석탄바닥재의 골프장 토양 및 잔디생육 개량 영향평가

이주영[1]· 최희열[1]· 심규열[1]·양재의[2]

[1]한국잔디연구소, [2]강원대학교 바이오자원환경학과

Assessment of Bottom Ash Amendment on Soil and Turfgrass Qualities in Golf Course

Ju-Young Lee[1], Hee-Youl Choi[1], Gyu-Yul Shim[1], and Jae-E Yang[2]

[1] Korea Turfgrass Research Institute, Yatap-Dong, Bundang-Gu, Seongnam 463-840, Korea(turfsoil@hanmail.net;(O)82-31-781-6440;(F)82-31-781-6443)

[2] Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

실험 목적

우리나라는 수력발전의 한계, 원자력 발전의 안정성 문제, 석유나 가스의 고비용 문제로 석탄을 이용한 화력발전이 상당부분을 차지하고 있는 실정이다. 석탄은 많은 무기물을 함유해 연소 후 약 10～40%의 회분을 배출하고 있어 1999년도 석탄회 발생량은 약 395만 톤이며. 최근 한전 발전5개자회사 통계자료에 의하면 2009년 석탄회 발생량은 835만 톤(Fly ash 684만톤, Bottom ash 151만톤)에 달한다. 이렇듯 석탄회의 발생량은 급격히 증가하고 있으나 대부분 매립되고 있어 환경보호와 자원 재활용 차원에서 석탄재의 재활용에 대한 연구가 시급한 실정이다. 석탄회는 크게 Fly ash(비산회)와 Bottom ash(석탄바닥재)로 나뉘는데 발생비율로 보면 fly ash가 약 82%이고 bottom ash가 18%이며, 재활용률은 fly ash가 약 68%이고 bottom ash가 약 40% 수준으로 bottom ash가 fly ash보다 재활용률이 낮았다. 석탄바닥재의 경우 재활용률이 절반에도 못 미치므로 그만큼 매립되는 비율이 많아 재활용에 대한 연구가 절실히 요구된다. 이 연구는 석탄바닥재를 자원으로 재활용하기 위한 새로운 분야로서, 석탄바닥재가 한지형 잔디로 조성하는 골프장 모래 토양의 이화학성을 개선하기 위한 토양개량재로 사용 적합한지를 평가하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

석탄바닥재의 화학적 특성

본 실험에 사용한 공시재료는 영동화력발전소와 영흥화력발전소에서 사용한 유연탄의 석탄바닥재이다. 석탄바닥재의 분석은 토양 및 식물체 분석법(농업과학기술원, 2000)에 준하여 분석하였으며 석탄바닥재의 화학적 특성은 표 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical properties of bottom ash.

sample	pH (1:5 H_2O)	EC (dS m^{-1})	Av.P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. Cations ($cmol_c$ kg^{-1})				T-N (%)
bottom	9.03	0.63	52	K	Ca	Mg	Na	0.34

ash	0.13	1.9	0.3	0.35

석탄바닥재에 함유되어 있는 광물의 조성을 분말 X-선 회절분석(Power X-ray diffraction; XRD)을 통하여 확인하였다(그림 1). 석탄바닥재에는 quartz, mullite 및 felspar가 주요 결정상으로 존재하였다.

