

土壤의 物理的 條件이 은수원사시나무
(*Populus alba* × *P. glandulosa*)의
生長 및 根系發達에 미치는 影響¹

— 容積重을 中心으로 —

閔一植² · 李壽煜²

Influence of Soil Bulk Density on Growth and
Root Development of
Populus alba × *P. glandulosa*¹

Ell Sik Min² · Soo Wook Lee²

要 約

本 研究는 傾斜部位別 土深別로 土壤의 物理的 性質 中 容積重과 孔隙率이 은수원사시나무의 生長과 根系發達에 미치는 影響을 分析한 것으로서 그 結果를 要約하면 다음과 같다. 1) 容積重과 孔隙率은 傾斜部位와 密接한 關係를 가지고 있으며, 土深에 따라 有意인 差異를 갖는다. 2) 容積重은 下部에서 平均 1.17 g/cm³ (1.05~1.40), 上部에서 平均 1.43 g/cm³ (1.36~1.60) 이었으며, 孔隙率은 下部에서 平均 52.65% (55.05~45.50), 上部에서 平均 41.20% (43.81~37.21) 이었다. 3) 容積重은 樹高, 胸高直徑, Total biomass 및 林木의 各部位別 Biomass와 回歸分析結果 負의 相關을 나타내었다. 4) 은수원사시나무의 根系은 淺根性으로서 주로 A1層에 分布하였으며, 限界容積重은 1.40 g/cm³ 이었다.

ABSTRACT

This experiment has been made to find out the influence of soil bulk density on growth and root development of *Populus alba* × *P. glandulosa* in Buyeo-kun, Chungnam. Bulk density and porosity significantly change according to slope position and soil depth and have a significant effect on tree height, DBH, biomass, and the distribution of root development. The results extracted from the experiments are as follows; 1) Bulk density in average changes from 1.17 g/cm³ (1.05 ~ 1.40) in lower slope position to 1.43 g/cm³ (1.36 ~ 1.60) in upper slope position, and porosity from 52.65% (55.05 ~ 45.50) in lower slope position to 41.20% (43.81 ~ 37.21) in upper slope position. 2) Bulk density increases significantly with soil depth. 3) Tree height, DBH, and total biomass decrease with bulk density. 4) Foliage, branch, holewood, bolebark, and root also significantly have a negative correlation with bulk density. 5) *Populus alba* × *P. glandulosa* has a shallow root system chiefly distributing only in A1 horizon, and critical bulk density is 1.40 g/cm³. Therefore, slope position, bulk density, and porosity are considered to influence on the growth, biomass, and root development of *Populus alba* × *P.*

¹ 接受 9月 15日 Received September 15, 1984.

² 忠南大學校 農科大學 College of Agriculture, Chungnam National University, Taejeon, Korea.

glandulosa.

Key words; bulk density; porosity; slope position; soil depth; *Populus alba* × *P. glandulosa*.

緒 論

Populus alba × *P. glandulosa*는 林木育種研究所에서 장려되어 오고 있는 造林樹種으로서, 1967년부터 全國에 大量普及이 始作되어 現在까지 約 170,000ha에 1億 3千 6百萬本을 造林하였다. 그러나 이와 같이 大量的 植栽가 이루어짐으로써 실제 植樹 造林의 結果 地形 및 土壤의 物理性에 따라 生長의 差異를 나타내고 있다. 이에 따라 보다 效果의인 植樹 造林을 위하여 適地判定에 도움이 되는 資料가 要求되며, 아울러 育林管理 및 土壤과 肥沃度 管理에 관한 資料가 必要하다. 林木의 生長은 遺傳的인 形質과 環境的인 要素가 綜合作用되는데 우리나라와 같이 瘠薄한 土壤이 많은 곳에서는 遺傳的인 影響보다 環境的인 影響을 더 많이 받으므로 生長量의 推定은 樹種이나 品種이 植栽된 곳의 環境因子를 上臺로 判斷하여야 하므로, 심고자 하는 造林地의 環境因子를 判斷하는 것이 장차의 生長狀態를 推定하는데 매우 重要한 課題라 아니할 수 없다.

林木의 生長에 關係하는 環境的인 面을 考慮할 때 土壤의 特性에 따라 影響을 받는데, 土壤의 生成에 關係되는 因子로는 氣候, 地形, 植生, 母材, 時間이 있으며¹⁰⁾, 이 중 氣候, 植生, 母材, 時間이 同一한 林地에서는 우리나라 森林에서처럼 地形에 따라 特別히 傾斜 部位別로 土壤의 物理的인 性質이 달라질 수 있다.^{31, 35)}

土壤의 物理的인 性質 중 容積重(Bulk Density)이 林木의 生長 특히 根系 發達과 密接한 關係가 있다는 研究가 많이 進行되어 왔다.

