

집중적 답압 피해에서의 잔디 회복을 위한 강제 흡·호기 순환식 설비의 효과

이정호 · 손진수 · 김인철 · 주영규*

연세대학교 생물자원공학과

Effects of a Forced Air-Flow System for Recovery of Turfgrass after Intensive Traffic Injury

Jeong-Ho Lee, Jin-Su Son, In-Chul Kim and Young-Kyoo Joo*

Dept. of Biological Resources and Technology, Yonsei Univ. Wonju 220-710, Korea

ABSTRACT

Korea and Japan hosted the FIFA World Cup Soccer Game in 2002. Ten stadiums had been built and more than 30 soccer grounds for practice were renovated in Korea. Sport fields in both countries had problems on cool-season turfgrass growth and quality by summer decline during humid and warm climate especially followed by intensive uses. We measured the effects of air-flow system, which is designed to optimize rootzone soil gas and moisture levels to promote the growth and maintenance turfgrass. This experiment was carried out to verify the effects of the system on soil gas exchange, ground resilience, and turfgrass recovery in turfgrass rootzone.

Within 1 or 2 hr of operation of the system, rootzone soil gas (CO₂, O₂) levels returned to natural atmospheric levels completely. Soil CO₂ levels began to decrease within the first 10 min of operation of the system. The levels were reduced from 1.3 to 0.06% after 30 min, and natural atmospheric levels within 1 hr. When the system was turned off, CO₂ levels increased to 0.36% and 0.7% after 5 and 20 hr, respectively. The application of the system did not affect the resilience of turf surface after traffic treatments. Higher traffic treatment resulted in higher surface resilience especially in zoysiagrass plots. Operation of the system had a significant beneficial impact on turf recovery by increased root dry weight and improved turf quality, as compared with the non-operated check plots.

Key words: World Cup Soccer, air-flow system, USGA drainage system, traffic injury, summer decline, turfgrass management

*Corresponding author. Tel : +82-33-760-2250
E-mail: ykjoo@yonsei.ac.kr

서 론

2002년 월드컵축구대회를 개최하기 위하여 우리나라에서는 전국 10개 도시에서 월드컵 축구경기장이 건설되었으며, 각각의 골프장은 FIFA 월드컵구장에 대한 시설기준에 따라 천연잔디로 조성되었다.

경기장 잔디는 지반의 형태와 밀접한 관련이 있고, 토양의 물리성과 화학성의 차이는 잔디의 품질에 직접적인 영향을 끼친다(Beard and Sifers, 1990). 경기장 잔디 그라운드의 환경적 특성은 지속적인 사용에도 토양의 경화를 최소화할 수 있는 내담압성 혹은 내고결성, 강우량이 많아도 단 시간 내에 배수시켜 정상적인 경기를 진행할 수 있는 배수성, 공의 리바운드 및 선수의 부상을 보호해 줄 수 있는 탄력성 등을 포함한다(Adams and Gibbs, 1994). 잔디그라운드가 처음 조성되었을 때 잔디의 품질에는 문제가 없으나, 계속되는 경기에 지반의 경도는 높아져 잔디의 품질을 저하시키는 원인이 된다. 지반경도의 연약함은 선수들이 위험요소로 작용할 수 있는데, 축구화를 신고 경기를 하는 축구선수들은 경기의 특성상 태클과 슬라이딩으로 인하여 발목의 부상을 가져올 수 있고, 공의 속도저하 등 경기력에 지장을 초래할 수 있다(Rogers and Waddington, 1990). 반대로 담압의 축적은 지반을 경화시키며 이에 따른 토양 표면의 경화로 인하여 잔디의 생육에 지장을 주고 경기를 하는 선수들이 쉽게 피로감을 느끼게 할 수 있는 요인으로 작용한다(Canaway et al, 1990).

우리나라의 연간 총 강수량은 1,000~1,500mm 범위로 비교적 충분한 편이나 고온기인 6~8월에 집중되어있고 이 시기에 field capacity보다 많은 수분은 잔디생장에 유해하

며, 통기성이 나빠져 잔디뿌리에 충분한 산소를 공급하지 못하고 질소산화, 질소고정 및 암모니아화 작용을 일으키는 세균의 활동을 저해하여 혐기성 상태에서 발생하는 유독가스(이산화질소, 황화수소)에 의해서 잔디뿌리가 상하게 된다. 근권에서 산화반응이 계속 이루어진다면 acetaldehyde와 ethanol이 축적되고 증가된 ethanol은 산소결핍의 두드러진 현상이다(Hook and Scholtens, 1978). 그러므로 수분과다를 방지하기 위한 적절한 배수체계나 보조 system이 필요하다.

