구조용 목질재료의 전단파괴기구 해명을 위한 파면해석적 연구*1

김남훈*2 · 堤 壽一*3 · 홍순일*2 · 이성재*4

Fractography of the Wood Materials Ruptured by Shear Stress*1

Nam-Hun Kim*2 · Juichi Tsutsumi*3
Soon-Il Hong*3 and Sung-Jae Lee*4

ABSTRACT

The ultrastructural characteristics of shear fracture surfaces of laminated wood prepared from major four Korean wood specimens were examined. Commercial urea and urethan resin were used as adhesives for laminated woods of both homospecies and heterospecies. The morphology of fracture surface was observed using an optical microscopy and scanning electron microscopy. Three anatomical failure types were recognized : intercell failure, intrawall failure and transwall failure.

In dry specimen, failure occurred mainly in woods. Laminated woods of softwoods showed mostly intrawall failure and transwall failure of tracheids, and them of hardwoods indicated mainly intrawall failure and interwall failure. Laminated woods prepared with urethan resin showed coarse fracture surface, on the other hand, those prepared with an urea formaldehyde resin had clean surface.

In wet specimen, failure occurred dominantly in glue line. Intrawall failure and flags were characterized in laminated wood prepared with urethan resin. In heterospecies laminated woods, failure was occurred mainly in softwood.

Consequently, fracture morphology of laminated wood may be influenced by adhesives, moisture content, species and anatomical characteristics.

Keywords : Fractography, Laminated woods, Shear stress, Morphology, Wood failure, Intrawall failure, Intercell failure, Transwall failure

*1 본연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 학술연구조성비(국제협력공동연구과제)에 의하여 연구되었음.
*2 강원대학교 산림과학대학, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea
*3 九州大學 農學部, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan
*4 강원도 산림개발연구원, Forest Research Institute of Kangwon Province, Chunchon 200-150, Korea

1. 서 론

문명의 발달과 함께 인간의 생활정도가 좋아지면서 콘크리트, 금속 등 딱딱한 재료의 환경보다는 내적 생명에 의하여 만들어진 목질자원의 환경과 가까워지려는 욕구는 점차 증가되고 있어 차츰 목조주택 혹은 주택내부의 구조부재나 내부장식재 등으로 목질재료의 이용이 급격히 증가되고 있다. 그러나 목재자원의 고갈로 대경재의 공급은 점차 감소되고 있어 이의 대체재로서 간벌소경재를 적층 집성한 재가 많은 호평을 받고 있다. 이들 적층 집성재는 강도적인 면에서도 제재목보다 우수한 것으로 평가되고 있다.

목질재료가 내부장식재로 선호되는 이유는 온·습도조절기능, 표면에서 느끼는 촉감, 시감등이 다른 재료에 비해 뛰어나기 때문이다. 또한 강도적 품질지수인 비강도중 휨강성과 휨강도가 뛰어나 기둥, 보 등의 휨하중을 받는 구조부재로서 가장 적합한 재료로 생각되고 있다. 그러나 압축, 전단, 인장강도는 타 재료에 비해 떨어져 구조체의 접합부에 사용되는 것은 불리한 단점도 가지고 있다.

지진, 태풍 등 자연적으로 발생되는 힘은 재료에 가해지는 외적하중 즉, 충격 및 전단하중 등으로 생각할 수 있는데 목조주택의 경우는 상당히 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 앞으로 계속 증가될 목조주택 및 목질재료의 수요에 부응하여 구조의 안전성을 위한 안전설계 및 시공에 관한 기초연구중의 하나가 破面解析(fractography)적 연구이다. 즉, 재료에 있어 결함의 존재여부와 관련하여 구조물을 안전하게 사용하기 위한 역학적인 해석은 파괴역학분야에서의 기본과제인데, 사고의 진단은 물론 안전설계의 유력한 수단의 하나로 생각된다. 파괴역학과 재료강도의 측면에서 볼 때 파괴기구, 파괴원인 등에 관한 정보를 얻을 수 있는 중요한 방법으로서 파면해석적인 연구가 중요하다.

파면해석은 육안 및 저배율(약40배)의 현미경으로 해석하는 巨視的 파면해석(macrofractography)과 그 이상의 배율로 해석하는 微視的 파면해석(microfractography)으로 나눌수 있는데 재료의 파괴기구를 해석하기에는 전자현미경을 이용한 미시적 파면해석이 더욱 중요시되고 있다(北川 등, 1977).

