

〈Review paper〉

산림 대상 석회 시용의 연구 경향과 산림생태계에 미치는 영향

김주섭 · 장한나 · 노유진 · 한승현 · 손요환*

고려대학교 대학원 환경생태공학과

Research Trends of Forest Liming and the Effects of Liming on Forest Ecosystems

Jusub Kim, Hanna Chang, Yujin Roh, Seung Hyun Han and Yowhan Son*

Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Abstract - The current study aimed to review the research trends on forest liming by age, country, and research topics, and seeks to summarize the effects of forest liming on soil, vegetation and water system in forest ecosystems. The recent goals of forest liming have been changed in response to changes in the acid deposition, and related studies have been mainly carried out in Europe and North America, where there is noted a massive forest decline, which was subsequently caused by acid rain. Most forest liming studies are noted to have focused on soil responses, however, the number of studies on the responses of vegetation and water system according to a literature review on the subject were relatively small. Meanwhile, forest liming influenced whole forest ecosystems through interaction between the soil, vegetation and water system as associated with the relevant regions. The changes in soil pH, base saturation, and cation exchange capacity by forest liming were noted as different depending on the soil layer and elapsed time after liming. The responses of vegetation to forest liming were shown in above- and below-ground plant growth and plant nutrient concentration, and also were noted to have varied depending on the available regional plant species and noted specific soil conditions. The chemical properties of the water system were changed similarly to those in the soil, leading to notable changes as seen in the planktons and available fish species in the region. Finally, these results could be used to plan further studies on forest liming, which would significantly benefit regional studies to promote the preservation of the species noted for protection in the region.

Keywords : acidification, ecosystem response, forest ecosystem, liming, watershed liming

서 론

산성강하물에 의한 토양산성화는 산림생태계에 직·간접적으로 영향을 미친다(Kim 2005). 토양 pH가 일정 수준 이

하로 낮아지면 칼슘, 마그네슘, 칼륨 등의 양분 유효도가 감소하고 알루미늄을 비롯한 독성 이온의 이동성이 증가한다(Pawlowski 1997). 또한 토양산성화는 식물 생장에 영향을 미치며, 토양 내 양분 및 독성 이온의 용탈을 일으켜 수계 내 플랑크톤의 변화 및 녹조 발생의 위험이 증가할 수 있다(Koo *et al.* 2016).

* Corresponding author: Yowhan Son, Tel. 02-3290-3469, Fax. 02-3290-3651, E-mail. yson@korea.ac.kr

1970년대 독일 서부 흑림 및 미국의 Hubbard Brook Experimental Forest (HBEF)에서 산성강하물로 인한 임목 쇠퇴 현상 등 산림 피해가 보고되면서(Huettl 1989; Driscoll *et al.* 2001), 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 산림 대상 석회 시용이 제시되었다. 1970년대 이전에도 산림 대상 석회 시용 연구가 수행되었으나, 1980년대 이후 유럽 및 북미 지역을 중심으로 관련 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Huettl and Zoettl 1993; Derome *et al.* 2000; Moore *et al.* 2014). 국내에서도 산성강하물에 의한 산림생태계의 피해가 보고되면서(Kim 2005), 석회 시용 후 토양산성화의 완화와 식물 성장 반응에 관한 연구가 진행되었다(Jung and Lee 1998; Yoo *et al.* 1998; Hwang and Son 2006).

기존 연구에 따르면 석회 시용은 산성화된 산림 토양의 pH를 높여 식물에 필요한 양분 유효도를 증가시키고 알루미늄 및 중금속의 용해도를 감소시켜, 산성화로 훼손된 산림의 건강성을 회복하는 데 도움을 주는 것으로 나타났다(Lawrence *et al.* 2016). 또한 석회 시용으로 인한 토양 pH 변화는 토양 내 생물상에 영향을 주고, 침출수 및 계류수를 통해 인근 수계의 화학적 성질 및 생물상을 변화시킨다(Driscoll *et al.* 1996). 이와 같이 산림 대상 석회 시용의 효과는 토양, 식생, 수계 등 넓은 범위에서 나타나므로 이에 대한 종합적인 영향 분석이 필요하다. 그러나 산림을 대상으로 한 광범위한 석회 시용 연구는 유럽 및 북미 지역에서 수행된 몇 가지 사례(Kreutzer 1995; Driscoll *et al.* 1996; Fuss *et al.* 2015)를 제외하고는 매우 부족한 상황이며, 국내에서 수행된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 산림 대상 석회 시용 연구 관련 기존 문헌을 분석하여 연대별, 국가별, 그리고 주제별 연구 경향을 파악하고, 석회 시용이 산림생태계의 각 요소(토양, 식생, 수계 등)에 미치는 영향을 종합적으로 알아보고자 하였다.

산림 대상 석회 시용의 연구 경향

산림 대상 석회 시용 관련 자료를 분석하기 위하여 Elsevier가 제공하는 학술논문 데이터베이스인 Scopus에서 “Liming”과 “Forest”를 키워드로 하여 729건의 논문을 수집하였고, 이 중에서 산성강하물의 완화와 연관이 있는 335건의 논문을 추출하여 분석하였다. 또한 지역별 산성강하물 유입량에 따른 석회 시용 연구의 경향을 알아보기 위해 Centre on Emission Inventories and Projection (CEIP)에서 제공하는 1980~2015년 사이의 국가별 산성강하물 유입량 자료를 이용하였다.

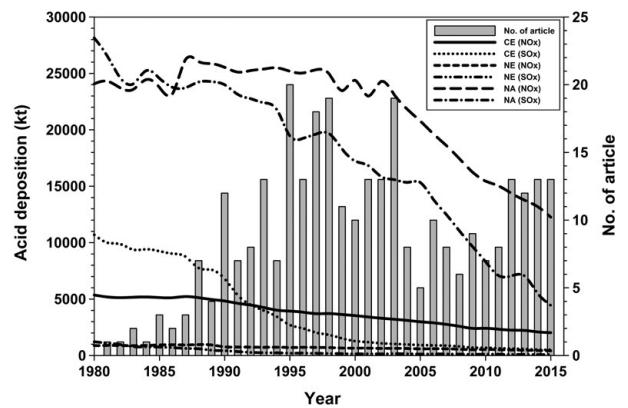


Fig. 1. Number of published articles on forest liming and the amount of acid deposition in Central Europe (CE), North Europe (NE) and North America (NA) during 1980–2015.

1. 연대별 경향

연대별로 산성강하물 유입량의 변화에 따라 산림 대상 석회 시용 연구의 수와 목적이 달라지는 것으로 나타났다(Fig. 1). 산업혁명 이후 유럽 및 북미 지역의 산성강하물 유입량이 지속적으로 증가하여 1980년대 가장 높은 수치를 나타내었다. 그러나 이로 인한 산림 피해는 이미 1970년대부터 인식되기 시작하였고, 이후 피해 산림을 대상으로 한 석회 시용 연구 및 정책이 실시되었다(Hultberg and Gernmfelt 1986; Andersson and Persson 1988; Huettl 1989; Huettl and Zoettl 1993). 1970년대 이전의 산림 대상 석회 시용 연구는 주로 산림 토양 개선 및 임목 성장 증가를 목적으로 하였으나(Huettl and Zoettl 1993; Derome *et al.* 2000; Saarsalmi *et al.* 2011; Reid and Watmough 2014), 산림 피해가 인식된 이후에는 산성강하물의 영향을 완화하여 산림 피해를 줄이기 위한 목적으로 연구가 진행되었다. 1980년대 이후에는 대규모 피해가 발생한 스웨덴, 독일 및 미국을 중심으로 산림과 수계를 포함한 석회 시용 연구가 집중적으로 수행되었으며(Andersson and Persson 1988; Bukaveckas 1988; Huettl 1989; Huettl and Zoettl 1993), 독일과 미국에서는 국제 협력 연구도 수행되었다(Brocksen *et al.* 1988).

