

濟州道 리기다 및 리기테다 採種園에서 푸사리움가지마름병 被害度 調査 및 病原性 菌株選抜

禹官洙^{1*} · 金榮中² · 金泰壽¹ · 李承奎³

¹국립산림과학원 산림유전자원부, ²국립산림과학원 산림종자연구소,
³국립산림과학원 산림환경부

Selection of Virulent Isolates of *Fusarium circinatum* and Investigation of Pitch Canker Severity of *Pinus rigida* and *P. rigida* x *P. taeda* Seed Orchards in Jeju Island

Kwan-Soo Woo^{1*}, Young-Joung Kim², Tae-Su Kim¹ and Seong-Kyu Lee³

¹Department of Forest Genetic Resources, Korea Forest Research Institute, Suwon 441-350, Korea

²Forest Seed Research Center, Korea Forest Research Institute, Chungju 380-941, Korea

³Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요 약: 제주도에 조성한 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill.), 리기테다소나무(*Pinus rigida* x *P. taeda*) 채종원내 조성년도가 다른 6개 식재지에서 푸사리움가지마름병(pitch canker) 피해를 입은 지 7년째 되는 잔존 임목의 피해를 개체별로 판정하여 채종원 및 수종간 피해도 차이를 비교하였으며 이들 중 표현형에 의해 선발한 내병성, 이병성 선발목의 반형매 차대 2년생 묘목을 리기다소나무와 해송(*P. thunbergii* Parl.)에서 분리한 푸사리움가지마름병균(*Fusarium circinatum*)으로 인공접종 한 뒤 기주의 감염성 여부를 검정하였고 균주들의 병원성 여부를 확인하였다. 조사한 특성 중 두 채종원(상호, 한남)내 리기테다소나무 4 식재지간에 SC(줄기깨양)에서 통계적 유의성($\chi^2=7.76$; $P=0.05$)이 있는 것으로 나타났다. 상호채종원내에서 리기다소나무가 리기테다소나무에 비해 수관피해도(top kill)와 가지끝 마름증상(branch tip symptoms)에서 피해도가 높은 것으로 나타났다. 인공접종 결과 내병성 후보목 차대가 이병성 후보목 차대에 비해 14% 높은 고사율을 보였는데, 이는 화분수의 영향이나 표현형에 의한 후보목 선발에서 온 결과로 사료된다. 처리균주 5개 중 C-6-L(9)과 C-6-L(19) 균주가 각각 68%, 60%의 고사율을 보여 차후 추진할 대규모 인공접종용 균주로 사용할 수 있을 것이다. 인공접종 실험을 통해 1차 선발된 내병성 후보목 개체들은 푸사리움가지마름병 저항성 품종 육종을 위한 유전적, 생화학적 기초 연구에 유용한 재료로 이용 될 수 있을 것으로 본다.

Abstract: This study was undertaken to compare and estimate the severity of pitch canker of individual trees of *Pinus rigida* and *Pinus rigida* x *P. taeda* in two seed orchards in Jeju island, in which the orchards have been damaged by the pitch canker for seven years. Wind-pollinated two-year-old seedlings of *P. rigida* and *P. rigida* x *P. taeda*, in which the seedlings of *P. rigida* x *P. taeda* were from seeds of phenotypically selected, uninfected(but untested) trees, were inoculated with the pathogenic fungus, *Fusarium circinatum*, isolated from *P. rigida* and *P. thunbergii*. The virulence of the isolates was also identified. Statistically significant difference was found in 'stem cankers'(SC; $\chi^2=7.76$, $P=0.05$) among 4 plantations of *P. rigida* x *P. taeda* of two seed orchards. *P. rigida* was higher in 'top kill' (TK) and 'branch tip symptoms' (BT) than those of *P. rigida* x *P. taeda*. In artificial inoculation tests, mortality of the seedlings from the resistant candidates was 14% higher than that of the seedlings from the susceptible candidates. This result may be caused by unknown pollen trees and/or candidate tree selection based only on phenotype. Two of five fungal isolates, C-6-L(9) and C-6-L(19), showed significantly higher mortality (68% and 60%, respectively) than others, suggesting that these isolates can be used as virulent isolates for a mass artificial inoculation. Resistance candidate seedlings that were selected from this study can be utilized as useful materials for fundamental studies of genetics and biochemistry to breed resistance varieties to pitch canker.

Key words : *Pinus rigida* x *P. taeda*, *Fusarium circinatum*, pathogenicity, artificial inoculation, mortality

*Corresponding author
E-mail: woo9431@foa.go.kr

서론

푸사리움가지마름병(pitch canker)은 1946년에 미국의 North Carolina에서 처음으로 보고 되었고(Hepting and Roth, 1946), 1970년대 중반에 Florida주에 있는 slash pine(*Pinus elliottii* Engelm.)에 큰 피해를 주면서 문제시되기 시작했다(Dwinell *et al.*, 1985). 그 이후 이 병의 원인균인 *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell [= *F. subglutinans* (Wollenweb. & Reinking) P.E. Nelson, T.A. Toussoun & Marasas f. sp. *pini* (Correll *et al.*)]은 1986년에 처음으로 California에 있는 Monterey pine(*Pinus radiata* D. Don)에서도 분리되었고 Aleppo pine(*P. halepensis* Mill.), Bishop pine(*P. muricata*), Italian stone pine(*P. pinea* L.)도 높은 고사율을 보였다(McCain *et al.*, 1987). 현재까지 이 병은 일본(Kobayashi and Muramoto, 1989), 남아프리카(Viljoen *et al.*, 1994), Mexico(Guerra-Santos, 1999)에서도 보고 되었고 국내에서는 1990년대 중반쯤에 인천 지역의 리기다소나무림에서 처음 발견(Lee *et al.*, 2000)된 이후 2004년 현재 전년도에 비해 피해가 7.4% 증가(최대 : 충남 20.5% 증가)하였다(국립산림과학원, 2004).

