한국철도학회논문집 제18권 제6호 ▌pp. 558-566 (2015년 12월)
JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY VOL.18, NO.6 ▌pp. 558-566 (December 2015)
ISSN 1738-6225(Print)
ISSN 2288-2235(Online)

LCA를 이용한 확공지압형 앵커와 일반 앵커의 환경영향 특성 비교분석

Comparison Analysis of the Environmental Impact of VSL Anchors and RBanchors Using a Life-Cycle Assessment (LCA)

안태봉 · 이재원 · 민경남* · 이중관 · 권용규
Taebong Ahn · Jaewon Lee · Kyoungnam Min · Junggwan Lee · Yongkyu Kwon

Abstract In this study, quantitative environmental impact assessments of the VSL anchor and RB(Reaming and Bearing) anchor systems were conducted after a life-cycle assessment (LCA). In addition, improvements which reduce the adverse environmental effects of the RB anchor system were confirmed through comparisons with results with a VSL anchor system. Both results showed that water ecotoxicity and global warming are the most important in environmental influences. To determine the effect of reducing the RB anchor system environment, the result was normalized for the environmental impact category. Most items appeared to have been improved with regard to the RB anchor system. The most significant improvement was a 77% decrease in POC levels(photochemical oxidant creation). Greenhouse gas emissions, related to global warming, were decreased by 44%. It is expected that these quantitative environmental impact assessment results will serve as the basis of an anchor system for civil engineering and environmental impact assessments.

Keywords : RB anchor system, LCA, Environmental impact, Global warming, Greenhouse gas

초 록 본 연구에서는 일반 앵커와 확공지압형 앵커 시스템에 대하여 전과정평가(LCA)를 수행하고 환경영향 특성을 분석하였다. 또한, 평가결과를 비교·분석하여 개발된 확공지압형 앵커 시스템의 환경저감 개선효과를 확인하였다. 환경영향범주별 기여도 분석결과, 두 앵커 시스템 모두 지구온난화가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 개발된 확공지압형 앵커 시스템의 환경저감효과를 확인하기 위해 환경영향범주에 대한 정규화 결과, 모든 항목에서 확공지압형 앵커 시스템의 환경성이 개선된 것으로 나타났으며, 광화학 산화물 생성분야가 77%로 가장 크게 개선되었다. 최근 지구온난화와 관련하여 전세계적으로 관심이 고조되고 있는 온실가스 배출량은 약 44% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 정량적인 환경영향평가 결과는 향후 토목분야 영구앵커 공법에 대한 환경영향평가시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 확공지압형 앵커 시스템, 전과정평가, 환경영향범주, 지구온난화, 온실가스

1. 서 론

온실가스, 산성비 등 환경오염물질의 발생량은 경제성장에 따른 화석에너지 사용증가와 더불어 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 환경오염물질은 지구온난화, 오존층파괴 등의 환경부하를 야기하며 급격한 기후변화 및 이상기온 현상을 초래하고 있다. 화석에너지 고갈과 온실가스 배출 증가에 따른 지구 온난화 현상에 대응하기 위하여 온실가스 감축을 위한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다.

지구온난화를 유발하는 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO_2)는 교토의정서에 의해 감축대상으로 명시되어 있으며, 대한민국 역시 이산화탄소를 줄이기 위하여, “저탄소 녹색성장”이라는 국가적 비전을 제시하고, 2020년까지 탄소 배출량을 BAU 대비 30% 수준으로 감축하는 것을 목표로 하는 정책 및 제도를 마련하였다.

이러한 움직임에 능동적으로 대처하기 위하여 국내 각 산업분야에서는 제품의 생산, 유통, 사용, 폐기의 전과정에 걸쳐 환경부하 특성을 평가하는 LCA방법론이 각광을 받고 있으며 LCI DB구축 및 LCA 평가 프로그램개발 등과 같은 LCA의 환경평가방법의 도입을 위한 연구가 활발히 수행되었다.

건축분야에서는 다량의 이산화탄소를 발생시키는 건축물에서는 2020년까지 26.9%의 온실가스 배출량을 감축하는 것을 목표로

*Corresponding author. Tel.: +82-42-828-6261, E-mail : knmin4183@naver.com.
© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.6.558

정책을 추진하고 있다. Beak 등[1]과 Hong 등[2]은 건축물로부터 배출되는 이산화탄소의 적절한 관리와 감축을 위한 방안으로 전과정평가(LCA)를 이용하여 건축물 설계시 환경적으로 가장 우수한 설계안의 선정을 지원하는 도구로서 연구를 수행하였으며, Hong 등[3]은 LCA평가 모델 개발뿐만 아니라 건축물로 인해 발생하는 이산화탄소 배출량을 정확하게 평가할 수 있도록, 보다 정확하고 상세한 수준으로 구분된 건축자재의 이산화탄소 배출량 데이터를 제시하였다. Lim 등[4]은 생애주기를 세분화함으로써 LCA가 관리도구로서의 역할과 환경비용의 합리적인 원가배분을 수행함을 증명하였다.

