



수목 구조와 생리적 특성을 고려한 수간주입법 개선 방안

차병진^{1*} · 한상섭² · 김기우³ · 김동수⁴ · 이동운^{5**}

¹충북대학교 식물외과, ²전북대학교 산림환경과학과, ³경북대학교 생태환경시스템학부,
⁴국립산림과학원 산림병해충연구과, ⁵경북대학교 질병매개곤충학과

Improving Strategies for Trunk Injection Considering Tree Anatomy and Physiology

Byeongjin Cha^{1*}, Sangsub Han², Ki Woo Kim³, Dong Soo Kim⁴, DongWoon Lee^{5**}

¹Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Department of Forest Environment Science, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³School of Ecology and Environmental System, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

⁴National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁵Department of Vector Entomology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

(Received on June 15, 2020. Revised on June 18, 2020. Accepted on June 22, 2020)

Abstract Trunk injection delivers various substances directly to the crown through drilling wound on xylem and could be used for trees with poor roots. Injected substance is stable in the tree and trunk injection has long-lasting effect. Application of trunk injection is increasing in living space because it has little effect on the surrounding environment. However, without understanding anatomy and physiology of tree species and environmental conditions, trunk injection may injure through injection wound. This study suggests improving methods to inject substances without damaging trees. The best trunk injection is to inject the right substance at the right time, to the right tissue, in the right way. Since the injected substance relies its translocation on the transpiration flow of tree, the injection wound drilling should be different according to the components and distribution of the xylem system. Trees must be injected under the environmental conditions good for transpiration. Injection wound should be drilled on the stem tissue of good vitality in a way that minimizes the damage to the tree. The injecting substance should be weakly acidic, water-soluble and translocatable through vessels. Substance formulation and characteristics of additives are also very important. Injection wounds should be drilled as small and shallow as possible. Recently, various injectable formulations and non-drilling injectors are in the market. If the proper product is selected in consideration of the characteristics of tree species and the trunk is injected in a suitable way, better results with minimal injury on trees could be expected.

Key words Decay, Injection wound, Transpiration, Trunk injection, Xylem structure

<< ORCID

Byeongjin Cha

<http://orcid.org/0000-0003-4458-2498>

<< ORCID

Dong Woon Lee

<http://orcid.org/0000-0001-9751-5390>

*Corresponding author

E-mail: bjcha@chungbuk.ac.kr

**Co-corresponding author

E-mail: whitegrub@knu.ac.kr

서론

수목은 목재나 종이, 연료의 제공이나 각종 열매를 비롯한 식용 및 의약품 자원의 공급 역할을 하는 경제적 기능뿐만 아니라 산소의 공급과 대기오염 물질 감소, 햇빛 차단과 복사열 방출 억제 등을 통한 온도변화 완화를 통한 기후 순화에 기여하며 각종 곤충들과 동물들의 먹이가 되고, 생물적 방제 자원의 보육처의 기능을 담당하는 것과 같은 다양한 공익적 기능을 제공하고 있다(Kim, 2006; Simpon and Ogorzaly, 2011). 산업혁명 이후 도시화와 인구증가로 인하여 산림의 면적은 감소하고, 농경지 면적은 크게 증가하는 변화를 보이고 있지만 사람들의 밀집도가 높은 도시에서도 가로수나 건물주변의 조경림, 공원지대 조성 및 주택 정원과 같은 도시환경림이 다양하게 조성되고 있다(Kang et al., 1997; Simpon and Ogorzaly, 2011).

한편 나무가 살아가는 환경은 자연, 도시, 경작지 등 매우 다양하며 끊임없이 역동적으로 변화하고 있고, 지속적 또는 간헐적 환경스트레스로 인하여 나무는 병해충에 시달리거나 활력을 잃는 경우가 많다. 나무를 관리하는 사람들은 이러한 스트레스로부터 나무를 보호하고 활력을 유지하기 위하여 살균제, 살충제와 같은 작물보호제나 영양제를 투여한다(Kang et al., 1997; see Harries, 1965). 식물에 어떤 물질을 투여하는 방법에는 제형이나 작용 특성에 따라 분무나 연무, 미스트 살포와 같은 엽면처리 방법과 입제나 액상제를 토양에 처리하는 방법 등 여러 가지가 있는데, 조경수나 과수 등 수목류에는 나무줄기에 구멍을 뚫고 약제를 직접 주입하는 수간주입법도 많이 이용되고 있다(Kim et al., 2014).

수간주입법은 일반적인 작물 병해충 방제에 이용되는 수관살포법에 비하여 비표적 생물이나 환경 노출 위험성이 적어 과수를 비롯한 도심지역이나 농약 비산으로 인한 오염이 우려되는 지역에서 효과적으로 활용할 수 있는 대체 방제법으로 사용되고 있는데(Ugine et al., 2013; Wise et al., 2014) 미국에서는 1920년대부터 가로수나 과수 해충 방제를 위해 이용되고 있다(Hollister and Jacobs, 1928; Harries, 1965; Thompson, 1967; Wene, 1970; Saunders, 1971). 우리나라에서도 수간주입법은 40년 이상의 역사를 가지고 있는데(La et al., 1976) 주로 산림병해충 방제를 위하여 사용되고 있고(KFS, 2019), 특히 소나무 재선충병 예방을 위하여 '소나무재선충병 방제특별법 시행규칙'에 방제방법으로 명시되어 있다(KMGL, 2020). 수간주입은 나무에 구멍을 뚫고 약액을 직접 주입하기 때문에 처리 약제를 손실 없이 모두 나무에 전달하게 할 수 있는 처리법으로 다른 처리 방법보다 장점이 많아 사용이 늘고 있다. 하지만 같은 방법으로 주입하여도 주입물 성분이나 주입 시기, 대상 수종 등에 따라 수간주입의 효과가 다를 수 있다(Berger and Laurent, 2019). 더구나, 수간주입 방법이 옳지 않았을 경우에는 오히려 나무가 피해를 입을 수도 있다.

비록 일반 과수작물에 대한 수간주입 방법이 활성화 되어 있지 않지만 소나무 재선충병 등 각종 산림병해충 예방과 방제를 위하여 매년 산림청에서 수간주입을 시행하고 있는 우리나라의 현실을 감안할 때 수간주입의 원리를 제대로 이해하고 올바른 방법을 고찰하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 수간주입의 역사와 원리, 방법, 문제점, 그리고 수목의 특성과 건강을 고려한 개선방안 등에 대하여 살펴보고자 한다.

수간주입 정의와 적용

나무주사(tree injection) 또는 수간주입(樹幹注入, trunk or stem injection)은 수목을 치료하고 병해충을 방제하는 화학적 방제법의 하나로 동물의 혈관주사와 같이 처리하고자 하는 약액을 나무에 직접 넣어 주는 방법이다(Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2004). 즉, 나무 밑동(근두부)이나 굵은 줄기에 구멍을 뚫고 물관부(xylem)로 약액을 넣어 수관의 잔가지와 잎은 물론 뿌리에까지 고르게 전달하는 방법으로(VanWoerkom et al., 2014), 뿌리가 제 역할을 충분히 하지 못할 때에도 사용할 수 있는 방법이다. 원하는 물질을 나무 내부로 직접 주입하기 때문에 효과도 빨리 나타나는 편이므로 살균제(Percival and Boyle, 2005), 살충제(McCullough et al., 2011), 항생제(Cha and Tattar, 1993), 영양제(Nair et al., 2014; Shaaban, 2009), 식물저항성유도물질(Berger and Laurent, 2019), 식물정유(Mckenzie et al., 2010) 등 다양한 물질 공급에 사용하고 있다. 주입된 물질이 조직 내부에서 이동하므로 자외선에 의한 분해가 없으며, 기상 요인의 영향도 받지 않아 효과가 오래 지속된다는 점 등도 장점이다(VanWoerkom, 2012).

다양한 수목 약제처리법 중 수간주입만큼 여러 면에서 확실한 효과를 보이는 것은 없다. 수간주입은 엽면살포나 토양관주와 달리 주입물질의 손실이 없고, 약액이 비산하여 의도치 않게 주변에 피해를 주거나 토양에 스며들어 지하수를 오염하는 등의 부작용도 없다(Wise et al., 2014). 따라서 수간주입은 생활권 수목, 특히 공원수와 가로수 등에 보편적으로 사용하고 있으며, 다른 방제법을 사용할 수 없는 경우 현실적인 대안이 되기도 한다(Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2004; Doccola and Wild, 2012; Lee et al., 2017). 또한, 살포나 도포, 관주 등 일반적인 처리법으로는 방제효과를 기대할 수 없는 빗자루병, 오갈병 등 내부기생성 수목병의 현실적인 방제법으로 세계적으로 널리 사용되고 있으며(Cha and Tattar, 1993; Flower et al., 2015) 목질부 내에 기생하는 소나무재선충과 같은 식물기생선충 방제에도 활용할 수 있다(Lee et al., 2009). 또한 집중방제가 필요한 고품질 과수재배에서도 살균제 수간주입은 효과적인 약제처리법으로 인정받고 있다(VanWoerkom et al., 2014).

우리나라에서는 한때 대발생하였던 뽕나무 오갈병과 대추나무 빗자루병의 유일한 치료법으로 수간주입이 사용되었다(La et al., 1976; Park et al., 1994). 최근에는 생활권 소나무림이나 도심 가로수들에서 솔잎혹파리, 소나무재선충, 버즘나무방패벌레 등 병해충 방제를 위하여 많이 사용하고 있다(KFS, 2014). 수간주입은 안전성과 방제효과 면에서 다른 방제법들에 비해 뛰어나므로 생활권 수목병해충 방제 현장에서 사용빈도가 점점 증가하고 있다.

