

지하부 영상 계측

Some Methods of Root Investigations

김 기 영

서울대학교

Kim, G.Y.

Seoul National University

서론

식물의 뿌리는 식물을 땅에 단단하게 고정하여 흐르는 물이나 바람으로 인해 식물이 씻겨 나가는 것을 막아주고 물과 영양분을 공급하여 식물의 생존을 가능케 한다. 또한 뿌리는 유기물을 공급하여 흙을 보존하고 토양 입자의 결속을 돕고 (Poincelot, 1986), 경사지 흙을 지탱하는 그물 역할을 하여 흙이 흘러내리는 것을 막아줄 뿐만 아니라 (Waldron, 1977), 땅속 깊이 파고 드는 깊은 뿌리를 통하여 농기계 운행에 의해 다져진 토양층을 분쇄하는 역할을 한다 (Elkins 등, 1977). 이러한 기능들 이외에도 식물의 뿌리는 토양을 효과적으로 관리하는데 아주 중요한 정보를 제공한다. 예를 들어, 작물의 뿌리가 얇은 토양층에 많이 분포한다는 사실을 알고 있다면 경운작업시 경운 깊이를 알게 하여 작물 뿌리에 입히는 상해를 줄일 수 있고, 비료를 적당한 위치에 살포하여 성장 초기에 원하는 뿌리 분포 형태를 조성하면 작물이 성장 과정에서 비료의 영양분을 효과적으로 흡수할 수 있게 되어 비료의 경제성을 높일 수가 있다. 또한 성장 초기의 작물에 공급하는 물의 양과 횡수를 조절하여 깊은 뿌리의 발달을 유도하면 성장 후기에 겪을 수 있는 가뭄의 피해를 줄일 수도 있다 (Stoskopf, 1981). 그 이외에도 식물뿌리의 발달 상태는 기후나 토양과 같은 환경조건에 민감하므로 뿌리의 측정 가능한 특징이나 분포 상태등을 잘 조사하면 작물의 성장 환경의 좋고 나쁨을 평가할 수도 있다 (Rendig and Taylor, 1989).

식물의 뿌리가 이처럼 중요한 기능을 하지만 식물 뿌리에 관한 정보를 얻는데 많은 시간과 노동력이 필요하기 때문에 뿌리에 관하여 축적된 정보는 작물 지상부의 정보에 비하여 매우 적다. 식물 뿌리에 관한 정보를 보다 많이 얻기 위하여 뿌리의 특징을 빠르게 측정하는 방법들이 개발되어 왔다. 뿌리 측정 방법은 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나뉜다. 파괴적인 방법은 뿌리를 토양으로 부터 씻어 낸 다음 필요한 정보를 얻어 내는 것으로 측정 대상 식물에 피해를 줄 뿐만 아니라 뿌리를 토양으로 부터 씻어 내는데 시간과 노동력이 많이 요구된다. 비파괴적인 방법은 CAT (computer assisted tomography), 미러리조트론, 핵자기공명 (NMR) 법 등으로, 조사 대상 식물에 피해를 주지 않고 뿌리에 관한 정보를 얻는 방법으로 계속해서 같은 식물의 뿌리 발달 과정 등을 관찰할 수 있지만 측정 기기를 확보하기 어렵고 비용도 많이 드는 단점이 있다. 위에서 예를 든 것과 같이 몇몇 뿌리 측정법들이 개발되어 있지만 아직도 이들 방법은 개선의 여지가 있으며 빠르고 간편하며 값싼 새로운 측정법을 개발할 필요성이 있다.

새로운 뿌리 측정 방법을 개발하기 위해서는 기존에 개발되어 있는 측정 방법을 잘 분

석한 뒤 이들의 장점들을 잘 이용하는 것이 효과적일 것이다. 또한 이미 개발되어져 있는 측정 방법들을 뿌리에 관한 연구에 사용할 경우 개발되어져 있는 측정 방법들이 각기 다른 목적과 원리에 바탕을 두고 있기 때문에 각 측정 방법의 특징을 잘 파악하여 원하는 목적에 따라 적절한 측정 방법을 선택하는 것이 중요하다.

뿌리 측정법

1. 직선 교차법

이 방법은 뿌리의 길이를 측정하는데 필요한 시간을 줄일 목적으로 Newman (1966)에 의하여 개발되었다. 이 방법은 뿌리와 일정한 간격으로 그려진 직선들이 만나는 교점의 수로 뿌리의 길이를 계산한다. 뿌리의 길이는 다음의 방정식에 의하여 계산된다.

$$R = \pi AN/2H \quad (1)$$

여기서, R은 관찰하는 영역내에 포함된 뿌리의 전체 길이(cm)이고, A는 관찰 영역의 넓이(cm^2)이며, N은 전체 길이 H(cm)인 직선들과 뿌리가 이루는 교점의 수이다. 일반적으로 뿌리 길이를 이 방법으로 잴 때는 투명한 얇고 넓은 용기안에 뿌리를 서로 겹치지 않도록 조심스럽게 잘 퍼준다음 격자 모양이 그려진 곳 위에 놓는다. 그 다음 격자와 뿌리 사이의 교점의 수를 세고 공식 (1)에 대입하여 뿌리 길이를 계산한다. 그림 1에 직선교차법의 개념을 나타내었다.

