

LCA를 고려한 우수배제시스템 통합평가지표의 개발과 적용

안정규¹, 박성원^{1*}, 김용인²

¹인천대학교 건설환경공학부, ²지성산업개발

Development and Application of Integrated Evaluation Index of Rainwater Drainage System based on the Life Cycle Assessment

Jungkyu Ahn¹, Sung Won Park^{1*}, Yong In Kim²

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

²Jisung C&E Co.

요약 본 논문은 침수피해 방지를 위한 기존의 우수배제시스템의 한계점을 극복하기 위해서 신규 개발된 친환경 수로형 우수배제시스템을 비교 및 분석하고, 기존 시스템 대비 장점을 정량화하기 위한 통합평가지표의 개발 및 적용에 관한 연구이다. 이에 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)의 개념을 적용하여 각 공정별 필요물량과 비용을 산정하여 비교하였고, 또한 탄소배출량을 각 과정별로 산정하여 고려하는 통합평가지표를 개발하여 각각의 기술에 적용하였다. 그 결과 원형 집수시스템에 비해 전 과정에 걸쳐 비용이 53 %, 측구 집수시스템에 비해 63 %가 절감되는 것으로 분석되었다. 또한 통합평가지표 적용결과, 기존 기술대비 수로형 집수시스템을 평가한 결과 건설공사 분야를 제외한 나머지 4가지 분야(건설자재, 운용 및 유지관리, 해체, 폐기)에 있어서 80 % 이상의 높은 점수로 평가되었다. 본 연구에서 개발된 평가지표를 경기도 안양현장과 인천 청라현장에 적용하여 기존 기술대비 약 35 ~ 100 % 개선된 높은 점수로 향상되어 개선효과를 입증하였고 동시에 적용성을 확보하였다.

Abstract To overcome the limitations of existing rainwater drainage systems, we compared and analyzed a newly developed eco-friendly channel-type rainwater drainage system. We also developed an integrated evaluation index to quantify the improvement of the new system. The concept of Life Cycle Assessment (LCA) was applied to calculate and compare the costs of each process and to develop the integrated evaluation index, which considers the carbon emissions by each process. As a result, the cost was reduced by 53% overall compared to an O-type system and by 63% compared to a U-type system. In addition, when applying the integrated evaluation index, the new system was evaluated to be over 80% in the four processes compared to the existing systems. When applying the evaluation index to sites in Anyang and Incheon, the new system was improved by 35-100% compared to existing systems.

Keywords : Rainwater, Drainage System, Life Cycle Assessment, Integrated Evaluation Index, Carbon Emissions

1. 서론

극한 강우로 인한 홍수피해 및 물수지 불균형으로 인한 가뭄피해 및 사막화현상이 잇따라 발생하고 있다. 이에 따라 도심지내 주거 밀집지역에서 발생하는 물부족

1.1 연구 배경

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019R1F1A1062727).

*Corresponding Author : Sung Won Park(Incheon Natl. Univ.)

email: billy1006@gmail.com

Received February 14, 2019

Accepted July 5, 2019

Revised March 14, 2019

Published July 31, 2019

혹은 홍수피해에 대한 방지대책이 더욱 필요한 실정이다 [1]. 도심지는 급격한 도시화로 인해 불투수 면적이 증가하여 우수유출량이 급증하게 되면서 침수피해는 더욱 가중되고 있지만 침수피해의 방지 및 저감대책은 아직까지 전통적인 방식에서 크게 변하지 않은 원형 및 측구형 집수정이 전부이며, 이러한 기존기술은 유지관리에 있어서 취약하고, 특히 표면유출수의 정체로 인한 침수저감효율이 낮아질 수 있다[2]. 또한 겨울철 보도구간의 물고임 이후 결빙으로 인한 자재 노후화 및 낙상피해, 그리고 도로 결빙 방지용 염화칼슘의 무분별한 사용으로 인한 인근 하천 수질악화 등의 문제를 극복할 필요가 있다.

