

스트랜드/파티클 복합체의 기계적 성질에 관한 연구(II)*1

- 탄성률 측정 및 초음파법에 의한 이방성의 예측 -

김 유 정*2

A Study on Mechanical Properties of Strand/Particle Composites (II)*1

- Measuring of Young's Moduli and Estimating of Anisotropy Using an Ultrasonic Method -

Yu-Jung Kim*2

요 약

본 연구에서는 배향도가 높은 스트랜드와 무배향성의 파티클을 혼합해서 다양한 층구조의 복합체를 제조하여 각종 탄성률을 측정하여 비교하였으며, 초음파법을 적용하여 이방성 적층재료의 층구조에 기인하는 이방성의 정도를 예측하기 위하여 초음파 전파속도와 복합체 면내의 이방성의 관계에 대하여 검토했다.

그 결과 각층구조 복합체의 정적 휨 탄성률 E_S 는 동적 탄성률 E_D 와 거의 일치하였으며 E_D 는 높게 산출되는 경향을 나타내었다.

초음파법을 이용한 복합체의 최외층 스트랜드의 섬유방향(∥)과 직각방향(⊥)의 전파속도의 차는 3층 구조, 7층 구조, PB 순으로 크게 나타나 층구조에 의한 이방성의 정도를 나타내고 있었다. 또한 복합체 면내의 양방향간의 전파속도의 차는 스트랜드 표층구조가 파티클 표층구조보다 큰 값을 나타내었으며, 스트랜드의 혼합률이 높을수록 각 방향의 전파속도는 빨라지는 경향이였다. 이와는 반대로, 복합체의 두께방향의 전파속도는 파티클 표층구조와 스트랜드의 혼합률이 작을수록 빨라지는 경향을 나타내었다.

*1 접수 2000년 3월 2일, 채택 2000년 12월 6일

*2 경북대학교 농업과학기술연구소 Institute of Agriculture Science and Technology, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

ABSTRACT

Composites with various layer constructions involving the ratio of S/P were produced from wood strands(S) and particles(P) (*Cryptomeria japonica* D.Don) to measure various Young's moduli and anisotropy by ultrasonics.

As a result, static Young's moduli of composites were almost same as dynamic Young's moduli obtained from natural frequency. However, these were smaller than those evaluated from ultrasonic wave propagation velocity.

The differences between propagation velocity of the parallel(∥) and perpendicular(⊥) in-plane direction resulted in a tendency of anisotropy. The tendency of anisotropy was larger in three-layer constructions than in seven-layer constructions. The differences of strand surface layers showed larger values than those of particle surface layers. Also, composites with higher weight ratio of strand had a tendency to propagate rapidly in each direction. In contrast to these results, the propagation velocity in the thickness direction had a tendency to propagate rapidly in composites with particle surface layers and the lower weight ratio of strand.

Keywords : strand/particle composites, Young's moduli, ultrasonics, anisotropy, layer constructions

1. 서론

개체간의 재질변동이 크며, 물성발현기구도 불명확한 목재를 합리적으로 이용하기 위해서는 목재 및 목질재료의 물성을 정확히 파악하여 유효하게 활용할 필요가 있다. 따라서 목재가 다른 공업재료와 같이 성능의 설계, 관리, 평가가 행해질 수 있는 재료로 취급될 수 있도록 목재에 상해를 입히지 않고 비파괴적인 방법으로 재질측정을 하는 기술이 요구되어지고 있다.

비파괴적 검사법은 금속, 콘크리트재료의 분야에서 널리 보급되어 있으며, 목재에 비파괴적 검사법을 적용하려고 하는 시도는 부후진단이나 등급구분을 목적으로 해서 비교적 많은 연구가 진행되고 있다. 예를 들면, Laminated Veneer Lumber(LVL)의 세계적인 제조회사인 미국의 Trus Joist Macmillan社에서는 Metriguard社의 초음파 전파장치를 이용한 시스템(Model 2600 Veneer Tester)으로 단판을 등급구분하여 신뢰성이 높은 LVL을 제조하고 있다(Kunesh, 1978). 이 보고에 의하면 초음파를 이용한 등급구분장