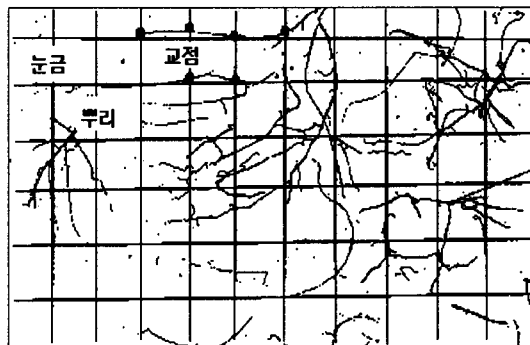


Fig. 1 Concept of line-intersection method

직선 교차법은 뿌리를 펼쳐 놓는 영역의 크기와 격자의 크기를 변화시키는 방법으로 개선되어 왔다. 격자의 크기는 재고자 하는 뿌리의 양에 따라 달라지는데, 1 cm 크기의 격자는 전체 뿌리의 길이가 1 m 이하일 때, 2 cm 크기의 격자는 전체 길이 5 m 까지의 비교적 많은 뿌리 표본에, 5 cm 크기의 격자는 전체 뿌리 길이 15 m 이하의 아주 많은 뿌리 표본의 길이를 측정할 때 사용한다 (Bohm, 1979). 직선교차법으로 뿌리의 길이를 측정할 때 뿌리와 격자의 교점을 사람이 셀 경우 시간과 노동력이 많이 소요될 뿐만 아니라 관찰자의 피로에 의한 오차가 발생할 확률이 커지므로 이러한 작업을 자동으로 수행하는, 직선 교차법의 원리를 응용한 자동 뿌리 길이 측정장치(Delta-T 면적기)가 Decagon Devices사(Pullman, Washington, USA)에 의해 개발되어서 몇몇 연구자 (Cunningham et

al., 1989; Shuman et al., 1993)들의 뿌리 연구에 사용되기도 하였다.

이 장치는 라인 스캔 카메라를 장착하고 있는데 이 카메라의 스캔선과 물체사이의 교점 갯수를 자동으로 세어서 뿌리의 길이를 계산하게 되어있다. Cunningham 등(1989)은 이 장치와 직선교차법으로 측정된 전선의 길이를 각각 비교하였는데 두 길이 사이에서 선형 관계($R^2 = 0.92$)를 얻을 수 있었다. Shuman 등 (1993)도 이 장치와 손으로 직접 잴 수수 뿌리길이가 각각 잘 일치한다고 보고하였다($R^2 = 0.96$).

2. Lang의 공식

Melhuish와 Lang (1968)에 의해 개발된 이 방법은 면적을 알고 있는 단면을 지나는 뿌리의 갯수와 단위 면적안에 존재하는 뿌리 길이 사이의 이론적 관계를 바탕으로 한다. 뿌리가 어느 한 방향에 치우치지 않고 균일하고 불규칙하게 토양중에 분포한다면 기하학적 확률의 원리에 의해 단면을 통과하는 뿌리의 갯수와 단위 부피안에 존재하는 뿌리 길이 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$L_T = 2 \times N_A \quad (2)$$

여기서, L_T 는 단위 부피당 뿌리 길이(cm/cm^3), N_A 는 토양 절단면에서의 뿌리 갯수이다. Lang 과 Melhuish (1970)는 세 방향의 단면에서의 뿌리의 갯수를 이용하여 뿌리의 길이를 예측함으로써 이 방법을 더욱 향상시켰다. Drew와 Saker (1980)는 공식 (2)를 사용하여 뿌리의 수로부터 뿌리 길이를 예측한 후, 이를 물에 씻은 뿌리 표본을 직접 잴 수수 구한 뿌리 길이와 비교하였는데 두 값 사이에는 큰 상관 관계가 있었다. 하지만 그들은 뿌리가 항상 균일하고 불규칙하게 토양중에 분포하는 것이 아니기 때문에 공식 (2)를 사용하여 뿌리 길이를 구하는 것은 대략적인 뿌리 분포에 관한 정보를 알고 싶을 때로 제한하여야 한다고 결론지었다. 또한 연구자들은, 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 몇몇 표본의 토양으로부터 뿌리를 분리한 뒤 자를 사용하여 직접적인 방법으로 뿌리의 길이를 재고 이 값을 이용하여 공식 (2)를 보정한 뒤 그 보정식을 통하여 뿌리의 길이를 예측하는 것이 바람직하다고 하였다. 이와 같이 공식 (2)에 이론적인 기울기값 2를 사용하여 뿌리의 수를 뿌리의 길이로 변환시킬 경우 부정확한 결과를 얻을 수 있기 때문에 고정적인 기울기 값 2를 사용하는 대신 뿌리의 수와 뿌리 길이 사이의 관계식을 직접 구하려하는 시도가 뒤따랐다.

