石灰添加が韓国安山工業団地内に植栽したチョウセンゴヨウに及ぼす影響

崔 東寿^{*1)}・戸田浩人¹⁾・李 忠和²⁾

1) 東京農工大学大学院農学研究院 Faculty of Agriculture, Tokyo Univ. of Agri. and Tech.

2) 韓国森林科学院 Korea Forest Research Institute

摘要：土壌酸性化により衰退現象が確認された韓国の安山工業団地内の森林土壌に石灰を添加し (0, 2.0, 3.0, 4.0 ton/ha), 森林土壌とチョウセンゴヨウの成長及び生理反応に及ぼす影響を調査した。石灰添加3年後, 石灰添加量の増加と共に土壌 pH は 4.0 から 4.9 付近まで有意に増加し, 土壌呼吸量も有意に増加した ($p < 0.05$)。土壌に添加した石灰量の増加と共に針葉中のリン濃度とクロロフィル (a+b) の含有量が有意に増加し, チョウセンゴヨウの光飽和時と CO_2 飽和時の光合成速度が高くなった。さらに, チョウセンゴヨウの成長パラメータである, 3年生針葉の残存率と3年生シュートの長さ根元直径は土壌に添加した石灰量の増加と共に有意な増加が認められた ($p < 0.05$)。チョウセンゴヨウの根と共生する外生菌根菌の感染率は土壌に添加した石灰量の増加と共に低下した。

キーワード：土壌酸性化, 土壌呼吸, 光合成速度, チョウセンゴヨウ, 外生菌根菌

CHOI, Dongsu · TODA, Hiroto and LEE, Choonghwa: Effects of lime addition on the *Pinus koraiensis* planted in the Ansan industrial complex in Korea.

Abstract: We investigated the effect of lime addition to soil (0, 2.0, 3.0, 4.0 ton/ha) on forest soil and the growth and physiological responses of *Pinus koraiensis* in Ansan industrial complex, South Korea. Three years later, lime addition can also significantly increase soil pH from 4.0 to 4.9, and the soil respiration rate ($p < 0.05$). Phosphorus and Chlorophyll (a+b) content in needles of *P. koraiensis* was significantly increased with increasing amounts of addition of lime to soil ($p < 0.05$). Moreover, the photosynthetic rate (A/Ci curve and light-photosynthesis curve) of *P. koraiensis* became higher with increasing amounts of addition of lime than that of control. In addition, the shoot length of 3 years old and survival rate of 3 years old needle and stem diameter increased significantly as more lime is added to soil ($p < 0.05$). However, the inoculation rate of ectomycorrhiza inoculated with *P. koraiensis* was decreased with increasing amounts of addition of lime to soil.

Key words: soil acidification, soil respiration, photosynthesis, *Pinus koraiensis*, ectomycorrhiza

1. はじめに

急速な経済発展のために東アジアの環境汚染は残念ながら深刻さを増している。韓国でもソウル市内のマツ林や沿岸地帯に設けられた工業地帯のマツ林は著しい衰退現象を呈し始めた^{5,7)}。韓国で大気汚染が社会問題視されはじめたのは大都市と工業団地ができた1960年代からである。1970年代, 重化学産業を中心とした経済発展計画で次々と産業・工業団地が造られ, 様々な場所で大気汚染や森林などの被害が報告された^{13,18,35)}。1978年ソウルとウルサン地域で酸性雨の観測を始め, 全国各地で酸性雨や土壌酸性化が報告されている^{27,37)}。

大気汚染物質や酸性降下物や土壌酸性化などの研究結果によると, 大気汚染物質の発生源が集中している大都市や工業団地地域だけではなく, 非汚染地域と認識されていた農村や

海岸および島々でも大気汚染物質や酸性雨の発生頻度が増加している¹⁵⁾。また, 偏西風の影響を受けている韓国は東アジア地域から出てくる大気汚染物質や黄砂の流入の増加で, 西海岸の大気環境が悪化している^{12,17)}。特に最近では, 韓国西海岸での降水中のアニオン含有量が高くなっていることが報告されている²⁶⁾。

酸性降下物による地表水と土壌の酸性化は, 森林成長の衰退, 植物病害の増加, 土壌からの有毒成分の溶脱など, 生態系に重大な影響を及ぼす。土壌と基盤岩石の酸緩衝能により降水は中和され, 土壌中の元素は溶脱され河川中へと流出する^{10,16,25,32)}。しかし, 韓国の森林土壌の大部分は花崗岩を母材としているため, 土壌の酸緩衝能が低く²³⁾, 韓国の森林は土壌酸性化に対して脆弱であることが予想される。現在, 土壌酸性化に耐性の低いアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 等には, 様々な場所で衰退現象が現れている。さら

図-1 調査地位置図

Fig. 1 Map of study site.

