

# 落葉의 蓄積, 分解 및 無機化에 관한 모델定立과 그 適用

張楠基 · 李性圭\* · 李福善\*\* · 金姬伯

(서울大學校 師範大學 生物教育科,

\* 尙志大學, \*\* 公州教育大學)

## The Litter Accumulation, Decay and Turnover Models and their Validation

Chang, Nam-Kee, Sung-Kyu Lee,\* Bok-Seon Lee\*\* and Heu Baik Kim

(Dept. of Biology Education, Seoul National University,

\* Sangji College, \*\* Kongju Teachers' College)

### ABSTRACT

Mathematical models of the litter accumulation, decay and turnover in the grassland and forest ecosystems of the equilibrium state of the annual litter production were established to analyse the decay rates of organic and inorganic constituents of the litter.

Those models were validated by an application to a *Phragmites longivalvis* grassland in a delta of the River Nakdong. The decay constants of cold-water-soluble fractions, other carbohydrates, hot-water-soluble fractions, cellulose, crude fat, lignin and crude protein in the litter were 0.730, 0.583, 0.555, 0.505, 0.479, 0.331 and 0.310 respectively. The amount of mineral nutrients such as N, P, K, Ca and Mg returned annually to the soil were estimated to 7.09, 1.34, 2.36, 4.37 and 0.79 g/m<sup>2</sup> respectively.

### 緒 論

식물생태계내에서 생산되는 낙엽의 축적과 분해는 식물의 물질 생산력과 토양조건에 대한 개선향에 큰 영향을 끼치고 있다. Ovington and Heitkamp(1960)에 의하면 삼림생태계에 있어서 입상에 축적된 유기물의 대부분은 그 삼림을 구성하고 있는 수목의 낙엽이라고 하였다. 식물군락에서 낙엽의 생산은 그 군락을 구성하고 있는 식물에 의존되나 이입된 낙엽의 축적은 바람, 수분, 지세, 지형, 분해자, 인간 등 주위환경의 영향을 받아 낙엽의 이출동태가 변화하여 이차적으로 이루어진다고 생각된다.

그러므로 식물생태계에 있어서 에너지의 흐름과 물질순환을 연구하기 위해 낙엽의 생산에 따른 유기탄소의 분해와 축적에 관한 수학적 모델을 만들지 않으면 안된다. 그렇지 않으면 낙엽의 분해와 축적을 연구하는데 많은 노력과 시간이 소요될 뿐만 아니라 그 분해양상을 전체적으로 이해하기 어렵다. 일찌기 Jenny *et al.* (1949)은 최초로 낙엽의 분해모델을 정립하였으며, Olson(1963)은 낙엽의 생산과 분해의 이입이출이 같은 식물군락에서 낙엽의 축적을 수학적으로 정량화하고 분해상수를 결정하는 방법을 제시하는 획기적인 연구를 하였다.

식물군락에서 생산되는 낙엽의 유기성분별 분해모델과 유기태 무기원소의 무기화(turnover)에 관한 모델은 Chang에 의하여 주도된 연구로 Oohara *et al.* (1971a, b, c, d, e, f), Kim and Chang(1975), Chang and Oh(1977) 등의 연구가 있다.

본 연구에서는 낙엽의 유기물을 비롯하여 낙엽의 유기성분, 유기태 필수 무기원소 및 유기태 미량원소의 분해와 무기화 모델을 재정립하고 낙동강 하구의 갈대초지를 대상으로 하여 이 분해와 무기화 모델을 적용하여 연구 검토하였다.

## 材料 및 方法

### 연구지역

본연구는 경남 김해의 낙동강 하구에 발달한 갈대초지로 북위 35°06', 동경 128°57'에 위치한다. 이 지역의 연평균기온은 12.8°C로서 갈대의 생육기인 4월부터 10월 사이에는 12°C ~17°C 이다. 강우량은 9월이 404 mm 이며 연강우량은 1,300~1,800 mm 이나 6월부터 9월 초순에 집중되어 있다.

### 순갈대초지

낙동강하구는 일반적으로 장마시에 범람하기 때문에 유기물의 이입과 이출의 변동이 우점종인 갈대(*Phragmites longivalvis*)의 낙엽에만 의존된다고는 볼 수 없다. 그러므로 해마다 이입되는 낙엽생산량이 일정하고 장마시 범람의 영향을 받지 않는 지소를 택하여 조사하였다.

