

X-ray 단층촬영기법을 이용한 스트랜드보드의 내부공극구조에 관한 연구*1

오 세 창*2†

Internal Void Structure of Strandboard using X-ray Computed Tomography*1

Sei Chang Oh*2†

요 약

보드의 기계적 성질에 영향을 미치는 공극에 대하여 공극을 두가지로 분류하고 밀도에 따른 오에스비의 내부 공극구조의 특성에 대하여 살펴보고자 하였다. 스트랜드보드의 내부공극을 X-ray 단층촬영기로 측정하고 이미지분석 소프트웨어를 사용하여 밀도에 따른 공극의 분포와 공극의 함유량을 조사하였다. 측정 전에 보드의 밀도를 밀도측정기와 전진법으로 측정하였으며 이 두 방법에 의해 측정된 결과는 아주 높은 상관관계를 보여주었다. X-ray를 서로 다른 배율로 조사하여 획득한 이미지를 바탕으로 분석한 결과, 저해상도에서는 스트랜드간의 공극(macro-void)의 측정이 가능하나 스트랜드내의 미세공극(micro-void)은 이미지획득이 불가능하였다. 중해상도에서는 두가지 형태 모두의 이미지 획득이 가능하였고, 고해상도에서는 대부분의 미세공극 이미지의 획득이 가능하였다. 저배율을 채택하여 스트랜드간의 공극을 측정하고 스트랜드내의 미세공극은 관련식을 이용하여 추정하였다. 이를 통해 보드내부에 존재하는 스트랜드간의 공극분포를 파악할 수 있었으며 그 공극의 함유비율을 정확하게 산정할 수 있었다.

ABSTRACT

Internal voids affecting the mechanical properties of wood composite were classified into two categories and characteristics of voids were examined according to density variation of strandboard. The void distribution and content of strandboard according to board density were

*1 접수 2008년 5월 14일, 채택 2008년 7월 1일

본 연구는 2005년도 대구대학교 학술연구비지원에 의하여 지원되었음.

*2 대구대학교 산림자원학과, Department of Forest Resources, Daegu University, Kyongsan 712-714, Korea

† 주저자(corresponding author) : 오세창(e-mail: osc@daegu.ac.kr)

measured by X-ray computed tomography system and analyzed using image processing software. Prior to investigation, the densities of strandboard were measured by densitometer and the results were showed high correlation with conventional oven drying method. Based on the image analysis conducted on captured images by X-ray tomography, low resolution can be used to capture the macro-voids (between strand) but not the micro-voids (within strands). Intermediate resolution can be used to capture both the macro and the micro-voids and high resolution can be successfully used to capture the majority of the micro-voids. The content of macro-void was measured and content of micro-void was computed by corresponding related equation. The macro-void distribution can be successfully understood and void content can be correctly estimated through the results.

Keywords: X-ray computed tomography, void distribution, macro-void, micro-voids, strandboard, image processing

1. 서 론

오에스비(Oriented Strand Board: OSB)는 목재 스트랜드를 인접층간에 배향을 달리하여 내수 접착제로 열압하여 만든 구조용 판상재료이다. 웅이와 같은 결점은 스트랜드 제조와 매트성형단계에서 분산·제거되므로 오에스비의 물리 및 역학적 성질은 일반 목재에 비하여 상당히 균일하다. 오에스비는 주로 목조건축에서 벽, 바닥, 지붕의 구조용 덮개재료, 또 I-장선의 복재(web)로 사용되고 있으며, 이들의 기계적인 성질은 접착제의 종류와 도포량, 스트랜드의 크기 및 배열상태, 밀도경사등과 같은 여러 제조변수에 따라 달라진다. 특히 매트성형 중 오에스비의 내부구조는 본질적으로 공극이 포함되어 있으며, 이 공극의 함유량은 판넬의 밀도에 따라 달라지게 된다. 공극은 오에스비의 기계적 성질에 중요한 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. Suchsland와 Xu (1989)는 플레이크보드의 판면에서 밀도의 변이에 대한 영향을 나타내는 수학적 모델을 개발하였으며 판면에서 밀도의 변이는 내부결합력과 두께팽윤에 큰 영향을 미친다고 하였다. 공극과 관련된 일련의 연구로부터 공극의 존재는 보드의 기계적 성질에 중요한 영향을 미치며 공극의 함유량이 높아질수록 오에스비의 탄성계수, 강도 및 치수안정성이 저하된다고 연구되었다(Shaler and

Blankenhorn, 1990; Lenth and Kamke, 1996; Wu, etc., 2004). 궁극적으로 공극은 바람직하지 못한 결점으로 지적되고 있지만, 재료의 특성상 목질복합재료로부터 공극을 배제하기란 불가능하다. 따라서 목질복합재료의 기계적 성질에 미치는 공극의 영향은 가장 중요한 문제이며 반드시 고려되어야 할 사항이다.

