

LCC분석에 의한 슬러지수집기 선정 모델

A Sludge Collector Selection Model by Life Cycle Cost Analysis

이 승 훈* · 우 유 미** · 이 성 락*** · 홍 태 훈**** · 구 교 진***** · 현 창 택*****

Lee, Seung-Hoon · Woo, Yu-mi · Lee, Sung-Rak · Hong, Tae-Hoon · Koo, Kyo-Jin · Hyun, Chang-Taek

요 약

사회기반시설의 노후화에 따라 시설물 유지관리에 관한 관심이 증대되고 있으며, 이에 따라 다양한 사회기반시설에 대한 LCC분석 연구가 수행되고 있다. 특히 기계설비가 다수 포함된 기반시설에서는 시설물의 건설비와 더불어 보수/교체비, 에너지비 등 유지관리비용이 높은 비중을 차지하고 있다. 이에 본 연구에서는 하수처리장의 슬러지 수집기 선정에 있어 정량적 요소와 정성적 요소를 모두 고려하는 LCC 분석 모델을 개발하고, 사례적용을 통하여 최적대안을 선정하고자 한다. 문헌 고찰과 분석대상 하수처리장의 슬러지 수집기에 대한 공사비와 유지관리 및 보수/교체 이력자료를 바탕으로 비용항목을 도출한다. LCC분석을 위한 가정사항 설정 후, 각 항목별 실적자료와 장비납품업체의 정보를 활용하여 경제성 평가결과를 도출하고, 할인율과 초기투자비 및 유지관리비의 비용변동범위에 따른 민감도분석을 실시한다. 설계자, 자재공급업체 및 시공 전문가의 면담을 통하여 유지관리 편의성, 조달 용이성, 슬러지 수집 성능, 침전물제거 효율도, 환경친화성 등 슬러지 수집기 선정을 위한 기술적·사회적 영향인자를 파악한다. 분석된 기술적·사회적 요인과 LCC 분석결과인 경제성에 대하여 각 항목별 쌍별비교를 통하여 항목별 가중치를 설정하고 전문가 평가를 통하여 종합적인 최적안을 선정한다.

키워드 : LCC, 슬러지 수집기, 경제성 평가, 기술적·사회적요소 평가

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 사회기반시설의 노후화로 인하여 시설물 유지관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 한정된 국가예산을 효율적으로 집행하기 위하여 '설계의 경제성등 검토'와 같은 노력이 제도화되어 시행되고 있다. 이러한 관점에서 시설물의 전체 혹은 각 부분을 유지관리함에 있어 성능대비 비용투입을 최소화하기 위한 방안으로 LCC분석이 합리적인 방법론으로 대두되고 있다.

다양한 사회기반시설 중 건축물·도로·교량 등의 LCC분석에 관한 연구는 다수 진행되었으나, 과거 하수처리장으로 불리던

물 재생시설에 대한 연구는 미진한 실정이다. 물 재생시설은 24시간 에너지를 소비하여 운영되고 있으며, 각종 기계장비들이 집약되어 있어 LCC분석을 통하여 시설물의 건설 및 운영, 유지관리를 합리적으로 결정할 필요가 있다.

본 연구는 물 재생시설을 구성하고 있는 장비 중 슬러지수집기에 대한 LCC분석을 통하여 비용적인 측면과 기술적·사회적 영향요인에 대한 종합적인 고려를 통하여 최적대안을 선정하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

물 재생시설을 구성하고 있는 각종 구조물과 장비 중 슬러지수집기는 장비의 규모나 운영 및 유지관리에 소요되는 자원의 양에 있어서 가장 큰 장비 중의 하나이다. 또한, 슬러지수집기의 대표적인 장비운용 방식으로 미더식브릿지형과 체인플라이트형을 들 수 있는데, 지금까지는 두 가지 방식 모두 사용되었으나, 최근 유지관리의 편의성 등의 이유로 인하여 체인플라이트형이 선호되고 있는 추세이다. 그러나 아직까지 두 방식에 대한 경제성 비교는 이루어진 바 없다.

이를 위하여 물 재생시설과 슬러지수집기의 특징과 각 방식별

* 일반회원, 서울시립대학교 건축공학과 박사과정
 ** 일반회원, 서울시립대학교 건축공학과 석사과정
 *** 일반회원, 서울시립대학교 기계정보공학과 박사과정
 **** 종신회원, 서울시립대학교 건축공학과 조교수, 공학박사 (교신저자), hong7@uos.ac.kr
 ***** 종신회원, 서울시립대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
 ***** 종신회원, 서울시립대학교 건축공학과 교수, 공학박사

장단점에 대한 자료조사를 실시하고, LCC분석 방법론에 있어 기존 연구문헌을 고찰하였다. LCC분석 방법론을 각종 시설물에 적용한 사례들의 고찰, LCC분석을 위한 비용자료 획득 방법, 그리고 가정사항 설정에 관한 기존 연구들의 방법론을 분석하여 본 연구의 방향과 LCC분석 모델의 적정성을 타진하였다.

자료조사와 기존 연구문헌에 대한 고찰을 바탕으로 LCC분석 절차와 모델을 수립하고, 서울시내 물 재생센터의 비용자료를 확보하여 LCC분석을 실시하였다. 또한 해당 장비의 설계·시공·운영 전문가의 판단을 바탕으로 기술적·사회적 영향요인을 도출하고, 각 대안에 대한 평가를 실시한 후, 경제성 평가를 포함한 최적안 선정 방법을 제시하였다.

2. 예비적 고찰

2.1 물 재생시설과 슬러지수집기

2.1.1 물 재생시설

기존의 하수처리장으로 불리던 물 재생센터는 가정이나 오염원에서 배출되는 오수를 관거를 통하여 집수하여 생물학적 처리 공정이나 물리화학적 처리공정을 통하여 수질을 정화하는 곳이다. 복잡한 망상조직으로 이루어진 하수처리시설은 하수를 자연계로 방출하기까지 여러 과정을 걸쳐 정화가 이루어지는데 크게 수처리 과정과 슬러지 처리과정으로 나누어진다.

물 재생시설의 수처리과정은 그림 1과 같이 진행된다. 수처리는 먼저 가정이나 공장, 학교 등에서 버린 물이 하수관을 통해 물 재생센터로 들어오게 된다. 유입된 하수의 흙, 모래, 각종 찌꺼기 등은 침사지에서 제거한 후 유입펌프장으로 보내게 된다.

유입펌프장에서는 펌프를 통하여 유입된 하수를 높은 곳(최초 침전지)으로 송수한다.

최초 침전지로 유입된 하수는 일정시간 후에 부유물과 침전물로 나뉘어 진다. 침전물은 농축조로 이송되어 슬러지 처리공정을 거치게 된다.

부유물이 포함된 하수는 포기조로 이송되고, 포기조에서 생물학적 처리 과정을 통하여 하수에 포함된 유기물질을 처리하게 된다.