치가 1초에 1장의 비율로 단판을 등급구분하여 engineering LVL을 생산하는 데에 도움이 되고 있다고 한다. 합판에 있어서도 비접촉형의 초음파 시험장치를 이용하여 불량품(不良品)과 양품(良品)의 구별이 가능한 것을 확인하고 있다(島田理化學工業(株)). 주택업계에서는 타격음(打撃音)에 의해 발생하는 고유주파수를 이용하여 들보재의 등급구분을 하고 있다(古澤·平野, 1992). 이외에도 목재를 전파하는 응력파에 대해서는, 정적인 탄성률과 응력파의 속도로부터 산출된 탄성률과의 관계, 응력파의 속도에 미치는 섬유경사, 웅이, 외력, 부후, 온도, 함수율의 영향에 관한 많은 연구결과가 얻어졌다.

한편, 보드류에 대해서는 보드 전체의 평균적인 물성이나 부분적인 물성의 간편한 측정법으로서 비파괴적인 방법을 이용한 연구의 예(Dong *et al.*, 1992, 1994a, 1994b)는 있지만, 보드류의 적층구조에 유래하는 이방성의 평가법은 확립되어 있지 않다. 보드류의 경우는 구성 엘리먼트의 층구조, 즉 적층수, 배치, 혼합률 등을 변화시킴으로써 보드 면내(面内)의 이방

성이 변화하기 때문에 부분적인 엘리먼트의 물성으로부터 제조된 보드의 물성을 예측하는 것이 어려운 경향이 있다. 그러므로 요구성능을 충족시키기 위한 제조조건은 지금까지 경험적으로 정해지고 있다.

본 연구에서는 다양한 층구조의 보드류(스트랜드와 파티클의 복합체)를 제조하여 양단 자유 휨 진동법과 초음파법에 의한 동적 탄성률을 측정하여 휨 시험의 결과 얻어진 정적 휨 탄성률과의 관계를 살펴보았다. 또한 복합체의 적층구조에 유래하는 이방성의 평가법을 확립하기 위한 간편한 방법으로서 탐촉자(探觸子)의 발진주파수에 의해 진동을 발생시키는 초음파법을 이용하여 부분적인 물성을 파악하기 용이하다고 판단되어지는 초음파 전파속도와 보드(복합체)의 이방성의

관계에 대해서 검토했다.

2. 재료 및 방법

2.1 보드의 제조

2.1.1 공시재료

본 실험에서 제조한 보드의 엘리먼트인 스트랜드(S)와 파티클(P)의 수종은 삼나무(*Cryptomeria japonica* D. Don)이며, 스트랜드는 두께 3~4mm, 길이 400mm의 가늘고 긴 봉상(棒狀)의 형태로 제조했다.

