

4대 공작기계 재제조에 대한 LCA 분석을 통한 환경부하 및 온실가스 저감효과 분석

이성원¹ · 박지형² · 박명선³

¹경남테크노파크

²인하대학교 환경안전융합대학원

³인하대학교 글로벌산업환경융합전공

Analysis of Environmental Load and Greenhouse Gas Reduction Effects through LCA of the 4 Major Machine Tool Remanufacturing

Seongwon Lee¹ · Jihyoung Park² · Myoungsun Park³

¹Gyeongnam Techno park

²Program in ET & ST, Inha University Graduate School

³Program in Global Industrial & Environmental Technology Convergence, Inha University

ABSTRACT: The industrial sector that can actively respond to the circular economy is remanufacturing. In the case of machine tools, the need for remanufacturing of machine tools is emphasized because it is expected that waste products will increase before the mechanical life expires due to the change in perception of low carbon energy reduction and the increase in demand for advanced high-precision machine tools due to the development of ultra-precision industry. This study calculated the environmental load and greenhouse gas reduction effects through LCA analysis of the remanufacturing of four major machine tools used throughout the industry, such as grinding machines, planar millers, presses, and lathes, using LCA. Due to the nature of the remanufacturing process, some consumables are replaced or put in to improve quality and function by using the core of the product (or part) after use. In the case of cores used in the remanufacturing process, environmental impacts have already occurred during manufacturing by new manufacturers. In remanufacturing, only the environmental impacts caused by the use of newly input auxiliary materials and energy, excluding cores, occur. As a result of the Midpoint LCA analysis, the amount of reduction in environmental impact for each product remanufactured were 4,439 kg CO₂ eq. per machine based on the global warming impact category during characterization, the planar miller 90,080 kg CO₂ eq., the press 636,390 kg CO₂ eq., the lathe 24,638 kg CO₂ eq., it was found that the reduction of environmental impact was the highest when one press was remanufactured.

Key words: Circular Economy, Remanufacturing, Machine Tools, LCA

요약문: 순환경제에 가장 적극적으로 대응할 수 있는 산업분야는 재제조이다. 공작기계의 경우 저탄소 에너지 저감 인식 변환, 초정밀 산업의 발전에 따른 첨단 고정밀 공작기계 수요 증가 등으로 인해 기계적 수명이 만료되기 이전에 폐 제품화가 증가할 것으로 예상되어, 공작기계 재제조의 필요성 강조되고 있다. 본 연구는 전과정평가(LCA)를 활용하여 연삭기, 플래너 밀러, 프레스, 선반 등 산업 전반에 활용되는 4대 공작기계 재제조에 대한 환경부하 및 온실가스 저감효과를 산출하였다. 재제조 공정은 그 특성상 사용 후 제품(혹은 부품)의 코어를 사용하여 품질 및 기능 향상을 위해서 일부 소모품 등을 교체하거나 투입한다. 재제조 공정에 투입되는 코어의 경우 신제품 제조업체에서 제조 시 이미 환경영향이 발생했기에, 재제조에서는 코어를 제외한 신규 투입되는 부자재 및 에너지 사용에 따른 환경영향만이 발생한다. Midpoint LCA 분석 결과, 각 제품별 재제조에 따른 환경영향 저감량은 특성화 중 지구온난화 영향범주를 기준으로 기계 1대당 연삭기 4,439 kg CO₂ eq., 플래너밀러 90,080 kg CO₂ eq., 프레스 636,390 kg CO₂ eq., 선반 24,638 kg CO₂ eq.으로 프레스 1대 재제조 시의 환경영향 저감량이 가장 높은 것으로 나타났다.

