

낙엽송 인공림 목재 생산임업 전과정평가

차준희, *강경석, *윤여창

(서울대학교 농업생명과학연구원, *서울대학교 산림과학부)

Life Cycle Assessment of Larch Roundwood Production Forestry

Junhee Cha, *Kyungseok Kang, *YOUN Yeo-Chang

(Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

*Department of Forest Sciences, Seoul National University)

ABSTRACT

Energy use and greenhouse gas emissions of Larch roundwood production forestry were analysed using life cycle assessment(LCA). Application of LCA for forestry operations and forest products is a developing field of study in Korea. Larch roundwood production system comprises seedling production, silvicultural operations, felling and logging(log extraction). From the results of life cycle inventory analysis, among various forestry operations, roundwood extraction (hauling and loading of felled roundwood) had about three quarters of the total energy use and GHG emissions. The life-cycle energy use and GHG emissions of roundwood production at forest were $6.921\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ and $94.02\text{MJ}/\text{m}^3$, respectively. The total life-cycle energy use and GHG emissions including roundwood transportation from the forest to the sawmill (roundtrip distance of 150km) were $12.232\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ and $168.76\text{MJ}/\text{m}^3$, respectively. To reduce energy use and GHG emissions in forestry, optimization of wood production and transportation system decreasing fossil fuel use is required.

Key words : LCA, forestry, Larch, roundwood, GHG

요약문

본 논문은 국내 낙엽송 원목생산의 전과정 온실가스 배출량 및 에너지 사용량을 알아보기 위해 수행되었다. 임업 생산활동 및 목제품에 대한 전과정평가(LCA)의 적용은 아직 국내에서 많이 이루어지지 않았다. 양묘장에서의 조림용 낙엽송 묘목의 생산, 임지에서의 조림, 숲가꾸기, 벌채, 반출, 운송 등 생산 공정별 환경영향을 평가하였다. 다양한 산림작업 중, 벌채된 원목의 반출에 따른 환경영향이 가장 크게 나타났으며, 생산된 원목의 가공공장까지의 운송에 따른 환경영향도 많은 부분을 차지하였다. 임지에서 벌채, 반출되어 트럭에 상차된 낙엽송 원목의 전과정 온실가스 배출량은 $6.921\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$, 에너지 사용량은 $94.02\text{MJ}/\text{m}^3$ 으로 평가되었다. 제재소 도착(수송거리 왕복 150km 가정)기준 낙엽송 원목 1m^3 에 내재된 온실가스 배출량은 $12.232\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$, 에너지 사용량은 $168.76\text{MJ}/\text{m}^3$ 으로 평가되었다. 임업부분의 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 줄이기 위해서는 화석연료의 사용을 줄이기 위한 목재 생산 및 수송 시스템의 효율화가 요구된다.

주제어 : 전과정평가, 임업, 낙엽송, 원목, 온실가스

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 전국토의 64%가 산림으로 이루어졌다(산림면적 637만5천ha). 그러나 이용할 수 있는 목재자원이 빈약하고 국산목재의 생산비용이 높아 전체 목재수요량의 약 90%를 수입목재에 의존하고 있다. 그러나 수입목재는 장거리 육상 및 해상운송이 요구되어 국산재에 비해 내재 에너지 사용량 및 온실가스 배출량이 많다. 지속가능한 산림경영을 통해 생산된 목재는 산림을 파괴하지 않고 장기적으로 대기중의 이산화탄소의 농도를 증가시키지 않는 탄소 중립적인 재료이다. 목재를 화석연료 집약적인 소재 즉, 철, 콘크리트, 알루미늄 등의 대체재로 사용한다면 온실가스를 배출저감하는 효과가 발생한다.

산림은 온실가스의 주요한 흡수원(sink)으로 인식되어 주로 산림의 온실가스 흡수효과에 대한 연구가 진행되었다. 이 연구는 전통적인 임업활동인 목재생산임업의 전 과정에서의 물질 및 에너지의 투입에 따른 온실가스의 배출을 알아보기 위해 수행되었다. 연구의 대상은 건축용재로 우수한 성질을 가진 낙엽송(영명: Japanese larch, 학명: *Larix leptolepis*)으로 묘목의 생산, 조림, 숲가꾸기, 수확벌채까지로 산림에서 낙엽송원목 생산까지의 임업(forestry)의 전과정을 포함한다.

