

자연환경에 노출된 CCA 방부목재로부터 크롬, 구리 및 비소의 용탈 특성

구진회 · 송병열 · 김희갑*

강원대학교 자연과학대학 환경과학과
(2007. 8. 8. 접수. 2007. 12. 2. 승인)

Characteristics of the release of chromium, copper, and arsenic from CCA-treated wood exposed to the natural environment

Jinhoi Koo, Byeongyeol Song and Hekap Kim*

*Department of Environmental Science, Kangwon National University,
Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea*

(Received August 8, 2007; Accepted December 2, 2007)

요약: 이 연구에서는 chromated copper arsenate(CCA)로 처리된 방부목재가 실외환경에 노출될 때 금속들의 용탈 특성을 알아보았다. CCA 방부목재를 수평 또는 토양에 묻은 채 수직으로 1년 동안 노출시켰다. 수평으로 노출된 목재의 옆면에서 매월 드릴로 목재 시료를 채취하였고, 노출이 종료된 후에는 톱밥 시료를 채취했다. 수직으로 노출시킨 목재 주변에서는 표토를, 그리고 깊이별로 토양 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 원자흡광도계(AAS)로 분석하였다. 목재 표면 부위에서의 농도는 경우에 따라 매월 변하였고, 목재가 수평으로 노출된 경우보다는 수직으로 노출된 경우 금속들이 더 많이 용탈되었다. 비소의 경우에는 노출 전에 비해 80% 정도까지 용탈되었다. 또한 지상보다는 지하 부위에서 더 많이 용탈되었으며, 수직으로 세운 말뚝 주변의 토양은 금속으로 오염되었다.

Abstract: This study was conducted to investigate the characteristics of the leaching of metal components from CCA-treated wood during outdoor exposure. CCA-treated wood specimens were placed horizontally or buried vertically into the soil, and then exposed to the natural environment for a year. Wood samples were collected from the side of the horizontal wood specimens using a drill and saw dust samples were collected at the end of the exposure. Soil samples were also obtained around the wood specimens and at different depths of the posts. Wood and soil samples were analyzed for metals using an atomic absorption spectrometer. Monthly metal concentrations varied greatly and more metals were released when wood specimens were exposed vertically than horizontally. Arsenic was released from the wood by 80% of the initial content. In addition, more leaching was observed from the zone below the ground than above the ground, and soil around the posts was contaminated with metals released from CCA-treated wood.

Key words: CCA, arsenic, chromium, copper, leaching, wood preservative.

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)33-250-8577 Fax : +82-(0)33-251-3991

E-mail : kimh@kangwon.ac.kr

1. 서 론

Chromated copper arsenate(CCA)는 크롬, 구리 및 비소의 산화물로 구성된 목재 방부제로서, 전 세계적으로뿐만 아니라 국내에서 가장 널리 사용된 형태는 CrO_3 , CuO 및 As_2O_5 의 비율이 각각 47.5, 18.5 및 35.0%인 CCA-3호(외국의 경우에는 CCA-C)이다.¹ CCA가 국내에 들어와 사용되기 시작한 것은 1983년 이고, 2000년대에 접어들어서부터는 그 사용량이 증가하여 전체 방부목재의 50% 이상을 차지하였으며, 최근 몇 년 사이에는 방부목재의 대부분이 CCA로 처리된 목재일 정도로 널리 사용되었다.² 그 이유로 CCA 방부목재는 처리가 용이하고, 냄새가 없으며, 가격이 다른 방부목재에 비해 저렴하기 때문이다.

그렇지만, CCA 방부목재가 실외환경에 사용되는 동안에, 강우와의 접촉 및 풍화에 의해 구성 금속인 크롬, 구리 및 비소 환경으로 용탈된다는 것이 많은 연구에서 보고되었다.³⁻⁹ 국내에서는 환경부의 지원을 받아 2003년부터 2006년까지 실시된 '비소계 목재방부제(CCA)의 통합적 위해성평가기술 개발'이라는 연구 사업을 통해, 처음으로 CCA 목재의 사용 지역 주변의 토양이 크롬, 구리 및 비소로 오염되는 것을 확인하였으며,² 그 결과의 일부를 논문에 발표하였다.^{7,8}

CCA 방부목재의 사용으로 인해 토양오염으로 인한 생태 위해성이나 목재와의 직접 접촉에 의한 인체(특히 어린이) 노출의 우려가 제기되어, 덴마크, 폴란드, 인도네시아 등 많은 나라에서는 CCA 방부목재의 사용을 전면적으로 금지하였고, 핀란드, 미국, 캐나다 등에서는 사람의 접촉이 일어나지 않는 장소에 대해서만 제한적으로 사용하도록 하고 있다.² 우리나라의 경우에는 2006년도 말부터 CCA의 규제에 대한 본격적인 논의가 시작되었고, 급기야 환경부는 2007년 10월 8일자로 오산화비소(As_2O_5) 및 이를 0.1% 이상 함유한 혼합물질이 목제품에 사용되는 것을 금지하는 고시를 발표했다.