1.2 연구 목적

최근 도심지의 침수피해 저감을 위해 투수성 블록 및 포장기술, 맨홀기술, 지하저류시설물 등의 다양한 기술이 개발되는 가운데 기존 우수배제 집수정의 한계점을 극복하기 위해 ‘친환경 수로형 집수정’ 기술이 개발된 바 있으나 이에 대한 정량적 설계기준이나 우수성을 검증할 만한 적절한 지표가 전무하기 때문에 이 기술의 적용성 확보가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 우수배제시스템과 함께 친환경 수로형 집수정을 객관적으로 평가할 수 있는 평가지표를 수립하여 실제 시공현장에 적용하여 검증하고자 하였다. 즉, 기존 우수배제 집수정 기술대비 수로형 집수정 기술의 장단점을 비교하고 특히 전과정(건설-운영 및 유지관리-해체 및 폐기)에 대한 비용적인 측면을 고려한 개선효과를 비교하고자 하였다.

2. 본론

2.1 우수배제시스템 비교

빗물 집수시스템은 집수정과 배수로로 구성되어 있다. 현행 도로 배수설비법규 또는 하수도 시설기준에서는 배수로와 연결된 빗물받이의 경우, 크기에 따라 30 m를 기준으로 1개씩 설치하도록 의무화하고 있으나, 집수정은 설치기준이 없다. 일반적으로 국내에서 적용되는 빗물 집수시스템은 측구 집수시스템(U-shape type)과 원형 집수시스템(O-shape type)이다. 이 시스템은 콘크리트로 구성되어 있는 배수로와 집수정으로 구성되어 있다. 반면에 수로형 집수시스템(channel type)은 지하에 물을 배수하는 폴리에틸렌관과 집수구멍이 있는 집수정, 집수정 위에 부직포로 구성되어 있다. Fig. 1에는 세 가지 집수시스템의 설치 전경을 구분하여 비교하였다. 신규 개발된

수로형 집수시스템은 기존 시스템에 비하여 유지관리가 용이하고, 시공비용이 저렴하며 또한 집수효율도 높은 것으로 평가 받고 있으나 이러한 정성적인 평가를 보다 객관적으로 증명할 필요가 있다(Table 1). 이에 빗물 집수량은 동일하다고 가정하고, 빗물을 집수하기 위해 필요한 하수도 시설 기준에 의거하여 30 m를 기준으로 필요한 집수정과 배수로를 빗물 집수시스템 1 set을 선정하였다. 측구 및 원형 집수시스템은 배수로와 집수정 1개로 구성하고, 수로형 집수시스템은 폴리에틸렌관과 집수정 2개로 구성됨을 가정하였다(Fig. 2).



(a) O-type



(b) U-type



(c) channel-type

Fig. 1. Photos of rainwater drainage system

Table 1. Comparisons of drainage systems (pros and cons)

contents	Channel type	U-shape type	O-shape type
benefit	<ul style="list-style-type: none"> - Integrated water collecting and drainage system - Collecting infiltrated water for water recycling by reducing evaporation water - 15 % better than existing system - simple process and lower cost - easy maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> - lower cost than O-shape - most constructed system 	<ul style="list-style-type: none"> - good shape and drainage
weakness	<ul style="list-style-type: none"> - weak for instantaneous drainage capacity 	<ul style="list-style-type: none"> - difficult for maintain - poor water drainage - poor curvilinear construction 	<ul style="list-style-type: none"> - highest cost - multi-stage - poor drainage of infiltrated water - poor maintenance
details	Dual system (collecting and drainage)	Surface runoff drainage system	

