

굴삭기 제조 공정의 환경성 평가를 위한 LCA 적용

임현수, *김지원

볼보 코리아, *동의대학교 환경공학과

Environmental Evaluation of the Manufacturing Process of Excavators through Life Cycle Assessment

Hyunsoo Lim, *Jiwon Kim

Volvo Koirea, *Donggeui University

envjjang@nate.com

Abstract

The purpose of this study is to evaluate environmental impacts from the manufacturing process of excavators by using LCA, and improve design and manufacturing process. This study was analyzed by each process through characterization and normalization. The result shows that assembly and fabrication process has the highest environmental impact on Abiotic Resource Depletion, Global Warming, Photochemical Oxidant Creation, while painting and finishing process has the highest environmental impact on Ozone depletion, Eutrophication, and Acidification. This shows that environmental impact of manufacturing excavators came from using much steel and energies in accordance with the usage. Therefore, recycle of steel and development of new material is important for sustainable construction equipment industry.

1. 서론

건설기계는 원자재 채취에서부터, 도로작업, 건축물의 해체 및 건설, 배관 및 보수, 농업 및 임업 용도, 수송 등을 비롯하여 수많은 용도로 이용되고 있는 장비로 그 종류는 도저(dozer), 로더(loader), 백호로더(backhoe loader), 굴삭기(excavator), 트렌처(trencher), 덤프(dumper), 스크레이퍼(scraper), 그레이더(grader), 도로다짐용 기계(ladfill compactor), 롤러(roller), 파이프레이어(piperlayer), 상부선회식 파이프레이어(pipelayer), 천공기(horizontal directional drill) 등이 있으며 그 중에서 활용도가 높고 시장에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것은 굴삭기이다.

건설기계 산업은 전 세계 시장 수요가 2010년 77만대, 1,518억불 규모이며, 기존의 유럽이나 북미 지역과 중국, 인도, 러시아, 브라질 및 동남아 국가의 성장과 더불어 계속해서 시장이 확대되고 있다. 2000년 50만대, 580억불 규모의 시장 수요를 감안할 때, 최근 2010년까지 상당한 성장을 해 오고 있는 것으로 알 수 있다. 또한, 시장의 판매 대수 기준 연평균 4%, 시장 규모 기준 연평균 10%의 성장률을 보이고 있어, 앞으로도 꾸준한 성장 가능성이 큰 시장이라 할 수 있다.

Table 1. 건설장비 세계시장 규모

| Year | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|--------------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Volume (EA) | 512,671 | 491,797 | 475,977 | 566,985 | 711,344 | 799,819 |
| Sales (MUSD) | 58,450 | 55,210 | 52,579 | 65,837 | 86,885 | 98,773 |
| Year | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | CAGR |
| Volume (EA) | 889,254 | 1,001,228 | 848,340 | 594,829 | 769,281 | 4.1 |
| Sales (MUSD) | 121,935 | 141,537 | 167,930 | 109,784 | 151,785 | 10 |

자료: 한국건설기계산업협회, <http://www.kocema.org>, (2012)

- 주: 1. CAGR: compounded annual growth rate(%), 연평균 성장
2. 대수: 크레인, 지게차 제외

국내의 경우 내수 판매에 비해 수출 비중이 대단히 높은 실정이며, 이는 오랜 기간 기술개발 투자로 인한 품질 확보의 결과이다. 굴삭기의 경우에는 내수 시장의 감소에도 불구하고 수출은 급속도로 증가하는 경향을 보이고 있다.

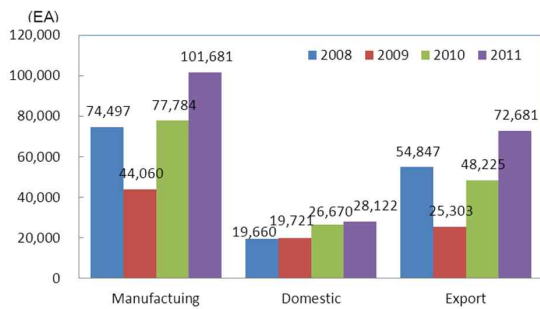


Fig. 1. 한국의 건설기계 생산 및 판매

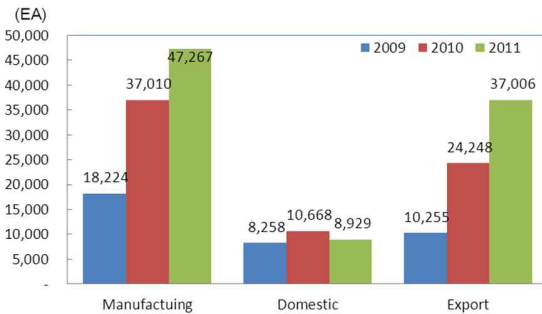


Fig. 2. 한국의 굴삭기 생산 및 판매

환경규제로서 건설기계 산업은 자동차, 전자제품 등과 같은 직접 소비재이기 보다는 자원을 채취하고 건설에 사용되는 생산재 수준으로 분류가 되는 경우가 많고 생산량이 적은 편이기 때문에, 자동차 등에 비해 규제 수준이 다소 낮은 편이다.