### 조사시기

본 연구는 1977년 10월 28일에 시작하여 1979, 1981, 1983, 1985, 1986년 꼭 같은 일자에 같은 장소에서 낙엽의 생산량을 조사하였다. 다만 유기물을 구성하고 있는 유기성분과 무기원소의 분석재료는 1985년에 채취한 것을 사용하였다.

### 낙엽의 생산량, 유기성분 및 무기성분분석

낙엽의 생산량, 유기성분 및 무기성분 조사는 Oohara *et al.* (1971a, b, c, d, e, f, 1972)의 방법에 따라 실시하였다.

## 落葉의 蓄積·分解 및 無機化 모델

### 초지와 삼림생태계에 있어서의 유기물 분해계

초지와 삼림생태계에 있어서 낙엽의 생산은 식물군락을 구성하고 있는 식물의 종에 의존된다. 초지와 삼림의 입장에서 분해 및 무기화되며 축적되는 낙엽의 유기탄소량(C)은 Jenny *et al.* (1949)의 이론을 발달시켜 정립한 Chang and Yoshida(1973)의 수학 모델에 의하면 그 초지와 삼림의 기후( $cl$ ), 토양( $s$ ), 지세( $r$ ), 생물( $o$ ) 및 시간( $t$ )과 함수관계에 있다.

$$C=f(cl, s, r, o, t) \dots \dots \dots (1)$$

Chang and Yoshida (1973)는 (1)식으로부터 다음과 같은 편미분방정식을 유도하였다.

$$dC = \frac{\partial C}{\partial cl} dcl + \frac{\partial C}{\partial s} ds + \frac{\partial C}{\partial r} dr + \frac{\partial C}{\partial o} do + \frac{\partial C}{\partial t} dt \dots \dots \dots (2-1)$$

일반적으로 표시하면

$$dC = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C}{\partial x_i} \partial x_i \dots\dots\dots(2-2)$$

(2-2)식에서  $x$ 는 제한요인을 말하며  $n$ 은 환경요인의 총가지수를 나타내고  $i$ 는 각 환경요인을 표시한다.

(2-1)과 (2-2) 식의 해를 구하기 위해 조사초지와 삼림을 무한히 작은 지점에 수렴시키고 시간을 연단위로 고려하면 기후, 토양, 지세 및 생물의 조건은 일정한 상수치로 극한하게 된다. 그러므로

$$dC = \frac{\partial C}{\partial t} dt \dots\dots\dots(3)$$

식물군락의 낙엽의 연간생산량이 일정하게 임상에 이입할 때 임상에 낙엽이 축적되는 속도는 낙엽의 연간 이입 유기탄소량을  $L$ 이라고 하면

$$\frac{dC}{dt} = L - kC \dots\dots\dots(4)$$

(4)식에서  $k$ 는 낙엽의 분해 상수이다. (4)식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$C = \frac{L}{k}(1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots(5)$$

연 이입없이 낙엽이 임상에 떨어져 축적된 낙엽의 유기탄소가 분해할 때의 식은 (4)식에서  $L$ 이 소거된 경우 이므로

$$\frac{dC}{dt} = -kC \dots\dots\dots(6)$$

(6) 식의 해를 구하면 낙엽의 분해식이 된다.

$$C = C_0 e^{-kt} \dots\dots\dots(7)$$

(7) 식에서  $C$ 는 시간  $t$ 일때의 낙엽의 유기물의 유기탄소량이고  $C_0$ 는 최초( $t_0$ )의 낙엽의 유기탄소량을 나타낸다. 그러므로 낙엽이 50%, 95% 및 99% 분해하는데 소요되는 시간은  $0.693/k$ ,  $3/k$  및  $5/k$ 로 추정할 수 있다.

초지와 삼림생태계에 있어서 기후, 토양, 지세 및 생물요인이 낙엽분해에 미치는 영향을 조사할 때에도 (3)~(7)식에서 같이 연구하고자 하는 요인을 제한요인화하기 위해 다른 모든 요인을 통제해야 한다. 시간을 통제할 때는 제한요인에 대한 유기탄소의 분해율로 조사하면 된다.

**환경요인에 따른 낙엽의 분해 모델**

기후조건을 낙엽의 유기탄소의 분해요인으로 생각하면

$$\frac{dC}{dcl} = -k_1 C \dots\dots\dots(8)$$

(8)식에서  $k_1$ 은 기후조건이 낙엽의 분해요인으로 작용하였을 때의 분해 상수이다.