잔디의 생육을 저해하는 요인으로 특히 사계절이 뚜렷한 우리나라에서는 무엇보다도 여름철의 높은 온도가 한지형잔디로 조성되는 잔디그라운드에 영향을 미칠 것이다. 특히 토양온도의 변화는 잔디생육에 있어서 화학적, 생물학적 활동에 상당히 큰 영향을 미친다. 여름철의 높은 온도는 줄기의 성장과 생리적 활동을 방해하고 잎의 노화를 촉진한다(Aldous and Kaufmann, 1979; Kuroyanagi and Paulsen, 1988). 여름철 잔디그라운드에서의 축구경기는 고온과 담압에 의한 토양의 고결화로 인한 복합적 작용으로 다른 계절의 경기보다 잔디에 심한 stress를 주게된다. 잔디줄기의 건물생산량은 고온이나 low aeration이 따로 작용하는 것보다 고온과 low aeration이 동시에 작용했을 때 더 많이 감소한다(Huang et al., 1998).

본 연구는 토양 내 수분과 공기의 이동을 조절하는 강제 흡·호기 순환식 설비(SoilAir™ system)를 사용하여 우리나라의 하고 현상과 장마 시 그라운드 배수능력에 대한 효과를 검증하기 위하여 1999년 7월부터 2000년 9월까지 대구 모형경기장에서 실시하였다. 이와 함께 그라운드 사용시 수반되는 담압과 잔디의 회복력을 건물량으로 계산하여

실험하였다.

이에 본 연구결과를 바탕으로 한지형잔디로 조성되는 천연잔디경기장의 조성과 관리방안에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

모형경기장 그라운드 조성

본 실험이 수행된 대구 모형경기장은 대구 월드컵경기장 부근의 정수장에 월드컵축구경기장의 10분 1의 규모(960m²)로 건설되었다. 그라운드의 지반은 인공식재층과 왕모래, 콩자갈, 배수관(유공관 ϕ : 지선 100mm, 간선 200mm)으로 이루어진 USGA(United States Golf Association)식 다층구조 지반으로 1999년에 조성되었다(USGA, 1988). 지반 각 층에 들어가는 골재는 USGA Green 시방서에서 권장하는 규격의 재료를 사용했으며 인공식재층에는 토양개량재를 식재층 모래와의 건중비로 1~5% 혼합하여 조성하였다. 실험포지 가운데 차수막을 설치하여 두 개 부분으로 나누어 한 쪽에 강제 흡·호기 순환식 설비로 SoilAirTM system를 채택하여 설치하였다. 그라운드 조성에 사용된 초종은 'Zenith' zoysiagrass, Kentucky bluegrass(*Poa pratensis* L. ; 이하 KBG) 85% + perennial ryegrass(*Lolium perenne* L. ; 이하 PR) 15% 혼합형으로 이루어진 roll 잔디(sod)로 강제 흡·호기 순환식 설비가 설치된 부분과 설치되지 않은 부분에 각각 식재되었다.

실험구 설정 및 인위적 답압조건

본 실험은 토양수분과 공기의 이동을 조절하는 강제 흡·호기 순환식 설비를 사용하기 위하여 설치지역과 비설치 지역을 구분하고 그라운드 사용 시 수반되는 답압과 잔디의 회

복력을 시험하기 위하여 1999년 7월 17일부터 8월 5일까지 인위적 답압을 실행하고, 답압의 형태는 경기장 사용 빈도에 따라 매일 1, 2회사용, 2.5일간격 1, 2회사용과 무처리구로 총 5구획을 나누어 처리하고 그 회복정도와 잔디의 생리적 변화에 대한 분석을 실시하였다. 답압용 roller는 납땀(축구화용 평균 3.5cm 간격)이 부착된 폭 1m, 지름 0.5m, 무게 120kg의 roller를 사용하였다(Fig. 1). 1회 사용 개념은 10회 왕복으로 rolling을 하였고 2회 사용 개념은 20회 왕복의 인위적 답압 조건으로 실시하였다.