포기조에서 처리한 하수는 최종침전지에서 약 3시간가량 머물며 유기물 덩어리는 가라앉게 되고, 상부의 맑은 물은 방류시설로 이송된다. 방류시설은 하수를 처리한 후 처리수를 공공수역에

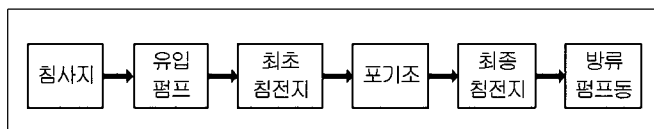


그림 1. 수처리과정
(자료 : 중량 물 재생센터 2006)

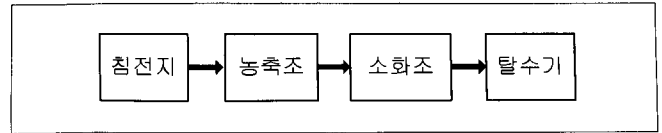


그림 2. 슬러지 처리과정
(자료 : 중량 물 재생센터 2006)

내보내는 최종시설이다.

슬러지 처리과정에서는, 하수가 침사지와 최초 침전지, 포기조, 최종침전지 등을 거치면서 발생하는 슬러지가 농축조로 보내진다. 농축조에서는 슬러지를 중력에 의한 침전방식으로 부피를 감소시키고 농도를 높여주고, 농축시킨 슬러지를 소화조에서 슬러지를 가온하여 교반하면 슬러지의 유기물이 분해되어 부산물과 메탄가스를 생성하고, 슬러지의 악취를 없애게 된다. 소화처리된 슬러지는 탈수기에서 탈수 작업으로 수분을 제거한 뒤 매립한다. 그림 2는 이와 같은 슬러지 처리과정을 도식화한 것이다.

2.1.2 슬러지수집기

수처리과정중에 최초침전지, 최종침전지, 농축조에서 침강된 슬러지를 중앙으로 모으는 슬러지수집기의 기종은 침전지의 형상에 따라 장방형 침전지와 원형침전지로 나누어진다. 원형 침전지에는 원형슬러지수집기를 사용하는데, 이것은 슬러지 및 스크럼 처리능력이 탁월하고, 구조가 간단하여 유지관리가 용이하다. 그러나 20m 이하의 소규모 침전지나 농축조의 슬러지제거기로 적당하다. 장방형 침전지는 미더식 브릿지형과 체인플라이트식을 사용한다. 체인플라이트형 슬러지수집기는 내부식성, 내마모성, 내수축성이 우수하여 내구연한이 길고, 중량이 가벼워 시공이 용이하다. 또한 설치비 및 유지관리비를 획기적으로 절감하고 슬러지 처리능력이 우수하다(표1 참조).

표 1. 슬러지수집기의 유형

침전지 슬러지 수집기	원형 침전지	장방형 침전지	
	원형	미더식 브릿지형	체인플라이트형
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 20m이하의 소규모 침전지의 슬러지 제거 • 슬러지 및 스크럼 처리 능력이 탁월함 • 구조가 간단하여 유지관리가 용이함 • 설치면적이 적게 소모됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 1개의 기기로 여러 침전지를 처리할 때 경제적임 • 스크레이퍼와 같은 방향으로 부유물이 제거됨 • 스크레이퍼의 승강장치 실린더를 이용하여 부유물을 제거함 	<ul style="list-style-type: none"> • 체인에 여러 플라이트를 부착하여 같은 주행속도에 비해 많은 슬러지를 제거할 수 있어 성능이 우수함 • 수면상부에 떠있는 부유물 제거능력 뛰어남

2.2 LCC분석이 적용된 사례 연구

표2는 LCC분석을 이용한 시설물의 경제성 평가에 대한 기존 연구를 분석한 결과이다.

표 2. LCC 분석된 적용 사례연구

연구자	분석대상	분석내용
강승희 (2003)	냉동냉장창고의 외벽 내단열 공법	기존 콘크리트 외벽 내단열 공법을 적용한 외피구조와 단열성능 개선이 가능한 PC외벽 내단열 공법을 적용한 외피구조를 대상으로 단열재료와 온도조건에 따른 적정 단열두께를 도출하여 경제성을 평가함
박태근 (2004)	철근콘크리트 구조 시스템	건축계획요소와 구조시스템의 계획 안 및 비교 안을 제시하고, 경과년수에 따른 수명주기비용의 절감을 비교·분석함. 이때 설비시물레이션의 분석도구인 TRANSYS ver.15를 활용하여 분석대상건물의 시스템 변화에 따른 에너지소비량을 산출함
정순성 (2005)	히트펌프 시스템	전기구동히트펌프(EHP) 시스템과 가스구동히트펌프(GHP) 시스템을 대상으로 현가법에 의한 EHP 및 GHP 시스템의 LCC를 산출하여 최적안을 선정
석호태 (2005)	대규모 공간 공조 시스템	공조방식별 설계자료를 바탕으로 에너지 시물레이션을 실시하여 공조방식에 따른 에너지 소비 특성을 분석하였고, 실제 공사비 및 운영데이터를 활용하여 적절한 비용항목과 분석기준을 설정하여 LCC분석을 수행함
김용수 (2005)	건축물의 냉·난방 공조설비	LCC분석을 통하여 건축물의 냉·난방 공조설비 선정에 있어 기존시스템과 신기술시스템의 경제성을 비교함
오정환 (2005)	군시설물	철근콘크리트, 철골, Modular 구조의 이동성을 감안하여 각 구조의 LCC를 분석하고 이를 바탕으로 이동성을 고려할 경우와 고려하지 않을 경우에 가장 경제적인 시설물 구조를 제시함

이 중 김용수 (2005)의 연구는 신기술 시스템의 적용에 따라 감축된 인원의 인건비와 부대비용을 고려하였다는 점에서 비용항목의 포함수준이 높았으며, 오정환 (2005)의 연구는 군 시설물의 특수성을 고려하여 내구년수 이전에 시설물의 폐기·해체를 고려할 경우도 감안했다는 점에서 접근방법이 독특한 연구라 할 수 있다.

이상의 기존 연구를 분석한 결과, 타분야에 비하여 기계설비분야의 연구가 많았는데 이는 초기투자비에 비하여 유지관리비의 비중이 큰 건축물의 기계설비 선정에 있어 LCC분석의 효용이 가장 크기 때문인 것으로 분석된다.

2.3 비용자료 획득 및 적용

LCC분석에서 비용항목의 추출 및 비용자료 획득방법, 획득 자료의 LCC분석 적용방법과 관련한 문헌을 분석한 결과는 표3과 같다.

