학술기사

비파괴검사법을 이용한 구조용 목재의 압축강도 추정

Estimation of Compressive Strength of Structural Timber using Ultrasonic Pulse Velocity Method

이 용 택[1] 김 승 훈[2] 홍 성 욱[3]* 박 준 호[4]

Lee, Yong Taeg Kim, Seung Hun Hong, Seong Uk Park, Jun Ho

1. 서 론

최근 한옥에 대한 관심이 증가하면서 국가정책위원회는 국토교통부 등 관계부처와 합동으로 한옥육성방법을 추진하고 있으며, 한옥건축 R&D로 산업을 추진하고 한옥마을 시범사업과 한옥관계 법령의 제도개선 및 정비를 통하여 한옥건축을 활성화함으로써, 목조, 전통건축에 대한 관심도 늘고 있으며 이에 따라 목조주택들의 수요가 늘어날 것으로 전망된다. 또한 문화재의 가치와 중요성이 높아지면서 문화재를 보존하려는 인식도 높아지고 있다. 이 때문에 새로 지어지는 목조건조물과 전통 목조건조물의 보존에 필요한 유지관리에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 종래의 목조건축물은 구조해석과 재료성능에 대한 공학적 접근이나 검증 없이 일반적인 경험과 전통적 기술의 경험치를 사용하여 부재를 가정하고 설계하였기 때문에 구조적인 안정성 및 내구성을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 기술적 발전에도 한계를 지니게 되었다. 한편 미국이나 유럽의 경우 각국의 생산 목재에 대한 충분한 물성자료와 실험 자료를 통해 목재 성능과 규격을 표준화함으로써 공학적인 목구조 설계가 가능하도록 그 기준을 마련해 놓고 실무에 적용하는데 반해 국내에서는 그 연구 내용이 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비파괴검사법 중 초음파속도법을 이용하여 구조용으로 사용되는 목재의 압축강도를 측정하여 초음파속도와 압축강도의 상관관계를 분석하고, 회귀분석을 통해 구조용 목재의 압축강도 추정식을 제안하여 목재의 기초적인 물성을 손쉽게 예측하여 실무에 적용할 수 있도록 기초적인 자료를 제공하는 것이 목적이며, 이에 대해 소개하고자 한다.

2. 문헌 고찰

2.1 기존 연구

우리나라의 비파괴검사법을 이용한 목재 적용 연구는 2000년대 초반부터 이루어졌다. 장상식은 함수율과 섬유경사각을 이용해 압축강도 추정식을 제안하였고, 이순흠 외 3인은 목재 내부를 검사할 수 있는 초음파 CT 구현에 대한 연구를 하였다. 그리고 박준철 외 1인은 초음파속도와 종진동을 이용하여 낙엽송의 휨강도를 추정하였으며, 심국보 외 2인은 비파괴 시험으로 국산 침엽수 구조부재의 등급을 구분에 대한 연구를 하였다. 하지만 위 연구들에서 사용된 수종들은 한두 가지에 불과하다. 목재는 그 수종마다 조직이 다르고 불균일하기 때문에 각각의 수종에 맞는 연구가 필요하다.

1) 국립한밭대학교 건축공학과 교수, 공학박사
2) 국립한밭대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
3) 국립한밭대학교 도시건축재생기술연구소 연구교수, 공학박사
4) 국립한밭대학교 건축공학과 연구원, 공학석사
* E-mail : suhong7@hanbat.ac.kr

2.2 초음파속도법

초음파속도법의 원리는 변환기에 짧고 강한 전기적 신호를 보내 변환기가 공명주파수에 따라 진동하게 되면 변환기의 진동이 접촉매질에 의해 부재에 전달하게 되고 반대면의 수신 변환기에 의해 감지된다. 탄성체 내부를 전파하는 길이방향 초음파 펄스 속도 V는 다음 식 (1)과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)}} \quad (1)$$

여기서,
E : 동탄성계수 v : 푸아송비 ρ : 밀도

초음파속도법은 KS F 2731과 ASTM C597-97에서 자세히 설명한다. 하지만 위의 규정은 콘크리트에 대한 초음파속도법의 규정이며 아직까지 목재에 대한 비파괴 검사법의 규준 및 적용사례, 연구는 미비한 실정이다.

3. 실 험

3.1 실험계획

본 연구에서는 국내에서 구조용으로 사용되고 있는 8가지의 수종을 사용하였다. 시험에 사용된 수종은 리기다소나무(Southern yellow pine, 이하 SYP), 아메리카 적송(Red pine, 이하 RP), 알래스카 측백나무(Yellow cedar, 이하 YC), 솔송나무(Hemlock, 이하 HL), 편백나무(Hinoki, 이하 HK), 가문비나무(Spruce, 이하 SP), 삼나무(Japanese cedar, 이하 JC) 및 태평양철목(Merbau, 이하 MB)를 이용하였다.