Bennie 등 (1987)은 식물의 종류에 따라 직선회귀식 (2)에서의 기울기가 변하는 사실을 발견하고 식물의 종류에 따른 직선회귀식의 기울기를 실험적으로 구하였다. 식물의 종류에 따른 기울기의 범위는 1.4 에서 2.4 였고 목화화 해바라기의 기울기 만이 공식 (2)에서의 이론적인 값 2를 나타내었다.

3. 영상분석에 의한 직접분리법

이 방법은 뿌리의 영상으로부터 뿌리의 길이를 직접 측정하는 것으로 영상을 처리하여 영상 속의 뿌리를 한 화소 두께의 골격으로 나타낸 뒤, 뿌리중심선을 표현하는 이 골격이 갖는 화소의 수를 세어서 뿌리 길이를 측정한다. 화소의 수로 표현되는 영상속의 뿌리의 길이는 미리 알고 있는 기준 길이와 화소수와의 관계를 이용하여 일반적으로 사용되는 단위(cm)로 변환된다. 그림 2와 3에 뿌리의 영상과 세선화를 거쳐 골격화된 뿌리의 영상을 나타내었다.

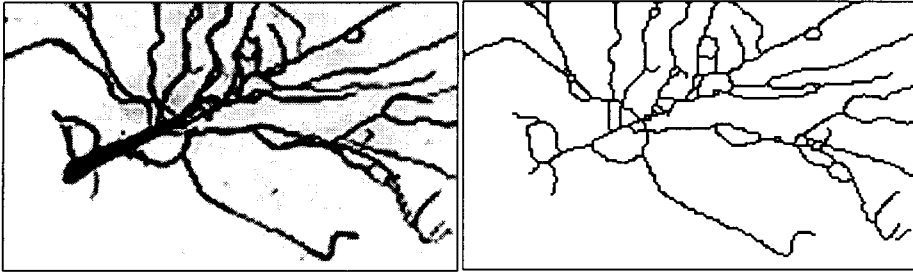


Fig. 2 A gray scale digital root image Fig. 3 The same digital root image seen in Fig. 2 after thinning

Smucker 등 (1987)은 토양으로부터 분리한 뿌리를 촬영한 영상에서 잡음을 제거하고, 이치화를 통해 뿌리와 뿌리가 놓여있는 배경을 분리한 뒤, 뿌리를 골격화 시켜 뿌리의 길이를 측정하였는데 자를 이용하여 직접 측정한 뿌리 길이와 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다. 영상분석을 통하여 뿌리의 길이를 측정할 때 유의하여야 할 사항중의 하나는 화소의 수직 · 수평비에 의해 같은 화소수를 갖는 수직선과 수평선의 길이가 화면상에 다르게 나타날 수 있다는 점이다. Smit 등 (1994)은 탁상용 스캐너를 이용하여 썬은 뿌리의 영상을 획득, 처리하여 뿌리를 그 중심선으로만 표현한 뒤 그 중심선의 길이를 측정하였는데, 화소가 정사각형을 이루지 않아 같은 수의 화소가 세로로 배열되었을 때와 가로로 배열되었을 때 총길이가 달라지는 것과 같은 이유로 발생하는 뿌리 길이 측정 오차를 보정계수를 이용하여 없애려고 하였다. 보정계수를 사용할 때 위의 방법으로 측정한 뿌리길이는 직선교차법으로 측정한 길이와 매우 큰 상관관계($R^2 = 0.9692$)가 있었다.

영상분리법은 토양으로부터 분리된 뿌리의 길이 측정 뿐만 아니라 토양에 노출되어 있는 뿌리의 길이 측정에도 사용될 수 있다. Casarin 등(1991)은 뿌리의 분포를 관찰하기 위하여 리즈스코프(rhizoscope)로 미니리조트론에 인접한 뿌리의 영상을 얻은후 형상필터를 사용하여 뿌리를 골격화 시키는 방법으로 뿌리의 길이를 측정하였다. 토양으로부터 뿌리를 분리하지 않은 상태에서 영상처리기법을 이용할 경우에는 토양과 뿌리가 화면상에서 잘 구분될 수 있도록 조처를 취해주어야 한다. Commins 등 (1991)은 토양 단면에 노출된 뿌리의 길이를 측정하기 위하여 영상분석에 의한 직접분리법을 사용하였는데 뿌리 영상을 얻을 때 뿌리와 토양을 명확히 구분하여 분석을 쉽게할 목적으로 자외선 램프를 비추어 뿌리의 발광을 유도하였다.