따라서

$$C = C_0 e^{-k_1 cl} \dots\dots\dots(9)$$

실제로 (8)식에서  $C$ 는 기온, 강수량, 공중습도등의 기후요인 중에서 어느 하나만을 제한요인으로 생각하고 일정기간 동안의 유기물의 분해량임을 나타낸다.

꼭 같은 방법으로 토양의 요인을 낙엽의 분해의 제한요인으로 생각하였을 경우에는

$$\frac{dC}{ds} = -k_2 C \dots\dots\dots(10)$$

(10)식에서  $k_2$ 는 토양조건이 낙엽의 분해요인으로 작용하였을 때의 분해상수이다.

그러므로

$$C = C_0 e^{-k_2 s} \dots\dots\dots(11)$$

따라서 지세를 제한요인으로 생각하였을 경우에는

$$\frac{dC}{dr} = -k_3 C \dots\dots\dots(12)$$

(12)식에서  $k_3$ 는 지세조건이 낙엽의 분해요인으로 작용하였을때의 분해 상수이다.

그러므로

$$C = C_0 e^{-k_3 r} \dots\dots\dots(13)$$

낙엽의 분해자를 제한요인으로 생각하였을 경우에는

$$\frac{dC}{do} = -k_4 o \dots\dots\dots(14)$$

(14)식에서  $k_4$ 는 생물요인인 분해자가 낙엽의 분해요인으로 작용하였을 때의 분해상수이다.

그러므로

$$C = C_0 e^{-k_4 o} \dots\dots\dots(15)$$

이상의 수학적 모델을 이용하면 낙엽의 분해에 필요한 제한경요인의 영향을 정량적으로 조사하고 예견할 수 있다.

**낙엽의 유기성분의 분해모델**

낙엽을 구성하고 있는 물질은 조단백질(P), 조지방(F), 섬유(Ce), lignin(Li), 기타 탄수화물(H) 및 조회분(A)으로 대별하여 생각할 수 있다. 낙엽이 임상에서 분해자에 의해 분해될 때에는 각 구성성분에 따라 선택적으로 분해되는 것이 일반적이다. 그러므로

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= \frac{d}{dt} (P + F + Ce + Li + H + A) \\ &= \frac{dP}{dt} + \frac{dF}{dt} + \frac{dCe}{dt} + \frac{dLi}{dt} + \frac{dH}{dt} + \frac{dA}{dt} \dots\dots\dots(16-1) \end{aligned}$$

낙엽의 유기구성성분의 분해를 일반적으로 표시하면

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \frac{dy_i}{dt} \dots\dots\dots(16-2)$$

(16-2) 식에서  $y_i$ 는 낙엽의 제유기물의 종류를 말하며  $n$ 는 유기물의 총가지수이고  $i$ 는 각 유기물을 표시한다.

(16-1)식을 풀면

$$kC = k_p P + k_f F + k_{ce} Ce + k_{li} Li + k_h H + k_a A \dots\dots\dots(17-1)$$

일반적으로 표시하면

$$\frac{dC}{dt} = kC = \sum_{i=1}^n k_i y_i \dots\dots\dots(17-2)$$

(17-2)식에서  $k$ 는 낙엽의 제유기물의 분해상수를 가리킨다.

(17-1)과 (17-2)식에서  $k_p, k_f, k_{ce}, k_{li}, k_h$  및  $k_a$ 는 낙엽의 유기물을 구성하고 있는 각 유기성분의 분해상수이다. (17)식으로부터  $t$ 시간 때의 낙엽의 성분별 분해양상을 식으로

표시하면 다음과 같다.

$$C_0 e^{-kt} = P_0 e^{-k_p t} + F_0 e^{-k_f t} + C_{e0} e^{-k_{ce} t} + L_{i0} e^{-k_{ii} t} + H_0 e^{-k_h t} + A_0 e^{-k_a t} \dots\dots\dots(18-1)$$

(18-1)식에서  $P_0, F_0, C_{e0}, L_{i0}, H_0,$  및  $A_0$ 은 낙엽의 유기성분의 최초의 시간  $t_0$  때의 함량이다.

$$C = C_0 e^{-kt} = \sum_{i=1}^n y_{0i} e^{-k_i t} \dots\dots\dots(18-2)$$

(18-2) 식에서  $y_0$ 는 시간  $t_0$  때의 낙엽의 유기성분의 함량을 나타낸다.

