

수도권매립지에서 성장과 적응력이 우수한 포플러류 및 버드나무 클론 선발

구영본* · 우관수 · 여진기 · 김영식

국립산림과학원 산림유전자원부

Selection of Superior Poplar and Willow Clones in Growth Performance and Adaptation Abilities at Sudokwon Landfill Site

Yeong-Bon Koo*, Kwan-Soo Woo, Jin-Kie Yeo and Yeong-Sik Kim

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

요 약: 쓰레기 매립지에서 성장과 적응력이 우수한 수종 및 품종을 육성하기 위하여 1997년에 포플러류 4수종(10 클론)과 도입종 버드나무 1수종(2클론)을 수도권매립지에 식재한 후 1997년부터 2005년까지의 생존율, 성장, 활력, 공해 및 균·해충에 의한 잎 피해, 그리고 천공충에 의한 피해를 각각 조사하였다. 전체 생존율은 1997년에 평균 90%에서 2005년에는 53%로 크게 감소하였다. 포플러 수종 중 현사시가 2005년에 66%의 생존율을 보여 가장 우수한 반면 양황철과 이태리포플러가 41%로 가장 저조한 생존율을 보였다. 현사시 3호(Clivus) 클론이 73%로 가장 높은 생존율을 보였다. 평균 수고는 이태리포플러 Eco28호가 11.2 ± 2.1 m로 가장 우수하였고 그 다음으로 Clivus(11.0 ± 2.0 m)였다. 반면 도입종 버드나무 클론 중에서 131-27은 7.8 ± 1.6 m로 가장 저조한 수고생장을 보였다. 활력, 낙엽율, 잎피해, 그리고 천공충 피해는 클론 간에 통계적 차이가 있었다. 수종별로는 현사시와 도입종 버드나무가 활력이 강하고 매립지 환경의 다양한 스트레스에 적응력이 강한 것으로 나타났으나 양황철나무는 스트레스에 아주 민감하게 반응을 하였다. 우수 클론을 한 클론만 선발하면 현사시 3호(Clivus)를, 추가하여 선발하면 버드나무 2클론(131-25, 131-27), 현사시 4호 2클론(72-9, 72-16)을 포함하여 총 5클론을 선발할 수 있었다. 이들 5클론은 수도권매립지와 비슷한 환경에 보급할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract: Poplars and willow were planted to identify suitable species and varieties for landfill reclamation at the Sudokwon Landfill Site in 1997. Survival rate, growth performance, vitality, visible foliar injury by pollutants, fungi, and leaf insects, and stem borer damage have been investigated for 10 clones of 4 poplar species and 2 clones of one willow species from 1997 to 2005. The average survival rates of poplar and willow clones were drastically decreased from 90% in 1997 to 53% in 2005. Among poplar species, *Populus alba* × *P. glandulosa* showed the highest mean survival rate of 66%, while *Populus koreana* × *P. nigra* var. *italica* and *Populus euramericana* were the lowest of 41%, respectively in 2005. Clivus, which is one of the clones from *Populus alba* × *P. glandulosa*, showed the highest survival rate of 73%. For mean height, Eco28 clone(*P. euramericana*) showed the highest of 11.2 ± 2.1 m and followed by Clivus of 11.0 ± 2.0 m. Clone 131-27(*Salix alba*) was the lowest of 7.8 ± 1.6 m. Vitality, defoliation, visible foliar damage, and stem borer damage were significantly different among clones. Most of *Populus alba* × *P. glandulosa* and *Salix alba* clones seemed to have strong vitality and to be tolerant to various stresses at the site. However, *Populus nigra* × *P. maximowiczii* was sensitive to the stress. We have selected 5 clones in total: Clivus as the best clone for waste landfill reclamation, and additionally two *Salix* clones 131-25, 131-27 and two clones of *Populus alba* × *P. glandulosa* (72-9, 72-16) have been selected. These five clones could be supplied for planting at sites having an environment similar to the Sudokwon Landfill Site.

Key words: landfill reclamation, *Populus alba* × *P. glandulosa*, vitality, defoliation, stem borer

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

서 론

수도권매립지는 총면적이 2,000여 ha로 30년간 2억5천만 톤을 매립할 예정이며 생활폐기물이 62.9%를 차지하고 있다. 인근 지역에서 관측되는 대기오염과 악취, 소음 등이 심하며, 총 먼지량은 2004년 87~134 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 2005년에는 111~139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였고 미세먼지도 2005년에 80~106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되어 2004년 61~96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 증가하였다(수도권매립지관리공사, 2006). 쓰레기 매립지를 조성했을 때 지하수 및 지표수의 오염 확산은 매립 2년 후부터 지하수를 최고 92 mg/l까지 오염시키고 매립이 안정될 때까지 최소 20년간 계속될 것이라고 하였으며(정종관과 장원, 1995), Jones *et al.*(2006)은 쓰레기 매립지에서 나오는 침출수는 매립완료 후 수 백년 간 발생할 가능성이 있다고 보고하였다.

폐기물 매립지에 식재한 버드나무류는 식재 후 3년 동안 수체 내 구리 농도가 다른 수종에 비해 훨씬 높고, 특히 잎에서의 구리 농도가 높게 나타났으며(Dickinson, 2000), 쓰레기매립지 환경에서 자라는 현사시는 일반적인 환경에서 자라는 현사시에 비해 매립가스, 토양 수분 부족, 급격한 온도 변화 등의 환경 스트레스에 적응해야하므로 엽면적이 좁고, 섬모(纖毛, leaf hair)의 밀도가 높으며, 광합성에 대한 수분 이용효율이 높은 것으로 나타났다(김판기 등, 2002).

