

목재 데크재의 초음파 비파괴시험에 의한 인위적인 결함의 영향평가¹

오 세 창^{2,†}

Evaluation of Influences of Artificial Defect of Wood Deck Using Non-destructive Ultrasonic Testing¹

Sei-Chang Oh^{2,†}

요 약

목재 데크재에 인위적인 결함인 구멍을 부여하고 이들의 성능평가를 위해 초음파 비파괴 시험법을 적용하였다. 구멍의 크기와 개수를 달리하여 각각에 대한 초음파 전달속도를 측정하고 탄성계수를 산정하여 그 영향을 비교분석하였다. 시험결과 구멍의 크기가 커짐에 따라 초음파 전달속도와 탄성계수는 감소하였으며 이들 상호간에는 직선상관관계를 보였다. 구멍의 크기가 증가하면 초음파의 전달 길이는 증가하며 이에 따라 초음파속도는 감소하였지만 구멍의 크기가 15 mm 이하로 작은 경우에는 구멍이 없는 부재에 비해 그 차이가 작게 나타났다. 구멍의 개수가 많아짐에 따라 초음파 전달속도와 탄성계수는 감소하였으며 이들 상호간에는 높은 직선상관관계를 보였다. 구멍의 개수가 3개인 경우 초음파속도는 약 3.5% 정도 감소한데 비하여 탄성계수는 27% 정도로 현저히 감소하여 더 큰 감소경향을 나타내었다. 이들의 결과로부터 구멍의 크기와 개수는 초음파 전달속도와 탄성계수에 영향을 미치며 구멍의 크기가 크고 개수가 많아질수록 그 영향은 더욱 커질 것으로 여겨진다. 또한 작은 결함의 탐지를 위해서는 초음파 전달속도에만 의지할 것이 아니라 여러 초음파 변수를 고려하여 적용하는 방법을 고려하여야 할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

Non-destructive ultrasonic testing was applied to evaluate the performance of wood deck material with hole as artificial defect. Ultrasonic velocities and modulus of elasticity were measured according to different diameters and numbers of holes, and comparative analysis to each data were done. From the results, ultrasonic velocities and modulus of elasticity decreased with an increase in the hole size and showed a negative linear correlation with the size of hole, respectively. As the hole size increased, ultrasonic velocities decreased, but their difference was small in the case of the hole size under 15 mm. Also, ultrasonic velocities and modulus of elasticity decreased with increasing the number of holes and showed a strong negative linear correlation to the number of holes. As the number of holes increased,

¹ Date Received September 17, 2015, Date Accepted October 21, 2015

² 대구대학교 생명환경대학 산림자원학과. Department of Forest Resources, Daegu University, Kyongsan, 38453, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 오세창(e-mail: osc@daegu.ac.kr)

ultrasonic velocities decreased to 3.5%, but modulus of elasticity decreased to 27%. Therefore, the number of holes showed greater influence to modulus of elasticity than ultrasonic velocity. Overall, the size and number of holes influenced to ultrasonic velocity and modulus of elasticity, and their influence will be greater as the size and number of holes increases. These results suggested that several ultrasonic parameters rather than a single ultrasonic velocity should be applied to detect small defects in wood decking materials.

Keywords : non-destructive ultrasonic testing, wood deck, ultrasonic velocity, modulus of elasticity

1. 서 론

목재의 재질은 용도에 직접 영향을 미치며 목재의 결함은 목재의 용도를 제한하고 가치를 저하시키는 주원인이 되며 결함에는 내재적인 결함 이외에도 부후, 할렬 등 외부적인 영향에 따른 결함도 많이 발생한다. 이러한 결함들로 인해 목재로 된 건물의 수명이 짧아지고 사용목재의 내구연한이 감소되어 심지어는 국부적인 파괴에까지 이르기도 한다. 따라서 이런 결함들을 미리 탐지하고 정량화시켜 안전을 확보하기 위해 많은 노력이 있어 왔다. 이 방법 중에는 파괴시험법과 비파괴 시험법이 있는데 전자는 재료의 기계적 성질 시험법에 근거를 두고 있는 반면 후자는 재료를 파괴하지 않고 시험 후에도 사용이 가능하도록 하는 시험법이다. 이에 따라 다양한 비파괴 시험법이 목재의 재질평가에 적용되었으며 그 경향은 갈수록 증대되고 있다. 비파괴 시험법 중 초음파 시험법은 목재에 손상을 주지 않고, 장비의 구성이 비교적 간단하여 국내에서도 목재와 목조건축물의 재질성능시험과 열화탐지에 많이 사용되고 있다 (Jang, 2000; Lee *et al.*, 2003; Park and Hong, 2008; Park and Kim, 2014; Hwang, *et al.*, 2014).