Veihmeyer(1946)³³⁾는 Soil Auger를 使用하여 容積重은 土深이 깊어짐에 따라 增加하며 表土에서는 1.38 g/cm³이고 150cm 깊이에서는 1.83 g/cm³이었으며 해바라기의 경우 限界 容積重은 1.80 g/cm³이라 報告하였고, Hendrickson(1948)¹⁶⁾은 土性에 따라 容積重이 변하며 砂土에서는 1.75 g/cm³, 粘土에서는 1.46 ~ 1.63 g/cm³이 限界 容積重이었으며, 根系 發達을 制限하는 要因은 孔隙의 크기 때문이라 하였다. Zimmerman(1961)³⁷⁾은 人工的으로 土壤의 容積重을 調節하여 1.6 ~ 2.0 g/cm³에서는 林木의 生長 및 根系 發達이 制限을 받는다고 하였으며, Meredith

(1960)²³⁾는 微砂質壤土(silt loam)에서 容積重이 1 g/cm³ 增加하면 뿌리침투가 30% 減少하며 그 原因은 非毛細管孔隙(noncapillary pore)의 減少 때문이라 하였으며, Aubertin(1965)⁴¹⁾은 孔隙의 크기는 短根(shorter root)보다 長根(longer root)에 더큰 影響을 미치며 Maize의 경우 孔隙의 直徑이 138 μ 이하이면 根系 生長이 不良하다고 報告하였다. Foil(1967)¹³⁾은 테다소나무의 경우 容積重이 0.8 g/cm³ 부터 1.4 g/cm³ 사이에서 뿌리의 무게와 침투율이 負의 相關이 있음을 報告하였다.

Gill(1956)¹⁴⁾은 植物의 生長에 影響을 미치는 物理的인 性質들의 數는 적지만 그들의 相互作用이 복잡하여 어떤 하나의 特定한 factor의 意味로 觀察하여야 하며, 옥수수의 경우 酸素供給이 10% 以下이면 根系 生長이 不良하다고 하였으며, Burtrand(1957)⁷⁾는 Corn의 實驗에서 容積重이 1.5 g/cm³ 以上이 되면 酸素의 缺乏으로 根系 生長이 制限된다고 報告하였다. Phillips(1962)²⁸⁾은 容積重이 0.94 g/cm³ 부터 1.30 g/cm³에서 뿌리생장은 直線 回歸的으로 減少하며, 그 原因은 通氣性의 不良 때문이라고 하였으며, Patt(1966)²⁷⁾는 土壤의 孔隙量을 測定하여 松나무류에서 根系 發達의 限界를 9 ~ 10%라 報告하였고, Webster(1978)³⁴⁾는 사과나무에서 根系 發達을 制限하는 要因이 砂土에서는 土壤強度 때문이며, 排水 不良한 粘土에서는 通氣性 때문이라고 하였고, 孔隙量의 制限 範圍를 29%부터 39%라 하였다. Heilman(1981)¹⁵⁾은 더글라스쉬(Douglas-fir)에서 孔隙率이 29 ~ 30%일 때 根系 發達에 阻害가 된다고 報告하였다.

Taylor(1963)³²⁾는 堅密層에서 孔隙의 크기(pore size)가 根冠(root cap)의 크기보다 작으면 根系 生長에 阻害가 되며 목화의 경우 限界 容積重이 1.85 g/cm³이라 하였으며, Barley(1963)⁵⁾는 剪斷強度(shear strength)가 結定 因子이며 그 限界를 옥수수의 경우 0.6 kg/cm²라 하였다. Heilman(1981)¹⁵⁾은 容積重이 커지면 根系은 屈地性(geotropism)의 喪失로 生長이 制限을 받는다고 報告하였으며, 曹(1982)¹⁰⁾는 土壤의 堅密度는 土深이 깊어질수록 增加하며 리기다소나무의 樹根(中細根)은 20cm 깊이까지의 表土層에 57%가 分布하며 리기다소나무의 中細根의 生長에 適合한 土壤의 堅密度는 20.9 mm(山中式 soil

hardness tester) 以下라고 報告하였다.

Camp(1964)⁸⁾은 容積重의 測定으로 淺根性 樹種에 대해 토양 건밀도의 影響을 推定할 수 있으며, 뿌리침투의 限界를 1.7~1.8 g/cm³라 하였고, Hodgkin(1977)¹⁷⁾은 대왕송에 대해 傾斜 部位를 上部, 中部 및 下部로 나누어 根系을 測定한 結果 平均 2.2cm부터 27.2cm 깊이에 側根이 주로 分布하였다고 報告하였으며, Heilman(1981)¹⁵⁾은 回歸分析으로 容積重이 1.74~1.83 g/cm³일 때 더글러스취 苗木의 根系發達이 制限을 받으며 土深이 깊어짐에 따라 容積重이 增加하므로 堅密度가 낮은 表土를 따라 根系가 發達한다고 하였다.