매립지 침출수를 초지나 나무가 심겨진 토양에 공급했을 때 오염도가 현저히 줄어드는 것으로 보고되었다. Harrington과 Maris(1986)는 하루에 1ha당 50톤의 침출수를 초본으로 피복된 토양에 공급했을 때 BOD (biochemical oxygen demand)가 20배가량 줄어든다고 보고하였으며, Menser *et al.*(1983)은 5년 동안 산림토양에 침출수를 공급한 후 원래 침출수와 산림토양을 통과한 침출수의 오염도를 비교해 본 결과 후자의 오염도가 현저히 감소된다고 하였다. 침출수 처리가 토양과 생태계에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데 Bowman *et al.*(2002)은 침출수를 1년 이상 초본에 처리했을 때 토양 내 엽분함량 증가에 따른 문제와 초본들이 말라 죽는 피해가 있다고 보고하였다. 침출수에 대한 식물의 반응은 수종에 따라 큰 차이가 있어 신중한 수종 선택(초본 또는 목본)이 요구 된다고 하였다(Adarve *et al.*, 1998; Gordon *et al.*, 1989a, b).

포플러는 환경에 쉽게 적응하고 생장이 빠르며 높은 증산량과 넓게 퍼지는 근계는 토양 침식을 방지함은 물론 오염물질을 흡수하고 분해하는 기능이 우수하다(Dix *et al.*, 1997). 버드나무류는 무성번식이 용이하고 생장이 빠르며 특히 육종학적 방법에 의해 개량된 버드나무류는 연간 약 35톤/ha의 줄기 biomass 생산 능력을 가지고 있으며

(Greger와 Landberg, 1999), Cd 등 중금속 흡수 능력은 일반 임목의 10배 이상 높은 것으로 알려져 있다(Baker *et al.*, 1994). 국내에서도 침출수 처리에 따른 포플러의 생육 특성과 적응력을 조사한 결과 교잡종 포플러인 현사시가 가장 우수한 것으로 보고 된 바 있다(구영본 등 1999).

본 연구는 쓰레기 매립지 환경에 식재한 포플러와 버드나무(*Salix alba*)의 생육상태, 활력, 피해도 등을 조사하여 적응력이 가장 우수한 수종과 클론을 선발하여 쓰레기 매립지의 생태환경복원에 필요한 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 시험립 조성

수도권매립지는 인천시 서구 백석동의 북위 37° 47' 동경 126° 37'에 위치하며 서해안 갯벌을 메워서 조성하였다. 총 면적 1,987ha 중 처음 시작되는 제1매립장은 409ha로 주로 수도권 3개 시도인 서울, 인천, 경기 지역의 생활쓰레기, 건설 및 사업장 폐기물을 1992년 2월부터 하루 평균 약 2만 톤가량 매립하여 2000년 10월에 매립을 종료하였다. 1997년 봄 제1매립장 주위로 포플러 및 버드나무 5수종 (12클론)을 식재하였는데 현사시(*Populus alba* × *P. glandulosa*) 5클론 [3호(Clivus), 4호(72-9, 72-16, 72-30, 72-31)], 양황철나무(*Populus nigra* × *P. maximowiczii*) 3클론(62-1, 62-10, 62-62), 이태리포플러(*P. euramericana*) 1클론(Eco28), 수원포플러(*Populus koreana* × *P. nigra* var. *italica*) 1클론(Suwon) 그리고 도입종인 버드나무(*Salix alba*) 2클론(131-25, 131-27)을 공시 수종으로 사용하였다. 이들 12클론은 1996년 국립산림과학원 산림유전자원부포지(수원)에 삼목하여 1997년 4월에 1년생 삼목묘를 생산, 조립하였다. 식재 방법은 당시 매립 중이었던 매립 2단 작업로 변의 가장자리 부분에 식재하였으며, 식재간격은 개체 간 2m로 하여 클론 당 30본씩 3반복으로 총 1,080본을 2,160m에 걸쳐 1열로 식재하였다.

2. 성장 특성 및 생존율

쓰레기 매립지 환경에서 포플러 및 버드나무 클론의 성장 특성으로 수고 및 흉고직경을 식재한 12클론의 3반복에서 매목조사를 실시하였으며, 1997년, 1998년 그리고 2004년에는 클론 당 30본(10본/반복)만 조사하였다. 조사는 1997년부터 2005년까지 매년 생장이 정지된 9월 말에서 10월 초에 수고는 수고측정기로 10 cm 단위로 측정하였고 흉고직경은 직경자로 0.5 cm까지 측정하였다. 생존율 역시 성장 특성 조사와 동시에 실시하였으며 식재 본수에 대한 생존 본수의 비율(%)로 나타내었다.

Table 1. Categories for vitality, defoliation, leaf damage and stem borer damage in poplar and willow clones planted at Sudokwon Landfill Site.

