

## Trends of Lysimeter Studies to Investigate Nutrient Leaching Loss

Yang-Min Kim<sup>1</sup>, Chan-Wook Lee<sup>2</sup>, and Ye-Jin Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Post-doctoral Fellow, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

<sup>2</sup>Research Scientist, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

\*Corresponding author: [leeyj418@korea.kr](mailto:leeyj418@korea.kr)

### ABSTRACT

**Received:** October 12, 2020  
**Revised:** November 20, 2020  
**Accepted:** November 25, 2020

### ORCID

Yang-Min Kim  
<http://orcid.org/0000-0002-6246-5845>

Chan-Wook Lee  
<https://orcid.org/0000-0002-8901-8631>

Ye-Jin Lee  
<http://orcid.org/0000-0003-4415-846X>

Lysimeter is used to monitor water and nutrient transport through soil profiles under minimum disturbance conditions. In this study, we focused on the researches about nutrient leaching loss using a lysimeter in the world. We aimed at reviewing key studies and planning further research directions using the weighable lysimeters in Korea. In response to climate changes, environmental issues, and policies for sustainable agriculture, the experiments using a lysimeter were performed to better understand the nutrient leaching loss in the soils. The research topics were about crop rotation, soil amendment, nitrification inhibitors and what were better practices for reducing nutrient leaching including nitrogen. In addition, some researches focused on developing optimal models to predict the nutrient leaching loss in the soils that have a variety of environments. Current study suggests that the studies of the nutrient leaching loss combined with water dynamics using weighable lysimeters in Korea are to be fostered so that they may provide scientific guidelines on the issues and policies such as sustainable agriculture, climate change, fertilizer recommendation, and nutrient balance.

**Keywords:** Lysimeter, Nutrient leaching loss, Modelling

### Lysimeter research topics on nutrient leaching in Korea and around the world.

Countries	Korea	China	USA	New Zealand	Austria
	Germany	Switzerland	Italy	UK	Nordic countries
	1990s	- Effect of fertilizer			
	2000s	- Effect of irrigation, fertilizer, crops, and mechanical site preparation			
As-Is	2010s	- Effect of fertilizer considering climate change and fertilizer ordinance			
		- Weighable lysimeter: water transport measurement and comparable modelling and nutrient leaching measurement			
To-Be	- Climate change, sustainable agriculture, agricultural policies, modelling				



## Introduction

라이시미터 (Lysimeter)는 그리스어 단어인 “lysis (용액)”와 “metron (측정)”에서 만들어진 용어로, 작물 증발산량과 토양 증발량을 측정할 수 있는 실제 재배 환경을 대변하는 토양이 담긴 용기이다 (Winton and Weber, 1996). 라이시미터를 이용한 초기 연구들은 작물의 증산, 증발산, 수분이동, 양분이동, 제초제의 이동 등에 관한 연구이다 (Winton and Weber, 1996). 국내에서는 2010년대에 중량식 라이시미터가 건설된 이후 이를 이용하여 수분이동, 증발산, 물수지, 양분 용탈 등에 대해 연구해왔다 (Lee et al., 2017, 2018; Ok et al., 2018, 2019; Kim et al., 2020).

양분 용탈 (Nutrient leaching)에 의해 작물에 의해 흡수되지 못한 비료가 지하수로 흘러들어 가고, 이로 인해 경제적 손실과 환경 오염을 일으킨다 (Drury et al., 1996; Bergeron et al., 2011). 중부유럽의 경우, 환경 보전을 고려한 지속가능한 농업에 대한 유럽 물관리 종합지침 (European Water Framework Directive) 및 EU 질소 지침 (European Union Nitrates Directive)과 같은 정책 시행이 강화됨에 따라, 또한 세계적인 기후변화에 대응한 적절한 양수분 관리에 대한 연구의 필요성이 증가함에 따라, 이에 대한 대응으로 라이시미터를 활용한 양분 유출 연구를 수행하였다 (Fu et al., 2017). 국내에서도 2010년대에 농업환경보전 프로그램과 같은 사업을 통하여 친환경농업을 위한 정책을 추진하고 있다 (Lee et al., 2019). 국내 여건 변화 가운데 우리나라도 국내 라이시미터를 활용한 양분 유출 연구 방향에 대한 고찰이 필요한 시점이다.

라이시미터를 이용한 양분 유출에 대해 진행되어 온 국내외 다양한 연구사례를 살펴봄으로써, 라이시미터를 활용한 양분 유출 연구범위를 탐구하고 국내 연구계획에 활용하고자 한다. 특히 기후변화 및 환경문제와 관련하여 지속가능한 농업에 관한 이슈가 정책적으로 국내 농업에 시행되는 것에 발맞추어 이에 대한 라이시미터를 이용한 양분 유출 연구방향에 대해 선진국 사례 및 동향을 참고하여 고찰해 보고자 한다.