4. 영상처리 응용

뿌리측정을 빠르고 정확하게 하기 위하여 뿌리연구에 영상처리 기법을 적용시킬 수 있다. 영상처리기법은 토양으로부터 썬어서 분리한 뿌리를 측정할 때나 미니리조트론방법과 같이 자연 상태의 분포 모습을 간직하는 뿌리를 측정할 때 모두 이용될 수 있으며, 영상처리에 의하여 뿌리 길이 및 직경과 같은 필요한 뿌리 인자들을 손쉽게 측정할 수 있다.

Ferguson과 Smucker (1989)는 조그마한 비디오 카메라를 작물 주위에 설치된 미니리조트론 속으로 내려보내 뿌리의 영상을 얻고 이 영상을 분석하여 뿌리의 길이를 예측하는 방법으로 뿌리를 연속적으로 관찰할 수 있었다. 미니리조트론을 따라 설정된 특정한 위치들에서의 뿌리 영상을 연속적으로 촬영하기 위하여 영상을 얻은 장소의 좌표들을 기억시키고, 전자장치를 이용하여 그 위치로 카메라를 이동시켜 일정 시간 뒤의 영상을 획득하

였다. Girardin 등(1991)은 미니리조트론으로부터 영상을 획득하는 방법들에 관한 비교 실험을 수행하였는데 리조스코프(rhizoscope), 비디오 카메라, 그리고 직장내시경(endoscope) 중에서 리조스코프가 영상획득에 가장 유리하다고 결론지었다.

토양으로부터의 뿌리 분리는 Pallant 등 (1993)이 개발한 것과 같은 뿌리분리기를 이용하면 보다 짧은 시간내에 수행할수 있는데, 이렇게 분리된 뿌리의 영상은 비디오 카메라나 스캐너를 이용하여 컴퓨터로 받아들일 수 있다.

또한 뿌리를 찍은 음화(negative)를 선스캔 카메라를 이용하여 컴퓨터에 읽어들이는 방법으로 뿌리 길이를 측정할 수 있는데(Voorhees 등, 1980; Ottman and Timm, 1984; Smika와 Klute, 1982), 뿌리 길이는 카메라의 스캔선이 뿌리를 나타내는 급격한 밝기 변화가 있는 곳과 만날 때의 갯수를 세어서 Newman (1966)의 공식에 대입하여 구한다. Harris와 Campbell (1989)도 카메라의 스캔선과 뿌리가 만나는 갯수를 이용하여 토양으로부터 분리된 뿌리의 길이를 구하였는데, 뿌리가 특정한 방향으로 편중되어 있을 때 나타나는 오차를 없애기 위하여 뿌리표본을 두 방향에서 스캔하였으며 뿌리가 겹쳐서 발생하는 오차를 없애기 위하여 수학적으로 교정 상수를 구하여 길이를 보정하였다.

뿌리 영상 획득 장치로 문서 출판용의 스캐너의 사용도 가능하다. Pan과 Bolton (1991)은 플랫폼형 스캐너를 이용하여 토양으로부터 분리한 뿌리 표본의 영상을 읽어들인 뒤 영상 분석을 통하여 뿌리의 면적, 길이, 너비 등을 측정하였다. Smit 등 (1994)은 비디오 카메라의 저해상도 문제를 극복하기 위하여 3차원 스캐너를 사용하였는데, 3차원 스캐너로부터 썸은 뿌리의 영상을 읽어들인 뒤 처리하는 방법으로 매우 가는 (직경 100 μm) 뿌리의 길이 까지도 측정할 수 있었다.

자연 상태에서의 뿌리 관찰법

뿌리에 관한 특성을 측정하기 위해서는 토양 속에 있는 뿌리를 노출시켜야만 되는데 일반적으로는 뿌리를 씻어서 토양으로부터 분리한다. 하지만 토양으로부터 뿌리를 씻어서 분리하면 자연 상태에서의 뿌리의 분포에 대한 정보가 사라지는 단점이 있다. 뿌리가 자연 상태에서 어떻게 발달하는지에 대한 정보를 얻기 위해서는 미니리조트론이라든가, 코어 및 토양 절단법등과 같이 뿌리가 토양에 분포한 그대로 노출시켜 뿌리를 관찰하여야 한다.

1. 미니리조트론

미니리조트론(Minirhizotron)이란 식물 지하부 뿌리의 연구에 사용되는 투명한 재질의 가늘고 긴 관을 말하는 것으로 보통 관찰 대상인 식물 주위에 여러 개를 설치하여 그 관 주위의 뿌리를 관찰하는데 사용된다. 일반적으로 미니리조트론은 뿌리가 관을 타고 성장하는 것을 막기 위하여 지표면에 수직으로 설치하기 보다는 30° - 45° 경사지게 또는 지표면과 수평으로(Meyer 와 Barrs, 1985) 설치하며, 조그마한 거울과 전등을 사용하여 관 주위에서 자라는 뿌리를 관찰한다. 하지만 미니리조트론의 설치 방법과 설치된 미니리조트론 주위 상태를 조사하는 방법에 의해 많은 조합의 다른 방법들을 생각할 수 있다. 그림 4에 뿌리 근처에 설치된 미니리조트론을 나타내었다.

