

REVIEW ARTICLE

잔디관리를 위한 질소와 인의 사용과 환경

이상국

호서대학교 기초과학연구소

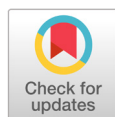
Nitrogen and Phosphorus Use and Environmental Problems for Turfgrass Management

Sang-Kook Lee

Research Institute for Basic Sciences, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

Abstract

Nitrogen (N) and Phosphorus (P) are essential nutrients for turf growth. Both nutrients are required to appropriate amount in their use to prevent environmental Problems. There are three factors which are pH, temperature, and irrigation methods to reduce the loss of N and P, and maximize their efficiency. Entire N use has been reduced from 2000 to 2010 due to regulation change and increase of market price. However, the amount of its use is still more than optimum range. More researches on the reduction of N use for turfgrass management are required. The effect of P on turfgrass establishment has been well investigated. Phosphorus could be excessively applied although a soil test would suggest no applications and lead to P accumulation in soil. Accumulated P in soil is one of the sources to cause environmental problems such as unwanted algae growth in most fresh surface-water due to the inflow of soil with excessive P. Efforts to reduce P loss have been explored in previous researches, based on buffer strips, soil amendments, and soil types. Eleven states in US have passed the new regulation to restrict improper use of P since 2005 when Minnesota enacted the new regulation. Not much attentions of improper P use have been recognized and no regulations have been passed. The new regulation and guideline of proper P use is needed for turfgrass management program to prevent environmental problems.



OPEN ACCESS

***Corresponding Author:**

Phone. +82-41-540-5879
Fax. +82-41-540-5883
E-mail. sklee@hoseo.edu

Received: December 11, 2018

Revised: December 22, 2018

Accepted: December 25, 2018

© 2018 The Korean Society of Weed Science and The Turfgrass Society of Korea



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Key words: New regulation, Nitrogen, Phosphorus, Proper fertilization

서론

식물의 성장에 필요한 원소는 총 17가지로 알려져 있다(Marschner, 1995). 식물이 생명현상을 유지하고 성장하기 위해서는 이 17가지 원소가 식물체 내에 적정수준의 양으로 존재해야만 한다. 이 원소들 중에 일부는 식물체 내에서 세포나 효소를 구성하는 필수 조건이 되기도 하며, 또한 다른 원소들은 식물 체내의 신진대사 과정에서 그 원소만이 가지고 있는 고유의 역할을 하기도 한다. 이 17가지 필수 원소들은 어느 한가지도 다른 것으로 대체될 수 없으며 반드시 식물의 신진대사에 직

접적으로 연관이 되어야 한다. 그러므로 17가지 필수 원소들 중에서 한가지 원소라도 그 양이 필요량 보다 많거나 혹은 적을 때는 정상적인 성장과정이 아닌 이상증상이 나타나게 된다. 이 17가지 필수 원소 중에 공기나 수분을 통해 공급이 되는 탄소(Carbon, C), 산소(Oxygen, O), 수소(Hydrogen, H)를 제외하고 공급이 필요한 원소 중에 질소(Nitrogen, N)와 인(Phosphorus, P)은 식물의 성장을 위해 가장 많은 양이 요구되는 다량 원소(Macronutrients) 그룹에 포함된다. 일반적으로 질소와 인과 함께 언급이 되는 칼륨(Potassium, K)은 17가지 필수 원소 중에 유일하게 식물체를 구성하는 성분에 관여되지 않으며 약 80여가지의 효소를 활성화 하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Havlin et al., 1999). 칼륨은 식물체 건물중 기준으로 1%에서 3%를 차지하고 있는 질소를 제외하면 식물체 내에 가장 많은 양으로 존재하는 원소이다(Carrow et al., 2001). 그러나 식물에게 필요한 17가지 필수 원소 중에 칼륨을 제외하면 질소와 인은 식물체내에서 가장 많은 함량의 원소이며 가장 많은 공급량을 요구하는 필수 원소가 된다.

질소는 1776년 프랑스의 화학자 앙투안로랑 드 라부아지에(Antoine-Laurent de Lavoisier)에 의해서 그 존재가 처음 밝혀졌으며, 1918년 독일의 화학자 프리츠 하버(Fritz Haber)와 카를 보슈(Carl Bosch)에 의해 개발된 하버-보슈 공정법(Haber-Bosch Process)에 의해 질소의 한 형태인 암모니아를 제조 할 수 있게 되었고, 이는 1900년대 당시 16억에 불과하던 인구를 2018년 현재 76.9억명으로 폭발적인 증가하게 되는 원동력을 제공하게 된다. 그러나 질소는 전세계의 식량난을 해결하는 원동력이 되기도 하였지만 제조가 가능해 지면서 그 사용량이 급격하게 증가하게 되면서 환경에 큰 영향을 주기도 하였다(PPFK and UNFPA, 2018). 질소의 경우는 과다 사용시 토양 내에 암모늄 이온(NH_4^+)의 형태와 질산염(NO_3^-) 형태로 존재하게 되는데 토양이 음전하를 띠게 되므로 대부분의 질산염은 토양 내 이동이 빠르게 진행이 되어 지하수로 유입이 되기 쉽다. 이러한 경로로 지하수 내 질산의 농도가 상승하게 되고, 지하수 중에 함유되어 있는 고농도의 질산염을 인간이 섭취할 경우에는 발암물질인 nitrosamine이 형성되고 질산염 이온이 이산화질소(NO_2^-) 이온으로 전환되어 혈액 속의 hemoglobin과 결합하게 되어 methemoglobin을 형성 하게 된다. 이 methemoglobin은 특히 6세미만 어린이에게 치명적인 유아 청색증(blue baby syndrome)을 유발시키는 것으로 알려져 있다(Kapoor and Viraraghavan, 1997; Mizuta et al., 2004).

