여 15°의 각도 변화를 주어 시험편을 만들어 링크라시강도를 측정해보면 Fig. 3과 같은 결과가 나온다. 이 그림에서 링크라시강

도 값은 예를 들면, MD방향에서 150, 45°의 경우 128이며 CD방향에서 100이 된다. 이 결과에서, 원지의 종류, 평량, 초지기의 종류 등에 따라서 다소 차이가 있겠지만, MD는 CD보다도 약 50%정도 강하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 원지의 섬유 배향에 따라 압축강도에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 원지의 섬유방향의 링크라시강도와 골판지의 플루트 방향성에 대한 수직압축강도를 비교한 평균적 경향을 나타내고, 골판지가 원지의 섬유방향을 소화하여 강하게되어 골판지가 강력한 구조강도를 발휘하고 있음을 알 수 있다.

2. 골판지의 물성과 압축강도

골판지의 수직압축강도는 골판지의 중요한 특성으로서 골판지상자의 적재성능과 같은 특성을 추정하는데 유용하다. 골판지의 수직압축강도는 골판지 구성원지의 고유 수직압축강도(intrinsic edgewise compressive strength, IECS)와 비례하고 골판지 구성원지의 고유 수직압축강도로 예측될 수 있으며, 골판지강도는 그 구성원지강도의 70~80%의 값을 나타내는 것으로 보고된 바 있다. 골판지의 수직압축강도는 골판지상자의 압축강도를 지배하는 가장 중요한 성질이며 골판지 구성원지의 압축강도와 제조작업에 크게 좌우된다. 골판지 압축특성의 접근방법은 패널 좌굴이론을 응용하여 가능한 전개하고 이론화가 곤란한 부분은 일반적으로 수직 압축시험과 골판지상자 압축시험의 결과를 시뮬레이션하는 방법을 이용했는데, Kellicutt식과 Mckee식이 그러하다.

파열강도는 주로 골판지원지의 인장강도와 MD방향 신장에 의존하는 반면, 상자압축강도는 골판지원지의 CD방향 수직압축강도에 의존한다.

파열강도보다 압축강도의 중요성이 강조됨으로 인해 활엽수 섬유의 사용이 증대될 수 있다. 일반적으로 침엽수섬유보다 활엽수의 섬유장이 짧기 때문에 파열강도는 작으나 압축강도는 크다. 이에 따라 활엽수펄프를 30%

수준까지 높여 혼합하여 제조한 라이너원지는 우수한 압축성능을 보였으며 파열강도는 낮은 결과를 나타내었다.

수직압축강도는 골판지구성원지인 라이너와 골심지의 강도에 크게 좌우되는데, 골판지상자의 압축강도의 1/2은 수직압축강도에서, 나머지는 횡강도로부터 나오며 판지의 압축강도는 보통 인장강도의 1/3비율이다. 이것은 골판지 구성라이너의 골조율(take-up factor)을 곱한 골심지의 링크라시강도 값의 합계와 깊은 관계가 있는 것으로 보고되고 있다.

Kellicutt 등은 동일한 평량에서 탄성계수가 높을수록 수직압축강도가 높을 것으로 예측하였으며, 골심지에서와 마찬가지로 라이너의 물성차이의 원인이 주로 평량에 의한 것으로 보았으며, 골판지 평량과 수직압축강도와의 관련이 깊은 것으로 보고 하였다.

McKee 등에 의하면 수직압축시험은 A플루트 양면골판지의 가로방향에서 보통의 수직압축강도보다 높은 강도 추정치를 나타내었으며, 가로 방향에서의 골판지의 수직압축강도를 상부하중에 의한 상자압축강도를 좌우하는 주요한 재료적 요인으로 분석하였다.

실제적인 수직압축강도 수치와 이론 압축강도 수치를 비교한 논문에 따르면 실제 수직압축강도와 Kellicutt가 전개한 $P = P_1(h - c)a + P_2aatc$ (여기에서, P: 골판지의 수직압축강도, P₁: 라이너원지의 CD방향 압축강도, h: 골판지의 두께, c: 라이너원지 내면간 거리, a: 폭, P₂: 골심지의 CD방향 압축강도, α: 골조율, t_c: 골심지의 두께)의 식을 이용하여 계산된 압축강도는 서로 연관성이 높았으며 골판지 원지의 링크라시강도 값의 합계와도 관련이 깊은 것으로 나타났다.

그는 총합링크라시강도 값이, 압축하중이 골에 평행으로 주어진 때, 입방체 튜브의 특정치수의 압축강도와 일치한다고 하는 현상을 발견하여 켈리컷트식(Kellicutt formula)로 발전시켰는데, 최종식으로,

$$P = P_x \left[\frac{(ax_2)^2}{\left[\left(\frac{Z}{4} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{3}} J \cdot Z \text{의 식을 얻었다.}$$

(여기에서, P : 상자의 압축강도, P_x : 총합링크라시강도 값, aX_2 : 플루트 정수, Z: 상자의 주변장, J : 상자의 정수)

골판지가 구조체로서의 강도를 발휘하는 것은 기본적으로 사용원지의 품질과 정확한 골성형(flute profile conformation) 및 접착(adhesion)에 의하여 이루어지고, 이 배경에는 철저한 공정관리, 품질관리가 필요하다. 골판지의 강도특성으로는 평면압축강도, 수직압축강도, 휨강도 등이 있다.