Vitality		Defoliation	Leaf damage	Stem borer	
Degree	Score	Degree (%)	Degree (%)	Degree*	Score
Dead	0	0-10	0-10	none	0
Weak	1	11-25	11-25	1-3	1
Intermediate	2	26-50	26-50	4-6	2
Strong	3	51-75	51-75	7-9	3
-	-	76-100	76-100	10>	4

*Number of scars by stem borer

3. 활력, 낙엽을 및 피해도

쓰레기 매립지에서 분출되는 메탄가스 등 오염된 환경에서의 수목의 활력도(수세), 낙엽율, 잎 피해 그리고 천공충 피해를 조사하였다. 활력은 개체목의 전반적인 생육상태, 신초지 및 가지의 발달 정도에 따라 4가지 범주로 나누어 고사(0점), 약(1점), 중(2점), 강(3점)으로 구분하였다. 낙엽율 및 잎 피해는 Ke와 Skelly(1989)의 독일 system 피해등급 기준을 적용하였으며 개체목의 전체 잎 중 피해 잎의 비율을 5개 등급으로 나누는 다음 피해가 가장 작은 등급에서 가장 피해가 심한 등급까지 0-4점까지의 점수를 부여하였다. 천공충의 피해는 대부분 줄기에 발생하므로 줄기에 발생한 천공충 상흔의 개수를 5개 범주로 구분하여 점수(0-4점)를 부여하였다(Table 1).

4. 통계분석

분석 자료는 1997년 식재 당년부터 2005년까지 9년간 연도별 클론간의 수고 및 흉고직경 생장은 SYSTAT 11 통계프로그램을 사용하여 GLM(General Linear Model)을 이

용하여 분석하였으며 기본모델은 $Y_{ij} = \mu + C_i + B_j + \epsilon_{ij}$ 로 Y_{ij} 는 j번째 반복에서 i번째 클론의 성장, μ 는 전체평균, C_i 는 클론효과, B_j 는 반복효과, ϵ_{ij} 는 오차를 나타낸다. 활력, 낙엽율, 엽피해 및 천공충 피해는 정규분포를 보이지 않는 범주형 데이터 분석에 용이한 Nonparametric(Kruskal-Wallis Test) 기법을 사용하여 분석하였다(SYSTAT Software Inc., 2004).

결과 및 고찰

1. 적응력(생존율)

식재 당년 매립이 계속 진행되는 동안 가장 우수한 생존율을 보인 수종은 현사시로, 5클론 평균 생존율이 92%였고 가장 저조한 생존율을 보인 수종은 수원포플러로 78%를 나타내었다(Figure 1). 그 이듬해인 1998년에는 전년도에 비해 12클론 평균 생존율이 65%로 크게 떨어졌는데 이것은 묘목이 아직 어릴 뿐 아니라 쓰레기 매립지에서 나오는 CH₄나 CO₂ 등의 유독 가스에 의해 정상적인 적

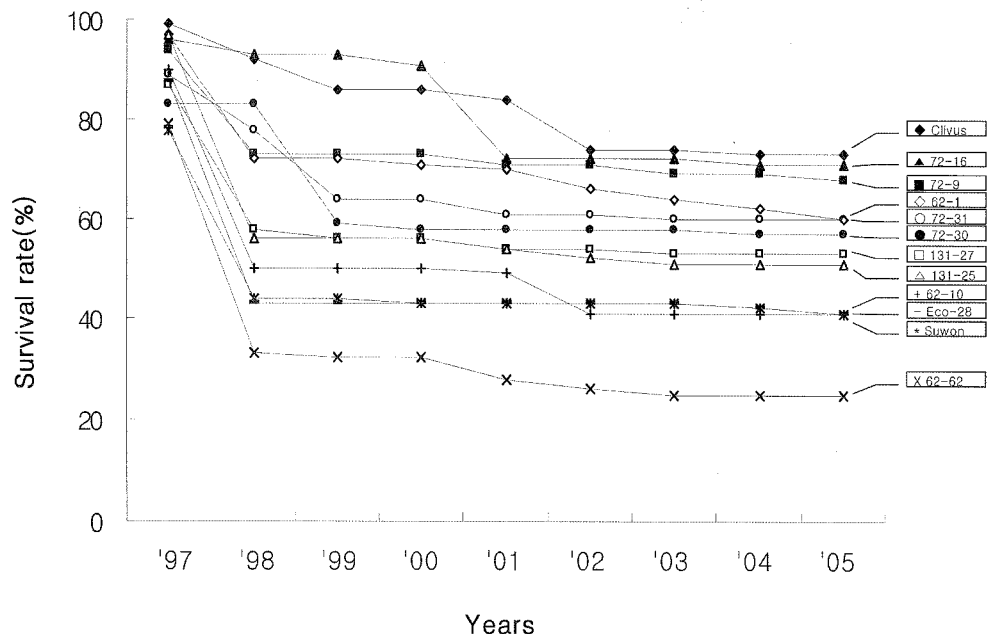


Figure 1. Survival rate of poplar and willow clones by year at Sudokwon Landfill Site.

용을 하지 못하고 수세가 약한 틈을 타 병해충의 침입으로 고사 본수가 늘어난 것으로 사료된다. 이와 같은 급격한 생존율 감소는 그 다음 해인 1999년에 대부분 클론에서 발생하지 않았으나 72-30과 72-31 클론은 각각 24%, 14%씩 줄어 감소 추세가 계속되었다.

