

634.975169
L293 人

GOVP1200201382

19

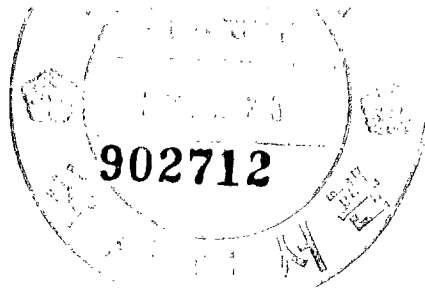
최 중
연구보고서

소나무재선충 종합방제 기술 개발

Development of integrated control technology for
pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*

연구기관
임업연구원

농림부



최 종 보 고 서

2000년도 농림기술개발사업에 의하여 완료한 소나무재선충 종합방제 기술 개발에 관한 연구의 최종보고서를 별첨과 같이 제출합니다.

첨부 : 1. 최종보고서 10부

2. 최종보고서 디스켓 1매

2001 년 10 월 21 일

주관연구기관 : 임업연구원

총괄연구책임자 : 정 영 진 (인)

주관연구기관장 :

농 립 부 장 관 귀 하

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “소나무재선충 종합방제 기술 개발” 과제 (세부과제 “소나무재선충 방제기술 개발”, “소나무재선충 박멸기술 체계화”, “소나무재선충 및 매개충의 생태특성 구명”)의 최종보고서로 제출합니다.

2001. 10 . 21 .

주관연구기관명 : 임업연구원

총괄연구책임자 : 정 영 진

세부연구책임자 : 신 상 철

연 구 원 : 박 지 두

연 구 원 : 여 운 홍

연 구 원 : 이 상 명

연 구 원 : 김 준 범

연 구 원 : 문 일 성

연 구 원 : 최 광 식

연 구 원 : 김 철 수

연 구 원 : 이 상 길

연 구 원 : 권 태 성

연 구 원 : 유 주

협동연구기관명 : 경상대학교

협동연구책임자 : 박 정 규

여 백

요 약 문

I. 제 목

소나무재선충 종합방제 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무속(*Pinus*) 뿐만 아니라 전나무속(*Abies*), 가문비나무속(*Picea*), 잎갈나무속(*Larix*)의 일부 수종과 Douglas-fir, 히말라야시다 등도 가해하는 것으로 알려져 있으며 미국이 원산지로서 미국내 자생수종들은 대부분 저항성을 나타내어 큰 피해가 없으나 원산지에서 다른 나라로 유입될 경우 본 충에 감염된 나무는 모두 죽고 대부분 감염 후 3개월 이내에 죽기 때문에 지구상의 다른 어떠한 산림병해충보다 무서운 발병 기작을 나타내며 극심한 피해를 주고 있다. 대표적인 예가 일본으로서 1900년대 초반부터 본 충의 피해가 나타나기 시작하여 점차 확산되면서 1941년 이래 해마다 20만~243만㎡의 피해 재적량을 나타내고 있으며 현재 소나무와 해송이 거의 전멸 상태가 되고 있다 (Kishi, 1995). 1982년 남경시(南京市)에서 최초로 발생이 확인된 중국은 현재 마미송(馬尾松, *Pinus massoniana*)과 해송림이 극심한 피해를 받고 있으며 1985년 최초 발생이 확인된 대만의 경우, 유구송(琉球松, *P. luchuensis*)과 대만이엽송(臺灣二葉松, *P. taiwanensis*) 등이 전멸 위기에 있는 것으로 알려지고 있다 (遠田, 1997). 최근에는 유럽의 포르투갈에서도 발생이 보고된 바 있다 (Mota 등, 1999). 우리나라에서도 본 충의 중요성과 유입될 경우의 심각성을 우려해서 식물방역법상 금지해충으로 지정하면서 유입방지를 위해 노력을 했으나 국제화, 개방화 시대를 맞아 국제간 교역량이 증대되고 교역품도 다양해짐에 따라 본 충의 유입을 막지 못하고 급기야 1988년 10월 부산광역시 동래구

금정산 일원에서 본 충의 피해가 발생되기에 이르렀다 (이 등, 1989). 그동안 본 충의 박멸을 위해 산림청을 중심으로 관계 기관들이 노력해 왔으나 최초 발견이후 10년 이상이 지난 현재, 박멸은 고사하고 그 피해는 인접 경남, 울산 등으로 계속 확대되고 있으며 2001년에는 경북 구미에서도 발생이 확인되었다. 따라서 본 충의 피해가 전국적으로 확대될 기로에 서 있는 우리나라로서는 현시점에서 박멸을 위한 특단의 대책이 그 어느 때보다 절실히 요구된다고 할 수 있다.

소나무재선충은 자체로는 다른 나무에 이동할 수 있는 능력이 없으며 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*) 등의 매개충에 의해 이동된다. 소나무재선충과 매개충에 관한 연구 및 방제기술은 일본에서 1905년부터 발생되기 시작한 소나무의 집단 고사 현상이 매개충의 전염에 의한 소나무재선충의 피해로 최초로 확인된 1972년 이후 수많은 곤충학, 선충학, 임학, 수병학 등의 전문가들이 방대한 연구를 수행하여 2,000여편이 훨씬 넘는 연구실적을 발표하여 전세계적으로 가장 앞서 있다고 생각된다 (Kishi, 1995). 그렇지만 일본의 경우, 소나무재선충이 전국적으로 만연된 상태에서 피해억제를 목표로 한 기술 개발이 위주가 되기 때문에 박멸을 목표로 하고 있는 우리나라로서는 연구 및 방제기술의 단순 도입은 어려운 실정이다. 따라서 본 충이 국부적으로 한정된 지역에서만 발생되고 있는 우리나라로서는 지금이 박멸을 위한 마지막 호기이므로 우리나라 실정에 맞는 박멸방안을 확립하는 것이 그 무엇보다도 시급한 것으로 판단된다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 우리나라에서의 소나무재선충 피해특성과 매개충의 생태특성을 구명하고 새로운 방제기술을 개발하며 관련 연구결과와 방제방법 등을 체계화하여 우리나라 실정에 맞는 방제전략을 도출하는데 중점을 두고 수행하였다.

소나무재선충 피해특성과 매개충 생태특성 구명분야에서는 피해목의 시기별 고사율, 피해목과 건전목의 흉고직경 비교, 소나무내 소나무재선충의 분포 등 소나무재선충의 피해특성과 솔수염하늘소 성충 탈출시기, 성충의 개체특성, 소나무내 분포

와 후식특성, 거주선호성 등 솔수염하늘소의 생태를 구명하였다. 방제기술 분야에서는 조립식 소각로 및 방충소재 개발, 훈증처리 약제 선발 및 훈증처리 방법 개선, 피해목 표면 약제 처리 기술개발, 항공방제 약제선발 및 환경영향 평가, 침투성 살충제 수간주사법 개발, 유인제 선발, 천적미생물 종류 조사 및 생물검정을 수행하였다. 소나무재선충 방제전략 수립분야에서는 소나무재선충의 박멸이론을 정립하고, 확산저지 전략을 수립하였으며 발생정보 관리, 소나무재선충 및 솔수염하늘소 소개, 방제기술 보급 등을 위해 홈페이지를 구축하였다.

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

본 연구결과 소나무재선충의 피해특성은 1999년 7월부터 2001년 6월까지 조사 결과 소나무재선충 감염목은 대부분 추기(9~11월)에 집중적으로 고사하였으며 당년에 90% 이상이 고사하는 것으로 나타났고, 소나무재선충에 의한 고사목은 평균 흉고 직경이 22.12cm로 건전목의 18.60cm보다 큰 경향을 보였다. 소나무내 재선충의 공간 분포는 수관 상부>중부>하부의 순으로 밀도에 차이가 있었으며 흉고부위의 밀도가 상대적으로 가장 적은 것으로 나타났다. 매개충 생태특성은 진주 지역에서의 솔수염하늘소 성충은 5월중순부터 7월하순까지 우화하며 50%우화일은 1999년과 2000년의 경우 각각 6월15일과 6월 19일이었으나 2001년은 춘기 이상고온 현상으로 1999년과 2000년에 비해 10일 이상 빠른 6월 4일로 조사되었고 성충의 개체특성을 조사한 결과 암수 간 생체중과 두폭은 비슷한 것으로 나타났으나 체장과 체폭은 암컷이 크고 더듬이길이는 수컷이 큰 것으로 나타났다. 소나무내 솔수염하늘소 유충 침입공은 수관 중부에 가장 많은 것으로 나타났으며 주간부는 수관부에 비해 상대적으로 적은 경향을 보였다.

소나무재선충 방제기술 개발은 피해목의 임내 노천소각은 산불 위험, 열해목 발생 등 많은 문제점이 있으므로 이를 개선하기 위해 조립식 몸통과 연통으로 분리가 가능한 조립식 소각로 2종을 개발하였다. 조립식 소각로는 직경 1.5mm의 스테인레스 단판에 상단부는 직경 3mm, 하단부는 직경 4mm의 구멍을 뚫어서 열 발산과 외부 공기

유입이 용이하도록 하였으며 변형방지를 위해 몸통에 파형밴딩처리를 하였다. 현재 사용되고 있는 훈증약제인 인화늄(에피늄[®])정제는 고독성이다 처리시기에 따라 방제 효과에 차이가 있어 대체약제로 보통독성이면서 처리시기에 관계없이 1㎡당 0.7ℓ 처리시 100%의 완벽한 살충률을 나타내는 매탐소디움(킬퍼[®])25%액제를 선발하였다. 솔수염하늘소 후식방지 효과를 조사한 결과 침투성살충제인 포스팜액제와 이미다클로프리드액제를 혼용직경 cm당 0.6cc 이상 수간주사를 했을 때 수간주사 8일 후부터 살충 효과가 있었다. 솔수염하늘소 유인력 조사결과 합성 terpentine은 단독으로 처리했을 때 benzene이나 ethanol을 유기용매로 사용하여 처리했을 때 보다 유인력이 높게 나타났다으며 소나무 정유의 경우 ethanol를 혼합했을 때의 유인력이 높은 것으로 나타났다. 곤충병원성 선충의 생물검정 결과 솔수염하늘소 유충 1마리당 *Heterorhabditis* sp.는 400마리, *Steinernema* sp.는 200마리 이상 처리했을 때 100%의 치사율을 나타내었으며 곤충병원성 곰팡이 *Beauveria* sp.와 *Metarrhizium* sp. 처리의 경우 모두 10⁶/ml 이상 처리구에서 60% 이상의 치사율을 나타내었다.

소나무재선충 방제전략 수립은 소나무재선충이 전국적으로 만연되었을 경우 매년 발생하는 엄청난 피해와 이를 방지하기 위해 소요될 막대한 예산과 노력을 고려하여 소나무재선충 문제는 단순히 방제대책 차원이 아닌 “전쟁” 차원에서 접근해야 하는 논리와 방제의 기본전략으로 “①확산저지→②압축제어→③소탕박멸” 안을 제시하였다. 소나무재선충의 확산을 저지하고 방제효율을 제고하기 위해 저지선 구축방안과 방제사업에서의 설계·시공·감리 개념 도입, 정확한 분포조사를 위한 방안 등을 정립하였다. 산림병해충 관계자의 역량을 총집결하여 소나무재선충 문제에 대처할 수 있도록 산림청 주도하여 시·도, 지방산림관리청, 임업연구원, 도산림환경연구소, 대학, 민간단체 등이 참여하는 소나무재선충 특별방제본부 신설안을 정립하였으며 소나무재선충의 신방제기술과 방제전략의 지속적인 개발, 정밀분포조사를 위한 전문기동예찰팀 운영, 방제기술 교육 및 보급을 위한 소나무재선충연구센터 설립안을 제시하였다. 소나무재선충의 발생정보 관리와 재선충 및 매개충의 생태특성 소개, 방제기술 보급 등을 위해 홈페이지를 구축하였다.

SUMMARY

This research project has been carried out for 3 years during 1998~2001 to develop integrated control techniques for pinewood nematode(PWN), *Bursaphelenchus xylophilus*. Our research consisted of three parts: to investigate characteristics of pinewood nematode damage and ecology of insect vector, Japanese pine sawyer(JPS), *Monochamus alternatus*, to develop new technologies for pinewood nematode and vector control, to provide integrated control strategy for pinewood nematode.

The main season for pine trees wilt caused by PWN was autumn (September to November) and over 90% trees wilted in the present year of infection. Average D.B.H. of infested trees were greater than healthy ones. Within-tree distribution of PWN decreased significantly from the upper crown to the lower. JPS adults emerged from mid-May to late August, and peak in early to mid-June. Adults characteristics between male and female were similar, but male's antenna length was significantly longer than female. Within-tree distribution of JPS entrance holes and emergence holes were most abundant in the mid-crown. JPS adults emerged from mid-May to late August, and peak in early to mid-June.

We manufactured 2 kinds of mobile incinerator composed of 1.5 mm stainless steel body with punching ϕ 3mm in upper part and ϕ 4mm in lower and wave-bending for preventing transformation. In the fumigation method of infested trees, we substituted Aluminium phosphide by metamsodium showed 100% JPS mortality using 0.7 l per m³. Trunk injection of systemic insecticides, phosphamidon and imidachloprid showed highly effective to prevent the maturation feeding of JPS. Bioassay of entomopathogenic nematodes, treatments of 400 *Heterorhabditis* sp. and 200 *Steinernema* sp. per JPS larva showed 100% mortalities.

We established tactics for preventing PWN spread, especially methods of intensive and extensive surveys, control method and evaluation, and enlargement of corresponding organization. To provide the introduction of PWN and JPS biology, occurrence and spread informations, new technologies of control method, we constructed a homepage of PWN and JPS.

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	15
	Section 1 The objectives of research	15
Chapter 2	Characteristics of PWN damage and ecology of JPS	17
	Section 1 Introduction	17
	Section 2 Characteristics of PWN damage	19
	1. Seasonal occurrence of pine trees wilt	19
	2. Comparison of D.B.H. between infested and healthy trees	21
	3. Within-tree distribution of PWN	21
	Section 3 Ecology of JPS	24
	1. Adult emergence of JPS	24
	2. Adult characteristics of JPS	26
	3. Within-tree distribution of JPS	28
	4. Maturation feeding of PWN	29
	5. Host selection of JPS	29
Chapter 3	Development of PWN control technologies	34
	Section 1 Introduction	34
	Section 2 Physical control	35
	1. Development of mobile incinerator	35
	2. Development of method for preventing adult emergence	42
	Section 3 Chemical control	44

1. Fumigation	44
2. Groundl spray	51
3. Aerial spray	53
4. Trunk injection of systemics insecticides	58
5. Attractant	60
Section 4 Biological control	62
1. Kinds of natural enemies	62
2. Bioassay	66
Chapter 4 Establishment of control tactics	69
Section 1 Introduction	69
Section 2 Control theory	70
Section 3 Tactics for preventing PWN spread	71
Section 4 Homepage of PWN and JPS.	74
Literature cited	74

목 차

제 1 장 서 론	15
제1절 연구개발의 목적과 범위	15
제 2 장 소나무재선충의 피해특성과 매개충의 생태특성 구명 분야	17
제1절 서 설	17
제2절 소나무재선충의 피해특성	19
1. 피해목의 시기별 고사율	19
가. 재료 및 방법	19
나. 결과 및 고찰	19
2. 피해목과 건전목의 흉고직경 비교	21
가. 재료 및 방법	21
나. 결과 및 고찰	21
3. 소나무내 소나무재선충의 분포	21
가. 재료 및 방법	21
나. 결과 및 고찰	23
제3절 매개충 솔수염하늘소 생태	24
1. 솔수염하늘소 탈출시기	24
가. 재료 및 방법	24
나. 결과 및 고찰	24
2. 솔수염하늘소 개체특성	26
가. 재료 및 방법	26
나. 결과 및 고찰	27

3. 소나무내 솔수염하늘소 분포	28
가. 재료 및 방법	28
나. 결과 및 고찰	28
4. 솔수염하늘소의 후식 특성	29
가. 재료 및 방법	29
나. 결과 및 고찰	29
5. 솔수염하늘소의 기주 선택성	32
가. 재료 및 방법	32
나. 결과 및 고찰	32
제 3 장 소나무재선충 방제기술 개발 분야	34
제1절 서설	34
제2절 물리적방제	35
1. 조립식 소각로 개발	35
가. 재료 및 방법	35
1) 소각로 제작	35
2) 소각시험	35
나. 결과 및 고찰	35
1) 조립식 소각로의 특성 및 제원	35
2) 조립식 소각로 소각 시험	41
2. 방충소재 개발	42
가. 재료 및 방법	42
나. 결과 및 고찰	43
제3절 화학적방제	44
1. 피해목 약제 혼중처리	44
가. 인화늄정제(에피흙 [®]) 혼중효과	44
1) 재료 및 방법	44
2) 결과 및 고찰	45

나. 양고추냉이 혼중효과	45
1) 재료 및 방법	45
2) 결과 및 고찰	46
다. 메탐소디움(킬피®)25%액제 혼중효과	48
1) 재료 및 방법	48
2) 결과 및 고찰	49
라. 혼중처리 방법 개선	50
1) 재료 및 방법	50
2) 결과 및 고찰	50
2. 피해목 표면 약제 처리	51
가. 재료 및 방법	51
나. 결과 및 고찰	52
3. 항공약제방제	53
가. 항공방제용 약제 선발	53
1) 재료 및 방법	53
2) 결과 및 고찰	53
나. 항공방제 환경영향 평가	54
1) 재료 및 방법	54
2) 결과 및 고찰	54
4. 침투성살충제 수간주사	58
가. 재료 및 방법	58
나. 결과 및 고찰	59
5. 유인제	60
가. 재료 및 방법	60
1) 유인물질 탐색	60
나. 결과 및 고찰	60
제4절 생물적방제	62
1. 매개충의 천적미생물 종류 조사	62

가. 재료 및 방법	62
1) 천적미생물 채집	62
2) 천적미생물 분리동정	62
나. 결과 및 고찰	63
1) 매개충의 병원미생물 종류	63
2) 매개충의 병원미생물 감염율	65
2. 매개충의 병원미생물 생물검정	66
가. 재료 및 방법	66
1) 공시 천적	66
2) 생물 검정	66
나. 결과 및 고찰	67
1) 곤충병원성 선충	67
2) 곤충병원성 곰팡이	67
제 4 장 소나무재선충 방제전략 수립분야	69
제1절 서 설	69
제2절 박멸이론 정립	70
제3절 확산저지전략	71
1. 저지선 구축	72
2. 설계·시공·감리 개념 도입	72
3. 정확한 분포조사로 충분한 물량 확보	72
4. 치밀한 설계 및 철저한 방제작업	73
5. 공정한 방제효과 평가	73
제4절 소나무재선충 홈페이지 제작	74
인용문헌	74

제 1 장 서 론

제1절 연구개발의 목적과 범위

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무속(*Pinus*) 뿐만 아니라 전나무속(*Abies*), 가문비나무속(*Picea*), 잎갈나무속(*Larix*)의 일부 수종과 Douglas-fir, 히말라야시다 등도 가해하는 것으로 알려져 있으며 미국이 원산지로서 미국내 자생수종들은 대부분 저항성을 나타내어 큰 피해가 없으나 원산지에서 다른 나라로 유입될 경우 본 충에 감염된 나무는 모두 죽고 대부분 감염 후 3개월 이내에 죽기 때문에 지구상의 다른 어떠한 산림병해충보다 무서운 발병 기작을 나타내며 극심한 피해를 주고 있다. 대표적인 예가 일본으로서 1900년대 초반부터 본 충의 피해가 나타나기 시작하여 점차 확산되면서 1941년 이래 해마다 20만~243만㎡의 피해 재적량을 나타내고 있으며 현재 소나무와 해송이 거의 전멸 상태가 되고 있다 (Kishi, 1995). 1982년 남경시(南京市)에서 최초로 발생이 확인된 중국은 현재 마미송(馬尾松, *Pinus massoniana*)과 해송림이 극심한 피해를 받고 있으며 1985년 최초 발생이 확인된 대만의 경우, 유구송(琉球松, *P. luchuensis*)과 대만이엽송(臺灣二葉松, *P. taiwanensis*) 등이 전멸 위기에 있는 것으로 알려지고 있다 (遠田, 1997). 최근에는 유럽의 포르투갈에서도 발생이 보고된 바 있다 (Mota 등, 1999). 우리나라에서도 본 충의 중요성과 유입될 경우의 심각성을 우려해서 식물방역법상 금지해충으로 지정하면서 유입방지를 위해 노력을 했으나 국제화, 개방화 시대를 맞아 국제간 교역량이 증대되고 교역품도 다양해짐에 따라 본 충의 유입을 막지 못하고 급기야 1988년 10월 부산광역시 동래구 금정산 일원에서 본 충의 피해가 발생되기에 이르렀다 (이 등, 1989). 그동안 본 충의 박멸을 위해 산림청을 중심으로 관계 기관들이 노력해 왔으나 최초 발견이후 10년 이상이 지난 현재, 박멸은 고사하고 그 피해는 인접 경남, 울산 등으로 계속 확대되고 있으며 2001년에는 경북 구미에서도 발생이 확인되었다. 따라서 본 충의 피해가 전국적으로 확대될 기로에 서 있는 우리나라로서는 현시점에서 박멸을 위한 특단의 대책이 그 어느 때보다 절실히 요구된다고 할 수 있다.

소나무재선충은 자체로는 다른 나무에 이동할 수 있는 능력이 없으며 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*) 등의 매개충에 의해 이동된다. 소나무재선충과 매개충에 관한 연구 및 방제기술은 일본에서 1905년부터 발생되기 시작한 소나무의 집단 고사 현상이 매개충의 전염에 의한 소나무재선충의 피해로 최초로 확인된 1972년 이후 수많은 곤충학, 선충학, 임학, 수병학 등의 전문가들이 방대한 연구를 수행하여 2,000여편이 훨씬 넘는 연구실적을 발표하여 전세계적으로 가장 앞서 있다고 생각된다 (Kishi, 1995). 그렇지만 일본의 경우, 소나무재선충이 전국적으로 만연된 상태에서 피해억제를 목표로 한 기술 개발이 위주가 되기 때문에 박멸을 목표로 하고 있는 우리나라로서는 연구 및 방제기술의 단순 도입은 어려운 실정이다. 따라서 본 충이 국부적으로 한정된 지역에서만 발생되고 있는 우리나라로서는 지금이 박멸을 위한 마지막 호기이므로 우리나라 실정에 맞는 박멸방안을 확립하는 것이 그 무엇보다도 시급한 것으로 판단된다.

본 연구는 우리나라에서의 소나무재선충 피해특성과 매개충의 생태특성을 구명하고 새로운 방제기술을 개발하며 관련 연구결과와 방제방법 등을 체계화하여 우리나라 실정에 맞는 방제전략을 도출하는데 중점을 두고 수행하였다.

제 2 장 소나무재선충의 피해특성과 매개충의 생태 특성 구명 분야

제1절 서 설

소나무재선충과 매개충과의 관계를 보면 소나무재선충은 자체적으로 다른 나무로 이동할 수 있는 능력은 없지만 나무를 죽여서 매개충에게 서식처를 제공하는 역할을 하며 매개충은 재선충을 다른 나무로 옮겨주는 역할을 한다. 매개충이 소나무재선충을 옮겨주는 과정을 보면 매개충이 성충으로 우화·탈출할 무렵 매개충의 번데기방 주변에 있는 재선충의 분산형 유충은 탈피하여 분산형 4기 유충(내구형 유충)이 되어 번데기방 주변으로 몰린다. 분산형 4기 유충은 소화기관이 없으며 몸표면에 접착성 물질을 분비하고 활발하게 움직여서 번데기방내의 매개충 몸에 부착되거나 복부 제1기문을 통해 체내 기관으로 들어가서 매개충이 성충이 되어 외부로 탈출할 때 함께 이동한다. 매개충의 몸에 붙어서 이동한 소나무재선충은 매개충이 건전한 나무 가지의 수피를 갉아 먹는 후식(後食=性成熟攝食, maturation feeding) 행동을 할 때 생기는 상처를 통해 건전한 나무로 옮겨진다. 후식 행동은 매개충으로서의 역할 여부를 판단하는 핵심 조건으로 실제 소나무 고사목에서 채집된 곤충중에서 소나무재선충을 보유하고 있는 하늘소만 해도 22종이 알려지고 있지만(표 1, 禰原, 1998) 이들중 솔수염하늘소류(Monochamus)를 제외한 나머지 하늘소들은 후식을 하지 않기 때문에 매개충이 되지 못하는 것으로 알려지고 있다.

기주식물에 침입한 소나무재선충은 발육속도가 빨라서 1세대를 완료하는데 30℃에서는 3일, 25℃에서는 4~5일, 20℃에서 6일, 15℃에서는 12일 밖에 소요되지 않으며 25℃에서 암수 1쌍이 20일후에는 20만마리까지 급속히 증식한다. 감염목은 감염 20일 후부터 잎의 증산량이 감소되거나 정지되어 잎이 시들기 시작하며 감염 30일 후에는 잎이 급속하게 붉은색으로 변색되며 고사한다. 감염목은 대부분 3개월이내에 고사하는 것으로 알려지고 있다(Kishi, 1995).

표 1. 소나무재선충이 검출된 하늘소류

학 명	국 명	분 포	
		일본	북미
<i>Acalolepta fraudatrix</i>	우단하늘소	○	
<i>Acanthocinus griseus</i>	곤봉수염하늘소	○	
<i>Arhopalus rusticus</i>	큰넓적하늘소	○	
<i>Arhopalus rusticus obsoletus</i>	-		○
<i>Asemum striatum</i>	작은넓적하늘소		○
<i>Astylopsis sexguttata</i>	-		○
<i>Corymbia succesanea</i>	- (붉은산꽃하늘소류)	○	
<i>Leiopus guttatus</i>	꼬미수염하늘소	○	
<i>Monochamus alternatus</i>	솔수염하늘소	○	
<i>M. caloricus</i>	-		○
<i>M. grandis</i>	-	○	
<i>M. marmorator</i>	-		○
<i>M. mutator</i>	-		○
<i>M. obtusus</i>	-		○
<i>M. saltuarius</i>	북방수염하늘소	○	
<i>M. scutellatus</i>	-		○
<i>M. titillator</i>	-		○
<i>Neacanthocinus obsoletus</i>	-		○
<i>N. pusillus</i>	-		○
<i>Spondylis buprestoides</i>	검정하늘소	○	
<i>Uraecha bimaculata</i>	화살하늘소	○	
<i>Xylotrechus saggitatus</i>	- (호랑하늘소류)		○

본 연구에서는 우리나라에서의 소나무재선충 피해목의 시기별 고사율, 피해목과 건전목의 경급 비교, 소나무내 분포 등 소나무재선충의 피해특성과 매개충인 솔수염하늘소의 성충 탈출시기 및 개체특성, 소나무내 유충 침입공과 성충 탈출공의 분포, 성충의 후식 특성 및 기주 선호성 등을 구명하는데 중점을 두고 수행하였다.