본 연구에 사용된 시험편의 크기는 ASTM D 198에서 규정에 준하여 제작하였다. Table 1에 시험체 일람을 나타내었으며, 시험은 기건상태와 절건상태일 때를 나누어 시험을 하였으며, 각 수종마다 10개씩 시험편을 준비하여 총 80개의 목재 시험편으로 압축강도는 ASTM D 198, 초음파속도법은 KS F 2731, 함수율은 KS F 2199에 준하여 시험을 실시하였다.

3.2 실험결과

초음파속도 측정한 뒤의 80개 시험체를 압축강도 시험

Table 1 시험체 일람

수종	원목/집성		갯수
SYP	원목	시험편 크기	10
RP	집성		10
YC	집성		10
HL	집성	82×82×164 (mm)	10
HK	집성		10
SP	원목		10
JC	원목		10
MB	원목		10

Table 2 압축강도

수종	함수	압축강도 (MPa)					
		1	2	3	4	5	평균
SYP	기건	34.12	22.89	32.67	30.32	30.65	30.13
	절건	40.94	42.03	48.77	54.38	62.92	49.81
RP	기건	26.77	27.22	27.50	27.41	24.99	26.78
	절건	49.17	44.85	46.74	41.45	38.65	44.17
YC	기건	32.08	32.59	35.04	34.11	30.97	32.96
	절건	49.55	47.98	40.35	40.44	54.94	46.65
HL	기건	31.27	31.92	27.24	33.79	32.74	31.39
	절건	62.28	53.86	64.35	60.39	62.65	60.71
HK	기건	27.88	22.63	25.77	23.69	24.35	24.86
	절건	42.08	38.75	25.69	40.78	29.31	35.32
SP	기건	38.81	37.17	38.90	36.74	37.48	37.82
	절건	68.63	68.44	69.61	67.74	70.67	69.02
JC	기건	26.13	26.54	26.92	27.68	27.15	26.88
	절건	24.70	31.35	41.05	30.10	37.55	32.95
MB	기건	75.79	74.16	78.61	75.89	76.00	76.09
	절건	82.40	89.36	92.07	90.29	79.80	86.79

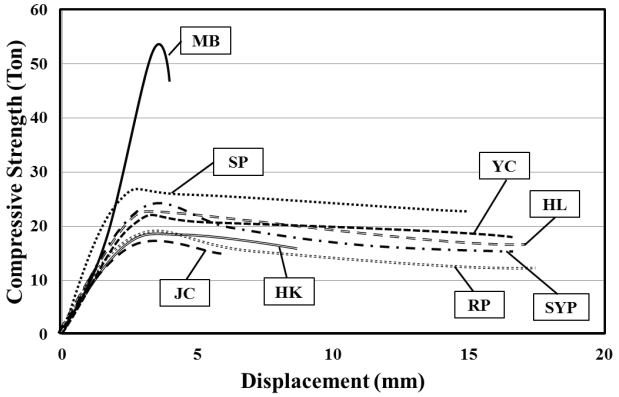

Fig. 1 하중-변위 곡선

한 결과와 기건 시험체의 하중-변위 곡선을 각각 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다.