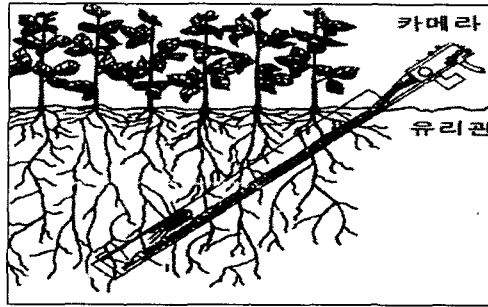


Fig. 4 An example of a minirhizotron positioned in the plant row

McLean 등 (1992)의 토양 중의 낮은 수분함량과 포도나무 뿌리의 관계에 관한 연구에서와 같이 마이크로 카메라를 포도나무 주위에 설치된 미니리조트론 안으로 내려보내서 뿌리의 상태를 조사하는 방법, Vos와 Groenwold (1983)의 연구에서 처럼 의학용 내시경 (Endoscope)을 사용하여 미니리조트론 주위의 뿌리를 조사하는 방법, 그리고 Meyer와 Barrs (1985) 처럼 유리섬유 내시경(Fiberscope)을 사용하는 방법이 있다.

미니리조트론의 재질에 의하여 뿌리 연구의 성패가 좌우될 수 있는데, 이는 미니리조트론 인접 토양의 조건이 자연 상태의 토양의 조건과 달라 뿌리의 성장이 영향을 받을 수 있기 때문이다. Volkmar (1993)에 의하면 단단한 재질의 미니리조트론 보다 탄력이 있는 재질의 미니리조트론을 사용했을 때 보다 자연 상태에서의 뿌리 성장과 같은 결과를 얻을 수 있다고 한다.

미니리조트론 방법의 검증은 주로 미니리조트론 주위에서 몇 개의 토양 표본을 채취하여 그 토양 표본 속의 뿌리의 상태와 미니리조트론으로 관찰한 뿌리의 상태를 비교하여서 실시한다 (Vos와 Groenwold, 1983; Meyer와 Barrs, 1985; Upchurch와 Ritchie, 1983).

미니리조트론에서 측정하는 뿌리의 특성은 주로 뿌리의 길이인데, 직선교차법의 원리를 이용하여 미니리조트론에 새겨진 눈금과 뿌리의 교차점의 갯수로 부터 계산하거나 (Sanders와 Brown, 1978) 미니리조트론 안쪽에서 촬영한 뿌리의 사진에 격자무늬를 투사하여 뿌리와 의 교차점을 계수한 뒤 이로부터 뿌리 길이를 계산한다 (Volkmar, 1993; Vos 와 Groenwold, 1983).

직선교차법의 원리를 이용하는 대신 토양 샘플 절단법에서와 같이 미니리조트론의 면과 뿌리가 만나는 갯수로부터 뿌리 길이를 계산하는 방법도 있다. Lang의 공식을 사용하여 뿌리의 수로부터 뿌리 길이를 계산하는 방법 (Meyer와 Barrs, 1985; Bland와 Dugas, 1988; Upchurch, 1987), 그리고 뿌리 개수 절반값에 미니리조트론의 직경을 곱하여 뿌리 길이를 계산하는 법 (Buckland 등, 1993)이 있다.

2. 코어 절단법 (Core Break)

코어 절단법은 원통형의 속이 빈 파이프를 토양 속에 원하는 깊이 만큼 삽입하였다가 뽑아낸 뒤 파이프 속의 토양을 빼내어 파이프 길이 방향에 수직으로 잘라 뿌리를 관찰하는 방법이다. 실험에 사용하는 코어의 지름은 25-100 mm 범위인데 50 mm 지름을 가진 코어가 가장 일반적으로 사용된다. 코어 절단법은 토양의 블록을 들어내어 뿌리를 분리하고 관찰하던 기존의 방법을 개선한 것으로 기존의 방법보다 뿌리 관찰에 소요되는 시간을

약 1/3로 줄일 수 있다. 토양 코어 표본을 채취하는 도구는 들고 다니며 사용할 수 있는 간단한 것부터 유압기기를 이용한 복잡한 것 등 여러 가지가 있다. 코어 절단법은 돌이 많은 토양이나, 단단한 토양에서는 사용하기 어렵고, 작은 부위의 뿌리 시스템을 표본채취하는 관계로 뿌리 시스템의 전체적인 형태를 연구하기에는 불리한 점이 있지만 관찰 대상 작물에 큰 피해를 주지 않고도 짧은 시간동안 많은 뿌리 표본을 채취할 수 있기 때문에 뿌리 연구에 많이 사용되고 있다. 그림 5에 코어 샘플의 모습을 나타내었다.

