

박달나무 반형매 5가계의 탄수화물 배분 및 분할에 대한 Cd 처리 효과

한심희¹ · 오창영¹ · 이재천¹ · 김판기²

¹국립산림과학원 산림유전자원부, ²국립상주대학교 산림환경자원학과

(2006년 2월 13일 접수; 2006년 2월 23일 수락)

Effects of Cadmium Treatment on Carbohydrate Allocation and Partitioning of Five Half-sib Families of *Betula schmidtii*

Sim-Hee Han¹, Chang-Young Oh¹, Jae-Cheon Lee¹ and Pan-Gi Kim²

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

²Department of Forest Resources and Environment, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

(Received February 13, 2006; Accepted February 23, 2006)

ABSTRACT

This study was conducted to understand the regulation mechanism of carbohydrate allocation and partitioning of one-year-old seedlings of *Betula schmidtii* with Cd treatment, and to assess tolerance against Cd toxicity among five half-sib families on the basis of carbon allocation and partitioning. Seedlings were treated with CdSO₄ solution of 0, 0.2, 0.4, and 0.6 mM for two months. After harvesting, carbohydrate concentrations were analyzed for leaves, stems and roots of seedlings. Carbohydrate concentration for Cd-treated seedlings decreased in comparison with control plants, even though Cd effects were significantly different among five families. Meanwhile, Cd treatment decreased carbohydrate allocation in leaves and increased allocation in roots. In addition, partitioning of glucose in leaves was increased by Cd treatment, but partitioning of sucrose and starch in leaves decreased. In Cd-treated roots, partitioning of glucose, sucrose and starch increased. On the basis of carbohydrate allocation patterns, "Family No. 7" (of the five families studied) was considered as the most sensitive family to Cd toxicity because the decrease of carbohydrate concentration and the change of carbohydrate allocation pattern after Cd treatment were relatively greater.

Key words : Cd toxicity, Tolerance, Glucose, Sucrose, Starch

I. 서 론

카드뮴은 다른 중금속의 제련과 채광 과정에서 배출되는 오염물질이며, 매우 오랜 시간에 걸쳐 토양에 존재하는 독성 중금속으로 식물의 생장에 매우 해로운 영향을 준다(Prasad, 1995). 또한 식물체내에 유입된 Cd은 광합성 저해와 같은 생리 대사를 방해하며, 동화물질의 배분 및 분할 패턴을 변화시킨다(Kim *et al.*,

2004). 식물의 탄소 축적 능력은 광합성 능력과 탄소 배분 패턴에 따라 결정되며, 대부분 유전적으로 고정되어 있으나, 미량원소, 빛, CO₂, 오존, 수분, 온도, 토성 및 산도 등 다양한 요인뿐만 아니라 여러 가지 스트레스에 의해서도 영향을 받는다(Ericsson *et al.*, 1996).

스트레스가 가해지면 수목의 잎 내 탄소 고정량은 감소하고, 식물의 조직 및 기관간의 탄소 이동을 나타

내는 탄소 배분(allocation) 패턴과 탄수화물 종류간의 흐름을 나타내는 탄소 분할(partitioning) 패턴은 변한다(Dickson and Isebrands, 1993). 성숙한 잎은 탄소의 주요 공급원(source)으로 잎에서 고정된 탄소는 설탕의 형태로 여러 화합물의 합성 및 호흡을 위해서 수용부(sink)로 배분되고, 여러 수용부로 수송된 설탕은 조직의 호흡이나 대사물질들의 합성에 사용된다(Geiger and Servaites, 1991). 그러나 수용부에서 소비하는 탄소량은 공급원의 탄소 공급에 의해서 제한을 받기 때문에 탄소 공급을 안정되게 유지하는 것은 식물이 스트레스를 극복하기 위한 일차적인 요건이 된다(Geiger and Servaites, 1991). 이러한 면에서 스트레스에 의해 변화된 탄소 배분과 분할 패턴은 손상된 조직을 복구하고 생장을 유지하기 위한 보상 메커니즘을 반영하는 것이며, 또 다른 스트레스에 대한 수목의 적응 능력에도 큰 영향을 미친다(Amundson *et al.*, 1995).

