

전나무 수형목 품매차대의 생장특성에 대한 유전력 및 개량효과

한상억^{1*} · 오창영¹ · 김장수¹ · 이재선²

¹국립산림과학원 산림유전자원부, ²강원대학교 산림환경과학대학

Realized Genetic Gains and Heritabilities for Growth Traits in Open-Pollinated Progenies of *Abies holophylla* Max.

Sang-Urk Han^{1*}, Chang-Young Oh¹, Chang-Soo Kim¹, and Jae-Seon Yi²

¹Tree Breeding Division, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

²College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

ABSTRACT : Progeny tests of *Abies holophylla* were established with 32 open-pollinated families at Hwaseong and Gangneung in 1994. Growth characteristics (height, DBH and volume index) were measured at the age of 15, showing that Gangneung site showed in general better performance than Hwaseong site. Analysis of variance (ANOVA) of the growth characteristics showed that there was a significant difference among families in Gangneung but not in Hwaseong, and Hwaseong site showed that DBH and volume index were statistically different among replications. At Gangneung site, family x replication interaction was significant in DBH and volume index. Based on the combined analysis of both sites, all characteristics except height showed highly significant differences between sites and among families. On the other hand, family x replication interaction was not significant, implying that growth pattern of families could be similar at Gangneung and Hwaseong. Individual heritabilities (h^2) at Gangneung were 0.485 in height, 0.611 in DBH and 0.538 in volume index, and the values of h^2 at Hwaseong were 0.121 in height, 0.054 in DBH and 0.080 in volume index, respectively. Based on both sites, h^2 was estimated as 0.204 in height, 0.326 in DBH and 0.238 in volume index. Individual heritabilities (0.054~0.611) were lower than family heritabilities (0.089~0.723) for all growth characteristics. Realized gain was estimated to be 2.5% in height, 9.2% in DBH and 23.6% in volume. When inferior families (about 50% of all families) are genetically thinned from a seed orchard, genetic gain would be 9.55% in height, 17.0% in DBH and 46.8% in volume.

Keywords : *Abies holophylla*, progeny test, growth traits, heritability, genetic gain

서 론

전나무(*Abies holophylla* Max.)는 우리나라 고산지대에 자생하는 수종으로 국립산림과학원에서는 조림에 소요되는 우량종자를 공급하기 위하여 생장이 우수한 수형목을 선발하였다. 선발된 수형목으로부터 품매종자를 채취·양묘하여 조성한 실생묘 채종원과 접목·증식한 접목묘 채종원 12 ha를 조성하였고, 채종원에서 1997년 15 kg의 개량종자를 생산하였다. 또한 지금보다 좀 더 높은 개량효과를 얻기 위하여 품매차대검정 결과에 따라 불량하게 판명된 가계들을 채

종원에서 유전간벌을 실시할 계획이다.

차대검정 결과에 의해 선발된 수형목은 지속적으로 개량하기 위한 전진세대의 실질적인 재료로 이용되며 이들 수형목에 대한 주요 특성의 유전력과 개량효과 등의 유전모수는 선발육종계획을 수립하는데 기본이 되는 것이다(Zobel and Talbert 1984; Han et al. 2007a, 2007b). 생장에 대한 유전력은 많은 수종에서 조사되었는데, 형질, 수령, 지역에 따라 차이가 난다. Matziris(2000)는 *Pinus halepensis*에서 지역에 따라 개체유전력은 수고가 0.42~0.57, 직경이 0.26~0.48, 재적이 0.33~0.58로 차이가 있다고 보고하였고, Han(1993)

은 잣나무에서 10년생때 수고생장에서 3개 지역 및 이를 종합한 분석에서 가계간에는 고도의 유의차가 나타났다고 하였으며, 개체와 가계유전력이 0.242~0.673과 0.418~0.753으로 비교적 높게 나타났다고 하였다. Ahn and Lee(1994)와 Ahn et al.(1994)는 전나무 수형목 품매차대의 수고, 엽, 동아특성을 조사하여 가계간에 수고에서는 고도의 유의성이 보였으나, 엽폭과 정아길이는 유의차가 나타나지 않았다고 보고하였고, 가계유전력은 0.38~0.60으로 비교적 높게 추정되었다고 하였다. 또한 전나무 차대의 수고와 비중은 가계간에 유의차가 나타났으나, 흉고직경과 가도관 길이 및 폭은 유의차가 없었다. 가계유전력은 수고가 0.55로 비중 0.44와 흉고직경 0.25보다 높게 추정되었다고 하였다.