그렇지만, 이와 같은 조치에도 불구하고, 기존에 설치된 CCA 방부목재 시설물들은 규제 이후에도 별도의 처리 없이 수명이 다할 때까지 사용되어, 인체 및 생태계에 끼칠 위해성의 우려가 제기되고 있다. 따라서 기존에 설치된 시설물로부터 CCA 구성 금속성분들의 용탈을 최소화하기 위한 방법들이 제기되었으며, 그 중 한 가지는 표면을 적절한 발수제나 도료를 사용하여 코팅하는 방법이다.^{10,11}

CCA 방부목재는 펜스, 텍, 방음벽, 계단, 통나무집,

피크닉 테이블, 난간 등의 다양한 구조물에 사용되어 왔다. 따라서 목재가 결을 따라 수평으로 사용될 경우와 수직으로 사용될 경우에, 강우와의 접촉 정도와 목재 내부로 빗물이 침투하는 정도가 다르기 때문에 용탈량에 있어서 차이가 날 수 있다. 또한 지상뿐만 아니라 지하에 목재가 묻혀 사용되기도 하므로 토양과의 접촉에 따른 용탈에 대한 연구도 수행될 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 일정한 규격으로 재단한 목재를 수평과 수직(일부분을 토양에 박음)으로 설치한 후, 1년 동안 자연환경에서 강우와 햇빛에 노출시킨 후 목재 내 금속의 농도를 측정해 노출 전후의 용탈률을 비교하고, 또한 수평으로 설치한 목재에 대해서는 시간에 따른 표면 부위에서의 잔류 농도의 변화를 알아보았다. 또한 수직으로 노출된 방부목재 주변의 토양 오염도를 조사하고, 목재에 인접한 토양에서 세 가지 금속의 수직분포를 알아보았다.

2. 실험방법

2.1. 방부목재 설치 및 시료 채취

2.1.1. 수평 노출 실험

2004년 11월 5일에 CCA로 처리된 목재(122 cm × 15.0 cm × 15.5 cm) 세 개를 강원대학교 자연과학대학 2호관 4층 건물의 옥상 바닥에 높이 7 cm의 벽돌을 목재의 양 끝에 받친 후 가로로 누어 놓았다. 12개월의 실험기간 동안에 일별 강수량을 측정하기 위해 목재 옆에는 간이 측우기를 설치하였다(Fig. 1).

12개월의 실외 노출 기간 동안에 목재의 표면은 강우와 접촉하게 된다. 그 뿐만 아니라 목재는 목재 부후균, 곤충 등의 생물적 원인 및 자외선, 바람 등의 비생물적인 원인에 의해 열화되어 강우의 침투가 더 용이하게 됨으로써 강우에 의한 용탈이 증가될 수 있다. 목재 내부로부터 크롬, 구리 및 비소의 표면으로의 재분포를 평가하기 위해, 목재의 옆쪽에서 목재 시편마다 한 달 간격으로 매월 3 cm의 깊이까지 직경 0.7 cm의 드릴을 사용하여 목재 시료를 채취하였다(시료마다 세 개의 드릴 구멍을 뚫어 나온 목재시료를 혼합함). 따라서 총 12회에 걸쳐 모두 36개의 시료를 채취하였다.

실험 기간이 종료된 후에는 실험실로 목재를 운반한 후, 각 시편마다 톱을 사용하여 세 곳의 단면을 잘라 톱밥 시료를 채취하였다. 이는 금속에 대해 분석해 노출 전에 목재의 단면을 톱으로 절단하여 얻는 톱밥

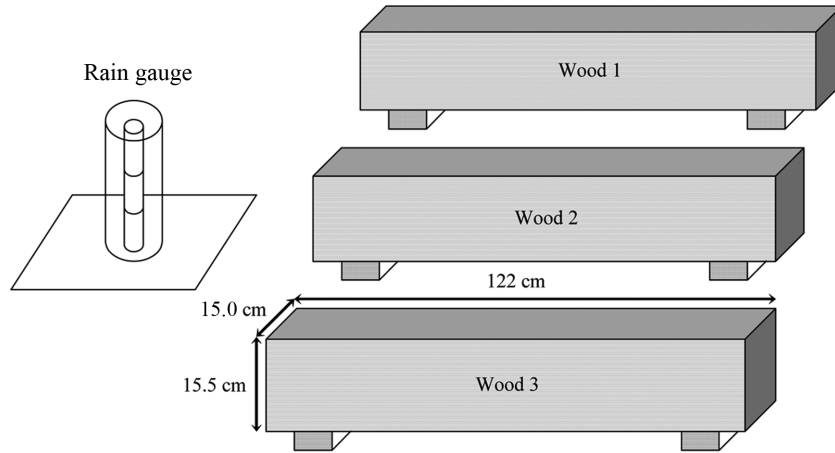


Fig. 1. Wood specimens on the rooftop of a four-story building with a rain gauge.