주제어: 순환경제, 재제조, 공작기계, 전과정평가

1. 서론

경제가 발달하고, 사용자의 편의성 증대를 위한 제조활동으로 인해 전 세계적으로 폭발적인 원자재 수요의 증가와 더불어 높은 에너지 소비, 환경 오염, 기후 변화, 자원의

고갈과 같은 중요한 문제에 직면하고 있다. 이러한 문제점들을 해결하지 못하면 재생 불가능한 자원의 공급 부족, 환경 과부하, 원자재 비용 상승 등으로 인한 경제적 부담이 발생하게 되고 이는 곧 국내외 경제 상황을 악화시키는 요인이 될 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 제품

의 설계 단계에서부터 원자재와 에너지의 사용, 환경 유해 물의 배출을 최소화하려는 다양한 혁신이 진행되고 있으며, 동시에 기존 제품이나 부품을 다시 사용하는 순환경제에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 순환 경제는 환경에 영향을 줄이거나 자원의 소비를 늘리지 않으면서 경제 성장을 할 수 있도록 하는 전략으로 근본적인 목표는 기술적, 사회적, 구조적 혁신을 통해 제조 시스템에 대한 개선은 물론, 사람들의 소비 습관에까지 개입하는 적극적인 활동이다. 이러한 순환경제에 가장 적극적으로 대응할 수 있는 산업분야가 바로 재제조이다. 이는 수명이 다한 제품에 대해 높은 부가가치를 창출할 수 있는 산업으로 평가되어 미국, 유럽과 같은 기술 선진국에서 널리 시행되고 있다¹⁾.

재제조 산업은 고장, 폐기, 교환된 물건을 회수해 분해, 세척, 보수, 재조립 공정을 통해 새것과 동등 성능을 구현하는 것을 목표로 하며, 새로운 부품 또는 원자재 생산 과정에서 다른 형태의 자원으로 활용하는 재활용(recycling)이나 일부 수리 과정을 거쳐 다시 사용하는 재이용(reuse)과는 다른 개념을 가지고 있다. 또한 재제조 기술을 통해 표면에 더 높은 내구성 재료를 코팅하거나, 새로운 센서 시스템을 추가하는 등 제품에 새롭고 더 나은 기능을 추가하는 것을 의미한다. 그리고 신품 생산 시 투입되는 에너지와 원재료를 대부분 사용하기 때문에 자원 및 에너지 절감 효과가 우수하다²⁾. 기존 연구에 따르면 재제조는 신제품 제조 대비 자원회수량은 88% 향상되고, 이산화탄소 배출량은 신품의 14% 수준이며, 제품 생산에 투입되는 비용은 신품대비 84% 절감할 수 있는 장점이 있다³⁾.

재제조 산업은 기존의 자동차부품 중심에서 공작기계, 축매 등으로 분야를 확장 중이며, 7,500억 원('10)에서 1

조 원('17) 규모로 7년간 약 30%의 국내시장 성장추세에 있다⁴⁾. 특히 공작기계의 경우 저탄소 에너지 저감 인식 전환, 초정밀 산업의 발전에 따른 첨단 고정밀 공작기계 수요 증가 등으로 인해 기계적 수명이 만료되기 이전에 폐제품화가 증가할 것으로 예상되어, 공작기계 재제조의 필요성 강조되고 있다.

공작기계 재제조는 중고 장비를 매입 후 재제조하거나, 고객으로부터 수리 또는 업그레이드가 필요한 기계를 의뢰받아 재제조 후 공급하는 형태를 취하고 있다. 공작기계 재제조 사업의 경우 코어를 확보하는 것이 주요 사업 제한 요인으로 작용하고 있다. 국내 주요 재제조사의 경우 대리점을 코어회수와 판매 루트로 활용하고 있다. 코어확보에 어려움을 겪는 주요 요인은 공작기계 재제조품의 홍보 부족 및 소비자 인식 부족으로 인한 저조한 회수율을 들 수 있다. 「환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률」에 의하여 수직형 머시닝센터, 선반, 연삭기, 밀링머신, 프레스, 사출성형기, 압출기, 인발·신선기 등 총 8종이 재제조 대상 제품으로 제시되어 있으나, 품질인증기준이 현재 부재한 상황으로 이로 인한 소비자의 신뢰성 확보가 어려운 상황 또한 주요 요인으로 들 수 있다. 본 연구에서는 연삭기, 플래너 밀러, 프레스, 선반 등 산업 전반에서 활용되는 4대 공작기계 재제조에 대한 LCA 분석을 통한 환경부하 및 온실가스 저감효과를 산정하여 재제조 공작기계 품질인증기준 마련에 기여할 수 있도록 하고자 한다.