골판지의 평면 압축강도(flat crush strength, FCT)는 구조체로서의 골판지의 경도(hardness)를 나타내고, 골심지의 강도나 골성형의 좋고 나쁨, 골의 찌부러짐 등에 좌우되며, 최종적으로는 골판지상자어의 압축강도에도 영향을 미친다. 평면압축강도는 수직압축강도와도 연관성이 있으며, 평면압축강도가 낮으면 압축하중에 의해 골이 찌부러져 골판지의 두께손실이 발생하고 상자의 압축강도도 저하된다. 특히 상자의 가공공정 중에서 피딩롤, 인쇄압 등에 의한 골판지 골의 두께손실(Fig. 4)에 따른 상자의 압축강도 저하는 두께저하의 정도에 따라 18~20%에 이르는 예가 있는 것으로 보고 되고 있다. 골의 높이 저하에 따른 두께손실과 평면압축강도 저하율의 상관관계는 대단히 높고($r=0.99$), 두께손실이 있는 골판지시트의 강도시험에서 압축량·압축하중선도에는 Fig. 5와 같은 1차, 2차 등의 피크가 나타나지 않고 초기하중부분의 1차 파괴를 나타내는 1차 피크로 끝난다.

Fig. 4와 같이 평행하중을 가하면, 정상적으로 골성형이 되어있는 골판지는 최종적으로 골이 수직상태로 될때 최대의 하중(평면압축강도)을 나타내고 그후 골심지가 좌굴된다. 이 피크 때가 평면압축강도가 된다.

평면압축강도는 라이너의 물성에는 관계가 없고, 주로 골심지의 물성에 의하여 결정된다. 골심지의 시험방법인 CMT에 높은 상관관계가 있다. 정상적인 골 성형으로 접착된 경우 일반적으로 A 플루트는 120~125 g/m²의 골심지(SCP)를 사용하는 경우 40~50 kgf, B 플루트는 70 kgf 전후, C 플루트는 중간이다. 골판지의 골이 정상적으로

성형되어 있어도 사용하는 골심지의 강도와 골의 종류 및 형상 등에 의하여 영향을 받는다.

골판지의 수직압축강도(end crush strength, edgewise crush strength, column crush strength, ECT)는 골판지를 수직으로 골판지 벽면이 좌굴할때의 최대하중을 말하고 링크라시강도나 골판지 상자의 압축강도와 상관되고 있는데, 골판지 상자의 압축강도와 가장 상관성이 큰 물성이다. 수직압축강도는, 골의 성형이 정상이라면 원지의 링크라시강도와 깊은 상관성이 있으며, 상관식 $Y=0.679+0.961X$ 을 나타내고, 따라서 원지의 RCT 값이나 골판지의 수직압축강도값 중 하나만 알게되면 다른 하나의 값을 구할 수 있다.

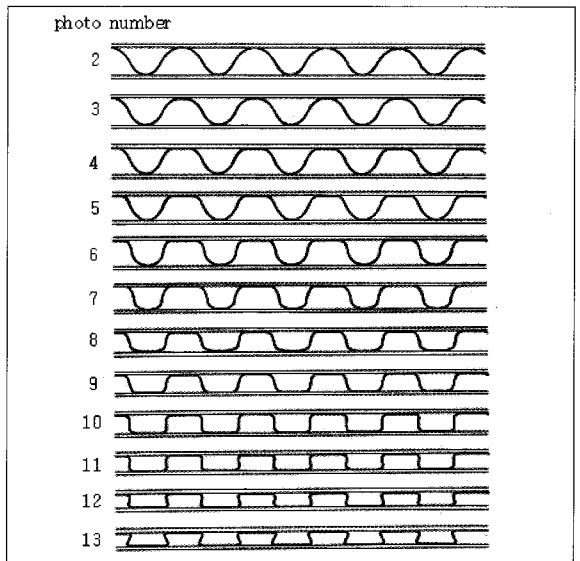


Fig. 4. Deformation modes for corrugated board during flat crushing.

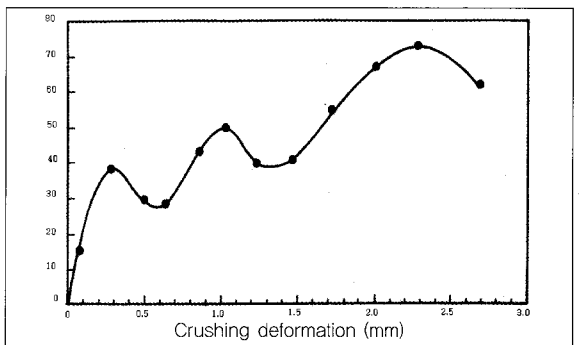


Fig. 5. Flat crush curve for corrugated fiberboard (for Fig. 4).