일반적으로 스트레스를 받은 식물은 스트레스를 받지 않은 식물과 비교해서 전분이나 당이 잎에 우선적으로 축적되는 탄소 분할 패턴의 변화가 나타나는데(Dickson and Isebrands, 1993; Moya *et al.*, 1993; Vinit-Dunand *et al.*, 2002), 이것은 사부 적재(phloem loading) 및 동화물질의 수송 능력 감소 또는 수용부에서 동화물질의 이용률이 감소하였기 때문이다(Alaoui-Sosse *et al.*, 2004). 따라서 스트레스 하에서 있는 수목의 탄수화물 배분 및 분할 패턴의 변화는 스트레스에 대한 내성 메커니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

본 연구는 Cd 처리된 박달나무(*Betula schmidtii*)의 탄수화물 배분 및 분할 패턴 조절 메커니즘을 이해하고, 가계간 탄소 배분 및 분할 패턴을 기준으로 Cd 독성에 내성 수준을 평가하고자 하였다

II. 재료 및 방법

2.1. 공시 수종 및 카드뮴 처리

본 실험에 사용된 박달나무는 태백시 소도동에 위치한 폐탄광지역의 폐석지에 자연적으로 침입하여 생장하고 있는 선구수종으로부터 선발하였으며(Lee *et al.*, 2002), 종자는 폐석지내에서 자생하는 박달나무 11개체를 대상으로 채취하였고, 국립산림과학원 산림유전 자원부 구내 온실에서 종자를 발아시켜 반형매 차대

묘목을 얻었다. 11개 차대 1년생 묘목 중 잎, 줄기, 뿌리의 건조량, 상대생장을 등을 고려하여 생장이 우수한 5가계(박달나무 2번, 4번, 5번, 7번, 9번)를 선정하였다.

카드뮴 처리 실험에 사용한 묘목은 박달나무 5가계의 묘목 중에서 수고(10.0 ± 1.4 cm)가 균일한 개체를 선별하여 인공토양(모래 : 펠라이트 : 버미큘라이트 = 1 : 1 : 1, v/v/v)이 들어있는 화분(H 20 cm × W 15 cm)에 옮겨 심고 활착시켰다. 실험은 개방된 유리 온실의 자연광 조건에서 수행하였으며, 박달나무 이식 후 실험 기간 동안의 일일 평균온도는 $23.1 \pm 2.1^\circ\text{C}$ 이었고, 일일 평균상대습도는 $74.3 \pm 10.9\%$ 이었다.

카드뮴 처리는 대조구와 처리 수준을 달리한 3개의 처리구로 구성하였으며, 가계 및 처리별로 10개체씩 완전임의배치법으로 배치하였으며, 화분 위치에 따른 효과를 줄이기 위하여 1주일 간격으로 화분을 재배치하였다. 처리 수준은 CdSO_4 용액을 0.2 mM, 0.4 mM 및 0.6 mM로 하였으며, 주 1~2회 토양의 건조 상태에 따라서 200 ml씩 분주하였다. 처리 기간은 6월부터 8월까지 2개월간 처리하였으며, 카드뮴 처리 이외의 관수는 하지 않았다.

2.2. 탄수화물 분석

Cd 처리 후 시험묘목을 수확하여 잎, 줄기, 뿌리로 구분하여 건조한 후 건조량을 측정하였다. 탄수화물 분석은 건조된 시료 0.1 g에 methanol : chloroform : H_2O 를 12:5:3의 비율로 혼합한 추출액 1.5ml를 넣고 잘 섞은 후, $13,000 \times g$ 에서 60초간 원심분리를 실시하고, 상등액을 0.1 ml씩 뽑아내 포도당과 과당을 분석하는데 사용하였으며, 침전물은 전분 분석에 사용하기 위하여 건조기에 넣고 남은 액체를 건조시켰다. 탄수화물 함량은 glucose oxidase법(Hendry and Price, 1993)을 이용하였으며, 460 nm의 파장에서 흡광도를 측정하여 결정하였다. 총 비구조 탄수화물(Total non-structural carbohydrate; TNC)의 함량은 Paynter *et al.*(1991)의 방법에 따라 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 탄수화물 함량에 대한 Cd 처리 효과