환경보호의 필요성이 증가하고, 일반 소비자의 환경친화적인 제품을 구입하고 사용하려는 욕구가 증가하면서 기업은 환경친화적인 제품을 소비자에게 공급하려 노력하고 있다. 그러나 동일한 제품 중에서 어느 제품이 환경에

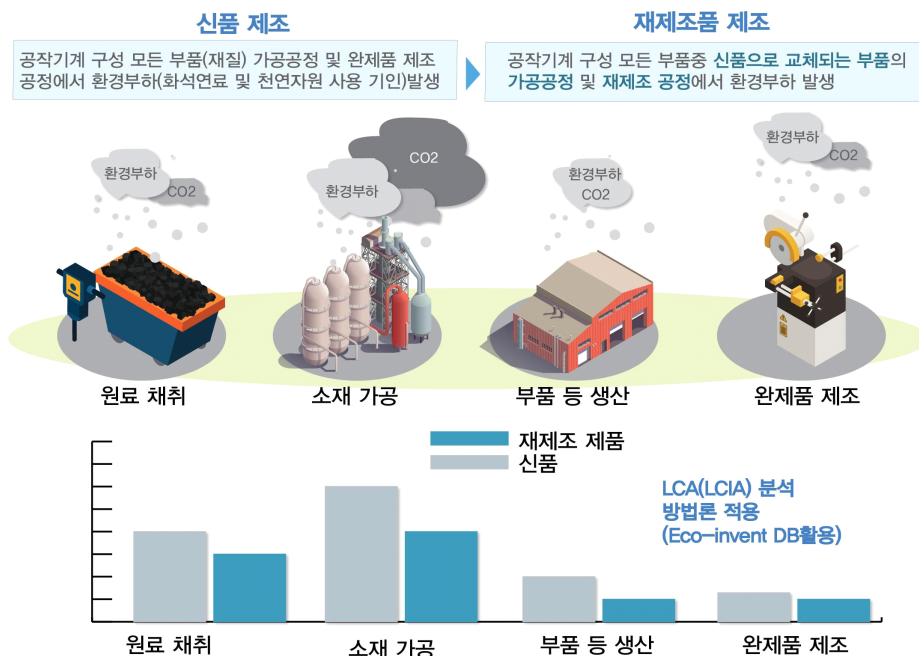


Fig. 1. 본 연구 분석 대상 범위 및 개념.

미치는 영향이 적은 제품인지를 파악하거나, 동일 용도의 대체 제품 중에 어떤 제품이 환경친화적인지를 결정하고 판단하는 것은 매우 어려운 일이다⁵⁾.

동일 기능의 제품이라도 사용하는 원료, 생산 방법, 운송 수단, 사용 방법 및 폐기 방법에 따라 서로 다른 환경영향이 발생하므로 제품의 환경성을 파악할 때는 제품의 전 과정에서 발생하는 환경영향을 총체적으로 평가하여야 할 필요가 있다. 결국, 특정한 제품이나 서비스의 전과정에서 발생하는 환경영향과 자원 및 에너지소비량을 객관적으로 파악할 수 있는 도구가 필요하며, 이러한 요구에 가장 유용하게 이용될 수 있는 LCA(Life Cycle Assessment) 기법이 널리 이용되고 있다⁶⁾.