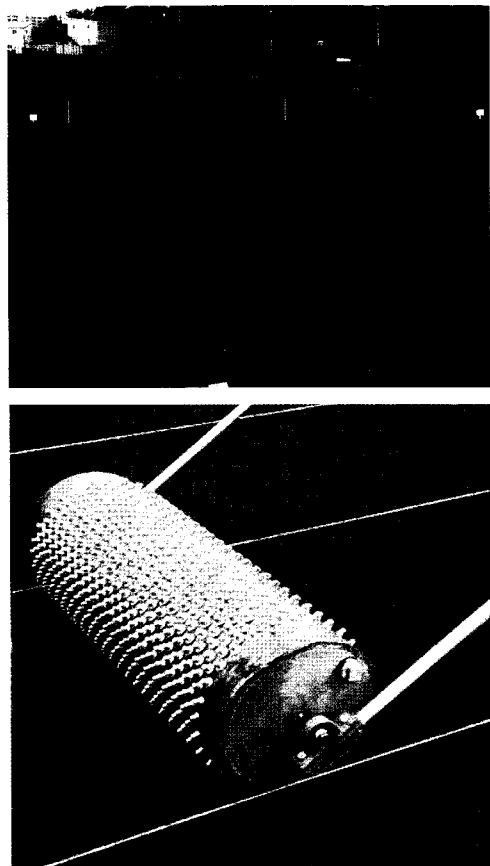


Fig. 1. The roller for traffic injury treatment on research plot.

잔디 지반의 gas함량 변화 및 시각적 품질 상태 측정

식재층 내 지하부의 gas 함량 변화에 대한 측정은 soil gas analyzer(SoilAir Technology™)를 이용하여 측정하였다. 측정 방법으로는 강제 흡·호기 순환식 설비의 작동을 중지하고 18시간이 경과한 후에 각각의 실험구의 답압 실험이 종료하는 1999년 8월 5일에 O₂와 CO₂함량을 각각 3 반복으로 측정하고 강제 흡·호기 순환식 설비를 가동하고 1시간 후와 2시간 후에 동일한 방법으로 O₂와 CO₂함량을 측정하였다. 그리고 강제 흡·호기 순환식 설비의 작동에 의한 토양 내 gas 함량의 변화를 측정하기 위해 자연상태에서 1시간 동안 강제 흡·호기 순환식 설비를 작동하면서 5분 간격으로 O₂와 CO₂의 변화를 측정하고 작동을 정지한 후 gas가 원상 회복되는 정도를 20시간동안 10분 간격으로 답압 1일 2회 사용개념의 KBG 85% + PR 15% 혼합 실험구에서 실시하였다.

답압처리가 종료된 1999년 8월 5일에 4.5 kg의 hammer로 된 Clegg Impact Soil Tester(Lafayette Ins. Co.; ASTM Standard D5874)를 사용하여 각각의 실험구에서 3반복으로 표면탄성도를 측정하였다.

잔디 지하부의 회복력은 뿌리의 건물량을 측정하여 비교하였고 건물량을 측정하기 위해 답압처리가 종료된 후 4주 후인 1999년 9월 2일에 강제 흡·호기 순환식 설비 설치구와 비설치구의 KBG 85% + PR 15% 혼합 실험구에서 hole cup(86.6cm² × 20cm)으로 sampling을 하고 105℃ 24hr 동안 dry oven에 건조시키고 건조시킨 sample들의 건물량을 측정하였다(축산기술연구소, 1996).

잔디의 시각적 품질상태(visual quality)는 밀도, color, 피복률을 기준으로 1~9단계의

등급으로 나누어 육안으로 평가하였다. '1'의 단계는 고사한 상태를 나타낸 것이며 '9'의 단계는 이상적인 잔디의 상태를 나타낸 것이다(NTEP, 1997).

실험 설계 및 통계처리

식재층 지반 경도를 제외한 모든 실험은 처리당 3반복의 Randomized Incomplete block design으로 실험 설계되었으며 측정된 지반경도를 제외한 모든 data들은 SAS(Stastical Analysis System)에 의해 통계분석하였다(SAS Institute, 1990).