수간주입은 수간주사, 나무주사, 수관주사(주입) 등으로도 불리는데, 수관주사는 옳지 않은 명칭이므로 사용하지 말아야 한다.

수간주입 유래와 발달 과정

식물에 무엇을 주입한 것에 대한 가장 오래 된 기록은 약 천 년 전으로, Granada의 Hadje가 1158년에 몇 가지 식물줄기와 뿌리의 수(pith)에 다양한 물질을 집어넣어 꽃과 열매에 풍미, 향기, 청정성, 약리성 등을 주려고 시도한 것이다(Perry et al. 1991). 이후 여러 사람에 의해 수간주입이 시행되었는데, 다방면에서 이름을 남긴 레오나르도 다빈치가 독이 있는 복숭아를 만들기 위하여 복숭아나무에 비소를 주입하였다는 흥미로운 기록도 있다(Stipes and Campana, 1981).

20세기 초반까지는 주로 식물체 내에서 물질이 어떻게, 어디로 그리고 얼마나 빨리 이동하는지를 알아보기 위한 연구들이 시도되었고(Rumbold, 1915; Lipman and Gordon, 1925), 병해충을 치료하기 위한 목적으로 수간주입을 사용한 것은 러시아가 선구적 역할을 하였으며, 독일, 프랑스, 영국, 이태리, 미국 등이 러시아 문헌을 따라 시행하였다(Perry et al., 1991). 하지만 당시 수간주입 효과에 대해서는 평가가 엇갈렸는데, 1918년 USDA Farmers Bulletin은 이러한 수간주입이 병해충을 방제하는 효과가 전혀 없으며, 나무에 결정적 피해를 주기도 한다고 경고하였다. Perry et al.(1991)은 당시 수간주입 효과에 대한 부정적 견해가 있었던 것은 아마도 수간주입 물질의 농도가 너무 높거나 주입 속도가 너무 빠른 등 방법이 제대로 확립되지 않았기 때문일 거라고 분석하였다.

1900년대 초-중반부터는 주로 수목 건강관리에 수간주입이 사용되었다. 항생제로부터 살균제, 필수 원소들, 생장조절제, 제초제 등 다양한 물질을 주입하여 효과를 관찰하였는데, 일부는 효과를 보이기도 하였으나 결과가 언제나 성공적인 것은 아니었다. Rumbold (1920)는 밤나무 줄기마름병을 치료하기 위하여 페놀, 살리실산, 수은염 등 40 여종의 물질들을 밤나무에 주입하였으나 뚜렷한 치료효과를 얻지 못한 반면, 오히려 수간주입에 따른 피해들이 관찰되었다. 또한 Roach (1939)는 사과나무에 영양물질을 공급하기

위해 그리스 주입기, 자전거 펌프, 공기압축기 등을 이용하여 압력식 수간주입을 시도하였는데 주입된 나무의 수피가 갈라지는 현상이 나타났다. May (1941)는 이와 같이 잘못된 주입방법이 수목의 부후를 초래하므로 주입공을 필요 이상으로 깊게 뚫지 말고, 주입공의 높이를 서로 다르게 하며, 주입 후 주입공을 소독하고 이물질이 들어가지 않도록 메워야 한다고 하였다.

수간주입은 1930년대 미국에 느릅나무 시들음병이 발생하여 생활권 느릅나무들을 초토화함에 따라 새롭게 관심을 끌며 발전하였다(Perry et al., 1991). 시간이 흐르면서 방법과 장비들도 꾸준히 개선되며 수간주입 효율을 높이고 수목에 주는 피해를 최소화하여 왔는데, 결론은 수피와 형성층에 천공기로 작고 얇은 구멍을 깨끗하고 매끈하게 뚫어야 한다는 것이었다(Phair and Ellmore, 1984).

약액을 수목 내부로 직접 넣어 주는 수간주입은 살포나 도포, 관주 등에 비해 약액 손실이 적으며, 유효성분을 효율적으로 전달하고 환경에도 안전하므로 사람과 접촉이 많은 공간에도 사용할 수 있다. 12세기 아랍에서 열매나 꽃의 색을 바꾸기 위하여 나무에 특정 물질을 주입하기 시작한 이래 다양한 수간주입법들이 개발되어 왔다(Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2004). 현재 많이 사용되는 수간주입법으로는 천공형과 비천공형이 있는데 천공형에는 미세압력식(pressurized microinjection method), 압력식, 중력식, 흡수식, 삽입식 등이 있다(Lee et al., 2017; Berger and Laurent, 2019).

수간주입 원리

주입된 물질이 나무줄기를 따라 이동하고, 수관 전체로 분산되는 것은 증산작용에 의해 뿌리에서 흡수된 물이 물관을 따라 위로 이동하는 원리와 같다. 단, 물관에서는 물이 위로만 이동하지만 수관 관다발에 주입된 물질은 위-아래 양방향으로 이동한다는 점에서 약간 차이가 있다(Tattar and Tattar, 1999; VanWoerkom, 2012). 주입된 물질 이동의 원동력은 증산류이므로 수간주입이 성공하기 위해서는 물관의 특성과 잎 전체 면적이 대단히 중요하다. 즉, 대기 중으로 방출되는 증기의 양이 가장 중요하다(Aajoud, 2006; VanWoerkom, 2012).

식물에서 물 이동 양상은 목질부 구조에 따라 다르므로 주입물질 이동도 목질부의 영향을 받는다(Chaney, 1986). 목질부 형태와 구조는 수중에 따라 몇 가지 특성이 있는데, 물관(도관, vessel), 헛물관(가도관, tracheid), 섬유(fiber), 유조직(parenchyma) 등 네 가지 세포로 이루어져 있다(Chaney, 1986). 목질부 구성 세포 종류에 따라 물 이동량이 다른데, 물관은 크기가 커서(지름 100-300 μm) 많은 양의 물이 상대적으로 빠른 속도로 이동할 수 있다, 헛물관은 물

관에 비해 매우 작고(지름 25-50 μm) 양 끝이 막혀있어서 물이 위로 이동하려면 세포벽에 있는 벽공쌍을 통해 옆 헛물관으로 이동하여야만 하므로 이동 속도가 상대적으로 느리다(Sinclair, 1981). 활엽수 물관부는 주로 물관과 헛물관으로 되어 있는 반면, 침엽수 물관부는 주로 헛물관으로 되어 있다.

통도세포 종류에 따라 나무 재(wood)가 결정된다. 나무 재에는 산공재(diffusive porous wood), 환공재(ring porous wood), 무공재(non-porous wood) 등 세 종류가 있다. 무공재는 소나무 전나무, 가문비나무 등 겉씨식물 목질부를 구성하며, 상대적으로 크기가 작은 헛물관만으로 이루어져 있다(Sinclair, 1989; VanWoerkom, 2012). 속씨식물 목질부는 산공재 또는 환공재이며, 물관과 헛물관으로 이루어져 있다. 산공재는 물관과 헛물관이 나이트 춘재와 추재에 비교적 균일하게 분포되어 있다. 산공재 수종은 단풍나무, 말채나무, 비즘나무, 사과나무 등이다(Sinclair, 1989; VanWoerkom, 2012). 환공재는 커다란 물관이 주로 나이트 춘재에 분포되어 있으며 물관 크기는 산공재보다 크다. 환공재 수종으로는 밤나무, 물푸레나무, 느릅나무 등을 들 수 있다(Sinclair, 1989; VanWoerkom, 2012). 통도세포 크기에 따라서 물의 이동속도도 달라지므로, 수간주입한 약액이 상승하는 속도는 환공재 활엽수 > 산공재 활엽수 > 침엽수(무공재) 순서로 빠르다. 침엽수에서 수간주입 속도가 늦은 또 다른 이유는 수지분비에 따라 가도관과 주입관이 막히는 것이며, 이 때문에 수간주입 자체가 불가능한 경우도 있다(Zillmer et al., 1991; Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2004).

모든 나무가 최근 만들어진 세포들로 구성된 목질부인 2기 물관부의 바깥쪽에 있는 어리고 좁은 변재로만 물을 이동하는데(Lee, 2012) 구성 세포 종류에 따른 수분 이동속도 차이를 극복하기 위하여 무공재와 산공재는 환공재보다 더 많은 두께(나이트)로 물을 이동한다. 즉, 무공재는 가장 최근에 만들어진 나이트 1~5개로 물이 이동하는 반면(Umeyabashi et al., 2007), 산공재는 최근 1~3개 나이트로, 환공재는 가장 최근 나이트 1개로만 물 대부분을 이동한다(Chaney, 1986; Tattar et al., 1998).

무공재를 갖고 있는 침엽수에서는 물이 헛물관에 있는 벽공을 통해 옆 세포로 이동하며 사선방향으로 상승한다. 수간주입한 물질도 통도조직을 따라 위로 올라갈수록 옆으로도 퍼지므로 활엽수에 비해 수간주입 구멍 수가 적어도 수관의 더 많은 부분으로 주입된 물질이 분산된다. 활엽수에서는 수간주입한 물질이 물관을 통해 거의 수직으로 올라가므로 침엽수보다 더 많은 구멍으로 수간주입하여야 수관에 고르게 분산된다고 알려져 있다(Chaney, 1986). 그러나 실제로 주입물질의 이동을 확인한 연구결과들은 활엽수에서도 물관부에 포함되어 있는 헛물관으로 인해 주입액이 위로 올라가면서 옆으로도 확산된다고 하고 있다(Sinclair and

Larsen, 1981; Tattar et al., 1998; Docola et al., 2011; Lee et al., 2014). Lee et al. (2014)은 주입공 크기를 달리하여 염료를 주입하고 일정 시간이 지난 후 줄기를 잘라 단면을 확인한 연구에서 주입공이 있는 높이에서는 구멍 크기에 따라 염색된 면적이 달랐으나 위로 올라갈수록 차이가 줄어들었다고 하였다.