盧(1982)²⁶⁾은 온수원사시나무의 生長에 影響을 미치는 各種 因子를 path analysis에 의한 寄與度 調査에서 8年生의 경우 寄與도가 土深이 -0.4%, 土性이 45.9%, 堅密度가 49.8%이었으며, 10年生의 경우 土深이 2.9%, 土性이 32.8%, 堅密度가 62.8%라 報告하였다.

林木의 生長 관계 중 地上部의 生長과 根系發達は 密接한 關係를 갖는 것으로 思料된다. Crow(1978)¹²⁾와 Kendell(1978)²¹⁾ 등은 地上部 生長量에 대해 樹高와 胸高直徑을 D²H의 函數를 回歸式에 의해 算定하였고, Allen(1964)¹¹⁾과 Kaufman(1968)²⁰⁾ 등은 樹高, 胸高直徑, root length의 關係를 調査하였다. Armson(1979)²⁾은 一般적으로 總物質生長量 중에서 根系의 物質生長量은 20~25%이라고 하였으며, Will(1966)³⁶⁾은 18年生 라디아타소나무의 경우 總物質生長量 중 根系가 11%라 하였다. Morrison(1974)²⁴⁾은 30~35年生 Jack pine의 경우 13~14%라 하였고, Fernandez(1975)¹²⁾은 사과나무와 메다소나무의 경우 뿌리/ 줄기의 비율이 1:5라고 報告하였다.

衛生 舜(1979)²⁵⁾은 淺根性 樹種에서는 土深이 깊은 곳에서도 林木의 生長이 좋지만 土深이 얇은 곳에서도 生長이 그만큼 良好하다고 하였으며, Armson(1979)²⁾은 成土層(solum)내에서는 rooting에 制限要素가 없는 土과성이 높은 심층토양일지라도 淺根性 樹種의 根系發達에는 有利한 條件을 주지못한다고 報告하였으며, Wilde(1958)³⁵⁾는 土深은 어느 限界를 넘어서면 生態的인 重要性을 喪失하며, 土深의 地質學的 制限은 物理的, 化學的, 生物學的인 條件에 의해 補充되어야 한다고 하였다.

本 研究은 合理的인 適地適樹의 造林指針을 마련하고, 植栽 후 土壤 및 肥沃도와 관련된 有利한 育林管

理를 위해서 地形的인 差異가 林木生長에 미치는 影響을 土壤의 物理的인 性質을 根據로 관찰하려는 것이 主要 目的이다.

材料 및 方法

1. 調査地域

忠南 扶餘郡 恩山面 羅嶺里에 位置한 忠南大學校 附屬練習林에 所在한 林分으로서, 調査樹種은 *Populus alba* × *P. glandulosa* (온수원사시나무)로서 造林時期는 1978年이며, 蓄積本數는 736本/ha이었으며, 方位는 東向이고, 平均 傾斜度는 23°였다. 海拔高는 250~300m이며, 年平均 總降水量은 1249.8mm이며, 年平均 氣温은 11.8°C였다.

2. 調査方法

(1) 土壤調査

林木의 根元部(root collar)로부터 側方 1m 떨어진 地點에서 土壤의 斷面을 따라 成土層을 調査하였으며, 表土에서부터 10cm 間隔의 깊이로 토양 시료 채취기(Soil Core Sampler)를 使用하여 50cm 깊이까지²²⁾, 100cm³의 시료를 採取하였고^{3,19)}, 傾斜 部位別로 4 反復을 實施하였다.

토양 시료는 調査地에서 實驗室로 운반하여 水分으로 飽和시켜 秤量한 후 건조기에서 105°C로 24時間 乾燥시킨 다음 토양시료의 무게를 測定하고〔1〕와〔2〕式으로 容積重과 孔隙率을 計算하였다.

$$\text{容積重} = \frac{\text{乾燥土壤의 무게}(g)}{\text{토양시료의 부피}(cm^3)} \dots\dots\dots [1]$$

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{\text{飽和土壤의 무게} - \text{乾燥土壤의 무게}}{\text{무게}} \dots\dots\dots [2]$$

(2) 生長量調査

本 調査地에서 各 傾斜 部位別로 調査木의 樹高 및 胸高直徑을 測定하였고, 調査木의 總物質生長量(Total biomass)과 葉, 가지, 樹幹, 樹皮, 뿌리部分의 生重量을 試驗地에서 測定하고, 實驗室로 운반하여 건조기를 使用하여 70°C로 48時間 乾燥시킨 다음 乾重量을 測定하였고, 根系 分布 範圍를 追跡하여 根系發達圖를 作成하였다.

結果 및 考察

1. 土 壤

本 調査地의 平均 傾斜度는 23°로서 各 傾斜 部位

를 따라 上部, 中部, 下部로 나누어 成土層의 깊이를 測定하였고 그 結果는 表 1 과 같다.