**비료사용에 따른 양분 용탈 연구 (Table 1)** 독일에서 라이시미터를 이용한 연구는 농경지 이용 (1,3,5년간 휴경 후 사용) 및 비료사용량에 따른 N, P, K의 용탈을 다년간 실험하였고, 비료사용량을 50% 줄이는 것보다 3년이상 휴경 후 농경지로 사용하는 것이 용탈 저감에 더욱 효과적인 것으로 보고되었다 (Meissner et al., 2002). 산악지대 초원 (grassland)에서의 가축분뇨 투여 횟수 등의 농경지 관리와 고도에 따른 기온 및 강수량 차이와 같은 기후조건이 질소 용탈에 끼치는 영향도 연구되었는데, 농경지 양분투입정도가 많을수록 총 질소 용탈량이 많고, 그 중 질산태 질소 비율이 가장 많았으나 기후조건에 의한 영향은 적었다 (Fu et al., 2017). Fu et al. (2017)은 사질 외의 토양 (non-sandy 토양) 및 식생이 많은 경우 질산태질소 용탈량이 극히 적었기 때문에, EU 질소 지침이 제시한 조건에 따라 제정된 독일 비료사용지침 (German Fertilizer Ordinance)이 질소비료 시비량을 고정하는 것보다 지역조건에 따라 차등화하는 것이 필요하다고 제시하였다.

영국의 경우 Shepherd and Bennett (1998)은 1988 - 1995년 기후조건과 사질 농경지에서의 연간 Ca, K, Na, Cl, SO<sub>4</sub>-S, Mg 용탈을 조사하였다. 최종 3년간의 실험 중에는 계분 퇴비를 사용했을 경우에 대해 연구함으로써, 계분 퇴비 사용에 의해 K 용탈이 증가함을 보고하였다.

스웨덴의 경우, 가축분 또는 비료 사용에 따른 N, P, K 양분 용탈을 7년간 모니터링 하였는데, 단기간의 가축분과 무기비료 사용은 양분유출에 영향을 보이지 않는다고 보고하였다 (Ulén, 1999). Ulén et al. (2013)은 과거에 투입된 가축분 투입량에 따른 N, P 양분 용탈 위험성을 평가함으로써, 과거에 P 투입량이 많은 경우 용탈 위험이 높음을 제시하였다.

중국의 경우, Ji et al. (2011)은 요소, 완효성 질소비료, 우분을 사용하여 3가지 토양유형의 논 벼 이모작 재배 시스템에서 질소 용탈을 연구하였는데, 양분종류에 의한 영향은 적었고 토양유형에 의해 큰 영향을 받았다고 하였다. 반면, Fan et al. (2017)은 무기질 비료 또는 가축분을 사용하여 밀(동절기) - 옥수수(하절기) 돌려짓기를 하였을 때 질소 용탈 정도를 비교한 결과 가축분 사용의 경우 총 질소 및 질산태 질소 용탈이 적음을 보고하였다. 양수분 공급에 따른 영향도 연구되었는데, Jia et al. (2014)은 밀(동절기) - 옥수수(하절기) 돌려짓기에서 옥수수 재배기간 동안 수분(2수준)과 양분(요소, 가축분 퇴비)을 처리하였을 경우, 수분공급이 많고 요소 공급이 많은 처리구에서  $\text{NO}_3\text{-N}$  용탈이 가장 많음을 보고하였다. 또한 Li et al. (2018)도 수분 2수준(관행, 적정)과 양분 2수준(관행, 적정)에 따른 시설재배 오이의 N, P, 양이온의 용탈을 연구한 결과 적정수분 - 적정양분 처리구에서 용탈량이 가장 적음을 보였다.