제2절 소나무재선충의 피해특성

1. 피해목의 시기별 고사율

가. 재료 및 방법

경남 진주시의 소나무재선충 피해임지에서 1999년 7월부터 2001년 6월까지 2년 간에 걸쳐 매월 1회씩 고사목 발생상황을 조사하였다. 1999년 7월부터 2000년 6월까지는 임업연구원 남부임업시험장에서 시범방제를 실시한 690ha를 대상으로 월별 고사목 발생상황을 전수 조사하였으며 2000년 7월부터 2001년 6월까지는 진주시 정촌면에 1,444그루의 조사목을 선정하여 매목별로 라벨을 부착하고 흉고직경을 측정한 후 월말에 고사목 발생여부를 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

소나무재선충 피해지역인 경남 진주시에서 감염목을 대상으로 월별 고사율을 조사한 결과 그림 1과 같이 9월의 고사율이 1999년의 경우 44.5%, 2000년은 42.7%로서 가장 높았으며 8~11월에 1999년은 94.0%, 2000년은 75.5%의 고사율을 보여 이 시기에 집중 고사되는 것으로 나타났다. 또한 감염목의 대부분은 감염 당해연도인 12월까지 고사되었으며 이듬해 고사된 비율은 1999~2000년 조사에서는 3.5%, 2000~2001년 조사에서는 9.2%로 나타났다. 이와 같이 재선충 감염목의 고사시기에 차이가 있는 것은 매개충인 솔수염하늘소의 우화 탈출시기와 밀접한 관계가 있어 일찍 성충으로 우화한 매개충에 의하여 감염된 소나무는 당해연도인 12월까지 고사되며, 반대로 늦게 우화한 성충에 의하여 감염된 소나무는 이듬해 고사되는 것으로 사료된다.

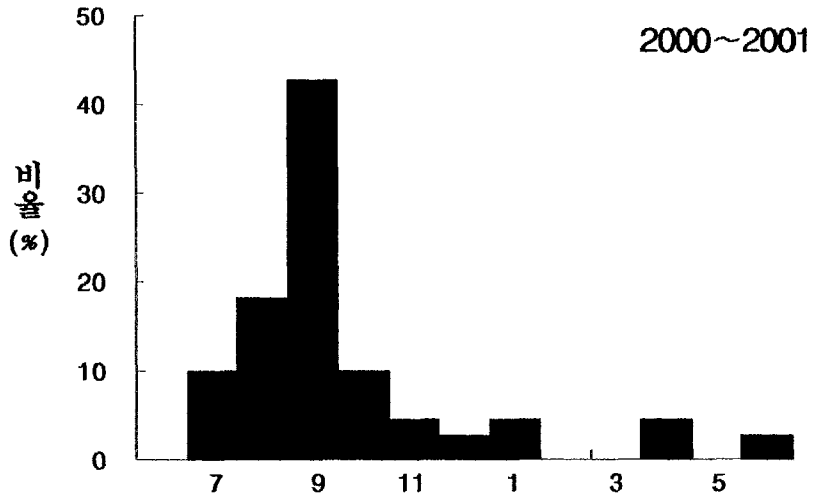
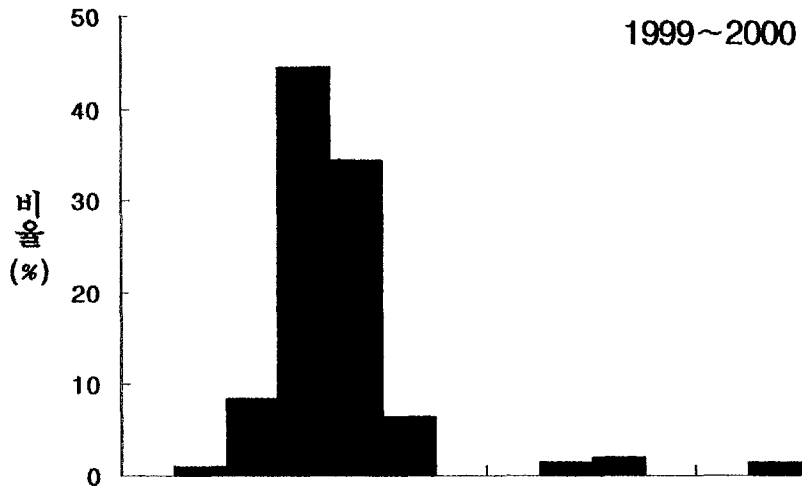


그림 1. 피해목의 월별 고사율

2. 피해목과 건전목의 흉고직경 비교

가. 재료 및 방법

1항의 2000년 7월부터 2001년 6월까지 피해목의 시기별 고사율 조사시 이미 선정된 진주시 정촌면의 1,444그루 조사목을 대상으로 고사목과 건전목의 흉고직경을 비교 분석하였다.

나. 결과 및 고찰

조사지내 소나무재선충 피해에 의한 고사목과 생존목의 경급 분포는 그림 2와 같다. 고사목의 평균 흉고직경은 22.12cm인데 반해 건전목은 18.60cm로서 고사목의 경급이 건전목에 비해 큰 것으로 나타났다 ($p=0.0105$, t-test). 이러한 결과는 실제 소나무재선충 피해지에서 열세목보다는 경급이 큰 우세목들이 주로 고사하는 것과 경향이 일치하는 것으로 사료된다.

3. 소나무내 소나무재선충의 분포

가. 재료 및 방법

소나무내 소나무재선충의 분포양식을 조사하기 위하여 경남 진주시의 소나무재선충 피해임지에서 감염목 10그루를 벌채하여 수관 상·중·하부에서 원판을 채취한 후, 심재부와 변재부로 구분하여 천공 드릴을 이용하여 10g씩 목편을 채취하여 실험실에 가져와 Baermann 깔대기법으로 소나무재선충을 분리하여 50배 해부현미경하에서 계수하였다.

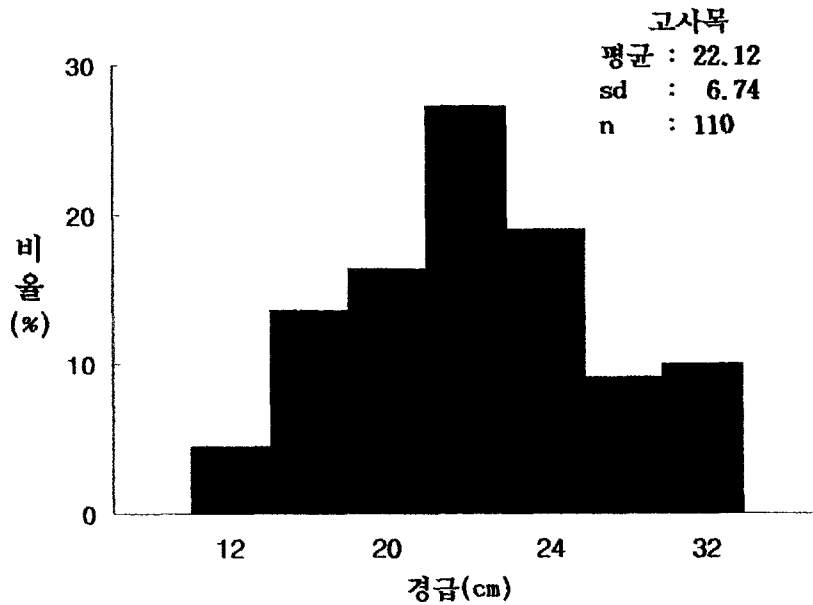
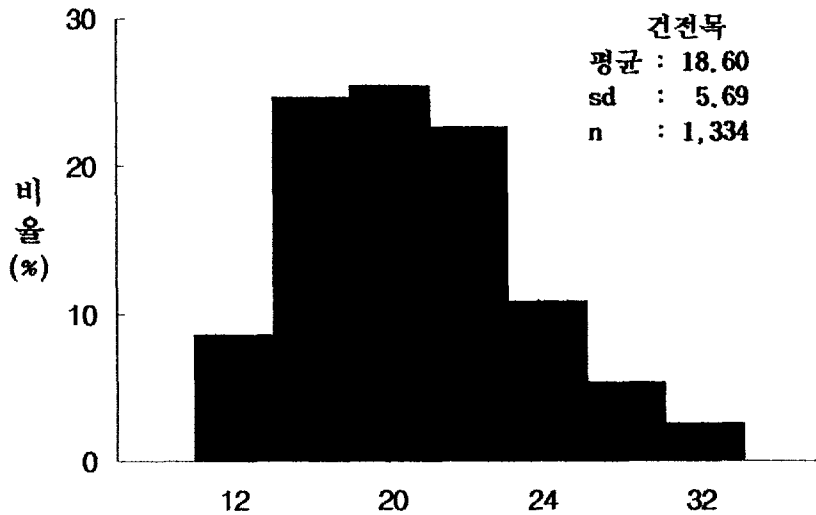


그림 2. 고사목과 건전목의 경급 분포

나. 결과 및 고찰

소나무재선충에 의하여 감염 고사된 소나무를 벌채하여 수관 부위별 재선충 밀도 분포상황을 조사한 결과 표 2와 같이 수관 상부의 밀도가 g당 593.7마리로서 가장 높았으며 흉고 부위의 밀도는 g당 41.9마리로 상대적으로 아주 낮았다. 목재별 밀도를 보면 수관 상부와 중부는 변재부의 재선충 밀도가 높았고 수관 하부와 흉고 부위는 심재부의 재선충 밀도가 높은 것으로 나타났다.

표 2. 소나무내 소나무재선충의 분포

수관부위	밀도 (마리/g)			
	계	변재	중간	심재
상 부	593.7	357.5	235.8	0.4
중 부	298.9	208.0	87.4	3.5
하 부	155.0	4.2	17.0	63.8
흉 고	41.9	14.4	5.7	21.8

소나무재선충은 지렁이와 같이 가늘고 긴 모습을 하고 있으며 몸체가 투명하고 몸길이가 0.6~1.0mm로 극히 작아 육안으로 식별이 어렵기 때문에 현재 소나무재선충의 감염 여부 조사는 고사목의 목편을 채취한 후 목편내에 있는 재선충을 분리한 후, 현미경으로 검경하여 확인하고 있다. 그러나 표 2에서 보는 바와 같이 작업의 편의성 때문에 흉고 부위에서 목편 시료를 채취할 경우 재선충의 밀도가 낮기 때문에 감염목이지만 재선충이 검출되지 않을 수도 있다. 따라서 보다 정확한 감염 여부 조사를 위해서는 고사목을 벌채한 후 수관 상·중·하부에서 목편 시료를 골고루 채취하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제3절 매개충 솔수염하늘소 생태

1. 솔수염하늘소 탈출시기

가. 재료 및 방법

1999년부터 2001년까지 3년 동안 매년 경남 진주시 소나무재선충 피해임지에서 고사목을 벌채하여 고사목의 주간과 가지를 약 1m 크기로 조제한 후 임업연구원 남부 임업시험장내에 설치된 철망(직경 3mm 비닐 코팅) 사육상(650cm×480cm×300cm)에 두고 5월부터 매일 오전 10시를 전후하여 성충 탈출상황을 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

진주 지역에서의 연도별 솔수염하늘소 성충의 우화, 탈출상황은 그림 3과 같다. 솔수염하늘소 성충의 탈출초일은 1999년과 2000년이 5월 17일, 2001년이 5월15일로 비슷하였으나 50%탈출일은 1999년이 6월15일, 2000년은 6월19일, 2001년은 6월4일로 연도간에 차이가 큰 것으로 나타났으며 발육영점온도를 11℃로 했을 때 50%탈출일의 유효적산온도는 1999년 499.1일도, 2000년 271.8일도, 2001년 371.0일도로 차이가 컸으며 특히 1999년과 2000년의 경우 227.3일도나 차이를 나타내었다 (표 3). 이러한 결과로 볼 때 유효적산온도로 성충 탈출시기를 예측하는 것은 일본에서와 마찬가지로 어려운 것으로 사료된다 (遠田, 1993).

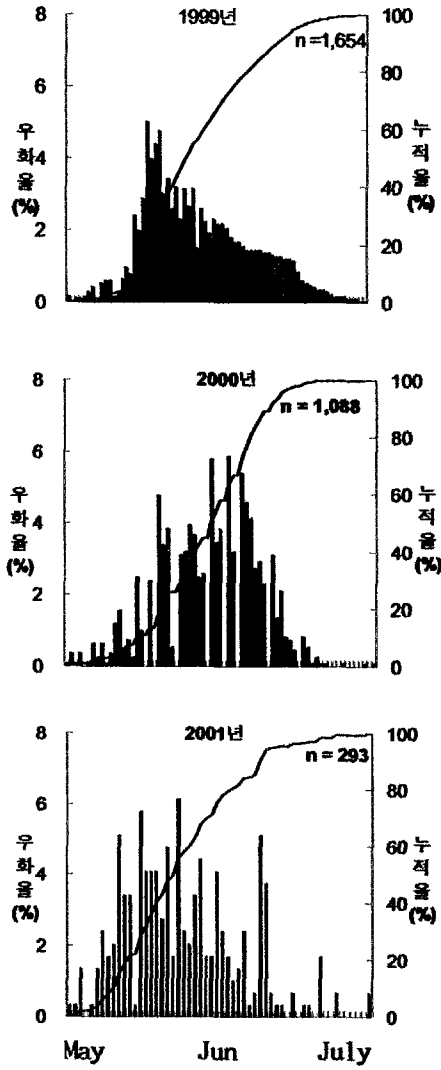


그림 3. 솔수염하늘소 성충의 연도별 우화, 탈출상황(경남 진주)

표 3. 솔수염하늘소 성충 탈출상황

연도	조 사 성충수	탈 출 상 황				
		초일	30%	50%	70%	말일
1999	1,654	5.17 (228.5)	6.8 (410.6)	6.15 (499.1)	6.23 (586.3)	7.27 (1028.7)
2000	1,088	5.17 (38.8)	6.13 (213.6)	6.19 (271.8)	6.26 (345.2)	7.26 (743.7)
2001	293	5.15 (176.4)	5.29 (313.2)	6.4 (371.0)	6.10 (447.7)	7.9 (829.9)

* ()내는 발육영점온도를 11℃로 했을 때의 유효적산온도 (진주기상대 자료 이용)

2. 솔수염하늘소 기체특성

가. 재료 및 방법

2001년 4월에 경남 진주시의 소나무재선충 피해지역에서 흉고직경 20cm 이상의 고사목 30본을 벌채한 후 각 고사목별로 수관부와 주간부(지하부)를 각각 상·중·하부로 구분하여 각 부위에서 1m 내외의 원목 시료를 조제하여 망사(80mesh)로 씌운 후 임업연구원 남부임업시험장에 설치된 구내 철망 사육상에 넣고 우화·탈출하는 성충을 대상으로 생체중, 체장, 체폭, 두폭, 더듬이 길이와 탈출공의 직경 등을 조사하였다. 생체중 측정에는 디지털저울(OHAUS TS400A)을 이용하였고, 체장 등의 길이와 탈출공 직경 측정에는 디지털캘리퍼스(Digimatic caliper CD-20CP)를 이용하였다.

나. 결과 및 고찰

솔수염하늘소 성충의 개체특성은 표 4와 같다. 표 4에서 보는 바와 같이 솔수염하늘소 성충의 암수간 개체특성의 차이를 보면 생체중과 체장, 체폭, 두폭은 암컷이 수컷에 비해 큰 것으로 나타났으나 유의차는 없었으며 더듬이 길이는 암컷이 평균 31.42mm인 데 반해 수컷은 평균 46.55mm로 수컷이 훨씬 큰 것으로 나타났다.

표 4. 솔수염하늘소 성충의 개체특성

구 분	♀	♂	p(t-test)
생 체 중 (g)	0.30±0.11	0.29±0.11	n. s.
체 장 (cm)	21.24±2.69	20.36±2.87	n. s.
체 폭 (cm)	6.74±0.90	6.39±1.00	n. s.
두 폭 (cm)	3.81±0.47	3.73±0.49	n. s.
더듬이 길이 (cm)	31.42±4.20	46.55±11.06	0.000

솔수염하늘소 성충 탈출공의 직경은 그림 4와 같이 최소 4.44mm, 최대 10.05mm, 평균 7.16mm로 조사되었다.

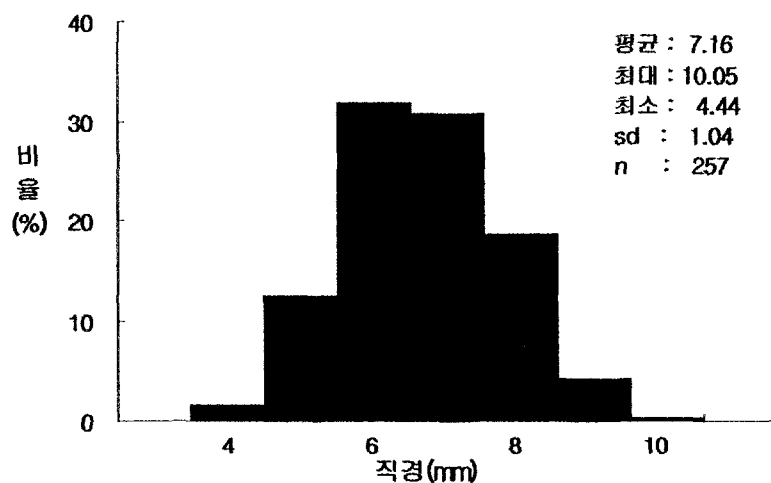


그림 4. 솔수염하늘소 성충 탈출공의 직경 분포

3. 소나무내 솔수염하늘소 분포

가. 재료 및 방법

2항의 솔수염하늘소 개체특성 조사 완료 후 수관부와 주간부의 부위별(상·중·하부) 원목 시료를 대상으로 유충 침입공 수와 성충 탈출공 수를 조사하였으며 (침입공 수-탈출공 수)/침입공 수×100으로 하여 자연폐사율을 산출하였다.

나. 결과 및 고찰

소나무내 솔수염하늘소 유충 침입공과 성충 탈출공의 분포는 표 5와 같다. 표 5 에서 보는 바와 같이 유충 침입공은 수관부가 주간부에 비해 많았으며 수관 중부의 평균 침입공은 1m당 19.63개로 가장 많았다. 성충 탈출공수는 수관부가 주간부에 비해 다소 많은 경향이었으나 유의차는 없는 것으로 나타났으며 자연폐사율은 주간의 하부가 가장 낮은 것으로 나타났다 (표 5).

표 5. 소나무내 솔수염하늘소 유충 침입공 및 성충 탈출공 분포

구 분	부 위	1m당 평균 ± SD		
		침입공 수	탈출공 수	자연폐사율(%)
수 관	상	16.72± 7.96ab*	2.64±2.57	84.1a*
	중	19.63±10.19a	2.61±2.53	87.0a
	하	15.29± 9.10abc	1.93±2.58	88.9a
주 간	상	12.94± 7.06bc	1.31±1.96	90.0a
	중	9.41± 5.66cd	1.26±1.23	86.8a
	하	4.94± 4.34d	1.15±1.18	64.3b

* Tukey's studentized range test (5% probability level)

4. 솔수염하늘소의 후식 특성

가. 재료 및 방법

솔수염하늘소의 가지 부위별, 가지 연령별 후식 선호성을 조사하기 위해 경남 진주, 통영, 함안의 소나무재선충 피해임지에서 해송 감염목 12본을 벌채한 후 각 조사목별로 측지 1가지씩을 제거해 가면서 가지내 후식흔수를 전수 조사하고 방안지를 이용하여 후식흔 1개당 면적을 산출하였다.

나. 결과 및 고찰

해송 단목내 가지 부위별 후식흔수 비율을 조사한 결과 수관 최하부 가지를 기준으로 하여 하부에 해당되는 1차와 2차 가지의 후식흔수 비율은 각각 1.8%와 5.4%, 상부에 해당되는 9차, 10차, 11차 가지는 10%이하의 후식흔수 비율을 보였으나 3차, 4차, 5차 가지에서는 각각 12.5%, 26.8%, 12.5%의 후식흔수 비율을 보여 수관 중부에 해당되는 가지의 후식흔수 비율이 높은 것으로 나타났다 (그림 5).

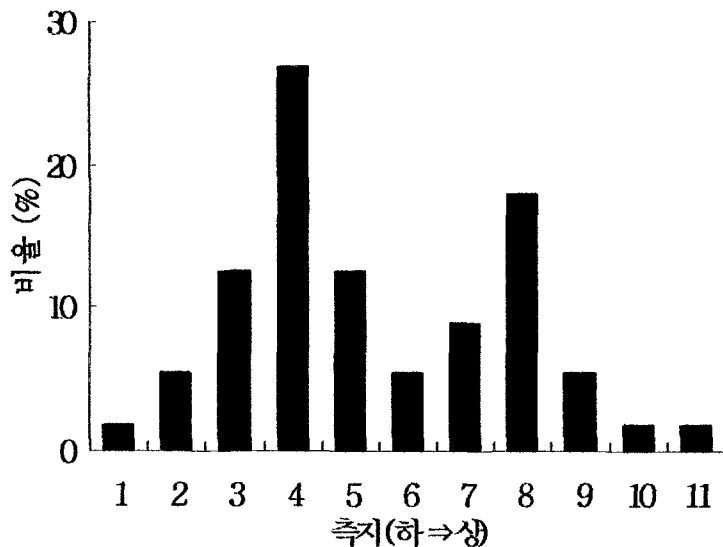


그림 5. 가지부위별 후식흔수 비율

가지 연령별 후식혼수 비율을 조사한 결과 5년생 가지의 후식혼수 비율이 27.4%로 가장 높게 나타났으며 1년생 가지의 후식혼수 비율은 3.9%에 불과한 것으로 나타났다 (그림 6). 이는 실내에서 해송 가지를 공급하여 솔수염하늘소 성충을 사육할 때 주로 1년생 신초를 먼저 섭식하는 것과는 다른 양상을 보였다. 일본의 경우 자연 조건에서 후식혼은 1년생 가지에 가장 많고 오래된 가지에는 상대적으로 적은 것으로 알려졌지만 (Kishi, 1995) 岩手縣의 한랭지역에서는 6~8년생 가지에 많은 것으로 보고되고 있다 (小林, 1986).

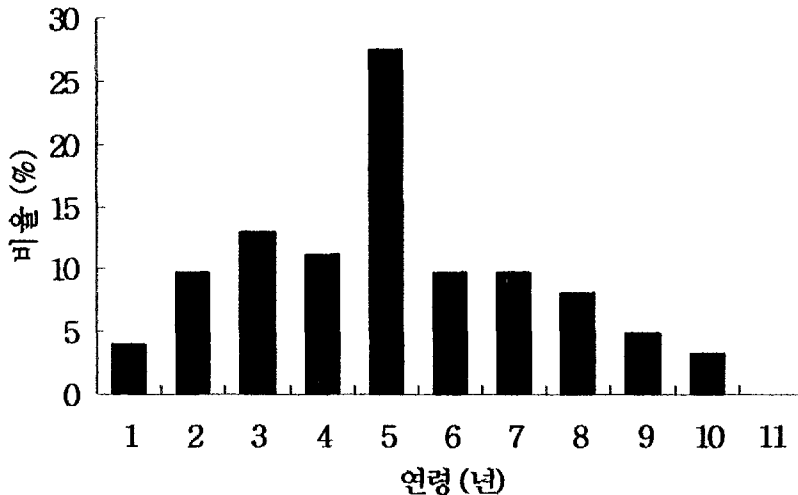


그림 6. 가지연령별 후식혼수 비율

단목당 솔수염하늘소 성충의 후식혼수 및 후식혼 1개의 면적은 표 6과 같이 단목내 평균 후식혼수는 8.8개, 1개 후식혼의 면적은 61.3mm²로 나타났으며 후식혼의 형태는 그림 7과 같다.

표 6. 단목당 솔수염하늘소 성충의 후식흔수 및 후식흔당 면적

구 분	평 균	최 대	최 소
단목당 후식흔수 (개)	8.8	33	2
후식흔당 면적 (mm ²)	61.3	229	12

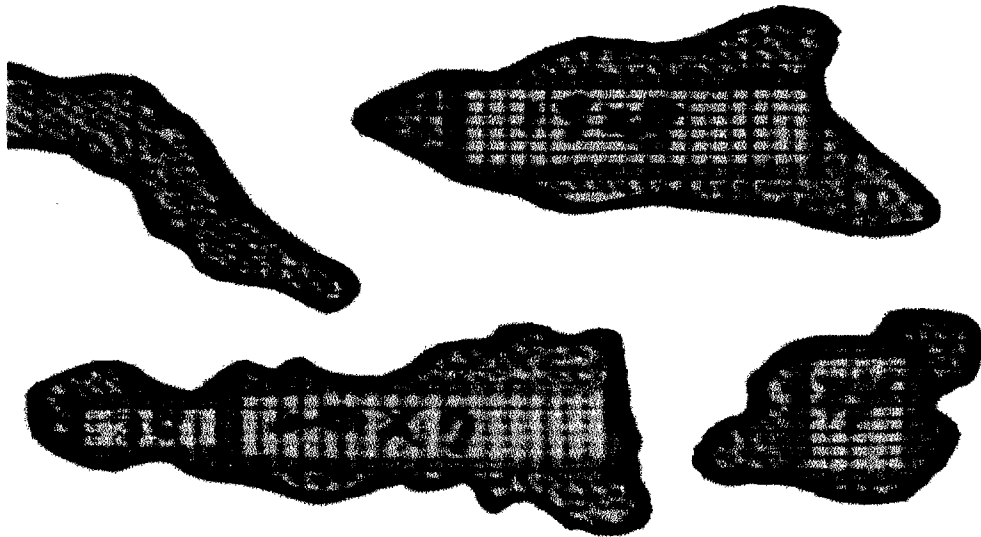


그림 7. 솔수염하늘소의 후식흔

5. 솔수염하늘소의 기주 선택성

가. 재료 및 방법

1999년 4월에 경남 진주시와 함안군의 소나무재선충 피해지에서 유충 또는 번데기 상태로 소나무 조직내에 서식하고 있는 솔수염하늘소를 원목내 서식 상태로 채집하여 야외 사육상에 두고 5월중순부터 우화되는 성충중 기주 탐색(host finding) 기회를 최대화하기 위해 후식을 하지 않은 우화 당일 또는 우화 1일 경과 이전의 성충을 공시충으로 이용하였다. 공시수종은 경남 진주시 소재 임업연구원 남부임업시험장 수목전시원에서 해송, 소나무, 리기다소나무, 리기테다소나무, 테다소나무, 잣나무, 스트로브잣나무, 대왕송 등의 5-10년생 가지를 꺾어 화분에 꽂아서 이용하였다. 기주선호성은 4수종씩 조합하여 십자형으로 제작된 사육상의 각 cell(1m×1.5m×1.5m)에 수종별로 화분 1개씩을 임의로 놓고 솔수염하늘소 성충 8~76마리를 망실의 중앙에 놓은 후, 각 화분에 유인되는 솔수염하늘소의 유인수로 조사하였으며 각 처리별로 4반복하였다.