박달나무의 조직 내 총 탄수화물 함량은 Cd 처리에 의해서 변화되었으며, 가계간 또는 Cd 처리 농도

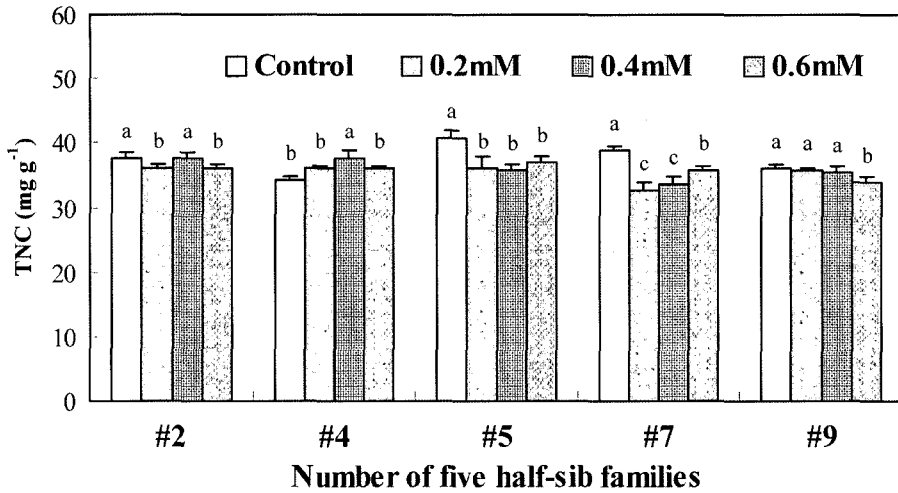


Fig. 1. Effects of Cd treatment on TNC in five half-sib families of *B. schmidtii*. Each bar represents the mean and standard deviation of five replicates. The same letters are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test.

간 차이를 나타냈다(Fig. 1). Cd 처리에 의해 탄수화물 함량이 뚜렷하게 감소한 가계는 5번과 7번 가계였다. 그러나 5번 가계는 Cd 처리 농도간 차이는 없었으며, 7번 가계는 0.2 mM과 0.4 mM Cd 처리구에서 가장 낮은 농도를 보였다. 2번 가계의 총 탄수화물 농도는 0.2 mM과 0.6 mM Cd 처리구에서 대조구보다 낮았으며, 9번 가계는 0.6 mM Cd 처리구에서 대조구보다 낮은 함량을 나타냈다. 그러나 4번 가계의 총 탄수화물 농도는 대조구보다 감소하지 않았으며, 0.4 mM Cd 처리구에서는 오히려 대조구보다 높은 값을 나타냈다.

식물 조직 내 탄수화물 함량이 감소하는 것은 광합성 능력의 감소와 관련이 깊다(Zheng *et al.*, 2000). 본 연구에서 박달나무들은 가계별 차이는 있었지만, Cd 처리에 의해 광합성이 현저히 감소하였으며(Oh *et al.*, 2004), 이로 인하여 조직 내 탄수화물의 함량이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 일부 연구에서는 중금속이 당, 전분과 일부 아미노산의 함량을 증가시키며(Rausser, 1978), 본 연구 재료의 4번 가계와 같이 Cd 처리에 의해서 탄수화물 농도가 증가되는 것으로 보고한 바도 있다(Han, 2000). 이러한 차이는 본 연구 결과에서 나타난 바와 같이 중금속에 대한 내성 차이가 수종간은 물론 가계 간에 큰 차이가 있기 때문이며, 스트레스에 노출될 경우 흔히 나타나는 초기 보상 효과와도 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.2. 가계간 탄수화물 배분 패턴

Cd를 처리하지 않은 대조구의 탄수화물의 함량은 잎, 줄기, 뿌리의 순으로 배분되었다. 그러나 2번 가계는 예외적으로 줄기보다 뿌리가 더 높은 배분 패턴을 보였다.

한편 Cd를 처리한 시험구에서는 2번, 5번, 9번 가계의 경우 대조구와 유사한 패턴을 나타냈다. 그러나 4번 가계의 0.4 mM Cd 처리구와 7번 가계의 0.6 mM Cd 처리구에서는 탄수화물의 함량이 잎 > 줄기 > 뿌리에서 잎 > 뿌리 > 줄기의 순서로 배분 패턴이 변화하였다. 전체적으로 볼 때 Cd 처리는 잎 내의 탄수화물 배분은 감소하고, 뿌리의 배분은 증가하는 경향을 나타냈다. 예를 들면, 4번과 9번 가계의 경우 0.4 mM Cd 처리구에서 잎 내의 배분율이 대조구보다 각각 7%와 8%가 감소한 반면, 뿌리의 배분율은 대조구보다 각각 9%와 8%가 증가하였다. 특히 4번 가계는 잎 내의 함량은 줄고 뿌리는 증가하면서 전체적인 배분 패턴에 영향을 주었다.

무한 성장하는 수목의 경우, 성장시기에 따른 탄수화물 배분 패턴은 일정하게 나타난다. 즉 탄소고정이 활발히 이루어지는 시기에는 대조구와 같이 잎 내의 탄수화물 함량이 가장 높다(Dickson, 1991; Han *et al.*, 2002). 그러나 스트레스가 가해질 경우, 탄수화물 배분 패턴은 적절하게 변화되는데, 이러한 현상은 식물이 생식 및 성장에서 우위를 점하기 위해 식물 간

Table 1. Effects of Cd treatment on TNC allocated in leaves, stems and roots of five half-sib families of *B. schmidtii*. Each data represents the mean and standard deviation of five replicates. The same letters are not significantly different at the 5% probability level by the Duncan's multiple range test