압력식 수간주입은 용기를 물관과 연결하여 증산류를 따라 물질을 주입하는 흡수식과는 달리 외부에서 압력을 사용하여 물질을 강제로 주입하는 방식이다. 주입물질은 압력에 의해 물관부 세포의 부분(apoplast)으로 밀려들어가는데, 식물 통도기관은 전체가 막힘없이 연결된 동물 순환기관과는 구조적으로 다르기 때문에 주입되는 양이 매우 제한될 수밖에 없다. Apoplast로 주입된 물질들은 통도기관에서 증산류를 만나고, 그것을 따라 다른 부분으로 전이되므로 실제로 압력에 의해 이동하는 거리는 그리 길지 않다. 즉, 수간주입 후 일정 단계를 지나고 나면 이동에 있어서는 흡수식 수간주입과 다를 바 없어진다. 주입기를 수간에 심어 놓는 삽입식(매물식, implant) 수간주입은 주입기가 매물된 부분에 수액이 고이면서 주입기 내부에 있는 물질을 녹여 내어 다른 부분으로 이동하는 방법이므로 이 역시 일정 단계가 지나면 증산류에 의존하는 흡수식 수간주입과 같다고 할 수 있다.

주입된 물질들은 증산류를 따라 이동하는데, 증산류는 언제나 뿌리쪽에서 잎쪽, 즉 아래에서 위로 이동하므로 주입 물질들도 주입한 곳에서 수관 쪽으로 이동한다고 알려져 있다(Chaney, 1986; Takai et al., 2004). 하지만 흡수식, 압력식을 막론하고 실제로는 주입된 물질들이 위, 아래 모든 방향으로 이동한다는 사실이 여러 실증시험을 통하여 확인되었다(Tattar and Tattar, 1999; Harrell, 2006; Lee et al., 2014; Cha et al., 2019). 수간에 주입된 물질은 세포내(symplast) 이동과 세포간(apoplast) 이동을 모두 하는데, 주입구 위쪽으로는 apoplast로 활발하게 이동하는 반면 아래쪽으로는 symplast로 움직여서 이동이 느린 편이다(Zillmer et al., 1991; Cha et al., 2003).

수간주입에 영향을 미치는 요인

수간주입 효율을 높이기 위해 고려할 사항은 대상 수종의 생리적 특성(Perry et al., 1991)과 날씨 및 토양 환경(Tattar, 1989), 주입물질의 화학적 특성과 제형(Sur and Stork, 2003) 등이다. 주입물질의 흡수와 분산은 실제로 수간주입 방식은 물론, 주입물 성분과 수용성(Reil, 1979; Percival and Boyle, 2005; Docola et al., 2007), 주입 시기(Reil, 1979; Aćimović et al., 2016), 수종(Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2000), 나무 크기와 목질부 형태(Perry et al., 1991), 수관 상태(VanWoerkom, 2012) 등과 밀접한 관련이 있다.

수목 생리와 내부구조

주입물은 물관부 이동 특성에 따라 수관까지 이동하는데, 수중에 따라 생리적 특성이 다르므로 나무가 물질을 흡수하고 이동하는 특성도 다르다. 따라서 수간주입 방법도 수종 특이적으로 달라져야 한다(Perry et al., 1991). 주입물 흡수와 이동은 통도기관에서 이루어지는데, 수종과 환경요인에 따라 물관 크기가 다르다. 산공재와 환공재가 다르며, 인과류와 핵과류가 다르고, 쌍떡잎과 외떡잎이 다르다(Clifford et al., 1987; Ferry and Gomez, 2014). 속씨식물에 있는 큰 물관으로는 물질 이동이 빠르며, 좁은 물관으로는 짧은 시간에 많은 물이 이동하기 어렵다. 구과식물들은 통수 저항이 큰 가도관을 가지고 있어서 일반적으로 속씨식물보다 수간주입이 더 어렵다고 알려져 있으며(Sachs et al., 1977; Reil, 1979; Sinclair and Larsen, 1981), 수지분비도 수간주입 장애요인이다(Zillmer et al., 1991). 어떤 수종은 결이 나선형으로 되어있어 주입물질이 감기며 올라가 더 많은 부분으로 재이동(Takai et al., 2004) 되는 반면, 어떤 종은 결이 곧아 주입부에 제한되어 상승한다(Chaney, 1986).

주입물질은 물관부를 타고 가지와 잎으로 이동하며 체관을 통해 뿌리계로도 이동한다. 뿌리 물관부는 수간에 비해 일반적으로 구멍이 더 많으며, 더 많은 물관이 접하여 수평이동이 증가하고 균일한 이행경향을 보인다(Sinclair and Larson, 1981). 따라서 뿌리나 판근에 주입하면 이행속도와 수평이동을 증가시켜, 구획화를 줄이고 주입효율을 높일 수 있다. 그러므로 뿌리 근처나 주간 밑부분에 주입하였을 때 분산이 가장 좋다(Tattar et al., 1998).

주입물 화학적 특성과 제형

주입물질이 빨리 흡수되고 잘 분산되기 위해서는 수용성이 높아야 하며, 특정 환경에서 화합물이 탄소에 흡착하는 정도를 나타내는 탄소흡착계수(유기탄소-물 분배계수: organic carbon/water partition coefficient, K_{oc})는 높지 않아야 한다. 탄소흡착계수가 높으면 즙액이나 물관의 유기탄소에 흡착되어 수관으로의 이동이 저해되므로 분산과 약효발현에 문제가 있다. 사과 불마름병 방제를 위해 prohexadione-calcium (PC)을 수간주입하여도 효과가 없었던 결과에 대해 Acimović et al. (2015)은 PC의 수용성이 174 mg/L로 낮고, 유기탄소-물 분배계수는 155-1428 ml/g 정도로 크기 때문에 약제가 물관을 이동하지 못하고 수간에 붙잡혀 있었기 때문이라고 해석했다.

용해도 역시 흡수와 이동에 중요한 요인이다(Percival and Boyle, 2005). 엽면살포용 제형이라고 하여 수간주입에도 문제없이 사용할 수 있는 것은 아니며, 수용성이 좋을수록 더 효율적으로 분산된다. 제형에 따라 물관부 이동 적합성이 달라서 수용성 물질이 유제보다 더 효율적으로 이동된다(VanWoerkom et al., 2014). 수용성은 옥탄올-물 분배계수

(octanol/water partition coefficient, K_{ow})와 산해리상수(acid dissociation constant, pKa)에 의해 결정되는데, 수용성이 좋을수록 막을 잘 통과하여 식물체 내 이동성이 좋다(Sur and Stork, 2003). pKa가 높아질수록 산성도는 약해지는데, 물관 pH는 5 정도이고 체관은 8 정도이므로 주입물질 pKa가 높은 편이어야 물관으로 이동을 잘한다(Coslor, 2017). 주입약제가 소량이고 지속성이 좋으며 이행성 또는 수용성이면 물관부에서 효율적으로 이행되어 약효 지속기간도 길어진다.

제형도 주입효율을 결정하는 요인이다. 주입물질은 반드시 물관이동성이 좋아야 하며, 침투이행성 약제라면 더욱 좋다. 포타습포스파이트, 에마텍틴벤조에이트, 아바텍틴 등은 물관과 체관 모두로 이동하지만 이미다클로프리드는 물관으로만 이동하므로 수간주입 효과도 다르다(Huang et al., 2016). 느릅나무 마름병 방제 연구에서 MBC·HCl은 50% 베노밀 수화제보다 수용성이 높았기 때문에 더 빨리 주입되었으며, 방제효과도 MBC·HCl이 더 좋았다(Van Alfen and Walton, 1974). 유효성분 외에도 제품의 안정성을 높이고 효과를 유지하기 위한 물질들이 첨가되어 있는데, 이들의 특성도 수간주입 효율에 영향을 미친다. 수용액 pH는 중성이어야 하며, 침투성 또는 흡착성 보조제가 없고, 전신 이동능력 등을 갖추고 있어야 한다.

주입 시기, 날씨 및 토양 환경

주입할 때의 환경도 이행과 분산에 매우 중요하다. Byrne et al. (2014)은 아보카도에 대한 연구에서 잎이 한창 자라는 시기에 수간주입 속도가 가장 빨랐다고 하였다. 자두와 사과 연구(Clifford et al., 1987)에서 열매 수확 후에 수간주입하면 주입물질이 확산에 의해 비활동성 목질부로도 이동하여 속도도 늦어지고 분산도 불량하였던 반면, 월동 후 발아 직전이나 개화기에 수간주입하면 활동성 물관부만으로 이동하여 수간주입 속도도 상대적으로 빨랐고, 이동과 분산도 좋았다. 그밖에도 Cha et al.(2003), Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar(2000), Tattar and Tattar(2007) 등 많은 연구자들이 생육 초기가 후기보다 수간주입에 더 적합하다고 하였다. Sinclair and Larsen (1981)은 몇 가지 수종에 대한 연구에서 특이하게도 6월보다는 9월에 수간주입하였을 때 더 빠르게 주입되었다고 보고하였으나 그 이유를 설명하지는 못하였다. 주입시기에 따라 큰 차이가 없다는 보고도 있는데 Ugine et al. (2013)은 노르웨이단풍(*Acer platanoides*)에 이미다클로프리드를 개엽 초기인 4월 하순에서 5월 초순 수간주입 하였을 때가 잎이 완전히 전개한 5월 하순에서 7월 초순 처리에 비하여 더 빨리 흡수되었으나 개체간 변이가 많아 통계적 차이는 확인 할 수 없다고 하였다. 또한 Cowles et al. (2006)은 솔송나무(*Tsuga spp.*)림에서 *Adelges tsugae*를 방제하기 위하여 이미다클로프리드를 가을에 수간주입한 것과 봄에 수간주입한 것에 효과 차이가 없다고 하였다.