제조분야에서는 자원의 재활용을 통하여 대기오염 물질 및 고형폐기물 등 환경오염물질의 저감과 에너지 절약 면에서 큰 효과를 거두고 있으며 최근 연구결과[5-7]를 살펴보면 개별 제품에 대한 전과정평가를 도입하여 원료채취부터 생산, 사용 및 폐기에 이르는 전과정을 조사하여 그 과정으로부터 발생하는 환경부하를 정량화하고 데이터베이스화하여 환경규제에 대비한 기업의 경쟁력을 높이고 친환경적인 시스템을 만들기 위한 노력이 이루어지고 있다.

토목·건설분야에서는 저탄소 녹색성장 정책에 동참하기 위하여 설계단계에서부터 경제적 비용과 환경적 비용을 고려한 종합적이고 합리적인 설계가 요구되고 있으며 친환경 제품 개발과 공정개선을 통한 에너지 절감 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee[8]의 연구결과에 따르면 특히 철도분야는 개정된 환경평가 가이드라인을 계기로 2012년부터 철도시설물 건설시 사전 환경성 검토를 통하여 온실가스 항목의 환경평가를 수행하도록 하고 있으며, 이에 따라 철도시설물의 온실가스 배출량 산정 및 저감을 위한 기술개발이 요구되고 있다.

철도산업자체에서 배출되는 온실가스는 상당부분이 건설단계에서 배출되기 때문에 저탄소 철도시설물 건설을 위한 노력이 필요하다. 이에 Lee와 Kim[9]은 철도시설물 온실가스저감방안연구에서 유형별 전과정 온실가스 배출량 분석을 통하여 콘크리트가 주요 발생원임을 확인하고 구체적인 개선방안을 제안하였다. Lee 등[10]은 고속철도노선 전과정 중 건설단계에서 각 분야별(토목, 궤도, 건축 및 전 신호통신분야) 주요 건설자재 및 중장비 에너지 사용량을 토대로 전과정평가 방법론을 적용하여 주요 환경부하특성을 분석하고 분야별 주요 영향인자 및 영향범주별 환경기여도를 정량화함으로써 철도 건설단계에서 전과정평가 적용성을 확인하였다. Min 등[11]은 토목분야 중 개별공정에 해당하는 확공지압형 앵커시스템에 대한 LCA평가를 수행함으로써 친환경 공정개선을 통하여 개별공정에 대한 환경영향 저감사례를 소개하였다. 제품의 생산에서 폐기과정까지의 생애주기(Life Cycle)를 고려한 전과정평가 방법론은 환경파괴에 대한 환경오염물질을 파악하고 감소시키기 위하여 다양한 산업분야에서 활용되고 있으나, 타 산업분야보다 비교적 긴 생애주기와 다양한 공종을 가진 토목·건설분야에서는 개별 공종에 대한 LCA-DB가 부족한 실정이므로 개별 공종에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 전과정평가를 통하여 철도 건설단계에서 토목공사중 개별공종에 해당하는 일반 앵커와 확공지압형 앵커의 환경영향을 평가하여, 확공지압형 앵커의 환경저감 개선효과를 정량적으로 도출하였다.

2. 본 론

2.1 전과정평가(Life Cycle Assessment)

전과정평가(LCA)는 “원료 채취, 가공, 제품제조, 사용 및 폐기 등의 전과정에서 사용되는 에너지와 물질, 배출되는 폐기물을 규명하고 정량화함으로써 제품 및 공정과 관련된 환경부하를 평가하는 기법”이다. 이 기법의 대상으로는 단순한 제품에서 복잡한 시스템에 이르기까지 목적에 따라 다양하며, 환경에 대한 영향으로는 환경오염물의 배출뿐만 아니라 자원, 에너지 소비 또는 인간의 건강, 생태학적 영향까지 포함한다. 이 기법의 목적은 인간 활동의 다양한 국면에서 환경부하를 저감하는 방향으로 의사결정을 하기 위한 판단자료를 제공하는데 있다.

전과정평가 절차는 ISO 14000 시리즈에 따라 목적 및 범위 정의(Goal and scope definition), 전과정 목록분석(Life cycle inventory analysis), 전과정 영향평가(Life cycle impact assessment), 해석(Interpertation)단계로 수행되며 각 구성단계는 연구목적과의 부합성, 해석결과의 객관성 및 신뢰성 확보를 위하여 반복적인 수행을 할 수 있도록 구성되어 있다.

따라서, 전과정평가는 제품 및 공정 전과정에서 환경에 미치는 영향을 지구 온난화(Global warming), 오존층 파괴(Ozone layer depletion), 자원 고갈(Abiotic resource depletion) 등 여러 환경영향범주들(Environmental impact categories)에 미치는 영향으로 정량화할 수 있다.

2.2 일반 앵커공법과 확공지압형 앵커공법의 전과정평가

2.2.1 목적 및 범위 정의

본 연구는 토목공사에서 사용되는 영구앵커 중에서 일반(VSL type) 앵커와 확공지압형(Reaming and Bearing) 앵커 시스템에 대

한 전과정평가를 통해 환경측면에서 상대적인 중대성을 규명하고 환경영향을 평가·비교 분석하는 것이 목적이며 철도 건설단계에서 세부공종의 환경영향 개선방향에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. 본 연구에 사용된 전과정평가 프로그램은 단순 제품에서 복잡한 공정까지 다양한 데이터베이스 구축으로 다양한 분야에서 활용성이 우수하고 평가가 용이하여 전세계적으로 널리 사용되고 있는 Pre Consultants에서 개발한 SimaPro 7.0이다.

