

항공LiDAR 자료를 이용한 생활폐기물매립장의 가용한도 추정

Estimation of Maximum Volume in Landfill Site Using Airborne LiDAR Measurement

변상철¹⁾ · 최명규²⁾ · 김진광³⁾

Byun, Sang Chul · Choi, Myung Kyu · Kim, Jin Kwang

Abstract

This study intends to analyze how long the landfill site will be available by estimating maximum volume of landfill. Preestimated volume was calculated using digital maps and scheme drawings. The latest reclamation volume was measured using the state-of-the-art airborne LiDAR technology. Based on these data, landfill volume of now, carries in volume of past a few years and subsidence rate were calculated. As a result of study, the remaining capacity of this landfill site was estimated that it would be available till 2045.

Keywords : Landfill site, Airborne LiDAR, Remaining capacity, Subsidence rate

초 록

본 연구는 생활폐기물매립장의 용적량을 산출함으로써 매립장을 향후 계속하여 언제까지 사용할 수 있는가를 분석한 것이다. 계획용적량을 산출하기 위해서 매립장의 설계 당시의 수치지도 및 계획도 등을 사용하였고, 현재까지의 매립 용적량은 최신의 항공측량장비인 항공 LiDAR 장비를 이용하여 매립량을 측정하였다. 이러한 자료를 바탕으로 현재의 매립 용적량과 지난 수년 간의 반입량, 그리고 그간의 침하량을 산출하였다. 연구 결과, 잉여용적량으로 계산한 대항지역의 매립 가용 년도는 2045년까지로 나타났다.

핵심어 : 매립장, 항공LiDAR, 잉여용량, 침하율

1. 서 론

인간의 산업 및 생활 활동에 의해 생긴 부산물인 폐기물은 인구의 증가와 생활문화의 다변화에 따라 그 발생량이 급속히 증가되고 있다. 폐기물의 처리를 위하여 매립 및 소각 등 여러 방법이 활용 또는 연구 중에 있으나 우리나라는 매립이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 특히 초창기 매립지들은 부지 선정과정에서 지질학적 여건을 고려한 매립물질의 선택이나 오염방지시설에 대한 미비로 최근 사회적 문제로 대두되고 있다(이재영 등, 1996).

이와 같이 쓰레기 문제의 직접적인 원인은 쓰레기 매립부지의 확보난에 있다. 이런 부지확보 어려움의 이유로는 매립지에서 발생하는 침출수에 의한 주변 하천의 오염과 유출 가스에 의한 식물의 고사, 지구 온난화 등 많은 문제점을 들 수 있다. 특히, 매립가스는 쓰레기 매립 작업 중에 인근 주민과 작업자에 위험한 가스가 되고, 매립 완료 후에는 토지 이용에 저해요인이 된다(이혜승 등, 1997).

지난 1980년대 중반까지만 해도 생활쓰레기 처리는 대부분 간이 노천 매립장에 의존하고 있었으며, 서울시의 경우는 난지도 매립장에서 위생처리 되고 있었다. 그

1) 정희원 · 경기대학교 지리정보공학과 석사과정(E-mail:2869579@hanmail.net)
2) 정희원 · 중앙향업(주) 연구원(E-mail:dmsgodslv@hanmail.net)
3) 교신저자 · 정희원 · 중앙향업(주) 수석연구원(E-mail:jeff2kim@chollian.net)

러나 난지도 매립장은 매립한계에 도달해 지반붕괴 등의 위험이 우려됐고, 새로운 쓰레기매립장의 확보는 당시 서울시의 가장 큰 현안 사항으로 대두됐다. 이에 따라 환경청에서는 1987년 서울시, 인천시, 경기도와 협의하여 수도권지역 쓰레기문제를 근본적으로 해결하기 위한 대안으로 수도권 전체를 아우르는 대규모 광역매립지 조성 방안을 마련했다. 쓰레기 매립지 선정을 위한 부지 물색과 적정성에 대한 검토가 이뤄지고 있었으나, 가장 큰 장애는 대상지역 주민의 반발과 대규모 부지의 확보 등이다(환경부, 2010).