재료의 실제적인 공극의 함유량을 높은 정확도로 측정하는 것은 아주 어려우며, 공극의 함유량과 이들이 미치는 영향에 관한 것을 정량화시키기 위해 많은 측정방법이 사용되었다(Schnider, 1982; Ellis, etc., 1994; Lenth and Kamke, 1996; Nishimura, etc., 2002). 이들 방법간에는 결과에 상당한 차이가 있으며 여러 측정조건에 따라 많은 영향을 받는다. 최근에는 X-ray 단층촬영기법과 디지털이미지프로세싱(digital image processing)기술이 공학재료의 내부의 미세공극에 대한 정확한 정보를 정량화할 수 있는 효율적인 기법으로 등장하였다(Masad, etc., 1999; Sugimori and Lam, 1999; Tashman, etc., 2002; Gupta, etc., 2005; Zhang, etc., 2005).

목질복합재료에서의 공극은 목재 자체가 다공성 재료임으로 인해 다른 복합재료의 공극의 특성과는 상당히 다르며 보통 목질복합재료의 공극은 두가지로 구분된다: 각 요소간의 공극(macro-voids)과 요소 내의 공극(micro-voids). 이들 각 공극의 함유량의 변화에 따른 정량적인 측정과 오에스비의 성질에

미치는 영향은 아직 완전히 구명되지는 못하고 있다. 또한 X-ray 기술과 이미지프로세싱기술이 도입되기 전까지는 두 종류의 공극을 각각 측정하는 것은 매우 어려운 작업으로 거의 불가능하다고 보았다.

본 연구의 주목적은 X-ray 단층촬영기법과 디지털이미지프로세싱기술을 사용하여 오에스비의 공극 함유량의 변화를 두가지 형태의 공극과 연관하여 살펴보고 이를 통해 오에스비의 내부 공극구조의 특성에 대하여 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

스트랜드보드 제조용 스트랜드는 폰데로사 소나무(ponderosa pine) 제재목으로부터 제조하였다. 우선 폰데로사 소나무 원목을 20 mm × 150 mm × 2,600 mm의 각재로 제재한 후 길이 200~250 mm의 소형블록으로 자른 다음 디스크 스트랜더를 사용하여 이들 블록으로부터 두께 0.38 mm, 폭 22 mm, 길이 145 mm의 스트랜드를 제조하였다. 이 스트랜드를 로터리 드럼건조기에서 건조시켰으며 건조후 스트랜드의 함수율은 3.4%로 측정되었다. 건조된 스트랜드는 함수율 변동을 막기 위해 비닐백에 넣어 보관하였다.

2.2. 스트랜드보드 제조 및 시험편 제작

총 12개의 스트랜드보드를 제조하였으며 접착제는 페놀수지로 스트랜드 전건중량의 6%를 가하였고, 배향은 전두께에 걸쳐서 스트랜드의 길이방향에 평행하게 하여 제조하였다. 목표밀도는 각각 0.4, 0.6, 0.8 g/cm³으로 하였고, 각 밀도당 4개의 보드를 제조하였다. 제조 후 재단된 최종 보드의 치수는 폭 300 mm × 두께 10 mm × 길이 450 mm이며, 시험편으로 절단할 때까지 온도 20°C, 상대습도 65% 조건인 항온항습실에서 보관하였다.

제조된 각 보드로부터 밀도측정을 위한 시험편을

제작하였으며 그 크기는 폭 25 mm × 두께 10 mm × 길이 250 mm 로 하였다. 밀도측정후 각 시험편을 X-ray로 내부구조를 탐색하기 위해 ASTM D-3500에 따른 인장시험편으로 제작하였다. 제작된 시험편은 항온항습실에서 함수율이 12%에 달할 때까지 조습 처리하여 보관하였다.

2.3. 시험편의 밀도측정

시험편의 길이에 따른 밀도를 측정하기 위하여 밀도측정기(QMS densitometer - model QTRS-01X)를 사용하였다. 측정길이는 시험편의 한쪽 끝면에서부터 200 mm이며, 시험편의 두께와 목표밀도가 입력변수로 입력되었다.