수간주입은 증산류를 이용하는 것이므로 증산에 영향을 미치는 요인들은 모두 수간주입 속도에도 영향을 미친다고 볼 수 있다. 침엽수는 주행성을 보여 한낮에는 기공이 닫히는 경우가 많으므로 이른 아침과 이른 저녁이 수간주입 적기이다. 활엽수는 해가 비치고 미풍이 있을 때는 다 가능하나, 더운 여름 한낮에는 기공을 닫으므로 증산류가 약해져 수간주입 속도가 늦어진다.

토양은 건조하거나 과습하지 않아 기공이 열리는 것을 방해하지 않을 때가 수간주입에 적당하다. 따라서 토양이 건조하다면 미리 토양에 관수를 하여 습도가 유지되도록 한 후에 수간주입을 하는 것이 좋다.

한편 병해충의 생태적 특성 또한 방제에 있어서 매우 중요한 요인이므로 수간주입 시기는 반드시 대상 수목의 생리적 특성과 대상 병해충의 생태적 특성을 복합적으로 고려하여야 한다. 우리나라에서 수간주입 방제법을 적용하고 있는 중요 산림해충의 하나인 솔껍질깍지벌레(*Matsucoccus thunbergianae*)의 경우 11월부터 익년 2월의 후약충기를 수간주입 시기로 설정 해 놓고 있는데(KFS, 2019) 이 해충의 우화시기가 지역에 따라 한 달 정도 차이가 있는 점을 감안하면(Lee, Unpublished data) 수간주입 시기도 지역에 따라 달라져야 할 것이다.

수간주입 방법과 기술 등

수간주입 기술에 따라서도 수간주입 효율은 크게 달라지는데, 주입압력과 주입공은 흡수 및 분산과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

주입압력은 주입시간과 반비례 관계이므로 송백류 등 수지 분비가 많은 나무에 수간주입할 때 특히 중요하다. 소나무에서는 주입압력이 클수록 수지 분비가 억제되며 주입 시간이 단축되는 경향을 보였다(Lee et al., 2014). 하지만 높은 압력으로 주입하면 주입 시간은 짧아지는 반면, 물관 폐색, 수피 갈라짐, 형성층 손상, 수피 병반 등 다양한 피해를 초래할 수도 있다(Perry et al., 1991).

천공 속도, 천공날 모양, 천공 위치, 천공 깊이, 천공각, 천공 수 등 주입공 특성에 따라서도 주입 효율이 크게 달라진다(Ferry and Gomez, 2014; VanWoerkom, 2014; Lee et al., 2017). 저속천공은 고속천공에 비하여 주입공이 상대적으로 거칠고 목질 부스러기가 남아 유관속계를 차단하기도 한다. 고속천공은 물관부에 마찰이 생기고 그로 인해 흡수가 감소할 수 있다. 끝이 뾰족한 천공날은 목질부를 깨끗이 파내어 흡수를 증가시킨다(Orr et al., 1988). 주입공은 수간 중심을 향하여 축에 수직으로 뚫는 것이 가장 적당하며, 천공각이 증가할수록 도관조직을 놓치거나 손상을 일으킬 수 있다(Davis, 1991).

느티나무 수간주입에서 주입공 지름 5 mm와 10 mm를 비교한 결과, 구멍 크기는 주입효율에 큰 영향을 미치지

않았으며(Cha et al., 2019), 구멍이 클수록 주입 후 변색 등 부작용이 많았다는 보고도 있다(Cha and Yun, 1995; 1996).

수간주입 종류와 방법

오랜 역사를 가지고 있는 수간주입은 처음 시도된 이래 꾸준히 발전하여 왔다. 나무와 화합물에 대한 지식이 많아지면서 나무보호 전문가들은 주입 효율은 높이고 나무에 주는 피해는 줄이기 위하여 끊임없이 새로운 기술을 개발하고 있으며, 다양한 수간주입법들이 상황과 목적에 맞게 사용되고 있다.

수간주입은 주입공 크기에 따라 대공주입(macroinjection)과 소공주입(microinjection)으로 나눌 수 있다(Costonis, 1981). 대공주입은 물관부에 지름 1 cm 이상, 깊이 1~10 cm으로 큰 구멍을 뚫어 주입하는 것이고, 소공주입은 지름 0.5 cm 이하, 깊이 2 cm 이하인 구멍을 뚫어 주입하는 것이다. 밤나무 줄기마름병과 느릅나무 마름병 발생으로 수간주입이 활성화되었던 20세기 초중반까지는 구멍 크기가 크면 주입이 더 잘된다는 믿음으로 대공주입이 대세였다(Costonis, 1981). 그러나 20세기 중반부터 Shigo 박사를 비롯한 여러 연구자들이 수간주입공으로 인한 목질부 변색 및 부후 피해를 잇달아 지적하고(Shigo and Marx, 1977; Anderson et al., 1985) 구멍 크기가 주입속도에 미치는 영향은 미미하다는 사실이 알려지면서 수간주입의 주류가 소공주입으로 바뀌었다(Cha et al., 2003; Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2000; Doccola and Wild, 2012).

관습적으로 수간주입이란 용어는 물질을 줄기 내부로 전달하는 모든 방법을 포함한다. 그러나 엄밀하게 구분하면 물질을 밀어 넣는 주입, 빨려 들어가거나 흘러 들어가는 흡수, 그리고 조직 사이에 심어 놓는 삽입(매몰) 등 세 가지로 나뉜다. 주입이란 적당한 용기와 도구를 사용하여 물질을 강제로 조직 내부로 밀어 넣는 것이며, 흡수는 주입공에 채워진 물질이 물관의 흐름에 편입되어 흘러 들어가도록 하는 방법이고, 삽입 또는 매몰은 주입하려는 물질을 젤라틴 캡슐에 담아 물관부에 심어 놓는 방법이다(Lee et al., 2017).

주입과 흡수는 주입물질을 주로 수용액으로 만들어 사용하며, 몇 시간에서 며칠 이내에 모두 주입되어 약효가 나타난다. 삽입식 수간주입에서는 용액 대신 가루 또는 입자로 된 물질을 젤라틴 캡슐에 넣어 사용하는데, 약효가 천천히 나타나지만 오래 지속된다(Tattar, 1989).

주입식은 다시 중력식과 압력식으로 구분할 수 있는데, 오랜 역사를 가지고 있는 중력식은 주입액 용기를 일정 높이에 매달아 중력에 의해 밀려들어가도록 하는 방법이다. 압력식은 내부에 압력을 넣은 밀폐용기를 사용하거나 압력을 가할 수 있는 도구를 사용하여 주입액을 일정 수준의 압력으로 물관부에 밀어 넣는 수간주입 방법이다. 중력식은

상대적으로 많은 양을 주입할 수 있으므로 주입물질의 농도가 낮아 약해 발생 우려가 적고, 수관에 고르게 분포된다는 것이 장점이다. 반면, 설치가 번거롭고 주입에 걸리는 시간이 길다는 단점이 있다. 압력식은 상대적으로 간편하고 처리 및 주입 시간도 짧은 것이 강점이지만, 압력식 용기를 사용하는 경우에는 용량이 크지 않아 고농도로 주입하므로 약해가 발생하거나 분산이 고르게 되지 않을 우려가 있다. 1950년대에 미국 Mauget사에서 일회용 압력식 수간주입기 ‘모제캡슐’을 개발하여 시판한 이래 지금은 여러 회사에서 제품을 생산하여 판매하고 있다. 최근에는 재사용할 수 있는 압력식 수간주입기도 여러 종 판매되고 있다. 중력식 수간주입에서는 관습적으로 대공주입법을 사용하여 왔으나, 압력식인 모제캡슐은 생산 당시부터 작은 주입관을 사용하는 소공주입법을 사용하였다. 지금은 주입기 종류를 막론하고 대부분 소공주입법을 사용하고 있다.

흡수식은 크고 깊게 뚫은 주입공에 주입액을 채워 자연적으로 흡수되도록 하거나, 조그만 개방용기에 주입액을 채우고, 대공주입법으로 흡수시키는 방법이다. 처리는 매우 쉽고 간단하지만 구멍을 크게 뚫어야 하므로 수간주입으로 얻을 수 있는 이득보다는 나무에 주는 피해가 더 커서 특별한 경우를 제외하고는 잘 사용하지 않는 방법이다. 주로 고농도로 소량을 주입하므로 약해 발생 우려도 크다.

삽입식은 주입물질이 든 캡슐을 조그만 플라스틱 주입용기 안에 넣어 물관부에 심어 놓는 주입법이다. 천공으로 잘린 물관에서 수액이 흘러나오면 캡슐 안에 들어있는 물질이 녹아 나오고 증산류를 따라 물관을 타고 이동한다. 오랜 시간에 걸쳐 서서히 녹아나오므로 약효 지속기간이 길다는 장점이 있으나 주입구멍을 크게 뚫어야 하는 것이 단점이다.

