

# 엽록소 형광분석에 의한 조경수목의 제설제 스트레스 평가

- 스트로브잣나무와 곰솔을 대상으로 -

권희범\* · 김태진\*\*

\*한국도로공사 · \*\*한경대학교 조경학과

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

겨울철 도로를 주행하는 차량의 안전을 도모하기 위하여 살포하는 제설제가 최근에 심각한 환경문제를 야기하고 있다. 또한 기후변화에 따른 잦은 폭설로 인하여 염화물의 집중살포가 고속도로변 식재 수목의 고사율을 높일 뿐 아니라 황엽 발생을 초래하여 도로경관을 해치고 있다.

근년의 기상은 강원도지방과 서해안지방을 중심으로 많은 눈이 내리고 있으며 게릴라성 폭설현상이 특징이라 할 수 있다. 우리 나라의 10개 주요 도시에서 5개년 평균 강설일수는 13일 정도이며 강설량은 50cm를 나타내고 있다. 이에 따라 제설제 사용과 사용량, 제설방법의 변화를 가져왔다.

고속도로에서 제설제의 사용은 2001년까지 염화칼슘과 모래를 혼합 살포하였으나 마찰제인 모래 사용으로 인한 재 수거 작업 및 비용 문제와 폐 모래 처리비용 등의 각종 폐해 발생과 염화칼슘 수급 불균형에 따른 공급 지연, 가격 상승 등 신속한 제설작업 수행에 여러 가지 어려움이 있어 2002년부터 염화칼슘과 소금을 혼합한 용액화 살포 방식(Pre-wetted Salt Spraying)을 사용하고 있다.

본 연구에서는 고속도로의 제설 피해로부터 가장 많이 노출되어 있으나 내염성이 약한 수종인 스트로브잣나무의 대체수종을 찾기 위하여 육안관찰로 피해가 적게 나타나는 곰솔을 연구대상으로 선정하였다. 단, 스트로브잣나무의 대안으로서 모색하고자 하는 곰솔은 생육가능지역 내에서 대체 식재한다는 조건을 전제로

하였다.

### 2. 제설제 사용 및 수목피해 현황

제설제의 종류는 염화물계인 염화칼슘( $\text{CaCl}_2$ ), 소금( $\text{NaCl}$ ), 염화마그네슘( $\text{MgCl}_2$ )과 초산염계인 CMA(Calcium Magnesium Acetate), 초산칼륨, 산화칼슘계, 초산바륨, 초산나트륨과 알콜/글리콜계인 EG(Ethylene Glycol), PG(Propylene Glycol)로 구분하며, 고속도로와 일반도로에서 주로 사용하는 제설제는 염화물계에 속하는 소금과 염화칼슘이다.

1980년 중반에 접어들어 염화칼슘을 이용한 제설방법이 도입되었으며 점차 염화칼슘의 순도를 높여 모래와 혼합 살포하는 제설방법이 개발되었고 장비 또한 꾸준한 연구개발로 향상된 제설방안을 찾을 수 있었다. 하지만 고속도로 연장이 증가됨에 따라 염화칼슘의 소요량은 많아졌으며 생산단가 또한 높아져 수급상의 어려움이 닥치자 2001년을 기준으로 제설제 사용 방법을 다양화하였다. 현재 주로 사용하는 용액화 살포 방식의 제설제는 염화칼슘을 용액화한 것에 소금을 혼합하여 사용하고 있다. 이에 따라 이전에 제설 위주의 방법에서 2002년부터는 제설효과가 곧바로 나타나는 방식, 재료획득이 용이한 자재선택, 인력이 적게 소요되는 방법 등 만을 고려한 효율위주의 방법을 택하고 있다.

실제로 실험실 조건에서 시험한 결과 적설량별 평균치에 대한 제설효과는 “소금+염화칼슘용액>소금>소금+염화칼슘>염화칼슘용액>모래+염화칼슘>염화칼슘>염화칼슘+염화칼슘용액” 순으로 나타났다고 주장한다. 이와 같이 소금의 제설제가 염화칼슘보다 우위에 있음으로 해서 소금사용량은 급속히 증가하였다.

현재 우리 나라 고속도로 중 민자고속도로를 제외한 고속도로에 식재된 수목은 2005년 말 기준 총 289종 11,902,897주이며, 교목이 1,575,586주로서, 이들 중 스트로브잣나무가 327,245주이며 곰솔은 104,018주이다. 교목 중 이들 두 수종이 차지하는 비율은 각각 20.8%, 0.07%로서 스트로브잣나무가 가장 많이 식재되어 있다.