A層과 B層 및 成土層(solum)의 깊이는 傾斜 部位別로 뚜렷한 差異를 보이며, 各 層의 깊이는 共히 下部에서 가장 깊으며, 上部로 갈수록 얇아졌다.^{31, 35)}

Table 1. Depth of soil by position

Slope Position Horizon (cm)	Upper	Middle	Lower
A	18.8 ± 2.50	27.5 ± 2.89	40.0 ± 4.08
B	28.8 ± 2.50	36.3 ± 2.50	65.0 ± 10.00
Soil (A + B)	47.6 ± 2.88	63.8 ± 2.50	105.0 ± 13.54

Table 2. Bulk density and porosity by slope position and soil depth

Soil Depth (cm)	Upper		Middle		Lower	
	B. D.	Porosity	B. D.	Porosity	B. D.	Porosity
10	1.36	43.81	1.09	52.14	1.05	55.05
20	1.32	43.86	1.19	50.22	1.11	55.04
30	1.42	40.58	1.24	45.21	1.13	54.68
40	1.46	40.55	1.25	46.11	1.17	52.96
50	1.60	37.21	1.41	40.99	1.40	45.50
Average	1.43	41.20	1.24	46.93	1.17	52.65

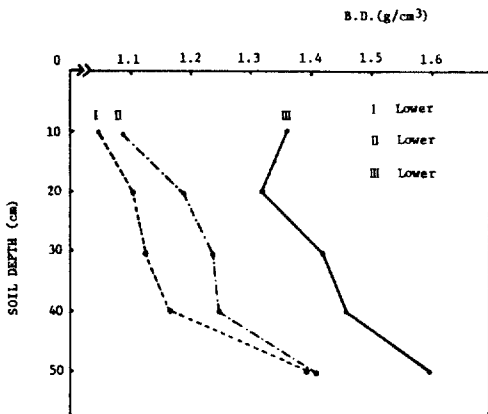


Fig. 1. Bulk density by slope position and soil depth

傾斜 部位別 上深別 容積重과 孔隙率의 測定 結果는 表 2 와 같다. 이를 容積重과 孔隙率로 各 各 나누어서 圖表 1과 圖表 2로 나타내었다. 一般의으로 森林土壤의 容積重은 有機物層의 경우 0.2g/cm³부터 砂土의 경우 1.98g/cm³까지 分布하며²⁹⁾, 壤土層은 1.1g/cm³에서 1.6g/cm³까지 分布하는데⁹⁾, 本 實驗地에서의 容積重의 範圍는 下部가 1.17 (1.05~1.40), 上部가 1.43 (1.36~1.60)이었으며, 孔隙率의 範圍는 下部에서 52.65% (55.04~45.50), 上部에서 41.20% (43.86~37.21)이었다.

表 2 에서 容積重과 孔隙率의 分散分析 結果는 傾斜 部位와 上深에 따라 有意性을 나타내었으며, 圖表 1과 圖表 2에서 보는 바와 같이 上深이 깊어짐에 따라 그리고 上部로 갈수록 容積重은 增加하였고

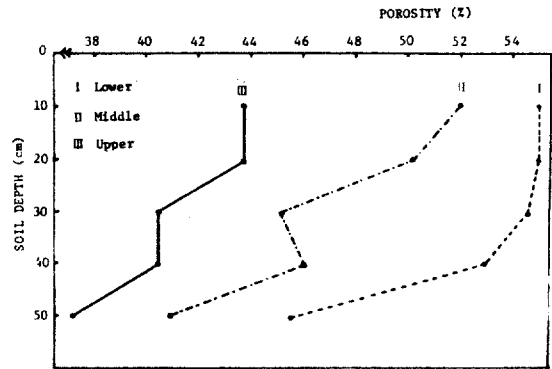


Fig. 2. Porosity by slope position and soil depth

孔隙率은 反대로 減少하였다.^{10, 13, 15, 33)}

2. 生長量

傾斜 部位別 樹高와 胸高直徑 및 總物質生長量의 測定 結果는 表 3 및 圖表 3과 같다.

