

카드뮴 처리에 대한 박달나무의 가계간 성장과 광합성 차이

오창영* · 이경준¹ · 이재천 · 한심희

국립산림과학원 산림유전자원부, ¹서울대학교 산림자원학과

적 요: 본 연구는 카드뮴 처리에 대한 박달나무 유묘의 가계간 성장 차이와 광합성 특성을 구명하고자 실시하였다. 카드뮴 처리는 3가계의 박달나무 1년생 묘목에 0, 0.4, 0.8 mM의 CdSO₄ · H₂O 용액을 이용하여 3수준으로 2개월간 실시하였다. 박달나무의 가계간 및 처리간 성장과 생리적 반응은 건중량, 상대생장율, 순양자수율 및 탄소고정효율을 이용하여 결정하였다. 0.4 mM과 0.8 mM 카드뮴이 처리된 박달나무 유묘는 대조구와 비교해서 건중량과 상대생장율이 크게 감소하였으며, 박달나무 유묘의 성장 감소는 광합성 능력의 감소에 큰 영향을 받은 것으로 나타났다. 또한 순양자수율과 탄소고정효율은 카드뮴 처리로 감소하였으며, 모든 가계에서 카드뮴 농도가 증가함에 따라 감소 폭이 커졌다. 한편 카드뮴 처리에 의한 성장과 광합성 반응은 박달나무 가계간 뚜렷한 차이를 보여 카드뮴 내성은 가계간 유전적 요인이 작용하고 있음을 확인하였다.

검색어: 박달나무, 상대생장율, 순양자수율, 탄소고정효율

서 론

식물복원법(phytoremediation)은 중금속에 오염된 토양을 정화하고 생태적으로 복구하기 위하여 개발된 기술로 식물을 이용한 친환경적인 토양 정화방법이며, 물리·화학적 중금속 제거 방법보다 비용이 적게 소요된다는 장점이 있다(Salt *et al.* 1995, Dickinson 2000). 더구나 목본 식물은 초본 식물과 비교하여 생체량이 크고 생장이 빠르기 때문에 장기적이고 효과적인 토양 정화를 기대할 수 있다(Pulford and Watson 2003). 최근 식물복원법에 관한 연구는 국내외적으로 활발히 진행되고 있으며, 목본 식물인 자작나무속 및 버드나무속 등의 연구 결과(Punshon *et al.* 1995, Kopponen *et al.* 2001)와 포플러속 등의 중금속 정화 효과에 대한 연구(한 등 2001)가 보고된 바 있다.

중금속 중 카드뮴은 낮은 농도에서도 독성이 매우 높으며, 토양 내에서의 높은 이동성 때문에 식물에 잘 흡수되어 성장 감소에 큰 영향을 준다(Smith and Brennan 1984, Wu *et al.* 2003). 이러한 식물의 성장 감소는 엽록소 합성(Huang *et al.* 1974), 광화학 반응(Li and Miles 1975), Calvin cycle 내의 효소 활성(Weigel 1985) 등에 의해서 영향을 받는다. 또한 카드뮴은 광합성을 효과적으로 저해할 수 있는데, 식물의 광합성 감소는 CO₂ 흡수에 대한 기공과 엽육 조직의 저항이 증가하면서 발생하며(Krupa *et al.* 1993), 기공이 영구적으로 막히거나, 에틸렌의 생산 증가로 인한 세포 노화에 의해서도 영향을 받는다(Fuhrer 1982), 이와 같이 카드뮴에 의한 식물의 성장 감소와 광합성 저해는 여러 가지 요인이 복합적으로 관여하며, 중금속의 처리 농도와 시간에 따라서 크게 달라진다. 또한 중금속에 대한 식물의 피해 및 내성은 조직

내 중금속의 축적 및 독성 제거 능력에 따라 좌우되며, 이것은 종간뿐만 아니라 가계간, 개체간에도 차이가 존재한다(Weih and Nordh 2002).

박달나무는 국내에 산재해 있는 폐 탄광지내 자연 이입된 선구수종이며, 폐석지와 척박한 토양 내 열악한 조건에서도 비교적 높은 내성을 보여 폐탄광지의 친 환경복원에 적합한 수종으로 보고되었다(이 등 2002, 2003). 따라서 본 연구는 박달나무를 오염지 토양 복원에 이용하기 위하여 카드뮴에 대한 정화 및 내성 능력이 우수한 가계를 선발하고자 하였으며, 또한 카드뮴이 처리된 박달나무의 성장과 광합성 반응이 가계간의 내성 능력을 비교 판단하는 요인이 될 수 있는지를 검정하고자 하였다.

재료 및 방법

공시 수종 및 카드뮴 처리

본 실험에 사용된 박달나무는 태백시 소도동에 위치한 폐 탄광 지역에서 선발하였으며, 종자는 폐석지내에서 자생하는 박달나무 11개체를 대상으로 채취하였고, 국립산림과학원 산림유전자원부 구내 온실에서 종자를 발아시켜 반형매 차대 묘목을 얻었다. 11개 차대 1년생 묘목 중 잎, 줄기, 뿌리의 건중량, 상대생장율 등을 고려하여 생장이 우수한 3 가계(박달나무 4번, 5번, 9번)를 선정하였다.