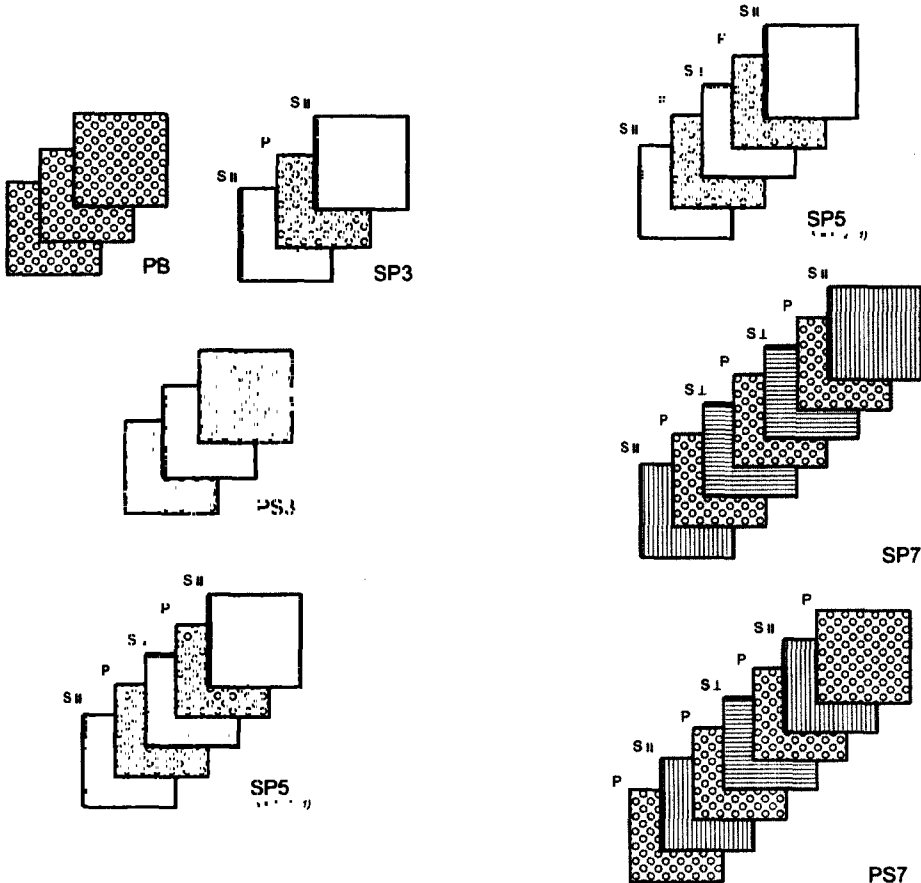


Fig. 1. Schematic diagram of the layer constructions.

동일 수종으로부터 파티클을 제조하여 10mesh (screen 구멍 2mm) on으로 선별한 것을 이용했다. 복합체 제조 전의 스트랜드와 파티클의 함유율은 각각 7%, 3% 이하로 조정했다.

2.1.2 제조조건

복합체의 층구조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 단층(單層), 3층, 5층, 7층의 4종류의 층으로 구성했다. 단층(單層)구조는 P만으로 구성된 파티클보드(PB)이며, 3층, 5층, 7층 구조는 S층과 P층을 교대로 배치했다.

즉, 3층 구조는 표층이 S이고 심층이 P인 SP3, 표층이 P이고 심층이 S인 PS3의 2종류를 제조했으며 S와 P의 중량비는 1:1로 했다(50SP3, 50PS3). 5층 구조는 표층이 S이고 S의 1, 5층과 3층의 배향방향을 직교시킨 것으로 S와 P의 중량비는 1:1로 했지만, 그중에서 1, 3, 5층의 S의 중량비를 1:1:1, 1:2:1의 2종류로 제조했다(50SP5 S=1:1:1, 50SP5 S=1:2:1). 7층

구조는 1, 3, 5, 7층이 S이고 1층과 7층, 3층과 5층의 배향방향이 각각 평행하며 1, 7층과 3, 5층의 배향방향을 직교시킨 SP7, 1, 3, 5, 7층이 P이고 S의 2층과 6층의 배향방향이 평행하며 4층의 배향방향을 직교시킨 PS7의 2종류를 제조했다. 이때에 S와 P의 중량비는 3:7, 1:1, 7:3의 3종류로 했다(30SP7, 50SP7, 70SP7, 30PS7, 50PS7, 70PS7).

접착제는 페놀수지를 사용하여 스트랜드와 파티클의 전건중량에 대해 10%의 비율로 스프레이 도포했다. 열압조건은 열판온도 180℃, 최대압력 55kg/cm²로 열압시간 총 15분으로 했다. 복합체의 설계비중은 0.7이며, 복합체의 크기는 길이 400mm × 폭 400mm, 두께 12mm로 제조했다.

2.2 비파괴 시험과 휨 시험

제조한 보드는 20℃, RH 65%의 항온항습실에서 조습시킨 후, 복합체의 중앙부에서 길이 90mm × 폭 90mm의 시험체로 절단하여 초음파진단기(PUNDIT: 공진주파수 54KHz)로 Fig. 2에 표시된 바와 같이 시험체의 최외층 스트랜드의 섬유방향(∥)과 직각방향(⊥)에서 각각 2개소(個所), 두께방향(T)으로 4개소에 초음파 전파시간을 측정했다. 또한, 동일 복합체 내에서 휨 시험체(길이 230mm, 폭 50mm, 두께 12mm)를 재단하여 휨 시험을 하기 전에 양단 자유 휨 진동법에 의한 고유진동수로 동적 탄성률을 구했다. 동일 시험체에 대해 JIS A 5908(1994)에 준하여 휨 시험을