傾斜 部位別로 樹高와 胸高直徑 및 總物質生長量은 共히 下部에서 上部로 갈수록 減少하였다. 總物質生長量 중 地上部 生長量과 地下部 生長量의 比率

Table 3. Tree height, DBH, and total biomass by slope position

Growth Slope Position	Tree Height (m)	DBH (cm)	Total Biomass (kg)
Upper	4.70 ± 0.26	3.45 ± 0.41	2.47 ± 1.75
Middle	5.58 ± 0.48	4.77 ± 0.26	4.70 ± 1.41
Lower	8.05 ± 0.29	6.84 ± 0.61	12.01 ± 0.54

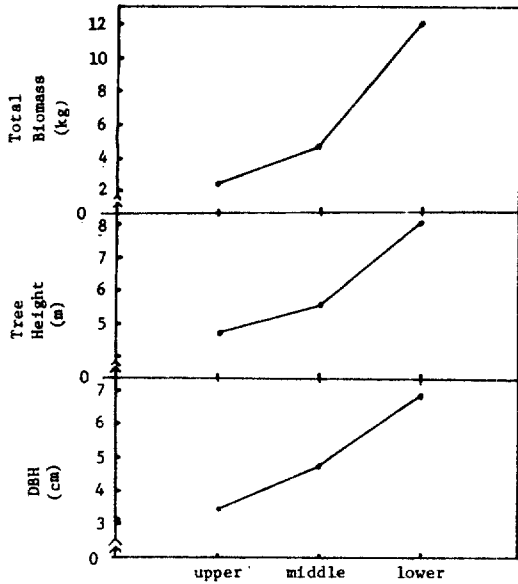


Fig. 3. Tree height, DBH, and total biomass by slope position

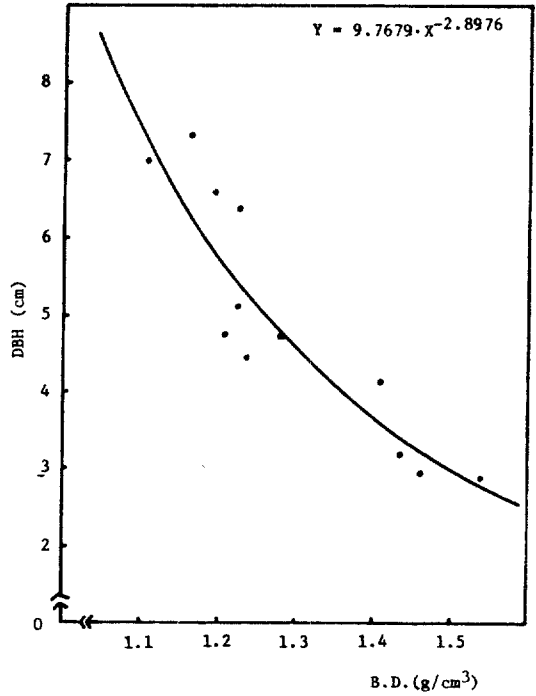


Fig. 5. DBH by bulk density

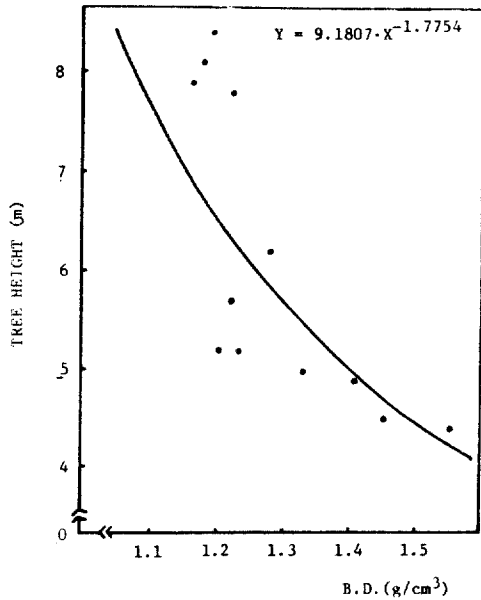


Fig. 4. Tree height by bulk density

(T : R ratio)은 上部에서 31%, 中部에서 28%, 下部에서 29%이었다.

容積重에 따른 樹高와 胸高直經 및 總物質生長量을 回歸曲線式 [3]에 의해 回歸分析을 하여 나타낸 結果는 圖表 4, 圖表 5, 圖表 6 과 같다.

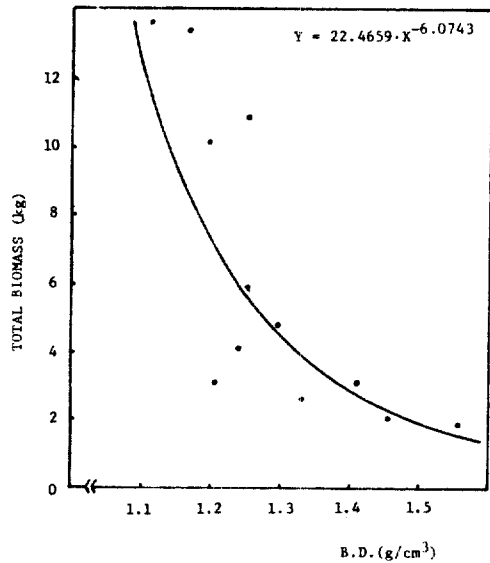


Fig. 6. Total biomass by bulk density

$$Y = a \cdot X^b \quad \dots\dots\dots [3]$$

Y : 生長量 (m, cm, kg)