시료 내 금속의 농도와 비교하였다.

2.1.2. 수직 노출 실험

수평 노출 실험이 시작된 같은 날짜에 동일한 규격의 방부목재 세 개를 받 토양에 25 cm의 깊이까지 수직으로 세워 묻었다(Fig. 2). 설치된 목재는 12개월 동안 자연환경에 노출시켰다가 토양 및 목재시료를 채취하였다.

토양 시료는 세 개의 목재가 묻혔던 바닥의 중심부(A)에서의 수직 시료(A), 목재와 접촉한 옆면(B), 그리고 목재 설치 지역 주변의 표토로 구분하여 채취하였다. 수직 시료 A는 코어(core) 샘플러를 사용하여 목재 바닥이 닿은 지면에서부터 5 cm의 구간으로 나누

어 20 cm(A-1 및 A-2) 또는 25 cm(A-3)의 깊이까지 채취하였다. 토양 시료 B도 각 목재가 설치되어 있던 세 개의 지점에서 5 cm의 구간으로 나누어 다섯 개씩 채취하였다. 표토 시료는 목재가 설치된 지점으로부터 30 cm 이내의 거리에서 표토(깊이 0-5 cm)를 혼합하여 모두 8개의 시료를 채취하였다. 또한 목재가 설치된 지점으로부터 10 m 이상 떨어진 지점에서 7개의 대조 표토 시료를 채취하였다.

실험실로 회수한 각 목재는 지상 30 및 60 cm, 지표와 접촉한 면, 그리고 지하 10 cm로 구분해 톱을 사용해 절단하였고, 이 때 나오는 톱밥을 시료로 채취하였다. 이와 같이 얻은 시료는 실외 노출 전에 목재 단면을 톱으로 절단하여 얻은 톱밥 시료와 CCA의 세

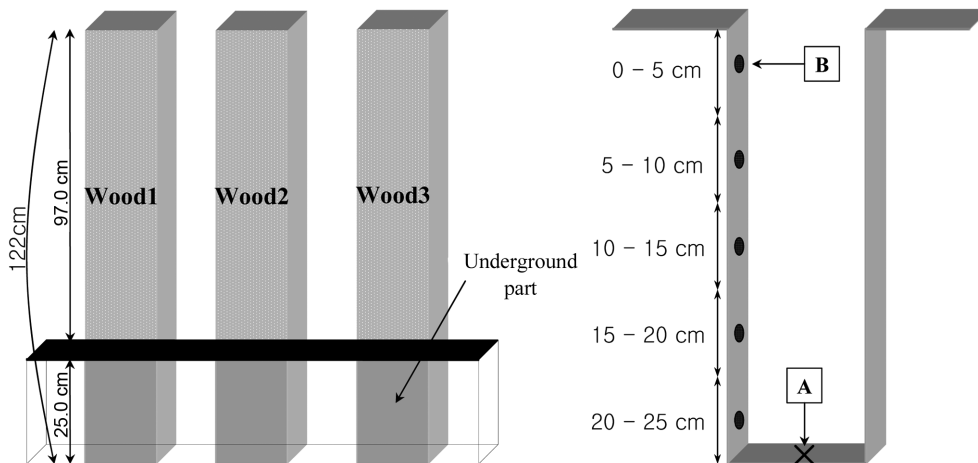


Fig. 2. Three posts were buried in the soil to the depth of 25 cm, and soil profile samples were collected at point A using a core sampler and at the adjacent sides (B) of each post.

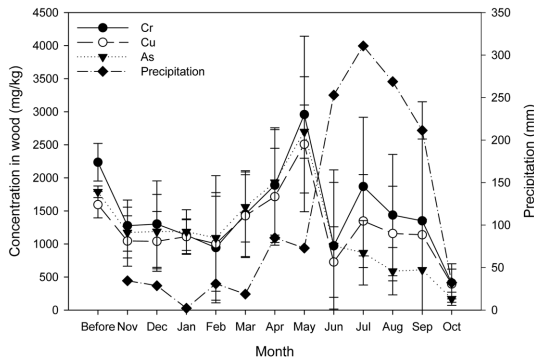


Fig. 3. Monthly variations of the concentrations of chromium, copper, and arsenic in rooftop wood samples and monthly variations of precipitation during the experimental period.