카드뮴 처리 실험에 사용한 묘목은 박달나무 3가계의 묘목 중 수고(10.0±1.4 cm)가 균일한 개체를 선발하여 인공토양(모래 : 발토양 : 펄라이트 : 버미큘라이트 = 1 : 1 : 1 : 1, v/v/v/v)이 들어있는 화분(H 20 cm × W 15 cm)에 옮겨 심고 활착시켰다. 실험은 개방된 유리온실의 자연광 조건에서 수행하였으며, 박달

* Corresponding author; Phone: 82-31-290-1152, e-mail: happyohcy@nate.com

나무 이식 후 실험 기간 동안의 일일 평균온도는 $23.1 \pm 2.1^\circ\text{C}$ 이었고, 일일 평균상대습도는 $74.3 \pm 10.9\%$ 이었다. 실험 설계는 카드뮴 처리를 하지 않은 대조구와 처리 수준을 달리한 두개의 처리구로 구성하였으며, 기계 및 처리별로 30개체씩 완전임의배치법으로 배치하였으며, 화분 위치에 따른 효과를 줄이기 위하여 1주일 간격으로 화분을 재배치하였다. 처리 수준은 $\text{CdSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 용액을 0.4 mM과 0.8 mM로 하였으며, 주 1~2회 토양의 건조 상태에 따라서 200 ml 씩 분주하였다. 처리 기간은 8월부터 9월까지 2개월간 처리하였으며, 카드뮴 처리 이외의 관수는 하지 않았다. 또한 카드뮴의 유실을 막기 위하여 화분 밑에 접시를 받쳐 실험을 수행하였다.

토양 내 카드뮴 농도를 측정하기 위하여 박달나무를 수확한 후 토양을 채취하여 건조시켰다. 건조된 10 g의 토양에 0.1N HCl 50 ml를 첨가하여 1시간 동안 교반한 후 여과하여 여액을 원자흡광도계(AA-6401, Shimadzu, Japan)를 이용하여 측정하였다.

생장 및 광합성 특성 분석

카드뮴 처리 후 1주일 간격으로 수고를 측정하고, $[\ln(x_2) - \ln(x_1)]/(t_2 - t_1)$ 의 식에 의해 상대생장율(relative growth rate)을 계산하였다(Beadle 1993). 여기서 x_2 와 x_1 은 생장 종료 후(t_2)와 이식 초기(t_1)의 수고를 나타낸다.

광합성 측정은 LI-6400 휴대용 광합성 측정기(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 광량을 임의로 조절할 수 있는

LED(light emitting diode) light source를 이용하여 카드뮴 처리 및 관수를 한 다음날 09:00부터 11:00 사이에 광합성을 측정하였으며, 측정시 leaf chamber의 조건은 온도 25°C , 상대습도 60%로 유지하였으며, 광량은 $1100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 으로 고정하고, 잎의 생리적 연령 차이에 따른 오차를 줄이기 위하여 완전하게 성숙한 잎을 대상으로 30초 간격으로 5분간 측정하였다. 광-광합성 곡선을 구하기 위하여 각 처리구별로 LED light source의 광량을 0, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 으로 조절하면서 각 광량에 따른 광합성 양을 측정하였으며, A-Ci 곡선을 구하기 위하여 잎에 공급되는 CO_2 의 농도를 변화시켜 엽육 내 CO_2 농도를 변하게 하여 광합성 양을 측정하였다(김과 이 2001).

생체량은 카드뮴 처리가 끝난 후, 전식물체를 수확하여 물로 세척하여 이물질을 제거하고, 잎, 줄기, 뿌리로 구분하였고, 85°C 의 건조기에서 48시간동안 건조한 후 건중량을 측정하였다.

결과 및 고찰

카드뮴 처리에 따른 건중량 및 상대생장율 변화

카드뮴을 처리하지 않은 각 기계별 대조구의 생체량과 상대생장율은 그 기계의 기본적인 생장 능력을 의미한다. 4번 기계의 총 건중량은 6.16 g, 5번 기계의 총 건중량은 5.62 g, 9번 기계의 총 건중량은 3.99 g으로 나타났다(Table 1). 따라서 기계간 생장 능력은 4번 기계가 가장 우수하고, 9번 기계는 저조한 것으로

Table 1. Dry weight of leaf, stem, root and total and shoot to root (S/R) ratio of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Each data represents the mean and standard deviation of 30 replications. Means with the same letter are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test (unit: g)