또한 낙엽의 구성성분별로 임상에 축적되는 유기성분별 축적량은

$$\begin{aligned} L/k(1-e^{-kt}) &= L_p/k_p(1-e^{-k_p t}) + L_f/k_f(1-e^{-k_f t}) + L_{ce}/k_{ce}(1-e^{-k_{ce} t}) \\ &+ L_{ii}/k_{ii}(1-e^{-k_{ii} t}) + L_h/k_h(1-e^{-k_h t}) + L_a/k_a(1-e^{-k_a t}) \dots\dots\dots(19-1) \end{aligned}$$

일반적으로 표시하면

$$C = \frac{L}{k} (1-e^{-kt}) = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{k_i} (1-e^{-k_i t}) \dots\dots\dots(19-2)$$

(19-2)식에서  $y_i$ 은 낙엽에 함유되어 있는 유기성분이다.

**낙엽의 무기성분의 무기화 모델**

낙엽의 무기성분에는 C, H, O, N, S을 제외한 P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, B, Zn, Cu, Cl, Na 등이 있으며 이들은 식물의 무기양분으로 C, H, O, N, S, P, Ca, K, Mg, Fe는 필수 10원소이고 Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo는 미량원소로 중요시되고 있다.

그러므로 N, S, P, Ca, K, Mg, Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl의 13원소는 무기토양으로부터 직접 또는 간접으로 얻는 것으로 필수광물원소( $m$ )이라고 한다. 실제로 N은 공중질소에 근원을 두고 있는 것으로 광물원소는 아니나 N를 포함하여 이상의 13원소는 식물의 필수영양원소로 함께 취급하는 것이 일반적이다.

이 필수광물원소는 유기물에 포함되어 있으므로 낙엽의 유기물이 분해하면 이에 비례하여 무기화한다는 것을 고려하면

$$\frac{dC}{dt} \propto \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots(20)$$

따라서

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= \alpha \frac{dm}{dt} = \alpha \frac{d}{dt} (N+S+P+Ca+K+Mg+Fe+Mn+B+Zn+Cu+Mo+Cl) \\ &\dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

(21)식에서  $\alpha$ 는 비례상수이며 이식을 정리하면

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} (N+S+P+Ca+K+Mg+Fe+Mn+B+Zn+Cu+Mo+Cl) \dots\dots\dots(22-1)$$

일반적으로 표시하면

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n Z_i = \sum_{i=1}^n \frac{dZ_i}{dt} \dots\dots\dots(22-2)$$

(22-2)식에서  $Z$ 는 낙엽에 함유되어 있는 무기영양을 나타내며  $n$ 은 무기영양소의 가지수이고  $i$ 는 각 무기영양소를 표시한다.

(22-1)식을 (18-1)식과 같은 방법으로 해를 구하면, 낙엽의 유기물로부터 무기화하는 식을 구할 수 있다.

$$m = m_0 e^{-k_n t} = N_0 e^{-k_n t} + S_0 e^{-k_s t} + P_0 e^{-k_p t} + K_0 e^{-k_k t} + Ca_0 e^{-k_{Ca} t} + Mg_0 e^{-k_{Mg} t} + Fe_0 e^{-k_{Fe} t} + Mn_0 e^{-k_{Mn} t} + B_0 e^{-k_B t} + Zn_0 e^{-k_{Zn} t} + Cu_0 e^{-k_{Cu} t} + Mo_0 e^{-k_{Mo} t} + Cl_0 e^{-k_{Cl} t} \dots \dots (23-1)$$

(23-1)식에서  $k_M, k_N, k_S, k_P, k_K, k_{Ca}, k_{Mg}, k_{Fe}, k_{Mn}, k_B, k_{Zn}, k_{Cu}, k_{Mo}$  및  $k_{Cl}$ 은 각 무기원소의 무기화 상수이다.

일반적으로 표시하면

$$m = m_0 e^{-k_n t} = \sum_{i=1}^n Z_{0i} e^{-k_{mi} t} \dots \dots \dots (23-2)$$

(23-2)식에서  $Z_0$ 는  $t_0$  때의 무기양분량이다.