X : Bulk Density (g/cm³)

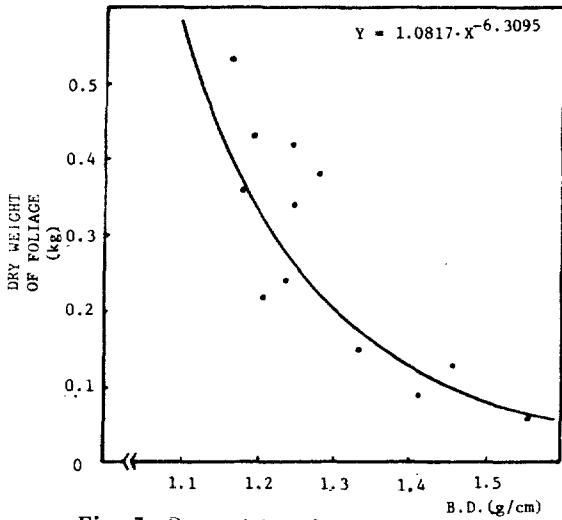


Fig. 7. Dry weight of foliage by bulk density

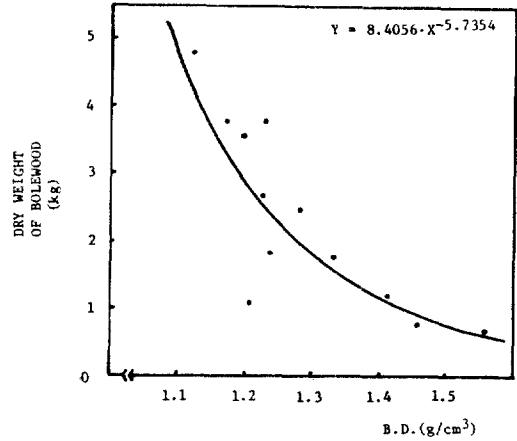


Fig. 9. Dry weight of bolewood by bulk density

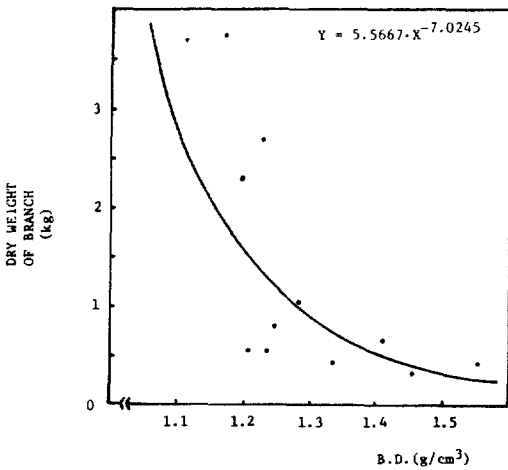


Fig. 8. Dry weight of branch by bulk density

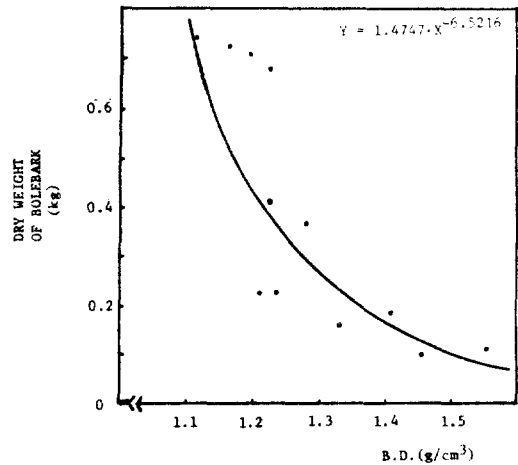


Fig. 10. Dry weight of bolebark by bulk density

a, b : 媒介變數 (parameters)

容積重과 各 生長量은 모두 負의 相關을 나타내고 있다. 즉 容積重이 增加할수록 樹高와 胸高直徑 및 總物質生長量은 減少하였다.

林木을 各 部分別(葉, 가지, 樹幹, 樹皮, 뿌리)로 나누어서 物質生長量을 測定하여 容積重과 生長量을 回歸分析式 (3)에 의해 回歸分析한 結果는 圖表 7 (葉), 圖表 8 (가지), 圖表 9 (樹幹), 圖表 10 (樹皮), 圖表 11 (뿌리)와 같다.

林木의 各 部分別 物質生長量과 容積重은 有意의 인 關係를 보이며, 모두 容積重이 增加함에 따라 物

質生長量은 減少하였다.^{13, 15, 37)}

3. 傾斜 部位別 根系發達圖

傾斜 部位別로 根系의 分布 範圍를 側根이 最大로 變換 部分까지 追跡하여 圖表 12에 나타내었다.

Armson(1979)¹⁾에 의하면 土壤內에서 根系를 測定하는 測定値는 1) 뿌리의 길이, 2) 뿌리의 표면積, 3) 뿌리의 부피, 4) 뿌리의 무게라고 提示하였다.