이 병원균의 이동경로를 밝히기 위한 체세포화합성(vegetative compatibility)이나 분자표지자(molecular markers)를 이용한 실험 결과 미국 남동부에서 발견된 푸사리움균들은 캘리포니아 그룹과 유사하며 일본에서 발견된 균들도 캘리포니아 것과 유사한 것으로 나타나 캘리포니아 집단은 미국 남동부에서 기원하였고 일본 집단은 미국

캘리포니아나 또는 미국 남동부에서 직접 유입된 것으로 추정하고 있다(Wikler and Gordon, 2000).

감염된 나무의 전형적인 증상은 가지의 끝부분이 마르면서 수간과 가지의 궤양부분에서 수지가 흐르며 수피를 제거하면 변재에 수지가 배어있다(Lee *et al.*, 2000). 가지의 끝이 마르는 것은 궤양 발생에 의한 도관의 기능 상실에 기인하며 감염목은 처음 가지끝이 노란색으로 되었다가 붉은색으로 변하며 결국 가지 끝 침엽이 모두 탈락하게 된다(Wikler *et al.*, 2003).

유전적으로 저항성을 보이는 개체들이 외국에서 보고가 되었는데 푸사리움가지마름병 피해가 심각한 *P. radiata* 집단 내에서 전혀 감염이 되지 않은 개체들이 발견되었고 이 개체들을 직접 인공 접종한 결과 이병성 개체들에 비해 병 진전도가 아주 느린 것으로 나타났다(Correll *et al.*, 1991; Gordon *et al.*, 1998b). 온실에서 어린 *P. radiata* 묘목을 인공 접종한 결과 병 피해에 개체별로 차이가 있음이 밝혀졌고(Schultz *et al.*, 1990; Gordon *et al.*, 1998b), *P. muricata*(Bishop pine) 천연 입분 내 개체들 간에도 푸사리움가지마름병에 대한 감염성에 큰 변이가 있는 것으로 보고 되었다(Schmale and Gordon, 2003). 그러나 국내에서는 아직 저항성개체 선발에 대한 보고가 없다.

본 연구의 목적은 푸사리움가지마름병 피해 최초발생 지역으로써 그 병해가 심각한 제주도에 조성된 리기다소나무와 리기테다소나무 채종원에서 푸사리움가지마름병 피해를 입은 지 7년째 되는 잔존 임목의 피해도를 개체별로 판정하여 수종별 차이를 비교 해석하고 이 곳에서

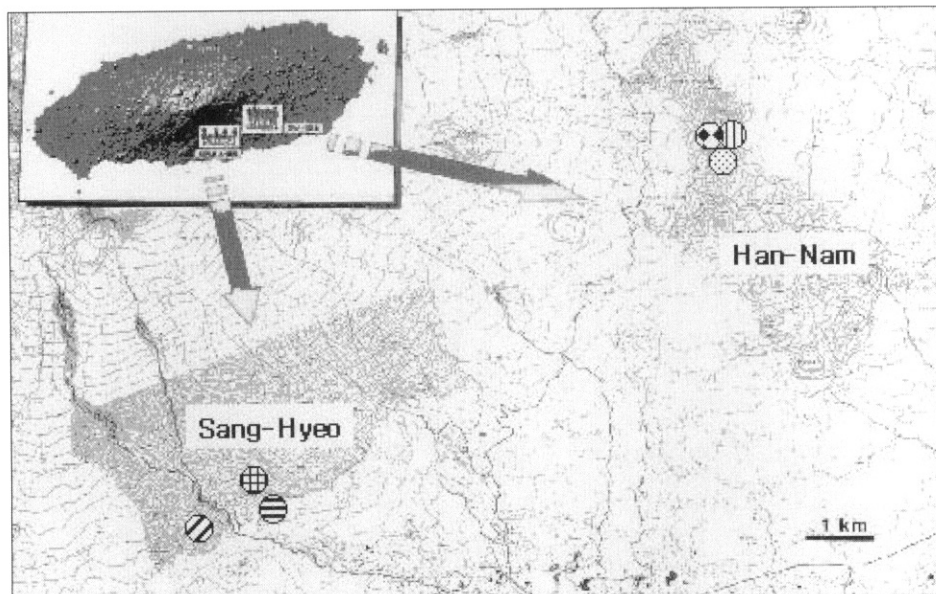


Figure 1. Geographic location of six plantations: three plantations (circles) in Sang-Hyeo and Han-Nam seed orchards, respectively in Jeju island.