인은 1669년 독일의 연금술사 브란트(Hennig Brandt)가 금을 만들기 위해서 소변을 정제하여 염을 얻는 과정에서 발견하게 되었다. 인은 식물체내에서 에너지의 저장과 이동에 관여하며 종자의 생산에 많은 인이 요구되는 것으로 알려져 있다(Christians, 1996; Tisdale et al., 1993). 특히 잔디관리에서는 지하부의 성장과 종자의 발아에 꼭 필요한 원소이기 때문에 처음 잔디를 조성할 때 질소, 인, 칼륨의 비율을 1:2:1로 하는 것이 일반적이다(Christians, 2011). 그러나 인은 질소와 달리 토양에서 이동이 적기 때문에 용탈에 의한 손실 보다는 토양의 유실과 함께 이동하여 호수나 하천 등의 표면수 오염에 관여한다. 과도한 인의 하천으로의 유실은 하천 내의 용존산소량을 감소시켜 하천생물의 개체수가 감소되며 유입된 화학비료와 함께 조류의 과도한 성장을 이끌게 된다. 이러한 현상을 부영양화(Eutrophication)라 하며, 우리나라에서도 부영양화에 하천 오염이 증가되어 그 인식이 고조되고 있다.

질소와 인은 잔디관리에 있어 반드시 필요한 필수 원소 이다. 그러나 효과적인 질소와 인산질 사용과 환경오염을 예방하기 위해서는 적정량의 사용과 손실되는 양을 감소시키는 방법들이 필요하다. 또한 질소와 인의 과잉 사용으로 인해 발생하는 환경적인 문제 발생에 대한 인식이 필요하다. 본 연구에서는 잔디관리에 사용되는 질소와 인의 사용에 있어 그 효과를 극대화 하기 위해 손실되는 요인에 대한 연구결과를 종합하고 질소와 인의 사용과 관련된 환경문제에 대한 인식 개선을 위해 국제사회의 대응 현황과 우리나라의 상황에 대해 검토하고자 한다.

질소(Nitrogen, N)와 인(Phosphorus, P)의 기능

식물체 내에서 질소는 건물 중 기준 약 2%에서 5%의 양으로 언급된 바와 같이 17가지 필수원소중에서 가장 많은 양으로 존재하는 원소이다. 따라서 가장 많은 양의 공급이 필요하기도 하다. 질소는 식물체 내에서 엽록소를 구성하는 물질로 사용이 된다. 엽록소는 광합성으로 통해 탄수화물을 합성하는데 절대적으로 필요한 역할을 하며 생성된 탄수화물은

새로운 세포소기관과 단백질의 구성에 필요한 아미노산을 구성을 위해 필요하게 된다(Carrow et al., 2001). 따라서 질소가 부족하게 되면 엽록소의 부족으로 녹색이 부족하게 되는 황화현상이 발생하게 된다. 또한 질소는 식물체 내에 존재하는 여러 호르몬들을 조절하는 역할을 한다. 질소에 의해서 조절되는 대표적인 호르몬에는 세포 신장 촉진, 열매의 형성, 뿌리 발생 촉진 등의 역할을 하는 Auxin과 세포분열촉진, 세포의 노화 억제, 엽록체 발달에 관여하는 Cytokinins, 그리고 과일 성숙, 스트레스 저항 등의 역할을 하는 Ethylene 등이 있다(Davis, 1987). 질소는 삼투압을 조절하는 Glycin betaine과 proline의 구성성분이기 하다. 이 물질들은 염분, 열, 수분 등의 스트레스에 저항하는 역할을 제공한다. 잔디관리에서 질소는 엽색, 지상부 및 지하부 성장, 밀도, 지하경과 포복경의 성장, 스트레스 저항, 대취층(Thatch layer) 축적 등에 관여한다(Carrow et al., 2001). 그러므로 잔디관리에서 질소가 부족하게 되면 황화현상 이외에 지상부의 밀도저하, 오래된 잎의 노화, 성장의 둔화 등을 초래하게 된다.

식물체 내에서 인의 가장 주된 기능은 에너지 저장과 전달의 역할을 하는 것이다. 인산화 과정(phosphorylation)을 통해서 에너지가 풍부한 인산유기물에서 에너지가 필요한 식물체 내의 물질로 필요한 만큼의 에너지가 전달되게 된다(Havlin et al., 1999). 또한 인은 식물체 내에서 핵산, 조효소, 인지질, 인단백질, nucleotide 등을 구성하는 주된 원소가 된다. 따라서 지하부의 성장과 종자 생성 및 발아에 필수적인 원소가 된다(Carrow et al., 2001). 인이 부족하게 되면 질소와는 달리 엽색이 자주색으로 변하게 되는데 우리나라의 토양에서는 발생하는 일이 많지 않다.

질소와 인시비 효과에 미치는 요인

토양의 수소이온농도(pH)

식물의 성장에 필요한 적정 pH 범위는 토양내 유기물 함량이 19% 혹은 그 이하일 경우 pH 6.0-7.0 이며, 그 범위가 pH 5.2-7.8 일 경우도 생존이 가능한 것으로 알려져 있다. 예외적으로 블루베리나 진달래 등의 식물들은 산성토양을 선호하는 식물로 pH의 범위가 4.5-5.2 에서도 생존이 가능하다(Rosen et al., 2008). 이 적정 pH의 범위는 질소의 시비효과에도 영향을 주게 되는데, 그 이유는 토양 내 질소를 고정하는 *Rhizobia* spp.에 속하는 세균들의 활동에 영향이 있기 때문이다. 예를 들어 토양의 pH가 6.0 이하일 경우 토양 내의 질소를 고정하는 세균인 *Rhizobia melioli*의 수가 급속히 감소하여, 토양 내 질소고정 효과가 감소하게 된다. 따라서 식물이 이용할 수 있는 토양 내 질소의 양이 감소하게 된다(Havlin et al., 1999). 적정 토양 pH 범위에서 벗어나게 될 때 질소의 시비효과가 감소하게 되는 또 하나의 원인은 *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter* 그리고 *Nitrococcus*와 같은 세균에 의해 진행되는 질산화과정(Nitrification)의 증가로 인해 질소의 용탈(Leaching)에 의한 질산(NO_3)의 손실과 *Pseudomonas*, *Alkaligenes*, *Bacillus* 등의 세균에 의해 진행되는 탈질화 과정(Denitrification)의 증가로 인해 Dinitrogen (N_2), Nitric oxide (NO), Nitrous oxide (N_2O) 등의 기체 형태의 질소 손실을 초래하는 과정이 있다. Kyveryga et al. (2004)은 질소시비 후 토양 pH의 변화에 따라 질소가 질산화 과정으로 손실되는 양을 측정하였다. 그들은 pH 7.5 이상에서는 시비된 질소 중 89%가 질산화 과정에 의해서 손실이 되었으며, pH 6.0 이하에서는 39%의 질소가 질산화 과정에 의해서 손실되었다고 보고하였다. 탈질화 과정으로 인한 질소 손실의 경우, 상반된 연구결과가 보고된 바 있다. Bremner and Shaw (1958)는 토양의 pH가 5.0 이하인 경우 탈질화에 관여하는 세균의 작용이 없어 탈질화 과정에 의한 질소의 손실이 거의 없고, 염기성 토양에서는 탈질화 과정이 빠르게 증가한다고 보고 하였다. 그러나 Simek and Cooper (2002)는 토양 pH는 탈질화 과정에 큰 영향을 주지 않는다고 보고하였다. 그 이유는 탈질화 과정을 측정하기 위한 토양표본의 조건과 원 토양의 조건이 다르고, 탈질화 과정을 유도하기 위한 과정으로 토양을 incubation 내에서 측정을 위해 배양하는 과정에서 토양의 조건이 변하기 때문이라고 보고한 바 있다. 토양의 pH는 빈번하게 변화되는 것이 아니기 때문에 관리대상이 되는 토양의 pH 값이 어느정도 인지 인지하고 있는 것은 질소의 효율을 극대화 하는 관점에서 중요한 요인으로 판단된다. 일반적으로 토양 분석은 관리대상이 되는 작물의 관리계획을 위해 식재 되기 전에 이루어지며, 작물이 식

