

sion)은 열팽창계수(coefficient of linear expansion)로 표시하며 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{DL}{dt}, \quad \beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{DV}{dt}$$

식에서, α : 열팽창계수(선팽창률), DL : 길이 변화량($L_1 - L_0$), L_0 : 최초
의 길이, L_1 : 온도 t_1 일 때의 길이, β : 체적팽창계수($= \alpha_t + \alpha_r + \alpha_l$),
 DV : 체적 변화량 ($V_1 - V_0$), V_0 : 최초의 체적, V_1 : 온도 t_1 일 때의
체적, dt : 온도변화가 있기 전과 후의 온도차($t_1 - t_0$)

앞의 식은 선팽창률로 표시된 것인데, 이는 온도 1℃ 상승시에 일어나는
물체의 단위길이의 변화량을 나타낸 것으로, cm/cm °C 또는 in./in. °F 로 표
시된다.

목재와 각종 다른 재료의 열팽창계수(熱膨脹係數)를 비교해서 나타내면
표 1-15와 같다.

[표 1-15] 각종 재료의 열팽창계수(목재 및 목질 재료 : 함수율 12% 기준) <W.L.Cox 등, 1991>

목재	물 질	밀도(g/cm ³)	열 팽 창 계 수(in./in. °F)
	비 중(γ)	미 중(Δ)	
목재	레드우드(Δ)	0.71	32×10 ⁻⁶
	레드우드(Δ)	0.45	23×10 ⁻⁶
	섬유판	0.29	6×10 ⁻⁶
	폴리스티렌	0.032	35×10 ⁻⁶
기타 재료	유리(창문)	2.50	5×10 ⁻⁶
	벽돌	1.93	5×10 ⁻⁶
	콘크리트	2.27	8×10 ⁻⁶
	폴리비닐클로라이드(PVC)	1.40	38×10 ⁻⁶
	스틸	7.85	8×10 ⁻⁶
	알루미늄	2.70	14×10 ⁻⁶

표 1-15에서 보는 바와 같이 목재는 기본적으로 다른 물질과 같은 유형
의 열팽창 및 수축성을 보이나, 섬유에 평행한 방향으로의 그것은 6×10⁻⁶

제 4 장 목재의 열적 성질

목재는 저온에서도 단열효과가 높고 강도가 강하며 일반적으로 열전도가
매우 낮아 상온에서 매우 안정된 재료이나 넓은 온도 범위에서 따라 함유
수분의 동결, 목재질질의 연화·분해·연소 등에 따라 그 성질이 크게 변
화된다.

목재가공이나 목질재료 제조시 건조·자비(煮沸)·증자(蒸蒸)·열압·침
가공 등을 할 경우 상온보다 훨씬 높은 온도에서 목재는 열처리를 받게 되
고, 따라서 목재의 이화학적 성질이 영향을 받게 된다. 온도가 다른 두 개
의 물체가 접촉할 때 높은 온도의 물체로부터 낮은 온도의 물체로 이동하
는 에너지를 열(熱; heat)이라고 한다.

목재의 열적 성질은 열팽창(thermal expansion), 열전도도(열전도계수;
thermal conductivity), 비열(specific heat) 및 열확산율(thermal diffusivity)로
표시한다.

4.1 온도변화에 의한 목재의 치수변화

일반적으로 어떤 물질이 가열되어 온도가 상승하면 치수가 늘어나고, 반
대로 냉각되어 물질의 온도가 내려가면 팽창되었던 치수는 다시 수축되는
현상을 나타낸다.

이는 물질을 이루는 분자에 열로 인한 진동이 커지고 그로 인한 분자간
의 평균거리가 증가하였다가, 다시 냉각으로 분자진동의 감소로 인한 분자
간 거리가 감소하는 현상 때문에 생기는 현상이다.

목재는 온도가 상승할 때 열에 의한 치수변화, 즉 열팽창(thermal expan-

정도로 스틸·유리창·콘크리트·벽돌 등의 팽창률과는 유사하고, 알루미늄과 플라스틱의 팽창률보다는 작은 값을 가진다. 그러나 온도차이가 극심한 경우 온도상승으로 인한 함유수분의 거동이 많아지면서 수축 및 팽윤 현상이 발생하므로 그로 인한 치수변화가 순수한 열팽창계수보다 훨씬 크게 나타난다.

목재의 열팽창의 특성을 나열하면 다음과 같다.

- 1) 열팽창계수에 이방성이 있음 : 표 1-15에서 본 바와 같이 목재의 열에 의한 팽창 및 수축은 섬유에 직교한 방향(접선 및 방사 방향)의 팽창계수가 섬유에 평행인 방향으로의 팽창계수보다 크며, 일반적으로 5~10 배 크다(W_{ANGCARD}, 1981). 또한, 접선 및 방사 방향에는 열팽창계수에 차이를 보이는데 그 차의 크기는 대략 접선 : 방사=1.3 : 1 을 보이고 있다. 섬유평행방향과는 달리 직교방향의 열팽창계수는 밀도와 비례관계를 갖고 있다.
- 2) 함유수의 영향 : 함유율이 약 20 %까지는 함유율 증가에 따라 열팽창계수도 증가하나 섬유포화점(纖維飽和點) 이상이 되면 전진시의 열팽창계수 수준으로 떨어진다.
- 3) 온도의 영향 : 고온으로 갈수록 열팽창계수가 약간 증가하나 거의 일정하다고 여겨진다.

4.2 목재의 온도를 상승시키는 위한 열량

일반적으로 어떤 물질의 온도를 단위질량당 1℃ 올리는 데 요구되는 열량을 비열(比熱: specific heat)로 나타낸다.

실제로 열용량(熱容量; heat capacity)은 물질의 온도를 1℃ 상승시키는 데 필요한 열량을 나타내므로, 어떤 물질의 열용량을 나타내는 경우에는 단위 cal/℃ 또는 kcal/℃ 를 사용한다.

