Korean J. Ecol., 21(5-2):491~499, 1998

植物의 境界分布 理論과 白頭山 森林限界線의 波動性

張楠基 · 沈揆哲 · 李現旭 · 姜京美 · 蘇琴鉉
서울대학교 사범대학 생물교육과

The Theory of Boundary Distribution of the Plant and Wave Character of the Timber Line on Mt. Paektu

Chang, Nam-Kee, Kew-Cheol Shim, Hyun-Uk Lee, Kyoung-Mi Kang and Keum-Hyun So
Department of Biology Education, Seoul National University

ABSTRACT

An investigation was performed to establish the mathematical theories of a vibration for the plant growth and a wave distribution of a plant population on the boundary condition of a limiting factor in the environment. The mathematical theories of the plant growth vibration and wave distribution had been elucidated by the plant growth and the timber line on the middle slope of the west side of Mt. Paektu. The *Betula ermaruii* composes the timber line on about 2,060 m elevation of sea label, has a growth vibration on the ground surface and takes a wave distribution due to a boundary condition of alpine temperature gradient.

Key words : Growth vibration, Wave distribution, Timber line, Boundary distribution.

緖 論

白頭山은 동경 128° 6', 북위 42° 7'에 위치하고 우리나라와 中國과의 경계에 있으며 해발 2,746.6 m로 우리나라에서 가장 높은 웅대한 靈山이다. 백두산의 화산활동은 1990만년전 부터 9만년전까지 수차에 걸쳐 있었으나 유사 이래로는 1597년에 대폭발이 있었다. 이 분출은 天池밑에서부터 알칼리 유문암이 대량의 물과 결합하면서 일어나 많은 부석이 백두산 전체를 뒤덮어 백색을 띠게 되었다. 또 일부분에서는 현무암이 용출하여 부석을 덮기도 하였다. 그러므로 중국에서는 이때문에 지금도 白山 혹은 長白山이라 부르고, 우리나라에서는 白頭山이라고 부르게 되었다고 한다. 1668년과 1702년의 화산분출은 백두산의 정상부근이 아닌 다른 일부분에서 일어난 소규모의 것으로 추정되고 있다.

백두산의 식생이 언제부터 발달하기 시작하였는가를 조사해 보면 백두산의 앞갈나무 중에 320년생 이상의 고목이 관찰되는 것으로 보아 적어도 370년 이전이라고 추정하고 있다 (李 1991). 우리가 백두산정에 올라 산아래를 내려다 보면 森林限界線이 분명하게 관찰되며 보다 자세히 관찰하면 파동상으로 나타난다는 것을 직감할 수 있다.

우리가 조사한 中國側의 서북사면에서는 사스레나무가 2,060 m에 이르기까지 분포하고 있다. 이 (1991)에 의하면 북한측은 1,900~2,000 m에서 만주잎갈나무林과 1,980 m에서 가문비나무林이 森林限界線을 이루고 있다고 한다. 또한 백두산의 남동골짜기에서는 분비나무, 종비나무와 같은 침엽수가 2,100 m의 높이에서도 생육하는 것을 관찰할 수 있었다고 한다.

본 논문에서는 주로 삼림한계선을 중심으로 하여 관목과 樹木이 어떻게 發達할 것인가를 數學的으로 考察하여 理論을 定立하고 이 理論을 해석하여 波動性 分布를 발현한다는 것을 추정하고 이를 사스레나무林의 森

林限界線을 조사하여 실증하였다.

調査地의 概況

白頭山에서 가장 높은 장군봉까지의 해발고도는 2,749.6 m에 이른다. 백두산 정상에는 최고 수심이 300 m인 천지가 있다. 백두산은 고도 1,800 m이상에서 정상이 보이기 시작하는 35~45°의 경사도를 나타낸다.