이러한 차대검정결과로 Han et al.(2007a)이 해송에서 수고, 직경, 재적생장에 대한 가계별 순위를 정하여 개량효과를 추정하였으며, Kang et al.(2005)은 해송 차대의 성장과 클론별 개화 특성을 채종원에 적용하여 유전간별에 의한 개량효과와 유전적 다양도를 여러 단계별로 추정하여 효율적인 채종원 관리방안을 제시하였다.

본 연구는 전나무 수형목 차대의 성장특성을 조사하여 분산성분, 유전력, 개량효과 등을 추정하여 채종원에서 유전간별하는데 필요한 가계 정보를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구에 사용된 시험목을 생산하기 위하여 강원도(KW), 경기도(GG) 및 경상북도(GB)에서 선발된 전나무 수형목 32본으로부터 1988년 가을에 품매 종자를 채취하였다. 또한, 비교목(GG-C)은 경기도에서 선발된 수형목 주위의 일반목으로부터 종자를 채취하여 사용하였다.

채취한 종자는 1989년 봄에 국립산림과학원 산림유전자원부 묘포장에 파종하였고 이듬해에는 거치하였다가 1991년 4월에 이식하여 3년간 거치하였다가, 1994년 봄에 5년생(2-3) 묘목을 경기도 화성시 매송면 어천리(위도: N37°16'19", 경도: E126°55'33", 해발고: 67 m)와 강원도 강릉시 왕산면 대기리(위도: N37°34'50", 경도: E128°48'30", 해발고: 965 m)에 식재하였다. 식재방법은 가계별로 최소 2본에서 8본까지로 난괴법 3반복, 1.8 m×1.8 m 간격으로 열 식하였다.

자료 수집 및 통계분석

시험목은 15년생때인 2003년 가을에 수고(H) 및 흉고직경(DBH)을 측정하였고 수고와 직경 성장량으로부터 재적지수($H \cdot D^2$)를 산출하였다.

본 연구에서 조사된 2개 시험지의 성장 특성을 분석한 수학적 모형은 다음과 같다(Zobel and Talbert 1984; Xie et al. 2007).

$$X_{ijk} = \mu + R_i + F_j + RF_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

즉, X_{ijk} = i 번째 반복에서 j 번째 가계의 k 번째 나무의 성장량, μ = 전체 평균 성장량, R_i = i 번째 반복의 고정효과, F_j = j 번째 가계의 임의효과, RF_{ij} = i 번째 반복과 j 번째 가계간의 상호작용효과, ε_{ijk} = 오차항이다.

2개 지역을 종합하여 성장 특성을 분석한 수학적 모형은 다음과 같다(Wright 1976; Xie et al. 2007).

$$X_{ijkl} = \mu + S_i + R_{ij} + F_k + SF_{ik} + RF_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

즉, X_{ijkl} = i 번째 지역에서 j 번째 반복의 k 번째 가계의 l 번째 나무의 성장량, μ = 전체 평균 성장량, S_i = i 번째 지역의 고정효과, R_{ij} = i 번째 지역의 j 번째 반복의 고정효과, F_k = k 번째 가계의 임의효과, SF_{ik} = i 번째 지역과 k 번째 가계간의 상호작용효과, RF_{ijk} = i 번째 지역에서 j 번째 반복과 k 번째 가계간의 상호작용효과, ε_{ijkl} = 오차항이다.

지역별 분석(Zobel and Talbert 1984)에 의한 개체 및 가계 유전력은 다음 식에 의하여 추정하였다.

$$h_i^2 = \frac{4\sigma_F^2}{\sigma_W^2 + \sigma_{FB}^2 + \sigma_F^2}, \quad h_j^2 = \frac{\sigma_F^2}{\sigma_W^2/TR + \sigma_{FB}^2/R + \sigma_F^2}$$

즉, σ_F^2 = 가계 분산, σ_W^2 = 오차 분산, σ_{FB}^2 = 가계×반복 상호작용 분산, T = 반복내 개체수, R = 반복수이다.