2. 연구방법

본 연구에서는 공작기계 주요 재제조 제품에 대한 LCA 수행을 통하여 전과정적 환경저감 효과 및 친환경 재제조 제품의 CO₂ 및 자원절감 효과를 분석하고자 한다. 재제조 공정의 경우 그 특성상, 사용 후 제품(혹은 부품)인 코어를 사용하며, 품질 및 기능 향상을 일부 소모품 등을 교체하거나 수입하여 재제조 부품을 생산한다. 따라서 재제조 공정에 투입되는 코어의 경우 신제품 제조업체에서 제조 시 이미 환경영향이 발생하였기 때문에, 그에 대한 책임은 신제품으로 부과되는 것이 타당하다. 재제조 업체에서는 코어를 제외한 신규 투입되는 부자재 및 에너지 사용에 따른 환경

Table 1. Midpoint LCA assessment impact category

구분	단위
ADP (Abiotic Depletion Potential)	자원고갈 1/yr
AP (Acidification Potential)	산성화 kg SO ₂ eq.
EP (Eutrophication Potential)	부영양화 kg PO ₄ ³⁻ eq.
GWP (Global Warming Potential)	지구온난화 kg CO ₂ eq.
ODP (Ozone layer Depletion Potential)	오존층파괴 kg CFC-11 eq.
POCP (Photochemical oxidation Potential)	광화학산화물생성 kg C ₂ H ₄ eq.

Table 2. Machine tool remanufacturing characterization results

공작기계	영향범주	신제품	재제조제품	저감량	단위
연삭기	자원고갈(ADP)	1.77E+01	4.94E+00	1.27E+01	1/yr
	산성화(AP)	2.17E+01	6.08E+00	1.56E+01	kg SO ₂ eq.
	부영양화(EP)	1.25E+01	3.49E+00	8.97E+00	kg PO ₄ ³⁻ eq.
	지구온난화(GWP)	6.17E+03	1.73E+03	4.44E+03	kg CO ₂ eq.
	오존층파괴(ODP)	2.55E-04	7.13E-05	1.83E-04	kg CFC11 eq.
	광화학산화물 생성(POCP)	3.06E+00	8.56E-01	2.20E+00	kg C ₂ H ₄ eq.
플래너 밀러	자원고갈(ADP)	3.13E+02	3.95E+01	2.74E+02	1/yr
	산성화(AP)	3.70E+02	4.68E+01	3.23E+02	kg SO ₂ eq.
	부영양화(EP)	2.18E+02	2.75E+01	1.91E+02	kg PO ₄ ³⁻ eq.
	지구온난화(GWP)	1.03E+05	1.30E+04	9.01E+04	kg CO ₂ eq.
	오존층파괴(ODP)	3.69E-03	4.74E-04	3.22E-03	kg CFC11 eq.
	광화학산화물 생성(POCP)	6.32E+01	7.81E+00	5.54E+01	kg C ₂ H ₄ eq.
프레스	자원고갈(ADP)	3.22E+03	7.93E+01	3.14E+03	1/yr
	산성화(AP)	3.11E+03	7.91E+01	3.03E+03	kg SO ₂ eq.
	부영양화(EP)	1.36E+03	3.75E+01	1.32E+03	kg PO ₄ ³⁻ eq.
	지구온난화(GWP)	6.54E+05	1.77E+04	6.36E+05	kg CO ₂ eq.
	오존층파괴(ODP)	2.16E-02	5.68E-04	2.10E-02	kg CFC11 eq.
	광화학산화물 생성(POCP)	3.75E+02	1.10E+01	3.64E+02	kg C ₂ H ₄ eq.
선반	자원고갈(ADP)	7.53E+01	4.74E+00	7.06E+01	1/yr
	산성화(AP)	9.26E+01	5.85E+00	8.67E+01	kg SO ₂ eq.
	부영양화(EP)	5.28E+01	2.96E+00	4.98E+01	kg PO ₄ ³⁻ eq.
	지구온난화(GWP)	2.64E+04	1.76E+03	2.46E+04	kg CO ₂ eq.
	오존층파괴(ODP)	1.07E-03	5.78E-05	1.02E-03	kg CFC11 eq.
	광화학산화물 생성(POCP)	1.31E+01	7.97E-01	1.23E+01	kg C ₂ H ₄ eq.