나. 결과 및 고찰

해송, 리기다소나무, 리기테다소나무, 잣나무를 대상으로 기주 선호성을 조사한 결과 잣나무를 제외하고는 해송, 리기다소나무, 리기테다소나무 모두 비슷한 기주 선택성을 보였으며 해송, 소나무, 스트로브잣나무, 테다소나무의 비교시험에서는 소나무의 유인수가 가장 많았다. 해송, 잣나무, 스트로브잣나무, 대왕송의 시험에서는 해송에 비해 잣나무, 스트로브잣나무, 대왕송의 유인수가 매우 낮았으며 상대적으로 유인수가 많은 해송, 소나무, 리기테다소나무의 비교시험에서는 해송의 유인수가 가장 많았다(표 7). 솔수염하늘소의 기주 선호성은 소나무재선충에 대한 내충성 품종 선발과 밀접한 관련이 있으므로 금후 심층적인 연구가 요구된다.

표 7. 해송, 리기다소나무, 리기테다소나무, 잣나무, 대왕송의 솔수염하늘소 유인수

조합		수종별 유인수 (평균±SD)			
1	해송	리기다소나무	리기테다소나무	잣나무	무반응
	2.6±1.62	2.33±2.05	2.4±1.37	1.3±1.05	9.2±4.72
2	해송	소나무	스트로브잣나무	테다소나무	무반응
	11.2±3.27	18.0±6.13	9.3±3.04	11.0±5.76	14.8±9.92
3	해송	잣나무	스트로브잣나무	대왕송	무반응
	13.9±2.53	5.8±1.11	5.8±1.60	4.7±1.07	20.1±4.23
4	해송	소나무	리기테다소나무	대조구	무반응
	21.2±3.45	12.5±2.15	12.0±0.73	0.8±0.83	5.3±1.82

제 3 장 소나무재선충 방제기술 개발 분야

제1절 서 설

소나무재선충은 주 기주식물인 소나무와 해송이 일단 재선충에 감염되면 뚜렷한 치료약이 없어 100% 완전 고사되는 치명적인 피해를 입기 때문에 흔히 “소나무의 에이즈”라고도 불리고 있다. 그만큼 소나무재선충은 가공할 위력을 가졌지만 방제는 의외로 쉽다고도 볼 수 있다. 소나무재선충은 자체로는 이동(전염) 능력이 없어 매개충인 솔수염하늘소에 의해 옮겨지므로 방제의 주대상은 솔수염하늘소가 되고 있다. 다행이도 솔수염하늘소는 생활사중 대부분의 기간인 약 9개월 이상을 죽은 나무의 조직내에서 서식하므로 고사목을 완벽하게 제거할 수만 있다면 이론적으로 소나무재선충의 박멸도 가능하다. 따라서 현재 소나무재선충의 방제방법으로는 매개충인 솔수염하늘소를 완벽하게 구제하기 위해 고사목을 벌채한 후 비용이 적게 들면서도 작업이 쉬운 소각 방법을 주력 방제방법으로 활용하고 있으며 소각이 어려울 경우 비용이 많이 들면서 작업이 상대적으로 어려운 집재목의 약제 훈증처리방법을 적용하고 있다.

현행 방제 실행 단계를 구체적으로 보면 통상 추기에 피해분포조사를 하여 이듬해 방제계획을 수립한다. 일선 시·군에서는 이듬해에 예산이 확보되는 대로 방제 작업을 개시하며 매개충인 솔수염하늘소가 우화·탈출하기 전인 5월 이전에 작업을 완료하므로 소나무재선충의 방제시기는 2월부터 4월까지 약 3개월 정도로 볼 수 있다. 그렇지만 이 기간은 우리나라에서 대표적인 건조기로서 산화경방기간과 중복되어 일선 시·군 담당자들이 과중한 업무량이 시달리고 있으며 임내에서 피해목을 소각할 경우 산불 발생의 우려가 매우 높다. 그래서 대부분의 시·군에서는 피해목을 벌채하여 임내외에 집제한 후 강우시 일괄 소각을 하고 있으나 벌채부터 소각할 때까지의 기간이 길어 임내외에 쌓아둔 집재목들이 무단 반출되는 사례가 있으며 소각에서 누락되는 집재 무더기가 발생할 우려가 높고 소각지 주변목에서 열해 피해가 발생되고 있다.

따라서 본 연구에서는 현행 벌채·소각 방제의 문제점을 해소하기 위해 운반

이동이 가능한 조립식 소각로를 개발하는데 중점을 두었으며 그 외 약제 혼중처리 방법 개선, 집재목 표면 약제처리 시험, 항공방제 대체약제 선발, 침투성살충제 수간주사에 의한 매개충 방제시험, 매개충 유인시험, 천적미생물 선발시험 등을 수행하였다.

제2절 물리적방제

1. 조립식 소각로 개발

가. 재료 및 방법

1) 소각로 제작

2001년에 내구성을 높이고 경량화하기 위해 1.5ST 스테인레스 단판을 사용하여 몸통과 연통으로 분리 가능한 조립식 소각로 2종을 제작하였다.

2) 소각시험

제작된 소각로 2종을 대상으로 일일 최대 연소량을 조사하고 경급별 연소시간 조사를 위해 고사목의 경급을 10cm미만, 10~20cm, 20cm이상으로 구분한 후 각각 0.5㎡씩 3반복으로 소각하면서 연소시간을 조사하였으며 소각로 주변에서 거리별로 최고온도와 최고온도 도달시간을 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 조립식 소각로의 특성 및 제원

현행 피해목의 임내 노천 소각의 문제점을 해결하기 위해 몸통과 연통으로 분리가 가능한 소형과 중형의 조립식 소각로 2종을 개발하였다 (그림 8). 본 소각로의 주요 특성으로는 몸통은 직경 1.5mm의 스테인레스 단판에 상단부는 직경 3mm, 하단부는 직경 4mm의 구멍을 뚫어서 열 발산과 외부 공기 유입이 용이하도록 하였으며 변형

방지를 위해 파형 밴딩 처리를 하였다. 각 소각로의 주요 제원은 표 8과 같이 총중량은 소형 99kg, 중형 139kg이며 소형은 3부분, 중형은 4부분으로 분리가 가능하도록 제작하였고 각 부분의 중량은 25~41kg로 2~3인이 운반할 수 있도록 하였다 (그림 9). 소각로의 용적은 소형 0.8 m^3 , 중형 1.6 m^3 이며 1일 동안 소형의 경우 2 m^3 , 중형은 4 m^3 까지 연소가 가능

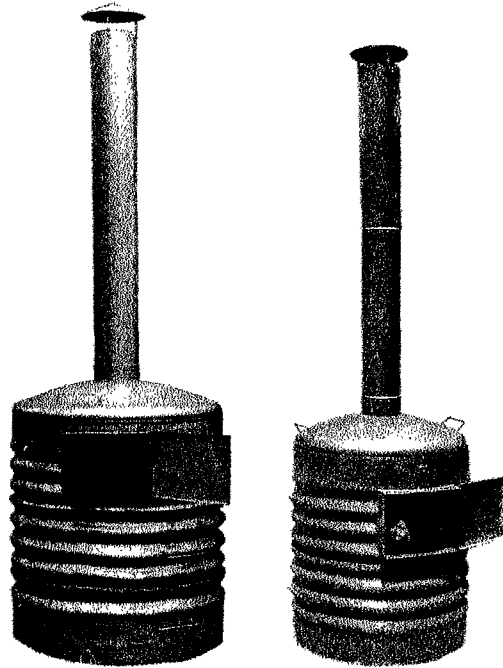


그림 8. 조립식 소각로

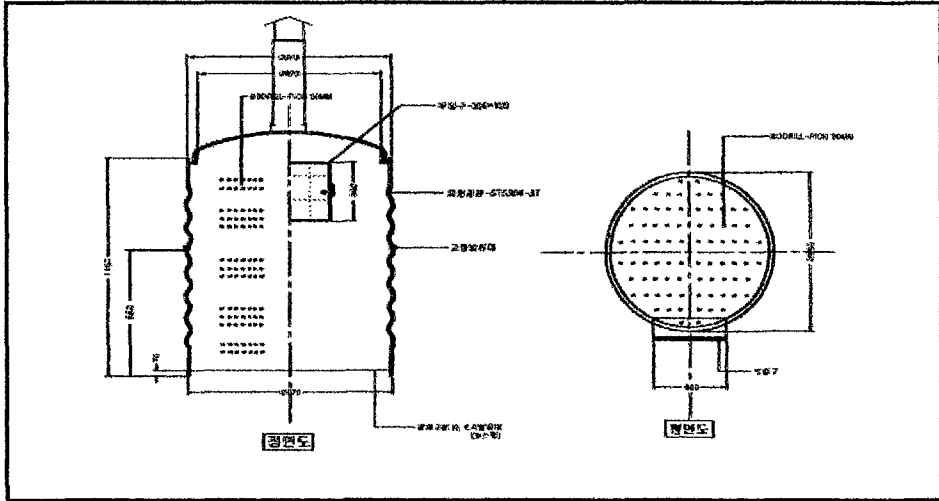
표 8. 조립식 소각로의 제원

모델	중량(kg)					용적 (m^3)	직경 (cm)	높이(cm)		일일최대 연소량(m^3)
	연통	상	중	하	계			몸통	몸통+ 연통	
소형	25	36	-	38	99	0.8	97	110	290	2
중형	38	41	26	34	139	1.6	140	140	220	4

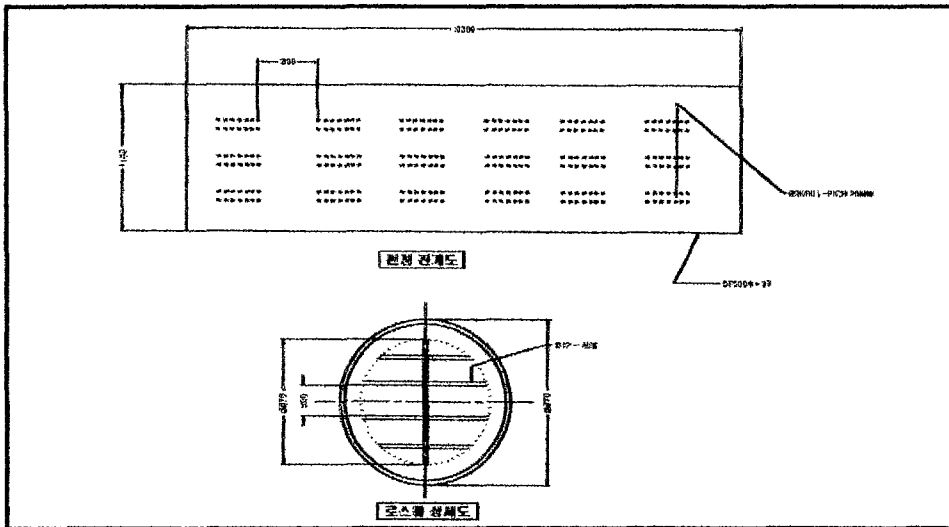


그림 9. 조립식 소각로 (소형) 분해 장면

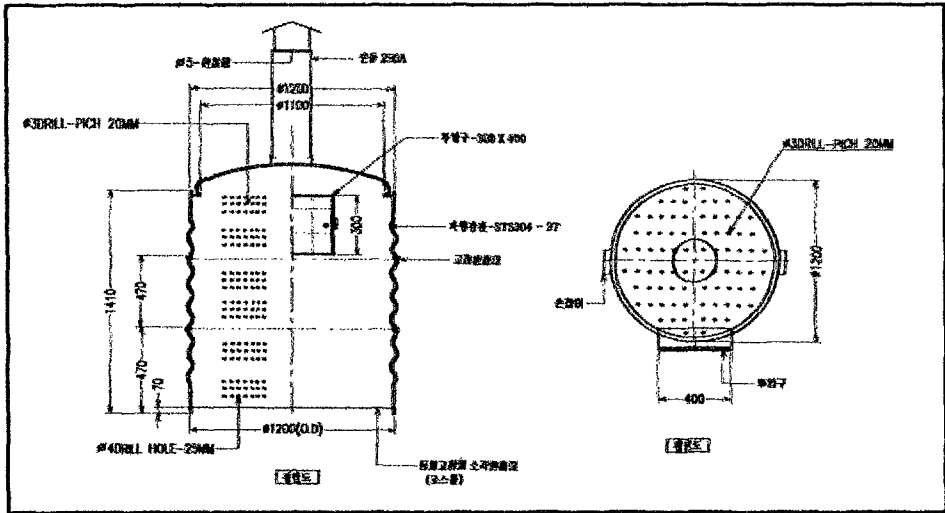
본 소각로의 설계도면은 그림 10과 같으며 제작 기술은 현재 실용신안 출원중에 있다.



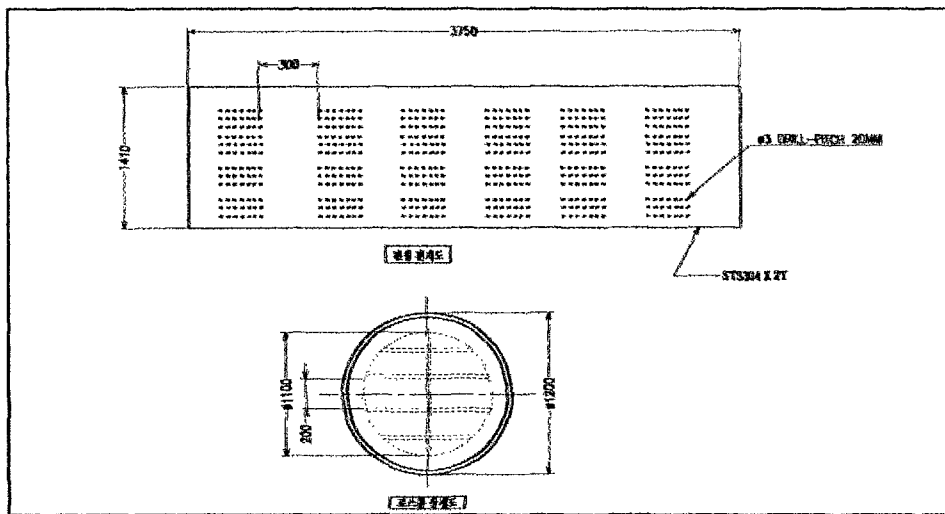
소형소각로 전면, 평면도



소형소각로 펼친 전개도



중형소각로 전면, 평면도



중형 소각로 펼친 전개도

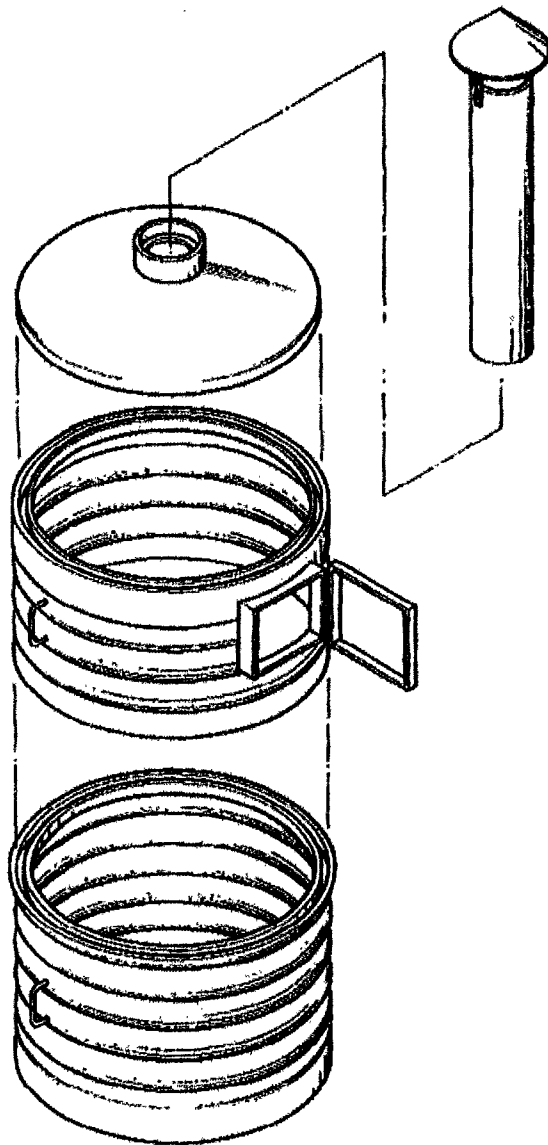


그림 10. 조림식 소각로 설계 도면

2) 조립식 소각로 소각 시험

소각로의 연소광경은 그림 11과 같다. 소각로 2종의 경급별 연소시간은 표 9와 같이 경급이 클수록 연소시간이 길었으며 노지 소각과 비교해 볼 때, 경급이 20cm 미만일 경우 노지 소각의 연소시간이 소각로 보다 짧은 것으로 나타났으나 경급이 20cm이상일 경우 오히려 노지 소각의 연소시간이 소각로에 비해 더 긴 것으로 나타났다.

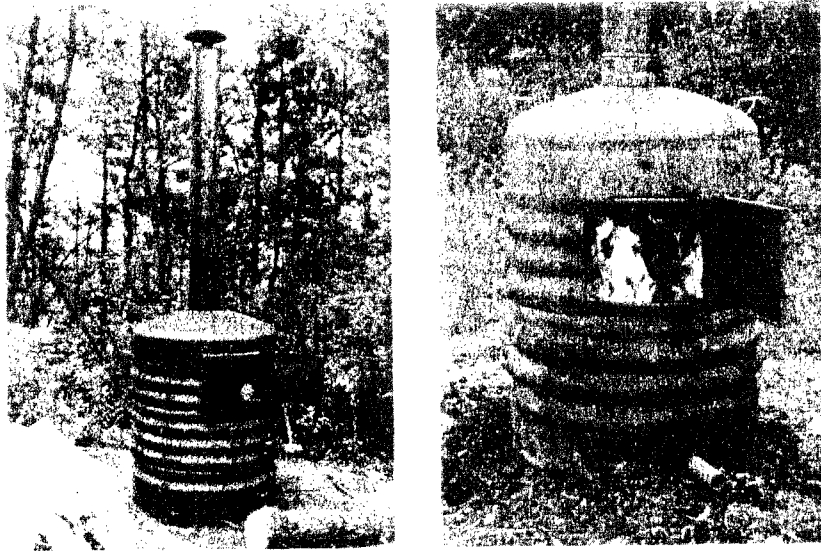


그림 11. 조립식 소각로 연소 광경

표 9. 조립식 소각로의 고사목 경급별 연소시간

경 급	0.5m ³ 소각연소시간(분, 평균±sd)		
	소 형	대 형	노 지
10cm미만	232±29.0a*	225±38.7a	120
10~20cm	268±30.1ab	268±30.1ab	250
20cm이상	338±37.7b	335±33.2b	390

*Tukey's studentized range test(5% probability level)

소각로 주변의 거리별 최고온도는 표 10과 같이 중형과 소형간에 큰 차이가 없었으며 소각로에서 1m 떨어진 지점은 최고온도가 50℃ 이상까지 도달되므로 열해의 가능성이 있을 것으로 사료되나 3m 정도 거리를 두었을 때 최고온도는 중형 29.5℃, 소형 31℃로 열해 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다.

표 10. 조립식 소각로의 고사목 경급별 연소시간

소 각 로	수평거리 (m)	최고온도(℃)	도달시간(분)
중 형	지상 1	54.0	60
	지상 2	39.0	90
	지상 3	29.5	40
	지중 1	25.1	240
소 형	지상 1	52.0	120
	지상 2	39.5	40
	지상 3	31.0	120
	지하 1	30.0	210

현재 적용하고 있는 피해목의 노지 소각을 대신하여 조립식 소각로를 이용하여 방제할 경우 피해목을 벌채와 동시에 완벽하게 처리할 수 있으며 산불 발생 우려가 현저하게 감소되고 열해목이 거의 발생하지 않는 장점이 있다. 또한 조립식 소각로는 운반, 이동이 가능하므로 집단피해지는 물론 확산선단지에서도 유력한 방제수단으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 방충소재 개발

가. 재료 및 방법

2001년 4월에 소나무재선충 피해목을 벌채하여 약 1m 크기로 잘라서 조제한 후 임업연구원 남부임업시험장으로 반입하여 집제한 후, 방충소재(PVA: Poly Vinyl Alcohol, 그림 12)만 피복했을 때 성충 탈출 여부와 메프50%유제를 10배, 100배액을 처리했을 때 약효 지속성 및 성충 탈출 여부를 조사하였다.

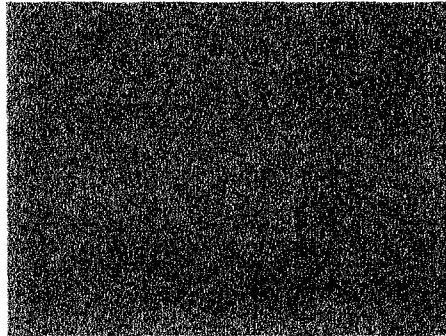


그림 12. 방충소재

나. 결과 및 고찰

집재목을 카시미론솜 (4oz)만으로 피복했을 때 솔수염하늘소 성충의 탈출이 가능하여 방충 효과가 없었으며 메프50%유제를 처리했을 때 표 11과 같이 처리 후 68일이 경과되어도 성충이 탈출하지 못한 채 폐사되는 것으로 나타났다.

표 11. 집재목 피복재 약제 처리효과

피복재	약 제	희석배수	처리경과일별 살충률 (%)	
			41일	68일
카시미론솜 (4oz)	메프50%유제	10배	100	100
		100배	100	100

제3절 화학적방제

1. 피해목 약제 혼중처리

가. 인화늄정제(에피폼®) 혼중효과

1) 재료 및 방법

2000년 2월과 10월에 바다에 비닐(0.05mm) 2겹을 피복하고 1m 길이의 원목을 1㎡ 정도 집제한 후 인화늄정제(그림 13)의 약량을 달리하여 집재목에 끌고루 처리하여 비닐(0.05mm) 2겹으로 밀봉한 후 처리 1주일 후에 원목을 절개하여 솔수염하늘소 유충의 폐사 여부를 조사하였다.



그림 13. 인화늄정제

2) 결과 및 고찰

인화늄정제의 처리시기별, 약량별 살충률은 표 12와 같다. 처리시기에 따라 살충률에 차이가 커서 1㎡당 12g 처리시 겨울철인 2월에는 전혀 죽지 않았으나 가을철인 10월에는 97.4%의 높은 살충률을 나타내었으며 겨울철의 경우 100% 완벽한 살충률을 나타내기 위해서는 1㎡당 126g이라는 과도한 약량이 소요되어 대체약제 선발이 필요한 것으로 판단되었다.

표 12. 인화늄정제의 혼증처리효과

처리시기	약량 (g/㎡)	살충률 (%)
2002. 2	12	0.0
	18	17.7
	24	6.0
	36	40.0
	48	88.9
	126	100.0
2000. 10	12	97.4
	48	100.0
	84	100.0
	120	100.0

나. 양고추냉이 혼증효과

1) 재료 및 방법

양고추냉이의 살충성분을 가스, 액제, 마이크로캡슐로 제제화한 혼증제(그림 14)를 이용하여 집재목 1㎡당 가스는 1EA(10ml), 3EA(30ml), 액제는 40ml, 50ml, 60ml, 마이크로캡슐은 100g씩 처리하여 밀봉한 후 처리 1주일 후에 원목을 절개하여 솔수염하늘소 유충의 폐사 여부를 조사하였다.

2) 결과 및 고찰

양고추냉이 살충성분의 제형별, 약량별 살충률은 표 13과 같다. 가스 제형은 1㎡당 3EA(30ml) 처리시 83.3%의 살충률을 나타냈으며 액제는 1㎡당 40ml, 60ml 모두 100%의 살충률을 보였으나 훈증처리시 바닥을 비닐(0.05mm)로 피복하지 않았을 때는 전혀 살충효과가 없었다. 마이크로캡슐제는 1㎡당 100g 처리시 57.1%의 살충률을 나타내었다.

표 13. 양고추냉이 살충성분의 훈증처리 효과

제 형	처리시기	약량/㎡	살충률 (%)
가스(캡스탄®)	2000. 4	1EA(10ml)	31.6
	2001. 5	3EA(30ml)	83.3
액제(캡스탄®)	2001. 5	40ml	100
	2001. 5	60ml	100
	2001.11	50ml	0.0*
마이크로캡슐	2001. 4	100g	57.1

* 바닥 비닐 미피복



그림 14. 양고추냉이 혼증제

다. 메탐소디움(킬퍼®)25%액제 혼중효과

1) 재료 및 방법

2000~2001년에 바다에 비닐(0.05mm) 2겹을 피복하고 1m 길이의 원목을 1㎡ 정도 집재한 후 메탐소디움25%액제(그림 15)의 약량을 달리하여 집재목에 골고루 처리하여 비닐(0.05mm) 2겹으로 밀봉한 후 처리 1주일 후에 원목을 절개하여 솔수염하늘소 유충의 폐사 여부를 조사하였다.