に比較的耐性があり、衰退が少なかったチョウセンゴヨウ (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) やリギダマツ (*Pinus rigida* Mill.) も西海岸の工業団地では衰退現象が確認され始めた⁵⁾。

したがって森林を将来に亘り健全に保つためには、酸性化の影響をできる限り早期に検出し衰退の進行を止める必要がある。そこで、チョウセンゴヨウの衰退が進んでいる韓国北西部の安山工業団地内の森林土壤に石灰を用いた中和処理を行い、土壤調査と植栽されたチョウセンゴヨウの成長に及ぼす影響を評価し、森林環境修復を進める基礎資料を提供するために本研究を行った。

2. 研究方法

2.1 調査地の概況

調査地は韓国北西部に位置する安山工業団地内の森林公園（京畿道安山市）(37.2°N, 127.1°E) で行った（図-1）。調査地である森林公園の土壤環境は花崗岩を母材とする褐色森林土で、年間平均降水量は 1,204 mm、樹木成長期（4 月～10 月）の平均気温は 19.2℃ である。調査地には約 20 年前に 3 年生のチョウセンゴヨウが 2,000 本/ha の密度で植栽された。安山工業団地の総面積は約 31 Km² で、1978 年造成の Ban-Woll 工業団地と 1986 年造成の Shi-Wha 産業団地で構成されている。ソウルから約 40 Km 内に位置し、最近の降水中のアニオン含有量が高い西海岸地域に位置する安山工業団地は約 2,300 個の食品、製紙、印刷、化学、衣服、機械などの工場が稼働している、首都圏最大の工業団地である。

2.2 石灰添加

2007 年 4 月にチョウセンゴヨウ針葉の変色と土壤の酸性化（土壌 pH(H₂O) = 4.0）が確認された調査地に石灰添加量による 4 つの処理区を設定した。植生などが代表的と思わ

れ、より斜面のなだらかな地点に 20×30 m の処理区を設置し、各処理区当りに石灰（CaO=56%；MgO=40%；その他=4%）を 0（対照区）、2.0, 3.0, 4.0 ton/ha になるように添加した。石灰添加量は実験開始前（2007 年 3 月）に作成した緩衝曲線を基準にした。土壌 pH(H₂O) を 1 上げる（4.0 から 5.0）際に必要な石灰添加量が 4.0 ton/ha だったので、それを基準に各処理区当りの石灰添加量を設定した。石灰添加 3 年後、土壌 pH、土壌呼吸、光合成速度、蒸散速度、針葉のクロロフィル濃度、外生菌根菌の感染率、針葉の残存率、成長などを測定した。

2.3 土壌 pH 及び土壌呼吸

2009 年 9 月中旬の晴天日に各処理区での土壌呼吸速度（土壌表面からの CO₂ 放出速度）を測定した。土壌呼吸速度の測定にはダイナミック・クローズド・チャンバー（dynamic closed-chamber : DC）法を用い、開放型携帯用光合成蒸散測定装置（LI-6400, Li-Cor, Nebraska, USA）に土壌呼吸チャンバー（LI-6400-09, Li-Cor, Nebraska, USA）を取りつけたものを使用し、各処理区ごとに 6 か所で測定した。また、土壌呼吸速度の測定と同時にリター直下の土壌温度、リターを除いた地表面から深さ 5 cm の土壌温度、深さ 10 cm の土壌水分をそれぞれ各処理区ごとに 6 か所で測定した。温度は LI-6400 付属の土壌温度計（Soil Temperature Probe; Type E, Li-Cor）を、土壌水分は TDR 土壌水分計（HydroSense-3, Campbell Scientific Inc. USA）を用いて測定した。

土壌呼吸速度測定終了後、各処理区ごとに 6 つの土壌サンプルを採集し、実験室に持ち帰ってろ紙上で風乾し、枝葉等をピンセットで取り除いた後、2 mm メッシュのふるいを通した。100 ml のビーカーに土壌 20 g に CO₂ 不含水 50 ml を加え、20 分に 1 回ずつよくかき混ぜながら 1 時間放置後、pH メーター（Mettler-Toledo, CH-8603, Switzerland）を用いて土壌 pH(H₂O) を求めた。