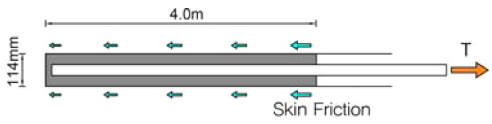
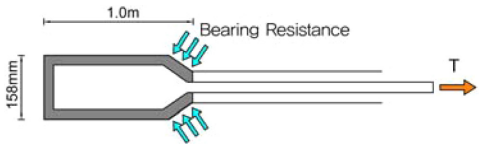
본 연구의 대상 시스템은 영구 앵커공법 중 인발저항력 발휘기구와 지압판 설치기구가 다른 일반(VSL type) 앵커와 확공지압형 앵커이며 주요 특징은 Table 1과 같다.

시스템 경계는 Fig. 1과 같이 앵커두부, 앵커체를 제조하기 위해 사용되는 모든 원료물질 채취 및 가공단계, 원자재를 이용하여 앵커두부, 앵커체 및 콘크리트 수압판을 제작하는 제조단계, 천공, 앵커체 삽입, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치, 그라우팅, 인장 등 일련의 과정을 통해 앵커공법을 시공하는 단계까지 고려하였다.

대상의 기능은 비탈면 안정 또는 영구 구조물의 전도 및 부상 방지이며 기능단위는 두 앵커시스템 모두 동일한 보강간격(2.5m×2.5m) 조건에서 대상의 기능을 만족하는 각각 앵커 시스템 1set으로 설정하였다. 따라서, 데이터 수집 및 계산의 기준이 되는 기준흐름은 각각 공법의 앵커 시스템 1set으로 정의하였다.

데이터 범주는 크게 제조단계와 시공단계로 분류한 후 투입물과 배출물로 구분하고 투입물은 원료물질, 에너지로 설정하였으며 배출물은 고형폐기물로 구분하였다. 데이터 수집은 앵커 시스템의 제조단계 및 시공단계에 대해서는 대상 업체 내부데이터를 사용

Table 1. Characteristics of the VSL-type and RB-type anchor systems.

Division	VSL-type anchor system	RB-type anchor system
Overview		
Pull-out capacity	Skin friction	Bearing resistance
Bonded length	4.0m or over	1.0m
Ground anchor body	Field production or plant production	Plant production
Ground anchor head	Con'c block + bearing plate	Bearing plate
Construction sequence	General boring → Anchor insertion → Con'c block installation → Bearing plate installation → Grouting → Curing of con'c → Prestressing → Cap installation	Boring and reaming → Anchor insertion → Bearing plate installation → Prestressing → Grouting → Cap installation

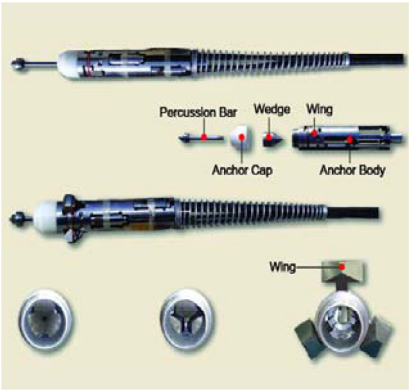
Secure raw materials and Process Step	Manufacture step	Construction step
		

Fig. 1. System boundary of the anchor.

하였으며 원료물질 채취 및 가공, 폐기물 처리 등은 대상 업체에서 수집이 불가능하여 외부데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)를 수집하여 사용하였다.

또한, 앵커 시스템의 특성을 고려하여 가정 및 제한사항을 설정하였다. 첫째, 앵커 시스템은 시공 후 영구적으로 사용되기 때문에 별도의 폐기처리가 이루어지지 않으므로 시스템 경계에서 폐기단계를 제외하였다. 둘째, 제품의 수송단계는 본 연구에서 평가대상으로 하는 제품 1단위를 기준으로 할 경우 전체 환경영향에 비해 매우 작기 때문에 제외하였다. 셋째, 전기 발전을 위한 연료 연소로 인해 발생하는 대기배출물의 경우, 업체에서 관리되고 있지 않아 계산식을 통하여 이론값을 산정하였다. 온실가스배출물(CO2, CH4, N2O)은 『IPCC(2006)』의 배출계수를 적용하였으며, 대기오염배출물(CO, NOx, SOx, TSP, PM10, VOC, NH3)은 국립환경과학원의 『국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(2010)』의 배출계수를 적용하였다.

2.2.2 전과정 목록분석 및 영향평가

전과정평가에서 목록분석은 시스템 내에서 투입물과 배출물의 데이터를 정성적, 정량적으로 정리하는 단계이다. 작성된 투입물과 배출물의 데이터를 기초로 상위흐름 데이터베이스를 연결하고, ISO 14048의 기준에 의거하여 각각의 앵커시스템에 대한 최종적인 전과정 목록분석을 수행하였다. 분석결과, 단계별 앵커시스템의 도출된 환경배출 항목은 Table 2와 같다.

주요 투입물로는 선재, 레미콘 등의 원료물질과 이들을 채취, 가공하는 과정에서 소비되는 석탄 및 석유 등의 에너지가 차지하였으며 배출물로는 석탄 및 석유의 연소에 의해 발생하는 이산화탄소, 질소산화물, 플루오린화수소 등으로 나타났다.