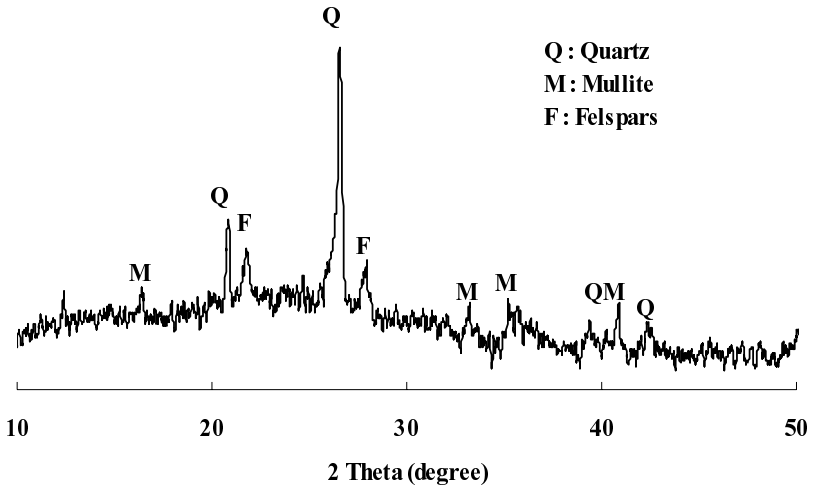

Figure 1. X-ray diffraction result of bottom ash used in the experiment

석탄바닥재에 존재하는 광물의 원소조성 함량은 분말 X-선 형광분광 분석(X-ray Fluorescence; XRF)법을 통하여 조사하였다. 석탄바닥재의 경우 SiO_2가 53.2%를 차지하는 주된 원소이었으며, 그 뒤를 이어 Al_2O_3 26.8%, Fe_2O_3 7.70, K_2O 5.72%, SO_3, TiO_2 순으로 주된 원소로 구성되어 있었다. 다른 원소들은 미량 존재하였다.

석탄바닥재의 중금속함량은 ICP-OES(710-ES, Varian, Austrailia)를 이용하여 분석하였고 분석 결과는 표 3과 같다. 석탄바닥재의 중금속 검출 농도는 토양환경보전법에 명시된 토양환경오염우려기준보다 훨씬 낮은 농도로 석탄바닥재 재활용 시 중금속으로 인한 오염문제는 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

Table 2. Heavy metal contents of bottom ash(B/A).

Kind of Heavy metal	Cd	Cr^{6+}	Cu	Pb	Ni	Ti	As
			---------- mg kg^{-1} ----------				
Contents	0.01	0.52	1.25	0.15	0.61	0.66	0.85
Criteria†	1.5	4.0	50	100	40	-	6

†Heavy metal criteria by Soil Environmental Conservation Act.

석탄바닥재의 물리적 특성

석탄바닥재를 부피비로 아래와 같이 모래와 일정비율(0, 10, 20, 30, 50%)로 혼합한 혼합시료를 만들고

용량 100 ml의 코어에 시료를 충진하고 24시간을 물로 충분히 포화시켜 Soil water permeameter(모델명 : CS-10RING, 제조사 : Eijkelkamp, 네덜란드)를 이용해 투수계수를 3반복으로 측정하여 평균값을 투수계수로 구했다. 투수계수를 측정하는 방법은 정수위법(Costant-Head Method)과 변수위법(Falling-Head Method)이 있는데 시료가 사질토양으로 투과성이 매우 좋은 시료라 정수위법을 사용해 측정했다.

토양의 보수력은 포장용수량과 위조계수 및 유효수분 범위로 표시되며, 본 실험에서는 시료별 유효수분 범위를 구하기 위해 포장용수량과 위조점에 대한 분석을 수행했다. 측정은 2.0 mm 체를 통과한 석탄바닥재 혼합시료를 사용하였다. 위조점은 Membrane plate apparatus, 포장용수량은 Pressure porous plate apparatus로 사용했는데 전자는 1기압 이상의 압력에 대한 수분함량을 측정하는데, 후자는 1기압 이하의 압력에 대한 수분범위를 측정하는데 사용했다.

Lysimeter를 이용한 용탈실험

본 연구에 사용된 lysimeter는 투명한 아크릴 재질로서 반경 28cm, 높이 33cm의 원기둥으로 제작하였다. lysimeter 내부에는 바닥에서 2cm정도의 두께로 콩자갈(입경크기 6～9mm)을 깔고 그 위에 5cm 두께로 왕사(입경크기 1～4mm)를 채운 후 25cm 두께로 잔디식재층 토양을 충진하였다. Lysimeter 최하부에는 배수용 유출구를 설치하여 용탈수가 포집되도록 설치하였다.

