신갈나무 정상재와 인장이상재의 전단 및 휨 파면해석*¹

권 성 민*² · 권 구 중*² · 장 재 혁*² · 김 남 훈*^{2†}

Fractography of Sound and Tension Woods of *Quercus mongolica* by Shear and Bending Stress*¹

Sung-Min Kwon*² · Gu-Joong Kwon*² · Jae-Hyuk Jang*² · Nam-Hun Kim*^{2†}

요 약

인장이상재를 갖는 활엽수재의 파괴특성을 이해하기 위해 신갈나무재의 전단시험 및 휨시험을 통하여 파괴단면을 관찰하였다. 육안적으로 관찰한 결과 전단시험의 경우 정상재보다 인장이상재 시험에서 더 많은 섬유조직의 보풀이 관찰되었고, 함수율 30% 시험의 전단면이 10%보다 거칠고 많은 섬유조직의 보풀이 관찰되었다. 휨시험에 의해 파괴된 인장이상재는 정상재에 비해 목섬유가 굵고 길게 드러나 있는 것이 관찰되었다. SEM 관찰 결과 방사면 전단파괴시 정상재와 인장이상재의 목섬유는 벽면파괴에 의한 파괴형태를 보여주고 있으며, 방사유세포는 벽면파괴에 가까운 형태로 파괴되었다. 접선면 전단파괴시 목섬유는 벽면파괴에 의한 파괴형태를 보여주고 있고 인장이상재의 목섬유의 파괴부분이 더 거칠었다. 방사유세포는 양 시험 모두 벽면파괴에 의한 파괴형태를 보여주었으며, 인장이상재의 방사유세포에서 절단면이 비교적 깨끗한 것으로 나타났다. 휨시험에 의한 목섬유 파면의 형태는 정상재의 목섬유에 비하여 인장이상재가 파괴 시 끝이 무디고 깨끗하게 끊어진 모습을 보여주었다.

ABSTRACT

This study has been carried out to understand the fracture characteristics of the tension wood of *Quercus mongolica* under the shear and bending stress. Macroscopically, the wood fluff in the shear surface appeared more frequently in tension wood than sound wood, and more coarse wood fluffs were observed in 30% than 10% moistured shear surface. In the fractured tension wood from bending stress, more thick and long wood fiber appeared than sound wood. The

*¹ 접수 2011년 6월 22일, 채택 2011년 7월 19일

*² 강원대학교 산림환경과학대학, College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김남훈(e-mail: kimnh@kangwon.ac.kr)

observation using scanning electron microscope indicated that both sound and tension wood samples from radial shear surface showed the intrawall dominated failure and the fracture surface of the ray parenchyma cell showed the transwall dominated failure. In tangential shear surface, wood fiber surface showed the intrawall failure and short and coarse wood fiber was observed in tension wood. Ray parenchyma cell of sound and tension wood samples showed the transwall failure. The surfaces of tension wood's ray parenchyma cell were relatively clean. The fractured tension wood from bending stress showed unsharp and flat wood fiber compared with sound wood.

Keywords: fractography, tension wood, intercell failure, intrawall failure, transwall failure

1. 서 론

이상재(reaction wood)는 정상재에 비하여 여러 가지 특성을 가지는데 조직적인 구조뿐만 아니라 물리·화학적 성질도 매우 다르다(Diaz-vaz *et al.*, 2009). 이상재의 형성 원인은 굴지성과 생장특성에 원인이 있는 지향성 운동이 관련하는 것으로 생각되며, 직접적으로는 식물생장 조절물질, 특히 옥신과 TIBA와 같은 식물생장 호르몬의 분배 불균형으로 알려지고 있다(Cronshaw and Morey, 1968; Carlquist, 1988). 이러한 이상재는 경사지에서 생육하는 수목이나 눈, 바람 등 외력의 영향을 받으며 생장한 수간의 재부를 의미하며, 침엽수재에서 나타난 경우를 압축이상재(compression wood), 활엽수재에서 나타난 경우를 인장이상재(tension wood)라 한다(George, 1991; Timell, 1986). 인장이상재의 가장 큰 특징은 G층(gelatinous layer)이라 불리는 두꺼운 세포벽층이 존재하는 것으로(Lehringer *et al.*, 2009; Kaku *et al.*, 2009; Yamamoto 2004) 인장이상재는 정상재에 비하여 2차 세포벽에 목질화가 적고 도관의 직경이 작고 수도 감소하며 섬유 크기가 크다. 또한 생재함수율은 크지만 건조하기 쉽고 건조에 따라 흡습성이 작아지고 축방향, 접선방향의 수축율이 크고 압축강도는 작다(Ruelle *et al.*, 2011; Panshin and Zeeuw 1980). 현재까지 이상재의 결과들은 주로 해부 및 물리학적 특성의 기본적인 연구만이 진행되었으며 이상재의 파면해석에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