**Table 1.** Nutrient leaching loss varying water, fertilizer, and soil type.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation ( $\text{mm y}^{-1}$ )	Crops	Reference
Germany	Impact of land use changes and cutting fertilizer	-N-P-K leaching loss	4 - 58 $\text{kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$	-	grass, clover+grass, winter wheat, winter barley, oats+sub-seed	Meissner et al. (2002)
	Impact of management and climate (manure, precipitation)	-Water balance and nitrogen leaching -Suggestion of fertilizer application	in $\text{kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ TN: 1.0-150 $\text{NO}_3$ : 0.5-39 $\text{NH}_4$ : 0.2-1.0	913-1423	grassland vegetation: clover+herbs+grass+standing litter	Fu et al. (2017)
UK	Impact of manure addition into arable sandy soil under UK condition	-Leaching of Ca, K, Na, Cl, $\text{SO}_4\text{-S}$ , Mg	( $\text{kg ha}^{-1}$ growth period <sup>-1</sup> ) Ca: 40-952, K: 7-49 Na: 8-196, Ca: 43-350 S: 37-429, Mg: 9-56	625	winter wheat, spring wheat, winter barley, spring barley, spring oats, sugar beet	Shepherd and Bennett (1998)
Sweden	Impact of application of organic manure and inorganic fertilizer and soil type	-Nutrient leaching of Tot-P, Tot-N	TP: 0.03-2.09 $\text{mg L}^{-1}$ TN: 2.4-3.2 $\text{mg L}^{-1}$	515-609	spring wheat, barley, ley, oat	Ulén (1999)
	Impact of manure input in the past	-Nutrient leaching of N and P	in $\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ TP: 0.4-51.2 TN: 26-192	simulated rain event	ley	Ulén et al. (2013)
	Impact of fertilizer (urea, manure, controlled release N fertilizer) in two paddy soil types	-Nitrogen leaching: Tot-N, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$	in $\text{kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ TN: 1.9-7.2 $\text{NO}_3$ : 0.1-0.3 $\text{NH}_4$ : 0.6-4.0	1400	rice	Ji et al. (2011)
	Impact of irrigation and fertilizer (urea, manure)	-Nitrogen leaching: Tot-N	TN: 16-77 $\text{kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$	irrigation	winter wheat, summer maize rotation	Jia et al. (2014)
China	Impact of fertilizer (manure, inorganic fertilizer)	-Nitrogen leaching: Tot-N, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$	in $\text{kg N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ TN: 0.9-46.6 $\text{NO}_3$ : 0.4-36.9 $\text{NH}_4$ : 0.1-3.4	693	winter wheat, summer maize rotation	Fan et al. (2017)
	Impact of irrigation and fertilizer	-Nutrient leaching of $\text{NO}_3\text{-N}$ , P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Zn,	in $\text{kg ha}^{-1}$ growth period <sup>-1</sup> $\text{NO}_3$ : 100-500 P: 1-4, K: 5-60, Ca: 100-600, Mg: 50-200, Na: 50-300 in $\text{g ha}^{-1}$ growth period <sup>-1</sup> Cu: 5-90, Fe: 50-150 Zn: 3-70	irrigation	cucumber	Li et al. (2018)

**질산화 억제제 사용에 따른 양분 용탈 연구 (Table 2)** 뉴질랜드에서는 식수에 대한 질산태 질소 농도를 기준수준 이하로 낮추는 정부 가이드라인이 도입되면서 방목 목초지에서 가축분뇨로부터 발생하는 질소용탈을 줄이기 위한 연구가 진행되었다. Di and Cameron (2004)은 질산화 억제제 (Dicyandiamide, Eco-n™) 처리시 토양에서 질산태 질소 및 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>의 용탈이 감소되고, 건물생산량이 15 - 33% 증가됨을 확인하였다. 이 결과를 토대로 Moir et al. (2007)은 질산화 억제제 처리시 토양 내 질소가 암모니아태로 유지되어 질산태 질소의 생성이 감소되었고, 건물생산량은 증가하나 목초지의 품질은 영향을 받지 않는다는 결과를 얻었다. 또한 Di et al. (2009)의 연구에서 토양(3지역)과 강우조건(2수준)을 달리하였을 때, 질산화 억제제의 질산태질소 용탈량의 감소 효과가 나타났으며, 질산태 질소 유출과 질산화성균의 일종인 ammonia oxidizing bacteria의 생장 사이에 상관관계가 있음을 밝혔다.

**작물재배를 통한 양분 용탈 저감 (Table 3)** 환경오염 저감을 위해 작물을 이용하여 양분 용탈을 줄이는 연구들이 이루어졌다. 미국에서는 Allen et al. (2004)이 나무와 작물을 이용한 임간재배 (alley cropping)를 사용하여 나무 뿌리의 작용에 의해 질산태 질소 용탈을 감소시켰다. 북유럽에서는 농업에 의해 발생한 질소가 해수에 유입되거나, 동절기 기온이 낮지 않고 강수량이 많아 질소 용탈에 취약한 것을 해결하기 위해 봄작기 이후 간작물 재배를 통해 토양 내 질산태 질소 함량을 줄임으로써 가을 및 겨울작기 동안 질소용탈을 줄이고자 하였다 (Valkama et al., 2015). 라이시미터를 이용하여 간작물로 비콩과작물 (특히 라이그라스)의 재배는 질소 용탈을 50%까지 줄였고, 콩과작물은 질소용탈 위험을 줄이지 못하는 것으로 평가되었다 (Valkama et al., 2015). 목초 - 클로버 재배에서 비료 사용 여부에 따른 질소 용탈을 비교했을 때, 비료를 사용하지 않은 목초 - 클로버 재배에서 질소용탈이 적었기 때문에 비료가 다량 투입되는 목초지에 대해 단기간 비료를 사용하지 않는 친환경농업활동으로서 추천하였다 (Saarijärvi et al., 2007). 뉴질랜드에서는 초종 및 지베렐린산 적용에 따른 질소 용탈 연구를 진행하여 이탈리아 라이그라스가 다년생 라이그라스 - 화이트 클로버, 라이그라스 - 알팔파에 비하여 질소 유출 손실이 적고, 겨울철 식물체 질소흡수가 높아 효과적이며, 지베렐린의 효과는 나타나지 않았다고 하였다 (Woods et al., 2016). 더 나아가 urine 처리시 이탈리아 라이그라스 - 질경이 - 화이트 클로버 재배가 다년생 라이그라스 - 화이트 클로버 재배에 비해 질소 용탈이 낮고, 목초 생산량의 차이가 없어 질소 유출 저감에 유용할 것이라고 하였다 (Woods et al., 2018). Maxwell et al. (2019)은 겨울 - 봄 사이에