이들 수종 중 스트로브잣나무를 비롯한 몇 수종에 대하여 최근 5년 동안에 염화물 피해 방지를 위하여 수목 917,738주를 대상으로 염화물 피해 저감제(이하 '엽면코팅제'라 한다.) 및 제염세척제 2,815,195ℓ를 살포하였다(표 1 참조).

또한 상습 피해가 발생하는 지역의 수목을 2004년도와 2005년도에 걸쳐 14,542주를 이식하였으며, 불량수목에 대하여 10,132주를 제거하였으며, 수종별로는 스트로브잣나무 이식이 11,594주(80%), 제거가 2,417주(24%)로서 가장 많았으며, 잣나무, 전나무, 소나무 순이며, 광나무와 영산홍 등 관목류도 일부 포함하고 있다.

이와 같이 매년 제설제 살포로 인한 수목피해 방지 작업을 시행하고 있으나, 수목의 고사가 당년에 나타나는 것이 아니라 수령과 식재 년도에 따라 오랜 기간에 걸쳐 고사됨으로서, 수목고사의 직접원인이 제설제 피해에 의한 것으로 판명되지 않는 경우가 많다.

따라서 향후 제설방법은 환경을 고려한 방식을 택할 뿐 아니라 환경의 영향을 저감할 수 있는 새로운 제설제 개발이 필요하다.

### 3. 연구방법

제설작업으로 인한 수목피해는 단순히 엽면에 비산 부착된 제설제 만의 피해이기보다는 토양과 바람, 미세 먼지, 매연, 당년의 기후, 식재 이격 거리, 미 활착 등의 복합적인 원인에 기인한다 할 수 있으므로, 실제 고속도로변에 식재된 수목을 선정하여 조사하는 것이 바

람직하다 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 내염도의 미세한 차이를 비교분석하기 위하여 고속도로변 식재 수목은 영향요인의 통제가 곤란하므로 부득이 제설제 농도와 살포방법 등 제설요인의 통제가 가능한 모사실험포지 수목을 대상으로 조사하였다.

본 연구에 사용한 공시수목은 스트로브잣나무와 곰솔 2종을 선정하였으며, 이들 수종은 소나무속에 속하는 상록침엽교목으로서 도로변에 기능 식재용으로 빈번히 사용되는 수종들로서 사용 빈도가 높은 반면 제설작업으로부터 피해 또한 많이 발생하고 있다. 특히 신초 발아 시기인 4~5월에 스트로브잣나무의 황엽현상이 많이 발생하고 있는 반면에 곰솔의 피해는 약하게 나타나고 있음을 육안관찰에 의해 확인할 수 있다. 이는 두 수종간에 내염성의 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 제설제에 의한 수목 피해는 잎, 줄기, 뿌리, 토양 등으로 나누어 파악할 수 있으나 본 연구에서는 수목의 활력을 결정하는 주된 요인이 잎에 있음을 전제로 두 수종에 대하여 내염성 정도를 엽록소 형광분석으로 찾고자 하였다.

또한 광합성 형광분석법은 식물 잎의 광합성을 공간적인 해석 및 시각적인 해석을 가능하게 하며, 정량적이고 비파괴적인 방법으로 측정이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 스트로브잣나무, 곰솔을 대상으로 제설제 농도별, 종류별, 엽면코팅제 처리별 살포효과에 대한 광합성 반응정도를 측정하고자 하였다.

#### 1) 제설제의 종류 및 농도 결정

본 연구에서는 표 2와 같이 공시 제설제 5종을 선정하였으며, 제설제 농도를 0%, 5%, 9%로 조제하였다.

#### 2) 약제 선정, 전처리 및 측정방법

제설제 피해 방지를 위한 약제 선정은 W사의 엽면코팅제를 사용하였다.

엽면코팅제는 파란편유를 농도에 따라 잎의 표면에

표 1. 염화물 피해 예방 작업 현황

작업 내용		작업 기간	'01.12.	'02.12.	'03.12.~'04. 4.	'04.12.~'05. 4.	'06. 4.
염화물 피해 예방 작업	수목(주)		125,776	100,627	217,606	253,916	219,813
	살포량(ℓ)		158,590	202,993	1,207,394	612,177	634,041

\*: 년도 말 작업은 엽면 코팅을 위한 작업, 년도 초 작업은 제염 세척 작업임.