각 물질의 열용량은 다음 식과 같이 얻어질 수 있다.

$$\text{열용량} = \frac{Q}{\Delta t} \dots\dots\dots (1 \cdot 58)$$

식에서, Q : t₁에서 t₂로 상승시키는 데 소요되는 열량, Δt: t₁에서 t₂로의 온도 변화량

다음 식과 같이 비열값(C)을 구할 수 있게 된다.

$$\text{비열 } C = \frac{Q/\Delta t}{m} = \frac{Q}{m\Delta t} = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} \dots\dots\dots (1 \cdot 59)$$

식에서, Δt : t₁에서 t₂로의 온도 변화량, m : 질량

목재의 비열은 표 1-16에서 보는 바와 같이 실온에서 약 0.29로 다른 재료에 비해 큰 값을 지니지만 수중이나 밀도, 춘·추재, 변·심재에 따라 큰 변이를 보이지 않는 특징이 있다.

[표 1-16] 각종 재료의 비열(목재 및 목질재료 : 함유율 12% 기준)

목재	재 료	밀 도 (g/cm ³)	비 열 [cal/(g · °C)]
목질재료	미송(/), (L)	0.54	0.29
	북부레드오크(L)	0.71	0.29
	레드우드(L)	0.45	0.29
기타	섬유판	0.29	0.29
	소나무, 목탄	0.26	0.23
	정체된 공기	0.0012	0.24
	폴리스티렌	0.032	0.32
	유리섬유	0.04	0.20
	유리창	2.50	0.18
	석고보드	0.80	0.26
	벽돌	1.93	0.22
	콘크리트	2.27	0.24
	폴리비닐클로라이드(PVC, 硬)	1.40	0.24
물	스틸	7.85	0.10
	알루미늄	2.70	0.23
	물	1.00	1.00

그러나 목재가 수분을 함유하는 경우에 변이가 심해진다. 물의 비열이 목재의 그것보다 약 3 배 이상 크기 때문에 함유수분이 많아질수록 수분을 함유한 목재의 비열은 커져서 섬유포화점 정도의 함유상태에서 0.5 정도의 비열값을 갖게 된다. 건조된 목재의 비열은 물의 비열에서 0.4 정도로 증가

나 젖은 목재는 물 자체의 온도에 의한 변화율이 크지 않기 때문에 오히려 크게 증가하지 않는다.

4.2.1 함수율의 영향

함수목재의 비열 C_u 는 다음 식과 같이 유도될 수 있다.

$$C_u = \frac{m \cdot C_w + C_o}{1 + m} \dots\dots\dots (1 \cdot 60)$$

식에서, m : 건량기준(乾量基準) 함수율, C_w : 물의 비열, C_o : 건전재(全乾材)의 평균비열

예를 들어, 함수율 20%의 평균비열은 $C_u = \frac{0.2 + 0.29}{1 + 0.2}$ 로 약 0.4의 값이 얻어진다.

목재의 함수율과 비열과의 관계를 보면 그림 1-42와 같다.

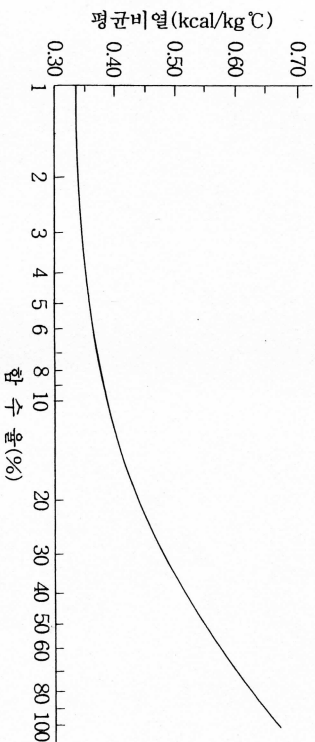


그림 1-42 함수율과 비열의 관계(KOLLMANN, 1951)

4.2.2 온도의 영향

온도가 높아지면 재료의 비열은 증가한다. DUNLAP(1912)은 t 가 온도($^{\circ}\text{C}$), C_o 가 건전재의 비열일 때 건전목재의 비열식을 다음과 같이 표시하였으나, 건전수피에도 동일하게 적용된다(李, 1977).

$$C_o = 0.266 + 0.00116 t \dots\dots\dots (1 \cdot 61)$$

이와 같이 비열은 온도에 따라 변하기 때문에 목재비열의 평균값은 기술적으로 중요하다. 따라서, 온도범위 0~100 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 평균비열(average specific heat) C_m 은 다음과 같다.

$$C_m = \frac{1}{100} \int_0^{100} (0.266 + 0.00116 t) dt = 0.324 \text{ cal/(g} \cdot ^{\circ}\text{C)} \dots\dots (1 \cdot 62)$$

4.3 목재의 열전도성

열의 전달은 방사·대류 및 전도의 세 가지 방법으로 이루어진다. 열전도도(熱傳導度; thermal conductivity)는 후자의 전도와 관련된 것으로 온도경사의 힘을 입어 어떤 물질을 통하여 고온의 분자에서 저온의 분자로 열이 전도되는 비율을 나타내는 척도이다.

4.3.1 열전도도의 측정 및 단위

열전도도(熱傳導度)를 측정하기 위하여 두께 x 의 판재류(板材類)를 이용한다. 판재의 한쪽 면에는 높은 온도 h_1 가 되도록 가열하고, 또 다른 한쪽 면에는 낮은 온도 l 을 갖도록 동시에 냉각시킨다. 그리고 h 온도가 되도록 가열한 열(input)과 반대쪽으로 전달되어 나오는 열(output)을 측정한다. 이 때 $(h-l)/x$ 의 온도경사가 판재를 통하여 열이 전도되게 하는 원동력이 된다.

열전도도 K 는 정상상태의 온도경사($\theta_2 - \theta_1$)가 주어졌을 때 면적 A , 두께 d 의 판재를 통하여 1시간(t)에 흐르는 열에너지(Q)의 양으로 측정하며, 다음과 같이 표시한다.

$$K = \frac{Q \cdot x}{A \cdot t \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \dots\dots\dots (1 \cdot 63)$$

표시단위는 CGS 단위로는 kcal/(m h $^{\circ}\text{C}$)로, 영국공학단위로는 Btu/ft h $^{\circ}\text{F}$ 로, SI 단위는 watt/(m $^{\circ}\text{K}$)로 나타낸다.