재 된후에는 1-3년 마다 한번씩 토양 분석이 추천되고 있다.

토양 내 인의 가용성은 pH 6.5에서 가장 높게 나타난다. 토양에서 식물이 이용하는 인은 H_2PO_4 와 HPO_4^{2-} 형태의 인산으로 존재하는데, 낮은 pH에서 인은 주로 Al과 Fe와 결합된 형태로 존재하고, 중성이나 높은 pH에서는 Ca와 결합된 형태로 주로 존재한다. pH 6.5에서는 이 모든 형태의 인산이 흡수가 가능하기 때문에 인의 가용성이 가장 높다(Stevenson, 1986). 토양 내 인의 가용성을 증가하는 방법에는 토양 내 인의 무기화 과정(Mineralization)을 활성화 하는 방법이 있으며, 이때 pH가 중요한 조건이 된다. Tabatabai and Dick (1979)에 의하면 pH 7.0 이상에서 Ca-P의 무기화 과정이 촉진된다고 보고한 바 있다. 연구결과에 의하면 토양이 pH 7.0 이상, 유기탄소 함량이 5% 일 때, 무기화된 인산의 양은 약 $200 \mu g g^{-1} soil$ 이며, 동일 조건하에서 pH 7.0 이하일 때는 무기화된 인산의 양은 약 $1,300 \mu g g^{-1} soil$ 로 약 6.5배의 차이가 났다. 인산의 시비 효율을 높이는 관점에서 대상 토양의 pH는 6.5가 가장 이상적이지만 잔디 관리를 위한 최적 토양 pH는 초종마다 다양하다. 초종별 최적 pH 범위는 5.0-7.0로 Table 1(Murphy and Heckman, 2003)은 초종별 최적 pH 범위를 나타냈다. Redtop, sheep fescue, velvet bentgrass를 제외하면 우리나라에서 주로 사용되는 초종들의 최적 토양 pH 범위는 모두 pH6.5를 포함한다.

질소와 인의 손실에 관여하는 온도

질소 손실에 가장 큰 영향을 주는 질산화 과정의 최적 토양 온도는 $25-35^{\circ}C$ 으로 비교적 그 조건의 범위가 큰 것으로 보고되고 있다(Chandra, 1962). 우리나라의 경우로 본다면 봄에서 여름까지로 잔디의 성장이 가장 많이 이루어 지는 기간이 기도 하다. 그러므로 질소 효율의 관점에서 볼 때 질소 시비의 가장 최적 시기는 가을로 일중 최저온도가 $4.4^{\circ}C$ 이하이거나 토양의 온도가 $10^{\circ}C$ 이하일 경우가 가장 적합하다(Havlin et al., 1999). 탈질화 과정에 의한 질소 손실은 온도범위가 $2^{\circ}C$ 에서 $25^{\circ}C$ 까지 증가하는 경우 그 속도가 급속히 증가하여 질소 손실의 속도가 가속화되며 온도의 범위가 $25-60^{\circ}C$ 의 경우 증가 폭은 감소하나 손실량은 더 증가하게 된다. 또한 토양의 온도가 $5-10^{\circ}C$ 인 경우 탈질화 과정에 의한 질소의 손실량은 가장 크게 이루어진다(Powlson et al., 1988). 선행연구에 의하면 시비된 질소량의 85%까지 탈질화 과정에 이루어 질 수 있다고 보고된 바 있으나, 대부분 토양의 경우 탈질화에 의한 질소 손실은 5% 미만으로 알려져 있다(Carrow et al., 2001). 탈질화 과정에 의한 질소 손실을 줄이는 방법은 토양 내 O_2 의 농도를 높여주는 방법이 있다. 답압 정도가 높은 경우, 토양에서 모래의 비중이 적은 경우, 배수가 잘 되지 않는 경우, 토양 내 유기물의 함량이 높은 경우 그리고 온도가 상승 할수록 탈질화에 의한 질소의 손실량 높아져 질소 시비의 효과가 감소하게 된다. 질산화와 탈질화 과정에 관여하는 세균은 모두

Table 1. The optimum pH range for turfgrass species.

| Species | Optimum pH range |
|----------------------|------------------|
| Annual bluegrass | 6.0-6.5 |
| Bermudagrass | 6.0-7.0 |
| Canada bluegrass | 6.0-6.5 |
| Chewings fescue | 5.0-6.5 |
| Creeping bentgrass | 5.5-6.5 |
| Creeping red fescues | 5.5-6.5 |
| Hard fescue | 5.0-6.5 |
| Kentucky bluegrass | 6.0-6.5 |
| Perennial ryegrass | 5.5-7.0 |
| Redtop | 5.0-6.0 |
| Rough bluegrass | 6.0-7.0 |
| Sheep fescue | 5.0-6.0 |
| Tall fescue | 5.5-7.0 |
| Velvet bentgrass | 5.0-6.0 |
| Zoysiagrass | 6.0-7.0 |