선발된 내병성, 이병성 선발목 차대의 *F. circinatum*에 대한 감수성 여부를 인공접종을 통해 검정하고 차후 대규모 인공접종을 위해 병원성 균주를 확인하여 선발육종을 통한 푸사리움가지마름병 저항성 품종육종의 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 피해도 조사

푸사리움가지마름병 발생에 영향을 끼치는 요인들의 효과를 추정하기 위해 Storer *et al.*(2002)의 병 피해도 조사 방법을 적용하였다. 제주도 남제주군 남원읍 한남리 소재 한남채종원의 1978년, 1979년, 1981년에 조성한 리기테다 소나무와, 서귀포시 상호동 소재 상호채종원의 1972년, 1973년에 조성한 리기테다소나무, 1974년 조성한 리기테다 소나무를 포함한 총 6개 식재지에서 2003년 5월에 피해도를 조사하였다(Figure 1). 한남 채종원내 몇몇 조성지들은 동해피해 등 다른 요인에 의한 피해와 겹쳐서 본 조사에서 제외하였다. 채종원내 조성지들 간 거리는 2 km 이내 이었다. 상호채종원 조사 지역은 해발 530~600 m 사이로 평균 약 5° 정도의 남동사면에 위치하고, 한남채종원은 해발 약 640 m에 위치하며 경사가 거의 없거나 아주 완만하다. 이미 *F. circinatum*에 의해 많은 나무가 고사하여 유전적 배경을 고려하지 않고 각 조성연도별로 20본의 나무를 무작위로 선발하였으며, 단간작업을 하지 않은 나무만 포함시켰다. 개체별 피해도는 Table 1에 있는 3가지 방법에 따라 그 판정값(scores)을 낸 후 BT(branch tip symptoms)와 SC(stem cankers) matrix(Table 2)를 이용해서 피해도 '0(none)'에서 피해도 '심' 까지 결정하였다(Storer *et al.*, 2002).

Table 2. The matrix of pitch canker severity rate (Storer *et al.*, 2002).

Branch tip symptoms score ¹	Stem cankers score ²		
	0	1	2
0	None	Low	Moderate
1	Low	Low	Moderate
2	Moderate	Moderate	Severe
3	Severe	Severe	Severe

¹0=no branch tip dieback; 1= 1 or 2 dead branch tips; 2=3-10 dead branch tips; 3=>10 dead branch tips. ²0=no stem cankers; 1=1 stem canker; 2>=2 stem cankers.

2. 인공접종

제주 상호채종원에서 외형적 판단으로 내병성과 이병성 후보목을 2002년부터 선발하여 왔는데 그 중 리기테다 소나무 내병성 후보목 5호, 6호와 이병성 후보목 1호, 5호의 품매 차대 종자와 리기테다소나무(춘천에 있는 도입종) 품매 차대 종자를 채취하여 2003년에 파종, 양묘하여 2년생이 되는 2004년 9월 초에 인공접종을 실시하였다. 처리는 모두 6가지로 control 균주(비병원성)를 포함해 5개 접종 균주와 control(멸균수)을 처리하였다. G-5(17)와 G-6(19)은 해송에서 분리하였고 나머지는 리기테다소나무에서 분리하였다(Table 3). 각 가계당 30본씩(1처리 당 5나무) 모두 150본을 접종하였는데 Enebak과 Stanosz(2003)의 방법에 따라 묘목의 주간에 작은 상처를 낸 후 PDA(Potato Dextrose Agar) 배지 상에서 자란 균사 편을 직경 5 mm 채취 후 멸균 솜에 묻혀 부착 후 파라필름으로 감아준 뒤 약 2-3개월간 각 가계별 처리별 고사율을 조사하였다. 접종된 묘목들은 온실 내에 가계 및 처리별로 배치하였으며 조사기간 동안 최저, 최고 온도를 측정하였고, 관수 시에는 균을 처리한 부분에 물이 튀지 않도록 주의하였다.

Table 1. Pitch canker severity rating system for individual tree (Storer *et al.*, 2002).

Branch Tip Symptoms (BT)	Stem Cankers (SC)	Top Kill (TK)
0=No branch tip dieback	0=No stem cankers	0=No top canopy dieback
1=1 or 2 dead branch tips	1=1 stem canker	1=<10% top canopy dieback
2=3-10 dead branch tips	2>=2 stem cankers	2=10%-50% top canopy dieback
3=>10 dead branch tips		3=>50% top canopy dieback

Table 3. Characteristics of inocula used for artificial inoculation of pine seedlings.

Isolate	Region	Host	BT ¹	Color on PDA ²	Daily growth on PDA(cm)	dsRNA ³
A-11(4)	Yicheon, Kyeonggi	<i>P. rigida</i>	Pigmentation	Pink	3.1	+
C-6-L(9)	Hyenam, Cheonnam	<i>P. rigida</i>	"	Pink	3.2	+
C-6-L(19)	Hyenam, Cheonnam	<i>P. rigida</i>	"	None	4.4	+
G-5(17)	Jeju	<i>P. thunbergii</i>	"	Peach	3.3	+
*G-6(19)	Jeju	<i>P. thunbergii</i>	Clean Zone	Pale purple	7.3	-

¹Used as a control. ²Bavendamm medium test: pigmentation means virulent and clean zone means low-virulent. ³Potato dextrose agar. ⁺: Existence of double-stranded RNA; ⁻: nonexistence of double-stranded RNA.