2.4 光合成速度及び成長特性

2009 年 9 月中旬の晴天日に各処理区に植栽されたチョウセンゴヨウから 6 個体を選定し、光合成速度の測定を行った。光合成速度の測定には開放系の同化箱法（LI-6400, Li-Cor, Nebraska, USA）を用いた。各個体とも高さ 1.5 m 前後の位置で日当たりの良い当年生針葉を選び、光（PAR）—光合成関係は大気条件（25℃、相対湿度 60～70%、二酸化炭素（CO₂）濃度 370 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹）とし、純光合成速度と葉内二酸化炭素の関係（A/Ci 曲線）は飽和光（>1500 μmol photons·m⁻²·s⁻¹、葉温 25℃）の条件下で行った。CO₂ は高濃度から低濃度へと変化させて測定した。測定時刻は午前 7 時～午前 11 時までの間とした。得られた測定データから以下の式を利用し、光—光合成曲線を作成した。

$$Pn = \frac{\phi I + P_{\max} - \sqrt{(\phi I + P_{\max})^2 - 4\theta\phi IP_{\max}}}{2\theta} - r_d$$

ここで、 Pn は純光合成速度、 ϕ は初期勾配、 I は光強度、 $P_{\max}$ は飽和点光条件下の最大光合成速度、 θ は曲線の凸度、 r_d は暗呼吸速度を示し、得られた光—光合成曲線から、最大光合成速度 ($P_{\max}$) を求めた。さらに、最大電子伝達速度 ($J_{\max}$)

は、純光合成速度と葉内 CO_2 濃度曲線から Farquhar らの個葉光合成モデルにより求めた⁹⁾。

各処理区ごとに光合成測定を行った 6 本のチョウセンゴヨウから針葉の寿命を表す針葉の残存率と成長を表すシュートの長さを測定した。3 年生針葉の残存率 (2007 年展開した針葉) は、残存針葉数/全葉痕跡数 $\times 100$ (%) とした⁵⁾。また、3 年生シュートの長さ (2007 年展開したシュート) をメジャーで実測した。測定終了後、各処理区当り 6 本の樹木の根元直径を測定した。

2.5 針葉中のクロロフィル及びリン濃度

光合成速度を測定した各個体から一部の針葉を実験室に持ち帰って DMSO (dimethylsulfoxide) によってクロロフィルの抽出を行い、分光光度計 (U-1800, 日立) にて測定した (各処理区ごとに 6 個体, 3 回繰り返し)^{2,33)}。クロロフィル Chl(a+b) は、 $\text{Chl(a+b)} = 7.49 \times A_{664.9} + 20.3 \times A_{648.2}$ にて計算した。ここで、下付の数字は吸収帯 (nm) で単位は ($\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$) である。残った針葉は 60°C で 1 週間乾燥させ粉碎した。針葉のリン濃度はマイクロウィーブ分解装置を行って (O・I analytical, USA) 湿式灰化した後に、分解液をプラズマ発光分析装置 ICP (Jarrel Ash, USA) を行いて分析した。

2.6 外生菌根菌の感染率

現地での測定終了後、各処理区から 3 本ずつを慎重に掘りとり、外生菌根菌感染率 (%) = (外生菌根菌に感染した根端の数/全根端の数) $\times 100$ (%) として計算した⁴⁾。

2.7 統計処理

測定した 3 年生針葉の残存率、3 年生シュートの長さ、根元直径、外生菌根菌の感染率、土壌呼吸量、土壌 pH (H_2O)、針葉中のリン濃度、針葉中のクロロフィル濃度のデータは石灰添加量別に分け (対照区, 2.0, 3.0, 4.0 ton/ha 処理区)、平均値と標準偏差を計算した。その後 Turkey の多重比較を用いて分析した。また、針葉中のリン濃度と最大電子伝達速度、針葉中のクロロフィル (a+b) と光—光合成曲線の初期勾配の関係は回帰分析を行った (SPSS 11.5.0, Chicago, IL, USA)。

3. 研究結果

3.1 土壌 pH 及び土壌呼吸

石灰添加 3 年後 (2009 年 9 月中旬) の土壌 pH (H_2O) と土壌呼吸量を図-2 に示す。石灰を添加していない対照区の土壌 pH は 4.0 付近で石灰の添加前に比べて変化していないが、石灰添加処理区の土壌 pH (H_2O) は有為に高くなった。特に、石灰添加量 4.0 ton/ha 処理区の土壌 pH (H_2O) は 4.9 付近まで高くなった。また、土壌表面から発生する二酸化炭素量 (土壌呼吸量) も土壌に添加する石灰量の増加と共に増加した。特に、対照区に比べて土壌に添加した石灰量が 3.0 ton/ha と 4.0 ton/ha 処理区の土壌呼吸量は有意に増加し、4.0 ton/ha 処理区の土壌呼吸量は対照区の 2 倍になった。また、土壌呼吸量と一緒に測定した土壌温度は各処理区別に差はなく 24°C 前後で安定だった (データ省略)。