용탈수는 잔디 파종 후 약 4개월이 경과되어 잔디밀도가 완전히 형성된 9월 4일에 잔디용 복합비료(11-7-7) 20g을 시비하고 다음 날인 9월 5일부터 3일 간격으로 28일 동안 채취하여 분석하였다. 1회 관수량은 처리구별 400ml를 수돗물을 이용해 관수하였다.

시험포장 조성 및 잔디의 품질평가

본 실험은 2010년 4월 1일부터 10월 20일까지 경기도 여주군 대신면에 위치한 블루헤런C.C. 증식포에서 수행하였다. 시험포는 USGA 그린구조와 동일하게 자갈층은 10 cm, 왕사층은 5 cm 두께로 설치하고 공시재료인 석탄바닥재와 토양개량제(피트모스, 액시스, 이소라이트)를 일정비율로 모래와 혼합해 혼합상토층을 30 cm 두께로 물다짐을 해 침하가 발생하지 않도록 조성하였다. 1개 실험구의 크기는 1 m × 1 m이고 3반복으로 조성하였다(6처리×3반복).

잔디의 시각적 품질평가(visual quality)는 잔디의 생육상태를 육안에 의해 종합적으로 평가하는 방법으로 잔디의 피복율, 색상, 밀도 등 생육상태를 모두 포함하여 평가하는 방법이다. 본 연구에서 품질평가는 1에서 9까지 9등급으로 달관 조사해 평가하였다. 1등급은 잔디의 생육상태가 가장 좋지 않은 상태, 9등급은 가장 좋은 상태로 평가하였다. 달관조사에서 발생할 수 있는 편차를 최소화하기 위해서 되도록 오후 1시부터 오후 3시 사이에 기상이 맑은 날 실시했다.

결과 및 고찰

관수량과 용탈수량

석탄바닥재 혼합비율이 다른 각각의 lysimeter 관수량에 따른 용탈수량의 관계는 그림 2와 같다. 그림 1에 나타난 것처럼 석탄바닥재의 혼합비율이 높아질수록 관수량 대비 용탈수량은 유의성 있게 줄어드는 경향을 나타냈다. 이 결과는 모래위주로 조성되어 보수력이 낮은 골프장 사질토양의 보수력을 높이는데 석탄바닥재가 효과적인 토양개량재로 사용가능하다는 것을 보여준다.

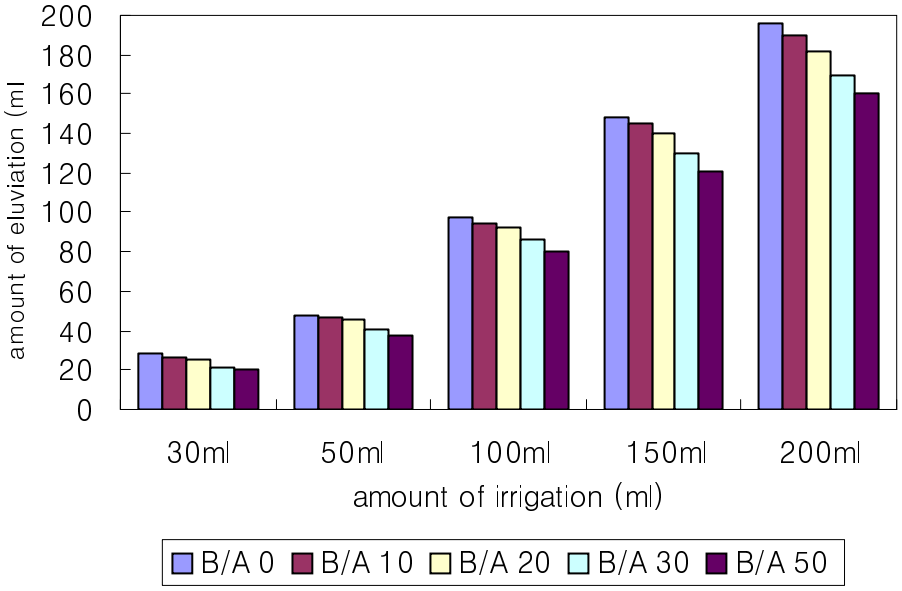

Fig. 2. The correlation quantity of irrigation water and quantity of leachate.

