

나무상자 포장설계 실무(2)

김형빈/우진공업포장연구소 소장

목 차

3. 목재의 각종 하중에 대한 강도계산	
3-1. 허용굽힘하중	3-3. 보받침대의 치수
3-2. 보의 치수에 대하여 필요한 중심 간격	3-4. 허용압축하중
	3-5. 허용인장하중

3. 목재의 각종 하중에 대한 강도계산

나무상자 설계시에는 목재의 허용 강도를 사용하여 필요한 부재 치수를 결정하는데 이를 위해서 각종 하중에 대한 응력의 산출식을 알아야 한다. 여기에서는 나무상자에 사용되는 부재 계산에 필요한 것만을 설명하도록 한다.

3-1. 허용굽힘하중

1. 허용굽힘강도

$$F_b = \frac{M}{Z} \dots\dots\dots(1)$$

여기에서

F_b : 허용굽힘강도(107 또는 82kgf/cm²)

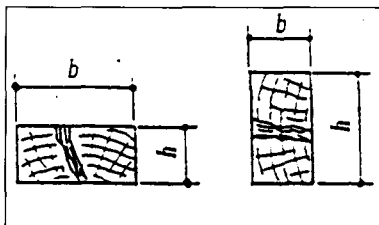
M : 굽힘모우멘트(kgf-cm)

Z : 단면계수(cm³)

(단면형상에 의한 계수로서

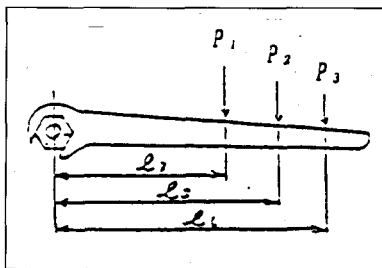
$$\frac{bh^2}{6})$$

b : 부재의 폭(cm)



h : 부재의 두께(cm)

굽힘모우멘트(M)는 힘(P)과 작용점에서 작용선까지의 거리(l)와의 곱인데 아래 그림과 같이 스페너로 보울트를 조이는 경우 거리(l)가 클수록 힘(P)은 작아도 쉽게 조일 수 있는 것과 마찬가지로 원리이다.

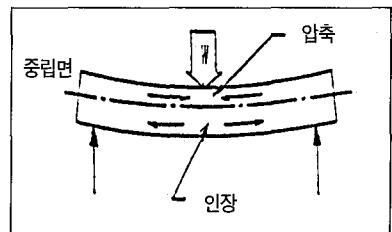


$$l_3 > l_2 > l_1$$

P₁ > P₂ > P₃ 라고 하면

$$\bullet M = P_1 \times l_3 = P_2 \times l_2 = P_3 \times l_1$$

힘의 경우, 목재의 내부 응력은 아래 그림과 같이 중립면의 상부에는 압축이, 아래에는 인장이 작용한다.



(1) 중앙집중하중

아래 그림과 같이 자유단의 난순보의 중앙에 집중하중이 작용하는 경우, a점에서의 굽힘모우멘트는 다음과 같다.

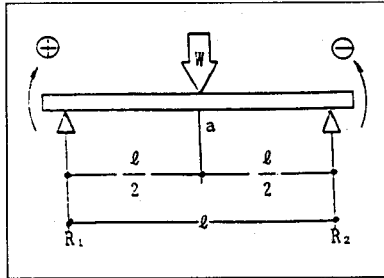
하중을 W, 지지하는 힘을 반력(R)이라고 하면

$$\text{반력} : R_1 = R_2 = \frac{W}{2}$$

굽힘모우멘트

$$(M) = \frac{W}{2} \times \frac{l}{2} = \frac{Wl}{4}$$

나무상자 포장설계 실무(2)



(1) 식으로부터

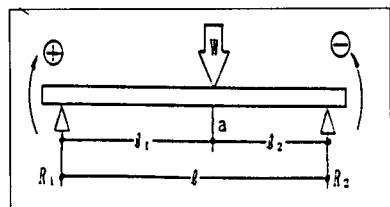
$$F_b = \frac{M}{Z} = \frac{Wl/4}{bh^2/6} = \frac{3Wl}{2bh^2} \dots\dots\dots(2)$$

