

## 山林土壤 特性이 集材車輛의 走行性에 미치는 影響<sup>1\*</sup>

金 基 源<sup>2</sup>

## Forest Soil Characteristics and their Effects on the Trafficability of Logging Vehicles<sup>1\*</sup>

Ki Weon Kim<sup>2</sup>

### 要 約

본 연구는 토양의 硬度 등 물리적 역학적 특성이 차량의 走行性에 미치는 영향을 파악하고자 시도되었다. 광릉 시험림 38임반 '거'소반에 있는 20m 길이의 林地에 4m 간격으로 5개의 측점을 설치하여 트랙터로 하여금 荷重없이 1회 空走行, 통나무(중량 780 - 790kg)를 견인한 상태로 1회 왕복, 5회 왕복; 10회 왕복 주행토록 하였다. 각 주행 형태별로 SHM-1형, Lang Penetrometer, Clegg Impact Soil Tester 등 3개의 토양 경도계를 이용하여 측점 당 5차례 土壤硬度를 측정하였으며, 地被植生の 훼손 정도와 주행 차량의 미끄러짐도 관찰하였다.

조사지의 토양은 SC(점토질 모래)와 乾性 褐色 山林土壤으로 판명되었다. 地被植生の 경우 3-5회 왕복 주행 후에는 草本類는 짓이겨지고, 灌木類도 잎떨어지고 樹皮도 벗겨지다가 11회 왕복 후에는 植生은 거의 사라졌다. 주행 차량이 顛覆되거나 미끄러지는 경우는 없었지만, 바퀴자국은 토양의 단위 밀도가 높고 함수량이 낮은 1-3구간의 경우 불과 1-2cm의 깊이로 파인 반면 단위 밀도가 낮고 함수량이 높은 4-5구간은 5-7cm 깊이로 나타났다.

走行 形態別로 각 측점에서 조사한 土壤硬度 變化는 주행 횟수가 증가할수록 점점 증가하는 것으로 나타났다. L-PNTM에 의한 경도 변화는 완만하고, SHM-1형에 의한 경도 변화는 가파르게 나타났다. 比重과 單位密度가 높고, 含水量이 낮으며, 液性限界와 塑性指數가 높은 구간에서는 土壤硬度가 높게 나타나서 집재 차량의 주행성이 좋았다. 그렇지 않은 토질 역학적인 특성을 갖는 경도가 낮은 구간에서는 바퀴자국이 깊어 주행성이 좋지 않을 것으로 판단된다. CIST로 측정할 경우에는 4kg용 해머를 사용하는 것보다는 2.5kg이나 0.5kg용 해머를 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

### ABSTRACT

This study deals with forest soil characteristics and their effects on the trafficability of logging vehicles. The study area is the national experimental forest located in Kwangnung. This site has 20m length and is equally divided by 5 surveying ranges with 4m width, on which a tractor(FIATAGRI) attached with logging boogie can drive in 4 driving types, namely 1time-return unload, 1time-return with load of 780 - 790kg weight of 3 logs, 5 and 10times-return with same load. After one driving type on all surveying ranges, the soil hardness is surveyed 5 times with 3 several type tools, SHM-1 type, lang penetrometer(L-PNTM), and clegg impact soil tester(CIST). A disturbed degree of cover vegetation and sliding conditions of vehicle are also observed.

As results, the soil type of the test site was SC by USCS and dry brown forest soil. The cover vegetation is gotten trampled under driving after 3-5 times-return, shrubs leaves are fully fallen and

<sup>1</sup> 接受 1999年 2月 10日 Received on February 10, 1999.

<sup>2</sup> 국민대학교 산림자원학과 Department of forest resources, college of forest science, Kookmin University, Seoul, 136-702 Korea.

\* 1997 학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행된 과제임.

their bark are peeled, and after 10 times-return the cover vegetations were nearly disappeared. The test vehicle has neither slid nor was overturned. The wheel tracks in the 1-3 ranges, of which unit weight( $gd$ ,  $gt$ ) is high and soil moisture content( $MC$ ) is low, were only 1-2cm deep, but those in the 4-5 ranges, of which the  $gd$ ,  $gt$  is low and the  $MC$  is high, were 5-7cm deep.

In the soil hardness test, which was established in 5 test ranges by types of driving, the more driving times, the higher the hardness. The soil hardness surveyed by L-PNTM has changed slowly and that surveyed by SHM-1 type has risen sharply. In the ranges with higher specific gravity( $G_s$ ), higher unit weight, lower  $MC$  and higher liquid limit( $LL$ ) and plasticity index( $PI$ ) was the soil hardness high and the trafficability was good. In the ranges with opposite conditions, also in the ranges of the lower soil hardness, the trafficability must be not good, because the wheel track may be deep. The results from CIST attached with 4kg hammer was not better than expected. So it is recommended to use CIST with 2.5kg or 0.5kg hammer.

*Key words : Trafficability, Soil hardness, CIST, Logging vehicle, Sliding conditions, Wheel track*

### 緒 論

차량에 의한 集運材 作業은 土壤 條件이 차량의 走行에 양호한 상태일 경우에는 원활하게 진행되지만 그렇지 못할 때에는 바퀴의 움직임이 고르지 못하고 차량 기사의 운전 미숙 등으로 작업이 순조롭지 못하게 되는 경우가 발생한다.

산악지에서 차량의 주행 능력은 물론 지형 경사에 좌우되는 경우가 많다. 그러나 작업 차량의 차륜과 접촉면인 토양의 물리적 특성 또한 走行性에 큰 영향을 미친다. 차량의 정상적인 주행은 집재 작업 성과에 별 영향을 끼치지 않겠지만, 비정상적인 주행은 집운재 시간의 지체, 그에 따른 작업량의 감소를 초래하므로써 전체 임업 생산성에 악영향을 미친다. 이미 先進 林業國에서는 집운재 작업 현장의 토양 조건을 사전에 미리 파악하여 작업 시스템 관리자에게 정보를 제공함으로써 집운재 시점을 결정하고, 작업 차량의 종류를 선정하며, 그에 따라서는 어떤 종류의 車輪 프로파일(Profile)을 가진 바퀴를 장착해야 하는가에 대해서도 고려할 수 있게 해 준다.