3. 통계분석

두 채종원내 리기테다소나무 4 조성지의 각 rating 방법에 따른 피해도 차이 및 상호채종원내 리기다소나무와 리기테다소나무 간의 피해도를 SAS를 이용한 Nonparametric (Kruskal-Wallis Test) 방법으로 조사하였으며 구체적인 관계를 살펴보기 위해 lsmeans(Least-Squares Means) test를 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 피해도 및 병징 특성

두 채종원내 리기테다소나무 4 조성지의 피해도 조사결과 줄기케양(SC; stem canker)은 통계적 유의성($\chi^2=7.76$; $P=0.05$)이 있는 것으로 나타났으나, BT($\chi^2=0.12$; $P=0.99$)와 TK($\chi^2=3.94$; $P=0.27$)는 통계적 유의성이 나타나지 않았다(Table 4). 특히 SC는 병이 상당히 진행된 상태에서 나타나며 나무고사와 직접적으로 관련이 있으며(Storer et al., 2002), 투구벌레 일종인 *Ips* spp.나 *Pityophthorus* spp., *Conophthorus raidata* 같은 매개곤충에 의해 전염되기도 한다(Fox et al., 1991; Hoover et al., 1996). Lsmmeans 테스트 결과 상호채종원내 1978년 조성지가 1979년과 1981년 조성지와 각각 통계적 유의성(두 조성지 모두 $P=0.02$)이 있었으나 한남채종원의 1974년 리기테다소나무 조성지와는 유의성이 나타나지 않아($P=0.46$) 채종원내 SC 피해도 변이가 채종원간의 변이보다 큰 것으로 나타났다. 리기테다소나무의 SC에 대한 두 채종원간의 rank 평균은 한남채종원이 41.7이었고 상호채종원이 37.0으로 나타나 한남채종원 개체들이 상호채종원 개체들에 비해 SC는 더 많이 발생했으나 수관 상부의 피해나 가지끝마름 증상은 적은 것으로 나타났다. 상호채종원내 리기다소나무와 리기테다소나무 간에는 3가지 rating 방법 모두에서 통계적 유의성이 나타나지 않았으나(각각 BT: $P=0.07$;

SC: $P=0.06$; TK: $P=0.24$) BT와 SC의 p-value는 거의 근사치를 보여 조성지 간 lsmeans test결과 1972년 리기다소나무와 1974년 리기테다소나무가 BT에서 통계적 유의성이 있었으며($P=0.03$), SC에서는 1973년 리기다소나무와 1974년 리기테다소나무 간에 차이가 나타났다($P=0.02$). Wikler et al.(2003)은 푸사리움가지마름병의 피해도나 병의 확산은 입지환경과 지리적인 요인과 관련성이 있다고 보고하였는데 본 연구에서도 두 채종원 간의 푸사리움가지마름병에 의한 피해도 차이는 채종원의 입지 조건에 따른 국소 환경변이나 지리적 차이가 병원균의 기주 감염여부에 영향을 미친 것으로 본다. 즉 실제 푸사리움가지마름병균의 비산시기인 6~9월의 서귀포시 평균 온도가 지난 1999년에서 2003년까지 $22.2^{\circ}\text{C}\sim 27.2^{\circ}\text{C}$ 를 보였는데 상호채종원이 경사지에 위치하여 한남채종원에 비해 약 40~100 m 낮은 곳에 위치하므로 해발고 100 m에 약 1°C 온도차가 있는 것으로 감안할 때 약 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 높은 것으로 추정된다. 피해도와 연관성이 있는 것으로 사료되는 다른 입지적 요인과의 상관관계는 차후 추가적인 연구가 요구된다.

조사한 6개 조성지 전체 평균피해율은 78.5%로 그 피해 정도가 심각한 것으로 나타났으며 한남채종원 1978년과 1981년 리기테다소나무가 70%로 가장 낮은 피해율을 보였고 상호채종원 1972년 리기다소나무의 피해가 가장 심한(93%) 것으로 나타났다(Figures 2, 3). 임업연구원(2000) 보고에 나타난 내륙의 일반 임분 피해율은 4.5%~55% 인데 비해 채종원의 피해가 훨씬 심하다는 것을 알 수 있다. 이는 인공적으로 관리된 임분이 천연임분보다 더 심각한 피해를 받으며 더욱이 해상 쪽에 위치한 임분이 내륙에 위치한 임분에 비해 더 빠르게 병이 확산되므로(Wikler et al., 2003) 제주도라는 입지적 환경 조건이나 기후 조건과 연관성이 있는 것으로 추정된다. 특히, 채종원은 많은 관리가 요구되고 종자채취 등 인위적 활동이 많아 병원균의 이동을 더욱 심화시키는 것이 사실이다.

Table 4. Mean and standard deviations of the severity scores of pitch canker in individual trees evaluated by the three rating methods in six plantations of the two seed orchards.