Kellicutt는 원지의 RCT 값의 합계는 골판지시트의 ECT와 같다고 보고 있다. Fig. 6의 중앙에 골판지시트 단면의 모델화를 나타내었는데, 단위셀은 그림의 굵은 선에 둘러싸인 영역 (L₁, L₂ : 폭 W의 표면/이면 라이너 각 1매, M : 골심지 2매, A₁, A₂: 라이너와 골심지의 접착부 각 1매)이 된다. 이 모델에서 압축시 접착제 호선은 휨(굽힘)이 없다고 고려하여 접착부를 단순히 접착선이라 보면 (Fig. 6 좌), 재질이 다른 패널이 4변으로 단순히 상하에 압축되고 있다고 모델화할 수 있고, 이것은 Kellicutt의 총합링크라시식으로 귀착한다(미크로 좌굴 모델). 이것은 수직압축강도와 라이너/골심지의 CD방향 압축강도의 상관관계를 설명할 수 있지만 접착부의 존재를 무시한 근사로서, 라이너/골심지의 접착부는 그만큼 응력이 증가된다고 보아야 한다.

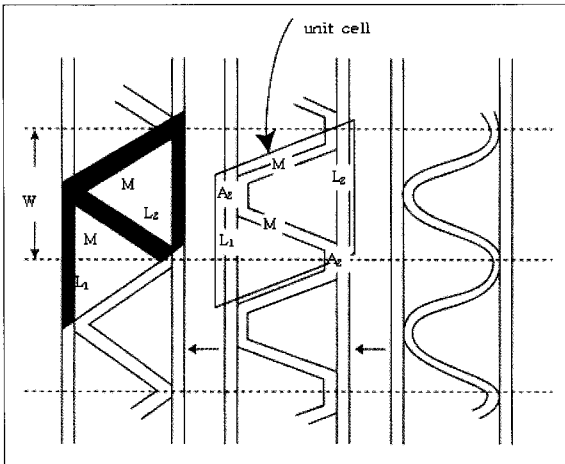


Fig. 6. Micro buckling mode. 155)

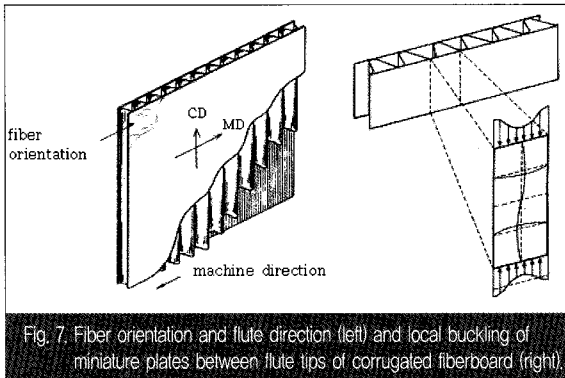


Fig. 7. Fiber orientation and flute direction (left) and local buckling of miniature plates between flute tips of corrugated fiberboard (right).

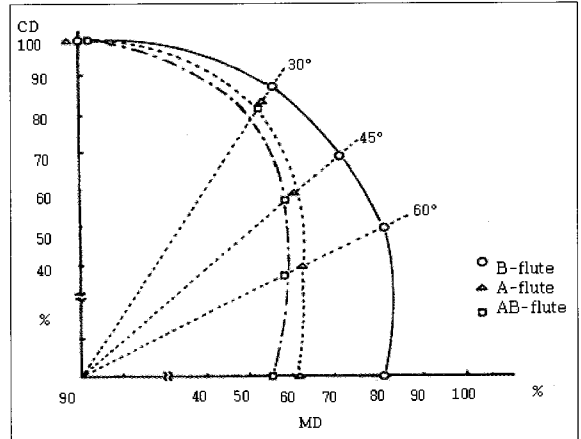


Fig. 8. Typical strength variations with thickness and orientation of corrugated fiberboard.

Fig. 7은 수직압축강도시험에 있어서 원지의 섬유방향과 골판지의 골 방향과의 관계 및 골판지의 라이너와 골심지 접착부분인 골 꼭대기(flute tip)간의 국부좌굴 (partial buckling)의 모식도를 나타내고 있다.

수직압축강도 시험에서 원지의 섬유 방향과 골판지의 골 방향(CD, MD방향)에 따른 강도변화의 관계는 Fig. 3에서와 같이 골판지가 원지의 섬유방향을 소화하여 강하게 되어 골판지가 강력한 구조적 강도를 발휘한다고 볼 수 있다. Fig. 8에서는 골판지의 골 종류별 방향성에 따른 강도변화의 경향을 나타내고 있는데, 골판지는 B플루트, A플루트, AB플루트 순서로 CD방향에서 제일 강하고, 각도가 커질수록 MD방향강도가 떨어진다. 또한 골판지의 종류별 방향성에 대해서도 Fig. 8과 같은 경향으로, 두께가 얇은 골판지가 비교적 방향성이 적다.

미국 골판지 협회에서 가이드라인으로 하고 있는 수직 압축강도와 링크라시강도의 관계는 다음과 같이 표시하고 있다.

$$ECT = 3.93 + 0.157(\Sigma RC_i) + 0.321(\Sigma RC_m) \quad (r^2 = 0.99)$$

Wolf는 골판지의 수직압축강도(ECT)와 골판지원지의 링크라시값과의 관계를 로 발표했다.

$$P_m = 1.25[\Sigma RC_i + \Sigma RC_m \cdot t_f]$$

Koning 등은 골판지의 수직압축강도를 실험 측정하

여, $ECT = \Sigma RCT / 0.768$ 의 실험식을 제시하고 있다.