표 2. 제설제별 시험용액 조제 현황

제설제	화학식 및 조성	순도(%)	기타
소금	NaCl	85	· 수분함량 11% 이하
염화칼슘	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	100	
T제품	(CH <sub>3</sub> COONa-MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O(40%)-CH <sub>3</sub> COONa-NaCl(60%))	100	· 외관: 염화나트륨과 염화마그네슘의 결정에 유기산을 함유시킨 것으로 과립 상태. · 입도: 5mm 체질시 잔류중량 2% 미만, 1.2mm 체질시 잔류중량 90% 이상. · pH : 7~10 · 안정성 및 반응성: 평형상태에서 화학적으로 안정
소금+염화칼슘	NaCl + 30% CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O (7:3, w/w)	-	· 시험용액 조제용과 30% 염화칼슘용액 조제 · 염화칼슘 파우더 30g을 증류수에 녹여 100mL로 함.
T제품+염화칼슘	[(CH <sub>3</sub> COONa-MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O(40%)-CH <sub>3</sub> COONa-NaCl(60%))] + 30% CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O (7:3, w/w)	-	

살포함으로써 피막을 형성하여 수분증산억제나 동해방지의 효과를 나타낸다.

이 약제는 피막형성에 의한 염화물 부착을 방지하므로 20~25일 주기로 재 살포하여 손상된 피막을 복구하여야 한다고 주장하고 있으나 약효 지속 기간과 농도 결정은 실제 검증이 필요하다.

시료는 2006년 8월 중순경 모사실험지에서 채취하였다. 엽면코팅제 처리효과를 비교하기 위하여 시료채취 3일전에 10배 희석한 엽면코팅제를 살포하였다. 채취한 공시수목의 잎은 전처리 시험 당일 오전 10시에 채취한 후 3시간 이내에 실내 실험실로 가져와 제설제별(5종의 제설제), 농도별(0%, 5%, 9%)로 조제한 용액에 2분간 담근 후 꺼내어 세균배양용 접시에 걸름 종이를 놓고 폴리에틸렌 필름으로 밀봉 처리하여 22℃의 Growth chamber에서 72시간 암 상태를 유지하였다.

분석에 사용된 스트로브잣나무와 곰솔의 엽 개체수는 5처리(제설제)×3처리(제설농도)×2처리(엽면코팅제 처리, 엽면코팅제 무처리)×5반복=150 개체를 대상으로 실험에 사용하였다.

암처리된 잎을 엽록소 형광반응분석기(Imaging fluorometer, Fluor Cam)에 넣고 30분간 작동하여 제설제별 초기수광율(F<sub>o</sub>), 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), 수광이용율(F'<sub>q</sub>/F'<sub>m</sub>), 광전자전달계수(qP)를 측정하였다.

## II. 본론

### 1. 농도별 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 비교

최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)은 식물의 잎이 광합성을 수행할 수 있는 잠재력을 의미하므로, 식물의 광합성 활성 지표로 사용하는 기준이 된다.