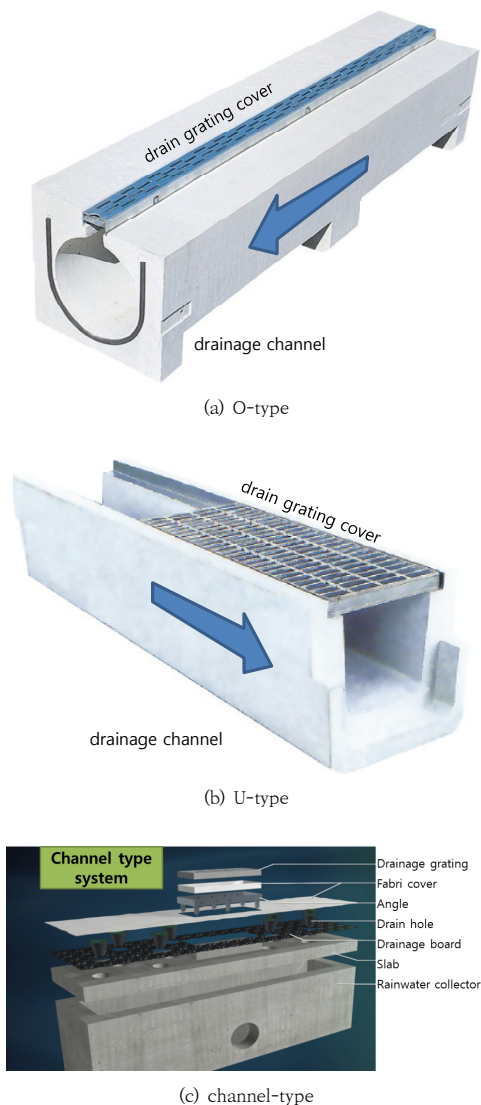


Fig. 2. Schematic designs of rainwater drainage

비교 범위는 각 빗물 집수시스템의 건설, 운용 및 유지 관리, 해체, 폐기단계에 이르는 전 과정(life cycle)으로 선정하였다.

2.2 전과정 평가

전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)란 정의된 시스템의 전과정에서 원료의 채취, 생산품의 가공 및 사용 그리고 처분과 관련된 투입물과 산출물의 목록을 취합하여 처리하고, 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 잠재적 환경부하를 평가하여 얻은 결과물을 활용목적에 맞게 해석함으로써 제품이나 서비스 그리고 공정과 관련된 환경적 영향과 잠재적 미래 영향을 평가하는 기술이다[3-6]. 사회기반시설의 LCA는 시설의 자재 및 설비 제조로부터 시공 및 운영단계에서 발생하는 그리고 구조물의 최종폐기 단계에 이르기까지의 전과정에서 발생하는 투입물과 산출물에 관련된 잠재적인 환경부하를 평가 대상으로 할 수 있다[4, 5]. 본 연구에서는 특히 최근 LCA 관련 연구 중에서 친환경 하수처리수 재이용시설에 관한 연구[5]로부터 건설 공정별 LCA기법 적용연구를 활용하고자 하였다. LCA기법은 목적 및 범위 정의, 목록분석, 영향평가, 해석 등의 4단계로 구성되어 있으며[6], 이에 대한 상세한 설정은 기존 연구를 바탕으로 구성하였다[5, 6]. 추가적으로 본 연구에서는 기존 두 가지 시스템과 신규 시스템에 대한 각 방법별 전과정(건설, 운용 및 유지 관리, 해체, 폐기)의 물량과 비용을 산정하여 비교하였다. 각 공정별 비용산출 내역은 기존 연구에서 분석된 내용을 활용하였다. 즉 측구 집수시스템이 8,171,146원, 원형 집수시스템이 6,360,992원, 수로형 집수시스템이 3,012,626원이 소요되었다[4]. 즉, 수로형 집수시스템이 원형 집수시스템에 비해 전과정(total process)에 걸쳐 비용이 53 %을 측구 집수시스템에 비해 63 %가 절감되는 것으로 나타났다(Fig 3).