(2)식에서, 허용굽힘하중

$$W_0 = \frac{2bh^2F_b}{3l} \dots\dots\dots(3)이다.$$

(2) 편하중

아래 그림과 같이 하중점이 중심 위치에서 한 방향으로 편중되어 있고, 지점으로 부터의 거리를 l_1, l_2 라고 하면 반력은 다음과 같다.



$$R_1 = \frac{l_2}{l} \times W$$

$$R_2 = \frac{l_1}{l} \times W$$

a점에서의 굽힘모우멘트는

$$M_a = R_1 \times l_1 = \frac{l_1 l_2 W}{l}$$

이것을 (1)식에 대입하면

$$F_b = \frac{M}{Z} = \frac{6 l_1 l_2 W}{bh^2 l} \text{ 이 되어}$$

허용굽힘하중은

$$W = \frac{bh^2 l F_b}{6 l_1 l_2} \dots\dots\dots(4)$$

1-3. 등분포하중

아래 그림과 같이 단순보의 단위 길이당, w의 하중이 등분포로 작용할 경우의 허용굽힘하중. 이 경우 하중의 합계를 $w \cdot l = W$ 라 한다.

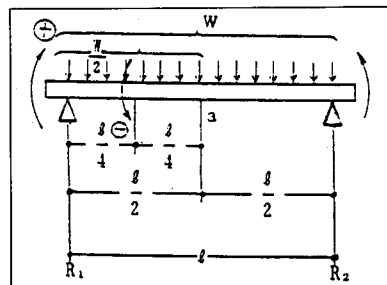
반력은 중앙집중하중의 경우와 같이

$$R_1 = R_2 = \frac{W}{2} \text{ 이다.}$$

이 경우는 반력에 의한 굽힘모우멘트에 대하여, a 점으로 부터 $l/4$ 의 위치에 $W/2$ 의 하중이 역방향으로 작용한다.

따라서 a 점에서의 굽힘모우멘트는

$$M_d = \frac{W}{2} \times \frac{l}{2} - \frac{W}{2} \times \frac{l}{4} = \frac{Wl}{8} \text{ 이다.}$$



이것을 (1)식에 대입하면

$$F_b = \frac{Wl/8}{bh^2/6} = \frac{3Wl}{4bh^2} \dots\dots\dots(5)$$

(5)식으로부터 허용굽힘하중은

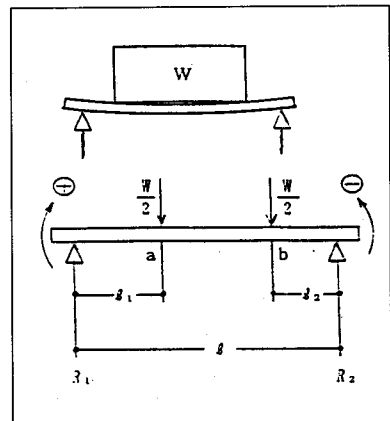
$$W_d = \frac{4bh^2 F_b}{3l} \dots\dots\dots(6)이다.$$

1-4. 2점집중하중

아래 그림과 같이 단순보에 4각형의 강체의 하중이 작용하면 중간 부분이 약간 휘면서 양단에 하중이 집중한다. 2점집중하중은 이와 같은 경우가 많다.

$l_1 > l_2$ 일때의 반력은 편하중일 때와 마찬가지로 아래의 식으로 계산한다.

$$R_1 = \frac{W}{2} \times \frac{l_1 - l_2}{l} + \frac{W}{2} \times \frac{l_2}{l} = \frac{W}{2} \left(\frac{l_1 - l_1 + l_2}{l} \right)$$



같은 방식으로

$$R_2 = \frac{W}{2} \left(\frac{l - l_2 + l_1}{l} \right)$$

a점 및 b점의 굽힘모우멘트를 각각 M_a, M_b 라고 하면, $M_a = R_1 \times l_1, M_b = R_2 \times l_2$ 이다. 이 경우, $l_1 > l_2$ 이므로 일반적으로 $M_a > M_b$ 이다.

$$F_b = \frac{M}{Z} = \frac{\frac{W}{2} \left(\frac{l - l_1 + l_2}{l} \right) l_1}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3Wl_1}{bh^2} \left(\frac{l - l_1 + l_2}{l} \right)$$