목재 데크재는 목재로부터 생산한 판재를 목조주택이나 야외 조경시설의 바닥상판 등에 사용하는 재료로 환경 친화적 목적과 더불어 미관상의 목적으로 많이 사용하고 있다. 최근에는 품질의 차이가 심한 침엽수 방부목에서 탈피하여 내구성이 뛰어나고 내후성이 강한 멀바우, 방길라이, 이페 등의 소위 천연목이라 불리는 고밀도 활엽수재가 많이 사용되고 있다. 목재 데크재는 부재가 목재이므로 내재적으로 가진 결함 이외에도 외기에 노출시켜 사용하는 경우

사용 중 할렬이나 부후 등의 결함이 발생할 수 있는 여지가 많다. 할렬의 경우 표면할렬 같은 경우는 눈에 보이지만 내부할렬은 눈에 보이지 않아 육안으로 판별하기가 어렵다. 이에 따라 목재에 내부결함을 부여하고 결함이 없는 부분과의 초음파속도를 비교하여 그 영향을 분석한 결과 큰 차이를 보였다(Shaji *et al.*, 2000). 또한 집성재에서 내부의 부후된 것과 되지 않은 쪽에 대한 검증을 위해 초음파전달속도의 차이를 통해 전체적인 속도분포 지도를 작성하여 유지관리에 필요한 근거를 제시하였다(Carrasco and Teixeira, 2012). 부후는 목재 내부가 미생물에 의해 목재 내부의 세포가 완전히 파괴된 경우도 있는데 이 경우에도 육안으로는 피해를 파악하기가 힘들어서 실제 데크재의 유지관리에 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서 설치된 데크재의 유지관리를 잘하기 위해서는 상태를 제대로 진단할 수 있는 성능 검증방법이 필요하며, 이에 대한 방법 중의 하나로 초음파 비파괴시험이 매우 효율적인 검증 방안이 된다. 특히 결함의 탐지와 이에 따른 초음파전달속도의 상관특성을 분석하기 위해 재료에 인위적인 결함(구멍)을 만들어서 이들 결함의 크기와 개수에 따른 초음파 전달속도의 상관관계를 분석하면 결함을 함유한 재료의 성능파악이 효율적으로 이루어질 수 있으리라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 현재 데크재로 많이 사용하고 있는 활엽수재의 하나인 멀바우 목재 데크재에 대하여 초음파 비파괴 시험법을 적용하여 인위적인 결함을 부여한 각 부재에 대해 그 크기가 수가 부재에 미치는 영향을 조사하고 정량화하여 향후 목재 데크재의 유지관리에 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 하였다.

Table 1. Characteristics of tested materials

Material	Size (mm)	Density (kg/m ³)	M.C. (%)	No. of specimens
Merbau (<i>Intsia spp.</i>)	19 × 90 × 3300	877	9.3	10

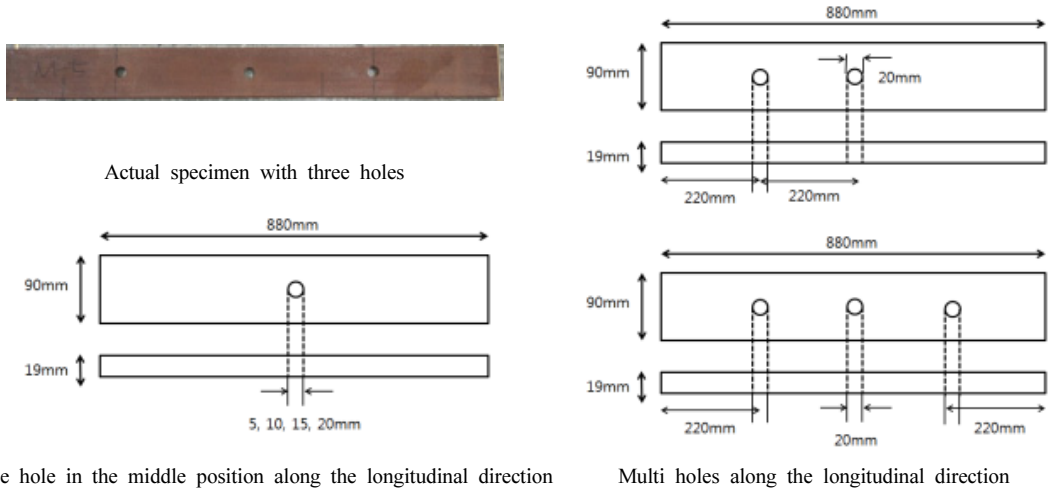


Fig 1. Configuration of hole (s) size and location in the tested materials.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 시험재료는 현재 목재 데크재로 많이 유통되어 현장에서 사용되고 있는 고밀도 활엽수재인 멀바우(Merbau)재를 전문업체로부터 구입하여 시험용 공시재료로 하였으며 그 내역은 Table 1과 같다.