재료의 파괴기구를 해석하기 위한 파면해석적 연구는 재료를 다루는 여러 분야에서 일찍부터 수행되어 금속분야(北川 등, 1977), 섬유분야(Hearle et al., 1989) 등에서는 그 결과가 단행본으로 출판되어 있다.

목재의 파면해석적 연구는 타 재료에 비해 다소 늦게 시작되었고 현재까지도 미해결의 연구과제가 많이 남아있다. 이렇게 목재의 파면해석적 연구가 미진한 이유는, 목재의 파괴부는 타재료에 비해 요철이 현저하고 변화가 심하므로 광학현미경이나 투과전자현미경으로는 관찰이 일부분에 한정되어 수단에 의한 연구의 제약이 많았기 때문이다. 1965년경부터 제조된 주사전자현미경은 초점심도가 깊고 요철部의 관찰이 가능하며 分解能도 광학현미경에 비해 현저히 높아서 이에 관한 연구는 급진전하게 되었다.

목재 파괴부의 주사전자현미경적 연구의 시초는 Atack 등(1961)의 할열파괴와 인장에너지에 관한 연구로 생각된다. 이어서 DeBaise 등(1966)의 목재파괴역학과 형태에 관한 연구, Korán(1967)의 서로 다른 온도조건하에서 인장파괴된 black spruce의 방사단면 가도관의 전자현미경적연구가 발표되었고, 그후 많은 연구자들이 파괴면의 구조에 관해 깊은 관심을 갖게 되었다. 즉, Akande 등(1990)은 종인장파괴형을, Korán(1968)은 온도변화와 횡인장파괴형을, 古川 등(1980)은 침엽수재 단섬유의 인장파괴의 과정과 파괴형태를 해석하였다. 또한 DeBaise(1972)와 大澤 등(1978)은 전단파괴면을, 北原 등(1981), 今村 등(1982), 堤 등(1995)은 휨파괴면을, Aiuchi 등(1978), Kucêra 등(1982), Bariska 등(1985)은 압축파괴면을 해석하였다. 목재이용 및 가공분야에서도 藤田(1974), 金 등(1988)은 건조할열면을, Furuno 등(1983), Saiki (1984)는 목재접착층의 파괴면을 관찰, 해석하였다. 이외에 Côté 등(1983)은 종압축, 인장, 전단 등의 파괴면을 종합적으로 관찰하여 파면해석에 사용되는 용어를 정리하였으며, Woodward(1980)는 온도가 파괴면에 미치는 영향에 관하여, Wilkes (1987)는 목재파괴면에 미치는 수분의 영향에 관

하여 각각 보고하고 있다. 최근에는 분해능이 더욱 높아진 주사전자현미경을 이용하여 Sell 등(1993)이 장기간 휨상태에서 인장력에 의해 파괴된 파괴면의 microfibril을 관찰하였고, Imayama (1994)는 정적반복 휨하중 하에서 목재의 crack과 압축파괴의 관계를 연구하였다. 또한 Zink 등(1994)은 여러 각도의 섬유주향을 갖는 시료의 인장파괴 시료의 파면해석을 실시하였으며, Donaldson(1995)은 라디아타 소나무류의 접선면 파괴면의 특징을 리그닌분포와 세포치수와 관련하여 검토하였다. 따라서 본 연구에서는 앞으로 상당히 증가될 적층재를 이용한 건축물이나 구조물의 외적하중에 대한 안전을 도모하기 위하여, 전단하중에 의해 파괴된 동일수종간 및 이수종간의 적층재의 파괴면을 해석하여 외적하중에 유래하는 목구조물의 파괴현상을 구명하고 안전설계에 관한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 실험에 사용된 공시재는 강원대학교 연습림에서 채취한 낙엽송[*Larix leptolepis* G.], 잣나무[*Pinus koraiensis* S. et Z.], 느릅나무[*Ulmus davidiana var. japonica* N.], 다릅나무[*Maackia amurensis* R. et M.]의 4수종의 목재로부터 제작한 적층재의 전단강도 측정시료를 사용하였다.