파면해석은 재료의 파괴원인을 해석하기 위한 수단으로 파괴역학 분야에서 널리 사용되고 있는 방법이다. 파면해석 연구는 금속분야(Tarpani *et al.*, 2004; Michalska *et al.*, 2009 등), 섬유분야(Nakanishi *et al.*, 1997; Harish *et al.*, 2009; Teh *et al.*, 2005 등) 의료분야(Quinn *et al.*, 2010; Wise *et al.*, 2007 등) 등 재료를 다루는 여러 분야에서 일찍부터 수행되고 있다. 그러나 목재의 파면해석에 관한 연구는 목재의 파괴 부분이 다른 재료와 비교하여 요철이 현저하고 변화가 매우 심하기 때문에 현재까지도 해결되지 않은 과제가 많이 남아있다.

목재의 파면해석에 관한 연구는 Côté 등(1969, 1983)이 파단면의 파괴면을 종합적으로 관찰하여 파면해석 용어를 정리하였으며, Sell and Zimmermann (1993)은 장기간의 휨상태에서 인장력에 의해 파괴된 파괴면의 microfibril을 관찰하였다. Nakai 등(1998)은 Sitka spruce의 인장파면을, Ando 등(2006)은 Japanese red pine의 전단파면을 주사전자현미경을 통해 연구하였고, Donaldson (1995)은 radiata pine의 접선파괴면 특징을 리그닌분포 및 세포치수와 관련하여 검토하였다. 또한 Kifetew 등(1998)은 Scots pine을 생재(green)와 전건후 포수재(resoaked state)로 나누어 파면을 관찰하여 생재는 파면이 거칠게 나타난 반면 전건후 포수재는 파면이 매끈하고 부서지기 쉬운 형태로 나타남을 보고하였다. Kim 등(1988)은 목재의 건조과정 중 수분응력에 의해 발생된 활열면의 파면을 해석하여 보고하였고, 김 등(1999)은 전단하중에 의해 파괴된 동일수종간 및 이

Table 1. Characteristics of sample wood

Species	Test	Moisture contents (%)		DBH (cm)*	Age	Density (g/cm ³)	Locality
<i>Quercus Mongolica</i> Fisch.	Shearing	30	Sound	24	27	0.80	Chuncheon, Kangwon
			Tension	22	21	0.90	
		10	Sound	16	19	0.80	
			Tension	20	21	0.90	
	Bending	10	Sound	20	20	0.88	
		10	Tension	18	19	0.86	

* Diameter at Breast Height.

Fig. 1. Sample disc of *Quercus mongolica* (T : Tension wood, P : Pith).

수종간의 적층재 파괴면을 해석하였다. 이상과 같이 목재의 파괴해석에 관하여 보고된 연구들은 주로 정상재의 파괴형태에 따른 결과로서 이상재에 대한 파괴해석은 거의 없는 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 인장이상재를 갖는 활엽수재의 파괴특성을 이해하기 위하여 신갈나무재의 전단 시험 및 휨시험을 실시하여 파괴단면을 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

공시목은 강원대학교 학술림에서 자생한 신갈나무재를 흉고높이에서 인장이상재가 포함된 원판을 채취하였다(Fig. 1). 전단강도 시험편의 인장이상재와

Fig. 2. Different types of wood cell wall failure (A : Transwall failure, B : Intrawall failure, C : Intercell failure).

정상재의 함수율은 30%와 10%로 구분하였으며, 휨강도 시험편의 인장이상재와 정상재는 10%의 함수율로 조절하였다(Table 1).

2.2. 실험방법

2.2.1. 전단시험

전단시험은 한국산업규격 KS F 2209에 따라 실험하였으며, 정상재와 인장이상재를 구분하여 방사단면과 접선단면 시편으로 각각 제작하였다. 제작된 시편은 만능재료시험기(Instron, 4482)를 이용하여 하중속도 8 mm/min의 전단력을 시편에 가하여 파괴를 실시하였다.

