

土壤 酸性化 程度에 따른 독일가문비나무(*Picea abies*)의 뿌리 發達과 分枝形態에 關한 研究¹

李 道 炯^{2*}

Root Development and Branching forms of Norway Spruce (*Picea abies*) in the Differently Acidified Forest Soil¹

Do-Hyung Lee^{2*}

要 約

본 연구는 토양 산성화 정도가 서로 다른 독일가문비나무 임분에서 토양 깊이에 따른 뿌리의 나이테 발달과 분지형태를 분석함으로써, 임분에 따른 뿌리발달을 비교하고자 하였다. 조사된 독일가문비나무 임분에서 뿌리분지구조는 변형된 뿌리와 변형되지 않은 뿌리에 대한 조사임분간의 통계적 유의성이 인정되지 않았지만, 가장 많이 산성화된 Weidenbrunnen 임분에서는 뿌리가 상해를 입음으로 인해 발생되는 포크형, 권총형, 쇠스랑형과 같은 비정상적인 분지구조가 많이 나타났다. 뿌리의 나이테 분석 결과, 수평뿌리의 연평균 길이생장은 Weidenbrunnen 임분과 Barbis 임분이 6.3cm, Ebergötzen 임분이 9.5cm의 길이 생장을 나타내었으며, 수직뿌리의 연평균 길이생장은 Weidenbrunnen 임분이 4.4cm, Barbis 임분이 5.4cm, 그리고 Ebergötzen 임분이 6.7cm의 생장을 보였다. 80cm 토양 깊이에서의 뿌리횡단면 분포는 Ebergötzen 임분이 굵은 뿌리와 가는 뿌리가 고르게 분포하고 있으며, 횡단면의 합계는 32.6cm² 이었다. Barbis 임분에서는 굵은 뿌리가 가운데 몰려서 분포하고, 가는 뿌리는 비교적 적게 나타났으며, 그 합계는 29.2cm²이었다. Weidenbrunnen 임분에서는 적은 수의 가는 뿌리만 분포하고 그 값은 10.9cm²에 불과하였다. 뿌리고정계수는 Ebergötzen 임분이 1.04로 다른 두 임분 Barbis(0.3), Weidenbrunnen (0.08)과 비교하여 매우 높은 값을 나타내었다. 본 조사 독일가문비나무 임분 중에서 Weidenbrunnen 임분에서 나타난 비정상적인 형태의 변형된 분지구조와 뿌리의 저조한 생장은 토양산성화 등으로 인하여 정상적인 뿌리가 생장의 장애를 받아 나타난 결과 때문이라 사료된다.

ABSTRACT

In this study, the annual growth of roots and their branching forms of Norway spruce(*Picea abies* [L.] Karst.) were analysed to compare the development of their root in the differently acidified forest soils. And there was no significant difference among the stands for the modified roots and the non-modified roots depending on the root branch forms, and however in the most acidified Weidenbrunnen stand, the modified roots, the abnormal root branch form such as fork, gun and rake types were appeared. As a result of the ring of the root, the annual horizontal root growth were 6.3cm for Weidenbrunnen and Barbis stands and 9.5cm for Ebergötzen stand. The average annual vertical root growth was 4.4cm, 5.4cm, and 6.7cm for Weidenbrunnen stand, Barbis stand, and Ebergötzen stand, respectively. The cross section area by root distribution at 80cm deep showed that the thick and thin roots were evenly distributed in of Ebergötzen stand and the sum of root cross section area was 32.6cm². In Barbis stand, the thick roots were distributed

¹ 接受 2001年 4月 23日 Received on April 23, 2001.

審査完了 2001年 8月 20日 Accepted on August 20, 2001.

² 영남대학교 산림자원학과 Department of Forest Resources, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea.

* 연락처자 E-mail : dhlee@yu.ac.kr

in the center while the thin roots were comparatively rare. And the sum of root cross section area was 29.2cm². In Weidenbrunnen stand, only a few thin roots were found, and the total root cross section area was 10.9cm². The stability coefficient of roots were in the order of Ebergötzen stand(1.04), Barbis stand (0.3), and Weidenbrunnen(0.08) stand. Among the investigated Norway spruce stands, the modified abnormal root branching form and the low root growth appeared in the Weidenbrunnen stand could be attributed by the soil acidification etc.