물질을 나무에 주입할 때 천공기를 사용하는 방법과 사용하지 않는 방법, 즉 구멍을 뚫는 방법과 뚫지 않는 방법이 있다. 일반적인 주입과 흡수, 대공주입과 소공주입 모두 구멍을 뚫는 방법이다. 구멍을 뚫지 않는 수간주입에서는 속이 빈 바늘 또는 크고 납작한 바늘을 사용한다. 속이 빈 바늘을 사용하는 주입법은 대부분 압력식 수간주입이며, 일반적인 수간주입과는 달리 사부조직으로 물질을 주입하는 방법도 있다(Gill et al., 1999). 빨대 끝 부분을 납작하게 눌러 칼날 같은 주입관을 사용하는 수간주입법은 칼날을 통도조직 목재섬유 사이에 때려 박고, 주입액이 든 용기를 연결하여 약액이 흡수되도록 하는 것으로, 물관을 절단하지 않는 것이 장점이다(Doccola and Wild, 2012; VanWoerkom, 2012; Berger and Laurent, 2019). 대공주입법으로부터 시작하여 소공주입법으로 발전되어 온 수간주입의 역사를 볼 때, 앞으로는 바늘주입법이 더욱 일반화될 것으로 예상된다.

우리나라에서 가장 많이 사용하는 수간주입법은 압력을 가하지 않고 대기압 하에서 중력과 수액의 흐름에 의해 약액이 주입되는 방식인 중력식 수간주입법이다. 중력식 수간

주입은 주입용기를 위쪽에 매달고 주입관을 수간의 주입구멍에 연결하여 주입하는 방식으로, 일반적으로 저농도로 많은 양을 주입하는 방법이다. 생육기에는 수지분비가 왕성한 송백류에는 수지가 잘 분비되지 않는 겨울에서 이른 봄에 사용하거나 낮은 압력을 가하는 미세압력식 수간주입법을 사용하기도 한다.

현재 가장 큰 문제인 소나무 시들음병(소나무 재선충병) 방제에는 천공 후 피펫이나 약제주입기를 이용하여 약제를 천공구멍 속에 채운 뒤 자연적으로 흡수 이행되게 하는 흡수식과 소공주입인 압력식 수간주입 제품을 사용하고 있으나, 솔잎혹파리 방제에는 주로 대공주입인 흡수식 수간주입법을 사용하고 있다(KFS, 2014). 생활권 수목 병해충 방제 및 영양 공급에는 주로 모제캡슐 수간주입과 흡수한 미세압력식 수간주입법을 사용한다(Lee et al., 2017). 일부 지역에서 벚나무 응애류 방제에 삽입식 수간주입을 사용하기도 한다.

수간주입 문제점

일반적으로 구과식물은 물관 구조 때문에 속씨식물보다 수간주입이 더 어렵다(Sachs et al., 1977; Reil, 1979). 속씨식물 물관은 지름이 큰 반면, 구과식물 통도조직은 주로 헛물관으로 이루어져 구조적으로 통수 저항이 더 크다(Chaney, 1986). 몇몇 구과식물은 수지를 분비하여 헛물관과 주입관을 막으며, 이로 인해 수간주입 자체가 불가능한 경우도 있다(Zillmer et al., 1991; Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar, 2004). 일반적으로 수지분비가 적은 이른 봄이나 늦가을에는 수간주입이 가능하지만, 일단 수지가 분비되면 송진이 주입관을 막는 것은 물론, 분출된 수지가 주입용기로 역류하는 경우도 빈번하다.

수간주입이 나무에 해로운 가장 큰 이유는 나무에 구멍을 뚫어 상처를 만든다는 것이다. 따라서 주입공을 주입상처라고 부르기도 한다(Tattar, 1989; Perry et al., 1991). 수간주입으로 인한 피해는 대부분 나무의 생리 및 그에 미치는 환경의 영향을 충분히 이해하지 못하였거나 수간주입 후 남겨진 상처에 대해 깊이 생각하지 않기 때문에 생기는 것들이다. 커다란 수간주입이나 삽입 상처가 나무를 자극하면 할수록 주간 내부의 변색기둥은 서로 합쳐져 죽은 목질부 기둥은 점점 더 커진다(Shigo, 1986).

주입공은 제대로 아물지 않을 경우 부후가 시작되어 오히려 역효과를 초래하는 경우도 많다(Cha and Yun, 1995; Doccola et al., 2011). 나무의 상처 자가치유는 상처 크기가 작고 깊이가 얕을수록 성공 가능성이 높다. 목질부에 구멍을 뚫으면 물관이 단절된 부분에 공기가 차서 물기둥이 단절되고 수피가 손상되며 부후, 궤양 등과 연결되는 경우가 많다(Shigo, 1977; Stipes and Campana, 1981; Anderson et al., 1985). 물관 공기기둥은 위아래로 확장되어 뿌리까지 진

전되는 것이 관찰되었다(Perry et al., 1991). 실제로 주간 기부에 20 cm 간격으로 수간주입하였을 때, 활동성 통도계의 20%가 차단되고 수분과 물질 이동이 40% 이상 저지되기도 하였다(Perry et al., 1991).

주입상처에 대한 반응은 수종과 주입물질에 따라 질적, 양적으로 다르다(Tanis and McCullough, 2016). 일반적으로 주입공 주변에는 자체 방어를 위하여 페놀화합물 등이 축적되어 변색되고, 녹말이 당으로 바뀌어 상처를 구획화하는 방어벽을 만든다(Shigo and Marx, 1977; Shigo, 1986; Santamour, 1987). 이 단계에서 방어에 성공하지 못하면 부후가 시작된다. 나무에 상처가 나면 당을 비롯하여 여러 물질들이 흘러나오므로 그 부분에 새로운 미생물과 해충이 급속히 증식할 수 있는 조건이 만들어지고, 나무에 피해가 나타날 수 있다(Perry et al., 1991; Tsen et al., 2016). 실제로 수간주입공이 부후균 침입통로 역할을 하는 경우가 빈번하다(Shigo, 1984; Doccola et al., 2011). 소나무와 밤나무에서 주입구멍 크기와 물관 변색부 크기 사이에 정의 상관관계가 있다는 연구결과도 있다(Cha and Yun, 1995; 1996).

그밖에도 구멍 주변에서는 형성층 생장이 왜곡되거나, 목질부가 위아래로 갈라지는 현상, 미생물 감염에 의한 수액 누출, 부후, 수피 고사, 궤양, 양분 저장 공간 감소 등의 변화가 나타난다(Cha and Yun, 1996; Doccola et al., 2011). 이런 변화들은 특히 주입공을 30~45°로 뚫었을 때, 그리고 수세가 약한 나무에서 심하게 나타났다(Perry et al., 1991).

나무 상처에 화학물질을 주입하면 피해가 심해지고, 부후가 빠르게 진행될 수 있다. Paraformaldehyde 같은 물질은 수간주입하면 물관을 둘러싸고 있는 축방향유조직(axial parenchyma)을 죽인다. 다른 세포들의 활동을 조절하는 두뇌 역할을 하는 축방향유조직이 죽으면 방어를 위한 폐색막이 파괴되고 목질부에 긴 변색재가 생긴다. 목질부가 죽으면 나무는 구획화(compartmentalization)를 하지만 한계가 있다(Shigo, 1986). 따라서 나무에 대한 주입물질의 독성도 문제가 된다.

현재 우리나라에서는 일회용 압력식 수간주입제품을 사용하지 않으면, 대개 중력식 또는 흡수식 수간주입을 한다. 이 경우 주입구멍을 크고 깊게 뚫는데, 국가에서 발행한 임업기술핸드북(NIFOS, 2012)에 소개되어 있는 솔잎혹파리 방제 수간주입에서도 지름 10 mm, 깊이 70 mm 주입구멍을 사용하며, 소나무재선충 방제 수간주입에서도 주입구멍을 지름 6 mm 이상, 깊이 100 mm로 뚫도록 제시하고 있다. 민간에서 사용하는 수간주입법에서도 구멍 크기를 지름 10 mm, 깊이 40 mm 이상으로 뚫는 것이 일반적이다. 그 이유는 주입구멍의 크기가 클수록 주입속도가 빠르고 약액이 잘 전달되며, 특히 수간주입이 필요한 나무들은 대부분 수관의 상태도 불량하므로 주입구멍이 작을 경우 제대로 주입되지 않을 것이라는 생각, 그리고 송백류의 경우 송진이 나

오기 전에 약액이 빨리 흡수되도록 하여야 한다는 생각 때문인 것으로 알려져 있다. 또한 주입구멍을 크게 뚫을 경우 작은 구멍을 여러 개 뚫는 것보다 상대적으로 시간이 절약되며 주입하는 약액의 양도 작은 구멍에 비하여 많이 들어가기 때문에 작업의 시간을 단축시킬 수 있어 선호하는 방법이다(Personal communication).

수간주입에서 반드시 고려하여야 하는 나무 특성을 무시한 채 수종에 관계없이 대부분 같은 방법으로 시행하는 것도 심각한 문제다. 우리나라에서 소나무 재선충의 기주가 되는 소나무와 곰솔, 잣나무에 대한 수간주입 방법은 기주의 종류와 상관없이 모두 동일한데(KFRI, 2006) 수간주입한 약제가 이동 될 수 있는 변재의 구성은 잣나무가 다른 두 수종에 비하여 현저히 적은 편으로 변재의 상대적 비율은 지역이나 입지 환경, 수종별로도 차이를 보이고 있어(Lee, Unpublished data) 효율적인 수간주입을 위해서는 처리 전에 대상지별로 이러한 특성을 고려한 방제 설계가 필요하다. 아울러 수간주입 시 시기와 환경에 따른 충분한 고려가 있어야 하나 일괄적으로 기본적인 이해 없이 수간주입하는 것도 개선해야 할 사항이다. 관광지나 국립공원 지역, 보호수 및 골프장과 같은 지역에서는 소나무재선충 감염을 예방하기 위하여 지속적, 주기적으로 수간주입을 할 수밖에 없으므로 나무가 입는 피해를 최소화 할 수 있는 방법을 적용하는 것이 매우 중요하다. 즉 지속성이 높은 약제의 처리나 천공 구멍을 최소화 할 수 있는 방법의 적용, 천공 깊이의 최소화 방안 등이 종합적으로 검토되어야 할 것이다.