이와 같이 매립 부지를 효과적으로 선정하고 이에 대한 환경영향 평가 방법과 매립 용량을 산출하는 다양한 방법이 제시되었다.

즉, 다량의 환경학적 정보를 저장, 관리, 분석, 표시할 수 있는 GIS(Geo-Spatial Information System)와 의사 결정 과정에서 사용될 수 있는 AHP(Analytic Hierarchy Process: 분석적 계층법)를 이용하여 쓰레기 매립지를 평가하는 방법 연구(양인태 등, 1998)가 있다. Hasan 등(2009)은 GIS를 활용하여 매립부지 선정을 위한 다양한 기법을 적용하였다.

매립지의 용량을 산정하기 위한 방법으로 매립이 진행되고 있는 매립장에 반입되는 생활폐기물의 차량적재 밀도, 적하밀도, 다짐밀도를 분석하여 매립용량 산정을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다(서정민 등 1998). 또한 캘리포니아 주 정부에서도 매립장 용적량 산출을 위해 입체 항공사진측량, 지상측량, 반입량 무게 측정 방법으로 연구(James, 1995)하였으며, 항공사진측량에 의한 방법이 비용, 정확도 측면에서 가장 우수함을 나타내고 있다.

또한 본 연구와 유사하게 Fisher 등(2001)은 LiDAR 자료를 이용하여 매립장에서의 용적량 변화를 모니터링하고자 하였다. 즉 서로 다른 시기에 획득한 LiDAR 자료를 바탕으로 매립장 관리자들에게 정확하고 신뢰성 있는 세금을 결정하고자 하였다. 이는 매립량의 침하를 고려하지 않고 단지 두 시기의 변화량만을 측정함으로써 향후 매립장의 가용기간에 대한 추정을 하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 매립장 설계 당시의 계획 용량을 산정하고, 항공 LiDAR를 활용하여 현재까지의 매립 용량을 산출하였다. 또한 그간의 반입량과 현재의 매립 용량을 비교하여 자연 침하량을 산출함으로써 정확한 매립장의 가용기간을 추정할 수 있었다.

2. 연구방법

2.1 자료획득

본 연구의 대상지역은 마산시 덕동동 68번지 일원에 위치한 생활폐기물매립장으로서 연구에 사용한 자료는 크게 두 종류를 획득하였다. 현재의 매립 용적량을 산출하기 위해 항공 LiDAR 자료를 획득하였고, 매립장 설계 당시의 계획 용적량을 산출하기 위해 수치지도와 계획도면을 사용함으로써 설계용적량을 확인하였다. 또한 촬영 당시까지의 매립 누적량을 산출하기 위해 1995년부터 2009년 10월까지의 연간 매립량 통계자료를 사용하였다.

GPS/INS 관련 자료의 처리는 POSPAC 소프트웨어를 이용하였으며, 점자료를 처리하기 위해 Bentley사의 Microstation V8과 반드시 Microstation을 기반으로 운영되는 Terrasolid사의 Terra Scan 및 Terra Modeller를 이용하였다.

항공LiDAR 자료는 매립장 사용한다 추정용 목적으로 하기 때문에 항공레이저측량작업규정(국토지리정보원, 2009)에 있는 자료획득 점밀도 보다 많은 4점으로 설계하였고, 비행코스 중복도는 50%로 촬영하였다. 또한 항공레이저측량 장비가 가지고 있는 자체적인 오차를 판별하고 이를 보정해주기 위해 천안 탕정지구를 2009년 8월 23일에 실시하여 시스템 검정을 수행하였다. 본 연구 대상지역의 효율적인 자료획득 및 분석을 위해 기상조건을 고려하여 2009년 11월 24일 그림 1과 같이 매립장을 기준으로 대각선의 형태로 촬영하였다. 위치자료의 정확도를 향상시키기 위해 GPS 상시 기준국 2개소를 이용하였으며, GPS 신호 수신 간격은 1초단위로 사용하였다.