토양 내 O_2 의 농도가 높아질 경우 그 활동이 급속하게 감소하게 되며, 반대로 O_2 의 농도가 낮아질 경우 질산화와 탈질화 과정에 관여하는 세균의 활동이 증가하게 되어 질소의 손실이 증가하게 된다. Colbourn et al. (1984)은 60 mm의 강수량 후 O_2 의 농도가 5%로 감소했을 때 탈질화 과정에 의한 질소의 손실은 시비된 총 질소량의 20%로 가장 높았다고 보고했다. 언급된 바와 같이 탈질화에 대한 질소 손실의 양은 5% 미만으로 낮은 수준이나 O_2 의 농도가 낮아짐으로써 발생할 수 있는 질소의 손실을 낮추려면 관수 배수문제 등을 고려하여 토양 수분을 조절해야 할 것이다.

식물에 의한 인의 흡수는 높은 온도에서 그 흡수가 높은 것으로 보고되고 있다. 인산이 시비가 되었을 때 높은 온도에 서는 낮은 온도에서 보다 그 흡수가 높은 것으로 나타났다. 그러나 인산의 시비가 이루어지지 않았을 때는 온도차이에 의한 인의 흡수량은 차이가 없는 것으로 보고되었다(Liu et al., 2002; Reddy and DeLaune, 2008; Sah and Mikkelsen, 1986). 또한 토양 내에 존재하는 유기물로부터 식물이 흡수하기 위한 인산의 형태로 전환되는 무기화 과정(Mineralization)을 위해서는 토양내 미생물의 활동이 필요한데, 이 미생물들의 활동은 온도가 상승과 함께 그 활동량이 증가하게 된다. 따라서 온도의 상승과 함께 무기화 과정에 의한 토양내 인산의 함량은 증가하게 된다. Grierson et al. (1999)는 토양 내에서 수분, 온도, 시비의 정도가 인산의 무기화 과정에 미치는 영향에 대해서 연구결과를 보고한 바 있다. 연구결과에 의하면 온도가 15°C에서 38°C까지 증가했을 때 인산의 무기화 과정은 13%에서 53%로 증가한 것으로 나타났다. Bower (1949)는 토양을 각각 25, 30, 35°C로 배양했을 때 무기화된 인산의 양을 측정하였다. 무기화된 인산의 양은 25°C 일때 11 ppm에서 35°C로 온도가 증가하였을 때 38.7 ppm으로 증가한 것으로 보고했다. 선행연구 결과에 의하면 온도가 10°C 증가 할 때 마다 약 2배의 무기화된 인산의 양이 증가하는 것으로 나타났다.

토양 수분

토양 수분 조절은 잔디의 생육에 가장 중요한 역할을 하는 필수 요소이며, 질소의 공급이 많이 필요한 잔디의 관리를 위해서는 효율적인 질소의 효과를 위해 수분 관리가 절대적으로 중요한 요소가 된다. 토양 수분에 의한 질소의 손실은 질산화 과정으로 생성된 NO_3 의 용탈에 의해 지하수로 이동하는 형태로 손실이 이루어진다. 많은 강수량이나 필요이상의 관수가 이루어졌을 때는 용탈에 의한 질소의 손실이 많이 이루어 지게 된다. 특히 모래지반에서 관리가 이루어지는 잔디의 경우 토양내 대공극(Macro pore)의 비중이 크기 때문에 그 손실이 더 많이 발생하게 된다. Morton et al. (1988)은 Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) 90%와 creeping red fescue (*Festuca rubra* L.) 10%로 구성된 혼합 종에 1.25 cm의 관수를 일주일에 3회 총 3.75 cm wk⁻¹를 공급하였다. 이 실험에서 연간 244 kg N ha⁻¹로 처리된 실험구에서는 연간 총 32 kg N ha⁻¹가 용탈에 의한 손실로 약 13.1%의 질소 손실이 발생한 것으로 나타났다. 이것은 질소가 많이 사용이 되는 creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.)와 같은 고관리 초종의 경우 대부분 모래지반에서 관리가 이루어지고 있어 용탈에 의한 질소의 손실이 더 빠르게 이루어 지기 때문에, 한번에 많은 수분이 공급되는 관수 방법은 많은 질소의 손실이 발생하게 된다.

인산의 효율을 높이기 위한 수분관리 전략은 주로 관수방법과 연관이 있다. 관수방법은 관수의 빈도와 양에 따라 적은 수분의 양을 높은 빈도로 공급하는 포장용수량(Field capacity) 기반의 관수방법과 많은 양의 수분을 낮은 빈도로 공급하는 위조점 기반(Wilting point)의 관수방법 2가지가 있다. 토양 내 인산 비율을 높이기 위해서는 위조점 기반의 관수방법이 권

Table 2. Elemental contents in cool-season turfgrass leaf tissues following tissue analysis.

| Turfgrass Species | Nitrogen (%) | Phosphorus (%) | Potassium (%) |
|--------------------------------|--------------|----------------|---------------|
| Creeping bentgrass | 2.40-8.30 | 0.20-2.60 | 2.20-2.60 |
| Kentucky bluegrass | 2.51-5.40 | 0.27-0.49 | 1.73-3.08 |
| Perennial ryegrass | 3.34-5.10 | 0.35-0.55 | 2.00-3.57 |
| Tall fescue | 3.40-5.40 | 0.34-0.51 | 3.00-4.00 |
| Creeping red fescue | 3.70 | 0.34 | 2.62 |
| Average of cool-season species | 4.00-5.00 | 0.41-0.48 | 2.10-3.60 |

장되고 있으며, 식물의 인산 흡수량을 높이기 위해서는 포장용수량 기반의 관수 방법이 권장되고 있다. Wang and Zhang (2010)은 그린하우스 내에서 토마토 관리를 위한 수분장력에 따라 토양 내 인산의 비율과 가용성에 대해서 실험하였다. 실험결과 토양 내 인산의 가용성은 수분장력이 -16 kPa 과 -25 kPa 사이에서 가장 높은 것으로 나타났으며, 토양 내 인산 비율은 수분장력이 -25, -40, -63 kPa 에서 더 높은 것으로 나타났다. Chang et al. (2017)은 furrow irrigation (FI), surface drip irrigation (SUR), subsurface drip irrigation (SDI) 3가지의 관수방법으로 토양 내 인산의 가용성 변화에 대해서 측정하였다. 실험결과 토양 내 가용성 인산이 제한적일 때는 field capacity based 관수방법과 유사한 SUR 관수방법이 SDI나 FI의 관수방법보다 인산의 효율이 높은 관수방법 방법이라고 보고했다. 일반적으로 식물의 지하부 성장을 촉진 시키기 위해서는 wilting point based 관수방법이 권장된다. 그러나 인산의 시비 효율을 높이기 위해서는 field capacity based 관수방법이 더 효율적인 것으로 선행연구 결과는 나타내고 있다.