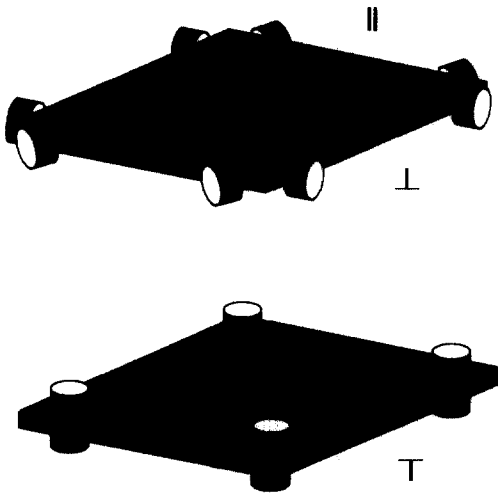


Fig. 2. Schematic diagram of measuring points.

Legend : ∥ : parallel to the stand layers on the surface,
 ⊥ : perpendicular to the stand layers on the surface,
 T : thickness direction of board.

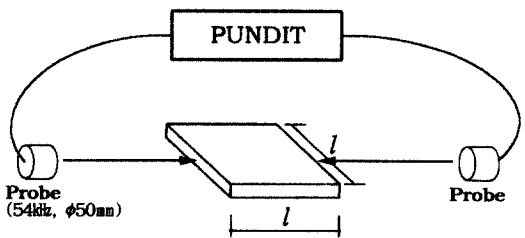


Fig. 3. Schematic diagram of measuring ΔT .
 Legend : ΔT : ultrasonic wave propagation time,
 l : length of ultrasonic wave propagation path,
 —, — : measuring point pressed by probes.

하여 정적 휨 탄성률을 구했다.

2.2.1 초음파 전파시간의 측정법

본 연구에서 이용한 측정법은 2탐촉자법(探觸子法 또는 Pulse법)으로 불리워지는 것으로 2개의 탐촉자(probe)를 각각 송진기와 수신기로 이용하고 있다. 즉 2개의 탐촉자를 평행하게 대향시켜 시험체에 압착하여 탐촉자간(전파거리 ℓ)을 초음파 pulse가 통과하는 데에 요하는 시간(전파시간 ΔT)을 측정하는 것이다. Fig. 3에 측정의 개략을 표시했다.

2.2.2 초음파 전파시간에 의한 동적 탄성률 (E_U)의 산출법

초음파 pulse가 2탐촉자간(探觸子間)을 전파했을 때의 전파속도(V_U)는,

$$V_U = \frac{\ell}{\Delta T}$$

로 나타낼 수 있다. 또한, 탄성률(E_U) 및 밀도(ρ)를 이용해서,

$$V_U = \sqrt{\frac{E_U g}{\rho}}, \quad g \text{는 중력가속도}(980\text{cm/s}^2)$$

로 표시되므로, 초음파 전파시간을 이용한 동적 탄성률(E_U)은,

$$E_U = V_U^2 \times \frac{\rho}{g}$$

$$E_U = \left(\frac{\ell}{\Delta T}\right)^2 \times \frac{\rho}{g}$$

이다. 따라서 ℓ , ΔT 및 ρ 를 측정하면 시험체의 동적 탄성률(E_U)이 산출된다.

2.2.3 양단 자유 휨 진동법

본 연구의 휨 진동 시험은 230mm×50mm, 12mm (두께) 크기의 휨 시험체를 이용하여 정적 휨 시험을

하기 전에 양단 자유 휨 진동법에 의해 고유진동수를 구했다. 즉, 휨 진동의 마디점에 실을 걸어 시험체를 수평으로 매단 후 한쪽 끝을 해머(hammer)로 타격(打擊)해 진동을 가하고, 다른 한쪽 끝의 진폭을 microphone으로 검지(檢知)해, FFT analyzer을 이용하여 공진주파수(f_0)를 측정했다. 또한 공진주파수(f_0)에 의한 동적 탄성률(E_D)은 다음 식에 의해 산출했다.