결과 및 고찰

식재층 내 지하부의 gas 함량변화

답압 처리 후 흡·호기 시스템을 작동하기 전 실험구 식재지반의 gas함량은 전체적으로 대기중의 산소함량보다 낮고, 대기 중의 이산화탄소함량보다 높게 나타났다. 그러나 공기의 순환으로 흡·호기 시스템 설치구에서는 작동 1시간 후 산소와 이산화탄소의 함량이 작동 전보다 답압조건에 관계없이 대기 중과 동일한 조건으로 회복되었다. 작동 2시간 후에는 KBG 85% + PR 15% 혼합실험구와 'Zenith' 실험구의 근계에서 모두 대기 중과 동일한 조건으로 회복되었다(Table 1). 이것은 인위적 답압처리 수준이 높아질수록 잔디근계의 호흡량이 증가하여 토양 내 gas 중 산소함량이 감소하고, 이산화탄소의 함량이 증가하여 여름철 고온기의 잔디생리에 stress요인으로 작용하는 것으로 판단되었다. 이와 함께 흡·호기 시스템 미설치구역의 무답압지역에서도 산소와 이산화탄소의 함량이 대기중과 비교하여 차이가 나는 것은 8월 평균기온이 높기 때문에 높은

Table 1. Soil gas content after 2 hrs of Soil-Air™ operation (14:00 August 5, 1999)

Treatment		GAS (%)											
		O ₂					LSD	CO ₂					LSD
		Control	1game/ 2.5day	2game/ 2.5day	1game/ 1day	2game/ 1day		Control	1game/ 2.5day	2game/ 2.5day	1game/ 1day	2game/ 1day	
Air-flow	KBG	20.90a*	20.90a	20.90a	20.90a	20.90a		0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c	
	Zenith	20.90a	20.90a	20.90a	20.90a	20.90a	NS	0.01c	0.00c	0.04c	0.00b	0.00c	NS
no Air-flow	KBG	19.93b	18.87a	18.30b	18.23b	16.23c	1.58	0.77b	1.23b	1.47b	1.81a	3.01a	0.98
	Zenith	18.27c	14.57b	13.07c	17.60b	18.53b	NS	1.47a	2.29a	2.73a	1.27a	1.31b	NS
LSD		0.43	4.00	2.55	1.52	0.46		0.36	1.04	0.73	0.78	0.39	

* Capital letters and small letters mean LSD grouping for row and column, respectively.
NS=not significant at $P>0.05$

