

수종별 벌채부산물의 압축 변형 특성

오재현¹ · 최윤성¹ · 김대현^{2*}

¹국립산림과학원 산림생산기술연구소, ²강원대학교 바이오시스템공학과

Compressive Deformation Characteristics of Logging Residues by Tree Species

Jae Heun Oh¹, Yun Sung Choi¹ and Dae Hyun Kim^{2*}

¹Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-498, Korea

²Department of Bio-Systems Engineering, Kangwon National University, ChunCheon 200-170, Korea

요약: 본 연구에서는, 수종별 벌채부산물의 압축 변형 특성을 규명함으로써 벌채부산물을 압축할 수 있는 장비의 개발을 위한 기초자료로 사용하고자 하였다. 만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 이용한 압축재하 시험장치로 벌채부산물의 3회 반복 압축-변형 특성시험을 통해 수종별 벌채부산물의 목표밀도 압축에 필요한 소요압축력을 구하였다. 리기다소나무(*Pinus rigida*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 신갈나무(*Quercus mongolica*)의 반복 압축 시 응력-변형률 자료를 기반으로 지수함수 형태로 모델화한 것의 물리적 특성 값을 분석한 결과, 목표밀도 350 kg/m³과 400 kg/m³ 모두 벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력계수는 압축횟수가 늘어나면서 줄어드는 경향을 나타냈으며, 반대로 변형률 계수는 늘어나는 경향을 나타냈다. 모델화를 통해 압축횟수가 증가할수록 압축에 요구되는 소요응력은 줄어들고, 변형률 변화에 비해 응력증가가 커지는 특성이 있으므로, 적절한 초기 압축력이 벌채부산물의 목표밀도 달성에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

Abstract: The aim of this study was to provide the basic design parameters for developing logging residue compression machines by investigating compressive deformation characteristics of different types of logging residues. To achieve these objectives, *Pinus rigida*, *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* were selected as specimens, and compression-deformation tests by UTM(universal testing machine) were conducted. The experimental dataset were used to set up the model based on the compression-deformation ratio in the form of exponential function. The results showed that stress coefficient in terms of mechanical properties of logging residues was decreased, whereas strain coefficient tended to be increased as the number of compression increased at target density of 350 kg/m³ and 400 kg/m³. The model presented that the required stress was decreased as the number of compression increased, and the stress growth rate was swelled compared to the change of the deformation rate. Therefore, it showed that proper initial compression force was a significant variable in order to achieve the target density of logging residue.

Key words: stress-strain, logging residues, bundler, forest machine

서론

최근 탄소흡수원 확충과 산림바이오매스 활용 촉진을 규정된 녹색성장기본법이 제정되어 산림자원의 에너지활용 기반 구축을 위해 숲가꾸기 산물수집을 확대하고 목재 펠릿 제조기반을 마련하고 있다. 또한 2012년 신재생에너지 의무할당제(RPS: Renewable Portfolio Standards) 시행 등으로 인한 부족해진 목질원료를 확보하기 위해 전목수

확시시스템을 통한 미이용 벌채부산물(초두부, 가지 등)을 활용하는 방안들이 고려되고 있다. 그러나 벌채부산물은 일반적으로 원목 밀도의 25% 이하로 목재생산 공정에 있어서 운반, 수집, 상하차 작업 시 낮은 밀도로 인해 작업 생산성이 떨어지며 톤당 처리비용이 증가하는 결과를 초래한다고 보고되고 있다(McDonald et al., 1994). 벌채부산물의 압축은 농업용 벧짚 베일과 비슷한 형태로 1990년대 중반에 이미 소개가 되었으며(Andersen and Brunberg, 1996), 벌채부산물을 효과적으로 압축할 수 있는 번들러(Bundler)가 소개된 이후 스칸디나비아에서 성공적으로 적

*Corresponding author
E-mail: daekim@kangwon.ac.kr

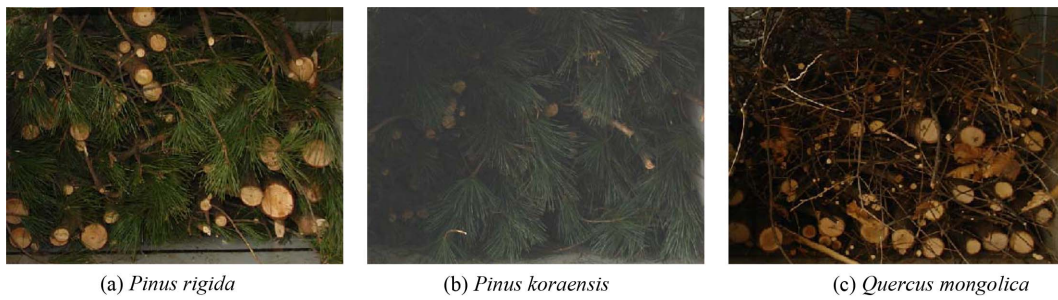


Figure 1. Used logging residues specimens by tree Species in compression and deformation test.

용되어 매년 에너지 생산을 위해 번들(CRLs : Composite Residue Logs)을 생산하고 소비되고 있다(Timperi, 2003).