잔디의 질소와 인의 분석

식물이 필요한 영양분이 어느 정도인지 분석하고 예측하는 방법은 원소마다 그 방법이 다르다. 이러한 방법의 큰 범주로 토양분석과 식물조직 분석의 두가지 방법으로 이루어진다. 질소의 경우 식물이 섭취하는 질소의 형태가 질산(NO_3^-)과 암모니아(NH_4^+)의 형태이므로 주로 이 두가지의 형태를 분석하게 된다. 그러나 토양분석의 경우, 토양이 음전하의 성질을 가지고 있기 때문에 토양 속에 주로 잔존하게 되는 형태인 암모니아는 식물이 이용할 수 있는 형태의 질소의 양을 예측하기 위해서 분석이 되며, 질산의 경우 지하수의 오염가능성을 예측하기 위해 분석하게 된다. 잔디가 아닌 다른 작물에서는 질산화 검사(Nitrification test)를 통해 식물이 필요한 질소의 양을 예측하기도 한다(Drury et al., 2008). 그러나 잔디의 성장을 위한 질소의 양을 예측하기 위한 분석 방법으로는 사용되지 않고 있다. 토양 속의 식물에게 필요한 질소의 양을 측정하기가 어려운 이유는 토양 속에서 질소의 이동이 빠르게 이루어지기 때문이다. 토양분석은 표본채집에서 분석까지 어느 정도의 시간이 필요하나 그 시간 동안 토양 내의 질소의 양이 일정하게 유지되지 않기 때문이다. 식물이 필요한 질소의 양을 예측하기 위한 분석방법이 수년 동안 연구가 되어왔지만 정확한 예측 결과를 도출해 내기에는 제한점이 많이 있는 것이 현실이다. 최근에는 높은 수준의 관리가 이루어져야 하는 고관리 잔디초종을 위한 질소분석 방법으로 식물조직 검사가 이루어지고 있다. 식물조직 검사의 경우 토양분석과 비교하여 비교적 식물체 내의 질소함량을 정확하게 도출해 낼 수 있지만 이 방법 역시 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다. 한지형 잔디의 초종별 및 조직내 질소, 인, 칼륨의 권장되는 함량은 Table 2와 같다(Mills and Jones, 1996). 식물조직 분석 방법으로는 Near Infrared Spectroscopy (NIRS)가 있다. NIRS 분석 결과에 대한 경험이 있는 실무자의 경우 분석이 가능한 대학의 연구팀이나 연구소와 협조 하에 관리 대상인 잔디의 질소요구량에 대한 데이터의 누적이 가능하다면 단회성 분석결과를 적용하는 것보다 효과적인 관리 결과를 얻을 수 있다.

인산의 요구량을 측정하는 방법은 식물조직 분석 보다는 토양 분석이 일반적으로 사용이 되고 있다. 인산의 토양분석은 토양의 pH에 따라 Bray-Kurtz P1 test, Mehlich-3 test, Olsen test의 3가지가 사용이 된다. Bray-Kurtz P1 test는 1945년 University of Illinois의 Bray 와 Kurtz 에 의해서 만들어 졌다(Bray and Kurtz, 1945). 이 방법은 염화수소산(hydrochloric)과 플루오르화암모늄 용액(ammonium fluoride solution)을 추출물로 사용하는 분석법으로 토양의 pH가 중성이거나 7.0 일때 사용이 된다. Mehlich-3 test는 1984년 Adolph Mehlich에 의해서 만들어 졌으며 처음에는 North Carolina 지역의 중성 혹은 산성토양을 분석하기 위해서 고안이 되었다(Mehlich, 1984). 추출용액으로 아세트산(acetic acid), 질산암모늄(ammonium nitrate), 플루오르화암모늄(ammonium fluoride), 질산(nitric acid) and the 킬레이트(chelate), 에틸렌디아민사아세트산(ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) 등이 혼합된 용액을 사용한다. Olsen test는 1954년 Olsen, Cole, Watanabe, Dean등에 의해서 고안이 되었으며 주로 pH 7.0 이상의 토양을 분석할 때 사용이 된다(Olsen et al., 1954). 추출용액으로는 탄산수소나트륨(sodium bicarbonate)을 사용한다. Table 3은 잔디관리에서 사용되는 토양내 인산분석법에 따른 인산의 적정 범위를 나타낸 표이다(Carrow et al.,

2001).

질소와 인의 손실을 줄이고 시비효과를 극대화 하기 위해서는 관리대상이 되는 잔디의 특성과 분석 데이터를 파악하여 관리에 적용 하는 것은 질소와 인시비량을 고려할 때 손실을 줄이고 효과를 높이는 방법으로 권장된다.