2. 연구의 범위 및 방법

2.1 연구 방법

전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)는 어떤 제품이나 서비스의 전과정에 걸친 잠재적인 환경영향을 알아보는 데 유용한 방법론이다(Baumann and Tillman, 2004). 산림에서 조림, 숲가꾸기, 벌채 등 다양한 가지 임업생산 활동을 통해 생산되는 목재는 생산에 소요되는 시간이 짧게는 10년에서 길게는 100년까지로 장기이고, 목재의 생장은 수종, 기후, 토양 등의 자연적인 조건에 영향 받으며, 생산공정은 많은 변화 및 불확실성을 수반하고 있다(예, 산불 또는 병해충의 발생). 우리나라는 소나무, 잣나무, 낙엽송 등 주요한 조림수종에 대해서 생산공정을 표준화 하고 이에 따른 임업생산 활동시 예상되는 수확가능한 목재의 생산량에 대한 통계 및 지침서(국립산림과학원, 2005)가 마련되어 있다.

이 연구는 건축용재로서 우수한 성질을 지닌 국내산 낙엽송 목재의 생산과정에서 투입되는 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 낙엽송 원목 생산 공정별로 알아보았다. 원목(roundwood)생산의 전과정은 양묘장에서의 묘목의 생산, 생산된 묘목(seedling)을 산림에 식재, 풀베기, 가지치기, 간벌, 벌채, 반출 등의 세부공정으로 구분된다.

2.2 시스템경계 및 기능단위

전과정평가(LCA) 연구의 대상은 지속가능한 방식으로 생산되는 국산 낙엽송 원목생산 시스템으로 최종 수확하고자하는 낙엽송 원목의 흉고직경(DBH, Diameter at Breast Height; 25cm, 30cm, 40cm) 및 생산기간(벌기령 40년, 50년, 70년)에 따라 세 개 산림작업시스템을 분석하였다. 전과정목록분석(LCI)을 위한 기준은 1 ha(0.01km²)면적의 생산림 경영활동으로 분석의 기능단위(f.u.)는 수확된(벌채, 반출 및 상차) 낙엽송 원목 1m³이다. 원목생산 시스템은 양묘장에서의 조림용 낙엽송 묘목의 생산과 임지에서의 임업생산 활동 즉, 조림예정지 정리작업, 풀베기, 어린나무가꾸기(Salvage cutting), 가지치기, 간벌(Thinning), 수확(벌채 및 조재), 반출 및 상차 등으로 구분된다. 낙엽송 원목생산 시스템에는 비료, 제초제 등 화학약품, 포장재, 운할유 등의 물질과 기계톱,

트랙터, 백호(backhoe-Woodgrap), 트럭 등 기계장비의 사용에 따른 유류(경유 및 휘발유)가 투입되며, 이에 따른 에너지사용량(MJ) 및 온실가스 배출량(CO₂eq.) 등 환경영향을 분석하였다.

데이터의 수집은 문헌자료(수확표 등)와 낙엽송의 주요 생산지인 강원지역의 실제 산림경영 활동자료(2008년)를 활용하였다. 데이터 적용의 지역적 범위는 한국으로 지속가능한 목재생산 방식이 적용된 현 기술이다.