LCC분석에 활용된 비용자료의 추출·획득·적용 방법에 대한 기존 연구를 고찰한 결과, 초기투자비는 시설물 취득시 가격이나 업체의 공급가액이 있으므로 변동여지가 적은 반면, 유지관리비는 물가상승률, 인건비, 에너지비등 대부분의 비용이 시장상황과 국제유가 등 다양한 인자들에 의해 변동될 여지가 크므로 비용변동 가능성을 고려하여 LCC분석을 수행해야 함을 알 수 있었다. 양봉석 (2001)과 김용수 (2005)의 연구에서는 초기투자비,

유지관리비, 해체·폐기비등의 실적자료를 구할 수 없는 경우에는 공인된 기관의 참고자료나 해당 시설물 관리자와의 면담을 통하여 경험치를 얻었고, 이도 불가능한 경우 견적작업을 통하여 비용자료를 획득하는 방법을 채택하였다.

표 3. 비용자료 획득 및 적용 사례연구

연구자	분석대상	분석내용
정순성 (2004)	HVAC 시스템	비용분석구조를 기획·설계단계, 설비건설단계, 유지·관리단계, 폐기·처분단계에 따라 13개로 대분류하여 수립
양봉석 (2001)	오피스 건축물	한국감정원의 건축신축단가표를 이용하여 신축공사비를 산정하고, 오피스건물의 월 관리비를 유지관리비로 간주하여, 최적경제수명을 추정하고 이를 바탕으로 경제적으로 가장 유리한 건축물의 수명관리 방안을 제시
김용수 (2005)	건축물의 냉·난방 공조설비	냉·난방 공조설비의 LCC분석에서 시설담당자와의 인터뷰 및 실적자료확보를 통하여 유지관리비를 산정하였고, 해체·폐기비는 견적전문가의 견적작업을 통하여 비용자료를 확보
손보식 (2005)	공동주택 개·보수	초기투자비 중 재건축사업비는 아파트 표준 건축비에서 제시된 건축비건설공사비지수를 반영하였고, 개보수 사업비는 품셈방식으로 상세견적하여 산출함 유지관리비는 실적자료가 부족하여 기존 연구에서 제시된 40년간 공동주택 유지관리비(1년~19년까지의 자료는 31개 단지를 표본 조사하여 구한 실적치이고, 20년~40년까지는 고차회귀식으로 추정된 값)를 차용

2.4 가정사항 설정

LCC분석에서의 대표적인 가정사항인 내용연수와 할인율에 관한 기존 연구를 표4와 같이 분석하였다.

내용연수는 기계설비의 경우 15년, 건축물의 경우 40년으로 설정한 경우가 많았으며, 할인율은 물가상승률을 고려한 실질할인율을 적용한 경우가 많았다. 실질할인율 산정과정에서는 은행의 예금금리와 소비자물가지수를 반영하여 각 연도별 실질할인율을 추정하고 이를 10여년간 산술평균한 값을 적용하였다. 그러나 국내의 예금금리나 소비자물가지수는 97년말 외환위기사태

표 4. 가정사항 설정 사례연구

연구자	분석대상	분석기간	실질할인율
김용수 (2005)	건축물 환가장치	한국감정원 유형고정자산 내용연수표 및 주요장비의 내용연수에서 제시된 사항과 설비전문가 면담을 고려하여 15년으로 가정함	한국은행의 정기예금 금리 및 소비자 물가지수를 바탕으로 평균값을 산출함. 1993년~2002년 산술평균 4.17%로 가정
손보식 (2005)	건축	법인세법의 건축물 등의 기준 내용연수 및 내용연수범위표의 철근콘크리트구조 내용연수인 40년으로 설정함	한국은행의 정기예금 금리 및 소비자 물가지수를 바탕으로 평균값을 산출함. 1994년~2003년 산술평균 5.47%로 가정
양봉석 (2001)	오피스 건축물	법인세법의 건축물 등의 기준 내용연수 및 철근콘크리트 건축물의 기준 내용연수인 50년으로 설정함	시장금리 7.5%로 가정, 1990년~1999년 소비자물가지수 증가율 평균 5.4%, 실질할인율 2.0%에 0%, 4% 를 추가분석

를 겪으며 3~4년간 매우 불안정하게 변화하였다. 따라서 이러한 상황을 실질할인을 설정시 반영하는 것이 합리적으로 판단된다.

3. 슬러지수집기 LCC분석모델

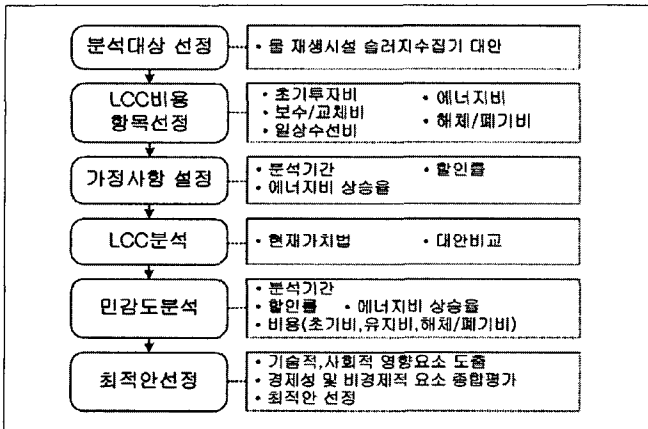


그림 3. 슬러지수집기 LCC분석 절차

3.1 슬러지수집기 LCC분석절차

본 연구에서는 슬러지수집기의 LCC분석절차를 다음 그림3과 같이 정립하고 분석을 수행한다.

분석을 위한 대안을 선정하고, LCC분석을 위한 비용항목으로 초기투자비, 보수/교체비, 일상수선비, 에너지비, 해체/폐기비를 선정하고 자료를 수집/분석한다. 내용연수, 할인율, 에너지비 상승률 등의 가정사항을 설정한 후, 현재가치법으로 두 가지 대안에 대한 LCC분석을 실시한다. 미래가격에 대한 불확실성을 고려하고자 가정사항과 비용항목에 대하여 민감도 분석을 실시하여, 분석자료의 불확실성에 대한 LCC분석 결과의 변화를 분석한다. LCC 산출을 통한 경제적 가치 이외에, 전문가 면담을 통하여 기술적·사회적 영향요소를 도출하고, 경제성 및 비경제적 요소를 종합평가하여 최적안을 선정한다.

3.2 슬러지수집기 LCC분석 모델 개발

3.2.1 분석대상 선정

LCC분석 대상으로 미더식 브릿지형과 체인플라이트형으로 구분되는 물 재생시설 장방형 침전지의 슬러지수집기를 선정하였다. 두 방식의 기기는 동일한 목적과 작업형태를 가지고 있으나 세부적인 작업방법과 장비의 구성에서 차이가 있으며, 외기와 접촉여부 및 장비자중의 영향으로 유지관리에 소요되는 비용과 노력에 차이가 있다.

3.2.2 LCC 비용항목 선정

슬러지수집기의 LCC분석을 위한 비용항목 및 비용자료의 수집방법과 출처는 다음 표5와 같다.