영향만이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 코어에 대한 환경영향을 신규제품 사용 대비 재제조품 사용에 따른 환경저감효과로 하여 코어에 대한 LCA를 수행하였다. 본 연구의 분석 대상은 연삭기, 플래너 밀러, 프레스, 선반(10인치) 등 산업 전반에서 활용되는 4대 공작기계로 선정하였다.

영향평가는 목록분석 결과를 이용하여 환경영향 정도를 정량적으로 파악하는 단계로 어떤 영향평가 방법을 사용하는가에 따라 결과해석에 많은 영향을 미치므로 신중히 고려하여야 한다. 본 연구에서는 일반적인 영향평가 수행 절차에 따라 분류화, 특성화, 정규화, 가중화의 4단계에 걸쳐 영향평가를 수행하였으며, Midpoint 평가방식에 따라 각각 분석을 수행하였다. Midpoint LCA 평가 시 사용된 영향평가 방법으로는 산업통상자원부 방법론을 이용하였으며, 범용 S/W인 TOTAL 5.1.0에 수록된 Factor를 적용하였다. 영향범주는 table 1과 같이 LCA 방법론에서 가장 일반적으로 활용되고 있는 6개 영향범주를 사용하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 특성화

특성화 결과는 분류화된 물질에 (식 1)을 이용하여 산정하였으며, 공작기계 재제조의 특성화 결과는 table 2와 같이 산출되었다. LCA 특성화 결과 대상 제품별 신제품 대비 재제조품 온실가스 저감량은 연삭기 4,440 kg CO₂ eq., 플래너 밀러 90,100 kg CO₂ eq., 프레스 636,000 kg CO₂ eq., 선반 24,600 kg CO₂ eq.으로 분석 되었다.

$$C_{ij} = E_j \times X_{ij} \quad (\text{식 1})$$

C_{ij} : 투입 및 산출물 j로부터 발생하는 영향범주 i에 대한 특성화 값

E_j : 투입 및 산출물 j의 질량

X_{ij} : 투입 및 산출물 j의 영향범주 i에 대한 특성화 factor

Table 3. Machine tool remanufacturing normalization results

(단위: Eco-point)

공작기계	영향범주	신제품	재제조품	저감량
연삭기	자원고갈(ADP)	7.09E-01	1.98E-01	5.10E-01
	산성화(AP)	5.45E-01	1.53E-01	3.93E-01
	부영양화(EP)	9.51E-01	2.66E-01	6.85E-01
	지구온난화(GWP)	1.12E+00	3.12E-01	8.03E-01
	오존층파괴(ODP)	6.26E-03	1.75E-03	4.50E-03
	광화학산화물 생성(POCP)	2.97E-01	8.31E-02	2.14E-01
	계	3.62E+00	1.01E+00	2.61E+00
플래너 밀러	자원고갈(ADP)	1.26E+01	1.59E+00	1.10E+01
	산성화(AP)	9.30E+00	1.18E+00	8.12E+00
	부영양화(EP)	1.67E+01	2.10E+00	1.46E+01
	지구온난화(GWP)	1.86E+01	2.35E+00	1.63E+01
	오존층파괴(ODP)	9.08E-02	1.17E-02	7.91E-02
	광화학산화물 생성(POCP)	6.14E+00	7.58E-01	5.38E+00
	계	6.34E+01	7.98E+00	5.54E+01
프레스	자원고갈(ADP)	1.29E+02	3.18E+00	1.26E+02
	산성화(AP)	7.81E+01	1.99E+00	7.61E+01
	부영양화(EP)	1.04E+02	2.86E+00	1.01E+02
	지구온난화(GWP)	1.18E+02	3.20E+00	1.15E+02
	오존층파괴(ODP)	5.30E-01	1.40E-02	5.16E-01
	광화학산화물 생성(POCP)	3.64E+01	1.07E+00	3.54E+01
	계	4.66E+02	1.23E+01	4.54E+02
선반	자원고갈(ADP)	3.03E+00	1.90E-01	2.83E+00
	산성화(AP)	2.33E+00	1.47E-01	2.18E+00
	부영양화(EP)	4.03E+00	2.26E-01	3.80E+00
	지구온난화(GWP)	4.77E+00	3.19E-01	4.46E+00
	오존층파괴(ODP)	2.64E-02	1.42E-03	2.50E-02
	광화학산화물 생성(POCP)	1.27E+00	7.74E-02	1.19E+00
	계	1.54E+01	9.61E-01	1.45E+01