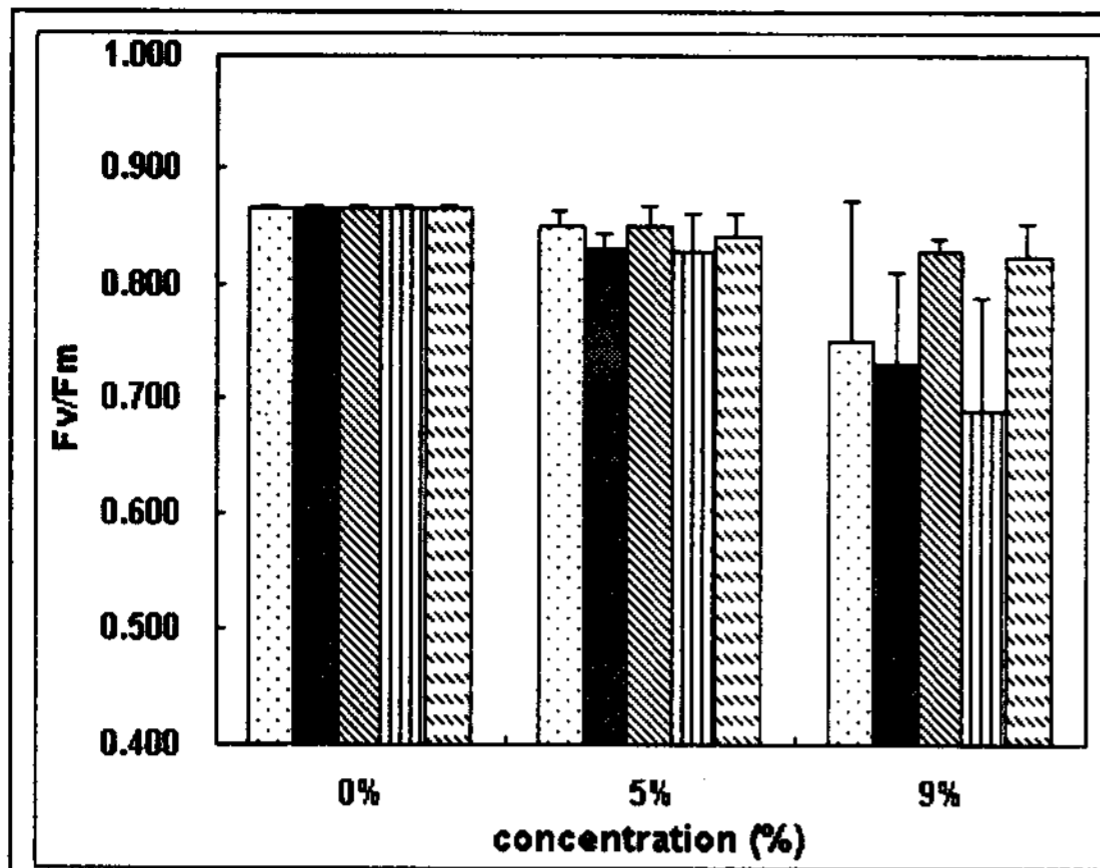
스트로브잣나무는 농도가 높아짐에 따라 전체적으로 감소하고 있으며, 염화칼슘과 염화칼슘을 포함한 혼합제에서 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 변화 값이 다소 적게 나타났다. 이는 스트로브잣나무가 제설제 농도에 매우 민감함을 알 수 있다.

곰솔의 경우는 농도변화에도 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 값의 변화가 적었다. 이는 농도 영향에 민감하지 않다는 것을 알 수 있다.

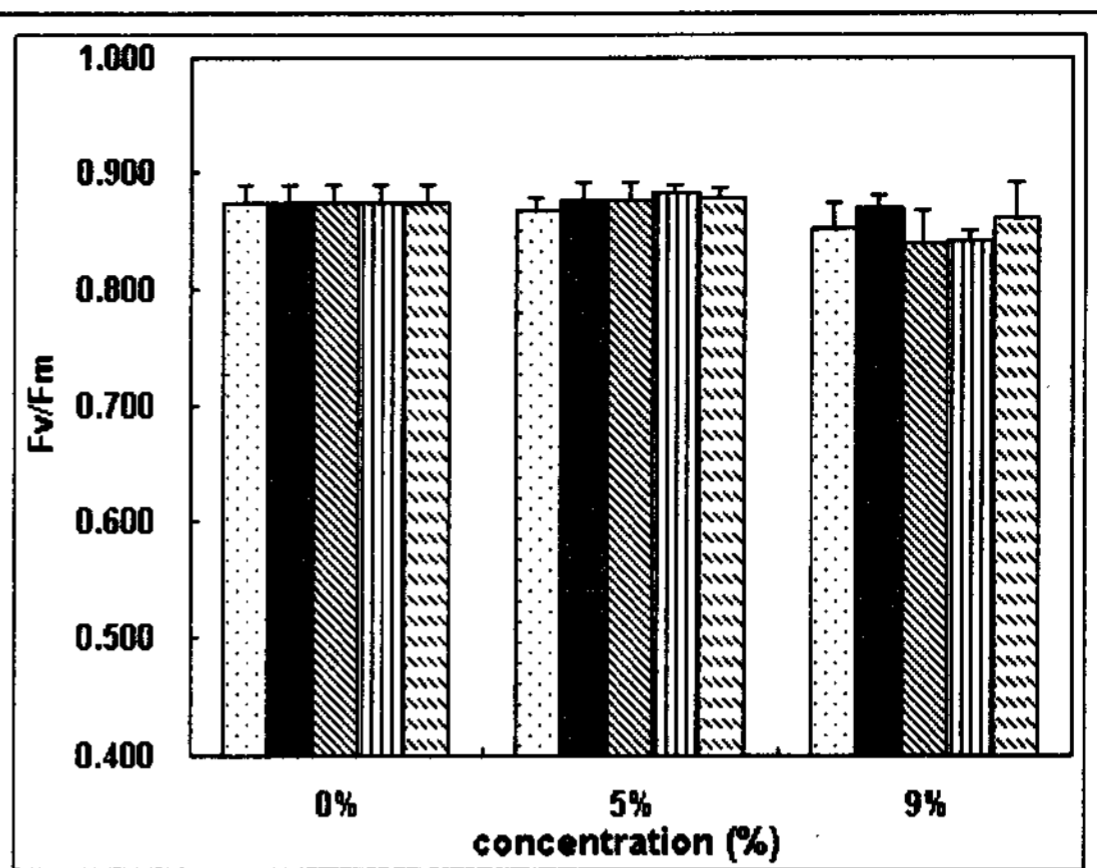
### 2. 제설제별 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 비교

