

저온 유통용 상자 설계-유한요소해석

Box Design for Low Temperature Warehouse-Finite Element Analysis

박종민* 김만수** 정현모**
정회원 정회원 정회원
J.M.Park M.S.Kim H.M.Jung

1. 서론

과실은 포장된 상태에서도 증산작용과 호흡작용이 계속되며, 그 결과로 발생하는 호흡열량과 유해한 가스를 제거시켜야만 신선도를 유지할 수 있다. 즉, 포장상자에 통기공(ventilating hole)을 제작하는 목적은 저온창고 내부의 공기유동과 상자내부의 공기유동에 대한 공기유동채널(ventilating channel)을 형성시켜 과실의 선도를 유지시키려는 것이다.

포장상자의 통기공의 설계는 포장제품의 종류, 저장방식, 운송방식, 저온창고내의 공기유동패턴 및 포장상자의 강도적(구조역학적) 특성 등을 고려하여 설계되어야 한다. 그러나 현재 국내의 경우, 저온창고용 통기성 골판지상자에 대한 설계기준이 없이 주로 경험에 의해 제작하는 관계로 압축강도 저하는 물론 상자내부의 공기유동(air circulation)이 원할치 못한 실정이다.

본 연구의 목적은 포장상자에 대한 유한요소해석(FEM, finite element method)과 실험적 방법을 통하여 저온창고(유통)용 통기성 골판지상자를 최적설계 하므로써, 동일한 조건에서 상자의 압축강도 저하를 최소화하려는 것이다.

2. 현행 실태조사 및 분석

우리나라의 과실 포장상자중 고압축강도를 요구하고 통기성을 매우 중요시 여기는 대표적인 것이 단감 포장상자이다. 따라서 본 연구에서는 현재 유통되는 통기성 골판지상자의 실태와 기술상의 문제점을 파악하기 위해 단감상자를 기본 모델로 설정하여, 단감의 주생산지인 경남지역을 중심으로 조사·분석하였다.

조사된 50여종의 단감 포장상자중 상자의 규격, 통기공과 손잡이의 크기 및 형태별로 크게 분류하여 먼저 16종을 선별하고, 이중 15kg 포장상자를 대상으로, 이와 동일한 치수를 갖는 무인쇄 DW 골판지상자(KL175/K200/KL175/K200/KL175)에 이들 상자와 각각 동일한 통기공과 손잡이를 제작하여 압축강도 저하율을 분석하였다.

* 밀양대학교 이공학부 기계공학과

**충남대학교 농과대학 농업기계공학과

[표 1]에서 보는 바와같이 통기공 무가공상자 대비 최하 8.5%에서 최고 20.2%의 압축강도 저하율을 보였으며, 통기공의 면적비율 보다는 통기공의 형태와 위치가 상자의 압축강도 저하에 미치는 영향이 더 큰 것으로 보아, 통기공의 적정위치 및 형태를 설계하면 어느정도의 강도저하를 막을 수 있을 것으로 판단된다.

[표 1] 현행 유통되는 단감 포장상자의 압축강도 저하율

형태	포장중량, kg	치 수, mm	측면적, mm ²	통기공 면적, mm ²	면적비율*, %	저하율, %
#01	15	410×295×245	345,450	8,200	2.37	16.9
#02	15	430×325×230	347,300	6,467	1.86	18.2
#03	15	430×325×230	347,300	6,467	1.86	18.9
#04	15	415×300×250	357,500	6,680	1.87	19.0
#05	15	430×325×225	339,750	6,467	1.90	20.2
#06	15	410×295×255	359,550	5,054	1.41	11.4
#07	15	430×325×230	347,300	6,970	2.01	9.0
#08	10	415×320×175	257,250	5,557	2.16	—
#09	10	415×320×175	257,250	4,191	1.63	—
#10	10	415×315×175	255,500	6,760	2.65	—
#11	10	415×320×180	264,600	4,694	1.77	—
#12	10	415×320×180	264,600	6,057	2.29	—
#13	10	415×320×180	264,600	5,054	1.91	—
#14	10	415×320×180	264,600	4,694	1.77	—
#15	15	410×300×255	362,100	6,057	1.67	9.1
#16	15	436×325×245	372,890	5,557	1.49	8.5

[참고] *)면적비율=통기공의 면적(손잡이 면적 포함)/상자측면적

3. 포장상자에 대한 유한요소해석

1) 해석재료에 대한 물성분석

유한요소해석에 적용할 재료는 DW 골판지로 원지구성은 KL175/K200/KL175/K200/KL175 이며, 원지(라이너 및 골심지)에 대한 물성실험 결과를 [표 2]에 나타내었다.