Family number	Cd (mM)	Leaf	Stem	Root	Total	S/R ratio
No. 4	0	2.36±0.35 ^a	1.80±0.16 ^a	2.00±0.38 ^a	6.16±0.82 ^a	2.24±0.05 ^a
	0.4	2.22±0.16 ^{ab}	1.54±0.08 ^a	1.95±0.26 ^a	5.72±0.30 ^a	1.81±0.23 ^b
	0.8	1.83±0.38 ^b	1.14±0.29 ^b	1.57±0.24 ^a	4.53±0.85 ^b	1.89±0.04 ^b
		*	***	*	***	**
No. 5	0	2.30±0.23 ^a	1.61±0.14 ^a	1.71±0.24 ^a	5.62±0.49 ^a	2.32±0.19 ^a
	0.4	1.97±0.32 ^{ab}	1.25±0.11 ^b	1.61±0.16 ^a	4.83±0.43 ^b	1.83±0.20 ^b
	0.8	1.60±0.34 ^b	1.08±0.20 ^b	1.60±0.26 ^a	4.27±0.57 ^b	1.68±0.17 ^b
		**	***	*	***	**
No. 9	0	1.67±0.27 ^a	0.91±0.15 ^a	1.41±0.47 ^a	3.99±0.82 ^a	2.22±0.16 ^a
	0.4	1.71±0.32 ^a	1.08±0.24 ^a	1.64±0.42 ^a	4.43±0.83 ^a	1.56±0.08 ^b
	0.8	1.41±0.19 ^a	0.97±0.20 ^a	1.53±0.20 ^a	3.91±0.58 ^a	1.47±0.01 ^b
		N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	***

***, ** and * indicate statistically significance at 1%, 5% and 10% level, respectively.

N.S. : No significance.

판단된다. 카드뮴은 광합성, 생리적인 작용 및 양료 흡수 등에 장애를 주기 때문에 식물의 성장 감소를 유발하는 것으로 보고 되었으며(Kahle 1993, Toppi and Gabbrielli 1999), 본 연구에서 카드뮴에 의한 성장 감소는 Table 1에 나타난 바와 같이 가계별, 부위별로 다르게 나타났다. 4번과 5번 가계는 처리 농도가 증가함에 따라 지상부의 생체량이 감소하였고, 9번 가계의 경우에는 농도가 다른 두 처리구 모두에서 대조구와 비교해 생체량의 감소가 나타나지 않았다. S/R율은 모든 가계가 대조구보다 0.4 mM, 0.8 mM 처리구에서 낮게 나타났으나, 0.4 mM과 0.8 mM 처리간에는 차이가 없었다. 그리고 0.8 mM 처리시 4번 가계의 S/R율이 1.89로 가장 높게 나타났으며, 0.4 mM 처리시는 가계간 S/R율의 차이가 나타나지 않았다. 또한 Fig. 1의 상대성장율에 나타난 것처럼, 대조구는 카드뮴 처리 약 8주 후 성장율이 감소한 반면, 0.4 mM 처리시 4번 가계와 5번 가계는 카드뮴 처리 약 4주가 지난 후, 9번 가계는 약 6주가 지난 후 성장 저해를 보이며, 0.8 mM 카드뮴 처리시 4번 가계는 약 3주가 지난 후, 5번과 9번 가계는 약 9주가 지난 후 성장 저해가 나타났다.

Chen *et al.*(2003)에 의하면 카드뮴은 콩의 성장을 저해하며, 특히 뿌리의 성장 감소를 유발하고, 처리 농도가 증가함에 따라 성장 감소가 커진다고 보고하였다. 반면 Schützendübel *et al.*(2002)은 5 µM의 저농도 카드뮴 처리는 *Populus×canescens*의 성장을 촉진시킨다고 보고하였다. 이처럼 카드뮴에 의한 독성 유발은 서로 중간 다른 경향을 나타내는데, 이는 뿌리의 항산화 효소 능력의 차이에 기인하며(Schützendübel *et al.* 2002), 일반적으로 카드뮴은 뿌리에 많이 축적되기 때문에 지상부에 비하여 지하부의 성장 감소가 더 많이 일어난다(An 2004).

본 연구에서 카드뮴 처리 후, 카드뮴 0.4 mM 처리구에서의 토양 내 카드뮴 농도는 50 mg kg⁻¹, 0.8 mM 처리구에서는 100 mg kg⁻¹으로 나타나 카드뮴 노출 농도가 비교적 높았음을 알 수 있었다. 그러나 높은 카드뮴 농도에 노출된 박달나무의 지상부

성장 및 생체량은 감소한 반면, 뿌리의 생장은 모든 가계 및 처리구에서 감소하지 않았다. 또한 처리구의 S/R율이 대조구의 S/R율보다 낮게 나타나서 박달나무는 지하부에 비하여 지상부가 민감하게 반응한 것으로 나타났다. 일반적으로 뿌리는 토양 중의 오염물질에 일차적으로 노출되어 영향을 받기 때문에 가장 먼저 피해가 나타난다(Chen *et al.* 2003, An 2004). 하지만 본 연구에서 이러한 경향과 다르게 나타난 것은 탄광 폐석지 내 선구 수종이었던 박달나무가 온실에서 충분한 빛에 노출되면서 광합성을 활발히 하여 왕성한 근계 발달을 유도하였기 때문인 것으로 판단된다(Quilici and Medina 1998).