종합 분석(Wright 1976)에 의한 개체 및 가계유전력 추정은 다음과 같이 수행하였다.

$$h_i^2 = \frac{4\sigma_F^2}{\sigma_W^2 + \sigma_{FB/S}^2 + \sigma_{FS}^2 + \sigma_F^2}, \quad h_j^2 = \frac{\sigma_F^2}{\sigma_W^2/NBS + \sigma_{FB/S}^2/BS + \sigma_{FS}^2/S + \sigma_F^2}$$

즉, σ_F^2 = 가계 분산, σ_W^2 = 오차 분산, $\sigma_{FB/S}^2$ = 조림지내 가계×반복 상호작용 분산, σ_{FB}^2 = 가계×조림지 상호작용 분산,

N = 플롯내 개체수, B = 지역내 반복수, S = 검정립 수이다. 실질적인 개량효과는 Matziris(2000, 2005)의 방법에 의해 추정하였다.

통계분석은 SAS System for Windows, Version 8.01(SAS Institute, USA)을 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

성장 및 유전력 추정

화성과 강릉 식재지에서 전나무 수형목 품매차대 32가계의 수고, 흉고직경 및 재적지수는 Table 1과 같다. 화성 식재지에서는 32가계의 평균수고가 185 cm(± 44.4), 흉고직경은 4.98 cm(± 1.23), 재적지수는 5550(± 3668)로 나타났는데 비하여 강릉 식재지에서는 평균수고가 222 cm(± 50.2), 흉고직경은 6.56 cm(± 1.38), 재적지수는 11031(± 6729)로 나타났으며 2개 식재지를 종합하면 평균수고가 204 cm(± 48.2), 흉고직경은 5.78 cm(± 1.31), 재적지수는 8317(± 5437)로 나타났다.

성장특성은 전반적으로 강릉 식재지가 양호한 것으로 나타났다. 이것은 해발고가 965 m로 고지대이며 토양조건도 비교적 전나무가 생육하기에 적합한 지역이기 때문으로 판단된다.

화성과 강릉 식재지에서 성장특성에 대한 분산분석을 한

Table 1. Height, DBH and volume index for 32 open-pollinated families in each plantation

Plantation	Height (cm)	DBH (cm)	Volume index
<i>Hwaseong</i>			
Mean	185	4.98	5550
S.D. (\pm)	44.4	1.23	3668
C.V. (%)	24.0	24.6	66.1
Range	144~228	3.56~6.66	2165~11321
<i>Gangneung</i>			
Mean	222	6.56	11031
S.D. (\pm)	50.2	1.38	6729
C.V. (%)	22.6	21.1	61.0
Range	162~276	5.12~7.85	5781~17922
<i>Combined</i>			
Mean	204	5.78	8317
S.D. (\pm)	48.2	1.31	5431
C.V. (%)	23.3	22.6	65.3
Range	170~234	4.67~6.90	4645~12881

결과는 Table 2와 같다. 가계간에는 전반적으로 생장이 불량하였던 화성에서 성장특성이 유의차가 없는 것으로 나타났으나 생장이 비교적 양호하였던 강릉에서는 고도의 유의차가 나타났다.

반복간에는 생장이 전반적으로 우수하게 나타난 강릉에서 차이가 크게 나타났으나 생장이 불량하였던 화성에서는 수고생장이 유의차를 보이지 않았다. 그러나 유전과 환경 상호작용에서는 화성에서는 고도의 유의차가 인정되어 반복에 따라 가계간 차이가 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 해송과 소나무에서도 나타나는 일반적인 결과라 할 수 있다(Han et al. 2007a, 2007b).

또한 화성과 강릉 두 식재지를 종합하여 분산분석한 결과는 Table 3과 같다. 이 결과는 Table 1에서 나타난 것과

Table 2. Analysis of variance for height, DBH and volume index in each plantation

Source of variation	df	Mean squares		
		Height	DBH	Volume index
<i>Hwaseong</i>				
Replications	2	7226 ^{NS}	13.38 [*]	129512606 [*]
Families	31	4723 ^{NS}	3.83 ^{NS}	35928084 ^{NS}
Rep \times Fam	57	3769 ^{**}	3.50 ^{**}	31319526 ^{**}
Within plot	317	1980	1.50	13460307
<i>Gangneung</i>				
Replications	2	125960 ^{**}	12.34 ^{**}	1083978860 ^{**}
Families	31	8859 ^{**}	6.68 ^{**}	137702217 ^{**}
Rep \times Fam	60	3813 [*]	2.11 ^{NS}	44767504 ^{NS}
Within plot	415	2525	1.91	45334350

^{**}, ^{*} and NS indicate significance at the 1%, 5% level and non-significance, respectively.