1990년대에는 국제적인 대기오염물질 배출 규제 노력으로 산성강하물의 유입량이 전 세계적으로 감소하기 시작하였으며, 기존에 수행된 석회 시용 연구의 결과로 가장 많은 수의 논문이 발표되었다(Fig. 1, Kreutzer 1995; Meiwes 1995; Blette and Newton 1996).

2000년대 이후에도 유럽 및 북미지역에서 산성강하물의 유입량이 지속적으로 감소하여(Fig. 1) 추가적인 산림 피해의 위험성이 낮아져 이전에 비해 석회 시용의 필요성이 감

소하였다 (Lawrence *et al.* 2016). 그리고 산림 대상 석회 시용에 대한 실험 논문의 수도 1990년대에 비해 감소하였으나, 생태계의 종합적인 반응을 정리한 리뷰 논문들이 지속적으로 발표되었다 (Derome *et al.* 2000; Ingerslev *et al.* 2001; Nohrstedt 2001; Saarsalmi and Mälkönen 2001; Donnelly *et al.* 2003; Formanek and Vranova 2003; Lundström *et al.* 2003; Schaaf and Hüttl 2006; Moore *et al.* 2014; Reid and Watmough 2014; Lawrence *et al.* 2016).

그러나 현재까지 많은 산성화된 산림 토양이 여전히 복구되지 않은 상태로 남아있으며, 이에 따른 산림 피해도 지속되고 있다 (Akselsson *et al.* 2013). 이러한 산림이 자연적 과정에 의하여 이전의 상태로 회복되는 것은 지역에 따라 불가능하거나 매우 오랜 시간이 소요될 것으로 추정되기 때문에, 산성화된 산림생태계의 복원을 촉진하기 위한 목적의 석회 시용은 여전히 필요한 것으로 알려져 있다 (Westling and Zetterberg 2007; Lawrence *et al.* 2016).

2. 주요 국가별 경향

산림 대상 석회 시용 관련 연구 논문의 수를 국가별로 분류하면, 유럽 221건, 북미 89건, 기타 국가 15건, 한국 10건 등이었다. 유럽의 경우 북유럽 (노르웨이, 덴마크, 스웨덴, 핀란드)에서 94건, 중앙유럽 (독일, 프랑스, 체코)에서 92건, 그 외 유럽 국가들에서 35건이 보고되어 유럽 내에서도 관련 연구가 일부 국가에 집중되어 있었다.

중앙유럽, 북유럽, 북미 지역에서 발표된 논문의 수가 많은 것은 산성화로 인한 대규모의 산림 피해가 발생한 것과 관련이 있다. 그 외 유럽 국가, 기타 국가 (나이지리아, 멕시코, 브라질, 에티오피아, 호주, 일본, 중국) 및 한국의 경우 유럽 및 북미 지역에 비하여 연구의 규모가 작고 그 수도 적다. 이는 산림 토양 산성화로 발생하는 피해에 대한 인식이 상대적으로 부족하였기 때문으로 보인다. 그러나 2050년에는 중국 및 동남아시아 지역의 산성강하물 유입량이 임계부하량을 초과할 것으로 추정되어, 새로운 지역에서 산성강하물로 인한 산림 피해가 발생할 위험이 크게 나타나고 있다 (Kuylenstierna *et al.* 2001). 또한 석회 시용에 대한 산림생태계의 반응은 장기적으로 나타나는데, 이에 대한 연구가 부족한 상태이다. 따라서 앞으로도 지속적인 산림 대상 석회 시용 연구가 필요하며 다양한 지역에서 수행되어야 할 것으로 판단된다.

한편 환경 조건이나 산성화 피해 양상에 따라, 국가별 연구 경향이 다르게 나타났다. 북유럽 국가의 경우 산림과 수계에 대한 석회 시용 연구가 주로 보고되었다 (Andersson and Persson 1988; Westling and Zetterberg 2007; Löfgren

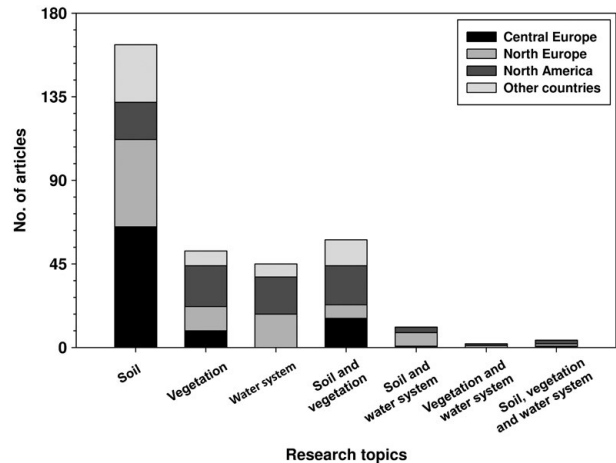


Fig. 2. Number of published articles on forest liming by research topics.

et al. 2009). 이는 북유럽 국가의 산림이 편마암과 화강암을 기반으로 하여 산성강하물의 영향에 취약한 토양과 (Lundström *et al.* 2003), 빙하호가 발달한 지형으로 이루어졌다는 것과 관련이 있는 것으로 볼 수 있다. 중앙유럽의 경우 독일의 연구 사례가 주로 보고되었다. 특히 1980년대 이후 독일 남부 및 북서부 지역에서 집중적인 산림 대상 석회 시용 연구가 진행되었고 (Kreutzer 1995), 대부분 주에서는 현재까지 활발한 석회 시용이 이루어지고 있다 (Reif *et al.* 2014). 미국에서는 뉴욕주 Adirondack 산맥 등 동북부 지역의 호수에서 산성화로 인한 어류 감소의 피해가 크게 나타났으며, 이에 대응하기 위해 수계와 산림 유역을 대상으로 한 석회 시용 사업과 연구가 다수 수행되었다 (Brocksen and Emler 1988; Driscoll *et al.* 1996).

3. 연구주제별 경향

석회 시용 연구의 주제는 석회가 영향을 미치는 생태계 요소인 토양, 식물, 수계 등으로 분류할 수 있으며, 각 주제별 관련 연구 논문의 수는 토양 163건, 식물 52건, 수계 45건 등이었다 (Fig. 2).

석회 시용에 따른 토양의 반응과 관련된 논문의 수는 다른 생태계 요소에 비하여 3배 이상 많았다. 이는 시용된 석회의 대부분이 일차적으로 토양 표면에 도달하며, 토양에서 반응을 나타내고 이어 생태계의 다른 요소들에도 영향을 미치기 때문이다. 석회 시용에 따른 토양 반응은 주로 토양의 화학적 성질 변화를 중심으로 연구되었으며 (Matzner *et al.* 1985; Kreutzer 1995; Schaaf and Hüttl 2006), 이외에도 토양 미생물과 소동물에 대한 영향도 다루고 있다 (Hyvönen and Persson 1990; Potthoff *et al.* 2008; Reid and Watmough

2014).

석회 사용에 대한 식생 및 수계의 반응은 토양의 화학적 성질 변화를 거쳐 이차적으로 나타나므로 토양에 비하여 비교적 연구의 수가 적었다(Fig. 2). 석회 사용 효과는 주로 식생의 경우 임목 성장, 수계의 경우 어류 군집 및 수질에 대하여 연구되었는데, 이는 인간의 생활 또는 경제활동에 직접적으로 영향을 주는 요인이기 때문인 것으로 판단된다(Balcar *et al.* 2011; Long *et al.* 2011; Pabian *et al.* 2012a, b; Moore *et al.* 2014). 수계의 경우 석회 사용의 충격을 줄이고 오랜 기간 지속적인 효과를 나타내기 위해 산림 유역을 대상으로 석회를 사용한 연구가 주로 수행되었다(Warfvinge and Sverdrup 1988; Jenkins *et al.* 1991; Brahmer 1994; Driscoll *et al.* 1996).