Lamina의 치수는 25cm(L)×9cm(T)×1.5cm(R)로 하여 2 ply 적층재를 제작하였다. 접착제는 시판용 Urea와 Urethan 수지를 사용하였고 250g/m^2를 기준으로 1면에 도포하였다. 경화제 첨가량은 Urea 5 part, Urethan 10 part로 하였다. 압제압력은 침엽수 10kgf/cm^2, 활엽수 12kgf/cm^2로 하였고 압제시간은 20시간으로 하였다.

상태접착성능은 KS F3118-1989규칙에 준하였으며 강도측정기(Instron)를 사용하여 block 전단강도 실험을 하였다.

내수접착성능은 요소수지 접착제로 적층한 적층재를 60℃의 물에 4시간 침지 후 1시간 정도 냉수에 침적 냉각하여 block 전단강도 실험을 하였으며, 우레탄 수지로 적층한 적층재를 끓는 물에 4시간 침지 후, 냉수로 30분 정도 냉각하여 강도실험을 하였다.

2.2. 파괴면 관찰

적층재의 파괴면은 실체현미경과 주사전자현미경(SEM; Cambridge Stereoscan 200)으로 검경하였다. SEM관찰용 시료는 파괴면에 손상이 가지 않도록 하여 1cm×1cm×0.5cm의 블록을 제조한 후 SEM시료용 stub에 양면 테이프로 접착하고 ion sputter coater를 사용하여 금으로 증착하였다. SEM은 가속전압 5kV로 조작하였고 100X, 200X, 400X의 세 가지 해상도로 파괴면의 특징들을 검경하였다.

2.3. 목재파면해석의 전문용어

대부분의 목재세포벽은 2차벽의 3층구조(S1, S2, S3)와 외부의 1차벽으로 둘러 쌓여있고, 중간층이라 불리는 세포간층으로 접해있다. 목재의 파괴형은 이들 세포벽에서 파괴가 일어나는 형태에 따라 다음과 같이 구분하였다(Côté 등, 1983).

* 細胞間層破壞 (壁間破壞; intercell failure, interwall failure) : 단순히 중간층에서 세포가 분리되는 것을 말한다.
* 壁內破壞 (intrawall failure) : 1차벽(P층)이나 2차벽(S1,S2,S3)에서 분리가 일어나는 파단형을 말한다.
* 壁切斷破壞 (壁橫斷破壞 ; transwall failure) : 세포벽이 관통되어 일어난 파괴를 말하는 것으로 종절단, 횡절단의 파괴형으로 보다 완벽한 파괴가 일어난 경우를 말한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 육안 및 실체현미경에 의한 파면해석

육안 및 실체현미경을 사용한 거시적 관찰을 통해 상태시료와 내수시료 사이의 특징을 조사한 결과는 Table 1과 Table 2에 나타냈다. Table의 숫자는 10개의 시료를 파괴부위가 목부인 것, 목부와 접착층 혼합인 것, 접착층인 것으로 구별한 것이

다. 상태시료는 대부분 접착층의 파괴율이 0-30% 사이로서 접착층 파괴보다는 주로 목부에서 파괴가 발생하였는데 우레탄수지가 목부파괴율이 더욱 높았다. 내수시료는 요소수지 적층재의 경우 대부분 접착층파괴를 보였으며 우레탄수지 적층재에서도 접착층 파괴를 많이 보였지만 목부파괴가 요소수지 적층재에 비해 많이 발생하였다.

3.2. 주사 전자현미경에 의한 파면해석

3.2.1 상태시료의 파면해석

동일수종간 및 이수종간의 상태시료의 파괴면을 관찰한 결과는 Table 3과 같다. *(L * L)*과 *(P * P)*와 같이 침엽수재간 동일수종에서는 가도관의 벽내파괴가 많이 발생하였고, 벽내파괴가 발생한 가도관은 보풀이 일어나는 파괴가 두드러졌다

Table 1. Fracture of laminated wood in dry. (Unit: Number)

Fractured zone / Species	Urea			Urethan		
	Wood[1]	Wood/ Glue layer[2]	Glue layer[3]	Wood[1]	Wood/ Glue layer[2]	Glue layer[3]
*L * L*	8	2		8		2
*L * P*	5	3	2	9		1
*L * M*	2	3	5	8	2	
*L * U*	9		1	9	1	
*P * P*	6	2	2	9	1	
*P * M*	8	2		9		1
*P * U*	7	2	1	10		
*M * M*		2	8	9	1	
*M * U*	5	3	2	9	1	
*U * U*	5	4	1	9	1	