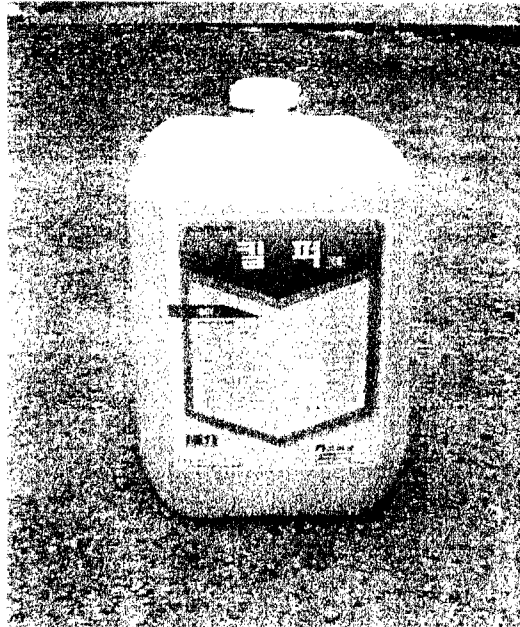


그림 15. 메탐소디움25%액제

2) 결과 및 고찰

메탐소듐25%액제의 처리시기별, 약량별 살충률은 표 14와 같다. 표 14에서 보는 바와 같이 처리시기, 처리약량에 관계없이 모두 100%의 완벽한 살충률을 나타내었다. 현재 사용되고 있는 훈증처리약제인 인화늄정제는 살충성분이 인화수소로 인체에 대한 독성이 아주 강한 고독성 농약으로 농약공업협회에서 주관하는 안전교육을 이수한 후 취급이 가능하며 집재목 훈증처리시 1㎡당 약제대는 6,800원(40정, 120g기준)이며 처리시기(온도)에 따라 방제효과에 차이가 있는 단점이 있다. 반면 메탐소듐25%액제는 살충성분이 메틸이소티오시아네이트인 보통독성 농약으로 사용하는데 제한이 없으며 집재목 훈증처리시 1㎡당 약제대는 4,375원(0.7ℓ 기준)으로 인화늄정제보다 오히려 저렴하며 처리시기에 관계없이 1㎡당 0.5~1ℓ 처리시 100%의 완벽한 살충률을 나타내고 있다. 따라서 앞으로는 훈증처리약제로 인화늄정제를 대체하여 메탐소듐25%액제를 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

표 14. 메탐소듐25%액제의 훈증처리효과

처리시기	약량(ℓ/㎡)	살충률(%)
2000. 10	0.5	100
2001. 4	0.5	100
2001. 5	0.7	100
	1.0	100
2001. 10	0.7	100

라. 훈증처리 방법 개선

1) 재료 및 방법

현행 훈증처리방법 개선을 위해 바닥에 비닐을 깔지 않고 훈증했을 때와 집재목의 피복재료로 비닐 2겹 대신 비닐과 카시미론을 혼용했을 때 훈증처리 효과를 비교 조사하기 위해 2001년 10월에 메탐소디움25%액제를 1㎡당 0.7ℓ 기준으로 각각 처리한 후 1주일 후에 원목을 절개하여 솔수염하늘소 유충의 폐사 여부를 조사하였다.

2) 결과 및 고찰

메탐소디움25%액제를 1㎡당 0.7ℓ 처리를 기준으로 바닥을 비닐(0.05mm) 2겹으로 피복하고 집재목을 비닐(0.05mm) 2겹으로 밀봉했을 때와 바닥을 피복하지 않은 채 단순히 비닐 2겹과 비닐 1겹에 카시미론 1겹으로 각각 밀봉한 경우 모두 100%의 완벽한 살충률을 나타내었다. 바닥에 비닐을 깔지 않을 경우 작업시간이 단축되고 재료비도 25%정도 절감되며 비닐 2겹대신 비닐 1겹에 카시미론을 사용할 경우 추가로 재료비가 약 18% 정도 절감되는 것으로 나타났다 (표 15).

표 15. 훈증처리방법별 재료비 비교 (메탐소디움25%액제 0.7ℓ/㎡처리 기준)

훈증방법	바닥피복여부	재료비 (원)			
		계	비닐	카시미론	약제
비닐(0.05mm) 2겹	무	10,525	6,150		4,375
비닐(0.05mm) 2겹	비닐(0.05mm) 2겹	12,305	7,930		4,375
비닐(0.05mm) 1겹	무	8,655	3,080	1,200	4,375
+ 카시미론 4oz					

표 16은 기존 인화늄정제에 의한 훈증처리방법과 메탐소디움25%액제를 비닐 1겹과 카시미론 1겹으로 피복하여 훈증처리했을 때 방제비용을 비교한 것으로 메탐소

디움을 이용하여 훈증처리할 경우 1㎡당 8,655원으로 인화늄정제 훈증처리 재료비 14,730원보다 6,075원(약 40%) 절감되는 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 훈증처리는 바닥을 피복하지 않고 메탐소디움25%액제를 집재목 1㎡당 0.7ℓ 처리한 후 비닐 1겹과 카시미론 1겹으로 밀봉하는 것이 효율적일 것으로 판단되었다.

표 16. 훈증처리방법별 방제비 비교

약 제	재료비(1㎡당)			훈증방법	
	계	약제대	피복비	바닥피복	집재목 밀봉
인 화 뇨	14,730	6,800 ^{*1}	7,930	비닐(0.05mm) 2겹	비닐(0.05mm) 2겹
메탐소디움	8,655	4,375 ^{*2}	4,280	-	비닐(0.05mm) 1겹+ 카시미론(4oz) 1겹

* ¹ 40정, 120g 기준, ² 0.7ℓ 기준

2. 피해목 표면 약제 처리

가. 재료 및 방법

2000년 춘기(5월)와 추기(10월)에 메프50%유제외 3약종(표 17)을 공시하여 회석배수를 달리하여 피해목 표면에 처리한 후 10~14일후에 살충률을 조사하였다.

표 17. 공시약제

일반명	상표명	제형	유효성분
메프	스미치온, 호리치온	유제	fenitrothion 50%
	스미치온	오일	fenitrothion 40%
지오릭스	지오릭스, 마릭스	분제	endosulfan 3%
그로메	렐단	유제	chlorpyrifos-methyl 25%

나. 결과 및 고찰

피해목 표면에 메프50%유제의 3약종을 희석배수를 달리하여 처리했을 때 효과는 표 18과 같다. 표 18에서 보는 바와 같이 메프50%유제를 제외하고는 전반적으로 살충효과가 저조하였으며 메프50%유제의 경우 춘기에는 100배액 처리에서도 97%이상의 높은 살충력을 보였으나 추기에는 25배 및 50배의 고농도에서도 살충률은 상대적으로 낮게 나타났다.

표 18. 집재목 표면처리 효과

약 제 명	처리일	희석배수	살충률(%)
메프50%유제	5. 12	100배	97.1
	5. 22	100배	100
	10. 18	25배	77.7
	10. 18	50배	90.0
메프40%오일	10. 18	25배	31.0
	10. 18	50배	30.9
지오릭스3%분제	5. 12	6kg/a	27.6
	5. 22	6kg/a	6.6
그로메25%유제	5. 12	100배	35.3
	5. 22	100배	23.5
	10. 18	25배	54.6
	10. 18	50배	48.1
무처리	5. 12	-	0
	5. 22	-	0
	10. 18	-	0

3. 항공약제방제

가. 항공방제용 약제 선발

1) 재료 및 방법

솔수염하늘소 방제를 위한 항공방제용 저독성 약제 선발을 위하여 2000년 6월 16일 경남 함안군 대산면의 해송임지에 약제살포 구역을 정한 후 이미다클로프리트 20%액제, 치아메톡삼12.5%액제, 메프50%유제 각 100배액을 D6 노즐을 이용하여 ha당 3.6ℓ씩 항공살포를 하였다. 방제효과 조사는 처리별로 우화상에서 채집한 솔수염하늘소 성충 10마리씩을 넣은 망실(100cm×50cm) 5개씩을 수고 10m내외의 해송 측지에 걸어둔 후 약제살포 1일후 망실에 넣은 솔수염하늘소의 살충률을 조사하였다.

2) 결과 및 고찰

이미다클로프리트20%액제, 치아메톡삼12.5%액제, 메프50%유제 각 100배액을 ha당 3.6ℓ 항공살포했을 때 솔수염하늘소의 살충율은 표 19과 같다. 이미다클로프리트 20%액제 처리의 경우 기존 항공살포약제인 메프50%유제 처리와 마찬가지로 100%의 살충율을 나타내었다. 이미다클로프리트는 메프보다 독성이 낮으므로 항공방제약제로 대체하여 사용한다면 산림생태계에 미치는 영향이 상대적으로 적을 것으로 판단된다 (표 20).

표 19. 처리약제별 항공방제효과

약 제 명	살충률(%)
메프50%유제	100
이미다클로프리트20%액제	100
치아메톡삼12.5%액제	70
무처리	0

표 20. 이미다클로프리드와 메프의 독성 비교

구 분	약 제	
	이미다클로프리드	메 프
경구독성(쥐, LD ₅₀ , mg/kg)	450	250
1일섭취용량(mg/kg)	0.057	0.005
어독성(송어 LC ₅₀ , mg/l)	211	1.7
양봉 독성	약	강

나. 항공방제 환경영향 평가

1) 재료 및 방법

소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소의 방제용으로 사용하는 메프50%유제 성분의 방제 지역으로부터 수계의 유출농도 수준 및 유출경로에 대한 정량적 평가를 실시하였다. 2001년 6월 항공방제를 3회 실시한 부산광역시 기장군 철마면 산림지역 배출수계의 한 지점을 선정하고 지속적으로 물을 채취하여 메프의 잔류량을 분석하였으며, 경남 함안군 철서면 태곡리 소재 소규모 방제구(2회 실시)에서는 살포농약의 산림환경 중 분포, 이동, 잔류소장 등에 관한 행적을 추적하였다.

항공살포의 문제점으로 인식되고 있는 비산에 의한 주변환경에 대한 오염 피해 가능성을 확인하고자 살포지역 내 낙하량 및 주변 인근지역 낙하량을 측정하였다. 살포 대상 목표인 소나무에 대한 농약의 부착율과 농약의 지표 도달율을 여지를 사용하여 측정 계산하였으며, 강우에 의한 소나무 부착 농약의 wash-off (우세) 농도를 측정하였고, 수계유출농도와 솔잎, 부엽/부식토 및 토양중 농도를 지속적으로 측정하였다.

2) 결과 및 고찰

시험지 내 개활 공간인 분포주변과 인접 숲 속 지표면 낙하량을 항공살포전에

설치한 여지에 부착된 농약을 분석하여 계산하였다 (표 21). 6월 8일 1차 방제시 2개 지점, 6월 29일 2차 방제시 1개 지점을 선정하여 지점당 5반복으로 농약을 채취 측정 한 결과, 방제시기와 지점 및 반복간의 차이는 상당히 컸으나 개활지 평균 낙하량은 17.4mg/m²로 이론적 계산치인 15mg/m²에 가까운 값을 나타내었으며 숲 속 지표 낙하량은 3.1mg/m²으로 측정되었다. 소나무에 대한 부착량은 전체 낙하량에서 지표 낙하량을 제한 14.3mg/m²으로 계산하였다.

표 21. 매프 살포시 환경내분포(이론적 투하량 15mg/m²)

분포부위별	총낙하량 (3반복)	인근 낙하량 (10m거리)	지표 낙하량 (3반복)	임목 부착량
분포농도	17.4mg/m ²	0.007mg/m ²	3.1mg/m ²	14.3mg/m ²
분포율	100%	< 0.4%	1.78%	82.2%

살포농약의 지표 도달량은 살포시의 낙하량과 강우시의 wash-off에 의한 도달량의 합으로 구하였다 (표 22). 6월 29일 2차 방제 완료 약 8시간 후 26.5mm의 강우에 의하여 부착량의 4%(0.59mg/m²)가 빗물에 씻겨 지표면에 도달하였다. 6월 30일부터 7월 6일까지의 wash-off량은 수집된 빗물중의 농도와 강우량을 사용하여 계산한 결과 일차 wash-off량의 10분의 1 수준이었고, 전체 지표 도달량은 살포량의 21.6% 수준인 3.75mg/m²으로 계산되었다.

표 22. 매프의 지표 도달 경로별 농도

도달경로별	지표도달량 (계산)	지표 낙하량 (3반복)	Wash-off (1차, 6/29일)	Wash-off (2차, 6/30-7/6)
경로별 농도	3.75mg/m ²	3.1mg/m ²	0.59mg/m ²	0.06mg/m ²
살포량대비율	21.6%	17.8%	3.4%	0.3%

위와 같은 경로로 지표에 도달한 메프의 잔류소장을 추적한 결과는 표 23과 같다. 2차 방제 직후의 농도는 강우로 인하여 측정하지 못하였으나 전날 채취시료 중의 잔류농도와 지표 낙하량과 일차 wash-off량을 감안하면 $4\text{mg}/\text{m}^2$ 을 상회할 것으로 추정된다. 부엽토중의 농도는 약제살포 48일 경과 후 약 10분의 1 수준으로 감소하였으며, 부엽토 밑 토양층에서는 메프가 검출되지 않았다. 2차 방제 후 250mm 이상의 강우가 있었으나 메프는 부엽토층을 지나 토양층까지는 도달하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 강우시 부엽토층과 토양층 사이를 흐르는 유출수에 의한 메프의 수계로의 유입 가능성은 거의 없을 것으로 생각되며 표 24의 결과는 이러한 추정을 잘 반영하는 것으로 드러났다. 다만 2차 살포 8시간 후 채취한 계곡 유출수 중에서 메프가 매우 낮은 수준으로 검출된 것은 강도 높은 강우에 의한 빗물의 갑작스러운 다량 유출에 의한 것으로 판단되며, 검출농도와 강우량으로 계산하면 살포량 대비 수만 내지 수십만분의 1 수준일 것으로 추정된다. 그리고 이렇게 유출된 메프도 토양 흡착력으로 인하여 소류지까지는 도달하지 못하는 것으로 사료된다.

표 23. 지표 도달 메프의 잔류량 변화

부위별	채취일자별 부엽토 및 토양 메프 잔류농도				
	2차살포	2차살포	2차살포	2차살포	20차살포
	1일전	당일	7일후	20일후	48일후
부엽토	0.94mg/m ²	결측	2.26mg/m ²	1.04mg/m ²	0.47mg/m ²
부엽토밑 토양	불검출	결측	불검출	불검출	불검출

* 불검출은 0.0001ppm 미만

표 24. 시험지 내 유출수 및 인접 저수지 물 중 메프 잔류농도

수계별	2차살포 후 경과기간					
	1일 전	당일	1일 후	7일 후	20일 후	48일 후
계곡유출수	불검출	0.00009ppm	불검출	불검출	불검출	불검출
인근소류지	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출

* 불검출은 0.0001ppm 미만

이상의 결과를 종합하면 메프유제의 경우 산림방제 농약의 수계유입경로 중 비산과 지하수에 의한 유입 가능성은 거의 없는 것으로 드러났으며, 메프의 부엽토 및 토양에 대한 강한 흡착력으로 인하여 물에 녹은 상태로의 유출량은 매우 낮으며, 산림지역의 토양피복 특성상 토양 등 부유입자에 흡착된 형태로의 유출 가능성도 거의 없을 것으로 판단된다.

한편 솔잎 중 메프의 잔류량은 상단부위에서 2차 방제 직후 0.92ppm에서 48일 경과후인 8월 16일에는 0.04ppm으로 하단부위 잎 중에서는 2차 방제 직후 0.64ppm에서 0.02ppm로 감소하였다. 메프의 솔잎 중 잔류량 수준을 국내 농산물중 잔류허용기준과 비교하여 보면 방제 48일 후에는 가장 낮은 기준인 파에 대한 0.02ppm보다 상회하나 나머지 모든 작물에 대한 기준치보다는 낮은 것으로 나타났다 (표 25).

표 25. 지표 도달 메프의 잔류량 변화

부위별	채취일자별 솔잎중 메프 잔류농도(ppm)			
	2차살포 당일	2차살포 7일후	2차살포 20일후	2차살포 48일후
상단엽*	0.918	0.345	0.214	0.042
하단엽**	0.641	0.101	0.055	0.023

* 상단엽 : 지상 4~5m, 약제살포시 직접노출 솔잎

**하단엽 : 지상 1~3m, 중간 이하의 솔잎

기장군 철마면 매프 살포지역 내의 모든 유출수가 배출되는 경로 중 가장 상류에 속하는 연구리 소재 보림교에서 매프 1차방제 1일전인 6월 3일부터 8월 16일까지 3회의 방제 및 강우시기를 포함하여 15회 물을 채취하여 분석하였다. 함안군 시험구에서 행한 매프의 행적 추적 결과에서 예상되었듯이 전 시험기간 동안에 매프는 검출되지 않았으며 검출한계는 0.0001ppm 수준이었다. 매프의 국내 음용수중 잔류허용기준은 0.004ppm으로 매프의 산림항공방제의 의한 수계 오염은 우려할만한 상황이 아니라고 판단된다.

4. 침투성살충제 수간주사

가. 재료 및 방법

소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소가 성충으로 우화 탈출한 후 소나무의 가지를 후식할 때 살충효과를 나타내는 약제를 선발하기 위해 2000년 6월 26일 경남 진주시 소재 임업연구원 남부임업시험장 가좌시험림에서 흉고직경 10~15cm의 해송을 대상으로 각 나무별로 지상 50cm 정도의 수간부에 동력천공기로 직경 1cm, 깊이 7~8cm의 구멍을 뚫은 후, 표 26의 공시약제를 분당 흉고직경 cm 당 0.3, 0.6, 0.9cc씩 각각 30분씩 주입하였다.

표 26. 공시약제의 특성

일반명	상표명	제형	유효성분
포스팜	다이메크론	액제	posphamidon 50%
이미다클로프리드	코니도	액제	imidacloprid 4%
아세타미프리드	-	액제	acetamiprid 20%

살충효과 조사는 솔수염하늘소 성충을 직경 11cm petri-dish에 넣고 각 처리목 별로 1일 간격으로 솔수염하늘소의 후식 선호도가 가장 높은 3~4년생 가지를 공급해 주면서 후식 24시간 경과 후 치사여부를 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

침투성 살충제의 수간주사에 의한 솔수염하늘소 후식방지 효과를 조사한 결과, 표 27에서 보는 바와 같이 공시약제 모두 흉고직경 cm당 0.3cc를 주사했을 때는 전혀 살충효과가 없었으나 0.6cc 이상을 주사한 경우 포스팜액제와 이미다클로프리드액제는 수간주사후 8일부터 살충효과가 있었으며 아세타미프리드액제는 살충효과가 없는 것으로 나타났다.

표 27. 수간주사후 경과일에 따른 약종별 살충효과

약제명	약량 (cc/DBHcm)	매개충 후식 24시간 경과후 치사여부			
		2일	4일	8일	14일
포스팜액제	0.3	-	-	-	-
	0.6	-	-	+	+
	0.9	-	-	+	+
이미다클로프리드액제	0.3	-	-	-	-
	0.6	-	-	+	+
	0.9	-	-	+	+
아세타미프리드액제	0.3	-	-	-	-
	0.6	-	-	-	-
	0.9	-	-	-	-

5. 유인제

가. 재료 및 방법

1) 유인물질 탐색

1999년 6~7월에 유기용매인 ethanol과 benzene의 솔수염하늘소 성충 유인력 및 소나무에 많이 존재하는 휘발성 물질인 α -pinene, 합성 terpenine과 소나무 정유(essential oil) 물질에 유기용매를 섞었을 때의 유인력을 검정하였다. 공시충은 1999년 4월에 경남 진주시와 함안군의 소나무재선충 피해지에서 소나무 조직내에 서식하고 있는 솔수염하늘소를 원목내 서식 상태 그대로 채집하여 야외 사육상에 두고 5월 중순부터 우화되는 성충을 이용하였다. 유인력 검정은 4처리씩 조합하여 십자형으로 제작된 사육상의 각 cell에 처리별로 놓고 솔수염하늘소 성충 10~20마리를 망실의 중앙에 놓은 후, 각 사육상에 유인되는 솔수염하늘소의 유인수로 조사하였으며 각 처리별로 4반복하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 유인물질 탐색

유기용매인 benzene(B)과 ethanol(E)의 조성을 달리하여 처리했을 때의 유인력을 보면 표 28와 같이 benzene 100% 처리에서 유인력이 가장 높게 나타났다.

표 28. 유기용매 benzene(B)과 ethanol(E)의 조성을 달리했을 때의 유인력

조합		유인수(평균±SD)			
1	B100%	E100%	B50%:E50%	대조구	무반응
	4.0±0.73	1.2±0.57	1.2±0.57	0.4±0.51	13.4±0.99
2	B80%:E20%	B50%:E50%	B100%	B20%:E80%	무반응
	2.4±0.51	4.8±0.62	6.2±0.71	1.2±0.57	5.3±1.2

합성 terpentine을 단독으로 처리했을 때와 합성 terpentine에 benzene과 ethanol을 유기용매로 사용하여 처리했을 때의 유인력을 비교 조사한 결과 합성 terpentine 단독 처리에서 유인력이 상대적으로 높은 것으로 나타났다(표 29, 30).

표 29. 합성 terpentine(T)에 benzene(B)을 유기용매로 사용했을 때의 솔수염하늘소 성충 유인력

유인수 (평균±SD)				
T100%	T80%:B20%	T60%:B40%	T40%:B60%	무반응
2.5±0.52	1.8±0.75	1.2±0.62	0.8±0.45	3.7±1.28

표 30. 합성 terpentine(T)에 ethanol(E)을 유기용매로 사용했을 때의 솔수염하늘소 성충 유인력

유인수 (평균±SD)				
T100%	T80%:E20%	T60%:E40%	T40%:E60%	무반응
2.6±0.90	0.2±0.57	1.8±0.57	0.5±0.67	3.9±0.90

표 31은 소나무 정유(essential oil)를 단독으로 처리했을 때와 정유에 ethanol과 benzene, 합성 terpentine을 혼합 처리했을 때의 유인력을 비교 조사한 결과로 정유에 ethanol을 혼합했을 때의 유인력이 가장 높은 것으로 나타났다(표 31).

표 31. 소나무 정유(O)에 용매를 혼합했을 때의 솔수염하늘소 성충 유인력

유인수 (평균 ± SD)				
O100%	O50%:E50%	O50%:B50%	O50%:T50%	무반응
1.7±0.49	2.4±0.66	1.1±0.79	0.8±0.38	4.1±0.99

표 32은 일본에서 솔수염하늘소 성충에 대해 유인력이 가장 좋은 것으로 알려진 α -pinene을 대상으로 해송과 유인력을 비교 시험한 결과로 α -pinene의 유인력은 해송보다 떨어지는 것으로 나타났다.

표 32. α -pinene(P)의 솔수염하늘소 성충 유인력

유 인 수 (평균 \pm SD)				
해송	P100%	P50%:E50%	P50%:B50%	무반응
3.7 \pm 0.77	2.2 \pm 0.83	2.5 \pm 1.16	2.3 \pm 0.65	3.8 \pm 2.44

제4절 생물적방제

1. 매개충의 천적미생물 종류 조사

가. 재료 및 방법

1) 천적미생물 채집

1999~2000년에 경남 진주와 함안의 소나무재선충 피해임지에서 소나무재선충 감염목을 벌채한 후 수피를 벗기고 목질부를 절개하면서 목질부내에 서식하는 곤충 중 천적미생물에 의해 폐사된 곤충을 채집하였다.

2) 천적미생물 분리동정

천적미생물의 포자가 미형성된 폐사충은 한천배지(water agar)에 올려놓아 균사가 자라거나 포자가 형성되도록 한 후 감자한천배지(potato dextrose agar)에 재접종하여 순수 분리 배양하였고 포자가 형성된 폐사충은 감자한천배지에 직접 접종하여 분리한 다음 동정하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 매개충의 병원미생물 종류

1999년 2월부터 7월까지 진주, 함안의 소나무재선충 피해지에서 채집한 천공성 해충은 솔수염하늘소를 포함한 7종이었고 이들의 폐사충에서 분리한 병원미생물은 표 33과 같이 *Beauveria*가 대부분이었으며, 솔수염하늘소의 성충과 유충, 애소나무좀에서 *Beauveria*가 각각 분리되었다 (그림 16). 솔수염하늘소의 성충에서 분리된 *Beauveria*와 *Metarrhizium*의 형태는 그림 17과 같다.

표 33. 소나무 고사목내 폐사충으로부터 분리된 병원미생물 종류

폐 사 충	충태			천적미생물 종류
	유충	번데기	성충	
하늘소과(<i>Cerambycidae</i>)				
솔수염하늘소(<i>Monochamus alternatus</i>)	○	○		<i>Beauveria</i> sp.
		○		<i>Bacillus</i> sp.
	○			<i>Metarrhizium</i> sp
하늘소류	○			<i>Beauveria</i> sp.
바구미과(<i>Curculionidae</i>)				
소나무노랑점바구미(<i>Pissodes nitidus</i>)	○	○	○	<i>Beauveria</i> sp.
흰점바구미(<i>Shirahoshizo insidious</i>)	○		○	<i>Beauveria</i> sp.
왕바구미(<i>Siphalinus gigas</i>)	○			<i>Beauveria</i> sp.
나무좀과(<i>Scolytidae</i>)				
소나무좀(<i>Tomicus piniperda</i>)	○	○	○	<i>Beauveria</i> sp.
애소나무좀(<i>Tomicus minor</i>)	○	○	○	<i>Beauveria</i> sp.
				<i>Bacillus</i> sp.
가문비왕나무좀(<i>Xyleborus validus</i>)			○	<i>Beauveria</i> sp.
오리나무좀(<i>Xylosandrus germanus</i>)	○		○	<i>Beauveria</i> sp.