골판지상자는 실용적으로 압력을 받으면 동체(몸통)가 휘어지는 현상이 시작되고(Fig. 9), 최종적으로는 좌굴(buckling)하여 주저앉아 버리고 만다. 좌굴의 기본 시작

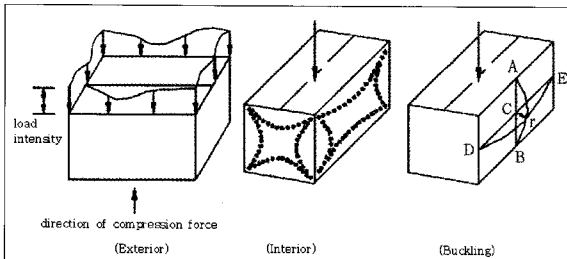


Fig. 9. Stress distribution and buckling configuration in a corrugated fiberboard box.

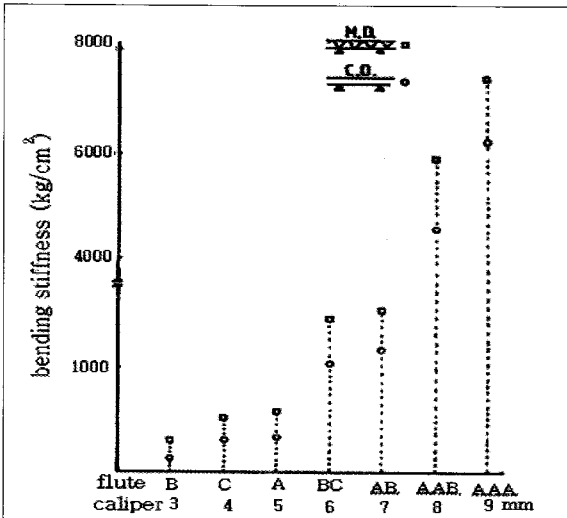


Fig. 10. Bending stiffness of corrugated fiberboard.

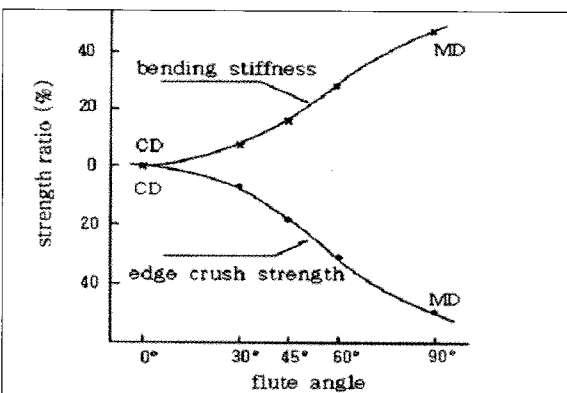


Fig. 11. Strength ratio to the flute angle.

이 되는 휨강도(bending stiffness, flexural stiffness)는 사용하는 원지의 휨강도와 골판지의 구조에 따라 결정되고, 두께가 큰 영향을 미친다. 또한 골판지의 방향성(MD, CD)과 그 균형에도 관계가 있으며, MD방향이 CD방향에 비하여 높은 값을 나타낸다.

골판지의 휨강성은 원지의 종탄성계수(E)와 골판지시트의 단면 2차모멘트(I)와를 곱한 $E \cdot I$ 로 나타내는데, $E \cdot I$ 가 클수록 압축강도도 커지게 되며, 이 중에서 I는 골판지 두께의 3승에 영향을 받기 때문에 두께는 중요하다. McKee는 휨강도와 골판지두께의 상관성을 연구하여 McKee식을 제안했다.

미국 IPC의 McKee는 1962년 12월에 휨강성에 관한 논문을 발표했다. 특히 구조체로서의 골판지 특성을 추구하기 위해서는 같은 재질의 원지를 사용하여 플루트별, 골판지의 종류별로 각각 휨강도를 측정할 예를 Fig. 10에 나타내었다. 이 결과로부터, 골판지의 두께가 큰 요소가 된다는 것과, 두께가 올라감에 따라 MD와 CD의 강도비율이 적어지는 경향에 있음을 알 수 있다. 따라서 양면보다 이중양면, 특히 3중양면골판지는 몸통 구부러짐이 어렵다는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 10에서는 골판지의 휨강성($E \cdot I$)은 MD방향(D_x)이 CD방향(D_y)에 비하여 높은 값을 나타낸다. 또한, 골판지의 평균적인 수직압축강도와 휨강도의 관계를 플루트의 방향성과의 관계를 비교해보면, Fig. 11에 나타낸 바와 같이 되고, 구조체로서의 특징의 일면을 볼 수 있다.

3. 골판지의 플루트 프로파일과 입축강도

골판지는 골의 형상인 플루트 프로파일을 가진 파(wave)형상의 구조체 포장재로서 널리 이용되고 있으므로, 골판지의 골의 형상에 따른 응력, 하중 등에 대한 연구는 골형상에 따른 포장재료 설계에 있어서 대단히 중요하다. 골판지상자의 좌굴강도에 관한 연구, 골판지시트의 압축에 관한 연구, 기하학적 조건을 기본으로 한 골판지의 재료역학적 강도 메커니즘에 관한 인장변형강도, 하중

에 따른 골판지의 휨변형에 관한 연구, 면압을 받는 골판지 및 플루트의 내부응력에 관한 연구 등이 있다.