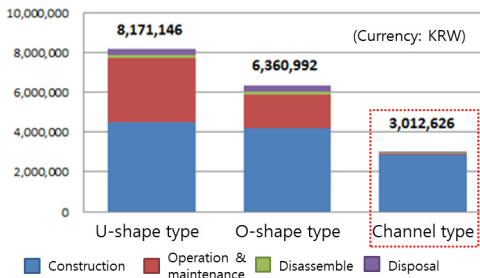


Fig. 3. Cost comparison for each system and phase

2.3 통합평가지표의 개발

앞 절에서 비교한 각 공정 및 시스템별 비용비교의 한계점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 최근 주목받고 있는 탄소배출량에 대한 분석을 추가적으로 고려한 통합평가지표를 개발하여 적용하고자 하였다. 통합평가지표의 결정을 위해서는 단순히 집수정의 설계인자만을 고려하는 것이 아니라 앞 절에서 고려된 전과정에 대한 통합적인 고려가 필요하며 또한 최근 주요 현안과제인 비점오염원 문제와 탄소배출량, 미세먼지 등의 환경적 요인도 반드시 고려되어야 할 주요설계인자이다. 우선 빗물 집수 시스템을 건설하기 위해서는 집수정과 배수로가 필요하다. 현행 도로 배수설비법규 및 하수도 시설기준에서는 배수로와 연결된 빗물받이의 경우, 크기에 따라 30m를 기준으로 1개씩 설치하도록 의무화하고 있으나 집수정은 특별한 설치기준은 없다. 따라서 본 연구에서 온실가스 배출량을 산정하기 위해, 기능은 빗물 집수로 설정하였다. 기능단위인 빗물의 집수량은 지역 및 강우량에 따라 차이가 발생하므로, 빗물 집수량으로 선정하기는 어렵기 때문에 빗물을 집수하기 위해 필요한 배수로관이나 집수정으로 구성된 빗물 집수시스템 1 set으로 결정하였다. 빗물집수시스템을 운용하기 위한 기간은 지방공기업법 시행규칙의 건축물 등의 내용연수표에 따라 상하수도 시설의 법정 내용연수인 30년으로 설정하였으며, 각각의 공정단계별 에너지 및 건설자재의 소비 및 이산화탄소의 배출 개념도를 Fig. 4에 도시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 각 공정은 기존 연구에서 설정된 공정을 참고하였다[5. 즉, 건설단계의 공종별 자재 사용량은 설계 내역서를 활용하여 토목공사, 기계공사, 전기공사로 구분하여 데이터를 수집하였으며 공사 시 에너지 사용량은 장비 투입종류와 투입대수를 활용하여 경유량 데이터를 수집하였다. 또한 운영단계는 유지보수 자재 사용량, 에너지 사용량, 약품 사용량으로 구분하여 데이터를 수집하였다.

자재 사용량은 내용연수를 고려하여 데이터를 계산하여 산출하였으며, 에너지 사용량은 연간 전력량 데이터를 수집하였다. 마지막으로 해체 및 폐기단계는 시설물 해체와 폐기물 수송, 재처리 공정에 대한 데이터를 수집하여 구성하였다.

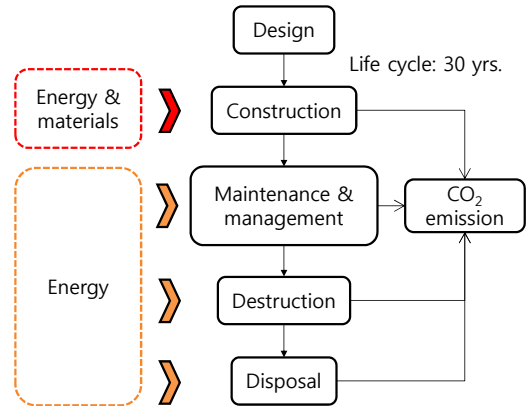


Fig. 4. Life cycle and CO₂ emission of rainwater collecting system

건설재료 및 에너지 사용량을 산정하기 위해서 3가지 집수정 기술이 만일 30 m로 시공한다고 가정하여 집수정 시스템의 전과정에 대하여 물량을 산정하였다. 또한 전과정평가를 이용하여 적용된 국토해양부의 시설물 이산화탄소배출량 산정가이드라인(2014년 기준)에서 제시하는 방법에 따라 각 단계별 이산화탄소 배출량을 산정하였다(Eq. 1 and Eq. 2). 이산화탄소배출량을 산정하기 필요한 위해 필요한 탄소배출계수는 국토해양부, 환경부 및 국외기준에서 제공하는 탄소배출계수를 이용하였다.