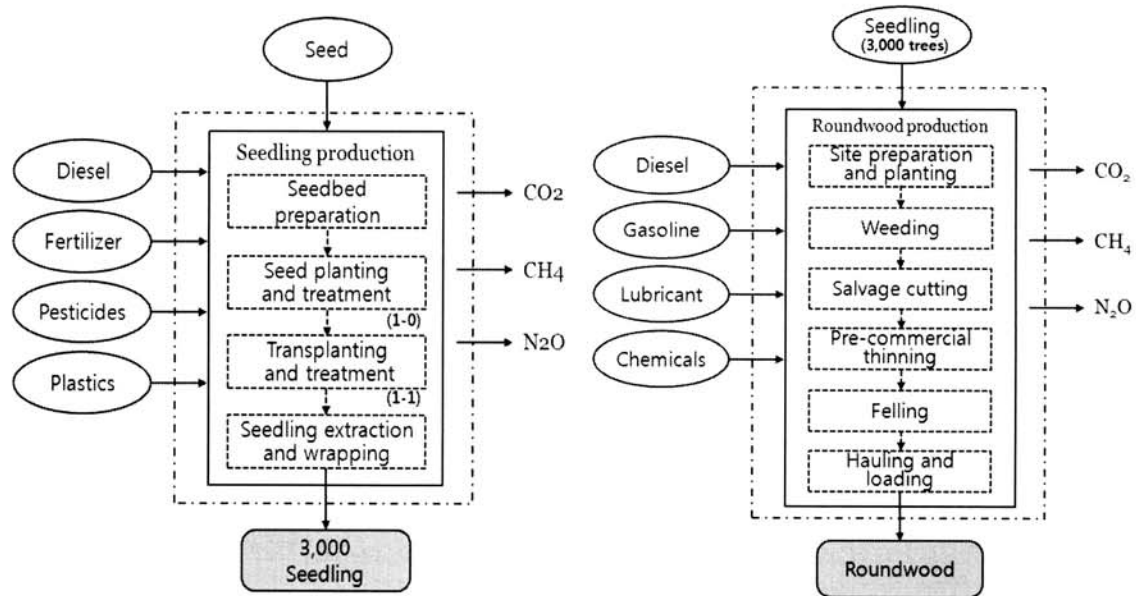


Fig. 1. 낙엽송 목재생산 임업 시스템.

2.2.1 묘목의 생산

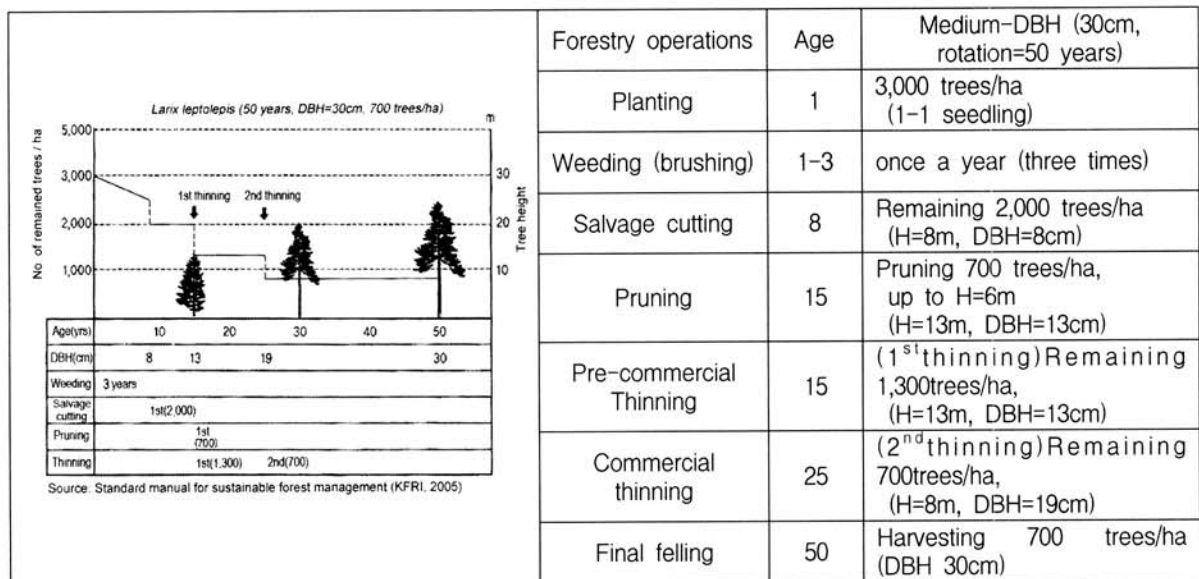
조림용 묘목의 생산은 양묘장에서 집약적으로 생산된다. 낙엽송 묘목의 생산은 파종상 만들기, 파종, 이식(1-0묘), 성묘(1-1묘) 굴취 및 포장/출하의 2년간의 생산과정을 거친다. 낙엽송 인공림의 조림 식재본수는 ha당 3,000본으로, 양묘장에서 묘목 3,000본 생산을 기준으로 비료(N, P, K), 농약(살균제, 살충제), 포장용 끈, 묘포장 내 장비사용에 따른 경유 등 투입물에 따른 온실가스 배출량 및 에너지 사용량을 목록화 하였다. 조림용 낙엽송 묘목 3,000본(Unit) 생산의 온실가스 배출량은 89.65kgCO₂e/Unit, 에너지 사용량은 1,428.7MJ/Unit 으로 계산되었으며, 1톤 트럭을 이용한 산지까지의 운송(왕복 200km)의 환경영향을 포함한 조림용 낙엽송 묘목 3,000본에 내재된 온실가스 배출량은 96.19kgCO₂e/Unit, 에너지 사용량은 1,520.7MJ/Unit 으로 계산되었다.