Table 3. Combined analysis of variance for height, DBH and volume index of two plantations

Source of variation	df	Mean squares		
		Height	DBH	Volume index
Sites	1	169336 ^{**}	355.19 ^{**}	3740357841 ^{**}
Rep/Site	4	66592 ^{**}	12.86 ^{**}	606745733 ^{**}
Families	31	8618 ^{NS}	7.86 ^{**}	117221699 [*]
Fam \times Site	31	4886 ^{NS}	2.37 ^{NS}	51661416 ^{NS}
Fam \times Rep/Site	117	3791 ^{**}	2.79 [*]	38215925 [*]
Within plot	639	2255	1.71	29522031

^{**}, ^{*} and NS indicate significance at the 1%, 5% level and non-significance, respectively.

같이 지역간에는 모든 특성이 고도의 유의차를 보였으며, 가계간에는 흉고직경과 재적지수가 유의차가 큰 것으로 나타났다. 그러나 가계와 지역 상호작용간에는 모든 특성에서 유의차가 나타나지 않아 화성과 강릉 식재지에서 가계별 생장 패턴이 유사한 경향을 보인 것이다. 이것은 Matziris(2005)가 *Pinus nigra*에서, Ladrach and Lambeth(1991)가 *Pinus patula*에서, Han et al.(2007a)이 해송에서 고찰한 것처럼 가계의 순위가 약간의 차이가 있으나 생장이 양호한 것은 상위에, 불량한 것은 하위에 나타난다는 것을 의미하는 것이다.

이러한 분산분석 결과를 토대로 화성과 강릉 식재지에서 분산성분, 개체 및 가계유전력을 추정한 결과는 Table 4와 같다. 분산성분중 유전분산성분은 강릉 식재지가 화성 식재지보다 수고, 흉고직경 및 재적지수에서 전체적으로 크게 나타나 유전력이 높게 추정되었다. 또한 개체 및 가계 유전력은 화성식재지에서 수고는 0.121~0.202, 직경에서 0.054~0.089, 재적은 0.08~0.128로 비교적 낮게 추정되었고, 강릉에서는 수고가 0.485~0.570, 직경은 0.611~0.684, 재적은 0.538~0.675로 비교적 높게 추정되었다. 이러한 결과는 Han et al.(2007b)이 소나무 28년생 차대검정결과 직경의 가계유전력이 0.36~0.47로 수고의 가계유전력 0.17~0.27보다 높게 추정되었다는 것과 유사하였으나, Zobel and Talbert(1984)가 수고가 직경생장보다 유전력이 높다는 일반적인 경향과는 반대의 결과를 나타내었으나 수종, 수령 및 특성간의 차이에 따라 나타난 결과라 할 수 있다. 또한 모든

Table 4. Variance components and heritabilities for height, DBH and volume index in each plantation

Plantation	Height	DBH	Volume index
<i>Hwaseong</i>			
σW^2	1980	1.5	13460307
σFR^2	421.7	0.469	4212079
σF^2	75	0.026	362308
hi^2	0.121	0.054	0.080
hf^2	0.202	0.089	0.128
<i>Gangneung</i>			
σW^2	2525	1.91	45334350
σFR^2	298	0.046	-
σF^2	389	0.352	7170888
hi^2	0.485	0.611	0.538
hf^2	0.570	0.684	0.675

특성에서 개체 유전력(0.054~0.611)보다 가계유전력(0.089~0.684)이 높게 추정되었다. 그러나 Beaulieu et al.(1990)은 *Abies balsamea*에서 다르게 나타났다고 하였는데 이는 Zobel and Talbert(1984)가 지적한 것처럼 한 장소에서 시험이 수행되어 환경분산이 적게 나타났기 때문이라 생각된다.

화성과 강릉 두 식재지를 종합하여 유전력을 추정할 결과는 Table 5와 같다. 개체유전력이 수고에서는 0.204, 직경이 0.326 재적이 0.238로 보통 정도의 값을 보였으며, 가계유전력은 0.433~0.723으로 비교적 높게 추정되었다. 이러한 결과는 가계유전력은 많은 차대로부터 얻어진 평균에 의하여 계산되기 때문에 개체유전력보다 높게 나타나 일반적인 경향을 보인 것이다.