図-2 石灰添加処理区における土壌呼吸量と土壌 pH (H_2O)。エラーバーは標準偏差。異なるアルファベットは有意差が認められたことを示す (Turkey's test, $p < 0.05$)。

Fig. 2 Soil respiration and soil pH in each lime treatment. The error bar shows the standard deviation. Different letters indicate significant difference (Turkey's test, $p < 0.05$)

3.2 A/Ci 曲線と針葉中のリン濃度

光飽和での光合成速度と葉内二酸化炭素濃度の関係 (A/Ci 曲線) を示す (図-3)。対照区のチョウセンゴヨウの初期勾配は小さく、 CO_2 飽和域の純光合成速度は $2.3 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で低かった。ところが、石灰添加量 2.0 ton/ha 処理区の CO_2 飽和域の純光合成速度は $4.5 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に上り、石灰添加量の増加と共に、初期勾配と CO_2 飽和域の純光合成速度が高い値を示した。特に、4.0 ton/ha 処理区の CO_2 飽和域の純光合成速度は $11.3 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に上り対照区より 5 倍程高くなった。

チョウセンゴヨウの 1 年葉から 3 年葉までの針葉中のリン濃度を図-4 に示す。チョウセンゴヨウの各葉齢の針葉中のリン含有量は、土壌に石灰を添加していない対照区に比べ石灰を添加した処理区で増加した (図-4)。1 年葉の針葉中のリン含有量は 4.0 ton/ha 処理区で対照区と比べ有意に増加した ($p < 0.05$)。また、2 年葉の針葉中のリン含有量は 3.0 ton/ha と 4.0 ton/ha 処理区で対照区と比べ有意に増加が見

図-3 石灰添加処理したチョウセンゴヨウの A/Ci 曲線

Fig. 3 The A/Ci curve of current year needles in each lime treatment for *P. koraiensis*

図-4 石灰添加処理したチョウセンゴヨウの針葉中のリン濃度
エラーバーは標準偏差。異なるアルファベットは有意差が認められたことを示す (Turkey's test, $p < 0.05$)。

Fig. 4 The P content in the needles in each lime treatment for *P. koraiensis*
The error bar shows the standard deviation. Different letters indicate significant difference (Turkey's test, $p < 0.05$)

られ、3年葉の針葉中のリン含有量は石灰を添加したすべての処理区で対照区と比べ有意な増加が示された ($p < 0.05$)。土壤に石灰を添加してない対照区の針葉中のリン含有量は葉齢とともに急激な低下が見られ、1年次の針葉中のリン含有量に比べ3年次の針葉中のリン含有量は1/3まで低下した。しかし、土壤に添加する石灰量の増加とともに針葉中のリン含有量の低下は緩和された。特に4.0 ton/ha処理区の針葉中のリン含有量は1年葉と3年葉で殆ど変化がなかった。さらに、チョウセンゴヨウ針葉中のリン濃度と最大電子伝達速度 (J_{max}) の間には強い相関関係が確認された ($r = 0.57$, $p < 0.01$) (図-7(a))。

3.3 光—光合成曲線と針葉中のクロロフィル含有量

図-5に光—光合成曲線を示す。対照区のチョウセンゴヨウの光飽和点は光合成有効放射 (PAR) が約 $600 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 付近で低かったが、土壤に添加した石灰量が増えると共に高くなり、4.0 ton/ha処理区では約 $1,500 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となった。そして初期勾配も土壤に添加し

図-5 石灰添加処理したチョウセンゴヨウの光—光合成曲線

Fig. 5 Photosynthetic light response curve of current year needles in each lime treatment for *P. koraiensis*

図-6 石灰添加処理したチョウセンゴヨウの針葉中のクロロフィル (a+b) 含有量
エラーバーは標準偏差。異なるアルファベットは有意差が認められたことを示す (Turkey's test, $p < 0.05$)。

Fig. 6 Concentration of Chlorophyll (a+b) in the needles in each lime treatment for *P. koraiensis*
The error bar shows the standard deviation. Different letters indicate significant difference (Turkey's test, $p < 0.05$)