Fig. 3. Macroscopic failure of shear stress in *Quercus mongolica* wood.

* Moisture content (%).

2.2.2. 휨시험

휨시험은 한국산업규격 KS F 2208에 따라 실험하였으며, 정상재와 인장이상재를 구분하여 섬유방향과 접선방향 시편으로 각각 제작하였다. 휨시험편의 크기는 작은 시료의 크기로 인해 10 (R) × 10 (T) × 70 (L) mm의 크기로 축소 제작한 후 하중을 가하여 (8 mm/min) 실험을 실시하였다.

2.2.3. 파면관찰

전단과 휨시험 후 강원대학교 창강제지연구소에 설치되어 있는 주사전자현미경(JEOL, JSM-5510)으로 25 kV의 가속 전압하에서 관찰하였다.

2.2.3. 목재의 파면해석

목재의 파괴형태는 세포벽에서 파괴가 일어나는 형태에 따라 다음과 같이 구분하였다(Côté 등, 1983; Fig. 2)

- 세포간층파괴(intercell failure) : 단순히 중간층에서의 파괴
- 벽내파괴(intrawall failure) : 1차벽이나 2차벽에서의 파괴
- 벽절단파괴(transwall failure) : 세포벽이 관통되어 일어난 파괴

Fig. 4. Macroscopic failure of bending stress in *Quercus mongolica* wood.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파면의 육안적 구조

Fig. 3은 함수율과 전단면에 따른 정상재와 인장이상재의 전단파면에 대한 육안적 구조를 보여주고 있다. 방사단면 시편의 경우 정상재에 비하여 인장이상재 시편에서 더 많은 섬유유 보풀이 관찰되었다. 접선단면 시편의 경우 양 시편 모두 대도관이 존재하고 있는 공관부를 따라 파괴된 모습을 보여 주고 있으며, 섬유유 보풀은 거의 관찰되지 않으나 인장이상재 시편에서 굵고 짧은 보풀이 관찰되었다. 함수율 30% 시편의 전단면이 10%의 전단면보다 많은 섬유유 보풀이 관찰되었다.

Wilkes (1987)는 유칼립투스재를 이용하여 수분이 목재파괴에 미치는 영향을 조사하여 수분이 양이 적을수록 목섬유 및 유세포 2차벽의 갈라짐으로 인해 파면이 거친 형태로 나타남을 보고하였다. Kifetew 등(1998)은 Scots pine을 생재와 전건후 포수재로 나누어 파면을 관찰하여 생재는 파면이 거칠게 나타난 반면 전건후 포수재는 파면이 매끈하고 부서지기 쉬운 형태로 나타남을 보고하여 한번 함수율이 낮아졌던 재는 파면이 깨끗하게 나타남을 보고하였다.

휨시험에 의해 파괴된 정상재와 인장이상재의 경우(Fig. 4) 짧게 휘어지며 파괴된 형태를 보여주고 있으며, 인장이상재에서 파괴된 목섬유가 정상재에 비해 굵고 길게 드러나 있는 것이 관찰되었다. 파괴 방향에 따른 육안적 차이는 찾아보기 어려웠다.

Fig. 5. Radial shearing fracture surfaces of *Quercus mongolica* wood (SW : Sound wood, TW : Tension wood).

Fig. 6. Tangential shearing fracture surfaces of *Quercus mongolica* wood (SW : Sound wood, TW : Tension wood).

3.2. 파면의 주사전자현미경 관찰

Fig. 5 정상재와 인장이상재의 방사면 전단파괴를 나타낸 SEM 사진으로서 두 시편의 목섬유 모두 세포벽의 파괴가 일어나는 벽내파괴의 파괴형태를 보여주고 있으며, 인장이상재 목섬유의 파괴가 정상재보다 짧고 굵게 나타나는 경향이 있다. 방사유세포의 파괴형태는 정상재의 경우 벽내파괴에 가까운 파괴의 형태가 더 많이 나타났으나, 인장이상재의 경우 세포벽이 완전히 절단된 벽절단파괴에 가까운 형태로 파괴가 관찰되었다.

접선면 전단파괴는 Fig. 6에 나타내었다. 정상재와 인장이상재의 목섬유는 벽내파괴에 의한 파괴형태를 보여주고 있고 인장이상재의 목섬유의 벽층이 찢어지면서 발생한 마이크로화이버들의 길이가 짧고 거친 면을 보여주었다. 방사유세포는 양 시편 모두 벽절단파괴에 의한 파괴 형태를 보여주었으며, 정상재보다 인장이상재의 방사유세포가 파괴 시 더 심한 변형이 나타났으며 절단면이 비교적 깨끗한 것으로 나타났다.