개량효과 추정

화성과 강릉 두 식재지에서 가계별 수고, 직경 및 재적지수에 대한 순위는 Fig. 1과 같다. 평균 생장이 우수한 가계는 수고에서 강원15, 경기4, 경북25, 강원1, 경북24호 순으로, 흉고직경은 경북25, 경기4, 경기1, 경북2, 경북31호 순으로, 재적지수는 경기4, 경북25, 경북2, 경기1, 강원15호 순으로 나타났다. 반면에 생장이 불량한 가계는 수고에서 경북7, 경북34, 강원32, 강원16, 경북22호 순으로, 흉고직경은 경북7, 경북37, 강원30, 경북13, 경북34호 순으로, 재적지수는 경북7, 경북37, 경북13, 강원30, 경북34 순으로 나타났다. Han et al.(2007a)이 해송에서 차대검정 결과 가계별 순위를 정하여 우수하고 불량한 가계들을 구분하였으며, Kang et al.(2005)은 차대검정 자료와 개화특성을 고려하여 개량효과와 유전다양도를 추정하였는데 여기서 재적생장이 불량한 가계는 채종원에서 우선적으로 유전간별하여 개량효과를 극대화하여야 할 것이다.

Table 5. Variance components and heritabilities estimated from the combined analysis for height, DBH and volume index of two plantations

	Height	DBH	Volume index
σW^2	2254	1.707	29522031
$\sigma FR/S^2$	359	0.252	2031283
σFS^2	85	-	840343
σF^2	145	0.171	2048758
hi^2	0.204	0.326	0.238
hf^2	0.433	0.723	0.570