산림 작업의 기계화가 오래 전부터 시작된 선진 임업국에서는 일찍부터 토양과 차량의 走行性에 대한 연구가 진척되어 왔다. Beitzen-Heineke와 Dimitri(1981), Brown와 Jemison(1988), Donaubauer(1988), Köller(1986) 등은 集運材 등 산림 작업시 집재차량이 토양에 가하는 각종 악영향을 제시하고 특별히 토양 특성에 주목할 필요성을 언급하면서 개선방안의 하나로서 토양 조건에 합당한 기계장비를 선정해야 할 것을 제시하고 있다. Starke는 낮은 타이어 압력과 넓은 타

이어 폭을 가진 차량의 走行性을 조사한 바 있다(Starke, 1988). 1982년과 1983년 2년에 걸쳐 Gerdson과 Bolz는 토양에 가해지는 임업 기계의 車輪力과 주행성에 미치는 차량 운행의 영향에 대해 조사하였으며, Nipkow는 낮은 주행성을 가진 토양에서 발생하는 집운재 차량의 주행 문제점을 제기하였다(Nipkow, 1983). Nipkow가 연구에 사용한 차량들은 소형 케도식 트랙터, 임업용 트랙터, 농업용 트랙터, 분절식 트랙터 등이었다. 토양의 주행성과 직접적으로 관련된 연구를 진행한 사례는 Haslauer(1974), Krause와 Steinkampf(1986), 그리고 Henke(1974)에게서 발견된다. 특히, 본 연구와 관련하여 제일 관심을 끄는 연구는 Henke에 의해 이루어진 것인데, 그는 토양의 주행성을 측정하고 평가하는 방법에 대해 연구하였다. 그가 사용한 토양 조사 장비는 페니트로미터(Penetrometer)로서 이를 이용하여 토양의 주행성을 판단하였다(Henke, 1974). 한편, Zander 등은 車輛 走行이 表層土의 다짐에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으며(Zander 등, 1988), 같은 해 Müller는 林相圖의 토양 물리학적, 토질 역학적 정보를 연구하여 토양의 銳敏性을 5등급으로 구분하여 각 등급에 따라 車輛 走行性 등에 대한 可짐을 제시한 바 있다(Müller, 1988).

한편, 1987년 독일의 Gross-Umstadt에서 열렸던 '산림노동 및 공학위원회'(KWF)의 학술회의에서 Hildebrand는 산림 토양 기능에 미치는 주행의 영향을 발표하고(Hildebrand, 1988), Beekman(1988), Holzwieser(1988)는 토양 요소와 주행 시스템의 선정, Hofman(1988)은 사암 풍화토

의 주행성을 조사 보고하고, Reinhardt(1983)는 임업 기계의 토양 보전적 투입을 위한 차륜의 요구 조건에 대해 언급한 바 있다. 농작업 기계에 의한 경작지의 踏壓에 관해서는 Olfe und Schön (1986)에게서 찾아볼 수 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 국외에서는 토양과 차량의 주행성에 관한 연구가 꽤 오래 전부터 진행되어 많은 경험과 정보가 축적되어 있다.

국내의 경우, 토양 자체에 대한 연구는 토양학 분야에서 다각도로 진행되어 오고 있으나, 토양의 물리적 역학적인 성질을 集運材에 투입되는 차량의 走行성과 관련하여 조사 연구한 예는 많지 않다. 집운재 차량의 주행에 대해서는 정주상과 정우담(1995)이 급경사지에 있어서 차량의 走行 動態에 대해 명쾌한 역학적 분석을 실시하여 일찍이 이 분야 연구에 기초를 마련하였다. 김기원(1993)은 1985부터 1990년까지 산림공학 분야, 특히 토양의 物理的 機械的 特性 파악에 대한 연구를 한 바 있으며, 1993년 연구에서는 토양의 차량 주행성에 미치는 영향이 크므로 토양 조건의 중요성에 대해 언급한 적이 있다. 1995년에는 토양의 물리적 역학적 분석방법에 대한 연구를 진행하였다.

그 동안 토양은 순전히 생물학적이고 화학적인 측면에서만 조사되어 왔다. 그렇기 때문에 집운재 차량 등 대형 중장비가 투입되는 시점에서 그러한 생물 화학적인 측면에서 조사된 토양 자료로는 장비 선정이나 林地 保護의 측면에서 효과적으로 대처할 수 없다. 토양의 硬度 등 물리적 역학적 특성이 고려되지 않고 또, 차량의 走行성을 검토해 보지 않은 상태에서 집운재 차량을 무절제하게 투입하므로써 야기되는 각종 부정적인 면은 전체적인 임업의 생산성을 저하시키는 결과를 초래할 것이다. 예를 든다면, 토양이 낮은 走行성을 나타내고 있는 데도 불구하고 무리하게 차량을 투입했다면, 미끄럼 현상이나, 차륜의 공회전, 또는 顛覆이나 진흙 속에서의 고립 상태를 면치 못하여, 집운재 작업에 커다란 지장을 초래할 것이다. 이것은 곧 작업 지체를 야기하고 결국 노동 생산성을 저하시키게 된다.

우리 나라는 아직 임업의 여건상, 특히 林木 收穫 분야에서 후진성을 면치 못하고 있는 실정 이어서 集運材에 대처하는 능력도 낮고 기술 진보 또한 만족스럽지 못하다. 본 연구 과제의 시도는 비록 선진 임업국에 비해 늦은 감은 있

나, 좀더 합리적이고 과학적인 임업을 추구하고자 하는 현시점에서 선진국의 임업 기술 수준으로 한 걸음 다가가는 계기가 될 것으로 생각한다. 본 연구는 다음과 같은 세 가지를 목적으로 이뤄진다.

첫째, 山林土壤과 集運材 車輛의 走行성 관계를 파악하여 각 산림 작업 현장에 투입하게 될 적합한 트랙터 등 장비선정과 올바른 작업방법의 개선을 도모하여 山林 生産성을 向上시키기 위함이다.

둘째, 토양과 차량 사이의 走行성을 연구함으로써, 주행성 제고를 위해 우리나라 산림 토양에 적합한 車輪의 프로필을 개선하기 위한 기술적인 토대를 마련하기 위함이다. 연구 결과의 적용은 중장비, 트랙터, 타이어 제조 기업에 파급될 수 있어 임업과 타산업의 기술이 접목되고 향상되는 계기가 될 것이다.

셋째, 연관 분야의 연구 토대를 구축하고 진척하며 발전을 도모하기 위함이다. 間伐事業의 증가로 車輛의 林地 投入이 빈번한 데도 불구하고 山林土木 분야에 있어서 산림토양 특성과 집운재 차량 주행성과의 관계에 관한 연구는 아직 개척 단계여서 미진하다.