2.4. X-ray Computed Tomography와 이미지프로세싱 시스템

본 연구에서 사용된 X-ray tomography는 제 3세대의 3차원 scanning system (Model FCT 4200)이다. X선 소스로 최대해상력이 5 μm인 225 kV microfocus tube가 사용되었다. 시험편이 장착되면 X-ray 빔이 시험편의 높이를 따라 한번 스캔한 뒤 360° 회전하면서 스캔을 계속한다. 충분한 영상이 얻어질 때까지 작업을 계속한다. 측정된 자료는 이미지 분석 소프트웨어(Image-Pro Plus)에 의하여 분석이 시행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 밀도

각 시험편의 밀도는 2가지로 구분하였다: Density-A, and Density-B. Density-A는 전체측정범위 중 시험편의 끝으로부터 100 mm~150 mm 지점의 밀도를 측정된 것으로 이 지점은 X-ray로 공극을 측정할 때의 측정지점인 인장시험편의 게이지영역(목부분)에 해당된다. Density-B는 전건법에 의하여 측정된 평

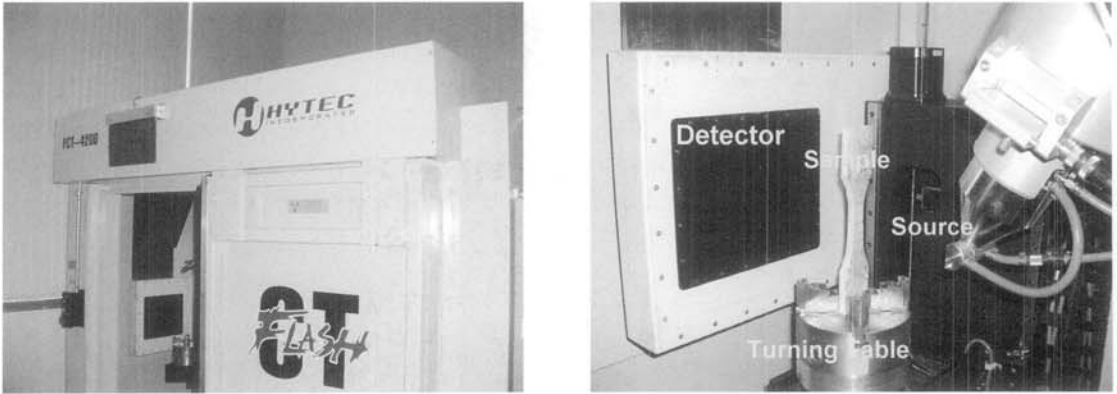


Fig. 1. X-ray computed tomography system.

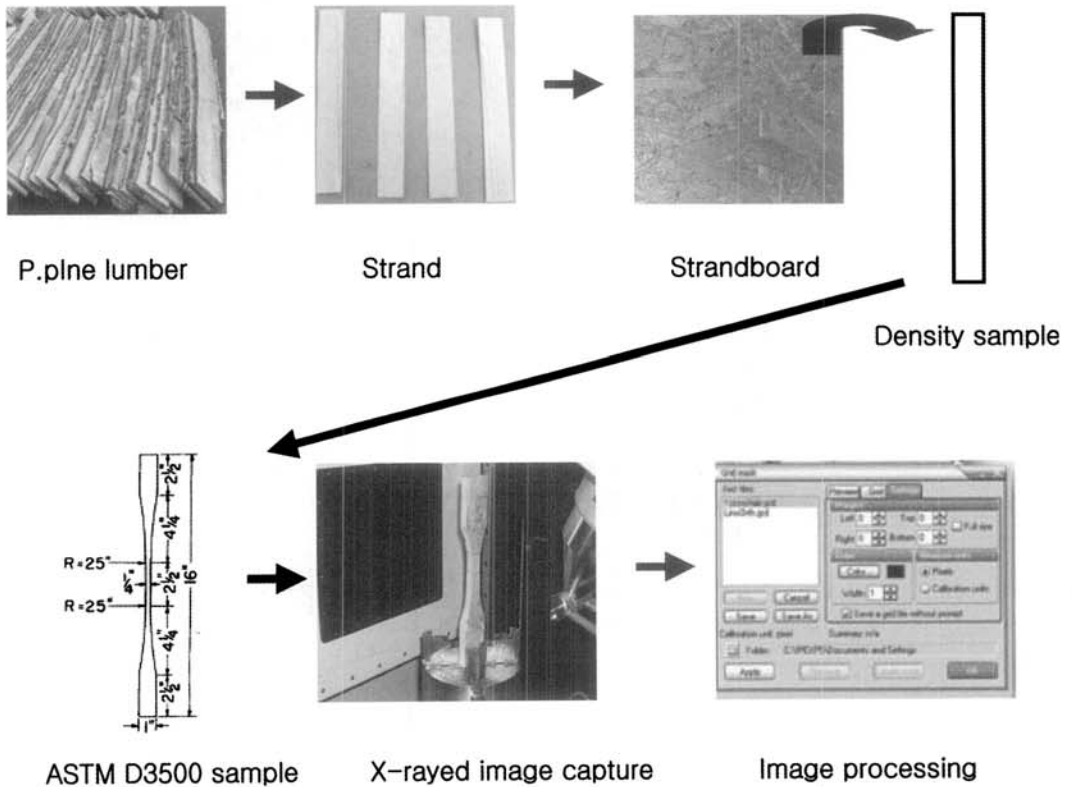


Fig. 2. Experimental steps using X-ray computed tomography system.