광합성

Fig. 2에 나타난 바와 같이 광합성 속도는 가계별 또는 카드뮴 농도별로 다른 반응을 나타냈다. 카드뮴은 광합성을 효과적으로 저해하는 것으로 보고되었는데(Krupa *et al.* 1993, Greger *et al.* 1994), 4번 가계는 0.8 mM 처리구에서 3.62 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹으로 대조구의 6.49 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹보다 크게 감소하였으며, 5번과 9번 가계에서도 뚜렷한 광합성 감소가 나타났다. 기공전도도는 광합성과 유사한 특성을 나타냈다. 4번 가계의 0.8 mM 카드뮴 처리구에서의 기공 전도도는 0.04 mol H₂O m⁻² s⁻¹으로 대조구의 0.11 mol H₂O m⁻² s⁻¹보다 낮았으며, 5번과 9번 가계에서도 카드뮴 처리에 따라 기공전도도가 감소하였다(Fig. 3). 증산속도 역시 카드뮴 처리에 따라서 뚜렷한 감소가 나타났다(Fig. 4). 4번 가계의 0.8 mM 처리구의 증산속도는 0.30 mmol H₂O m⁻² s⁻¹으로 대조구의 1.35 mmol H₂O m⁻² s⁻¹보다 매우 많이 감소하였으며, 5번과 9번 가계도 뚜렷한 감소를 나타냈다.

카드뮴은 기공 저항을 증가시켜 기공 개폐 작용을 저해하는데, 이것은 Cd 노출 농도와 시간에 따라 다른 경향을 나타낸다(Pearson and Kirkham 1981, Barcelo and Poschenreider 1990, Shoeran *et al.* 1990). 또한 카드뮴은 목부 세포벽을 분해하여 수

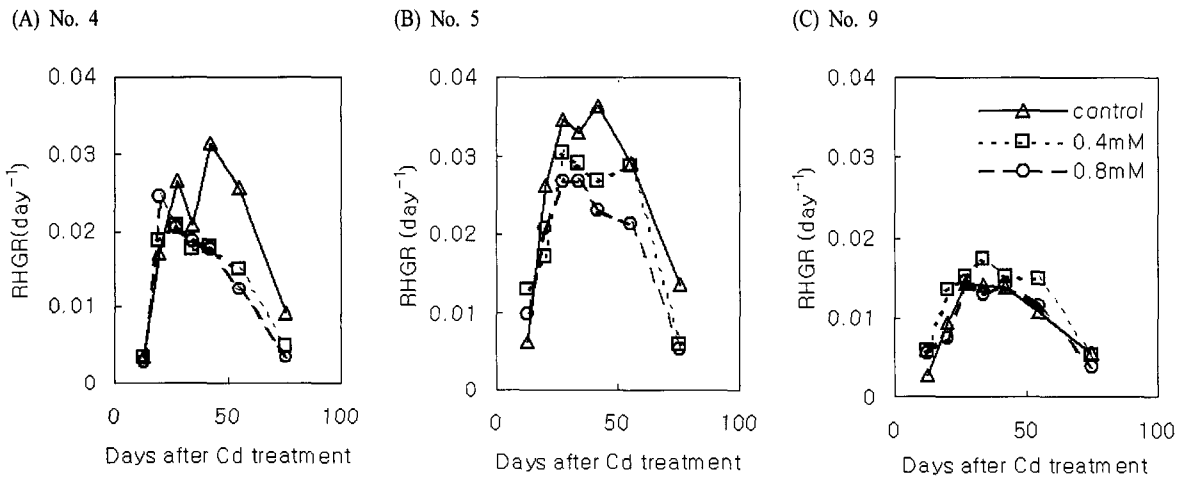


Fig. 1. Relative height growth rate (RHGR) of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Each data point represents mean of thirty replications.