Key word : root development, root branching forms, Norway spruce, abnormal root structure, root cross section area, stability coefficient, soil acidification.

緒 論

점차 늘어나는 환경오염의 심각성과 더불어 이에 대한 관심이 고조됨에 따라 환경변화에 따른 수목의 적응 능력과 그 형태변이에 대한 연구가 시급히 이루어져야 하며, 현재 또는 미래에 있어서 생물지시자(Bio-indicator)로서의 수목에 대한 생리, 생태학적인 연구의 필요성이 더욱 절실히 요구된다.

수관분석를 통해 한 수종의 생장과 그 변화량을 정밀히 분석할 수 있듯이, 뿌리구조 또한 뿌리의 나이에 분석으로 개체목의 뿌리 발달에 대해 매우 정확한 분석을 할 수 있다. 뿌리발달은 내부적으로는 유전적인 형태와 규칙성이 정해져 있고, 외부적으로는 토양의 양분상태, 토양수분, 밀도, 통기성 등의 물리, 화학적 성질에 영향을 받으며, 뿌리의 분지 정도, 각도, 비율이 환경 변화에 따라 다양하게 나타난다. 지하부의 뿌리구조는 규칙적으로 자라는 지상부의 가지구조와 비교하면, 명확하거나 다양하지 않고, 분지구조와 구성성분을 뚜렷이 구별하기 어려우며, 또한 그 특징이 매우 가변적이고 유동적이다. 이는 토양을 지상부의 공간과 비교하면 돌과 같은 딱딱한 물체 등의 균일하지 않는 상태에서 뿌리가 성장하기 때문에 변형의 폭이 매우 클 수 있다. 또한 그 변형 형태가 다양하고 불규칙하게 나타나고 예측하는 것도 매우 어렵다. 뿌리구조는 수관과 비교하여 수종간의 구별이 어렵고 수종내의 유연성과 표현형의 다양성이 매우 크다. 이러한 점 때문에 뿌리구조는 토양공간의 상태와 특수한 환경에 대한 매우 민감한 표시 매체로서 사용될 수 있는 장점을 동시에 갖고 있다. 대부분 뿌리구조는 토양 중에서 이상적인 성장을 하지 못하고, 토양의 물리적 그리고 화학적 이질성으로 인하여 뿌리의 성장속도와 성장방향의 변형이 일어나며, 이러한 토양의 성질은 측면분열조직과 분지점 유도에 큰 영향을 미쳐 다양한 형태의 표현형으로 나타나게 된다.

지금까지 산림 생태계에서 환경오염으로 인한 수목 피해연구는 지금까지 수많은 연구가 이루어져 왔다. 숲 생태계에서 잎과 뿌리의 피해가 동시에 일어남이 확인되었으며(Ulrich 등, 1985), 지상부의 피해 현상에 대한 지하부 뿌리구조의 피해에 대한 형태학적 및 유전-형태학적인 연구가 보고되고 있다(Gehrmann 등, 1985; Puhe and Aronsson, 1986; Köstler 등, 1968; Schmidt-Vogt, 1986). 또한 임분의 악화에 따른 뿌리 생장의 장애요인 증가와 가는 뿌리의 비정상적인 분지구조에 대하여 보고되었다(Eichhorn, 1987).

본 연구의 목적은 토양 산성화 정도가 서로 다른 독일가문비나무 임분에서 토양 깊이에 따른 뿌리의 공간적 발달과 각 임분에서의 분지형태를 비교 분석함으로써, 한 수종이 갖는 환경에 대한 적응력의 범위를 밝히고자 하였다.

材料 및 方法

1. 조사지의 현황

한국임학회지 89권 5호와 같다.