균밀도이며 측정된 결과를 Table 1에 나타내었다. 밀도측정기에 의해 측정된 결과는 전건법에 의해 측정

된 결과와 다소 차이가 나타났으나 그 차이는 매우 작았다. 이들 간의 관계는 아주 높은 상관계수를 보여주

Table 1. Comparing the measured density by densitometer to conventional method

Sample I.D.	Density-A ¹⁾ (kg/m ³)	Density-B ²⁾ (kg/m ³)	Density ratio ³⁾
S40	430.24	434.98	0.99
	439.02	405.75	1.08
	469.39	410.56	1.14
	434.98	437.65	0.99
			Avg. 1.05
S60	571.82	580.98	0.98
	592.14	620.02	0.96
	540.33	529.24	1.02
	674.18	603.48	1.19
			Avg. 1.04
S80	783.53	725.32	1.08
	837.18	808.73	1.03
	785.02	784.18	1.00
	696.78	699.68	0.96
			Avg. 1.03

1) density by densitometer, 2) density by conventional method, 3) Density-A/Density-B

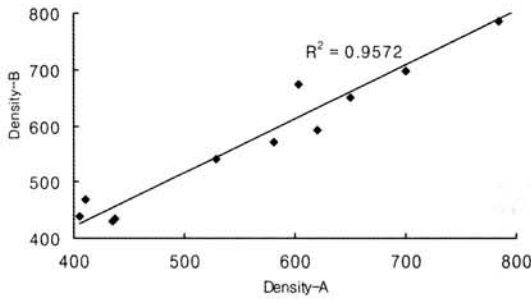


Fig. 3. Correlation between measured density by densitometer (Density-A) and conventional method (Density-B).

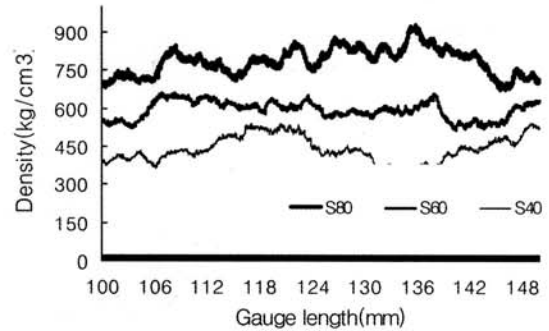


Fig. 4. Typical density variation along the length of the samples.

있으며(Fig. 3). 평균비율(Density-A/Density-B)은 밀도가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었다. 따라서 덴시토미터는 목재뿐만 아니라 오에스비와 같은 목질복합재료의 밀도측정에도 유용한 기기로 생각된다.

밀도별 각 시험편의 길이에 따른 밀도의 변이는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. 밀도는 인장시험편의 게이지 영역의 길이인 한쪽 끝면에서부터 100 mm~150 mm 사이에서 길이와 밀도에 따른 변이를 보여주고 있다. 밀도의 변이가 다수 나타났는데 이는 성형작업시 수작업으로 이루어진 관계로 인한 것이며

공장에서 성형작업이 이루어질 경우 공정상에서 자동 조절되어 변이성이 감소될 것으로 기대된다.

3.2. 내부공극의 이미지와 분포

서로 다른 해상도에서 X-ray를 조사하여 획득한 이미지는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 검은색의 진한 부분이 공극이며 각 스트랜드와 그 주변은 밝은 색으로 공극이 명확하게 식별되었다. 획득한 이미지를 바탕으로 수행된 이미지 분석결과 저해상도(8 pix-

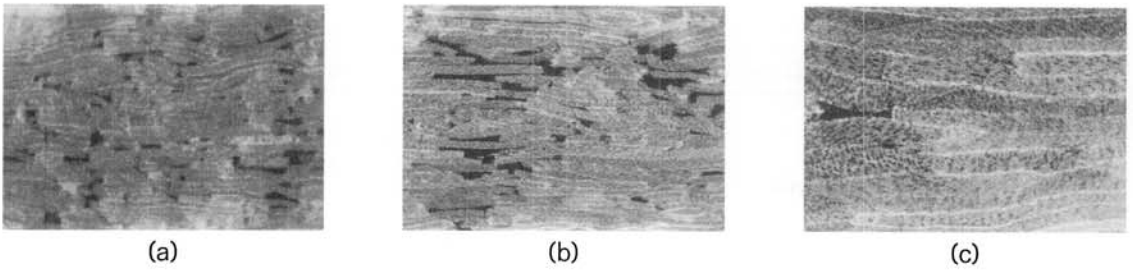


Fig. 5. Scanned images of strandboard in low resolution (a), intermediate resolution (b), high resolution (c).