Family No.	Position	Cd concentration (mM)			
		0	0.2	0.4	0.6
2	Leaf	40.1 ± 0.4 ^a	40.3 ± 0.3 ^a	36.0 ± 0.4 ^a	41.4 ± 1.0 ^a
	Stem	29.0 ± 0.3 ^c	27.5 ± 1.7 ^c	29.3 ± 0.7 ^c	27.7 ± 1.1 ^c
	Root	30.9 ± 0.3 ^b	32.2 ± 1.9 ^b	34.7 ± 1.0 ^b	30.9 ± 0.7 ^b
	Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	Leaf	42.0 ± 2.3 ^a	34.9 ± 1.0 ^a	35.0 ± 1.4 ^a	39.1 ± 0.8 ^a
	Stem	33.0 ± 0.5 ^b	33.5 ± 0.9 ^b	30.8 ± 1.1 ^c	31.2 ± 0.3 ^b
	Root	25.0 ± 2.6 ^c	31.6 ± 1.0 ^c	34.2 ± 1.0 ^b	29.7 ± 1.0 ^b
	Pr > F	0.0001	0.0005	0.0003	0.0001
5	Leaf	40.6 ± 1.1 ^a	36.7 ± 0.3 ^a	35.9 ± 0.8 ^a	37.5 ± 1.0 ^a
	Stem	35.0 ± 0.6 ^b	34.8 ± 0.9 ^b	33.6 ± 0.9 ^b	32.0 ± 1.3 ^b
	Root	24.4 ± 1.5 ^c	28.5 ± 1.2 ^c	30.5 ± 0.9 ^c	30.5 ± 0.7 ^b
	Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
7	Leaf	44.0 ± 0.7 ^a	42.3 ± 2.1 ^a	38.1 ± 1.7 ^a	36.0 ± 0.5 ^a
	Stem	28.4 ± 0.8 ^b	32.3 ± 1.4 ^b	31.1 ± 1.1 ^b	30.1 ± 0.6 ^c
	Root	27.6 ± 0.6 ^b	25.4 ± 3.0 ^c	30.8 ± 1.3 ^b	33.9 ± 0.4 ^b
	Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
9	Leaf	44.1 ± 1.6 ^a	39.9 ± 1.0 ^a	36.7 ± 0.7 ^a	40.7 ± 0.8 ^a
	Stem	33.7 ± 1.1 ^b	31.4 ± 1.6 ^b	32.8 ± 0.6 ^b	35.4 ± 0.6 ^b
	Root	22.2 ± 0.9 ^c	29.3 ± 1.7 ^c	30.5 ± 0.9 ^c	23.9 ± 0.8 ^c
	Pr > F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

경쟁을 하기 때문이다(Ericsson *et al.*, 1996). 본 연구에서도 Cd 처리된 박달나무의 잎 내 탄수화물은 줄고 뿌리의 탄수화물 함량이 증가한 것은 Cd 스트레스 환경 변화에 적응하기 위한 것으로 판단된다. 즉 Cd 처리된 묘목의 뿌리에서 탄수화물이 증가한 것은 Cd 독성으로 손상된 뿌리 조직을 치유하기 위한 것으로 생각된다.

한편 Kim *et al.*(2004)은 Cd 처리가 구주소나무 (*Pinus sylvestris*) 유묘의 지상부에 수용성 탄수화물의 함량을 증가시킨다고 보고한 바 있는데, 이것은 수용부(sink)로의 탄수화물 수송이 저해되고, 오염물질에 의해 손상된 잎 조직을 치유하거나 재생산하기 위해 에너지가 많이 요구되기 때문이다(Kozioł and Jordan, 1978). 또한 식물이 오존과 같은 대기 오염에 노출될 경우 더 많은 양의 탄소를 잎과 신초 조직에 보유하여 지상부의 피해 조직을 복구하는데 이용하기도 한다(Brouwer, 1983; Spence *et al.*, 1990). 이러한 결과는 수종뿐만 아니라 가계간에도 많은 차이를 보여 주는데(Han *et al.*, 2002), 특히 스트레스에 강한 내성을 나타내는 식물들은 광합성 속도를 증가시켜 스트레스로 발생한 손실을 빠르게 보상하기 때문에 탄수화물 배분 패

턴의 변화는 나타나지 않는다(Coleman *et al.*, 1995).

이와 같은 결과를 기초로 판단할 때, 박달나무 5가계 중 탄수화물의 배분 패턴이 거의 변하지 않은 2번과 9번 가계는 비교적 내성이 높은 가계로 판단되며, 탄수화물의 배분 패턴 변화가 매우 심하게 나타난 4번과 7번 가계는 Cd 독성에 민감한 가계로 판단된다. 특히 7번 가계는 Cd 처리 후 탄수화물 함량이 크게 감소하고 배분 패턴 변화도 현저하게 나타난 것으로 보아 5가계 중 가장 민감한 가계로 판단된다.