표 5. 슬러지수집기의 LCC 비용항목

구분	미더식 브릿지형	체인플라이트형	
초기투자비	장비취득가격	장비취득가격	
유지관리비	교체/보수비	장비이력카드 및 일일작업일지	장비이력카드 및 장비업체 견적
	에너지비	한전 전기료	한전 전기료
해체/폐기비	해체비	해체공사 내역	해체공사 내역
	폐기비	폐기물처리 내역	폐기물처리 내역
	잔존가치	고철가격	고철가격

물 재생센터에서 보유하고 있는 장비이력카드로부터 초기투자비인 장비취득가격을 산정하였다. 장비이력카드로부터 외주업체에 용역의뢰한 주요 부품의 교체비용을 산정하였고, 일일작업일지로부터 미더식 브릿지형의 보수비를 산정하였으며, 체인플라이트형의 보수비는 장비업체의 견적자료로부터 산정하였다. 에너지비는 장비규격과 일일 평균운전시간을 산출하여 매월 전기료를 산정하였다.

2006년 상반기에 이루어진 해체공사 내역서를 바탕으로 해체비, 폐기비, 잔존가치를 산정하였다. 이외에 LCC분석에서 고려할 수 있는 비용항목으로 세금, 보험료, 금융비용, 임금 등이 있으나, 분석대상인 두 종류의 슬러지수집기는 세금과 임금 항목이 동일하게 적용되며, 보험료와 금융비용은 해당되지 않으므로 생략하였다.

3.2.3 가정사항 설정

1) 분석기간

물 재생센터에서 작성·유지하고 있는 장비이력카드에서는 슬러지수집기의 수명을 15년으로 기록하고 있지만, 사례적용 물 재생시설에서는 15년이상 운영중이고 또한 지속적으로 운영할 예정이므로, 시설담당자의 의견을 반영하여 분석기간을 25년으로 가정하였다.

2) 할인율

실질할인율은 비용분석 과정에서 발생시점이 다른 화폐의 가치를 객관적으로 비교하기 위해 특정 시점으로 화폐의 가치를 환산하는데 이용되며, 정부채권의 수익률, 시중금리, 물가상승 등 여러 가지 복합적인 요인을 포함하고 있다. 실질할인율 산정에 필요한 명목이자율로는 장기정부채권의 이율을 사용하는 것이

원칙이나 국내의 경우 장기정부채권의 시장규모가 적어 금리의 주도적 역할을 담당하지 못하므로 흔히 은행이자율(기업대출금리)을 명목이자율로 사용한다. 본 연구에서는 기업대출금리를 명목이자율로 사용하였다.

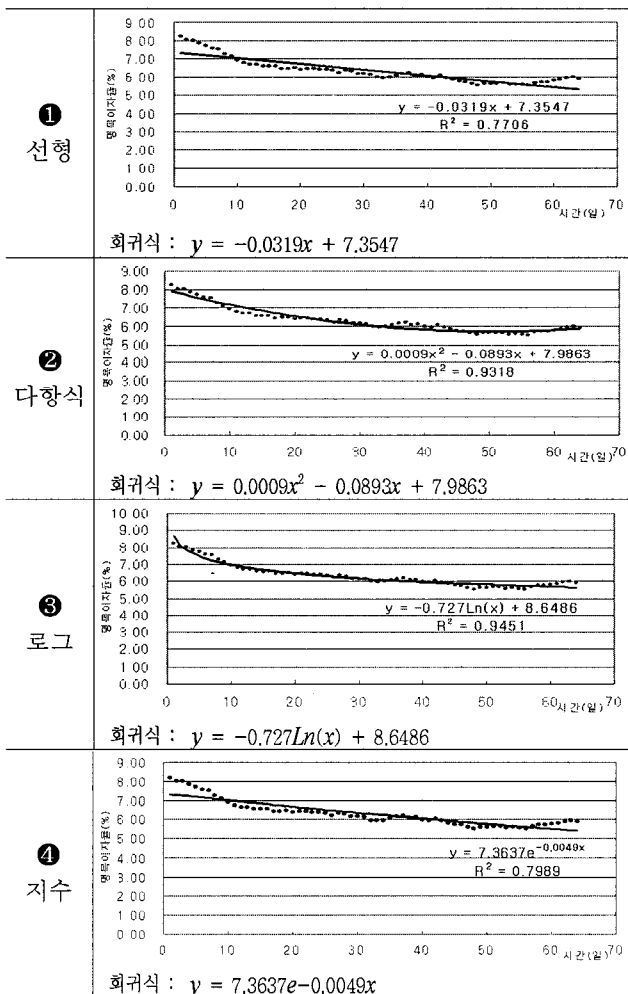
할인율은 식(1)과 같이 구하며, 명목이자율과 물가상승률은 표 3, 표4와 같은 자료와 추정방법을 이용하여 설정하였다.

$$i = \frac{(1 + in)}{(1 + f)} - 1 \dots \dots \text{식(1)}$$

이때, i: 실질할인률, in: 명목이자율, f: 물가상승률

(1) 명목이자율 추정

표 6. 슬러지수집기의 LCC 비용항목



(자료 : 한국은행 기업대출금리)

명목이자율은 기업대출금리로 대체하여 추정하는데, 최근 10년간 월간 기업대출금리 자료 중 외환위기 당시 IMF 구제금융의 영향으로 기업대출금리 변동폭이 정상적이지 않다고 판단되는

자료(1998년~2000년)를 제외한 7년간(84개월)의 자료를 바탕으로 물가상승률 변화 추정 회귀식을 표6과 같이 도출하였다.

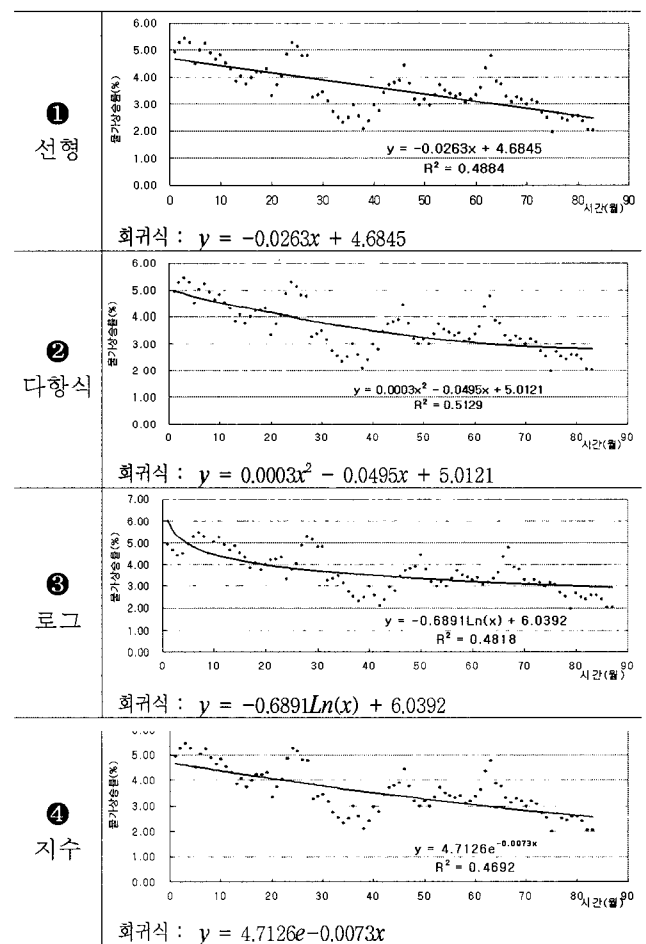
표6의 네 가지 회귀식 중 ④ 로그계열방법으로 추정한 회귀식의 R²가 0.9451로 가장 높아 예측 정확도가 가장 높은 모델로 판단된다. 로그계열방법으로 향후 10년간 명목이자율을 추정한 결과는 표7과 같다. 본 연구에서는 2006년~2015년 물가상승률 예측치의 평균인 5.21%를 적용한다.