Notes : *L=Larix leptolepis G.* *P=Pinus koraiensis* S. et Z.
U=Ulmus davidiana var. japonica N. *M=Maackia amurensis* R. et M.
1) wood failure: 90% or more, 2) wood failure: 10% to 89%,
3) wood failure: 9% or less

Table 2. Fracture of laminated wood in wet. (Unit: Number)

Fractured zone / Species	Urea			Urethan		
	Wood[1]	Wood/ Glue layer[2]	Glue layer[3]	Wood[1]	Wood/ Glue layer[2]	Glue layer[3]
L * L			10	1	2	7
*L * P*	1		9	6	2	2
*L * M*			10	4	2	4
*L * U*			10	9	2	1
*P * P*			10		2	8
*P * M*	1	1	8	8	2	
*P * U*	1		9	6	3	1
*M * M*			10		3	7
*M * U*			10	4	4	2
*U * U*			10	8	1	1

(Figs. 1, 2). 이러한 벽내파괴의 발생은 요소수지 적층재에 비해 우레탄수지 적층재에서 그 빈도가 높았다.

Table 3. Characteristics of fracture surfaces of laminated woods in dry.

Laminated system	Characteristics of fracture surfaces
L * *L*	Mostly intrawall failure of tracheids. Flags in secondary wall.
P * *P*	Intrawall failure of tracheids. Many flags in secondary wall.
M * *M*	Transwall failure of vessels and flags of wood fibers. Coarse surfaces caused by vessel failure.
U * *U*	Transwall failure of vessels and flags of wood fibers.
L * *P*	Intrawall failure heavily and transwall failure slightly in both specimens. Many flags in *Pinus koraiensis*.
L * *M*	Intrawall failure mostly in tracheid. Transwall failure of vessels. Fractured mainly in *Larix leptolepis*.
L * *U*	Intrawall failure mostly in tracheids. Transwall failure of vessels.
P * *M*	Intrawall failure mostly in Pinus koraiensis. Transwall failures of vessels
P * *U*	Intrawall failure mostly in Pinus koraiensis. Transwall failures of vessels
M * *U*	Slightly flags of wood fibers and intrawall failure of vessels in *Ulmus davidiana var. japonica*.

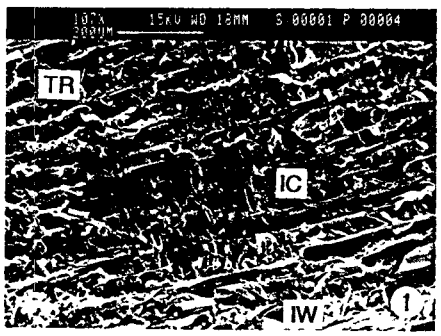

Fig. 1 *L. l.* * *L. l.* Intrawall(IW), intercell(IC) and transwall(TR) failures of tracheids(urea resin).

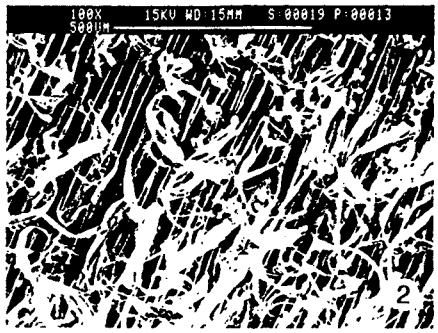

Fig. 2 *P. k.* * *P. k.* Typical flags of secondary wall (urethan resin).

*(M * M)*과 *(U * U)*와 같이 활엽수재의 동일수종 간에는 도관부의 심한 벽내파괴를 관찰할 수 있고, 파괴면이 매우 거칠어 보이며 목섬유의 경우 보풀이 일어나는 형태로 파괴가 발생되었다(Figs. 3, 4)

Fig. 3 *M. a.* * *M. a.* Typical failure of vessels (urethan resin).

Fig. 4 *U. d.* * *U. d.* Typical flags of wood fiber (urethan resin).