배기가스 배출기준은 자동차와 마찬가지로 NOx, SOx, PM등에 대해 규제를 하고 있으며, 2012년 현재, EU Stage IIIB, 북미 Tier4 interim, 한국 Tier3 수준으로, 자동차 배출가스 기준보다 3~4년 정도 낮은 수준으로 적용이 된다. 이는 자동차 등의 생산량에 비해 규모가 매우 작기 때문에 온실가스 영향도 산업계 대응 기술 수준 등을 고려한 것이다.

이전에는 공정에서 사용되는 오일, 가스 및 기타 공정 물질 등 기체 및 액체 류 등에 대한 규제가 많았으나, 최근에는 EU REACH 등 제품에 들어가는 물질에 대한 규제가 전제품 대상으로 확대되어, 공정 물질 뿐만 아니라 건설기계의 제조에 들어가는 각 부품의 유해성에 대한 규제도 보다 강화되고 있어 제조사들의 적극적인 대응이 더욱 필요한 시점이다.

우리나라에는 볼보건설기계, 두산인프라코어, 현대중공업 등 세계적인 규모의 건설기계 회사가 위치해 있고 시장에서의 점유율과 영향력을 점점 더 확대 해나가고 있으나, 제품의 환경성 등에 대한 이해와 리더십은 해외 선진국의 건설기계 업체 및 경쟁사에 비해 낮은 수준이다.

전과정평가를 건설기계에 적용한 사례는 드물지만 가장 유사한 사례로 지게차에 대한 연구가 있으며 연구내용은 공정별 연구를 통하여 가장 환경부하가 큰 제조공정에 대해 규명하고, 해당 공정에 대해 DfE 기법을 적용하여 친환경적인 제조공정을 설계하도록 하는 것이다. 그 결과 제관 공정 및 도장공정에서의 환경영향이 가장 크게 나타났으며 도장공정의 환경부하를 개선하고자 도료의 개선 및 사용량 절감으로 VOC발생량을 저감하는 효과를 얻을 수 있다.

본 연구는 우리나라 건설기계의 대부분을 차지하는 굴삭기에 대한 제품의 환경성 평가를 실시하여 친환경적인 제품 설계 및 제조 기법 개발에 도움이 되고자 한다.

굴삭기는 제품 특성상 중량이 매우 큰 제품이고 제조 단계에서 소모되는 자원의 양이 다른 제품과 비교할 때 매우 높다. 굴삭기는 생산 단계뿐만 아니라 제품의 사용 목적과 특성상 사용 단계에서 연료를 많이 사용하고 소모 부품이 많은 편이지만 연료의 사용 소모량과 연비, 제품 교환주기 등은 건설기계 제조사별, 건설기계 종류별로 많은 차이가 있기 때문에 객관적인 연구결과를 확인하기 어렵고 특정한 제조사 및 특정한 모델 간의 비교 연구를 통해서 수행될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 굴삭기의 제조공정에 대한 연구를 수행함으로써 공정에 투입되는 물질을 포함한 생산 공정에서의 환경부하를 측정하여, 각 제조 공정별 환경 부하 발생량 및 특성을 분석하고자 한다. 본 연구는 지식경제부 전과정평가 Tool인 PASS ver.4.1.1을 사용하였으며 관련데이터는 건설기계 제조사의 실 데이터를 기반으로 분석하여 수행되었다.

2. 전과정평가 수행

2.1 목적 및 범위 정의

2.1.1 목적 정의

본 연구에서는 국내 건설기계 중 굴삭기 제품 개발자를 대상으로 각 공정별, 사용 물질별 환경부하를 LCA를 통해 정량적으로 평가하고 비교하는 것을 목적으로 한다.

제품제조에 필요한 각종 부품 및 에너지 외 소모품을 근거로 하여, 굴삭기 제조공정에서의 투입물과 산출물을 통해 환경 부하를 측정하며, 제조 공정은 1년 동안 공장 내 생산되는 각 주요 부품의 제조 공정을 고려하고, 기타 수입 및 구매 부품까지 고려하여 평가 및 분석한다.

2.1.2 범위 정의

2.1.2.1 기능 및 기능단위 설정

본 연구의 대상시스템은 굴삭기 제조공정으로 기능은 굴삭기 제조공정이며 기능단위는 굴삭기 단위 톤당 환경영향으로 한다. 굴삭기는 동일 생산라인에서 여러 가지 종류의 굴삭기를 생산하고 중량별로 생산량도 각각 다르기 때문에 정량화된 데이터를 평가하기 위하여 굴삭기를 1톤 생산 및 출하 하는 것으로 기능 단위를 설정하였다. 참고흐름은 기능단위에서 생산계획에 따라 품질 및 성능에 이상이 없는 굴삭기를 생산 및 출하하는 것으로 하였다.

