

Bi-Sn 용융합금주입 목재복합체의 최적제조조건 및 물리·기계적 특성¹

박 계 신² · 이 화 형² · 강 석 구^{2,†}

Physico-mechanical Properties and Optimum Manufacturing Conditions of Bi-Sn Metal Alloy Impregnated Wood Composites¹

Kye-Shin Park² · Hwa-hyoung Lee² · Seog Goo Kang^{2,†}

요 약

용융점이 138℃인 Bi-Sn 혼합합금 주입방법을 이용한 용융합금주입목재복합체의 제조를 통해 목재의 단점인 치수 안정성과 내구성의 개선을 하고자 3가지 주요 침·활엽수 수종의 수종별 최적주입조건을 구명하고, 주입에 따른 금속 주입목재복합체의 중량증가율, 열전도도, 전기저항 등의 물리적 성질과 기계적 성질을 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 금속주입목재의 최적처리 조건은 185℃, 진공시간 10분 조건하에서 *radiata pine*의 경우 10 kgf/cm² 가압시간 2분 30초, *red oak*는 30 kgf/cm², 가압시간 10분, *white oak*는 50 kgf/cm², 가압시간 10분에서 최적의 주입조건을 나타냈다.
2. 금속주입목재복합체의 외관적 특징은 전체적으로 재색은 회백색을 나타냈으며, 목재의 무늬를 그대로 유지하고 있다.
3. 침엽수 수종인 *radiata pine*은 저온용융합금주입처리로 인해 중량증가율은 12배, 밀도는 6.13 g/cm³으로 15배나 증가하였으나, 인테리어용으로 주로 사용되는 *red oak*와 *white oak* 등의 활엽수의 경우 목재해부학적 특성으로 인해 *radiata pine*보다는 낮은 5~6배의 밀도증가율을 나타냈다.
4. 주입된 목재는 침·활엽수 모두 금속주입으로 인해 수분흡수율과 두께팽윤율이 현저히 감소하였고, 매우 높은 치수 안정성을 나타냈으며, 금속주입목재복합체의 휨강도, 휨영계수, 경도 및 전기전도도와 열전도도 등도 무처리목재보다 매우 크게 향상되었다.

¹ Date Received March 31, 2014, Date Accepted June 20, 2014

² 충남대학교 환경소재공학과. Department of Bio-based Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

† 교신저자(corresponding author): 강석구(e-mail: lachesis@cnu.ac.kr)

ABSTRACT

In order to improve the dimensional stability and durability of wood, this study attempted to impregnate bismuth (Bi) - tin (Sn) alloy metal with low melting temperature into solid woods of three species such as radiata pine, red oak and white oak, and investigated to determine an optimum condition of manufacturing the metal alloy-wood composites with natural wood grains. These Bi-Sn alloys were chosen for this study because they were harmless to human and melting at low temperatures. The composites resulted in high dimensional stability and low thickness swelling, and also showed much improved performance such as high bending strength, high hardness, high electric conductivity, and high thermal conductivity as floor materials. A proper impregnating condition of all specimens was determined as 10 minutes of the preliminary vacuum time, and 185°C of the heating temperature. The proper processing condition for radiata pine wood was 2.5 minutes of the pressuring time at the pressure of 10 kgf/cm². For red oak wood, 10 minutes of the pressuring time at the pressure of 30 kgf/cm² were the proper condition. The proper manufacture conditions for white oak wood was determined as 10 minutes of the pressuring time at the pressure of 50 kgf/cm².

Keywords : Bi-Sn alloy, metalized wood composites, *Radiata pine*, *Red oak*, *White oak*, dimensional stability, hardness

1. 서 론

목재에 금속을 주입 처리하여 제품으로 생산하는 기술은 1930년 독일에서 lignum vitae(유창목) 대신에 선박의 스크류베어링(screw bearing)으로 사용하기 위하여, Martel (1930)와 Naeser (1930)이 개발하였다. 이 제품의 조성은 Bi 50%, Pb 31.2%, Sn 18.8%이며 97°C의 용점을 갖고 있는 저온용융합금으로 목재 시편을 고압 주입 처리하여 제조하였다. 그러나 제품 개발 이후 적합한 활용도를 찾지 못하고 폐기되었으며 이 기술은 인체에 유해한 납을 다량 함유하고 있으므로 1980년대 이후에 납이 인체에 해로운 것으로 알려지면서 납은 더 이상 사용할 수 없게 되었다(Martel 1930; Naeser 1930).