*(L * P), (L * M), (L * U), (P * M), (P * U), (M * U)*과 같이 이수종간 적층재의 파괴면은 잣나무와 낙엽송 모두 벽내파괴가 주를 이루나 벽절단파괴도 일부 나타났다. 잣나무는 낙엽송에 비해 보풀이 많이 관찰되며 우레탄수지로 적층한 시료는 접착층 파괴가 거의 없었다. 다릅나무와 느릅나무의 목섬유에서는 보풀이 발생하였고, 침·활엽수 이수종간에는 침엽수에서 파괴가 일어났으며(Fig. 5) 도관의 파괴부가 많이 존재하였다(Fig. 6).

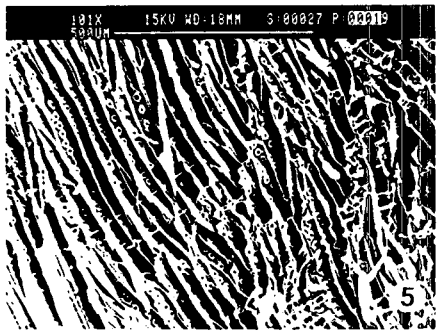

Fig. 5 *P. k. * U. d.* Transwall failure in *Pinus* (urethan resin).

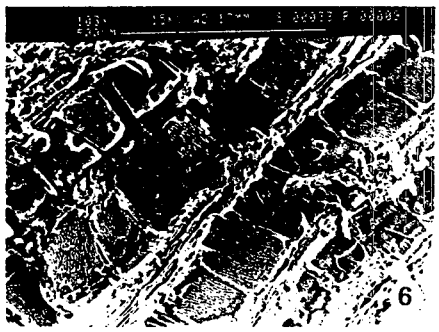

Fig. 6 *M. a. * U. d.* Typical transwall failure of vessels in *Ulmus* (urea resin).

3.2.2. 내수시료의 파면해석

동일수종간 및 이수종간의 내수시료의 파괴면을 관찰한 결과는 Table 4와 같다.

*(L * L)*과 *(P * P)*에서 요소수지 적층재의 경우 접착층파괴가 주를 이루며 목부의 파괴는 거의 관찰되지 않았다. 반면 우레탄수지 적층재에서는 접착층파괴와 더불어 일부 목부의 파괴도 발생하였다. 특히 낙엽송간의 파괴표면에서는 가도관에 보플이 발생하였고 파괴된 가도관은 접착제가 충진되어 있는 것이 관찰되었고 벽절단파괴도 나타났다(Figs. 7, 8).

Table 4. Characteristics of fracture surfaces of laminated woods in wet.

Laminated system	Characteristics of fracture surfaces
*L * L*	Mostly glue layer failure in laminated wood prepared with urea resin. Intrawall failure and flags in laminated wood prepared with urethan resin.
*P * P*	Mostly glue layer failure in urea resin. Intrawall and interwall failures in urethan resin
*M * M*	Glue layer failure in both adhesives. Slightly flags in vessels.
*U * U*	Glue layer failure in both adhesives. Slightly flags in laminated wood prepared with urethan resin.
*L * P*	Intrawall failure mostly and transwall failure slightly. Fractured mainly in *Pinus koraiensis* wood.
*L * M*	Mostly glue layer failure in both adhesives. Fractured mainly in *Larix leptolepis* wood.
*L * U*	Mostly glue layer failure. Many flags of wood fibers.
*P * M*	Mainly glue layer failure. Slightly intrawall failure in *Pinus koraiensis*.
*P * U*	Slightly flags and transwall failure in *Pinus koraiensis*.
*M * U*	Mainly glue layer failure. Slightly flags of wood fibers in *Ulmus davidiana var. japonica*.

Fig. 7 *L. l. * L. l.* Typical glue layer surface (urea resin).

Fig. 8 *P. k.* * *P. k.* Intercell and intrawall failures of tracheids (urethan resin).

*(M * M)*과 *(U * U)*와 같이 활엽수재의 동일수종간에는 요소수지 적층재의 경우 접착층의 파괴만이 발생하며, 우레탄수지 적층재에서는 접착층 파괴가 거의 발생하지 않고 목부에서 파괴가 발생하였다. 우레탄수지 적층재는 요소수지 적층재에 비해 보풀이 조금 더 많이 발생하였다(Figs. 9, 10).