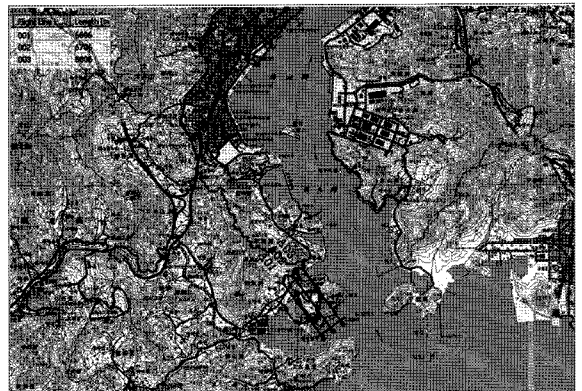


그림 1. 연구대상지역

2.2 초기 매립장 복원

초기 매립장의 정확한 용적량 산출을 위해 폐기물이 매립되기 전 자료가 필요하다. 이는 누적된 폐기물의 자연 침하 및 매립 시작 시점부터 현재까지의 매립용량을 산출하는 근거자료로 활용할 수 있다. 초기 매립장의 복원은 1991년 매립장 설계에 사용되었던 매립평면계획도 및 연구대상지역의 수치지형도, 설계변경도 등을 참고하였다(그림 2).

매립장의 준공당시 형태를 복원하기 위해 수치지형도의 등고선과 매립계획 평면도를 비교 분석하였으며, 매립계획 평면도를 기준으로 매립 이전의 지형 형태 및 지형고도 등에 대한 정보를 추출하여 최종적으로 등고선의 형태로 복원하였다.

제작된 등고선을 이용하여 지형 형태를 구축하였으며, 매립 이전의 지형 모델은 그림 3과 같이 복원하였다.