[표 2] 유한요소해석에 적용할 골판지원지에 대한 물성분석 결과

원 지	평량, g/m ²	파열강도, kgf/cm ²	링크라쉬(CD), kgf	두께, mm	비 고
KL175	175	7.9	26.0	0.27	KS M7013, KS M7063,
K200	200	3.1	23.4	0.30	KS M7082

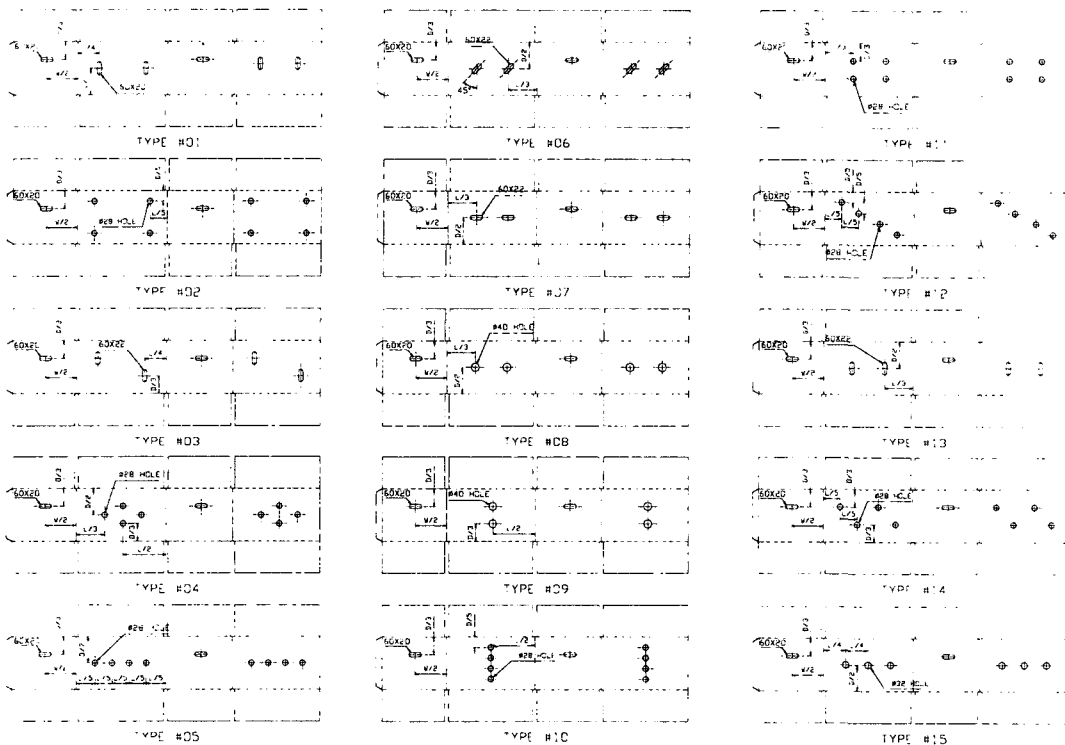
유한요소해석에는 골판지원지에 대한 물성 이외에도 원단인 골판지에 대한 탄성계수, 포와송비 및 휨강도가 필요하다. 골판지는 MD 및 CD방향으로 물성이 다른 대표적인 이방성 재료이고, 또한 단면형태가 매우 복잡하다. 이러한 단면구조를 한 재료의 탄성계수를 직접 측정하는 것은 불가능하므로, 본 연구에서는 골판지에 대한 4점 휨실험(4-point bending test)

으로부터 휨강성(bending stiffness)을 측정하고, 이로부터 탄성계수를 산출해 내는 방법을 택하였다.

골판지의 휨강성으로부터 탄성계수를 산출하기위한 이론적 모형을 개발하였으며, 적용할 골판지의 탄성계수를 산출한 결과 MD방향에서는 $3.34 \times 10^9 \text{Pa}$, CD방향에서는 $1.41 \times 10^9 \text{Pa}$ 이었다.

2)유한요소 모델링 및 해석방법

유한요소법에 의한 응력해석으로부터 통기공과 손잡이의 적정위치 및 형태를 분석하기 위하여, 상자치수 $410 \times 300 \times 250 \text{mm}$ 의 측면적 대비 2%의 동일한 통기공 면적을 갖는 15가지의 통기공 형태를 기본 모델로 설정하여 이들에 대해 각각 모델링하였다([그림 1]).