가지 중금속 성분에 대해 분석하여 비교하였다.

2.2. 토양의 물리화학적 성질 측정

토양 시료는 상온에서 2일 동안 건조한 후, 10 mesh(<2 mm) 체로 걸러주고, 체를 통과한 시료 중 12 개를 막자사발에 넣어 분쇄한 후 일부 물리화학적 성질에 대해 분석하였다.

토양의 pH는 시료 10 g에 초순수 10 mL을 넣고 30분 동안 잘 섞어준 후에 측정하였다.¹² 전기전도도 (electrical conductivity, EC)는 물과 토양을 1:1(v/v)로 혼합한 후에 측정하였다.¹² 토양 중 유기물의 함량 (organic matter content, OM %)은 강열감량(loss-on-ignition)법에 따라 측정하였으며, 이 때 사용한 온도는 105 및 400 °C이었고, 가열시간은 각각 4시간이었다.¹³ 토양의 입자 크기(soil texture)는 Bouyoucos hydrometer 방법에 따라 측정하였다.¹⁴

2.3. 중금속 분석

건조한 토양 시료 1 g은 U.S. EPA Method 3051A에 따라¹⁵ 진한 질산(케미탁) 10 mL로 150 °C에서 20분 동안 Questron Technologies 사의 EnviroPrep Q45 마이크로웨이브 추출시스템으로 추출하였다. 추출액은 상온으로 식힌 후 Whatman No. 5 paper filter(pore size 2.5 µm)와 Whatman hydrophilic PVDF syringe filter(pore size 0.2 µm)로 차례대로 여과하였다. 여과액은 초순수(18.2 MΩ)로 100 mL까지 희석한 후, Varian 사의 Spectra AA-400 원자흡광광도계로 크롬, 구리 및 비소에 대해 분석하였다. 크롬과 구리는 flame-AA로, 그리고 비소는 hydride-AA 방법으로 각

각 분석하였다.

토양 시료 중 크롬, 구리 및 비소의 분석에 대한 재현성으로 나타난 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)는 6.1-9.3 %이었으며, 토양 매트릭스에 표준액을 spike한 후 계산한 회수율은 각각 84.0-96.2 %이었다. 또한, 바탕 시료를 일곱 번 분석하여 얻은 표준편차를 이용하여 추정된 방법검출한계(method detection limit, MDL)는 크롬, 구리 및 비소에 대해 각각 1.4, 0.68 및 0.04 mg/kg이었다. 목재시료는 0.1 g을 토양시료와 동일한 방법으로 전처리하여 AAS로 분석하였으며, 회수율은 99.0-111 %, 방법검출한계는 각각 13, 7.0 및 0.4 mg/kg이었다. 또한, 크롬, 구리 및 비소의 분석에 대한 재현성으로 나타난 상대표준편차는 6.0-8.3 %이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상 자료

실험기간 동안인 2004년 11월부터 2005년 10월 사이의 기상 자료는 Table 1에 정리하였다. 총 강수량은 1,349 mm이었으며, 이 중에서 6월부터 8월 사이의 강수량은 1,044 mm로 전체 강수량의 77 %를 차지하였다. 실험기간 동안의 최저기온은 -8.5 °C이었고, 최대기온은 29.6 °C이었으며, 월별 평균 기온은 1월의 최저 -4.0 °C부터 7월의 최고 25.4 °C까지 분포하였다. 5월부터는 간이 측우기로 받은 물의 pH와 전기전도도(EC)를 측정하였는데, 5월부터 10월까지의 월 평균 pH는 각각 5.2, 4.9, 4.3, 4.5, 4.6 및 4.3이었으며, pH의 범위는 3.7-6.4이었고, 평균은 4.6이었다. 5월부터 10월까지의 월 평균 EC는 각각 44.9, 22.9, 28.5, 18.2, 11.9 및 9.3 µS/cm 이었고, 측정된 모든 EC의 최소값은 4.0, 최대값은 74.8, 평균은 각각 21.6 µS/cm이었다.

3.2. 수평 목재 월별 잔류량

목재를 수평으로 설치한 후 4개월 이내에 목재의 표면 근처(0-3 cm)에서 크롬, 구리 및 비소의 농도는 초기에 비해 낮기는 하였지만, 큰 변동은 없는 상태로 유지되었다. 그렇지만, 5개월이 되었을 때인 3월 시료에서부터 농도가 증가하기 시작하여 4월 시료에서 더 높아지고 5월 시료에서는 가장 높은 농도를 기록하였다.