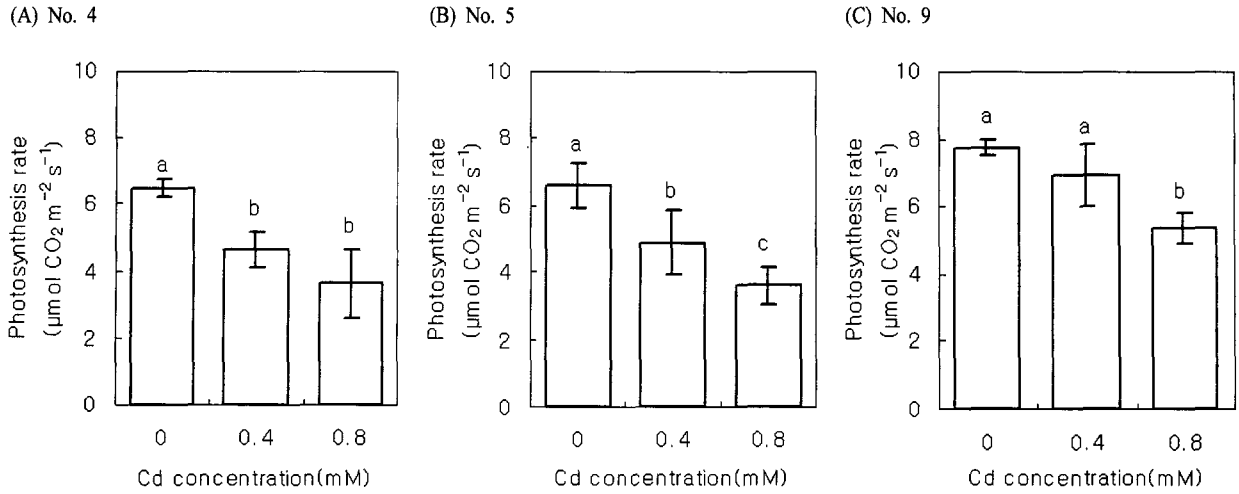


Fig. 2. Photosynthetic rate of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Bars with the same letter are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test. Each bar represents mean and standard deviation of three replications.

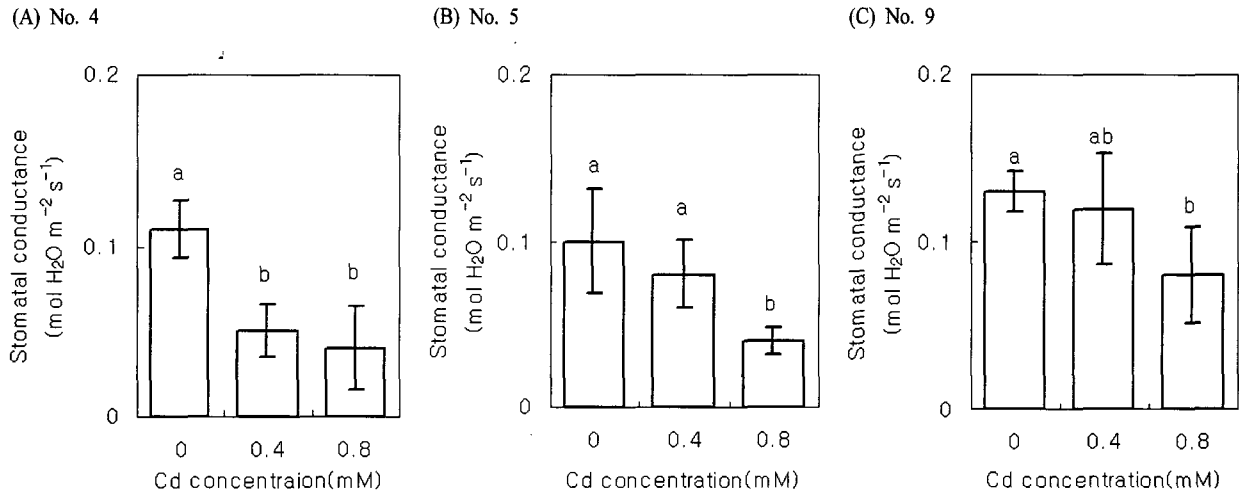


Fig. 3. Stomatal conductance of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Bars with the same letter are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test. Each bar represents mean and standard deviation of three replications.

분 수송에 장애를 주어 식물의 증산속도를 감소시키며, 뿌리의 성장 장애에 의한 수분 흡수 감소와 수송 장애에 의하여 기공 저항을 증가시켜 잎의 뒤틀림과 같은 피해증상을 나타낼 수 있다(Barcelo and Poschenreider 1990). 본 연구에서도 처리 농도가 증가함에 따라 광합성, 기공전도도, 증산속도가 뚜렷하게 감소하였다. 그러나 잎의 가시적인 피해 증상은 나타나지 않았다. 한편 생체량, S/R율의 변화 및 상대생장율의 변화와 같이 광합성, 기공전도도, 증산속도의 감소도 가계 간에 매우 다른 양상을 보였다.

순양자수율과 탄소고정효율

광합성 능력은 엽록소 함량 및 질소 함량 이외에도 광화학계(명반응)의 능력과, 탄소고정계(암반응)의 능력에 의해 결정된다(김과 이 2001). 이산화탄소의 공급이 일정한 상태에서 광량과 광합성 속도와의 관계인 광-광합성 곡선에서 100 µmol m⁻² s⁻¹ 이하의 광도에서는 광도와 광합성의 관계는 직선으로 나타나는데, 이 부분의 기울기인 순양자수율(apparent quantum yield)은 광합성 과정에서 광화학계의 능력을 가늠할 수 있는 지표가 된다(Evans 1987, 김 등 2001).