제4기 산성용암이 약 650 m의 두께로 제3기 현무암 위에 높이 쌓여 층상의 화산추를 만들었다. 고도 1,800 m로부터 2,100 m까지는 구멍이 많은 알칼리 현무암, 응회암, 조변암으로 되어있고, 2,100 m로티 2,400 m까지는 산성용암이 흐르면서 만들어진 알칼리조면암, 유문암질암, 벤모라이트, 코멘다이트, 판테라이트 등의 alkaline과 peralkaline 화산암들로 형성되어 있다. 2,500 m에서 정상에 이르기까지는 경사가 급하고 미황색, 백색, 회백색, 회흑색 등의 부석으로 덮여있다. 이 부석은 양적으로 적으나 산포되어 있는 범위는 넓고 그 상태는 일정하지 않다. 천지의 화산구 주변에 있는 각 봉우리들에는 40 m에서 60 m의 깊이로 덮여있다.

이 부석들은 1597년 8월 26일, 1668년 4월 및 1702년 4월 14일의 3회에 걸친 화산분출의 결과이다. 2, 3차의 화산활동은 지질학적으로 볼 때 소규모로 화산재, 수증기, 이산화탄소, 유화수소, 아황산가스, 염화수소 등이 분출되었을 것으로 추정하고 있다 (홍 1990).

백두산 산록지대의 최근 10년간 측정한 연평균 기온은 11.0℃~11.3℃였고, 연간 기온교차와 낮과 밤의 온도교차가 대단히 큰 것이 특징이다. 여름은 사계절 중 가장 짧고 겨울이 대단히 길며 눈과 얼음은 6월에서 8월 사이에서만 녹는다. 강우량도 매우 적어 일년을 통하여 575.5 mm이다. 그나마도 여름에 집중하여 평균 습도는 71%에 달하고 짙은 안개가 낀 날이 많다 (吉林省環境保護研究所 1988).

調査 및 研究 方法

調査日時

제1차 조사는 1989년 7월 24일부터 8월 15일까지 중국에 입국하여 8월부터 8월 8일까지 백두산에 체류하면서 실시하였다 제2차 조사는 1997년 7월 22일부터 7월 27일까지 수행하였다. 1,2차에 실시한 조사지역은 Fig. 1에서 보는 코스를 중심으로 하여 이루어졌다 (Fig. 1).

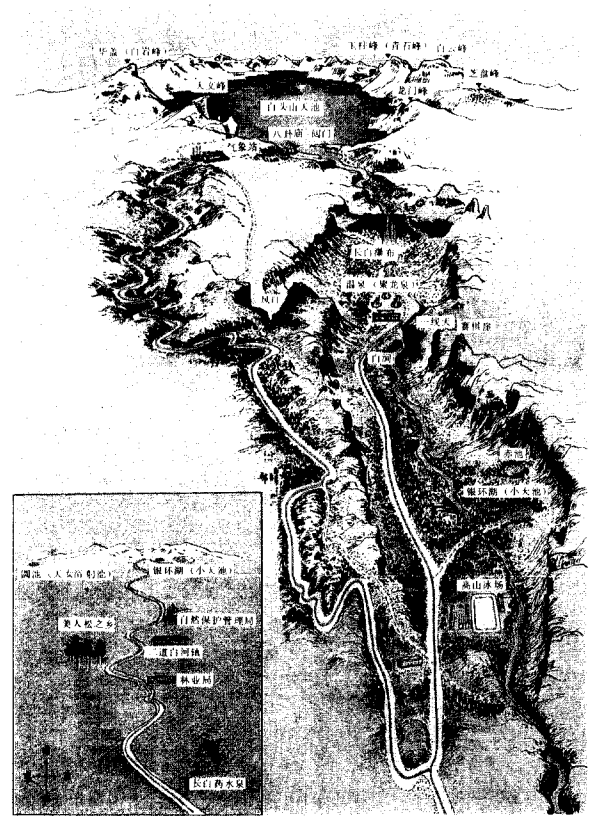

Fig. 1. The course showing studied middle slope of west side of Mt. Paektu.

森林 群落

方形區法, 接線法, point法 및 間隔法을 지형, 지세, 군락에 따라 신속하게 조사할 수 있는 방법을 선택하여 가장 많은 시간을 절약하기 위해 표지한 방형구 전체를 사진촬영하여 군락의 이론 분석에 이용하였다.