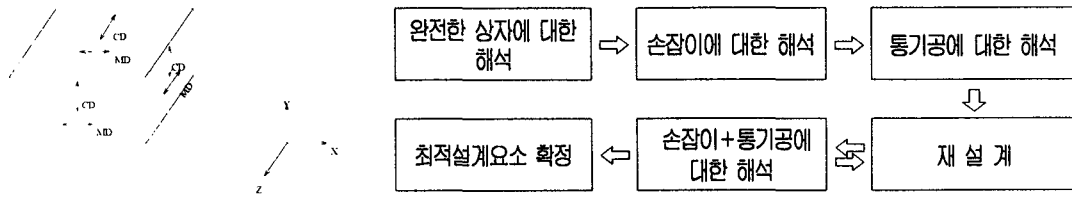


[그림 1] 해석에 적용된 통기공의 형태

포장상자를 유한요소모델로 표현하기 위해서 상자를 속이 비어있는 직육면체와 두께를 가진 판으로 가정하였다. 이때 각방향 (X, Y, Z)으로 변위와 회전이 발생하므로, 이러한 출력값들을 가진 3차원 shell요소를 선정하였다. 3차원 shell요소의 기본자유도는 절점당 6 자유도를 가지며, 이는 각각 X, Y, Z 방향의 변위와 각 절점에서의 회전자유도가 포함된 것이다.

유한요소해석에는 현재 solution의 신뢰성을 인정받아 각 공학분야에서 널리사용되고 있는 유한요소 구조해석 패키지인 ANSYS 5.5를 사용하였으며, 유한요소해석을 위해서는 상자의 유한요소모델에 재료의 물성값을 부여해야 하는데, 이때 상자의 실제 현상에 일치하게 [그림 2]에서 보는 바와같이 골판지의 이방성 특성을 충분히 고려하여 물성을 적용하였다.

유한요소해석시 구속조건(boundary conditions)에 따라 해석결과에 많은 차이가 나타나므로, 본 연구에서는 포장상자의 유통조건을 고려하여 실제 현상에 가깝도록 상자의 밑면 즉, [그림 2]에서 Y=0가 되는 지점의 모든 절점의 좌표값들은 Y방향의 변위가 없다고 가정하였다.



[그림 2] 포장상자에 대한 물성값 부여 조건 [그림 3] 유한요소법의 적용 절차

상자의 상하면 응력 분포 보다는 측면의 응력 분포에 관심이 있으므로, 측면 응력분포가 잘 나타날 수 있도록 균일한 변위를 상자의 상판 전체에 가하는 방법을 적용하였다.

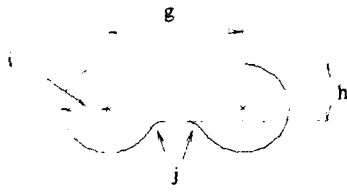
3) 유한요소해석 결과

통기공과 손잡이를 동시에 고려하여 유한요소해석을 수행할 경우 손잡이의 영향 때문에 통기공의 형태별 정성적인 비교가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 통기공과 손잡이의 적정 위치 및 형태를 도출하기 위해 [그림 3]과 같은 순서로 유한요소해석을 적용 하였다.

통기공과 손잡이가 없는 완전한 상자에 대한 유한요소해석 결과, 최대응력이 나타나는 부분은 상자의 각 코너였으며, 각 코너를 잇는 대각선 방향으로 응력집중라인(stress concentration line)이 형성되었다. 이는 응력이 stress line을 따라 작용하고 있으므로, 상자에 통기공과 손잡이를 뚫을 경우 그 위치와 형태에 따라 상자 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.

손잡이의 위치가 panel의 좌우 방향 즉, (W/5, D/2), (W/3, D/2), (W/2, D/2)에 위치할 때와 상하 방향 즉, (W/2, D/6), (W/2, D/3), (W/2, D/2)에 위치할 때에 대한 각각의 응력해석의 결과, 손잡이가 (D/3~D/2, W/2)의 위치에 있을 때 구조적으로 가장 안정함을 보였다.