표7. 향후 10년간 명목이자율 예측

연도 (%)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	5.69	5.48	5.37	5.28	5.20	5.13	5.06	5.00	4.95	4.90

(2) 물가상승률 추정

표8. 물가상승률 추정 방법 및 결과



(자료 : 통계청 소비자물가지수)

명목이자율 추정방법과 동일하게 최근 10년간 월간물가상승률 중 1998년~2000년을 제외한 7년간(84개월)의 자료를 바탕으로 물가상승률 변화 추정 회귀식을 표8과 같이 도출하였다.

표8의 네 가지 회귀식 중 ② 다항식으로 추정된 2차함수 회귀식의 R²가 0.5129로 가장 높게 나왔으나, 독립변수의 다중공선성에서 문제가 있으므로 적절하지 않다. ① 선형회귀식은 y값이 지속적으로 하락하여 일정기간이 경과한 후 물가상승률이 음수가 되므로, 현실적이지 않다고 판단된다. 차후 선진국과 같이, 우리나라의 경제를 비롯한 사회전반의 안정이 유지된다고 가정할 때, 물가상승률은 ③ 로그계열방법과 같이 물가상승률이 미미하게 감소하다 일정한 변동범위내에서 유지될 것으로 판단된다. ③의 방법에 따라 향후 10년간의 물가상승률을 추정된 값은 아래 표9와 같다. 본 연구에서는 2006년~2015년 물가상승률 예측치의 평균인 2.66%를 적용한다.

표9. 향후 10년간 물가상승률 예측

연도	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
(%)	2.97	2.88	2.80	2.73	2.67	2.61	2.55	2.50	2.46	2.41

(3) 실질할인율 산정

위와 같이 명목이자율과 물가상승률을 적용한 결과, 실질할인율은 아래의 식에 의하여 2.48%로 적용한다.

$$i = \frac{(1 + 0.0521)}{(1 + 0.0226)} - 1 = 0.024839 \dots \dots \dots \text{식(2)}$$

3) 에너지비 상승률

슬러지수집기는 전력으로 작동하므로 전기료를 에너지비로 설정한다. 전기료 효율체계는 표10과 같다. 최근 15년간 전기료상승률은 그림4와 같다. 일정한 추이를 예측하기 어려우므로 15년간의 평균값인 2.36%를 적용한다.

표10. 전기료 효율체계

구분	요금	비고
산업용 (갑)	기본료	4,190(원/kW)
	사용료	여름철(7,8월):64.40(원/kWh) 봄,가을철(4,5,6,9월):48.50(원/kWh) 겨울철(10~3월):52.40(원/kWh)
저압 전력		2006년 한전 요금 기준

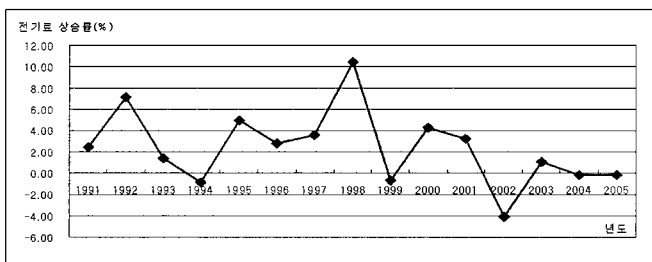


그림 4. 과거 15년간 전기료상승률 변동

3.2.4 LCC분석

확보한 비용자료와 분석기간, 할인율 및 에너지비 상승률의 가정사항을 바탕으로 LCC분석을 수행한다. 초기투자비와 향후 30년간 유지관리비, 해체/폐기비용을 모두 장비 취득시기인 2006년 1월 시점 당시 가치로 환산한다.

3.2.5 민감도분석

두 장비 모두 현재 15년 이상 사용하고 있으며, 향후 추가적으로 10년이상 사용가능하다는 시설 운영기관의 의견을 반영하여, 25년으로 가정한 분석기간에 대한 변화를 민감도분석 대상에 포함한다. 할인율은 물가상승률과 은행금리로 인하여 예측불가능하게 변동할 수 있으며, 에너지비 상승률도 국제유가 등의 영향으로 변동의 여지가 있다. 초기투자비나 유지관리비, 해체/폐기비용은 시장가격이나 입·낙찰결과 혹은 신기술·신재료의 개발 등에 따라 변동될 여지가 있다. 따라서 분석기간과 할인율, 에너지비 상승률, 초기투자비, 유지관리비, 해체/폐기비용의 민감도 분석을 수행한다. 민감도분석은 Monte Carlo Simulation(MCS)을 이용하여 각 변수들의 선택된 분포특성과 입력된 변수 변동범위에서 변수들을 50,000회 무작위 추출하여 산출된 대안별 LCC 분석 결과를 비교분석한다.

3.2.6 최적안 선정

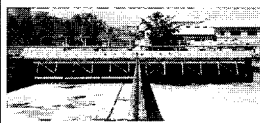

설계자, 자재공급업체, 시공자, 운영주체와의 면담을 통하여 슬러지수집기 선정시 필히 고려해야할 기술적·사회적 영향인자를 파악한다. 분석된 기술적·사회적 요인과 LCC 분석결과인 경제성에 대하여 가중치부여 매트릭스 평가를 통하여 종합적인 최적안을 선정한다.

4. 슬러지수집기 LCC분석모델의 사례적용

4.1 LCC분석에 의한 경제성 평가

4.1.1 LCC분석 대상 개요

표 11. 'A' 물 재생센터의 슬러지수집기 개요

구분	미더식 브릿지형	체인플라이트형
규격	너비34.8m, 1.2m/min진행, 5마력	너비4.3m, 길이50m, 높이3m, 3마력
성능	42,000m ³ /대·일	41,500m ³ /대·일
제조일	1993년	1993년
수명	15년	15년
장비형태		

3장에서 수립한 슬러지수집기 LCC분석 모델을 "A" 물 재생센터에 사례적용 하였다. "A" 물 재생센터에서 운영중인 슬러지수집기의 개요는 다음 표11과 같다.

4.1.2 비용항목별 자료수집

표2의 자료원에서 수집 · 추정한 각 대안의 항목별 비용은 다음 표12와 같다.