$$\begin{aligned} \text{건설장비사용 이산화탄소배출량}(t\text{ CO}_2) &= \\ & \text{단위작업량/건설장비 사용 작업량}(unit/hr) \\ & \times \text{건설장비 별 탄소배출계수}(t\text{ CO}_2/hr) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{건설재료사용 이산화탄소배출량}(t\text{ CO}_2) &= \\ & \text{단위작업량/투입건설재료량}(unit/hr) \\ & \times \text{건설재료 별 탄소배출계수}(t\text{ CO}_2/hr) \end{aligned} \quad (2)$$

설계 후 4단계의 건설공정에 대한 물량산출결과를 통해 산정한 이산화탄소 배출량결과를 친환경 수로형 집수정, 측구형 집수정, 원형 집수정에 대하여 비교하였다(Table 2 ; Table 3). 친환경 수로형 집수정 기술이 기존 기술대비 2배 이상의 큰 점수 차이와 함께 공정별로 크게 높은 점수를 나타냈다.

Table 2. Estimation of CO₂ emission of rainwater drainage systems

phases	Carbon emission (kg-CO ₂ /set)		
	Channel type	U-shape	O-shape
construction	876.48	1300.77	2121.48
materials	1272.66	21081.97	21639.74
maintenance	646.76	3733.47	3733.47
disassemble	17.63	61.31	69.74
disposal	11.21	67.65	80.46

Table 3. Score comparison of CO₂ emission of rainwater drainage systems

phases	Carbon emission score (100)		
	Channel type	U-shape	O-shape
construction	70.78	56.64	29.28
materials	95.76	29.73	27.87
maintenance	83.83	6.66	6.66
disassemble	82.37	38.69	30.26
disposal	88.79	32.35	19.54

Table 3에서 계산된 건설단계별 각 집수정시스템의 이산화탄소 배출량 점수를 Fig. 5에 방사형 그래프로 동시에 도시하였다. 친환경 수로형 집수정 기술의 경우에는 기존 기술 대비 건설공사 분야를 제외한 나머지 4가지 분야(건설자재, 운용 및 유지관리, 해체, 폐기)에 있어서 80 점 이상으로 평가되었다.

2.4 통합평가지표의 적용

본 절에서는 친환경 집수정이 설치예정이거나 이미 설치된 그리고 기존설계안이 일반 집수정이었으나 친환경 수로형 집수정으로 변경 설치된 현장을 선정하여 통합지표를 적용하여 재평가하고자 한다. 선정된 테스트베드는 총 변경된 현장 2건(변경 전후 각 2건)이 선정되었으며, 현장도면을 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 여기서 변경 전후에 대한 비교가 가능한 경기도 안양현장과 인천 청라현장의 초기계획을 분석하고, 이에 대한 물량산정 후 평가지표를 적용하여 변경 영향을 확인하였다(Table 4; Table 5; Fig. 8).

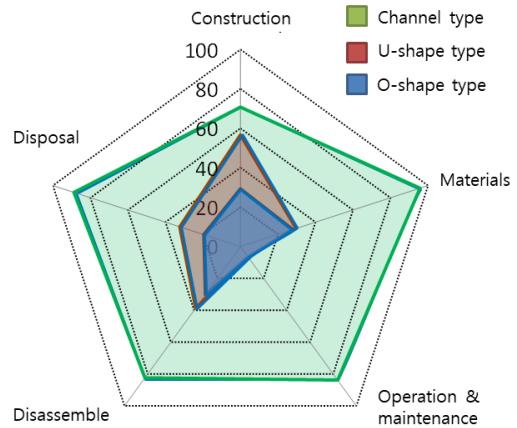


Fig. 5. Evaluation results for processes and drainage type

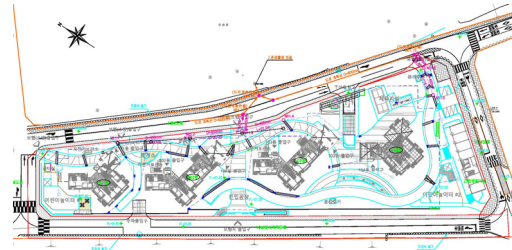


Fig. 6. Application site A (Anyang-si)