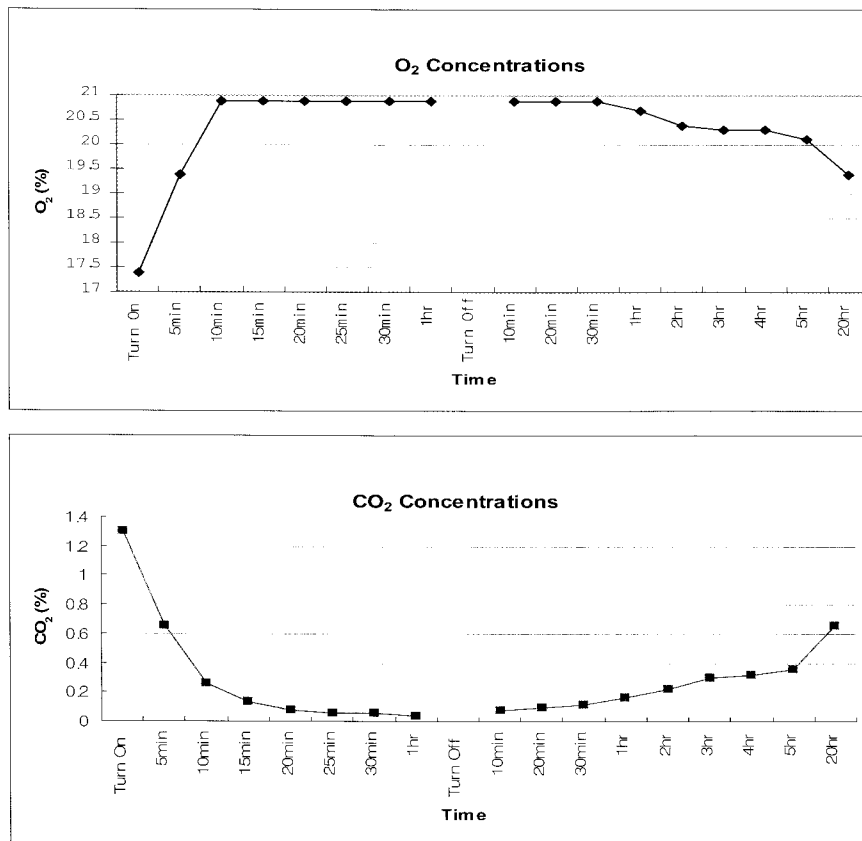


Fig. 2. Effect Soil-Air™ operation on changes of O₂ and CO₂ concentration in turf root zone(10cm in depth)

온도가 여름철 잔디 생육에 지장을 주는 것으로 판단된다.

자연상태에서 흡·호기 시스템의 작동에 의한 토양 내 산소와 이산화탄소함량의 변화는 흡·호기 시스템 작동 초기 10분 간에 그 함량이 급격히 감소되었으며, 30분 이후에는 0.06%, 1시간 후에는 대기 중과 동일한 상태로 감소하였다. 작동을 정지한 후 이산화탄소의 함량은 다시 서서히 증가하여 5시간 후에는 0.36%, 20시간 이후에는 0.74%까지 증가하였다. 산소의 경우 작동 10분 후 대기 중과 동일한 상태로 증가하였고, 작동을 정지한 후에는 완전히 감소하여 20시간 후에는 19.4%의 함량을 보였다(Fig. 2). 이것은 흡·호기 시스템을 현장에 적용시 사용빈도를 예측할 수 있는 척도로 사용될 수 있고, 대구 모형경기장에서는 이를 토대로 8시간마다 1시간씩 가동하였다.

그라운드 표면탄성도 측정

대구 모형경기장 그라운드 표면의 탄성도는 흡·호기 시스템 설치에 따른 차이는 나타나지 않았으며, 전체적으로 초중에 관계없이 답

압이 심할수록 표면탄성도는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 한국잔디류에서 그 경향이 현저하였다. 초중에 따라 유의차가 나타나는 것은 한지형 잔디와 난지형 잔디의 생육형태가 다르기 때문이다(Table 2). 표면탄성도가 증가하게 되면 축구경기 중 축구공의 리바운드에 큰 영향을 미치게 되므로 경기장 그라운드 조성 및 관리 시 적절한 수준의 탄성도를 유지하도록 관리하여야 한다.

잔디 뿌리의 회복 및 시각적 품질상태 변화

답압에 의한 stress는 KBG 85% + PR 15% 혼합실험구에서 지하부의 건물량을 감소시켰으나, ‘Zenith’ 실험구에서는 지상부의 피해는 관찰되었으나 지하부 건물량에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 흡·호기 시스템을 작동한 KBG 85% + PR 15% 혼합실험구의 지하부 건물량은 미설치지역의 실험구보다 현저한 지하부의 회복력을 보였다. 이것은 답압으로 인한 stress로 잔디뿌리의 호흡에 악영향을 미쳤으나 흡·호기 시스템으로 인한 잔디지하부에 gas 교환이 일어나 회복에 필요한 호흡을 원활히 할 수 있어 지하부의 회복에

Table. 2. Surface resilience for traffic injury treatment measured with Clegg Impact Soil Tester(4.5kg hammer)

Treatment	Surface resilience (g-max)					LSD	
	control	1game / 2.5day	2games / 2.5day	1game / 1day	2games / 1day		
Air-flow	KBG	7.45de* B*	8.73cd A	8.88cd A	8.65d A	9.08d A	0.64
	Zenith	8.03abcd C	9.50ab B	9.90ab B	10.68a AB	11.45a A	1.26
no Air-flow	KBG	7.60cd C	8.15d C	8.85d B	9.18cd AB	9.73cd A	0.59
	Zenith	8.38ab C	9.60a B	10.63a A	10.68a A	11.10ab A	0.99
LSD	0.71	0.74	0.79	0.80	1.16		

* Capital letters and small letters mean LSD_{0.05} grouping for row and column.

효과를 준 것으로 분석되었다(Table 3).