[표 1] 부하상재 1개당의 허용굽힘하중(등분포하중) kgf

양단활재의 안쪽 간격(cm)	부하상재의 단면치수(폭×두께)(cm)																		fb: 107kgf/cm ²	
	9×2.4	9×3	9×4	9×4.5	6×6	10×6	9×6	7.5×7.5	12×6	9×9	15×7.5	10×10	18×9	12×12	15×15	18×18	21×21	24×24		30×30
60	123	193	342	433	514	594	770	1003	1027	1733	2006	2378	3467	4109						
70	106	165	293	371	440	510	660	860	880	1486	1720	2038	2972	3522	6879					
80	92	144	257	325	385	446	578	752	770	1300	1505	1783	2600	3082	6019	10400				
90	82	128	228	289	342	396	514	669	685	1156	1338	1585	2311	2739	5350	9245	14680			
100	74	116	205	260	308	357	462	602	616	1040	1204	1427	2080	2465	4815	8320	13212	19722		
110	67	105	187	236	280	324	420	547	560	945	1094	1297	1891	2241	4377	7564	12011	17929		
120	62	96	171	217	257	297	385	502	514	867	1003	1189	1733	2054	4013	6934	11010	16435	32100	
130	57	89	158	200	237	274	356	463	474	800	926	1097	1600	1896	3704	6400	10163	15171	29631	
140	53	83	147	186	220	255	330	430	440	743	860	1019	1486	1761	3439	5943	9437	14087	27514	
150	49	77	137	173	205	238	308	401	411	693	803	951	1387	1644	3210	5547	8808	13148	25680	
160	46	72	128	163	193	223	289	376	385	650	752	892	1300	1541	3009	5200	8258	12326	24075	
170	44	68	121	153	181	210	272	354	363	612	708	839	1224	1450	2832	4894	7772	11601	22659	
180	41	64	114	144	171	198	257	334	342	578	669	793	1156	1370	2675	4622	7340	10957	21400	
190	39	61	108	137	162	188	243	317	324	547	634	751	1095	1298	2534	4379	6954	10380	20274	
200	37	58	103	130	154	178	231	301	308	520	602	713	1040	1233	2408	4160	6606	9861	19260	
220	-	53	93	118	140	162	210	274	280	473	547	648	945	1121	2189	3782	6006	8965	17509	
240	-	-	86	108	128	149	193	251	257	433	502	594	867	1027	2006	3467	5505	8218	16050	
260	-	-	-	100	119	137	178	231	237	400	463	549	948	948	1852	3200	5082	7585	14815	
280	-	-	-	93	110	127	165	215	220	371	430	510	880	880	1720	2972	4719	7044	13757	
300	-	-	-	-	103	119	154	201	205	347	401	476	693	822	1605	2773	4404	6574	12840	
320	-	-	-	-	96	111	144	188	193	325	376	446	650	770	1505	2600	4129	6163	12038	
340	-	-	-	-	-	105	136	177	181	306	354	420	612	725	1416	2447	3886	5801	11329	
360	-	-	-	-	-	99	128	167	171	289	334	396	578	685	1338	2311	3670	5478	10700	
380	-	-	-	-	-	-	122	158	162	274	317	375	547	649	1267	2190	3477	5190	10137	
400	-	-	-	-	-	-	-	150	154	260	301	357	520	616	1204	2080	3303	4931	9630	
420	-	-	-	-	-	-	-	143	147	248	287	340	495	587	1146	1981	3146	4696	9171	
440	-	-	-	-	-	-	-	-	140	236	274	324	473	560	1094	1891	3003	4482	8755	
460	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134	226	262	310	452	1047	1809	2872	4287	8374	
480	-	-	-	-	-	-	-	-	-	217	251	297	433	514	1003	1733	2753	4109	8025	

따라서 a점의 허용굽힘하중은

$$W_a = \frac{bh^2F_b}{3\left(\frac{l-l_1+l_2}{l}\right)l_1} = \frac{bh^2F_b l}{3(l-l_1+l_2)l_1}$$

.....(7)이다.