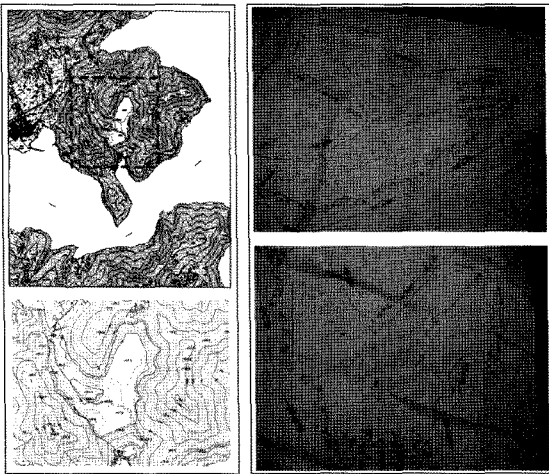


그림 2. 수치지형도 및 평면계획도

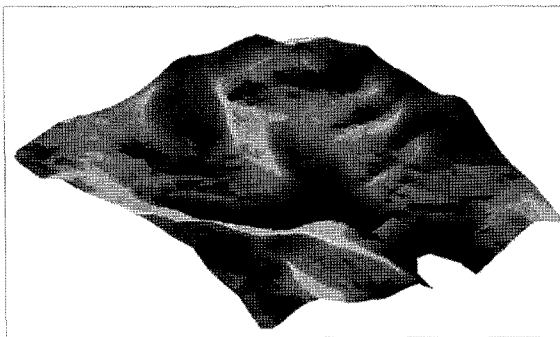


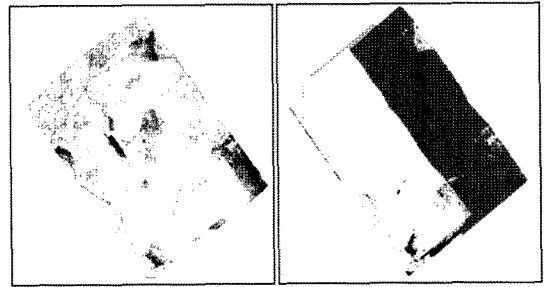
그림 3. 매립전 지형모델

2.3 항공LiDAR 자료처리

항공LiDAR 자료를 처리하기 위해서는 촬영과 동시에 획득한 GPS/INS 자료, GPS 상시기준국 자료, 점자료를 처리해야 한다. 먼저 전처리 단계로서 획득된 원시자료에서 GPS/INS자료와 지상 GPS 자료를 이용하여 정확한 항공기의 위치정보와 지상기준국 위치정보를 입력하여 처리함으로써 정밀한 위치정보를 획득하였다.

자료처리 결과 항공기의 교차비행시 이격 오차는 10cm 이내인 것을 확인할 수 있었으며, PDOP, HDOP, VDOP 등은 대체적으로 3이하의 값으로 안정적이었고, 수신된 GPS 위성의 수는 6개 이상으로 양호하였다.

획득된 점자료를 정밀한 위치정보로 변환한 후 반사값에 따라 분류를 수행하였다. 분류를 수행하지 않은 자료는 그림 4와 같이 지상에 있는 모든 자료를 포함하고 있다.



(a) 반사강도

(b) 코스별 점자료

그림 4. LiDAR 점자료

항공레이저측량 수행 후 획득된 자료는 1차 처리, 즉 전처리 단계를 완료한 후 자료의 가공, 분류 및 수정의 단계인 후처리를 수행하였다. 후처리 단계에서 자료를 처리하기 위해 Terra Scan을 사용 실제의 지표면에 해당하는 Ground Class만을 자동분류를 수행하였다. S/W에 의한 자동분류는 일부지역에서 오류를 포함할 가능성이 있다. 일반적으로 제방, 논, 밭 등과 건물과 같은 인공 구조물에서 오류가 발생하며, 수목으로 구성된 산림지역 등에서도 자동 분류 후 미흡한 점들을 발견할 수 있다. 따라서 이러한 점군들은 음영기복도, 등고선도, 디지털영상, 반사강도 등을 참고하여 오류를 수정함으로써 보다 정밀한 자료를 구축하였고, 전처리 및 후처리가 완료된 점자료는 1m 간격의 수치표고자료(DEM)로 제작하였다(그림 5).

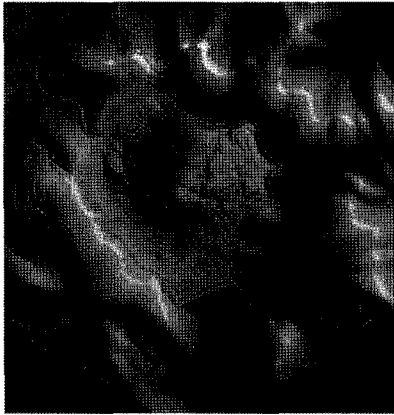


그림 5. 처리 완료된 표고자료

3. 매립장 용량 산출

3.1 매립장 현황

생활폐기물매립장의 사용개시 시점부터 2009년 10월 까지의 매립현황에 대한 조사 결과 표 1과 같았다.

매립장의 연간 매립현황에 대한 통계치를 추정하기 위해 1년간의 매립현황이 확보된 1996년부터 2008년까지의 현황 자료를 사용하여 연간 매립량에 의한 월평균 매립량을 추정하였다.

3.2 매립장 용량산출

누적된 매립량의 정확한 용량 측정을 위해 매립부지의 용량 기준을 설정하여야 하며, 참조 자료로 반사도, 음영기복도 및 정사영상 등(그림 7)을 이용하여 매립부지의 최대 기준면을 설정하였다.