3.3. 가계간 탄수화물 분할 패턴

대조구의 탄수화물은 모든 가계가 유사한 분할 패턴을 보였으며, 잎, 줄기, 뿌리의 탄수화물은 모두 포도당, 자당, 전분의 순으로 높았다(Table 2). 모든 가계에서 가장 높은 분할 비를 나타낸 당은 잎 내의 전분으로 18.7~21.2%의 범위를 나타냈으며, 분할비가 가장 낮은 당은 줄기의 포도당으로 1.4~4.1%의 범위를 보였다. 그러나 5번 가계와 9번 가계는 뿌리의 포도당이 가장 낮은 비율로 각각 3.0%와 2.7%의 분할 비를 나타냈다.

한편 Cd를 처리한 시험구에서는 대조구와는 달리 4

Table 2. Effects of Cd treatment on partitioning among chemical fractions in leaves, stems and roots of five half-sib families of *B. schmidtii*. Each data represents the mean and standard deviation of five replicates

Family No.	Position	Sugars	Cd concentration (mM)				Source (Pr>F)
			0	0.2	0.4	0.6	
2	Leaf	Glucose	5.4 ± 0.7	5.1 ± 0.9	6.5 ± 0.4	8.2 ± 0.8	Sugar***
		Sucrose	15.4 ± 1.1	16.5 ± 0.9	11.3 ± 0.9	13.4 ± 1.3	Cd***
		Starch	19.3 ± 0.6	18.7 ± 0.1	18.2 ± 0.8	19.9 ± 0.5	Sugar × Cd***
	Stem	Glucose	3.1 ± 0.8	3.9 ± 0.5	3.3 ± 0.5	4.1 ± 1.0	Sugar***
		Sucrose	9.8 ± 1.1	6.7 ± 1.4	8.6 ± 0.7	6.9 ± 1.9	Cd ^{n.s.}
		Starch	16.1 ± 0.5	16.9 ± 0.5	17.4 ± 0.4	16.8 ± 0.6	Sugar × Cd***
	Root	Glucose	3.6 ± 0.5	4.3 ± 0.3	4.0 ± 0.6	3.6 ± 0.4	Sugar***
		Sucrose	11.1 ± 0.7	12.5 ± 2.1	15.1 ± 1.2	11.0 ± 1.4	Cd**
		Starch	16.3 ± 0.3	15.4 ± 0.9	15.7 ± 0.3	16.2 ± 0.5	Sugar × Cd***
4	Leaf	Glucose	8.5 ± 0.2	8.9 ± 0.3	9.2 ± 0.5	8.8 ± 0.3	Sugar***
		Sucrose	12.4 ± 1.9	6.5 ± 0.9	7.9 ± 1.8	9.1 ± 0.8	Cd***
		Starch	21.2 ± 0.5	19.5 ± 0.3	18.0 ± 1.1	21.2 ± 0.3	Sugar × Cd***
	Stem	Glucose	3.4 ± 0.5	3.7 ± 0.4	2.4 ± 0.5	3.6 ± 0.2	Sugar***
		Sucrose	11.5 ± 0.9	11.6 ± 1.4	10.5 ± 1.3	9.2 ± 0.5	Cd**
		Starch	18.1 ± 0.7	18.8 ± 0.3	17.9 ± 0.5	18.4 ± 0.4	Sugar × Cd***
	Root	Glucose	3.6 ± 0.6	4.4 ± 0.4	3.5 ± 0.4	3.6 ± 0.5	Sugar***
		Sucrose	9.2 ± 1.1	14.5 ± 1.1	14.3 ± 1.5	8.8 ± 1.5	Cd***
		Starch	12.2 ± 2.2	12.7 ± 1.5	16.4 ± 0.6	17.2 ± 0.3	Sugar × Cd***
5	Leaf	Glucose	10.2 ± 0.2	8.8 ± 1.0	9.6 ± 1.0	9.7 ± 0.8	Sugar***
		Sucrose	11.7 ± 1.6	9.1 ± 1.9	7.2 ± 1.5	9.5 ± 0.7	Cd***
		Starch	18.7 ± 0.7	18.8 ± 0.8	19.1 ± 0.4	18.2 ± 0.5	Sugar × Cd***
	Stem	Glucose	3.7 ± 1.0	2.9 ± 1.1	3.4 ± 0.8	4.4 ± 1.3	Sugar***
		Sucrose	15.3 ± 1.2	13.5 ± 2.0	11.4 ± 2.0	8.8 ± 2.7	Cd ^{n.s.}
		Starch	16.0 ± 0.7	18.4 ± 0.7	18.6 ± 0.4	18.8 ± 0.7	Sugar × Cd***
	Root	Glucose	3.0 ± 0.3	4.0 ± 1.2	4.4 ± 0.5	4.1 ± 0.3	Sugar***
		Sucrose	6.2 ± 1.2	10.2 ± 1.2	9.0 ± 1.6	9.8 ± 0.9	Cd***
		Starch	15.5 ± 0.8	14.3 ± 1.0	17.1 ± 0.3	16.7 ± 0.4	Sugar × Cd***
7	Leaf	Glucose	7.9 ± 0.9	7.1 ± 0.6	9.1 ± 1.9	9.1 ± 1.1	Sugar***
		Sucrose	16.1 ± 1.4	12.5 ± 1.3	8.7 ± 3.9	7.8 ± 1.6	Cd***
		Starch	20.0 ± 0.4	22.7 ± 0.8	20.2 ± 0.8	19.2 ± 0.5	Sugar × Cd***
	Stem	Glucose	1.4 ± 0.5	2.3 ± 0.7	2.2 ± 0.4	1.8 ± 0.3	Sugar***
		Sucrose	13.1 ± 1.8	10.3 ± 0.6	9.4 ± 1.2	9.3 ± 0.6	Cd**
		Starch	14.0 ± 1.0	19.7 ± 0.9	19.5 ± 0.8	19.0 ± 0.3	Sugar × Cd***
	Root	Glucose	3.2 ± 0.4	4.2 ± 0.7	3.8 ± 0.5	4.3 ± 0.7	Sugar***
		Sucrose	8.4 ± 0.7	11.0 ± 2.1	11.6 ± 1.2	12.3 ± 1.0	Cd***
		Starch	16.0 ± 0.1	10.4 ± 3.1	15.5 ± 1.2	17.3 ± 0.2	Sugar × Cd***
9	Leaf	Glucose	7.7 ± 1.4	6.6 ± 0.4	6.4 ± 0.4	7.3 ± 0.4	Sugar***
		Sucrose	16.7 ± 2.5	14.6 ± 1.2	12.3 ± 0.4	14.0 ± 1.4	Cd***
		Starch	19.8 ± 0.5	18.1 ± 0.7	18.0 ± 0.6	19.4 ± 0.6	Sugar × Cd*
	Stem	Glucose	4.2 ± 0.4	3.8 ± 0.4	4.3 ± 0.7	4.4 ± 0.3	Sugar***
		Sucrose	12.1 ± 0.7	10.2 ± 2.1	10.9 ± 1.3	12.7 ± 1.0	Cd**
		Starch	17.5 ± 0.5	17.4 ± 0.4	17.6 ± 0.4	18.3 ± 0.7	Suga × Cd ^{n.s.}
	Root	Glucose	2.7 ± 0.5	3.0 ± 0.7	4.2 ± 0.2	3.5 ± 0.4	Sugar***
		Sucrose	6.2 ± 0.7	10.1 ± 2.3	11.0 ± 0.7	7.2 ± 1.0	Cd***
		Starch	13.3 ± 0.9	16.2 ± 0.2	15.4 ± 0.4	13.2 ± 0.8	Sugar × Cd***