스트로브잣나무의 경우 NaCl 제설제는 0%와 5% 농도에서는 변화의 차이가 미약하나, 5%에서 9%로 농도를 높임에 따라 0.139 값의 차이를 나타냈으며, T제품은 처리 농도가 5%에서 9%로 높아짐에 따라 0.103의 값의 차이를 나타냈고, CaCl<sub>2</sub>는 5%에서 9%로 높아짐에 따라 0.099로 3순위의 변화를 나타냈다(그림 1 참조).

혼합제인 나머지 2종 제설제(T제품+CaCl<sub>2</sub>, NaCl+CaCl<sub>2</sub>)의 최대수광율(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 값의 변화는 농도 차에 따른 변화가 적었다. 이는 제설제 사용 시 기준량을 사용한다는 전제하에서는 혼합제가 수목의 잎에 환경압이 적다는 것을 알 수 있다.



a. 스트로브잣나무



b. 곰솔

그림 1. 제설제별 최대수광율(Fv/Fm) 비교

범례: □CaCl<sub>2</sub> ■NS40 ▨NS+Ca ▤NaCl ▧Na+Ca

곰솔의 경우, 농도가 5%에서 9%로 높아짐에 따라 NaCl은 0.04, T제품+CaCl<sub>2</sub>은 0.036으로 약간의 차이를 나타내고 있을 뿐이며, 나머지 제설제 3종에 대해서는 차이 값 극히 적었다. 따라서 곰솔은 전체적으로 최대수광율(Fv/Fm)에 큰 변화가 없으며, 내염성이 강함을 알 수 있다(그림 1 참조).