Fig. 7. Bending fracture surfaces of *Quercus mongolica* wood (SW : Sound wood, TW : Tension wood).

Fig. 7은 정상재와 인장이상재 휨강도 시험편의 SEM사진이다. 목섬유 파면의 형태는 정상재의 목섬유에 비하여 인장이상재가 파괴 시 끝이 무디고 깨끗하게 끊어진 모습을 보여주고 있다. G층을 가지고 있는 인장이상재의 목섬유와 일반적인 정상재 목섬유간의 서로 다른 파괴 형태를 보여주어 두꺼운 G층

의 존재로 인해 얇은 세포벽의 파괴와 G층의 절단면이 비교적 깨끗한 것으로 나타났다.

Côté 등(1983)은 후벽의 세포벽은 벽내파괴가 발생하기 쉽고 박벽의 세포벽은 벽절단파괴가 발생하기 쉽다고 관찰하였다. Donaldson (1995)은 radiata pine을 이용하여 리그닌의 함량과 세포벽 두께에 따른 파면특징을 조사하여 리그닌의 양이 적은 층에서 주로 파괴가 일어남을 보고하여, 목재의 파괴형태는 조직적인 구조와 세포벽을 구성하는 화학성분에 따라 다른 것으로 생각된다.

4. 결 론

인장이상재를 갖는 활엽수재의 파괴특성을 이해하기 위해 신갈나무재의 전단시험 및 휨시험을 통하여 파괴단면을 관찰하였다.

육안적으로 관찰한 결과 전단 방사단면 시편의 경우 정상재에 비하여 인장이상재 시편에서 더 많은 섬유유의 보풀이 관찰되었고, 접선단면 시편의 경우 양 시편 모두 공권부가 선택적으로 파괴된 모습이 관찰되었다. 함수율 30% 시편의 전단면이 10%의 전단면보다 거칠고 많은 섬유유의 보풀이 관찰되었다. 휨시험에 의해 파괴된 인장이상재의 경우 목섬유가 정상재에 비해 굵고 길게 드러나 있는 것이 관찰되었다.

SEM 관찰 결과 방사면 전단파괴 시 정상재와 인장이상재는 벽내파괴에 의한 파괴형태를 보여주고 있으며, 인장이상재 목섬유의 파괴가 정상재보다 짧고 굵게 나타나고 있다. 방사유세포의 파괴형태는 벽절단파괴에 가까운 형태의 파괴가 관찰되었다. 접선면 전단파괴시 목섬유는 벽내파괴에 의한 파괴형태를 보여주고 있고 인장이상재가 더 거친 면을 보여주었다. 방사유세포는 양 시편 모두 벽절단파괴에 의한 파괴 형태를 보여주었으며, 인장이상재의 방사유세포에서 절단면이 비교적 깨끗한 것으로 나타났다.

휨시험에 의한 목섬유 파면의 형태는 정상재의 목섬유에 비하여 인장이상재가 파괴 시 끝이 무디고 깨끗하게 끊어진 모습을 보여주고 있다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023185).

참 고 문 헌

1. 김남훈, 堤壽一, 홍순일, 이성재. 1999. 구조용 목질재료의 전단파괴기구 해명을 위한 파면해석적 연구. 한국가공학회지 10(1): 23~32.
2. 한국산업규격. 2010. KS F 2208, KS F 2209.
3. 홍병화, 변희섭. 1995. 소나무 압축응력재의 등 탄성율과 내부마찰. 목재공학 32(2): 32~36.
4. Ando, K., Y. Hirashima, M. Sugihara, S. Hirao, and Y. Sasaki. 2006. Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. Journal of Wood Science 52: 483~489.
5. Carlquist, S. 1988. Comparative wood anatomy Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood. Springer. p. 144.
6. Côté, W. A., A. C. Day, and T. E. Timell. 1969. A contribution to the ultrastructure of tension wood fibers. Wood science and Technology 3(4): 257~271.
7. Côté, W. A. and R. B. Hanna. 1983. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. Wood and Fiber Science 15(2): 135~163.
8. Gronshaw, J. and P. R. Morey. 1968. The effect of plant growth substances on the development of tension wood in horizontally inclined stems of *Acer rubrum* seedlings. Protoplasma 65(4): 379~391.
9. Diaz-vaz, J. E., R. A. Ananías, S. Rodríguez, M. Torres, A. Fernández, and H. Poblete, 2009. Compression wood in *Pinus radiata* II: Density and chemical composition. Maderas. Ciencia y tecnología 11(2): 139~151.
10. Donaldson, L. A. 1995. Cell wall fracture properties in relation to lignin distribution and cell dimensions among three genetic groups of radiata pine. Wood Science and Technology 29(1): 51~63.
11. George, T. 1991. Science and Technology of