이와 같은 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. 11월에 설치한 목재는 겨울을 지나고 봄이 되면서 열에 의해 폭 방향으로 다소 팽창하면서 약간의 갈라짐 현상이 발생하였다. 이로 인하여 비록 많은 양은 아니지

Table 1. Average monthly temperature and precipitation in Chuncheon during the field exposure

Month	Rain events	Precipitation (mm)	Average temperature (°C)			pH	EC (µS/cm)
			Minimum	Maximum	Average		
November	4	34.5	1.4	14.2	6.2	- ^a	-
December	7	28.7	-6.9	5.6	-0.1	-	-
January	3	2.2	-8.5	3.4	-4.0	-	-
February	5	31.0	-7.1	3.5	-3.1	-	-
March	8	18.8	-3.1	9.2	3.9	-	-
April	7	85.0	9.5	22.1	12.9	-	-
May	8	73.0	10.6	22.1	17.1	5.2	44.9
June	13	252.8	19.6	26.4	23.0	4.9	22.9
July	14	310.7	20.7	29.6	25.4	4.3	28.5
August	17	268.7	17.0	29.0	24.5	4.5	18.2
September	10	211.4	15.6	26.2	20.3	4.6	11.9
October	6	32.3	6.0	19.9	12.8	4.3	9.3

^aNot measured.

만, 이 기간 동안에 내린 빗물이 목재 내부로 침투하면서 CCA 구성 금속의 표면으로의 이동을 일으켰을 것으로 생각된다.

그러다가 6월에는 목재 외부의 금속들의 농도가 크게 감소하였다. 이는 6월에 내린 강우량이 많아(253 mm) 표면 부위에 있던 성분들이 물과의 접촉에 의해 용탈되었기 때문으로 생각할 수 있다. 7월에는 강우량이 가장 많아 311 mm에 달했으며, 8월과 9월에도 7월보다는 농도는 낮았지만 평균 잔류 농도가 7월과 유사한 수준을 나타냈다. 이 기간 동안에는 많은 양의 비가 내리면서 표면 부분에 있던 성분들, 특히 비소의 용탈을 촉진시키는 것을 볼 수 있다. 그렇지만, 시간당 강우량(강우 속도)이 많아 강우량에 비해 빗물이 목재와 접촉하는 양이 적어 실제로 목재 내부로부터 표면 쪽으로 이동되는 양은 상대적으로 낮았던 것으로 판단된다.

이와 같은 결과는 같은 양의 강우와 접촉할 때 강우 속도(mm/hr)가 낮을수록 용탈되는 양이 더 많다는 결과 보고와도 일치한다고 볼 수 있다.¹⁶ 즉, 단 시간에 많은 양의 비가 내릴 경우에는 목재 표면과의 강한 충돌로 인해 표면 부위의 금속은 쉽게 용탈시키는 반면에, 목재와 접촉되는 빗물의 양이 적게 됨으로써 목재 내부로 침투하는 양이 적어 상대적으로 더 적은 양이 용탈된다는 것을 의미한다.

세 성분 중에서 비소의 평균 잔류 농도가 가장 낮아 초기 농도의 절반에도 미치지 않았으며, 구리는 초기보다 약간 낮은 수준으로, 그리고 크롬은 세 성분 중 가장 높은 수준으로 잔류하여 봄철의 농도보다도

높았다. 이로 미루어 볼 때, 세 가지의 금속들 중에서 목재로부터의 용탈은 비소>구리>크롬의 순서로 용이하게 일어나는 것을 알 수 있다. 그러다가 10월에 이르러서는 강우량이 감소하고, 표면에서 많은 부분이 용탈되어 제거됨으로써 세 성분들의 농도가 모두 낮게 측정되었다.

Stilwell 등은 1년 또는 2년 동안 판자 형태의 CCA 방부목재를 실외에 노출시킨 후 표면에서의 크롬, 구리 및 비소의 단위면적 당 양을 측정할 결과, 어떤 일정한 경향을 나타내는 대신에 불규칙한 양상을 나타내, 종종 초기보다도 오히려 더 높은 결과를 나타내기도 했다.¹⁷ 이와 같은 결과는 이 연구에서와 비슷한데, 그러한 근본적인 이유는 목재 내부에 있던 CCA 성분이 표면 쪽으로 이동하여 재분포 되었기 때문이다. 따라서 이와 같은 결과를 해석하기 위해서는 강우량, 강우 속도, 온도 등과 같은 인자를 고려해야 한다.