벌채 후 발생하는 가지나 초두부의 경우 산물밀도가 낮기 때문에 운송 시 효율을 높이기 위해 산물밀도에 따른 벌채부산물을 압축 또는 파쇄 하여 운송하는 것이 더 바람직하다. 목질원료 잣나무 벌채부산물의 산물밀도를 산출하기 위해 무게를 측정, 굴삭기를 이용하여 현장에서와 같은 조건으로 토장에 집적한 후 산물밀도를 측정한 결과 약 160 kg/m^3 로 나타났고(Oh, 2011), 목재칩의 산물밀도는 고정식 목재파쇄기의 경우 $200\sim 310 \text{ kg/m}^3$ 이며, 이동식 목재파쇄기의 경우 $180\sim 240 \text{ kg/m}^3$ 으로 나타났다(Hwang et al., 2009). 이와 관련된 연구로 목재의 압축변형 하에서 응력이완에 대한 이론 연구를 통해 계수를 산출하여 검증하는 연구를 수행하였고(Sang and Chun, 1998), 재선충 피해목을 활용하기 위해 유압식 만능강도 시험기를 사용하여 압축강도를 예측하는 연구를 수행하였고(Byeon et al., 2008), 압축-변형 특성 규명에 관한 선행 연구로 일본에서는 편백나무 벌채 후 발생한 부산물을 와이어로프를 이용하여 압축시켜 와이어의 장력과 단면적 변화의 관계를 측정하고 압축 전·후에 대한 체적의 용적축소율에 관한 연구를 수행하였다(Imai, 2006).

일반적으로 번들장비를 활용하여 생산된 압축번들은 원목보다는 밀도가 낮으나 목재칩 보다 밀도가 높고 약 400 kg/m^3 이상의 밀도를 가지고 있어 목재칩의 경우보다 약 1.8배 밀도가 큰 것으로 알려져 있다(Oh, 2011). 그러나 번들의 경우 원통형으로 적재 시 공극을 고려할 때 실제로는 목재칩에 비해 1.2~1.5배 정도 운송효율을 높일 수 있을 것으로 예상되며 벌크한 상태와 비교했을 경우는 3배 이상의 운송효율이 높아질 수 있는 것으로 판단된다(Oh, 2011).

따라서, 본 연구에서는 만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 이용한 압축재하 시험장치로 벌채부산물의 3회 반복 압축-변형 특성시험을 통해 수종별 벌채부산물의 목표밀도 압축에 필요한 소요압축력을 구하고, 이를 바탕으로 벌채부산물 압축화 장치 설계 시 실린더 선정을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

본 연구에서의 공시재료 벌채부산물의 3종류로 침엽수는 인공림 면적의 약 50%를 차지하고 있으며 간벌수확 및 주벌수확대상 수종 중 비교적 벌채부산물량이 많은 리기다소나무와 잣나무를 선정하였으며, 활엽수는 우리나라의 활엽수 중 분포범위가 가장 넓고 성장도 비교적 빠른 향토수종으로서 최근 들어 가공기술의 발달로 수요가 급속하게 늘어나고 있는 참나무 중에서 신갈나무를 선정하여 시험하였다(Figure 1).

3종류의 벌채부산물은 경기도 남양주시와 포천시에 걸쳐있는 국립산림과학원 광릉시험림에서 2월 중에 간벌작업을 통해 수확한 것으로 현장작업을 통해 원목은 사용하지 않고 가지 및 초두부만을 이용하였다. 신갈나무의 경우는 시험을 위해 별도로 작업하여 확보하였다. 현장에서 채취한 3종류의 벌채부산물 시료는 가지의 직경별 함수율과 잎의 함수율, 가지의 크기분포 등을 측정하여 압축전의 초기특성을 파악하도록 하였다.

2. 연구방법

1) 벌채부산물 압축용 장치의 구성

Figure 2와 같이 벌채부산물의 압축력을 가하기 위하여

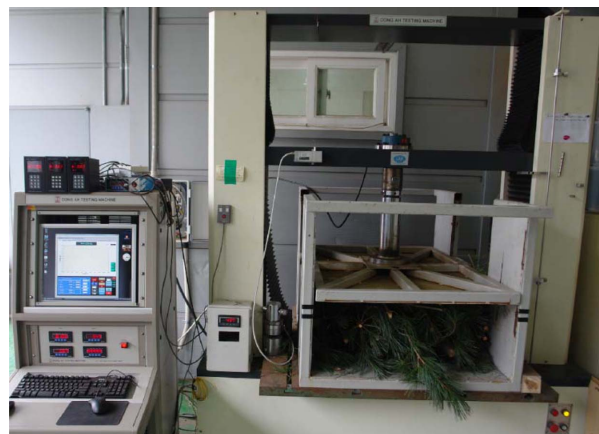


Figure 2. Universal testing machine.

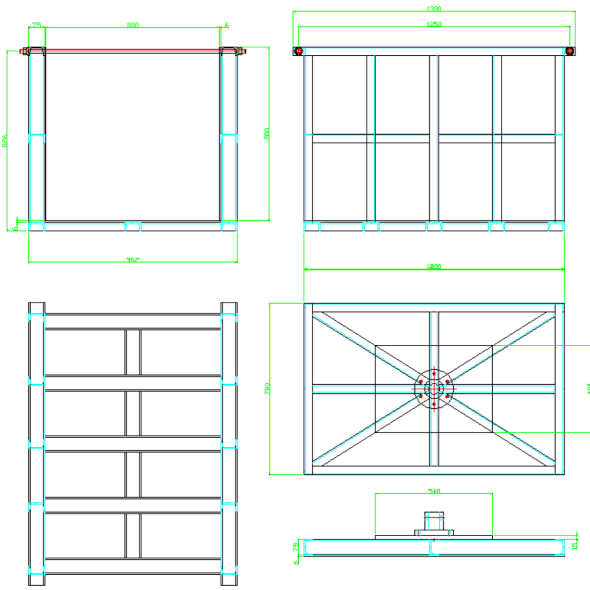


Figure 3. Logging residue compress zig.