표12. 대안별 비용자료

대안		미더식 브릿지형	체인플라이트형
초기투자비		65,000,000	75,000,000
유지관리비	교체/보수비(원/년)	952,830	695,600
	에너지비(원/년)	1,532,663	1,054,605
해체/폐기비	해체비(원)	13,697,220	13,697,220
	폐기비(원)	0	0
	잔존가치(원)	(3,500,000)	(2,625,000)

초기투자비는 장비 설치당시 취득가격을 현재가치로 환산하였으며, 유지관리비는 과거 유지관리비용의 연간 평균값과 장비공급업체의 견적가를 연간 유지관리비로 적용하였다. 해체/폐기비는 2006년 현재 진행 중인 해체/폐기공사의 내역 자료를 활용하였다. 체인플라이트형에 비하여 미더식 브릿지형이 초기투자비는 적으나 연간 유지관리비가 많으며 장비해체 후 폐기물을 모두 고철로 활용할 수 있지만, 체인플라이트형은 초기투자비가 많고 유지관리비가 다소 저렴하며, 비금속 자재가 있어 잔존가치는 미더식 브릿지형에 비해 적고, 폐기비용이 일부 소요된다.

4.1.3 가정사항 설정

LCC분석을 위하여 설정한 가정사항은 앞서 3.2.3항에서 기술한 바와 같이, 분석기간 25년, 실질할인율 2.48%, 전기료상승률 2.4%로 가정하였다.

4.1.4 비용 통합

가정사항과 비용자료를 바탕으로 2006년 1월을 기준으로 현재가치로 환산한 LCC분석 결과의 누계는 다음 표13 및 그림5와 같다.

현재시점에 두 방식의 장비를 설치하고 운영할 경우, 향후 16년과 17년 사이인 2021년과 2022년 사이에 미더식 브릿지형의 LCC가 체인플라이트형의 LCC와 같아지는 Break-Even Point¹⁾

1) break-even point : 손익분기점, 이익과 손실이 같아지는 점 (Deil'Isola and Kirk 2003, p. 136)

표13. LCC분석 결과 (단위:원)

년도	미더식 브릿지형	체인플라이트형	년도	미더식 브릿지형	체인플라이트형
2006	67,427,098	76,709,057	2019	94,248,117	95,593,178
2007	69,797,173	78,377,933	2020	95,988,113	96,818,125
2008	72,111,566	80,007,575	2021	97,687,237	98,014,279
2009	74,371,586	81,598,904	2022	99,346,450	99,182,317
2010	76,578,511	83,152,822	2023	100,966,689	100,322,899
2011	78,733,589	84,670,209	2024	102,548,871	101,436,673
2012	80,838,039	86,151,925	2025	104,093,890	102,524,268
2013	82,893,051	87,598,808	2026	105,602,619	103,586,300
2014	84,899,787	89,011,677	2027	107,075,912	104,623,371
2015	86,859,381	90,391,334	2028	108,514,600	105,636,066
2016	88,772,942	91,738,558	2029	109,919,498	106,624,960
2017	90,641,551	93,054,113	2030	121,488,620	118,850,332
2018	92,466,266	94,338,744			

가 발생한다. 17년 이후부터는 미더식 브릿지형의 LCC가 체인플라이트형의 LCC를 초과하여 두 대안간의 LCC 차이는 더욱 벌어지다가 해체/폐기 시점에 두 대안의 LCC 차이가 다소 좁아지나, 여전히 미더식 브릿지형의 LCC가 체인플라이트형의 LCC에 비하여 약 2.2% 높게 나타난다.

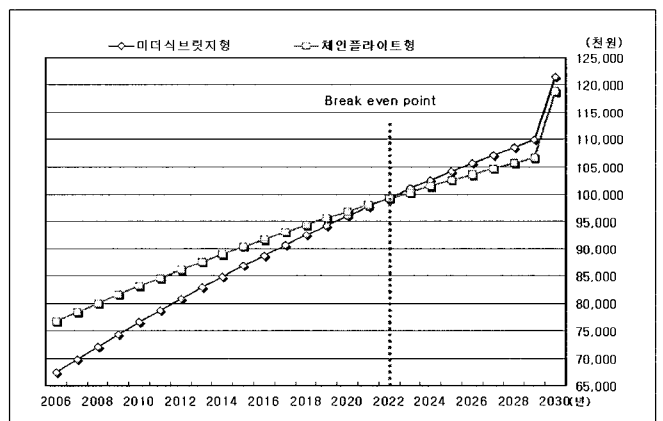


그림 5. LCC분석 결과 누적 그래프

4.1.5 민감도분석

가정사항과 비용자료의 변동가능성과 불확실성에 따른 분석결과 변화 분석을 위하여 MCS를 통하여 민감도분석을 실시하였다. 다음 표14는 민감도분석을 위하여 설정한 각 변수집합의 분포와 변수의 변동범위이다. 각 비용항목별 특성을 반영하여 분포형태를 가정하였으며, 본 연구에서 적용한 값이 가질수 있는 불확실성을 고려하여 적용값의 변동범위를 설정하였다.

초기투자비, 교체/보수비, 해체비는 장비구입이나 공사도급의 형태로 가격이 결정되므로 건설사업비용의 분포형태를 띄고 있다. 한편, Spooner (1974)는 베타분포나 로그정규분포로 건설비용의 분포형태를 추정하는 것이 바람직하다고 하였다. 이에 본

연구에서는 베타분포로 가정하며, 변동범위는 내·외부적 환경에 민감하게 반응하는 건설 시장가격의 특성을 반영하여 다소 높은 ±10%로 설정하였다.

에너지비, 폐기비, 잔존가치는 공급시장이 제한적이므로 공급자의 가격결정력에 의존성이 강하지만 정부정책의 영향을 많이 받는다. 이에 본 연구에서는 균일분포로 가정하며, 정부정책이 일관성을 유지한다는 가정하에 변동범위를 ±5%로 설정하였다.

분석기간은 현재 시설운영기관 및 건설담당기관 전문가의 의견에 따르면 최소 10년에서 최대 30년까지 가능하고 대체적으로 20~25년정도 사용이 가능한 것으로 판단하고 있다. 이에 따라 최소값 10년 최대값 30년의 삼각분포로 가정하였다.

할인율과 에너지비상승률은 각각 물가상승률 및 이자율, 국제유가의 영향을 많이 받는다. 본 연구에서 설정한 값은 과거 실적 자료를 통하여 추정된 값으로 정규분포로 가정하였다. 설정값의 표준편차 설정시, 할인율은 이자율과 물가상승률의 영향을 동시에 받으므로 3%수준으로 가정하였고, 에너지비상승률은 원자력 발전의 비율이 높아짐에 따라 상대적으로 적은 1%로 가정하였다.