비스머스(Bi, Y메탈社, 용점 271.5°C)는 중금속 중에서 가장 낮은 독성을 갖는 특징이 있어 화장품과 약품 내복약 및 의료용 공정에 사용되고 있으며, 주석(Sn: Y메탈社, 용점 232.06°C)은 음식포장용과 도금용 금속으로 현재까지 사용되고 있다.

Kang 등(2011)과 Park 등(2010)의 연구 결과에 의하면 국산 흑호두나무와 가래나무를 이용하여 인체에 무해한 위의 두 금속을 중량비 58 : 42 (Bi : Sn)로 용융 합금처리함으로써 용융온도가 원금속의 용융점보다 훨씬 낮은 138°C로 낮추어 목재구성요소인 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌 등의 분해에 영

향을 주지 않는 온도로 금속의 목재주입처리가 가능하게 하였다(Kang *et al.* 2011; Park and Lee 2010).

이러한 목재 내 합금주입처리방법을 이용하여 목재와 복합체를 이루면 약한 내구성과 치수안정성 등의 목재의 결점을 금속이 보완한 개질복합체가 만들어진다.

본 연구에서는 이렇게 제조된 Bi-Sn 용융합금주입 목재복합체(이하 금속주입목재복합체)가 내구성 및 치수안정성이 특히 중요한 요구물성인 목질바닥재로 활용 가능한지를 밝히고자 한다.

2012년 기준 우리나라 바닥재의 시장 규모는 1조 2,000억 원으로 그중 인체 친화적 바닥재인 목질계 마루가 차지하고 있는 시장은 약 6,000억 원 정도를 차지하고 있다. 특히 일반적으로 가장 보편적인 용도로 사용되고 있는 국내의 바닥 난방용 마루바닥재는 난방에 따른 약한 치수안정성과 소비자 과실에 의한 충격 등과 같은 내구성에 취약함으로 이에 대응할 수 있는 재질적 복합화 연구가 필요하다(Lee *et al.* 2011).

아울러 본 연구에서는 일반적으로 마루판 수종으로 활용되는 북미산 활엽수 중에서 주입처리가 비교적 쉬운 적참나무(*red oak, quercus spp.*)와 가장 어려운 백참나무(*white oak, quercus spp.*)를 사용하였다(Park *et al.* 1987). 이와 더불어 일반적으로 무늬는 좋으나 비중이 낮고 조재부분이 쉽게 마모되어



Fig. 1. Pressure treating cylinder.

마루판으로 사용하지 못하는 침엽수를 금속화목재로 제조하여 경도를 증가시킴으로써 마루판의 재료로서의 사용 가능성을 검증하고자 한다. 사용된 침엽수는 저가의 수입산 *radiata pine*을 사용하였고 다른 수종과 마찬가지로 금속주입목재복합체의 압력 및 가압 시간에 따른 중량증가율, 물리적 성질 및 기계적 성질, 열전도도, 전기저항을 검토하여 각 수종에 따른 적정 제조조건을 구명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. 공시 목재

본 연구에 사용된 목재의 수종으로서는 수입산 *radiata pine*(*pinus radiata*), red oak(*quercus spp.*), White oak(*quercus spp.*)로 3개 수종을 사용하였다. 이용된 목재의 크기는 실제 현장에서 사용하는 마루판 실패재의 크기인 길이 900 mm, 폭 90 mm로 하여 두께 5 mm의 기건상태(함수율 9-12%)의 목재를 이용하여 용융합금의 주입 특성을 구명하였다.