골판지의 휨강성은 플루트의 프로파일, 플루트의 찌그러짐, 흐름, 접착강도 등의 요인에 좌우되며 압축강도와 높은 상관성을 가지고 있다. McKee의 데이터에서도 압축강도와 높은 상관성을 표시하여 A 플루트 = 0.94, B 플루트 = 0.91이라는 계수를 도입하고 있다.

Fellers 등은 골판지에서 라이너와 골심지의 압축강도는 상자압축강도를 좌우하고, 그 1/2은 수직압축강도에서, 나머지는 휨강성으로부터 오며 판지의 압축강도와 인장강도 비는 1/3비율로서, 골판지원지는 압축력보다 인장력에 강하고, 따라서 상자의 좌굴은 이면라이너로 부터 시작된다고 보고했다. 따라서 골판지 두께에 대한 중립축이 이면라이너에 가까이 위치할수록 구조역학적으로 유리하다고 할 수 있다. 중립축의 위치는 골판지의 골형태와 밀접한 관계가 있고, 상자의 압축력에 의한 좌굴은 상자의 네모서리의 안쪽으로부터 시작되어 점차 패널안쪽 중심부로 진행되므로, 골판지의 골구조와 원지구성의 평형 등이 상자의 압축 강도에 영향을 미치는 인자가 된다.

골판지상자의 골판지 원지배합에서는 상자좌굴의 형태로 보아 골판지의 상자의 내측인 이면라이너에 휨강성이 강한 원지를 사용하는 것이 패널의 휨을 방지할 수 있고, Kellicutt는 상자의 파괴는 압축(crushing)과 좌굴(buckling)의 조합에 기인하고 압축강도의 향상을 위하여는, 두꺼운 라이너, 두꺼운 골심지, 두꺼운 라이너와 골심지의 복합채용이 필요하며, 그 중에서도 강한(두께)라이너의 채용을 강조하고 있다.

내용물의 유무대소와 모양을 불문하고 골판지 상자의 좌굴파괴는 대각선상의 코너에 가까운 부분의 라이너가 압축항복함으로서 일어난다(Fig. 20, 21). 골판지 칼럼에 하중이 작용하면 구조는 좌굴할때까지 휘어지고, 이 벤딩은 Fig. 21과 같이 포장된 골판지상자의 외측면 라이너(outside liner)에 인장(tension)상태가 되고 있는 동안 내측면 라이너(inside liner)에 압축힘응력(compression stresses)를 일으킨다. 그러므로 골판지의 원지 배합에 있어서 동일급

(평균)의 표면 및 이면라이너를 사용하는 경우에는 원지의 압축강도(ring crush strength)가 더 높은 라이너를 내측 라이너에 두어야 한다. 연장선상에서, 그레이드가 다른 라이너를 사용하는 원지 배합은 더 두껍고 강한 라이너는 내측라이너로 사용하여야 한다는 것을 시사하고 있다. 이중양면골판지상자의 경우에는 가장 약한 라이너를 중간라이너에, 가장 강한 라이너를 이면 라이너에, 다음으로 강한 라이너를 표면라이너에 배합하도록 하는 것이 중요하다.

골 모양은 골 롤의 플루트 프로파일과 같은 형태로 성형된다. 형성된 플루트 프로파일이 변형되면 평면압축강도는 물론 상하의 압축강도도 떨어진다.

플루트 프로파일을 형성하는 골심지는, 골을 만들면 원래의 평평한 상태로 되돌아가려는 힘(fluff-out force)이 생기므로 플루트 프로파일의 형상유지를 위해서 골롤(corrugating roll)의 nip 압(nip pressure)을 통하여 라이너와 접촉시킬때 nip에 의한 골심지의 두께가 변하게 되고, 이 두께 변화인 형상보존(shape retention, SR)은 플루트 팁에서 30~35 %, 골의 정강이(flute flanks)부에서 15~20 %만큼 두께가 변하도록 골롤을 제작하는 것이 대체적으로 압축강도에 영향이 없는 것으로 보고되고 있다. 원료에 따라서는 이 두께 변화가 골롤을 벗어나 커지면서 어느 점에 이르러 정지되고 그 이상 두께 변화가 일어나지 않는다. 이러한 영구변형(permanent set)은 SR과 같은 때가 제일 좋다고 보고 되고 있다. 일반적으로 회수고지로 만든 골심지는 적은 SR을 갖게 만들어도 영구변형률이 줄어든다. 이것은 원지(골심지)의 구성에 따라 변하며 골의 높이나 폭은 물론, 골의 정강이 각도 변화되어 평면압축강도와 수직압축강도의 변화를 초래한다. 골판지의 강도는 플루트 프로파일의 형상보존력과 강한 상관 관계를 가지고 있고, 특히 골의 높이와 근사적 상관관계가 있다는 실험보고서가 발표된 바 있다.