대기배출물 산정은 전기 발전을 위한 연료 연소로 인해 발생하는 대기배출물의 경우, 업체에서 관리되고 있지 않아 계산식을 통하여 이론값을 산정하였다. 본 연구에서 고려한 대기배출물은 온실가스배출물(CO2, CH4, N2O)과 대기오염배출물(CO, NOx, SOx, TSP, PM10, VOC, NH3)이다.

식 1은 온실가스배출물에 대한 산정식이다. 연료 사용량은 대상 업체에서 실제 연료 사용량을 수집하였으며, 연료의 열량계수는 『에너지법』의 에너지열량환산기준을, 연료의 온실가스 배출계수는 『IPCC(2006)』을 적용하였다. 또한, 연료의 산화계수는 『환경성적표지 대상제품과 작성지침』을 따랐다.

$$E_{i,j} = Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times f_i \times 10^{-6} \tag{1}$$

여기서,

$E_{i,j}$: 연료(i) 연소에 따른 온실가스(j) 배출량(단위: kg)
Q_i: 연료(i) 사용량(실제 사용량, 단위: L,kg-연료)
EC_i: 연료(i)의 열량계수(연료 순발열량, 단위: MJ/L,kg-연료)
$EF_{i,j}$: 연료(i)의 온실가스(j) 배출계수(단위: kg-온실가스/TJ-연료)
f_i: 연료(i)의 산화계수

전과정 영향평가는 지식경제부 영향평가 방법론을 사용하여 대표적인 환경영향범주인 지구온난화(Global Warming :GW), 자원고갈(Abiotic Resources Depletion: ARD), 오존층파괴(Ozone Depletion: OD), 산성화(Acidification : AC), 광화학산화물(Photo-chemical Qxidant Creation: POC)의 5가지를 선정하였으며, 부영양화(Eutrophication : Eu), 인체독성(Human Tocicity: HT), 생태독성(Terrestrial Eco-Toxicity: TET)은 제품 생산과정에서 수처리 과정을 거쳐 배출되어 수계에 직접 미치는 영향이 없으므로 제외하였다. 전과정 영향평가의 첫 번째 단계인 특성화는 각 환경 영향범주별로 분류된 목록항목들의 각각의 영향범주에 미치는 기여정도를 정량화하는 단계로서, 이 특성화값에 각각의 환경부하에 대응하는 상응인자를 곱하여 잠재적인 환경영향을 산정 할 수 있다. 본 연구에서는 필수과정인 특성화 단계까지만 진행하여 평가결과를 제시하였다.

2.3 환경영향 특성화 결과비교

2.3.1 지구온난화

일반 앵커와 확공지압형 앵커 시스템이 지구온난화에 미치는 영향에 대한 분석결과는 Fig. 2(a)와 같다. 일반앵커의 경우 시공단계에서 35.2%, 제조단계에서 64.8% 영향을 미치는 것으로 나타났으며 확공지압형 앵커의 경우에는 시공단계에서 42.7%, 제조단계에서 57.3% 영향을 미치는 것으로 나타나 지구온난화에 대한 영향은 두 앵커 시스템 모두 시공단계보다 제조단계에서 더 큰 것으로 나타났다. 지구온난화 영향인자의 크기는 일반 앵커의 경우 콘크리트 수압판 제작, 앵커체, 그라우팅, 천공 및 앵커체 삽입, 앵커두부, 인장 순으로 나타났고 확공지압형 앵커에서는 앵커체, 천공, 그라우팅, 앵커두부, 인장, 지압판 설치 순으로 나타났다. 시공

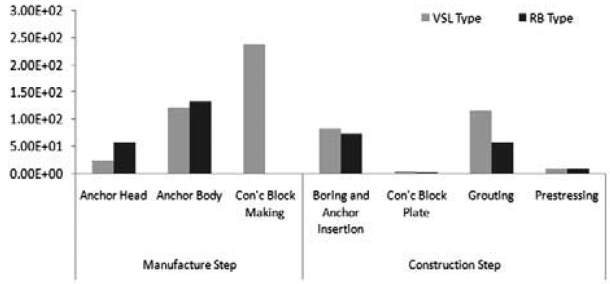
Table 2. Gate to-gate base in VSL and RB anchor.