**Table 2.** Nutrient leaching loss using nitrification inhibitor.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation (mm y <sup>-1</sup> )	Crops	Reference
	Impact of nitrification inhibitor on nitrate leching in grazed pasture	-NO <sub>3</sub> - leaching loss -Dry matter yield	in kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> -N: 20-85 Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> : 50-113 Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> : 42-73	1600 (rainfall + irrigation)	mixture of perennial ryegrass and white clover	Di and Cameron (2004)
New Zealand	Impact of nitrification inhibitor in grazed pasture	-Soil mineral N -Pasture dry matter yield and quality	-	1150 (650 mm rainfall + 500 mm irrigation)	mixture of perennial ryegrass and white clover	Moir et al. (2007)
	Impact of climate and management in grassland (eg. precipitation, manure)	-Nitrate-N leaching loss -Dynamics of ammonia oxidizing bacteria	NO <sub>3</sub> -N: 29.7-457.0 kg NO <sub>3</sub> -N ha <sup>-1</sup>	1260and 2145 (rainfall + irrigation)	mixture of perennial ryegrass and white clover	Di et al. (2009)

질소흡수 능력이 좋은 이탈리아 라이그라스가 다른 다년생 라이그라스 품종들보다 질산태 질소의 용탈이 적고, 질소 흡수량, 건물 생산량이 많아 목초지에서 질소 용탈을 줄이는 데에 유용하다고 평가하였다.

또한 작물의 뿌리 구조에 의해 양분 용탈이 영향을 받을 수 있는가에 대해서도 연구되었는데, Malcolm et al. (2015)은 동절기 식물체를 통한 질소 회수가 뿌리 구조보다는 식물 생장에 의해 크게 영향을 받는 것으로 평가하였다. 반면 Syvertsen et al. (1993)은 citrus 나무뿌리 형태에 따라 N, P, K 비료 용탈이 크게 영향을 받는다고 보고하였다.

**Table 3.** Nutrient leaching loss varying cropping system and root morphology.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation (mm y <sup>-1</sup> )	Crops	Reference
Denmark, Sweden and Finland	Impact of catch crop in Denmark, Sweden and Finland	-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N leaching	7-98 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	480-1040	Italian ryegrass, perennial ryegrass, Westerwolds ryegrass, rapeseed, white clover, red clover	Valkama et al. (2015)
Finland	Impact of management in pasture (fertilized grass vs. unfertilized grass-clover)	-Nitrogen leaching (Tot-N, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , soluble organic N)	in kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> TN: 4.1-60 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 3.8-53.6 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 0.04-0.14 Org N: 0.2-6.3	530-690	grass, grass+clover	Saarijärvi et al. (2007)
	Impact of forage type and gibberellic acid on nitrate leaching loss	-Nitrogen leaching loss	Total N(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ): 133-407 kg N ha <sup>-1</sup>	1965 mm (713 mm rainfall + 1252 mm irrigation) in 17 month	perennial ryegrass+white clover (RGWC), Italian ryegrass, lucerne	Woods et al. (2016)
	cropping system					
New Zealand	Impact of forage mix type on nitrogen leaching loss	-Nitrogen leaching loss -Herbage yield	Total N(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ): 12.5-113.4 kg N ha <sup>-1</sup>	1798 mm (804 mm rainfall + 994 mm irrigation) in 17 month	mixture of Italian ryegrass, plantain, white clover (IRPWC). Perennial ryegrass+white clover (PRWC)	Woods et al. (2018)
	Impact of forage type on N leaching	-Nitrogen leaching loss -Herbage yield -Dry matter yield	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 143-267 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	1201 mm (rainfall+irrigation inclusive) in 12 month	Italian ryegrass, 4 perennial ryegrass cultivars, Italian+ each of 4 perennial ryegrass cultivars	Maxwell et al. (2019)
USA	Impact of alley cropping	-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	in kg N ha <sup>-1</sup> 15months <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 13-122 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 0.14-0.25	-	tree+crop	Allen et al. (2004)
New Zealand	Impact of plant growth on N recovery during winter	-Herbage N uptake and yield -Root N uptake efficiency	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N: 0.97-97.50 kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N ha <sup>-1</sup>	-	Italian ryegrass, Tall fescue	Malcolm et al. (2015)
	root shape					
USA	Impact of tree root shape by salinized irrigation	-N-P-K leaching loss	N: 2-8% P: 1-8% K: 13-28% of annual application	precipitation 988-1025 +irrigation 779-951	citrus	Syvertsen et al. (1993)