2.1.2.2 시스템 경계

굴삭기 시스템 경계는 원료 채취에서부터 생산, 사용 및 폐기 단계에 이르기 까지 매우 복잡하고 광범위하다. 본 연구에서는 연구의 목적에 맞게 부품 등의 입고에서부터 굴삭기 생산 단계를 거쳐 최종 제품이 출고되는 단계까지를 단위 공정으로 하여 데이터를 수집 및 평가, 분석한다.

생산 단계는 중장비 가공공정, 유압실린더 생산공정, 유압 MVP 생산공정, 구동 감속기 생산공정, 구동 AXLE 생산공정, 중장비 조립 공정, 중장비 도장 공정으로 나누어 분석한다. 각 공정별 연결은 각 공정에서 생산되는 하위 부품들로 구성되어 제품 생산 공정의 흐름 분석이 용이하게 구성하였다.

세부 공정에 대한 도식은 다음의 Fig. 3. 과 같다.

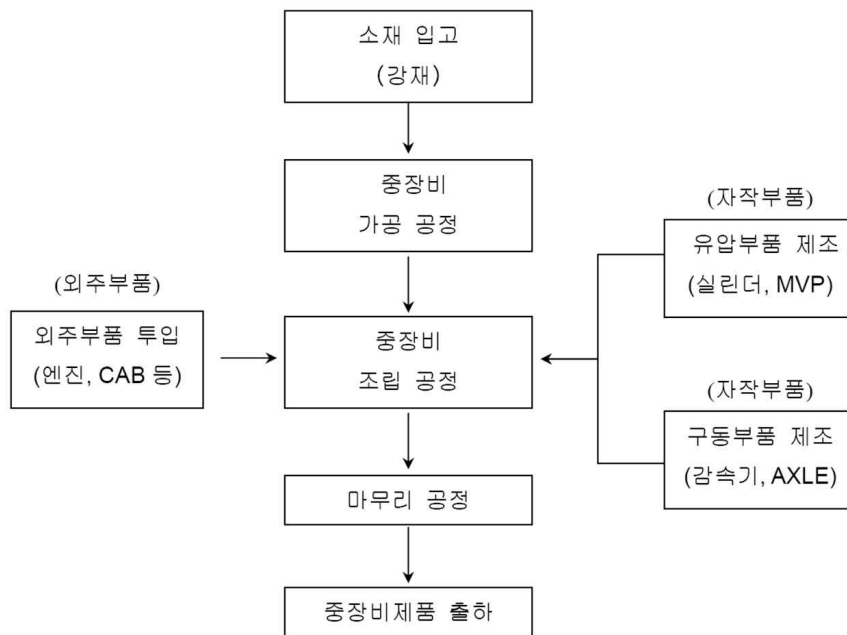


Fig. 3. 굴삭기 공정 시스템

2.1.2.2 할당

본 연구의 경우, 여러 가지 하위 공정이 물리적으로 연결되어 있기 때문에 각 하위 공정별 할당을 할 수 있다. 단, 굴삭기의 종류별 중량이 매우 다르고 그 생산량도 다르기 때문에 분석 단위를 기본 단위인 연간 생산되는 단위 톤으로 하였다. 따라서 각 장비별 생산 부하량을 분석하고자 할 때에는 각 장비별 톤수에 따른 요소를 고려할 수 있다.

2.2 목록분석

2.2.1 데이터 수집 및 계산

데이터 수집은 국내 V사의 구매이력을 통해 투입물질을 수집하였고 배출물은 공정별로 설치된 계량 자료를 통해, 기타 증발량 및 미측정 소모량은 투입물을 고려한 추정치로 계산하였다. 데이터 수집을 위한 세부공정은 Fig. 4와 같다.

수집된 자료 중 대부분은 단일 물질(철)이 차지하고 있고 중량이 매우 크기 때문에 연간 해당 생산을 위한 투입 및 산출물을 기본으로 단위 생산 톤 당 데이터로 변환하여 계산하였다. 공정이 복잡

하고 투입 물질이 많기 때문에 미확인되는 데이터는 전체 공정별 투입물 대비 배출물의 Mass Balance를 기본으로 하여 추정하였다.

수집 데이터의 범위는 전체 중량 대비 99.1% 기준으로 설정하여 Input 데이터는 총 37개 중 9개를 이용하고, 전체 중량 대비 중량이 매우 적어 환경 영향 기여도가 적은 투입물들은 제외하여 평가하였다. 이는 반영된 9개 항목 중에 중량 비중이 큰 금속류 투입물이 많이 함유되어 있기 때문이다.