등분포하중일 때의 굽힘모우멘트 (Md)를, 이 경우의 굽힘모우멘트 (Ma)로 나누면,

$$\frac{M_d}{M_a} = \frac{\frac{Wl}{8}}{\frac{W}{2}\left(\frac{l-l_1+l_2}{l}\right)l_1}$$

$$= \frac{l^2}{4(l-l_1+l_2)l_1} \dots\dots(8)$$

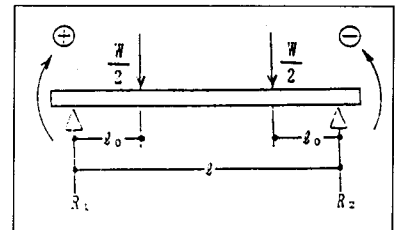
따라서 $W_a = W_d \times \frac{l^2}{4(l-l_1+l_2)l_1}$

가 되어 등분포하중일 때의 허용굽힘하중을 알고 있을 때는 (8)식의 배수를 곱하여 사용해도 좋다.

또한 $l=l_2$ 일 때, 그것을 l_0 라고 하면

$$\text{반력 } R_1 = R_2 = \frac{W}{2}$$

$$\text{굽힘모우멘트 } M_0 = \frac{W}{2}l_0 \text{이다.}$$



따라서 $F_b = \frac{M}{Z} = \frac{Wl_0/2}{bh^2/6} = \frac{3Wl_0}{bh^2}$ 이며,

(표 2) $l_1 = l_2 = l_0$ 일때의 배수표

l_0/l	배수	비 고
1/10	2.5	등분포하중과 같다. 중앙집중하중과 같다.
1/8	2.0	
1/5	1.25	
1/4	1.0	
1/2	0.5	

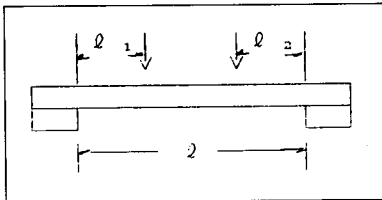
허용휨모우멘트 $W_0 = \frac{bh^2Fb}{3l_0}$
.....(9)이다.

이 경우, (9)식에 의하면 스패 l 과는 관계가 없다.

등분하중일 때의 굽힘모우멘트 (Md)를 M_0 로 나누면,

배수 = $\frac{Md}{M_0} = \frac{Wl/8}{Wl_0/2} = \frac{l}{4l_0}$
.....(10)이다.

따라서 등분포하중일 때의 허용굽힘하중을 알 때는 (10)식의 배수를 곱하여 사용해도 좋다.



3-2. 보의 치수에 대하여 필요한 중심 간격

KS에서는 보가 지지하는 천정하중은 400kgf/m²로 규정하고 있다.

천정하중: 0.04kgf/cm²

l_1 : 보의 길이(cm), l_2 : 보의 중심간격(cm)

b : 보의 폭(cm), h : 보의 두께(cm)라고 하면

보1개에 작용하는 천정하중 (W_1) = $0.04 \times l_1 \times l_2$

한편, 등분포하중일 때의 허용굽힘하중의 산출식은

$W = \frac{4bh^2Fb}{3l_1}$ 이다.

이 W 에 W_1 을 대입하면

$0.04 \times l_1 \times l_2 = \frac{4bh^2Fb}{3l_1}$ 이 된다.

보의 치수에 대하여 필요한 중심간격 $l_2 \leq \frac{1000bh^2Fb}{3l_1}$ (11)

3-3. 보받침대의 치수

보를 지지하기 위해서는 보받침대가 필요하다. 보받침대는 지주의 중심간격을 스패로 하여 보받침대의 중심 위치에 보가 위치하는 것을 예정하여 필요한 치수를 규정하고 있다.

여기에서

l_1 : 보의 길이, l_2 : 보받침대의 중심간격

b : 보받침대의 폭, h : 보받침대의 두께라고 하면 보 1개에 작용하는 천정하중 $W_1 = 0.04 \times 60 \times l_1 = 2.4l_1$

보받침대의 허용굽힘하중의 계산식은 중앙집중하중인데, 양쪽에 2개이므로 등분포하중의 경우의 계산식을 사용하여,

$W = \frac{4bh^2Fb}{3l_2}$ 이 된다.