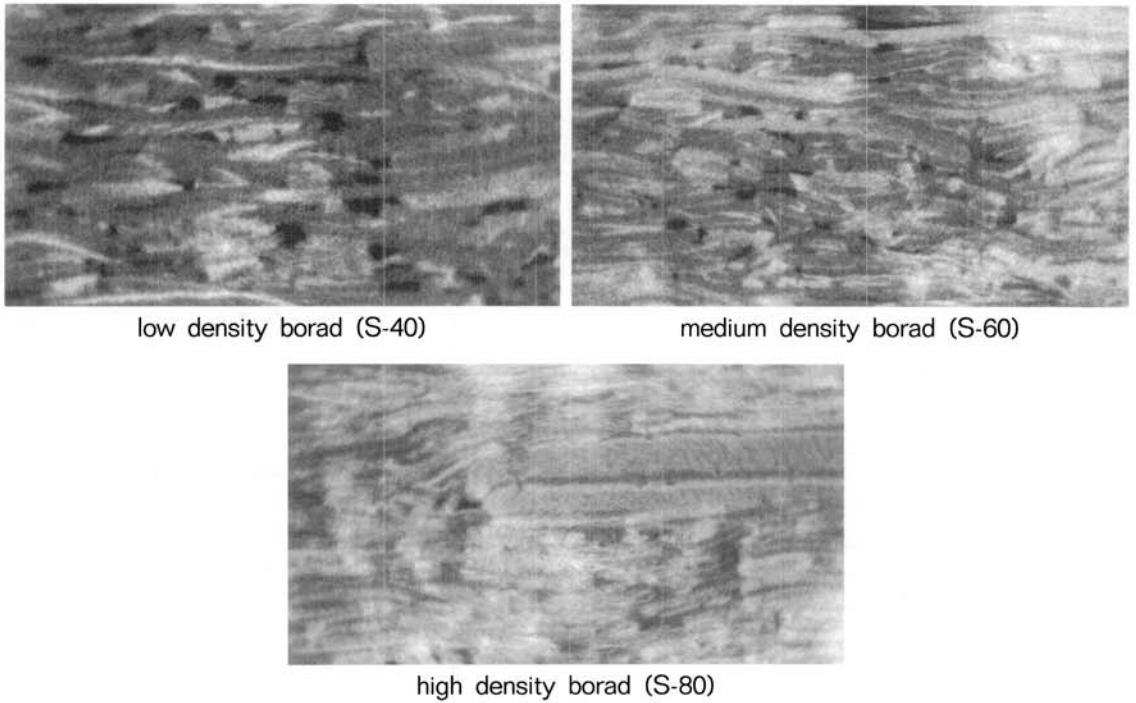


Fig. 6. Scanned images of OSB according to density of the samples.

els/mm)에서는 스트랜드간의 공극, 즉 macro-void는 측정이 가능하나 스트랜드 내의 미세공극인 micro-void의 이미지획득이 불가능하였다. 중해상도(23 pixels/mm)에서는 두 가지 형태의 공극 모두다 이미지 획득이 가능하였으나 미세공극의 전부 또는 대부분의 이미지를 획득하는데에는 어려움이 있었다. 고해상도(62 pixels/mm)에서는 대부분의 미세

공극 이미지획득이 가능하였다.

고해상도 영역에서 거의 모든 미세공극을 인식할 수 있으나 시간과 비용이 너무 많이 소모되어, 본 연구에서는 내부공극 이미지 획득을 위하여 저배율을 채택하여 적용하였으며 미세공극은 관련식을 이용하여 추정하였다.