4. 골판지상자의 구조적 특성과 압축강도

최근 업계에서는 골판지상자의 적재강도(stacking

strength)에 큰 비중을 두고 있다. 상자가 내부적으로 하중을 받게 되면 화물용 상자는 압축파괴가 일어나는데 이것은 판지의 압축강도가 인장강도보다 작기 때문이다. 파열강도는 인장시험의 한 형태로서 화물용 상자의 성능에 크게 관련이 없는 것으로 알려져 있다.

Kroescheel에 따르면 압축강도는 라이너지와 골심지의 중요한 품질특정 요소로서 섬유 결합과 강도를 반영하며 판지의 압축강도는 인장강도에 비해 작기 때문에 인장강도에 거의 영향을 주지 않고 압축강도를 큰 비율로 변화시키는 것이 가능하다고 하였다. 즉, 압축강도의 증가는 부수적으로 인쇄적성과 같이 섬유결합력으로 개선가능한 가공성에 좋은 영향을 미치게된다고 분석하였으며 압축강도가 골판지상자의 강도 기준이 되어야 한다고 하였다.

Rowland에 따르면 골판지상자의 품질 규정은 파열강도보다는 수직압축강도에 기초를 두고 있으며 향후 골판지 업계는 저평량에서 높은 링 크리시 강도 수치를 나타내도록 노력할 것으로 예측하였다.

Peterson은 수직압축강도를 받는 골판지상자의 최소 비용설계에 관한 연구에서 라이너지와 골심지의 기하학적인 측면과 비선형적인 응력-변형 성질을 고려하여 모델링 하였으며, Batelka는 골판지상자 제조공정에서의 공정변수가 골판지의 평균수직압축강도시험과 수직압축강도 변화에 미치는 정량적인 효과를 연구하였다.17) Batelka는 특히 골판지의 싱글페이스(single-facer)측의 접착강도, 골의 흐름, 하이로 골, 골의 찌부러짐 등은 모두 수직압축강도를 저하시킨다고 했다.

Peterson은 골판지상자의 최종용도 성능예측을 위한 “통합된 상자성능과 파괴이론”에 관한 연구에서 최종용도의 하중에 관계없이 라이너지 압축강도를 골판지상자 성능개선을 위해 최대화될 수 있는 중요한 특성으로 간주하면서 라이너지 압축강도의 직접적인 향상은 상자 최종용도 성능에 있어서 간접적으로 연관된 파열강도의 개선보다 훨씬 더 중요하다고 보고하였으며, 골판지상자의 성능을 개선하는데 절대적인 라이너지 압축강도의 일반적인 중요성을 입증하는 구조역학적 관점에서 “통합된 상

자성능과 파괴이론”은 상자의 성능을 개선하면서 동시에 섬유와 에너지를 보존하는데 기여할 것으로 분석하였다.

골판지상자의 압축강도는 최종용도에 필요한 중요한 특성의 하나로 포장자재의 구매조건에서 차지하는 비중이 점차 증대되고 있다.

McKee에 의한 $BCT = k_1 ECT^{0.75} S^{0.25} Z^{0.5}$ (여기에서, BCT : 상자압축강도, k_1 : 상수, ECT : 골판지의 수직압축강도, S : 휨강성, Z : 상자의 주변장)의 식에서 알 수 있듯이 상자압축강도는 골판지 수직압축강도와 휨강성 ($S = S_{MD}^{0.5} S_{CD}^{0.5}$, $S = 0.5 DL T^2$, 여기에서, S : 골판지의 휨강성, DL : 라이너지의 인장강성, T : 골판지의 두께)에 의존하며 골판지의 수직압축강도는 골판지구성원지의 성질에 크게 좌우된다. 따라서 골판지원지의 압축강도가 변화함에 따라 골판지의 수직압축강도가 변화하게 되고 결국 골판지상자의 압축강도에 영향을 미치게 된다.

$$P = 2.028 \cdot P_m^{0.746} \cdot (\sqrt{D_x \cdot D_y})^{0.254} \cdot Z^{0.492}$$

McKee는 골판지상자의 압축강도 예측식으로서 앞에서 논한 그의 식을

(여기에서, P : 상자의 압축강도, P_m : 수직압축강도 (ECT), D_x, D_y : 각 MD, CD방향의 휨강성, Z : 상자의 주변장)으로 도출하고, 휨강성과 $P_m \cdot h^2$ 과의 상관관계를 연구하여 $P = 5.874 P_m \cdot h^{0.598} \cdot Z^{0.492}$ (여기에서, h : 골판지 시트의 두께)로 간이화 시켰다.

또한 Murray Wolf는 McKee식을 개량하여 상자의 장 · 폭비율(A), 상자높이(D)의 요소를 보정하여 골판지의 수직압축강도(E)와 함께

$$P = \frac{5.2426E \cdot Z^{0.5} \cdot h^{0.5}(0.3228A - 0.1217A^2 + 1)}{D^{0.041}}$$

의 식을 발표했다.

골판지상자의 압축강도 추정에는 원지의 물성치보다도 골판지의 수직압축강도(ECT) 등으로 연결하고 있다. 수직압축강도는 상자의 적재강도 계산에 있어서 중요한 인자로서 골판지상자의 적재강도는 골판지의 수직압축강도, 휨강성, 상자의 주변장으로서 예측될 수 있는데, Gartaganis는

골판지의 수직압축강도와 골판지상자의 상자압축강도를 예측하기 위해 사용되는 계산방법을 정리하였으며 라이너지의 링크러시 값과 골성형된 골심지의 H&D 스티프니스로부터 골판지의 수직압축강도를 추정할 수 있는 새로운 예측식에 사용된 계산방법을 제시하였다.