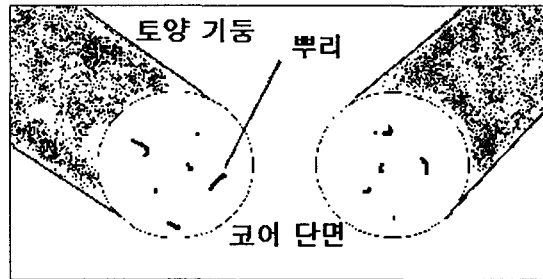


Fig. 5 Illustration of the broken soil core sample

코어 절단법으로 뿌리와 토양의 표본을 채취한 뒤, 표본 속의 뿌리는 물에 씻어서 토양으로부터 분리하여 그 특성을 측정하거나 Lang의 공식을 이용하여 길이를 측정한다. Drew와 Saker (1980)는 연속된 토양 코어 표본을 채취하여 일정한 깊이에 상당하는 부분을 파이프 방향에 수직으로 잘라낸 뒤, 이 절단면에서 뿌리의 수를 세고 이를 Lang의 공식에 대입하여 토양표본 속에 있는 뿌리의 길이를 예측하였다. Bennie 등 (1987)이 발견한 것과 같이 코어 표본 속의 뿌리 길이와 코어 절단면에서의 뿌리갯수 사이의 관계식은 조사 대상 작물의 종류나 토양의 특성 등에 따라서 바뀔 수 있고, 관찰자의 실수에 의해 오차가 발생할 수도 있지만(Bland와 Dugas, 1988), 아주 짧은 시간내에 특정한 토양관리기술에 따른 뿌리 시스템의 발달 현황을 조사하기에는 적당한 방법이다.

3. NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 과 CAT(Computer Aided Tomography)

뿌리의 상태를 자연 상태에서 관찰하기 위하여 핵자기공명법을 이용한 연구도 수행된 바 있다. NMR은 원자핵의 자기 모우먼트와 자기장 그리고 라디오파의 진동 사이의 상호관계를 바탕으로하는 기술로 생물체의 신진대사와 해부학적 구조를 비파괴적으로 조사할 수 있게 해준다. Matyac 등(1989)은 핵자기공명법을 이용하여 화분에 담긴 뿌리의 영상을 얻어 배지로부터 뿌리를 분리하지 않고도 뿌리에 발생하는 흑의 성장과 뿌리 분포를 관찰할 수 있었다. Rogers와 Bottomley (1987) 등은 비파괴적인 뿌리관찰법으로서의 NMR의 사용 가능성을 여러 장소에서 채취한 토양과 몇몇 인공토양의 토양 종류, 자성물질 함량, 함수율에 대한 NMR신호의 세기를 조사하므로써 분석하였다. 이 들의 연구 결과에 따르면 자성물질의 함량이 토양 무게의 4% 이상일 때는 NMR 영상에서 뿌리 시스템을 식별하기 어려웠지만 그 이외의 경우에는 토양 수분함량이나 토양의 종류에 상관없이 선명하게 뿌리 시스템의 분포를 관찰할 수 있다고 한다.

CAT 장치는 의료용으로 사용되는 것으로, 방사선 발생기로부터의 방사선이 물체를 통과하여 방사선 감지판에 도달하는 동안 물체의 방사선 흡수능력에 따라 세기가 변해 감지판에서 발생하는 전류의 세기를 변화시키는 원리에 의해 작동한다. 살아 있는 식물의 뿌

리는 수분을 함유하고 있어 방사선을 흡수하기 때문에 CAT 장치를 사용하여 토양중의 뿌리를 관찰할 수 있다. 토양 단면에서 뿌리의 수를 보다 정확하게 세어서 토양표본 절단법의 정확성을 높이기 위하여 방사선 사진을 사용한 연구도 있다. Baldwin 등(1971)은 방사선 물질인 ^{32}P 를 작물에 주입하여 뿌리를 오염시킨 다음 토양을 절단하고, 그 절단면에서 방사선 사진을 찍어 뿌리를 배경 토양으로부터 쉽게 구분되게 하였다. Fusseder (1983) 역시 방사선 물질을 이용하여 옥수수 뿌리를 염색시킨 뒤 x-ray 사진을 찍어 토양으로부터 뿌리를 명확히 구분할 수 있도록 하였다. 방사선 사진을 이용하여 뿌리를 토양으로부터 명확히 구분함으로써 Lang의 공식을 이용하여 뿌리 길이를 예측하는데 정확성을 높일 수 있었지만 여러 개의 뿌리가 모여있을 경우 방사선 사진에선 하나의 뿌리로 나타나는 결점도 있었다. Brown 등(1987)이 CAT장치를 사용하여 토양 중의 수분의 분포와 뿌리와의 관계를 조사한 바 있는데 장치가 고가이고 안전상의 문제가 있으며, 해상도가 좋지 않아 많이 사용되지는 않았다.

뿌리 관찰 및 측정방법 간의 비교

1. 측정 방법 사이의 비교

토양 절단면에서 센 뿌리의 수로 뿌리의 길이를 계산할 때 유의하여야 할 점은 Bennie 등 (1987)의 연구 결과에서처럼 작물에 따라 뿌리의 분포 형태가 다를 수 있으므로 공식 (2)를 직접 적용하여 뿌리의 길이를 계산하는 경우 부정확한 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 이는 뿌리 수로부터 뿌리 길이를 변환하는 Lang의 공식이 뿌리의 분포가 각 방향으로 균일하게 뻗어 있다는 것을 전제로 하는데 실제에 있어선 그렇지 않다는데 있다 (Bland, 1991).