공시재료에 대해 길이를 880 mm로 재단한 다음 스위스 Proceq사의 Pundit Lab Plus 기기를 사용하여 양 단면에 초음파 트랜스듀서를 설치하고 초음파 전달속도를 측정하였으며 측정이 끝난 후 구멍크기에 따른 효과를 검증하기 위해 같은 시험편에 대해 Fig. 1과 같이 직경 5 mm의 구멍을 뚫어 다시 초음파 속도를 측정하였으며 이후 같은 위치에서 10, 15, 20 mm 크기의 순으로 차례로 구멍을 뚫어 각 크기의 구멍을 가진 부재의 초음파 속도를 측정하였다. 추가적으로 구멍 개수에 따른 효과를 검증하기 위해 20 mm 크기의 구멍을 Fig. 1과 같이 1, 2, 3개를 차례로



Fig 2. Schematic view of testing of material with holes using ultrasonic device.

뚫어 구멍 개수별로 Fig. 2와 같이 각각의 초음파 속도를 측정하였다. 각 시험에 따른 시험편의 개수는 10개로 하였으며 사용된 초음파기기의 트랜스듀서는 주파수는 54 kHz이며 펄스폭은 9.3 μs였다.

초음파 전달속도는 계측기로부터 자동으로 측정되었으며 재료의 탄성계수(E)는 다음 식에 따라 산정하였다.

Table 2. Test results of ultrasonic test according to hole size (diameter)

Hole size		Velocity (m/sec)	Ratio ³⁾	MOE ($\times 10^9$ Pa)
mm	% ¹⁾			
0	-	5682 (5.2) ²⁾	1.000	27.36
5	5.5	5634 (5.7)	0.992	26.66
10	11.0	5606 (5.8)	0.987	26.40
15	16.6	5589 (6.0)	0.984	26.25
20	22.2	5568 (5.9)	0.980	26.05

1) % ratio of hole diameter to material width, 2) coefficient of variation (COV, %), 3) ratio of materials with hole to clear material

$$E = \rho V^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ρ = 재료의 밀도(kg/m³) V = 초음파전달속도(m/s)

3. 결과 및 고찰

3.1. 구멍크기에 따른 효과

구멍의 크기에 따른 초음파 전달속도를 측정 한 비파괴시험 결과는 Table 2에 나타내었다.

측정된 값으로부터 살펴보면 부재에서 구멍의 존재여부는 초음파 전달속도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 구멍의 크기가 증가할수록 초음파 속도는 감소하였으며 구멍이 없는 부재에 대해 구멍이 있는 부재의 속도의 차이는 0.98 - 0.99 정도로 나타났다. 구멍의 크기가 20 mm재인 경우 초음파속도는 5682 m/s에서 5568 m/s로 감소하였으며 탄성계수는 27.36 GPa에서 26.05 GPa로 감소하였다. Lin과 Wu (2013a)는 물푸레나무에 대한 초음파 실험에서 구멍의 크기가 10 mm와 20 mm에서 초음파 전달속도의 차이는 0.987 정도로 나타난다고 하였으며 본 연구에서도 0.993 정도 나타난 결과와 비교해 볼 때 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 또 Raquel *et al.* (2011)은 열대산 Pequiá재에 대한 연구에서 구멍의