50 kN 용량의 로드 셀이 장착된 압축재하 시험장치를 사용하였다. 압축력 및 재하속도를 조절하기 위해 별도의 프로그램을 사용하였으며 압축 및 인장 기능을 이용하여 재료의 압축·이완을 반복하도록 하였다.

또한, 벌채부산물을 압축하기 위한 별도의 지그(zig)를 Figure 3과 같은 제원으로 설계·제작하여 일정면적 (0.6×0.8 m)의 압축판이 수직으로 벌채부산물을 압축재하하도록 하였으며 실제 고려하고 있는 압축기구와 마찬가지로 압축 재하중에 측면으로 재료가 변형되어 형태를 잃어버리지 않도록 고려하였다. 시험 중의 압축력과 변위는 장착된 로드 셀(5 ton, BONGSHIN, Korea)과 변위센서(1250 mm, ASM.)를 통해 측정하였으며 측정된 신호는 앰프를 통해 증폭된 후 4~20 mA의 전류로 출력되어 자료수집장치(EDS400A, Kyowa, Japan)를 통해 저장되도록 하였다.

2) 벌채부산물 압축시험 방법

벌채부산물의 압축·변형 특성 시험은 설계할 벌채부산물 압축결속장비의 압축 메커니즘을 상하좌우 롤러에 의한 1차 압축, 5절 링크에 의한 2차 압축, 그립에 의한 3차

압축으로 3회에 걸친 압축이 반복되기 때문에 만능재료시험기의 압축-인장 기능을 이용하여 총 3회의 압축-인장이 반복되도록 하였다. 시험 전에 벌채부산물 압축리그 (0.6×0.8×0.65 m)의 정해진 공간 0.312 m³에 일정량 47 kg의 벌채부산물을 넣어 일반적으로 야적된 벌채부산물의 산물밀도인 150 kg/m³을 초기상태로 유지하도록 하였다. 이후 압축과정에서 목표밀도인 350 kg/m³ 및 400 kg/m³이 되는 시점까지의 압축력 및 변위를 각각 수종별로 3회 반복하여 측정 분석 하였다.

결과 및 고찰

1. 벌채부산물 시료의 특성

1) 수종별 함수율

벌채부산물의 압축재하 시험에 사용한 리기다소나무의 벌채부산물은 수확 후 현장에서 바로 채취한 것으로 비교적 함수율이 높은 특성을 나타내고 있다. 직경이 커질수록 함수율이 높은 경향을 나타내었으며 평균 52.7%(wb)의 함수율을 나타냈으며 잎의 경우 평균 55.3%(wb)의 함수율을 보였다(Figure 4). 잣나무의 경우 현장에서 벌채한 후 약 10일이 경과한 상태에서 채취하여 함수율을 측정한 것으로 리기다소나무 보다는 전체적으로 함수율이 낮아 현장에서 약간 자연건조가 된 것으로 판단된다. 특히 직경이 40 mm 이상인 것은 함수율 측정부분의 목재가 대부분 심재로 다른 가지에 비해 직경이 굵음에도 불구하고 함수율이 낮게 조사되었다. 전체적인 평균 함수율은 36.8%(wb)로 리기다소나무 보다는 낮았으며 잎의 경우에는 평균 56.2%(wb)로 높은 함수율을 나타냈다. 리기다소나무와 마찬가지로 잣나무의 경우는 침엽수로 온도가 낮은 초봄에도 토양이 해동되어 뿌리로부터 일부 수액의 이동이 있는 것으로 판단된다. 신갈나무의 평균 함수율은 36.3%로 잎의 경우는 현장수확 시 거의 떨어져나가서 고려하지 않았으며, 직경이 작을수록 함수율이 낮은 경향이 보이나 전체적으로 큰 차이를 나타내지는 않았다. 같은 시기에 수확하여 측정하였음에도 불구하고 침엽수의 경우보다 활엽수의 함수율이 낮은 것은 목재 자체가 가지고 있는 수분통로의 비율이 활엽수보다는 침엽수가 더 많아

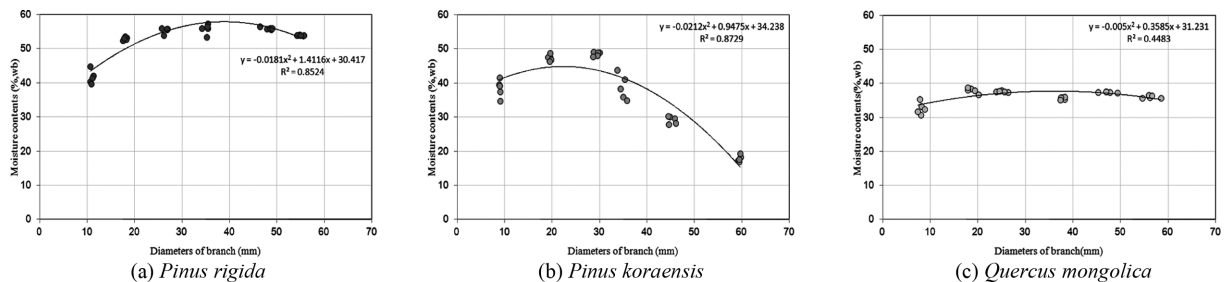


Figure 4. Moisture content by tree species and branch diameter.

같은 조건에서 목재가 가지는 함수율이 차이가 있는 것으로 판단된다.