Category			Field		Unit	Material	Amount	
							VSL-type	RB-type
Manufacturing steps	Anchor head	Elastic support	Input	Raw materials	kg	Rubber(NBR)	-	1.63E+00
				Energy	kWh	Electricity	-	1.87E-01
			Output	Solid waste	kg	Rubber waste	-	2.25E-01
		Bearing plate	Input	Raw materials	kg	Steel plate	2.30E+01	3.78E+01
				Raw materials	mm^2	Iron	3.78E+03	3.68E+05
				Energy	kWh	Electricity	2.13E+00	2.63E+00
					mm^2	Zincification	-	5.93E+03
			Output	Solid waste	kg	Steel plate waste	2.00E-01	1.23E+01
		Head	Input	Raw materials	kg	Steel bar	4.00E+00	4.00E+00
				Energy	kWh	Electricity	1.74E-01	1.24E-01
			Output	Solid waste	kg	Steel bar waste	8.00E-01	6.00E-01
		Wedge	Input	Raw materials	kg	Steel bar	2.00E-01	2.00E-01
				Energy	kWh	Electricity	1.59E-01	1.59E-01
			Output	Solid waste	kg	Steel bar waste	3.00E-02	3.00E-02
		Cap	Input	Raw materials	kg	Steel plate	4.00E-01	4.00E-01
				Energy	kWh	Electricity	1.47E-01	1.47E-01
	Anchor body		Input	Raw materials	kg	Heat contraction sheet	6.14E+01	5.73E+01
				Secondary materials	kg	Grease	3.08E+00	3.08E+00
			Output	Energy	kWh	Electricity	1.91E-01	1.87E-01
			Input	Solid waste	kg	Prestressing strand waste	1.36E+00	5.30E-01
	Con'c block plate producing		Input	Raw materials	m^3	Ready-mixed concrete	3.98E-01	-
					ton	Steel bar	1.52E-01	-
					g	PVC pipe	3.63E+00	-
				Secondary materials	L	Form oil	5.44E-02	-
				Energy	kg	Diesel, gasoline	2.79E-01	-
			Output	Solid waste	ton	Steel bar waste	4.56E-03	-
Construction steps	Boring, anchor insertion		Input	Energy	kg	Diesel	2.89E+01	2.57E+01
	Plate installation		Input	Energy	kg	Diesel	1.33E+00	9.13E-01
	Grouting		Input	Raw materials	kg	Cement, admixture	5.22E+02	2.61E+02
				Secondary materials	kg	Polluted water	2.39E+02	1.22E+02
				Energy	kg	Diesel	2.03E+00	1.01E+00
	Prestressing		Input	Energy	kg	Diesel	2.89E+00	2.89E+00

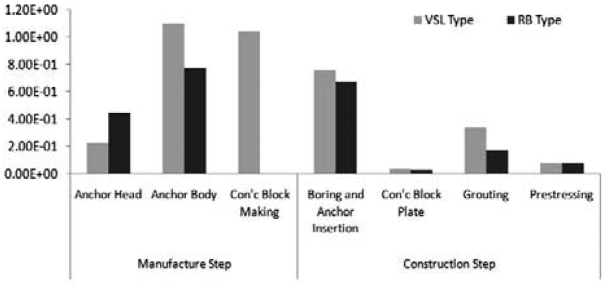
단계에서 앵커두부 처리공종에 해당하는 콘크리트 수압판 및 지압판 설치, 지표근입 지압판 설치, 인장은 두 앵커 시스템 모두 지구온난화 영향에 미미한 것으로 나타났다. 일반 앵커의 경우 콘크리트 수압판 제작으로 지구온난화에 대한 영향이 가장 크게 나타났는데 이는 레미콘, 철근 등이 주요 자재로 사용되고 자재의 원료 채취 및 가공단계에서 장비사용에 따른 화석연료의 연소에 의해 CO_2, CH_4, N_2O 등의 온실가스가 발생하기 때문인 것으로 분석되었다.

2.3.2 자원고갈

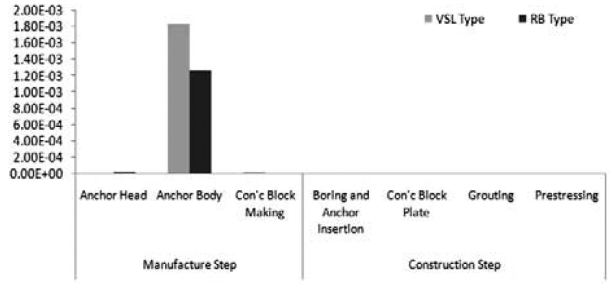
자원고갈 영향에 대한 결과는 Fig. 2(b)와 같으며 두 앵커 시스템 모두 시공단계보다 제조단계에서 영향이 큰 것으로 도출되었다.



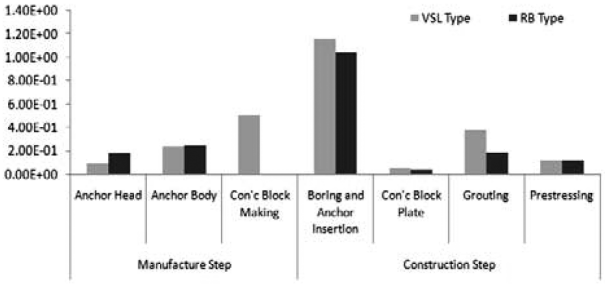
(a) Characterization for GWP



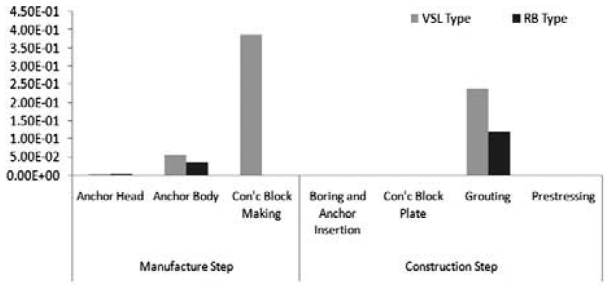
(b) Characterization for ARD



(c) Characterization for OD



(d) Characterization for AD



(e) Characterization for POC

Fig. 2. Characterization for the environmental impact assessment.