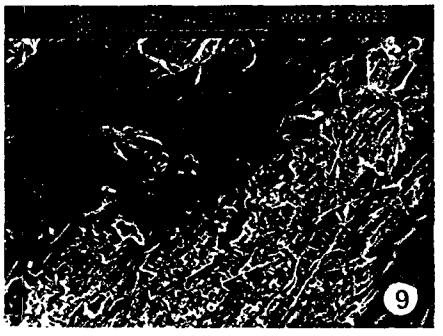

Fig. 9 *M. a.* * *M. a.* Typical glue layer surface (urea resin).

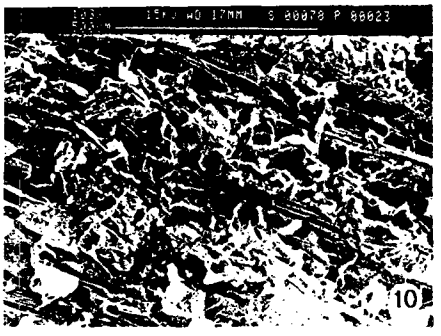

Fig. 10 *U. d.* * *U. d.* Typical fracture surface (urethane resin)

*(L * P)*, *(L * M)*, *(L * U)*, *(P * M)*, *(P * U)*, *(M * U)*과 같은 이수종간의 요소수지 적층재의 경우 접착층 파괴와 목부파괴가 같은 비율로 발생하였다(Fig. 11). *(L * P)* 적층재의 목부파괴는 대부분 잣나무에서 발생하였으며 우레탄수지 적층시료는 잣나무와 낙엽송 모두 비슷한 비율로 파괴가 일어났고, 조재부에서는 목부의 파괴를 보이나 만재부에서는 접착층의 파괴를 보였다. 세포의 파괴형태는 벽내파괴가 주를 이루며 벽절단파괴도 일부 나타났다.

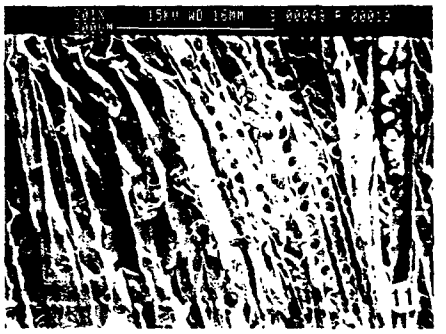

Fig. 11 *L. l.* * *P. k.* Intercell and intrawall failures in *Pinus* (urethan resin).

*(L * M)*, *(L * U)* 적층재는 모두 접착층 파괴가 주를 이루며 목부의 파괴는 거의 보이지 않았다(Fig. 12). 우레탄수지 적층재의 경우 일부분 파괴가 진행된 낙엽송은 가도관의 벽간파괴가 나타나며 다릅나무의 도관은 파괴가 발생하지 않았고 느릅나무 목섬유에 보플이 발생하였다.

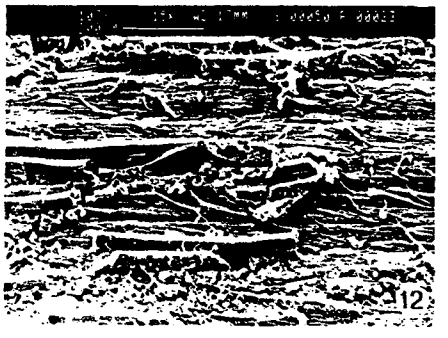

Fig. 12 *L. l.* * *M. a.* Glue layer in Maackia (urea resin).

*(P * M), (P * U), (M * U)* 적층재는 접착층파괴가 주를 이루며 잣나무의 파괴는 조재부를 따라 일렬로 길게 파괴가 발생하였다. 우레탄수지 적층재에서도 역시 접착층이 주로 파괴가 되었으며 목부의 파괴는 잣나무의 경우 가도관의 파괴가 많이 발생하는 벽내파괴, 벽절단파괴의 경향을 나타냈다. 다릅나무보다 느릅나무의 파괴가 더욱 컸다 (Figs. 13, 14).

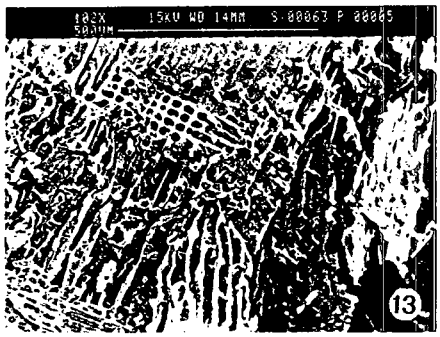

Fig. 13 *P. k.* * *M. a.* Transwall and intrawall failures in Pinus (urethan resin).