매립이 완료된 폐기물 매립지나 쓰레기 매립지 환경에 포플러를 식재했을 때 첫 해의 활착율이 가장 중요하며 그 후 그대로 활착율이 계속 유지되는 것으로 보고된 바 있다(Light와 Madison, 1995; 구영본 등, 1997). 이 것은 식재 후 묘목이 제대로 활착되기도 전에 앞에서 언급한 매립지에서 발생하는 각종 유독 가스의 피해로 추정된다. 2002년 중간 결과 발표(구영본 등, 2002) 이후에는 대부분 클론들의 생존율은 크게 변화되지 않았으나 현사시3호(Clivus), 72-31, 수원포플러(Suwon), 양황철나무(62-10, 62-62) 등의 생존율이 다소 감소하였다. 2005년도(9년생)의 수종별 생존율은 현사시와 버드나무가 우수하고 양황철나무, 수원포플러 및 이태리포플러가 불량하였다. 클론별로는 현사시 3호(Clivus)가 73%로 가장 우수하였으며 생존율 상위 6 클론 중 5 클론이 현사시로 나타났다. 가장 생존율이 저조한 클론은 양황철 62-62클론으로 25%를 보였다.

2. 성장 특성

쓰레기 매립지에 조성한 포플러 및 버드나무 12클론의 수고와 흉고직경 성장을 식재 당해년인 1997년부터 2005년까지 조사한 결과 2003년 흉고직경 성장에서 클론 간에 통계적 유의성이 나타나지 않은 것을 제외하고($P=0.114$), 각 연도별로 클론 간에 고도의 통계적 유의성($P<0.001$)이 있는 것으로 나타났다(Table 2). 식재년도인 1997년부터 2000년까지 4년간 수고 성장은 조사 기간 9년간 전체 수고 성장의 약 11.5%만 성장하였으며 특히 1998년에 12클

론 전체 평균($3.0\pm 0.7m$)이 전년도($3.3\pm 0.4m$)에 비해 감소한 이유는 구영본 등(2002)이 중간 결과 발표 때 천공층의 피해로 설명한 바 있다.

수고 성장이 좋아지기 시작한 것은 2001년부터인데 수도권매립지 제1 매립장의 2000년 10월 매립 완료와 함께 성장이 향상 된 것으로 나타났다. 식재 당년의 수종별 성장은 현사시 5클론이 $3.5\pm 0.2m$ 로 다른 수종에 비해 월등히 우수하였다(Figure 1). 1997년 식재 당시 수고 성장이 가장 저조한 수종은 버드나무였으나($2.5\pm 0.2m$) 1년 뒤인 1998년부터 양황철나무 보다 뛰어난 성장을 보이다가 4년째인 2000년에는 현사시 3호 Clivus($4.9\pm 1.0m$) 다음으로 우수한 성장($4.6\pm 1.2m$)을 보여 생육 환경이 좋지 않은 시기인 매립 진행 기간 동안에 우수한 성장을 보였다. 매립 초기에 성장이 다소 저조했던 이태리포플러(Eco28)와 수원포플러는 매립이 완료된 이후 성장 능력이 빠르게 회복되면서 우수한 수고 성장을 보여 2005년 현재 이태리포플러가 가장 우수한 성장($11.2\pm 2.1m$)을 보였다. 그 다음으로 Clivus($11.0\pm 2.0m$)와 수원포플러($10.7\pm 1.7m$)이었으며 버드나무 두 클론은 $8.0\pm 1.7m$ 으로 가장 낮은 성장을 보였다(Figure 2).

흉고직경 성장 역시 식재 당해년인 1997년에는 수고 성장과 같은 패턴을 보여 현사시 5클론($2.0\pm 0.3\text{ cm}$)이 가장 우수한 반면 버드나무 두 클론($1.3\pm 0.3\text{ cm}$)은 저조한 성장을 보였다. 1999년에는 버드나무 131-25 클론이 $4.1\pm 1.7\text{ cm}$ 로 흉고직경 성장에서 가장 우수하였다(Figure 3). 양황철나무는 실험 기간 동안 매년 저조한 직경 성장을 보였으며, 현사시는 식재 초기 매립 진행시에 우수한 흉고직경 성장을 보였으나 매립이 완료된 이후 Clivus를 제외한 나머지 클론들은 다소 저조한 직경 성장을 보였다. 이태리포플러인 Eco28과 수원포플러는 수고 성장과 같이 직경 성장도 2002년부터 다른 클론에 비해 우수하였으며,

Table 2. Mean and standard deviations of height and DBH growth of poplar and willow clones by year at Sudokwon Landfill Site.

Year	Height					DBH				
	N*	Mean \pm SD (m)	df	F	P-value**	N	Mean \pm SD (cm)	df	F	P-value
1997	260	3.3 ± 0.4	11	72.49	<0.001	260	1.8 ± 0.4	11	16.80	<0.001
1998	339	3.0 ± 0.7	11	8.39	<0.001	339	2.3 ± 0.7	11	3.93	<0.001
1999	609	3.3 ± 0.8	11	6.65	<0.001	609	3.3 ± 1.4	11	5.08	<0.001
2000	632	4.0 ± 1.1	11	15.60	<0.001	632	4.6 ± 1.8	11	8.34	<0.001
2001	605	5.2 ± 1.3	11	10.55	<0.001	605	5.9 ± 3.8	11	10.02	<0.001
2002	631	6.6 ± 1.3	11	13.85	<0.001	631	7.7 ± 4.0	11	3.31	<0.001
2003	537	8.2 ± 3.1	11	3.20	<0.001	537	10.6 ± 13.5	11	1.54	0.114
2004	320	9.1 ± 2.1	11	7.04	<0.001	320	12.2 ± 3.4	11	6.01	<0.001
2005	604	9.4 ± 2.0	11	23.80	<0.001	604	12.4 ± 3.7	11	15.99	<0.001