잔디관리에 사용되는 질소와 인의 환경문제 인식

잔디관리를 위해서 가장 많이 사용되는 질소는 그 사용량이 적정범위를 넘어서게 될 때 언급된 바와 같이 지하수 내의 질산염의 함량이 높아지게 되면 이 지하수를 섭취한 아이들에게서는 유아청색증을 유발 할 수 있다. 현재 세계보건기구 (World Health Organization, WHO)에서는 유아 청색증을 예방하기 위해서 지하수내 질산염의 농도가 10 ppm 이상이 되지 않도록 권고하고 있다(WHO, 1998). 이에 따라 질소질 화학비료의 사용에 있어 주의가 요구되고 있다. 우리나라의 연간 질소질 화학비료의 사용량은 2000년 약 800,000 톤에서 2010년에는 절반수준으로 감소하였다. 그 이유는 2005년 질소질 화학비료 보조의 폐지가 결정됨에 따라 사전 구매가 증가해 722,000 톤 까지 증가 하였으나 2007년 친환경 농업 확대, 그리고 2008년 화학비료 가격의 인상 등으로 2010년에는 약 434,000 톤까지 감소하게 되었다(Nam et al., 2012). 그러나 국토 면적에 비해 아직까지 그 사용량은 여전히 많은 것으로 파악되고 있어 질소질 비료의 효율을 극대화 하고 손실을 줄일 수 있는 방안이 필요하다.

인의 과도한 사용으로 부영양화를 초래하는 것은 일반적으로 알려진 사실이다. 우리나라 하천의 부영양화 상태도 그 심각성이 고조 되고 있다. NIER (2016) 에서는 2015년도 우리나라 전국의 49개 호수와 하천의 수질을 검사하여 그 결과를 보고한 바 있다. 수질검사 결과 49개의 호수와 하천에서 10곳에서 부영양화 지수가 기준 이상으로 나타났다. 검사 대상의 49곳 중 20.4%가 부영양화에 의해 오염이 되었다는 것이다. 하천의 부영양화 오염을 방지하려면 토양과 함께 유실되는 화학비료, 특히 인의 유실을 줄여야 하는 것이 중요하다. 잔디관리가 이루어 질 때 인의 사용은 토양분석에 따른 인의 권장량을 고려하기 보다는 복합형태의 형태로 질소의 사용량에 맞추어 사용이 되고 있다. 이것은 토양에 인산의 함량이 많이 있더라도 인산의 사용량은 고려가 되지 않고 토양에 적용이 된다는 것이다. 이 결과 토양 속의 인산 함량은 계속해서 축적이 되고, 따라서 토양과 함께 유실된 인산은 하천으로 유입이 되어 부영양화를 초래하게 된다. 국가별 인산의 사용량을 보면, 우리나라에서는 단위면적당 인산의 사용량은 미국이나 유럽과 비교했을 때 그 사용량이 크게 차이가 난다. 미국이나 유럽의 인산 사용량이 $0.2-5.2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이나 한국에서의 인산 사용량은 $15-25 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도로 그 차이가 크다(Table 4). 미국에서는 오래 전부터 인산 사용량을 줄이기 위한 노력이 계속해서 이루어졌다. 인산 시비를 줄이기 위해서 인산 시비의 효과에 대한 검증을 위해 미비한 효과가 도출된 연구결과가 보고되었다. Lee et al. (2013)에 의하면 인산이 부족한 토

Table 3. The range of soil phosphorus by the different analysis methods often used for turfgrass.

| Extractant | Phosphorus sufficiency level (ppm) | | | |
|--------------------|------------------------------------|-------|--------|------|
| | Very low | Low | Medium | High |
| Bray P1 | 0-4 | 5-15 | 16-30 | >31 |
| Mehlich III | 0-12 | 13-26 | 27-54 | >55 |
| Olsen [†] | 0-6 | 7-12 | 13-28 | >29 |

Table 4. Summary of averaged phosphorus rate used in different countries.

| Country | Year | Averaged amount of P used ($\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) | Source of sampling | References |
|---------|-----------|---|------------------------------------|--|
| Korea | 2008-2011 | 15-25 | 12 golf courses in Jeju and Junbuk | Personal communication |
| US | 2007 | 0.2-1.0 | 90 million homeowners | Scotts Company Report (Augustin, 2007) |
| Europe | 2005-2008 | 0.6-5.2 | 32 countries | Eurostat |

Table 5. Summary of phosphorus regulations for eleven states in US.

| Subject | Illinois | Maine | Maryland | Michigan | Minnesota | New Jersey | New York | Vermont | Virginia | Washington | Wisconsin |
|---|--|---|--|---|---|--|--|---|--|--|--|
| Regulation | 415 ILCS 65 | 38 MRSA § 419 | MD Laws § 6-201 et seq. and § 8-801 et seq. | MLCA § 324.8501 et seq. | MSA statute § 18C.60 et seq. | NJSA 58:10A-61 et seq.; 49-15.13a | ECL § 17-2101 et seq. | 10 VSA § 1266b | VA Code § 3.2-3600 et seq. and § 10.1-104.5 et seq. | RCWA 15.54.500 | WSA 94.643 |
| Year passed/ effective | 2010/2010 | 2007/2008 | 2011/2011-2013 | 2010/2012 | 2002/2004 | 2010/2011,2013 | 2010/2012 | 2011/2011,2012 | 2011/2013 | 2011/2013 | 2009/2010 |
| Applicators affected: | “Applicator for hire” (licensed commercial, certified applicators, and others) | All persons | Everyone | All persons | All persons | All persons | All persons | All persons | All persons | All persons | All persons |
| Exempt applicators and allowed Phosphorus fertilizer use: | Golf courses; Commercial and Sod farms; Agricultural lands and production; Right-of-ways; Phosphorus deficiency; Establish new turf; Lawn repair | Agriculture; Phosphorus deficiency; Sod farms; Turf repair; Gardening | Agricultural purposes; Commercial farm land; and Sod farms; Phosphorus deficiency; Establish new turf; Turf repair | Golf courses; Commercial farm land; Phosphorus deficiency; Establish new turf | Golf courses; Sod farms; Agricultural lands and production; Phosphorus deficiency; Establish new turf | Golf courses; Commercial Farms; Phosphorus deficiency; Turf repair | Gardens; Agricultural lands and production; Sod farms; Phosphorus deficiency; Establish new turf | Golf courses; Sod farms; Agricultural lands and production; Phosphorus deficiency; Establish new turf | Phosphorus deficiency; Establish new turf; Agricultural use; Gardening; Golf courses management plan | Establish new turf; Phosphorus deficiency; Gardens; Sod farms; Agricultural land or production | Sod farms; Agricultural land and Phosphorus deficiency; Establish new turf |
| Restrictions on Phosphorus lawn fertilizer sales: | No restrictions | Post signs about fertilizer use at point of sale | Must sell low Phosphorus fertilizer for lawns unless organic and sold to professional | No restrictions | No restrictions | Sale prohibited to consumers unless for new turf, or turf repair | Display Phosphorus fertilizer separately; Post educational signs | Display Phosphorus fertilizer separately; Post educational signs | Sale of lawn fertilizer prohibited; Can sell existing stock | Sale prohibited unless for an allowed use and properly labeled; Can sell existing stock | No display but Must sell only for specific purposes |