2.2.2 원목 생산임업

낙엽송은 현재 조림 후 일반적으로 평균 임령 50년에서 벌채가 이루어지고 있다. Table 1. 은 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼(국립산림과학원, 2005)에 따른 우량중경재(흉고직경 30cm) 생산을 위한 벌기령 50년의 낙엽송 원목 생산임업 시스템의 연령별 산림작업내용을 표준화한 자료이다(벌기령 40년 및 벌기령 70년의 작업시스템은 작업 시기 및 회수, 작업량에 차이가 있음). 기계톱 등에 의한 조림예정지 정리작업이 완료되면 양묘장에서 생산된 조림용 낙엽송 묘목(1-1묘)을 운송하여 산지에 식재한다. 식재기준은 3,000본/ha로 일정간격으로 식재한다. 조림후 3년까지는

제초제(glyphosate) 및 예초기(휘발유, 윤활유)에 의한 풀베기를 실시한다. 조림후 8년이 경과하면 죽거나 생육이 불량한 나무를 제거하고 건전목 2,000본만 남기는 어린나무가꾸기를 한다. 조림후 15년이 경과하면 가지치기 및 슈아베기(간벌)를 실시하여 우량목의 생육을 돕는다. 조림후 25년에는 최종 수확될 700본을 남기고 상업적 슈아베기를 실시한다. 어린나무가꾸기나 슈아베기 등의 숲가꾸기 작업에는 기계톱(휘발유, 윤활유)이 보편적으로 사용된다(단, 가지치기는 인력에 의한 방식 적용-고지톱). 최종적으로 벌기령 50년이 되면 목표한 크기의 낙엽송 700본을 벌채한다. 이때 예상 수확량은 417.56m³이다(낙엽송 수확표, 자연고사율, 이용률 적용하여 산출). 어린나무가꾸기, 슈아베기, 벌채에는 기계톱(휘발유, 윤활유)이 이용된다. 벌채한 목재를 반출, 운반하는 데는 경유(diesel)를 사용하는 임업장비(HAM200, Woodgrap) 및 트럭이 사용된다.

Table 1. 낙엽송 원목 생산임업 공정 (수확목 흉고직경 30cm, 벌기령 50년 작업시스템)



출처: 국립산림과학원 (2005), 「지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼」

3. 연구사

LCA를 적용하여 목재생산 및 임업작업에 대한 환경영향을 평가한 연구로는 묘목생산 (Aldentun, 2002; Sonne, 2006), 원목생산(Haas et al., 2000; Berg and Lindholm, 2001; Schwaiger and Zimmer, 2001; Sonne, 2006; González-García et al., 2009), 제재목생산(Milota et al., 2005; Bergman and Bowe, 2008) 등이 있다.

Berg 와 Lindholm(2005)은 스웨덴의 원목생산 임업활동을 조림 및 숲가꾸기, 벌채, 제재소까지의 운송으로 나누어 각 단계별 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 계산하였다. 그 결과 조림(7~8%)에서 벌채 및 반출(30~40%)까지 산림경영활동에서의 환경영향(에너지 사용, 온실가스 배출)보다 원목을 가공공장까지 트럭 운송하는데 따른 환경영향이 더 큰 것으로 나타났다(53~56%). 묘목의 생산에 따른 환경영향은 작은 것으로 나타났다. Schwaiger 와 Zimmer(2001)은 목재의 수확, 반출, 2차 운송에 따른 온실가스 배출량에 대해 분석하였다.