### 材料 및 方法

본 연구가 지향하는 가장 중요한 연구 목적은 토양의 硬度 등 물리적 역학적 특성과 차량의 走行성과의 상호관계를 파악하는 것이다. 이것은 결국 집운재 차량이 林地를 주행하고자 할 때 最大의 走行성을 확보하기 위한 기초를 마련하는 의도이다. 따라서 본 연구에 있어서 주된 실험 내용은 차량의 주행 형태에 따라 나타나는 토양의 경도를 측정하는 것이며, 부수적으로 地被 植生의 변화 상태, 주행 차량의 미끄러짐과 그 길이 및 파인 바퀴자국의 깊이 등도 관찰하였다.

토양이 가지고 있는 여러 가지 특성 중에서 차량의 주행성에 미치는 특성은 토양의 硬度(Soil Hardness)라고 전제하고 연구를 진행하고자 한다. 토양의 경도를 측정하기 위해 지금까지 사용한 장비는 소형 토양 경도계(SHM-1식)나 페니트로미터(Penetrometer)와 같은 것들이었다. 본 연구에서는 이들 측정기뿐만 아니라 고성능 토양 경도계(Clegg Impact Soil Tester/CIST)도 사용하였다(Fig. 1).

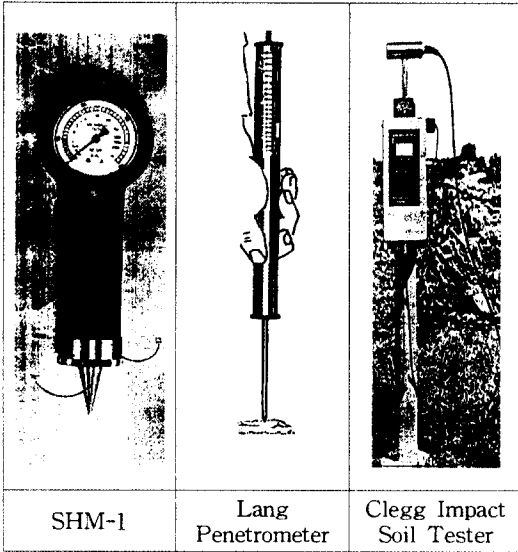


Fig. 1. Test tools

소형 토양 경도계(Soil Hardness Tester)로는 일본의 竹村電機(株)에서 제작한 SHM-1형을 이용하였다. 경도측정 방법은 먼저 측정하려고 하는 토양면을 평평하게 고른 다음 경도계의 탐침부분을 토양 속으로 수직으로 서서히 금속환(金屬環) 부분까지 밀어 넣는다. 이어서 기구를 빼낸 다음 멈춰있는 mm 바늘 눈금을 읽는다. mm 눈금은 0 - 40mm로 되어 있는데 이 수치들이 0 - 500 - ∞(kg/cm<sup>2</sup>)의 경도를 나타내게 되어 있다. 즉, 읽은 눈금을 계산식에 대입하여 土壤 支持 強度 (p)로 환산하게 되는데 여기에 이용되는 환산식은 다음과 같다 :

$$p = \frac{100x}{0.7952(40 - x)^2}$$

p : 支持強度(kg/cm<sup>2</sup>)  
 x : 읽은 눈금(mm)

SHM-1식 경도계는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 탐침부분이 짧고 굵은 원추체형으로서 길이가 약 4cm인데 토양 중에서도 비교적 얇은 부분, 즉 초본류의 근계(根系) 발달 범위에 있는 토양의 강도를 측정하게 된다.

본 실험에서 사용한 페니트로미터는 랭 페니트로미터(Lang Penetrometer/L-PNTM)이다. 탐침의 길이는 4¼인치(약 12cm)인데, 계산환(Calibration wheel)이 땅 표면에 닿을 때까지 탐침을

땅 속으로 삽입한다. 토양의 저항 정도에 따라서 탐침에 연결된 핀이 페니트로미터의 윗부분에 새겨진 1 - 20번 사이의 눈금에 정지하도록 되어 있다. 하나의 눈금은 2.390322t/ft<sup>2</sup>(2.572911kg/cm<sup>2</sup>)을 나타내는데 눈금을 경도로 환산할 때는 측정된 눈금에서 1을 뺀 수치를 가지고 환산하도록 되어 있다. SHM-1형보다 깊은 토층의 경도 변화를 파악하는데 유용하다.

Clegg Impact Soil Tester(CIST)라 불리는 토양 경도계는 국내 토목 분야에서 아직 널리 알려지지 않은 토양 경도 측정 기구이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 손잡이 달린 해머를 일정 높이에서 놓으면 튜브를 통해서 낙하하고 지반을 강타하게 된다. 영향지역 안에 있는 재료의 剛性에 따라 결정된 비율로 감속하게 된다. 이 기구는 해머에 부착된 가속 미터기가 내부 밧데리에 의해 전원이 공급되는 디지털 눈금단자에 케이블로 연결된 전기적 차이지(charge)를 발생시켜 수치를 나타내도록 되어 있다. 4회째 낙하시켰을 때 기록되는 수치(IV Impact values)를 CBR치로 환산하는데 환산식은 CBR% = 0.07(IV)<sup>2</sup>를 사용한다. 예를 들어 4회째 “20IV”라는 숫자가 나왔다면 CBR% = 0.07 × 20<sup>2</sup>으로서 28% CBR을 나타내게 된다. 해머는 4kg, 2.5kg, 0.5kg 등 3종류가 있으며 목적에 따라서 선택할 수 있다.

조사지는 중부 임업 시험장 38일반 '거'소반 주변이다. 직선으로 시야가 확보된 20m 길이의 林地에 4m마다 총 5개의 측정점을 설치하여 집재차량이 주행하도록 준비하였다. 사용된 집재차량은 중부시험장 보유의 FIATAGRI 트랙터(약 4.74톤)로서 여기에 집재장치인 로깅부기(Logging Boogie)를 장착(트랙터 포함한 총중량 약 5.6톤)하고 空走行과 중량 780 - 790kg의 통나무(短材 3토막)를 매 단 상태에서 주행토록 하였다. 走行形態는 1회 공주행 왕복(1T-return/unl), 1회 상차(上車) 왕복(1T-return), 5회 상차왕복(5T-return), 10회 상차왕복(10T-return) 등 4종류이다. 주행 시험은 같은 시점에서 연속하여 실시하였다. 여기서 1회 상차(上車) 왕복(1T-return)이란 함은 1회 공주후 적재하여 1회 왕복한 것이고, 5회 상차왕복(5T-return)이란 함은 전자의 1회 상차왕복 후 4회 더 누적되어 5회 왕복된 것을 의미한다. 같은 방법으로 10회 상차왕복이란 함은 5회 상차왕복에 5회 누적하여 왕복한 것을 말한다. 각각의 주행형태가 끝나면 지피식생의 변화

상태, 미끄러짐 및 파인 상태를 관찰하였으며, 3개의 토양 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다. 경도는 각 측정마다 기구 당 5회씩 반복 측정하였고, 토질 역학적 특성을 분석하기 위한 試料는 각 측정마다 1점씩 打入式 원통형 시료 채취기를 이용하여 채취하였다.