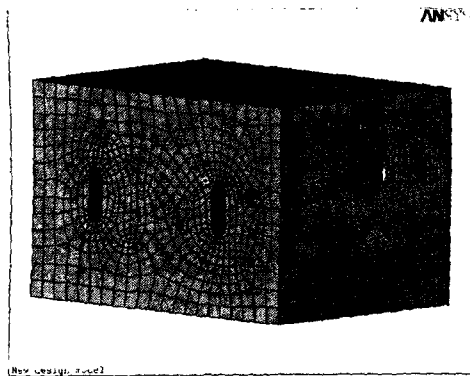
통기공의 면적비율은 같고 형상과 위치가 서로다른 [그림 1]의 15 가지 모델에 대한 유한요소해석의 결과, 통기공의 전체 면적비율이 동일할 경우, 통기공의 수가 적고, 또한 통기공의 배치가 대칭인 경우가 뒤틀린 구조를 한 경우에 비하여 작용하는 응력수준이 자고, 고르게 분포되었다. 통기공의 형태는 수직 방향으로 긴 장원형의 형태가 가장 작은 최대응력 값을 가지고 있고, 또한 stress line이 발생하는 범위가 가장 작으므로, 구조적으로 가장 안정하다.



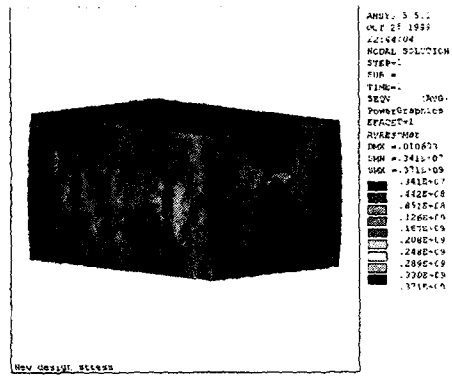
[그림 4] 재설계한 손잡이의 형태

손잡이와 통기공 각각에 대한 유한요소해석 결과를 통해 15가지의 모델중 TYPE #01과 #13과 같은 통기공과 손잡이의 형태 및 배치를 한 상자가 다른 형태의 상자에 비하여 큰 힘에 견딜수 있는 구조라는 결과를 얻었다. 그러나 손잡이의 양측면의 곡선부에 집중되는 응력을 다소 분산시킬 필요가 있고, 손잡이의 크기와 형태를 인간공학적(인체공학적) 측면에서 재설계할 필요성이 있다.

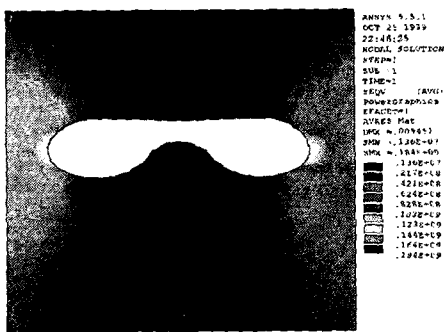
손잡이는 인체역학적 측면을 고려할 때 장방향의 폭은 최소한 70mm 정도는 되어야 하고, 측면에 집중되는 응력을 분산시키기 위해서는 곡률반경을 크게하여야 한다. 이러한 조건들을 고려하여 재설계한 손잡이의 형태가 [그림 4]이다. 재설계된 손잡이의 형태의 효율성을 분석하기 위하여 유한요소해석을 실시하였는데, [그림 5]는 유한요소모델링한 것이고, [그림 6]은 유한요소해석의 결과이다. 동일한 조건으로 설계전후의 손잡이 형태에 대한 해석결과를 확대한 [그림 7]과 [그림 8]을 비교할 때, 재설계된 손잡이의 형태가 최대응력값은 약 8% 감소되었고, 옆 절단면 주위의 응력 집중이 다소 분산되는 효과를 보였다.



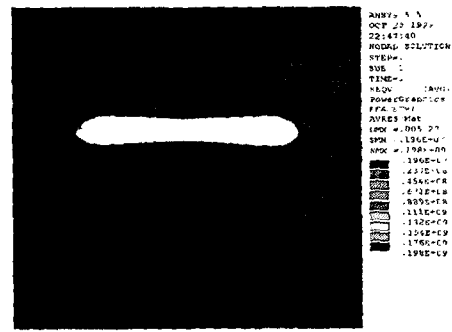
[그림 5] 재설계된 통기공과 손잡이의 유한요소모델



[그림 6] 재설계된 통기공과 손잡이에 대한 유한요소해석 결과



[그림 7] 재설계된 손잡이의 응력분포



[그림 8] 기존형태의 손잡이에 대한 응력분포

4. 유한요소해석 결과의 실험적 검증

1) 실험방법

상자치수가 $410 \times 300 \times 250$ 인 DW상자(KL175/K200/KL175/K200/KL175)에 유한요소해석에 적용된 [그림 1]의 15가지의 통기공 형태를 전기드릴과 특별히 제작한 커터날이 사용하여 각각 제작하였다.