표14. 민감도분석 변수 설정

구분	분포형태	변동범위
비용 항목	초기투자비	베타분포 -10%~+10%
	교체/보수비	베타분포 -10%~+10%
	에너지비	균일분포 -5%~+5%
	해체비	베타분포 -10%~+10%
	폐기비	균일분포 -5%~+5%
	잔존가치	균일분포 -5%~+5%
가정 사항	분석기간	삼각분포 10년~30년
	할인율	정규분포 표준편차 : 3%
	에너지비상승률	정규분포 표준편차 : 1%

각 변수들을 위와 같이 설정하고 50,000회 시뮬레이션 한 결과, 그림6과 같이 두 대안의 LCC가 산출되었다.

그림6에서 미더식 브릿지형(질은색)의 LCC 변동범위가 상대

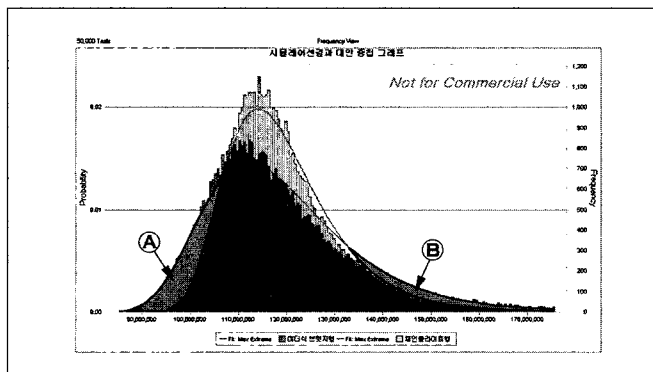


그림 6. 민감도분석 결과 그래프

적으로 넓은을 알 수 있다. 이는 미더식 브릿지형의 유지관리비가 상대적으로 높아 변수들의 영향을 많이 받는 것으로 해석할 수 있다. 특히 영역과 영역은 각각 미더식 브릿지형의 절대적 LCC값이 각각 낮거나 높게 산출될 확률이 체인플라이트형에 비하여 상대적으로 높은 부분이다. 민감도분석 결과로 볼 때, 두 대안간 LCC의 차이는 그다지 크지 않으며, 체인플라이트형의 LCC가 변동폭이 상대적으로 작은 반면, 미더식브릿지형은 각 항목별 비용의 변화나 할인율, 에너지비상승률 등 가정사항의 변화에 상대적으로 민감하게 반응하며, 이에 따라 LCC가 낮거나 높게 산출될 가능성이 높은 것으로 분석된다.

표 15. 대안별 변수들의 민감도

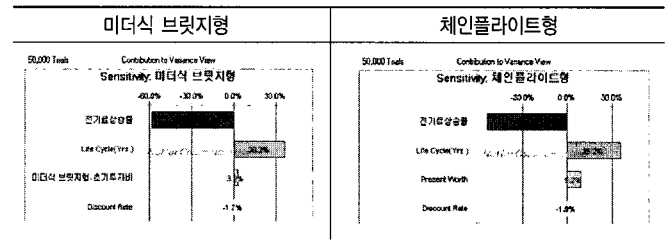


표15는 민감도분석에 활용된 각 변수들이 대안별 LCC분석 결과에 미치는 민감도를 나타낸 것이다. LCC분석 결과에는 전기료상승률과 분석기간이 가장 크게 영향을 미치며, 초기투자비와 할인율도 일정부분 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표15에서 수명주기(Life Cycle)의 민감도가 높게 나타났으므로, 다음 표16 및 그림9와 같이 수명주기의 변화(10년,15년,20년,25년)에 따른 LCC분석 결과를 분석하였다. 분석결과, 수명주기 15년~20년 사이에 대안의 우선순위가 미더식브릿지형에서 체인플라이트형으로 전환되었다. 현재 15년이상 슬러지수집기를 사용하고 있으며, 시설물을 25년까지 활용가능하다는 시설전문가의 의견이 있으므로, 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

표16. 수명주기 변화에 따른 LCC 변화

연도	년수	미더식 브릿지형	체인 플라이트형
2015	10	97,056 천원	101,651 천원
2020	15	106,185 천원	108,077 천원
2025	20	114,291 천원	113,783 천원
2023	25	121,488 천원	118,850 천원

4.2 기술적·사회적 영향요소를 고려한 최적안 선정

4.2.1 기술적·사회적 영향인자 도출

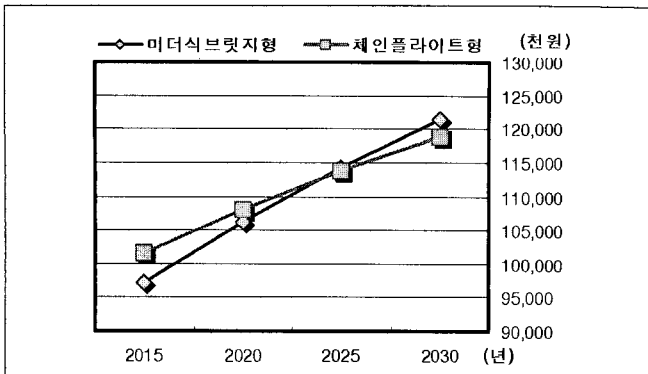


그림 9. 수명주기 변화에 따른 LCC분석 결과

앞서 두 방식의 슬러지 수집기의 LCC 분석결과, 체인플라이트형이 미더식 브릿지형보다 경제성에서 다소 우수한 것으로 분석되었다. 그러나 두 방식의 경제성 차이가 미미하므로 최적 설계대안을 선정하기 위하여 비경제적 요소를 설계 대안평가에 포함하였다.

물 재생시설의 건설담당기관(2명) 및 운영기관(3명)에서 10년 이상 근무하고 있는 전문가들과의 면담을 통하여, 경제적 측면이 외에 슬러지수집기 선정시 고려해야할 기술적·사회적 영향요소를 도출하였다. 유지관리 편의성, 조달용이성, 슬러지 수집 성능, 침전물제거 효율도, 환경친화성의 5개 항목이 주요 고려요소로 도출되었다. 최근 물 재생시설은 과거 혐오시설로 간주되었던 하수처리장이라는 이미지를 탈피하고자 악취제거를 위하여 처리시설을 지하에 설치하고 상부를 녹지공간으로 계획하는 등 친환경적인 노력이 집중되고 있다는 점이 강조되었다.

4.2.2 경제성 및 비경제적 요소 종합평가

도출된 기술적·사회적 영향인자 5개 항목과 LCC분석 결과인 경제성을 포함한 6개 인자를 평가항목으로 선정한 후, 가중치부

여 매트릭스 평가법²⁾을 통하여 슬러지수집기의 최적안 선정을 위한 종합평가를 실시하였다. 평가항목의 가중치산정을 위한 쌍별비교는 전문가전체의 논의를 통하여 산정하였고, 평가항목에 대한 대안평가는 전문가 5인의 평가결과를 평균하여 산출하였다. 그림10과 같이 종합평가를 실시한 결과, 경제성과 환경친화성의 가중치가 높게 도출되었고, 환경친화성에서 특히 유리한 체인플라이트형이 최적안으로 선정되었다.