2.1.2. 저온 용융합금

비스머스(Bi, 융점 271.5℃)와 주석(Sn, 융점 232.06℃)의 중량비를 58 : 42 (Bi : Sn)로 합금하여 사용하였으며, 이때 합금의 용융온도는 138℃이었다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 금속주입목재복합체 제조

Fig. 1은 금속주입목재복합체 제조에 사용된 장치로서 시편의 주입처리를 위해 감압, 가압 및 가열을 할 수 있는 내열실린더 유형의 주입장치이다.

목재내부에 Bi-Sn 합금을 주입하는 방법으로는 우선 실린더 내에서 가열에 의하여 미리 용융된 액상의 합금에 목재 전체가 처리조에 잠기도록 한 다음 실린더 내부를 185℃의 온도를 유지한 후에 진공펌프를 이용하여 약 10분간 감압(700 mg)하여 실린더 내의 남은 공기를 제거하였다.

이때, Bi-Sn 합금의 용융온도는 Kang 등(2011)의 실험에서 나타난 바와 같이 처리온도를 목재구성요소의 열화가 되도록 발생하지 않는 범위에서 되도록 낮은 합금용융온도인 185℃를 적용하였다(Kang *et al.* 2011; Park and Lee 2010). 이는 질소가스에 의한 가압조건이므로 처리 중 온도의 하강현상이 발생함을 고려하여 185℃일 때가 가장 안정화된 온도조건임을 예비실험을 통해 알 수 있었다.

각각의 조건별로 합금의 주입이 완료되면 액상의 합금에서 처리된 목재를 꺼내어 표면에 묻어 있는 합금은 칼날로 긁어 처리조로 회수한 후 상온에서 냉각시킨다. 표면에 냉각된 금속은 샌딩하여 금속주입목재복합체 제품을 제조하였다.

2.2.2. 처리 조건

목재에 금속주입의 최적주입조건을 구명하기 위하여, 질소가스 주입 시 가압압력(10 kgf/cm², 30 kgf/cm², 50 kgf/cm²)과 가압온도와 시간(185℃, 2분 30초, 6분 30초, 10분), 그리고 가압전의 진공도 및 시간(700 mg, 5분, 10분)을 변수로 하여 금속주입목재복합체를 3반복으로 제조하였다.

2.2.3. 금속주입목재복합체의 특성 분석

각각의 조건별로 제조된 금속주입목재복합체가 목재에 금속의 주입도 측정을 위해 금속 전후의 중량증가율을 측정하였다. 또한 금속주입목재복합체의 물리적인 성질과 기계적인 성질은 KS F 3200에 준



Radiata pine



White oak



Red oak

Upper: before impregnation, Lower: after impregnation

Fig. 2. Color and grain of wood.

하여 분석하였다. 처리재의 표면 경도의 측정은 KS F 2212 (2004)에 준하여 만능재료시험기(Universal Testing Machine, Tinius olsen Ltd., H-50K-ST, Redhill, England)를 이용하여 분석하였으며, 처리재의 열전도도와 전기저항은 각각 Quick Thermal Conductivity

Meter (QTM-500, 제조사: KYOTO ELECTRONICS), 전류계(DA-101B, 제조사: SEJIN)를 이용하여 측정하였다. 각각의 시험편은 7반복을 통하여 시험을 실시하였으며, 던킨의 다중검정(Duncan's multiple range test)을 이용하여 유의성 검증을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 금속주입목재복합체의 외관특성

Fig. 2는 각 수종의 금속주입 전후의 색상변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 금속주입목재복합체의 색상은 전체적으로 합금의 색상인 회백색을 나타내며, 목재가 갖는 고유한 무늬(wood grain)를 그대로 나타내고 있다.