또한 낙엽의 유기성분속에 포함된 무기원소가 임상에 축적되는 양은

$$L_m (1 - e^{-k_n t}) / k_m = L_N (1 - e^{-k_n t}) / k_N + L_S (1 - e^{-k_s t}) / k_S + L_P (1 - e^{-k_p t}) / k_P + L_{Ca} (1 - e^{-k_{Ca} t}) / k_{Ca} + L_K (1 - e^{-k_k t}) / k_K + L_{Mg} (1 - e^{-k_{Mg} t}) / k_{Mg} + L_{Fe} (1 - e^{-k_{Fe} t}) / k_{Fe} + L_{Mn} (1 - e^{-k_{Mn} t}) / k_{Mn} + L_B (1 - e^{-k_B t}) / k_B + L_{Zn} (1 - e^{-k_{Zn} t}) / k_{Zn} + L_{Cu} (1 - e^{-k_{Cu} t}) / k_{Cu} + L_{Mo} (1 - e^{-k_{Mo} t}) / k_{Mo} + L_{Cl} (1 - e^{-k_{Cl} t}) / k_{Cl} \dots \dots \dots (24-1)$$

실제로 식물의 낙엽속에는 이 13 광물원소 이외에 Na, Ni 등 많은 원소도 포함하고 있으나 이들 원소의 무기화도 (23-1)과 (23-2)식에 첨가하여 생각할 수 있다.

일반적으로 표시하면

$$m = \frac{L_m}{k_m} (1 - e^{-k_n t}) = \sum_{i=1}^n \frac{Z_{li}}{k_{mi}} (1 - e^{-k_{mi} t}) \dots \dots \dots (24-2)$$

(24-2)식에서  $Z_{li}$ 은 낙엽에 함유되어 있는 유기태 무기원소를 가리킨다.

**結果 및 論議**

**낙엽의 연생산과 분해상수의 결정**

낙엽의 연생산량이 평형상태에 도달하여 매년 임상에 이입되는 낙엽의 양이 일정하게 되면 임상에 축적된 낙엽은 그 초지나 삼림생태계의 조건하에서 분해자에 의해 분해하게 된다. 매년 규칙적으로 쌓이는 낙엽층의 축적량은 이입되는 낙엽의 유기탄소량  $L$ 과 이출되는 축적된 낙엽의 유기탄소의 분해량  $C$ 가 같을 때 일정량을 유지한다. 이때 낙엽의 연분해속도는 영에 수렴한다. 그러므로 (4)식은

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= L - kC = 0 \\ L &= kC \\ k &= \frac{L}{C} \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

이 식에 의하여 낙엽의 축적과 분해가 평형상태에 도달한 초지와 삼림에서 낙엽의 분해상수를 구할 수 있다. 낙동강하구의 갈대 초지에서 1977년부터 1986년까지 격년으로 낙엽의 생산량을 조사한 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1의 결과를 통계처리하여 연도별로 낙엽의 생산량간에 차이가 있는지의 여부를 검정한 결과 유의차가 존재하지 않았다. 즉 10년간 갈대군락의 낙엽생산량은 일정하다는 것을 의미한다. 뿐만 아니라 낙엽의 축적량도 같은 통계처리결과를 얻었으며 10년간 낙엽의

**Table 1.** The production and accumulation ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) of organic matter of the litter in *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Horizons	1977	1979	1981	1983	1985	1986	mean
Litter	1,020.4	1,023.5	1,049.9	1,031.8	1,027.0	1,019.9	1,028.8
Litter accumulation	1,155.0	1,154.9	1,143.6	1,162.5	1,164.4	1,148.7	1,154.9

축적량도 변동없이 일정하다는 것을 알 수 있었다. 이 연구결과로 연간 이입량인 낙엽의 생산량과 축적된 낙엽으로부터 이출되는 분해량간에 평형상태를 이루고 있다는 것을 입증해주는 결과라고 생각된다. 이러한 연구결과는 아직 발표된 바 없는 것으로 본 조사결과 나타났다.

#### 낙엽의 유기물분해

낙엽의 이입량과 분해되는 낙엽의 이출량이 평형상태에 있으므로 (25)식에 의하여 낙동강하구에 있는 갈대초지의 초지생태계에 있어서 낙엽의 분해상수를 구할 수 있다. 갈대의 낙엽은 냉수 가용성유기물, 열수가용성유기물, 조단백질, 조지방, 섬유소, lignin, 기타 탄수화물 및 조회분으로 구성되어 있다. 이 유기물질들의 분해를 (16)~(19)식에 의하여 구할 수 있다. 갈대의 낙엽과 축적된 낙엽층에 포함되어 있는 냉수가용성유기물, 열수가용성유기물, 조단백질, 조지방, 섬유소, lignin, 기타 탄수화물 및 조회분을 분석하여 단위당 면적( $\text{m}^2$ ) 축적량( $\text{g}$ )을 조사한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다.