아울러 우리나라는 소나무재선충병이나 솔잎혹파리, 솔껍질깍지벌레의 예방이나 구제를 위하여 매년 수간주입을 하고 있지만 방제의 실효성을 증가시키기 위한 방법 개선이나 기초적 연구가 매우 부족한 실정이다. 특히 생활 근린 시설의 많은 수목류에 대한 환경친화적 방제법으로 수간주입에 대한 수요가 증가할 것을 고려한다면 수간주입법 개선, 방제효과 제고 등에 대한 기본 연구들이 반드시 필요하다.

나무건강과 주입 효율을 고려한 수간주입 방법

수간주입은 최근 30~40년 동안 새롭게 효율적인 주입 장치 개발과 살균제, 살충제는 물론 생물농약과 영양소 주입법 개선, 물관이동성 제형 개발 등으로 추진력을 얻고 있다(Phair and Ellmore, 1984; VanWoerkom, 2012). 그럼에도 불구하고 수간주입은 나무에 상처를 남게 때로는 의도치 않은 피해를 일으킬 수도 있으므로 반드시 올바른 방법으로 시행하여야 한다. 수간주입의 핵심은 적절한 물질을 적절한 시기에 적절한 곳에 주입하여 적절한 곳으로 이동시키는 것이다(Shigo, 1986).

나무의 생리적 특성에서 가장 먼저 고려할 것은 물이 이

동하는 통로이다. 앞에서 언급했듯이 목질부 종류, 즉 무공재, 산공재, 환공재 중 어느 것인지에 따라 물이 이동하는 조직이 다르므로 그에 맞는 구멍을 뚫어야 한다. 가장 최근 나이에 1~5개로 물이 이동하는 무공재 수종은 가장 최근 나이에 1개만 사용하는 환공재 수종보다는 주입구멍을 더 깊이 뚫어도 무방하지만, 이 경우에도 깊이 5 cm를 넘지 않는 것이 좋으며 무공재 수종 간에도 수종에 따라 변재비율이 다르므로 이런 부분을 충분히 고려하여야 한다. 환공재 수종에서는 주입공 깊이에 따라 주입속도나 양이 달라지는 것이 아니므로 깊이 1~2 cm 정도면 충분한 효과를 얻을 수 있으며, 깊게 뚫는 경우 오히려 주입효율이 낮을 수 있다 (Chaney, 1986). 또한 물관과 헛물관은 옆 방향으로의 이동 특성이 다르므로 헛물관만 있는 겉씨식물은 속씨식물에 비하여 주입공 수를 줄여도 비슷한 주입효과를 얻을 수 있다 (Chaney, 1986).

주입구멍의 각도와 방향도 중요하다. 수간주입 후 주입공 구획화와 자기방어를 고려한다면 주입공은 작고 얕을수록 좋으므로 주입구멍 각도는 수평이 가장 좋다. 그러나 실제로는 주입용기 연결 편리성 및 안정감을 고려하여 수평보다는 약 20° 정도 아래로 향해 뚫고 있는데 이러한 부분을 개선할 수 있는 방법의 개발도 필요하다. 천공각이 증가할수록 물관을 놓치거나 손상을 일으킬 수 있으므로 주의하여야 한다 (Davis, 1991). 주입공은 목질부 상층을 최소화하기 위하여 수(정중앙)를 향해 뚫는 것이 원칙이다. 그러나 환공재 수종에서 수피 두께가 충분치 않아 수간주입관을 고정하기 위해 목질부까지 많이 밀어 넣어야 하는 경우에는 방향을 옆으로 비스듬하게 하여 주입액이 가장 최근 나이테로 이동할 수 있도록 하여야 한다. 주입관 끝부분이 가장 최근 나이테를 지나가 버리면 주입효율이 매우 낮아지기 때문이다.

무공재 수종으로는 *Pinus* 속 소나무류와 잣나무류, *Picea* 속 가문비나무, 독일가문비나무 등이 있고, 산공재 수종에는 *Betula* 속 자작나무, 박달나무, *Cornus* 속 층층나무, *Acer* 속 단풍나무류, *Prunus* 속 뱀나무류, *Liriodendron* 속 백합나무, *Alnus* 속 오리나무, 사방오리나무, *Carpinus* 속 서어나무, 개서어나무 등이 있다. 환공재 수종으로는 *Zelkova* 속 느티나무, *Ulmus* 속 느릅나무, *Fraxinus* 속 물푸레나무, *Quercus* 속 신갈나무, 졸참나무, 갈참나무, 떡갈나무, 상수리나무, 굴참나무, 가시나무, 붉가시나무, *Castanea* 속 밤나무, *Fagus* 속 너도밤나무, *Castanopsis* 속 구실잣밤나무, 메밀잣밤나무 등이 있다.

일반적으로 구과식물(Coniferous species)은 통수 저항이 크고 수지가 분비되기 때문에 수간주입이 어렵다. 따라서 수지가 분비되기 전에 약액이 먼저 주입될 수 있도록 주입 시기를 잘 선택하고 압력식으로 주입속도를 높이면 수간주입이 가능하다. 수지 점도를 낮추는 물질을 주입액과 함께 주입하는 것도 방법이다.

수간주입으로 인한 부후를 최소화하기 위해서는 약제가 충분히 주입될 수 있는 조건 내에서는 주입구멍을 가능한 한 적고, 작고, 얇게, 그리고 지표면 부분에 만들어 나무가 스스로 치유하기 쉽도록 해주는 것이 중요하다.

Sánchez-Zamora and Fernández-Escobar (2000)는 지름 3 mm 주입공은 조건에 따라서 주입속도 변이가 심했으나 4 mm와 6 mm에서는 모든 시험 수종에서 48시간 안에 처리액 대부분이 주입되었다고 보고하면서 나무의 상처치유 등을 고려할 때 지름 4 mm 주입구멍을 사용할 것을 제안하였다. 선행 연구결과들을 종합하면 주입속도와 분산에 차이가 없다면 작은 주입구멍을 사용할수록 나무의 건강에는 도움이 되는 것이 확실하다.

주입구멍은 수피와 형성층에 날이 잘 선 천공기로 깨끗하고 매끈하게 뚫고, 내부에 찌꺼기가 남지 않도록 하여야 한다 (Phair and Ellmore, 1984). 특히 고속으로 구멍을 뚫을 경우 마찰열로 통도조직을 손상하여 흡수에 영향을 줄 수 있으므로 주의하여야 한다 (Orr et al., 1988). 소나무재선충 예방을 위한 수간주입과 같이 대규모의 수간주입에서는 마찰열로 인하여 영향을 받을 수 있는 작업 시간을 고려하여 일정 시간 천공 작업 후 드릴 날을 교체하거나 하는 현장 중심적인 대안 마련이 필요할 것이다.

주입구멍 위치는 기능을 수행하고 있는 물관부를 택하여야 하며, 이미 사용했던 구멍이나 웅이, 상처 등의 위, 아래에는 주입을 하지 않는다. 차후 주입할 구멍의 위치도 생각하여야 한다. 한 생육기가 지난 후 구멍을 점검하며 아직 아물지 않는 경우에는 추가 수간주입을 하지 않아야 한다 (Shigo, 1986). 전술한 바와 같이 이러한 사항은 관광지나 보호수와 같이 2~3년 주기로 수간주입 처리를 해야 하는 경우 충분히 고려하여 수간주입을 하여야 할 것이다.

수간주입은 수액이동과 함께 이루어지므로 시기 선택도 매우 중요하다. 증산이 잘될 때 해야 하므로 생육기 중 미풍이 있는 맑은 날 오전에 하는 것이 가장 좋다. 단, 침엽수는 주행성을 보여 낮에는 기공을 닫으므로 이른 아침과 이른 저녁이 수간주입 적기다. 활엽수, 침엽수 모두 더운 여름 한낮은 기공 닫으므로 수간주입을 피하는 것이 좋다. 토양은 건조하거나 과습하지 않아야 하며, 건조하면 미리 관수한 후에 시행하는 것이 좋다.

주입물질 특성도 중요하다. 수용성물질이 유제보다 더 효율적으로 이동되므로 수용성이 좋을수록 더 효율적으로 분산된다 (VanWoerkom et al., 2014). 용해도 역시 흡수와 이동에 매우 중요하며 (Percival and Boyle, 2005), 엽면살포용 제형이 반드시 주입공을 통한 통도계 이동에 적합한 것은 아니다 (Coslor, 2017). 나무 피해를 줄이기 위해서는 살균제, 살충제의 주제와 부제 모두 나무에 대해 독성이 없는 것으로 선발하여야 하며, 이동성이 좋은 제형으로 개발하여야 한다. 소량으로 약효를 보이며 지속적이고 침투이행성이거

나 수용성이면 더욱 적합하다.

결 론

나무줄기의 통도계로 약액을 집어넣는 수간주입은 대기 중 분무법이나 토양관주법을 대체할 수 있는 약제 처리법으로 환경에 대한 영향이 거의 없으므로 특히 도시지역 병해충 방제에 적합하다(VanWoerkom, 2012). 하지만 수목의 해부학적 특성에 대한 충분한 지식 없이, 그리고 수목 생리에 영향을 미치는 환경조건을 고려하지 않고 시행한다면 수간주입은 나무에 상처를 남겨 때로는 의도치 않은 피해를 일으킬 수도 있으므로 반드시 올바른 방법으로 시행하여야 한다.