두 가지 이상의 연구주제를 다룬 논문의 수는 토양 및 식생 58건, 토양 및 수계 11건, 식생 및 수계 2건, 토양, 식생 및 수계 4건 등이었다(Fig. 2). 토양의 변화와 식생의 반응은 직접적으로 연결되기 때문에 이를 동시에 분석한 연구 논문의 수가 비교적 많았다(Ingerslev 1997; Long *et al.* 1997; Prietzel *et al.* 2008). 또한 석회 사용에 따른 토양 양분 및 중금속 농도 변화는 침출수 및 계류수를 통하여 수계에 영향을 미치므로 토양과 수계를 함께 연구할 필요가 있다. 그러나 식생과 수계를 동시에 연구한 사례의 수는 매우 적었다. 그리고 토양, 식생, 수계 전체를 대상으로 종합적인 영향을 분석한 리뷰 논문은 있으나(Driscoll *et al.* 1996; Moore *et al.* 2014; Lawrence *et al.* 2016), 실험적 논문은 보고되지 않았다.

석회 사용이 산림생태계에 미치는 영향

Table 1에 석회 사용이 산림생태계에 미치는 분야별 영향을 표로 제시하였다.

1. 토양

산림 대상 석회 사용은 일반적으로 토양 pH, 염기포화도(Base saturation; BS), 양이온치환용량(Cation exchange capacity; CEC) 및 Ca^{2+} 농도를 증가시키며, Al^{3+} 과 중금속 농도를 감소시킨다. 그리고 이러한 효과의 대부분은 토양 층위 및 사용 후 경과 시간에 따라 다르게 나타났다.

석회 사용 후 초기 토양 pH 변화는 유기물층에 국한되거나(Andersson and Persson 1988), 유기물층과 무기광물 토양층의 상층부(< 10 cm)에서 나타났다(Matznier *et al.* 1985). 10 cm보다 깊은 토양에서 pH 변화는 나타나지 않았다(Schaaf and Hüttl 2006). 그러나 사용 후 5년 또는 10년

이상 경과한 경우에는 10 cm 깊이 이상의 무기광물 토양층에서도 pH가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다(Moore *et al.* 2012). 이는 석회 사용의 단기적인 효과가 표토층에 국한되는 것을 의미한다. 이러한 깊이에 따라 나타나는 석회 사용 효과의 시간차는 해당 지역의 유기물층이 두꺼울수록 커지며, 석회 사용량이 많을수록 감소하는 것으로 나타났다(Andersson and Persson 1988). 이는 유기물층이 석회 사용의 효과를 완충하기 때문으로 판단된다(Andersson and Persson 1988).

석회 사용에 따른 BS 및 CEC의 변화는 일반적으로 토양 pH 변화와 밀접한 관련이 있다(Kreutzer 1995; Reid and Watmough 2014). 즉 토양 pH와 마찬가지로 석회 사용 후 유기물층에서는 BS 및 CEC의 변화가 뚜렷하였으나, 무기광물 토양층에서는 깊이가 깊어질수록 그 효과는 급격히 감소하였다(Huber *et al.* 2006; Moore *et al.* 2008). 독일 Höglwald 산림의 장기 석회 사용 연구에서 유기물층의 BS는 40~80%로 무기광물 토양층(10% 미만)에 비해 높은 수치를 보였다(Huber *et al.* 2006). Guckland *et al.* (2012)는 석회 사용 후 무기광물 토양층에서 CEC의 변화는 없었으나, 토양 깊이가 깊어질수록 CEC가 감소한다고 보고하였다.

일반적으로 석회 사용 후 토양 내 치환성 Al^{3+} 농도는 감소하는 것으로 보고되었다(Derome *et al.* 2000; Schaaf and Hüttl 2006). 석회 사용으로 토양 용액에서 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 이온의 농도가 증가하면 토양 입자의 양이온 치환 부위에서 H^+ 와 Al^{3+} 이온이 치환되며, 치환된 Al^{3+} 이온은 증가된 토양 용액의 pH에 의해 $Al(OH)_3$ 등의 형태로 침전되어 치환성 Al^{3+} 농도의 감소로 이어진다(Kreutzer 1995).

석회 사용은 산림 토양의 중금속 독성을 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Lautenbach *et al.* 1995; Derome and Saarsalmi 1999). 석회 사용에 따른 토양 pH 증가는 중금속 이온을 침전시켜 토양 용액에서 중금속 농도를 감소시킨다(Kreutzer 1995). 그러나 석회로부터 용해되어 나온 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 이온들에 의해 토양의 양이온 치환 자리에 흡착된 중금속이 방출되어 사용 초기에 일시적으로 중금속 농도가 증가할 수 있다(Derome and Saarsalmi 1999). 한편 석회를 과도하게 사용한 경우 유기물층에서 유기 착화제(Organic complexing agents)의 방출을 촉진하여 중금속의 농도가 증가할 위험도 있다(Kreutzer 1995).

산림 대상 석회 사용은 산성화된 토양 pH를 완화시켜 미생물 바이오매스와 활성을 증가시키며, 토양 동물의 종 풍부도와 분포에 뚜렷한 변화를 일으킨다. 석회 사용 후 미생물 관련 지표의 변화는 토양의 화학적 성질 변화와 동일하게 주로 유기물층에서 나타났고 무기광물 토양층에서는 나타나지 않았다(Zelles *et al.* 1987; Kreutzer 1995). 일반적으로 지

Table 1. Summary of effects of liming on soil, vegetation and water system in forest ecosystems

Factor	Effect			
	Positive	Negative	None or mixed	
(A) Soil				
Top soil (< 10 cm)	< 10 years	pH, BS, CEC (20,33,36,39,42) Ca, Mg (20,33,36,39,42)	Al (39,42) Mn (39)	
	> 10 years	pH, BS, CEC (38,39,44) Ca, Mg (38,39,44)	Al (36,38,39) Mn (39)	
Subsoil (> 10 cm)	< 10 years	pH, BS, CEC (36,39) Ca, Mg (36,39)	Al (36) Mn (39)	pH (33,42) Al (39)
	> 10 years	pH, BS, CEC (39,44) Ca, Mg (39,44)	Al (39) Mn (39)	
Micro-organism	Biomass	<i>Picea abies</i> (33,41,62) <i>Lolium perenne</i> (60) <i>Abies alba</i> (46) <i>Acer saccharum</i> (10)		
	Activity	<i>Pinus sylvestris</i> (2) <i>Abies alba</i> (47)	<i>Pinus sylvestris</i> (54)	<i>Picea abies</i> (67)
Soil fauna		<i>Enchytraeus buchholzi</i> (56) <i>Enchytrona parva</i> (56) <i>Fridericia paroniana</i> (56) <i>Mesenchytraeus cambrensis</i> (56) Endogeic Collembolan (10)	Acidophilic Enchytraeidae (56) Epigeic Collembolan (10)	
(B) Vegetation				
Tree	Above-ground	<i>Acer saccharum</i> (40,44,66) <i>Alnus incana</i> (29) <i>Fagus sylvatica</i> (4) <i>Picea abies</i> (1)	<i>Picea abies</i> (17) <i>Prunus serotina</i> (40)	<i>Acer pseudoplatanus</i> (4) <i>Fagus grandifolia</i> (40) <i>Picea abies</i> (1,53,61) <i>Pinus barikisiana</i> (19) <i>Pinus sylvestris</i> (17,61)
	Below-ground	<i>Fagus sylvatica</i> (45) <i>Picea abies</i> (23,45,58) <i>Pinus sylvestris</i> (25) <i>Quercus petraea</i> (3)	<i>Picea abies</i> (26,51,52)	<i>Fagus grandifolia</i> (57) <i>Larix leptolepis</i> (30) <i>Picea abies</i> (14,52) <i>Pinus sylvestris</i> (14)
Understory vegetation		Biomass (49) <i>Oxalis acetosella</i> (5)	<i>Lycopodium lucidulum</i> (5)	Diversity (15)
Nutrient concentration		Ca (40,43,61) Mg (16,32,40,43)	K (8,43,59) Al (16,28,40), N (4,61)	Al (8)
(C) Water system				
Water chemistry		pH, Ca, ANC (18,37,21,11,24,48) NO ₃ ⁻ (11,12,65), SO ₄ ⁻ (11) DOC (12,6,18)	Al (12,48,65,35) Hg (34), Total P (27)	NO ₃ ⁻ (21), NH ₄ ⁺ (21)
Fish		<i>Salvelinus fontinalis</i> , <i>Salvelinus namaycush</i> (9,13,22)		<i>Perca flavescens</i> (22,50)
Phytoplankton		Biomass (7,55,63)	Biomass (31,50) Species richness (50)	
Zooplankton		Biomass (64) Species richness (63)		Biomass (31)