- Wood: Structure, Properties, Utilization. Tsoumis Van Nostrand Reinhold. p. 93~96.
12. Harish, S., D. P. Michael, A. Bensely, D. M. Lal, and A. Rajadurai. 2009. Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. *Materials Characterization* 60(1): 44~49.
13. Kaku, T., S. Serada, K. Baba, F. Tanaka, and T. Hayashi. 2009. Proteomic analysis of the G-layer in poplar tension wood. *Journal of Wood Science* 55(4): 250~257.
14. Kifetew, G., F. Thuvander, L. Berglund, and H. Lindberg. 1998. The effect of drying on wood fracture surfaces from specimens loaded in wet condition. *Wood Science and Technology* 32(2): 83~94.
15. Kim, N. H., T. Okano, and M. Ohta. 1988. Fractography of drying checks. *Bulletin of the Tokyo University Forests* 78: 83~95.
16. Lehringer, C., G. Daniel, and U. Schmitt. 2009. TEM/FE-SEM studies on tension wood fibres of *Acer* spp., *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. *Wood Science and Technology* 43(7-8): 691~702.
17. Michalska, J., S. Maria, and M. Hetmańczyk. 2009. Application of quantitative fractography in the assessment of hydrogen damage of duplex stainless steel. *Materials Characterization* 60(10): 1100~1106.
18. Nakai, T., N. Igushi, and K. Ando. 1998. Piezoelectric behavior of wood under combined compression and vibration stresses I: Relation between piezoelectric voltage and microscopic deformation of a Sitka spruce (*Picea sitchensis* Carr.) 44(1): 28~34.
19. Nakanishi, Y., K. Hana, and H. Hamada. 1997. Fractography of fracture in CFRP under compressive load. *Composites Science and Technology* 57(8): 1139~1147.
20. Panshin, A. J. and C. de Zeeuw. 1980. Textbook of wood technology -structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. McGraw-Hill in New York.
21. Quinn, J. B. and G. D. Quinn. 2010. Material properties and fractography of an indirect dental resin composite. *Dental Materials* 26(6): 589~599.
22. Ruelle, J., J. Beauchêne, H. Yamamoto, and B. Thibaut. 2011. Variations in physical and mechanical properties between tension and opposite wood from three tropical rainforest species. *Wood Science and Technology* 45(2): 339~357.
23. Sell, J. and T. Zimmermann. 1993. Radial fibril agglomerations of the S2 on transverse-fracture surfaces of tracheids of tension-loaded spruce and white fir. *European Journal of Wood and Wood Products* 51(6): 384.
24. Tarpani, J. R., C. O. F. T. Ruckert, M. T. Milan, R. V. Silva, A. Rosato Jr., R. N. Pereira, W. W. Bose, and D. Spinelli. 2004. Estimating fatigue life under variable amplitude loading through quantitative fractography. *Engineering Failure Analysis* 11(4): 547~559.
25. Teh, S. F., T. Liu, L. Wang, and C. He. 2005. Fracture behaviour of poly(ethylene terephthalate) fiber toughened epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36(8): 1167~1173.
26. Timell, T. E. 1986. Compression wood in Gymnosperms Vol. I.II.III. Springer-Verlog. Berlin.
27. Wilkes, J. 1987. Effect of moisture content on the morphology of longitudinal fracture in *Eucalyptus maculata*. *IAWA Bulletin n. s.* 8(2): 175~181.
28. Wise, L. M., Z. Wang, and M. D. Grynpas. 2007. The use of fractography to supplement analysis of bone mechanical properties in different strains of mice. *Bone* 41(4): 620~630.
29. Yamamoto, H. 2004. Role of the gelatinous layer on the origin of the physical properties of the tension wood. *Journal of Wood Science* 50(3): 197~208.