3.3. 수평 및 수직 용탈률 비교

Table 2에는 1년 동안의 노출이 종료된 후 수평으로 놓인 목재와 수직으로 설치된 목재 내 금속 성분들의 농도와 노출 전의 농도를 비교하여 초기 대비 용탈된 비율을 보여주고 있다. 수평으로 노출되었을 때, 크롬, 구리 및 비소의 용탈률은 각각 9.90, 17.6 및 36.3%로, 비소>구리>비소의 순이었다. 반면에, 수직으로 노출된 목재의 경우에는, 지상 60 cm를 제외하고 모두 수평으로 노출된 경우보다 모두 훨씬 더 많이 용탈되는 것을 알 수 있었다. 지상 부위와 지하 부위의 용탈률은 차이가 있어, 토양 속에 묻혀 있는 경우에 더 많

Table 2. The average concentrations of chromium, copper, and arsenic in saw dust samples for horizontal and vertical settings before and after outdoor exposure, and the average percentages of the metals released from the treated wood

Group		Cr (mg/kg)		Cu (mg/kg)		As (mg/kg)		
		Mean(±sd) ^a	% Released	Mean(±sd)	% Released	Mean(±sd)	% Released	
Horizontal exposure	Before	2157(±63)	-	1425(±26)	-	1945(±248)	-	
	After	1944(±80)	9.9	1175(±26)	17.6	1239(±94)	36.3	
Vertical exposure	Before	3343(±793)	-	1818(±426)	-	3108(±1795)	-	
	After	60 cm above	2320(±50)	30.6	1520(±325)	16.4	932(±445)	70.0
		30 cm above	2206(±656)	34.0	1373(±414)	24.5	512(±186)	83.5
		Ground surface	1677(±207)	49.8	1014(±120)	44.2	394(±65)	87.3
		10 cm below	1503(±30)	55.0	950(±22)	47.8	481(±76)	84.5

^aStandard deviation of three measurements.

Table 3. Comparison of the concentrations of the CCA metals in surface soil samples collected around the posts with those in background surface soil samples

Descriptive statistics	Cr (mg/kg)			Cu (mg/kg)			As (mg/kg)		
	Range	Median	Mean(±sd) ^a	Range	Median	Mean(±sd)	Range	Median	Mean(±sd)
Surface soil	14.2-25.7	17.9	18.6(±4.11)	26.3-72.0	44.3	44.8(±15.3)	4.08-28.0	7.62	9.58(±7.55)
Background	3.78-9.70	7.14	6.60(±2.14)	17.0-93.9	42.3	41.8(±26.8)	1.59-2.89	2.21	2.15(±0.40)

^aStandard deviation.

이 용탈되어, 크롬의 경우 지상에서는 30 % 정도였으나 지하에 묻힌 부위에서는 50 % 정도였다. 구리의 경우에는 지상에서 20 %, 그리고 지하에서는 45 % 정도였고, 비소의 경우에는 지상에서 70-84 %, 그리고 지하에서는 85 % 정도였다. 따라서 크롬과 구리는 토양에 묻힌 경우에 용탈률이 크게 증가하며, 특히 구리의 경우에 약 2배 정도 용탈이 더 높은 것을 볼 수 있었다. 반면에, 비소는 크롬과 구리에 비해 용탈률이 매우 높아 지상 60 cm에서는 70 %, 나머지 세 지점에서는 모두 80 %를 넘을 정도로 대부분이 용탈되었다. 수평 노출과는 달리, 수직으로 노출시켰을 때 세 금속의 용탈률은 비소>크롬>구리의 순이었다. 따라서 1년 동안의 실외 노출에 의해 용탈이 일어날 때, 수평으로 노출되는 경우보다 수직으로 노출될 경우에 목재의 절단면을 따라 빗물이 스며들어 용탈률이 크게 높은 것을 알 수 있었다.

3.4. 토양에서의 농도 분포

토양의 pH는 6.77-8.02(중앙값 7.46; 평균값 7.43)로 중성의 범위에 있었으며, 전기전도도는 126-197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (중앙값 163 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 평균값 162 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이었다. 유기물의 함량은 2.31-4.89 % (중앙값 3.32 %; 평균값 3.36 %)이었으며, 토성은 sandy loam이나

loam이었다.

Table 3에는 수직으로 노출시킨 목재 주변의 표토 시료와 배경 시료에 대한 기술통계량을 나타냈다. 방부목재 주변의 표층 토양에서 크롬과 비소의 평균 농도는 각각 18.6 및 9.58 mg/kg으로, 배경 시료에서의 농도인 6.60 및 2.15 mg/kg보다 각각 2.8 및 4.5배 높았다. 그렇지만, 구리의 경우에는 크롬과 비소에 비해 배경농도보다 약간 더 높은 정도였다(44.8 vs. 41.8 mg/kg). 표토 시료와 배경 시료를 student-t 검정(양측)을 통해 평균을 비교한 결과, 크롬과 비소는 5 %의 유의수준에서 서로 통계적으로 유의한 차이가 있는 반면에(크롬 P -값 3.27×10^{-6} ; 비소 P -값 0.015), 구리는 유의한 차이가 없었다.