열전도도(K)는 열의 흐름을 저지하거나 열저항계수의 역수로 이해할 수 있다. 건축문헌 등에는 이러한 단열성 또는 열저항계수(thermal resistance) R -치로 표시하는 경우가 많은데, 이는 단열재료의 두께에 비례하여 큰 차이가 부여된다. 시판되고 있는 목조 건축용 단열재료에서는 두께가 3.5 인치 때에는 R -11로 표시되고, 두께가 6 인치일 때에는 R -19로 표시되고 다.

[표 1-17] 주요 재료의 열전도도(실온, 목재 및 목질재료의 함수율 12% 기준) (Wilcox 등, 1991; Siau, 1995)

재 료	밀도(g/cm^3)	열전도도	
		Btu in./ft ² h °F	10 ⁻¹ kcal/m h °C
목재	미송(//)	2.40	2.98
	미송(⊥)	1.00	1.24
	북부레드우드(⊥)	1.25	1.55
	레드우드(⊥)	0.85	1.05
목질 재료	섬유판	0.29	0.40
	중밀도섬유판	0.4~0.8	0.73
	중밀도파티클보드	0.4~0.8	0.93
	미송합판	0.12	0.80
단열 재료	정제된 공기	0.18	0.22
	폴리스티렌발포체	0.24	0.30
	폴리우레탄발포체	0.16	0.20
	유리섬유(glass fiber)	0.27	0.34
기타	유리창	6.00	7.45
	석고보드	1.13	1.40
	벽돌	5.00	6.21
	콘크리트	6.5	8.07
	돌, 석회, 모래	12.50	15.51
	구리	2,680	3,325.88
	알루미늄	1,080	1,340.28
	스텔	324	402.08
	물	4.03	5.00

[주] 1 Btu in./ft² h °F = 0.1241 kcal/m h °C

$$R(\text{열저항계수}) = \frac{x(\text{두께})}{K(\text{열전도도})} \frac{m^2 h^\circ C}{kcal} \dots\dots\dots (1.64)$$

주요 재료의 열전도도를 보면 표 1-17과 같다. 이 표에서 보면 목재 및 목질재료는 다른 건축재료에 비하여 열전도도가 매우 낮은 편에 속하며 단열성이 높다고 할 수 있다. 특히, 목재의 경우 세포벽 물질과 공극이 교차되어 있는 망상 구조이므로 세포벽 물질의 전도도와 공극의 공기층이 동시에 작용하여 섬유에 직각방향으로의 열전도도는 섬유방향보다 훨씬 낮은 열전도도를 보인다. 목재의 열전도도는 밀도, 함수율, 추출물, 섬유방향, 피브릴정사각과 같은 인자에 의하여 영향을 받는다.

4.3.2 섬유주향에 따른 열전도도

목재조직의 배열에 대한 열의 전도성은 방향성을 나타낸다. 2개의 섬유직각방향끼리는 거의 비슷하나 점선 및 방사 방향에 대한 섬유방향의 열전도성의 비(열전도도비; thermal conductivity ratio)는 2~2.75배 정도 더 큰 값을 보인다.

이러한 관계는 표 1-17에서도 볼 수 있지만, 그림 1-43에서 보다 확실한 경향을 볼 수 있다. 실제 건축물의 벽 재료로 목재가 사용될 때는 점선방향

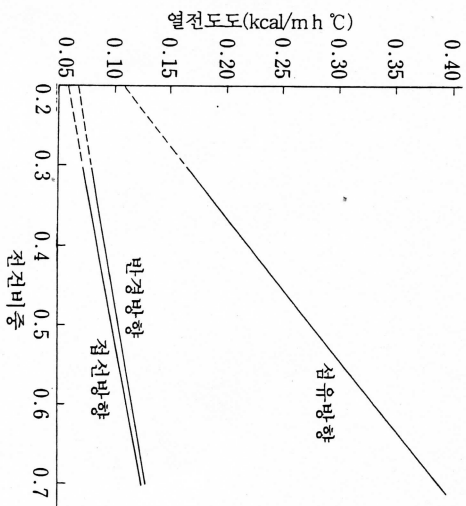


그림 1-43 열전도도와 전전비증과의 관계
(목재물리 및 역학, 1989)

1 방사방향으로 열전도도의 역할이 훨씬 중요하게 작용한다. 그러나 목재의 방향이나 외벽기둥, 천장, 샹기둥 등의 섬유방향을 통한 열손실이 되는 것은 아니다.

4.3.3 밀도의 영향

재에서는 밀도의 증가에 따라 열전도도가 커지는 경향을 가진다. 그림 3에서 보는 바와 같이 섬유방향의 경우 증가가 더 큰 것을 알 수 있다. 같은 이유는 목재가 다공성의 물질로서 공극 속의 정체된 공기의 열전도도가 낮기 때문이며, 공극률이 높은 목재의 경우, 열절연성, 즉, 단열성 매우 양호하다고 볼 수 있다.

목재의 비중과 열전도도와의 관계는 다음 식들과 같다.

$$K(//) = 0.02 + 0.346 S_o \dots\dots\dots (1 \cdot 65)$$

식에서, $K(//)$: 섬유에 평행한 방향의 열전도도(온도 20°C), S_o : 전건비중

$$K(\perp) = 0.022 + 0.0724 S_o + 0.0931 S_o^2 \dots\dots\dots (1 \cdot 66)$$

4.3.4 함유물의 영향

재가 수분을 많이 함유할수록 열전도도는 커지는데, 이는 물 자체의 열

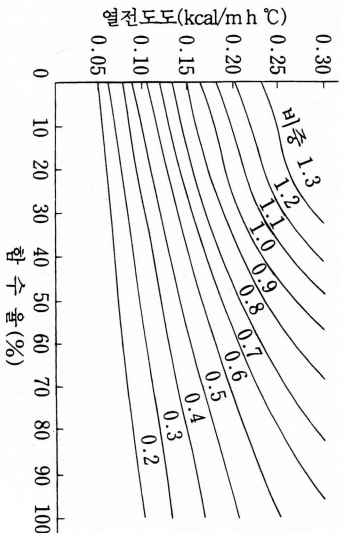


그림 1-44 열전도도와 함수율과의 관계
(伏谷 外, 1985)

전도도 때문이다. 표 1-17에서 본 바와 같이 물의 열전도도는 목재에 비하여 매우 큰 값을 갖고 있기 때문에 목재의 열전도도에 큰 영향을 끼친다.