階層構造

森林群落內에서 구성식물의 수직적 배열상태를 高木層, 低木層, 幼木層, 草木層 및 이끼層을 조사하여 계층구조를 조사하고 수학적 이론을 정립하는데 이용하였다.

森林限界線

고도계와 5만분지 1의 백두산지도를 이용하여 가능한 한 해발고도를 정확히 측정하였고 관목대 삼림대의

境界面을 육안으로 원근별 관찰을 시행하고 사진 촬영을 하였고 중국에서 제작한 사진관광자료와 日本의 富士山 사진 관광자료에 나타난 결과를 조사하여 이론의 발현상을 실증하였다.

地球表面의 植被 分布

지구표면의 식피분포를 인공위성으로 촬영한 결과 (Starr and Taggart 1998)를 토대로하여 이론의 적합성을 입증하였다.

植物의 分布 理論

식물의 분포는 주로 種子의 생산과 散布, 生長, 온도, 수분, 식물의 영양, 중력, 지세등 식물과 환경 요인간의 상호작용에 의해 발현되는 것으로 이 현상을 수학적으로 일반화하여 이론을 정립하여 生物의 개체생장, 군집의 발달, 삼림한계선 및 지구표면의 식생 분포가 나타내는 법칙성을 해석하였다.

結果 및 考察

白頭山 植物分布의 境界反應

장 (1990), 장 (1992), 장과 유 (1993)에 의하면 지구상의 모든 생물은 지구표면의 境界面에서 일어나는 諸環境要因의 境界反應의 作用과 反作用의 결과 생긴 산물로 보고 있다. 이 결과를 數學的 理論으로 고찰하고 白頭山의 植物分布 調査로 나타난 사실에 의해 입증하였다.

生物의 分布理論

生物群集의 生長은 생물의 個體群이나 個體의 생장과 꼭 같이 생각할 수 있다. 다만 生長量을 무엇으로 基準할 것인가가 문제이다. 이 논문에서는 일반적으로 생물의 군집을 취급하기로 한다.

張과 吉田 (1973)는 생물환경을 크게 기후, 토양, 자세, 생물, 시간으로 나누고 생장을 논할때는 시간 t를 제한요인으로 생각하는 것이라고 하였다. 이 연구의 논리에 따라 다음과 같이 분류하여 생각할 수 있다.

1. 생물의 현재의 생장량 N은 시간에 비례한다

이 사고는 생물의 생장량은 시간이 경과하면 이에 비례하여 증가한다는 설이다. 즉,

$$N \propto t$$

이때 비례상수를 r이라고 가정하면

$$N = rt \tag{1}$$

만일 (1)식에서 최초의 생장량 b를 무시할 수 없을 경우에는

$$N = rt + b \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다.

(1)과 (2)식에서 r는 생장계수이고 언제나 변화하지 않고 일정하다. N은 t의 불매 r에 따라 일정한 생장속도로 생장한다는 것이다. 이 식은 가장 간단한 생장이나 생물의 생장을 완전히 해석할 수 없는 것이 단점이다.

2. 생물의 생장속도가 현재의 생장량에 비례한다

생장량이 시간에 비례한다는 사고대신에 생장속도가 생장량에 비례한다는 것이다. 즉,

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

이다. 이 경우 비례상수를 r이라고 하면

$$\frac{dN}{dt} = rN \tag{3}$$

(3)식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$N = N_0 e^{rt} \tag{4}$$

(4)식은 생물의 생장이 지수함수적으로 증가하는 것을 나타낸다. 이러한 생장을 하는 생물은 극히 제한되어 있는 것으로 알려져 있다.

그러므로 생물의 생장에 한계가 있다는 것을 보정하여 (3)식을 다음과 같이 변형하였다.

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(\frac{K-N}{K}\right) \tag{5}$$

(5)식에서 K는 생물의 생장의 극한치이다.