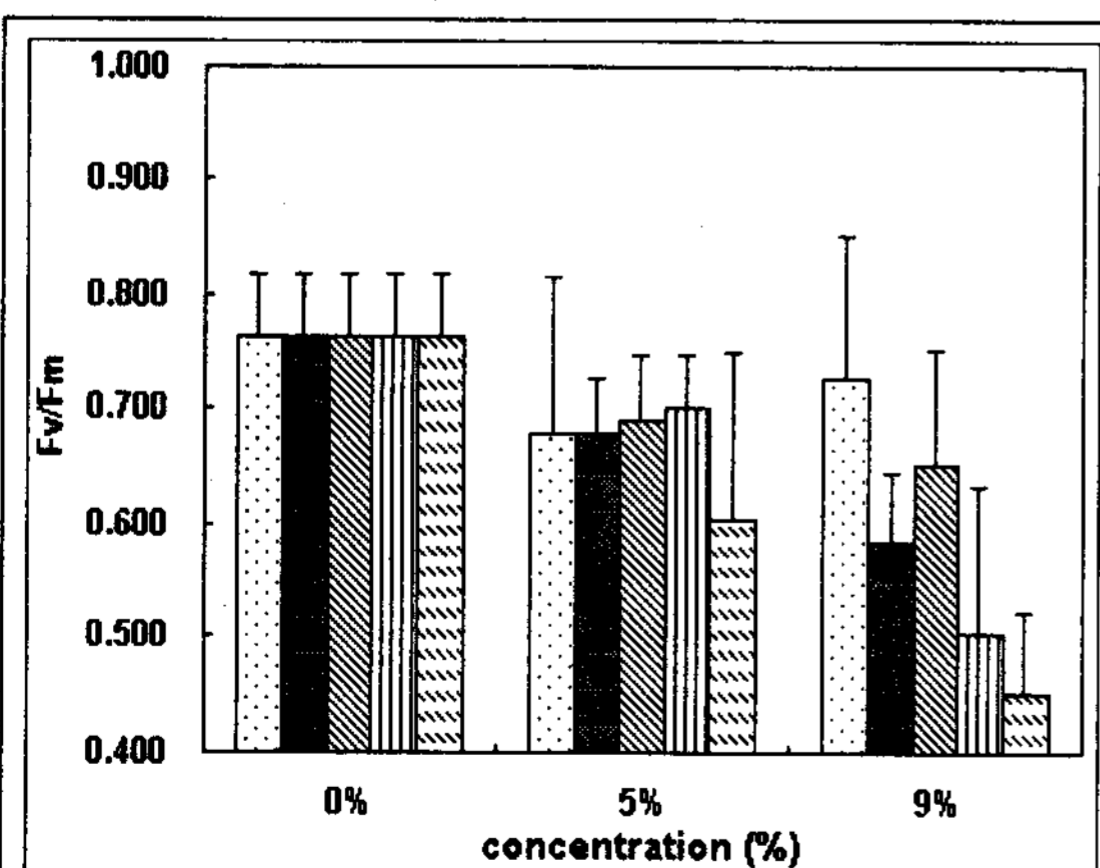
### 3. 엽면코팅제 처리별 비교

#### 1) 최대수광율(Fv/Fm)

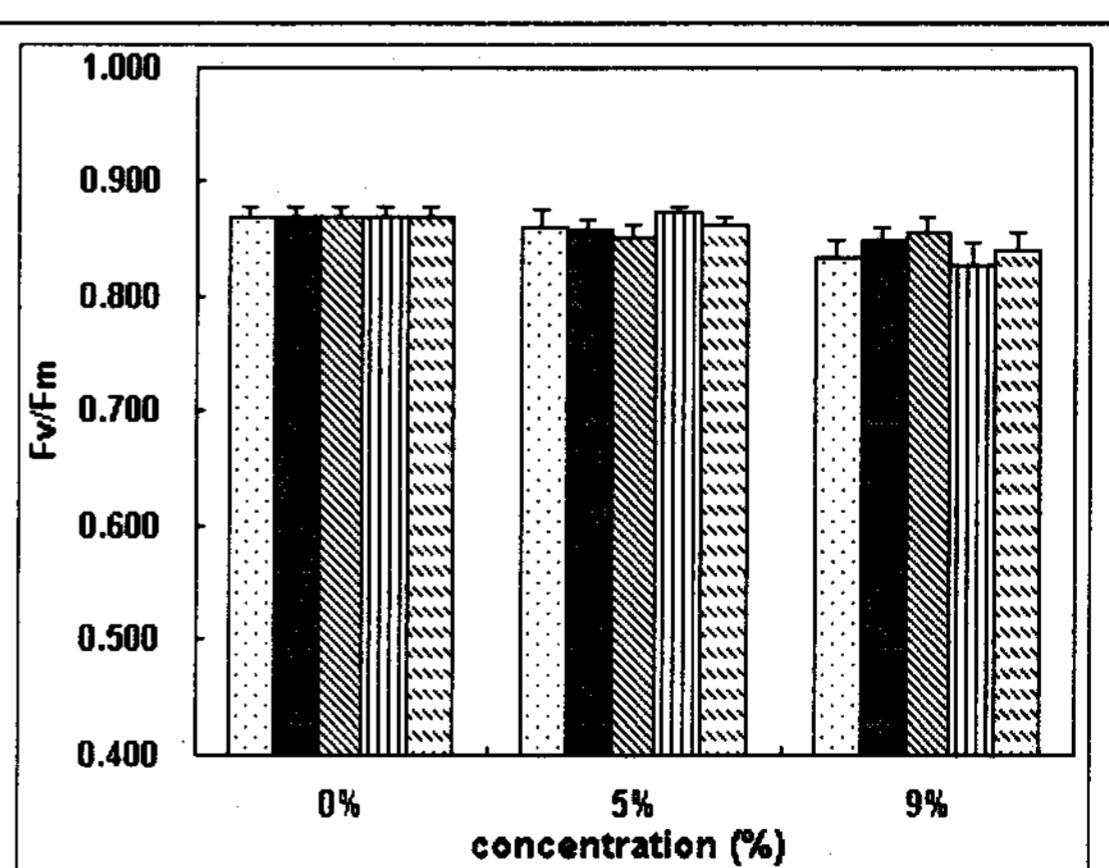
엽면코팅제 처리에 대한 농도별 최대수광율(Fv/Fm)

변화에서는 NaCl+CaCl<sub>2</sub> 혼합 제설제가 0%에서 9%로 농도가 높아짐에 따라 0.312로 감소하여 가장 큰 변화를 나타냈으며, 다음으로 NaCl 제설제가 농도 0%에서 9%로 높아짐에 따라 0.261로 감소하였으며, T제품은 농도가 0%에서 9%로 높아짐에 따라 0.179 감소하였다(그림 2 참조). CaCl<sub>2</sub>와 T제품+CaCl<sub>2</sub>는 경미한 차이를 나타내고 있다. 엽면코팅제 처리시 NaCl+CaCl<sub>2</sub>> NaCl>T제품>T제품+CaCl<sub>2</sub>>CaCl<sub>2</sub> 순으로 스트로브잣나무에 광합성 감소량이 크다는 것을 알 수 있다.