$$E_D = \frac{48\pi^2 \rho \ell^4 f_0^2}{m^4 h^2}$$

여기서, ρ : 시험체의 밀도(g/cm^3),
 ℓ : 스패น(180mm), f_0 : 공진주파수(Hz),
 h : 시험체의 두께(12mm),
 m : 공진차수(기본진동 4.730)

3. 결과 및 고찰

3.1 탄성률(E_S 와 E_U , E_D)의 관계

각종의 탄성률을 측정된 값을 비교하기 위해 Fig. 4에 초음파 전파속도로 계산한 동적 탄성률(E_U)과 휨 시험의 결과 얻어진 정적 휨 탄성률(E_S) 및 양단 자유 휨 진동법에 의한 고유진동수로부터 구한 동적 탄성률(E_D)의 관계를 나타내었다. 그 결과, 각층구조의 E_U 와 E_S 의 값은 일치하지 않고 E_U 가 높게 산출되고 있으며, E_D 와 E_S 는 거의 일치하고 있다. 이와 같이 E_U 값이 가장 크게 산출되는 것은 초음파가 고체 중의 제일 빨리 도달할 수 있는 경로를 선택하여 통과하기 때문이다. 즉 종파의 속도로 구하는 E_U 의 경우, 작은 공극과 고체부분 등으로 구성된 균일하지 못한 밀도분포를 하고 있는 시험편 내에서 초음파는 부분적으로 밀도가 높은 곳이 있으면 그 곳을 경유해서 전달되므로 이 방법에 의한 동적 탄성률(E_U)은 정적 시험에서 얻어지는 평균적인 탄성률인 E_S 보다 큰 값으로 산출되기 때문이다 (Haines *et al.*, 1996).

이에 비해 고유진동수로 구하는 E_D 의 경우는 시험체가 전체적으로 진동하여 파의 주파수 성분 중에서 제일 많은 성분이 공진점이 되기 때문에 E_U 보다는 E_S 에 거의 가까운 값이 얻어진다. 이것은 Sobue와 Katoh

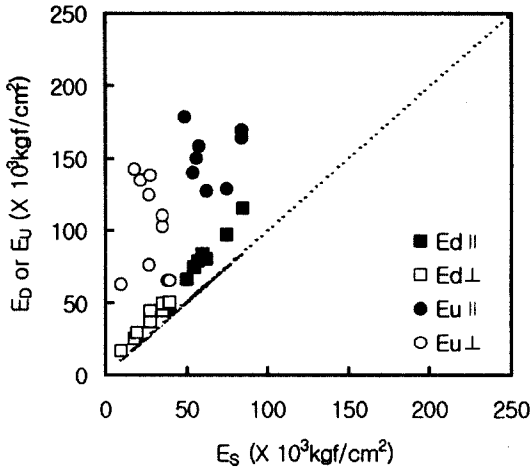


Fig. 4. Relationship among E_D , E_U and E_S .

(1992)가 판 진동법으로 측정한 합판의 동적 탄성률과 정적 시험에 의한 휨 탄성률 및 전단 탄성률이 매우 일치한 결과와 동일하며, Dong 등(1992)이 침적 처리한 각 종류의 보드(MDF 및 파티클보드)의 재질변동을 측정할 결과, 보드 종류나 접착제의 종류에 관계없이 휨 진동 시험에서 얻어진 동적 탄성률과 정적 휨 탄성률 간에는 단일의 높은 정(正)의 상관계수가 성립하는 결과를 얻은 것과도 일치한다.

3.2 복합체의 면내(面内) 이방성의 평가

Fig. 5는 각 복합체의 층구조에 따른 초음파 전파속도(V_U)를 나타내고 있다. 각 시험체의 최외층 스트랜드의 섬유방향(II)과 직각방향(I)의 초음파 전파속도의 차는 PB로부터 7층, 3층 구조로 갈수록 커지고 있어 층구조에 따른 이방성의 정도를 어느 정도 나타내고 있는 것 같다. 또한 같은 적층수의 보드 내에서는 S 표층 구조가 P표층 구조보다 전파속도의 차가 크며, 층구조와 관계없이 S표층 구조의 스트랜드의 섬유방향(II)의 절대치가 거의 같은 정도의 값을 나타내고 있어 전파속도에 스트랜드의 위치와 양 등이 복잡하게 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다. 이와 관련하여 스트랜드의 혼합률에 따른 전파속도의 변화를 검토하