3.2 정규화

정규화 단계는 특성화 단계를 통해 산출된 투입 및 산출물의 특성화 결과값의 상대 비교를 위해 정규화 Factor를 이용하여 단위를 무차원으로 만드는 작업으로 정규화 결과를 산정하는 방법은 (식 2)와 같고 공작기계 재제조의 정규화 결과는 table 3과 같이 산출되었다.

$$N_{ij} = C_{ij} / Y_i \quad (\text{식 2})$$

N_{ij} : 투입 및 산출물 j로부터 발생하는 영향범주 i에 대한 정규화 값

C_{ij} : 투입 및 산출물 j의 특성화 값

Y_i : 영향범주 i에 대한 정규화 factor

해 산출된 투입 및 산출물의 정규화 결과값에 상대적 중요도를 고려한 가중화 Factor를 이용하여 최종환경영향을 산출하며 산정하는 방법은 (식 3)과 같다. 공작기계 재제조의 가중화 결과는 table 4과 같이 산출되었다.

$$W_{ij} = N_{ij} \times Z_i \quad (\text{식 3})$$

W_{ij} : 투입 및 산출물 j로부터 발생하는 영향범주 i에 대한 가중화 값

N_{ij} : 투입 및 산출물 j의 정규화 값

Z_i : 영향범주 i에 대한 가중화 factor

공작기계 재제조할 경우 연삭기 1대당 4.04E-01 Eco-point의 환경영향 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 지구온난화에 대한 환경영향 저감량은 2.31E-01 Eco-point로 나타났다. 플래너 밀러는 1대당 8.45E+00 Eco-point의 환경영

3.3 가중화

가중화는 영향평가의 마지막 단계로 정규화 단계를 통

Table 4. Machine tool remanufacturing weighted results

(단위: Eco-point)

공작기계	영향범주	신품	재제조품	저감량
연삭기	자원고갈(ADP)	1.64E-01	4.58E-02	1.18E-01
	산성화(AP)	1.96E-02	5.50E-03	1.41E-02
	부영양화(EP)	3.62E-02	1.01E-02	2.60E-02
	지구온난화(GWP)	3.21E-01	8.99E-02	2.31E-01
	오존층파괴(ODP)	1.83E-03	5.11E-04	1.32E-03
	광화학산화물 생성(POCP)	1.93E-02	5.40E-03	1.39E-02
	계	5.62E-01	1.57E-01	4.04E-01
플래너 밀러	자원고갈(ADP)	2.90E+00	3.66E-01	2.54E+00
	산성화(AP)	3.35E-01	4.23E-02	2.92E-01
	부영양화(EP)	6.33E-01	7.96E-02	5.53E-01
	지구온난화(GWP)	5.37E+00	6.78E-01	4.69E+00
	오존층파괴(ODP)	2.65E-02	3.40E-03	2.31E-02
	광화학산화물 생성(POCP)	3.99E-01	4.93E-02	3.50E-01
	계	9.67E+00	1.22E+00	8.45E+00
프레스	자원고갈(ADP)	2.99E+01	7.35E-01	2.91E+01
	산성화(AP)	2.81E+00	7.15E-02	2.74E+00
	부영양화(EP)	3.94E+00	1.09E-01	3.83E+00
	지구온난화(GWP)	3.41E+01	9.22E-01	3.31E+01
	오존층파괴(ODP)	1.55E-01	4.07E-03	1.51E-01
	광화학산화물 생성(POCP)	2.37E+00	6.93E-02	2.30E+00
	계	7.32E+01	1.91E+00	7.13E+01
선반	자원고갈(ADP)	6.99E-01	4.40E-02	6.55E-01
	산성화(AP)	8.38E-02	5.29E-03	7.85E-02
	부영양화(EP)	1.53E-01	8.59E-03	1.45E-01
	지구온난화(GWP)	1.38E+00	9.18E-02	1.28E+00
	오존층파괴(ODP)	7.70E-03	4.15E-04	7.28E-03
	광화학산화물 생성(POCP)	8.24E-02	5.03E-03	7.73E-02
	계	2.40E+00	1.55E-01	2.25E+00