*Total number of trees used for analysis each year

**P-values are tests of differences among 12 clones

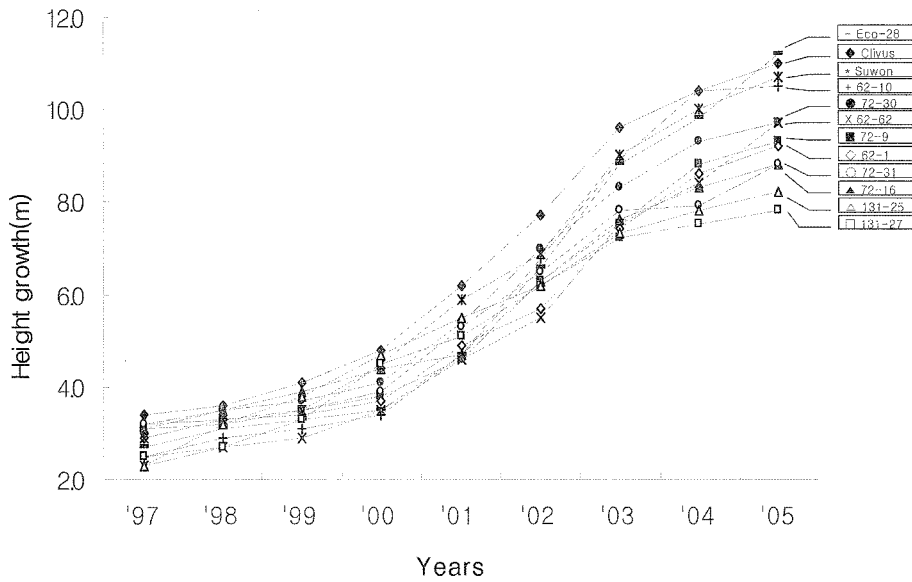


Figure 2. Height growth of poplar and willow clones by year at Sudokwon Landfill Site.

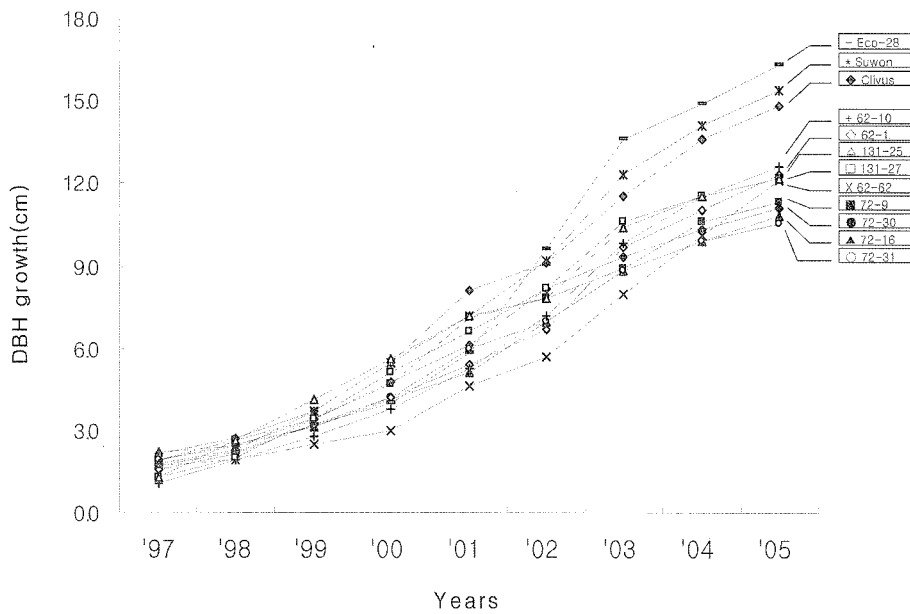


Figure 3. DBH growth of poplar and willow clones by year at Sudokwon Landfill Site.

최종 선발 연도인 2005년 때 직경 생장이 가장 우수한 클론은 Eco28 클론(16.3 ± 5.5 cm)이며 그 다음으로 수원포플러(15.3 ± 3.8 cm)와 Clivus(14.8 ± 3.3 cm)가 좋은 성장을 보였다.

같은 포플러속 수종들이라도 수종이 다르기 때문에 성장 적지는 대부분이 다르며, 수종 각각의 적지에 식재하면 현사시 보다는 이태리포플러와 수원포플러의 생장이 더 우수하다. 앞에서 언급한 이태리포플러와 수원포플러의 경우 매립지의 열악한 환경 조건에 적응이 되면 그 수종 특성이 발휘되는 것으로 판단된다. 유해 가스가 많이 나오는 매립 기간 동안 적응력이 뛰어나고 수고 및 직경 생장이 우수한 수종은 버드나무와 현사시인 것으로 나타

났다. 쓰레기 및 폐기물 매립지가 날로 증가하면서 환경 친화적으로 이 문제를 해결하려는 노력이 세계적으로 이루어지고 있는데 포플러 및 버드나무가 이러한 환경에 효과적으로 이용될 수 있고 적응력이 강한 것으로 알려져 있다(Greger와 Landberg, 1999; 구영본 등 1999). 난지도 쓰레기 매립지 주위에 식재한 이태리포플러 3년생의 생장이 일반 조림지에 비해 우수하여 이들 포플러류가 매립지의 침출수 제거 효과 뿐 아니라 매립지의 입지 환경조건에서도 문제가 없음을 입증되었다(구영본 등, 1997).