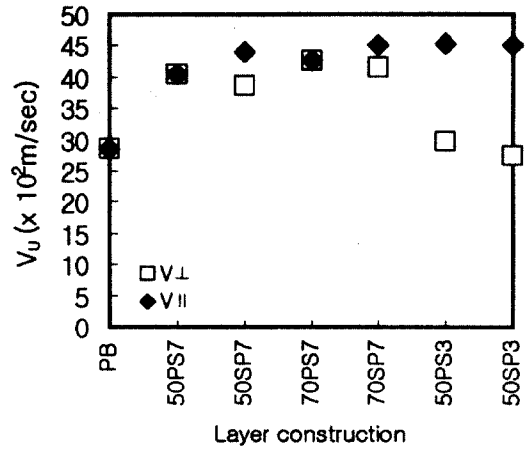


Fig. 5. Comparisons of V_U parallel and perpendicular to layer constructions.

기 위하여 Fig. 6에 7층 구조에 대하여 S표층 구조와 P표층 구조로 나누어 정리한 결과를 나타내었다. 전체적으로 S의 혼합률이 클수록 각 방향의 전파속도의 절대치가 커지고 있으며, 더욱이 S표층 구조가 양방향간의 차가 큰 경향을 나타내고 있다.

한편, Fig. 5에서 각 복합체의 직각방향(I)의 전파속도를 비교해 볼 때에 무배향성의 PB와 S의 직교층이 포함되어 있지 않는 3층 구조가 같은 정도의 값을 나타내고 있어 초음파가 P층을 통해서 전파하는 것을 알 수가 있다. 이에 대해서 S의 직교층이 포함되어 있는 7층 구조에서는 직각방향(I)의 전파속도가 3층 구조보다 빠른 것으로 보아 초음파가 전파방향으로 배향된 S층을 통해서 전파하고 있음을 알 수가 있다.

다음은 E_U 와 E_S 의 면내 이방성의 관계를 알아보기 위하여 Fig. 7에 각 시험체의 섬유방향(II)과 직각방향(I)의 E_U 의 차와 양방향의 E_S 의 차의 관계를 나타내었다. 45도 직선의 아래에 있는 시험체는 3층 구조로, 표층 엘리먼트와 관계없이 양방향에 의한 E_U 의 차가 크다. 이것은 스트랜드를 한 방향으로 배향시킨 3층 구조의 경우, 스트랜드의 섬유방향(II)의 빠른 전파속도와 스트랜드의 직교층이 없는 직각방향(I)의 느린 전파속도에 의한 양방향간의 전파속도의 차가 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉 전술한 바와 같이 직교층

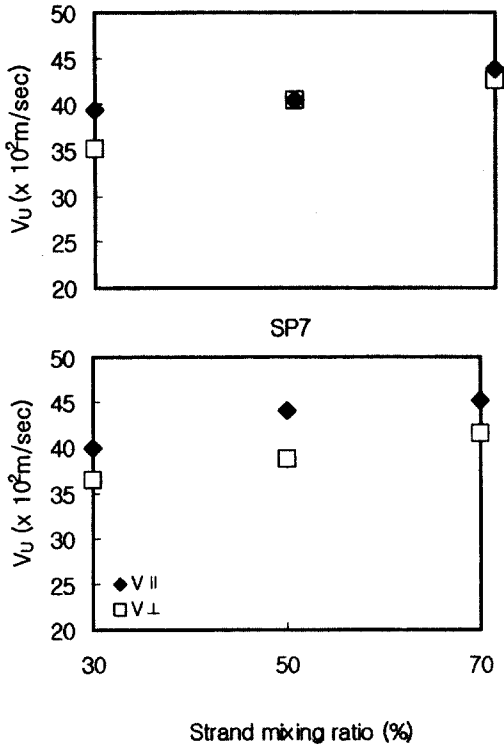


Fig. 6. Variation of V_u on strand mixing ratios.