표 1. 매립현황

단위(m³)

년도	매립기간	총매립량	월평균매립량
1995	4개월	65,460	16,365
1996	12개월	279,266	23,272
1997	12개월	268,832	22,403
1998	12개월	227,684	18,974
1999	12개월	208,407	17,367
2000	12개월	194,244	16,187
2001	12개월	179,961	14,997
2002	12개월	192,608	16,051
2003	12개월	189,221	15,768
2004	12개월	190,016	15,835
2005	12개월	148,139	12,345
2006	12개월	158,046	13,171
2007	12개월	151,247	12,604
2008	12개월	155,481	12,957
2009	10개월	110,184	9,182

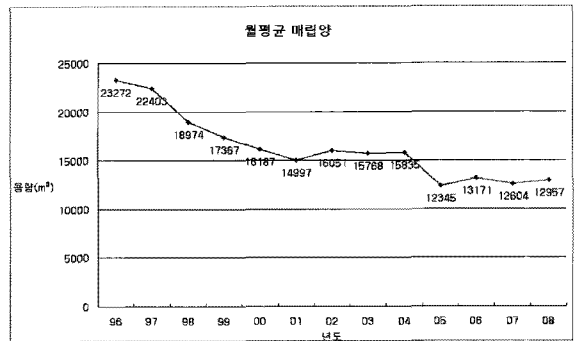


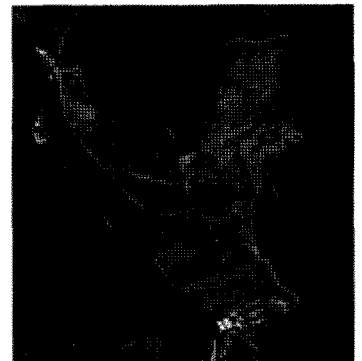
그림 6. 월평균 매립량



(a) 반사도



(b) 음영기복도



(c) 정사영상

그림 7. 자료별 기준면 추출



(a) 경사현황 (b) 버퍼적용 (c) 기준면

그림 8. 기준면 추출

매립장 경계지역으로 도로가 있으며, 이 도로가 실제적인 매립 부지에 해당한다. 따라서 기준면을 설정하기 위해 육안으로 도로의 형태가 뚜렷하게 나타나는 음영기복도 상에서 경계선을 추출하고, 추출된 경계선이 정확한지를 반사도와 정사영상에서 확인하였다. 도로 폭 내에 포함되는 LiDAR 포인트 자료는 수 없이 많을 수 있다. 따라서 도로를 따라 버퍼가 2m 이내인 영역을 설정하고, 이 영역 내의 포인트 자료를 추출하여 기준면의 경사를 고려한 면 자료를 추출하였다(그림 8의 c).

획득된 LiDAR 데이터의 3차원 위치정보를 이용해 최종적으로 모델을 구성함으로써 매립지의 용량을 산출하게 되며, 지형으로 분류된 LiDAR 성과와 기준면에 대한 모델을 별도로 구성함으로써 지형과 기준면 사이의 잉여용량을 산출할 수 있다.

지형분류성과로 추출된 점 데이터는 불규칙한 분포형태를 가진다. 따라서 균질성 확보를 위해 모델을 구성하였으며, 보간 방법 중 TIN(불규칙삼각망)보간법을 사용함으로써 모델을 구성하였다.

구성된 모델 중 지형모델은 실제지형의 형태를 반영하게 되며, 기준면 모델은 지형의 경사를 고려한 면 데이터로 제작된다.

지형과 기준면의 이격현상들을 확인하기 위해 중첩된 모델의 단면을 확인함으로써 모델간의 형태를 확인하였다. 그림 9는 매립장의 단면을 위치별로 나타낸 것이다.

지형과 기준면의 모델이 제작되면 각각의 모델을 중첩하여 모델간의 용량 산출이 가능하다. 따라서 기준면 모델과 지형모델을 중첩하여 현재까지의 잉여용량을 산출하였다.