곰솔의 경우, 그림 2의 B'와 같이 엽면코팅제 처리에 따른 농도별, 제설제별 변화가 거의 없음을 알 수 있다.



a. 스트로브잣나무



b. 곰솔

그림 2. 엽면코팅제 처리 최대수광율(Fv/Fm) 비교

범례: □T-cacl<sub>2</sub> ■T-ns40 ▨T-ns+ca ▤T-nacl ▧T-na+ca

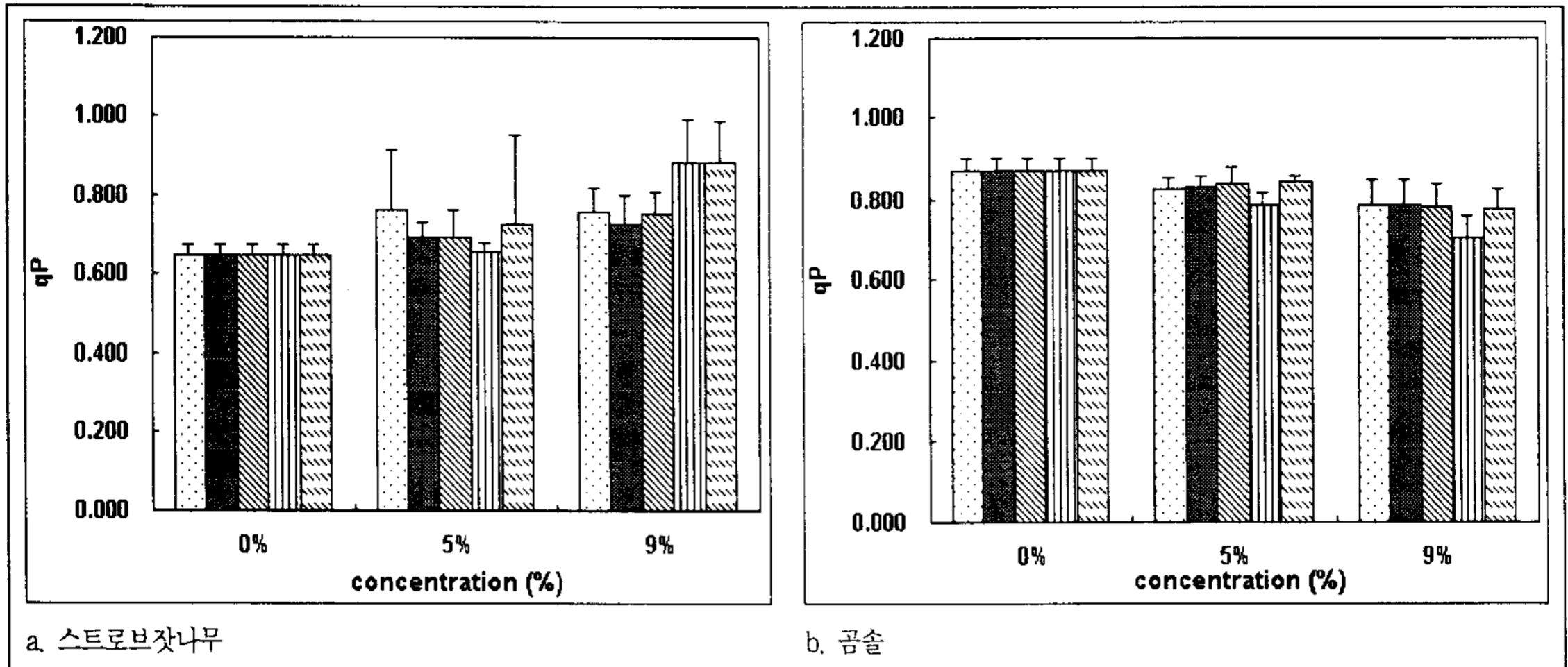


그림 3. 엽면코팅제 처리 광전자전달계수(qP) 비교  
 범례: □T-cacl2 ■T-ns40 ▨T-ns+ca ▮T-nacl ▩T-na+ca

이는 엽면코팅제 처리가 곰솔이라는 수종에는 별다른 영향을 줄 수 없다는 것을 알 수 있다.