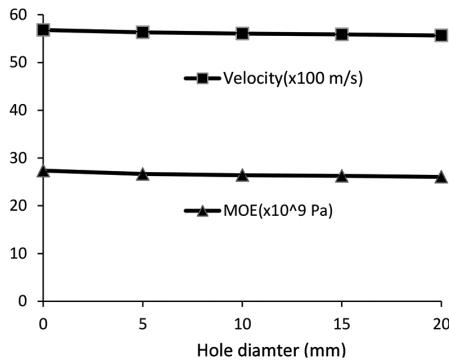
직경비가 5%, 10%인 경우 초음파 전달속도의 비는 구멍이 없는 재에 비해 각각 0.960, 0.958 정도로 나타난다고 하였는데 본 연구결과에 비교해 보면 감소경향은 유사한 것으로 생각된다. 구멍의 직경 (d)에 대한 초음파전달속도(V)와 탄성계수(E) 간에는 직선회귀식이 성립하였으며(Fig. 3), 각각에 있어서 $V = -27.3d + 5697.8$, 상관계수는 $R^2 = 0.953$, $E = 0.0602d + 27.148$ 상관계수는 $R^2 = 0.887$ 로 나타났다. Lin과 Wu (2013c)는 잣나무에 대한 초음파 실험에서 구멍직경과 탄성계수간의 상관계수는 0.804로 나타났다고 하였으며 본 연구결과에서도 마찬가지로 높은 상관관계를 보여주었다. Mestre *et al.* (2013)은 저가의 초음파 전달속도 측정장치를 구성하고 소나무(*Pinus pinaster*)재에 대해 구멍의 크기를 단계적으로 크게 하면서 초음파 전달속도를 측정 한 결과 구멍의 크기가 작은 경우에는 그 결함을 탐지해 내기가 어려우며 이는 파장(wave length)으로 인한 것이라고 하였다. 따라서 작은 결함이 있는 경우 그 차이를 검증해내어 개량화하는 데에는 신중한 고려가 필요하며 측정센서의 주파수를 증대시켜야 한다고 하였다. 따라서 추후 연구에서 주파수의 영향을 고려해 볼 필요가 있다고 생각된다.

구멍의 존재로 인한 초음파 전달속도의 차이는 초음파가 전달될 때 Fig. 4에서처럼 구멍주위의 가장 짧은 주변가장자리를 통해 초음파가 전달된다고 하

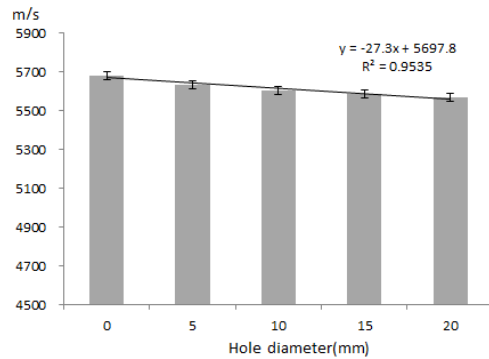
Table 3. Comparison of ultrasonic wave path length and velocity

This study				Raquel et al. (2013)			
Hole size (%) ¹⁾	Velocity (m/sec)	Ratio ²⁾	Path length (mm)	Hole size (%)	Velocity (m/sec)	Ratio	Path length (mm)
0	5682	1.000	880.00	0	1670	1.000	390
5.5	5634	0.992	882.85	5	1604	0.960	426
11.0	5606	0.987	885.70	10	1600	0.958	427
16.6	5589	0.984	888.55	15	1480	0.886	447
22.2	5568	0.980	891.40	20	1470	0.880	449
N.A	-	-	-	25	1470	0.880	449

1) % ratio of hole diameter to material width, 2) ratio of materials with hole to clear material



Effect of hole size (diameter)



Correlation between hole size and ultrasonic velocity

Fig 3. Effect of hole size to ultrasonic velocities and elastic modulus.

였으며(Raquel et al., 2013), 이들의 연구결과와 본 연구의 결과를 비교한 것을 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 보면 구멍의 크기가 증가할 때 전달 길이는 증가하였으며 초음파속도는 감소하였다. 비교 데이터에서 보면 구멍의 크기가 10% 전후까지는 같은 비율로 초음파속도가 감소하였지만 15 mm 전후에서 초음파속도의 감소폭은 더 크게 나타났다. 최대구멍크기에서 전달길이가 1.3% 증가할 때 초음파속도의 감소폭은 2%였으며, 비교 데이터의 경우 전달길이가 15.1% 증가할 때 초음파속도의 감소폭은 13.6%였다. 상기결과를 종합해보면 구멍의 크기가 증가함에 따라 초음파속도는 감소하고 탄성계수도 감소하여 비교데이터처럼 구멍의 크기가 큰 경우(90 - 330 mm)에는 그 차이를 검증해 내는 것이 용이하

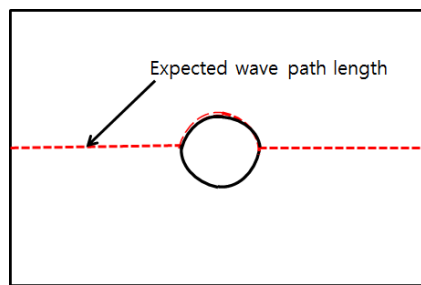


Fig 4. Expected wave path length around hole (Raquel et al., 2013).