1) Aldinger and Kremer 1985; 2) Bääth and Arnebrant 1994; 3) Bakker *et al.* 2000; 4) Balcar *et al.* 2011; 5) Brach and Raynal 1992; 6) Bukaveckas 1988; 7) Bukaveckas 1989; 8) Burke and Raynal 1998; 9) Carbone *et al.* 1998; 10) Chagnon *et al.* 2001; 11) Cho *et al.* 2009; 12) Cirmo and Driscoll 1996; 13) Clayton *et al.* 1998; 14) Clemensson-Lindell and Persson 1993; 15) Demchik and Sharpe 2001; 16) Derome and Saarsalmi 1999; 17) Derome 2000; 18) Driscoll *et al.* 1996; 19) Foster *et al.* 1988; 20) Frank and Stuanes 2003; 21) Groffman *et al.* 2006; 22) Gunn *et al.* 1990; 23) Hahn and Marschner 1998; 24) Hall *et al.* 2001; 25) Helmissaari *et al.* 1999; 26) Helmissaari and Hallbäck 1999; 27) Hu and Huser 2014; 28) Huber *et al.* 2006; 29) Huss-Danell 1986; 30) Hwang *et al.* 2007; 31) Jarvinen *et al.* 1995; 32) Jonard *et al.* 2010; 33) Kreutzer 1995; 34) Lawrence *et al.* 2016; 35) Lawrence *et al.* 2013; 36) Li *et al.* 2014; 37) Likens *et al.* 2004; 38) Lofgren *et al.* 2009; 39) Long *et al.* 2015; 40) Long *et al.* 2011; 41) Lützwow *et al.* 1992; 42) Matzner *et al.* 1985; 43) Misson *et al.* 2001; 44) Moore *et al.* 2012; 45) Murach 1988; 46) Neal *et al.* 1992; 47) Neale *et al.* 1997; 48) Newton *et al.* 1996; 49) Pabian *et al.* 2012a; 50) Persson and Appelberg 2001; 51) Persson and Ahlström 1990; 52) Persson *et al.* 1996; 53) Popovic 1992; 54) Priha and Smolander 1994; 55) Renberg and Hultberg 1992; 56) Rusek and Marshall 2000; 57) Safford 1974; 58) Schneider and Zech 1990; 59) Schonau and Herbert 1983; 60) Shah *et al.* 1990; 61) Sikstrom 1997; 62) Smolander and Mälikönen 1994; 63) Stenson and Svensson 1995; 64) Svensson and Stenson 2002; 65) Westling and Zetterberg 2007; 66) Wilmot *et al.* 1996; 67) Zelles *et al.* 1990.

령이는 중성 토양을 선호하며, 강한 산성 조건에서 개체군 밀도와 종 다양성이 매우 낮게 나타난다(Moore *et al.* 2014). 따라서 석회 사용 후 토양산성도가 완화되어 지령이 바이오매스 및 개체수가 증가되었다(Kreutzer 1995). 이와 같은 미생물 활성 및 지령이 개체수 증가는 석회 사용에 의한 낙엽층의 유기탄소화합물 용해도 증가(Kalbitz *et al.* 2000)와 더불어 부식질의 분해를 촉진하였다(Forey *et al.* 2015). 한편 Homan *et al.* (2016)은 북미 지역에서 석회 사용이 외래 종 지령이(*Lumbricus terrestris*)의 침입 가능성을 높일 수 있으며, 이때 낙엽 분해가 과도하게 촉진되어 낙엽층 손실이 발생할 위험이 있는 것으로 보고하였다. 이 외에 석회 사용 후 톱토기목이나 토양 선충은 호산성, 호염기성, 호중성 등의 성질에 따라 군집 구조 및 부화율 등이 다르게 나타났다(Kreutzer 1995; Rusek and Marshall 2000).

2. 식생

석회 사용에 따른 지하부 생장 반응은 세균 동태를 통하여 확인할 수 있다. *Picea abies*와 *Pinus sylvestris* 산림에서 석회 사용 후 세균 바이오매스는 증가하거나(Schneider and Zech 1990; Helmissaari *et al.* 1999), 변화가 없었다(Clemensson-Lindell and Persson 1993). 석회 사용 지역의 양분 유효도에 따라 세균 반응이 다르며, 특히 석회 사용 후 질소 유효도 변화에 따라 세균 동태가 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Persson and Ahlstrom 1990).

지상부 생장 반응의 경우, Reid and Watmough (2014)의 메타분석 결과에 따르면 석회 사용 후 임목 생장에 변화가 없는 경우가 61%로 지배적이었으며, 증가하는 경우가 31%, 감소하는 경우가 8%로 나타났다. 지상부 생장 반응은 종 특이적이며, 초기 토양 pH 및 양분 유효도 등에 따라 다르게 나타났다. 석회 사용에 따른 3가지 수종의 장기적 생장 반응에 대한 연구에서 석회 사용 후 *Acer saccharum*은 생장이 증가하였으나, *Fagus grandifolia*는 생장에 변화가 없었으며, *Prunus serotina*는 일시적으로 생장이 감소한 것으로 보고되었다(Long *et al.* 2011). *A. saccharum*은 산성 토양에 취약하고 칼슘 요구도가 높은 수종이므로 석회 사용 후 생장이 증가한 것으로 판단된다(Moore *et al.* 2014). 이 외에도 임목의 양분 상태에 따라 석회 사용 후 임목 생장이 증가하기도 하는데, *Larix leptolepis* 임분에서 엽내 K/Ca 비율이 개선된 경우에만 임목 생장이 증가하는 것으로 나타났으며(Van den Burg 1991), *P. abies*는 석회와 PK 비료를 함께 사용한 경우 흉고단면적이 증가하였다(Jonard *et al.* 2010).

하층 식생의 경우 석회 사용 후 관목의 반응은 거의 나타나지 않았으며 주로 초본류에서 반응이 나타났다. 초본류

의 반응도 종에 따라 다르지만, 일반적으로 석회 사용 후 하층 식생의 종 다양성과 피복도가 증가하였고(Rodenkirchen 1992; Olsson and Kellner 2002), 토양 내 Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 농도 증가는 하층식생의 생장 증가로 나타났다(Rodenkirchen 1992). 특히 *P. abies* 임분에서 석회 사용 6년 후 하층식생 중 관속식물의 종 수가 50~75% 증가한 것으로 보고되었다(Rodenkirchen 1992).

식물체 내 양분 농도 변화는 석회 사용 후 토양 양분 변화 동태와 유사하게 나타났다(Derome and Saarsalmi 1999; Jonard *et al.* 2010). 즉 석회 사용 후 토양 내 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 농도가 증가하였고, 이는 잎의 Ca과 Mg 농도의 증가로 이어졌다(Røsberg *et al.* 2006). 또한 토양 pH 증가에 따른 Al^{3+} 농도 감소는 식물의 Al^{3+} 흡수를 저해시켜 잎의 Al 농도 감소로 나타났다(Derome and Saarsalmi 1999).

3. 수계

산림 대상 석회 사용의 효과는 침출수 및 계류수를 통하여 토양에서 수계로 전달된다. 토양 표면에 도달한 석회는 서서히 용해되기 때문에, 사용된 석회의 대부분은 토양에 오랜 기간 머물게 되며, 특히 토양 침출수를 통한 석회 사용 효과 전달은 매우 느리게 진행된다(Driscoll *et al.* 1996; Oh and Raymond 2006). 한편 유역에 석회를 사용하면 수계에 직접 석회를 사용하는 것에 비해 급격한 수계의 화학적 성질 변화가 일어나지 않으며 장기간 효과가 지속된다(Newton *et al.* 1996; Lawrence *et al.* 2016).