Rating Method	Han-Nam Seed Orchard			Sang-Hyeo Seed Orchard			Test among					
	1978 RT mean (SD)	1979 RT mean (SD)	1981 RT mean (SD)	1972 R mean (SD)	1973 R mean (SD)	1974 RT mean (SD)	Test among RT			Sang-Hyeo plantations		
							χ^2	df	P-value*	χ^2	df	P-value**
BT	2.20 (1.06)	2.20 (1.20)	2.05 (1.32)	2.80 (0.70)	2.70 (0.73)	2.25 (1.07)	0.12	3	0.99	5.28	2	0.07
SC	0.15 (0.49)	0.55 (0.69)	0.55 (0.69)	0.05 (0.22)	0.00 (0.00)	0.30 (0.66)	7.76	3	0.05	5.70	2	0.06
TK	1.10 (1.21)	1.10 (0.91)	1.20 (1.20)	2.00 (1.12)	1.45 (1.00)	1.65 (0.93)	3.94	3	0.27	2.88	2	0.24

*P-values are tests of differences among 4 plantations of RT based on the Kruskal-Wallis test (Chi-square approximation).

**P-values are tests of differences among 3 plantations of Sang-Hyeo seed orchard. Scores were obtained by pitch canker severity rating system for individual trees (Table 1). RT- *P. rigida* x *P. taeda*, R- *P. rigida*.

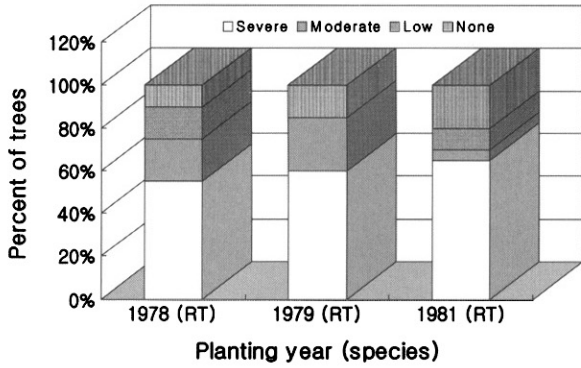


Figure 2. The severity of pitch canker in individual trees of *P. rigida* x *P. taeda* (RT) in Han-Nam seed orchard evaluated by the branch tip symptoms (BT) and stem cankers (SC) scores of Table 2.

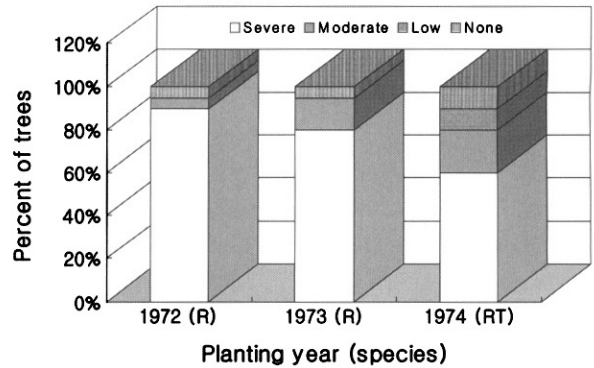


Figure 3. The severity of pitch canker in individual trees of *P. rigida* (R) and *P. rigida* x *P. taeda* (RT) in Sang-Hyeo seed orchard evaluated by the branch tip symptoms (BT) score and stem cankers (SC) score of Table 2.

채종원에서 푸사리움가지마름병에 대한 피해를 줄이기 위해서는 단간작업이나 지나친 가지치기 같은 작업을 줄여 병원균이 이동, 확산할 수 있는 여건을 줄여야 할 것으로 본다.

조사 임분의 수령(식재년도)별 3가지 방법에 대한 피해도는 뚜렷한 양상을 보이지 않았으며(Figures 2, 3), 상호 채종원에 있는 리기다소나무가 리기테다소나무에 비해 피해도가 TK와 BT에서 높게 나타났다. Storer *et al.*(2002)

이 *P. radiata* 개체의 푸사리움가지마름병 피해도를 판정할 때 사용한 BT와 SC matrix(Table 2)를 사용하여 판정한 결과에서도 같은 경향을 보였는데 리기다소나무가 리기테다소나무에 비해 피해도 “심”을 보인 개체가 훨씬 많은 것으로 나타났다(Figure 3). 임업연구사업보고서(임업연구원, 2000)에 있는 푸사리움가지마름병 피해를 계산방법을 통한 6개 연도별 조성지의 피해율은 Storer *et al.*(2002)의 방법에 의한 것과 유사한 결과를 보여 차후 *P.*

Table 5. Mortality of pine seedlings inoculated with several *Fusarium circinatum* isolates.