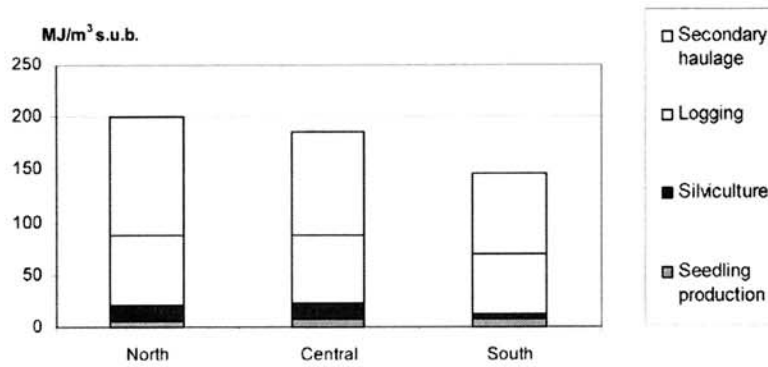


Fig. 2. 스웨덴의 지역별 목재 생산임업 에너지 사용량.

출처: Berg and Lindholm (2005)

이러한 연구들은 주로 스웨덴, 핀란드, 미국 등 임업생산시스템 및 기계화가 진전된 국가들에서 수행되었다. 우리나라도 최근 들어 고성능 임업기계를 이용한 산림작업 비중이 증가하고 있어 생산임업활동에 내재된 에너지사용량 및 온실가스 배출량을 평가하고 온실가스 배출을 효율적으로 저감하기 위해 임업 및 임산업부문에서 LCA 적용이 요구되고 있다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 목재생산 공정별 환경영향

벌기령을 달리하는 세 가지 낙엽송 원목생산 작업시스템에 대해 생산제품(트럭에 상차된 원목)의 전과정(cradle-to-gate) 온실가스 배출량 및 에너지사용량을 각 공정(산림작업)별로 분석하였다. 벌기령별 전과정 온실가스 배출량은 6.580kgCO₂e/m³(벌기령 R=70년), 7.005kgCO₂e/m³(벌기령 R=50년), 7.381kgCO₂e/m³(벌기령 R=40년), 전과정 에너지 사용량은 88.52MJ/m³(벌기령 R=70년), 95.41MJ/m³(벌기령 R=50년), 101.43MJ/m³(벌기령 R=40년)으로 나타났다. 벌기령이 커질수록 목재의 수확량이 커져 원목 1m³ 생산당 환경영향은 줄어들었다. 임목수확표를 통해 도출된 벌기령별 목재수확량(R=40년: 340.99m³, R=50년: 417.56m³, R=70년: 564.42m³)을 기준으로 가중평균한 결과 낙엽송 원목 1m³ 생산에 따른 온실가스 배출량은 6.921kgCO₂e/m³, 에너지 사용량은 94.02MJ/m³로 나타났다.

생산 공정별로 환경영향을 알아본 결과(Fig. 3, Fig. 4), 벌목 후 임업기계에 의한 반출(Hauling and loading)이 전과정 온실가스 배출량의 80.1%, 에너지 사용량의 75.8%로 가장 많은 부분을 차지하였다. 두 번째로 많은 환경영향을 지닌 공정은 기계톱에 의한 벌채 및 조재(Felling and processing) 공정으로 각각 5.7%와 6.8%의 환경영향을 나타냈다. 세 번째의 환경영향은 화약약품 및 예초기에 의한 풀베기(Weeding) 공정으로 각각 4.3%와 5.6%를 나타냈다. 조림에서 벌채까지의 산림작업은 총 온실가스 배출량 1.159kgCO₂e/m³, 에너지 사용량 14.77MJ/m³로 전과정 환경영향의 각각 16.8%와 20.5%를 나타냈다. 양묘장에서의 묘목생산 및 산림까지의 운반(Seedling production) 공정은 전과정 온실가스 배출량의 3.1%와 에너지 사용량의 3.7%로 작은 영향부분을 차지하였다. 따라서 목재생산 임업활동에서 온실가스 배출 및 에너지사용을 줄이기 위해서는 보다 에너지 효율적인 벌채 및 반출(조재 및 집재) 작업시스템의 개발이 중요하다.