2) 수종별 공시재료의 직경별 분포 특성

벌채부산물의 압축재하 시험에 사용한 벌채부산물의 직경별 분포를 Figure 5에 나타냈다. 리기다소나무의 경우 대부분 60 mm 이하의 가지가 대부분이며 1~3회 압축실험은 목표밀도 350 kg/m³의 경우로 목표밀도 400 kg/m³의 실험인 4~6회의 경우보다 직경 40 mm 이하의 가지가 비교적 많이 분포되어 있다. 잣나무의 경우도 리기다소나무와 마찬가지로 목표밀도 350 kg/m³인 1~3회의 경우 목표밀도 400 kg/m³의 시험인 4~6회의 경우보다 직경 40 mm 이하의 가지가 비교적 많이 분포되어 있다. 전체적으로 리기다소나무에 비해 잣나무 가지의 개수가 많은 것으로 보아 직경이 작을 것으로 판단되며 이는 압축재하 실험 시 직경이 큰 재료가 있는 경우보다 공극이 적어 압축에 소요되는 힘이 더 많이 요구될 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다. 신갈나무의 경우는 리기다소나무와 잣나무의 경우보다 직경 20 mm 이하의 가지 분포가 많은 것을 알 수 있으며 4, 5회의 경우는 직경이 작은 가지가 더 많

은 것으로 분석되어 목표밀도 400 kg/m³ 시험의 경우 더 많은 소요압축력이 요구될 것으로 예상된다.

2. 수종별 응력-변형률 특성

수종별 벌채부산물의 응력-변형률 특성을 분석한 결과 스트레인 증가에 따라 벌채부산물의 압축력에 대한 응력은 지수 함수적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서의 응력-변형률에 대한 모델은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다(식 1).

$$\sigma(\epsilon) = a \cdot e^{b \cdot \epsilon} \tag{1}$$

where, $\sigma(\epsilon)$ = 응력(N/m²), a=벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력계수(N/m²)

b=벌채부산물 기계적 성질에 따른 변형률 계수, ϵ =변형률

1) 리기다소나무

리기다소나무 벌채부산물의 압축 목표밀도를 350 kg/m³로 설정하고 만능재료시험기로 압축했을 때 목표 밀도까지의 압축특성을 Figure 6에 나타냈다. 각각은 1차에서 3차 압축을 3종류의 시료에 대해서 3회 반복하는 동안 응

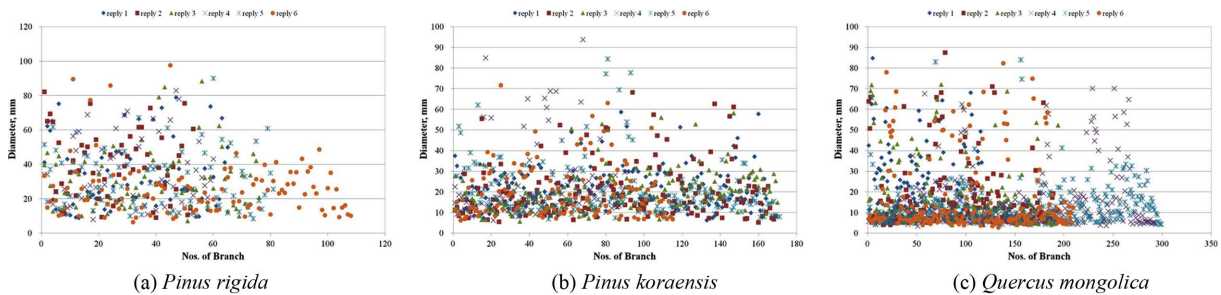


Figure 5. Diameter distributions of logging residue branch by tree species.

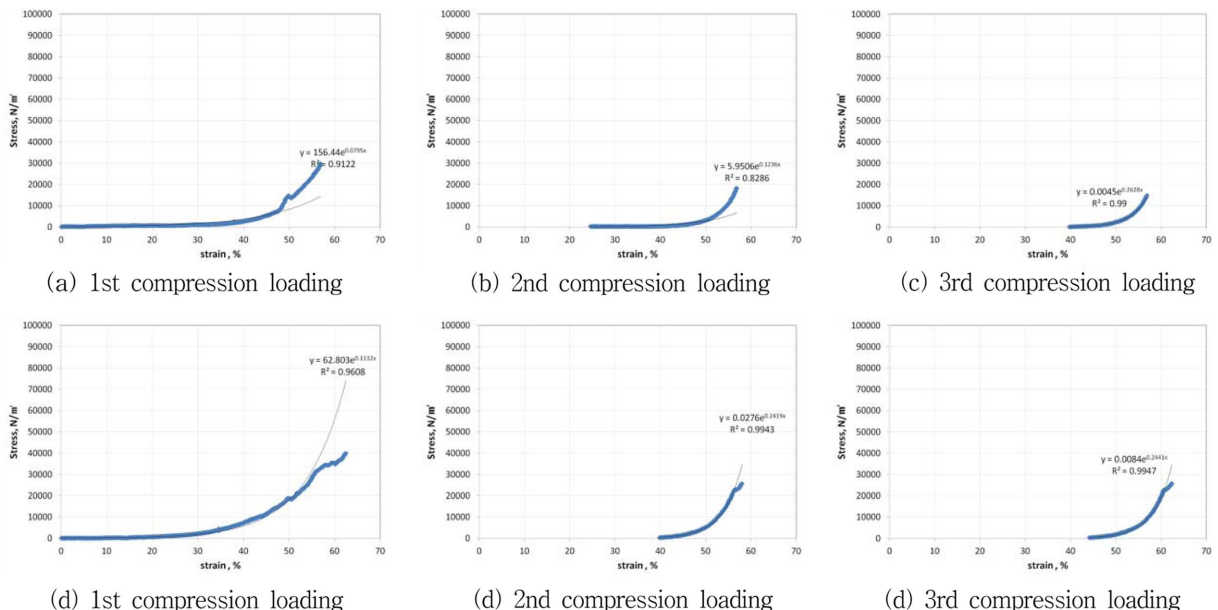


Figure 6. Stress-strain relation by compression loading times for *Pinus rigida*. (a~c:350 kg/m³, d~f:400 kg/m³)

Table 1. Stress-strain coefficients *Pinus rigida* of logging residue by compressive target density.