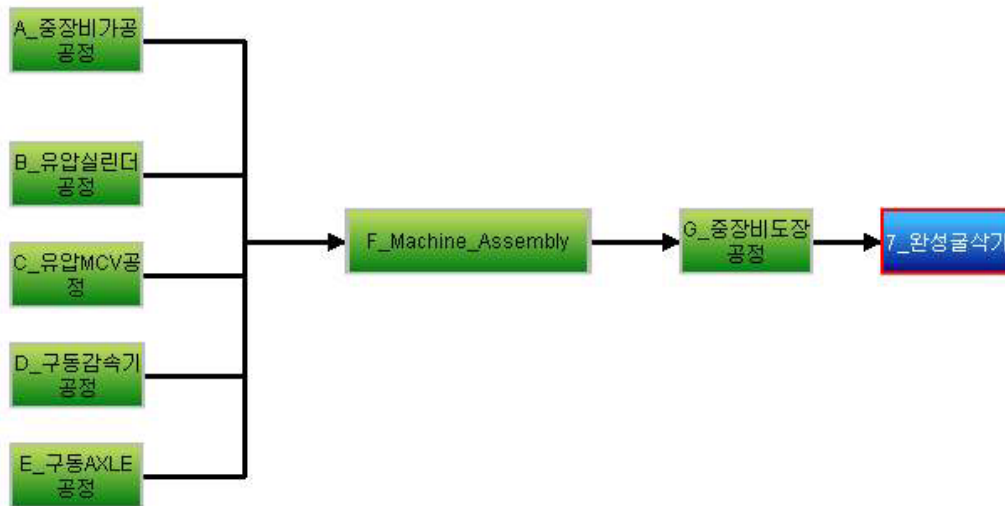


Fig. 4. LCA 자료 수집의 세부 공정

Output 데이터는 총 19개를 전부 이용함으로써 배출물로 인한 환경영향 영향에 대해서는 대부분의 데이터를 모두 활용하였다. 데이터 수집은 가공 공정, 조립 공정, 부품 생산 공정, 도장 및 마무리 공정 등 각 단계별 Life Cycle Inventory를 적용하였다.

가공공정 투입물로는 굴삭기 부품의 주 소재인 철이 주를 이루고 에너지원으로 전기가 사용 되고 있으며, 주요 배출물로는 대기 중 이산화탄소와 증발 소모량으로 인한 배출 및 폐수 처리 공정이 차지하고 있었다.

굴삭기 제조 공정 중 유압 실린더 제조 공정에서 투입물로는 유압 실린더 부품의 주 소재인 철, 공정수로서 상수, 에너지원으로서 전기 이용, 배출물로는 대기 증발 배출 및 폐수 처리 공정 등이다. 굴삭기 제조 공정 중 유압 MCV 제조 공정에서는 주 소재인 철, 공정수로서 상수, 에너지원으로서 전기 이용 등이 있으며 배출물로는 대기 중 증발소모량 및 폐오일 등이다.

굴삭기 제조 공정 중 감속기 등의 제조 공정에서는 투입물로 유압 감속기 부품의 주 소재인 철, 공정수로서 상수, 에너지원으로서 전기 이용 등이 있으며 배출물로는 대기 중 증발소모량, 폐수 처리 공정 등이다.

Axle 등의 제조 공정에서의 주요 투입물로는 Axle의 주 소재인 철, 공정수로서 상수, 에너지원으로서 전기 이용 등이 있으며 배출물로는 대기 중 증발소모량, 이산화탄소의 직접 배출 및 폐수 처리

공정 등이다.

전체 조립 공정에서 투입물로는 각 하위 부품들 외에 굴삭기의 주 소재인 철, 윤활유, 에너지원으로서 전기 및 경유의 이용 등이 있고 배출물로는 폐목 및 종이의 재활용 공정 등이 있다.

굴삭기 제조 공정 중 최종 단계인 도장 및 마무리 공정에서는 투입물로서 세척 등에 사용이 되는 공정수인 상수, 에너지원으로서 전기의 이용, 배출물로는 대기 증발 소모량 및 폐수처리 공정 등이 있다.

각 공정별 투입물 및 배출물에 대한 분석 결과, 전체 공정에서의 투입물질은 제품의 주 소재인 철이 가장 많이 이용되고, 배출 물질은 waste water로서 수자원의 사용과 그 영향이 가장 크게 작용함을 알 수 있다.

본 데이터를 기준으로 각 투입물 및 배출물에 대한 LCI 데이터를 활용하여 전 과정 목록 분석을 수행함으로써 각 단계별, 물질별 환경 영향 평가를 수행할 수 있다. 전과정평가 수행을 위한 기본적인 LCI 데이터베이스는 국내에서 환경부 및 지식경제부에서 개발한 LCI DB를 이용하였고, 폐수처리 공정에 관한 LCI 데이터베이스는 Sigma pro data를 활용하였다. 평가 및 분석을 위한 Tool은 지식 경제부에서 개발한 LCA 소프트웨어 PASS ver. 4.1.1을 사용하였다.