3.2. 금속주입목재복합체의 제조 조건 구명

Tables 1, 2, 3은 각 수종별 금속주입목재복합체의 특성을 나타낸 것으로서, 최적 제조조건은 수종에 따라 달리 나타났다. 금속주입목재복합체의 경우 목재의 무늬를 유지하면서, 금속이 목재 안으로 침투되면서 수분이나 물에 대한 차단이 이루어져 복합체의 흡수율과 두께팽윤율이 현저히 떨어져 치수안정성이 크게 향상되었으며, 금속의 영향으로 높은 열전도도와 전기전도체로서의 특성이 나타났을 뿐만 아니라 기계적인 성질과 경도도 크게 향상되었다. 수종별로 보면 침엽수인 radiata pine이 침투압력이 가장 낮은 10 kg/cm²의 압력에서도 12배 이상의 중량증가율을 나타내었으며, 모든 성질에서 가장 우수한 특성을 나타냈다. 활엽수인 red oak와 white oak는 radiata pine보다 더 높은 압력 조건에서도 낮은 중량증가율을 나타내었는데 이것은 수종의 해부학적 차이에 의한다고 볼 수 있다. radiata pine은 Kininmonth 등 (1991)에 의하면 해부학적으로 체적의 95% 이상의 가도관으로 구성되어 있어 국내 소나무의 91.8%의 결과(Park 등 1987)보다 높고 가도관의 방사벽에 단열의 커다란 유연벽공이 한 줄로 되어 있어 금속의 침투가 아주 쉬운 균일한 구조로 되어 있고 주입이

어려운 유세포의 비율이 아주 적은 반면, red oak와 white oak와 같은 활엽수는 구성 세포가 다양하며 특히 유세포의 구성비율이 높고 유세포의 단벽공포한 극히 작은 소공으로 그 개체 수도 아주 작아 주입 처리가 어렵다고 판단된다.

이와 같은 현상은 Kang 등(2011)의 연구결과에 따르면 북미산 반환공재인 흑호두나무와 Park 등(2010)이 밝힌 바와 같이 반환공재인 가래나무가 모두 도관과 목섬유의 내강은 금속 주입이 잘되고 있으나 유세포는 금속이 주입되지 않았음을 보고하고 있고 Kang 등(2011), Park and Lee (2010), Naeser (1930), Martel (1930) 등의 연구결과에 의하면 너도밤나무와 같은 환공재의 변재는 처리하기가 아주 좋으며 도관은 침투가 잘되고 방사조직은 침투가 안 되는 것으로 보고한 것으로 알 수 있다(Kininmonth and Whitehouse 1991). 또한 도관도 white oak처럼 타일 로시스가 발달하여 도관을 폐쇄시키는 구조를 갖는 수종은 더욱 주입하기 힘들게 된다(Park *et al.* 1987).

3.2.1. Radiata pine

Table 1에서 나타낸 바와 같이 radiata pine의 금속 주입복합체는 가장 낮은 압력인 10 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압유지시간 2분 30초에서 12배 이상의 중량증가율을 나타내어 밀도가 무처리 0.41 g/cm^3 에서 6.13 g/cm^3 으로 15배의 증가를 나타냈고 그 이상의 처리에서는 중량증가율, 밀도 등 물리적인 성질이 큰 차이점을 나타내지 않았다. 기계적 성질에 있어서는 진공시간 10분에 30 kgf/cm^2 이상으로 가압하고 가압시간을 10분으로 증가시키면 휨강도와 휨영계수는 증가되나, 10 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압유지시간 2분 30초에서의 경도는 이미 51 N/mm^2 로서 압력과 시간을 올려도 경도에서는 더 이상의 큰 차이를 나타내지 않았다. 이 정도의 경도는 현재 마루판으로 사용하는 어떤 수종보다도 높은 값을 나타낸다. 또한, 열전도도와 전기전도도에서도 큰 차를 나타내지 않았다. Naeser (1930)와 Martel (1930)의 방법(130-150°C, 42 kgf/cm^2 -176 kgf/cm^2 , 20분-60분)에 의하면 파인의 경우 4.83배, 경도가 2~3배 증가하였다고 보고한 것에 비하여 이 연구의 방법이 보다

낮은 압력에서 보다 많은 효과가 있었다. 따라서 가압에 소모되는 에너지와 각각의 성질을 고려할 때, radiata pine 경우에는 진공시간 10분에 압력 10 kgf/cm^2 , 가압유지시간을 2분 30초로 처리하는 것이 최적 제조조건이라 할 수 있다.