た石灰量が増えると共に大きくなった。対照区の光飽和域の純光合成速度は $1.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で低かったが、石灰添加量が2.0 ton/ha処理区の光飽和の純光合成速度は $2.0 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 上がった。石灰の添加量が増えると共に、光飽和の純光合成速度が高くなり、4.0 ton/ha処理区では、 $6.3 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ まで上り対照区の約6倍になった。光を補足しエネルギーを伝達するクロロフィルの量と組成は植物の光合成能力と密接な関係がある。針葉中のクロロフィル含有量を図-6に示す。1年次の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は処理区間に有意差は見られなかったが、2年葉、3年葉の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は、石灰添加の処理区で対照区より多い傾向を示した。3年次の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は土壤に添加する石灰量の増加とともに増加し対照区に対して有意な差異が見られた ($p < 0.05$)。土壤に石灰を添加してない対照区の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は葉齢とともに急激に低下し、3年次の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FMまでに低下した。しかし、土壤に添加する石灰量の増加とともに針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) の低下は緩和され、4.0 ton/ha処理区の針葉中のクロロフィル含有量 (a+b) は1年葉と3年葉で殆ど変化がなかった。さらに、チョウセンゴヨウ針葉中のクロロフィル (a+b) と光—光合成曲線の初期勾配 (見かけの光量子収率) の間には強い相関関係が確認された ($r = 0.55$, $p < 0.01$) (図-7(b))。

3.4 針葉の残存率とシュートの長さ根元直径

チョウセンゴヨウの成長に関するパラメータとして3年生針葉の残存率と3年生シュートの長さ根元直径を表-1に示す。3年生針葉の残存率は対照区では約17%、2.0 ton/ha処理区では約21%、3.0 ton/ha処理区では約32%、そして4.0 ton/ha処理区では約54%と土壤に添加した石灰量の

図-7 針葉中のリン濃度と最大電子伝達速度 (J_{max}) (a), 針葉中のクロロフィル (a+b) と光—光合成曲線の初期勾配 (b) の関係

Fig. 7 Relationships between P content in the needles and electron transport rate (J_{max}) (a), and concentration of Chlorophyll (a+b) in the needles and the initial slope of photosynthetic light response curve (b)

増加と共に針葉の残存率は高くなった。さらに、2.0 ton/ha 処理区の針葉の残存率は対照区に対して有意な差異は認められなかったが、3.0 と 4.0 ton/ha 処理区の針葉の残存率は対照区に対して有意な増加が認められた ($p < 0.05$)。

チョウセンゴヨウの3年生シュートの長さは対照区に対して石灰を添加した処理区で長かった。特に、3.0 と 4.0 ton/ha 処理区の3年生シュートの長さは対照区に対して有意な増加が認められた ($p < 0.05$)。

さらに、チョウセンゴヨウの根元直径では石灰を添加したすべての処理区で対照区に対して有意に太いことが認められた ($p < 0.05$)。特に、3.0 と 4.0 ton/ha 処理区の根元直径は対照区に対してそれぞれ 1.4 倍と 1.7 倍の直径成長の増加が

確認された。

3.5 外生菌根菌の感染率

チョウセンゴヨウの根と共生する外生菌根菌の感染率は対照区と 2.0 ton/ha 処理区では 50% 弱であった。土壤に添加した石灰量が 3.0, 4.0 ton/ha と増えると感染率が低くなり、4.0 ton/ha 処理区では約 38% まで低くなった (表-1)。

4. 考 察

一般に石灰の添加は土壤 pH を増加させることが知られている^{10,30)}。本研究では、土壤に添加した石灰量の増大に伴い、酸性化した試験地の土壤 pH (H_2O) が 4.0 付近から 4.9 付近まで有意に上がった ($p < 0.05$)。また、土壤呼吸量も石灰添加と共に有意に増加することが分かった ($p < 0.05$) (図-2)。土壤呼吸量は土壤内の従属栄養微生物の活性 (有機物の分解速度) 及び根の活性と密接な関係を持ち、土壤温度や土壤内の水分条件にも影響を受ける^{10,22,25)}。また、土壤微生物による土壤呼吸量は土壤微生物の活性を示す指標だけではなく、土壤の生産性とも密接な関係がある²¹⁾。本研究では、石灰添加により土壤 pH (H_2O) が高くなり、土壤微生物の活性が高まり、有機物の分解速度を増加させたと考えられる^{3,8,11)}。さらに、植栽されているチョウセンゴヨウの根の活性や成長も高まり、全体として土壤呼吸量が増大したと考えられる。

欧米では石灰の添加が樹木の成長に及ぼす影響に関する研究が多く行われ、Popovic and Andersson (1984), Andréasson (1988), Nihlgård and Popovic (1984) の研究結果によるとヨーロッパ、各処理区間に有意な差は確認されなかった。