**結果 및 考察**

**1. 地被植生 變化**

주요 식생으로서 갈참나무(흉고 직경급 41cm), 잣나무(직경급 31cm)가 주수종을 이루고, 관목으로서 싸리, 지피식생으로서 딸기가 우점을 차지하고 있다.

지피식생의 훼손 정도를 살핀 결과, 최초 1회 空走行한 후의 지피식생은 주행 직후에는 초본류나 목본류(관목) 공통적으로 줄기가 차량의 바퀴에 의해 짓눌린 상태로 변화지만 곧 다시 거의 정상 상태로 되돌아와서 주행 전후의 훼손 정도를 구분하기 힘들 정도로 경미한 것이었다. 그러나 이러한 상태는 상차후 주행을 반복하는 동안 서서히 변화해 가다가 3-5회 왕복 후에는 履歷現象의 증가로 초본류는 완전히 풀이 죽고 꺾였으며, 관목류도 잎이 모두 떨어지고 수피도 벗겨지기 시작하였고 바퀴자국이 선명하게 드러났다. 특히, 0-8m범위인 제4-5구간에서는 거의 전 범위가 식생은 사라지고 완전히 흙이 노출되고 바퀴자국 좌우로 흙이 밀려나기 시작하였다. 나머지 구간은 식생과 같이 흙으로 다져졌다. Table 2에서 D는 바퀴로 인해 파인 깊이를 나타내는 것으로서 11회 왕복 주행 중 1-3구간은 파인 깊이가 불과 1-2cm인 반면 4-5구간은 5-7cm에 이른다. 이것에 대한 원인으로서는 Table 1에서도 알 수 있는 바와 같이 제4-5구간은 비중이나 단위 밀도가 다른 구간의 것보다 낮으며, 토양 수

분(MC)도 약간 높게 나와 토양 경도가 낮아서 이와 같은 깊은 바퀴자국이 생기는 것이 아닌가 생각하게 한다.

11회 왕복 후에는 일부 지피식생 중 싸리와 같은 관목류는 잔존 가능한 것도 있었지만 거의 절단상태로 변화하였다. 특히 4-8m 범위는 表層이 딱처럼 반죽이 된 상태여서 그대로 방치하게 되면 우기(雨期)에 새로운 배수로나 물웅덩이가 될 가능성이 클 것으로 판단된다.

**2. 土壤의 力學的 特性**

Table 1은 시험 구간의 토양을 채취하여 분석한 결과이다.

함수량(MC)은 1-3구간에서는 대체로 낮은 반면 4-5구간에서 2.61-6.6% 정도 높게 나타났다. 비중은 1-3구간에서 높았고 4-5구간에서 낮았는데 이 같은 경향은 아터버그 液性限界나 塑性指數 그리고 단위밀도(gd, gt) 비교에서도 동일한 경향을 보이고 있다.

통일 분류법(USCS)으로 분류한 토양은 粗粒土 중에서 가장 細粒質인 SC(모래-점토 혼합물 혹은 점토질 모래)이며(Table 1), 산림 토양도에 의하면 乾性 褐色 山林土壤에 속한다(임업연구원, 1994). Fig. 5의 粒度 分布 曲線에서 보는 바와 같이 입도는 대체로 고르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

**3. 미끄러짐 정도**

空走行을 포함하여 총 11차례 반복 주행하는 동안 특별한 미끄러짐은 발견되지 않았다(Table 2). 이것은 아마도 시험지의 토양 표면이 대체로 건조했고 경사도 완만한 조건 때문일 것이라고 판단된다.

**Table 1.** Soil mechanical characteristics by tested area ranges

Range No. & Section(m)	Soil characteristics	MC %	Sp./G Atterberg L.			Unit weight		Grain size analysis % finer than					USCS
			Gs	LL %	PI %	gd t/m <sup>3</sup>	gt	No.4	No.20	No.40	No.200	2μ	
1	16-20	20.90	2.64	55.04	13.24	1.34	1.56	83.87	60.00	56.10	42.57	4.00	SC
2	12-16	19.18	2.66	53.01	17.80	1.55	1.82	94.05	65.00	57.00	43.39	5.05	SC
3	8-12	22.44	2.66	51.80	14.87	1.55	1.63	91.43	66.00	59.30	40.62	8.00	SC
4	4-8	25.80	2.62	43.46	11.54	1.14	1.43	89.04	62.50	51.90	37.73	5.25	SC
5	0-4	25.05	2.62	45.01	10.20	1.21	1.43	88.26	62.50	54.20	41.23	4.50	SC

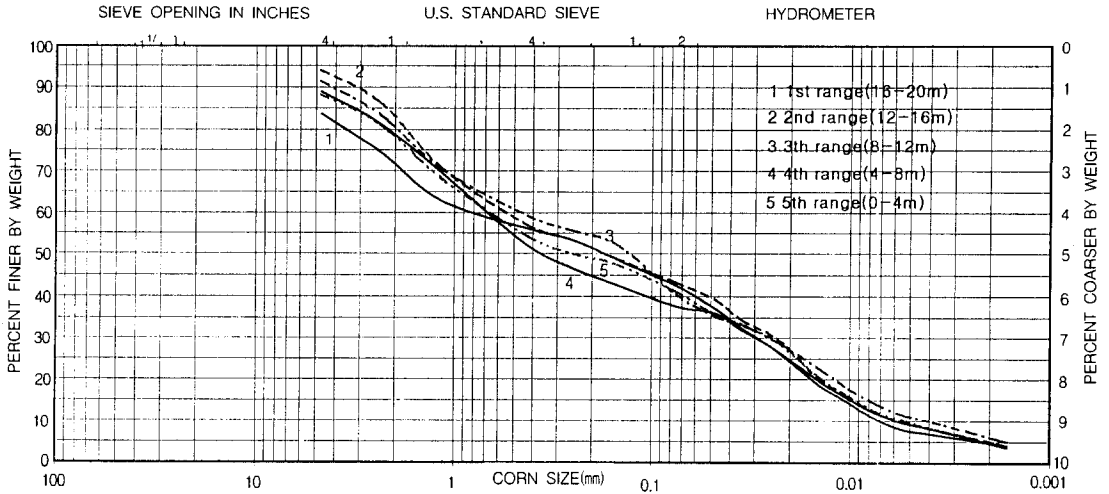


Fig. 2. Corn gradation curves by range

Table 2. Sliding status of the test vehicle after driving by section

units : cm

Range No. & Section(m)	After 1T-return/unload			After 1T-return/load			After 5T-return/load			After 10T-return/load		
	S	SL	D	S	SL	D	S	SL	D	S	SL	D
1 16 - 20	0	0	1.5	0	0	2.0	0	0	1.5	0	0	1.5
2 12 - 16	0	0	1.5	0	0	2.0	0	0	1.5	0	0	1.0
3 8 - 12	0	0	2.0	0	0	2.0	0	0	1.5	0	0	2.0
4 4 - 8	0	0	5.0	0	0	5.0	0	0	5.5	0	0	7.0
5 0 - 4	0	0	5.0	0	0	4.0	0	0	6.0	0	0	4.5