석탄바닥재 혼합비율별 투수계수 측정

모래에 석탄바닥재를 일정비율(0, 10, 20, 30, 50%)로 혼합한 처리구의 투수계수를 측정한 결과는 표 3과 같다.

Table 3. Infiltration rate as affected by different mixtures of bottom ash(B/A) and sand.

Treat	Sand 100	B/A 10 + Sand 90	B/A 20 + Sand 80	B/A 30 + Sand 70	B/A 50 + Sand 50
	---------- mm h^{-1} ----------				
Infiltration rate	1680a†	1542a	1251b	1080b	316c

†The same letters in column means are not significantly different at the 5% level.

대조구인 모래 100%구의 투수계수는 1,680 mm h^{-1}로 매우 높아 배수가 잘되는 토양임을 알 수 있다. 이러한 배수성이 높은 모래에 석탄바닥재 혼합비율이 증가함에 따라 투수계수는 점차 유의성 있게 줄어 석탄바닥재 혼합비율과 투수계수는 반비례 관계임을 알 수 있다. 석탄바닥재 혼합비율과 투수계수가 반비례 관계라는 실험결과로 보아, 석탄바닥재는 모래 위주 잔디식재층의 낮은 보수력을 높이기 위한 토양개량재로 사용 가능하다고 판단된다.

Lysimeter 용탈수 분석결과

용탈수 중 무기성 질소의 변화를 조사하기 위해 조성한 라이시미터에 시비 한 후, 3일 간격으로 채취한 용탈수 중의 NO_3-N의 농도를 분석한 결과는 그림 3과 같다. 석탄바닥재를 처리하지 않고 모래로만 상토층이 조성된 B/A 0 처리구에서는 초기부터 용탈수의 NO_3-N 함량이 68.3 mg kg^{-1}로 높게 분석되었다. 이는 조성

상토가 모래로 되어있고, NO_3^-는 음전하를 띠어 토양에 잘 흡착되지 않아 빨리 용탈된 것으로 판단된다. 시비 후 13일째 채취한 용탈수 내 NO_3-N의 농도는 처리구 간에 차이가 거의 없었다. 시비 후 16일부터 채취한 용탈수 내 NO_3-N의 농도는 B/A 0과 10 처리구에 비해 B/A 30과 50처리구의 농도가 높게 나타났으며, 처리 16일 후 부터는 B/A 0과 10 처리구에서 NO_3-N의 농도는 급격히 줄어든 것으로 나타났다.