(5)식의 해를 구하면

$$N = \frac{K}{1+e^{a-rt}} \tag{6}$$

이다. (6)식은 sigmoid를 나타내는 생장곡선으로 현재 널리 적용되고 있으며, 생물의 개체, 개체군 및 생물군집의 생장에 널리 이용되고 있다. 2종간의 경쟁에도 이론적으로 응용하여 분석하는데 응용되고 있다.

3. 생물의 생장가속도는 시간과 부상관의 관계가 있다

생물의 생장가속도는 생물이 태어났을 때 가장 크고 시간이 경과함에 따라 감소한다는 것이다. 즉, 생물의 수명과 같이 시간이 경과하면 할수록 감소한다. 이것을 식으로 나타내면

$$\frac{d^2N}{dt^2} = -rt \tag{7}$$

로 나타낼 수 있다. (7)식에서 r은 부상관계수이다. 생물이 태어났을 때의 생장가속도의 최초의 생장량을 b라고 가정하면

$$\frac{d^2N}{dt^2} = -rt+b \tag{8}$$

(8)식의 해를 구하면

$$N = \int\int (-rt+b)dtdt = \int (-\frac{r}{2}t+bt+c)dt$$

$$= -\frac{1}{6}rt^3 + \frac{1}{2}bt^2 + ct + d$$

$$\therefore N = -\frac{1}{6}rt^3 + \frac{1}{2}bt^2 + ct + d \tag{9}$$

(9)식은 시간을 독립변수로 하는 3차 함수로 이 생장식을 張과 吉田 (1973)은 식물의 물질생산에 적용하여 草地에서 최고수확량을 위한 草地의 收穫適期를 구하는데 적용하였고 장 (1998)은 학습에 있어서 進度理論을 전개하는데 적용한 바 있다.

본 연구에서는 (7), (8) 및 (9)식으로 유도되는 새로운 생물의 생장식을 정립하고 백두산의 식물분포양상을 조사하여 이 이론의 타당성을 입증하였다.

白頭山의 植物

본 연구에서는 먼저 백두산에서 自生하고 있는 식물의 생장과 분포하는 양상을 植物과 植物群集을 대상으로하여 (7)~(9)식의 적용성과 타당성을 조사하였다. 그리고 생물의 분포가 境界反應을 한다는 것을 발견하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 식물의 생장과 백두산 툰드라

식물의 生長力은 $f=ma$로 구할 수 있다. 생장력을 f로 표시하고 식물의 질량을 m이라 하면

$$f = m\frac{d^2G(t)}{dt^2} \tag{10}$$

이다. (10)식을 (7)식과 비교하면 m=1일때의 (7)식으로 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$m\frac{d^2G(t)}{dt^2} = -rt \tag{11}$$

또는 (8)식에 적용하면

$$m\frac{d^2G(t)}{dt^2} = -(rt-b) \tag{12}$$

(11)식과 (12)식에 의하면 생물의 생장력은 지표면을 경계로 하여 單調和振動을 한다는 것을 나타내고 있다. 즉, 식물의 생장은 단조화진동을 하는 지표면의 경계반응이다. 이 결과는 Fig. 2 ①②③④의 관찰로 알 수 있다. 이 사실은 지표면에 살고 있는 모든 생물은 지표면에서 진동의 경계반응으로 생장하고 있다는 것을 입증하고 있다. Fig. 2 ①에서 보는 바와 같이 백두산의 고산 tundra대에서 자라는 식물은 환경조건이 열악하여 식생이 원형으로 분포하고 있다. 이 지대의 연평균 기온은 영하 7℃이고 연강수량은 1,370 mm이다. 이러한 환경조건하에서 점상과 원형으로 분포하고 있는 식물은 노랑만병초, 꽃버들, 가솔송, 물싸리, 장백버들, 홍월귤, 좀참꽃나무, 두메자운, 담자리참꽃, 돌꽃, 바위돌꽃, 두메분취, 구름범의귀, 화살분취, 씨범의 꼬리 등이 있었다.