토양에서 수계로 전달된 석회 사용 효과는 수계의 pH, Ca^{2+} 농도 및 산중화능(Acid Neutralizing Capacity; ANC)을 증가시키고 Al^{3+} 유출을 감소시킨다(Driscoll *et al.* 1996). 아울러 하천과 호수에서 어류 개체군의 종 다양성과 개체수를 증가시킬 수 있다(Clayton *et al.* 1998; Westling and Zetterberg 2007). 유역을 대상으로 한 석회 사용은 수계의 pH를 증가시키고 계절적 변동을 감소시켜, *Salvelinus fontinalis*의 산란 서식지를 확장시키고 개체수를 증가시키는 것으로 나타났다(Schofield and Keleher 1996; Hudy *et al.* 2000). 또한 석회 사용 후 *Perca fluviatilis*와 *Esox lucius*의 체내 수은 농도가 감소하는 것이 관찰되었다(Rask *et al.* 2007).

한편 pH와 가용성 Ca^{2+} 의 증가는 일반적으로 수계의 먹이사슬에서 중요한 역할을 하는 동물성 플랑크톤 및 식물성 플랑크톤의 생장을 촉진하며, 종 풍부도 및 일부 종의 개체수가 증가하는 등 종 구성에도 영향을 준다(Renberg and Hultberg 1992; Järvinen *et al.* 1995; Stenson and Svensson 1995). 그러나 수계에 대한 직접적인 또는 과도한 석회 시

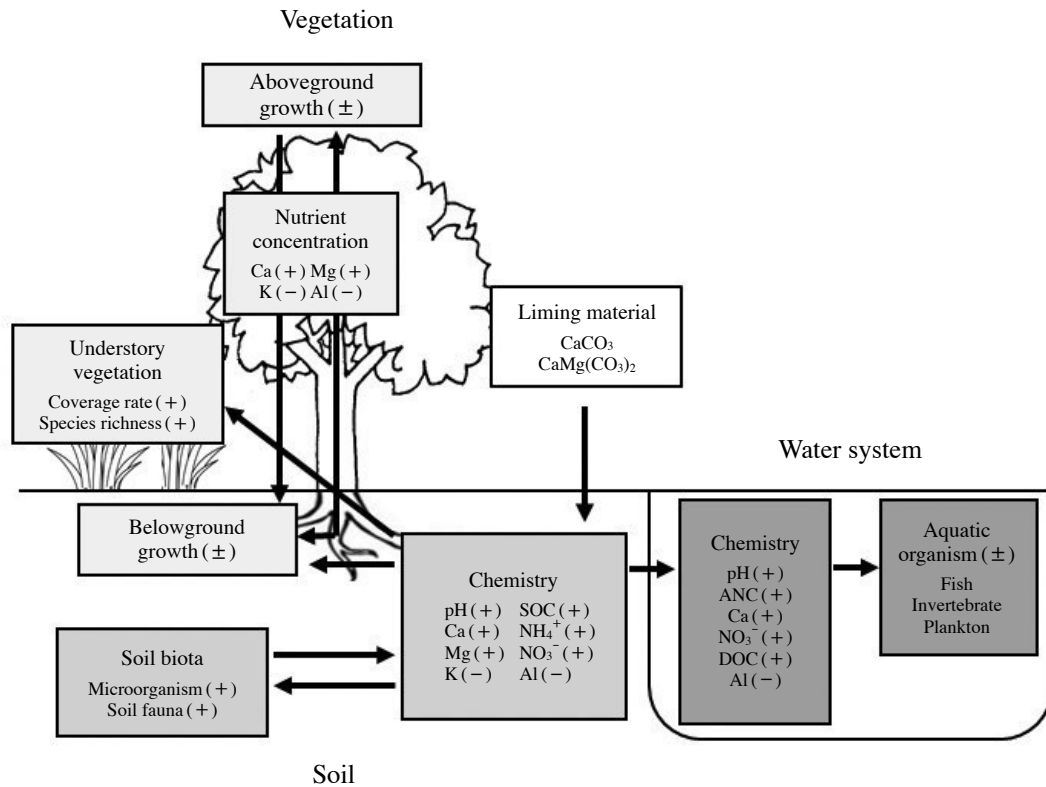


Fig. 3. Impact of forest liming on forest ecosystem. A plus (+) notes an increased effect, and a minus (-) notes a decreased effect of forest liming.

용으로 화학적 성질이 급격히 변화할 경우, 호수의 생물상에 악영향을 미칠 가능성도 보고되었다(Schaffner 1989; Lawrence *et al.* 2016).

4. 종합적인 영향

기존 연구 결과를 종합하면 산림 대상 석회 시용의 효과가 산림생태계의 요소 간 유기적인 상호작용에 따라 전달되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 석회 시용은 토양의 pH, BS, CEC를 증가시키는 등 화학적 성질에 직접적으로 영향을 미치고, 이는 토양에 서식하는 미생물 및 소동물의 바이오매스 증가 또는 종 구성의 변화로 나타난다. 그리고 유기물 층의 분해를 촉진하는 등 산림생태계의 물질 순환 측면에 영향을 미친다. 이와 같은 토양의 화학적 성질 및 양분 동태 변화는 식생의 지하부 양분 흡수에 영향을 주고, 지상부 생장의 변화로 이어지게 된다. 또한 석회 시용은 토양 침출수 및 계류수를 통하여 천천히 지속적으로 수계에 영향을 미친다. 따라서 산림 대상 석회 시용은 수계에서도 토양과 유사한 화학적 성질 변화가 나타나며, 이에 따라 먹이사슬에 중요한 위치에 있는 플랑크톤과 어류의 바이오매스, 개체수

및 군집이 변화하게 된다.

결 론

기존 연구 경향을 분석한 결과에 따르면 최근의 산림 대상 석회 시용 연구는 산림생태계 복원을 목적으로 하고 있으며, 토양, 식생 및 수계 각각에 미치는 영향에 중점을 두어 왔다. 그러나 산림생태계 구성요소 간 상호작용에 따른 종합적인 석회 시용의 영향 연구는 매우 부족한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 산림 대상 석회 시용이 토양의 화학적 성질과 생물상, 식생의 지하부 및 지상부 생장과 하층식생, 그리고 수계의 화학적 성질과 생물상에 미치는 영향을 분석하여 산림생태계 구성요소 간 유기적인 상호작용 모식도를 제시하였다. 그러나 이러한 결과는 일반적인 경향을 분석하는데에 한정되며, 실제 생태계에서는 지리적 특성, 기후, 수종 등 다양한 인자들에 따라 석회 시용 효과가 다르게 나타날 수 있다. 즉, 특정 지역에서의 산림 대상 석회 시용의 영향을 예측하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 향후 산림 대상 석회 시용 연구를 수행할 경우, 연구 대상지의 다양한 특성을

사전에 분석하고, 본 연구에서 제시한 결과를 활용한 종합적인 영향 분석 연구가 고려될 수 있을 것이다.

적 요

본 연구는 산림생태계에서의 석회 시용 연구를 연대별, 국가별 그리고 주제별로 경향을 파악하고 석회 시용이 산림생태계의 각 요소(토양, 식생, 수계 등)에 미치는 영향을 종합 분석하고자 하였다. 산림 대상 석회 시용은 연대별 산성강하물 유입량의 변화에 따라 시용 목적이 달라졌으며, 관련 연구는 산성화로 인한 대규모 산림 피해가 발생한 유럽과 북미 지역에서 주로 수행되었다. 대부분의 석회 시용 연구는 토양 반응을 중심으로 수행되었고, 토양 이외에 식생, 수계 등을 포함한 연구의 수는 비교적 적었다. 한편 산림 대상 석회 시용의 효과는 토양, 식생 및 수계 사이의 유기적인 상호작용을 통해 산림생태계 전체에 미치며 특히 화학적 성질 변화가 중요한 것으로 나타났다. 석회 시용 후 토양의 pH, BS, CEC 변화는 토양 층위와 경과 시간에 따라 다르게 나타났다. 그리고 식생의 반응은 지상부 및 지하부 생장과 식물체 내 양분 농도의 변화로 이어졌으며, 수종과 토양 조건에 따라 반응은 다르게 나타났다. 수계는 석회 시용 후 토양에서와 유사한 화학적 성질 변화를 보였으며, 이는 플랑크톤과 어류 등의 생물상 변화로 이어졌다. 본 연구 결과는 향후 석회 시용 관련 연구를 계획하는 단계에서 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 한국광물자원공사에서 지원한 ‘국내 석회석 산업 활성화를 위한 석회석의 산림 시용 방안 기초 연구’와 환경부 ‘CO₂ 저장 환경관리기술 개발사업(과제번호: 2014001810002)’의 지원을 받아 수행한 연구결과의 일부입니다.