Table 2. 낙엽송 원목생산의 공정별 온실가스 배출량 및 에너지 사용량

| | GHG emissions (kgCO ₂ e/m ³) | | | Energy use (MJ/m ³) | | |
|--|---|---------|---------|---------------------------------|---------|---------|
| | R=40 yr | R=50 yr | R=70 yr | R=40 yr | R=50 yr | R=70 yr |
| Seedling production and transportation | 0.282 | 0.230 | 0.170 | 4.46 | 3.64 | 2.69 |
| Site preparation | 0.322 | 0.263 | 0.194 | 5.25 | 4.29 | 3.17 |
| Weeding | 0.383 | 0.313 | 0.231 | 6.80 | 5.55 | 4.11 |
| Salvage cutting | 0.168 | 0.137 | 0.102 | 2.74 | 2.24 | 1.66 |
| Pre-commercial thinning | 0.115 | 0.094 | 0.070 | 1.88 | 1.53 | 1.14 |
| Felling -Commercial thinning | 0.128 | 0.156 | 0.205 | 2.09 | 2.55 | 3.35 |
| Felling -Final felling | 0.382 | 0.266 | 0.099 | 6.23 | 4.35 | 1.61 |
| Log extraction -Commercial thinning | 0.708 | 0.867 | 1.791 | 9.09 | 11.14 | 23.01 |
| Log extraction -Final felling | 4.894 | 4.677 | 3.718 | 62.88 | 60.10 | 47.77 |
| TOTAL (cradle-to-gate) | 7.381 | 7.005 | 6.580 | 101.43 | 95.41 | 88.52 |

Note: R(rotation)=벌기령(year)

4.2 목재 수송에 따른 환경영향

임지에서 생산된 원목은 트럭에 상차되어 수요처인 제재소 등 가공공장까지 운송된다. 원목의 운송에 따른 환경영향 정도를 원목생산에 내재된 환경영향과 비교하였다. 원목의 운송수단은 일반적으로 11톤 트럭으로, 산지에서 가공공장까지의 평균 수송거리와 경유소모량은 낙엽송의 주요 수요처인 대형 제재소(경기도 여주)와 운송업체의 설문을 통해 도출한 150km(왕복)와 경유 0.013 L/m³km (연비 5km/L)를 적용하였다. 이에 따라 산림에서 생산된 원목의 수송에 따른 온실가스 배출량은 5.312kgCO₂e/m³, 에너지 사용량은 74.74MJ/m³로 평가되었으며, 이는 임지에서의 원목생산의 전과정 환경영향(각각 6.921kgCO₂e/m³, 94.02MJ/m³)과 비교하여 각각 76.8%와 79.5%의 환경영향을 가진 것으로 평가되었다. 따라서 가공공장까지 운송된 원목(Roundwood at mill gate)에 내재된 낙엽송 원목의 전과정(cradle-to-gate) 온실가스 배출량은 12.232kgCO₂e/m³, 에너지 사용량은 168.76MJ/m³로 평가되었다(Fig. 3, Fig. 4).

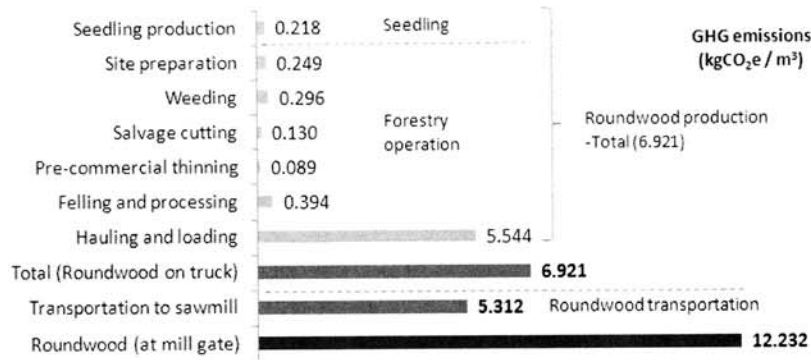


Fig. 3. 낙엽송 원목생산의 공정별 온실가스 배출량.

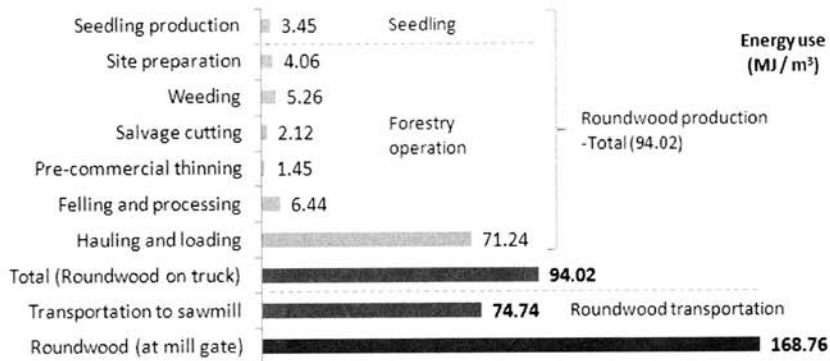


Fig. 4. 낙엽송 원목생산의 공정별 에너지 사용량.