그림 10은 모델 중첩 후 단면을 나타낸 것이며, 붉은색은 지형을 나타내고 파란색은 매립장의 잉여용량을

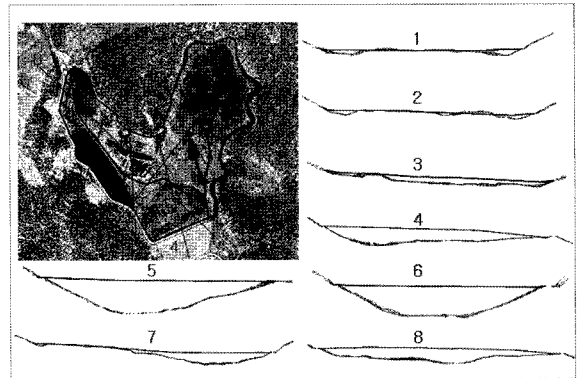


그림 9. 위치별 단면



그림 10. 중첩모델과 단면

나타낸 것이다. LiDAR 지형모델과 기준면 모델을 비교하여 계산한 결과 측정된 잉여용량은 1,522,202m³으로

산출되었다.

누적된 폐기물의 용량 산출을 위해 매립장 설계당시의 수치지도 및 설계도면 등의 자료로부터 복원된 매립장의 용량을 기준으로 1996년부터 2009년까지 폐기물의 매립량을 산출하여 비교하였다. 복원된 매립장의 용량은 3,292,407.2m³로 측정되었으며, 1996년부터 2009년까지의 누적 매립량은 2,718,796m³로 조사되었다. 복원된 용량과 조사된 누적 매립량을 비교한 결과 잉여 용량은 573,611.2m³로 측정되었다.

매립 후 환경오염을 최소화하기 위한 복토를 하고자 확보하고 있는 토사를 적재한 지역의 토사량은 매립장의 전체용량에서 제외해야한다.

토사량 추출을 위해 매립장 단면의 경사를 고려하여 적재된 토사에 대한 용량을 산출하였다. 매립지 입구 좌측에 위치한 토사적재지역의 용량을 산출한 결과 그림 11의 그림에서 붉은색으로 표시된 지역은 인접 경사면보다 토사량이 많은 것을 나타낸다. 토사량을 산출하기 위해 촬영 및 현지조사에서 획득한 자료를 바탕으로 토사가 적재된 지역의 경계를 추출한 후 해당지역의 3차원 점 데이터를 사용하여 토사가 적재된 지역에 한하여 모델을 제작하였다. 이 모델과 초기 복원된 매립지의 3차원 모델을 중첩함으로써 토사지역의 적재용량을 산출한 결과 9,054.3m³ 용량이 산출되었다.

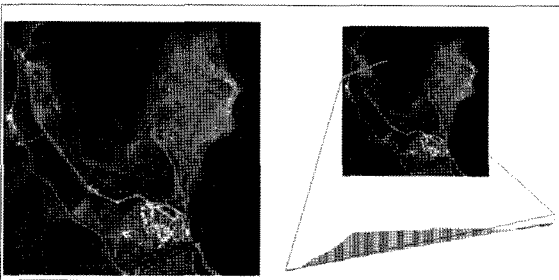


그림 11. 적재토사 위치와 단면

기준면으로부터 조사된 매립지 잉여용량과 LiDAR로 측정된 잉여용량을 분석한 결과 값을 비교하여 자연 침하량을 산출하였다(표 2).

표 2. 잉여용량과 자연 침하량

대상	용량	자연 침하량
매립장	573,611.2	957,645.3
LiDAR	1,531,256.5	

LiDAR로 측정된 잉여용량과 매립지의 연간 투입 매립량에 의한 잉여용량을 비교한 결과 1996년부터 2009년 까지 총 957,645.3m³의 자연 침하가 일어난 것으로 나타났다. 매립기간을 개월 수로 환산하여 최종적으로 평균 년수를 산출한 결과 총 14년이며, 총 자연 침하량을 14년에 대해 등분배 할 경우 년 간 68,403.2m³의 용량이 자연 침하가 일어난 것으로 측정되었다.