Compressive target density									
350 kg/m ³					400 kg/m ³				
Replication No.	Compression times	a	b	R ²	Replication No.	Compression times	a	b	R ²
1	1st	16.352	0.1448	0.9539	4	1st	8.8655	0.1077	0.6459
2		2.7356	0.1442	0.7921	5		79.847	0.113	0.9878
3		156.44	0.0795	0.9122	6		62.803	0.1132	0.9608
1	2nd	0.1376	0.2260	0.9471	4	2nd	5.9506	0.1236	0.8286
2		0.0036	0.2569	0.9341	5		0.0104	0.2482	0.9539
3		5.9506	0.1236	0.8286	6		0.0276	0.2419	0.9943
1	3rd	0.0103	0.2624	0.9971	4	3rd	6.0645	0.2628	0.9900
2		0.0006	0.2836	0.8489	5		0.0019	0.2729	0.9743
3		0.0045	0.2628	0.9900	6		0.0084	0.2441	0.9947

력-변형을 관계로 표시하였다. 1차 압축의 경우 약 50~60%의 변형을 구간이 목표밀도에 접근하는 변형율로 실제 응력은 25,000~30,000 N/m³ 이 소요되는 것으로 나타났으며, 지수함수에 의한 예측 모델에서는 반복실험에 대한 예측 응력이 다소 크게 변화하는 것으로 나타났다. 1차 압축 후 만능재료시험기의 크로스헤드를 상승시켜 벌채부산물의 압축력을 이완시킨 후 2차 압축한 결과 약 25%의 변형을 구간부터 응력이 발생하는 것으로 보아 1차 압축 후 소성 변화가 생긴 것으로 판단할 수 있다. 목표밀도 350 kg/m³의 3차 압축 경우는 목표밀도까지 소요되는 응력이 1, 2차 보다 낮아졌으며 2차 압축시보다 변형율의 시작점이 커져 소성변화량도 커진 것을 알 수 있다. 약 40%의 소성 변화량을 보임으로써 초기 만능재료시험기의 표점거리가 650 mm 임을 감안하면 약 260 mm의 소성변화가 생긴 것을 알 수 있다.

Table 1은 리기다소나무 벌채부산물의 반복 압축 시 응력-변형율 자료를 기반으로 지수함수 형태로 모델화한 것의 물리적 특성 값을 나타낸 것으로 목표밀도 350 kg/m³과 400 kg/m³ 모두 벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력 계수 a는 압축횟수가 늘어나면서 줄어드는 경향을 나타냈으며 반대로 벌채부산물의 기계적 성질에 따른 변형율 계수 b는 늘어나는 경향을 나타내었다. 따라서 변형율이 증가하면서 응력이 지수 함수적으로 증가하는 특성을 가진 리기다소나무 벌채부산물의 경우 모델화를 통해 압축횟수가 증가할수록 압축에 요구되는 소요응력은 줄어들고, 변형율 변화에 비해 응력증가가 커지는 것을 알 수 있다.