말뚝의 중심부 바로 아래 지점인 A에서의 깊이별 금속 성분의 농도 분포를 보면, 구리와 비소는 목재와 인접한 부분인 0-5 cm의 깊이에서만 농도의 증가가 나타났지만 크롬은 그러한 양상을 나타내지 않았다(Table 4).

또한 말뚝이 토양에 묻혀있는 부분의 인접한 옆면에서 토양을 채취하여 분석한 결과, 지표에 가까운 깊이인 0-5 cm에서 세 가지 금속 모두 가장 높은 수준을 나타냈다. 크롬과 구리는 농도의 구배가 나타나지 않았지만, 비소는 깊이에 따라 농도가 계속 감소하는

Table 4. The soil profile distributions of chromium, copper, and arsenic concentrations at sampling point A for three posts

Depth (cm)	Concentration (mg/kg)		
	Cr	Cu	As
0-5	12.2(±3.9) ^a	16.4(±7.0)	12.3(±5.9)
5-10	18.7(±1.6)	13.0(±3.6)	5.98(±2.51)
10-15	23.5(±5.3)	10.7(±1.5)	5.89(±0.68)
15-20	19.5(±4.9)	10.4(±7.8)	6.39(±1.11)
20-25 ^b	29.8	17.0	8.17

^aMean (±standard deviation).

^bOnly a single sample was collected at this depth.

Table 5. The soil profile distributions of chromium, copper, and arsenic concentrations at sampling point B for three posts

Depth (cm)	Concentration (mg/kg)		
	Cr	Cu	As
0-5	26.0(±5.3) ^a	45.6(±36.5)	89.3(±33.7)
5-10	18.4(±1.2)	22.4(±5.7)	54.9(±14.9)
10-15	18.0(±2.8)	27.4(±1.4)	26.3(±10.0)
15-20	21.3(±8.9)	27.7(±2.8)	18.7(±11.7)
20-25	18.9(±3.6)	24.6(±6.1)	11.6(±5.0)

^aMean (±standard deviation).

경향을 나타냈다(Table 5). 그리고 비소의 농도는 배경 농도보다 크게 증가하여, 지표 근처에서는 89.3 mg/kg 을 기록해 배경 농도인 2.15 mg/kg보다 무려 40배 이상 높아 세 성분 중에서 비소의 용탈이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 비소의 경우 농도 구배가 나타나는 것은 지상에 비해 지하 부위에서의 비소의 용탈이 다소 더 용이하게 일어나지만, 지상 부위에서 목재의 총 부피가 크기 때문에 용탈량이 더 많고 용탈된 비소가 지표로 용탈되어 지표에서의 농도 증가에 기여했기 때문으로 생각된다.

미국 플로리다 주에서 실시한 실험에서, 말뚝 주변과 바로 아래의 토양에서 세 가지 금속의 분포를 조사하였는데, 인접한 토양에서 금속의 농도가 증가하였지만 목재로부터 거리와 깊이에 따라 그 농도가 감소하는 것이 보고되었다.¹⁸ Robinson 등에 의한 연구에서는 말뚝을 60 cm의 깊이에 묻고 1-3년이 경과한 후 목재와 토양 시료를 채취하여 분석한 결과, 세 가지 금속의 농도는 목재의 지상 부위보다는 지하 부위에서 낮아 토양에 묻혀 있는 곳에서 더 용탈이 쉽게 일어나는 것을 알 수 있었다.¹⁹

금속에 따라 토양에서 농도 분포가 다른 것은 토양

에서 이동성의 차이 때문이다. 구리의 경우에는 일반적으로 양이온의 형태로 존재하기 때문에, 특히 phenolic group이나 carboxylic acid group과 같은 유기물 리간드와 강하게 결합하고,^{20,21} 크롬은 양이온 또는 중성의 형태로 존재하며,²² 비소는 중성 또는 대부분 음이온의 형태로 존재하기 때문인 것으로 알려져 있다.²³ 이와 같은 금속의 토양 내에서의 이동성 차이 때문에 토양으로 용탈된 금속 중 크롬과 구리는 목재에 인접한 곳에 영향을 미치는 반면에, 비소는 비교적 먼 거리까지 재분포 되어 약 1 m 정도까지도 영향을 끼칠 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

실외환경에 노출된 CCA 방부목재로부터 크롬, 구리 및 비소의 용탈은 목재가 어떤 방향으로 설치되어 사용되는지, 그리고 토양과의 접촉 여부에 따라 달라진다. 1년 동안의 노출을 통해 금속들의 용탈은 수평보다는 수직으로 사용될 때 단면을 통해 목재 내부로 빛물의 침투가 용이하여 더 많이 용탈되고, 지상 부위보다는 지하에서 토양과 접촉함으로써 용탈이 더 용이하게 일어나는 것을 알 수 있다.