양에 완전히 성장한 Kentucky bluegrass를 이식했을 때 3년동안 인에 의한 부족현상은 발견되지 않았다고 보고했다. 실험 전 토양의 인산 함량은 7 mg kg⁻¹ (Olsen test) 였으며, 이 함량은 Table 3에 의하면 낮은 수준에 속한다. 그럼에도 불구하고 3년동안 다 성장한 Kentucky bluegrass에서는 인의 부족 현상은 발견되지 않았으며 잔디의 품질 평가도 6 이상을 유지했다. 이와 같이 잔디관리에 있어 인의 효과가 없거나 미비한 효과만 있다라는 연구결과는 계속해서 보고되어 오고 있다 (Christians et al., 1979; Liu et al., 2008; Nus et al., 1993; Turner, 1980; Waddington et al., 1978). 이러한 연구결과를 기반으로 성장한 잔디에서는 인산 시비를 할 수 없는 법안이 제정이 되어 시행이 되어 오고 있다. Table 5는 미국에서 2009년에서 2013년 사이에 인산 시비의 사용을 금지하는 법안이 상정되었거나 시행되는 주의 현황을 나타낸 것이다. 2013년 기준으로 11개의 주가 미네소타주를 시작으로 법안을 시행하고 있으며 인산 시비 사용의 금지 법안은 점차 확대되고 있다. 이에 따라 비료제조업체에서는 인성분을 제외한 질소 혹은 칼륨만 포함된 제품을 제조하기 시작했다. 이것은 토양분석결과와 상관없이 시비가 되는 인산의 양을 감소시키기에 효과적인 방법이라 판단된다. 우리나라의 경우 아직 인산 시비의 제한을 두는 법안은 아직 시행되고 있지 않다.

결론

질소와 인은 잔디관리에 있어 필수적인 요소이다. 그러나 적정 범위를 초과하여 사용이 될 경우 잔디관리의 비용상승,

생육감소등 부정적인 효과뿐 아니라 지하수오염 및 표면수의 부영양화등의 환경문제까지 야기 될 수 있다. 질소의 손실을 줄이기 위해서는 초종의 적정 pH 범위가 필요하며 6.0-7.0이 된다. 온도의 경우 질소의 손실을 줄이기 위해서는 최저온도가 4.4°C 이하이거나, 토양의 온도가 10°C 이하인 경우이나, 한지형잔디의 최적 성장 온도 범위인 17-24°C 와 난지형잔디의 최적 성장 온도 범위인 24-35°C를 고려해야 한다. 수분공급의 경우 질소손실의 가장 큰 비중이 질산화에 의한 질산염의 용탈에 의한 손실인 것을 고려하여, 특히 질소의 요구도가 높고 모재지반에서 관리가 되는 고관리 초종을 관리 할 때는 한번에 많은 양의 수분이 공급되는 것을 배제해야 한다. 인산의 손실을 줄이고 효율을 극대화 하기 위해서 가장 적합한 pH 6.5 이며, 온도의 경우 35°C 까지는 높은 온도일수록 무기화 과정에 의한 가용성 인산의 양이 증가하게 된다. 잔디의 최적 생육온도를 고려할 때 난지형 잔디의 경우 가용성 인산의 증가에 있어 한지형잔디 보다 더 효과적이다. 관수방법의 경우 일반적으로 지하부의 성장을 촉진하기 위해 wilting point based 관수방법이 권장되고 있으나 인산의 시비 효율을 높이기 위해서는 field capacity based 관수방법이 더 효과적인 것으로 판단된다.

질소는 잔디관리를 위해서 가장 많이 사용되는 원소이다. 우리나라에서는 2000년에서 2010년까지 질소의 사용량이 감소되어 왔지만 잔디관리에 사용하는 질소의 양은 여전히 많은 것으로 파악된다. 따라서 질소의 효율을 극대화 하고 지하수 오염을 최소화 할 수 있는 많은 연구결과가 필요하다고 판단된다. 잔디 조성시 인산의 역할에 대해서는 이전 연구에 의해서 많은 연구결과가 보고 되어 왔다. 그러나 인산은 토양분석을 통해 제시된 사용량 보다 더 많이 사용이 되는 것이 일반적이며 그 이유는 질소를 기준으로 복합비료가 사용이 되기 때문이다. 실제 우리나라는 미국이나 유럽에 비해 그 사용량이 큰 차이로 많이 사용하고 있다. 이렇게 사용이 된 인산은 토양 내에 계속해서 축적이 되며, 축적된 인산은 토양표면을 통해 유실이 될 수 있다. 토양표면을 통해 인산이 유실되면 표면수로 이동하게 되어 급격한 조류의 성장을 야기하게 된다. 인산의 유실을 줄이기 위한 노력은 토양종류에 따른 인산 적용, 토양개량제를 사용하는 등 과거의 많은 연구결과들이 발표 되었다. 그러나 인산의 사용으로 인해 계속되는 환경문제를 조절하기 위해, 미네소타를 시작으로 2013년 기준으로 미국에서는 11개 주에서 인산의 사용을 제한하는 새로운 규제가 법안으로 통과 되었다. 한국에서는 아직 인산사용에 대한 인식이 부족하며 이에 대한 규제나 법안이 마련되어 있지 않다. 그러나 과도한 인산 시비로부터 유실된 인산으로 인한 환경문제뿐 아니라 잔디성장을 위한 적합한 시비 프로그램을 운영하기 위해 인산사용에 대한 새로운 규제나 법안이 필요하다고 판단된다.