올바른 수간주입이란 적절한 물질을 적절한 시기에 적절한 곳에 적절한 방법으로 주입하는 것이다. 그러기 위해서는 처리하려는 수목의 해부학적 특성에 따른 수분이동 생리를 이해하고 있어야 하며, 그러한 특성에 맞도록 주입구멍을 뚫어야 한다. 또한, 주입구멍은 나무에 주는 피해를 최소화하는 방법으로 뚫어야 하며, 주입효율이 좋은 부위를 선택하여야 한다. 시기적으로는 나무 안에서 물이 활발하게 이동하는 생육기가 좋으며, 증산이 최고로 이루어질 때 수간주입 효율도 최고에 이른다. 주입하는 물질의 약리적 또는 영양적 기능도 중요하지만, 화학적, 물리적 특성에 따라 수목 내부에서 이동이 결정되므로 수간주입 효과 제고를 위해서는 제형과 보조성분들의 특성도 매우 중요하다.

최근에는 천공기를 사용하지 않는 바늘형 수간주입기도 개발되어 사용 중이며, 다양한 수간주입기와 수간주입용 제형들이 시중에 유통되고 있다. 따라서 지금까지 검토한 내용들에 입각하여 적절한 제품을 선정하고 적절한 방법으로 수간주입한다면 나무에 주는 부담을 줄이면서 더 좋은 처리 효과를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원의 ‘산림병해충 나무주사 약효 시험기준과 방법(안) 마련’과제와 충북대학교 2018학년도 연구년제사업의 일부 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

Aajoud A, Raveton M, Aouadi H, Tissut M, Ravanel P, 2006. Uptake and xylem transport of fipronil in sunflower. *J. Agric. Food Chem.* 54(14):5055-5060.

- Aćimović SG, McGhee GC, Sundin GW, Wise JC, 2015. Evaluation of trunk-injected bactericides and prohexadione-calcium for environmentally friendly control of fire blight (*Erwinia amylovora*) in apples. *Proc. of the 7th Cong. on Plant Protec., Plant Protec. Soc. Serbia*, pp129-134.
- Aćimović SG, VanWoerkom AH, Garavaglia T, Vandervoort C, Sundin W, et al., 2016. Seasonal and cross-seasonal timing of fungicide trunk injections in apple trees to optimize management of apple scab. *Plant Dis.* 100(8):1606-1616.
- Anderson JL, Campana RJ, Shigo AL, Shortle WC, 1985. Wound responses of *Ulmus americana* 1: Results of chemical injection in attempts to control Dutch elm disease. *J. Arboric.* 11(5):137-142.
- Berger C, Laurent F, 2019. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases. *Crop protect* 124:104831. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.05.025.
- Byrne FJ, Krieger RI, Doccola J, Morse JG, 2014. Seasonal timing of neonicotinoid and organophosphate trunk injections to optimize the management of avocado thrips in California avocado groves. *Crop Prot.* 57:20-26.
- Cha B, Tattar TA, 1993. Effects of antibiotic injection on ash yellows-infected white ash (*Fraxinus americana* L.). *Arboric. J.* 17(2):131-143.
- Cha BJ, Yun JK, 1995. The size of injection wound, tree diameter, and injection wound healing of a tree - Response to Pospam Injection Wound -. *Jour. Korean For. Soc.* 84(1): 22-30. (In Korean)
- Cha B, Yun JK, 1996. Responses of *Castanea crenata* to injection wound for oxytetracycline (OTC). *Korean J. Environ. Agric.* 15(1):77-85. (In Korean)
- Cha B, Lee S, Liu M, Han S, 2003. Changes in the absorption rate of jujube trees in trunk injection over time and control effect of different trunk injection method and chemicals for jujube witches'-broom disease. *Kor. J. Mycoplasmol.* 14:38-45. (In Korean)
- Cha B, Kim MY, Kim JK, Kim CH, Lee KJ, 2019. Influence of the wound size and the crown condition on the trunk-injection efficiency in Zelkova trees. *J. Agri. Life Sci.* 53(1):73-84. (In Korean)
- Chaney WR. 1986. Anatomy and physiology related to chemical movement in trees. *J. Arboric.* 12(4):85-91.
- Clifford DR, Gendle P, Holgate ME, 1987. Uptake and movement of the fungicide imazalil following trunk injection into apple and plum trees by a novel, rapid technique. *Annals Appl. Biol.* 111(3):541-551.
- Coslor CC, 2017. Refining trunk injection strategies for control of foliar insect pests and disease in Michigan apple orchards. PhD Diss., Michigan State University, Ann Arbor, USA. 99pp.
- Costonis AC, 1981. Tree injection: perspective macro-injection/micro-injection. *J. Arboric.* 7(10):275-277.
- Cowles RS, Montgomery ME, Cheah CAS-J, 2006. Activity and residues of imidacloprid applied to soil and tree trunks

- to control hemlock woolly adelgid (Hemiptera: Adelgidae) in forests. *J. Econ. Entomol.* 99(4):1258-1267.
- Davis TD, 1991. Regulation of tree growth and development with triazole compounds. *J. Arboric.* 17(6):167-170.
- Doccola JJ, Wild PM, 2012. Tree Injection as an alternative method of insecticide application, pp. 61-78. In: Soloneski S, (Ed). *Insecticides – basic and other applications*. InTech, Rijeka, Croatia.
- Doccola JJ, Bristol EJ, Sifleet SD, Lojko J, Wild PM, 2007. Efficacy and duration of trunk-injected imidacloprid in the management of hemlock woolly adelgid (*Adelges tsugae*). *Arbor. Urban For.* 33(1):12-21.
- Doccola JJ, Smitley DR, Davis TW, Aiken JJ, Wild PM, 2011. Tree wound responses following systemic insecticide trunk injection treatments in green ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) as determined by destructive autopsy. *Arbor. Urban For.* 37(1):6-12.
- Ferry M, Gomez S, 2014. Assessment of risks and potential of injection techniques in integrated programs to eradicate the red palm weevil: review and new perspectives. *Fruits* 69(2):143-157.
- Flower CE, Dalton JE, Knight KS, Brikha M, Gonzalez-Meler MA, 2015. To treat or not to treat: diminishing effectiveness of emamectin benzoate tree injections in ash trees heavily infested by emerald ash borer. *Urban For. Urban Greening* 14(4):790-795.
- Gill S, Jefferson DK, Reeser RM, Raupp MJ, 1999. Use of soil and trunk injection of systemic insecticides to control lace bug on hawthorn. *J. Arboric.* 25:38-42.
- Harries FH, 1965. Control of insects and mites on fruit trees by trunk injections. *J. Econ. Entomol.* 58(4):631-634.
- Hollister WO, Jacobs HL, 1928. Injection experiments for controlling insects. *J. Econ. Entomol.* 21(1):198-201.
- Huang J, Zhang J, Li Y, Li J, Shi X-H, 2016. Evaluation of the effectiveness of insecticide trunk injections for control of *Latiaia lepida* (Cramer) in the sweet olive tree *Osmanthus fragrans*. *Peer J* 4:e2480; DOI 10.7717/peerj.2480
- Kang JY, Kim SG, Kim YC, Kim JG, Kim JS, et al., 1997. *Forest environment conservation*. Hyang-moonsa, Seoul, Korea. pp. 263-282. (In Korean)
- Kim SH, 2006. *Tree health*. Seoul National University Press. Seoul, Korea. 196pp. (In Korean)
- Kim GH, Lee SH, Ahn YJ, 2014. *Principle and applications in insect toxicology*. Worldscience Co. Seoul, Korea. 204pp. (In Korean)
- Korea Forest Research Institute (KFRI), 2006. *Forest pest technology manual*. Korea Forest Research Institute. 300pp. (In Korean)
- Korea Forest Service (KFS), 2014. *Control and monitoring plan for forest disease and insect pests*. Korea Forest Service. 309pp. (In Korean)
- Korea Forest Service (KFS), 2019. *Forest pest control regulations*. Korea Forest Service. 163pp. (In Korean)
- Korea Ministry of Government Legislation (KMGL), Enforcement rules of the special act on the control of pinewood nematode disease. Korea Ministry of Government Legislation. <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=209994#AJAX> (Accessed June 14, 2020)
- La YJ, Brown WM, Moon DS, 1976. Control of witches'-broom disease of jujube with oxytetracycline injection *Korean Journal of Applied Entomology* 15(3):107-110. (In Korean)
- Lee KB, 2012. *Plant morphology*. Life Science Publishing Co. Seoul, Korea. 387pp. (In Korean)
- Lee SM, Kim DS, Lee SG, Park NC, Lee DW, 2009. Selection of trunk injection pesticides for preventive of pine wilt disease by *Bursaphelenchus xylophilus* on Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). *Korean J. Pestic. Sci.* 13(4):267-274. (In Korean)
- Lee KJ, Kim B, Cha B, 2014. Influence of the trunk-injection pressure on the distribution of dye-solution in *Pinus rigida*. *J. Agr. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.* 30:7-14. (In Korean)
- Lee JK, Cha B, Shin HD, La YJ, 2017. *Tree pathology*. Hyang-moonsa, Seoul, Korea. pp. 51-54. (In Korean)
- Lipman CB, Gordon A, 1925. Further studies on new methods in the physiology and pathology of plants. *J. Gen. Physiol.* 7(5):615-623. DOI 10.1085/jgp.7.5.615
- Maso ED, Linaldeddu BT, Fanchin G, Faccoli M, Monthocchio L, 2019. The potential for pesticide trunk injection for control of thousand cankers disease of walnut. *Phytopathol. Medit.* 58(1):73-79.
- May C, 1941. *Methods of tree injection*. *Trees Mag.* 4:7-16.
- McCullough DG, Poland TM, Anulewicz AC, Lewis P, Cappaert D, 2011. Evaluation of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) control provided by emamectin benzoate and two neonicotinoid insecticides, one and two seasons after treatment. *J. Econ. Entomol.* 104(5):1599-1612.
- McKenzie N, Helson B, Thompson D, Otis G, McFarlane J, et al., 2010. Azadirachtin: an effective systemic insecticide for control of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae). *J. Econ. Entomol.* 103(3):708-717.
- Nair R, Weatherall A, Perks M, Mencuccini M, 2014. Stem injection of 15N-NH₄NO₃ into mature Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Tree Physiol.* 34(10):1130-1140.
- National Institute of Forest Science (NIFOS), 2012. *Forest technology handbook*. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea, 1664pp. (In Korean)
- Orr JW, Leonard S, Lentz J, 1988. Field observations of tree injection. *J. Arboric.* 14(11):269-273.
- Park CH, Lee SP, Cha B, 1994. Comparison in adaptability of several commercial antibiotics as the therapeutic agent against jujube witches'-broom disease. *Jour. Agr. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.* 11(2):41-49. (In Korean)
- Percival GC, Boyle S, 2005. Evaluation of microcapsule trunk injections for the control of apple scab and powdery