3.2.2. Red oak

Table 2는 환공재인 red oak에 금속주입한 복합체의 특성을 나타낸 것이다. 중량증가율을 보면 압력 30 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압시간 10분으로 제조하였을 시, 4.8배의 높은 중량증가율을 나타냈으며, 밀도는 무처리 0.58 g/cm^3 에서 3.61 g/cm^3 로 6.2배나 높아졌다. 따라서 이렇게 주입된 금속의 영향으로 흡수율은 무처리의 32.8%에서 2.56%로 현저히 떨어졌으며 두께팽윤율도 4.48%에서 1.05%로 떨어져 매우 높은 치수 안정성을 나타냈다. 또한 위와 동일 조건일 때 열전도도 0.454 W/mK로 가장 우수하였으며, 0.65 Ω 의 낮은 전기저항을 나타내었다. 휨강도도 204 N/mm^2 로 높아졌고 경도도 무처리의 26 N/mm^2 에서 71 N/mm^2 로 높아져 가장 우수한 휨강도와 경도를 나타냈다. 비슷한 중량증가율(471%)을 나타낸 반환공재인 국산 가래나무의 경우(Park 등 2010)와 579%를 나타낸 북미산 반환공재인 흑호두나무의 경우(Kang 등 2011)도 적정 제조조건이 압력 30 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압시간 10분이었다. 따라서 red oak의 금속주입목재복합체 적정제조 조건은 압력 30 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압시간 10분이 적정 제조 조건이라 할 수 있다.

3.2.3. White oak

Table 3은 white oak에 금속주입한 목질복합체의 특성을 나타낸 것이다. 백참나무(white oak)의 도관은 타일로시스의 발달로 인하여 가장 주입하기 어려운 수종으로서 압력과 가압시간을 높일수록 중량증가율이 높아졌으며 이에 따라 물리적 성질과 기계적 성질이 모두 향상되었다. 압력 50 kgf/cm^2 , 진공시간 10분, 가압시간 10분일 때, 중량증가율은 480%이고 밀도는 무처리 0.68 g/cm^3 에서 3.94 g/cm^3 로 5.8배 증가하였으며 흡수율은 무처리 21.2%에서 3.84%로