**토양개량제 사용 및 경운이 양분 용탈에 미치는 영향 (Table 4)** Sorrenti and Toselli (2016)는 라이시미터를 이용하여 복숭아(1년생) 나무에 대해 바이오차와 퇴비 및 그것들의 혼합물을 토양개량제로 사용한 경우의 양분 용탈에 대해 연구하였다. 바이오차와 퇴비를 혼합한 개량제를 사용했을 때 수분이용효율(water use efficiency)은 개선되었으나, DOC(dissolved organic carbon), 누적 TDN(total dissolved nitrogen) NO<sub>3</sub>-N의 용탈은 증가하는 경향이 보였다. 수분이용효율 측면에서 퇴비만 사용한 것도 개선효과가 있었으나 바이오차와 퇴비를 혼합하였을 때 개선효과가 더욱 증진됨을 보였다. 혼합 개량제 사용시 양분 용탈이 증가하는 것은 퇴비에 포함된 수용성 유기물질에 원인이 있다고 고찰되었다. Knight et al. (1992)은 작물생산성 향상에 기여한다고 알려진 지렁이를 목초지에 사용하였을 때 NO<sub>3</sub>-N의 용탈이 증가함을 연구하였다. 이러한 용탈 증가는 지렁이가 질소 무기화와 질산화를 증가시키며, 토양 공극에 영향을 줌으로써 토양 내 NO<sub>3</sub>-N의 이동에 영향을 준다고 하였다. Piirainen et al. (2007, 2009)은 경운이 양분 용탈에 끼치는 영향을 연구하였는데, DOC, DNC(dissolved nitrogen compounds), 수용성 인 및 양이온의 용탈은 증가하였으나 황산이온은 영향을 받지 않았다고 하였다. 목초지에서의 질소 용탈은 인위적인 예초나 방목에 의해 감소되었으나, 경운에 의해 심각하게 용탈되어 지하수로 유출되었다고 하였다(Saarijärvi et al., 2004).

**Table 4.** Nutrient leaching loss varying soil amendment and management.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation (mm y <sup>-1</sup> )	Crops	Reference
Italy	Impact of amendment with biochar, compost, and their mixture	-Nutrient leaching of Dissolved organic carbon (DOC), total dissolved nitrogen (TDN), NO <sub>3</sub> -N	in kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> DOC: 37-360 TDN: 67-175 NO <sub>3</sub> : 57-147 NH <sub>4</sub> : 6-8	microirrigation (2L h <sup>-1</sup> per plant)	nectarine tree	Sorrenti and Toselli (2016)
UK	Impact of earthworms in pastures	-Leaching of NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> : 0.85-2.2 μg N g <sup>-1</sup>	-	permanent grazed pasture	Knight et al. (1992)
	Impact of intensive management in pasture (grazing and cutting) and renovation	-Nutrient leaching of N and P	in kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> TN: 0.7-46 NO <sub>3</sub> : 0.5-43 in g ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> TP: 4-37 PO <sub>4</sub> : 2-17	518-687	grass: timothy+meadow fescue+couch grass+white clover	Saarijärvi et al. (2004)
Finland	Impact of mechanical site preparation after forest harvesting	-Nutrient leaching of C, N, and P (DOC, organic N, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	in kg ha <sup>-1</sup> 5y <sup>-1</sup> DOC: 36.5 NO <sub>3</sub> : 0.46 NH <sub>4</sub> : 0.88 DON: 1.24 PO <sub>4</sub> : 0.09	564	-	Piirainen et al. (2007)
	Impact of mechanical site preparation after forest harvesting	-Nutrient leaching of cation (Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , H <sup>+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> ) and sulfate	in kg ha <sup>-1</sup> 5y <sup>-1</sup> Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> : 6.26 Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> : 1.97 K <sup>+</sup> : 11.4 Al <sub>3</sub> <sup>+</sup> : 1.00 H <sup>+</sup> : 0.06 Fe <sub>3</sub> <sup>+</sup> : 0.09 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> S: 7.48	564	-	Piirainen et al. (2009)