3. 전과정평가 수행 결과 및 해석

3.1 분류화

본 연구는 다양한 관점에서 수행될 수 있으나 그 수행 결과를 굴삭기 제조 공정 전체의 관점에서 비교 및 분석하고, 세부 하위 공정별 각 영향도를 평가하였다. 환경영향 평가 범주로는 자원 고갈(ARD), 산성화(AD), 부영양화(EU), 지구온난화(GW), 인간 독성(HT), 생태 독성(ET), 오존층 파괴(OD), 광화학산화물 생성(POC) 등으로 나누어 결과를 평가 분석하도록 한다.

3.2 특성화 결과 및 해석

3.2.1 자원고갈 영향

자원고갈(ARD: Abiotic Resource Depletion) 영향 범주를 특성화 평가한 결과 장비 조립 공정에서 57%, 중장비 가공 공정이 33%이다. 본 결과의 원인을 물질별로 보면, 소재로 사용한 철의 영향이 93.8%, 경유가 2.5%, 전기가 2.4% 순서이다. 그 이유는 투입물 및 산출물 데이터 수집 결과의 가공 공정 및 조립 공정에서 철의 투입 및 소모량이 가장 많은 비중을 차지하기 때문인 것으로 분석된다.

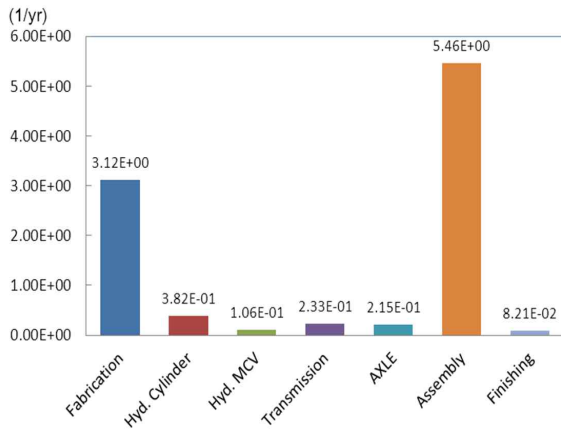


Fig. 5. 공정별 자원고갈 영향

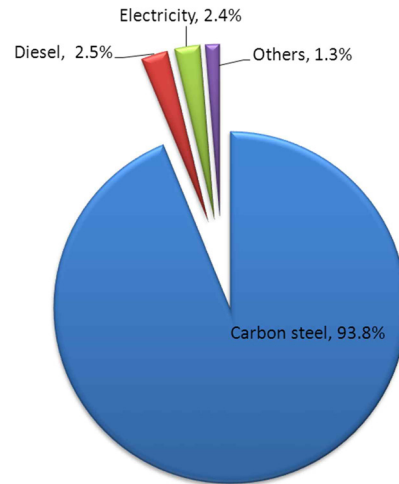


Fig. 6. 물질별 자원고갈 영향

3.2.2 산성화 영향

산성화(AD: Acidification) 영향 범주의 경우 중장비 도장 및 마무리 공정이 전체 공정의 44% 중장비 조립 공정(15%), 가공공정(13%) 등의 순이다. 원인물질로는 공정수의 영향이 44.4%, 폐수처리 공정이 30.0%, 철의 사용이 24.8% 순서로 나타났다. 이는 투입물 및 산출물 데이터 수집 결과 도장 및 마무리 공정에서 많은 양의 용수 사용과 유기 용매 및 세정제 사용, 그리고 그에 따른 폐수 처리 공정에서의 영향으로 분석된다.