2) 잣나무

잣나무 벌채부산물의 압축 목표밀도를 350 kg/m³로 설정한 경우 만능재료시험기로 압축했을 때 목표밀도까지

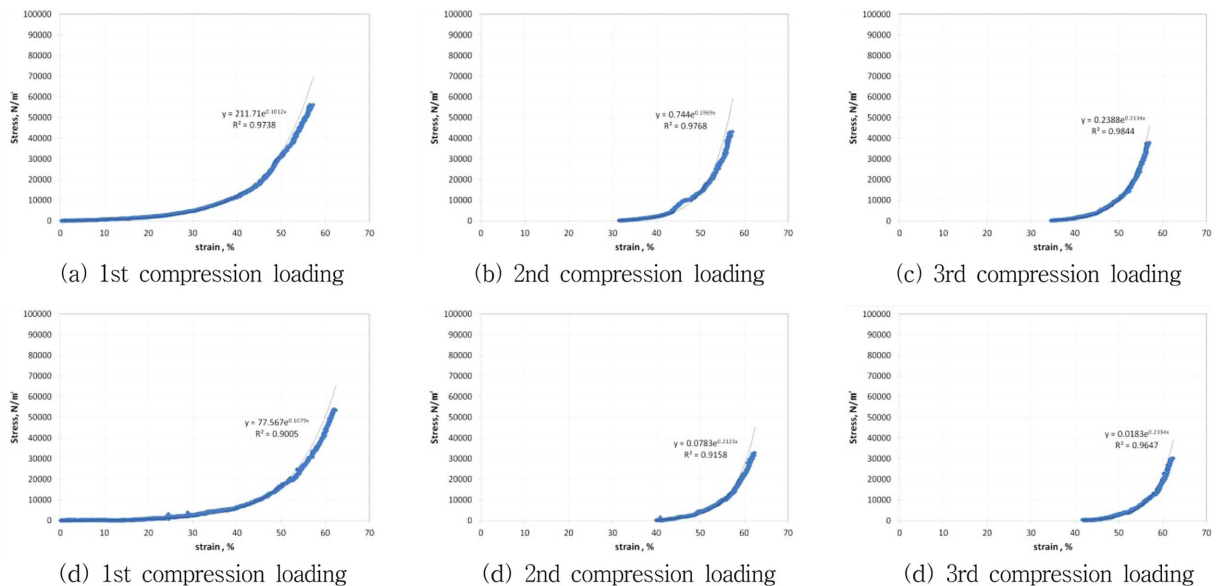


Figure 7. Stress-strain relation by compression loading times for *Pinus koraiensis*. (a~c:350 kg/m³, d~f:400 kg/m³)

의 압축특성을 Figure 7에 나타내었다. 1차 압축의 경우 약 50~60%의 변형율 구간이 목표밀도에 접근하는 변형율로 실제 응력은 35,000~55,000 N/m³이 소요되는 것으로 나타났으며, 지수함수에 의한 예측 모델에서는 리기다소나무와 같은 패턴으로 반복실험에 대한 예측응력이 다소 크게 변화하는 것으로 나타났다. 1차 압축 후 2차 압축한 결과 약 30~40%의 변형율 구간부터 응력이 발생하는 것으로 보아 리기다소나무와 마찬가지로 1차 압축 후 소성변화가 생긴 것으로 판단할 수 있다. 목표밀도 350 kg/m³의 3차 압축 경우는 목표밀도까지 소요되는 응력이 1, 2차 보다 낮아졌으며 2차 압축시보다 변형율의 시작점은 리기다소나무와는 달리 큰 소성변화량은 없었다. 시험 시 만능재료시험기의 시작 표점거리를 고려하면 약 228 mm의 소성변화가 생겨 리기다소나무에 비해서는 소성변화가 적었다. 목표밀도 400 kg/m³의 경우 목표밀도가 350 kg/m³의 경우보다 초기 1차 압축시의 응력요구도가 컸으며 1차 압축 후 재차 이완 후 2차 압축을 했을 때는 350 kg/m³의 경우에서는 리기다소나무와 마찬가지로 3차 압축에서 볼 수 있는 소성변형이 발생한 것을 알 수 있었으며 2차 압축 후 3차 압축을 시도할 때의 그래프와 같이 소성변형량은 변형율 40~50%로 약 260~325 mm 정도였다.

Table 2는 잣나무 벌채부산물의 반복압축 시 응력-변형율 자료를 기반으로 지수함수 형태로 모델화한 것의 물리적 특성 값을 나타낸 것으로 목표밀도 350 kg/m³과 400 kg/m³ 모두 벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력계수 a는 압축횟수가 늘어나면서 줄어드는 경향을 나타냈으며 반대로 벌채부산물 기계적 성질에 따른 변형율 계수 b는 늘어나는 경향을 나타내었다. 따라서 잣나무의 경우는 리기다소나무와 마찬가지로 변형율이 증가하면서 응력이 지수함수적으로 증가하는 특성을 가졌으며, 모델화를 통해 압축횟수가 증가할수록 압축에 요구되는 소요응력은 줄어들고, 변형율 변화에 비해 응력증가가 커지는 특성을 가

지고 있어 생물체가 가지는 탄소성 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

3) 신갈나무

벌채부산물의 압축 목표밀도를 350 kg/m³로 설정한 경우 1차 압축 시 약 50~60%의 변형율 구간이 목표밀도에 접근하는 변형율로, 실제 응력은 20,000~35,000 N/m³으로 전체적으로는 리기다소나무보다도 낮은 것으로 나타났으며, 지수함수에 의한 예측 모델에서는 리기다소나무, 잣나무와는 달리 반복실험에 대한 예측응력이 같거나 다소 작게 변화하는 것으로 나타났다. 1차 압축 후 2차 압축한 결과 같이 약 35~50%의 변형율 구간부터 응력이 발생하는 것으로 보아 리기다소나무, 잣나무와 마찬가지로 1차 압축 후 소성변화가 생긴 것으로 판단할 수 있다. 목표밀도 350 kg/m³의 3차 압축 경우는 목표밀도까지 소요되는 응력이 1, 2차 보다 낮아졌으며 2차 압축시보다 변형율의 시작점은 잣나무와 유사하게 큰 소성변화량은 없었다. 시험 시 만능재료시험기의 시작 표점거리를 고려하면 약 260~325 mm의 소성변화가 생겨 리기다소나무, 잣나무에 비해서 소성변화가 비교적 큰 것으로 판단된다.

목표밀도 400 kg/m³의 경우는 목표밀도가 350 kg/m³의 경우보다 초기 1차 압축시의 응력요구도가 컸으며 1차 압축 후 재차 이완 후 2차 압축을 했을 때는 350 kg/m³의 경우에서는 리기다소나무, 잣나무와 마찬가지로 3차 압축에서 볼 수 있는 소성변형이 발생한 것을 알 수 있었으며 2차 압축 후 3차 압축을 시도할 때의 그래프와 같이 소성변형량은 변형율 25~45%로 약 163~293 mm 정도이나 다른 실험 수중에 비해 반복실험 간의 편차가 크게 나타났다. 또한, 목표밀도 400 kg/m³일 경우 2차, 3차 압축에 요구되는 압력은 약 40,000~60,000 N/m³로 목표밀도 350 kg/m³의 경우보다 높았으며 반복실험별로 2차 압축과 3차 압축에 요구되는 압축응력의 차이는 크지 않았다. 따라서

Table 2. Stress-strain coefficients *Pinus koraensis* of logging residue by compressive target density.