밀도에 따른 전형적인 이미지를 Fig. 6에 나타내

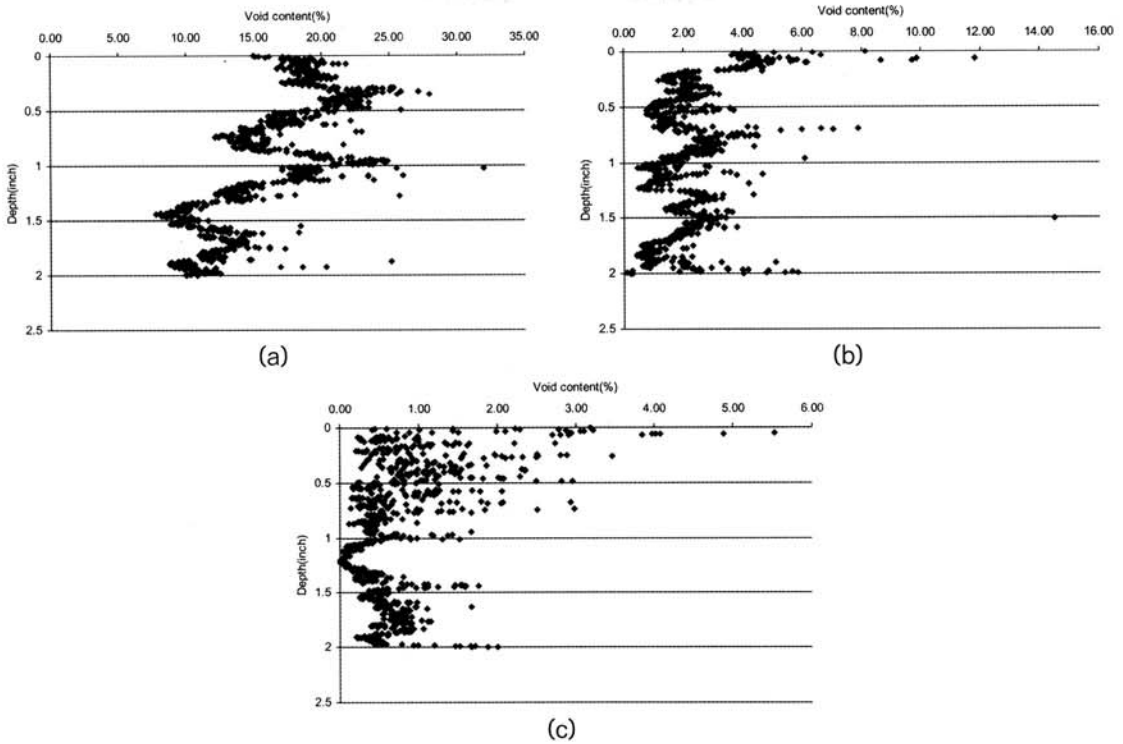


Fig. 7. Void contents of strandboard from the X-ray scanned images ((a) S40, (b) S60, (c) S80).

었다. 저밀도보드에서는 스트랜드간의 공극은 어두운 색으로 상대적으로 크게 나타났지만, 고밀도보드에서는 매우 작게 나타났다. 이를 다시 정리해보면 보드의 밀도가 증가할수록 공극으로 분석된 어두운 검정색의 이미지가 현저히 감소하는 경향을 보여주었으며, 고밀도보드에서는 스트랜드의 가장자리인 밝은색의 이미지가 많이 나타났다. 이 결과로부터 X-ray로 획득한 이미지를 통해 목질복합재료를 파괴하지 않고도 비파괴적으로 내부구조를 파악할 수 있으며, 이미지 분석을 통해 보드의 물리 및 기계적 성질의 평가가 가능하리라 생각되어 재료물성의 측정에 매우 유용한 기법으로 생각된다.

이미지 분석을 통하여 얻은 공극의 함유량에 대하여 보드의 밀도별로 측정깊이에 따른 전형적인 공극률을 산정한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 저밀도보드에서는 공극률이 높은 쪽에 집중되

어 공극이 존재하고 있으며 매 12.7 mm마다 층간에서 변이를 보이고 있다. 비슷한 경향이 밀도가 큰 보드에서도 나타났다. 그 이유는 성형작업이 수작업으로 진행되어 보통 한 보드의 성형시 스트랜드를 3번 나누어 각층마다 단속적으로 성형작업이 이루어져, 전체 층구조를 완전히 같아지게 하기 힘들기 때문이다. 보통 성형을 시작할 때 공극이 많이 발생하며, 성형중간에는 처음 성형시보다 스트랜드간의 겹침이 많아지면서 공극이 감소되는 것으로 나타났다. 이를 통해 보드내부에 존재하는 스트랜드간의 공극의 분포와 그 원인을 파악할 수 있으며, 공극의 존재 위치와 그 비율을 정확하게 산정할 수 있었다.