3. 활력, 낙엽율 및 피해도

Nonparametric Kruskal-Wallis One-Way ANOVA 분석

Table 3. Mean vitality, defoliation, leaf damage and stem borer damage of poplar and willow clones at Sudokwon Landfill Site for 9 years.

Species	Clone	Vitality	Defoliation	Leaf damage	Stem borer damage
Mean		2.29	1.26	1.40	1.02
<i>Populus alba</i> × <i>P. glandulosa</i>	Clivus	2.70	0.91	0.80	1.11
	72-9	2.29	1.18	1.17	1.51
	72-16	2.27	1.19	1.31	1.38
	72-30	2.49	1.17	1.54	1.37
	72-31	2.31	0.93	1.54	1.57
	Mean	2.38	1.08	1.28	1.38
<i>Populus nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>	62-1	2.18	1.78	1.98	0.94
	62-10	2.09	1.62	2.07	0.93
	62-62	1.82	1.98	2.41	1.16
	Mean	2.01	1.80	2.15	1.02
<i>P. euramericana</i>	Eco28	2.31	1.69	1.38	1.02
<i>Populus koreana</i> × <i>P. nigra</i>	Suwon	2.21	1.10	1.39	1.14
	131-25	2.50	0.53	0.81	0.63
<i>Salix alba</i>	131-27	2.44	0.62	0.71	0.46
	Mean	2.50	0.60	0.78	0.56

결과 12 클론의 활력은 조사 기간 9년간 대해 통계적으로 큰 차이($\chi^2=50.1\sim 401.7$; $P<0.001$ 각각)가 있었다(Table 3). 수종별 활력은 버드나무가 평균 2.57로 가장 우수한 반면 양황철나무가 2.01로 가장 저조하였다. 클론별로는 현사시 3호(Clivus)가 2.70으로 가장 우수하고 버드나무 131-25, 현사시 72-30 클론들이 비교적 우수하였으나 양황철나무 62-62 클론은 1.82로 가장 저조한 활력을 보였다(Table 3).

클론별 낙엽율은 조기 낙엽된 비율을 조사한 것으로 매해마다 각 클론 간에 통계적 유의성이 있었으나($\chi^2=67.2\sim 560.6$; $P<0.001$) 2005년에는 평균 낙엽율이 전체 수관의 0~10% 이내로 클론 간에 유의성이 나타나지 않았다($\chi^2=14.7$; $P=0.20$). 수종별로는 활력이 좋았던 버드나무가 연도별 총 평균이 0.6(0.0~2.1범위)으로 낙엽율이 가장 낮게 나타났고 그 다음으로 현사시가 평균 1.08(0.0~2.6 범위)로 낙엽율이 낮은 반면 양황철나무 평균 낙엽율이 1.8(0.0~3.3)로 조기 낙엽이 심한 것으로 나타났다. 마지막 조사 년도인 2005년도에는 대부분 클론에서 평균 낙엽율이 10% 미만으로 나타났다. 이와 같은 결과는 시험지의 쓰레기 매립이 완료된 이후 매립지가 점차 안정화 되고 유해가스의 발생량도 대폭 감소함과 동시에 수목의 활력이 증가함으로써 나타난 현상으로 추정된다.

공해와 포플러잎녹병 또는 식엽충에 의한 엽피해가 각 연도 별로 클론 간에 통계적 유의성($\chi^2=69.2\sim 439.8$; $P<0.001$ 각 연도별)이 있는 것으로 나타났다. 수종별로는 버드나무가 가장 피해를 적게 입었는데 연도별 총 평균이 0.78(0.0~1.4 범위)로 0~37%의 수관이 엽 피해를 입었다.

이에 반해 양황철은 9년간 평균이 2.15(1.1~3.0 범위)로 전체 수관의 11~75%가 피해를 입어 가장 엽 피해가 심한 것으로 나타났다. 현사시는 평균 1.3(0.0~2.0 범위)으로 전체 수관의 0~50%가 피해를 입어 버드나무 다음으로 공해, 잎녹병, 식엽충의 피해에 강한 것으로 나타났다. 버드나무 131-27클론이 9년간 평균 엽 피해도가 0.71로 엽 피해에 가장 강한 클론으로 나타났고 그 다음으로 Clivus클론이 0.80, 131-25클론이 0.81이었으며 반면 양황철 62-62클론이 2.41로 가장 피해에 약한 클론으로 나타났다.

천공충은 주로 박쥐나방과 버들바구미에 의한 피해로, 박쥐나방은 대형 나방으로(날개 길이 45~110 mm) 포플러 가지나 주간의 껍질을 환상으로 갉아먹거나 내부의 위 아래로 구멍을 만들고, 버들바구미 역시 수피와 목질부를 갉아먹어 바람이 불면 가해 부위의 주간이나 가지가 절단되는 피해를 주며 벌채 후 목질부가 검은 색으로 변해 목재 가치를 떨어뜨린다(Broberg *et al.*, 2002). 천공충 피해는 식재 후 7년간 꾸준히 발생하였으며 연도별로 각 클론 간에 통계적 차이($\chi^2=65.1\sim 460.0$; $P<0.001$)가 뚜렷하였다. 그러나 매립이 완료된 후 4~5년째인 2004년과 2005년에는 클론 간에 통계적 유의성이 나타나지 않았으며(각각 $\chi^2=7.3$, $P=0.77$; $\chi^2=17.3$, $P<0.10$), 그 피해가 현저히 줄어들었는데 이 것은 버들바구미와 같은 천공충 피해가 줄기의 지름이 크고 수피가 두꺼운 5년생 이상에서는 적으며 줄기의 지름이 6 cm 이하인 나무에 피해가 많은 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Broberg *et al.*, 2002). 현사시의 9년간 평균 천공충 피해는 1.38로 가장 피해가 심한 것으로 나타났고 그 다음으로 수원포플러가 1.14였고 버드나

Table 4. Ranking of clones based on weight of survival rate, growth performance and damage.