이 포함된 구조는 초음파가 직교층에 배향된 스트랜드 층을 통하여 전파하기 때문에 그 차가 적은 것으로 추정된다. 또 S표층 구조가 P표층 구조보다 E_s 와 E_u 의 양방향의 차가 큰 값을 나타내고 있어 E_u 와 E_s 가 동일한 경향을 나타내고 있다.

3.3 복합체의 두께방향의 V_u 및 E_u

각 시험체의 전파속도(V_u)와 동적 탄성률(E_u)에 대해 섬유방향(∥)과 직각방향(⊥)의 차에 의한 이방성과 시험체의 두께방향(T)과의 관계를 검토하기 위하여 Fig. 8에 7층 구조 복합체에 있어서 S의 혼합률에 따른 두께방향의 전파속도와 E_u 의 변화를 나타내었다. 두께방향은 섬유방향(∥)과 직각방향(⊥)간의 차와는 달리 스트랜드의 양이 많아질수록 전파속도가 늦어진다. 또 P표층 구조가 S표층 구조보다 전파속도가 빠른

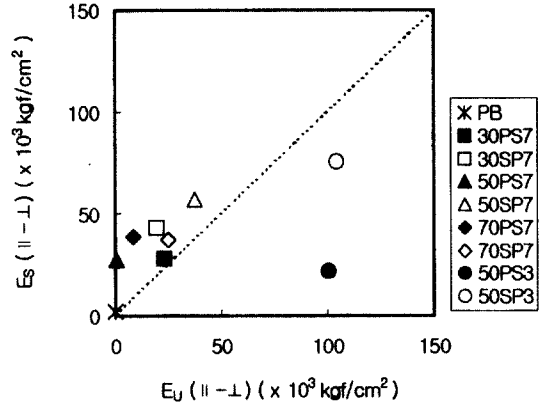


Fig. 7. Relationship between difference of parallel and perpendicular to E_u and E_s .

결과를 나타내고 있다. 뿐만 아니라, Fig. 9에 나타낸 바와 같이 S표층 구조 내에서도 표층 스트랜드의 양이 적을수록 V_u 와 E_u 가 커지는 경향을 나타내고 있다.

이것은 Fig. 10에 나타낸 E_u 의 섬유방향(∥)과 직각방향(⊥)의 차와 T방향의 관계에서 명백하다. S의 혼합률 30%인 스트랜드의 양이 적은 구조와 P표층 구조에서 T방향의 E_u 가 큰 결과를 나타내고 있어 보드의 면내 이방성과 T방향간에 역(逆)의 관계가 있는 것을 알 수가 있다.

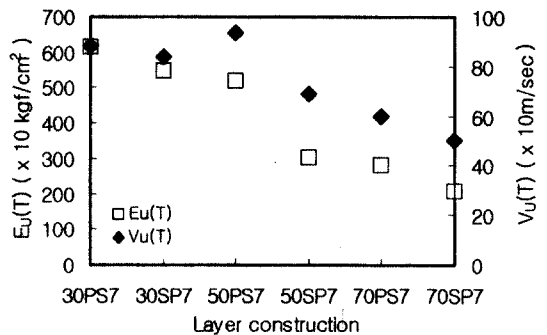


Fig. 8. Variation of V_u and E_u by strand mixing ratios in the thickness direction.

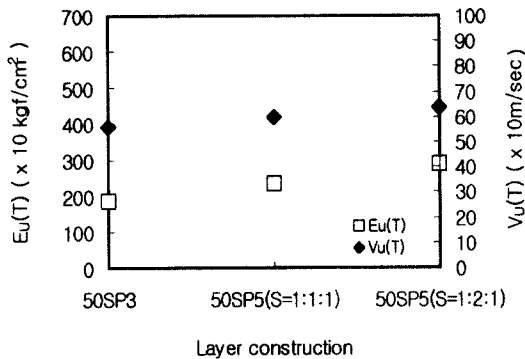


Fig. 9. Variation of V_u and E_u by weight of strand surface layer in the thickness direction.