## 2) 광전자전달계수(qP)

스트로브잣나무의 경우 엽면코팅제 처리 시 광전자 전달계수(qP) 변화는 그림 3의 A'와 같이 더욱더 분명한 반응을 보이고 있다. 제설제 5종 모두에서 농도가 높아짐에 따라 광전자전달계수(qP) 값이 증가하였다. 앞서 비교 분석한 농도별, 제설제별, 엽면코팅제 처리별 최대수광율(Fv/Fm)의 변화값이 대부분 감소하였으나 광전자전달계수(qP)는 반대 현상을 보이고 있다.

특히 농도가 0%에서 9%로 높아짐에 따라 NaCl이 0.239, NaCl+CaCl<sub>2</sub>이 0.241로 증가폭이 높았다. CaCl<sub>2</sub>은 0.118, T제품+CaCl<sub>2</sub>은 0.109, T제품은 0.082로 가장 작은 변화를 보였다. 이는 엽면코팅제 살포에 대한 효과가 NaCl>CaCl<sub>2</sub>>T제품의 제설제 순으로 높다는 것을 알 수 있다(그림 3 참조).

또한 스트로브잣나무에 있어서 엽면코팅제 살포가 잎에 피막을 형성하여 광합성 작용에 부정적 요소이나, 광전자 역할은 더욱 활성화 되어 있음을 알 수 있다. 따라서 엽면코팅제 살포가 스트로브잣나무에 어느 정도 효과가 있음을 알 수 있다.

곰솔의 경우, 그림 3의 B'와 같이 처리 농도가 높아짐에 따라 NaCl의 광전자전달계수(qP)가 약간 저하되었으나, 나머지 제설제에 대해서는 엽면코팅제 처리 및 농도에 상관없이 광전자전달계수(qP) 값의 변화가 적

었다. 결과적으로 광전자전달계수(qP) 분석을 통해 볼 때, 곰솔은 엽면코팅제 처리시에 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

## III. 분석결과

제설제 농도별, 종류별 엽면코팅제 처리에 대한 광합성 형광분석결과를 종합고찰하면 다음과 같았다.

첫째, 제설제 농도별로는 스트로브잣나무의 경우, 농도가 높아짐에 따라 최대수광율(Fv/Fm), 엽면코팅제 무처리구의 광전자전달계수(qP) 값은 모두 감소되었다. 다만 엽면코팅제 처리구의 광전자전달계수(qP) 값은 농도가 높아짐에 따라 반대로 증가하였다. 곰솔의 경우, 제설제 농도 증가에 따른 광합성 감소변화량의 평균값은 9.4이하로 약간의 변화값은 있으나 제설제별 스트레스 정도를 분별하기에는 값의 변화가 너무 적었다.

둘째, 제설제 종류별로는 스트로브잣나무의 경우, 전반적으로 NaCl, T-제품에서 광합성 감소 값이 크게 나타났으며, CaCl<sub>2</sub>와 CaCl<sub>2</sub>가 포함된 혼합제에서 광합성 감소 값이 다소 적게 나타났다. 곰솔의 경우, 제설제 종류별 광합성 변화량의 차이는 미미했으나, NaCl과 T제품의 감소 값이 다른 제설제보다 상대적으로 약간 크게 나타났다.

셋째, 엽면코팅제 처리별로는 스트로브잣나무의 경우, 처리 유무에 따른 광합성 변화의 평균값은 광전자 전달계수(qP)를 제외하고 광합성 분석값에서 최대 약

2배까지 감소되는 경향을 보였다. 광전자전달계수 분석 값은 엽면코팅제 처리시 반대로 그 값이 증가하는 현상을 보였다. 이는 광합성 작용을 유지하기 위한 일종의 방어기작으로 추정된다.

곰솔의 경우, 엽면코팅제 처리에 따른 광합성 변화량의 차이가 거의 없었다.

## 인용문헌

1. 이영배(2004) 고속도로. 한국도로공사 학술지 69(2): 318-333.
2. 조서연(2003) '습염살포' 제설작업 소개. 대한토목학회 51(5): 16-19.
3. 한국도로공사(1999) 한국도로공사30년사. 한국도로공사 홍보실.
4. 한국도로공사(2006) 조경업무시행계획.
5. <http://www.antisnow.co.kr/product/>