2. 뿌리의 분지구조와 생장분석

뿌리는 수평 50cm 단위별, 수직 20cm 단위별로 층위를 구분하여, 그 층위에서 직경 0.5cm 이상 되는 뿌리의 분지구조와 뿌리횡단면, 나이트 등을 조사하였다. 뿌리의 횡단면 조사를 위하여 약 1cm 길이의 단면을 톱으로 자르고, 자른 횡단면을 표면 연마기로 갈아서 심재, 변재면을 구분하여 플라니메터로 면적을 측정하였다. 뿌리생장은 토양의 이질성으로 인하여 구조적으로 상이한 분지구조를 나타내기 때문에 수직과 수평 분지구조에 대하여 정상적인 뿌리구조군과 변형된 뿌리구조군을 조사하였다(Figure 1). 수평과 수직 굵은 뿌리에 대한 평균 연년 길이 생장을 알아보기 위하여 각 토양 깊이층위에서 조사된 뿌리의 전체

나이테를 조사하였으며, 토양의 이전 층위에서 다음 층위의 나이테 차를 이용하여, 각 층위에서의 뿌리 생장에 소요되는 시간을 산출하였다. 뿌리의 자세한 분석을 위하여 확대 현미경을 사용하였다.

結果 및 考察

1. 뿌리 분지구조의 분류

조사된 뿌리구조에서 나타난 뿌리의 다양한 분지형태를 그림 1에 나타내었다. 조사를 통하여 뿌리의 발달 형태에 따라 일반적인 뿌리의 발달형태(A, B, C)와 변형된 뿌리 형태(D, E, F, G) 그리고 특별한 뿌리의 형태(H, I)로 분류하였다.

각도가 좁게 나란히 발달한 뿌리(A)는 약간 비스듬히 발달한 뿌리(C)의 변형된 형태로 발달 형태상 그 생장이 일찍 결정되어 분지구조의 각도가 매우 좁게 나타나며, 동시에 두 개의 뿌리가 발달한 것과 시간적인 차이를 두고 발달한 것으로 구별할 수 있는데, 후자는 드물게 나타난다. 중심뿌리에서 수직으로 발달한 뿌리(B)는 뿌리 발달의 특별한 형태이며 주로 늦게 발달하는 뿌리에서 흔히 나타난다. 약간 비스듬히 발달한 뿌리(C)는 그 각도가 45~60° 정도로 발달하며 수직과 수평뿌리에서 흔히 나타난다. 중심뿌리의 생장을 멈추고 측근의 생장이 더 왕성히 발달한 뿌리(D)는 수직뿌리에서 자주 발달할 뿐만 아니라 토양의 위층 부분에 많은 양의 뿌리가 발달하는 편평뿌리에서 더욱 많이 나타난다.

포크형태로 발달한 뿌리(E; dichasium)는 일반적으로 굵기가 비슷한 측면 뿌리에서 정단 분열조직이 피해를 받을 경우에 발달하는데, 이러한 뿌리형태는 수평뿌리에서 많이 나타나며, 가운데 부분의 발달이 저조하고 색깔이 검은 정단부분 때문에 쉽게 식별할 수 있다(Liese, 1926; Hoffmann, 1939; Fayle, 1974). 쇠스랑형(F)은 중심 부분이 피해를 받고 형성층 부분에 켈러스가 형성되어 새로운 뿌리가 발달하게 된 형태로 3~5개의 뿌리가 발달하는 것이 일반적이지만, 그 이상의 뿌리가 발달하는 경우도 있다. 뿌리 정단 부분이 상처나 피해를 받아 뿌리의 신장 변형이 나타난 형태(G)는 수평뿌리에서 많이 나타나며, 빗형 또는 양날 빗형(H)과 두 개의 뿌리가 서로 겹쳐서 생장하는 뿌리(I)는 주로 수분흡수의 경쟁이 심한 수평뿌리에서 많이 나타나는데, 수직뿌리에서도 간혹 발견된다. 빗 모양의 뿌리발달은 부식질이 많이 함유된 토양 위층에서 흔히 나타나며(Köstler, 1956), 또한 편평 뿌리구조에서 많이 나타난다(Steinmeyer, 1988). 이는 토양 위쪽 부분에서 뿌리 발달에 필요한 풍부한 유기물이 있어서 수분과 영양분을 얻기 위해 왕성한 뿌리의 분지 활동이 일어날 수 있고, 또한 측면 뿌리의 원래 생장방향을 유지하기 위한 뿌리 상해 부분이 빗 형태와 양날 빗 형태로 표현되기 때문인데(Eichhorn, 1987), 이것은 독일가문비나무는 토양 위층의 유기물 토양층 때문에 산성화된 아래층의 뿌리구조가 제한을 받는다는 Ulrich 등(1984)의 뿌리발달 이론과 일치한다. 한