3.3. 공극의 함유량

시험체의 밀도에 따라 측정된 공극의 함유량을

Table 2. Macro-void content and overall void content of the samples

Sample I.D.	Overall void volume (%)	Macro-void content (%)	Micro-void content (%)
S40	68.59	15.98	52.61
	68.22	13.90	54.32
	66.33	10.68	55.65
	66.13	10.45	55.68
	Avg 6732	Avg 12.75	Avg 54.57
S60	59.04	13.06	45.98
	55.03	2.23	52.80
	53.29	4.90	48.39
	52.01	2.24	49.77
	Avg 5484	Avg 5.61	Avg 49.24
S80	45.84	2.30	43.54
	43.86	1.48	42.38
	39.30	0.95	38.35
	34.40	1.95	32.45
	Avg 41.60	Avg 1.67	Avg 39.21

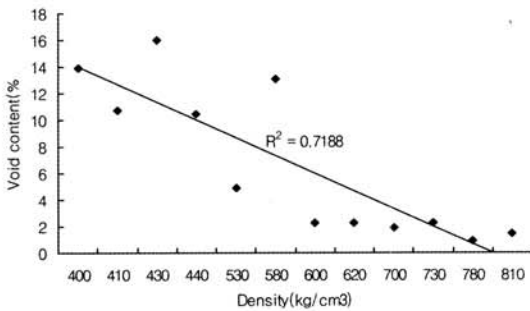


Fig. 8. Void content according to densities of the samples.

Table 2에 나타내었다. 시험체의 전체공극 함유량은 다음 식에 따라 산정하였다(Kollman and Côte, 1968). 산정을 위한 기본 가정으로 시험체에 포함된 수분의 양은 12%로 하였으며 이는 시험체를 항온항습실에서 조습처리한 함수율이다.

$$\text{공극률} = 1 - R \left(\frac{1}{\rho_w} + \frac{H_h}{\rho_s} + \frac{H_k}{\rho} \right) \quad (1)$$

여기서

R : 시험체의 밀도

ρ_w : 순수목질의 밀도(=1.50)

ρ_s : 흡습된 물의 밀도(=1.113)

ρ : 물의 평균밀도(=1.0)

H_h : 흡습된 수분량(=0.12)

H_k : 자유수의 수분량(=0)

식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\text{공극률}(\%) = [(1 - R \cdot 0.774) \times 100] \quad (2)$$

스트랜드간의 공극(macrovoid) 함유량은 보드의 밀도에 따라 다르게 나타났으며, S40은 평균 12.75%, S60은 5.61%, S80은 1.67%로 나타나, 보드의 밀도가 증가함에 따라 공극의 함유량은 낮게 나타났다. 보드의 밀도가 증가하면 스트랜드와 접착제로 구성된 매트는 스트랜드간의 상호 접촉을 증대시켜 접착력을 향상시킨다(Dai and Steiner, 1993). 따라서 압체가 많이 되는 매트는 스트랜드간의 공극이 줄어들게 된다. Fig. 8에 보드의 밀도와 공극의 함유량과의 관계를 나타내었는데, 보드의 밀도는 공극의 함유량과 직선적인 관계를 보여주었으며 상관관계가 높게 나타났다.

스트랜드간의 공극이 측정되면 스트랜드 내의 내부공극(V_{mi})은 전체공극률(V_f)에서 스트랜드간의 공극률(V_{ma})을 뺀 값이 되며 그 식은 다음과 같다.

$$V_{mi} = V_t - V_{ma} \quad (3)$$

산정된 결과를 Table 2에 나타내었다.

스트랜드 내의 환경조건은 스트랜드가 열압되는 동안에 항상 열압조건에 동일한 평형상태에 있다고 보기 어렵기 때문에 보드 내에 존재하는 공극이 스트랜드간의 공극과 스트랜드 내부의 공극으로 구분될 필요가 있다고 하였다(Kamke and Wolcott, 1994). Kruse 등(2000)은 공극이 팽창계수에는 영향을 미치지 않으나 공극의 존재는 OSB의 탄성계수와 프와송의 비(poisson's ratio)를 감소시킨다고 하였다. 이들이 언급하였듯이 공극의 존재는 목질복합재료의 역학적 성질에 영향을 미친다. 목재는 본질적인 공극을 함유하고 있으므로 공극의 함유에 따른 영향을 파악하기 위해서는 스트랜드보드의 경우 보드내부에 존재하는 공극을 스트랜드간과 스트랜드 내의 공극으로 구분하여, 이들 각각이 어떻게 영향을 미치는가에 대하여 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 스트랜드보드의 공극을 X-ray computed tomography로 측정하고 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 공극의 분포와 함유량 및 보드의 내부구조를 조사하였다. 보드 시험편의 밀도는 밀도측정기로 측정하였으며 측정된 결과는 전건법에 의해 측정된 결과와 아주 높은 상관관계를 보여 주었다. 보드 내의 길이에 따른 밀도의 변이는 성형작업시 수작업으로 이루어진 관계로 인한 것이며 공장서 성형작업이 이루어질 경우 공정상에서 자동조절이 되어 변이성이 감소될 것이다.