기건과 절건상태의 시험편의 강도 증가율을 살펴보면

Table 3 초음파속도

		초음파속도 (km/sec)																	
		직접법 (섬유방향)						사각법						직접법 (섬유직각방향)					
		1	2	3	4	5	평균	1	2	3	4	5	평균	1	2	3	4	5	평균
SYP	기건	4.16	3.58	4.05	4.12	4.81	4.14	4.37	2.98	4.32	4.04	4.75	4.09	2.01	2.37	1.94	2.05	1.97	2.07
	절건	5.93	4.51	5.03	4.99	4.90	5.07	4.07	2.59	3.01	3.17	3.06	3.18	2.05	2.12	2.07	1.96	1.24	1.89
RP	기건	5.25	4.94	5.78	5.41	5.39	5.35	4.06	4.20	4.32	3.91	4.29	4.15	1.74	1.48	1.54	1.69	1.40	1.57
	절건	5.45	6.15	6.49	6.56	5.49	6.03	3.34	3.52	3.76	3.33	3.48	3.49	1.76	1.91	1.82	1.86	2.10	1.89
YC	기건	4.99	5.13	5.41	5.39	5.07	5.20	4.56	4.16	4.22	4.57	4.38	4.38	1.64	1.66	1.49	1.59	1.64	1.60
	절건	6.04	6.19	5.72	5.76	6.88	6.12	3.92	3.99	2.64	4.12	3.37	3.61	2.20	2.13	2.20	2.26	1.83	2.12
HL	기건	6.07	5.67	5.13	5.68	5.89	5.69	3.24	3.48	4.25	3.35	3.31	3.53	1.62	1.63	1.42	1.36	1.39	1.48
	절건	6.49	6.44	6.41	6.33	6.38	6.41	4.09	4.10	4.25	3.90	3.58	3.98	1.66	1.63	1.64	1.64	1.61	1.64
HK	기건	4.72	4.41	4.45	3.76	4.70	4.41	4.02	4.04	4.07	3.66	4.15	3.99	1.69	2.28	2.26	1.80	2.14	2.03
	절건	4.97	5.23	4.40	4.84	4.22	4.73	4.33	3.53	2.93	3.50	3.64	3.59	1.94	1.77	2.55	2.59	3.52	2.48
SP	기건	5.69	5.85	5.54	5.52	5.56	5.63	4.02	4.38	4.33	3.66	3.92	4.06	1.35	1.44	1.58	1.30	1.31	1.40
	절건	6.44	6.09	6.04	6.46	6.49	6.30	4.56	3.65	4.06	4.00	3.24	3.90	1.57	1.41	1.43	1.57	1.51	1.50
JC	기건	4.90	4.58	4.99	5.07	5.12	4.93	4.30	4.35	4.20	4.35	4.17	4.28	2.18	1.88	1.51	1.47	1.78	1.77
	절건	5.80	6.02	6.07	5.51	5.66	5.81	3.23	2.25	1.98	3.42	3.24	2.82	2.24	2.27	2.24	2.30	2.04	2.22
MB	기건	5.91	5.74	5.74	5.69	5.76	5.77	4.35	4.40	4.16	4.49	3.84	4.25	2.07	2.04	1.90	1.82	2.14	1.99
	절건	5.80	6.02	6.07	5.51	5.66	5.81	3.23	2.25	1.98	3.42	3.24	2.82	2.24	2.27	2.24	2.30	2.04	2.22

12.33 ~ 48.30%로 평균 32.76%의 압축강도 증가율을 보였다. 하중-변위곡선에서는 활엽수 MB는 취성파괴를 보였으며 나머지 침엽수 시험체는 최대강도 이후 압입현상을 보이며 강도가 저하 되었다. 기건, 절건상태의 시험편 80개를 직접법(섬유방향, 섬유직각방향), 사각법을 이용해 초음파속도 측정한 결과를 Table 3에 나타내었다. 그 결과 직접법 섬유방향의 경우 기건 시험편과 절건 시험편을 비교 했을 때, 초음파속도가 모두 증가 하였으며 증가율은 MB 0.69%에서 SYP 18.34%으로 평균 11.14%로 증가하였다. 사각법의 경우는 JC-51.77에서 HL 11.31%로 HL 시험체만 절건상태에서 초음파속도가 증가하였으며 나머지 시험체에서는 모두 큰 폭으로 초음파속도가 줄어든 것을 알 수 있다. 직접법 섬유직각 방향 측정 결과는 SYP -9.52에서 YC 24.53%로 평균 12.14%의 증가율을 나타내었으며 SYP 시험체만이 파속도가 감소하였고, 나머지 시험체는 파속도가 증가하였다.

함수율은 각 수종 별로 5개씩 건조 전, 후의 질량을 측정하여 Table 4에 나타내었다. 활엽수인 MB에서 가장 낮은 9.65%의 함수율을 나타냈으며, 나머지 침엽수는13.10 ~ 17.38% 함수율을 나타냈다. KS F 3020 침엽수 구조용재에서 함수율 18%이하, KS F 3021 구조용 집성재 함수율 15%이하의 목재를 구조용으로 사용할 수 있는 목재로 정의하고 있으며, 시험결과 8수종 모두 만족하는 것을 알 수 있다.

Table 4 함수율

수종	함수율 (%)					
	1	2	3	4	5	평균
SYP	13.72	12.19	11.75	15.31	12.52	13.10
RP	13.14	13.38	12.92	13.48	13.73	13.33
YC	14.66	14.66	14.27	14.59	14.67	14.57
HL	14.09	15.76	13.60	16.14	16.51	15.22
HK	16.01	15.75	15.80	15.81	15.69	15.81
SP	15.98	16.06	15.87	16.04	15.93	15.98
JC	17.39	17.31	17.35	17.47	17.35	17.38
MB	10.08	9.63	9.43	9.37	9.72	9.65
평 균 (%)						14.38

3.3 압축강도와 초음파속도의 상관관계

초음파 속도와 압축강도의 상관관계 그래프를 Fig. 2에 나타내었으며, 그래프를 통해 각각의 수종마다 분포되어 있는 점이 다름을 알 수 있다. 이는 각 수종마다 강도에 따른 파속도의 분포가 다르다는 것을 나타내므로 각각의 수종에 맞는 압축강도 추정식이 필요하다고 판단된다. 이를 회귀 분석하여 각각의 수종에 맞는 초음파속도를 이용한 압축강도 추정식을 다음 Table 5에 나타내었다.