**양분 용탈 및 수분이동의 모델화 및 보정 (Table 5)** 라이시미터를 이용한 질소용탈 실험 결과와 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델을 보완하여 질소이동 및 무기화 등을 반영한 N-SWAT 모델 결과를 비교하여, 질소 용탈을 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하였다 (Pohlert et al., 2007). 모델 테스트를 통해 질소 용탈에 크게 영향을 미치는 파라미터를 발굴하였고, 유기물 분해속도상수, pH, 공극률 등이 파라미터로 제시되었다. 독일의 Heinlein et al. (2017) 또한 수분이동에 관한 연구를 위해 2개의 중량식 라이시미터에 옥수수를 심어 증발산 및 수액이동을 측정하였고, 그 결과를 작물모델 2가지 [CERES (Crop Environment Resource Synthesis), SPASS (Soil-Plant-Atmosphere System Simulation)]와 증발산 모델 3가지를 조합한 6가지 모델과 비교하였다. CERES 모델은 측정 초기에 증산량을 과대평가하였고, 모든 모델들에서 관수량이 많을 때 실제 증발산량보다 높게 예측하는 등의 실험결과와의 차이를 보였다고 하였다. 모델과 실험 사이의 차이는 한정된 라이시미터 공간과 수분스트레스에 의해 뿌리 분포 형태가 달라지는 것에 의해 발생하였을 것으로 고찰하였다. 이러한 모델 연구는 기후 변동에 따른 지역별 유효수분 변동이 작물 생산량에 영향을 줄 것으로 예상하였고, 모델을 이용한 환경조건 및 발달 단계별 관수량 산정을 목표로 하였다.

**중량식 라이시미터를 이용한 양분 용탈 연구 (Table 6)** 최근에는 중량식 라이시미터를 사용하여 양분 용탈에 관한 연구들이 있었다. 일반 라이시미터에 비해 중량식 라이시미터를 이용하면 물과 양분이동을 동시에 파악함으로써 상호 관계를 이해할 수 있는 장점이 있다. Klammler and Fank (2014)가 3개의 중량식 라이시미터를 이용하여 2007년-2011년간 옥수수 및 동계보리 등에 질소 비료 저감 또는 유기농법을 적용하였을 때 질소 용탈을 감소시킬 수 있음을 보였다. 한국에서는 중량식 라이시미터를 이용하여 물관리 방법과 토성에 따른 양분 용탈 및 작물 흡수를 평가

**Table 5.** Nutrient and water dynamics incorporating computer modelling.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation (mm y <sup>-1</sup> )	Crops	Reference
Germany	Model development for nitrogen prediction	-SWAT-N model (Soil water and nitrogen model) -Model results vs. experiment results	17-98 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	390-657	maize, sugarbeet, winter wheat, winter barley, grass, potato	Pohlert et al. (2007)
	Comparison of model and experiment	-Evapotranspiration and sap flow -6 computer models	-	939	maize	Heinlein et al. (2017)

**Table 6.** Nutrient leaching loss incorporating weighable lysimeters.

Country	Category	Results	Leaching	Precipitation (mm y <sup>-1</sup> )	Crops	Reference
Austria	Impact of low nitrogen input and organic farming	-Water balance -Nitrogen leaching	3-133 kg N ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup>	730-1360	maize, winter barley, pumpkin, triticale	Klammler and Fank (2014)
Korea	Impact of water management on nutrient leaching and crop uptake	-Nutrient leaching and uptake (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> P, inorganic K)	in g m <sup>-2</sup> Total N: 0.05-1.29 PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> P: 0.002-0.16 K: 0.02-0.52	-	soybean	Lee et al. (2017)
	Impact of soil texture on nitrogen leaching	-Nutrient leaching	Total N (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ): 0.14 - 0.7 kg 10a <sup>-1</sup>	-	cabbage	Lee et al. (2018)

하였다. Lee et al. (2017)은 밭토양 라이시미터에서 콩 재배 시 관개 여부에 따른 질산태 질소 용탈량을 비교했을 때 관개했을 때 보다 무관개 시 질산태 질소 용탈량이 많았으며, 무관개구의 콩 수량은 관개했을 때의 25% 수준으로 관개구의 작물 질소흡수량이 20 - 50% 높았다. 따라서 질산태 질소 용탈 저감을 위해서는 적정 수분공급으로 작물 양분 흡수를 높이는 것이 중요하다고 하였다. 또한, Lee et al. (2018)은 배추 재배시 토성에 따른 질소 용탈과 질소 수지를 평가하였는데, 식양토에서 질소 용탈이 거의 없는 반면 사양토에서 식양토에 비해 5배 많은 질소 용탈이 있었고 이 결과로 질소 수지 산정에 토성에 따른 용탈 특성을 고려할 필요가 있다고 하였다. 중국의 경우 2019년에 새로 중량식 라이시미터의 설치가 완료되어 앞으로 연구결과가 예상된다.