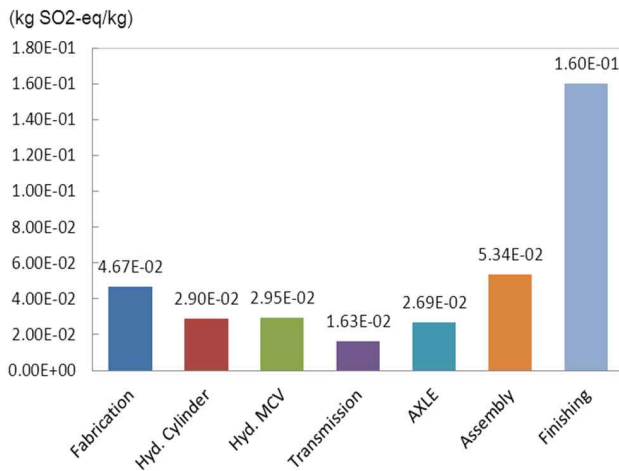


Fig. 7. 공정별 산성화 영향

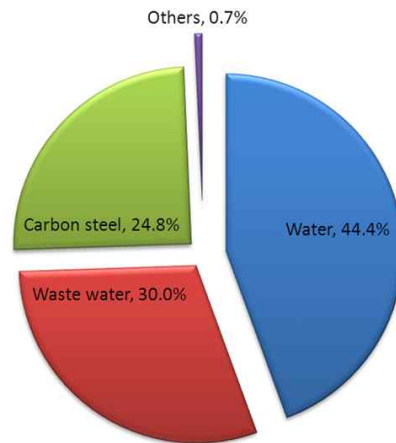


Fig. 8. 물질별 산성화 영향

3.2.3 부영양화 영향

부영양화(EU: Eutrophication)에 대한 영향 범주 평가 결과는 중장비 도장 및 마무리 공정에서 미치는 부영양화 효과가 74%로 대부분을 차지하였다. 원인물질로는 폐수 처리 공정의 영향이 91.0%, 공정수 사용 및 철의 사용이 각 5.3%, 3.6%의 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 도장 및 마무리 공정에서 많은 양의 용수 사용과 유기 용매 및 세정제 사용, 그리고 그에 따른 폐수 처리 공정에서의 영향으로 분석된다.

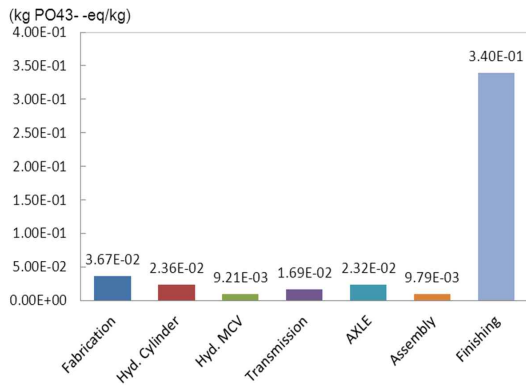


Fig. 9. 공정별 부영양화 영향

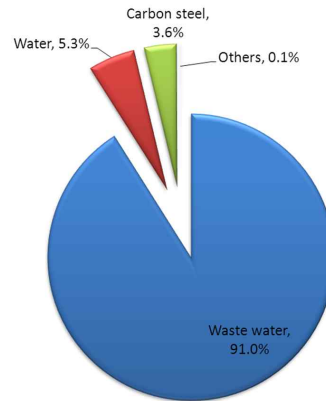


Fig. 10. 물질별 부영양화 영향

3.2.4 지구온난화 영향

지구 온난화(GW: Global Warming) 영향 범주 평가는 중장비 조립(53%), 중장비 가공 공정(33%)의 순서로 높게 나타났으며 그 원인은 소재로서 철의 사용에 따른 영향이 90.9% 전기 사용으로 인한 영향이 3.6%, 공정수 사용이 2.3% 등이다. 조립 공정, 도장 및 마무리 공정에서 철의 사용 및 소모량이 많고 철 생산 시 에너지가 많이 들기 때문으로 분석된다.

즉, 실제 직접적인 온실 가스 배출량에서도 해당 공정들의 영향이 크지만, 소모되는 자원의 양이 많기 때문에 해당 자원 채취 및 부품 제조 공정 등에 사용되는 에너지의 사용량이 많고, 이에 따른 온실가스 배출이 크기 때문인 것으로 분석된다.

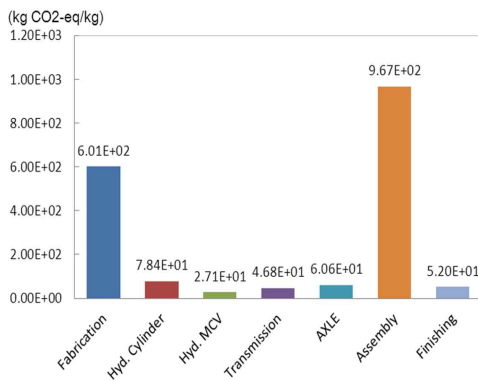


Fig. 11. 공정 별 지구온난화 영향

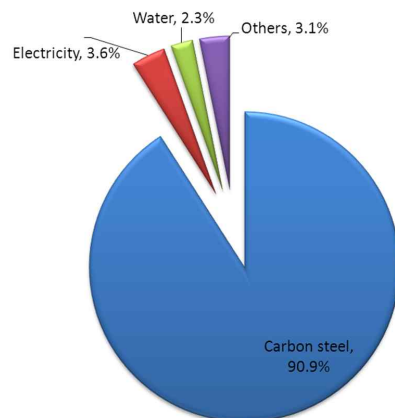


Fig. 12. 물질 별 지구온난화 영향

3.2.5 오존층 파괴 영향

오존층 파괴(OD: Ozone Depletion)의 공정별 영향의 경우 중장비 도장 및 마무리 공정에서 영향이 58%로 가장 크게 나타났다. 그 원인물질로는 폐수 처리에 따른 영향이 71.6%, 철의 사용이 23.8%, 공정수 사용 4.5%로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이것은 도장 및 마무리 공정에서 사용된 용수의 처리시스템에 기인하며 오존층 파괴 물질과 양은 적지만 해당 공정에서 주입이 되는 냉매가스 사용이 큰 영향을 미친 것으로 보인다. 또한 철의 생산 과정에서도 오존층파괴에 영향을 주는 것으로 분석된다.