Table 1과 2의 조사결과를 기초로하여 (25)식에 적용하면 (16)~(19)식의 이론에 의해 냉수가용성유기물, 열수가용성유기물, 섬유소, lignin, 기타 탄수화물, 조단백질, 조지방 및

**Table 2.** The production and accumulation ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) of important organic constituents of the litter in *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Horizons	Cold water soluble fraction	Hot water soluble fraction	Cellulose	Lignin	Other carbohydrate	Crude protein	Crude fat
Litter	98.5	152.1	443.2	182.5	341.0	44.1	13.5
Litter accumulation	36.5	121.9	433.7	368.3	244.1	98.1	14.7

**Table 3.** The parameters and periods (years) for decay and accumulation of the organic constituents in *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Organic constituents	$k$	$1/k$	$t_{1/2}$	$t_{1/20}$	$t_{1/100}$
Cold water soluble fraction	0.730	1.370	0.95	4.11	6.85
Hot water soluble fraction	0.555	1.802	1.25	5.41	9.01
Cellulose	0.505	1.980	1.37	5.94	9.90
Lignin	0.331	3.021	2.09	9.06	15.11
Other carbohydrate	0.583	1.715	1.19	5.15	8.58
Crude protein	0.310	3.226	2.24	9.68	16.13
Crude fat	0.479	2.088	1.45	6.26	10.44
Organic matter	0.471	2.123	1.47	6.37	10.62

유기물의 분해상수를 각각 계산할 수 있다. 이 결과는 Table 3에서 나타내는 바와 같다.

Table 3의 결과에 의하면 낙엽을 구성하고 있는 유기성분중에는 냉수가용성유기물이 가장 빨리 분해하며 조단백질이 가장 늦게 분해되는 것을 알 수 있다. 분해순위가 빠른 것으로부터 늦은 것의 순서로 살펴보면 냉수가용성유기물, 기타 탄수화물, 열수가용성유기물, 섬유소, 조지방, lignin, 조단백질의 순이었다. 일반적으로 말하면 섬유소를 포함하는 탄수화물계통의 유기물이 비교적 빨리 분해되고 ether 가용물질인 지질계통의 물질이 중간이고 lignin과 조단백질이 가장 늦게 분해되는 것으로 밝혀졌다.

일찌기 Waksman and Tenney(1927)에 의하여 단백질은 lignin-protein 복합물질을 형성하기 때문에 가장 분해속도가 늦다고 보고한바 있다. Oohara *et al.* (1971b)도 초지 낙엽의 유기물중 조단백질이 가장 늦게 분해한다는 것을 밝혔고 Chang and Oh(1977)가 낙동강 하구 삼각주의 갈대군락에서 조사한 유기물의 각성분에 대한 분해의 연구결과와 일치한다. 이러한 사실은 낙엽의 분해에 참여하는 여러 분해자의 식성차 뿐만 아니라 분해자들이 함유하고 있는 소화효소의 특이성에 귀결되는 것으로 생각된다. Oohara *et al.* (1971)의 조사 결과에 의하면 우리나라의 낙동강 하구 순갈대초지의 낙엽의 유기물이 일본 북해도 갈대 초지의 경우보다 2배이상이나 빨리 분해되는 것을 알 수 있다.

#### N, P, K, Ca 및 Mg의 무기화

(20)~(24)식에 의하여 낙동강하구 삼각주에 발달되어 있는 갈대초지의 낙엽에 포함되어 있는 N, P, K, Ca 및 Mg가 토양으로 되돌아가는데 필요한 무기화속도를 조사하기 위해 낙엽의 유기물로 이입되는 양과 지상에 축적되어 있는 양을 분석한 결과는 Table 4와 같다.