Clones	Ranking	Total*	Survival(40%)	Growth(30%)	Damage(30%)
Clivus	1	91.9	40.0(1)**	28.5(2)	23.4(3)
131-25	2	80.6	29.0(7)	22.2(9)	29.4(2)
131-27	3	79.5	27.9(8)	21.6(10)	30.0(1)
72-9	4	77.8	37.3(3)	22.8(8)	17.7(5)
72-16	5	77.6	38.9(2)	21.3(11)	17.4(7)
62-1	6	72.8	32.9(4)	23.7(6)	16.2(10)
72-31	7	71.9	32.9(4)	21.3(11)	17.7(5)
72-30	8	71.7	31.2(6)	23.1(7)	17.4(7)
Eco28	9	69.9	22.5(9)	30.0(1)	17.4(7)
Suwon	10	69.0	22.5(9)	28.5(2)	18.0(4)
62-10	11	64.2	22.5(9)	25.8(4)	15.9(11)
62-62	12	50.9	13.7(12)	24.0(5)	13.2(12)

*Total : $S(X_i/X_{max} * 40) + G(X_i/X_{max} * 30) + D(X_i/X_{max} * 30)$. X_i is an individual observed value of each trait. X_{max} is the maximum value of the X_i . S : survival, G : growth, D : damage

**Ranking in each trait

무는 0.56으로 가장 적은 피해를 입었다. 천공충 피해를 가장 적게 입은 클론은 131-27클론으로 0.46이었고 가장 피해가 심한 클론은 72-31로 1.57이었다.

Rawlinson *et al.*(2004)의 보고에 의하면 매립이 완료된 쓰레기 매립지에 식재된 수목이 생장하는데 여러 가지 쓰레기 매립지의 환경 요인들이 불리하게 작용한다고 하였다. 주로 CH_4 , CO_2 , 부족한 O_2 함량, 토양의 과습과 영양 문제, 토양 깊이, 침출수 등에 의해 죽거나 생장에 지장을 받게 되는데 21개 수종을 11개 매립지에 식재해 본 결과 생존율과 생장은 수종에 따라 다르고 각 site와 plot 내에서도 변이가 큰 것으로 나타났다. 스웨덴에서는 버드나무 단벌기(3~5년) 재배에 도시하수, 매립지 침출수, 산업 폐수, 하수 슬러지 등을 이용하여 지역난방 연료용 biomass을 생산하고 이들 폐수를 버드나무를 이용하여 정화하고 있으며, 적절한 수종 및 클론을 선발하여 실용화하고 그 면적만도 16,000ha에 달하고 있다. 생산량은 건중량으로 평균 6~12톤/ha/year이며, 10톤/ha/year을 생산하면 50 kg의 질소 오염물질을 제거할 수 있다고 하였으며(Dimitriou와 Aronsson, 2005), 임지내 미생물에 의한 탈질화, 축적 등을 고려하면 연간 200 kg 이상을 제거할 수 있다고 하였다(Aronsson와 Perttu, 2001). Isebrands(2006)은 포플러와 버드나무 클론들이 오염 지역의 오염원 정화에 가장 적합한 수종 혹은 품종으로 보고하였으며, 세계 각국의 이용 현황을 보고 한 바 있다.

결론

쓰레기 매립지에 식재된 포플러 및 버드나무 12클론의 9년간 생장을 조사해 본 결과 수고 및 흉고직경 생장은 각 연도별 클론 간에 고도의 통계적 차이가 인정되었다. 이

태리포플러(Eco28)가 생존율은 비교적 저조하였지만 수고와 흉고직경 생장에서 가장 우수하였으며 그 다음으로 현사시 3호(Clivus)와 수원포플러도 우수한 생장을 보였다. 매립이 진행되는 동안 각종 가스와 열악한 생육 조건 때문에 생장이 둔화되는 경향을 보이다가 매립이 완료되면서 생장이 호전되었다. 식재 후 9년째 생존율은 Clivus가 73%로 가장 우수하였고 양황철(62-62)이 25%로 가장 저조하였다. 활력, 낙엽률 및 균류나 천공충에 의한 피해도 역시 조사 기간 9년간 각 클론 간에 대부분 연도별로 통계적 차이가 확인되었다. 버드나무는 활력이 가장 좋고 낙엽률, 엽피해, 천공충 피해도 가장 적게 받았으며 그 다음으로 현사시 클론들이 우수한 결과를 보였다. 대부분의 현사시 클론과 버드나무 클론들이 매립지 환경의 다양한 스트레스에 적응력이 강한 것으로 나타난 반면 양황철은 스트레스에 아주 민감하게 반응하였다.