ロツパアカマツ (*Pinus sylvestris* L.) とヨーロッパトウヒ (*Picea abies* (L.) karst.) は石灰の添加により約 10% の成長低下が見られるなど、樹木の成長促進に及ぼす影響はほとんどないことが知られている。しかし、酸性化した土壤に石灰を添加した本研究では、土壤 pH の上昇と共に土壤微生物や樹木根の活性の増加、さらに土壤有機物の分解促進で、樹体内の栄養状況が改善されたと考えられる^{10,19)}。特に、石灰添加量の増加と共にチョウセンゴヨウ針葉中のリン濃度の有意な増加が確認された ($p < 0.05$)。チョウセンゴヨウ針葉中のリン濃度 (特に、無機リン酸 Pi) は ATP などの高エネルギー化合物の構成元素として、光エネルギーの固定や伝達にかかわるとともに、RuBP 再生能力と密接な関係を持ってい

表-1 石灰添加処理による3年生針葉の残存率、3年生シュートの長さ、根元直径および外生菌根菌の感染率

Table 1 Survivalship of needles at 3-years old, length of shoots at 3-years old, stem diameter and ectomycorrhizal inoculation ratio in each lime treatment

	対 照 区	処 理 区		
		2.0 ton/ha	3.0 ton/ha	4.0 ton/ha
3年生針葉の残存率 (%)	17.5 ± 8.3 a	20.7 ± 6.3 a	32.1 ± 2.1 b	54.2 ± 10.2 c
3年生シュートの長さ (cm)	18.5 ± 3.7 a	22.3 ± 3.1 a	29.8 ± 2.8 b	30.8 ± 5.5 b
根 元 直 径 (mm)	44.4 ± 2.2 a	52.3 ± 3.4 b	62.8 ± 3.1 c	76.7 ± 6.2 d
外生菌根菌の感染率 (%)	47.2 ± 7.9 a	48.5 ± 6.4 a	40.7 ± 5.0 a	37.7 ± 4.0 a

る^{20, 22, 36)}。本研究では、チョウセンゴヨウ針葉中のリン濃度と最大電子伝達速度 (J_{max}) の間には強い相関関係が確認された ($r=0.57$, $p<0.01$) (図-7(a))。石灰添加処理区ではチョウセンゴヨウ針葉中のリン濃度の増加と共に、RuBP 再生能力の増加あるいは光合成産物の転流の阻害が緩和されたと推察される。すなわち、この現象は CO_2 飽和領域での葉緑体内のデンプン合成や細胞質でのショ糖合成に伴う無機リン酸の再生産と、葉緑体内でのその無機リン酸の再利用速度などが促進されたことを意味しており、その結果、石灰添加処理区のチョウセンゴヨウの成長が増加したと考えられる。また、石灰添加処理により A/Ci 曲線でカルボキシレーション (炭素固定) 効率を示す初期勾配の増加及び最大光合成速度の増加がみられた (図-3)。このことは低 CO_2 分圧下での葉内 CO_2 拡散と Rubisco 酵素の CO_2 固定能力の増加として成長増加に直結すると考えられる²⁾ (表-1)。

また、石灰添加量の増加と共にチョウセンゴヨウの最大光合成速度が増加した (図-5)。これに加えクロロフィル (a+b) の含有量が石灰添加処理区では対照区に対して増加した。さらに、チョウセンゴヨウ針葉中のクロロフィル (a+b) と光-光合成曲線の初期勾配 (見かけの光子収率) の間には強い相関関係が確認された ($r=0.55$, $p<0.01$) (図-7(b))。

対照区のクロロフィル (a+b) の含有量は葉齢と共に低下して集光運搬能力が低下したが、石灰添加量を増やすと徐々に緩和され 4.0 ton/ha 処理区では 1 年目針葉内のクロロフィル (a+b) の含有量と殆ど変らなかった。石灰添加量の増加はチョウセンゴヨウの光飽和時と CO_2 飽和時の光合成速度を増加させ、針葉の寿命とシュートの長さを長くしたと考えられる。さらに、根元直径を増加させたことから、石灰添加処理区は対照区に比べて光合成速度の増大が成長の増加として顕著に現れたと考えられる。