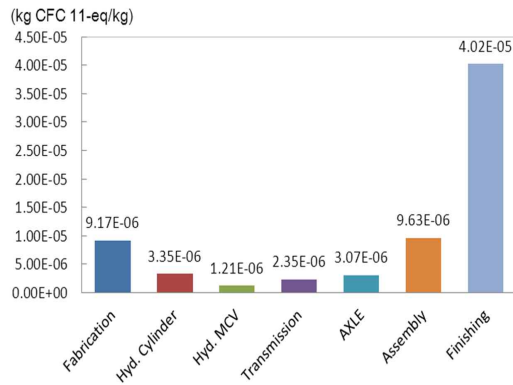


Fig. 13. 공정의 특성화 결과(오존층 파괴)

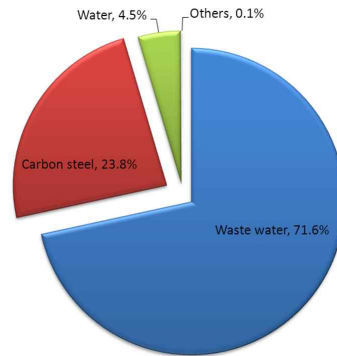


Fig. 14. 물질의 특성화 결과 (오존층 파괴)

3.2.6 광화학산화물 생성 영향

광화학산화물 생성(POC: Photochemical Oxidant Creation)의 공정별 영향은 중장비 조립 및 중장비 가공 공정에서 환경영향이 각각 전체 광화학산화물 생성 요인의 53%, 31%로 가장 크다. 그 원인물질로는 철의 사용이 91.8% 공정수 사용이 5.1%, 폐수 처리공정이 3.6%의 영향을 주는 것으로 나타난다. 이는 조립공정 및 가공공정에서 철의 사용 및 소모량에 따른 영향이 가장 큰 것으로 보아 철 생산 공정에서 발생 및 소모되는 물질의 광화학산화물 생성 영향이 큰 것을 알 수 있다.

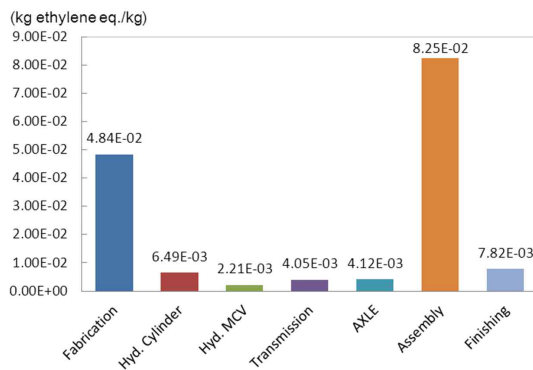


Fig. 15. 공정별 광화학 생성물 영향

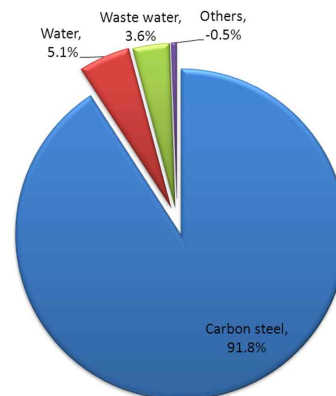


Fig. 16. 물질별 광화학 생성물 영향

3.3 특성화 결과 종합 및 정규화 해석

공정별 특성화 결과 산성화, 부영양화, 오존층 파괴 영향범주에서는 마무리 도색공정의 영향이 가장 크고 그 원인물질은 용수 및 세척제, 유기용매 사용과 폐수처리였다. 그 외 영향범주에서는 조립공정, 가공공정 순으로 높았으며 그 원인은 소재로서 철의 사용에 있다.

전 공정에 대한 정규화 결과 자원고갈의 영향이 $3.86E-01$ kg/person-yr로 50%, 지구온난화의 영향이 $3.31E-01$ kg CO₂-eq/person-yr로서 전체 환경 영향의 43%로서 두 가지 환경 영향 범주에 대한 영향이 가장 크게 나타남을 통해 소재로서 철의 사용에 대한 영향이 주요 원인이며 다음으로 용수사용 및 그로 인한 폐수처리로 발생하는 부영양화의 영향이 $3.50E-02$ kgPO₄-eq/person-yr으로 전체 환경 영향의 5% 수준의 환경 부하에 기여함을 알 수 있다.