향 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 지구온난화에 대한 환경영향 저감량은 4.69E+00 Eco-point로 나타났다. 프레스 1대당 7.13E+01 Eco-point의 환경영향 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 지구온난화에 대한 환경영향 저감량은 3.31E+01 Eco-point로 나타났다. 그리고 선반 1대당 2.25E+00 Eco-point의 환경영향 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 지구온난화에 대한 환경영향 저감량은 1.28E+00 Eco-point로 나타났다.

3.4 연구결과 종합

LCA 특성화 결과 영향범주별 신제품 대비 재제조제품의 저감량은 table 5와 같다. 재제조제품 재제조 시 CO₂ 저감량은 연삭기 4,440 kg CO₂ eq., 플래너 밀러 90,100 kg CO₂ eq., 프레스 636,000 kg CO₂ eq., 선반 24,600 kg CO₂ eq.으로 분석되었다.

재제조 부품별 LCA 가중화 결과는 table 6과 같다. 대상 제품 LCA 분석 결과 신제품 대비 재제조제품 환경영향 저감량은 연삭기 4.04E-01 Eco-point, 플래너 밀러 8.45E+

00 Eco-point, 프레스 7.13E+01 Eco-point, 선반 2.25E+00 Eco-point로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 공작기계인 연삭기, 플래너 밀러, 프레스, 선반(10인치) 총 4개의 기계의 재제조에 따른 환경부하 저감효과를 분석하였으며, 분석방법으로 LCA 분석 기법을 이용하였다. LCA 분석 시, midpoint 접근 방법을 통한 영향범주별 환경부하 분석을 수행하였다.

Midpoint LCA 분석결과, 각 제품별 재제조에 따른 환경영향 저감량은 특성화 중 지구온난화 영향범주를 기준으로 기계 1대당 연삭기 4,439 kg CO₂ eq., 플래너밀러 90,080 kg CO₂ eq., 프레스 636,390 kg CO₂ eq., 선반 24,638 kg CO₂ eq.으로 프레스 1대 재제조 시의 환경영향 저감량이 가장 높은 것으로 나타났다. 이를 온실가스 저감 효과의 가장 일반적인 정량수치인 수목의 온실가스 흡수 효과와 탄소배출권 판매효과로 각 공작기계의 CO₂ 저감

Table 5. Reduction amount by impact category of remanufactured products compared to new products

영향범주	연삭기	플래너밀러	프레스	선반	단위
자원고갈	1.27E+01	2.74E+02	3.14E+03	7.06E+01	1/yr
산성화	1.56E+01	3.23E+02	3.03E+03	8.67E+01	kg SO ₂ eq.
부영양화	8.97E+00	1.91E+02	1.32E+03	4.98E+01	kg PO ₄ ³⁻ eq.
지구온난화	4.44E+03	9.01E+04	6.36E+05	2.46E+04	kg CO ₂ eq.
오존층파괴	1.83E-04	3.22E-03	2.10E-02	1.02E-03	kg CFC-11 eq.
광화학산화물 생성	2.20E+00	5.54E+01	3.64E+02	1.23E+01	kg C ₂ H ₄ eq.