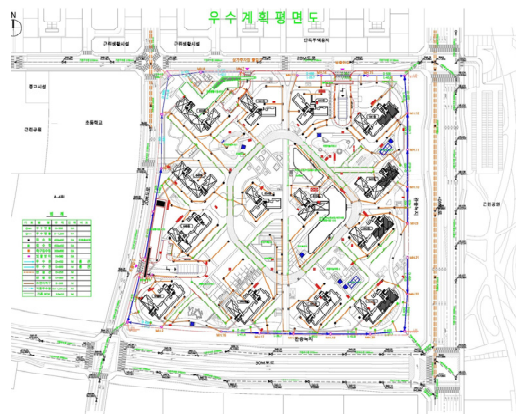


Fig. 7. Application site B (Incheon-si)

그 결과, 적용대상 A(경기도 안양현장)의 경우에는 유지관리 측면에 있어서 양호한 결과를 나타낸 반면, 적용대상 B(인천 청라현장)의 경우에는 건설당시 발생하는 이산화탄소 배출량이 가장 높게 발생하였다.

Table 4. Estimation of CO₂ emission of rainwater drainage systems in application site A

phases	CO ₂ emission (kg·CO ₂ /set)	
	original	modified
construction	46,606.59	32,668.28
materials	755,367	388,498.6
maintenance	133,770.2	73,393.45
disassemble	2,196.74	1,281.646
disposal	2,423.9	1,324.33

Table 5. Estimation of CO₂ emission of rainwater drainage systems in application site B

phases	CO ₂ emission (kg·CO ₂ /set)	
	original	modified
construction	231,810.2	175,847.6
materials	3,757,018	255,333.8
maintenance	665,341.7	129,759.5
disassemble	10,926.06	3,537.107
disposal	12,055.91	2,249.062

Table 6. Score comparison of rainwater drainage systems in application sites A and B

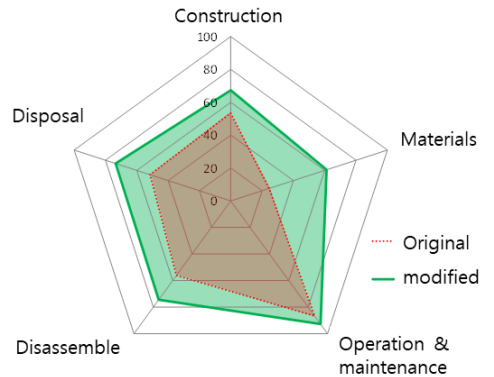
site	comparisons		
	original	modified	variation
site A	54.4	73.8	+19.4
site B	42.3	84.6	+42.3

3. 결론

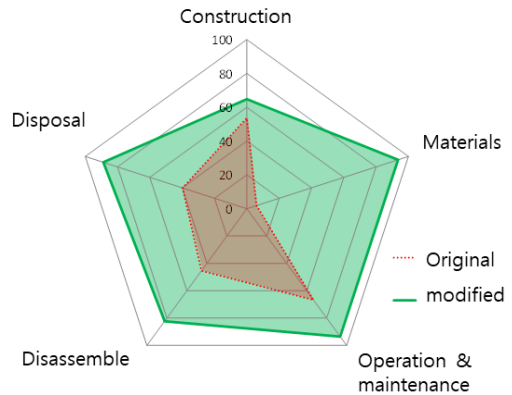
본 연구에서는 기존 측구형 및 원형 집수정 기술의 한계점을 극복할 수 있는 친환경 우수배제시스템의 기술적 우수성 확보를 위한 평가지표를 개발 및 적용하였다. 평가지표의 개발을 위해서 국내설계지침을 조사하였으며 조사내용을 기반으로 평가지표에 적용 가능한 인자를 도출하였다. 그리고 공학적인 우수성을 확보하고자 기존 설계지침에서 도출한 평가인자를 기반으로 평가지표를 개발하여 신설현장 및 수정현장에 대하여 평가절차를 수행하였다. 이를 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 친환경 수로형 집수정은 현장 친화적인 개발 기술이며 기존 기술 대비 공정이 간단하여 원형 집수시스템에 비해 전과정에 걸쳐 비용이 53 %, 측구 집수시스템에 비해 63 %가 절감되었다.