상자의 압축실험시에는 ASTM D642를 참고하여, 하중재하속도는 $12.7 \pm 2.5 \text{mm/min}$ 이고, 45kgf의 초기하중이 작용된 상태에서 측정이 시작되었다. 실험전 상자를 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$. 상대습도 50%로 잘 조성된 대형 항온항습기내에서 48시간 이상 충분히 평형시킨후 실험에 사용하였으며, 상자의 각 형태별로 5반복 실험하여 그 평균값을 취하였다..

2) 실험결과

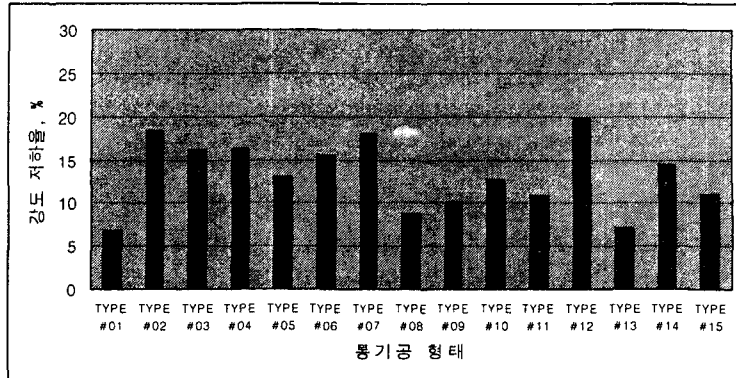
유한요소해석에 적용된 통기성 골판지상자 15가지 모델에 대하여 압축강도 저하율을 실험적으로 분석한 결과를 [그림 9]에 나타내었다. 앞의 유한요소해석 결과로부터 알수 있듯이 상자의 각 코너 부분에 응력이 집중되고, 이로부터 상자 panel의 대각선으로 stress line이 형성된다. 따라서 이러한 응력이 집중되는 부분에 통기공을 설치할 경우 상자의 강성을 크게 저하시키게 된다. 응력이 집중되는곳, 즉, 상자의 각 코너로부터의 대각선 방향과 수평 및 수직 모서리 가까이에 통기공을 제작한 #02, #03, #12, #14 등에서 압축강도 저하율이 크게 측정되었다.

#01, #08, #13과 같이 상자 앞뒤면의 중심부위를 중심으로 수평으로 통기공을 배치할 경우 대체로 압축강도 저하율이 작았다(정 중앙부로부터 일정 거리를 둠). 이는 상자가 압축하중을 받을 경우 panel이 굽게 되는데, 이때 panel의 바깥쪽은 인장상태에 놓이게 되며, 이 인장응력의 일부는 상자의 각 코너 부분으로 전달되어 그곳에 total stress가 증가되는 것이 일반적인 현상인데, 상자 panel 중심부위에 가로 방향으로 통기공이 설치되면 이 응력의 증가를 억제시켜 상대적으로 상자의 수직 모서리는 더 큰 하중을 지탱하기 때문으로 판단 된다. 그러나 비교적 높이가 있는 상자에서는 높이방향의 상자 중앙부에 최대회로멘트가 집중해 좌굴(buckling)이 생기기 때문에 #15와 같이 panel의 정 중앙부에 통기공을 뚫으면 압축강도에의 영향이 크다.

[표 3]은 손잡이의 위치에 따른 상자 압축강도의 변화를 실험한 결과이다. 손잡이의 위치가 각 코너에 접근할 수록 강도저하가 큰 것으로 나타났다. 이와같은 결과는 유한요소해석의 결과와 같은 경향을 보이나, 보다더 세부적으로 분석해 보면, 약간의 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 유한요소해석 결과에서는 손잡이의 위치가 panel의 중심에서 좌우측으로 변화할때가 상하로 변화할때에 비하여 최대응력이 더 크게 작용했던 것에 비하여, 실험에 의한 압축강도 저하율 분석에서는 이와는 반대의 경향을 보였다. 이와같은 경향을 나타낸 데에는 실험용으로 제작한 상자의 staple이 일정하지 못한데서 오는 오차가 클 것으로 판단된다.

이상의 실험결과와 유한요소해석의 결과로 미루어 볼 때, 통기공의 형태는 수직방향의 장원형, 그 위치는 상자의 panel 중심에서 좌우방향으로 약간의 거리를 둔 위치가 적정하며, 손잡이의 형태와 위치는 상자의 양옆면의 중앙부나 중앙부에서 윗쪽으로 약간 벗어난 위치

가 적절한 것으로 판단할 수 있다.