5. 결론

기계설비가 다수 포함된 기반시설에서는 시설물의 건설비와 더불어 보수/교체비, 에너지비 등 유지관리비용이 전체 사업비에서 높은 비중을 차지하고 있다. 본 연구는 최근 하수 고도 처리를 위하여 개선사업이 진행중인 물 재생시설에서, 대표적으로 장비교체가 진행중인 슬러지수집기의 두 가지 방식의 장비에 대하여 LCC분석 모델을 수립하고, 사례적용을 통하여 최적안을 선정하였다.

슬러지수집기의 LCC분석 모델을 수립하고자 시설물의 이력자료 등을 통하여 장비의 취득, 보수/교체, 일상수선, 해체/폐기 비용자료를 확보하고 이를 동일한 시점기준으로 환산하였다. 분석기간, 할인율, 에너지비 상승률 등 LCC분석을 위한 가정사항을 설정하기 위하여 통계자료를 바탕으로 추정하는 방법을 제시하였다. 분석에 활용된 비용자료와 가정사항의 변동가능성과 불확실성으로 인한 분석결과와 변화를 분석하고자 MCS를 활용하여 민감도 분석을 수행하였다. LCC분석 결과와 전문가 평가를 통한 기술적·사회적 영향요소를 포함하여 종합평가를 실시한 결과, 체인플라이트형이 LCC측면에서 다소 유리하고 환경친화성에서 상당히 우수하여 최적안으로 선정되었다.

이 연구에서 LCC의 정량적인 부분이외에 유지관리 편의성, 조달용이성, 슬러지수집성능, 침전물제거효율도, 환경친화성 등 정성적인 요소를 고려한 종합적인 분석이 실시되어졌다. 이 이유는 첫째, 확정적 방법을 사용한 LCC 분석결과 대안 간 LCC차이가 크지 않았다. 그래서 가정사항 및 비용데이터의 불확실성을 고려하기 위하여 MCS를 이용한 확률적 방법을 사용한 LCC 분석결과를 재 분석하였다. 그러나 그 결과 이후 대안의 우선순위를 확실히 정할 수 없었다. 둘째, 물재생시설은 도시혐오시설로 여겨지고 있어 해당시설을 비단 경제성분석뿐만 아니라, 환경친화성, 침전물제거효율도, 유지관리편의성 등의 요소가 필수고려인자이다. 그래서 관할기관과 환경단체, 지역주민사회가 모두 이러한 요소에 많은 가치를 두고 물재생시설의 운영에 관심을 가지고 있

평가항목	대안평가표						중점
	점수	9	6	I	I	5	
A. 경제성							
B. 유지관리 편의성							
C. 조달용이성							
D. 슬러지수집성능							
E. 침전물제거효율도							
F. 환경친화성							
가중치 (0-10)	8	5	I	I	4	10	
1. 미더식 브릿지형	2.8 32.4	4.3 21.5	4.5 4.5	4.4 4.4	3.3 13.2	3.9 39.0	105.0
2. 체인플라이트형	5.0 40.0	4.5 22.5	3.6 3.6	3.1 3.1	3.8 15.2	4.0 40.0	124.4

그림 10. 가중치부여 매트릭스 평가표

2) Dell'Isola and Kirk 2003, p. 163

다는 점이다.

이 밖에, 본 연구에서 수립한 LCC분석 및 민감도분석 모델은 현재 확보가능한 자료를 활용한 것이다. 수집한 비용자료, 설정한 가정사항과 적용된 변수분포형태 등은 향후 추가적으로 자료가 축적될 경우, 보다 향상된 비용자료, 추정방법을 개발할 수 있을 것이며, 보다 신뢰도가 향상된 LCC분석 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 강승희 (2003), “생애비용 분석을 통한 외벽 및 단열재료 종류별 냉동냉장창고 외피의 적정 단열두께 산정.” 설비공학논문집, 15(5), 대한설비공학회, pp. 372~381
2. 김용수 (2005), “LCC 기법을 이용한 신기술 냉·난방 공조설비 시스템의 경제성 분석에 관한 사례연구.” 건설관리논문집, 6(2), 한국건설관리학회, pp. 129~138
3. 박태근 (2004), “서울대학교 공과대학 교육연구동 LCC 분석 사례 연구.” 건설관리논문집, 5(3), 한국건설관리학회, pp. 63~70
4. 석호태 (2005), “인천국제공항 탑승동에 적용 가능한 적정 공조시스템에 관한 연구.” 대한건축학회논문집, 21(1), 대한건축학회, pp. 251~260
5. 손보식 (2005), “LCC분석을 이용한 공동주택 개보수의 경제성 분석 방법.” 대한건축학회논문집, 21(7), 대한건축학회, pp. 73~82
6. 양봉석 (2001), “LCC분석에 의한 오피스건축물의 최적경제수명추정분석 및 장수명화에 관한 연구.” 건설관리논문집, 2(4), 한국건설관리학회, pp. 135~143
7. 오정환 (2005), “군 시설물의 구조별 LCC분석 사례 연구.” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 25(1), 대한건축학회, pp. 471~474
8. 정순성 (2004), “의사 결정자를 위한 HVAC 시스템의 LCC 분석 방법론 개발에 관한 연구.” 태양에너지, 24(4), 한국태양에너지학회, pp. 55~63
9. 정순성 (2005), “전기구동 히트펌프(EHP)와 가스엔진구동 히트펌프(GHP)의 라이프 사이클 코스트 분석 / 부산지역 사무소 건물을 중심으로.” 대한건축학회논문집, 21(3), 대한건축학회, pp. 251~258
10. Alphonse J. Dell’Isola and Stephen J. Kirk (2003), Life cycle costing for Facilities, Reed Construction Data, Kingston, MA
11. Spooner (1974), “Probabilistic Estimating”, Journal of the Construction Division
12. 중랑 물 재생센터 (2006), “하수처리 과정.” <<http://www.seoul.go.kr/info/organ/center/jungrang/>> (2006. 6. 29)

논문제출일: 2006.09.05

심사완료일: 2006.12.08

Abstract

This study focused on developing Life Cycle Cost(LCC) analysis model for selecting sludge collectors in wastewater treatment system and applying the model to a case study. Cost items are examined through literature review and historical data of a facility. Analysis period, discount rate, energy cost escalation ratio are assumed to reasonable level. Monetary evaluation is performed using historical data and estimations from vendors. Sensitive analysis is executed using Monte Carlo Simulation for assumed factors. Interviews with operators, vendors, constructors, managers are conducted to define factors which indicates ease of maintenance, ease of delivery, technical performance, efficiency, environmental friendship. Factors are representing technical and social factors. Results from LCC analysis and qualitative analysis are evaluate together with Weighted Matrix Evaluation Methods for optimum alternative of sludge collectors.

Keywords : Life Cycle Cost, sludge collector, economic evaluation, technical · social factor evaluation