圖表 12에서 보는 바와 같이 은수원사시나무의 根系는 淺根性 樹種으로서^{25, 30)}, 特히 Bilan(1971)²⁾은 *Populus*의 根系形態를 淺根性 根系(sinker(flat)

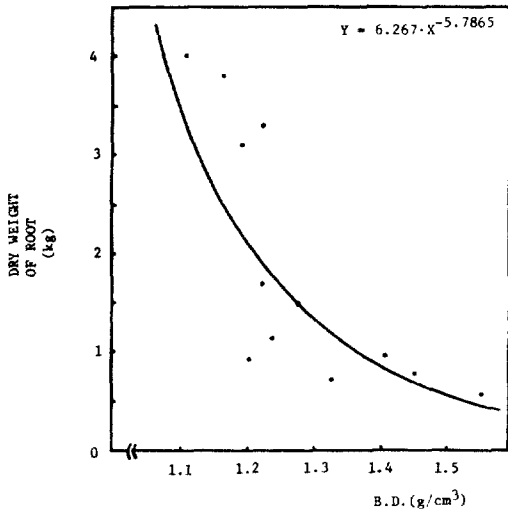


Fig. 11. Dry weight of book by bulk density

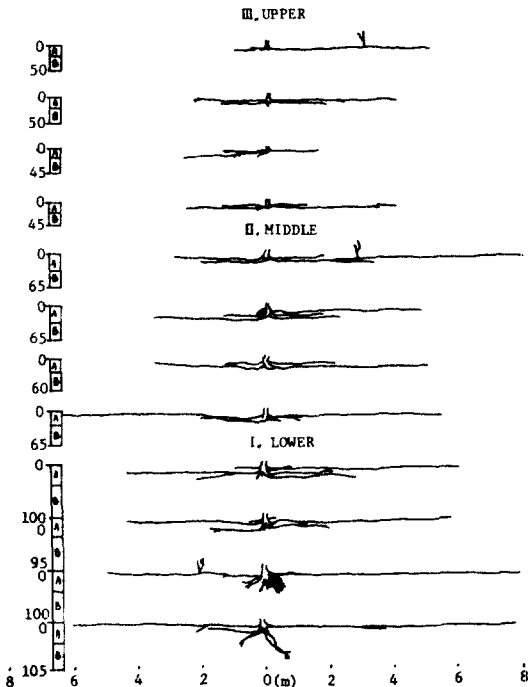


Fig. 12. Root systems by slope position

root system)라고 하였으며, 본 실험에서도 주로 A1층에 분포하였고 下部에서 上部로 갈수록 側根의 發達分布 範圍가 작아짐을 보여주고 있다.

結 論

本 調查地의 傾斜 部位別 土深別 土壤의 物理的 性質 중 容積重과 孔隙率이 은수원사시나무의 生長과 根系 發達에 미치는 影響을 分析한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 本 調查地의 容積重과 孔隙率은 傾斜 部位와 密接한 關係를 가지고 있으며, 容積重은 下部에서 平均 1.17 g/cm³ (1.05 ~ 1.40) 부터 上部에서 平均 1.43 g/cm³ (1.36 ~ 1.60)까지 分布하였고, 孔隙率은 下部에서 平均 52.65% (52.05 ~ 45.50) 부터 上部에서 平均 41.20% (43.81 ~ 37.21)까지 分布하였다.

2. 土深은 容積重 및 孔隙率과 有意인 差異를 보이며, 土深이 깊어질수록 容積重은 增加했고 孔隙率은 減少하였다.

3. 容積重은 樹高, 胸高直徑, 總物質生長量과 回歸分析 結果 負의 相關을 보이며, 高度의 有意性을 갖는다.

4. 林木의 各 部分別(葉, 가지, 樹幹, 樹皮, 뿌리) 物質生長量을 容積重과 回歸分析 結果 林木의 各 部分과도 有意인 關係를 가지며, 負의 相關을 나타내었다.

5. 은수원사시나무의 根系은 淺根性으로서 주로 A1層에 分布하고 있으며, 限界 容積重은 1.40 g/cm³ 이었다.

따라서 地形 및 土壤의 物理的인 性質(容積重과 孔隙率)은 은수원사시나무의 物質生長量과 根系 發達에 큰 影響을 미친다고 思料된다.

引用 文 獻

1. Allen, R. M. 1964. Contributions of roots, stem, and leaves to height growth of longleaf pine. *Forest Sci.* 10:14-16.
2. Armson, K. A. 1979. Roots and Soil. *In Forest Soils: properties and processes.* pp. 200-223.
3. Armson, K. A. 1979. Appendix 1. Procedures for soil profile description and sampling. *In Forest Soils: properties and processes.* pp. 332-338.
4. Aubertin, G. M. and L. T. Kardos, 1965. Root growth through porous media under controlled conditions: I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Sci. Soc. Proc.* 29:290-293.