Table 1. Properties of radiata pine impregnated with melting alloy

Pressure -Vacuum time -Pressing time	Weight percent gain (%) F=2160.958***		Density (g/cm ³) F=618.571***		Moisture contents (%) F=2160.958***		Water absorption (%) F=107.286***		Thickness swelling (%) F=83.297***	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood			0.41 ± 0.01	A	12.12 ± 0.596	C	148.27 ± 24.26	B	4.39 ± 0.21	B
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	1290.08 ± 19.75	C	6.13 ± 0.09	C	0.67 ± 0.05	B	5.47 ± 0.88	A	0.69 ± 0.33	A
10 kgf/cm ² -10'-10'	1244.06 ± 32.25	BC	5.91 ± 0.15	BC	0.28 ± 0.02	A	2.54 ± 0.09	A	0.52 ± 0.30	A
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	1270.83 ± 48.56	C	5.96 ± 0.23	BC	0.30 ± 0.02	A	2.30 ± 0.21	A	0.73 ± 0.31	A
30 kgf/cm ² -10'-10'	1194.05 ± 19.41	B	6.03 ± 0.10	BC	0.43 ± 0.09	AB	2.97 ± 0.18	A	0.75 ± 0.27	A
50 kgf/cm ² -10'-10'	1268.59 ± 41.51	C	5.83 ± 0.19	B	0.32 ± 0.08	A	2.71 ± 0.11	A	0.91 ± 0.24	A
30 kgf/cm ² -5'-6'30"	1100.27 ± 25.56	A	5.92 ± 0.14	BC	0.28 ± 0.04	A	2.65 ± 0.08	A	1.02 ± 0.02	A
Pressure -Vacuum time -Pressing time	MOR (N/mm ²) F=18.129***		MOE (N/mm ²) F=19.92***		Hardness (N/mm ²) F=11.639***		Thermal conductivity (W/mK) F=439.041***		Electric resistance (Ω) F=1.129	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood	84.0 ± 3.0	A	9009 ± 154	A	11.57 ± 0.34	A	0.026 ± 0.010	A	×	
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	186.8 ± 12.1	B	15853 ± 5423	B	51.06 ± 4.18	BC	0.910 ± 0.045	D	1.46 ± 1.64	A
10 kgf/cm ² -10'-10'	178.6 ± 9.6	B	21493 ± 1158	BC	53.48 ± 7.96	BC	0.844 ± 0.008	C	0.40 ± 0.14	A
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	223.9 ± 5.2	C	22895 ± 1195	BC	47.56 ± 2.82	B	0.794 ± 0.021	B	0.10 ± 0.07	A
30 kgf/cm ² -10'-10'	205.7 ± 4.7	BC	24025 ± 1298	BC	57.50 ± 11.40	BC	0.893 ± 0.020	D	0.33 ± 0.04	A
50 kgf/cm ² -10'-10'	195.2 ± 45.6	BC	26350 ± 2428	C	66.02 ± 10.18	C	0.903 ± 0.030	D	0.16 ± 0.02	A
30 kgf/cm ² -5'-6'30"	213.0 ± 12.2	BC	26017 ± 1352	C	60.11 ± 15.87	BC	0.906 ± 0.033	D	0.23 ± 0.18	A

* DUN: Duncan's new Multiple Range Test

낮아졌고 두께팽윤율은 무처리 4.76%에서 1.13%로 낮아져 치수안정이 매우 높아졌다. 기계적 성질로서 휨강도는 무처리 119 N/mm²에서 266 N/mm²으로 2.24배 증가하였고 경도는 무처리 18 N/mm²에서 95

N/mm²로 5.3배 증가하였다. 열전도도는 0.392 W/mK로 가장 우수하였으며, 압력 30 kgf/cm², 진공시간 10분, 가압시간 10분부터 전기전도성이 나타났다. 압력 30 kgf/cm²과 압력 50 kgf/cm²에서 특성이 비슷해

Table 2. Properties of red oak impregnated with melting alloy

Pressure -Vacuum time -Pressing time	Weight percent gain (%) F=97.851***		Density (g/cm ³) F=166.785***		Moisture contents (%) F=3469.911***		Water absorption (%) F=890.882***		Thickness swelling (%) F=99.005***	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood			0.58 ± 0.040	A	8.92 ± 0.350	D	32.83 ± 0.80	D	4.48 ± 0.10	B
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	206.48 ± 22.07	A	2.06 ± 0.22	B	0.82 ± 0.04	BC	7.19 ± 0.35	C	1.37 ± 0.20	A
10 kgf/cm ² -10'-10'	287.72 ± 16.11	B	2.43 ± 0.14	C	0.66 ± 0.14	B	7.67 ± 0.65	C	1.36 ± 0.30	A
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	314.20 ± 17.53	B	2.44 ± 0.14	C	0.87 ± 0.05	C	8.30 ± 0.55	C	1.41 ± 0.19	A
30 kgf/cm ² -10'-10'	479.34 ± 16.84	D	3.61 ± 0.13	E	0.24 ± 0.05	A	2.56 ± 1.02	A	1.05 ± 0.36	A
50 kgf/cm ² -10'-10'	448.63 ± 17.73	D	3.19 ± 0.13	D	0.39 ± 0.04	A	3.84 ± 0.16	B	1.22 ± 0.06	A
Pressure -Vacuum time -Pressing time	MOR (N/mm ²) F=3.018*		MOE (N/mm ²) F=29.998***		Hardness (N/mm ²) F=35.98***		Thermal conductivity (W/mK) F=595.995***		Electric resistance (Ω) F=45.432***	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood	169.3 ± 8.8	A	15256 ± 774	A	25.66 ± 0.99	A	0.090 ± 0.004	A	×	
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	174.2 ± 6.1	A	17071 ± 209	B	35.18 ± 2.98	B	0.253 ± 0.002	C	22.73 ± 3.22	D
10 kgf/cm ² -10'-10'	177.6 ± 10.9	AB	17683 ± 525	BC	45.46 ± 0.46	C	0.292 ± 0.011	D	8.00 ± 0.85	BC
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	185.2 ± 8.4	AB	18771 ± 465	CD	56.76 ± 1.31	D	0.220 ± 0.015	B	9.88 ± 1.77	C
30 kgf/cm ² -10'-10'	204.5 ± 33.1	B	19904 ± 613	DE	71.18 ± 9.65	E	0.454 ± 0.012	F	0.65 ± 0.35	A
50 kgf/cm ² -10'-10'	205.7 ± 7.5	B	20852 ± 971	E	60.55 ± 6.20	D	0.392 ± 0.002	E	3.61 ± 1.26	AB