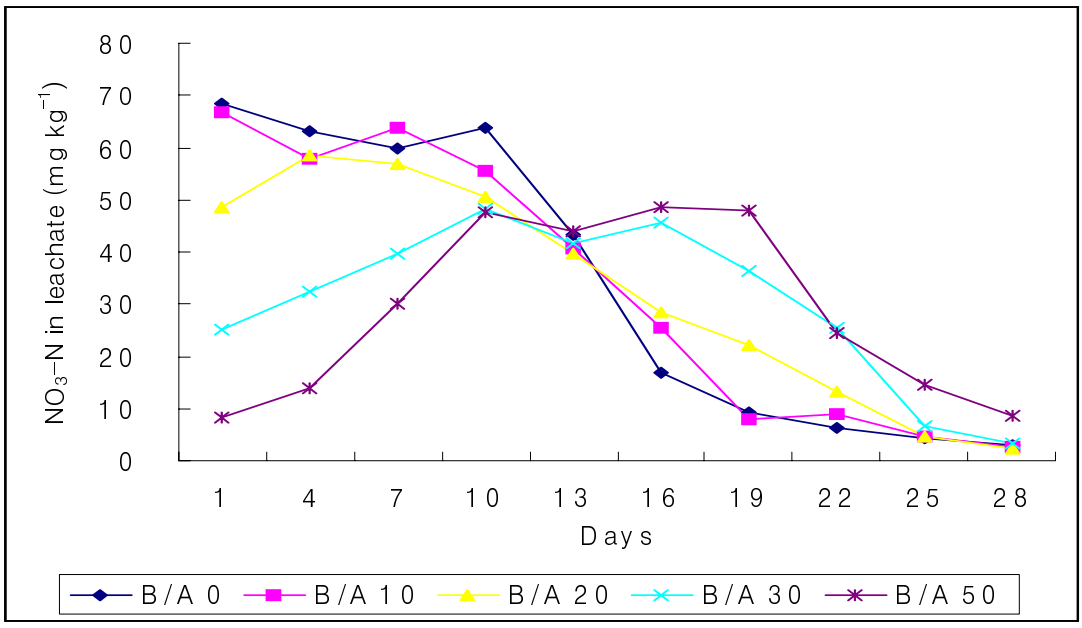

Figure 3. Change of NO_3-N in leachate at each of bottom ash(B/A) treatments.

시비 후 3일 간격으로 처리구별로 채취한 용탈수 중 NH_4-N 농도를 측정한 결과는 그림 4와 같다. 용탈수 내 NH_4-N 함량은 시비 후 7일 까지는 석탄바닥재 처리수준이 낮은 B/A 0, 10 및 20처리구 함량이 석탄바닥재 처리수준이 높은 B/A 30과 B/A 50처리구보다 높았다. 시비 13일 후에는 모든 처리구의 용탈수에서 NH_4-N 농도가 비슷하게 나타났으나, 석탄바닥재 처리수준이 상대적으로 높은 B/A 30과 50처리구의 NH-$_4$N 용탈량이 대조구보다 높게 나타나기 시작하였다. 시비 16일 후 채취한 용탈수 내 NH_4-N 농도는 B/A 50처리구는 증가하였지만 나머지 처리구 모두에서는 감소하였다. 시비 28일 후 용탈수 내 NH_4-N 농도를 조사한 결과 B/A 0 처리구는 2.8 mg kg^{-1}이었으나, B/A 50 처리구에서는 8배 이상 높은 11.6 mg kg^{-1}이 검출되었다. 이렇듯 대조구에 비해 석탄바닥재 처리수준이 상대적으로 높은 B/A 30과 B/A 50처리구의 용탈수에서는 NH_4-N이 지속적으로 용탈되었다.

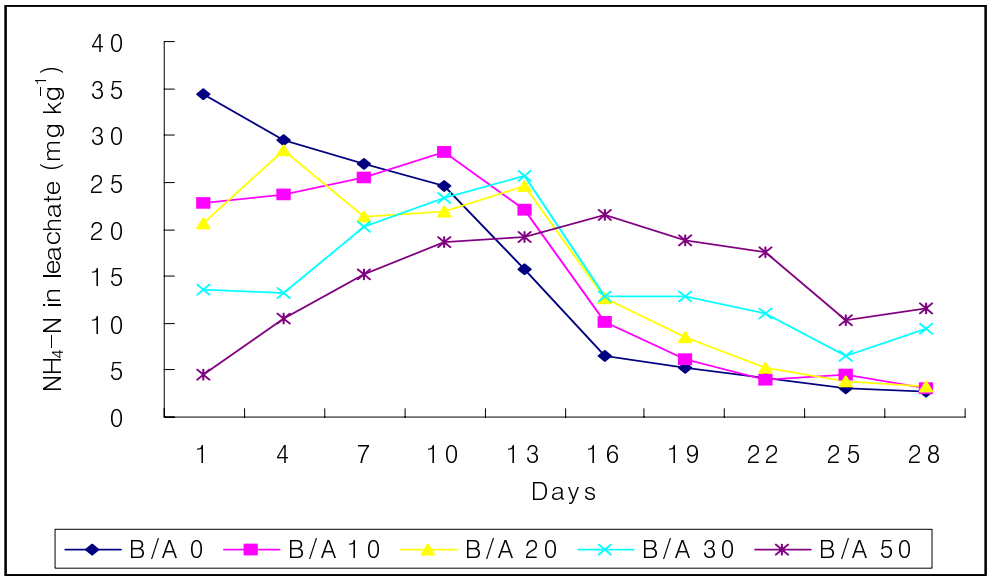

Figure 4. Change of NH_4-N in leachate at each of bottom ash(B/A) treatments.