목재의 함수율과 열전도도와의 관계를 보면 그림 1-44와 같다. 그림에서 목재의 열전도도는 비중의 증가에 따라 증가되고, 비중이 큰 목재일수록 증가 정도가 더 커지는 경향이 있다. 특히, 함수율 40% 이상에서 열전도도의 증가가 더욱 뚜렷해짐을 볼 수 있다.

일반적으로 함수율과 열전도도의 관계식을 MacLean(1941)은 40% 이하의 함수율에서 실험식으로 다음과 같이 나타내고 있다.

$$K = D(1.39 + 0.028 M) + 0.165 \dots\dots\dots (1 \cdot 67)$$

여기서, K 의 단위는 $\text{Btu} \cdot \text{in}/\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$ 이고, M 은 함수율, D 는 밀도로서 함수율 40% 이상에서는 함수율계수가 0.038로 바뀐다. 전건상태에서는 함수율이 0, 밀도가 0이 되면 상온에서 건조공기의 열전도도와 같게 된다. (1·67)식에서 수중간 편차를 나타내는 이유는 추출물과 피브릴경사각이 다르기 때문이라고 설명하고 있다.

4.3.5 온도의 영향

목재의 열전도도는 온도가 상승함에 따라 증가하는데, 이는 공극을 점유하는 공기의 열전도도가 온도와 함께 증가되기 때문이며, 실험적으로 절대 온도에 거의 비례한다고 알려져 있으며, Kohlmann은 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$K_2 = K_1 \left\{ 1 - (1.1 - 0.98 S_o) \frac{t_2 - t_1}{100} \right\} (\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (1 \cdot 68)$$

식에서, K_1, K_2 : 온도가 t_1, t_2 일 때의 열전도도, S_o : 전건비중

4.4 열 확산

열확산(熱擴散; thermal diffusion)은 어떤 재료의 주위 온도가 변화될 때 그 재료의 온도가 변화되는 속도를 나타내는 척도이다. 온도변화의 속도인

제 6 장 음향, 광, 감각과 목재

6.1 음과 목재

계는 고유한 음향특성을 지니고 있어 각종 악기의 향판재(響板材)로 이거나 건축물의 내장 또는 각종 흡음재료(吸音材料)로서 건축물의 소음에 중요한 역할을 담당하고 있다.

6.1.1 음 파

파(波動; sound wave)는 탄성체에서 전달되는 탄성파(彈性波; elastic wave)의 일종으로서 사람이 소리를 느낄 수 있는 가청주파(infrasonics)의 수는 16~20,000 Hz이며, 가청음압 범위는 매우 넓어 2×10^{-4} μ bar에서 10^2 μ bar까지이다. 박쥐나 돌고래는 인간과 달리 초음파(ultrasonics)를 |한다.

정파로서의 음파는 질량(관성)과 탄력(탄성)을 지닌 매질(媒質) 중을 전게 된다. 목편(木片)을 망치로 치면 목편은 진동하는데, 이 진동은 주위로 음파를 보낸다. 음파현상으로서 소리는 파장·진폭·주파수·음속 물리적인 특성을 지닌다.

파가 일정 속도(v)로 나아가면 주파수(f)와 파장(λ) 간에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$v = \lambda f \text{ 또는 } \lambda = \frac{v}{f} \dots\dots\dots (1.78)$$

, 음파는 일정 속도 v 로 전파되므로 단위시간에 일정 거리를 이동하고, 거리를 주파수 f (단위시간 진동수)로 나누면 파장 λ 를 구할 수 있다.

6.1.2 음의 전달속도

음파는 매질의 변형에 의하여 전달되므로 음파를 전달하는 매질의 성질에 따라 음파의 속도가 달라진다.

목재 성질의 측정에 사용되는 주요 파의 형태는 종파(縱波: 종파와 횡파)와 표면파(表面波: 레일리파·렘파·리브파)로 나눌 수 있는데, 이 파들은 전파의 방향과 입지운동으로 설명된다. 보다 엄밀히 말하면, 종파(縱波; longitudinal wave)는 매질의 진동방향이 파의 진행방향에 평행하고, 횡파(橫波; transverse wave)는 파의 진행방향에 수직하며, 동일한 매질에 대하여 대략 종파속도의 1/2의 속도를 갖는다. 레일리파(Rayleigh wave)는 표면 부근에 에너지가 집중되어 있는 특수파로 표면을 따라 전달되고, 전파의 방향과 평행한 면에 대해 타원으로 음속은 횡파의 90% 정도이다.

목재 중의 음속은 온도·습수율·밀도·조직구조 등에 따라 영향을 받는다. 그림 1-54는 메타세쿼이아 목재 내의 습수율과 초음파 음속의 변화 및 습수율과 감쇠의 관계를 나타낸 것이다.

습수율이 증가하면 음속이 느려지고 감쇠는 증가한다. 최대음속과 최소감쇠는 건조상태에서 측정된다. 습수율에 대한 음속의 변화는 섬유포화점(습수율 38%, U_1)까지 급격히 감소하는 반면, 감쇠의 경우는 습수율 18% (U_2) 이하에서는 일정하다가 이 임계점부터 상승한다(Sakai 등, 1990). 그

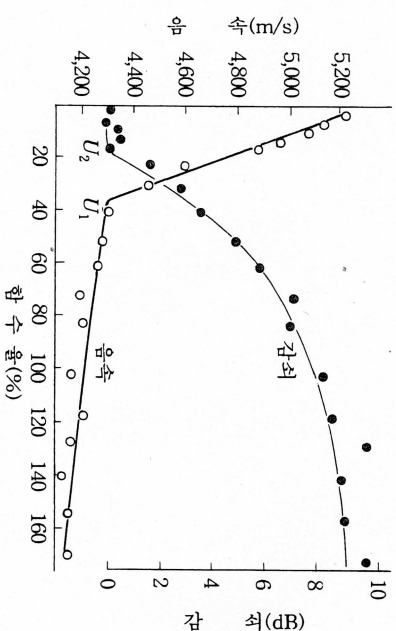


그림 1-54 메타세쿼이아의 습수율에 대한 음속과 감쇠
(Sakai 등, 1990)

하나 이 차이는 초음파 음속의 경우 1% 이내의 매우 높은 정밀도를 갖고 있으나 감쇠의 경우에는 10~20%의 낮은 정밀도에 기인한 것으로 보인다. 또한, 온도가 높아질수록 미송 중의 음속은 느려진다(James, 1961).