Species	Family	Date	Isolates					Control	Total
			G-6(19)	C-6-L(9)	C-6-L(19)	G-5(17)	A-11(4)		
<i>P. rigida</i> × <i>P. taeda</i>	R ¹ -5	Sept. 14	0 ³	0	0	0	0	0	9
		Oct. 4	0	3	4	0	2	0	
		Oct. 18	0	3	4	0	2	0	
		Nov. 15	0	3	4	0	2	0	
	R-6	Sept. 14	0	0	0	0	0	0	11
		Oct. 4	0	1	3	1	2	0	
		Oct. 18	0	2	4	1	3	0	
		Nov. 15	0	3	4	1	3	0	
	S ² -1	Sept. 14	0	0	0	0	0	0	4
		Oct. 4	0	1	1	0	0	0	
		Oct. 18	0	2	1	0	0	0	
		Nov. 15	0	3	1	0	0	0	
	S-5	Sept. 14	0	0	0	0	0	0	9
		Oct. 4	0	1	1	0	2	0	
		Oct. 18	0	3	2	0	4	0	
		Nov. 15	0	3	2	0	4	0	
<i>P. rigida</i>	54 ⁴	Sept. 14	0	0	0	0	0	0	12
		Oct. 4	0	2	2	0	1	0	
		Oct. 18	0	5	4	0	3	0	
		Nov. 15	0	5	4	0	3	0	
Total			0	17	15	1	12	0	

Inoculation date: September 10, 2004. ¹R-phenotypically resistant (uninfected) tree. ²S-phenotypically susceptible (infected) tree. ³The number of dead seedlings out of 5 until the date. ⁴Clone name of *P. rigida* introduced from USA.

*radiata*에 적용한 개체별 푸사리움가지마름병 피해도 판정 방법은 리기다소나무나 리기테다소나무의 개체별 피해도를 판정하는 데도 이용 될 수 있을 것으로 본다. 각 조성지에서 푸사리움가지마름병에 전혀 피해를 입지 않은(“None”) 개체가 몇 나무씩 있었는데(Figures 2, 3), 이는 물론 검정이 선행되어야 결론을 내릴 수 있으나 이 병에 대해 유전적으로 저항성을 보이는 개체가 있을 수 있고 푸사리움가지마름병에 대한 저항성 품종 육종의 가능성을 함축한다.

2. 인공접종에 의한 병원성 검정

각 균주별로 병원성이 뚜렷하게 구분되었는데 Control 균주(비병원성)인 G-6(19)과 멸균수만 처리한 control 묘목들은 접종 후 3개월이 지나도 고사율 0으로 전혀 감염 증상이 나타나지 않았다(Table 5). 전라남도 해남에서 분리한 C-6-L(9) 균주는 5개 가계 총 25본 중 17본을 고사시켜 68%의 고사율을 보였고 C-6-L(19) 균주는 60%의 고사율을 보여 차후 실시 할 대규모 인공접종 실험의 균주로 이용 될 수 있을 것으로 추정되며 경기도 이천에서 분리한 A-11(4) 균주(48% 고사율)도 감염성이 있는 것으로 나타났다. 제주도 곰솔 종자에서 분리한 G-5(17)는 리기테다소나무 선발목 내병 6호 중 1본만 고사시켜 인공접종을 위한 균주로서의 가치가 낮은 것으로 사료된다.

Bavendamm medium test 결과 착색이 되어 병원성이 있는 것으로 추정되는 A-11(4) 균주 등 4개 균주는 전체 가계 중 최소한 한 개체를 고사 시킨 것으로 나타났으나 기주에 따른 고사율 변이가 큰 것으로 보인다. 이러한 사실은 Barrows-Broadbush와 Dwinell(1985)의 연구에서도 나타났는데 푸사리움 균주 30개를 Virginia pine(*P. virginiana* Mill.)과 loblolly pine(*P. taeda*) 1년생 묘목에 인공접종한 뒤 8주 후에 감염성을 조사해보니 Virginia pine묘목들의 가지 고사율은 균주 간에 통계적 유의성이 있었으나, loblolly pine의 가지 고사율은 균주 간에 통계적 유의성이 나타나지 않았다.

내·이병성 후보목 차대들의 인공접종 결과 각 후보목 간에 고사율에 있어 차이가 나타났지만 후보목 특성(내병성 또는 이병성)과는 상이한 결과가 나타났다. 내병성 후보목 차대가 이병성 후보목 차대에 비해 고사율이 높게 나타났는데(Table 5), Control균주를 포함한 5개 균주에 대해 내병성 후보목 차대들은 40%(20/50)의 고사율을 보인 반면 이병성 후보목 차대들은 26%(13/50)만 고사하였다. 이러한 결과는 인공 접종한 차대들이 반형매 차대들이므로 화분수의 영향 때문이거나 후보목들을 표현형에 의해서만 선발한 것이므로 본 실험을 통해 일차적으로 검정이 된 것으로 추정된다. 실제 2002년 이후 피해 채종원을 모니터링 한 결과 내병성 후보목으로 선발한 것이 몇 년 뒤

에는 이병성으로 판명되어 결국 고사하는 개체목을 확인한 바 있다.

수종별로는 리기다소나무가 접종 후 38일째에 C-6-L(9) 균주에 의해 5그룹이 모두 고사하여 리기테다소나무에 비해 *F. circinatum*에 감수성이 강한 것으로 나타났다(Table 5). Gordon *et al.*(1998a)도 온실에서 3~4년생 소나무류 5수종을 인공 접종한 결과 수종간에 감수성에 변이가 있음을 확인하였고 가장 저항성이 강한 수종은 Japanese black pine(*P. thunbergiana* Franco)이었으며 가장 감수성이 강한 수종은 Monterey pine인 것으로 보고한 바 있다.