또다른 문제는 토양 절단면에서의 뿌리의 수를 셀 경우 관찰자에 따라 결과가 다르게 나올 수 있으므로 다른 사람이 같은 표본에서 뿌리의 수를 셀 다음 그 결과들을 평균하여 정확성을 높이거나 영상처리 등에 의한 기계적인 방법으로 뿌리의 수를 세어 관찰자의 주관성을 배제하는 것이 필요하다. Bland (1989)는 목화, 밀, 그리고 수수 뿌리의 연구에서 적은 수의 표본을 이용하여 토양 절단면에서의 뿌리의 수와 뿌리 길이 사이의 관계식을 얻은 뒤 이를 바탕으로 많은 작물에 대하여 뿌리의 수로부터 뿌리의 길이를 예측하였으나 좋은 결과를 얻지 못하였다. Bland의 연구 결과에서 뿌리 길이의 예측이 정확하지 못하였던 이유도 역시 관찰자의 주관적인 판단에 의해 몇몇 뿌리가 계수 되지 않았던 것에 기인한다.

Reicosky 등 (1970)은 직선교차법과 직접측정법으로 뿌리 길이를 측정 비교한 결과를 바탕으로 직선교차법이 실제 뿌리 길이 보다 약간 길게 예측하기는 하지만 직접측정법과 견줄만한 신뢰성있는 방법이라고 하였다. 하지만 직선교차법을 사용하여 뿌리 길이를 빠르게 예측할 때에는 격자위에 놓여 있는 뿌리의 분포 방향에 따라 그 결과가 달라지므로, 뿌리 밑에 놓여 있는 격자의 방향을 변환시킨 뒤 다시 측정하여 그 결과를 평균할 필요가 있다. 따라서 직선교차법의 원리에 바탕을 둔 자동화된 시스템을 사용할 경우라도 부수적인 영상획득 및 처리로 인하여 영상분석에 의한 직접분리법보다 시간이 더 걸리게 된다.

영상분석에 의한 직접분리법은 직선교차법이나 Lang의 공식에서와 같은 뿌리의 균일 및 불규칙한 분포를 가정하고 개발된 것이 아니기 때문에 뿌리의 펼쳐진 방향에 영향을 받지 않는다. 따라서 뿌리가 한 방향으로 편중되어 늘어서 있을 경우에도 큰 오차가 발생하지 않으므로 여러 방향의 뿌리 영상을 획득 및 처리할 필요가 없다. Lebowitz (1988)의

연구 결과를 살펴보면 영상분석을 통하여 측정한 뿌리의 길이가 직선교차법으로 측정한 뿌리길이보다 더 정확한 것으로 나타났다.

2. 관찰 방법 사이의 비교

Bohm (1977)은 콩의 뿌리를 관찰할 수 있는 여러가지 방법들을 비교하였는데, 코어 샘플링과 미니리조트론 모두 다른 방법들에 비하여 뿌리관찰에 시간이 적게 소요되지만, 미니리조트론방법으로는 정확한 뿌리 길이를 측정할 수 없는 것으로 나타났다. 또한 미니리조트론을 이용할 경우 유리벽의 온도 변화에 따라 인접한 뿌리의 성장이 영향을 받을 수 있으므로 온도 제어에 관한 고려가 있어야 한다. McMichael 등(1992)에 의하면 미니리조트론은 뿌리 도달 깊이, 뿌리 길이, 뿌리 형상, 뿌리 분포 등과 같은 정량적인 정보를 얻기에 적합한 것으로 보고되었다.

미니리조트론은 뿌리 도달 깊이, 뿌리 길이 밀도, 뿌리 형상, 뿌리 분포 등을 일정 기간 동안 연속적으로 측정할 수 있는 장점이 있으나, 초기 설치 비용과 관리 비용이 많이 든다. 또한 토양과 미니리조트론 사이의 경계면에 존재하는 공기층에 뿌리가 주위 토양보다 많이 성장하는 단점이 있다 (Taylor 등, 1990; McMichael et al., 1992). 그 이외에도 뿌리 성장 상태를 정확하게 추정하려면 관찰 대상 식물 주위에 여러개의 미니리조트론을 설치해야만 한다 (Taylor et al., 1990). Bragg 등 (1983)의 결과에 따르면 미니리조트론 방법을 사용하여 뿌리 길이를 예측했을 때 토양 상층에서 뿌리가 미니리조트론을 따라 성장하기 때문에 주위에서 채취한 토양 표본으로부터 측정한 뿌리 뿌리 길이와 큰 차이를 나타냈다. 그들은 이런 현상을 없애기 위하여 미니리조트론을 설치할 때 약 45°의 각도를 주고 설치하는 것이 바람직하다고 하였다. Samson과 Sinclair (1994)의 결과 역시 이러한 경향을 보여주고 있다. 그들은 미니리조트론과 코어 샘플링을 비교하였는데 지표면에서 토양 상부 30 cm 까지에서 두 방법으로 측정한 뿌리 길이 사이에 큰 차이가 있었다고 하였다.