酸性化した土壌からは Ca, Mg, K, P などの必須栄養元素の溶出が増加する^{10, 25, 31)}。さらに、リンは溶脱した Al と結合して不可給態となり、リンの吸収が不十分で樹木の栄養バランスを崩し、光合作用など樹木生理活動が抑制され成長に悪影響を及ぼす^{10, 32)}。一方、樹木の根に外生菌根菌が感染すると、樹木は土壌内の養分 (特にリン) と水分の吸収能力が向上し、樹木の生理活性や成長などに好影響を及ぼす^{20, 29, 34)}。殆どの樹木と共生する外生菌根菌はその菌系成長および感染ポテンシャルに最適 pH が存在する³³⁾ ことが明らかにされており強い酸性や環境ストレスや重金属などに耐性を持つ菌の存在も明らかになっている^{6, 14, 24)}。本研究では酸性化した土壌に石灰を添加すると、有意ではないものの外生菌根菌の感染率が低下した ($p>0.05$) (表-1)。酸性化した土壌への石灰添加による土壌 pH の上昇とそれに伴う土壌微生物活性の増加および土壌有機物の分解促進など、土壌条件の改善が外生菌根菌の形成および宿主としてのチョウセンゴヨウとの共生に影響を及ぼしていると考えられる。

このように酸性化した土壌条件下でチョウセンゴヨウを健全に育成するために石灰を添加したが、土壌 pH の上昇は樹木共生菌である外生菌根菌の発達を抑制させる可能性が示唆

された。今後、外生菌根菌の活性度を調査し、外生菌根菌の種類に適した土壌 pH や外生菌根菌の活性を高める方法を研究する必要がある。

謝辞: 本研究を実施するに当たり、現地の調査にご協力いただいた韓国森林科学院と KyungHee 大学の皆さまにお礼申し上げます。また、化学分析等でご協力をいただいた東京農工大学の初山健太路氏と井田悠一郎氏に感謝します。なお、本研究の一部は、若手研究者の自立的な研究環境整備促進プログラムによって行いました。

引用文献

- 1) Andréason, O. (1988) Suiting forest management to a changed environment. In: *Forest health and productivity, the Marcus Wallenberg Foundation symposia proceedings* #5, pp. 67-75, Falun, Sweden.
- 2) Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S., and Davison, A.W. (1992) A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environ Exp Bot* 32: 83-100.
- 3) Bauhus, J., Vor, T., Bartsch, N. and Cowling, A. (2004) The effects of gaps and liming on forest floor decomposition and soil C and N dynamics in a *Fagus sylvatica* forest. *Can. J. For. Res.* 34: 509-518.
- 4) Choi, D.S., Quoreshi, A.M., Maruyama, Y., Jin, H.O., and Koike, T. (2005) Effect of ectomycorrhizal infection on growth and photosynthetic characteristics of *Pinus densiflora* seedlings grown under elevated CO_2 concentration. *Photosynthetica* 43: 223-229.
- 5) Choi, D.S., Kayama, M., Jin, H.O., Lee, C.H., Izuta, T. and Koike, T. (2006) Growth and photosynthetic responses of two pine species (*Pinus koraiensis* and *Pinus rigida*) in a polluted industrial region in Korea. *Environmental Pollution* 139: 421-432.
- 6) Choi, D.S., Jin, H.O., Chung, D.J., Sasa, K. and Koike, T. (2008) Growth and physiological activity in *Larix kaempferi* seedlings inoculated with ectomycorrhizae as affected by soil acidification. *Trees—Structure and Function* 22: 729-735.
- 7) 崔 東寿・戸田浩人 (2008) 韓国における大気汚染とマツ類への影響, 大気環境学会誌 43: 307-314.
- 8) Condron, L.M., Tiessen, H., Trasarcepeda, C., Moir, J.O., and Stewart, J.W.B. (1993) Effects of liming on organic-matter decomposition and phosphorus extractability in an acid humic ranker soil from northwest Spain. *Biol. Fert. Soils* 15: 279-284.
- 9) Farquhar, G.D., S. von Caemmerer, and J.A. Berry. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C 3 species. *Planta* 149: 78-90.
- 10) Fisher, R.F. and Binkley D. (2000) *Ecology and management of forest soils*. 3rd ed. 350 pp. John Wiley & Sons, New York.
- 11) Geissen, B. and Brummer, G.W. (1999) Decomposition rates and feeding activities of soil fauna in deciduous forest soils in relation to soil chemical parameters following liming and fertilization. *Biol. Fert. Soils* 29: 335-342.
- 12) Han, J.S., Kim, Y.M., Ahn, J.Y., Kong, B.J., Choi, J.S., Lee,