지만 본 연구에서처럼 구멍의 크기가 작은 경우에는 그 차이를 검증해내어 정량화 하는 데에는 신중한 고려가 필요하다고 생각된다. 또 Yavari et al. (2011)

Table 4. Test results of ultrasonic test according to number of hole (s)

No. of hole (s)	Velocity (m/sec)	Ratio ²⁾	MOE ($\times 10^9$ Pa)
0	5682 (5.2) ¹⁾	1.000	27.36
1	5568 (5.9)	0.978	26.03
2	5503 (5.7)	0.968	20.66
3	5484 (5.6)	0.965	20.04

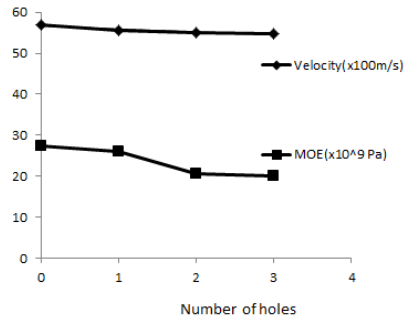
1) coefficient of variation (COV, %), 2) ratio of materials with hole (s) to clear material

은 작은 구멍의 경우에는 비파괴검사 중 자유진동법에 의한 FFT 분석시험 결과 5 mm 크기의 구멍은 FFT 분석에서 큰 영향이 나타나지 않는 것으로 조사되어 유의를 요한다고 하였다.

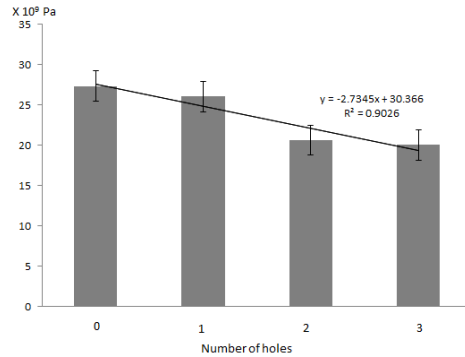
3.2. 구멍의 개수에 따른 효과

구멍의 개수에 따른 초음파 전달속도를 측정된 비파괴시험 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4로부터 살펴보면 부재의 구멍의 개수는 초음파 전달속도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 구멍의 수가 많아질수록 초음파 속도는 감소하였으며 구멍이 없는 부재에 대해 구멍이 있는 부재의 속도의 차이는 0.965 - 0.978 정도로 나타났다. 구멍의 개수가 3개인 경우 초음파속도는 5682 m/s에서 5484 m/s로 약 3.5% 정도 감소하였으며 탄성계수는 27.36 GPa에서 20.04 GPa로 27% 정도로 현저히 감소하였다. Lin과 Wu (2013c)는 잣나무(Korean pine)에 대한 초음파 실험에서 구멍의 크기가 15 mm에서 구멍의 개수는 초음파 전달속도와 탄성계수에 크게 영향을 미치며 이들의 상관계수는 각각 0.895와 0.658 정도로 나타난다고 하였다. 또 응력파를 이용한 같은 연구(Lin과 Wu, 2013b)에서 구멍의 개수(n)와 초음파 전달속도(V) 및 탄성계수(E)와의 상관계수는 각각 0.968과 0.857 정도로 나타난다고 하였다. 본 연구에서는 구멍의 개수와 초음파 전달속도 및 탄성계수와의 상관계수는 각각 0.903, 0.906으로 산



Effect of number of holes



Correlation between number of holes and elastic modulus

Fig 5. Effect of number of holes to ultrasonic velocities and elastic modulus.

정되어 높은 상관관계를 나타내었으며 직선 회귀식은 $V = -0.659n + 5658.1$, $E = -2.73n + 30.366$ 로 나타났다(Fig. 5).

이들의 결과로부터 구멍의 개수는 초음파 전달속도와 탄성계수에 미치는 영향이 크며 구멍의 크기가 크고 개수가 많아질수록 그 영향은 더욱 커질 것으로 보인다. 또한 작은 결함의 탐지를 위해서는 초음파 전달속도에만 의지할 것이 아니라 Kabir와 Araman (2002)이 지적하였듯이 에너지와 에너지/펄스값 등의 여러 변수를 고려하여 가장 정확한 변수를 찾아내는 방법을 고려해 볼 가치가 있다고 생각된다.