Compressive target density									
350 kg/m ³					400 kg/m ³				
Replication No.	Compression times	a	b	R ²	Replication No.	Compression times	a	b	R ²
1	1st	34.135	0.1284	0.9278	4	1st	17.132	0.1299	0.8352
2		90.494	0.1239	0.9122	5		56.929	0.1157	0.8109
3		211.71	0.1012	0.9738	6		77.567	0.1079	0.9005
1	2nd	0.0567	0.2331	0.9954	4	2nd	0.007	0.2511	0.9799
2		0.1435	0.2266	0.9814	5		0.0039	0.2669	0.9522
3		0.744	0.1969	0.9768	6		0.0783	0.2123	0.9158
1	3rd	0.0022	0.2866	0.9894	4	3rd	0.0008	0.283	0.9701
2		0.0144	0.2648	0.9819	5		0.0002	0.3079	0.9338
3		0.2388	0.2134	0.9844	6		0.0183	0.2334	0.9640

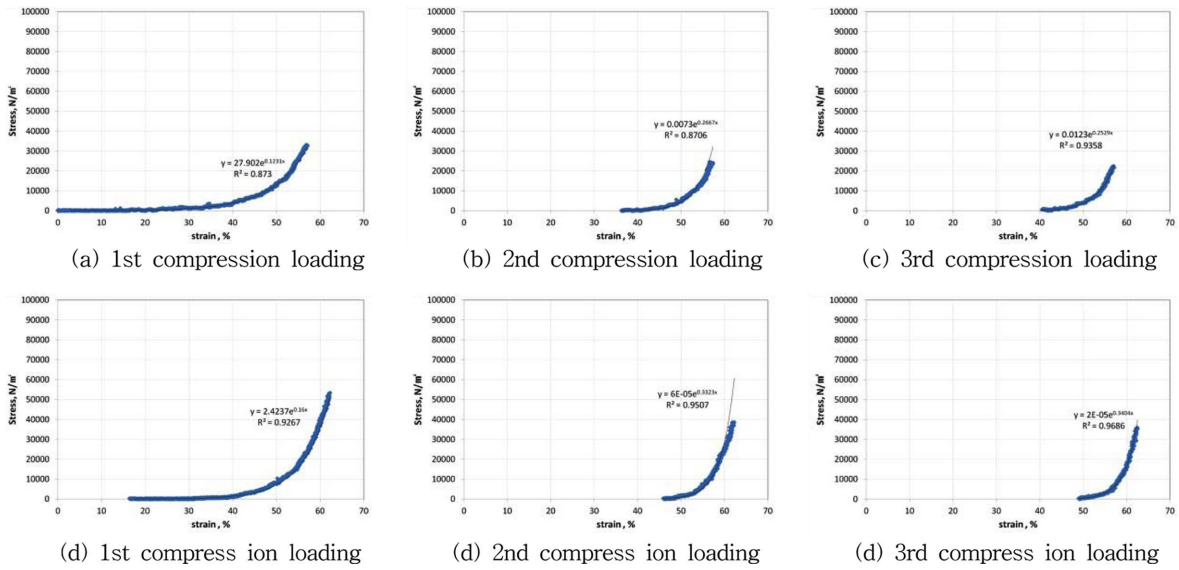


Figure 8. Stress-strain relation by compression loading times for *Quercus mongolica* (a~c:350 kg/m³, d-f:400 kg/m³)

Table 3. Stress-strain coefficients *Quercus mongolica* of logging residue by compressive target density.

		Compressive target density							
		350 kg/m ³			400 kg/m ³				
Replication No.	Compression times	a	b	R ²	Replication No.	Compression times	a	b	R ²
1	1st	5.7080	0.1367	0.6163	4	1st	19.663	0.1354	0.8838
2		15.8890	0.1065	0.6525	5		78.918	0.1034	0.9052
3		27.9020	0.1231	0.8730	6		2.4237	0.1600	0.9267
1	2nd	4.0E-05	0.3506	0.7291	4	2nd	0.0044	0.2681	0.9745
2		2.0E-06	0.4179	0.8305	5		1.2026	0.1653	0.8680
3		0.0073	0.2667	0.8706	6		6.0E-05	0.3323	0.9507
1	3rd	4.0E-05	0.3439	0.5734	4	3rd	0.0015	0.2797	0.9802
2		4.0E-06	0.3905	0.9158	5		0.4771	0.1770	0.9602
3		0.0123	0.2529	0.9358	6		2.0E-05	0.3404	0.9686

초기 압축력이 높을수록 목표로 하는 밀도에 도달하기 위해 반복되는 압축횟수는 적어지는 현상이 있는 것으로 판단되며, 본 연구에서는 2수준의 목표밀도 모두 대부분 2차 압축에서 목표밀도의 90%이상은 소성변형과 함께 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3은 신갈나무 벌채부산물의 반복압축 시 응력-변형률 자료를 기반으로 지수함수 형태로 모델화한 것의 물리적 특성 값을 나타낸 것으로 목표밀도 350 kg/m³과 400 kg/m³ 모두 벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력계수 a는 압축횟수가 늘어나면서 줄어드는 경향을 나타냈으며 반대로 벌채부산물 기계적 성질에 따른 변형률 계수 b는 늘어나는 경향을 나타내었으나 리기다소나무, 잣나무보다는 변화폭이 크지 않았다. 또한 생물체가 가지는 탄소성 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었으나 반복실험별로 편차가 다른 수종에 비해 큰 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 현장에서 버려지는 가지나 초두부와 같은 벌채부산물의 압축-변형 특성을 규명하여 벌채부산물을 압축화 할 수 있는 장비의 개발을 위한 기초자료로 사용하고자 하였다. 압축 실험에 사용된 벌채부산물의 수종으로는 리기다소나무, 잣나무의 침엽수와 활엽수인 신갈나무 등 3종류로 선정하였으며, 3차 압축이 가능한 시험기를 이용하여 3회 반복 압축-변형 특성실험을 통해 벌채부산물의 압축에 필요한 소요압축력을 산정하였다.