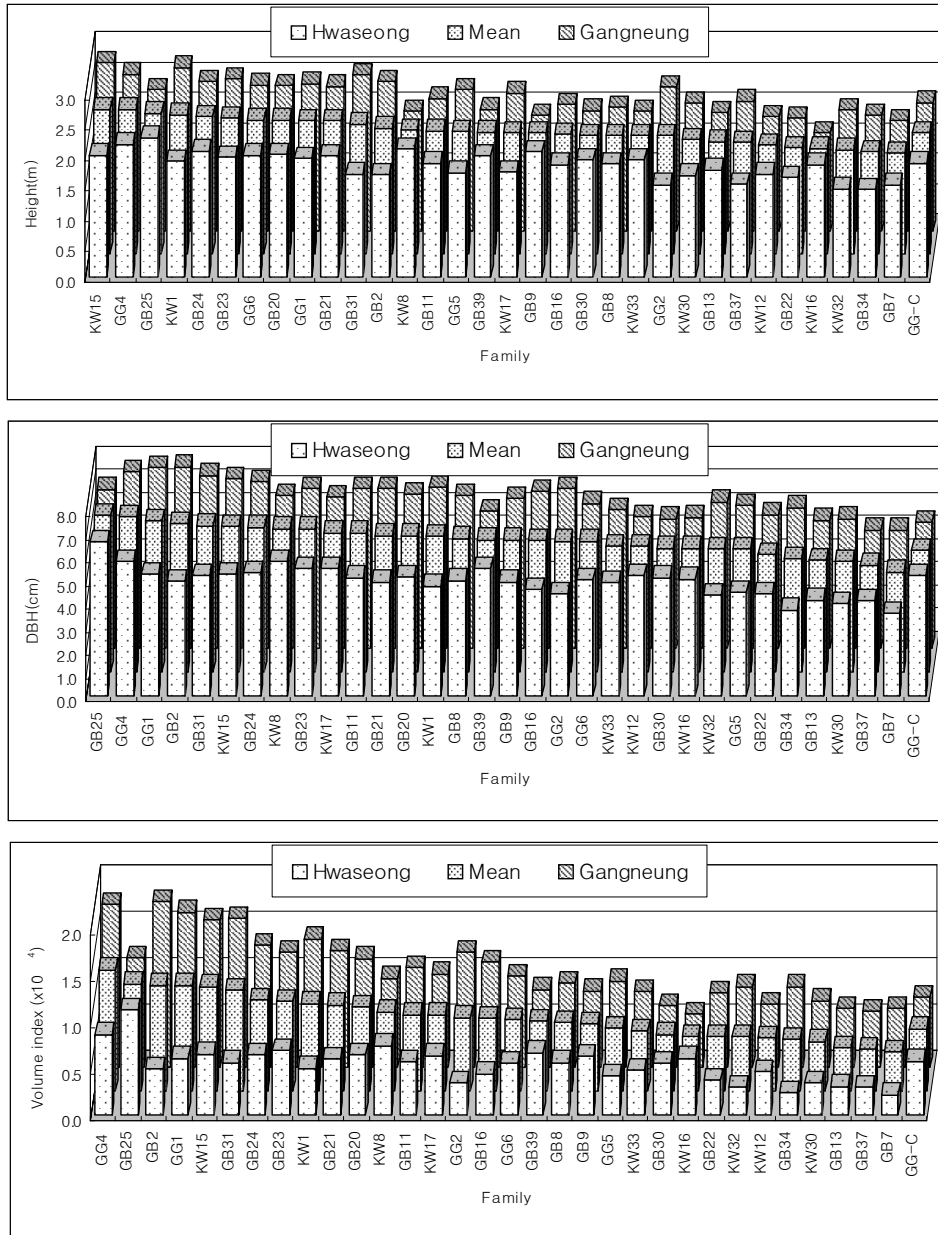


Fig. 1. Growth performance of the progenies which were planted on two testing sites at age of 15.

* KW, GG, GB and GG-C indicate Kangwon, Gyeonggi, Gyeongbuk and Gyeonggi-control, respectively.

일반적으로 선발육종계획에서 실질적인 개량효과는 개량된 재료(선발된 수형목)와 개량되지 않은 재료(일반목)를 비교하여 추정하는 것이다(Zobel and Talbert 1984; Dhakal et al. 1996). 개량효과는 차대검정 결과에 의하여 전진세대 채종원으로 유도하는데 있어 선발강도 등에 따라 달라지는데 이러한 선발 강도별 실질적인 개량효과는 Table 6과 같다. 32가계의 평균수고는 204 cm, 흉고직경은 5.78 cm, 재적지수는 8317로 각각 나타났으며 비교목은 수고가 199 cm, 흉

고직경이 5.29 cm, 재적지수가 6731로 나타나 일반목보다 수형목에서 채취된 종자가 수고에서 2.5%, 흉고직경에서 9.2%, 재적지수에서 23.6% 우수하게 나타났다. 또한 Kang et al.(2005)이 해송채종원에서 유전간별한 것처럼 전나무 채종원에서 Fig. 1과 같이 생장이 불량하게 나타난 16가계 (50%)를 유전간별하면 얻을 수 있는 실질적인 개량효과는 수고에서 9.5%, 흉고직경에서 17.0%, 재적지수에서 46.8%였다. 이것은 Matziris(2005)가 *Pinus nigra*에서 20% 유전

Table 6. Average and realized genetic gains estimated for selection intensity at the age of 15

	Height (cm)	DBH (cm)	Volume
overall mean (ΔG , %)	204 (2.5)	5.78 (9.2)	8317 (23.6)
50% selection (ΔG , %)	218 (9.5)	6.19 (17.0)	9882 (46.8)
control	199	5.29	6731

간별하여 얻은 실질적인 개량효과 수고 2%, 직경 3%, 재적 8% 보다 아주 높았으며, Han et al.(2007a)이 해송에서 50% 선발하여 얻은 실질적인 개량효과 수고 15.2%, 흉고직경 38.3%, 재적 104.3%보다는 낮게 추정되었다. 그러나 이러한 결과는 수종, 형질, 수령 또는 가계에 따라 달리 나타날 수 있으며, 비교목으로 사용된 일반목의 특성에 따라 달리 나타나므로 지속적인 관찰이 필요할 것으로 생각된다.