REFERENCES

- Akselsson C, H Hultberg, PE Karlsson, GP Karlsson and S Hellsten. 2013. Acidification trends in south Swedish forest soils 1986–2008: Slow recovery and high sensitivity to sea-salt episodes. *Sci. Total Environ.* 444:271–287.
- Aldinger E and WL Kremer. 1985. Investigations on increment of healthy and damaged Norway spruces and silver fir growing on previously limed areas. *Eur. J. For. Res.* 104:360–373.
- Andersson F and T Persson. 1988. Liming as a measure to improve soil and tree condition in areas affected by air pollution. Report 3518. National Swedish Environmental Protection Board, Stockholm.
- Bäath E and K Arnebrant. 1994. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 26:995–1001.
- Bakker MR, R Kerisit, K Verbist and C Nys. 2000. Effects of liming on rhizosphere chemistry and growth of fine roots and of shoots of sessile oak (*Quercus Petraea*). *Plant Soil* 217:243–255.
- Balcar V, D Kacálek, I Kuneš and D Dušek. 2011. Effect of soil liming on European beech (*Fagus sylvatica* L.) and sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) plantations. *Folia For. Pol. Ser. A For.* 53:85–92.
- Blette VL and RM Newton. 1996. Effects of watershed liming on the soil chemistry of Woods Lake, New York. *Biogeochemistry* 32:175–194.
- Brach AR and DJ Raynal. 1992. Effects of liming on *Oxalis acetosella* and *Lycopodium lucidulum* in a northern hardwood forest. *J. Appl. Ecol.* 29:492–500.
- Brahmer G. 1994. Effects of whole catchment liming and Mg addition on soil water and runoff at two forested watersheds in the Black Forest (Germany). *For. Ecol. Manage.* 68:47–60.
- Brocksen RW and PW Emler Jr. 1988. Living lakes: An aquatic liming and fish restoration demonstration program. *Water Air Soil Pollut.* 41:85–93.
- Brocksen RW, HW Zoetl, DB Porcella, RF Huettl, KH Feger and J Wisniewski. 1988. Experimental liming of watersheds: An international cooperative effort between the United States and west Germany. *Water Air Soil Pollut.* 41:455–471.
- Bukaveckas PA. 1988. Effects of calcite treatment on primary producers in acidified Adirondack lakes - Response of macrophyte communities. *Lake Reserv. Manag.* 4:107–113.
- Bukaveckas PA. 1989. Effects of calcite treatment on primary producers in acidified Adirondack lakes. II. Short-term response by phytoplankton communities. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 46:352–359.
- Burke MK and DJ Raynal. 1998. Liming influences growth and nutrient balances in sugar maple (*Acer saccharum*) seedlings on an acidic forest soil. *Environ. Exp. Bot.* 39:105–116.
- Carbone J, W Keller and RW Griffiths. 1998. Effects of changes in acidity on aquatic insects in rocky littoral habitats of lakes near Sudbury, Ontario. *Restor. Ecol.* 6:376–389.

- Chagnon M, D Paré, C Hébert and C Camiré. 2001. Effects of experimental liming on collembolan communities and soil microbial biomass in a southern Quebec sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stand. *Appl. Soil Ecol.* 17:81–90.
- Cho Y, CT Driscoll and JD Blum. 2009. The effects of a whole-watershed calcium addition on the chemistry of stream storm events at the Hubbard Brook Experimental Forest in NH, USA. *Sci. Total Environ.* 407:5392–5401.
- Cirmo CP and CT Driscoll. 1996. The impacts of a watershed CaCO₃ treatment on stream and wetland biogeochemistry in the Adirondack mountains. *Biogeochemistry* 32:265–297.
- Clayton JL, ES Dannaway, R Menendez, HW Rauch, JJ Renton, SM Sherlock and PE Zurbuch. 1998. Application of limestone to restore fish communities in acidified streams. *North Am. J. Fish Manage.* 18:347–360.
- Clemensson-Lindell A and H Persson. 1993. Long-term effects of liming on the fine-root standing crop of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in relation to chemical changes in the soil. *Scand. J. For. Res.* 8:384–394.
- Demchik MC and WE Sharpe. 2001. Forest floor plant response to lime and fertilizer before and after partial cutting of a northern red oak stand on an extremely acidic soil in Pennsylvania, USA. *For. Ecol. Manage.* 144:239–244.
- Derome J and A Saarsalmi. 1999. The effect of liming and correction fertilisation on heavy metal and macronutrient concentrations in soil solution in heavy-metal polluted Scots pine stands. *Environ. Pollut.* 104:249–259.
- Derome J, M Kukkola, A Smolander and T Lehto. 2000. Liming of forest soils. pp. 328–337. In *Forest Condition in a Changing Environment* (Mälkönen E ed.). Springer, Dordrecht.
- Derome J. 2000. Detoxification and amelioration of heavy-metal contaminated forest soils by means of liming and fertilisation. *Environ. Pollut.* 107:79–88.
- Donnelly A, E Jennings and N Allott. 2003. A review of liming options for afforested catchments in Ireland. *Biol. Environ.* 103B:91–105.
- Driscoll CT, CP Cirmo, TJ Fahey and CL Schofield. 1996. The experimental watershed liming study: Comparison of lake and watershed neutralization strategies. pp. 1–32. In *Experimental Watershed Liming Study* (Driscoll CT ed.). Springer, Dordrecht.
- Driscoll CT, GB Lawrence, AJ Bulger and KC Weathers. 2001. Acidic deposition in the northeastern United States: Sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies: the effects of acidic deposition in the northeastern United States include the acidification of soil and water, which stresses terrestrial and aquatic biota. *Bioscience* 51:180–198.
- Forey E, J Trap and M Aubert. 2015. Liming impacts *Fagus sylvatica* leaf traits and litter decomposition 25 years after amendment. *For. Ecol. Manage.* 353:67–76.
- Formanek P and V Vranova. 2003. A contribution to the effect of liming on forest soils: Review of literature. *J. For. Sci.* 49:182–190.
- Foster NW, GD Hogan and IK Morrison. 1988. Growth of jack pine forest on an acid brunisol treated with lime. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19:1393–1405.
- Frank J and AO Stuanes. 2003. Short-term effects of liming and vitality fertilization on forest soil and nutrient leaching in a Scots pine ecosystem in Norway. *For. Ecol. Manage.* 176:371–386.
- Fuss CB, CT Driscoll and JL Campbell. 2015. Recovery from chronic and snowmelt acidification: Long-term trends in stream and soil water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 120:2360–2374.
- Groffman PM, MC Fisk, CT Driscoll, GE Likens, TJ Fahey, C Eagar and LH Pardo. 2006. Calcium additions and microbial nitrogen cycle processes in a northern hardwood forest. *Ecosystems* 9:1289–1305.
- Guckland A, B Ahrends, U Paar and J Eichhorn. 2012. Predicting depth translocation of base cations after forest liming: Results from long-term experiments. *Eur. J. For. Res.* 131:1869–1887.
- Gunn JM, JG Hamilton, GM Booth, CD Wren, GL Beggs, HJ Rietveld and JR Munro. 1990. Survival, growth and reproduction of lake trout (*Salvelinus namaycush*) and yellow perch (*Perca flavescens*) after neutralization of an acidic lake near Sudbury, Ontario. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 47:446–453.
- Hahn G and H Marschner. 1998. Effect of acid irrigation and liming on root growth of Norway Spruce. *Plant Soil* 199:11–22.
- Hall Jr. RO, KH Macneale, ES Bernhardt, M Field and GE Likens. 2001. Biogeochemical responses of two forest streams to a 2-month calcium addition. *Freshw. Biol.* 46:291–302.
- Helmisaari HS and L Hallbäck. 1999. Fine-root biomass and necromass in limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. *For. Ecol. Manage.* 119:99–110.
- Helmisaari HS, K Makkonen, M Olsson and E Makkonen. 1999. Fine-root growth, mortality and heavy metal concentrations in limed and fertilized *Pinus sylvestris* (L.) stands in the vicinity of a Cu-Ni smelter in SW Finland. *Plant Soil* 209:193–200.
- Homan C, C Beier, T McCay and G Lawrence. 2016. Application of lime (CaCO₃) to promote forest recovery from severe acidification increases potential for earthworm inva-