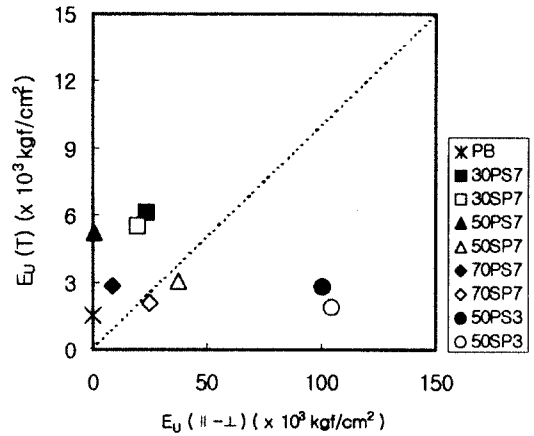


Fig. 10. Relationship between $E_u(T)$ and difference of parallel and perpendicular to E_u .

4. 결론

배향도가 큰 스트랜드(S)와 무배향성의 파티클(P)의 형상이 다른 엘리먼트를 이용하여 층구조를 바꾼 이방성 적층 복합체의 탄성률간의 관계는 정적 휨 탄성률 (E_s)은 고유진동수로부터 구한 동적 탄성률(E_d)과 거의 일치하는 경향을 나타내었으며 초음파 전파속도로 계산한 동적 탄성률(E_v)과는 일치하지 않았다.

또, 복합체 면내의 전파속도의 차는 S표층 구조가 P표층 구조보다 큰 값을 나타내었으며, S의 혼합률을 높일수록 복합체 면내의 전파속도가 빨라지는 경향을 나타내어 초음파 전파속도로 예측되는 복합체 면내의 이방성은 S층의 위치와 양의 영향을 복잡하게 받고 있는 것으로 판단되었다. 이와는 반대로 복합체의 두께 방향의 전파속도는 P표층 구조와 S의 혼합률이 낮을 수록 빨라지는 경향이였다. 급후, S층의 위치와 양의 영향을 명백히 밝히기 위해 층구조를 변화시킨 새로운 복합체를 제조하여, 초음파 전파속도의 변화를 검토해야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. Dong, Y., T. Nakao., C. Tanaka., A. Takahashi and Y.

Nishino, 1992, Evaluation of the characteristics of wood based panels by the in-and out of-planes variation technique, Mokuzai Gakkaishi, 38(7): 678-686.

2. Dong, Y., T. Nakao., C. Tanaka., A. Takahashi and Y. Nishino, 1994a, Effects of the shear, compression values of loading points, and bending speeds on young's moduli in the bending of wood based panels, Mokuzai Gakkaishi, 40(5): 481-490.

3. Dong, Y., T. Nakao., C. Tanaka., A. Takahashi and Y. Nishino, 1994b, Dynamic properties of laterally inhomogeneous wood based panels by flexural and longitudinal vibrations, Mokuzai Gakkaishi, 40(12): 1302-1309.

4. Haines, D. H., J. M. Leban and C. Herbe, 1996, Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods, Wood Science and Technology, 30: 253-263.

5. Jung, J. 1979, Stress-wave grading techniques on veneer sheet, USDA Forest Serv, Gen. Tech. Rept. FPL-27, Forest Prod. Lab., Madison, Wis.

6. Jung, J. 1982, Properties of parallel-laminated veneer from stress-wave-tested veneers, For. Prod. Journal, 32(7): 30-

- 35.
7. Kunesch, R. H. 1978. Using ultrasonic energy to grade veneer. Proc. of 4th Symp. Nondestructive Testing of Wood, Vancouver, Wash. August 28-30, Washington State Univ. Pullman, Wash. pp. 275-278.
8. Sobue, N. and A. Katoh, 1992. Simultaneous determination of orthotropic elastic constants of standard full-size plywoods by vibration method. Mokuzai Gakkaishi, 38(10): 895-902.
9. 古澤 信, 平野 茂. 1992. “簡易グレーディング法を用いた梁桁材の合理化ライン”. 日本加工技術協會 第10回 記念年次大會講演要旨集, 東京. pp. 49-50.
10. 金柔姪, 澁澤龍也. 1998. ポーベ類の層構造に起因する異方性の評價. 日本 農林水産省 森林總合研究所 研究計畫・成果報告書.
11. 島田理化學工業(株): 超音波材料試驗裝置 UMI-9000.