라이시미터에 인산을 시비한 후, 용탈수 내 PO_4-P의 농도를 측정한 결과는 그림 5와 같다. 석탄바닥재 처리수준이 상대적으로 높은 B/A 30과 50처리구의 PO_4-P 초기 용탈량은 대조구(B/A 0)에 비해 매우 낮았다. 시비 후 4일째 되는 날 용탈수의 PO_4-P 함량은 13일째 채취한 용탈수까지 점차 증가 하다가 16일 부터 용탈수 내 PO_4-P 함량은 감소하는 경향을 보였다. 다른 처리구에 비해 석탄바닥재 처리수준이 높은 B/A 30과 50처리구의 용탈수 내 PO-$_4$P 함량이 낮게 나타났는데, 이는 pH 9.03인 석탄바닥재의 혼합비율이 높아 토양 산도를 높여 인산이 불용화되고 석탄바닥재 혼합비율이 높아지면서 배수가 불량해져 인산이 토양과 접촉하는 시간이 길어져 토양에 흡착이 증가해 인산의 용출 농도가 낮아진 것으로 사료된다.

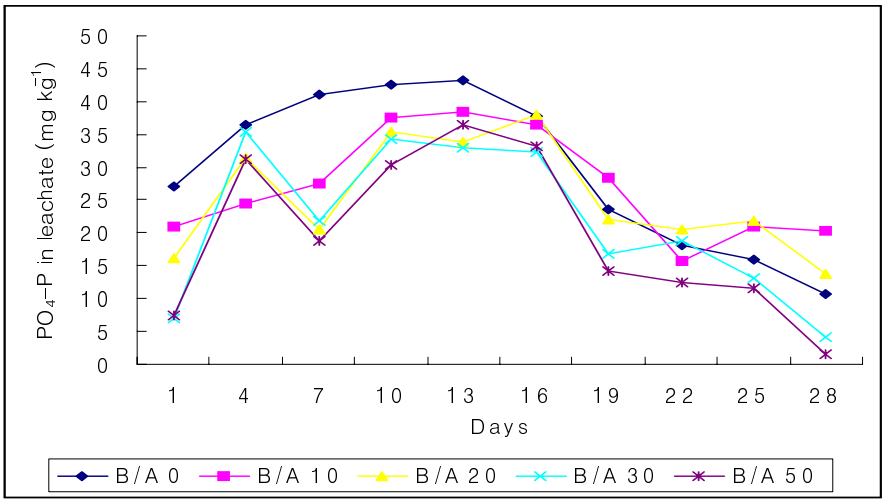

Figure 5. Change of PO_4-P in leachate at each of bottom ash(B/A) treatments.

잔디의 시각적 품질평가

잔디의 시각적 품질평가는 2010년 6월 11일부터 10월 12일까지 5차례 측정하였으며, 측정 결과는 표 32에 나타내었다.

파종 후 약 70일이 경과한 6월 11일 조사에서는 조성 초기 발아율이 높아 시각적으로 피복율이 우수한 B/A 20%처리구가 다른 처리구에 비해 높은 평가를 받았다. 전체 조사 기간 내내 보수력이 불량해 초기 발아세가 약했던 Sand100%처리구가 시각적인 품질평가에서 가장 낮은 평가를 받았다. 조사 초기에는 처리구간에 초기 발아세와 엽색 차이로 인해 시각적인 품질에 다소 차이가 나타났지만 발아 후 시간이 경과되어 3차 조사(8월 10일) 이후 4차 조사(9월 10일)와 5차 조사에서는 토양개량재를 처리하지 않은 Sand100%처리구를 제외한 토양개량재 처리구에서는 처리구 간 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 석탄바닥재가 모래 토양의 이화학성을 개선하기 위한 토양개량재로 사용 가능하다는 것을 의미한다.