References

- Augustin, B. 2007. Perception vs. reality: How much nitrogen do homeowners put on their lawn? In Annual Meeting Abstracts [CD-ROM]. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, US.
- Bower, C.A. 1949. Studies on the form and availability of soil organic phosphorus. Iowa Agr. Exp. Sta. Res. Bul. 362.
- Bray, R.H. and Kurtz. L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.
- Bremner, J.M. and Shaw, K. 1958. Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. The J. of Agricultural Sci. 51:40-52.
- Carrow, R.N., Waddington, D.V. and Rieke, P.E. 2001. Turfgrass soil fertility and chemical problems: Assessment and management. Ann Arbor Press, Chelsea, MI, US.
- Chandra, P. 1962. The effect of shifting temperatures on nitrification in a loam soil. Can. J. Soil Sci. 42:314-315.

- Chang, L., Xiuli, D., Melanie A.M., Leilei C. and Yulong Z. 2017. Effect of long-term irrigation patterns on phosphorus forms and distribution in the brown soil zone. PLoS ONE 12(11):e0188361.
- Christians, N.E. 2011. Fundamentals of turfgrass management. 4th ed. Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ, US.
- Christians, N.E., Martin, D.P. and Karnok, K.J. 1979. Interrelationships among nutrient elements on calcareous sand greens. Agron. J. Abstracts. p.120.
- Christians, N.E. 1996. Phosphorus nutrition of turfgrass. Golf Course Mgt. 64(2):54-57.
- Colbourn, P, Harper I.W. and Iqbal M.M. 1984. Denitrification losses from 15N-labelled calcium nitrate fertilizer in a clay soil in the field. J Soil Sci. 35:539-547.
- Davis, P.J. 1987. Plant hormones and their role in plant growth and development. Martinus Ni/hoff Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Drury, C.F., Hart, S.C. and Yang, X.M. 2008. Nitrification techniques for soils. Soil Sampling and Methods of Analysis. 495-513.
- Grierson, P.F., Comerford, N.B. and Jokela, E.J. 1999. Phosphorus mineralization and microbial biomass in a florida spodosol: Effects of water potential, temperature and fertilizer application. Biol Fertil Soils. 28:244-252.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers an introduction to nutrient management. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, US.
- Kapoor, A. and Viraraghavan, T. 1997. Nitrate removal from drinking water review. J. Environ. Eng. 123:371-380.
- Kyveryga, P.M., Blackmer, A.M., Ellsworth, J.W. and Isla, R. 2004. Soil pH effects on nitrification of fall-applied anhydrous ammonia. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:545-551.
- Lee, S., Frank, K.W., Crum, J. and Warncke, D. 2013. Phosphorus and nitrogen rate effects for turfgrass sod established on a phosphorus deficient soil. Int. Turfgrass Soc. Res. J. 12:207-215.
- Liu, M., Hoe, L., Xu, S., Ou, D., Yang, Y., et al. 2002. Adsorption of phosphate on tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary. Environ. Geol. 42(6):657-665.
- Liu, M., Sartain, J.B., Trenholm, L.E. and Miller, G.L. 2008. Phosphorus requirements of St. Augustinegrass grown in sandy soils. Crop Sci. 48(3):1178-1186.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. New York: Academic Press. Cambridge, MA, US.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15:1409-1416.
- Mills, H.A. and Jones Jr., J.B. 1996. Plant analysis handbook II. A Practical Sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Athens, GA, US.
- Mizuta, K., Matsumoto, T., Hatate, Y., Nishihara, K. and Nakanishi. T. 2004. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. Bioresour. Technol. 95(3):255-257.
- Morton, T.G., Gold, A.J. and Sullivan, W.M. 1988. Influence of overwatering and fertilization on nitrogen

- losses from home lawns. *J. Environ. Qual.* 17:124-130.
- Murphy, J.A. and Heckman, J.R. 2003. Managing soil pH for turfgrasses. Rutgers Cooperative Research & Extension. Factsheet. FS635.
- Nam, Y., An, S., Jung, M. and Park, J. 2012. Nitrogen budgets of agriculture and livestock in South Korea at 2010. *Kor. Soc. Environ. Eng.* 2012:204-213. (In Korean)
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2016. 2015 Annual report: Evaluation of national water quality. p107-108. NIER, Incheon, Korea.
- Nus, J.L, Christians, N.E. and Diesburg, K.L. 1993. High phosphorus applications influence soil-available potassium and Kentucky bluegrass copper content. *HortSci.* 28(6):639-641.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA circular 939. U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C. US.
- Powelson, D.S., Saffigna, P.G. and Monique K. 1988. Denitrification at sub-optimal temperatures in soils from different climatic zones. *Soil Biology and Biochem.* 20(5):719-723.
- PPFK and UNFPA. 2018. 2018 World population reports. Planned Population Federation of Korea.
- Reddy, K.R. and DeLaune, R.D. 2008. Biogeochemistry of wetlands: Science and Applications. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, US.
- Rosen, C.J., Bierman, P.M. and Eliason, R. 2008. Soil test interpretations and fertilizer management for lawns, turf, gardens, and landscape plants. University of Minnesota Extension Service. St. Paul, MN, US.
- Sah, R.N. and Mikkelsen, D.D. 1986. Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphorus in soil II. Effects on P sorption. *Plant Soil.* 95:173-181.
- Simek, M. and Cooper, J.E. 2002. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *Eur. J. Soil Sci.* 53:345-354.
- Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. p. 250. Wiley & Sons. Wiley, NY, US.
- Tabatabai, M.A. and Dick, W.A. 1979. Distribution and stability of phosphatase in soil. *Soil Biol. Biochem.* 11:655-659.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D and Havlin, J.L. 1993. Soil fertility and fertilizers. Macmillan Publishing Co., NY, US.
- Turner, T.R. 1980. Soil test calibration studies for turfgrass establishment. Ph.D dissertation. Pennsylvania State Univ., PA, US.
- Waddington, D.V., Turner, T.R., Duich, J.M. and Moberg, E.L. 1978. Effect of fertilization on Penncross creeping bentgrass. *Agron. J.* 70(5):713-718.
- Wang, Y. and Zhang, Y. 2010. Soil-phosphorus distribution and availability as affected by greenhouse subsurface irrigation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173:345-352.
- WHO (World Health Organization). 1998. WHO guidelines for drinking water quality. 2nd edition,

addendum to Volume 1: Recommendations. Geneva. pp. 8-10; and addendum to Volume 2: Health Criteria and other Supporting Information. WHO, Swiss.