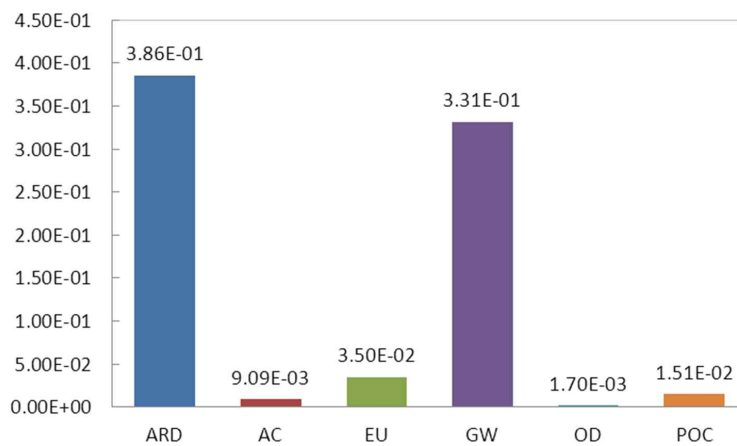


Fig. 17. 굴삭기 공정 환경영향의 정규화 결과

4. 결론

본 연구에서는 건설기계 제조 공정의 대표적인 사례로서 굴삭기의 제조공정의 환경 영향도를 전과정평가로 분석하였다. 이를 통해 굴삭기의 제조공정에서 각 공정별, 환경 영향 범주별 환경 영향을 분석할 수 있었고, 환경영향 개선 요소를 살펴보았다.

환경영향 평가에서 가장 많이 이용되는 6개의 환경영향 범주에 대해 분석 및 특성화한 결과 자원고갈, 지구온난화, 광화학산화물 생성의 환경영향 범주에서는 주로 중장비 조립 및 가공 공정에서의 영향이 크게 나타났으며 원인 물질로는 소재의 대부분을 차지하는 철의 사용에 있었다. 오존층파괴, 부영양화, 산성화의 영향범주에서는 도장 및 마무리 공정에서 환경영향이 크게 나타났으며 그 원인은 용수사용 및 그에 따른 폐수처리로 나타났다.

굴삭기는 중량 제품의 특성상 소재의 사용량이 환경에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 주 원재료인 철의 사용량을 줄이는 것이 필요하다. 철의 사용량을 줄일 수 있는 방안으로는 철 구조물 자체의 구조설계적인 개선 및 철보다 환경 부하가 적은 소재의 개발 등을 추가적으로 연구해야 한다. 특히, 철의 재활용 방안을 수립함으로써 자재 사용 저감으로 인한 환경 부하를 감소시키고 탄소 배출 감

소에도 크게 기여할 것으로 보인다.

또한, 도장 및 마무리 공정에서 주로 사용되는 유기 용매, 도료 및 세척제 등의 사용량을 줄일 수 있는 친환경적인 물질을 개발함으로써 부영양화, 오존층 파괴, 광화학 산화물 발생의 영향을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 건설기계인 굴삭기 제조 공정의 전과정평가를 통해 각 공정에 사용되는 소재의 사용량 및 소재 자체의 중량을 줄이는 소재개발 및 친환경설계가 환경영향에 가장 중요함을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

- 1) 임형석, "LCA기법을 이용한 철도차량 재제조 부품에 대한 환경성평가," 한양대학교 공학대학원 석사학위 논문, (2009)
- 2) 최상원, "전과정평가를 통한 하이브리드차의 환경성 평가," 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사학위 논문, (2007)
- 3) 박광호, 황용우, 박일도, "LCA와 DfE기법을 이용한 친환경적인 지게차 제조공정의 설계," 대한환경공학회지, Vol.27, No.7, pp. 677-685, (2005)
- 4) 백윤아, 문정민, 은종환, 정종식, "자동차의 환경영향 분석을 위한 LCA 연구: 철과 알루미늄 비교," 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, KAIST, pp. 1489~1495, (2003)
- 5) 장한성, "LCA기법을 이용한 휴대폰부품업체의 제조공정 관리 및 온실가스 배출량에 따른 적용성 평가," 금오공과대학교 대학원 환경공학과 박사학위 논문, (2010)
- 6) 김익, "전과정사고를 적용한 환경마크 부여기준의 개발에 관한 연구 : 천기저귀 시스템을 중심으로," 건국대학교 대학원 공업화학과 석사학위논문, (1998)
- 7) 곽종명, 이병국, 전희동, 허탁, "전과정평가기법을 이용한 환경평가에 대한 연구," 한국공업화학회 Vol.1, No.1, pp.150-153, (1997)
- 8) 이재영, "간략화된 전과정평가를 이용한 전동차 대차의 환경영향진단," 한국철도학회논문집, (2005)
- 9) 김용기, 윤희택, 정우성, "철도차량시스템의 전과정평가(LCA)," 한국철도학회 추계학술대회 논문집, Oct. 2004, (2004)
- 10) 홍성준, "자동차 재제조 부품에 대한 환경성평가," 전과정평가학회지 2007 제8권1호, (2007)
- 11) "전과정평가 이론과 실무," 한국환경산업기술원, (2010)