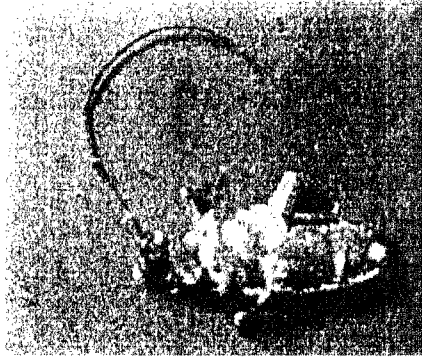


그림 16. *Beauveria* sp.에 감염된 솔수염하늘소 유충

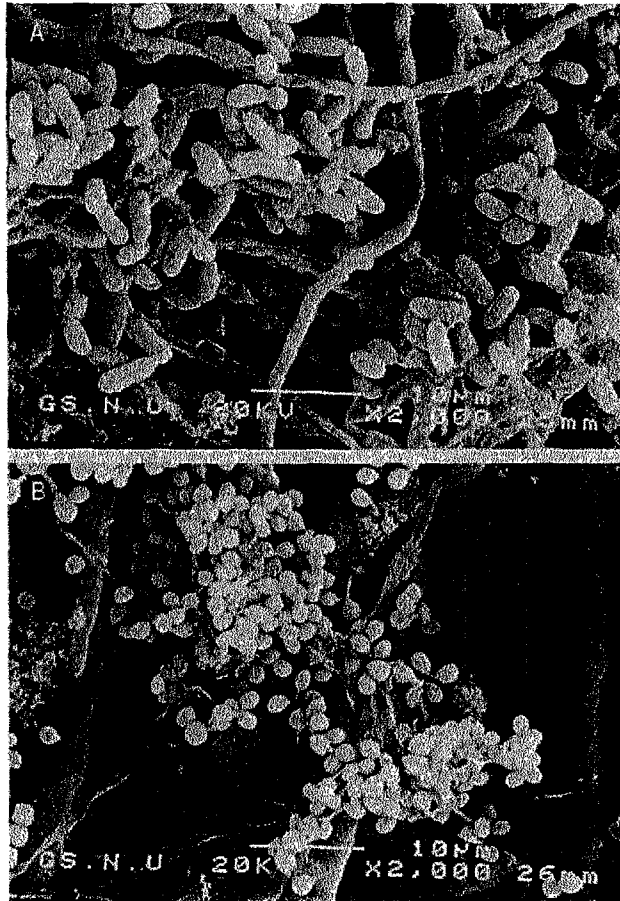


그림 17. 솔수염하늘소 유충에서 분리된 *Metarrhizium*(상)과 *Beauveria*(하)

2) 매개충의 병원미생물 감염율

1999~2000년에 경남 진주와 함안의 소나무재선충 피해지역에서 매개충인 솔수염하늘소의 *Beauveria* 감염률을 조사한 결과 표 29와 같이 진주 3.8%, 함안 4.6%로 나타났다.

표 34. 매개충의 병원미생물 *Beauveria* 감염율

조사장소	조사유충수(마리)	감염유충수(마리)	감염률(%)
경남 진주	53	2	3.8
경남 함안	22	1	4.6

2. 매개충의 병원미생물 생물검정

가. 재료 및 방법

1) 공시 천적

곤충병원성 선충은 경상대학교 농생물학과 선충연구실에서 끝벌부채명나방 (*Galleria mellonella*)의 유충을 이용하여 대량증식한 *Steinernema* sp.와 *Heterorhabditis* sp.를 분양받아 이용하였으며 곤충병원성 곰팡이 *Beauveria*는 경남 진주와 함안의 소나무재선충 피해지역에서 *Beauveria*에 감염된 솔수염하늘소 유충으로부터 분리한 균을 이용하였다.

2) 생물 검정

병원미생물의 생물검정은 실내 petri-dish법으로 직경 9cm의 petri-dish에 수분 30%정도의 소나무 톱밥을 채운 후 솔수염하늘소 유충을 1마리씩 넣고 유충 1마리당 선충을 100마리, 200마리, 400마리씩 각각 접종하여 25℃ 항온기에 보관한 후 처리 5일 후에 선충에 의한 치사유무를 조사하였다. 곤충병원성 곰팡이는 PDA배지에서 배양한 후 현탁액(10^9 , 10^8 , 10^7 , 10^6 /ml)을 선충처리 방법과 동일하게 처리하였다. 각 처리당 10마리를 1반복으로 3반복 처리하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 곤충병원성 선충

곤충병원성 선충에 의한 솔수염하늘소 유충의 치사율은 선충의 종류에 따라서는 차이가 없었으나 처리농도에 따라서는 차이가 있었다(표 35). 솔수염하늘소 유충 1마리당 *Heterorhabditis* sp.는 400마리, *Steinernema* sp.는 200마리 이상 처리했을 때 100%의 치사율을 나타내었다.

표 35. 곤충병원성 선충의 솔수염하늘소 유충 치사율

종 류	접종농도/유충	치사율(%)
<i>Heterorhabditis</i> sp.	100마리	60
	200마리	90
	400마리	100
<i>Steinernema</i> sp.	100마리	50
	200마리	100
	400마리	100
무 처 리	-	0

2) 곤충병원성 곰팡이

곤충병원성 곰팡이 *Baeuveria* sp.와 *Meatrrhizium* sp. 처리의 경우 선충과 마찬가지로 종간에는 차이가 없었으나, 처리농도에 따라서 큰 차이를 보였다. *Beauveria* sp.와 *Meatrrhizium* sp. 모두 $10^6/ml$ 이상 처리구에서 치사율이 60% 이상을 나타내었다 (표 36).

표 36 . 곤충병원성 곰팡이의 슬수염하늘소 유충 치사율

종 류	접종농도/ml	치사율(%)
<i>Beauveria</i> sp.	10^9	80
	10^8	90
	10^7	60
	10^6	20
<i>Metarrhizium</i> sp.	10^9	90
	10^8	90
	10^7	60
	10^6	30
무 처 리	-	0

제 4 장 소나무재선충 방제전략 수립 분야

제1절 서 설

생물학적 측면에서 침입(invasion)은 '특정 종이 새로운 지역으로 분포 영역을 확대하는 것'을 의미하며 침입종 중에는 드물게 심한 피해를 나타내지 않는 종도 있으나 대부분 침입 초기에는 기주식물과 草食者(herbivore) 간의 진화를 통한 균형이 미비되어 극심한 피해를 나타내며 어느 정도 시간이 경과되면 피해가 안정되는 경향을 보이고 있다 (Liebhold 등, 1994). 우리나라에서 문제가 되고 있는 산림해충종 솔잎혹파리, 솔껍질깍지벌레, 미국흰불나방, 버즘나무방패벌레 등의 침입종이 대표적인 예이다. 그러나 소나무재선충은 비록 침입종이지만 이들 종과는 전혀 다른 피해 특성을 나타내고 있다. 소나무재선충의 피해 규모는 매개충인 솔수염하늘소의 밀도와 관련이 있다. 솔수염하늘소는 주로 고사된 지 얼마 안된 나무나 고사중인 나무에서 서식하기 때문에 소나무재선충이 우리나라에 분포하기 전에는 자연상태에서 고사되는 나무가 많지 않아 밀도가 낮았지만 소나무재선충을 매개하면서 상황이 달라질 수 밖에 없다. 즉 소나무재선충을 보유하고 있지 않는 솔수염하늘소는 건전목을 후식하더라도 나무의 성장에는 거의 영향을 미치지 못하지만 소나무재선충을 보유한 경우에는 후식하는 나무는 모두 죽고 대부분 3개월 이내에 죽기 때문에 소나무재선충이 만연될수록 고사목은 급격하게 늘어나고 솔수염하늘소의 서식처도 그만큼 많아져서 밀도가 기하급수적으로 증가할 수 있다. 결국 솔수염하늘소의 밀도는 피해 규모와 밀접한 관계가 있으며 환경저항 등에 의한 생태계의 균형 유지로 밀도가 안정되는 것과는 차이가 있는 것으로 사료된다. 이러한 예는 일본의 경우 소나무재선충이 최초 발생된 후 약 94년이 지난 1999년 현재 피해재적량이 아직도 90만㎡에 달하는 것으로도 알 수 있다 (遠田, 2000). 따라서 우리나라의 소나무재선충 문제는 발생 면적이 적은 이 때 박멸을 해야하며 박멸에 실패하여 피해가 계속 확대되어 전국적으로 만연된다면 매년 소요될 막대한 방제비용을 감안할 때 자칫 방제를 포기하는 사태가 오지 않을까 우려된다. 이 경우 우리나라 소나무림은 전멸 위기까지 몰릴 수 있고 설사 전멸이 안된

다 하더라도 소나무림의 대규모 파괴는 국가적 재난으로 임업 기반이 여지없이 무너지는 결과를 초래할 것이다.

본 연구에서는 현 시점이 소나무재선충을 박멸할 수 있는 마지막 기회로 보고 대응전략을 정립하고 소나무재선충 문제를 전담할 수 있는 조직 신설방안과 피해확산을 저지할 수 있는 구체적인 방안을 도출하였다.

제2절 박멸이론 정립

일반적으로 소나무재선충과 같이 외국에서 유입된 침입종에 대한 대응전략으로 가장 먼저 고려할 수 있는 제 1단계 조치는 침입종이 국내에 정착하기 전에 완전히 박멸(eradication)을 시키는 것이다. 이 단계는 국립식물검역소의 고유 업무로 검역시 식물방역법상 금지병해충과 관리병해충을 철저히 색출해서 국내에 유입이 되지 않도록 원천적으로 차단을 해야 하며 해외병해충이 국내에 유입되었을 경우 예상되는 막대한 피해와 방제비용 등을 고려해 볼 때 제 1단계 조치가 매우 중요하다고 볼 수 있다. 제 2단계 조치는 제 1단계 조치가 실패하여 침입종이 국내에 정착은 했으나 그 분포가 제한적이어서 인위적으로 제어가 가능하다고 판단될 경우 침입종의 확산을 저지한 후 피해지역을 압축해 가면서 박멸을 목표로 철저히 방제(control)를 하는 것이다. 제 3단계 조치는 침입종의 분포가 확대되어 전국적으로 만연되었을 경우, 토착병해충과 마찬가지로 상시 방제보다는 병해충의 피해가 우려될 때, 밀도조절 측면에서 관리(management) 조치를 취하는 것이다.

이러한 관점에서 볼 때 현 시점에서의 소나무재선충 문제는 제 2단계에 해당된다. 따라서 소나무재선충 문제의 대응전략으로는 먼저 총력을 기울여서 피해 확산을 저지한 후, 피해지역을 압축, 제어하면서 최종적으로 소탕 박멸하는 방안 즉, “①확산저지→②압축제어→③소탕박멸” 방안을 기본으로 해야 할 것이다.

제3절 확산저지전략

산림병해충 방제는 결국 사람과 돈으로 이루어진다고 해도 과언이 아니다. 소나무재선충이 전국적으로 만연되었을 경우 매년 발생하는 엄청난 피해를 방지하기 위해 소요될 막대한 예산과 노력을 고려해 볼 때 현 시점에서 소나무재선충 방제를 위한 특단의 대책이 요구된다. 이제 소나무재선충 문제는 단순히 방제대책 차원이 아닌 “전쟁” 차원에서 접근해야 할 것이다. 소나무재선충 방제의 기본전략인 “①확산저지→②압축제어→③소탕박멸”이 합리적이라면 이러한 전략을 달성할 수 있는 다양한 전술과 획기적인 신무기(방제기술) 개발이 뒤따라야 할 것이다. 많지 않는 산림병해충 관계자들의 역량을 총결집하여 피해확산을 저지할 수 있도록 한시적이 될 지라도 산림청 주도하에 시·도, 지방산림관리청, 임업연구원, 산림환경연구소, 대학, 민간단체 등이 참여하는 “소나무재선충 특별방제본부 (그림 18)”를 신설, 조직하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 아울러 산하 조직으로 신방제기술 개발, 피해분포정밀조사, 방제전략 및 전술 개발, 방제기술 교육 및 보급 등을 담당할 수 있는 “소나무재선충 연구센터”를 신설하는 것도 필요할 것으로 판단된다. 이들 조직을 중심으로 한 소나무재선충 확산저지의 구체적인 전략은 다음과 같다.

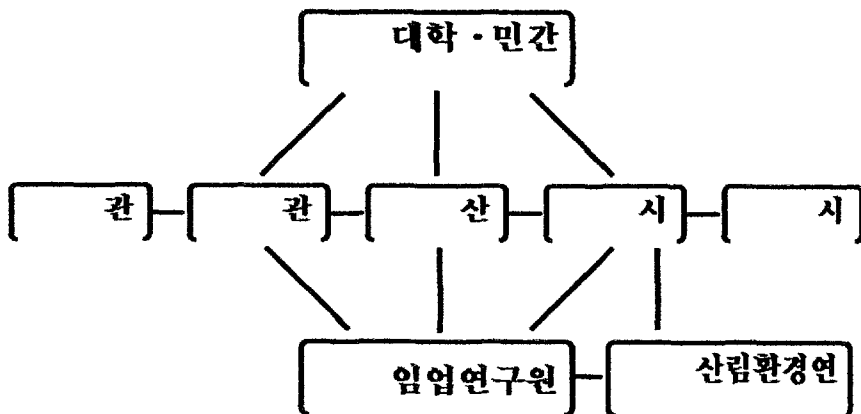


그림 18. 소나무재선충 특별방제본부(안)

1. 저지선 구축

소나무재선충이 계속 확산되고 있는 현 상황에서 기존 발생지의 연결을 차단하기 위한 저지선 구축을 고려해 볼 수 있다. 이 경우 자연 확산을 저지할 수 있는 폭 2~4km 정도의 소규모 방충대가 적당할 것으로 생각된다. 아울러 전국적으로 확산될 경우에 대비하여 대대적인 방충대의 구축 방안을 미리 강구해 볼 필요도 있는 것으로 사료된다.

2. 설계·시공·감리 개념 도입

소나무재선충 방제작업을 철저히 하기 위해서는 설계·시공·감리의 개념을 도입하여 정확한 설계(방제계획)에 의한 철저한 시공(방제실행), 공정한 감리(방제효과 평가)로 방제효율을 높여야 할 것이다. 설계·시공·감리 기관은 표 37과 같이 2중으로 지정하여 연대책임을 가하는 게 적합할 것으로 판단된다.

표 37. 설계·시공·감리기관 방안

구 분	1차기관	2차기관
설 계	시·군·구, 국유림관리소	임업연구원, 산림환경연구소
시 공	산림조합(전문작업단)	시·군·구, 국유림관리소
감 리	대학, 전문기관	산림청, 시·도, 지방산림관리청

3. 정확한 분포조사로 충분한 물량 확보

소나무재선충이 발생한 지역중에서 일부 시군은 자치단체장의 무관심과 열악한 지방재정 때문에 사업비를 충분히 확보하지 못한 상태에서 방제물량을 과소 책정하여 제대로 방제를 하지 못하는 경우가 있는 것으로 생각된다. 소나무재선충 피해의 심각

성을 고려할 때 사업비를 전액 국고로 지원하는 방안이 조속히 마련되어야 할 것이며 충분한 물량 확보를 위해 사업비의 대폭 증액이 뒤따라야 할 것이다. 아울러 정확한 분포 조사를 위해 임업연구원과 산림환경연구소가 주축이 되는 “전문기동예찰팀”을 운영하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 전문기동예찰팀은 경남 4팀(양산·김해권, 함안권, 통영·거제권, 진주·사천권), 부산 1팀, 울산 1팀, 경북 1팀 등 7개팀으로 구성하는 방안을 고려해 볼 수 있으며 주임무는 확산우려지역 피해분포 정밀조사, 방제계획 수립 업무 지원, 긴급방제 및 특별방제 조치 건의 등으로 하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

4. 치밀한 설계 및 철저한 방제작업

소나무재선충 방제전략의 핵심을 피해확산저지로 정했다면 당연히 방제 우선 순위는 확산선단지가 되어야 하고 선단지부터 완벽하게 방제를 한 후 집단발생지 쪽으로 범위를 좁히면서 방제를 실시할 수 있도록 방제계획을 수립하여야 할 것이다. 확산선단지에서는 조립식 소각로를 이용하여 피해목을 벌채 즉시 완벽하게 처리하는 것이 필요하며 임황, 지황 등 입지 조건상 소각로 이용이 불가능할 경우 집재목의 훈증약제처리방법을 적용할 수도 있을 것이다. 집단발생지에서는 조립식 소각로와 집재목 훈증약제처리방법 뿐만 아니라 톱밥제조기나 치퍼를 이용한 파쇄 등도 고려해 볼 수 있다. 예방방제법인 항공약제살포는 집단발생지보다는 확산선단지 위주로 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 공정한 방제효과 평가

소나무재선충 방제효과는 시·군에 따라, 동일 시·군이라도 담당자가 누구였는지에 따라 차이를 보이는 예를 종종 볼 수 있다. 공정한 방제효과 평가는 방제시행상의 문제점을 도출하여 개선 대책을 강구할 수 있고 금후 방제계획 수립의 기초 자료가 되는 점에서 매우 중요하다. 사실 종래 산림병해충 방제업무에서 방제효과 평가를 소홀히 한 점이 많은 것으로 생각된다. 이제부터라도 각 시·군에서는 소나무재선충 방제효과를 정확하게 평가를 해야 될 것으로 생각된다.

제4절 소나무재선충 홈페이지 제작

소나무재선충의 발생정보를 관리하고 소나무재선충의 피해특성과 매개충인 솔수염하늘소의 생태특성을 소개하고 방제기술 등을 보급하기 위해 홈페이지를 구축중에 있다. 홈페이지는 크게 발생정보관리시스템, 전문가(방제)시스템, 일반정보시스템, 정보교환시스템 형식으로 구성되어 있으며 관련정보는 변(1999), 산림청·임업연구원(2001a,b), 정(2001a,b), 정과 이(2001), Kishi(1995) 등의 자료를 이용하여 작성하였으며 구체적인 내용은 부록에 수록되어 있다.

인 용 문 헌

- 변병호. 1999. 소나무 재선충병의 생태와 방제대책. pp. 89~122. 소나무 보존을 위한 병해충 방제, 1999. 9. 17, 한국임업신문. 서울.
- 산림청·임업연구원. 2001a. 사진으로 보는 산림병해충의 생태와 방제. 산림청·임업연구원. 39pp.
- 산림청·임업연구원. 2001b. 소나무재선충병 피해 전국 실태조사. 산림청·임업연구원. 69pp.
- 이창근, 변병호, 박지두, 양성일, 장경한. 1989. 우리나라에서 발생한 소나무재선충과 매개충. 임업연구원연구보고 38: 141-149.
- 정영진. 2001a. 소나무재선충 방제방안 - 경남 진주시 시범방제지 사례를 중심으로 -. pp. 15-26. 제23회 산림병해충방제연찬회, 산림청·임업연구원, 경남 창녕.
- 정영진. 2001b. 소나무재선충 피해특성과 진단요령. pp. 83~98. 수목진단 및 방제기술 III. 강원대학교 산림과학연구소 수목진단센터. 강원 춘천.
- 정영진, 이상명. 2001. 소나무재선충 신방제기술 개발. pp. 64~67. 남부지역 현장 미니세미나. 경남 진주.

- 遠田暢男. 1993. マツノマダラカミキリ・カラフトヒゲナガカミキリ. pp. 149-156. 森林昆蟲, 小林富士雄, 竹谷昭彦 編, 養賢堂, 東京.
- 遠田暢男. 1997. アシア地域におけるマツ材線虫病の被害状況と対策. 森林防疫, 46(10): 2-8.
- 遠田暢男. 2000. 日本の松くい蟲(松材線蟲病)被害現状と防除対策. 未発表資料.
- Kishi, Y. 1995. The pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Thomas Company Limited, Tokyo, Japan.
- 小林光憲. 1986. マツ材線蟲病被害林内に発生した枯死木の調査例 (2) 後食痕の部位および大きさ. 日林東北支誌. 38: 264-266.
- 禎原 寛. 1998. 媒介昆蟲の種類と生活史. pp. 44-64. 松くい蟲(マツ材線蟲病)-沿革と最近の研究. 全国森林病蟲獣害防除協會.
- Liebholt, A.M., MacDonald, W.L., Bergdahl, D., and V.C. Mastro. 1994. Invasion by exotic forest pests: a threat to forest ecosystems. Forest Science Monograph, 30. 49pp.
- Mota, M.M., Braasch, H., Bravo, M.A., Penas, A.C., Bergermeister, W., Metge, K., Sousa, E. 1999. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. Nematology, 1: 727-734.

- 소나무재선충 홈페이지 구축 -



< 소나무재선충 발생연혁 >

● 소나무재선충 국내 발생연혁

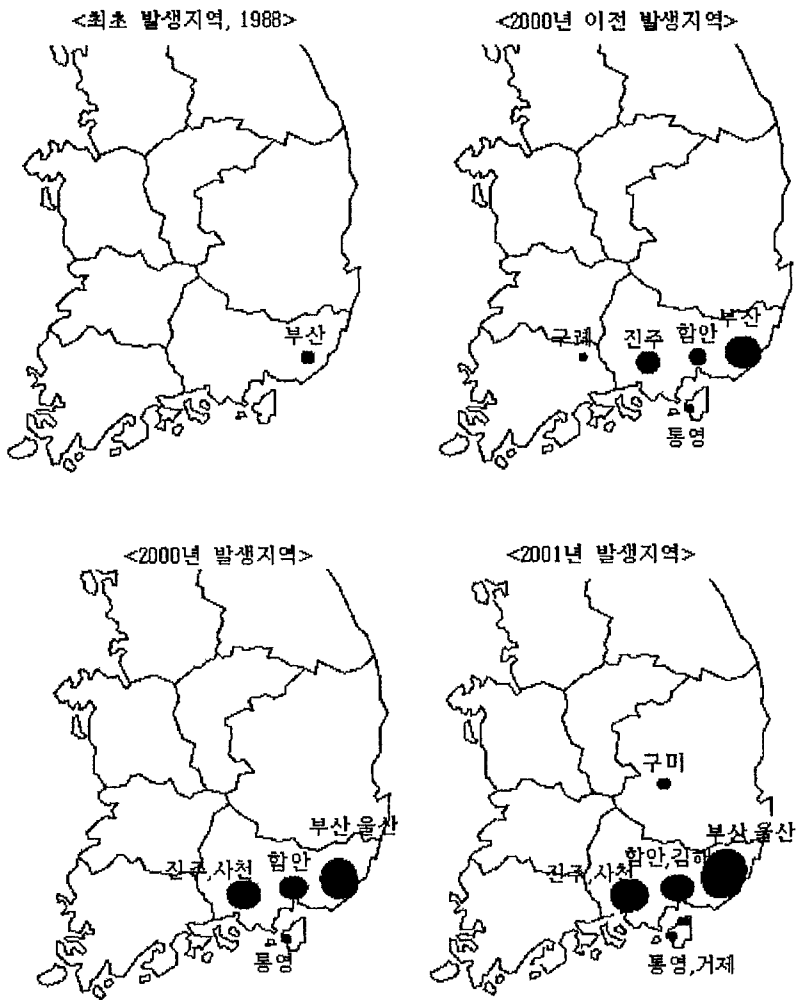
1988년 10월 부산시 동래구 금정산 일대에서 소나무재선충 피해가 최초로 발생한 이후 1997년에는 전남 구례군 화엄사 주변, 경남 함안군 칠원, 칠서면에서, 1998년에는 경남 진주시, 1999년에는 경남 통영시 한산도와 인접한 추봉도, 2000년도는 경남 사천, 울산광역시, 울주군 온산면에서 발생하였으며 2001년에는 경남 김해, 거제시 하청면과 언초면에서 발생하였고 2001년 7월에는 경북 구미시, 9월에는 경남 진해시에서 피해가 발견되어 확산되고 있는 추세이다.

지역별 확산양상을 보면 부산에는 사상구, 금정구, 북구, 기장군으로 피해가 확산되는 등 발생지역이 점차 확대되어, 경남 김해, 양산, 울산시로 북상하고 있고 경남 함안과 진주, 사천, 거제지역은 인근 산림으로 확산 중이며 특히 통영에서는 한산도로의 확산이 우려되고 있다.

다행히도 부산에서는 최초 발생지인 금정산 일대와 1993년부터 소나무재선충 피해를 받았던 해운대구 명장공원 지역은 집중방제로 소나무재선충 감염목 발생이 매년 감소하여 현재는 거의 발생하지 않고 있고 1997년에 발생한 전남 구례군 화엄사 주변은 조기 방제로 1998년 이후부터는 감염목이 발생하지 않고 있다.

< 연도별 소나무재선충 발생면적 >

년 도	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
발생면적(ha)	100	80	80	763	272	365	1,677	1,709



< 연도별 소나무재선충 피해분포 >

● 소나무재선충 국외 발생연혁

일본에서는 1905년경부터 피해가 나타났으나 그 당시에는 천공성 해충의 피해로 오인하였다. 그 후 약 70여년이 지난 1972년에 소나무재선충의 피해로 밝혀졌으며 1941년도부터 해마다 20만~243만㎡의 피해량을 나타내면서 소나무와 해송이 거의 전멸 상태에 이르고 있다.

중국에서는 1982년 난징시(南京市)에서 처음 발생되어 현재 약 700만ha의 마미송(馬尾松)과 해송림에 극심한 피해를 주고 있으며, 대만에서는 1985년 발생한 이래로 유구송(琉球松) 등이 전멸위기에 있다. 미국과 캐나다에도 소나무재선충이 분포하고 있으나 미대륙의 소나무는 대부분 저항성이다.

국 내		국 외	
년 도	발 생 장 소	년 도	발 생 장 소
1988.10	부산 동래 온천동 금정산	1905	일본 나가사키
1997. 5	전남 구례 화엄사 금정암 주변	1934	미국
1997.10	경남 함안 칠원칠서면	1982	중국 남경
1998. 4	경남 진주 가좌동 주변	1985	대만 대북
1999. 5	경남 통영 한산 추봉도	1985	캐나다 몬타리오주
2000.10	경남 사천, 울산 울주 온산면		
2001. 4	경남 거제 하청면·연초면, 장유, 주촌면		
2001. 7	경북 구미 지산, 오태동 일대		
2001. 9	경남 진해		

< 소나무재선충의 피해양상 >

● 소나무재선충 피해양상

소나무재선충은 자체 이동 능력이 없어 매개충에 의해 전파되고 소나무재선충은 나무를 죽여 매개충에게 산란처를 제공하는 공생관계를 유지하고 있다. 5~7월에 소나무재선충을 몸에 지닌 매개충이 고사목으로 부터 화하여, 건전한 소나무나 해송의 신초를 갉아 먹을 때(後食, maturation Feeding) 생기는 상처를 통하여 감염된다. 기주식물에 침입한 소나무재선충은 급격히 번식하여 감염 20일 후부터 잎에서 증산량이 감소, 정지되고 묽은 잎이 아래로 치지며 시들기 시작한다. 소나무는 당년도에 약 80% 고사되며, 나머지는 이듬해 5월까지 고사한다. 이듬해 고사하는 원인은 지방 또 그 해의 기후에 따라 병징의 진행속도가 느리거나, 매개충의 우화가 늦은 개체에서 감염된 소나무에서 재선충의 증식속도가 느려 해를 넘겨 죽는 경우이다. 일단 감염되면 소나무를 100% 고사시키므로 일명 소나무 AIDS라 부르기도 한다.