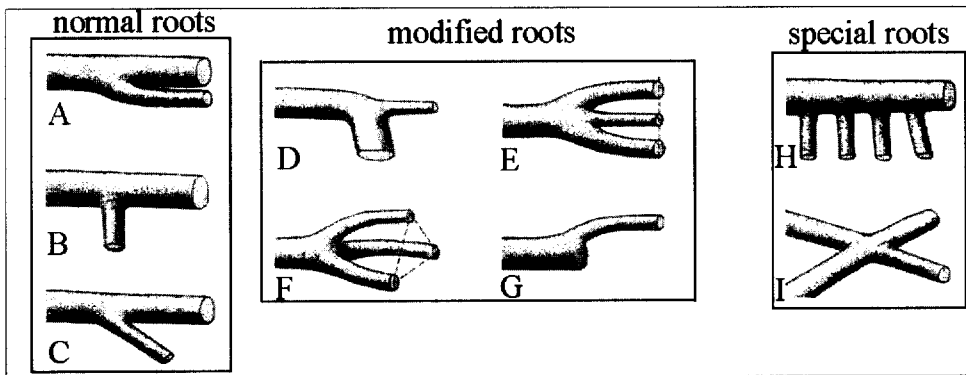


Figure 1. Branching forms of root systems in 40-year old Norway spruce at the three studied stands.

A : Side root with acute angle
 B : Side root with 90° angle
 C : Side root with ca. 45° angle
 D : Branch of side root
 E : Forked root

F : Forked root with 3 angle
 G : Bend with side root
 H : 'Comb'-shaped branch
 I : X-type branch

나무에서 뿌리가 서로 붙어서 자라는 경우와 서로 다른 나무의 뿌리가 붙어서 자라는 경우가 있는데, 이는 수목 생리적으로 중요한 의미를 갖는다. 다른 나무의 뿌리가 붙어서 함께 자라는 경우 나무들 간에 수분과 영양분 및 수병학적인 전이가 가능하며(Liebold, 1963; Graham and Bormann, 1966) 임분의 고정적인 측면에서 긍정적으로 작용한다(Laitakari, 1929; Rigg and Harrar, 1931). 같은 나무의 뿌리가 서로 붙어서 성장하는 현상 또한 수평뿌리와 수직뿌리의 그루터기 아래에서 흔히 나타나는데, 본 연구에는 임분간의 유의성은 나타나지 않았다. 그루터기 부근의 수평뿌리는 바람에 의한 기계적 저항으로 인하여 그 뿌리의 횡단면이 타원형에서 H-형으로 방사성 성장을 통하여 발달하는데, 뿌리중심에서 멀어질수록 뿌리 횡단면이 원형을 나타내게 된다(Fayle, 1968; Sutton, 1969; Mattheck and Breloer, 1992). 본 연구에서 폭과 너비에 대한 비율이 부정타원형으로 형성된 뿌리 횡단면은 조사된 모든 조사목에서 발견되었지만, 임분간의 유의성은 인정되지 않았다. Metzler와 Oberwinkler(1986)는 토양 산성화를 통한 일차적인 뿌리피해에 대한 표식자로서 독일가문비나무 뿌리에서의 분열조직 변화를 보고하였으며, Eichhorn(1987)은 독일가문비나무 노령목의 가는 뿌리연구에서 산성피해를 본 나무가 피해를 보지 않은 나무보다 변형된 뿌리의 빈도가 매우 높게 나타났다고 보고하였다. 또한 Hoffmann(1939)과 Gruber(1992)는 인위적인 뿌리 정단 부분의 절단으로 인한 2, 3, 4개의 새로운 뿌리가 분화되는 뿌리에 대하여 보고하였다.