Remarks : S : Sliding times, SL : Sliding length(cm), D : Depth of wheel track(cm)  
 After 1T-return/unload : Sliding status of the test vehicle after 1time return not in load with logs  
 After 1T-return/load : Sliding status of the test vehicle after 1time return in load with logs  
 After 5T-return/load : Sliding status of the test vehicle after 5times return in load with logs  
 After 10T-return/load : Sliding status of the test vehicle after 10times return in load with logs

Table 3. Soil hardness by range and tool before test

Range No. & Section(m)	SHM-1(kg/cm <sup>2</sup> )							L-PNTM(kg/cm <sup>2</sup> )							CIST	
	Test time						AVG	Test time						AVG	CBR %	Remarks
	1	2	3	4	5	1		2	3	4	5					
1 16 - 20	30.1	7.3	4.0	2.6	8.5	10.5	20.6	18.0	16.7	28.3	36.0	23.9	2.5	4th		
2 12 - 16	4.0	1.4	0.5	0.5	0.5	1.4	34.7	12.9	23.9	23.2	18.0	22.5	2.5	1st		
3 8 - 12	2.6	3.8	20.1	6.3	1.8	6.9	30.9	16.2	18.0	16.0	30.9	22.4	3.4	1st		
4 4 - 8	2.6	1.6	1.9	3.5	1.6	2.3	19.6	19.6	14.2	10.3	16.2	16.0	0.3	1st		
5 0 - 4	1.0	1.9	2.6	1.0	1.6	1.6	7.7	23.7	29.6	17.0	23.2	20.2	1.1	4th		
AVG(average)							4.5							21.0		

4. 土壤硬度

Table 3은 주행 시험 전에 토양 경도를 측정한 결과이다. 각 구간 측정마다 5회의 측정을 실시하였다. 같은 지점의 경도를 측정하는 것인 데도

불구하고 SHM-1과 L-PNTM 경도계 측정치간에 차이가 나는 것은 SHM-1형은 지표 바로 아래 부분(약 4cm 깊이)을 측정하고 L-PNTM은 12cm깊이 범위를 측정하는 데에서 오는 것으로

**Table 4.** Change trend of soil hardness by range and tool

	Range No. & Section(m)	SHM-1(kg/cm <sup>2</sup> )							L-PNTM(kg/cm <sup>2</sup> )							CIST	
		Test time							Test time							CBR %	Remarks
		1	2	3	4	5	AVG	1	2	3	4	5	AVG				
1T-return/ unl	1 16-20	8.5	7.3	7.3	5.4	7.3	7.2	18.0	23.2	20.6	22.1	21.1	21.0	0.6	1st		
	2 12-16	10.9	9.2	14.0	6.8	6.8	9.5	28.3	38.6	23.2	27.0	30.9	29.6	0.6	4th		
	3 8-12	16.7	10.0	84.7	28.9	19.3	31.9	30.9	33.4	34.7	27.0	28.3	30.9	2.5	2nd		
	4 4-8	5.4	6.3	14.0	6.3	8.5	8.1	30.9	23.2	34.7	18.0	24.4	26.2	1.1	4th		
	5 0-4	9.0	7.5	8.8	5.7	4.7	7.1	20.6	20.6	29.6	20.6	23.2	22.9	0.6	3th		
	AVG						12.8							26.1			
1T-return	1 16-20	6.3	14.0	10.3	12.8	9.5	10.6	29.6	21.9	24.4	25.7	25.7	25.5	-	fail		
	2 12-16	11.4	17.6	14.0	26.0	30.1	19.8	41.2	34.7	30.9	28.3	25.7	32.2	3.4	1st		
	3 8-12	24.5	21.3	16.1	28.9	16.7	20.7	33.4	28.3	28.3	25.7	39.9	31.1	0.6	1st		
	4 4-8	8.5	6.3	5.4	5.4	10.0	7.1	25.7	18.0	23.2	38.6	20.6	25.2	2.5	4th		
	5 0-4	37.7	11.8	10.0	5.4	8.5	14.7	38.6	28.3	20.6	20.6	24.4	26.5	-	fail		
	AVG						14.7							28.1			
5T-return	1 16-20	11.8	7.9	14.0	10.0	22.1	13.2	25.7	25.7	24.4	37.3	23.2	27.3	0.6	4th		
	2 12-16	84.7	48.1	24.5	30.1	18.3	41.1	30.9	32.2	36.0	42.5	30.9	34.5	3.4	4th		
	3 8-12	27.1	15.3	44.6	19.0	16.7	24.5	33.4	36.0	32.2	28.3	30.9	32.2	5.7	4th		
	4 4-8	15.3	15.3	16.7	15.3	37.7	20.0	20.6	30.9	25.7	23.2	28.3	25.7	0.3	4th		
	5 0-4	6.3	8.5	4.7	20.1	14.0	10.7	25.7	18.0	38.6	25.7	33.4	28.3	-	fail		
	AVG						21.9							29.6			
10T-return	1 16-20	84.7	30.1	14.0	7.3	99.7	47.2	18.0	23.2	36.0	25.7	33.4	27.3	4.5	4th		
	2 12-16	30.1	37.7	20.1	14.0	20.1	24.4	28.3	43.7	41.2	33.4	41.2	37.6	2.5	4th		
	3 8-12	10.0	24.5	14.0	8.5	20.1	15.4	30.9	30.9	43.7	33.4	43.7	36.5	1.1	4th		
	4 4-8	8.5	8.5	50.7	48.1	8.5	24.9	33.4	25.7	28.3	20.6	23.2	26.2	2.5	4th		
	5 0-4	20.1	84.7	118.8	30.1	5.4	51.8	41.2	23.2	41.2	28.3	33.4	33.4	0.3	4th		
	AVG						32.7							32.2			

Remark : “ - ” means no data.