● 소나무재선충에 의한 피해기작과 증상

소나무재선충은 기주식물에 침입하여 사상균(絲狀菌)인 *Botrytis cinerea*를 먹고살면서 급격히 성장한다. 25℃에서 1세대 경과 소요일이 4~5일 정도로 1쌍이 20일 후에는 20만 마리로 증식되어 기주식물의 가도관(假導管)을 막아 수분 상승을 차단하고, 독소인 Cellulase를 분비하여 조직을 파괴시켜 기주식물을 고사시킨다. 소나무재선충에 의해 감염되어 병징이 급속하게 전신에 나타난다. 이들의 증상은 다음과 같다.

1. 수지분비(樹脂分泌) 감소

외견상의 변화가 보이기전에 나타나는 증상으로 감염목에서 송진등 수지분비가 감소한다. 소나무 수간에 직경 1cm정도의 편치를 이용하여 수피를 때낸 후 변재부(邊材部, sapwood)를 노출시켜 1~2시간 후에 송진의 유출 상태를 관찰하면 건전한 나무는 변재 표면에 수지가 나와 구멍의 하부에서 외부로 흘러내린다. 전혀 수지가 나온 흔적이 없거나 있어도 극히 적은 양이 변재의 표면에 입상(粒狀)으로 점점이 나오는 정도이면 이것은 수액 이상목으로 진단해 재선충이 침입한 것인가 아닌가를 진단하는

기준이 된다. 그러나 동절기에는 건전한 나무일지라도 수액이 잘나오지 않아 오류를 범하기 쉬우므로 주의할 필요가 있다. 소나무의 수피 및 재부의 조직학적 접화, 탄소 동화량, 호흡량의 변화, 증산량의 변화등 생리학적 변화는 그 후에 보인다.

2. 외관상 변화

외관적인 변화는 침엽이 시들거나 변색되는 것으로 수지분비의 이상이 나타난 후에 나타나기 시작한다. 일반적으로 이러한 변화는 구엽(1, 2년엽)부터 신엽(당년엽)으로 진행되고 우산살 모양으로 아래로 처지는 것이 보통이다. 그 후 잎의 변색과 시들음은 급속히 진전되어 단기간내에 나무전체가 선명한 적갈색으로 변하고, 목재의 건조가 시작된다. 적갈색으로 변한 잎은 점점 퇴색하고 얼마 후에 낙엽이 된다. 감염목이 고사하는 모양은 여러 형태가 있는데 전신증상이 아니고 수관의 상부나 굵은 가지 1개 등 부분적으로 고사가 되고 나무 전체는 살아 있는 경우도 있다.

3. 피해확산 과정

소나무재선충에 의한 소나무 피해림의 피해확산 양상은 발생 초기에는 감염목이 단목 형태로 임분내에 산발적으로 나타나고, 이 단목을 중심으로 점상과 군상의 단계를 거쳐 전체 임분으로 확산된다. 10~20%의 피해목이 발생하면 산 전체가 새 빨강개 되어 나무 전체가 죽은 것 같이 보인다.

방제작업이 없는 지역에서의 일반적인 확산과정은 발생초기에는 노령목이 중기에는 장령목 말기에는 유령목 순으로 고사가 진행되는 과정을 보이며 10년 정도 지나면 소나무림은 완전히 고사되며 확산속도는 년 4~5km내외이다. 그러나 확산 속도가 빠른 지역에서는 4~5년 후에는 소나무가 전멸할 정도로 심하게 만연하기도 한다.

- 재선충 침입 6일 후 : 잎이 밑으로 처지기 시작하여 증세가 나타남
- 재선충 침입 20일 후 : 잎이 시들기 시작함
- 재선충 침입 30일 후 : 잎이 급속하게 붉은색으로 변색 고사함



피해도별 확산속도 (1988, 일본)

피해도	고사율(%)	소요년수	주 피해수령	확산속도 (km)
경미	0~1	2~3년	노령목	2~3
경	10미만	3년이내	노령, 장령목	4~5
중	10~29	3년이내	장령목	4~5
심	30~49	3년이내	장령, 유령목	4~5
극심	50~95이상	3년이내	유령목	4~5

소나무재선충 피해지에서 연도별 고사목 발생상황 (일본)

년 도	총 본 수	고사본수	고사율 (%)	누적고사율 (%)
1974	263	6	2.3	2.3
1975		15	5.7	8.0
1976		36	13.7	21.7
1977		68	25.9	47.6
1978		115	43.7	91.3
1979		23	8.7	100

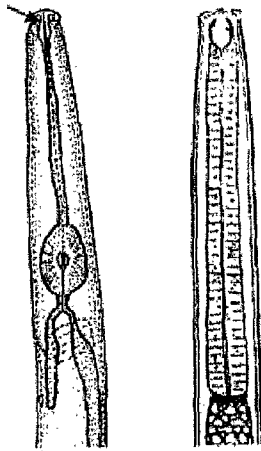
< 재선충피해와 여타 병해충과의 외관상의 피해특징 >

구 분	소나무재선충	솔잎혹파리	솔껍질까지벌레	푸사리움 가지마름병	소나무좀류
가 해 수 종	해송·적송 (잣, 낙엽송등도 감수성 있음)	해송·적송	해송·적성 (주로 해송에 피해)	리기다·리기테 다소나무 해송등	해송·적송 잣나무 등
피 해 속 도	급	완	선단지는 빠르게 확산	급	-
고사율	100%	30% 정도	20~30% 정도	25% 이상	-
외관상 의 피해특 징	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 초기에는 피해가 단목으로 드문드문 나타난다. ☞ 재선충 침입과 동시 잎이 밑으로 처지는 증세가 있다. ☞ 약 30일 후에는 잎이 급속하게 붉은색으로 변하며 고사가 시작된다. ☞ 우량목(노령목)부 터 먼저 피해가 온다 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 먼저 정아(頂芽)부터 고사한다 ☞ 피해목은 솔잎의 길이가 짧다(건전잎의 1/2) ☞ 잎은 황색으로 변해 가을부터 봄까지 낙엽진다. ☞ 솔잎의 밑부분에 벌레혹이 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 수관의 아랫가지부터 적갈색으로 고사한다. ☞ 여름과 가을에는 피해 진전이 있다가 3~5월에 가장 심하게 나타남. ☞ 주로 해안지방의 해송에게만 피해를 주고 유령림에 더 피해가 많다 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 수관 윗부분의 가지부터 적갈색으로 고사한다. ☞ 피해가 심해지면 가지, 줄기, 구과등에서 송진이 줄줄 흐른다. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 성충이 새로운 가지를 뚫고 들어가 꼭대기의 새가지가 구부러져 있거나 부러져 고사한채 나무에 붙어 있는 경우가 많다. ☞ 수세가 쇠약한 벌채목, 고사목에 주로 기생하지만 때로는 건전목에도 발생한다.
현 존 발생지 역	☞ 부산, 울산, 경남, 경북 일원	☞ 전국 - 특히 대관령 동부의 영동지방과 경북 북부 및 제주 지방이 피해 심함	☞ 부산, 울산, 전북, 전남, 경북, 경남의 해안지방으로 확산 추세	☞ 중서부 및 남부지역	☞ 전국

< 소나무재선충 동정(同定) 및 식별요령 >

- ① 해부현미경으로 재선충과 비기생성 선충을 구분한다. 일반적으로 선충과 비기생성 선충은 크기는 비슷하나 구침(口針)의 유무와 식도의 형태에서 뚜렷하게 구별이 된다.

구 분	재 선 충	비기생성 선충
구강내 구침(口針) 유무	있다	없다
식도형태	전,중,후 3부위로 뚜렷이 구분된다	구분이 없이 하나로 되어 있다

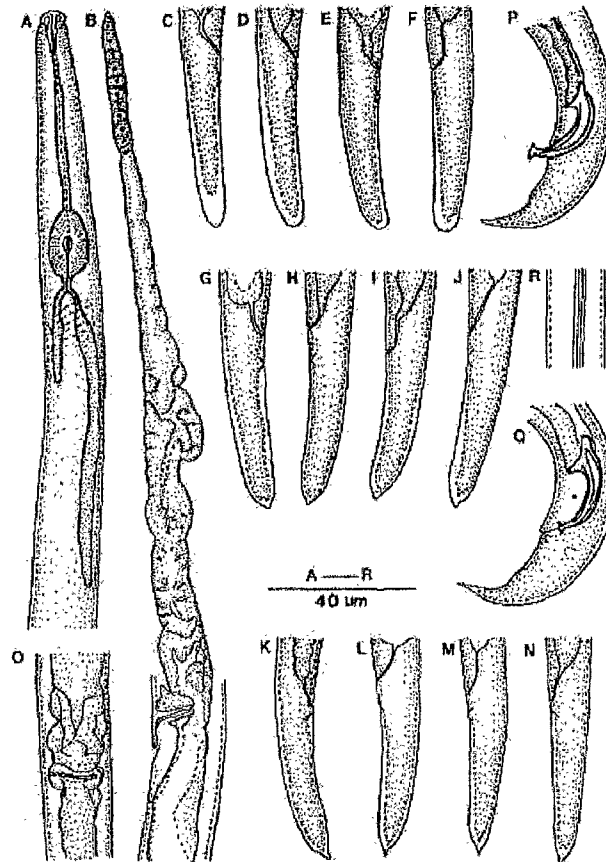


<기생성> <비기생성>

- ② 광학현미경을 이용하여 소나무재선충과 어리소나무재선충을 구분한다. 소나무재선충과 어리소나무재선충은 형태적으로 매우 유사하여 수컷으로는 구분이 어려우며 암컷 성충의 꼬리 모양으로 구분할 수 있다.

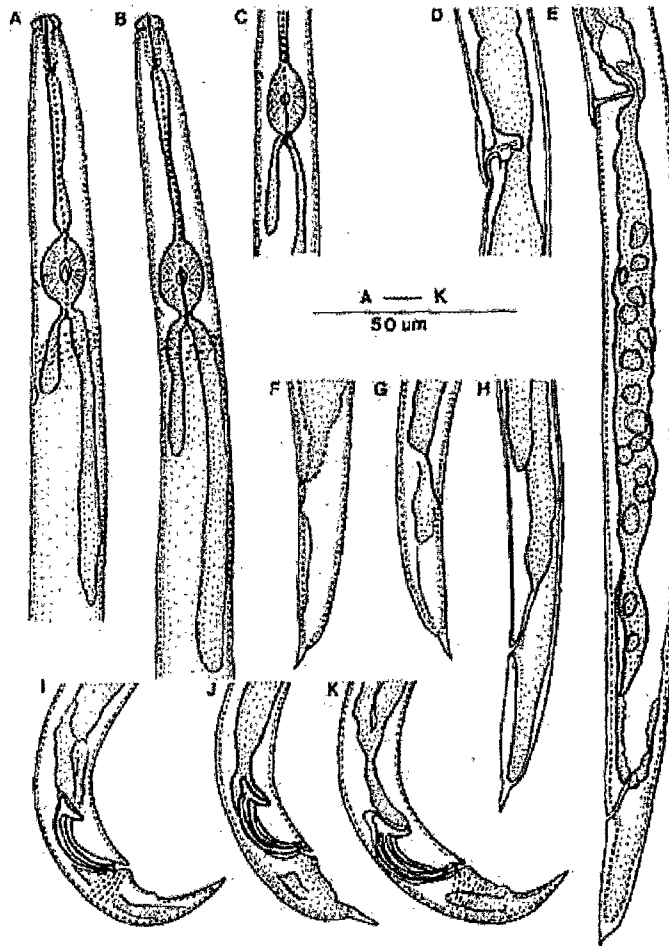
< 소나무재선충과 어리소나무재선충 암컷 성충의 꼬리 모양 차이점 >

구 분	소나무재선충	어리소나무재선충
꼬리형태	원통형에 가깝다	원추형이다.
꼬리돌기	넓고 등글다	뾰족하고 날카롭다.
돌기와 꼬리 비율	3.~4.9%	12.4%



Bursaphelenchus xylophilus : A. 암컷 식도부; B. 암컷생식계 및 음순; C~F. 암컷 미부 끝이 둥근 것; G~J. 암컷 미부 끝이 약간 돌출한 것; K~N. 암컷 미부 끝에 돌기가 있는 것; O. 음문 복면상; P, Q. 수컷 미부; R. 측대.

<소나무재선충 도해>



Bursaphelenchus mucronatus : A~C. 암컷 식도부; D. 음문부;
E. 암컷 후방부; F~H. 암컷미부; I~K. 수컷 미부

<어리재선충 도해>

< 소나무재선충의 분리 >

현지 조사결과 소나무재선충 피해가 의심 나는 곳의 최종 감염여부 판정을 위한 실내검정(현미경적 검정)을 위해서는 시료 채취가 중요하다.

● 시료채취 대상목의 선정

1. 조사현장의 피해 임지내에서 적어도 3~4본의 피해목을 선정한다.
 - 단목인 경우는 전수 시료채취하고 고사목이 균상 내지 산재해 있을 경우 고사목 3본당 1본씩 시료채취 대상목으로 한다.
2. 대상목은 육안적으로 보아 잎의 색깔이 갈색 또는 붉게 변화(병징을 나타내는 증세가 있는 것 포함)하여 고사가 진행 되거나 또는 고사가 된 것을 선정한다.
 - ※ 고사목이 너무 오래되어(2~3년 이상 경과) 건조되어 버린 것은 오히려 함유율이 낮아 재선충 밀도가 떨어지므로 대상목으로 적당치 않음(박피 등 인위적 피해목은 조사제외)

● 시료채취 방법

1. 사용도구 : 손도끼나 톱 등을 사용하여 목편을 채취하는 것이 좋다.
2. 채취위치 : 나무 1본당 위치가 각각 다른 2~3개소에서 채취하는 것이 객관성 유지를 위해 좋다.
 - 수간(樹幹)의 중간부에서 1~2개소, 옆가지에서 1~2개소, 아랫등치에서 1개소등을 선정하여 1개소당 양쪽에서 도끼로 시료를 채취한다.
 - 이것이 번거러울 경우 흉고부위에서 아래를 향해 사선방향으로 20~30cm 간격으로 3~4개소에서 시료 채취
 - 단, 옆가지(측지)의 경우는 가급적 2~3년생을 약 20cm 내외로 잘라서 시료로 한다.
3. 채취깊이 : 10~20cm 내외
4. 시료의 양
 - 드릴 사용시 : 1개소당 약 100g 내외

- 도끼를 사용시 : 운반 취급에 적당한 크기

● 유의사항

- 소나무 수피 (나무껍질)에는 다른 선충이 있으므로 이것은 실내의 현미경 검경에 방해가 되므로 수피부분이 시료에 섞이지 않도록 한다.
- 완전히 죽어서 마른 가지는 나무가 건조할 때 재선충이 죽는 경우가 많이 시료로 적당하지 않다.
 - * 나무 함수율이 30%이하가 되면 재선충은 죽기 시작한다.
- 소나무재선충은 실제 등치가 굵은 주간부 (主幹部)에 많은 것이 아니고 수관 상층부의 작은 가지에 오히려 많다는 점을 유의해야 한다.

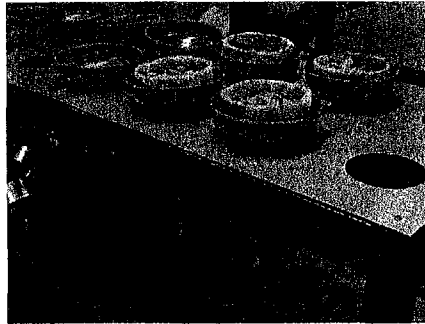
● 재선충의 분리방법

- 선충의 분리, 검출은 베르만 (Baermann)법에 의한다.
 - 소나무재선충 여부는 먼저 소나무 조직내에 있는 재선충을 분리한 후, 현미경으로 검경하여 확인할 수 있다.
 - 소나무재선충의 분리에는 선충을 분리하는데 흔히 사용되는 베르만 (Baermann) 깔대기법을 약간 개량하여 이용하고 있다.

● 재선충의 분리과정

1. 전정가위를 이용하여 목편 시료를 1cm 크기로 잘게 자른다.
2. 고무튜브를 연결한 깔대기에 채를 올리고 그 위에 종이와이퍼 2장을 교차시켜서 간 후 잘게 자른 시료를 넣고 깔대기판에 고정시킨다.
3. 깔대기에 물을 가득채운다.
 - 증류수가 좋으나 수도물도 무방함.
4. 24시간 또는 48시간 후 집게를 열고 선충이 든 물 20ml 정도를 비이커에 받는다.
5. 선충의 밀도가 많은 경우 비이커의 물을 샤페에 담아서 해부 현미경으로 바로 관찰한다.

6. 선충의 밀도가 적을 경위는 비이커에 충분한 양을 담아 직경 8cm의 500메쉬 체를 이용하여 선충을 모은 후 사레에 담아서 관찰한다



< 소나무재선충 분리장치 >



< 소나무재선충 분리과정 >

< 소나무재선충의 생활사 >

소나무재선충은 암컷의 체장이 0.7~1.0mm 수컷은 0.6~0.88mm이다.

소나무재선충의 발육은 25℃에서 난 기간은 30시간이며, 부화한 제 2기 유충은 바로 섭식활동을 개시하여 3회 탈피로 체장이 커지고 생식선이 발달하여 3일 후에는 성충이 되며 암컷은 교미 후 30일 정도가 지나면 약 80개의 알을 산란한다. 알에서 탈피한 후 부화하여 2기 유충이 되고 체장이 0.2~0.4mm가 된다. 그 후에는 2회 탈피하여 3~4기 유충이 되고 4회째 탈피로 성충이 되며 수명은 약 30일 정도이다.

발육속도는 30℃에서 가장 성장이 빨라 1세대가 3일로 완료된다. 25℃에서는 4, 5일 20℃에는 6일, 15℃는 12일 33℃ 이상에는 증식이 되지 않는다. 발육 한계온도는 9.5℃이다.

감염목에서의 병징 진행이 외견적으로 잎이 변색되는 시기에 이르면 개체군 증가는 최고에 달하며 이 때에 분산형 제 3기 유충이 출현한다. 그 후 분산형 제 3기 유충이 탈피하여 분산형 제 4기 유충으로 진행된다. 매개충인 솔수염하늘소 몸속에 들어가서 실제로 전염시키는 것은 내구형 유충이다.

분산형 유충은 형태적으로 증식기의 유충과 구분될 수 있는 특징을 가지고 있는데 크기에서는 커다란 차이가 없으나 체내에 과립상(顆粒狀)의 저장물질을 치밀하게 지니고 있어 짙은 체색을 띠며, 또한 꼬리 끝 부분이 반원형 내지 넓적한 형태로 구분된다. 분산형 제 4기 유충은 그 형태가 다른 충태와 크기가 다르고 직접 분산을 할 수 있도록 적응되어 있다.

입술부분은 돔(dome) 형태며 구침(口針)을 위시하여 식도 등 소화기관의 분화가 완전하지 못하고 꼬리 끝은 퇴화되어 있고 표피는 점착성물질로 덮여 있어 건조로 부터 몸을 보호하고 물체에 부착이 용이하게 하는 역할을 한다.

● 소나무재선충의 먹이

소나무재선충의 먹이는 균식성(菌食性)으로 여러 가지의 사상균(絲狀菌)을 먹이로 한다. 재선충병의 발견 경위도 균식성 선충이었기 때문에 가능하였다. 소나무재선충은 *Pestalotia* sp. *Botrytis cinerea*의 균에서 쉽게 번식하고 특히 후자인 *Botrytis*

*cinerea*에서 왕성한 증식을 보여 취급도 용이하여 재선충의 인공증식에 널리 이용되고 있다. 또한 선충에 의해 외표피(epidermis)와 형성층(形成層, cambium)의 파괴가 일어나는 것으로 보아 소나무材組織의 유조직(柔組織, parenchyma)을 소나무재선충이 먹는 것으로 추정하고 있다.

● 소나무재선충의 증식

소나무재선충은 각 종 사상균으로 용이하게 증식시킬 수 있고 실험실적으로 *Botrytis cinerea* 균총상(菌叢上)에서 가장 왕성하게 증식하며 25~30℃에서 잘 자라고 20℃ 이하에서는 완만하게 자란다.

성충 한쌍의 개체군의 증식량은 25℃에서는 21일째, 30℃에서는 14일째에 50만 마리로 최고에 달하였다. 실험을 통하여 소나무 원목에서 쉽게 증식하는 것이 확인되었고 또한 저항성인 테다소나무에서도 원목 상태에서 증식하였을 때는 소나무와 해송이 비슷하게 증식한다.

일반적으로 사상균균총상(絲狀菌叢上)에서 배양된 소나무재선충은 개체수 증가가 최고에 달한 후에는 비교적 급격한 감소가 일어나나, 그러나 에인산을 첨가한 배지에서는 2개월 후까지도 활동성이 왕성한 소나무재선충이 다수 발견되어서 소나무조직 중에 존재하는 지방산은 수체 내에서의 소나무재선충의 생활과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정되고 있다.

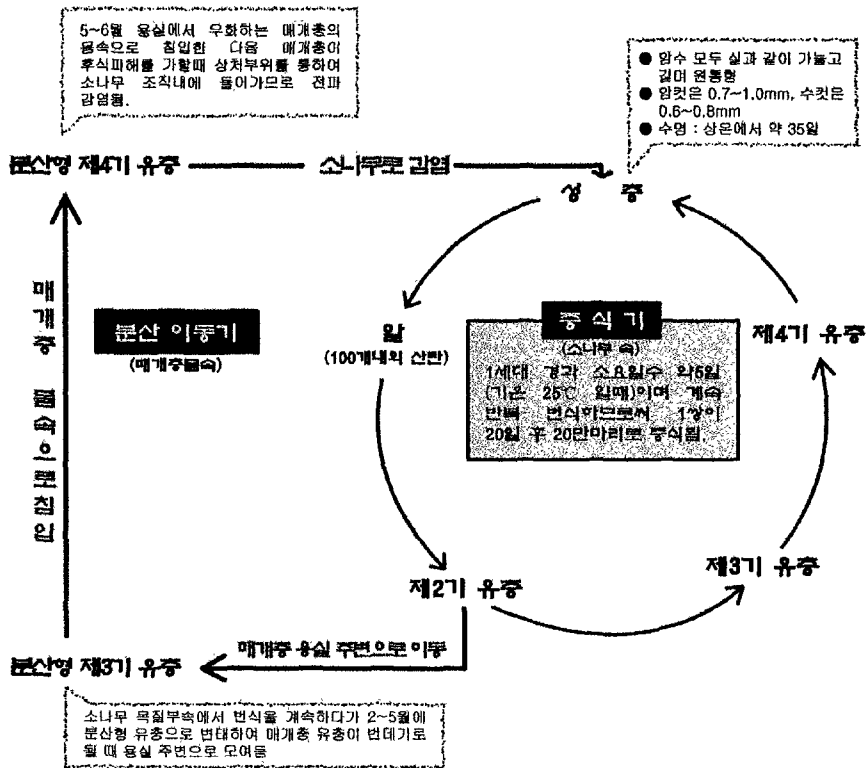
● 수체내의 움직임

소나무재선충은 소나무에 침입한 후 바로 수체내로 분산하여서 번식한다. 얼마 안 있어 수체에 생리적인 이상이 일어날 즈음하여 선충의 수는 급격히 증가한다. 소나무가 고사 건전할 때까지에는 분산형 3기 유충이라고 하는 특별한 단계가 된다. 이 단계의 유충은 체내의 저장 물질이 검게 보이고 체장이 갖추어지는 특징이 있다.

몸이 되어 솔수염하늘소의 유충이 목질부 내에 용실을 만들고 용실에서 용(번데기), 성충이 될 때 용실 주변의 목재중에서 분산형 유충은 탈피하여 분산형 4기 유충(내구형 유충)이 되어 용실로 모인다. 이 내구형 유충은 소화기관이 없고 체표에 접착성의 물질을 분비하고 활발하게 움직여 용실내의 솔수염하늘소 선성충의 몸에 부착한

다. 유충은 기문 특히 복부 제 1기분을 통해 체내의 기관으로 들어간다.

그렇게 하여 재선충은 죽은 소나무에서 솔수염 하늘소가 성충이 되어 외부로 탈출할 때 함께 운반되어 나온다. 솔수염하늘소 성충은 탈출 후 건전한 소나무의 소지수피를 먹으며 이때 생긴 이빨 자국의 상처로 재선충이 건전한 소나무로 침입한다.



<소나무재선충의 생활사>

< 매개충 솔수염하늘소의 생활사 >

● 신선충의 우화 탈출 직후의 분산기

솔수염하늘소는 보통 1년에 1세대이나 산란시기에 따라 2년에 1세대일 때도 있다. 지방에 따라서 우화시기가 다르나, 5월 중하순부터 피해목내의 용실에서 우화하여 약 1주간 용실에 머문 후 용실 선단부의 목재와 수피에 원형(6~10mm)의 탈출공을 만들고 외부로 탈출한다. 탈출은 약 2개월간 계속된다. 탈출 후 나무의 상부 선단부로 보행하여 여기서 날기 시작한다. 이때 바람 부는 방향으로 날아가 생림목에 도달한다. 이와 같이 날아가는 행동은 선천적인 것으로 이 짧은 기간을 분산기라고 한다. 18℃ 이하에서는 거의 날지 않는다.

● 미성숙 후식기

소나무류에 도달한 솔수염하늘소는 당년생 가지, 2년생 가지든 약지의 수피를 갉아먹기 시작한다. 먹이로 하는 수종은 해송, 소나무는 물론 외국산의 테다소나무등을 포함한 소나무속 전체와 낙엽송, 전나무, 분비나무, 히마리아시다속(屬) 등 같은 소나무과(科)에 속하는 종류는 대부분 후식의 대상이 된다. 성충의 섭식은 생존과 성숙을 위해 필요하며, 성숙 후에도 섭식을 계속하고, 온도에도 영향이 있으나 2~3일간 절식한 후 대부분 사망한다. 솔수염하늘소가 재선충을 소나무류의 건전목에 운반하는 것은 이 미성숙 후식기가 주가 된다.