본 조사에서는 서술한 분지구조가 토양의 화학적 성질(pH, 염기치환용량 등)의 변성작용이 뿌리의 여러 가지 다양한 형태의 분지구조로 표현될 수 있다는 가정과는 달리, 분지구조에 대한 조사 임분간의 통계적 유의성이 인정되지는 않았지만, 가장 많이 산성화된 Weidenbrunnen 임분에서 뿌리가 상해를 입음으로 인해 발생하는 포크형, 권총형, 쇠스랑형과 같은 비정상적인 분지구조가 많이 나타났다.

2. 층위에 따른 뿌리 분포

Figure 2에는 40, 60 그리고 80cm 토양 깊이에서의 뿌리횡단면 분포를 나타내었다. 토양깊이에 따른 뿌리 분포는 임분간 각각의 토양깊이에서 비슷한 뿌리분포를 나타내었고, 80cm 토양깊이에서

는 조사임분 중 토양산성화 정도가 가장 낮은 Ebergötzen 임분(E)에서 굵은 뿌리와 가는 뿌리가 고르게 분포하는 것으로 나타났으며, 횡단면의 합계는 32.6cm² 이었다. Barbis 임분(B)에서는 굵은 뿌리가 가운데 몰려서 분포하고, 가는 뿌리는 비교적 적게 나타났으며, 그 합계는 29.2cm²이었다. Weidenbrunnen 임분(W)에서는 적은 수의 가는 뿌리만 분포하고, 그 값은 단지 10.9cm²에 불과하였다. 조사임분 중에서 토양 산성화 정도가 가장 낮은 Ebergötzen 임분의 140cm 토양깊이에서 아직 0.5cm 이상 되는 굵은 뿌리가 남아있다는 것을 고려해 보면, 가는 뿌리가 더 깊은 토양 층에 존재함을 알 수 있다. Barbis 임분의 뿌리구조는 적은 수의 굵은 뿌리로 토양 깊은 곳까지 자라는 수직뿌리를 나타내었는데, 이는 토양 깊은 곳에서도 비교적 낮은 pH 값을 나타낸 Weidenbrunnen 임분에 비하여 토양 깊은 곳까지 비교적 높은 염기 치환성을 나타낸 것과 관계가 깊은 것으로 사료된다. 또한 Shinozaki(1961)의 파이프 이론을 적용하여 각 층위 면에서 뿌리횡단면, 변재면과 미세 뿌리량을 비교·분석하기 위하여 뿌리량을

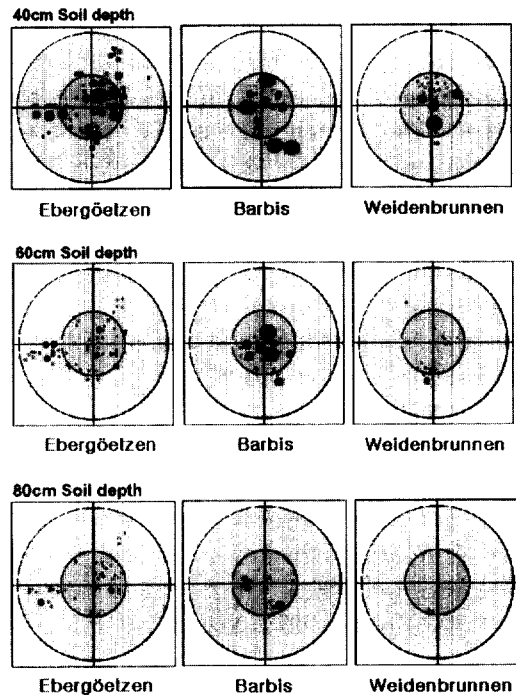


Figure 2. Distribution of root cross section area by the soil depth in 40-year old Norway spruce at the three studied stands.

측정하였는데, 미세뿌리의 양은 Weidenbrunnen, Ebergötzen, Barbis 임분이 각각 2.5ton ha⁻¹, 3.2ton ha⁻¹, 5.7ton ha⁻¹이었으며, 그 중 살아있는 미세 뿌리양은 각각 1.4ton ha⁻¹, 1.5ton ha⁻¹, 1.0ton ha⁻¹이었다. Weidenbrunnen 임분에서는 전체 가는 뿌리의 97%가 토심 20cm 위 부분에서 나타났으며, 죽은 미세 뿌리량은 매우 높은 값(82%)을 나타내었는데, 이러한 높은 뿌리 고사율은 Weidenbrunnen 임분이 뿌리 생육에 좋지 못한 환경임을 나타낸다.