4. 매립장 가용년도 산출

4.1 매립량 변화 추이

1996년 이후 연간 매립량의 추이는 정책 및 주된 사용 연료에 따라 변화가 있었다. 그림 12의 연간 총 매립량의 그래프로 판단할 때 폐기물의 매립량은 1996년부터 2001년까지 감소하는 추세를 나타내고 있으며, 이는 연탄과 같은 난방원료의 감소로 추정된다. 또한 2004년 이후 급격히 감소하는 추세는 쓰레기 분리수거 정책의 실행으로 쓰레기 매립량이 급격히 감소하는 추세임을 확인 할 수 있었다. 최근 5년간 매립량은 비교적 일정하며, 배출되는 생활폐기물의 분리수거 및 여건이 정착화 되었다는 것을 알 수 있다.

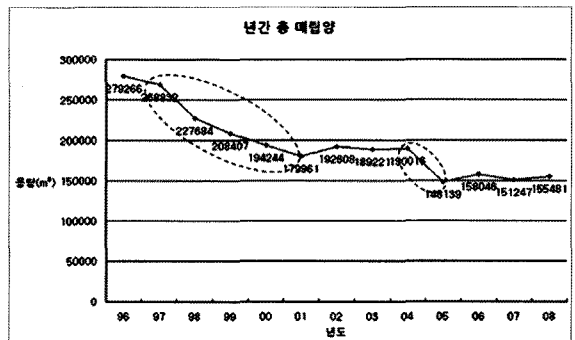


그림 12. 연간 총 매립량

4.2 매립량 감소

이와 같은 매립량의 변화를 예측하기 위해서는 최근의 추이를 반영해야 한다. 따라서 연간 평균매립량을 산출할 때 최근 5년간의 매립량을 토대로 평균 매립량을 산출하였다.

표 1에서 12개월 기준으로 미달인 2009년을 제외한 2005~2008년도에 대한 연평균 매립량에 대한 평균치를 산정한 결과 153,228.25m³로 나타났다. 앞서 조사한 자

연 침하량은 연간 68,403.2m³ 만큼 이루어졌으며, 향후 연간 매립량에 고려되어야 할 사항이다.

2009년 10월부터 생활폐기물 소각장 가동으로 인해 폐기물매립장의 매립량이 감소 추세를 나타낼 것으로 판단되며, 소각장 운용으로 인한 감소량의 변화는 표 3 과 같다.

표 3. 소각률 산정

단위(m ³)		
년도	총 반입량	감소율
2008	155,481	50.29%
2010	78,198	

4.3 가용기간 추정

획득된 LiDAR 데이터로 산정된 잉여용량을 기준으로 향후 연평균 매립량을 적용하여 폐기물 매립장의 향후 사용기간을 추정하였다.

매립장의 시트지 및 도로, 수로를 기준으로 기준면을 제작하여 기준면이하의 잉여용량을 산출한 결과는 1,522,202.2m³ 로 나타났으며, 측정된 결과에 복토야적장의 용량 및 침출수 배제 시설, 매립가스 포집공의 용량을 고려하여 최종 잉여량을 산출하였다. 복토야적장의 토사량은 9,054.3m³ 로 측정되었으며, 2개 침출수 배제 시설과 12개의 매립가스 포집공이 기준면에 도달한 시점을 가정하여 용량측정 결과 2개의 침출수 배제 시설은 317.17m³, 12개의 매립가스 포집공은 33m³ 로 측정되었다.

복토야적장의 용량은 남은 전체 잉여용량의 약 0.6%에 해당하며, 침출수 배제 시설의 용량은 전체의 약 0.02%, 매립가스 포집공의 용량은 0.002% 로 침출수 배

제 시설과 매립가스 포집공 시설은 전체의 잉여용량 대비 미소한 양임을 알 수 있었다.