- sion. *For. Ecol. Manage.* 368:39–44.
- Hu Q and BJ Huser. 2014. Anthropogenic oligotrophication via liming: Long-term phosphorus trends in acidified, limed, and neutral reference lakes in Sweden. *Ambio* 43:104–112.
- Huber C, R Baier, A Göttlein and W Weis. 2006. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany. *For. Ecol. Manage.* 233:11–20.
- Hudy M, DM Downey and DW Bowman. 2000. Successful restoration of an acidified native brook trout stream through mitigation with limestone sand. *North Am. J. Fish Manage.* 20:453–466.
- Huettl RF. 1989. Liming and fertilization as mitigation tools in declining forest ecosystems. *Water Air Soil Pollut.* 44:93–118.
- Huettl RF and HW Zoetl. 1993. Liming as a mitigation tool in Germany's declining forests—reviewing results from former and recent trials. *For. Ecol. Manage.* 61:325–338.
- Hultberg H and P Grennfelt. 1986. Gårdsjön project: Lake acidification, chemistry in catchment runoff, lake liming and microcatchment manipulations. pp. 31–46. In *Acidic Precipitation* (Martin HC ed.). Springer, Dordrecht.
- Huss-Danell K. 1986. Growth and production of leaf litter nitrogen by *Alnus incana* in response to liming and fertilization on degenerated forest soil. *Can. J. For. Res.* 16:847–853.
- Hwang J and Y Son. 2006. Short-term effects of thinning and liming on forest soils of pitch pine and Japanese larch plantations in Central Korea. *Ecol. Res.* 21:671–680.
- Hwang J, Y Son, C Kim, MJ Yi, ZS Kim, WK Lee and SK Hong. 2007. Fine root dynamics in thinned and limed pitch pine and Japanese larch plantations. *J. Plant Nutr.* 30:1821–1839.
- Hyvönen R and T Persson. 1990. Effects of acidification and liming on feeding groups of nematodes in coniferous forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 9:205–210.
- Ingerslev M. 1997. Effects of liming and fertilization on growth, soil chemistry and soil water chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil in Denmark. *For. Ecol. Manage.* 92:55–66.
- Ingerslev M, E Mälkönen, P Nilsen and K Raulund-Rasmussen. 2001. Main findings and future challenges in forest nutritional research and management in the Nordic countries. *Scand. J. For. Res.* 16:488–501.
- Järvinen M, K Kuoppamäki and M Rask. 1995. Responses of phyto- and zooplankton to liming in a small acidified humic lake. *Water Air Soil Pollut.* 85:943–948.
- Jenkins A, D Waters and A Donald. 1991. An assessment of terrestrial liming strategies in upland Wales. *J. Hydrol.* 124:243–261.
- Jonard M, F Andre, P Giot and Q Ponette. 2010. Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. *Eur. J. For. Res.* 129:1203–1211.
- Jung YK and HH Lee. 1993. Effects of lime and NPK application rates on the soil characteristics after a 10-year experiment in oversown hilly pasture of mixed grass-clover sward. *Korean Grassl. Sci.* 13:49–57.
- Kalbitz K, S Solinger, JH Park and E Matzner. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Sci.* 165:277–304.
- Kim JH. 2005. Atmospheric acidic deposition: Response to soil and forest ecosystems. *Korean J. Ecol.* 28:417–431.
- Koo NI, YS Kim, HT Choi and JH Lim. 2016. Monitoring of forest soil acidification impacts and developing assessment and management techniques. National Institute of Forest Science. Seoul.
- Kreutzer K. 1995. Effects of forest liming on soil processes. *Plant Soil* 168:447–470.
- Kuylenstierna JC, H Rodhe, S Cinderby and K Hicks. 2001. Acidification in developing countries: Ecosystem sensitivity and the critical load approach on a global scale. *Ambio* 30:20–28.
- Lautenbach WE, J Miller, PJ Beckett and K Winterhalder. 1995. Municipal land restoration program: The regreening process. pp. 109–122. In *Restoration and Recovery of an Industrial Region* (Gunn JM ed.). Springer, New York.
- Lawrence GB, DA Burns and K Riva-Murray. 2016. A new look at liming as an approach to accelerate recovery from acidic deposition effects. *Sci. Total Environ.* 562:35–46.
- Lawrence GB, JE Dukett, N Houck, P Snyder and SB Capone. 2013. Increases in dissolved organic carbon accelerate loss of toxic Al in Adirondack lakes recovering from acidification. *Environ. Sci. Technol.* 47:7095–7100.
- Li Z, Y Wang, Y Liu, H Guo, T Li, ZH Li and G Shi. 2014. Long-term effects of liming on health and growth of a masson pine stand damaged by soil acidification in Chongqing, China. *PLOS One* 9:e94230.
- Likens GE, DC Buso, BK Dresser, ES Bernhardt, RO Hall Jr, KH Macneale and SW Bailey. 2004. Buffering an acidic stream in New Hampshire with a silicate mineral. *Restor. Ecol.* 12:419–428.
- Löfgren S, N Cory, T Zetterberg and V Kronnas. 2009. The Long-term effects of catchment liming and reduced sulphur deposition on forest soils and runoff chemistry in southwest Sweden. *For. Ecol. Manage.* 258:567–578.
- Long RP, S Horsley and TJ Hall. 2011. Long-term impact of liming on growth and vigor of northern hardwoods. *Can. J.*