Fig. 14 *P. k.* * *U. d.* Typical flags of secondary wall and transwall failure in Pinus (urethan resin).

이상에서 살펴본 바와 같이 본 실험의 상태조건과 내수조건사이에 있어서 파괴면 형태에 큰 차이를 나타냈다. 즉 상태조건에서는 주로 목부에서 파괴가 발생하였으나 내수조건에서는 주로 접착층에서 파괴가 발생하였다. 또한, 조재부 가도관이 쉽게 파괴되었고 조재부 가도관의 파괴로 인해 만재부 가도관의 파괴가 시작되고 더욱 진행되었다. 만재부 가도관 및 목섬유는 벽내파괴가 많이 발생하였으나 조재부 가도관 및 도관은 세포벽 절단파괴가 빈번히 발생하였다.

본 실험과 같이 여러수종으로 제작한 적층재의 파괴면 관찰은 더욱 흥미롭다. 동일수종간의 경우는 접착층이 양호한 경우 양쪽의 lamina에서 비교적 균일하게 파괴가 이루어지지만 이수종간의 경우는 밀도가 낮은 재 즉, 잣나무와 낙엽송에서 파괴가 많이 발생하였다. 단 다릅나무와 느릅나무는 환공재로서 시료의 제작 및 하중방향에 따라 공권부에서 파괴가 발생하는 경우가 있었다.

목재의 파괴면 구조는 온도, 밀도, 수분, 세포치수에 의해 영향을 받는다고 하였으며 (Korán,1967; Woodward, 1980; Wikes, 1987), Côté 등(1983)은 후벽의 세포벽은 벽내파괴가 발생하기 쉽고 박벽의 세포벽은 절단파괴가 발생하기 쉽다고 보고하였다. 최근, Donaldson(1995)은 유전적 특성이 다른 세가지 종류의 라디아타소나무를 선발하여 접선면의 파괴형태로부터 파괴특성을 분석하였는데, S1층 부근에서 파괴가 주로 발생하지만 수종별로 파괴되는 벽층이 다소 다른 것을 확인하였고 이것은 리그닌의 양이 S1층에 작은 때문으로 생각하였다.

이와 같이 목재의 파괴는 세포벽의 구조나 세포의 구성 등 해부학적 특징과 세포벽을 구성하는 화학성분의 분포에 주로 기인되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

낙엽송, 잣나무, 느릅나무, 다릅나무의 4수종으로부터 동 · 이수종간 적층재를 제조하여 블럭 전단강도 시험을 거친 시료의 파괴면에 나타나는 특징은 다음과 같다.

상태조건하에서의 파괴형태

1) 대부분의 시료에서 접착층의 파괴보다 목부의 파괴율이 높게 나타났고, 특히 이수종간 적층재가 동수종간 적층재보다 높게 나타났다.
2) 침엽수재 적층시료는 벽내파괴의 발생율이 높았고 벽절단파괴도 나타났다. 이때 조재부가도관이 먼저 파괴되고 만재부 가도관의 파괴를 유도하였다. 활엽수재 적층시료는 벽내파괴와

벽간파괴의 경향이 주로 나타났다.

3) 요소수지 적층재 보다 우레탄수지 적층재가 목파율이 높게 나타났으며 내수조건 하에서는 그 차이가 더욱 명확하였다.

내수조건하에서의 파괴형태

1) 상태조건보다 접착층에서 파괴되는 빈도가 높았다.
2) 세포파괴의 대부분이 보풀이 일어나는 정도의 미미한 파괴가 주로 발생하였고, 동수종간 접착층 파괴율은 이수종간 접착층 파괴율보다 높게 나타났다.
3) 접착층 파괴율은 요소수지 적층재가 우레탄수지 적층재보다 높게 나타났다.

이상의 결과로부터 적층재의 파괴경향은 접착제의 성능과 더불어, 목재의 함유수분, 수종, 목재의 해부학적 성질에 크게 좌우되는 것으로 생각되었다.

* 사사 : 본 연구를 수행하는데 있어 실험과 자료정리에 애써준 목재물리학 연구실의 권구중, 황원중, 이충준, 김용섭, 신윤호 군에게 감사의 마음을 표한다.