**국내 연구 방향** 유럽의 지속가능한 농업을 위한 질소 지킴과 같은 정책 시행이나 뉴질랜드 정부의 식수 질산태 질소 기준 도입에 대응하여 라이시미터를 이용한 연구들이 진행되었던 것과 같이, 우리나라의 공익직불제, 기후변화 대응, 농업환경보전 프로그램, 양분 수지 개선 등의 현안에 라이시미터를 이용한 연구가 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 실험결과와 연계된 모델 개발을 통하여 기후변동에 따른 예측 시나리오를 얻을 수 있다. 이를 위해 장기적인 실험 수행과 더불어 모델 개발이 필요하며, 모델에서 파급된 예측 시나리오를 실험을 통해 검증하는 단계까지 확장될 필요가 있다. 독일에서 개발된 SWAT-N과 같은 모델을 국내실정에 맞게 변형하여 적용하거나, 독일에서 SWAT 모델을 변형하여 SWAT-N 모델을 개발한 것과 같이 국내에서 사용되고 있는 모델을 변형하여 새로운 모델을 개발할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 국내 기후조건에 대한 장기실험에서 중량식 라이시미터의 물과 양분이동을 동시에 파악할 수 있는 장점을 활용하여 수분이동과 연계된 양분 유출에 대한 연구가 장려되어야 하겠다.

## Conclusions

라이시미터를 이용한 양분 용탈 연구는 비료, 질산화억제제 및 토양개량제, 작물재배 등을 이용하여 양분 용탈을 줄일 수 있는 방법들을 탐구하였으며, 양분 이동 모델 개발을 통하여 실험결과를 보완하여 왔다. 이러한 연구들은 지속가능한 친환경농업 실천을 위해 중요성을 지니며, 이에 대응하고 있는 우리나라 농업 현안에 라이시미터를 활용한 양분 용탈 연구가 적극 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## Acknowledgement

This work was supported by the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No.01426204)” and by 2020 RDA Fellowship Program of Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

- Allen, S.C., S. Jose, P.K.R. Nair, B.J. Brecke, P. Nkedi-Kizza, and C.L. Ramsey. 2004. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *For. Ecol. Manag.* 192(2-3):395-407.
- Bergeron, M., S. Lacombe, R.L. Bradley, J. Whalen, A. Cogliastro, M.-F. Jutras, and P. Arp. 2011. Reduced soil



- nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforest. Syst.* 83:321-330.
- Di, H.J. and K.C. Cameron. 2004. Treating grazed pasture soil with a nitrification inhibitor, eco-n™, to decrease nitrate leaching in a deep sandy soil under spray irrigation—a lysimeter study. *New Zealand J. Agric. Res.* 47(3):351-361.
- Di, H.J., K.C. Cameron, J.P. Shen, J.Z. He, and C.S. Winefield. 2009. A lysimeter study of nitrate leaching from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia oxidizing bacteria and archaea. *Soil Use Manag.* 25(4):454-461.
- Drury, C.F., C.S. Tan, J.D. Gaynor, T.O. Oloya, and T.W. Welacky. 1996. Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. *J. Environ. Qual.* 25:317-324.
- Fan, J., J. Xiao, D. Liu, G. Ye, J. Luo, D. Houlbrooke, S. Laurenson, J. Yan, L. Chen, J. Tian, and W. Ding. 2017. Effect of application of dairy manure, effluent and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in clayey fluvo-aquic soil: A lysimeter study. *Sci. Total Environ.* 592:206-214.
- Fu, J., R. Gasche, N. Wang, H. Lu, K. Butterbach-Bahl, and R. Kiese. 2017. Impacts of climate and management on water balance and nitrogen leaching from montane grassland soils of S-Germany. *Environ. Pollut.* 229:119-131.
- Heinlein, F., C. Biernath, C. Klein, C. Thieme, and E. Priesack. 2017. Evaluation of simulated transpiration from maize plants on lysimeters. *Vadose Zone J.* 16(1):1-16.
- Ji, X.-H., S.X. Zheng, L.-H. Shi, and Z.-B. Liu. 2011. Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting Lake area of China. *Pedosphere*, 21(6):753-762.
- Jia, X., L. Shao, P. Liu, B. Zhao, L. Gu, S. Dong, S.H. Bing, J. Zhang, and B. Zhao. 2014. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions. *Agric. Water Manag.* 137:92-103.
- Kim, D.J., J.H. Ok, S.O. Hur, and S.A. Hwang. 2020. Effects of precipitation on soil water and evapotranspiration in differently-textured paddy soils during non-cultivated period: a weighable lysimeter study. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(3):309-322.
- Klammler, G. and J. Fank. 2014. Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Sci. Total Environ.* 499:448-462.
- Knight, D., P.W. Elliott, J.M. Anderson, and D. Scholefield. 1992. The role of earthworms in managed, permanent pastures in Devon, England. *Soil Biol. Biochem.* 24(12):1511-1517.
- Lee, S.-B., Y.-M. Kim, Y.-J. Lee, Y.-S. Song, C.-H. Ryu, D.-B. Lee, C.-W. Lee, C.-H. Lee, and J. Sung. 2019. Effect of optimum nutrient management on productivity and nitrogen balance in rice cultivation: a review, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):559-566.
- Lee, Y.J., J.H. Ok, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2018. Nitrogen leaching and balance of soils grown with cabbage in weighing lysimeter. *Korean J. Environ. Agric.* 37(3):166-171.
- Lee, Y.J., K.H. Han, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song, and D.B. Lee. 2017. Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management. *Korean J. Environ. Agric.* 36(3):147-153.
- Li, Y., J. Li, L. Gao, and Y. Tian. 2018. Irrigation has more influence than fertilization on leaching water quality and the potential environmental risk in excessively fertilized vegetable soils. *PloS One*, 13(9):e0204570.
- Malcolm, B.J., J.L. Moir, K.C. Cameron, H.J. Di, and G.R. Edwards. 2015. Influence of plant growth and root architecture of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*) on N recovery during winter. *Grass Forage Sci.* 70(4):600-610.
- Maxwell, T.M., R.D. McLenaghan, G.R. Edwards, H.J. Di, and K.C. Cameron. 2019. Italian ryegrass swards reduce N leaching via greater N uptake and lower drainage over perennial ryegrass cultivars varying in cool season