목재의 밀도를 ρ , 섬유방향의 영률(Young's modulus)을 E 로 하면 음속 c 는 다음과 같다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (1 \cdot 79)$$

목재의 섬유방향의 음속과 영률을 각각 $c_{//}$, $E_{//}$, 직각방향의 음속과 영률을 각각 $c_{\perp}$, $E_{\perp}$ 라 하고, 밀도를 ρ 로 하면 이때 목재의 밀도는 같으므로 $c_{//}$ 대 $c_{\perp}$ 의 비는 $c_{//}/c_{\perp} = \sqrt{E_{//}/E_{\perp}}$ 와 같이 되므로, $c_{//}/c_{\perp}$ 으로 $\sqrt{E_{//}/E_{\perp}}$ 를 구하게 되지만 실제로는 $E_{//}/E_{\perp}$ 의 값보다 적은 것으로 보고되고 있다. 이는 매질인 목재가 균질이 아니므로 음의 전달이 일정하지 않기 때문이라고 생각된다.

표 1-19는 목재 내에 있어서 음의 평균속도를 영률로 산출한 것이다. 목재의 음속은 섬유평행방향에서 섬유직각방향보다 빠르며, 그 예로서 소나무·나무·니도밤나무·니도밤나무에서는 섬유평행방향에서 섬유직각방향보다 3~4배

[표 1-19] 목재와 각종 재료의 음의 평균속도

(영률로 산출) (KOLLMANN & COTÉ)

구 분	평균 비중	평균영률		평균음속		$\frac{v_{//}}{v_{\perp}}$
		섬유평행 (kg/cm ²)	섬유직각 (kg/cm ²)	섬유평행 (m/s)	섬유직각 (m/s)	
가문비나무	0.47	110,000	5,500	4,790	1,072	4.47
소나무	0.52	120,000	4,600	4,760	932	5.11
젓나무	0.45	110,000	4,900	4,890	1,033	4.73
단풍나무	0.63	94,000	9,150	3,826	1,194	3.21
니도밤나무	0.73	160,000	15,000	4,638	1,420	3.27
참나무	0.69	130,000	10,000	4,304	1,193	3.61
철	7.85			5,000		
구리	8.9			3,900		
유리	2.5			5,100~6,000		
코르크	0.25			430~530		

빠르다. 그리고 방사방향의 음속은 접선방향의 음속보다 약간 빠르다.

소나무재의 음속은 일반적으로 섬유길이의 영향을 받는데, 단섬유재보다 장섬유재에서 그 속도가 빠른 것으로 알려져 있다.

표 1-19에서 보는 바와 같이 목재 내의 음속은 대부분 금속(납은 제외)과 비슷하지만, 목재의 밀도는 금속 밀도의 약 1/20~1/10이다.

6.1.3 음의 감쇠

음의 감쇠(減衰)에는 목재를 진동시키면 그 에너지가 공기 중에 음파로서 방사(放射)되어 감쇠되는 방사감쇠(放射減衰; damping due to sound radiation)와 목재 내부의 분자마찰에 의하여 감쇠되는 손실감쇠(損失減衰; damping due to internal friction)가 있으며, 공기저항에 의해서도 진동체의 진폭이 감쇠된다. 약기의 향판재(響板材)로는 손실감쇠가 적고, 방사감쇠가 많은 것이 요구되고 있다.

(1) 목재의 음방사감쇠

방사감쇠(放射減衰)는 본질적으로 물질 내의 음의 속도와 물질의 밀도비로 나타난다. 평판에 진동에너지가 가하면 에너지의 일부는 음파로 방사가 된다. 평판을 구성하는 물질이 다르면 음의 높이와 음색(音色; timbre)이 다른 음을 내고 여음의 지속시간도 차이가 생기는데, 그 원인은 평판의 총합 감쇠작용(總合減衰作用)이 다르기 때문이다. 이 총합감쇠는 손실감쇠와 방사감쇠의 총합작용이다.

방사감쇠는 음에너지의 방사에 의한 감쇠로서, 음향방사에 의한 감쇠율(減衰率) δ_r 는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\delta_r = 5 \times 10^{-8} \frac{v}{\rho} = 5 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \dots\dots\dots (1 \cdot 80)$$

식에서, v : 목재 중 음의 속도(cm/s), ρ : 비중, E : 동적 탄성계수(dyn/cm²)

<예> 목재 비중 0.35, 동적 탄성계수 65,000 kgf/cm²인 목재의 음향방사에 의한 감쇠율과 목재 내부의 음속은 얼마인가?

i) 음향방사에 의한 감쇠율 δ_r ,

$$E = 65,000 \text{ kgf/cm}^2 = 980 \times 1,000 \times 65,000 = 637 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$$

(1 $\text{gf} = 980 \text{ dyn}$)

$$\delta_r = 5 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{637 \times 10^8}{0.35^3}} = 5 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{637 \times 10^8}{0.0429}}$$

$$= 5 \times 10^{-8} \frac{25.24 \times 10^4}{0.2071} = 6.09 \times 10^{-2}$$

음속 v

$$6.09 \times 10^{-2} = 5 \times 10^{-8} \frac{v}{0.35}$$

$$v = \frac{6.09 \times 10^{-2} \times 0.35}{5 \times 10^{-8}} = 426,300 \text{ cm/s} = 4,263 \text{ m/s}$$