4. 결 론

테크용재로 많이 사용되고 있는 멀바우 재에 대해 구멍의 크기를 차례로 달리하고, 또 구멍의 개수를 달리하여 각각에 대한 초음파 시험법을 적용하고 초음파 속도와 탄성계수를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 구멍의 직경에 대한 초음파속도의 영향에서 구멍의 크기가 증가함에 따라 초음파속도는 감소하고 탄성계수도 감소하는 것으로 나타났다. 감소경향은 구멍의 크기가 클수록 크게 나타났으며 직경 15 mm 전후에서 초음파속도의 감소폭은 더 크게 나타났다. 또 구멍의 수는 초음파 전달속도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 구멍의 수가 많아질수록 초음파 속도는 감소하였으며 구멍의 개수가 3개인 경우 초음파속도는 약 3.5% 정도 감소한 반면 탄성계수는 27% 정도로 현저히 감소하여 초음파속도보다 탄성계수에 미치는 영향이 더 크게 나타났다. 구멍의 크기가 작은 경우에는 그 차이가 작아 이를 검증해 내는 데에는 미세한 차이에 주의할 필요가 있다고 생각된다.

추가적인 연구를 통하여 구멍의 크기가 작은 경우에는 그 차이를 검증해내어 개량화하는 데에는 신중한 고려가 필요하며 초음파 속도뿐만 아니라 측정센서의 주파수를 증대시켜 적용하거나 에너지흡수율 등 여러 다른 초음파 변수들도 고려하여 그 영향을 탐지해 내는 방법을 적용할 필요성이 제기되었다.

사 사

본 논문은 2014년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었다. 시험편의 제작과 실험에 도움을 준 김세호, 백인주, 유연정 학생에게 감사드린다.

REFERENCES

Carrasco, V.M., Teixeira, A.R. 2012. Methodology for inspection of wood pathologies sing ultrasonic pulses. *Cerne, Lavras* 18(3): 479-486.

Hwang, W.J., Lee, M.H., Park, Y.R., Lee, D.H. 2014. The change of ultrasonic transmission velocity by wood decay. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 42(2): 214-221.

Jang, S.J. 2000. Effect of moisture content and slope of grain on ultrasonic transmission speed of wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 28(2): 10-18.

Kabir, M.F., Araman, P.A. 2002. Non-destructive evaluation of defects in wood pallet parts by ultrasonic scanning. 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, California, USA.

Lee, J.J., Kim, G.M., Bae, M.S. 2003. Investigation of transmission process for ultrasonic waves in wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 31(2): 31-37.

Lin, W., Wu, J. 2013a. Non-destructive testing of wood defects based on ultrasonic technology. *Applied Mechanics and Materials* 401-403: 1124-1128.

Lin, W., Wu, J. 2013b. Non-destructive testing of wood defects based on stress wave technology. *TELKOMNIKA* 11(11): 6802-6807.

Lin, W., Wu, J. 2013c. Non-destructive testing of wood defects for Korean pine in Northwest China based on ultrasonic technology. *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing*. Yunan, China.

Mestre, P., Calçada, A., Carvalho, N., Serodio, C., Couto, P., Matias, J., Melo-Pinto, P., Morais, J. 2013. Low-cost ultrasonic probe to assess wood defects and parameters. *Proceedings of the World Congress on Engineering Vol. II, WCE 2013*, London, U.K.

Park, C.Y., Kim, G.C. 2014. Evaluation of modulus of elasticity of wood exposed to accelerated weathering test by measuring ultrasonic trans-

- mission time. Journal of the Korean Wood Science and Technology 42(3): 275-281.
- Park, J.C., Hong, S.I. 2008. Determination of localized defects in wood by the transfer time of ultrasonic waves. Journal of the Korean Wood Science and Technology 36(1): 61-68.
- Raquel, G., Domingos, G.P.C., Chiara, B.S., Fernando, A.F.B. 2011. Behavior of ultrasonic waves propagation in presence of holes on Pequiá (*Aspidosperma desmanthum*) wood. 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, Hungry.
- Shaji, T., Somayaji, S., Mathews, M.S. 2000. Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber. Journal of Materials in Civil Engineering Vol. 12(2): 180-185.
- Yavari, A., Roohnia, M., Khademi-Eslam, H., Yavari, E. 2011. Hole influence and FFT variation inspection in poplar wood by free vibration method. 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Sopron, Hungry.