- growth rates. *New Zealand J. Agric. Res.* 62(1):69-82.
- Meissner, R., J. Seeger, and H. Rupp. 2002. Effects of agricultural land use changes on diffuse pollution of water resources. *Irrig. Drain.* 51(2):119-127.
- Moir, J.L., K.C. Cameron, and H.J. Di. 2007. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system. *Soil Use Manag.* 23(2):111-120.
- Ok, J.H., K.H. Han, Y.J. Lee, Y.S. Zhang, H.R. Cho, S.A. Hwang, S.S. Kim, J.H. Lee, and D.J. Kim. 2018. Water balance for Chinese cabbage in spring season with different upland soils evaluated using weighable lysimeters. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):555-563.
- Ok, J.H., K.H. Han, Y.S. Zhang, H.R. Cho, S.A. Hwang, and D.J. Kim. 2019. Weighable lysimeter study for water balance estimation of Chinese cabbage in the fall season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):325-333.
- Piirainen, S., L. Finér, H. Mannerkoski, and M. Starr. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus leaching after site preparation at a boreal forest clear-cut area. *Forest Ecol. Manag.* 243(1):10-18.
- Piirainen, S., L. Finér, H. Mannerkoski, and M. Starr. 2009. Leaching of cations and sulphate after mechanical site preparation at a boreal forest clear-cut area. *Geoderma* 149(3-4):386-392.
- Pohlert, T., J.A. Huisman, L. Breuer, and H.G. Frede. 2007. Integration of a detailed biogeochemical model into SWAT for improved nitrogen predictions—Model development, sensitivity, and GLUE analysis. *Ecol. Modell.* 203(3-4):215-228.
- Saarijärvi, K., P. Virkajärvi, and H. Heinonen-Tanski. 2007. Nitrogen leaching and herbage production on intensively managed grass and grass-clover pastures on sandy soil in Finland. *Eur. J. Soil Sci.* 58(6):1382-1392.
- Saarijärvi, K., P. Virkajärvi, H. Heinonen-Tanski, and I. Taipainen. 2004. N and P leaching and microbial contamination from intensively managed pasture and cut sward on sandy soil in Finland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104(3):621-630.
- Shepherd, M.A. and G. Bennett. 1998. Nutrient leaching losses from a sandy soil in lysimeters. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29(7-8):931-946.
- Sorrenti, G. and M. Toselli. 2016. Soil leaching as affected by the amendment with biochar and compost. *Agric. Ecosyst. Environ.* 226:56-64.
- Syvrtsen, J.P., M.L. Smith, and B.J. Boman. 1993. Tree growth, mineral nutrition and nutrient leaching losses from soil of salinized citrus. *Agric. Ecosyst. Environ.* 45(3-4):319-334.
- Ulén, B. 1999. Leaching and balances of phosphorus and other nutrients in lysimeters after application of organic manures or fertilizers. *Soil Use Manag.* 15(1):56-61.
- Ulén, B., A.K. Eriksson, and A. Etana. 2013. Nutrient leaching from clay soil monoliths with variable past manure inputs. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176(6):883-891.
- Valkama, E., R. Lemola, H. Känkänen, and E. Turtola. 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 203:93-101.
- Winton, K. and J.B. Weber. 1996. A review of field lysimeter studies to describe the environmental fate of pesticides. *Weed Technol.* 202-209.
- Woods, R.R., K.C. Cameron, G.R. Edwards, H.J. Di, and T.J. Clough. 2016. Effects of forage type and gibberellic acid on nitrate leaching losses. *Soil Use Manag.* 32(4):565-572.
- Woods, R.R., K.C. Cameron, G.R. Edwards, H.J. Di, and T.J. Clough. 2018. Reducing nitrogen leaching losses in grazed dairy systems using an Italian ryegrass-plantain-white clover forage mix. *Grass Forage Sci.* 73(4):878-887.