Fig. 5는 각 가계별 대조구의 순양자수율에 대한 처리구의 순양자수율의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 9번 가계의 순양자수율은 0.4 mM 처리시 대조구의 91% 수준으

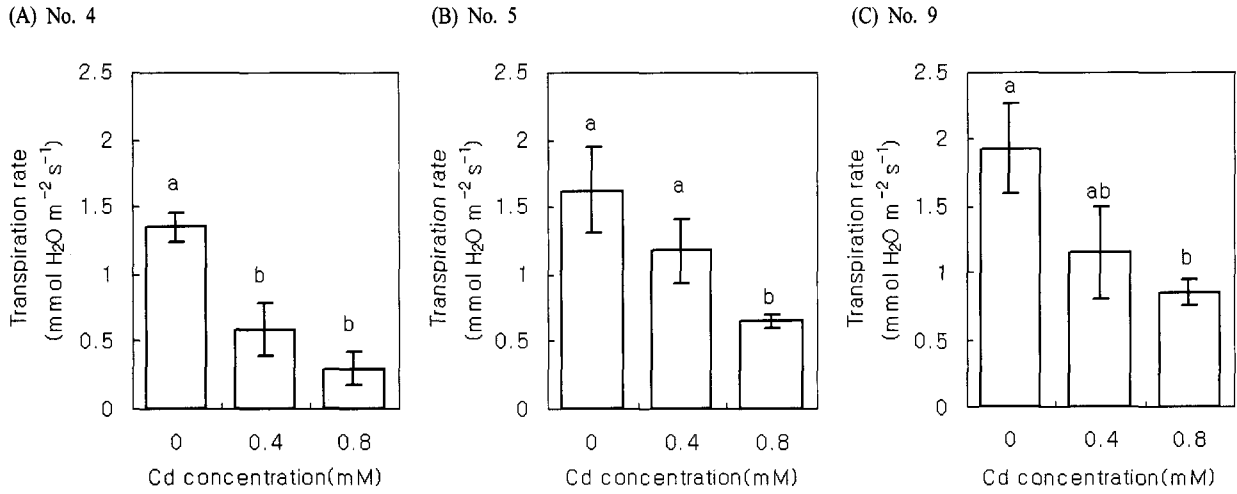


Fig. 4. Transpiration rate of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Bars with the same letter are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test. Each bar represents mean and standard deviation of three replications.

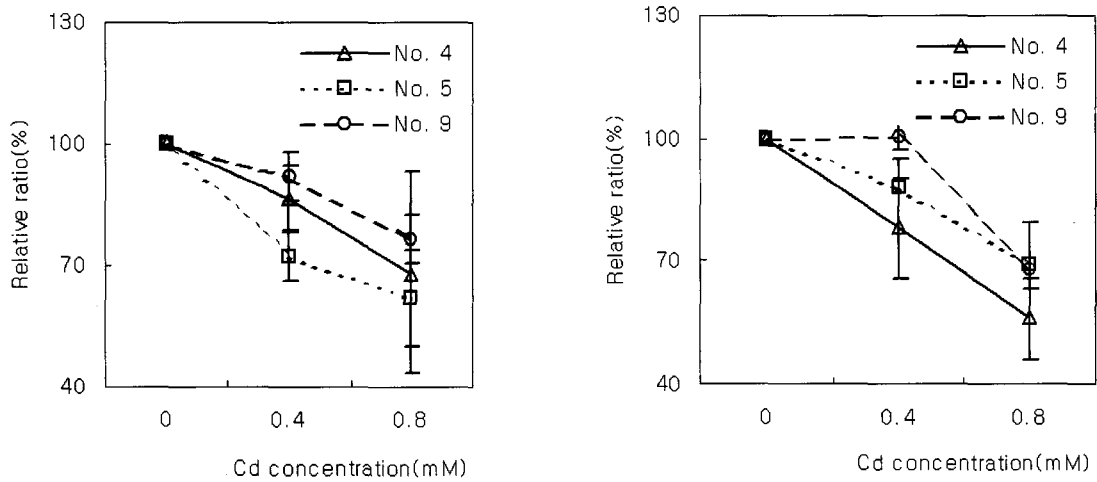


Fig. 5. Relative ratio of apparent quantum yield (left) and carboxylation efficiency (right) of three half-sib families of *Betula schmidtii* treated with 0, 0.4 and 0.8 mM Cd. Each data point represents mean and standard deviation of three replications.

로 다른 가계와 비교하여 가장 적게 감소하였으며, 5번 가계는 대조구의 72%로 크게 감소하였다. 0.8 mM 처리시에는 5번 가계의 순양자수율이 대조구의 62%로 가장 크게 감소하였고, 9번 가계는 76%로 감소 폭이 가장 적었다.