● 산란

월동처에서 탈출한 후 2~3주부터 암수가 동시에 성숙하여 교미 산란을 개시한다. 이기간에는 활발하게 날아다니고 광범위하게 이동하며 주로 야간에 활동한다. 암컷은 쇠약목, 신선한 벌채목에 유인되어 수피를 물어뜯어 상처를 내고 산란관을 쫓고 수피하에 1개씩 산란한다. 1일 산란 수는 1~8개로 생존 기간중 매일 산란한다. 한 마리의 최고 산란수는 188개로 3개월에 걸쳐 산란한 기록이 있으나 평균 100개 내외이다. 산란시의 행동은 방향성을 갖고 있어서 탈출 직후의 나는 행동과는 명확하게 구별된다. 이때에 작용하는 것은 냄새라는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 성충기는 크게 3시기 즉 탈출직후의 분산기, 성숙기와 중간의 미성숙기로 구별할 수 있으며 각각 다른 습성이 있으므로 방제에 중요하게 이용될 수 있다. 감염초기의 소나무에는 침엽의 위조, 변색 등의 의견상 변화는 거의 볼 수 없다. 그러나 이미 재선충이 침입한 소나무에는 수지유출의 이상이 생긴다. 하늘소의 성충은 이상이 있는 소나무에서 방출하는 냄새를 감지하여, 이것에 의해 유치되는 것이다. 이 냄새의 성분을 분석하여 유효성분을 밝혀서 조제 제제한 것이 유인제이다. 유인제에 반응하는 것은 성숙한 암컷과 수컷의 성충이다.

● 알, 유충기

성숙한 성충은 알을 1개씩 조피 밑 내수피에 산란한다. 크기는 1×4mm의 장타원형, 무게는 약 2.8mg이다. 약 1주간 후에 부화하고 유충은 신선한 내피를 먹고 자란다. 가을이 되면 3령 유충으로 체장은 3~4cm로 되고 변재부를 식해하여 터널을 만든다. 부화유충이 목질부로 침입할 때까지 1마리당 식해 면적은 100cm²이고 그 기간은 60~80일간이다 이때에 생기는 점유상의 톱밥(木屑)은 특징이 있으며, 일부는 수피의 갈라진 틈에서 밖으로 배출하기 때문에 지상에 떨어진 톱밥으로 솔수염하늘소 유충이 있는 것을 확인 할 수 있다. 수피를 박피하면 특징이 있는 갱도와 톱밥을 쉽게 볼 수 있다. 가을이 깊어지면 유충은 목질부 속으로 유충공을 만든다. 처음에는 내부로 향하나 얼마 안가 유턴해서 원목의 표면으로 향하고, 3령유충은 목재내에 유충공을 출입하고 있으나 10월이 되면 4령유충이 되어 구멍을 톱밥으로 막고 구멍 상단에 용실을 만들고 그 속에서 월동한다.

알에서 종령유충까지의 기간은 20℃에서 70~80일, 25℃에서 47~60일을 요하고, 자연조건하에서는 2개월 후에 목재로 들어간다. 이 기간의 발육 영점은 약12℃ 유효적산온량은 625일도가 되고, 알에서 종령유충까지의 유효온량은 710일도가 필요하다.

● 용화, 우화, 목재내 신성충기

다음해 4~7월에 용화하여 2~3주 후에 우화한다. 성충이 되어서 약1주간은 용실내에 있다. 이때 재선충은 용실벽에서 솔수염하늘소 성충의 몸으로 이동한다. 성충의 몸 표면에 붙어있던 재선충은 주로 복부기문 중 가장 큰 제일기문을 통해 기관으로

들어간다. 하늘소의 성충은 재선충의 분산형 제4기 유충을 체내에 갖고 밖으로 탈출한다.

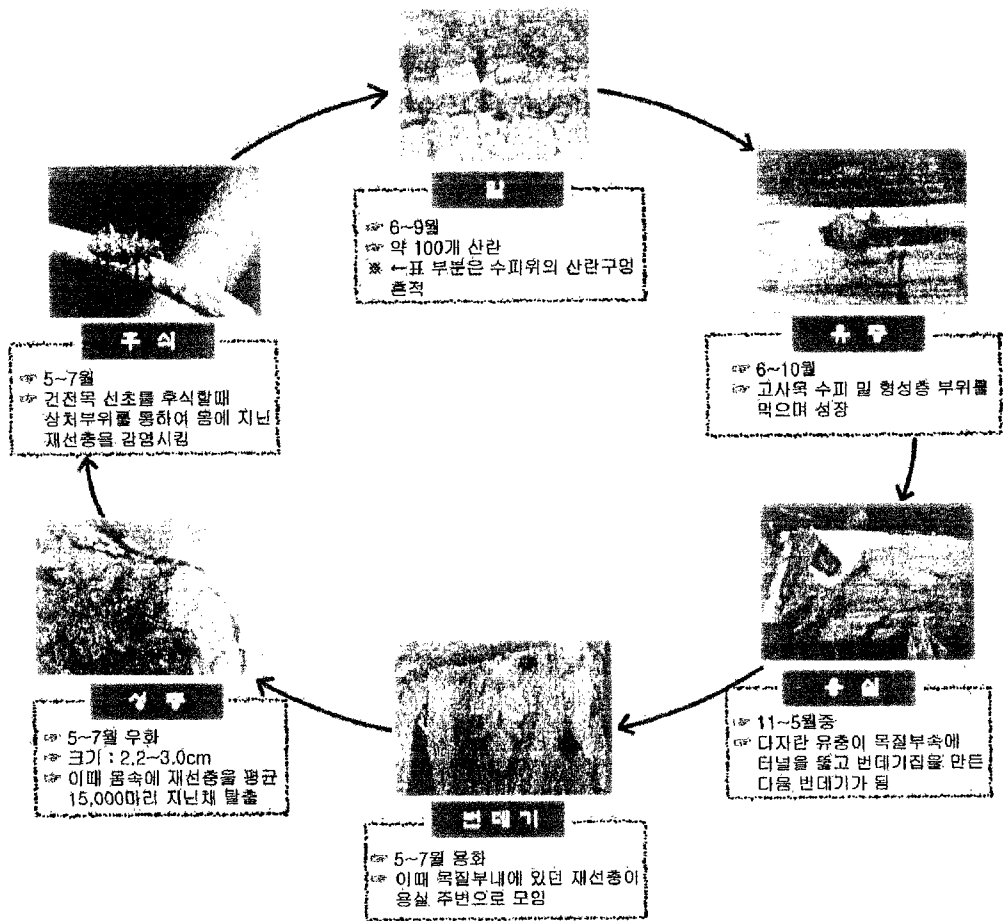
용기간은 온도에 따라 대개 일정하여 20℃에서는 20일, 25℃에서는 12일, 30℃에서는 10일이고, 발육영점은 약11℃이며, 유효적산온량은 187일도이다. 알에서 성충까지 1세대 동안의 요하는 유효적산 온량은 1,200일도 이상이 필요하다.

● 유사재선충과의 관계

재선충이 침입할 때까지는 유사재선충이 널리 분포되어 있다. 솔수염하늘소는 이 재선충과 밀접한 관계를 갖고 있다. 그러나 이 유사재선충은 병원성이 거의 없으며 있다고 하더라도 극히 약하기 때문에 이것을 매개하여도 소나무는 쇠약하게 되지 않는다. 하늘소는 임내에 많지 않으나 항상 존재하여 피압목, 고사지 및 풍도목 등을 산란 대상으로 하여 번식하므로 항상 저밀도로 임내에 존재한다. 보통은 극히 저밀도이다. 위에서 말한 바와 같이 유사재선충을 대신하여 소나무재선충이 감염되면 솔수염하늘소의 좋은 산란 대상목을 만드는 결과가 된다. 이와 같은 현상이 소나무재선충병의 이상 극심 피해발생에 원인이 된다.

솔수염하늘소의 생활경과

시기 충태	4월	5월	6월	7월	8월	9월 ~3월
알			████████████████████			
유충	████████████████				████████████████████	
번데기		████████████████████				
성충			████████████████████			



<술수염하늘소의 생활사>

● 우화탈출소장

술수염하늘소의 우화탈출, 후식시기, 산란시기 등은 재선충을 전파시키는데 중요한 것과 같이 방제 대책을 계획적으로 진행하기 위해서도 중요하다. 일본에서 지역별 성충우화 탈출소장을 유효적산온량으로 산출한 것을 보면 남쪽지방에서 북쪽지방으로 갈수록 50% 탈출일이 늦어진다.

● 한냉지방에서의 생태

동북지방의 술수염하늘소의 생활환을 보면, 한냉지에서는 발육에 필요한 온량의 관계로 1세대를 1년간으로 완료할 수 없는 개체가 있다. 2년 1회 발생하는 술수염하늘소의 출현률은 동북지방에서는 수10%, 때에 따라서는 대부분이 여기에 속한다. 관동지방에는 20~30%이다. 재선충 보지율, 보지수는 보통에 비하여 수가 적다.

● 재선충 보지수(保持數) 보지율 및 이탈경과

술수염하늘소 성충이 우화 탈출할 때 가지고 있는 재선충수·율은 조건에 따라 많은 차이가 있다. 하늘소의 신성충이 용실에 있는 동안 재선충은 용실벽에서 하늘소의 충체로 이동한다. 목재가 건조하면 재선충이 충체로 이동하지 못한다. 따라서 술수염하늘소가 가지고 있는 재선충의 수가 적어진다. 탈출후 후식할 때 재선충이 충체에서 이탈함으로 탈출 일수가 경과됨에 따라 갖고 있는 재선충의 수는 차차 감소해 간다

● 술수염 하늘소 이외의 매개충

재선충은 발견 초부터 주로 소나무 천공충을 중심으로 매개곤충의 검색을 하여 왔으나 보지수, 보지율의 양에서 술수염하늘소가 유일한 매개충이라고 밝혀졌다. 그러나 동북지방에는 동속의 북방하늘소가 살고 있고 생활사도 비슷하므로 매개자로서 위협시되어 충체내의 재선충 수를 조사한 결과 재선충을 갖고 있는 율은 약 60%, 평균 갖고 있는 수는 400개체 최고로는 45,000개를 갖고 있으며 술수염하늘소보다 탈출시기가 약 1개월 빠르다.

● 솔수염하늘소의 천적

천적곤충류, 천적미생물 등과 그들의 움직임에 대해 조사한 바 천적을 이용한 방제기술의 개발이 기대된다. 실용화에는 어느 정도의 시간이 필요하지만 금후 기대된다.

< 일본의 소나무재선충 피해 현상과 방제 대책 >

- greenjapan.com에서 -

소나무류의 집단 고사 원인은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)에 의해 일으켜지는 것이, 1971년에 일본에서 처음으로 발표되었다. 동시에 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)가 선충의 매개자인 것이 밝혀져 소나무류의 고사 원인 메카니즘이 해명되었다. 그 후, 1973년에 제정된 「소나무재선충 특별 방제」, 1977년까지 20년간에 걸쳐 「소나무재선충 피해 대책 특별조치법」 등 한시법에 근거해, 공중·지상에서의 약제 살포, 벌채 등에 매년 막대한 경비를 투입해 피해 방지 대책을 펴해 왔다.

그러나, 피해는 해마다 확대해 현재는 아오모리현과 홋카이도를 제외하는 일본 전 국토에 만연해, 1999년의 전국의 피해 면적은 90만㎡에 달하고 있다. 이것은 흉고 직경 30cm, 수고 20 m의 입목으로 환산하면, 대략 150만개의 소나무가 1년 간에 고사하고 있게 되어, 일본의 평균적인 목조 가옥으로 환산하면 75000호 분에 해당한다. 이것들 피해나무의 대부분은 재활용 되는 것이 없고, 숲에 방치되어 있는 현상이다.

게다가 소나무재선충병의 피해는 근접 국가까지 확대되었다. 1982년에 중국 대륙의 난징과 홍콩, 1985년에 대만 북부, 1988년에는 한국 부산에 발생했다. 침입 경로는 분명하지 않지만, 초기 발생지는 일본으로부터의 피해재나 기계 곤포재 등에 기생한 솔수염하늘소 성충의 비산의 가능성이 있는 것으로 추측되어 있다. 각국과도 철저한 방제를 펴해 왔지만 현재도 피해 확대의 양상을 나타내고 있다. 현재, 소나무재선충병에 의한 경제적인 실제 손해는 일본을 포함한 동아시아 지역에 한정되어 원산지 미국에서는 도입수종인 *Pinus sylvestris*, 일본 수종인 흑송, 소나무 등이 산발적인 피해를 받고 있지만, 북아메리카출산의 *P. taeda*, *P. elliotii* 저항성 때문에 피해는 없다.

유럽에서도 본 병의 침입을 경계해 검역 체제를 강화해 왔지만, 1999년에 포르투갈에서 *P. pinaster*의 고사나무로부터 소나무재선충이 검출되었기 때문에, 포르투갈 정부 및 유럽 연합(EU)에 있어서도 중대한 문제가 되고 있다. 포르투갈에는 동아시아 지역과 동속(同屬)의 하늘소(*Monochamus galloprovincialis*)가 분포 하고 있어, 본종이 전파자가 되고 있을 가능성이 높다.

● 2000년 소나무재선충 관계 예산(류야청) : 57억 4 천만엔(전년도 대비 92%)

- 삼림 피해의 감시 및 건전화의 추진
- 피해의 감시·조기 발견
- 위생벌·수종 전환등에 의한 보호 수렵띠의 조성
- 저항성 품종의 공급 체제 (저항성 소나무 재종원의 개량 사업)
- 야생 조수와의 공존에 배려한 삼림 정비의 추진
- 삼림 병충 등에 대하여 정확한 방제
- 소나무재선충벌레의 피해 만연 방지에 필요한 특별 방제(공중 살포)·지상 살포·벌채의 정확한 실시
- 삼림 피해 방지 기술의 보급 촉진
- 새로운 방제 수법의 도입·실증등 방제 수법의 다양화 (저항성 소나무의 공급 실용화, 천적 이용에 의한 실증 시험)
- 생물 방제에 의한 종합적인 방제기술의 연구 (천적 미생물의 실용화, 주요 천적 곤충류의 인공 증식과 실증 시험)
- 새로운 수법의 방제로서 무인 헬리콥터에 의한 방제, 마이크로 캡셀제 (microcapsule)에 의한 방제를 실증적으로 실시한다.
- 삼림 보호에 관한 지역의 주체적인 활동 체제의 정비
- 방제 활동의 추진을 담당하는 인재의 육성, 방제 기구의 대부
- 지역의 특히 수요인 소나무의 보전 체제의 정비 (나무 줄기 주입별로 밤송재 보전 대책도 포함)

● 방제 방법

○ 구 제 법

1. 특별 벌채

피해나무를 벌채 후 가지를 포함하여 파쇄, 소각·탄화한다 (이동식 파쇄기나 탄화노의 개발).

▷ 반출처의 칩(chip) 공장이나 소각장 주변으로부터 피해가 확대하는 위험성이 있다.

2. 약제살포 (Sumithion , Baycid 유제·유제외)

피해나무를 벌채 후 가지를 포함해 약제 살포한다.

- ▷ 소나무내의 솔수염하늘소 유충의 살충 효과는 불안정이어(최고 80%내외), 현재 그다지 사용 될 수 있고 없다.

3. 훈증처리(NCS · 카바제)

피해나무를 벌채해 가지까지 집적 해 비닐로 피복훈증 하는 방법으로, 실시 시기의 제약은 없고, 솔수염하늘소 유충이나 소나무재선충에게 100%의 구제 효과가 있기 때문에 전국적으로 가장 많이 사용되어 있다. 현재는 유독성의 높은 브롬화 메틸제(methyl bromide)는 사용하고 있지 않다.

- ▷ 훈증처리만으로는 가지부까지 완전하게 처리할 수 없기 때문에 100%의 보전이 기대할 수 없다. 피복 자재의 방치에 의한 환경오염.

4. 긴급 방제

피해 입목에 헬리콥터로부터 직접 약제 살포, 또는 헬리콥터에 의한 피해 나무의 반출을 한다.

○ 예방법

5. 항공방제 (Sumithion, Baycid 유제외)

솔수염하늘소 발생시기에 항공기를 이용해 수관부에 약제 살포한다. 공중 살포는 중요한 소나무재의 보전이나 피해 확대 방지를 위한 광역적인 방제를 꾀하는 효율적인 방법이다.

- ▷ 실시가 확정되어 주택, 수원림 등의 주변, 귀중한 야생 생물의 생식지 등 환경에 악영향을 주는 경우는 공중 살포는 실시하고 있지 않다. 또, 농작물의 재배지, 축산 시설, 양봉, 양식장 등의 주변에 대해서도 지역 주민의 요망에 의해, 악영향을 미치는 경우는 실시하지 않는다. 게다가 공중 살포가 확정되면 풍향·풍속 등에 충분히 유의해 실시한다.

- ▷ 통상 헬리콥터에 부착하는 다공식 분무 노즐(nozzle)에 의한 액제 살포에서는, 약 20 m의 살포 유효폭이 있어 광역 살포에 적절하다.

- ▷ 기상 조건에 의해 드리프트(drift) 피해의 우려가 있는 경우는, 살포 폭을 10

m로 조절한 노즐도 이용되고 있다(curtain 살포).

- ▷ 단목이나 좁은 소나무에는 총 형태 노즐(gun nozzle)을 장비해 살포하는 방법도 있어, 특히 산악 지대나 절벽등에서 벌채가 곤란한 장소의 피해나무의 살포에 적절하다.

6. 마이크로 캡셀제의 실용화

예방 약제 Sumithion 유제는 빗, 강우, 상발 등에 의해 분해·유실해 효력이 급속히 적감한다. 이 점을 보완하기 위하여, 스피치온 원제를 polyurethane (polyurethane)으로 피막해 microcapsule화(20 micron)하는 것으로써 2회 살포를 1회 살포로 대체 할 수 있어 사람과 가축 독성, 물고기 독성, 자동차 도장에 대한 피해가 큰폭으로 경감되었다.

- ▷ 1997년에 농약 등록되어 아직 사업적인 살포예가 적다.

7. 무인 헬리콥터에 의한 공중 살포

수도의 병해충 방제기로서 실용화하고 있어, 산림용 약제 살포의 실용화를 향한 개발을 하고 있다.

8. 지상살포(Sumithion, Baycid 유제의)

솔수염하늘소의 발생시기에 동력 분무기를 이용해 수관부에 약제 살포한다. 주변에의 drift가 적기 때문에 주택지 주변 등의 방제에 적절하다.

- ▷ 산림에서의 약제 살포 작업이 곤란한 것으로부터, 통상 잔효기간을 길게 보관 유지시키기 위해 약량을 많이 해 1회 살포를 실시하고 있지만, 살포 작업이 용이한 소나무에서는 약량의 농도를 묽게 해 살포 횟수를 늘리는 편이 효과적이다.
- ▷ 골포장이나 평탄지 작업이 용이한 소나무에서는 나무의 높이 40m까지 살포 가능한 강력 송풍 살포 장치(스파우타, 소형자동차에 탑재)를 사용하고 있다.

9. 나무 줄기 주입(Greenguard , Megatop, Shotone제타)

겨울동안 건강한 소나무의 나무 줄기에 작은 구멍(직경 6mm, 깊이 5cm)을 뚫어 약제를 주입해, 솔수염하늘소 성충의 발생전에 수관 전체에 침투·이행 분포시킨다. 침입한 선충은 약제의 저해 작용으로 마비돼, 수체내에서의 이동·증식을 억제하는 지극히 예방 효과가 높은 것이 특징이다. 1회의 주입으로 2~3년간의 예방 효과가 확보되어 주변 환경에의 악영향의 걱정이 없기 때문에, 신사·불각, 공원·가로수, 관광지 시설내의 송재, 수원림이나 골프장 등의 귀중나무에 사용되어 있다.

▷ 공중·지상 예방 약제 살포나 벌체에 비해 비용이 높은 것이 난점이다(흉고 직경 30 cm로 약 1만엔=3년간 유효). 현재 5 종류의 주입제가 시판되어 있지만, Greenguard제의 주성분은 가축의 기생충약으로 지극히 안전성이 높은 것이 특징이고, 주입후의 수체내의 약제 농도 분석(잔류량)도 용이하다.

○ 생물 방제

10. 활아균(*Beauveria bassiana*)의 실용화

천적 미생물의 활아균을 배양한 부직포(45x5cm)를 집적 한 피해 통나무상에 고정해, 솔수염하늘소 유충에 감염 시켜 방제 할 방법이 개발되었다(농약 등록중).

▷ 야외 시용으로서는 높은 효과가 있어, 수피 밑이나 목질내부의 유충에 대한 감염 사충률은 63~96%에 이르렀다. 향후, 약제 살포 등을 병용 한 종합적 방제의 일환으로서의 이용법이 기대된다.

11. 천적 곤충의 증식 기술

솔수염하늘소 유충을 포식 하는 *Temnochila japonica*, *Dastarcus longulus*, 기생성의 *Scleroderma nipponicus* 등의 대량 증식이 가능하게 되었다.

▷ 이러한 천적 곤충은 기주특이성이 낮기 때문에, 극해지의 소나무들이 시들어지는 것을 억제하는 것은 어렵지만, 피해 경감의 소재로서 이용이 가능하다. 또, 솔수염하늘소 성충의 자웅 생식기에 기생하는 선충이 발견되고(토오

다, 1970), 신중(*Contortylenchus genitalicola*)로서 기재되었다(Kosaka & Ogura, 1993).

▷ 실증 시험에서는 기생율이 낮고, 차세대의 번식력을 억제하는 효과가 적었다.

12. 조류의 보호 이용

솔수염하늘소 유충의 포식자로서 딱다구리류(woodpecker)의 보호 유치를 하기 위해, 보급자리용 등우리 상자가 개발·이용되어 있다. 가설 실험에 의하면 아케가리(*Dendrocopos major*) 1마리는 1일당 64 마리의 솔수염하늘소 유충을 포식 해, 5 ha에 1마리의 밀도로 고사율 1%의 소나무이면 90%의 솔수염하늘소 유충을 포식 할 수 있으면 추정되고 있다.

▷ 새의 유치·정착에는 소나무류의 광엽수의 대목을 포함한 혼교림 등 다양한 삼림이 이상적이다.

13. 유인제

솔수염하늘소 성충의 유인제로서 2종류가 시판되어 있고, 소나무류의 휘발 물질을 주성분이라고 한 것으로 산란 유인제이다.

▷ 이 약제도 소나무재선충의 이탈 후의 성숙한 성충만이 포획되기 때문에, 방제에의 이용의 가능성은 적다. 솔수염하늘소의 발생 예찰 등 모니터링(minitoring)용으로 사용되어 있다.

14. 나무의 생육상태 회복제

송류의 활력제, 식물 활성제, 미생물 토양 활성제 등이 판매되어 있지만, 공적인 시험에서는 모두 소나무재선충병에 대한 예방·방제, 살선충, 기피 효과 등은 인정되고 있지 않다.

소나무재선충 피해특성과 진단요령

1. 서 언

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무속(*Pinus*) 뿐만 아니라 전나무속(*Abies*), 가문비나무속(*Picea*), 잎갈나무속(*Larix*)의 일부 수종과 Douglas-fir, 히말라야시다 등도 가해하는 것으로 알려져 있으며 미국이 원산지로서 미국내 자생수종들은 대부분 저항성을 나타내어 큰 피해가 없으나 원산지에서 다른 나라로 유입될 경우 본 충에 감염된 나무는 모두 죽고 대부분 감염 후 3개월 이내에 죽기 때문에 지구상의 다른 어떠한 산림병해충보다 무서운 발병 기작을 나타내며 극심한 피해를 주고 있다. 대표적인 예가 일본으로서 1900년대 초반부터 본 충의 피해가 나타나기 시작하여 점차 확산되면서 1941년 이래 해마다 20만~243만㎡의 피해량을 나타내고 있으며 현재 소나무와 해송이 거의 전멸 상태가 되고 있다 (Kishi, 1995). 1982년 남경시(南京市)에서 최초로 발생이 확인된 중국은 현재 마미송(馬尾松, *Pinus massoniana*)과 해송림이 극심한 피해를 받고 있으며 1985년 최초 발생이 확인된 대만의 경우, 유구송(琉球松, *P. luchuensis*)과 대만이염송(臺灣二葉松, *P. taiwanensis*) 등이 전멸 위기에 있는 것으로 알려지고 있다 (遠田, 1997). 최근에는 유럽의 포르투갈에서도 발생이 보고된 바 있다 (Mota 등, 1999).

우리나라에서도 본 충의 중요성과 유입될 경우의 심각성을 우려해서 식물방역법상 금지해충으로 지정하면서 유입방지를 위해 노력을 했으나 국제화, 개방화 시대를 맞아 국제간 교역량이 증대되고 교역품도 다양해짐에 따라 본 충의 유입을 막지 못하고 급기야 1988년 10월 부산광역시 동래구 온천2동 금정산 일원에서 본 충의 피해가 발생되기에 이르렀다. 그동안 본 충의 박멸을 위해 산림청을 중심으로 관계 기관들이 노력해 왔으나 최초 발견이후 10년 이상이 지난 현재, 박멸은 고사하고 그 피해는 인접 경남, 울산 등으로 계속 확대되고 있으며 2001년에는 경북 구미에서도 발생이 확인되었다.

산림병해충 문제는 험준하고 광활한 산림의 특수성을 고려할 때 조기발견에 의해 피해 초기에 방제를 하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히 소나무재선충과 같이 비록 지금은 한정된 지역에서 국부적으로 발생하고 있으나 계속 분포영역이 확대되면서 자칫 전국으로 확산될 우려가 있는 경우에는 더더욱 조기발견에 의한 피해 억제가 중요하다.

본 자료는 소나무재선충의 조기발견에 도움이 될 수 있는 소나무재선충의 피해 특성과 진단요령 등을 정리한 결과이다.

2. 소나무재선충 피해특성

2.1. 소나무재선충과 매개충의 감염경로

소나무재선충은 자체적으로 다른 나무에 이동할 수 있는 능력이 없어 매개충의 몸에 붙어서 이동한 후 매개충이 건전한 나무 가지의 수피를 갉아 먹는 소위 후식(後食, maturation feeding) 행동을 할 때 생기는 상처를 통해 건전한 나무로 옮겨진다. 기주식물에 침입한 소나무재선충은 급속히 번식하여 감염 20일 후부터 잎의 증산량이 감소, 정지되고 묵은 잎이 아래로 처지며 시들기 시작한다. 감염목은 당년도에 약 80% 정도 고사되며 나머지는 이듬해 5월까지 고사한다 (변병호, 1999). 소나무재선충과 매개충인 솔수염하늘소, 소나무간의 피해관계는 그림 1과 같다.