CAT, Neutron radiography, 그리고 NMR 과 같은 뿌리 관찰법들은 관찰하는 작물의 뿌리체계를 파괴하지 않고도 뿌리의 정보를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있는 반면, 방사선 취급에 따르는 안전성 문제라든가 기기 확보의 어려움 및 막대한 사용 비용 때문에 널리 사용하기에는 어려운 점이 있다 (Taylor 등, 1991).

코어 절단법은 작은 부위의 뿌리 시스템을 관찰하는 관계로 뿌리 시스템의 전체적인 형태를 연구하기에는 불리하고, 뿌리 분포 방향에 따라 부정확한 결과를 얻을 수 있는 단점이 있지만 관찰 대상 작물에 큰 피해를 주지 않고도 짧은 시간동안 많은 뿌리 표본을 채취할 수 있는 장점이 있다.

결론 및 요약

위에서 토양 속에 있는 뿌리의 분포와 기능을 조사하는 방법들에 대하여 간략하게 알아 보았다. 코어 샘플링 방법은 빠르고 값이 싸지만 관찰 대상 작물의 성장을 방해해야만 한다. 미니리조트론 방법은 토양 속에 투명한 튜브를 묻어야 하지만 튜브와 인접한 토양 속의 뿌리를 연속해서 관찰할 수 있도록 해준다. NMR 방법은 비파괴적이지만 장치의 가격이 매우 비싸 쉽게 사용할 수 없는 단점이 있다. 각각의 뿌리 조사 방법은 뿌리 연구에 있어서 제 나름대로의 기능이 있다. 하나의 뿌리 조사 방법이 모든 뿌리 연구에 일률적으

로 사용될 수 없으므로, 가능한 시간, 노동력, 비용, 장치 확보의 용이성등을 염두에 두고 조사 방법을 선택하여야 할 것이다.

인용문헌

1. Baldwin, J.P., P.B. Tinker, and F.H.C. Marriott. 1971. The measurement and distribution of onion roots in the field and the laboratory. *Journal of Applied Ecology* 8:543-554.
2. Bennie, A.T.P., H.M. Taylor, and P.G. Georgen. 1987. An assessment of the core-break method for estimating rooting density of different crops in the field. *Soil Tillage Research* 9:347-353.
3. Bland, W.L. 1989. Estimating root length density by the core-break method. *Soil Science Society of America Journal* 53:1595-1597.
4. Bland, W.L. 1991. Root length density from core-break observations: Sources of error. Pp.565-569 In: *Plant Roots and Their Environment*, eds. B. L. McMichael and H. Persson. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
5. Bland, W.L. and W.A. Dugas. 1988. Root length density from minirhizotron observations. *Agronomy Journal* 80:271-274.
6. Bohm, W. 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Ecological Studies, vol. 33. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
7. Bohm, W., H. Maduakor, and H.M. Taylor. 1977. Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development. *Agronomy Journal* 69:415-418.
8. Bragg, P.L., G. Govi, and R.Q. Cannel. 1983. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil* 73:435-440.
9. Brown, J.M., Fonteno, W.C., Cassel, D.K., and Johnson, G.A. 1987. Computed tomographic analyses of water distribution in three porous foam media. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 51: 1121-1125
10. Buckland, S.T., C.D. Campbell, L.A. Mackie-Dawson, G.W. Horgan, and E.I. Duff. 1993. A Method for counting roots observed in minirhizotrons and their theoretical conversion to root length density. *Plant and Soil* 153:1-9.
11. Casarin, M., S. Jacquy, A. Fouere, and Ph. Girardin. 1991. Digital picture processing applied to the evaluation of plant root dynamics. Pp. 570-575 In: *Plant Roots and Their Environment*. B.L. McMichael and H. Persson, eds. Developments in Agricultural and Managed-Forest Ecology 24. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
12. Commins, P.J., A.B. McBratney, and A.J. Koppi. 1991. Development of a technique for the measurement of root geometry in the soil using resin-impregnated blocks and image analysis. *Journal of Soil Science* 42:237-250.
13. Cunningham, M., M.B. Adams, R.J. Luxmoore, W.M. Post, and D.L. DeAngelis. 1989. Quick estimates of root length, using a video image analyzer. *Canadian Journal of Forest Research* 19:335-340.
14. Drew, M.C. and L.R. Saker. 1980. Assessment of rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field. *Plant Soil* 55:297-305.
15. Ferguson, J.C. and A.J.M. Smucker. 1989. Modifications of the minirhizotron video camera system for measuring spatial and temporal root dynamics. *Soil Science Society of America Journal* 53:1601-1605.