Ebergötzen 임분은 거의 모든 깊이에서 평균적으로 가장 높은 값을 보였고, 가는 뿌리(0.5~1.0cm, 1.0~2.0cm)의 수는 Ebergötzen 임분이 다른 두 임분보다 양적으로 우세하게 나타났다. 굵은 뿌리(직경 5cm 이상)는 Barbis 임분이 Weidenbrunnen 임분과 Ebergötzen 임분 보다 현저히 높은 값을 보여 주었다.

3. 뿌리고정계수

수목의 기계적 그리고 물리적 고정능력을 나타내는 수평 100cm와 수직 100cm의 전체 뿌리횡단면 비교에서 Ebergötzen 임분이 1.04로 다른 두 임분 Barbis(0.3), Weidenbrunnen (0.08)에 비해 매우 높은 값을 나타내었는데(Figure 3), 이는 Ebergötzen 임분에 자라고 있는 수목이 바람과 한발에 대해 저항성이 크다는 것을 의미한다. Ebergötzen 임분에서는 수직뿌리의 발달이 두드러졌으며(Figure 2, 3), Barbis 임분은 적은 수의 굵은 뿌리가 발달하였고, Weidenbrunnen 임분은 수직뿌리의 발달이 저조하였다. 일반적으로 어떤 수종의 바람과 중력에 대한 기계적 고정능력은 수직뿌리의 발달과 밀접한 관계가 있는데, 수직뿌리에 대한 수평뿌리의 비율에 따라 그 수종의 물리적 고정능력을 판단할 수 있으며, 본 연구에서는 이를 고정계수라 명명하였다. Weidenbrunnen 임분과 같은 수직뿌리의 발달은 저조하고 수평뿌리가 많이 발달한 임분에서 자라는 나무는 비가 많이 온 후 토양의 함수율이 높아졌을 때 강한 바람이 불면 쉽게 뿌리째 넘어질 수 있는 가능성이 매우 크다(Köstler, 1956; Nielsen, 1990).

4. 뿌리의 나이테 분석

각각의 조사 임분에서 한 개체에 대한 나이테 분석을 실시한 결과, Figure 4에서와 같이 연속적 층위의 뿌리횡단면의 다양한 평균 길이생장이

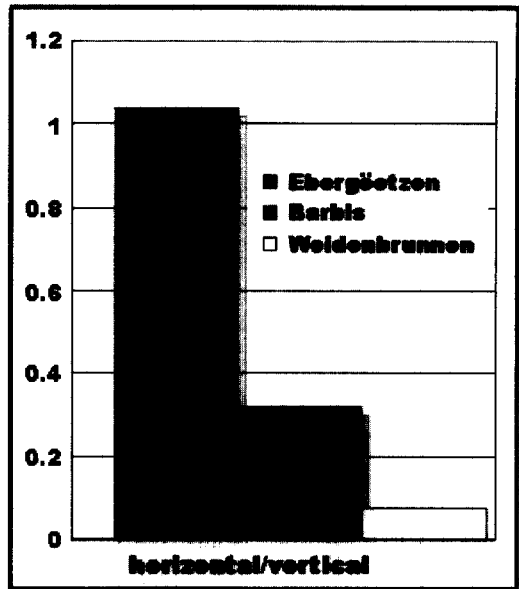


Figure 3. Ratio of horizontal and vertical roots in 40-year old Norway spruce at three studied stands.