평균 함수율이 52.7%(wb)인 리기다소나무의 벌채부산물의 경우 압축 목표밀도가 350 kg/m³ 일 때 1차 압축에서 25,000~30,000 N/m³정도로 높은 압축응력을 필요로 하였으며, 3차 압축 후 약 40%의 소성변화량을 보였다. 목표밀도 400 kg/m³에서는 2, 3차 압축에 요구되는 응력이

약 30,000N/m³로 압축 후 약 45%의 소성변형율을 보였다.

잣나무 벌채부산물의 압축 목표밀도 350 kg/m³ 일 때 1차 압축의 경우 35,000~55,000 N/m³ 이 소요되는 것으로 나타났으며, 약 35%의 소성변화량을 보였다. 목표밀도 400 kg/m³에서 2, 3차 압축에 필요한 응력은 30,000~40,000 N/m³로 3차 압축 후 약 40~50%의 소성변형율을 보였으며, 실험에 사용된 잣나무 벌채부산물의 평균 함수율은 34.8%(wb)이다.

신갈나무 벌채부산물의 평균 함수율은 36.3%(wb)였으며, 압축 목표밀도가 350 kg/m³ 일 때 응력은 20,000~35,000 N/m³로 35~50%의 소성변형율을 보였다. 목표밀도가 400 kg/m³ 일 경우 2, 3차 압축에 요구되는 응력은 약 40,000~60,000 N/m³으로 압축응력의 차이는 크지 않았다. 리기다 소나무, 잣나무, 신갈나무의 반복압축 시 응력-변형률 자료를 기반으로 지수함수 형태로 모델화한 것의 물리적 특성 값은 목표밀도 350 kg/m³과 400 kg/m³ 모두 벌채부산물 기계적 성질에 따른 응력계수는 압축횟수가 늘어나면서 줄어드는 경향을 나타냈으며, 반대로 변형율 계수는 늘어나는 경향을 나타내었다. 모델화를 통해 압축횟수가 증가할수록 압축에 요구되는 소요응력은 줄어들고, 변형율 변화에 비해 응력증가가 커지는 특성이 있으므로, 적절한 초기 압축력이 벌채부산물의 목표밀도 달성에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다. 벌채부산물의 운재 및 운송비용에서는 압축으로 인하여 운반차량의 적재량을 늘리는 동시에 부정형의 벌채부산물을 원통모양으로 성형 처리함으로써 운재 및 운송 전 상하차가 용이하고 운반차량을 유용하게 이용할 수 있어 벌채부산물의 형태보다 운반비용을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 예측된 자료를 통해 압축화장치개발의 조건을 제시 할 수 있으며, 이러한 예측 및 설계 기술을 통해 임업 현장에서의 벌채부산물의 운재 및 운송의 용이 및 비용의 감소에 매우 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Andersen, G. and Brunberg, B. 1996. 'Bailing of unchipped logging residues', in Harvesting, Storage and Road Transportation of Logging Residues, Proceedings of a workshop of IEA-BA-Task XII activity 1.2, October 1995 in Glasgow, Scotland, Danish Forest and Landscape REsearch Institute, Horsholm, Denmark.
- Byeon, H.S., Pack, J.H, Yun, S.L., Park, H.M., and Kim, J.K. 2008. Performance of compressive strength for wilt disease damaged tree. Journal of Wood Science, Conference 2008: 143-144.
- McDonald, T., Stokes, B., and McNeel, J. 1994. Effect of product form, compaction, vibration and comminution on energy-wood bulk density. In: Preparation and Supply of High Quality Wood Fuels. IEA Task IX Proceedings. Research Note 278. Garpenberg, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences. pp. 6-23.
- Oh, J.H. 2011, Development of logging residue bundler, Sanrimji 2011(5): 96-99.
- Oh, J.H. 2011, Low cost of logging residue harvesting, Sanrimji 2011(11): 70-75.
- Sang, S.J. and Chun, W.K. 1998. Theoretical models for stress relaxation behavior of wood under compressive strain. Journal of Furniture 9(2): 79-85.
- Timperi, A. 2003. New technologies for the collection of wood residuals from forests. Presented at: Sustainable Production Systems for Bioenergy. Impacts on Forest Resources and Utilization of Wood for Energy. Flagstaff, AZ: International Energy Agency Task 31.
- Hwang, J.S., Oh, J.H., Kim, N.H., and Cha, D.S. 2010. Preliminary Study on the Fuel Processing with Woody Biomass (I) - Physical Properties of Wood Chip -. Journal of Forest Science 25(1): 75-84.
- Imai kota. 2006. A Study on Compression of Logging Residues by Container Type Bundler, Unpublished Bachelor's Thesis, University of Tokyo. Tokyo Japan.