Table 6. Reduced environmental impact of remanufactured products compared to new products

(단위: Eco-point)

영향범주	연삭기	플래너밀러	프레스	선반
자원고갈	1.18E-01	2.54E+00	2.91E+01	6.55E-01
산성화	1.41E-02	2.92E-01	2.74E+00	7.85E-02
부영양화	2.60E-02	5.53E-01	3.83E+00	1.45E-01
지구온난화	2.31E-01	4.69E+00	3.31E+01	1.28E+00
오존층파괴	1.32E-03	2.31E-02	1.51E-01	7.28E-03
광화학산화물 생성	1.39E-02	3.50E-01	2.30E+00	7.73E-02
계	4.04E-01	8.45E+00	7.13E+01	2.25E+00

Table 7. Conversion result of GHG reduction effect of machine tool remanufacturing

(단위: kg CO₂ eq./대)

구분	신제품	재제조제품	저감량	온실가스 저감효과	
				수목(그루)	탄소배출권(원)
연삭기	6.17E+03	1.73E+03	4.44E+03	32	64,366
플래너 밀러	1.03E+05	1.30E+04	9.01E+04	645	1,306,160
프레스	6.54E+05	1.77E+04	6.36E+05	4,557	9,227,655
선반	2.64E+04	1.76E+03	2.46E+04	176	357,251
계	7.90E+05	3.42E+04	7.56E+05	5,410	10,955,432

량을 환산하여 table 7에 나타냈다. 배출 1t CO₂ 상쇄에 필요한 소나무는 7.16그루로 이를 기준으로 공작기계 온실가스 저감효과를 환산한 결과 연삭기 32그루, 플래너 밀러 645그루, 프레스 4,557그루, 선반 176그루의 온실가스 저감효과를 나타내는 것으로 분석되었다. 탄소배출권 판매 효과의 경우 배출권시장 정보플랫폼 기준(2021.6.25, KAU20, 14,500원)으로 환산하였으며 연삭기의 경우 대당 64,366원, 플래너 밀러는 1,306,160원, 프레스는 9,227,655원, 선반은 357,251원으로 분석되어 4대 공작기계 재제조시 1대당 소나무 총 5,410그루, 탄소배출권 판매효과 10,955,432원의 효과를 가진 것으로 분석되었다.

가중화를 통한 전체 환경영향 저감량은 기계 1대당 연삭기 4.04.E-01 Eco-point, 플래너밀러 8.45.E+00 Eco-point, 프레스 7.13.E+01 Eco-point, 선반 2.25.E+00 Eco-point로 분석되었다. 영향범주별로의 기여도 분석결과 지구온난화 영향범주의 저감 기여도가 약 46%~57%로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 자원고갈의 저감 기여도가 약 29%~41%, 부영양화의 저감 기여도가 약 5%~6%로 높게 나타났다.

4개 공작기계의 재제조에 따른 평균적인 온실가스 저감 비율은 신품 대비 약 87.5%이며 최소 72%(연삭기)에서 최대 97.3%(프레스)의 저감 비율을 나타내는 것으로 조사

되었다.

사 사

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008421, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)입니다.

REFERENCES

- 1) Smith, V. M. and Keoleian, G. A., The Value of remanufactured engines : Life-Cycle Environmental and Economic Perspectives, *J. Ind. Ecol.*, 8, 193 ~ 221 (2004).
- 2) Hwang, Y. W etc. Environmental Evaluation for the Remanufacturing of Rental Product Using the LCA Methodology, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(11), 611 ~ 617, 2016.
- 3) 한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터 재제조 효과 <https://www.kncpc.or.kr/resource/remanufacture.asp>.
- 4) 산업부 보도자료('21.10.11)_환경친화적 산업구조로의 전환 촉진에 관한 법률」 개정안 국무회의 의결.
- 5) 김우람, Water footprint 개념을 이용한 가전제품의 수자원사용량 산정에 관한 연구, 인하대학교 대학원, 2011.
- 6) 조현정, 황용우, 박지형, 강홍윤, LCA 기법을 이용한 자동차 재제조 부품 및 토너카트리지 재제조 제품의 환경성 평가, *한국폐기물자원순환학회지* 28(7), 770 ~ 777 (2011).