* DUN: Duncan's new multiple range test

지면서 50 kgf/cm²에서 중량증가율이 유의차를 나타내 힘강도와 휨탄성계수가 유의성이 높게 나타났다. Lee 등(2011)의 선행연구에 90 kgf/cm²까지의 압력에서도 압력 넣기가 힘든데 비하여 성능향상에는 큰 차이가 없었다. 따라서 백참나무(white oak)의 금속주입목재복합체의 최적제조 조건은 압력 50 kgf/cm², 진공시간 10분, 가압시간 10분이 적정제조조건이라 할 수 있다.

4. 결 론

3가지 주요 침·활엽수 수종을 이용하여 용융점이 138℃인 Bi-Sn 용융합금을 주입 시 최적압력 및 가압시간을 구명하고 주입에 따른 금속주입목재복합체의 중량증가율, 열전도도, 전기저항 등의 물리적 성질과 기계적 성질을 실험하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3. Properties of white oak impregnated with melting alloy

Pressure -Vacuum time -Pressing time	Weight percent gain (%) F=607.661***		Density (g/cm ³) F=405.727***		Moisture contents (%) F=2498.135***		Water absorption (%) F=2342.745***		Thickness swelling (%) F=174.95***	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood			0.68 ± 0.069	A	9.47 ± 0.348	E	21.20 ± 0.44	E	4.76 ± 0.28	C
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	62.71 ± 4.84	A	1.18 ± 0.09	B	2.56 ± 0.14	D	16.68 ± 0.21	D	2.37 ± 0.19	B
10 kgf/cm ² -10'-10'	208.89 ± 9.32	B	2.22 ± 0.10	C	0.48 ± 0.09	B	5.36 ± 0.24	C	1.34 ± 0.13	A
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	364.92 ± 11.34	C	2.25 ± 0.15	C	0.70 ± 0.11	C	5.70 ± 0.15	C	1.21 ± 0.08	A
30 kgf/cm ² -10'-10'	441.49 ± 14.14	D	3.79 ± 0.12	D	0.30 ± 0.11	AB	3.32 ± 0.31	A	1.37 ± 0.23	A
50 kgf/cm ² -10'-10'	480.39 ± 17.50	E	3.94 ± 0.14	D	0.24 ± 0.08	A	3.84 ± 0.16	B	1.13 ± 0.10	A
Pressure -Vacuum time -Pressing time	MOR (N/mm ²) F=28.133***		MOE (N/mm ²) F=80.078***		Hardness (N/mm ²) F=84.934***		Thermal conductivity (W/mK) F=38.006***		Electric resistance (Ω) F=142.36***	
	Mean ± SD	DUN*	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN	Mean ± SD	DUN
Untreated wood	119.2 ± 4.8	A	11565 ± 398	A	18.17 ± 1.97	A	0.130 ± 0.004	A	×	
10 kgf/cm ² -10'-2'30"	122.3 ± 7.9	A	12011 ± 996	A	24.09 ± 1.87	AB	0.162 ± 0.000	A	×	
10 kgf/cm ² -10'-10'	147.2 ± 20.1	A	13801 ± 977	B	33.53 ± 5.90	B	0.272 ± 0.028	BC	×	
30 kgf/cm ² -10'-6'30"	197.4 ± 31.5	B	18709 ± 1251	C	49.34 ± 0.39	C	0.239 ± 0.023	B	×	
30 kgf/cm ² -10'-10'	225.8 ± 9.7	B	20829 ± 1190	D	90.02 ± 11.70	D	0.280 ± 0.016	C	58.15 ± 3.18	
50 kgf/cm ² -10'-10'	265.8 ± 26.6	C	23569 ± 729	E	95.38 ± 7.62	D	0.301 ± 0.027	C	115.00 ± 5.94	