- mildew. *Ann. Appl. Biol.* 147(1):119-127.
- Perry TO, Santamour FS Jr., Stipes RJ, Shear T, Shigo AL, 1991. Exploring alternatives to tree injection. *J. Arboric.* 17(8):217-226.
- Phair WE, Ellmore GS, 1984. Improved trunk injection for control of Dutch elm disease. *J. Arboric.* 10:273-278.
- Reil WO. 1979. Pressure-injecting chemicals into trees. *Calif. Agric.* 33:16-19.
- Roach, WA, 1939. Plant injection as a physiological method. *Ann. Bot.* 3(9):155-226.
- Rumbold C, 1915. Methods of injecting trees. *Phytopathology* 5:225-229.
- Rumbold C, 1920. The injection of chemicals into chestnut trees. *Amer. J. Bot.* 7(1):1-20.
- Sachs RM, Nyland G, Hackett WP, Coffelt J, Debie J, et al., 1977. Pressurized injection of aqueous solutions into tree trunks. *Scientia Hortic.* 6(4):297-310.
- Sánchez-Zamora MA, Fernández-Escobar R, 2000. Injection-size and the time of application affects uptake of tree trunk-injected solutions. *Scientia Hortic.* 84(1-2):163-177.
- Sánchez-Zamora MA, Fernández-Escobar R, 2004. Uptake and distribution of trunk injections in conifers. *J. Arboric.* 30(2): 73-79.
- Santamour FSJ, 1987. Building walls and breaching walls: truth and consequences in wound compartmentalization. *J. Arboric.* 13:262-266.
- Saunders JL, 1971. Trunk drenches and injections for elm leaf beetle control. *J. Econ. Entomol.* 6(5):1287-1288.
- Shaaban MM, 2009. Injection fertilization: A full nutritional technique for fruit trees saves 90-95% of fertilizers and maintains a clean environment. *Fr, Veg, Cereal Sci, Biotech,* 3(1):22-27.
- Shigo AL, 1984. Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defending themselves. *Ann. Rev. Phytopathol.* 22:189-214.
- Shigo AL, 1986. A new tree biology. Shigo and Trees Asso., Durham, New Hampshire.
- Shigo AL, Marx WE, 1977. Compartmentalization of decay in trees. USDA Forest Service Agric. inform. Bull. No. 405.
- Simpson BB, Ogorzaly MC, 2011. Economic botany: plants in our world. Kyo Bo Book Centre Co., Ltd. Seoul, Korea. pp.417-423. (In Korean)
- Sinclair WA, Larsen AO, 1981. Wood characteristics related to "injectability" of trees. *J. of Arboric.* 7:6-10.
- Stipes RJ, Campana RJ, 1981. Compendium of elm diseases. The compendia series. American Phytopathology Society.
- Sur R, Stork A, 2003. Uptake, translocation and metabolism of imidacloprid in plants. *Bull. Insectology.* 56(1):35-40.
- Takai K, Suzuki T, Kawazu K, 2004. Distribution and persistence of emamectin benzoate at efficacious concentrations in pine tissues after injection of a liquid formulation. *Pest Manage. Sci.* 60(1):42-48.
- Tanis SR, McCullough DG, 2016. Evaluation of xylem discoloration in ash trees associated with macroinjections of a systemic insecticides. *Arboric. Urban For.* 42(6):389-399.
- Tattar TA, 1989. Diseases of shade trees. Academic Press, New York. 391pp.
- Tattar TA, 2007. Injection, infusion, and systemic movement in trees. In The proceedings of the 2nd National Oak Wilt Symposium. June 4-7, 2007. Austin, Texas.
- Tattar TA, Tattar SJ, 1999. Evidence for the downward movement of materials injected into trees. *J. Arboric.* 25(6): 325-332.
- Tattar TA, Dotson JA, Ruizzo MS, Steward VB, 1998. Translocation of imidacloprid in three tree species when trunk- and soil-injected. *J. Arboric.* 24(1):54-56.
- Thompson HE, 1967. Late season control of European elm scale with bidrin trunk injections. *J. Econ. Entomol.* 60(6):1745-1746.
- Tsen EWJ, Sitzia T, Webber BL, 2016. To core, or not to core: the impact of coring on tree health and a best-practice framework for collecting dendrochronological information from living trees. *Biol. Rev.* 91(4):899-924.
- Uguine TA, Gardescu S, Hajek AE, 2013. The within-season and between-tree distribution of imidacloprid trunk-injected into *Acer platanoides* (Sapindales: Sapindaceae). *J. Econ. Entomol.* 106(2):874-882.
- Umebayashi T, Utsumi Y, Koga S, Inoue S, Shiba Y, et al., 2007. Optimal conditions for visualizing water-conducting pathways in living trees by the dye injection method. *Tree Physiol.* 27(7):993-999.
- Van Alfen NK, Walton GS, 1974. Pressure injection of benomyl and methyl-2-benzimidazolecarbamate hydrochloride for control of Dutch elm disease. *Phytopathology* 64(9):1231-1234.
- VanWoerkom AH, 2012. Trunk injection: a new and innovative technique for pesticide delivery in tree fruits. Masters Thesis. Michigan State University, Ann Arbor, 150pp.
- VanWoerkom AH, Aćimović SG, Sundin GW, Cregg BM, Mota-Sanchez D, et al., 2014. Trunk injection: an alternative technique for pesticide delivery in apples. *Crop Protec.* 65:173-185.
- Wene GP, 1970. Evaluation of systemic drenches and trunk injections as controls for the elm leaf beetle in Arizona. *J. Econ. Entomol.* 63(4):1326-1328.
- Wise JC, VanWoerkom AH, Aćimović SG, Sundin GW, Cregg BM, et al., 2014. Trunk injection: a discriminating delivering system for horticulture crop IPM. *Entomol. Ornithol. Herpetol.* 3:126 DOI 10.4172/2161-0983.1000126
- Zillmer RE, Chaney WR, Holt HA, 1991. Structural and biological effects of trunk injected paclobutrazol in yellow poplar. *J. Arboric.* 17(10):261-268.

수목 구조와 생리적 특성을 고려한 수간주입법 개선 방안

차병진^{1*} · 한상섭² · 김기우³ · 김동수⁴ · 이동운^{5**}

¹충북대학교 식물외학과, ²전북대학교 산림환경과학과, ³경북대학교 생태환경시스템학부,
⁴국립산림과학원 산림병해충연구과, ⁵경북대학교 질병매개곤충학과

요 약 나무 줄기에 구멍을 뚫고 다양한 물질을 물관부로 주입하여 수관으로 직접 전달하는 수간주입은 뿌리가 부실한 나무에도 사용할 수 있다. 또한, 자외선에 의한 물질분해가 없으며, 기상의 영향도 받지 않아 효과가 오래 지속되고, 주변 환경에 미치는 영향도 거의 없어 생활권 수목 관리에 사용이 증가하고 있다. 그러나 수목 해부학적 특성과 수목 생리 및 환경조건에 대한 이해 없이 시행한다면 수간주입은 나무에 상처를 남겨 오히려 피해를 일으킬 수도 있으므로 올바른 방법으로 시행하는 것이 매우 중요하다. 따라서 나무에 피해를 주지 않고 수간주입의 효과를 향상할 수 있는 방법을 제시하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 최상의 수간주입은 적절한 물질을 적절한 시기에 적절한 곳에 적절한 방법으로 주입하는 것이다. 수간주입에서 물질 이동은 나무 증산류에 의존하므로 수목의 통도계 구성요소와 분포에 따라 주입공이 달라야 한다. 나무 증산은 다양한 환경요인의 영향을 받으므로 증산이 활발한 환경조건 하에서 주입하여야 한다. 주입공은 나무에 주는 피해를 최소화하는 방법으로 뚫어야 하며, 수간에서 활력이 좋은 부위를 선택하여야 한다. 주입물질은 약산성이고 수용성과 이행성이 좋아야 하며, 제형과 보조성분들의 특성도 매우 중요하다. 주입공은 가능한 한 작고 얇게 뚫어야 한다. 최근에는 주입공이 필요 없는 다양한 수간주입기와 수간주입용 제형들이 시중에 유통되고 있다. 주입하고자 하는 수종의 특성을 고려하여 적절한 제품을 선정하고 적절한 방법으로 수간주입하면 나무에 주는 부담을 줄이면서 더 좋은 처리효과를 기대할 수 있을 것이다.

색인어 부후, 주입공, 증산, 수간주입, 목부구조