목재 표면 부위에서 CCA 금속의 농도는 강우량과 더불어 강우 속도에 영향을 받아 계절적인 변동을 나타냈다. CCA 금속들은 목재 내부에서 물의 침투에 의해 표면 쪽으로의 재분포가 일어나며, 그 정도는 목재 내 물의 양에 의해 결정되는데 강우 속도가 느린 경우에 더 많은 침투가 일어난다. 반면에, 여름에 폭우가 내릴 경우에는 표면에 존재하는 금속들의 제거는 용이하게 일어나지만, 강우가 목재와 접촉되는 정도가 강우량에 비해 적어 표면 부위에서의 농도는 크게 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 연구를 통해 목재로부터 금속의 용탈은 계절에 따라 큰 차이를 보이고, 어떻게 설치되어 사용되느냐에 따라서도 크게 달라짐을 알 수 있다. 특히 수직으로 놓여 사용될 경우에, 비소는 거의 대부분이 용탈되어 방부목재로서의 기능을 다하지 못할 뿐만 아니라, 근처의 환경에 미칠 영향이 우려된다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업(091-031-019)에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. American Wood Preservers' Association (AWPA), American Wood Preservers' Association Book of Standards, Granbury, TX, USA, 1999.
2. 박정규, 신용승, 김희갑, 김동진, 이용석, 황인영, 이동흡, 김윤관 외 17, 비소계 목재방부제(CCA)의 통합적 위해성평가기술 개발, 환경부, 2006.
3. D. E. Stilwell and K. D. Gorny, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **58**, 2-9(1997).
4. J. A. Hingston, C. D. Collins, R. J. Murphy and J. N. Lester, *Environ. Pollut.*, **111**, 53-66(2001).
5. T. Chirenje, L. Q. Ma, C. Clark and M. Reeves, *Environ. Pollut.*, **124**, 407-417(2003).
6. T. Townsend, H. Solo-Gabriele, T. Tolaymat, K. Stook and N. Hosein, *Soil Sediment Contam.*, **12**, 779-798(2003).
7. S. Lebow, D. Foster and J. Evans, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **72**, 225-232(2004).
8. H. Kim, D.-J. Kim, J.-G. Park, Y. S. Shin, I. Y. Hwang and Y. K. Kim, *J. Kor. Soc. Soil Groundwat. Environ.*, **11**, 54-64(2006).
9. H. Kim, D.-J. Kim, J. Koo, J.-G. Park and Y.-C. Jang, *Sci. Total Environ.*, **374**, 273-281(2007).
10. U. S. CPSC, Evaluation of the Effectiveness of Surface Coatings in Reducing Dislodgeable Arsenic from New Wood Pressure-Treated with Chromated Copper Arsenate (CCA), May, 2005.
11. U.S. EPA, Evaluation of Effectiveness of Coatings in Reducing Dislodgeable Arsenic, Chromium, and Copper from CCA Treated Wood, May, 2005.
12. J. B. Jones, Laboratory Guide for Conducting Soils Tests and Plant Analysis, CRC Press, 2001.
13. E. Bendor and A. Banin, *Soil Sci. Plant Anal.*, **20**, 1675-1696(1989).
14. G. J. Bouyoucos, *Soil Sci.*, **4**, 225-228(1936).
15. U.S. EPA, EPA Method 3051A-Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils, 1998.
16. S. Lebow, D. Foster and P. Lebow, *Forest Prod. J.*, **54**, 81-88(2004).
17. D. Stilwell, M. Toner and B. Sawhney, *Sci. Total Environ.*, **312**, 123-131(2003).
18. J. J. Morrell and J. Huffman, *Wood Fiber Sci.*, **36**, 119-128(2004).
19. B. Robinson, M. Greven, S. Green, S. Sivakumaran, P. Davidson and B. Clothier, *Sci. Total Environ.*, **364**, 113-123(2006).
20. L. D. Tyler and M. B. McBride, *Soil Sci.*, **134**, 198-205(1982).
21. E. Tipping, *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, **73**, 117-131(1993).
22. B. M. Sass and D. Rai, *Inorg. Chem.*, **26**, 2228-2232(1987).
23. P. H. Masscheleyn, R. D. Delaune and W. H. Patrick, *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 1414-1419(1991).