2. 白頭山 森林限界線의 波動性

백두산의 森林限界線에 관한 境界反應은 장 (1990)에 의해 보고된바 있다. 그러나 理論的인 분석이 없었다. 백두산 정상에서 中國側 西部斜面에 나타나는 森林 境界線의 해발고도는 2,000~2,060 m였고 수종은 사스레나무(*Betula ermanii*)였다. 그러므로 관목군집과 사스레나무군집으로 이루어진 森林境界線에서는 관목과 교목인 수목의 분포간에 간섭이 일어난다.

森林限界 수목인 사스레나무림의 생장발달은 사스레

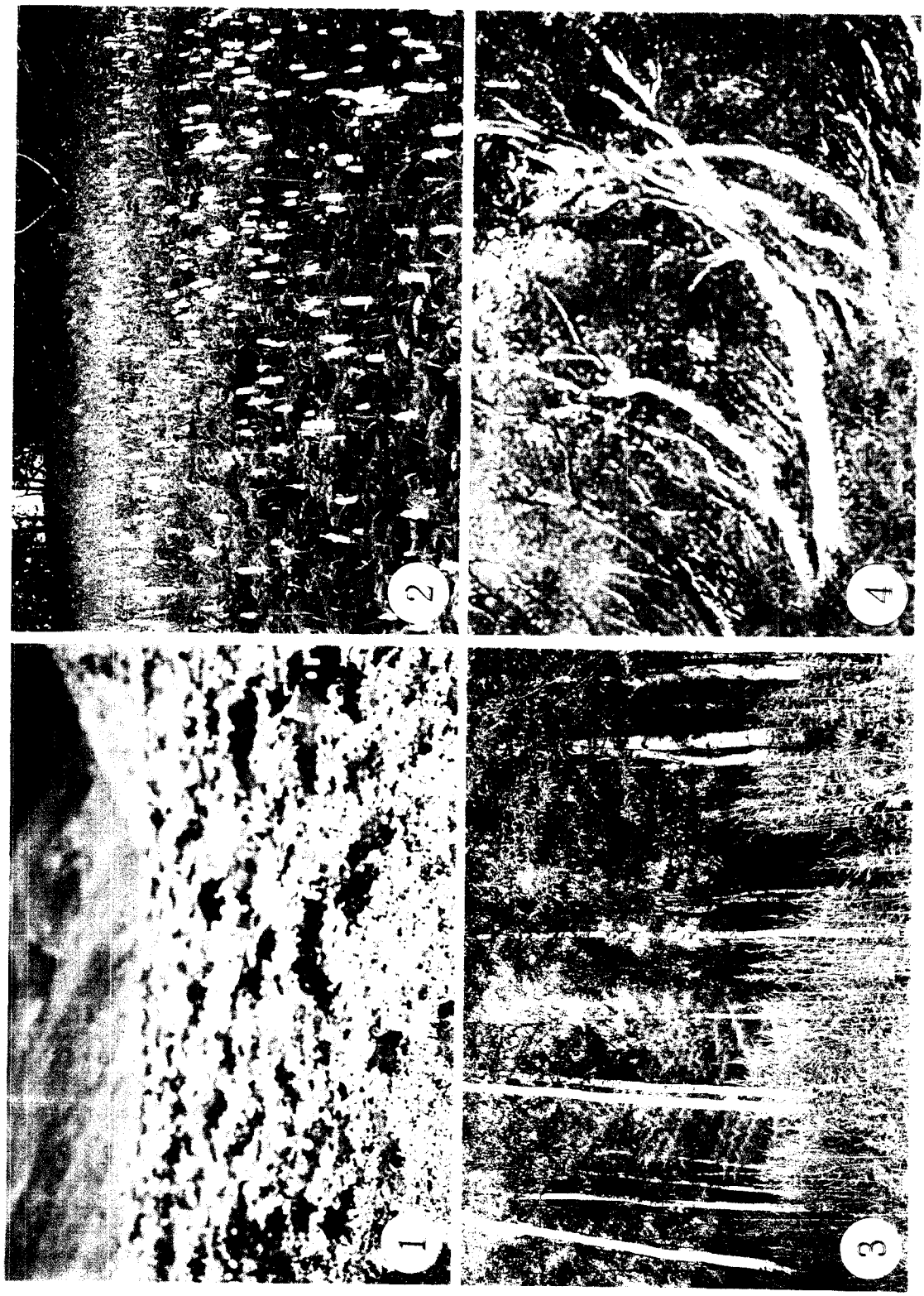

Fig. 2. Explanation of photographs of the vegetation in tundra ① *Sanguisorba sitchensis* community ② *Betula mandshurica* community ③ and *Betula ermanii* in the timber line ④ on Mt. Paektu.