카드뮴은 광화학반응의 기능에도 악영향을 주는데, 특히 엽록체에서의 PS II는 Cd에 가장 민감하게 반응하며(Li and Miles 1975, Skorzynska *et al.* 1995), 이것은 카드뮴이 light harvesting complex- II(LHC-II)와 상호작용을 하기 때문이다(Ahmed and Tajmir-Riahi 1993). 또한 카드뮴은 틸라코이드 막 안과 밖의 pH 경사를 증가시켜 광화학반응의 효율을 저하시키며, 광합성과정에서 전자전달계에 장애를 주어 광합성 감소를 유발시킨다(Krupa *et al.* 1992). 본 연구에서도 순양자수율이 감소된 것에 따

라서 카드뮴에 의하여 광화학계가 많은 피해를 입은 것을 확인할 수 있었으며, 카드뮴 처리 농도가 증가함에 따라서 피해 정도는 더 커지는 것으로 나타났다.

광합성 과정에서 탄소고정계의 능력을 가늠해 보기 위하여 A-C₃ 곡선을 이용한 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다. 엽록 내 이산화탄소 분압이 낮을 경우에는 광합성 속도가 rubisco의 함량에 의해서 좌우되므로, 엽록 내 CO₂ 분압에 따라 광합성 속도가 직선적으로 증가하는 구간의 회귀 직선 기울기가 탄소고정효율이며, 이것은 rubisco의 활성을 반영한다(Farquhar *et al.* 1980, 김 등 2001, 김과 이 2001). Fig. 5는 대조구의 탄소고정효율에 대한 각 처리구의 탄소고정효율의 비를 나타낸 것으로, 0.4 mM 처리구에서 9번 가계의 탄소고정효율은 감소하지 않았으나, 4번 가계

의 탄소고정효율은 대조구의 78%로 감소하였다. 0.8 mM 처리구에서는 5번과 9번 가계의 경우 대조구의 67%와 69%로 감소하였지만, 4번 가계는 대조구의 56%로 감소 폭이 매우 컸다. 즉 탄소고정효율은 가계에 따라서 다르게 나타났으며, 특히 0.8 mM 처리구와 같이 높은 농도에서는 모든 가계의 탄소고정계가 Cd에 의해 피해를 입는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 종합한다면 카드뮴은 식물에 유해한 중금속으로 생리적인 작용에 장애를 주어 광합성 저해, 생장 감소를 유발한다. 하지만 이러한 장애는 같은 종 내에서도 반형태 차대간에 차이가 나타나며, 이것은 Cd 내성에 대한 가계간 유전적 능력이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

인용문헌

- 김판기, 이용섭, 정동준, 우수영, 성주환, 이은주. 2001. 광도가 내음성이 서로 다른 3 수종의 광합성 생리에 미치는 영향. 한국임학회지 90: 476-487.
- 김판기, 이은주. 2001. 광합성의 생리생태(1)-광도와 엽육내 CO₂ 분압 변화에 대한 광합성 반응-. 한국농림기상학회지 3: 126-133.
- 이재천, 한심희, 장석성, 김판기, 허재선, 염규진. 2003. 탄광 폐석지내 자생 수종의 생리적 피해 및 내성. 한국농림기상학회지 5: 172-178.
- 이재천, 한심희, 장석성, 김판기, 허재선, 염규진. 2002. 태백지역 석탄 폐석지의 식생 복원을 위한 향토 수종 선발. 한국농림기상학회지 4: 86-94.
- 한심희, 이경준, 현정오. 2001. 모래밭버섯 균근균으로 접종한 포플러 4개 수종 삼목묘의 체내 부위별 Cd과 Pb 축적 특성. 한국임학회지 90: 495-504.
- Ahmed, A. and H.A. Tajmir-Riahi. 1993. Interaction of toxic metal ions Cd²⁺, Hg²⁺ and Pb²⁺ with light harvesting proteins of chloroplast thylakoid membranes. An FTIR Spectroscopic Study 50: 235-243.
- An, Y.J. 2004. Soil ecotoxicity assessment using cadmium sensitive plants. Environ. Pollut. 127: 21-26.
- Barcelo, J. and C. Poschenreider. 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. J. Plant Nut. 13: 1-37.
- Beadle, C.L. 1993. Growth analysis. In D.O. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R. Bolhär-Nordenkampf, R.C. Leegood and S.P. Long (eds.). Photosynthesis and Production in a Changing Environment, A Field and Laboratory Manual. Chapman & Hall, London, pp. 36-46.
- Chen, Y.X., Y.F. He, Y. Yang, Y.L. Yu, S.J. Zheng, G.M. Tian, Y.M. Luo and M.H. Wong. 2003. Effects of cadmium in nodulation and N₂-fixation of soybean in contaminated soils. Chemosphere 50: 781-787.
- Dickinson, N.M. 2000. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils. Chemosphere 41: 259-263.
- Evans, J.R. 1987. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. Austral. J. Pl. Physiol. 14: 69-79.
- Farquhar, G.D., von S. Caemmerer and J.A. Berry. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. Planta 149: 78-90.
- Fuhrer, J. 1982. Ethylene biosynthesis and cadmium toxicity in leaf tissue of beans *Phaseolus vulgaris* L. Plant Physiol. 70: 162-167.
- Greger, M., M. Johansson, A. Stihl and K. Hamza. 1994. Foliar uptake of Cd by pea *Pisum sativum* and sugar beet *Beta vulgaris*. Physiol. Planta. 88: 563-570.
- Huang, C.Y., F.A. Bazzaz and L.N. Vanderhoef. 1974. The inhibition of soybean metabolism by cadmium and lead. Plant Physiol. 54: 122-124.
- Kahle, H. 1993. Response of roots of trees to heavy metals. Environ. Exp. Bot. 33: 99-119.
- Kopponen, P., M. Utrianen, K. Lukkari, S. Suntioinen, L. Kärenlampi and S. Kärenlampi. 2001. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soils. Environ. Pollut. 112: 89-97.
- Krupa, Z., G. Oquist and N.P.A. Huner. 1992. The effects of cadmium on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L. -a fluorescence analysis. Physiol. Planta. 88: 626-630.
- Krupa, Z., G. Oquist and N.P.A. Huner. 1993. The effects of cadmium on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris*: A fluorescence analysis. Physiol. Planta. 88: 626-630.
- Li, E.H. and C.D. Miles. 1975. Effects of cadmium on Photoreaction II of Chloroplasts. Plant Sci. Lett. 5: 33-40.
- Pearson, C.H. and K.B. Kirkham. 1981. Water relations of wheat cultivars grown with cadmium. J. Plant Nut. 3: 309-318.
- Pulford, I.D. and C. Watson. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review. Environ. Int. 29: 529-540.
- Punshon, T., N.W. Lepp and N.M. Dicinson. 1995. Resistance to copper toxicity in some British willows. J. Geochem. Expl. 52: 259-266.
- Quilici, A. and E. Medina. 1998. Photosynthesis-nitrogen relationships in pioneer plants of disturbed tropical montane forest sites. Photosynthetica 35: 525-534.
- Salt, D.E., M. Blaylock, N.P.B.A. Kumar, V. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet and I. Raskin. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Biotechnology 13: 468-474.
- Schützendübel, A., P. Nikolova, C. Rudolf and A. Polle. 2002. Cadmium and H₂O₂-induced oxidative stress in *Populus × canescens* roots. Plant Physiol. Biochem. 40: 577-584.