[그림 9] 통기공의 형태 및 위치에 따른 압축강도 저하율(상자 측면적: 355,000mm², 통기공 면적: 4,872mm², 손잡이 면적: 2,228mm², 면적비율:2%)

[표 3] 손잡이의 위치에 따른 압축강도 변화

위치	상자측면적, mm ²	통기공 면적, mm ²		면적비율, %	압축강도, kgf	저하율, %	비 고
		통기공	손잡이				
—	355,000	—	—	—	921	0	
(W/2, D/6)	355,000	—	2,228	0.63	842	8.6	
(W/2, D/3)	355,000	—	2,228	0.63	891	3.3	
(W/2, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	899	2.4	
(W/5, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	876	4.9	
(W/3, D/2)	355,000	—	2,228	0.63	886	3.8	

5. 결 과

본 연구에서는 포장상자에 대한 유한요소해석과 실험적 방법을 통하여 저온창고(유통)용 통기성 골판지상자를 최적설계를 위한 인자를 분석하였다.

통기공의 형태는 수직방향의 장원형, 그 위치는 상자의 panel 중심에서 좌우방향으로 약간의 거리를 둔 위치가 적정하며, 손잡이의 형태와 위치는 상자의 양옆면의 중앙부나 중앙부에서 윗쪽으로 약간 벗어난 위치가 적절한 것으로 분석되었다. 또한 손잡이를 재설계한 결과 응력분산과 응력수준 면에서 효과를 보였다.

6. 참고문헌

1. ANSYS Inc., ANSYS theory reference. Release 5.5. 1998
2. ASTM D685: ASTM D1164
3. Billerad Handbook. Testing of corrugated board and its components

4. Carlson, T. A. 1940. Bending tests of corrugated board and their significance. *Fibre Containers* 25(3): 24-30
5. Carlson, T. A. 1941. Factors affecting the compressive strength of fibre boxes. *Fibre Containers* 26(3): 28, 32, 34-35
6. DieMex Y. 1997, 1998. 段ボール原典シリーズ. CARTON BOX: 第0回~第10回
7. Gartaganis, P. A. 1975. Strength properties of corrugated containers. *Tappi* 58(11): 102-108
8. 임연웅. 1994. 디자인 인간공학. 미진사. p171-206
9. Ibid. 1962. Flexural stiffness of corrugated board. *Paperboard Packaging*
10. 全農施設資材部. 1993. 段ボールの基礎知識. 段ボール資材講習會. p45-57
11. Johnson, M. W., T. J. Urbanik, W. E. Denniston. 1980. Maximizing top-to-bottom compression strength. *Paperboard Packaging* 98
12. Jönson, G. 1995. Corrugated board packaging. The Ipswich Book Company
13. KS A1012; KS M7012; KS M7013; KS M7051; KS M7063; KS M7082
14. Kutt, H. and B. B. Mithel. 1969. Structural strength characteristics of containers. *Tappi* 52(9): 1685
15. Leake, C. H. 1988. Measuring corrugated box performance. *Tappi Journal*(Oct): 71-75
16. Lorentzen & Wettre. Testing instruments
17. Maltenfort, G. G. 1979. Compression failure analysis. *Paperboard Packaging* 172
18. Maltenfort, G. G. 1980. Compression load distribution on corrugated boxes. *Paperboard Packaging*
19. Maltenfort, G. G. 1988. Corrugated shipping containers: an engineering approach. Jelmar Publishing Co.
20. Markström, H. 1993. The elastic properties of paper-test methods and measurement instruments. Lorentzen & Wettre. Stockholm
21. McKEE, R. C., J. W. Gander and J. R. Wachuta. 1962. Flexural stiffness of corrugated board. *Paperboard Packaging* 47(12): 111-118
22. Mitchell, F. G. *et al.* 1972. Commercial Cooling of Fruits and Vegetables. *CAGMAM* 43: 1-44
23. 五十嵐清一. 1996. 段ボール包装技術. 日報
24. Peterson, W. S., W. J. Schimmelpfenning. 1982. Panel edge boundary conditions and compressive strengths of tubes and boxes. *Tappi Journal* 65(8)
25. Peter, C. C. and K. Q. Kellicutt. Effect of ventilating and handholes on compressive strength of fiberboard boxes
26. TAPPI T411; TAPPI T804; TAPPI T811; TAPPI T818; TAPPI T820