일본의 Matsuoka는 골판지의 휨강성, 즉 휨에 대한 저항력이 골판지상자의 압축강도와 큰 관련이 있다는 것을 실험에 의하여 나타내 보이고 있다. 그는 골의 프로파일 에 따라 영향을 받는 골판지시트의 겉보기상의 영률 (Young's modulus, E)과 골판지의 단면2차모멘트(I)의 적(積) (E · I), 골판지시트의 평면압축강도(FCT) 값이 상자의 압축강도에 깊이 관계가 있다고 보고하고 있으며, $P = E \cdot I^{0.691} \times F^{0.177} \times 10^{2.057}$ (여기에서, P : 상자의 압축강도, E · I : 상자를 구성하는 골판지의 휨강성, F : 골판지의 평면압축강도)의 추정식을 유도하고 있다.

Buchanan 등은 골판지상자의 성능을 결정하기 위한 골판지 특성에 관한 연구에서 압축력을 증가시키기 위해 수직압축강도를 증가시키는 것은 휨강성만을 증가시키는 것보다 3배 정도 효과적인 것으로 보고하였다. 그는 골판지상자의 압축강도 기본식을 $P = c \cdot E^{3/4} \times D^{1/4}$ 로 정리했다.(여기에서, c : 상수, E : 수직압축강도, D : 휨강성) 그들은 간편식으로 $P = 0.57 \times E^{3/4} \times D^{1/4}$ 로 단순화 시켰다.

여러 조합을 통해 골판지를 직접 제조하지 않고 골판지의 압축성능을 평가해 볼 수 있는 계산식이 요구되는 가운데 Shick & Chari는 상자의 주변장, 원지 평량, 링크러시 값, 영률, 두께, 휨강도 측정으로부터 얻은 E · I 값 등을 통해 이중양면골판지상자의 상자압축강도를 예측할 수 있는 계산식을 개발하였으며, Kellicutt와 Landt 등은 A골 양면골판지상자의 압축강도를 결정하기 위한 공식 설계에 있어서, SFL. + DBL. + 1.532CM.(여기에서, SFL., DBL., CM. : 각각 표면라이너지, 이면라이너지, 골심지의 링크러시강도)의 형태로 골판지원지의 링크러시강도의 합계를 이용하였다.

헨들링이 골판지상자의 압축강도에 미치는 효과를 조사한 Singh 등의 연구에 따르면, 내용물을 보호하는 골판지

상자의 성능은 실제 상자압축강도와 밀접하게 관련되어 있으나 골판지상자 제조업계에서는 파열강도와 평량을 기준으로 제조하고 있는 실정임을 지적하였으며 포장중량과 하역조건이 골판지 상자의 압축강도의 감소에 미치는 효과를 연구하였는데 포장중량이 증가할수록, 낙하높이가 증가할수록 압축강도는 감소하는 것으로 보고하였다.

Renman은 골판지상자의 수직패널에 대한 효과적인 편심률을 측정하기 위한 새로운 시험장치를 연구하였는데 이 때 시각검사와 사진촬영기법을 활용하여 골판지의 변형과정을 관찰, 기록하였으며 측정된 편심률 모멘트와 연관시켜 분석하였다.

비접촉방법으로 판지의 변형영역을 측정한 Thorpe & Choi의 골판지상자 파괴분석에 의하면 골판지상자의 수직패널은 개별적인 라이너지 시편의 파괴를 일으킨 변형 값보다 훨씬 높은 변형값에서 본래의 형태를 유지하는 것으로 조사되었다. 또한, 반복적인 50 %~90 %의 상대습도 환경에서 압축하중하의 골판지상자 패널의 변형부분을 관찰하기 위해 비접촉 측정방법인 LISA(listed & spectral data analysis) 분석을 실시하였는데 연속적인 흡습팽창과 수축에 의해 골판지상자의 수직벽 외면(out-of plane)의 휨이 발생하고 골판지상자의 파괴는 구조적인 재료의 붕괴를 통해서 발생하는 것이 아니라 외면으로의 휨이 점차적으로 증가하여 발생하며 결국 구조의 붕괴를 가져오는 것으로 분석하였다.

Sach와 Kuster는 골판지상자가 창고에 적재 도중 파괴되는 현상을 고찰하였다. 파괴는 먼저 세포벽 조직의 전위(dislocation)에서 시작되어 S1층과 S2층이 분리되면서 섬유간 결합이 떨어지게 되고 섬유세포벽이 분리, 층간 분리를 촉진시켜 라이너원지의 파괴를 일으키게 한다고 하였다. 골판지상자의 상부하중 압축거동을 해석한 논문에서 의하면, 상자의 처짐변형(deflection)은 주로 날개(flaps)와 횡패선(flap scorelines)의 처짐에 의한 것이며 전체 처짐량의 90 %에 달하는 것으로 분석하였고, 골판지 상자 측면(panel wall)과 수직모서리(corner)의 거동을 관찰한 결과, 각기 다른 형태의 압축응력을 받았으며

상자 측면이 휘어지더라도 수직모서리는 높은 하중강도로 인해 계속 수직상태를 유지하고 높은 압축응력이 형성되는 것으로 밝혀졌다.