일반 앵커의 경우 시공단계에서 33.7%, 제조단계에서 66.3%로 나타났고 확공지압형 앵커의 경우에는 시공단계에서 43.6%, 제조단계에서 56.4%로 나타났다. 세부적으로는 앵커체, 콘크리트 수압판 제작, 천공 및 앵커체 삽입, 그라우팅, 앵커두부, 인장, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치 순으로 나타났다. 앵커체의 경우 PC강연선의 원료물질로 투입되는 선재의 영향과 이를 가공하는데 소비되는 에너지가 자원고갈의 주요 원인인 것으로 분석되었으며, 콘크리트 수압판 제작에서는 레미콘과 철근이 주요 자재로 사용되고 레미콘과 철근 생산시 장비사용에 따른 화석연료가 많이 소비되기 때문에 자원고갈에 대한 영향이 높은 것으로 분석되었다. 천공 및 앵커체 삽입에서는 시공 장비의 연료소비에 의한 것으로 나타났다.

2.3.3 오존층파괴

오존층파괴 영향에 대한 결과는 Fig. 2(c)와 같으며 두 앵커시스템 모두 제조단계가 전체 영향의 99%를 차지하며 시공단계는 영향이 거의 없는 것으로 도출되었다. 세부적으로는 대부분 앵커체에 의한 영향임을 알 수 있으며, 앵커두부, 콘크리트 수압판 제작, 천공 및 앵커체 삽입, 수압판 및 지압판 설치, 그라우팅, 인장에 의한 영향은 전체 영향의 1% 미만으로 그 영향이 매우 미미한 것으로 나타났다. 앵커체에 대한 오존층파괴 영향평가 결과 PC강연선과 에폭시수지로 나타났으며, 이들의 경우 Lee[8]는 원료의 가공 및 생산과정에서 오존층파괴에 큰 영향을 미치는 염소가스가 다량으로 발생하는 것을 주요 원인으로 규명하였다.

2.3.4 산성화

산성화 영향에 대한 결과는 Fig. 2(d)와 같으며 두 앵커 시스템 모두 제조단계보다 시공단계에서 보다 영향이 큰 것으로 도출되었다. 일반앵커의 경우 시공단계에서 67.3%, 제조단계에서 32.7% 영향을 미치는 것으로 나타났고 확공지압형 앵커의 경우에는 시공단계에서 76.7%, 제조단계에서 23.3%의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 세부적으로는 일반앵커 시스템의 경우 천공 및 앵커체 삽입, 콘크리트 수압판 제작, 그라우팅, 앵커체, 인장, 앵커두부, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치 순으로 나타났으며 확공지압형 앵커 시스템의 경우에는 천공, 앵커체 삽입, 앵커체, 그라우팅, 앵커두부, 인장, 지압판 설치 순으로 나타났다. 두 공법 모두 천공 및 앵커체 삽입에서 큰 영향을 나타내었는데 이는 천공기 등의 중장비 사용으로 인하여 경유가 연소되고 이로 인해 질소 산화물이 배출되기 때문인 것으로 분석되었다.

2.3.5 광화학산화물 생성

광화학물 생성 영향에 대한 결과는 Fig. 2(e)와 같으며 일반 앵커 시스템에서는 제조단계(65.1%)가 시공단계(34.9%) 보다 영향이 큰 것으로 도출되었으며 확공지압형 앵커 시스템에서는 시공단계(74.6%)가 제조단계(25.4%)보다 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 확공지압형 앵커공법에서는 일반앵커공법의 콘크리트 수압판 제작 공정이 불필요하므로 레미콘에 의한 광화화산화물 생성이 발생하지 않기 때문이다. 세부적으로는 그라우팅과 콘크리트 수압판 제작, 앵커체에서 영향이 크게 나타난 반면 앵커두부, 천공, 앵커체 삽입, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치, 인장은 그 영향이 미미한 것으로 나타났다. 콘크리트 수압판 제작, 그라우팅, 앵커체에 대한 광화학산화물생성 영향 분석결과, 주요 환경요인은 각각 레미콘, 고로슬래그시멘트, PC강연선으로 나타났으며 원료물질의 채취 및 가공, 제조 단계에서 배출되는 일산화탄소가 광화학산화물 생성의 원인으로 분석되었다.

2.4 전과정 해석결과 비교

일반 앵커와 확공지압형 앵커의 환경영향범주에 대한 특성화 결과로부터 환경영향 평가결과를 비교하였으며 영향범주별 개선정도를 Table 3에 나타내었다.

지구온난화에 대한 영향 비교결과 전체적으로 확공지압형 앵커가 일반 앵커보다 44.3% 감소되었으며, 세부적으로 앵커두부 처리, 그라우팅 등에서 영향이 크게 감소하였다. 확공지압형 앵커 시스템에서는 콘크리트 수압판 설치가 불필요하며 앵커체의 길이가 감소함에 따라 지구온난화 영향이 감소된 것으로 분석되었다.

자원고갈에 대한 영향 비교결과 확공지압형이 일반 앵커보다 39.4% 감소되었으며 앵커두부를 제외한 모든 부분에서 환경성이 개선된 것으로 나타났다. 앵커두부에서 자원고갈 영향이 증가한 것은 기존의 일반 앵커보다 두부가 확장되고 지압판 설치시 탄성받침대 등이 추가 되었기 때문이다.