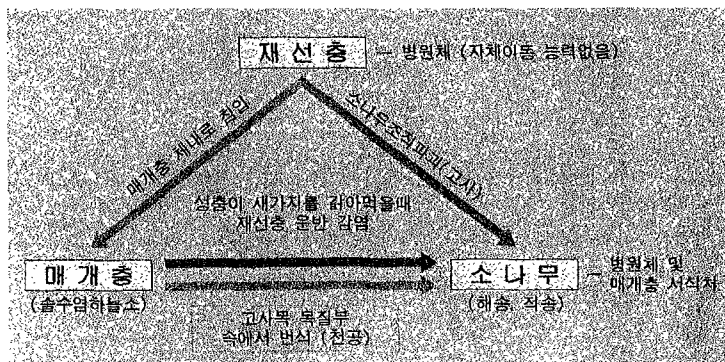


그림 1. 소나무재선충과 매개충, 소나무간의 피해관계

2.2. 소나무재선충의 생애

소나무재선충의 발육한계온도는 9.5℃이며 발육속도가 빨라서 1세대를 완료하는데 30℃에서는 3일이 소요되고 25℃에서는 4~5일, 20℃에서 6일, 15℃에서는 12일이 각각 소요되며 33℃ 이상에서는 증식이 되지 않는다. 암컷은 교미후 30일 정도 지나면 약 100개의 알을 낳는다. 난각안에서 최초로 탈피한 후 부화하여 2기 유충이 되며 체장은 0.2~0.4mm이다. 그 후 2회 탈피하여 3~4기 유충이 되며 4회 탈피로 성충이 된다. 춘기에 솔수염하늘소 유충이 목질부내에서 번데기방(蛹室)을 만들고 그 안에서 번데기가 된 후 성충으로 될 때 번데기방 주변의 분산형 유충은 탈피하여 분산형 4기 유충(내구형 유충)이 되어 번데기방 주변으로 몰린다. 분산형 4기 유충은 소화기관이 없고 몸표면에 접착성 물질을 분비하고 활발하게 움직여서 번데기방내의 솔수염하늘소 신성충의 몸에 부착되거나 복부 제1김분을 통해 체내 기관으로 들어가서 솔수염하늘소가 성충이 되어 외부로 탈출할 때 함께 이동한다 (변병호, 1999). 자세한 생활환은 그림 2와 같다.

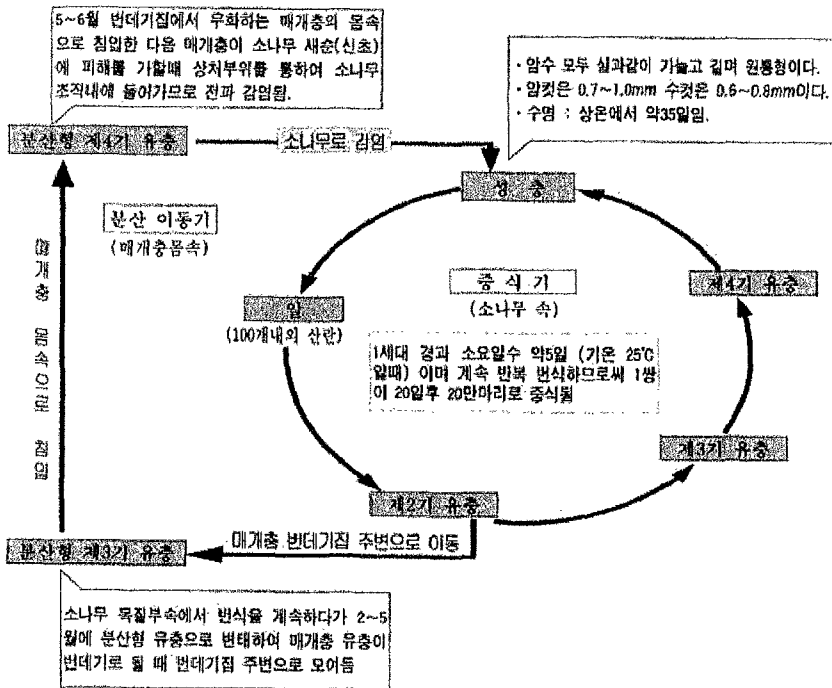


그림 2. 소나무재선충의 생활환

2.3. 메개충 솔수염하늘소 생태특성

솔수염하늘소 성충은 수컷이 15~20mm, 암컷이 20~30mm이며 체색은 적갈색이고 몸 전체에 검은색과 황색의 점이 산재되어 있다. 우리나라에서는 대부분 연 1회 발생하나 약 2% 정도는 2년 1회 발생한다. 성충은 5월중순부터 직경 6~8mm의 탈출공을 만들고 목재 조직내에서 외부로 탈출한다. 솔수염하늘소 성충 한 마리당 약 15,000마리의 재선충을 보유하며 솔수염하늘소가 후식을 할 때 후식 부위의 상처를 통해 소나무재선충이 옮겨진다. 성충은 탈출한 후 2~3주부터 교미, 산란을 시작하며 1일 산란수는 1~8개이며 생존기간중 평균 100개 내외를 산란한다. 부화한 유충은 수피 밑에서 내수피를 식해하면서 가는 튕밥 모양의 똥을 배설하며 2령유충 후반부터는 목질부속으로 들어가 식해한다. 4회 탈피하여 종령유충이 되며 4~6월에 번데기가 된다 (변병호, 1999). 자세한 생활환은 그림 3과 같다.

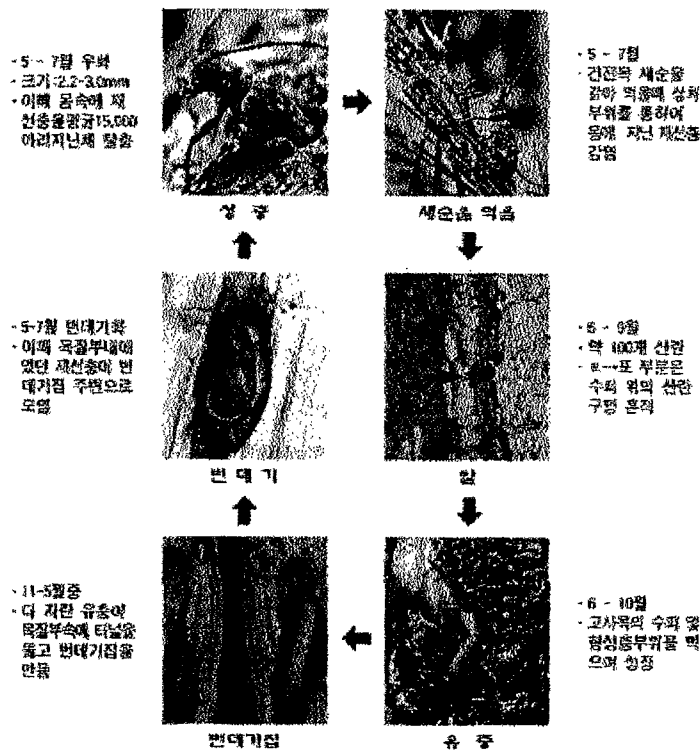


그림 3. 솔수염하늘소의 생활환

3. 소나무재선충 진단요령

3.1. 조기진단의 중요성

소나무재선충은 주기주식물인 소나무와 해송이 일단 재선충에 감염되면 뚜렷한 치료약이 없어 100% 완전 고사되는 치명적인 피해를 입기 때문에 흔히 “소나무의 에이즈”라고도 불리고 있다. 그만큼 소나무재선충은 가공할 위력을 가졌지만 방제는 의외로 쉽다고도 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 소나무재선충은 자체로는 이동(전염) 능력이 없으므로 매개충인 솔수염하늘소에 의해 옮겨지므로 방제의 주대상은 솔수염하늘소가 되고 있다. 다행히도 솔수염하늘소는 생활사중 대부분의 기간인 약 9개월 이상을 죽은 나무의 조직대에서 서식하므로 고사목을 완벽하게 제거할 수 있다면 이론적으로 소나무재선충의 박멸도 가능하다. 현재 소나무재선충의 주력 방제방법으로는 피해목을 벌채한 후 소각 또는 훈증처리하는 방법을 적용하고 있으며 예방방제로 매개충의 후식을 방지하기 위한 항공약제살포를 적용하고 있다. 그러나 이들 방법은 모두 피해 규모가 적을 때나 적용이 가능한 방법들이다. 만약 소나무재선충이 전국으로 만연된다면 매년 소요될 막대한 방제비용을 감안할 때 자칫 방제를 포기하는 사태가 오지 않을 까 우려된다. 이 경우 우리나라 소나무림은 전멸 위기까지 몰릴 수 있고 설사 전멸이 안된다 하더라도 소나무림의 대규모 파괴는 국가적 재난으로 임업 기반이 여지없이 무너지는 결과를 초래할 것이다. 따라서 피해발생 초기에 조기 발견하여 확산원을 원천적으로 제거하면서 피해를 억제시키는 것이 무엇보다도 중요하다.

3.2. 피해목 식별요령

3.2.1. 수지(樹脂) 분비 이상

소나무재선충 감염목이 외견상 변화를 보이기 전에 나타나는 증상으로 겉으로 는 건전한 상태인 것 같으나 감염목의 경우 수지, 즉 송진 분비가 현저하게 감소한다. 소나무 줄기에 낫이나 편치 등을 이용하여 직경 1cm 정도 수피를 벗겨서 변재부를 노출시킨 후 1~2시간 후에 송진의 유출 상태를 관찰하면 건전목은 송진이 흘러나와

외부로 흘러내리는 반면 감염목은 전혀 송진이 나온 흔적이 없거나 있어도 극히 적은 양이 변재의 표면에 입상(粒狀)으로 점점이 나오는 정도이다. 그러나 겨울철에는 건전한 나무라도 송진이 잘 나오지 않아 오류를 범하기 쉬우므로 주의할 필요가 있다. 소나무의 수피 및 재부(材部)의 조직적인 변화, 탄소 동화량, 호흡량의 변화, 증산량의 변화 등 생리적인 변화는 그 후에 나타난다 (변병호, 1999).

3.2.2. 외견상 변화

외관적인 변화는 소나무잎이 시들거나 변색되는 것으로 송진 분비 이상이 있을 후에 나타나기 시작한다. 일반적으로 잎이 시드는 변화는 묵은 잎(1~2년 지난 잎)이 먼저 아래로 처지며 시들고 곧이어 새잎(당년엽)도 아래로 처지며 시들기 시작한다. 피해가 진전되면 잎의 변색과 시들음은 급속히 진행되어 단기간 내에 나무 전체가 선명한 적갈색으로 변하며 고사하기 시작한다. 적갈색으로 변한 잎은 점점 퇴색하고 얼마 후에 낙엽이 된다 (그림 4). 그렇지만 나무 전체에 증상이 나타나지 않고 수관 상부나 가지 등에서 부분적으로 일부 고사현상이 나타나는 경우도 있다 (변병호, 1999).

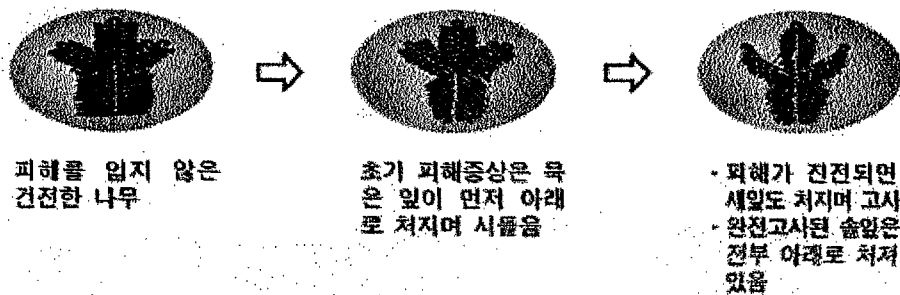


그림 4. 감염목 잎의 외견상 변화

3.3. 소나무계선충 분리 동정

3.3.1. 시료채취

소나무류가 별다른 이유없이 단목(單木) 또는 집단으로 고사된 경우에는 일단

소나무재선충의 피해를 의심해 볼 필요가 있다. 소나무재선충을 분리 동정하기 위해서는 먼저 목편(木片) 시료를 채취하여야 한다. 시료 채취 도구는 손도끼를 사용하는 것이 편리하며 정밀 조사를 위해 수동식 드릴을 사용하는 경우도 있다. 시료는 고사 목을 벌채하여 수관 상·중·하부에서 끌고루 채취하는 것이 가장 좋으며 벌채가 여의치 않을 경우에는 작업이 용이한 흉고 부위에서 채취할 수도 있다. 시료 채취 요령은 수피를 벗겨내고 목질부에서 약 30g 정도의 목편을 채취하여 라벨을 붙인 후 수분이 증발되지 않도록 비닐주머니에 담으면 된다.

3.3.2. 소나무재선충 분리

소나무재선충은 지렁이와 같이 가늘고 긴 모습을 하고 있으며 몸체가 투명하고 선충의 몸길이가 암컷 0.7~1.0mm, 수컷 0.6~0.9mm로 극히 작아 육안으로 식별이 어렵다. 소나무재선충 여부는 먼저 소나무 조직내에 있는 재선충을 분리한 후, 현미경으로 검정하여 확인할 수 있다. 소나무재선충의 분리에는 선충을 분리하는 데 흔히 사용되는 바에르만(Baermann) 깔대기법을 약간 개량한 장치를 이용하고 있으며 분리과정은 다음과 같다 (그림 5와 6).

- ① 전정가위를 이용하여 목편 시료를 1cm 크기로 잘게 찢는다.
- ② 고무튜브를 연결한 깔대기에 체를 올리고 그위에 종이와이퍼 2장을 교차시켜서 칸 후 깔때기판에 고정시킨다.
- ③ 잘게 찢은 시료를 깔대기 위에 놓고 물을 가득 채운다.
- ④ 24시간 또는 48시간후 집게를 열고 선충이 든 물 20cc 정도를 비이커에 받는다.
- ⑤ 선충의 밀도가 많은 경우 비이커의 물을 샬레에 담아서 해부현미경으로 바로 관찰한다.
- ⑥ 선충의 밀도가 적을 경우에는 비이커에 충분한 양을 담아 직경 8cm의 500메쉬 체를 이용하여 선충을 모은 후 샬레에 담아서 관찰한다.

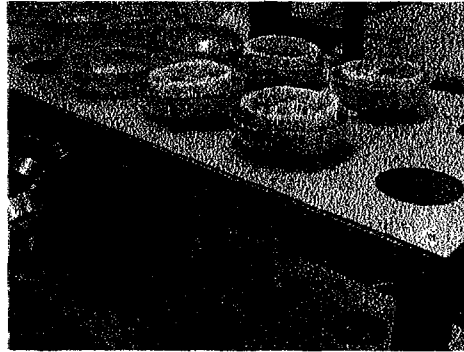


그림 5. 소나무제선충 분리장치

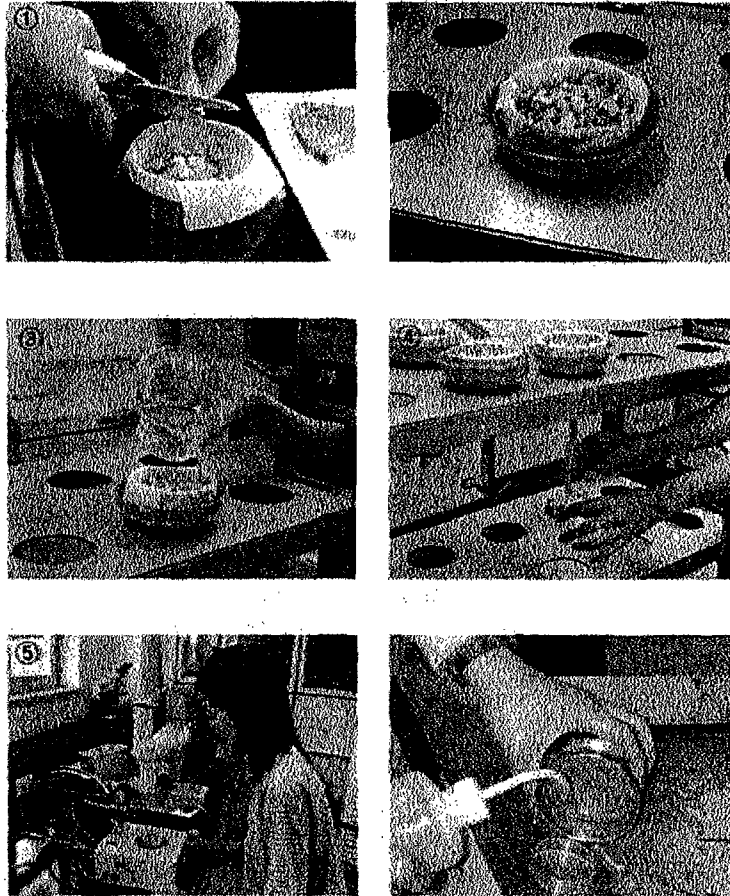


그림 6. 소나무제선충 분리과정

3.3.3. 소나무재선충 동정

일반적으로 고사된 소나무의 조직내에는 재선충외에도 부식성, 균식성, 포식성 등 비기생성 선충류가 다양하게 살고 있다. 재선충과 비기생성 선충은 해부현미경으로도 쉽게 구별할 수 있지만 같은 재선충속(*Bursaphelenchus*)에 속하는 소나무재선충과 어리소나무재선충은 형태적으로 서로 비슷해서 쉽게 구별하기가 어려우며 고배율의 광학현미경으로 구분이 가능하다. 소나무재선충의 동정과정은 다음과 같다.

- ① 먼저 해부현미경(50배)으로 재선충과 비기생성 선충을 구분한다. 일반적으로 재선충과 비기생성 선충은 크기는 비슷하나 구침의 유무와 식도의 형태에서 뚜렷하게 구별이 된다 (표 1, 그림 7).

표 1. 재선충과 다른 선충의 형태적인 차이점

구 분	재 선 충	비기생성 선충
구강내 구침(口針) 유무	있다	없다
식도 형태	전, 중, 후 3부위로 뚜렷이 구분된다	구분이 없이 하나로 되어 있다

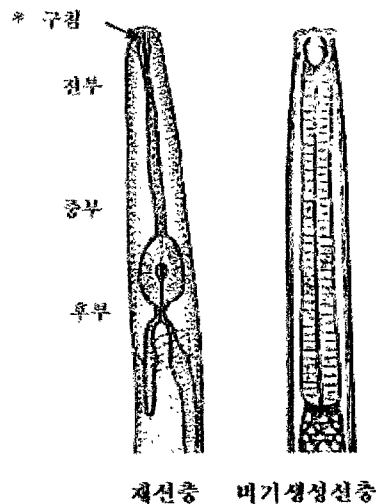


그림 7. 재선충과 비기생성 선충 비교

- ② 광학현미경(400배)을 이용하여 소나무제선충과 어리소나무제선충을 구분한다. 소나무제선충(그림 8)과 어리소나무제선충(그림 9)은 형태적으로 매우 비슷하여 수컷으로는 구분이 어려우며 암컷 성충의 꼬리 모양으로 구분할 수 있다 (표 2).

※ 소나무제선충의 형태

● 수 컷

- 몸길이(L: 體長) : 0.8mm (0.7~0.91mm)
- 구침(口針:Stylet)의 길이 : 15.2 μ m (15.2~17.7 μ m)
- 교점자(交接刺:spicule:생식기)의 길이 : 23.2 μ m (20.2~25.3 μ m)로 갈고리 모양
- 몸길이/체폭(a:體長/體幅)의 비 :36 (35-45)
- 몸길이/식도길이(b:體長/食道長)의 비 : 9.3 (7.8-12.8)
- 생식기의 위치는 체장의 81%w정도로 後部에 위치하고 있다.

● 암 컷

- 몸길이(L: 體長) : 0.94mm (0.76~1.08mm)
- 구침(口針:Stylet)의 길이 : 15.9 μ m (15.6~20.2 μ m)
- 몸길이/체폭(a:體長/體幅)의 비 :36 (33-50)
- 몸길이/식도길이(b:體長/食道長)의 비 : 10.8 (9.5-12.5)
- 음문(陰門:Vulva)의 위치 : 체장의 67% 정도로 약간 後部에 위치하고, 음문순(陰門唇:vulva flap)으로 덮여 있는 것이 특징.

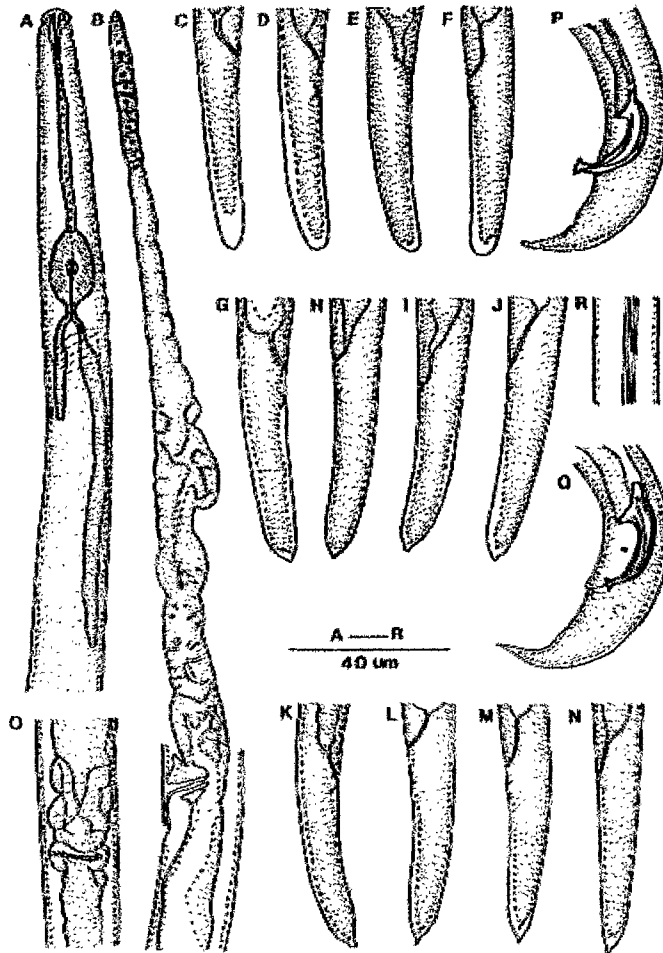


그림 8. 소나무재선충 도해

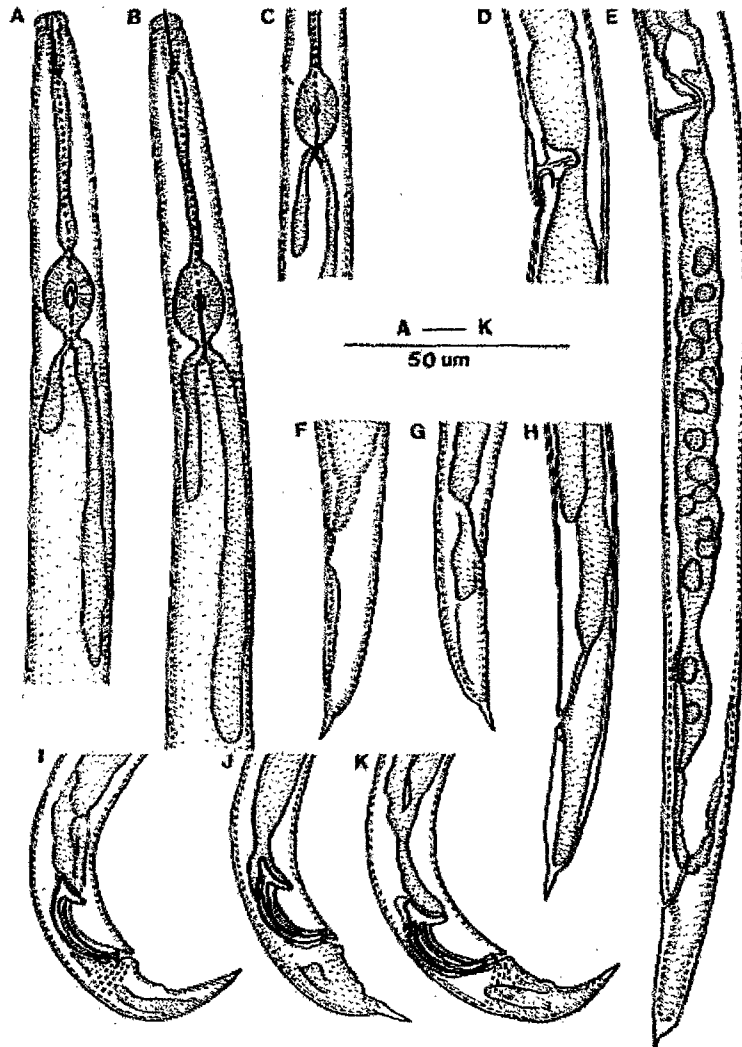


그림 9. 어리소나무재선충 도해

표 2. 소나무재선충과 어리소나무재선충 암컷 성충의 꼬리 모양

구 분	소나무재선충	어리소나무재선충
꼬리형태	원통형에 가깝다	원추형이다
꼬리돌기	넓고 등글다	뾰족하고 날카롭다
돌기와 꼬리 비율	3.1~4.9%	12.4%

소나무재선충 피해림



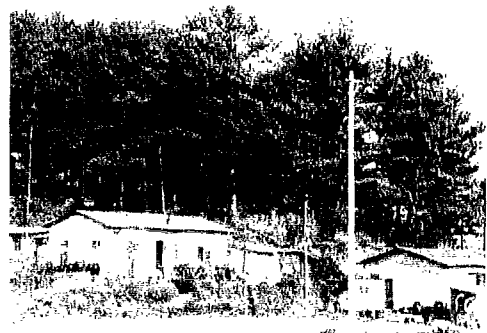
< 사 천 >



< 진 주 >



< 구 미 >



< 울 산 >

매개충 솔수염하늘소



<솔수염하늘소 탈출공(좌), 침입공(우)>



< 솔수염하늘소 유충 >



< 솔수염하늘소 변태기 >



< 솔수염하늘소 성충 >

방 제 작 업



< 피해목 별채 >



< 별채목 집재 >



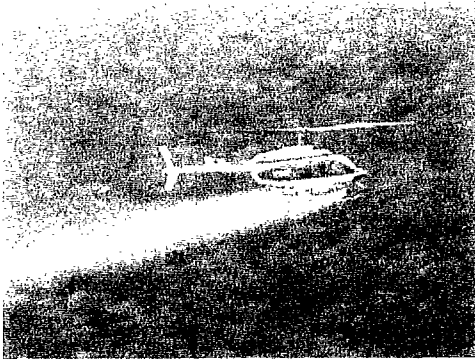
< 소 각 >



< 뒷불정리 >



< 피해목 훈증 >



< 항공방제 >