***, ** and * represent significant difference at $P \leq 0.001$, 0.01 and 0.05; ^{n.s.} not significant.

번, 5번, 7번 가계 잎의 포도당과 자당의 비율이 현저하게 변화하였다. 특히 0.6 mM Cd 처리구에서는 가장 낮은 분할 비를 나타내는 뿌리의 포도당이 2번 가계는 3.6%, 5번 가계는 4.1%를 보였다. 전체적으로 볼 때 Cd 처리는 잎에서 포도당의 함량을 증가시킨 반면, 자당과 전분의 농도를 감소시켰으며, 줄기에서는 포도당과 전분의 함량은 대조구보다 증가한 반면, 자당은 감소하였고, 뿌리에서는 포도당, 자당, 전분 모두 Cd 처리로 증가하였다. 잎 내 탄소 대사는 수중 또는 환경 인자들에 의해서 많은 영향을 받으며(Stitt, 1987; Rufty *et al.*, 1988), 스트레스에 대한 반응은 잎 조직에서 가장 뚜렷하게 나타난다(Coleman *et al.*, 1995).

본 연구에서 Cd 처리된 5가계의 잎 내 포도당 비율이 증가한 것은 저장물질인 전분이 분해되어 수용성 당으로 전환된 증거로 볼 수 있으며(Coleman *et al.*, 1995), 포도당은 항산화 물질인 L-ascorbate와 glucose 6-phosphate의 선구물질로서 항산화물질의 양을 유지하기 위해 사용되는 NADPH의 근원이 되기 때문에 Cd 처리로 인한 포도당의 증가는 스트레스에 대한 저항성 반응으로 볼 수 있다(Robinson and Rowland, 1996; Han *et al.*, 2002).