김포수도권매립지와 비슷한 환경에 보급할 수 있는 클론을 선발하기 위하여 조사 항목별 가중치를 적용하였다. 가중치는 필자 나름대로 열악한 환경 조건에 생존이 가능해야 하므로 우선 생존율을 40%, 생장(수고, 흉고직경)을 30%, 각종 피해(활력도, 낙엽률, 잎과 천공충 피해)를 30%로 적용하여 종합하였다(Table 4). 가장 우수한 클론은 현사시 3호(Clivus)로 생존율 1위, 생장 2위, 각종 피해에 대한 내성 3위로 평가되었으며, 종합 점수 91.6으로 타 클론에 비하여 10점 이상 월등히 우수하였다. 그러므로 한 클론만 선발한다면 현사시 3호가 되지만 또 다른 피해에 대한 mono-clone의 위험이 있으므로 추가하여 선발하면 버드나무 2 클론(131-25, 131-27), 현사시 4호 2 클론(72-9, 72-16)을 선발할 수 있다. 이들 5클론은 수도권매립지와 유사한 지역에 보급할 수 있을 것으로 판단된다.

인용문헌

1. 구영분, 김인식, 여진기, 이상현, 주창한. 1999. 속성수를 이용한 쓰레기 매립지 침출수 및 오염토양의 정화. 포플러 16: 26-36.
2. 구영분, 여진기, 김인식, 김태수, 김영중, 여인선. 2002. 포플러 및 버드나무 클론의 수도권매립지 적응성 검증. 한국임학회지 91(3): 405-411.
3. 구영분, 이성규, 김관기, 변광옥, 우수영. 1997. 난지도 폐기물 매립지의 포플러 생장 및 오염물질 흡수 가능성. 포플러 14: 23-32.
4. 김관기, 김선희, 이상모, 이철호, 이은주. 2002. 김포 수도권 매립지에 식재된 현사시나무의 환경 적응 반응(2) -수분생리를 중심으로-. 한국임학회지 91(3): 279-286.
5. 수도권매립지관리공사. 2006. 드림파크백서. 421pp.
6. 정종관, 장원. 1995. 쓰레기 매립지 침출수 거동 예측평가 연구. 환경영향평가 4(1): 9-15.
7. Adarve, M.j., Hernandez, A.J., Gil, A. and Pastor, J. 1998. Boron, zinc, iron and manganese contents in four grassland species. Journal of Environmental Quality 27: 1286-1293.
8. Aronsson, P. and Perttu, K. 2001. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. Forestry Chronicle, 77(2): 293-299.
9. Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Sidoli, C.M.D. and Reeves, R.D. 1994. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. Resources Conserv. Recyc. 11: 41-49.
10. Bowman, M.S., Clune, T.S. and Sutton, B.G. 2002. Sustainable management of landfill leachate by irrigation. Water, Air and Soil Pollution 134: 81-96.
11. Broberg, C.L., Borden, J.H. and Humble, L.M. 2002. Distribution and abundance of *Cryptorhynchus lapathi* on *Salix* spp. in British Columbia. Canadian Journal of Forest Research 32(3): 561-568.
12. Dickinson, N.M. 2000. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils. Chemosphere 41: 259-263.
13. Dimitriou, I. and Aronsson, P. 2005. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. Unasylva 221, 56: 47-50.
14. Dix, M.E., Klopfenstein, N.B., Zhang, J.W., Workman, S.W. and Kim, M.S. 1997. Potential use of *Populus* for phytoremediation of environmental pollution in riparian zones. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RM-GTR-297. 326pp.
15. Gordon, A.M., McBride, R.A. and Fiskin, A.J. 1989a. The effect of landfill leachate spraying on foliar nutrient concentrations and leaf transpiration in a northern hardwood forest, Canada. Forestry 62: 19-28.
16. Gordon, A.M., McBride, R.A., Fiskin, A.J. and Bates, T.E. 1989b. The effect of landfill leachate irrigation on red maple (*Acer rubrum* L.) and sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) seedling growth and on foliar nutrient concentrations. Environmental Pollution 56: 327-336.
17. Greger, M. and Landberg, T. 1999. Use of willow in phytoextraction. International Journal of Phytoremediation 1(2): 115-123.
18. Harrington, D.W. and Maris, P.J. 1986. The treatment of leachate -A UK perspective. Water Pollution Control 85: 45-56.
19. Isebrands, J.G. 2006. Phytoremediation applications with poplars and willows: a worldwide overview. Abstracts of International Poplar Symposium, p108, 146pp. June 5-9, 2006. Nanjing, China.
20. Jones, D.L., Williamson, K.L. and Owen, A.G. 2006. Phytoremediation of landfill leachate. Waste Management 26(8): 825-837.
21. Ke, J. and Skelly, J.M. 1989. An evaluation of norway spruce in northeastern United States. Air Pollution and Forest Decline (J.B. Bucher and I. Bucher-Wallin, eds.). Proc. 14th Int. Meeting for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystems, IUFRO P2.05, Interlaken, Switzerland, Oct. 2-8, 1988. Birmensdorf, 1989. p. 55-60.
22. Light, L.A. and Madison, M. 1995. Using poplar trees as a landfill cover: Experiences with the Ecolotree Cap. Swana 11th Annual Northwest Regional Solid Waste Symposium, Portland, Oregon, April 12-14. 8 pp.
23. Menser, H.A., Winant, W.M. and Bennet, O.L. 1983. Spray irrigation with landfill leachate. Biocycle 24: 22-25.
24. Rawlinson, H., Dickinson, N., Nolan, P. and Putwain, P. 2004. Woodland establishment on closed old-style landfill sites in N.W. England. Forest Ecology and Management 202: 265-280.
25. SYSTAT Software Inc. 2004. SYSTAT 11, Statistics II. SYSTAT Software Inc., Richmond, C.A. 657pp.

(2006년 9월 6일 접수; 2006년 11월 7일 채택)