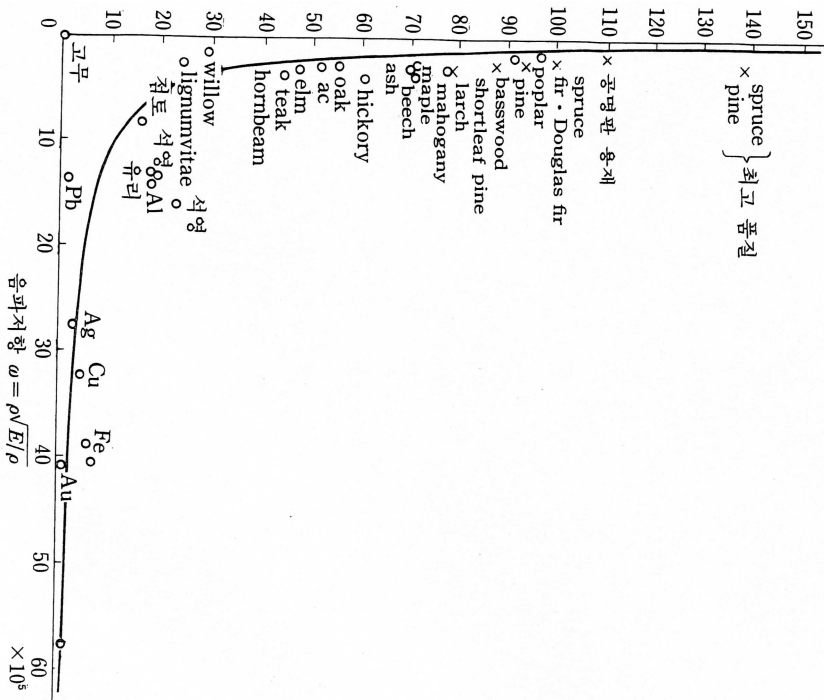


그림 1-55 목재와 다른 재료에 대한 음파저항과 방사
감쇠와의 관계(Hörng)

삼유에 평행방향의 방사감쇠에 비하여 삼유에 직각방향의 감쇠는 아주 작은 값을 나타내는데, 이와 같은 음향학적 성질의 이방성도 탄성적으로 같은 값의 판을 적당히 복합함으로써 개량할 수 있다.

그림 1-55는 목재와 다른 재료들에 대한 음파저항(雷波抵抗; sound wave resistance)과 방사감쇠와의 관계를 나타낸 것이다.

(2) 목재의 음손실감쇠

목재 시편의 일단을 고정하고 다른 자유단(自由端)에 추를 붙여 망치로 치면 순간적인 횡진동을 일으켜 어느 시간까지 시편은 진동하다가 점차 진폭이 감소된다. 시편의 운동에서 고유 에너지의 일부분은 음파로 공기 중에 방사되고, 일부분은 목재 내부의 분자마찰에 의해 열로 변해 소모된다. 따라서, 공기 중으로의 음의 방사는 목재 내부의 소모가 적을수록 많아진다.

목재 내부에서 발열과 함께 분자마찰에 의하여 일어난 에너지의 손실은 진폭을 감쇠시키는 경향을 나타내는데, 이와 같은 현상을 음의 감쇠현상이라고 한다. 공기 중에서 진동체의 진폭의 감쇠는 분자마찰 외에 공기저항도 관여한다.

어떤 물질의 자유진동에서 손실감쇠능(損失減衰能; damping capacity)은 다음과 같은 대수감쇠율(對數減衰率; logarithmic decrement) δ 로 나타낸다.

$$\delta = \ln \frac{a_1}{a_2} \dots\dots\dots (1 \cdot 81)$$

식에서, a_1, a_2 : 임의의 연속된 2개의 진동사이클의 진폭

〈예〉 연속 자유진동을 하고 있는 단순 보의 자유단의 연속진동 a_1 과 a_2 가 각각 1,030 cm와 1,000 cm 라면 대수감쇠율(δ)은 얼마인가?

$$\langle \text{답} \rangle \ln \frac{1,030}{1,000} = 0.0296$$

강제진동(強制振動; forced vibration)의 경우에는 주파수가 공명점(共鳴點) 주위에서 변하므로 진폭도 변한다. 공명주파수(共鳴周波數; resonant frequency)에서 최고치에 이르고, 공명점을 중심으로 상하 어느 쪽이든 감소한다. 즉, 공명주파수 부근에서 주파수가 변함에 따라 진폭 변화율이 손실감쇠능을 나타낸다.

HEARMAN 에 의하면 대수감쇠율 δ 는 다음과 같다고 한다.

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{df}{f} \dots\dots\dots (1 \cdot 82)$$

식에서, df : 최고공명치의 반분한 진동의 진폭이 가지는 공명주파수 상하 두 점 간의 주파수의 차, f : 공명주파수

〈예〉 앞 예의 단순 보에서 강계주파수 60.0 cps 에서 공명한다면 2 개의 반분진폭점(半分振幅點)간의 주파수 차 df 는 얼마인가?

$$\langle \text{답} \rangle \quad \frac{\sqrt{3} \delta f}{\pi} = \frac{\sqrt{3} (0.0296) (60.0)}{\pi} = 0.98 \text{ cps}$$

다른 말로 표현해서 주파수반응곡선이 대칭이라고 하면 59.51 cps 와 60.49 cps 에서 진동의 진폭은 공명주파수인 60.0 cps 의 절반이 된다.

GREENHILL 은 오스트레일리아산 16 수종에 대한 횡진동시험에서 대수감쇠율이 0.0260~0.0497 이고, 비틀림진동에서 대수감쇠율이 횡진동 평균치의 2~3 배라고 밝힌 바 있다.

합수를 영향은 합수를 8%, 15% 및 19% 일 때의 대수감쇠율 평균치는 각각 0.0332, 0.0365 및 0.0379 라고 하였다.

JAMES 가 보고한 미송의 삼유평행방향에서 각 온도에 대한 대수감쇠율과 합수율과의 관계를 보면 온도 -18°C , 합수를 4% 부근에서 대수감쇠율이 최고이고, 온도 27°C , 합수를 8% 부근에서 최소이며, 합수를 16~30% 에서는 완만한 증가를 나타내지만 30% 이상에서는 일정하다. 온도에 따라

〔표 1-20〕 진동과 음에 대한 성질

구 분	비중	탄성계수 ($10^4 \cdot \text{kgf/cm}^2$)	음향방사에 의한 감쇠율 (10^{-3})	내부마찰에 의한 대수 감쇠율(10^{-2})	음의 속도 (km/s)
편백	0.377	10.97	7.15	1.76	5.39
가문비나무	0.406	10.47	6.25	1.84	5.08
소나무	0.465	9.35	4.82	2.19	4.48
삼나무	0.345	6.52	6.29	2.00	4.34
은행나무	0.389	9.00	3.32	2.27	3.91

〔圖〕 1) 기건재 : 길이 30 cm, 너비 2 cm, 두께(진동방향) 0.5 cm
2) 樑山(동경대학 이공학연구소 보고 1 권 3, 4 호)

대수감쇠율의 최고치와 최소치의 위치는 이동한다.