답압실험 전 실험구의 잔디는 푸른 색을 띠었으나 답압종료일의 실험구 내의 잔디는 얼은 녹색이나 황색으로 변화하였으나 답압실험이 종료된 후 3 주후에는 다시 푸른 색으로 회복되었다. 특히 답압피해를 가장 많이 받은 KBG 85% + PR 15% 혼합 실험구(2 games/1 day)의 흡·호기 시스템을 가동한 지역에서 답압처리를 하기 전과 답압종료일, 답압종료 후 3 주후의 color의 변화가 흡·호기 시스템을 설치하지 않은 지역의 실험구보다 회복이 뚜렷하게 나타났다. 'Zenith' 실험구(2 game/1 day)에서도 역시 흡·호기 시스템을 설치한 실험구가 흡·호기 시스템을 설치하지 않은 지역보다 회복정도가 두드러졌다. 하지만 강제 흡·호기 순환식 설비의 설치유무에 따른 색의 회복정도의 차이는 없는 것으로 나타났다.

시각적 품질상태(visual quality)는 답압이 심할수록 잔디의 품질은 현저히 떨어졌으며 답압종료일의 품질상태는 초종에 따라 유의차가 있고 한지형잔디에서 강제 흡·호기 순환식 설비의 설치유무에 따른 유의차가 있는 것

으로 나타났다. 답압실험이 종료된 후 1 주일 후의 품질상태는 초종이나 강제 흡·호기 순환식 설비의 설치유무에 따라 시각적 품질상태의 차이가 있는 것으로 나타났다. 하지만 2 주후와 3 주후에는 초종이나 강제 흡·호기 순환식 설비의 설치유무에 관계없이 잔디가 회복되고 있음을 알 수 있다. 이는 잔디가 심한 stress를 받은 후 최소 2~3주이상 지나야 원상태로의 회복이 가능하고 강제 흡·호기 순환식 설비의 설치는 stress를 받은 직후 1 주정도 잔디의 품질회복에 효과를 나타내지만 시간이 지난 후에는 설비의 설치와는 관계없이 자연상태에서 회복이 이루어지는 것을 알 수 있다.

경기수용량이 많아 높은 답압이 예상되는 축구장에서 한지형 잔디로 그라운드를 조성할 때 흡·호기 시스템의 설치는 잔디관리 유지상 긍정적인 효과를 보이는 것으로 분석되었으나 잔디 지상부의 생육상태와 지상부의 건물량에 대한 조사가 추가로 고려되어야 할 것이다.

Table 3. Effect of turfgrass recovery on root weight with or without Soil-Air™ operation. Data were collected at 4 weeks later after 20 days of traffic treatment. (Measured at Sep. 2, 1999)

Treatment	Root dry wt. (g) / 86.6cm ² X depth 20cm					LSD	
	Control	1game/2.5d	2game/2.5d	1game/1d	2game/1d		
Air-flow	KBG	7.56a* A*	6.21a B	4.95a C	4.23a C	4.08a C	1.88
	Zenith	2.69c A	3.62b A	3.03b A	3.47a A	3.29a A	NS
NO Air-flow	KBG	4.39b A	5.10ab A	4.47ab A	3.68a A	3.86a A	NS
	Zenith	3.27c A	2.98b A	3.50ab A	3.62a A	3.06a A	NS
LSD	1.09	2.28	NS	NS	NS		

* Capital letters and small letters mean LSD_{0.05} grouping for row and column, respectively. NS=not significant at P>0.05

결론

한지형 잔디로 구장을 조성할 때 특히 우리나라에서 유의해야 되는 것 중 하나가 여름철의 고온다습한 기후환경일 것이다. 심한 답압이 예상되는 축구경기장에서 여름철 고온과 답압이 동시에 잔디그라운드에 영향을 미친다면 잔디그라운드는 집약적 잔디관리프로그램 일지라도 최적의 상태를 유지하기에 난점이 예상된다.

본 연구는 강제 흡·호기 순환식 설비를 이용하여 우리나라의 하고현상과 집중적 답압으로 인한 stress로부터 잔디의 회복력과 여름철 장마기 때의 배수능력, 근계부 온도조절, 그리고 잔디 표면탄성도에 미치는 영향을 실험하여 2002년 월드컵축구경기장의 관리 자료로 제시하는 것이 목적이다.