(25)식에 Table 4의 결과를 적용하여 N, P, K, Ca, Mg 및 Na의 무기화상수(turnover

**Table 4.** The amount of the production and accumulation of N, P, K, Ca and Mg in the litter on the mineral soil of *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River ( $g/m^2$ )

Horizon	Mineral					
	N	P	K	Ca	Mg	Na
Litter	7.09	1.34	2.36	4.37	0.79	1.34
Litter accumulation	11.80	1.28	1.65	6.70	3.92	6.81

**Table 5.** The parameters and periods (years) for turnover and accumulation of N, P, K, Ca and Mg in the litter on the mineral soil of *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Inorganic constituents	$k$	$1/k$	$t_{1/2}$	$t_{1/20}$	$t_{1/200}$
N	0.375	2.667	1.85	8.00	13.34
P	0.532	1.880	1.30	5.64	9.40
K	0.589	1.698	1.18	5.09	8.49
Ca	0.395	2.532	1.75	7.60	12.66
Mg	0.168	5.952	4.12	17.86	29.76
Na	0.164	6.098	4.22	18.29	30.49



constant)를 계산하고 이 주요원소들의 무기화 속도를 (22)~(24)식에 의하여 계산한 결과는 Table 5에서 보는바와 같다. Table 5의 결과에 따르면 K가 가장 빠른 속도로 무기화되는 것으로 나타났으며 가장 늦은 것은 Na라는 결과를 얻었다. 낙동강 하구의 갈대초지에 있어서 갈대낙엽에 유기태로서 함유되어 있는 주요무기원소의 무기화속도는 K, P, Ca, N, Mg, Na의 순서로 늦었다. 이 결과는 일본 북해도의 갈대초지(Oohara *et al.*, 1971)에서 연구된 갈대낙엽의 무기화율과 일치하는 결과이다. 그러나 낙엽의 유기물과 유기탄소의 축적과 분해에 관한 연구는 Jenny *et al.* (1949)를 비롯하여 이제까지 많은 연구가 되었으나 식물에 필요한 필수무기원소와 미량원소에 대한 낙엽으로부터의 무기화에 관한 연구는 별로 없었다.

### Fe, Mn, Cu, Zn, Co 및 Ni의 무기화

초지생태계에서 무엇보다도 중요한 것은 미량원소의 순환이다. 갈대초지가 만일 미량원소로 Co의 함량이 부족하면 가축의 청예사료로는 부적당하다는 사실은 이미 널리 알려져 있는 사실이다. 그만큼 초지생태계에 있어서 미량원소의 순환은 중요하다. 낙동강 하구의 갈대초지에서 매년생산되는 낙엽의 유기물 속에 유기태로 존재하는 Fe, Mn, Cu, Zn, Co 및 Ni 등의 이입량과 갈대초지내의 토양상에 갈대낙엽의 유기태로서 축적되어 있는 양을 각각 원소별로 정량분석한 결과는 Table 6에서 표시하였다.

**Table 6.** The amount of the production and accumulation (mg/m<sup>2</sup>) of Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Co and Ni in the litter on the mineral soil of *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Horizon	Mineral					
	Fe	Mn	Cu	Zn	Co	Ni
Litter	198.1	29.5	19.6	12.3	0.82	0.34
Litter accumulation	750.7	290.3	102.9	65.2	2.83	1.41

N, P, K, Ca, Mg, Na에 비하여 Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Ni은 갈대의 낙엽에 함유되어 있는 양자체가 미량이었으며 특히 Co와 Ni은 극미량이었다. 이 결과는 Oohara *et al.* (1971)의 북해도 갈대초지에서 조사한 결과와 일치하였다.

**Table 7.** The parameters and periods (years) for turnover and accumulation of Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Co and Ni in the litter on the mineral soil of *P. longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River

Inorganic constituents	<i>k</i>	1/ <i>k</i>	<i>t</i> <sub>1/2</sub>	<i>t</i> <sub>1/20</sub>	<i>t</i> <sub>1/100</sub>
Fe	0.209	4.785	3.32	14.36	23.93
Mn	0.092	10.870	7.53	32.61	54.35
Cu	0.190	5.263	3.65	15.79	26.32
Zn	0.189	5.291	3.67	15.87	26.46
Co	0.173	5.780	4.01	17.34	28.90
Ni	0.255	3.922	2.72	11.77	19.61

Table 6의 결과를 (25)식에 적용하여 Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Co 및 Ni의 무기화상수를 구하여 낙엽속에 유기태로 포함되어 있는 미량원소들이 50%, 95% 및 99% 무기화 하는데 소요되는 시간을 (22)~(24)식에 의해 계산한 결과는 Table 6에서 보는바와 같다.

이 연구결과에 따르면 미량원소중 무기화가 가장 빨리 일어나는 원소는 Ni이며 가장 늦은 원소는 Mn이었다. Fe, Cu, Zn 및 Co 간에는 거의 차이가 없이 거의 같은 무기화율을 보이고 있다. Table 7의 미량원소의 무기화에 관한 연구 결과는 Oohara *et al.* (1972)이 실시한 일본 북해도 초지에서의 조사결과 이외에는 참고자료가 없다. 다행히 이들의 연구결과와 잘 일치한다.