일반적으로 횡진동(橫振動)과 종진동(縱振動)의 대수감쇠율은 대개 같고 섬유에 직각방향을 축으로 할 때의 대수감쇠율은 섬유에 평행방향을 축으로 한 경우에 비하여 약 3.5 배 높다.

목재의 음손실감쇠는 목재의 점탄성(粘彈性)에 의존하고, 대수감쇠율은 세포와 세포벽 내부구조의 불균질성이 밀접한 관계를 가지고 있으므로 섬유포화점(纖維飽和點) 이하에서는 수분과 온도의 영향을 크게 받는다. 목재를 악기용재(樂器用材)로 이용하려면 질량에 비하여 탄성계수(彈性係數)가 높고, 가청주파수역(可聽周波數域)에서 내부마찰에 의한 감쇠가 적어야 한다.

則元은 피아노 향판용 목재(響板用 木材)에 대하여 1 주기당 열로서 손실된 에너지 Q^{-1}/E 는 주어진 역학적 에너지가 열에너지로 변환되는 양으로서 그 값이 낮은 재가 우수한 향판재이며, 숙련자가 선별한 향판재에 대하여 Q^{-1}/E 와 E/ρ (ρ 는 비중) 간의 관계에서 상급재는 Q^{-1}/E 값이 아주 적고, E/ρ 와 Q^{-1}/E 간의 높은 상관성이 있으므로 E/ρ 를 사용하여 피아노 향판의 선별이 가능하다고 하였다.

6.1.4 흡음 · 저음 및 진함

실내의 형태 · 천장 · 벽 · 마루 및 실내가구들이 음향적 성질과 관계가 있으므로 적당한 재료를 사용함으로써 실내에서는 음성의 명료도를 높이고 실외로부터의 소음은 차음(遮音)하여 양호한 음향적 환경을 이룰 수 있다. 말소리의 명료도는 음량, 실(室)의 잔향시간, 소음, 실의 형태 등에 따라 결정된다.

잔향(殘響; reverberation)이란 발음을 정지한 후 발음체의 직접음 외에 반사음이 존재하여 잠깐 음에너지가 실내에 남게 되는 것을 말하는데, 실내 모든 면의 흡음량과 실의 체적에 관계한다. 흡음량이 증가하면 잔향시간은 짧아지고 명료도는 증가되며, 흡음량이 더욱 많아지면 음량은 감소되고 명료도도 감소되므로 각 목적에 적합한 흡음률(吸音率)이 유지되는 것이 좋다.

목재 및 목질재료는 실내음향(室內音響; room acoustics)에 우수한 재료이지만 외부의 소음차단에 대한 구조 및 공법에 신중을 기해야 한다.

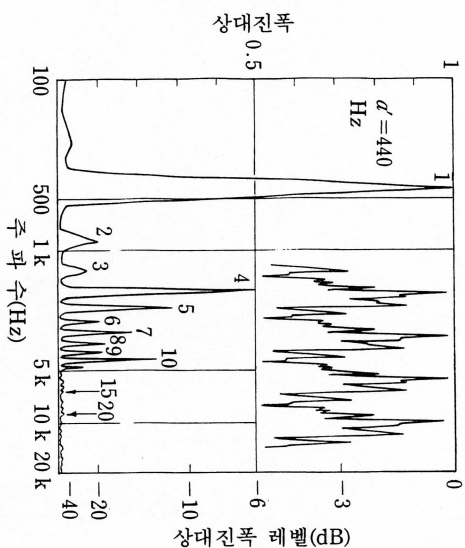


그림 1-64 바이올린 A 선 음의 주파수 스펙트럼

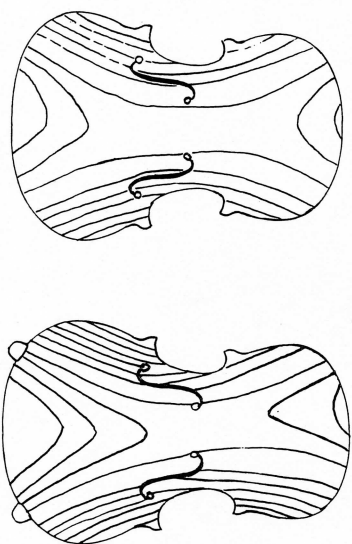


그림 1-65 바이올린 포판의 진동모드형과
주파수(RICHARDSON 등, 1987)

적인 음의 분석에는 항상 통과대역필터(通過帶域 필터; band pass 나 헤테로다인(heterodyne)식)의 주파수분석기가 사용되고 있으며, 최 · FFT(高速푸리에變換; fast Fourier transformation) 스펙트럼에널리 spectrum analyzer)도 사용된다. 과도적인 소리의 분석에는 음색의 시 변화가 분석되는 사운드스펙트로그래프(sound spectrograph) 및 소나(sonagraph)가 사용된다.

(3) 악기용 목재

악기의 탄생에는 그 지역의 문화 및 자연환경 등이 깊이 관여하고 특징 있는 각종 목재가 악기에 이용되고 있다. 음의 고저(pitch)는 목편(木片) 진동의 자연주파수(自然周波數; natural frequency)에 의존하는데, 이것은 목편의 밀도 및 탄성 크기의 영향을 받는다.

부후되어 탄성이 없어진 목재를 가볍게 칠 때 진전제와 비교해 보면 또 몇하지 못한 소리를 낸다. 진전제에 의하여 방사되는 음조는 유쾌하여 향관과 악기 부품으로 널리 사용된다.

바이올린 제작은 목공의 최고 기예의 하나로서 세계적인 명기로는 이탈리아의 대가 AMATI, GUARNERI, STRADIVARIUS 등에 의한 것을 손꼽고 있다.

목재의 탄성계수 대 밀도비율(MOE-to-density ratio)은 다른 재료보다 높다. 각 수종 중에서 가문비나무(spruce)는 탄성계수 대 밀도비율이 높으므로 각종 악기의 용도에 많이 쓰이고 있다.