Cd 처리시 잎의 전분 함량이 감소하는 것은 일반적인 현상으로 이와 유사한 결과는 토끼풀(*Trifolium repens*)와 테다소나무(*Pinus taeda*)에서도 보고된 바 있다(Blum *et al.*, 1982; Friend *et al.*, 1992). 잎 내 전분 비율이 감소하는 것은 스트레스로 인해 손상된 조직을 복구하기 위해 저장물질인 전분이 당이나 다른 화합물로 전환되었기 때문이다(Tingey, 1974; Meier *et al.*, 1990; Bucker and Ballach, 1992). 그러나 Cu가 처리된 옥수수의 잎에서 전분이 축적되기도 하는데, 이것은 Cu에 의해 뿌리는 전혀 영향을 받지 않았지만 잎의 발달이 감소하면서 잎 내에서의 동화물질에 대한 요구도가 약해져 탄수화물이 축적된 것으로 이러한 결과는 결국 광합성의 저해를 가져오기도 한다(Foyer, 1988; Vinit-Dunand *et al.*, 2002; Alaoui-Sosse *et al.*, 2004). 본 연구에서 이와 반대의 결과가 나온 것은 Cd 처리로 잎에서 생산된 동화물질이 Cd의 영향으로 사부 적재와 뿌리로의 수송능력이 감소하였거나 또는 뿌리의 손상으로 동화물질의 이용 속도가 감소하였기 때문인 것으로 판단되는데, 이것은 Cd 처리된 뿌리의 포도당, 자당 및 전분의 함

량이 증가된 것으로 설명할 수 있다.

적 요

Cd 처리에 의해서 스트레스를 받고 있는 박달나무의 탄수화물 배분 및 분할 기작을 이해하고, 이를 기준으로 가계간 Cd 독성에 내성 수준을 평가하기위해서, 박달나무 5가계의 1년생 묘목에 0, 0.2, 0.4, 0.6 mM의 농도로 CdSO₄ 용액을 2개월간 처리한 후 잎, 줄기, 뿌리의 탄수화물 농도를 측정하였다. Cd를 처리한 박달나무는 가계 간에 다소간의 차이는 있었으나, 체내 탄수화물의 함량이 대조구에 비하여 낮은 함량을 나타내었다. 기관에 따라서는 잎의 탄수화물 배분율이 감소되고 뿌리의 배분율이 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 Cd처리에 의하여 잎은 포도당 함량이 증가하고 자당과 전분의 농도가 감소하며, 뿌리는 포도당, 자당, 전분이 모두 증가하는 경향을 나타냈다. 이상의 결과를 토대로 본 연구에 공시한 박달나무 5가계 중 No. 7번 가계가 Cd에 가장 민감한 가계로 평가되었다.

REFERENCES

- Alaoui-Sossé, B., P. Genet, F. Vinit-Dunand, M.-L. Toussaint, D. Epron, and P.-M. Badot, 2004: Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Science* **166**, 1213-1218.
- Amundson, R. G., R. J. Kohut, and J. A. Laurence, 1995: Influence of foliar N on foliar soluble sugars and starch of red spruce saplings exposed to ambient and elevated ozone. *Tree Physiology* **15**, 167-174.
- Blum, U., G. R. Smith, and R. C. Fites, 1982: Effects of multiple O₃ exposures on carbohydrate and mineral contents of ladino clover. *Environmental and Experimental Botany* **22**, 143-154.
- Brouwer, R., 1983: Functional equilibrium: sense or nonsense? *Netherlands Journal of Agricultural Science* **31**, 335-348.
- Bucker, J., and H. J. Ballach, 1992: Alterations in carbohydrate levels in leaves of *Populus* due to ambient air pollution. *Physiologia Plantarum* **86**, 512-517.
- Coleman, M. D., R. E. Dickson, J. G. Isebrands, and D. F. Karnosky, 1995: Carbon allocation and partitioning in aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiology* **15**, 593-604.
- Dickson, R. E., 1991: Assimilate distribution and storage. *Physiology of Trees*, In: A. S. Raghavendra, ed. John Wiley and Sons, New York, 51-85.
- Dickson, R. E., and J. G. Isebrands, 1993: Carbon allocation