### 摘 要

낙엽의 연생산이 평형상태에 도달한 초지와 삼림생태계에서 생산되는 낙엽의 유기물, 낙엽을 구성하고 있는 유기성분 및 낙엽에 함유되어 있는 유기태무기원소에 관한 축적, 분해 및 무기화에 적용할 수 있는 수학적 모델을 정립하였다.

제시된 수학적모형을 낙동강하구의 갈대초지에 적용하여 그 타당성을 낙엽의 유기탄소의 이입과 이출의 평형상태의 확인, 낙엽의 유기물, 냉수가용성 유기물, 열수가용성 유기물, 섬유소, lignin, 기타함수탄소, 조단백질, 조지방, 유기태무기원소 및 유기태미량원소의 축적, 분해 및 무기화를 조사하였다.

갈대낙엽의 유기성분중 냉수가용성 유기물을 비롯하여 탄수화물 계통의 유기물질이 빨리 분해하고 lignin과 단백질은 가장 늦게 분해하였다.

갈대 낙엽의 유기태 무기원소중 K와 P가 가장 빨리 무기화 하였으며 Na가 가장 늦은 속도로 무기화 하였다.

갈대낙엽의 유기태 미량원소중 Ni가 가장 빨리 무기화하였고 Mn가 가장 늦었다. 그러나 N, P, K 및 Ca에 비교하면 대단히 늦은 속도로 무기화함을 알 수 있었다.

### 引 用 文 獻

- Chang, N.K. and S. Yoshida. (1973). Studies on the gross metabolism in a *Sasa paniculata* type grassland. III. The decay system of the litter. J. Japan. Grassl. Sci., 19 : 341~357.
- Chang, N.K. and K.H. Oh. (1977). The decomposition rates of the organic constituents of the litter in *Phragmites longivalvis* grassland in a delta of the Nakdong River. The College of Education Review, 15 : 129~142.
- Jenny, H., S.P. Gessel and F.T. Bingham. (1949). Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. Soil Sci., 68 : 419~432.
- Kim, C.M. and N.K. Chang. (1975). The decomposition rate of pine and oak litters affecting the amount of mineral nutrients of forest soil in Korea. The collection of themes and assays in commemoration of the sixty anniversary of Dr. Kim's Birth. pp.104~111.
- Oohara, H., N. Yoshida and N.K. Chang. (1971a). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. I. Energy storage, and the production and decomposition of litter. J. Japan. Grassl. Sci., 17 : 7~18.

- Oohara, H., N. Yoshida, K. Ataku and N.K. Chang. (1971b). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. II. Variation of nutritive values due to the decomposition of litter. *J. Japan. Grassl. Sci.*, **17** : 19~27.
- Oohara, H., N. Yoshida and N.K. Chang. (1971c). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. III. The decomposition rates of organic components of the litter. *J. Japan. Grassl. Sci.* **17** : 86~96.
- Oohara, H., N. Yoshida and N.K. Chang. (1971d). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. IV. Nitrogen cycle. *J. Japan. Grassl. Sci.*, **17** : 97~105.
- Oohara, H., N. Yoshida and N.K. Chang. (1971e). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. V. Phosphate cycle. *Res. Bull. Obihiro Univ.*, **7** : 165~175.
- Oohara, H., N. Yoshida, K. Ito and N.K. Chang. (1971f). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. VI. Cycles of potassium, calcium and magnesium. *Res. Bull. Obihiro Univ.*, **7** : 176~188.
- Oohara, H., N. Yoshida and N.K. Chang. (1972). Balance of producers and decomposers in a grassland ecosystem in Obihiro. VII. Movement of Na, Fe, Mn, Zn, Cu, Co and Ni. *J. Japan. Grassl. Sci.*, **18** : 75~84.
- Olson, J.S. (1963). Energy storage and balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, **44** : 322~331.
- Ovington, J.D. and D. Heitkamp. (1960). Accumulation of energy in forest plantation in Britain. *J. Ecol.*, **48** : 639~646.
- Waksman, S.A. and F.G. Tenney. (1927). The decomposition of natural organic materials and their decomposition in the soil. II. Influence of age plant upon the rapidity and nature of its decomposition plants. *Soil Sci.*, **24** : 317~334.

(1987年 5月 25日 接受)