오존층파괴에 대한 영향 비교결과 확공지압형이 일반 앵커보다 30.9% 감소되었으며 앵커두부, 인장을 제외한 모든 부분에서 환경성이 개선된 것으로 나타났다. 일반 앵커 대비 앵커두부가 오존층파괴 영향이 상대적으로 증가한 반면, 앵커체는 31.2%, 천공, 앵커체 삽입은 11.2%, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치는 31.4%, 그라우팅은 48.3%의 영향이 감소하였다. 인장에 대한 영향은 두 시스템이 동일한 것으로 도출되었다.

산성화에 대한 영향 비교결과 확공지압형이 일반 앵커보다 29.2% 감소되었으며 앵커두부, 앵커체, 인장을 제외한 모든 부분에서 환경성이 개선되었다. 일반 앵커 대비 앵커두부가 96.1%, 앵커체가 3.1%의 산성화 영향이 증가한 반면, 천공, 앵커체 삽입은 10.9%, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치는 31.4%, 그라우팅은 50.0%의 영향이 감소하였다. 인장에 대한 영향은 두 시스템이 동일한 것으로 도출되었다.

광화학산화물 형성에 대한 영향 비교결과 확공지압형이 일반 앵커보다 32.9% 감소되었으며 앵커두부, 인장을 제외한 모든 부분에서 광화학산화물 생성에 대한 환경성이 개선된 것으로 나타났다. 일반 앵커 대비 앵커두부가 100.6%의 영향이 증가한 반면, 앵

Table 3. Improvements by impact category.

Impact category	Unit	Results		Improvement (%)
		VSL-type	RB-type	
ARD	1/y	3.56E+00	2.16E+00	39.4
GW	kg CO2 eq.	5.94E+02	3.31E+02	44.3
OD	kg CFC11 eq.	1.85E-03	1.28E-03	30.9
AD	kg SO2 eq.	2.53E+00	1.79E+00	29.2
POC	kg Ethylene eq.	6.79E-01	1.59E-01	76.6

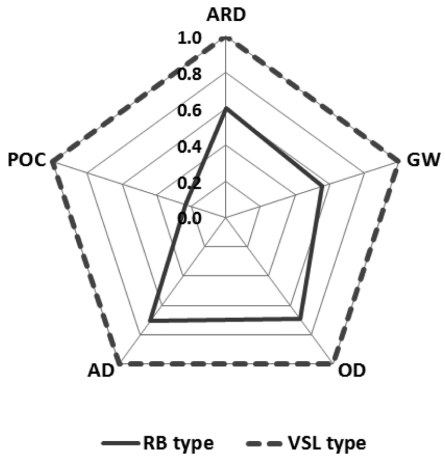


Fig. 3. Comparison of the impact categories for different anchor systems and the improvement results.

커체는 32.9%, 천공, 앵커체 삽입은 11.2%, 콘크리트 수압판 및 지압판 설치는 31.5%, 그라우팅은 50.0%의 영향이 감소하였다. 인장에 대한 영향은 두 시스템이 동일한 것으로 도출되었다.

일반 앵커시스템의 결과를 기준으로 확공지압형 앵커 시스템의 환경성 평가 결과를 정규화하면 Fig. 3과 같으며 확공지압형 앵커 시스템의 결과가 1이하 일 경우 해당 영향범주에서 환경성이 개선된 것을 의미하며, 1이상일 경우 오히려 환경성이 나빠진 것을 의미한다. 확공지압형 앵커 시스템에 대한 정규화 결과, 자원고갈 0.61, 지구온난화 0.56, 오존층파괴 0.69, 산성화 0.71, 광화학산화물생성 0.23으로 모든 범주에서 환경성이 개선된 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존 일반앵커 시스템의 성능개선을 통해 개발된 확공지압형 앵커 시스템에 대한 환경영향저감 효과를 파악하기 위하여 전과정평가를 수행하고 환경측면에서 주요이슈 규명 및 오염물질을 정량화하여 일반 앵커와 확공지압형 앵커 시스템을 비교함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

분야별 주요 환경영향 기여도 분석결과, 일반 앵커와 확공지압형 앵커 시스템 모두 앵커체의 기여도가 가장 높게 나타났으며 환경영향범주별 기여도는 지구온난화가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 주요 환경인자는 자재의 원료물질 채취 및 가공단계에서 중장비 사용시 화석연료의 연소에 의해 발생하는 플루오린화수소와 온실가스인 것으로 분석되었다.

환경영향 특성화 결과, 지구온난화는 콘크리트 수압판 제작과 앵커체 영향인 것으로 나타났으며 주요 환경인자는 제조단계에서 자재의 원료 채취 및 가공시 발생하는 온실가스인 것으로 나타났다. 자원고갈 및 오존층파괴는 앵커체 영향인 것으로 나타났으며 주요 환경인자는 PC강연선의 원료물질인 선재의 영향과 원료의 가공 생산과정에서 발생하는 염소 가스인 것으로 나타났다. 산성화는 천공 및 앵커체 삽입에 의한 영향으로 나타났으며 천공기 사용에 따른 질소 산화물이 주요 환경인자로 나타났다. 광화학산화물 생성은 콘크리트 수압판 제작과 그라우팅에 의한 영향인 것으로 나타났으며, 주요 환경인자는 레미콘, PC강연선의 원료물질 채취 및 가공에서 배출되는 일산화탄소인 것으로 나타났다.