답압으로 인한 토양의 경직도는 일반적으로 지하 7.5cm 깊이부터 증가하였고, 지하 20cm 이하인 하부에까지 영향을 미쳤다. 그라운드 조성초기의 답압은 강도가 심할수록 상토층의 고결화도 심해졌다. 흡·호기 시스템을 가동하지 않은 지역의 토양 내 근계부근의 산소와 이산화탄소의 함량은 초종에 따라 다르며 답압수준에 따라 차이를 보이고 있다. 답압처리 수준이 높을수록 잔디근계의 호흡량이 증가하여 토양가스 중 산소함량이 감소하고, 이산화탄소의 함량이 증가하여 고온기의 잔디생리에 stress요인으로 작용하는 것으로 판단되었고, 일정한 수준의 흡·호기 시스템의 작동은 미설치구보다 답압이 종료된 후 잔디뿌리의 회복력을 높이는 효과로 작용하였다. 잔디의 시각적 품질은 답압이 심할수록 질이 떨어졌으며 흡·호기 시스템의 설치유무에 관계없이 시간이 경과한 후 전체적으로 회복되었다. 흡·호기 시스템의 설치에 따라 잔디그라운드

의 표면탄성과 지반온도, 표면온도에는 큰 영향을 미치지 않았다. 여름철 강우집중기에서 흡·호기 시스템은 효과적인 배수능력을 보였고, 설치를 하지 않은 실험구에서도 USGA 다층지반구조로 인한 자연배수능력을 보였다. 각종 경기로 인하여 집중적 답압이 예상되는 한지형 잔디류로 조성된 경기장에 흡·호기 시스템의 설치는 잔디관리 유지상 회복력 등에서 긍정적인 효과를 보이는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Adams, W.A. and R.J. Gibbs. 1994. Natural turf sport and amenity science and practice. CAB International, Willingford, Oxen, UK. p. 27, 41~48.
2. Aldous, D.E. and J.E. Kaufmann. 1979. Role of root temperature in shoot growth of two Kentucky bluegrass cultivars. *Agron. J.* 71: 545~547.
3. Beard, J.B. and S.I. Sifers 1990. Feasibility assessment of randomly oriented, interlocking mesh element matrices for turfed root zones. *In Natural and artificial playing fields.* p. 154~165.
4. Canaway, P.M., M.J. Bell., G. Holmes, and S.W. Baker. 1990. Standards for the playing quality of natural turf for association football. *In Natural and artificial playing fields: Characteristics and safety features.* R.C. Schmidt, E.F. Hoerner, E.M. Miller, and C.A.

- Morehouse,(eds). American society for testing materials. Philadelphia. P.A. vol 1073. p. 29~47.
5. Hook, D.D. and Scholtens J.R. 1978. Adaptations and flood tolerance of tree species. *In* Hook. D.D, and Crawford RMM(eds). Ann Arbor Science Publ. Ann Arbor. p. 299~331
 6. Huang. B., X. Liu. and J.D. Fry. 1998. Effect of high temperature and poor soil aeration on root growth and viability of creeping bentgrass. *Crop science*. vol. 38. issue 6. p. 1618~1622.
 7. Kroyanagi, T., and G.M. Paulsen. 1988. Mediation of high-temperature injury by roots and shoots during reproductive growth of wheat. *Plant Cell Environ*. vol. 11. p. 517~523.
 8. National Turfgrass Evaluation Program(NTEP). 1997. National Zoysiagrass test-1996. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Beltsville Agricultural Research Center, Beltsville, MD. 20705. Progress Report 1997 NTEP No.98-4
 9. Rogers, J.N., III, and D.V. Waddington. 1990. Potable apparatus for assessing impact characteristics of athletic field surfaces. *In* Natural and artificial playing fields: Characteristics and safety features. R.C. Schmidt, E.F. Hoerner, E.M. Miller, and C.A. Morehouse,(eds). American society for testing materials. Philadelphia. P.A. vol. 1073. p. 96~110.
 10. SAS Institute. 1990. SAS/STAT user's guide. vol. 2. 4th edition. SAS Institute. Cary. NC.
 11. USGA recommendation for a method of putting green construction. 1988. <http://www.usga.org/green>.
 12. 축산기술연구소. 1996. 표준사료분석법. 농촌진흥청. p. 1~19.