- terminology: should it be more rational? *Bulletin of the Ecological Society of America* **74**, 175-177.
- Ericsson, T., L. Rytter, and E. Vapaavuori, 1996: Physiology of carbon allocation in trees. *Biomass and Bioenergy* **11**, 115-127.
- Foyer, C., 1988: Feedback inhibition of photosynthesis through source-sink regulation in leaves. *Plant Physiology and Biochemistry* **26**, 483-492.
- Friend, A. L., P. T. Tomlinson, R. E. Dickson, E. G. O'Neill, N. T. Edwards, and G. E. Taylor, Jr., 1992: Biochemical composition of loblolly pine reflects pollutant exposure. *Tree Physiology* **11**, 35-47.
- Geiger, D. R., and J. C. Servaites, 1991: Carbon allocation and response to stress. *Response of Plants to Multiple Stresses*, In: H. A. Mooney, W. E. Winner and E. J. Pell, ed. Academic Press, New York, 103-127.
- Han, S.-H., 2000: Tolerance of *Populus* species to heavy metals in contaminated soils and changes in Cd tolerance by mycorrhizal inoculation with *Pisolithus tinctorius*, PH.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 152p.
- Han, S.-H., J.-C. Lee, S.-S. Jang, and Y.-P. Hong, 2002: Comparison of the ozone sensitivity of four *Betula* species based on carbon allocation and partitioning patterns. *Journal of Korean Forestry Society* **91**, 449-456.
- Hendry, G. A. F., and A. H. Price, 1993: Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. pp. 148-152. In: G. A. F. Hendry and J. P. Grime, ed. *Methods in Comparative Plant Ecology: A Laboratory Manual*. Chapman & Hall.
- Kim, C.-G., S. A. Power, and J. N. B. Bell, 2004: Effects of host plant exposure to cadmium on mycorrhizal infection and soluble carbohydrate levels of *Pinus sylvestris* seedlings. *Environmental Pollution* **131**, 287-294.
- Koziol, M. J., and C. F. Jordan, 1978: Changes in carbohydrate levels in red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) exposed to sulphur dioxide. *Journal of Experimental Botany* **29**, 1037-1043.
- Lee, J.-C., S.-H. Han, S.-S. Jang, J.-H. Lee, P.-G. Kim, J.-S. Hur, and K.-J. Yum, 2002: Selection of indigenous tree species for the revegetation of the abandoned coal mine lands in Taebak area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 86-94.
- Meier, S., L. F. Grand, M. M. Schoeneberger, R. A. Reinert, and R. I. Bruck, 1990: Growth, ectomycorrhiza and nonstructural carbohydrates of loblolly pine seedlings exposed to ozone and soil water deficit. *Environmental Pollution* **64**, 11-27.
- Moya, J. L., R. Ros, and I. Picazo, 1993: Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthetic Research* **36**, 75-80.
- Oh, C.-Y., K.-J. Lee, J.-C. Lee, and S.-H. Han, 2004: Differences in growth and photosynthesis among three half-sib families of *Betula schmidtii* in response to Cd treatment. *Korean Journal of Ecology* **27**, 147-153.
- Paynter, V. A., J. C. Reardon, and V. B. Shelburne, 1991: Carbohydrate changes in short leaf pine (*Pinus echinata*) needles exposed to acid rain and ozone. *Canadian Journal of Forest Research* **21**, 666-671.
- Prasad, M. N. V., 1995: Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. *Environmental and Experimental Botany* **35**, 525-545.
- Rauser, W. E., 1978: Early effects of phytotoxic burdens of cadmium, cobalt, nickel and zinc in white beans. *Canadian Journal of Botany* **56**, 1744-1749.
- Robinson, J. M., and R. A. Rowland, 1996: Carbohydrate and carbon metabolite accumulation responses in leaves of ozone tolerant and ozone susceptible spinach plants after acute ozone exposure. *Photosynthesis Research* **50**, 103-115.
- Rufty, T. W., S. C. Huber, and R. J. Volk, 1988: Alterations in leaf carbohydrate metabolism in response to nitrogen stress. *Plant Physiology* **88**, 725-730.
- Spence, R. D., E. J. Rykiel, Jr., and P. J. H. Sharpe, 1990: Ozone alters carbon allocation in loblolly pine: assessment with carbon-11 labeling. *Environmental Pollution* **64**, 93-106.
- Stitt, M., 1987: Fructose 2,6-bisphosphate and plant carbohydrate metabolism. *Plant Physiology* **84**, 201-204.
- Tingey, D. T., 1974: Ozone induced alterations in the metabolite pools and enzyme activities of plants. pp. 40-57. In: *Air pollution Effects on Plant Growth*. ACS Symposium, No. 3, American Chemical Society.
- Vinit-Dunand, F., D. Epron, B. Alaoui-Sosse, and P. M. Badot, 2002: effects of copper on growth and on photosynthesis in cucumber plants. *Plant Science* **163**, 53-58.
- Zheng, Y., T. Lyons, and J. Barmes, 2000: Effects of ozone on the production and utilization of assimilates in *Plantago major*. *Environmental and Experimental Botany* **43**, 171-180.