5. 결론

한국의 목재생산 시스템은 과거의 인력위주의 조림 및 수확방식에서 기계톱, 우드그랩(Woodgrap) 등 다양한 임목수확장비의 사용 등 기계화 임업이 일반화 되고 있다. 단위면적(ha) 당 목재수확량은 입지환경에 따라 편차가 크며 산림작업 여건에 따라 적용되는 수확장비의 차이가 발생하기 때문에 임업생산에 따른 환경영향을 정량화하기는 쉽지 않다. 그러나 임목생산의 각 공정별 환경영향 정도를 비교할 때, 대부분의 환경영향은 기계장비를 사용한 임목의 반출 및 상차, 제재소 등 가공공장까지의 트럭운송이 차지하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 기존 임도 시설을 이용하는 경우를 가정하였으며 만약, 목재를 반출하기 위해 임도의 신설이 필요한 경우에는 이에 따른 환경영향은 증가하게 될 것이다.

이 연구는 낙엽송 원목생산시스템에 대한 전과정평가(LCA)를 통해 국산 목재의 임업 생산활동이 지닌 온실가스 배출량 및 에너지 사용량에 대해 산림작업 공정별로 평가하였다. 임업부문은 산림의 보전 및 목재의 이용을 통해 기후변화에 대응할 수 있다. 목재는 화석연료 집약적인 소재(철, 알루미늄, 콘크리트 등)를 대체하거나 바이오매스 열원으로 사용되어 화석연료의 직접연소에 따른 온실가스의 배출을 저감할 수 있다. 그러나 목재의 생산과정에서 임업 기계장비의 사용 또는 생산된 원목, 목재의 수송과정에서는 화석연료를 사용하게 되어 온실가스를 배출시킨다. 목재 생

산과정에서 온실가스의 배출과 에너지 사용을 줄이기 위해서는 에너지 효율적인 목재생산 시스템의 개발(조립 및 벌채계획, 장비의 운용), 효율적인 목재의 유통체계화(목재의 생산, 소비, 유통 거리의 단축), 바이오매스의 수확 및 이용량 증대(숯가꾸기 산물의 이용 등)가 필요하다.

사 사

본 연구는 산림청 지원으로 수행하는 「기후변화 대응 산림정책 연구개발사업단」(연구과제번호: S210910L010110)의 연구비 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼, 국립산림과학원(2005).
- 2) Aldentun, Y., Life cycle inventory of forest seedling production - from seed to regeneration site, J. of Cleaner Production 10(2002):47-55(2002).
- 3) Baumann, H. and Tillman, A.M., The Hitch Hiker's Guide to LCA, An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application, ISBN 9144023642, Studentlitteratur, Lund, Sweden(2004).
- 4) Berg, S. and Lindholm, E., Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden, Journal of Cleaner Production, 13(1): 33-42(2005).
- 5) Bergman, R. and Bowe, S., Environmental impact of producing hardwood lumber using life-cycle inventory, Wood and Fiber Science, 40(3): 448-458(2008).
- 6) González-García, S., Berg, S., Feijoo, G. and Moreira, M., Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies, The International Journal of Life Cycle Assessment, 14(4): 340-353(2009).
- 7) Haas, G., F. Wetterich, and U. Geier, Life cycle assessment framework in agriculture on the farm level, Int. J. Life Cycle Assessment 5(6):345-348(2000).
- 8) Milota, M., West, C. and Hartley, I., Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production, Wood and Fiber Science, 37: 47-57(2005).
- 9) Schwaiger, H., and Zimmer, B., A comparison of fuel consumption and greenhouse gas emissions from forest operations in Europe, Eur. For. Inst., Joensuu, Finland(2001).
- 10) Sonne, E., Greenhouse Gas Emissions from Forestry Operations: A Life Cycle Assessment, J. of Environmental Quality 35(2006):1439-1450(2006).