일반 앵커 시스템과 확공지압형 앵커 시스템에 대한 전과정해석 비교결과 모든 영향범주에서 확공지압형 앵커 시스템의 환경성이 개선된 것으로 나타났다. 광화학산화물 생성 영향이 77%로 가장 크게 개선되었으며, 최근 전세적으로 관심이 증대되고 있는 온실가스 배출량은 약 44% 감소한 것으로 나타났다.

토목공사에서는 너무 다양한 공법들이 적용되고 있어 전체 공사에서 사용되는 콘크리트, 철근 등 주재료의 사용량을 기초자료로 전과정평가를 실시하고 있으므로 개별공정에서 발생할 수 있는 환경영향을 정량적으로 확인하고, 개선하는데 많은 어려움이 있다. 또한, 제조 및 운송단계와 달리 시공 및 유지관리 단계의 경우 현장별 작업량 편차가 심해 표준시방 및 품셈을 참고하게 되는데, 이로 인해 실질적인 환경영향 평가가 어려우므로 현장여건을 잘 반영하는 것이 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 노반 건설공사에서 활용도가 높은 영구앵커공법을 대상으로 지층상태, 작업량 등의 현장여건을 고려해 전과정평가를 수행하고, 공정별 환경영향을 정량화하여 효율적으로 공정을 개선하였다.

향후 쏘일네일, 록볼트, 강관다단 등 유사공정에 대한 환경영향 저감대책 수립을 위한 전과정평가시 본 연구의 활용도가 높을 것

으로 판단되며, 대부분의 토목공사에서 수행되고 있는 LCC와의 상관성에 대한 연구가 병행된다면 환경을 고려한 경제적 토목공사 수행에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

References

[1] J.H. Beak, S.H. Tae, S.J. Roh, J.H. Lee, *et al*. (2011) A study on the requisite elements of LCCO2 evaluation system at planning stage of building, *Korean journal of Construction Engineering and Management*, 12(3), pp. 31-41.

[2] T.H. Hong, C.Y. Ji, H.S. Park (2012) Integrated model for assessing the cost and CO2 emission(IMACC) for sustainable structural design in ready-mix concrete, *Journal of Environmental Management*, 103, pp. 1-8.

[3] T.H. Hong, C.Y. Ji, M.H. Jang (2012) An analysis on CO_2 emission of structural steel materials by strength, *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, 13(4), pp. 132-140.

[4] J.Y. Lim, J.S. Yi, S.W. Shin, J.W. Son (2012) Implementing activity-based LCA model for carbon dioxide emission analysis and allocation of environment cost, *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, 13(4), pp. 78-88.

[5] J.M. Kwak, T. Her (1997) Application of life-cycle assessment for beverage can, *Journal of industrial Science and Technology*, 22(7), pp. 223-236.

[6] S.H. Baek, H.J. Kim, Y.S. Kwon, S.S. Kim, *et al*. (2011) A study on environmental impact evaluation of metallic can using life cycle assessment, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(11), pp. 1395-1401.

[7] S.H. Baek, H.J. Kim, Y.S. Kwon (2014) Environmental impact evaluation for glass bottle recycle using life cycle assessment, *Journal of Environmental Science International*, 23(6), pp1067-1074.

[8] J.W. Lee (2013) LCA method study for improvement construction process in anchor system, MS *Thesis*, Woosong University.

[9] C.K. Lee, J.S. Kim (2011) A research on the greenhouse gas emission reduction of railway structure construction stage, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), pp. 425-432.

[10] C.K. Lee, J.Y. Lee, W.S. Jung, Y.W. Hwang (2014) A study on the characteristics of environmental impact in construction sector of high-speed railway using LCA, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(3), pp. 178-185.

[11] K.N. Min, W.S. Bae, K.G. Ahn (2012) LCA method study for improvement construction rrocess in RBanchor system, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(2), pp. 17-24.

(Received 7 October 2014; Revised 28 October 2015; Accepted 2 November 2015)

Tae-Bong Ahn: tbahn@ wsu.ac.kr
Department of Railroad Civil System Engineering, Woosong University, #17-2 Jayang-Dong, Dong-Gu, Daejeon 300-718, Korea
Jae-Won Lee: bigljw@ naver.com
Sejong E&C, 4th Floor, Reagil B/D, 23, Oncheonbuk-ro, Yusung-Gu, Daejeon 305-301, Korea
Kyoung-Nam Min: knmin4183@ naver.com
Sejong E&C, 4th Floor, Reagil B/D, 23, Oncheonbuk-ro, Yusung-Gu, Daejeon 305-301, Korea
Jung-Gwan Lee: amos4774@hanmail.net
Sejong E&C, 4th Floor, Reagil B/D, 23, Oncheonbuk-ro, Yusung-Gu, Daejeon 305-301, Korea
Yong-Kyu Kwon: bmnt2000@ naver.com
Sejong E&C, 4th Floor, Reagil B/D, 23, Oncheonbuk-ro, Yusung-Gu, Daejeon 305-301, Korea