- Shoeran, I.S., H.R. Singal and R. Singh. 1990. Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and the enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan*). Photosyn. Res. 23: 345-351.
- Skorzynska, E., J. Bednara and T. Baszynski. 1995. Some aspects of runner bean plant response to cadmium at different stages of the primary leaf growth. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 64: 165-170.
- Smith, G.C. and E. Brennan. 1984. Response of silver maple seedlings to an acute dose of root applied cadmium. Forest Sci. 30: 582-586.
- Toppi, L.S.D. and R. Gabrielli. 1999. Response to cadmium in higher plants. Environ. Exp. Bot. 41: 105-130.
- Weigel, H.J. 1985. Inhibition of photosynthetic reactions of isolated intact chloroplast by cadmium. J. Plant Physiol. 119: 179-189.
- Weih, M. and N.E. Nordh. 2002. Characterizing willows for biomass and phytoremediation: growth, nitrogen and water use of 14 willow clones under different irrigation and fertilization regimes. Biomass Bioenergy 23: 397-413.
- Wu, F.B., G.P. Zhang and P. Dominy. 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. Environ. Exp. Bot. 50: 67-78.
(2004년 3월 31일 접수; 2004년 6월 4일 채택)

Differences in Growth and Photosynthesis among Three Half-sib Families of *Betula schmidtii* in Response to Cd Treatment

Oh, Chang-Young*, Kyung-Joon Lee¹, Jae-Cheon Lee and Sim-Hee Han

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

¹Department of Forest Resources, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

ABSTRACT : The objective of this study was to understand differences among three half-sib families of *Betula schmidtii* seedlings in the effect of three Cd levels on growth and photosynthesis. One-year-old seedlings of *B. schmidtii* were treated with 0, 0.4 and 0.8 mM CdSO₄ · 8/3H₂O for two months. Growth and physiological responses to Cd treatment levels of three families determined using dry weight, relative height growth rate(RHGR), apparent quantum yield and carboxylation efficiency. The *B. schmidtii* seedlings exposed to 0.4 and 0.8 mM Cd showed statistically significant decrease in dry weight and RHGR relative to controls. In addition, the growth inhibition of *B. schmidtii* seedlings was accompanied by a significant decrease in net photosynthesis measured as CO₂ assimilation. Apparent quantum yield and carboxylation efficiency were also affected by Cd treatment, undergoing a significant and progressive reduction with increasing Cd concentrations in all families. We also found significant difference among three families of *B. schmidtii* in growth, biomass and photosynthesis when exposed to Cd stress. Therefore the present study showed that the difference in Cd tolerance among families might be attributed to genetic factor in response to Cd stress.

Key words : Apparent quantum yield, *Betula schmidtii*, Carboxylation efficiency, Relative height growth rate