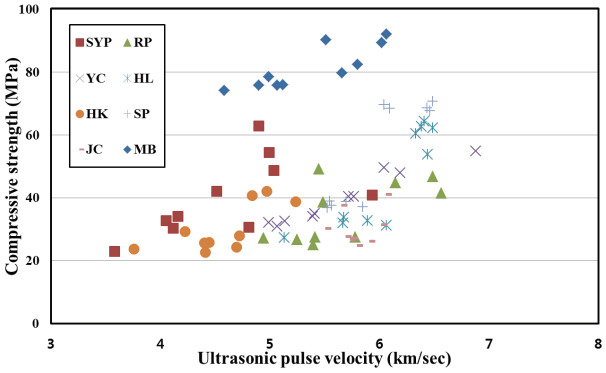

Fig. 2 압축강도와 초음파속도(직접법–섬유방향) 상관관계

Table 5 각 수종별 초음파속도를 이용한 압축강도 추정식

수종	추정식	결정계수
SYP	$10.962\,V_p - 10.556$	$R^2 = 0.35$
RP	$11.065\,V_p - 27.487$	$R^2 = 0.39$
YC	$13.867\,V_p - 38.654$	$R^2 = 0.95$
HL	$30.534\,V_p - 138.64$	$R^2 = 0.76$
HK	$13.014\,V_p - 29.383$	$R^2 = 0.52$
SP	$37.779\,V_p - 172.09$	$R^2 = 0.81$
JC	$9.5591\,V_p - 25.424$	$R^2 = 0.09$
MB	$11.237\,V_p + 21.086$	$R^2 = 0.72$

4. 결 론

본 연구에서는 비파괴검사법 중 초음파속도법을 이용하여 구조용 목재의 압축강도와 초음파속도의 상관관계를 분석하고, 회귀분석을 통하여 구조용 목재의 압축강도 추정식을 제안하였으며, 각 수종에 맞는 강도 추정식을 사용한다면 신뢰성 있는 압축강도 추정이 가능하다. 또한, 초음파속도는 각 수종마다 다르게 분포되어 있는 것을 알 수 있음을 통하여 상관관계의 명확성과 추정식의 신뢰성을 높이기 위한 실험이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 이강민 “한옥 현재화를 위한 정부 사업”, 한국주거학회지, 6(1), 2011.
2. 박학길, 한재수, 황선우, “간벌 소경재를 이용한 집성목재 보의 휨 거동특성에 관한 연구”, 대한건축학회, 논문집 구조계, 19(6), 2003.
3. 장상식, “함수율과 섬유경삭각이 목재의 압축강도 및 초음파 전달속도에 미치는 영향”, 목재공학, 28(2), 2000.
4. 이순흠, 전흥구, 유석기, 이원흠, “목재 검사용 초음파 CT구현”, 한국정보기술학회, 한국정보기술학회 논문지, 1(2), 2003.
5. 박준철, 홍순일, “비파괴 시험방법을 이용한 낙엽송재 원목의 휨강도 특성 평가”, 한국산림바이오에너지학회, 산림바이오에너지, 22(2), 2003.
6. 심국보, 박정환, 김광모, “비파괴 시험에 의한 국산 침엽수 2×6" 구조부재의 등급구분”, 한국산림바이오에너지학회, 산림바이오에너지, 25(2), 2006.
7. KS F 2731, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험방법”, 한국표준협회, 2013.
8. ASTM C597–97, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, American Standard for Testing Materials.
9. 노명수, 이형준, “비파괴 검사 개론”, 선학출판사, 2010.
10. 홍성욱, 조영상, “초음파 속도법 및 반발경도법을 이용한 콘크리트 모의부재 압축강도 추정에 관한 연구”, 대한건축학회, 대한건축학회 논문집, 구조계, 27(1), 2011.
11. 홍성욱, 김성범, 주현지, 조영상, “응력파 기반 비파괴 검사법을 이용한 콘크리트 슬래브의 압축강도 추정 및 공기량 영향에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회, 대한건축학회 논문집 구조계, 24(12), 2008.
12. ASTM D 198–09, “Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes”, American Standard for Testing Materials.
13. KS F 2199, “목재의 함수율 측정 방법”, 한국표전협회, 2006.

담당 편집위원: 김태수
(한밭대학교 건축공학과 교수)
tskim@hanbat.ac.kr