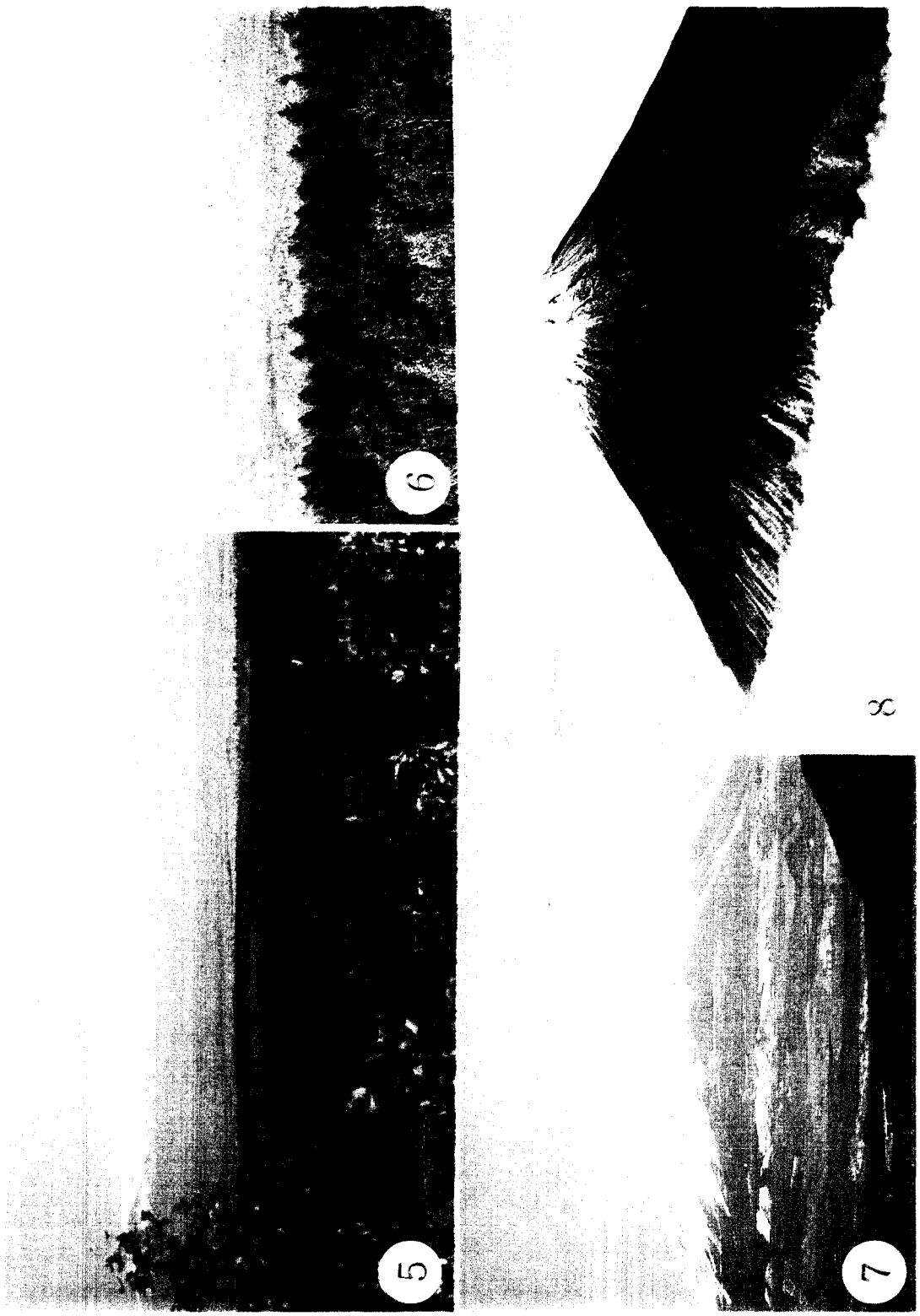

Fig. 3. Explanation of photographs of air photographs of the wave distribution on Mt. Paektu ⑤ ⑥ in China and Mt. Hooji ⑦ ⑧ in Japan.