- 비용뿐만 아니라 탄소배출량을 동시에 고려한 통합 평가지표를 전과정에 걸쳐서 분석 및 비교하였으며 이를 기준으로 기존 기술대비 수로형 집수시스템을 평가한 결과 건설공사 분야를 제외한 나머지 4가지 분야(건설자재, 운용 및 유지관리, 해체, 폐기)에 있어서 80 % 이상의 높은 점수로 평가되었고, 이에 친환경 수로형 집수정 기술이 기존 기술대비 2 ~ 3배 정도 높은 점수로 산정되었다.
- 또한 통합평가지표의 적용결과는 정량적인 결과를 비교하는데도 도움이 되며, 보완사항을 각 단계별로 비교하여 선택적인 개선점을 표현해준다.



(a) Anyang site



(b) Incheon site

Fig. 8. Evaluation scores and improvement

- 본 연구에서 개발된 평가지표를 경기도 안양현장과 인천 청라현장에 적용하여 기존 기술대비 약 35 ~ 100 % 개선된 높은 점수로 향상되어 개선효과를 입증하였다.
- 또한 LCA를 고려한 평가지표에 관한 기존 연구들은 각 이슈별로 평가지표를 산정하는데 도움이 되기는 하지만 의사결정자가 한눈에 알아볼 수 있는 수치로

표현하는데 다소 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 통합평가지표는 각 우수배제시스템에 대한 전과정 평가항목별로 100분위 점수를 표현하여 직관적인 평가가 가능하도록 하였다.

References

- [1] H. G. Choi, K. Y. Han, J. E. Yi, W. H. Cho, "Study on Installation of Underground Storage Facilities for Reducing the Flood Damage", *Journal of Disaster Management*, Vol. 12, No. 4, pp. 115-123, August, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.4.115>
- [2] Y. W. Kim, Y. W. Hwang, Y. I. Kim, Y. J. Gong, S. N. Lim, "Evaluation of Greenhouse Gas Emissions on Sustainable Rain Water Collection System", *Journal of the Korean Society for Life Cycle Assessment*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-13, January, 2018.
<http://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=3636036>
- [3] ISO 14040 *Environmental management-Life cycle assessment- Principle and framework*, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2005.03.001>
- [4] S. W. Lee, S. K. Kim, "Life-Cycle Assessment (LCA) for Eco-Design in a Wastewater Reuse Facility", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2D, pp. 255-266, March, 2011.
UCI: G704-D00042.2011.31.2.014
- [5] S. J. Roh, S. H. Tae, T. H. Kim, N. H. Kim, "A Study on the Comparison of Characterization of Environmental Impact of Major Building Material for Building Life Cycle Assessment", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 29, No. 7, pp. 93-100, July, 2013.
UCI: G704-B00167.2013.29.07.010
- [6] T. H. Kim, S. H. Tae "A Study on the Comparison of Characterization of Environmental Impact of Major Building Material for Building Life Cycle Assessment", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, pp. 787-796, December, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.6.787>

안 정 규(Jungkyu Ahn)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학석사
- 2004년 4월 ~ 2005년 7월 : 한국수자원공사 운하건설부 근무
- 2007년 8월 ~ 2011년 12월 : Colorado State University 공학박사
- 2012년 3월 ~ 2015년 8월 : 서울대학교 공학연구소 책임연구원
- 2015년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

우수배제시스템, 유사이송론, 하천수리학, 수치해석

박 성 원(Sung Won Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 공학박사
- 2016년 2월 ~ 2017년 4월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2017년 5월 ~ 현재 : 인천대학교 인천방재연구센터 책임연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 환경대학교 건설환경공학부 강의전담교원

<관심분야>

하천수리학, 유사이송론, 오염확산이론

김 용 인(Yong In Kim)

[정회원]



- 1998년 3월 ~ 2000년 2월 : 명지전문대학교 토목과 전문학사 졸업
- 2012년 1월 ~ 현재 : 지성산업개발 대표이사
- 2018년 2월 ~ 현재 : 한양대학교 경영학과 재학 중

<관심분야>

초기우수이론, 빗물배제시스템