5. Barley, K. P. 1963. Influence of soil strength on growth of roots. *Soil Sci.* 96:175-180.
6. Bilan, M. V. 1971. Some aspects of tree root distribution. In E. Hacskeylo (ed.) *Mycorrhizae*. pp. 69-80. USDA For. Serv. Misc. Pub. 1189.
7. Bertrand, A. R. and H. Kohnke. 1957. Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. *Soil Sci. Soc. Proc.* 21: 135-140.
8. Camp, C. R. and Z. F. Lund. 1964. Effect of soil compaction on cotton roots. *Crops and Soil.* 17:13-14.
9. 趙伯顯. 1969. 土壤의 物理性. 新稿土壤學. 鄉文社. pp. 136-167.
10. 曹熙科. 1982. 砂防工地上에 있어서 리기다소나무의 樹根의 分布에 미치는 土壤堅密度的 影響. 韓國林學會誌 56:66-76.
11. Crow, T. R. 1978. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stand. *Forest Sci.* 24:110-114.
12. Fernandez, O. A. and M. M. Caldwell. 1975. Phenology and dynamics of root growth of three cool semi-desert shrubs under field conditions. *J. Ecol.* 63:703-714.
13. Foil, R. R. and C. W. Ralson. 1967. The establishment and growth of loblolly pine seedlings on compacted soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 565-568.
14. Gill, W. R. and R. D. Miller. 1956. A method for study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. *Soil Sci. Soc. Proc.* 20: 154-157.
15. Heilman, P. 1981. Root penetration of Douglas-fir seedlings into compacted soil. *Forest Sci.* 27:660-666.
16. Hendrickson, A. H. and F. J. Veihmeyer. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65: 487-493.
17. Hodgkins, E. J. and N. G. Nichols. 1977. Extent of main lateral roots in natural long-leaf pine as related to position and age of the trees. *Forest Sci.* 23: 161-166.
18. Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. McGraw Hill Book Co.
19. 川口桂三郎. 1974. 土壤의 物理性. 土壤學. 朝倉書店. pp. 127-144.
20. Kaufman, C. M. 1968. Growth of horizontal roots, height, and diameter of planted slash pine. *Forest Sci.* 14: 265-274.
21. Kendell Snell, J. A. and J. K. Brown. 1978. Comparison of tree biomass estimator - DBH, sapwood. *Forest Sci.* 24:455-457.
22. Kozlowsky, T. T. 1971. Growth and development of trees. pp. 196-250.
23. Meredith, H. L. 1960. Effect of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. 53: 163-167.
24. Morrison, I. K. 1974. Dry-matter and element content of roots of several natural stands of *Pinus banksiana* Lamb. in Northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 4: 61-64.
25. 莉住晃. 1979. 根系型と各樹種の根系の特性. 樹木根系圖說. 誠文堂, 新光社. pp. 361-413.
26. 盧義來. 1982. Path analysis에 의한 *Populus alba* × *P. glandulosa* F₁ clone의 適地判定에 관한 研究. 林木育種研究所 研究報告 18:113-156.
27. Patt, P., D. Carmeli and I. Zafrir. 1966. Influence of soil physical conditions on root development and on productivity of citrus trees. *Soil Sci.* 102: 82-84.
28. Phillips, R. E. and D. Kirkham. 1962. Mechanical impedance and corn seedling root growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26: 319-322.
29. Pritchett, W. L. 1979. Forest soils and vegetation development. In *Properties and management of forest soils.* John Wiley and Sons. Inc pp. 10-25.
30. Pritchett, W. L. 1979. Soil and Root. In *Properties and management of forest soils.* John Wiley and Sons. Inc. pp. 156-172.
31. Spurr, S. H. and B. V. Barnes. 1980. Soils. In *Forest ecology.* John Wiley and Sons. Inc. pp. 191-210.
32. Taylor, H. M. and H. R. Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenc-

- ed by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil. Sci.* 96: 153-156.
33. Veihe, F. J. and A. H. Hendrickson. 1946. Soil density as a factor in determining the permanent wilting point. *Soil Sci.* 62:451-456.
34. Webster, D. H. 1978. Soil conditions associated with absence or sparse development of apple roots. *Can. J. Plant Sci.* 58:961-969.
35. Wilde, S. A. 1958. Genesis of forest soils. *In* Forest soils: their properties and relation to silviculture. The Ronald Press, Co. pp. 100-119.
36. Will, G. M. 1966. Root growth and dry-matter production in a high-producing stand of *Pinus radiata*. *N. Z. For. Service Res. Note* 44.
37. Zimmerman, R. P. and L. T. Kardos. 1961. Effect of bulk density on root growth. *Soil Sci.* 91: 280-288.