나무의 밀도를 N_1이라 하고, 생장가속도의 비례상수를 r_1이라 하면 일반적으로 (7)식에 의하여

$$\frac{d^2N_1}{dt^2} = -r_1 t \tag{13}$$

또는 (8)식에 의하여

$$\frac{d^2N_1}{dt^2} = -r_1 t + b_1 \tag{14}$$

관목군집의 생장량을 N_2라고 하고 그 생장가속도의 비례상수를 r_2라고 하면

$$\frac{d^2N_2}{dt^2} = -r_2 t \tag{15}$$

또는 $$\frac{d^2N_2}{dt^2} = -r_2 t + b_2 \tag{16}$$

으로 나타낼 수 있다.

森林限界線에서는 관목과 사스레나무가 공존할 수 있다. 그러므로 관목군집과 사스레나무군집의 합으로 나타내 보면 삼림한계선의 발현양상을 이론적으로 추정할 수 있다.

사스레나무 군집은 (13)식으로부터

$$-\frac{1}{r_1 t}\cdot\frac{d^2N_1}{dt^2} = 1 \tag{17}$$

또는 (14)식으로 부터

$$-\frac{1}{b_1 - r_1 t}\cdot\frac{d^2N_1}{dt^2} = 1 \tag{18}$$

(15)식에 의해

$$-\frac{1}{r_2 t}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2} = 1 \tag{19}$$

또는 (16)식으로 부터

$$-\frac{1}{b_2 - r_2 t}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2} = 1 \tag{20}$$

(17)식과 (19)식은 같으므로

$$\frac{1}{r_1}\cdot\frac{d^2N_1}{dt^2} = \frac{1}{r_2}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2}$$

(18)식과 (20)식은 같으므로

$$\frac{1}{b_1 - r_1 t}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2} = \frac{1}{b_2 - r_2 t}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2}$$

각각 N_1에 대하여 풀면

$$\frac{d^2N_1}{dt^2} = \frac{r_1}{r_2}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2} \tag{21}$$

또는 $$\frac{d^2N_1}{dt^2} = \frac{b_1 - r_1 t}{b_2 - r_2 t}\cdot\frac{d^2N_2}{dt^2} \tag{22}$$

(21), (22)식은 삼림한계선에서 사스레나무군집은 波動狀分布를 한다는 것을 나타낸다. 관목군집 N_2의 경우를 구하면

$$\frac{d^2N_2}{dt^2} = \frac{r_2}{r_1}\cdot\frac{d^2N_1}{dt^2} \tag{23}$$

또는 $$\frac{d^2N_2}{dt^2} = \frac{b_2 - r_2 t}{b_1 - r_1 t}\cdot\frac{d^2N_1}{dt^2} \tag{24}$$

로 된다.

이 理論은 장 (1990)의 조사결과와 Fig. 3 ⑤⑥에서 보는 바와 같이 백두산의 항공 원경사진을 찍은 카드에서도 잘 나타나 있다. 또한 日本 富士山의 경우도 관광용카드 Fig. 3 ⑦⑧에서도 식생의 파동분포가 선명하게 잘 관찰된다. 이들 결과로 볼 때 (21)~(24)식의 파동방정식은 환경의 경계조건에서 발현되는 식물군락의 파동성분포를 잘 나타내고 있다.