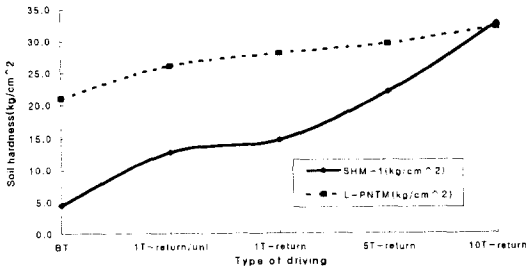
판단된다. 2기구 모두 1구간에서 5구간으로 갈수록 경도가 낮게 측정된 것으로 나타났다. 낮은 경도는 낮은 단위밀도와 관계되는 것으로 생각할 수 있는데, Table 1에서 확인할 수 있는 것처럼 5구간으로 갈수록 토양의 단위밀도는 낮아지고 있다.

Table 4는 통나무를 견인하지 않은 채로 1회 왕복 空走行한 후(1T-return/unl), 3개의 통나무(총 중량 약 780 - 790kg)를 로깅부기에 牽引한 상태에서 1회, 5회, 10회 왕복한 다음 각 측정점에서 5회씩 경도를 측정한 결과를 나타낸 것이다. SHM-1형 경도계에 의한 최고 경도치는 11차례 왕복한 후(10T-return) 5구간에서 나타났으며 (118.8kg/cm<sup>2</sup>), 제일 낮은 경도치는 4회 왕복 후의 제5구간에서 기록한 4.7kg/cm<sup>2</sup>이다. 각 주행형태별 평균값들은 주행횟수가 증가할수록 증가하고 있음을 확인할 수 있게 한다. 이것은 곧 踏壓이

증가하고 있다는 증거이다.

한편, L-PNTM에 의한 측정치 중 가장 높은 값은 43.7kg/cm<sup>2</sup>으로서 SHM-1형의 경우와 마찬가지로 11차례 왕복 후 제2, 3구간에서 나타났고, 최저치는 18.0kg/cm<sup>2</sup>로서 공주행할 때뿐만 아니라, 상차 후에도 각각 한 차례씩 나타났다. SHM-1형의 경우와 마찬가지로 L-PNTM에 의한 각 주행형태별 평균값들도 주행횟수가 증가할수록 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그런데 Table 4에서 또 한 가지 발견할 수 있는 것은 SHM-1형 경도계에 의한 측정값들은 최저 4.7kg/cm<sup>2</sup>최고 118.8kg/cm<sup>2</sup> 등 변화의 폭이 대단히 큰 반면, L-PNTM에 의한 값들은 최저 18.0kg/cm<sup>2</sup>, 최고 43.7kg/cm<sup>2</sup>로서 변화의 폭이 크지 않다는 점이다. 이와 같은 경향은 Fig. 3에 잘 나타나 있다.

Fig. 3은 주행 형태별로 모든 구간에서 측정하



**Fig. 3.** Soil hardness change by type of driving  
Remark : BT means Soil hardness before test

값들의 평균값을 측정기구별로 나타낸 그래프이다. 주행을 반복할수록 두 기구에 의해 측정된 경도값이 공통적으로 증가하고 있다는 점을 확인시켜 주고 있다. 그런데 이 그림에서 두 곡선 변화의 뚜렷한 차이점은 L-PNTM에 의한 경도 변화 기울기는 완만한 반면, SHM-1형 경도계에 의한 경도 변화 기울기는 가파르다라는 사실이다. 특히 1회 상차 주행후(1T-return)의 구간에서 많은 차이점을 보이고 있다. 이것은 土深 12cm 깊이 범위의 토양은 경도 변화가 서서히 이뤄지고 있는 반면, 비교적 얇은, 지피식생의 근계(根系)가 분포한 지표 부근의 경도는 주행이 반복될수록 급격하고도 예민하게 변한다는 사실을 암시하는 것이다. 이와 같은 사실은 Bolling(1986)이나 Sommer와 Zach(1986), Sommer(1988)이 조사한 車輛에 의한 地表下 壓力分布圖(압력 양파)와 비

교할 때 유사한 결과를 보여준다. 즉, 표층 얇은 곳에서 깊은 곳으로 갈수록 바퀴로부터 전달되는 하중이 점점 약해지고 그에 따라 경도 변화도 토심이 깊어질수록 적어진다.

한편, Table 3과 Table 4에 제시된 바와 같이 CIST에 의한 측정치들은 분석과정에서 해석하기 곤란한 결과를 보여주고 있다. 재료 및 방법에서 소개한 바와 같이 CIST에 의한 분석은 해머가 4회째 낙하한 후 기록되는 수치를 이용하여 실시하도록 되어 있다. 그러나 측정과정에 5회 왕복(5T-return) 이후를 제외하고, 거의 대부분이 4회째 기록되는 수치들이 없거나, 1-3회에만 기록되고 또 아예 처음부터 수치가 나타나지 않아 이 결과로는 객관적인 해석이 곤란한 것으로 생각한다. 수치가 디지털 액정에 기록되지 않는 이유는 4kg 해머의 낙하에 반응할 수 없을 정도로 표층이 너무 연약하기 때문이 아닌가 판단한다. 그렇지만 5회 왕복 이후에 보인 CBR%(0.3-5.7%)는 비록 낮은 수치이기는 하지만 주행횟수가 증가할수록 토양이 다져지고 있다는 점을 확인해 주는 중요한 암시이다.

Table 5와 Table 6, Fig. 4와 Fig. 5는 SHM-1형 경도계와 L-PNTM 경도계로 측정한 값들을 구간별로 분석한 결과이다. SHM-1형 경도계에 의한 측정결과는 2-3구간의 일부 경우를 제외하고는 주행횟수를 증가시킬수록 대체로 경도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나, 2-3

**Table 5.** Soil hardness with SHM-1 by tested area range

unit : kg/cm<sup>2</sup>

Type of driving \ Range	1st range (16 - 20m)	2nd range (12 - 16m)	3rd range (8 - 12m)	4th range (4 - 8m)	5th range (0 - 4m)
BT	10.5	1.4	6.9	2.3	1.6
1T-return/unl	7.2	9.5	31.9	8.1	7.1
1T-return	10.6	19.8	20.7	7.1	14.7
5T-return	13.2	41.1	24.5	20.0	10.7
10T-return	47.2	24.4	15.4	24.9	51.8

Remark : BT means Soil hardness before test.