서로 다른 배율에서 X-ray를 조사하여 획득한 이미지를 수행된 이미지 분석결과 저해상도에서는 스트랜드간의 공극의 측정이 가능하다. 스트랜드 내의 미세공극인 micro-voids는 이미지획득이 불가능하였다. 중해상도에서는 두가지 형태의 공극 모두다 이미지 획득이 가능하였고, 고해상도에서는 미세공

극 대부분의 이미지 획득이 가능하였다.

본 연구에서는 저해상도를 채택하여 스트랜드간의 공극을 측정하고, 스트랜드 내의 미세공극은 관련식을 이용하여 추정하였다. 저밀도보드에서는 스트랜드간의 공극은 어두운 색으로 상대적으로 크게 나타났지만, 고밀도보드에서는 매우 작게 나타났다. 보드의 밀도별로 측정깊이에 따른 전형적인 공극률을 산정한 결과 중간변이가 나타나 성형시 각 단계를 구분지을 수가 있었다. 이를 통해 보드내부에 존재하는 스트랜드간의 공극분포를 파악할 수 있으며 그 비율을 정확하게 산정할 수 있었다. 따라서 보드내부에 존재하는 스트랜드간의 공극을 X-ray로 획득한 이미지를 분석을 통해 목질복합재료를 파괴하지 않고도 비파괴적으로 내부의 공극구조를 파악할 수 있으며, 이를 정량화하여 보드의 물리 및 기계적 성질의 평가가 가능하리라 생각되어 재료물성의 측정에 매우 유용한 기법으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. American Society for Testing and Materials. 1995. Standard test methods for structural panels in tension. ASTM D3500.
2. Dai, C. and P. R. Steiner. 1993. Compression behavior of randomly formed wood flake mats. *Wood and Fiber Sci.* 25(4): 349~358.
3. Ellis, S., J. Dubois, and S. Avramidis. 1994. Determination of parallam macroporosity by two optical techniques. *Wood and Fiber Sci.* 26(1): 70~77.
4. Gupta, G., A. Zbib, A. El-G., M. Khraisheh, and H. Zbib. 2005. Characterization of a novel bioactive composite using X-ray computed tomography. *Composite Structures* 71: 423~428.
5. Kamke, F. A. and M. Wolcott. 1994. Fundamental aspects of wood deformation pertaining to manufacture of wood-based composites. *Wood and Fiber Sci.* 26(4): 496~5116.
6. Kruse, K., C. Dai, and A. Pielasch. 2000. An analysis of strand and horizontal density distributions in oriented strand boards. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 58: 270~277.

7. Sugimori M. and F. Lam. 1999 Macro-void distribution analysis in strand-based wood composites using X-ray computer tomography technique. *J. of Wood Sci.* 45: 254~257.
8. Lenth, C. A. and F. A. Kamke. 1996. Investigation of flakeboard mat consolidation. Part 1. Characterizing the cellular structure. *Wood and Fiber Sci.* 28(2): 153~167.
9. Masad, E. M., B. Muhuntan, N. Shashidhar, and T. Harman. 1998. Application of geotechnical principles in pavement engineering. *Geotechnical Special Publication No.85*: 69~81.
10. Nishimura T., M. P. Ansell, and N. Ando. 2002. Evaluation of the arrangement of wood strand at the surface of OSB by image analysis. *Wood Sci. and Tech.* 36: 93~99.
11. Shaler, M. S. and P. R. Blankenhorn. 1990. Composite model prediction of elastic moduli for flakeboard. *Wood and Fiber Sci.* 22(3): 246~261.
12. Schnider, A. 1982. Investigations on the pore structure of particleboard by means of mercury porocimetry. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 40(2): 415~420.
13. Suchsland, O. and Hong Xu. 1989. A simulation of the horizontal density distribution in flakeboard. *Forest Prod. J.* 39(5): 29~33.
14. Tashman, L., E. Masad, J. D'angelo, J. Bukowski, and T. Harman. 2002. X-ray tomography to characterize air void distribution in superpave gyratory computed specimens. *International Journal of Pavement Engineering.* 3(1): 19~28.
15. Wu, Q., J. N. Lee, and G. Han. 2004. The influence of voids on the engineering constants of oriented strand board: a finite element model. *Wood and Fiber Sci.* 36(1): 71~83.
16. Zhang, B., Q. Wu, L. Wang, and G. Han. 2005. Characterization of internal void structure of strand-based wood composites using X-ray tomography and digital tools. *Proceedings of McMat 2005*: 1~6.