나타났으며, 수평뿌리는 50~100cm 층위 면에서 Weidenbrunnen 임분과 Barbis 임분이 평균 6.3cm, Ebergötzen 임분이 9.3cm로 나타났다. 지상 부와는 달리 지하부 뿌리에서의 생장은 토양의 형태와 전밀도 등에 따라 나이테 폭의 변이성이 매우 크게 나타나며, 뿌리횡단면에서 형태 또한 매우 불규칙하게 나타난다. 뿌리에서의 이러한 불규칙하고 조밀한 나이테의 발달은 정확한 나이테 산정을 어렵게 하기 때문에 연륜을 분석할 때 신중함이 요구된다. 또한 본 연구에서는 각 임분의 뿌리 그루터기 부분에서 성장 개시한 수직뿌리는 뿌리생장이 억제되었으며, 그 나이테 차이는 2~19년이였다. 이는 생육초기에 수평뿌리의 발달이 수직뿌리의 발달보다 더 왕성하며, 일정한 시기를 두고 수직뿌리가 발달됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 Coutts와 Lewis(1983)의 결과와는 달리 그루터기 부근에서 굵기가 작은 가는 뿌리가 발견되었으며, 중심뿌리에 비하여 나이테 수가 적게 나타났다. 이것은 휴면하고 있는 뿌리 분열조직으로부터 새로운 뿌리가 돌발적으로 형성된 것으로 볼 수 있다. 수직뿌리의 연간 평균 길이생장은 Weidenbrunnen 임분이 4.4cm, Barbis 임분이 5.5cm, Ebergötzen 임분이 6.7cm의 생장을 보였다. Weidenbrunnen 임분의 좋지 못한 성장의

결과는 토양 산성화 등으로 인하여 토양의 물리·화학적 영향이 뿌리의 생장에 영향을 준 것으로 사료되며, 수직과 수평뿌리 발달이 각 조사 임분의 토양의 산성화와 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었다.

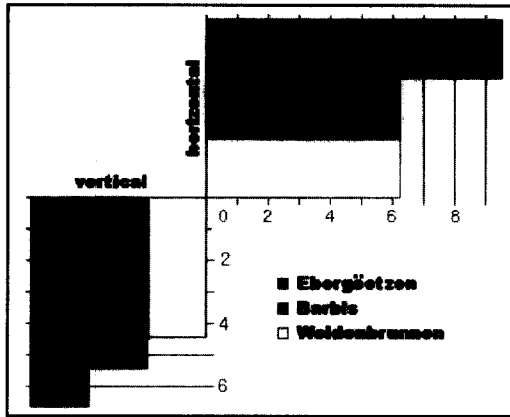


Figure 4. Annual growth of horizontal and vertical roots of 40-year old Norway spruce at the three studied stands.

結 論

본 연구에서 토양 산성화 정도에 따른 독일가문비나무의 뿌리구조는 조사 임분간에 큰 차이를 보였으며, 뿌리의 분지구조는 변형된 뿌리와 변형되지 않은 뿌리에 대한 조사 임분간의 통계적 유의성이 인정되지 않았지만, 가장 많이 산성화된 Weidenbrunnen 임분에서는 뿌리가 상해를 입음으로 인해 발생하는 포크형, 권총형, 쇠스랑형과 같은 비정상적인 분지구조가 많이 나타났다. 80cm 토양 깊이에서의 뿌리 횡단면 분포에서 Ebergötzen 임분은 굵은 뿌리와 가는 뿌리가 고르게 분포하고 있으며, Barbis 임분은 비교적 적은 수의 굵은 뿌리가 가운데 몰려서 분포하고, Weidenbrunnen 임분에서는 적은 수의 가는 뿌리만 분포하였다. 뿌리고정계수는 Ebergötzen 임분이 다른 두 임분에 비해 매우 높은 값을 나타내어, 건조와 한발에 대한 저항성이 크다는 것을 알 수 있었다. 뿌리의 나이테 분석에서 수평뿌리는 Ebergötzen 임분이 매년 9.3cm 성장으로 다른 두 임분(평균 6.3cm)에 비해 뿌리 발달이 왕성하였으며, 수직뿌리 또한 Ebergötzen 임분(6.7cm)이 Weidenbrunnen 임분(평균 4.4cm)과 Barbis 임분(5.4cm)에 비하

여 월등히 좋은 성장을 나타내었다.