*F. circinatum*의 감염 경로와 병 진전도는 여러 요인들과 관련성이 있는데 미국 캘리포니아의 소나무 천연임지 내에서 발생한 푸사리움가지마름병은 곤충에 의해 병원균이 나무로 이전되는 것으로 보고 되었고(Hoover *et al.*, 1996) 국내에서도 긴알락꽃하늘소 등 9종의 곤충에서 *F. circinatum*이 분리되었는데(임업연구원, 2000), 제주도는 특히 태풍의 피해가 많아 푸사리움가지마름병 병원균의 비산시기인 6~9월 사이에 바람에 의해 나무에 상처가 발생하고 그 상처 부위로 감염이 주로 진행 되는 것으로 여겨지며, 매개충에 의한 병원균의 전이 여부는 차후 부가적인 연구가 요구된다.

인공접종 시 포자의 양과 병 발생 정도와는 무관한 것으로 보고 된 반면(Gordon *et al.*, 1998a), 온도와 관련한 푸사리움가지마름병의 진전도는 14~26°C에서 빠르게 진행되는 것으로 나타났다(McDonald, 1994). Gordon *et al.*(1998a)은 온실과 피해 임지 내에서 5 μl의 포자현탁액을 *P. radiata* 가지에 인공접종 한 결과 병 진전도에 있어 10~42°C 범위를 유지한 온실 내 처리목이 10~23°C의 피해 임지 내 처리목에 비해 훨씬 빠르게 진행됨을 확인하였다. 본 실험에서는 인공접종 후 약 65일간 3~43°C 범위로 평균 21.4°C를 유지하여 병 발생에 적합한 환경 하에 있었다.

본 연구에서는 천연 감염에 의해 심각한 피해를 입은 리기테다소나무 채종원에서 외형적으로 전혀 감염이 되지 않은 저항성 개체를 확인, 선발하였고 선발한 후보목 차대를 인공 접종하여 이 병원균에 저항성을 보이는 개체를 1차적으로 선발하였는데 Schmale과 Gordon(2003)은 *P. muricata* 천연 임분 내 건전한 12-13년생 나무 200개체를 3회에 걸쳐 인공접종을 실시하여 27%의 푸사리움가지마름병 저항성 개체를 선발한 바 있으며 인공접종 횟수가 증가할수록 감염정도가 줄어들었는데 이는 systemic induced resistance(SIR) 와 관련 있는 것으로 추정하였다.

푸사리움가지마름병 저항성 품종육성은 다수의 반복적인 인공접종을 통해 저항성 개체나 가계를 선발한 뒤 그들의 유전적 특성을 규명함으로써 성과를 거둘 수 있기 때문에 상대적으로 많은 시간이 요구된다. 따라서 본 인공접종 실험을 통해 선발 된 내병성 후보목 및 병원성 균주

는 차후 수행될 저항성 품종 육성 실험에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 본다.

결 론

푸사리움가지마름병이 발병한 지 7년째 되는 제주채종원(상호, 한남) 리기다소나무 및 리기테다소나무 6개 조성지의 평균피해율은 78.5%로 내륙지방의 다른 피해 임분에 비해 훨씬 심각한 것으로 나타났으며 이는 제주도 특유의 입지적 환경조건과 사람의 간섭이 많은 채종원 특성에 의해 병원균의 감염 및 확산의 여지가 상대적으로 많기 때문인 것으로 추정된다. 채종원내 리기테다소나무 4 조성지 간에 개체별 수간의 궤양발생(SC)에 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났으며 리기다소나무가 리기테다소나무에 비해 피해도가 더 심한 것으로 조사되었다. 피해율이 높은데도 불구하고 전혀 병징이 나타나지 않은 개체가 발견되었는데 이들은 escape(병회피)이거나 유전적으로 저항성을 가지는 진정한 저항성 개체일 가능성이 있어 부가적인 검정이 요구된다. 내·이병성 후보목 차대들은 *F. circinatum*으로 인공접종 한 결과 가계 간에 고사목수에 변이가 있는 것으로 나타났는데 내병성 후보목 차대가 이병성 후보목 차대에 비해 14% 높은 고사율을 보였다. 이러한 결과는 차대들의 병저항성 관련 유전자들의 반이 화분수와 연관이 있다는 사실과, 표현형에 의해 선별한 후보목의 내·이병성을 1차적으로 검정한 결과로부터 기인 한 것으로 추정된다. 인공접종 결과, 해송에서 분리한 균주가 리기다소나무에서 분리한 균주에 비해 병원성이 현저히 낮은 것으로 나타났으며 control 균주(비병원성)를 포함한 5개 균주 중 C-6-L(9)균주와 C-6-L(19)균주는 각각 68%, 60%의 고사율을 보여 대량인공접종 시 병원성 균주로 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구를 통해 1차적으로 저항성이 있는 것으로 확인된 개체들은 차후 부가적인 인공접종을 통해 저항성 여부를 재검정 후 푸사리움가지마름병 저항성 품종 육종 관련 연구에 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

감사의 글

내·이병성 후보목 관리를 해주시는 국립산림과학원 난대산림연구소 모든 직원 분들과 인공접종실험을 위해 균주를 분양해주신 서울시립대학교 김진원 교수님 그리고 실험 보조를 해주신 박주용 연구원께 깊은 감사를 드립니다.