**Table 6.** Soil hardness with L-PNTM by range

unit : kg/cm<sup>2</sup>

Type of driving \ Range	1st range (16 - 20m)	2nd range (12 - 16m)	3rd range (8 - 12m)	4th range (4 - 8m)	5th range (0 - 4m)
BT	23.9	22.5	22.4	16.0	20.2
1T-return/unl	21.0	29.6	30.9	26.2	22.9
1T-return	25.5	32.2	31.1	25.2	26.5
5T-return	27.3	34.5	32.2	25.7	28.3
10T-return	27.3	37.6	36.5	26.2	33.4



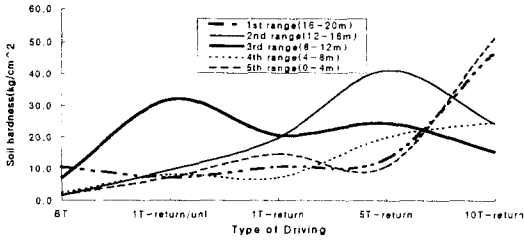


Fig. 4. Soil hardness change with SHM-1 by range

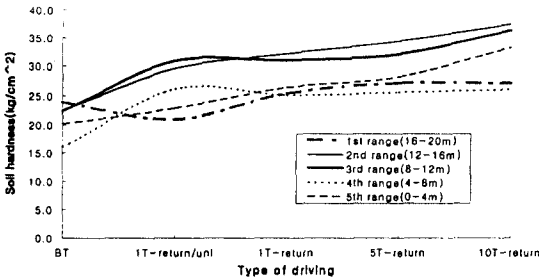


Fig. 5. Soil hardness change with L-PNTM by range

구간에 있어서 10T-return 후의 경도가 현저하게 낮아지고 1구간이나 5구간에 있어서는 그 이상으로 높아진 것에 대한 이유에 대해선 무엇이라고 단정하기가 어렵다. 또한, 토양의 단위밀도가 상대적으로 낮게 나타난 제5구간의 경우 전구간 중에서 가장 높은 정도(51.8kg/cm<sup>2</sup>)를 보인 점도 쉽게 이해하기 어려운 점일 것이다. 그러나, 그 원인으로서 측정 기구상의 문제점을 조심스럽게 생각해 볼 수 있을 것 같다. 즉, 짧고 굵은 원추체 형의 탐침으로 지표 얇은 지점을 측정하다 보니 굵은 모래알이나 잔 자갈 등과 부딪혀 일시적으로 측정치가 증가된 것이 아닌가 하는 점이다. 그러나 이러한 해석상의 어려운 점이 있는 데도 불구하고 주행 횟수가 증가할수록 전체 경도는 증가한다는 점을 상기할 필요가 있을 것이다.

Table 6과 Fig. 5는 L-PNTM 측정에 의한 구간별 분석결과를 나타낸 것이다. 두 세 군대를 제외하고 거의 전 지점에서 주행횟수를 증가시킴에 따라 구간별로 경도가 일목요연하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

結論(期待效果 및 活用方案)

토양 특성과 집재차량의 走行性과의 관계를 구명하기 위해 광릉 시험림 38반만 '거'소반을 대상으로 실험 조사를 실시하였다. 시험지는 4m 간

격으로 5개 구간을 설정하여 트랙터로 하여금 荷重없이 1회 공주행, 통나무(중량 780-790kg)를 견인한 상태로 1회 왕복, 5회 왕복, 10회 왕복 주행토록 하였다. 각 주행 형태마다 SHM-1형, Lang Penetrometer, Clegg Impact Soil Tester 등 3개의 토양 경도계를 이용하여 측정 당 5차례 土壤硬도를 측정하였으며, 地被植生の 훼손 정도와 주행차량의 미끄러짐도 아울러 관찰하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다;

1. 조사지의 토양은 통일 분류법상 SC이며, 乾性 褐色 山林土壤으로 나타났다.
2. 含水量(MC)은 1-3구간에서 낮고 4-5구간에서 높게, 比重과 單位密度는 1-3구간에서 높고 4-5구간에서 낮게 조사되었다.
3. 液性限界와 塑性指數는 1-3구간에서 높고 4-5구간에서 낮았으며, 粒度分布는 대체로 고르게 나타났다.
4. 地被植生の 경우 최초 공주행 후에 보인 깃눌린 상태는 다시 빠르게 회복되었다. 그러나 통나무가 견인된 상태에서 3-5회 왕복 주행 후에는 草本類는 서서히 풀이 죽고 灌木類도 잎이 지고 樹皮도 벗겨지다가 11회 왕복 이후에는 植生은 거의 사라졌다.
5. 주행 차량이 顛覆되거나 미끄러지는 경우는 없었다. 그러나, 바퀴자국은 1-3구간의 경우 불과 1-2cm의 깊이로 파인 반면 4-5구간은 5-7cm 깊이로 나타났다. 이 같은 차이는 4-5구간은 비중이나 단위밀도가 다른 구간보다 낮고 含水量이 높아 낮은 토양 경도를 나타내고 있기 때문이 아닌가 생각한다.
6. 4-8m 범위인 4구간의 경우에는 깊이 파여서 주행이 반복된다면 土層을 훼손시키는 것은 물론이려니와, 주행에 지장을 주게 되며, 그대로 방치할 경우 雨期에 배수로와 같은 역할을 하게 되어 浸蝕이 우려된다.
7. 走行 形態別로 각 측정에서 조사한 土壤 硬도 變化는 주행 횟수가 증가할수록 점점 증가하는 것으로 나타났다.
8. 비교적 깊은 토층을 측정할 수 있는 L-PNTM에 의한 경도 변화는 완만하고, 얇은 토층을 측정할 수 있는 SHM-1형에 의한 경도 변화는 가파르게 나타났다. 이것은 土深 12cm 깊이 범위의 토양은 경도 변화가 서서히 이뤄지고 있는 반면, 비교적 얇은, 지피식생의 根系가 분포한 地表 附近의 경도는 주행이 반복될

수목 급격하고도 예민하게 변한다는 사실을 암시하는 것이다. 즉, 表層 얇은 곳에서 깊은 곳으로 갈수록 바퀴로부터 전달되는 荷重이 점점 약해지고 그에 따라 경도 변화도 土深이 깊어질수록 적어짐을 확인해 주었다.