또한, 전나무도 많이 이용되며, 우리나라 고유 악기인 가야금 · 거문고의 제작에 오동나무를 오래 전부터 이용한 것도 비중에 비하여 탄성계수가 높기 때문이다.

洪은 우리나라 향판용재(響板用材)로 명시된 17개 수종의 동적 탄성계수를 측정하였는데, 오동나무가 $0.631 \pm 0.065 (E \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2)$ 로 비중에 비하여 높은 탄성률을 가지고 있다고 보고하였다. 또한, 목재의 탄성과 밀도의 성질뿐만 아니라 수목의 전 생장기 동안 균일하게 생장하여 조직이 균일하고 결점이 없는 것이 음향판의 필수조건이다.

가야금과 거문고의 제작용으로 쓰이는 오동나무에 있어서도 생장속도가 빨리 연륜폭(年輪幅)이 너무 넓은 것보다 생장속도가 느리고 연륜폭이 좁은 성숙제로서 수간의 표면에 가까운 재가 좋으며, 같은 산지라 하더라도 북쪽 경사면이 좋고, 동일 수간이라고 하더라도 북쪽에서 목취한 것이 좋으며, 연령은 정목재의 경우에는 60년 이, 판목재의 경우에는 30년 이상이 필요하며, 대패로 밀어낸 면이 광택이 있고 매끄러우며 끈기 있는 재가 좋은 향판재로 간주된다.

이(李)에 의하면 악기별로 적정 평균연륜폭의 차이가 있는데 바이올린과 비올라는 0.8~2.5 mm, 첼로는 3 mm, 더블베이스는 5 mm, 기타는 2 mm, 피아노는 0.7~3 mm로 보고하고 있다. 이는 악기의 형상, 크기, 연주방법

등에 따라 오랜 경험에 의하여 판정된 것이다. 체코슬로바키아 지역에서 생산되는 생장속도가 느린 가문비나무는 최고급 피아노와 바이올린 향판용재(響板用材)의 공급원으로 유명하다. Spradvarius 도 가문비나무를 선택하는데 있어서 높은 탄력(彈力; resilience)과 밀도를 가진 균일 생장재를 선택하는 등 세심한 주의를 기울였다. 바이올린 이판용(裏板用)으로 단풍나무(curly maple)가 많이 쓰이는 것은 표판(表板)에 비하여 진동적 성질은 많이 떨어지나 표판의 진동을 지지해 주는 기능과 공진 역할 및 파형 문양의 미학(aesthetics)과도 관련되어 있다고 할 수 있다.

표 1-23 은 오케스트라용 악기와 민속악기에 이용되는 수종들이다. 최근에는 양질의 악기용 목재의 고갈 등 자원적 제약 때문에 전통적인 수종을 이용하기 곤란하여 대체 수종으로 전환되고 있다.

[표 1-23] 악기용 목재의 주요 수종명

구 분	부품명	주요 수종명
바이올린	표판	독일가문비나무 · sitka spruce
	이판	단풍나무 · 버즘나무
피아노	향판 · 향봉	독일가문비나무 · sitka spruce · red spruce
	기운목	단풍나무 · 회양목 · 고로쇠나무
클래식기타	표판	독일가문비나무 · sitka spruce · western red cedar · red spruce
실로폰	이판	African mahogany · 단풍나무
리코더	음판	African padauk
비파	목판	흑단(ebony)
바자목	표판(복판)	오동나무
가야금 · 거문고	표판	가시나무
대금 · 통소	이판	오동나무
		밤나무 · 참나무

또한, H_{0.2} 는 연륜 내의 만재(晩材)의 비율은 전통적으로 대략 1/4 미만으로, 조재(早材)와 만재의 밀도 간의 차이는 가능한 한 넓을수록 전통적으로 조재 : 280 kg/m³, 만재 : 900 kg/m³ 좋다고 하였으며, 만재의 비율이 증가하면 탄성률(彈性率)이 증가되고 내부마찰도 증가함을 보여준다(표 1-24 참조).

[표 1-24] 노르웨이가문비나무 향판용재의 방사장 특성

구 분	밀도 (kg/m ³)	E_R (10 ⁸ N/m ²)	V_{RR} (m/s)	$\tan \delta_R$ (10 ⁻²)	연 료	
					폭 (mm)	만재율 (%)
guitar	413	5.9	1,190	1.8	1.08	21
바이올린	528	10	1,380	1.8	1.46	26
피아노	463	5.7	1,110	1.6	1.64	25
기타	456	12	510	2.8	2.65	41
보트용	378	1.9	730	2.2	4.25	13

주는 번째 부분의 성숙재를 악기의 한가운데 중심부에 위치시키는 것은 가능한 한 직각방향의 음향방사가 길이방향과 조화를 이루도록 할 때 더 좋기 때문이며, 이를 실험에 의하여 입증하였다.

(4) 악기용 목재의 진동시험법과 재질 지표

악기용 목재는 곡진동부재(曲振動部材)로 이용되는 경우가 많으므로 진동의 특성은 편지지(片支持) · 양단자유지지(兩端自由支持) · 비틀림진동법 등으로 조사된다. 측정법에는 공진법(共振法)과 자유감쇠진동법(自由減衰振動法)이 있다.

황진동에 의한 동적 시험법에 의한 Kollmann 과 Krech 의 동적 영률 E_d 를 (1·91)식에 의하여 구하거나 초음파를 이용하여 음속을 측정 한 후 밀도를 대입하여 탄성계수를 구한다.

$$E_d = \frac{f^2 \cdot w \cdot l^3}{14.5 \times 72,700 \times b \cdot h^3} \dots\dots\dots (1 \cdot 91)$$

직에서, E_d : 동적 영률(kg/cm²), f : 공진주파수(Hz), w : 시험체의 무게(g), l : 시험체의 길이(cm), b : 시험체의 나비(cm), h : 시험체의 높이(cm)

악기에는 각각 고유의 음역이 있는데, 악기용 목재의 진동특성은 넓은 음역에 걸쳐 주파수의존성에 대하여 조사할 필요가 있다. 진동주파수를 변화시키는 방법에는 시험체의 치수를 다르게 변화시키는 방법과 치수를 변화시키지 않고 고차진동을 이용하는 방법이 있다.

동적 영률은 목재의 탄성(彈性)을 나타내는 지표로서, 이것이 클 때 동일