3. 地球植生의 波動性分布

지구 표면은 대기권과의 경계면이다. 이 경계면에서 발달하고 있는 植生의 분포도 (13)~(16) 식에 의하여 이론적으로 波動性 分布를 한 것이라는 것을 예측할 수 있다. 미국의 인공위성으로부터 촬영한 지구표면 사진은 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 예측한대로 정확히 지구 표면의 식생은 波動性 分布를 하고 있다는 것을 실증해 주고 있다.

이는 적도부근에서부터 高緯度 지방으로 갈수록 太陽輻射열량이 점차로 감소한다. 가열된 적도지방의 공기는 상승하면서 냉각되고 수직방향으로 퍼지면서 고위도 쪽으로 이동하게 된다. 또한 극지방의 온도는 가장 낮아 공기는 냉각되어 침강하고 하층의 공기가 침강하면 상층의 공기도 따라서 하강하게 된다. 침강한 공기는 地表面을 따라 저위도 방향으로 이동하게 된다. 간략 단순한 모양의 대규모적 環流가 형성된다. 이 현상 역시 지표면

Fig. 4. A satellite data on the Earth's primary productivity (Starr and Taggart 1998).

에서 일어나는 공기의 경계반응이다. 그러나, 지구가 자전하고 있으므로 운동하는 공기의 轉向力의 모양이 변화한다. 이 작용에 의해 무역풍 (trade wind)이 생긴다 (대학지구과학연구회 1994).

이와 같이 지표면에서 일어나는 경계반응의 결과 무역풍이 생기고 이로 인해 발생하는 제환경요인의 변화로 지구 표면의 植生發達이 영향을 받게 되어 (21)~(24)식의 N_1과 N_2를 삼림식물 N_f와 사막식물 Ns로 바꾸어 생각하면

$$\frac{s^2N_f}{dt^2} = \frac{r_f}{r_s} \cdot \frac{s^2N_s}{dt^2} \tag{25}$$

또는 $$\frac{d^2N_f}{dt^2} = \frac{b_f - r_f t}{b_s - r_s t} \cdot \frac{d^2N_s}{dt^2} \tag{26}$$

로 표시할 수 있다.

그러므로 지구상의 모든 생물은 環境要因의 境界條件에서 경계반응을 하여 波動性 分布를 한다는 것을 理論化 할 수 있다.

要 約

본 연구에서는 白頭山의 西側 中部 斜面에서 출현하는 植物과 森林限界線을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

諸環境要因의 경계조건에서 식물의 생장은 振動反應으로 발현되고 식물군집의 발달은 波動性을 나타낸다는 것을 理論化하고 이것을 백두산에 분포하고 있는 식물의 생장과 해발고도 2,060 m에 나타나는 사스레나무林의 森林限界線의 調査로 각각 植物生長은 지표면을 경계로 하여 진동을 하고 삼림한계선은 波動性 分布를 하고 있는 것으로 입증하였다.

引 用 文 獻

吉林省環境保護研究所, 1988. 長白山地之自然資源開發與生態環境保護. 吉林科學技術出版社. pp. 1-355.

大學地球科學研究會, 1994. 地球科學論叢. pp. 113-116.

李永魯. 1991. 白頭山의 꽃, 한길사. pp. 14-50.

張楠基. 1990. 白頭山 森林限界線의 波動性에 관한 研究. 한국생태학회지. 13(14): 321-320.

장남기, 유해미. 1993. 한라산 구상나무림의 파동상 분포에 관한 연구. 科學教育研究論叢. 18(1): 79-90.

장남기. 1992. 人間의 個體, 個體群 및 社會의 行動 秩序와 自己調節. 3. 個體의 正常行動과 境界行動. 1(2): 131-138.

홍영국. 1990. 白頭山의 地質, 백두산 자연생태계의 지질 예비조사. 과학기술처. pp. 23-44.

Chang, Nam-Kee and Shigeharu Yoshida. 1973. Studies on the gross metabolism in a *Sasa paniculata* type grassland. I. The estimation of the gross assimilation. J. Japan Grass. Sci., 19(1): 107-134.

Starr, C., and R. Taggart. 1998. Biology-The Unity and Diversity of Life 4th edition. Wadsworth Publishing Company. pp. i~ii.

(1998년 7월 14일 접수)