파괴는 수직모서리 근접부위에 있는 골판지에서 시작되었으며 수직모서리의 파괴 시작은 상자의 파괴를 일으키게 한다. 상자의 용도에 대한 적합성 평가는 최대하중과 변형만을 고려해서는 안되며 압축하중과 변형의 전체 과정을 고려해야한다고 하였다.

Fox 등은 골판지상자 및 접음상자가 내부로부터 하중을 받는 경우 인장이 아닌 압축력으로 인해 파괴가 발생하기 때문에 내부 하중을 받는 상자의 초기 파괴는 인장응력에 의한 것이 아니며, 인장과 연관되어 있는 파열강도도 파괴하중을 예측하는데 직접적으로 관여하지 않는다고 보고하였고, Höke와 Göttsching에 따르면 상자의 파괴는 상자의 모서리에서 시작하여 한 개 이상의 결합과 동반하게 되는데 이 때 수직모서리의 조건은 상자압축파괴하중에 큰 영향을 미치며 이들 모서리를 강하게 함으로써 파괴하중을 크게 높일 수 있다고 하였다.

골판지상자에 압축하중이 가해질 때 그 하중은 상자의 네 수직 모서리와 측면패널이 지탱하는데(Fig. 12) 이때 수직 모서리는 CD방향의 수직압축상태이고 측면패널은 CD 및 MD방향의 휨상태에 놓이게 된다. 이때 상자 패널은 이면라이너에서부터 표면라이너 쪽으로 좌굴한다. 따라서 구조역학적 측면에서 상자의 압축강도는 골판지의 CD방향 수직압축강도와, CD 및 MD 양 방향의 휨강성에 따라 결정된다.

골판지상자의 구조는 내용물품의 포장에 적합하도록 상자의 장·폭·고의 치수에 의하여 설계되고 이 구조치수의 변화에 따라 상자의 압축강도는 변화한다. 상자의 주변장(=(장+폭)×2)의 변화에 의한 압축강도는 Kellicutt, Maltenfort, McKee, Wolf 등이 변화인자로 보고하고 있고, 상자의 높이는 Maltenfort, Wolf 등이, 길이와 폭의 치수비율은 McKee와 Wolf 등이, 그리고 골판지시트의 골 높이에 따른 두께변화(두께손실 포함)에 대하여는 McKee와 Wolf 등이 관련지어 예측계산식의 변화인자로서 채용하고 있다.

Ranger 등은, 압축을 받는 상자주변장의 주변하중분포가 불균일하다고 하는 개념으로, 실험식을 CD의 골판지시트특성과 상자규격에 관련시켜 이들을 적합화시켰다. 이때의 골판지 특성은 단주(short-column)시험, CD 휨강성으로 부터 계산한 장주(long-column)의 좌굴하중을 포함하고 있다. 특히 상자의 상하수직(top-to-bottom)의 압축거동을 시각법에 의하여 관찰했다.

Ranger 등은 $P = [2W(DyEd^2 + 2DyW^2)] / (5d^2 + 2W^2)$ (여기에서, P: 상자의 압축강도, W: 상자의 폭, Dy: 횡방향의 휨강도, E: 수직압축강도, d: 상자의 높이)의 식을 만들었다.

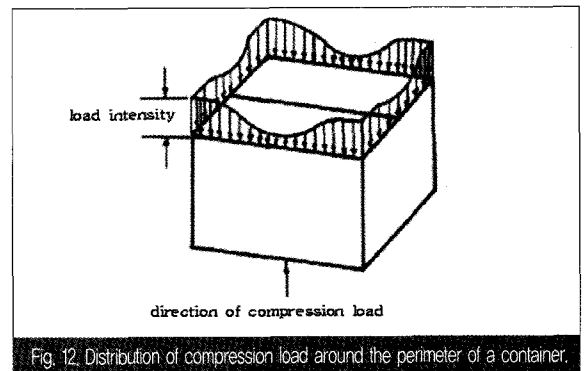


Fig. 12. Distribution of compression load around the perimeter of a container.

McKee 등은 Kellicutt나 Ranger 등의 연구를 참고로 하여 골판지상자의 하중분포는 Fig. 12와 같이 코너부 4개소에 집중하고 변의 중앙부는 코너보다 적다고 하는 표준적인 하중분포상태를 파악했다. 이 결과 Ranger 등의 개념을 지지함과 동시에 중합하중이 하중분포곡선하의 면적에 비례한다고 하는 견해를 밝혔다.

기존 연구사에서와 같이 골판지상자의 압축강도에 관련되는 많은 연구문헌들이 발표되고 있지만, 골판지 플루트 프로파일의 구조역학적인 공학적 해명과 플루트 프로파일 콘포메이션의 구성인자인 골의 단면형상과 단면2차 모멘트, 골 높이 및 골간의 거리, 골형상의 각도, 골심지 두께 등이 골판지의 재료역학적 특성에 미치는 영향과 상관성에 관한 연구보고서는 눈에 보이지 않는다.

다음호에 계속...