여기에 W_1 을 대입하면,

$2.4l_1 = \frac{4bh^2Fb}{3l_2}$ 가 되고,

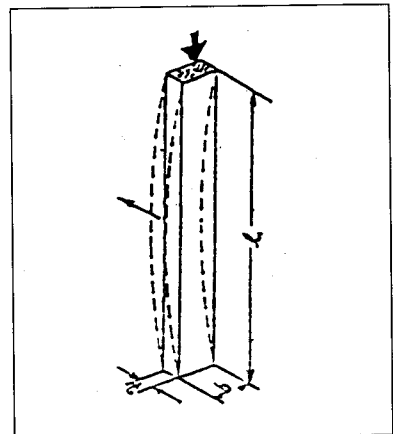
필요한 치수는 $bh^2 \geq \frac{1.8l_1l_2}{Fb}$
.....(12)

KS에서 규정하고 있는 보받침대의 치수는 이 (12)식에 의해서 산출한 것이다. 실제에는 보울트 조립상자를 제외하고는 보의 목구에 못을 박아 고정하므로 그 보지력을 고려하여 보의 길이를 2/3로 해도 좋으므로, (12)식에 2/3를 곱하면,

$bh^2 \geq \frac{1.2l_1l_2}{Fb}$ (13)이다.

3-4. 허용압축하중

기둥이 축방향으로 압축력을 받으면 그 단면 치수에 따라서 단순히 압축만 되는 경우와, 압축되기 전에 그림과 같이 옆으로 휘면서 파괴될 수도 있다. 이 현상을 좌굴이라고 한다. 단순히 압축만 되는 경우를 단주라고 하고, 좌굴현상을 일으키는 기둥을 길이에 따라서 중주와 장주로 구분하며, 각각의 허용압축강도의 계산은 다음과 같다.



허용압축강도(Fc)에 대하여, 허용좌굴강도를 (Fk)라고 하며 그 값은 다음과 같이 규정한다.

(a) 단주

$$6 > l/t \text{ 일 때 } Fk = Fc$$

(b) 중주

$$6 \leq l/t < 28 \text{ 일 때}$$

$$Fk = Fc(1.168 - 0.028 \times \frac{l}{t})$$

(c) 장주

$$28 \leq l/t \leq 46 \text{ 일 때}$$

$$Fk = \frac{300Fc}{(l/t)^2}$$

여기에서, 허용압축하중을 (P), 허용좌굴하중을 (Pk), 단면적(bxt)를 A라고 하면,

단주의 허용압축하중

$$Pk = Fc \times A \dots\dots\dots(14)$$

중주의 허용좌굴하중

$$Pk = Fk \times A \\ = Fc \times A(1.168 - 0.028 \times \frac{l}{t}) \dots\dots\dots(15)$$

장주의 허용좌굴하중

$$Pk = Fk \times A = \frac{300Fc \times A}{(l/t)^2} \dots\dots\dots(16)$$

3-5. 허용인장하중

허용인장하중은 길이에 관계없이 단면적 (A)에 허용인장강도를 곱하면 된다.

$$P_t = A \times F_t \dots\dots\dots(17)$$

☐

* 1995년 개정된 JIS규정에서는 SI단위를 채택하면서 다음과 같이 관련 계산 공식 및 목재의 규정 강도 등을 개정하였다.

1. 목재의 허용강도

길이에 직각인 휨강도		길이 방향의 압축강도	길이 방향의 인장강도
평방향	나무결 방향		
10.5MPa	8.1MPa	6.0MPa	12.7MPa

2. 상부하중

구분	개정치	
천정하중		3.9KPa
적상하중	10 톤 이하	9.8KPa
	30 톤 이하	14.7KPa
	30 톤을 초과	19.6KPa

3. 관련 계산공식

(1)부하상재의 허용굽힘하중

$$W = \frac{400bh^2Fb}{3l} \quad (N)$$

(2)보의 중심간격

$$l_2 \leq \frac{342bh^2Fb}{l_1^2} \quad (cm)$$

(3)보받침대의 치수

$$bh^2 \geq \frac{0.176 l_1 l_2}{Fb} \quad (cm^2)$$

(4)지주의 계산

a. 단주

$$6 > l/d \text{ 일 때 } Fk = Fc$$

b. 중주

$$6 \leq l/d < 28 \text{ 일 때}$$

$$Fk = Fc(1.168 - 0.028 \times \frac{l}{d})$$

c. 장주

$$28 \leq l/d \leq 46 \text{ 일 때}$$

$$Fk = \frac{300Fc}{(l/d)^2}$$

(비고)

SI단위에서는 두께 기호를 d로 하였다.

허용좌굴하중 계산식은 다음과 같다.
허용좌굴하중

$$Pk = Fk \times A = 100Fk \times b \times d (N)$$

이를 kN단위에 맞추어 변환하면

$$Pk = \frac{Fk \times b \times d}{10} \quad (kN)$$