요 약

전나무 수형목에서 채취한 품매종자 32가계를 이용하여 1994년 화성과 강릉 식재지에 차대검정림을 조성하였다. 15년생 때 수고, 흉고직경, 재적지수를 조사한 결과 전반적인 생장은 강릉식재지가 화성식재지보다 양호하게 나타났다. 강릉과 화성 식재지에서 성장특성에 대한 분산분석을 한 결과 가계간에는 생장이 양호하였던 강릉에서 모든 특성이 고도의 유의차를 나타냈으나 화성에서는 유의차가 나타나지 않았다. 반복간에는 화성에서 수고생장을 제외한 모든 특성에서 고도의 유의차가 나타났다. 그러나 가계×반복 상호작용에서는 강릉에서 흉고직경과 재적지수에서만 유의차가 나타나지 않았다. 또한 2개 식재지를 종합분석한 결과는 수고를 제외한 모든 특성에서 지역, 가계간에 고도의 유의차가 인정되었다. 그러나 지역×가계 상호작용간에는 유의차가 나타나지 않아 강릉과 화성 식재지에서 가계별 성장양상이 유사한 경향을 보였다. 개체유전력은 강릉에서 수고가 0.485, 흉고직경이 0.611, 재적이 0.538로 나타났으며, 화성에서는 수고가 0.121, 흉고직경이 0.054, 재적이 0.080으로 추정되었다. 2개 식재지를 종합한 유전력은 수고가 0.204, 흉고직경이 0.326, 재적이 0.238로 추정되었다. 또한 모든 특성에서 개체유전력이 0.054~0.611로 가계유전력 0.089~0.723보다 낮게 추정되었다. 개량된 채종원산과 일

반산 차대의 성장특성에 대한 실질적인 개량효과를 비교한 결과 선발된 수형목 차대들의 개량효과는 수고 2.5%, 흉고직경 9.2% 및 재적 23.6%로 추정되었다. 클론의 50%를 선발하면, 즉 생장이 불량한 50%가 채종원에서 유전간별되면 수고 9.5%, 흉고직경 17.0% 및 재적 46.8%가 개량되는 것으로 추정되었다.

인 용 문 헌

- Ahn, J.K. and W.Y. Lee. 1994. Heritabilities of height, needle and winter bud characters in open-pollinated progenies of *Abies holophylla* Max. Res. Rep. For. Gen. Res. Inst. Korea 30: 18-23.
- Ahn, J.K., W.Y. Lee, D.G. Jo and D.S. Son. 1994. Heritabilities of growth and wood quality characters in open-pollinated progenies of *Abies holophylla* Max. Jour. Korean For. Soc. 83(4): 480-485.
- Beaulieu, J., A. Coriveau and G. Daoust. 1990. Genetic parameters and expected gains in balsam fir. Information Report LAU-X-95E, Quebec Region, Forestry Canada. 24pp.
- Dhakal, L.P., T.L. White and G.R. Hodge. 1996. Realized genetic gain from slash pine tree improvement. *Silvae Genet.* 45(4): 190-197.
- Han, S.U. 1993. Genetic parameters and genetic gains for height growth through progeny tests of plus trees of *Pinus koraiensis*. Ph.D. Thesis, Kangwon Nat'l Univ., Korea. 94pp.
- Han, S.U., K.S. Kang, B.H. Cheon and C.S. Kim. 2007a. Realized genetic gains and heritabilities for height, DBH and volume growth in open-pollinated progenies of *Pinus thunbergii*. *Korean J. Breed. Sci.* 39(1): 15-19.
- Han, S.U., C.Y. Oh, C.S. Kim, Y.J. Kim, K.N. Kang and S.M. Lee. 2007b. Time trends for genetic parameters of growth traits in open-pollinated progenies of *Pinus densiflora*. *Korean J. Breed. Sci.* 39(4): 457-563.
- Kang, K.S., D. Lindgren, T.J. Mullin, W.Y. Choi and S.U. Han. 2005. Genetic gain and diversity of orchard crops under alternative management options in a clonal seed orchard of *Pinus thunbergii*. *Silvae Genet.* 54(3): 93-96.
- Ladrach, W.E., and C. Lambeth. 1991. Growth and heritability estimates for a seven-year-old open-pollinated *Pinus patula* progeny test in Colombia. *Silvae Genet.* 40(5-6): 169-173.
- Matziris, D.I. 2000. Genetic variation and realized genetic gain from Aleppo pine tree improvement. *Silvae Genetica* 49(1): 5-10.
- Matziris, D.I. 2005. Genetic variation and realized genetic gain from Black pine tree improvement. *Silvae Genet.* 54(3): 96-104.
- Wright, J.W. 1976. Introduction to forest genetics. Academic Press. 463pp.
- Xie, C.Y., M.R. Carlson and J.C. Murphy. 2007. Predicting individual breeding values and making forward selections from open-pollinated progeny test trials for seed orchard establishment of interior Lodgepole pine (*Pinus contorta* ssp. *latifolia*) in British Columbia. *New Forests* 33: 125-138.
- Zobel, B. and J. Talbert. 1984. Applied forest tree improvement. John Wiley & Sons, Inc. New York. 505pp.