- For. Res. 41:1295–1307.
- Long RP, SB Horsley and PR Lilja. 1997. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods. *Can. J. For. Res.* 27:1560–1573.
- Long RP, SW Bailey, SB Horsley, TJ Hall, BR Swistock and DR DeWalle. 2015. Long-term effects of forest liming on soil, soil leachate, and foliage chemistry in northern Pennsylvania. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79:1223–1236.
- Lundström US, DC Bain, AFS Taylor and PAW Van Hees. 2003. Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: A review. *Water Air Soil Pollut.* 3:5–28.
- Lützwow MV, L Zelles, I Scheunert and JCG Ottow. 1992. Seasonal effect of liming, irrigation, and acid precipitation on microbial biomass N in a spruce (*Picea abies* L.) forest soil. *Biol. Fertil. Soils* 13:130–134.
- Matzner E, PK Khanna, KJ Meiwes and B Ulrich. 1985. Effects of fertilization and liming on the chemical soil conditions and element distribution in forest soils. *Plant Soil* 87:405–415.
- Meiwes KJ. 1995. Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water Air Soil Pollut.* 85:143–152.
- Misson L, Q Ponette and F Andre. 2001. Regional scale effects of base cation fertilization on Norway spruce and European beech stands situated on acid brown soils: Soil and foliar chemistry. *Ann. For. Sci.* 58:699–712.
- Moore JD, L Duchesne and R Ouimet. 2008. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. *For. Ecol. Manage.* 255:3460–3468.
- Moore JD, R Ouimet and L Duchesne. 2012. Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application. *For. Ecol. Manage.* 281:130–139.
- Moore JD, R Ouimet, RP Long and PA Bukaveckas. 2014. Ecological benefits and risks arising from liming sugar maple dominated forests in northeastern north America. *Environ. Rev.* 23:66–77.
- Murach D. 1988. Judgement of the applicability of liming to restabilise forest stands-with special consideration of root ecological aspects. pp. 445–451. In *Air Pollution and Ecosystems* (Mathy P ed.). Springer, Grenoble.
- Neal C, C Smith and S Hill. 1992. Forestry impact on upland water quality. pp. 1–50. In *Institute of Hydrology Report No. 119*. Institute of Hydrology, Wallingford.
- Neale SP, Z Shah and WA Adams. 1997. Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidic organic soils following liming. *Soil Biol. Biochem.* 29:1463–1474.
- Newton RM, DA Burns, VL Blette and CT Driscoll. 1996. Effect of whole catchment liming on the episodic acidification of two Adirondack streams. *Biogeochemistry* 32:299–322.
- Nohrstedt HÖ. 2001. Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A review of Swedish experiences. *Scand. J. For. Res.* 16:555–573.
- Oh NH and PA Raymond. 2006. Contribution of agricultural liming to riverine bicarbonate export and CO₂ sequestration in the Ohio river basin. *Glob. Biogeochem. Cycle* 20:GB3012.
- Olsson BA and O Kellner. 2002. Effects of soil acidification and liming on ground flora establishment after clear-felling of Norway spruce in Sweden. *For. Ecol. Manage.* 158:127–139.
- Pabian SE, NM Ermer, WM Tzilkowski and MC Brittingham. 2012a. Effects of liming on forage availability and nutrient content in a forest impacted by acid rain. *PLoS One* 7:e39755.
- Pabian SE, SM Rummel, WE Sharpe and MC Brittingham. 2012b. Terrestrial liming as a restoration technique for acidified forest ecosystems. *Int. J. For. Res.* 2012:ID976809.
- Pawłowski L. 1997. Acidification: Its impact on the environment and mitigation strategies. *Ecol. Eng.* 8:271–288.
- Persson G and M Appelberg. 2001. Evidence of lower productivity in long term limed lakes as compared to unlimed lakes of similar pH. *Water Air Soil Pollut.* 130:1769–1774.
- Persson H and K Ahlström. 1990. The effects of forest liming on fertilization on fine-root growth. *Water Air Soil Pollut.* 54:365–375.
- Persson H, K Ahlström and A Clemensson-Lindell. 1996. Skogsmarkskalkningens effekter på rötterna. pp. 101–110. In *Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet*, Report 4559 (Staaf H, T Persson and U Bertills eds.). Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.
- Popovic B. 1992. Changes in soil, plant nutrient content and tree growth during a 5-year period on Norway spruce plots under different liming regimes in south Sweden. pp. 821–822. In *Responses of Forest Ecosystems to Environmental Changes* (Teller A ed.). Springer, Dordrecht.
- Pothhoff M, N Asche, B Stein, A Muhs and F Beese. 2008. Earthworm communities in temperate beech wood forest soils affected by liming. *Eur. J. Soil Biol.* 44:247–254.
- Prietzl J, KE Rehfuess, U Stetter and H Pretzsch. 2008. Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. *Eur. J. For. Res.* 127:43–61.
- Priha O and A Smolander. 1994. Fumigation-extraction and

- substrate-induced respiration derived microbial biomass C, and respiration rate in limed soil of Scots pine sapling stands. *Biol. Fertil. Soils* 17:301–308.
- Rask M, RI Jones, M Järvinen, A Paloheimo, M Salonen, J Syväranta and M Verta. 2007. Changes in fish mercury concentrations over 20 years in an acidified lake subject to experimental liming. *Appl. Geochem.* 22:1229–1240.
- Reid C and SA Watmough. 2014. Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis. *Can. J. For. Res.* 44:867–885.
- Reif A, ED Schulze, J Ewald and A Rothe. 2014. Forest liming-soil protection versus nature conservation? *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 14:5–29.
- Renberg I and H Hultberg. 1992. A paleolimnological assessment of acidification and liming effects on diatom assemblages in a Swedish lake. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 49:65–72.
- Rodenkirchen H. 1992. Effects of acidic precipitation, fertilization and liming on the ground vegetation in coniferous forests of southern Germany. *Water Air Soil Pollut.* 61:279–294.
- Røsberg I, J Frank and AO Stuanes. 2006. Effects of liming and fertilization on tree growth and nutrient cycling in a Scots pine ecosystem in Norway. *For. Ecol. Manage.* 237:191–207.
- Rusek J and VG Marshall. 2000. Impacts of airborne pollutants on soil fauna. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 31:395–423.
- Saarsalmi A and E Mälikönen. 2001. Forest fertilization research in Finland: A literature review. *Scand. J. For. Res.* 16:514–535.
- Saarsalmi A, P Tamminen, M Kukkola and T Levula. 2011. Effects of liming on chemical properties of soil, needle nutrients and growth of Scots pine transplants. *For. Ecol. Manage.* 262:278–285.
- Safford LO. 1974. Effect of fertilization on biomass and nutrient content of fine roots in a beech-birch-maple stand. *Plant Soil* 40:349–363.
- Schaaf W and RF Hüttel. 2006. Experiences with liming in European countries - Results of long-term experiments. *J. For. Sci.* 52:35–44.
- Schaffner WR. 1989. Effects of neutralization and addition of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) on the limnetic zooplankton communities of two acidic. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46:295–305.
- Schneider BU and W Zech. 1990. The influence of Mg fertilization on growth and mineral contents of fine roots in *Picea abies* (Karst. L.) stands at different stages of decline in NE-Bavaria. *Water Air Soil Pollut.* 54:469–476.
- Schofield CL and C Keleher. 1996. Comparison of brook trout reproductive success and recruitment in an acidic Adirondack lake following whole lake liming and watershed liming. *Biogeochemistry* 32:323–337.
- Schonau APG and MA Herbert. 1983. Relationship between growth rate, fertilizing and foliar nutrient concentrations for *Eucalyptus grandis*; preliminary investigations. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 4:369–380.
- Shah Z, WA Adamst and CDV Have. 1990. Composition and activity of the microbial population in an acidic upland soil and effects of liming. *Soil Biol. Biochem.* 22:257–263.
- Sikstrom U. 1997. Effects of low-dose liming and nitrogen fertilization on stemwood growth and needle properties of *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *For. Ecol. Manage.* 95:261–274.
- Smolander A and E Mälikönen. 1994. Microbial biomass C and N in limed soil of Norway spruce stands. *Soil Biol. Biochem.* 26:503–509.
- Stenson JAE and JE Svensson. 1995. Changes of planktivore fauna and development of zooplankton after liming of the acidified lake Gårdsjön. *Water Air Soil Pollut.* 85:979–984.
- Svensson JE and JAE Stenson. 2002. Responses of planktonic rotifers to restoration measures-trophic cascades after liming in lake Gårdsjön. *Arch. Hydrobiol.* 153:301–322.
- Van den Burg J. 1991. Results and experiences from fertilization experiments in the Netherlands. *Fertil. Res.* 27:107–111.
- Warfvinge P and H Sverdrup. 1988. Watershed liming. *Lake Reserv. Manag.* 4:99–106.
- Westling O and T Zetterberg. 2007. Recovery of acidified streams in forests treated by total catchment liming. *Water Air Soil Pollut.* 7:347–356.
- Wilmot TR, DS Ellsworth and MT Tyree. 1996. Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands. *For. Ecol. Manage.* 84:123–134.
- Yoo JH, JK Byun, CS Kim and WK Lee. 1998. Effects of lime, magnesium sulfate and compound fertilizers on soil chemical properties of acidified forest soils. *J. Korean. For. Soc.* 87:341–346.
- Zelles L, I Scheunert and K Kreutzer. 1987. Effect of artificial irrigation, acid precipitation and liming on the microbial activity in soil of a spruce forest. *Biol. Fertil. Soils* 4:137–143.
- Zelles L, K Stepper and A Zsolnay. 1990. The effect of lime on microbial activity in spruce (*Picea abies* L.) forests. *Biol. Fertil. Soils* 9:78–82.

Received: 19 January 2018

Revised: 2 March 2018

Revision accepted: 5 March 2018