인용문헌

1. 국립산림과학원. 2004. 연구사업보고서(산림환경 분야 5-

- 1) p. 309-342.
2. 임업연구원. 2000. 임업연구사업보고서(산림환경 분야 5-1) p. 323-332.
3. Barrows-Broadus, J. and Dwinell, L.D. 1985. Branch dieback and cone seed infection caused by *Fusarium moniliforme* var. *subglutinans* in a loblolly pine seed orchard in South Carolina. *Phytopathology* 75: 1104-1108.
4. Correll, J.C., Gordon, T.R., McCain, A.H., Fox, J.W., Koehler, C.S., Wood D.L. and Schultz, M.E. 1991. Pitch canker disease in California: pathogenicity, distribution, and canker development on Monterey pine (*Pinus radiata*). *Plant Disease* 75: 676-682.
5. Dwinell, L.D., Barrows-Broadus, J.B. and Kuhlman, E.G. 1985. Pitch canker: a disease complex of southern pines. *Plant Disease* 69: 270-276.
6. Enebak, S.A. and Stanosz, G.R. 2003. Responses of conifer species of the Great Lakes region of North America to inoculation with the pitch canker pathogen *Fusarium circinatum*. *Forest Pathology* 33: 333-338.
7. Fox, J.W., Wood, D.L. Koehler, C.S. and O'Keefe, S.T. 1991. Engraver beetles (Scolytidae: *Ips* species) as vectors of the pitch canker fungus, *Fusarium subglutinans*. *Canadian Entomology* 123: 1355-1367.
8. Gordon, T.R., Okamoto, D., Storer, A.J. and Wood, D.L. 1998a. Susceptibility of five landscape pines to pitch canker disease, caused by *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini*. *HortScience* 33(5): 868-871.
9. Gordon, T.R., Wikler, K.R., Clark, S.L., Okamoto, D., Storer, A.J. and Bonello, P. 1998b. Resistance to pitch canker disease, caused by *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini*, in Monterey pine (*Pinus radiata*). *Plant Pathology* 47: 706-711.
10. Guerra-Santos, J.J. 1999. Pitch canker in Monterey pine in Mexico. In *Current and Potential Impacts of Pitch Canker in Radiata Pine*. Proceedings of IMPACT Monterey Workshop, Monterey, Calif., 30 November-3 December 1998. Edited by M.E. Devey, A.C. Matheson, and T.R. Gordon. CSIRO, Australia. pp. 58-61.
11. Hepting, G.H. and Roth, E.R. 1946. Pitch canker, a new disease of some southern pines. *Journal of Forestry* 44: 742-744.
12. Hoover, K., Wood, D.L., Storer, A.J., Fox, J.W. and Bros, W.E. 1996. *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini*, to Monterey pine, *Pinus radiata*, by cone- and twig-infesting beetles. *Canadian Entomology* 128: 981-994.
13. Hoover, K., Wood, D.L., Storer, A.J., Fox, J.W. and Bros, W.E. 1996. Transmission of the pitch canker fungus, *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini* to Monterey pine, *Pinus radiata*, by cone- and twig-infesting beetles. *The Canadian Entomologist* 128: 981-994.
14. Kobayashi, T. and Muramoto, M. 1989. Pitch anker of *Pinus luchuensis*, a new disease in Japanese forests. *Forest Pests* 38: 169-173.

15. Lee, J.K., Lee, S.H., Yang, S.I. and Lee, Y.W. 2000. First report of pitch canker disease on *Pinus rigida* in Korea. The Plant Pathology Journal 16(1): 52-54.
16. McCain, A.H., Koehler, C.S. and Tjosvold, S.A. 1987. Pitch canker threatens California pines. California Agriculture 41: 22-23.
17. McDonald, M.J. 1994. Temperature effects on *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini* in infection on juvenile *Pinus radiata* (Monterey pine) and influence on growth of *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini* isolates from California and Florida. San Jose, California, USA: San Jose State University, MS Thesis.
18. Schmale, D.G. and Gordon, T.R. 2003. Variation in susceptibility to pitch canker disease, caused by *Fusarium circinatum*, in native stands of *Pinus muricata*. Plant pathology 52: 720-725.
19. Schultz, M.E., Gordon, T.R. and McCain, A.H. 1990. Resistance of Monterey pine (*Pinus radiata*) to pitch canker caused by *Fusarium subglutinans* (abstract). Phytopathology 80: 977.
20. Storer, A.J., Wood, D.L. and Gordon, T.R. 2002. The epidemiology of pitch canker of Monterey pine in California. Forest Science 48(4): 694-700.
21. Viljoen, A., Wingfield, M.J. and Marasas, W.F.O. 1994. First report of *Fusarium subglutinans* f. sp. *pini* on pine seedlings in South Africa. Plant Disease 78: 309-312.
22. Wikler, K. and Gordon, T. 2000. An initial assessment of genetic relationships among populations of *Fusarium circinatum* in different parts of the world. Canadian Journal of Botany 78: 709-717.
23. Wikler, K., Storer, A.J., Newman, W., Gordon, T.R. and Wood, D.L. 2003. The dynamics of an introduced pathogen in a native Monterey pine (*Pinus radiata*) forest. Forest Ecology and Management 179: 209-221.

(2005년 8월 3일 접수, 2005년 11월 14일 채택)