- S.U. and Lee, S.J. (2006 a) Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutant flux during 1997–2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 22: 99–106 (In Korean with English Summary).
- 13) Han, J.S., Lee, M.D., Lim, Y.J., Lee, S.U., Kim, Y.M., Kong, B.J., An, J.Y. and Hong, Y.D. (2006 b) Study on the distribution of VOCs, Aldehydes, PAHS concentration in Seoul metropolitan area. *Journal of Korean Society for Atmospheric environment* 22: 574–589 (In Korean with English Summary).
 - 14) Hung, L.L. and Trappe, J.M. (1983) Growth variation between and within species of ectomycorrhizal fungi in response to pH *in vitro*. *Mycologia* 75: 234–241.
 - 15) Kang, C.H., S.B. Hong, W.H. Kim, H.J. Ko, S.B. Lee, J.M.S. (2006) Study on acidification and neutralization characteristics of precipitation in JejuCity between 1997 and 2005. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 22: 487–498 (In Korean with English summary).
 - 16) 片岡正光・竹内浩士 (2001) 酸性雨と大気汚染—地球環境サイエンスシリーズ 4, 109 pp., 三共出版, 東京.
 - 17) Kim, B.G., J.S. Han, S.U. Park, 2000, Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea, *Atmospheric Environment*, 35, 727–737.
 - 18) Kim, J.S. and Lee, K.Y. (1996) Effects of air pollution on the forest vegetation structure in the vicinity of sasang industrial complex in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 85: 1–14 (In Korean with English summary).
 - 19) Kreutzer, K. (1995) Effects of forest liming on soil process. *Plant and soil* 168/169: 447–470
 - 20) Lambers, H., Chapin F.S. III, Pons T.L. (2008) *Plant Physiological Ecology*, 2nd ed. 604 pp. Springer, New York.
 - 21) Lansberg, J.J. and Gower, S.T. (1997) *Application of physiological ecology to forest management*. 354 pp. Academic Press. New York.
 - 22) Larcher, W. (2003) *Physiological Plant Ecology*, 4th ed. 506 pp. Springer-Verlag, New York.
 - 23) Lee, S.W. and Park, G.S. (2001) Experimental assessment of forest soil sensitivity to acidification—Application of prediction models for acid neutralization responses. *Journal of Korean Forest Society* 90: 133–138.
 - 24) LoBuglio, K.F. (1999) *Cenococcum*. In: *Ectomycorrhizal Fungi; Key Genera in Profile*. (eds. Cairney, J.W.G. and Chambers, S.M.) pp. 287–309. Springer-Verlag, Berlin.
 - 25) 松中照夫 (2006) *土壌学の基礎*, 農文協, 389 pp., 東京.
 - 26) Ministry of Environment (2009) Annual report of ambient air quality in Korea 2008, National Institute of Environmental Research, 414 pp., Seoul, Korea.
 - 27) Mun, H.T., Phy, J.H. and Kim, J.H. (1998) Chemical properties of soils in the vicinity of Yochon industrial complex. *The Korean Journal of Ecology* 21: 1–6 (In Korean with English summary).
 - 28) Nihlgård, B. and Popovic, B. (1984) *Effekter av olika kalkningsmedel i skogsmark—en literature versikt*. Statens Naturvårdsverk PM 1851, Solna, Sweden.
 - 29) 西尾道徳 (2003) *土壌微生物の基礎知識*, 農文協, 206 pp., 東京.
 - 30) Nohrstedt H. -Ö. (2002) Effects of liming and fertilization (N, PK) on chemistry and nitrogen turnover in acidic forest soils in SW Sweden. *Water air and soil pollution* 139: 343–354.
 - 31) Popovic, B. and Andersson, F. (1984) *Markkalkning och skogsproduktion—literature versikt och revision av svenska kalkningsförsök*. Statens Naturvårdsverk PM 1792, Solna, Sweden.
 - 32) 佐竹研一編 (2002) *酸性環境の生態学—酸汚染と自然生態系を科学する*, 愛智出版, 243 pp., 東京.
 - 33) Shinano, T., Lei T.T., Kawamukai, T., Inoue, M.T., Koike, T., and Tadano, T. (1996) Dimethylsulfoxide method for the extraction of chlorophylls a and b from the leaves of wheat, field bean, dwarf bamboo, and oak. *Photosynthetica* 32: 409–415.
 - 34) Smith, S.E. and Read, D.J. (2008) *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd ed. 787 pp. Academic Press, New York.
 - 35) Woo, S.Y., Lee, S.H. and Lee, D.S. (2004) Air pollution effects on the photosynthesis and chlorophyll contents of street trees in Seoul. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 6: 24–29 (In Korean with English summary).
 - 36) Yanai, R.D. (1992) Phosphorus budget of a 70-year-old northern hardwood forest. *Biogeochemistry* 17: 1–22.
 - 37) Yu, J.H., Ka, K.H. and Park, H. (1995) Air pollution effects on soil chemical properties, lichens, denitrifying and sulfur reducing bacteria around the yeochun industrial estate. *Journal of Korean Forest Society* 84: 178–185 (In Korean with English summary).

(2010. 11. 10 受理)