* DUN: Duncan's new multiple range test

1. 금속주입목재복합체의 목재에 대한 금속주입처리 최적조건은 각 수종별로 차이가 있지만, 185℃의 온도와 진공시간 10분조건에서 radiata pine은 가압력 10 kgf/cm², 가압시간 2.5분이었고, red oak는 가압력 30 kgf/cm², 가압시간 10분, 주입이 가장 어려운 white oak는 가압력 50 kgf/cm², 가압시간 10분으로 나타났다.
2. 금속주입목재복합체의 외관적 특징은 전체적으

로 재색은 회백색을 나타냈으며, 목재의 무늬를 그대로 유지하고 있다.

3. 가격이 싸고 저비중의 목재로 주로 사용되는 수입 침엽수 수종인 radiata pine은 저온용융합금주입처리로 인해 중량증가율은 12배, 밀도는 6.13 g/cm³로 15배나 증가하였으나, 인테리어용으로 주로 사용되는 red oak와 white oak 등의 활엽수의 경우 목재해부학적 특성으로 의해 ra-

diata pine보다는 낮은 5~6배 밀도 증가율을 나타냈다.

4. 주입된 목재는 침·활엽수 모두 금속주입으로 인해 수분이 차단되는 원인으로 인해 수분흡수율과 두께팽윤율이 현저히 감소하였고, 매우 높은 치수안정성을 나타냈으며, 금속주입목재복합체의 휨강도, 휨영계수, 경도 및 전기전도도와 열전도도 등도 무처리목재보다 매우 크게 향상되었다.

사 사

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 과제번호 109057022SD010 “바닥복사가열시스템을 위한 고성능후판무늬목복합체적층마루판의 개발” 연구비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- Kang, S.G., Park, K.S., Lee, H., Lee, J.S., Lee, H.H. 2011. Manufacturing and Properties of Bi-sn Impregnated Wood Composites of *Juglans nigra*. Journal of the Korea Furniture Society. 22(1) p. 55-63.
- Kininmonth, J.A., Whitehouse. L.J. 1991. Properties and Uses of New Zealand Radiata Pine. Vol. 1. NZ Forest Research Institute.
- Lee, H.H., Lee, J.S., Kang, S.G., Seo, I.S., Park, K.S. 2011. Study on the Development of Floor radiant heating system for high-performance metal composite laminate veneer flooring plates. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Report. Project N.109057-2.
- Martel, P. 1930. Journal for Applied Chem. German patent No. DRP 506477.
- Naeser, G. 1930. Umshau 34,250; German patent No. DRP 4939059.
- Park, S.J., Lee, W.Y., Lee, H.H. 1987. Organization and identification of wood, HwYang moon sa, Republic of Korea.
- Park, K.S., Lee, H.H. 2010. Properties and Manufacturing of Low Melting Alloy Impregnated Wood Composites for using Domestic Thinned Logs of *Juglans mandshurica*. Journal of Agricultural Science. 37(3) p. 457-464.
- USDA, Forest Service, FPL, 2010. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material, FPL-GTR-190.