5. 참고문헌

1. Aiuchi, T. and S. Ishida. 1978. An observation of the failure process of softwood under compression perpendicular to the grain in the scanning electron microscope. Mokuzai Gakkaishi 24(7): 507~510.
2. Akande J. A. and G. H. Kyanka. 1990. Evaluation of tensile fracture in aspen using fractographic and theoretical methods. Wood and Fiber Science 22(3): 283~297.
3. Atack D., W. D. May, E. L. Morris and R.N. Sproule. 1961. The energy of tensile and cleavage fracture of black spruce. Tappi 44(8): 555~567.
4. Côté, W. A. and R. B Hanna. 1983. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. Wood and Fiber Science 15(2) 135~163.
5. DeBaise, G. R., A. W. Porter and R. E. Pentoney. 1966. Morphology and mechanics of wood fracture. Materials Research & Standards 6(10):493~499.
6. DeBaise G. R.. 1972. Morphology of wood shear fracture. Journal of Materials, JMLSA 7(4): 568-572.
7. 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 : 51-63.
8. Furuno, T., H. Saiki, T. Goto and H. Harada. 1983. Penetration of glue into the tracheid lumina of softwood and the morphology of fractures by tensile-shear tests. Mokuzai Gakkaishi 29(1): 43~53.
9. Hearle,J.W.S., B. Lomas, W. D. Cooke and I.J. Duerden. 1989. Fibre failure and wear of materials. Ellis Horwood Limited. pp. 1~454.
10. Imayama N.. 1994. Relation on microscopic compression creases and crack of wood under static cyclic bending load. Holz als Roh-und Werkstoff 52:49~56.
11. Kim N. H., T. Okano and M. Ohta. 1988. Fractography of drying checks. Bulletin of the Tokyo University Forests 78: 83~95.
12. Korán, Z. 1967. Electron microscopy of radial tracheid surface of black spruce separated by tensile failure at various temperatures. Tappi 50(2):60~67.
13. Korán, Z. 1968. Electron microscopy of tangential tracheid surfaces of black spruce produced by tensile failure at various temperatures. Svenk Papperstidning arg 71: 567~576.
14. Kucêra, L. J., and M. Bariska. 1982. On the

fracture morphology in wood. Part 1. A SEM study of deformations in wood of spruce and aspen upon ultimate axial compression load. Wood Science and Technology 16: 241～259.

15. Saiki, H.. 1984. The effect of the penetration of adhesives into cell walls on the failure of wood bonding. Mokuzai Gakkaishi 30(1): 88～92
16. 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. Holz als Roh-und Werkstoff 51: 384.
17. Wilkes, J. 1987. Effect of moisture content on the morphology of longitudinal fracture in Eucalyptus maculata. IAWA Bulletin n. s. 8(2): 175～181.
18. Woodword, C. 1980. Fractured surfaces as indicators of cell wall behavior at elevated temperatures. Wood Science 13(2):83～86.
19. Zink, A. G., Pellicane, P. J. and Shuler, C. E. 1993. Ultrastructural analysis of softwood fracture surfaces. Wood Science and Technology 28 : 329～338.
20. 古川郁夫. 1980. 木材の縦引張破斷面のフラクトグラフィ-的研究. 鳥大農演林報 12: 1～118.
21. 大澤純二, 米田 豊. 1978. 纖維化モデルとしての木材のせん斷擧動(第2報) せん斷開裂面. 木材學會誌 24(11): 790～796.
22. 藤田晋輔. 1974. 木材の乾燥割れの發生機構に關する研究. 京都大學學位論文.
23. 北原龍士, 堤 壽一, 宋本. 1981. 靜的くり返し曲げ荷重を受けた木材の 力學的な擧動と細胞壁の觀察. 木材學會誌 27(1): 1～7.
24. 北川英夫, 小寺澤良一. 1977. フラクトグラフィ. 培風館. pp.1～220.
25. 今村祐嗣, 和田 博, 則元 京, 林 昭三. 1982. マイクロ波加熱を利用した曲げ木の組織構造. 木材學會誌 28(12): 743～749.
26. 堤壽一, 姜春遠,, 小田一幸. 1995. 曲げ强度性能と細胞壁變化へのたわみ速さの影響. 九大農學藝誌 49: 139～142.