이상을 종합하면 독일가문비나무는 장기간에 걸쳐 생육환경이 나빠짐에 따라 변형되고 비정상 형태의 뿌리가 많이 나타나며, 또한 수직과 수평뿌리의 길이 생장이 둔화되고, 특히 수직뿌리의 발달의 저하로 인해 뿌리의 고정능력이 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

引用 文 獻

1. Coutts, M.P. and G.L. Lewis. 1983. When is the structural root system determined in Sitka spruce?. *Plant and Soil* 71 : 155-160.
2. Eichhorn, J. 1987. Vergleichende Untersuchungen von Feinwurzelsystemen bei unterschiedlich geschädigten Altfeichten (*Picea abies* Karst.) Diss. Göttingen. pp. 154.
3. Fayle, D.C.F. 1968. Radial growth in tree roots : distribution, timing, anatomy. Technical Report No. 9, Univ. of Toronto. 145-149.
4. Fayle, D.C.F. 1974. Extension and longitudinal growth during the development of red pine root systems. *Canadian Journal of Forest Research* 5 : 608-625.
5. Gehrman, J., M. Grrriets, J. Puhe und B. Ulrich. 1984. Untersuchungen an Boden, Wurzeln, Nadeln und erste Ergebnisse von depositionsmessungen im Hils Ber. *Forsch. Waldökosysteme/Waldsterben*. Göttingen 2 : 169-206.
6. Graham, J.R., B.F. and F.H. Bormann. 1966. Natural root grafts. *Botanical Review* 32 : 255-292.
7. Gruber, F. 1992. Dynamik und Regeneration der Gehölze. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosystems Göttingen Reihe A, Bd. 86/ Teil I&II*, 1-420, 1-176.
8. Hoffmann, R. 1939. Vergleichende Untersuchungen über die Wurzeltracht forstlicher Kleinpflanzen, Diss. Gießen. pp. 180.
9. Köstler, J.N. 1956. *Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken sturmgeworfener Nadelbäume*. *Forstw. cbl.* 65-91.
10. Köstler, J.N., E. Brückner und H. Bibelriether. 1968. *Die Wurzel der Waldbäume*, Verlag Paul

- Parey, Hamburg, Berlin. 1-55.
11. Laitakari, E. 1929. Die Wurzelforschung in Ihrer Beziehung zur Praktischen Forstwirtschaft. Acta For Fennica 33(2) : 1-21.
 12. Liebold, H.E. 1963. Beobachtungen über die Wirkung von Wurzelverwachsungen in Fichtenbeständen. Wissenschaftlichen Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 12(4) : 1045-1048.
 13. Liese, J. 1926. Beiträge zur Kenntnis des Wurzelsystems der Kiefer (*Pinus sylvestris*). Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen, 129-181.
 14. Mattecks, C. und H. Breloer. 1992. Der Wurzelquerschnitt als Protokoll der Lastgeschichte. Allgemeine Forst und Jagd Zeitung 163(7/8) : 142-145.
 15. Metzler, B. und F. Oberwinkler. 1986. Charakteristische Meristemschäden in Fichtenwurzeln durch niedrigen PH-Wert und Aluminium-Ionen. Allgemeine Forest Zeitschrift 649-651.
 16. Nielsen, C. CH. N, 1990. Einflüsse von Pflanzenabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomassverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen Band 100. J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main. pp. 287.
 17. Puhe, J. und A. Aronsson. 1986. Wurzelwachstum und Wurzelschäden in skandinavischen Nadelwäldern. Allgemeine Forest Zeitschrift 20 : 488-492.
 18. Rigg, G.B. and E.S. Harrar. 1931. The root systems of trees growing in sphagnum. American Journal of Botany 18(6) : 391-397.
 19. Schmidt-Vogt, H. 1986. Die Fichte. Bd. 1. Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften, Parey Verlag, Berlin, Hamburg. pp. 647.
 20. Steinmeyer, U. 1988. Über die Wurzelentwicklung junger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) im Hils und auf dem Pokljuka-plateau. Diplomarbeit Univ. Göttingen. pp. 182.
 21. Sutton, R.F. 1969. Form and Development of conifer Roots systems. Technical Communication No. 7, Commonwealth Forestry Bureau Oxford, England Commonwealth Agricultural Bureaux. pp. 131.
 22. Ulrich, B., D. Murach and D. Pirouzpanah. 1984. Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Wurzelentwicklung von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. Forstarchiv 55 : 127-134.
 23. Ulrich, B., D. Pirouzpanah und D. Murach. 1985. Beziehungen zwischen Waldschäden und chemischem Bodenzustand; Abschlußbericht T. 1 und 2. zum Vorhaben Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn. pp. 120.