Table 4. Turfgrass visual quality as affected by soil amendments.

Treat	Turf quality (1～9)†				
	6/11	7/9	8/10	9/10	10/12
Sand 100	5.3c‡	5.4c	5.9b	6.8c	7.2b
B/A 10 + Sand 90	5.9b	6.4b	7.4a	7.9a	8.4a
B/A 20 + Sand 80	6.5a	7.1a	7.2a	7.9a	8.2a
Peat 10 + Sand 90	6.1b	6.8ab	7.5a	7.5b	8.0a
Axis 10 + Sand 90	5.9b	6.6b	7.3a	7.5b	8.2a
Isolite 10 + Sand 90	6.0b	5.8bc	6.9a	7.6b	8.0a

†Based on 1～9 scale; 1=low quality, 9=high quality

‡The same letters in column means are not significantly different at the 5% level.

요 약

본 연구는 화력발전의 부산물로 발생하는 석탄바닥재가 골프장 사질 토양의 개량재로 사용 적합한지를 평가하기 위해 수행되었으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 석탄바닥재의 화학성을 분석한 결과 총질소 0.34%, 가용성 인산 52 mg L^{-1}, 치환성 칼륨 51 mg L^{-1}뿐만 아니라 소량의 치환성 칼슘과 마그네슘을 함유하고 있어 식물생육에 이롭고, 유해중금속함량은 Cd, Cr^{6+}, Pb, Ni, As는 1 mg L^{-1} 이하, Cu 농도는 1.25 mg L^{-1} 검출되어 토양환경보전법의 토양오염우려기준 이하이므로 석탄바닥재 재활용으로 인한 토양오염 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

2. 모래 토양에 석탄바닥재를 부피비로 0～50% 비율로 혼합한 시료의 투수계수와 유효수분함량을 측정한 결과 석탄바닥재 혼합비율이 증가할수록 투수계수는 유의성 있게 감소하고 유효수분함량은 유의성 있게 증가해 석탄바닥재가 모래 토양의 낮은 수분보유력을 개선하는 효과가 있음을 확인하였다.

3. 모래 토양에 석탄바닥재를 부피비로 0～50% 비율로 혼합한 시료를 잔디식재층으로 조성한 라이시미터에 잔디종자 파종 후 약 4개월 뒤 잔디밀도가 완전히 형성된 후에 시비 후 3일 간격으로 채취한 용탈수를 분석한 결과 1일과 4일 후에 채취한 초기 용탈수에서는 석탄바닥재 혼합비율이 높을수록 NO_3-N, NH_4-N 및 K함량이 유의성 있게 감소했으며, 대조구에 비해 석탄바닥재 혼합비율이 높은 처리구일수록 NO_3-N, NH_4-N 및 K함량이 용탈수 채취기간 동안 지속적으로 용탈되었다. 이 결과로 석탄바닥재가 모래 토양의 낮은 양분보유력을 개선하는데 효과적이고 석탄바닥재처리가 대조구에 비해 오랫동안 식물 생육에 필요한 양분을 공급하는 효과가 있음을 확인하였다.

4. 골프장 그린상구조와 동일한 시험포장을 만들고 모래 토양에 석탄바닥재 10%와 20% 그리고 피트, 액시스, 이소라이트를 부피비로 10% 비율로 혼합한 시료를 잔디식재층으로 조성하고 크리핑 벤트그래스(*Agrostis paulstris* Huds), Penn A-4 10 g m^{-2}을 파종한 후에 처리구별로 잔디 품질을 평가하기 위해 잔디 밀도, 뿌리길이, 색상 및 시각적 품질을 조사한 결과 석탄바닥재 처리구는 기존에 사용하는 개량제인 피트, 액시스, 이소라이트 처리구와 동등한 잔디생육 촉진 효과가 있는 것으로 조사되었다.

5. 결론적으로 석탄바닥재는 골프장 토양의 물리적 특성과 화학적 특성을 개선하고 잔디생육에 필요한 양분을 공급하는데 효과적인 토양개량재라고 할 수 있다.