최종 잉여용량은 남은 총 잉여용량에 복토야적장의 토사량을 합산하며, 침출수 배제 시설 및 매립가스 포집공의 용량을 제외한 나머지인 1,530,906m³의 용량을 산출 하였다.

자연 침하량을 고려하고 또한 소각장운용을 통한 매립률이 50%일 경우 약 36년 간 사용하여 2045년까지 매립장 운영이 가능하다. 현재 소각장 운용은 시작단계임으로 추후 안정화 되는 시점을 고려하여 매립률이 30%에 도달할 경우 60년간 매립장 운영이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

생활폐기물매립장 확보에 어려움을 겪고 있는 여러 지방자치단체에서 기존 사용하고 있는 매립장을 보다 효과적으로 장기간 사용하기 위해 꾸준히 노력하고 있다. 본 연구 결과 매립장의 자연 침하를 고려하고 현재의 용적량을 정확히 산출할 수 있었다.

또한 매립장의 환경 특성상 폐기물 분진으로 인한 사람의 접근이 제한된 곳에 항공LiDAR를 이용한 폐기물의 정밀한 표고를 산출함으로써 매립장의 가용기간을 정확히 예측하는 것이 가능해졌다. 다만 계속적으로 폐기물의 투입으로 적재되고 있는 지표 최상층부에서는 자연 침하가 상대적으로 심하게 이루어지기 때문에 이에 대한 투입 폐기물의 성분 분석으로 침하량 예측이 가능하다면 보다 향상된 가용기간 추정이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 국토지리정보원 (2009), 항공레이저측량작업규정, pp. 7-9.
 서정민, 박진식, 최동훈 (1998), 매립용량 산정을 위한 쓰레기 밀도분석, 환경관리학회지, 환경관리학회, 제 4권, 제 2호, pp. 119-123.
 양인태, 김연준, 최광식 (1998), GIS와 AHP법을 이용한 쓰레기 매립지 예비 평가 방법, 한국측지학회지, 한국측지학회, 제 16권, 제 1호, pp. 59-66.
 환경부 (2010), 환경 30년사, pp. 680-681.
 이재영, 김학수 (1996), 불량쓰레기 매립지에 대한 물리 탐사 적용사례 연구 (I), 한국토양환경학회지, 한국토

표 4. 매립장의 가용기간

매립률	년간총반입량	가용기간	가용년도
70%	59,377m ³	26년	2035
65%	55,136m ³	28년	2037
60%	50,895m ³	30년	2039
55%	46,653m ³	33년	2042
50%	42,412m ³	36년	2045
45%	38,171m ³	40년	2049
40%	33,930m ³	45년	2054
35%	29,688m ³	52년	2061
30%	25,447m ³	60년	2069

- 양환경학회, 제 1권, 제 1호, pp. 29-38.
- 이혜승, 이찬기 (1997), 쓰레기 매립지에서 대기중에 유출하는 가스 분포, 한국토양환경학회지, 한국토양환경학회, 제 2권, 제 1호, pp. 63-72.
- M. R. Hasan, K. Tetsuo, S. A. Islam (2009), Landfill demand and allocation for municipal solid waste disposal in Dhaka city-an assessment in a GIS environment, *Journal of Civil Engineering*, IEB, Vol.37, No.2, pp. 133-149.
- James M. Strock (1995), *Determining Remaining Permitted Capacity of California's Sanitary Landfills*, California Environmental Protection Agency Publication No. 210-97-009, Integrated Waste Management Board, pp. 14-18

Peter F Fisher, Nicholas J Tate (2001), Assessing the consistency of LiDAR elevation models, *6th International Conference on GeoComputation*, GeoComputation, GeoComputation CD-ROM, ISBN 1864995637, University of Queensland, Brisbane, Australia.

(접수일 2010. 10. 05, 심사일 2010. 10. 15, 심사완료일 2010. 10. 18)