9. 比重과 單位密度가 높고, 含水量이 낮으며, 液性限界와 塑性指數가 높은 구간에서는 土壤 硬度가 높게 나타났고, 그렇지 않은 토질 역학적인 특성을 갖는 구간에서는 硬度가 낮게 나타났다.
10. 비중과 단위밀도가 높고, 함수량이 낮으며, 액성한계와 소성지수가 높은 구간에서는 바퀴 자국의 파인 정도가 적었다. 그러나, 비중과 단위밀도가 낮고 함수량이 높으며, 액성한계와 소성지수가 낮은 토질 역학적인 성질을 갖는 구간에서는 바퀴 파인 깊이가 크게 나타났다. 이것은 이 같은 토질적인 조건을 갖는 다른 山林土壤에서도 유사한 주행 특성을 갖게 될 것으로 유추할 수 있게 한다.
11. CIST로 측정할 수 치들이 보인 결과로는 객관적인 해석이 곤란할 것으로 생각한다. 그렇지만 5회 왕복 이후에 보인 CBR%(0.3 - 5.7%)는 비록 낮은 수치이기는 하지만 주행 횟수가 증가할수록 토양이 다져지고 있다는 점을 확인해 주는 중요한 암시이다. 좋은 결과를 얻기 위해서는 2.5kg이나 0.5kg용 해머를 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

앞으로의 연구를 진행하기 위하여 보완할 점으로서, 여러 林地를 대상으로 시험 구간과 횟수를 좀더 확장하고, CIST 장비의 해머를 輕量級(2.5 - 0.5kg용)으로 조정하여 시험하며, 주행할 임지의 경사를 다양화할 것 등이다. 이와 같은 점이 보완되고 수년간 연구를 진행하게 된다면 다음과 같은 기대효과를 얻을 수 있을 것으로 생각한다;

첫째, 집운재 차량의 주행특성과 관련한 토양의 物理的 力學的 特性에 대한 자료를 확보할 수 있게 하며,

둘째, 위의 자료를 이용하여 일종의 '표준 산림 토양 주행성 일람표'의 제작을 가능하게 하고,

셋째, 차량이 토양 특성 때문에 낮은 走行性을 보일 경우, 불필요한 운전 조작이 많아진다. 반대로 사전에 얻어진 토양 특성의 파악으로 차량의 走行性이 크게 확보되었을 경우, 불필요하게 운전 조작하는 시간이 사라짐으로써 그 만큼 작

업 시간을 많이 확보할 수 있어서 生産性을 높혀 준다.

넷째, 불필요한 주행 횟수를 줄이므로써 집운재시 필연적으로 발생하는 임지 피해, 특히 토양층 파괴의 최소화를 기대하게 한다.

다섯째, 높은 走行性은 차량의 미끄러짐과 顛覆의 위험 요소들을 없애 줌으로써 災害와 安全事故를 豫防하는 효과도 기대할 수 있게 한다.

여섯째, 토양과 주행성과의 관계가 밝혀지므로 우리 나라 산림토양에 맞는 集運材 車輛의 프로펠 개선에 도움을 줄 것이다.

또한 활용 방안으로서, 연구를 통해서 부수적으로 얻게 될 토양의 物理的 力學的 特性에 대한 자료는 여러 가지 山林 土木 設計, 예를 들면 林道 建設 및 기타 砂防 工事 計劃에 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 또한, 토양 특성에 따라 조사될 走行性은 土壤圖와 林相圖에도 기입하므로써 각종 산림 현황 도면의 보조 자료로서도 활용 가능하다. 그러나 무엇보다도 장기적으로는 일종의 '標準 山林 土壤 走行性 一覽表'의 제작을 가능하게 하므로써, 이 표를 활용하여 차량의 주행성을 최적화시킬 수 있는 집운재 장비의 선정과 장비의 투입시기 등을 결정하는 지표로 활용할 수 있다.

## 감사의 글

이 연구를 위해 현지실험을 가능케 하여 주신 중부임업시험장 임업기계연구실 실장 김재원 연구관님과 박홍룡 선생님께 감사드립니다.

## 引用文獻

1. 金基源, 1993. 山林地形特性을 고려한 山林收穫方法 및 集材方法의 選定基準. 韓國林學會誌. 82(2) : 195-206
2. \_\_\_\_\_, 1995. 임도 설계에의 응용을 위한 흙의 토질 역학적 특성. 韓國林學會誌. 84(2) : 166-177
3. \_\_\_\_\_, 1997. 環境 友好的 伐木 및 集運材 방안에 관한 고찰. 山林經濟研究. 5(2) : 12-28
4. 임업연구원, 1994. 광릉시험림. 910쪽.
5. 정주상·정우담, 1995. 急傾斜地 山林作業을 위한 車輛의 力學 分析에 관한 연구. 韓國林

- 學會誌. 84(2) : 218-225
6. Beekman, F. 1988. Bodenfaktoren und die Wahl des Verfahrensystems. In Bodenschäden durch Forstmaschinen. Hrsg. KWF : 75-80
  7. Beitzen, H. und L. Dimitri. 1981. Rückeschäden : Entstehung und die Möglichkeit ihrer Verhütung. AFZ. Nr.12 : 278-280
  8. Bolling, I. 1986. Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz - Bodenverdichtung. KTBL : 49-72
  9. Brown, G.W. und G.M. Jemison. 1988. Timber harvest and environmental protection. In : Festschrift til IVAR SAMSET. NISK : 333-336
  10. Donaubauer, M. 1988. Holzernte : Schäden unvermeidbar?. ÖFZ. Juni : 49-50
  11. Gerdson, G. und H. Bolz. 1982. Radkräfte von Forstmaschinen auf den Boden. Forsttechnische Informationen. 34(5) : 33-37
  12. Gerdson, G. und H. Bolz. 1983. Zum Einfluss von Fahrzeugbewegungen auf die Radkräfte von Forstmaschinen. Forsttechnische Informationen. 35(1/2)
  13. Haslauer, H. 1962. Die Trafähigkeit von Wald- und Wirtschaftswegen. AFZ. 73(21/22) : 251-255
  14. Henke, K.F. 1974. Messung und Beurteilung der Befahrbarkeit von Böden. Strassen und Autobahn. Nr.5 : 173-177
  15. Hildebrand, E.E. 1983. Mechanisierte Holzernet und Bodenstruktur. AFZ. Nr2.
  16. Hofmann, R. 1988. Befahrungsversuche auf Bundsandsteinverwitterungsböden Süddeutschland. In Bodenschäden durch Forstmaschinen. Hrsg. KWF : 81-82
  17. Holzwieser, O. 1988. Die Wahl des richtigen Holzernteverfahrens. ÖFZ.2 : 11-14
  18. KÖLLer, K. 1986. Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Massnahmen zu ihrer Minderung - Bodenverdichtung. KTBL : 153-170
  19. Krause, R. 1986. Die Befahrbarkeit des Bodens. In : Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verhinderung. KTBL-Schrift 308 : 89-104
  20. Krause, R. und H. Steinkampf. 1986. Die Befahrbarkeit des Bodens - Bodenverdichtung. KTBL : 89-104
  21. Müller, T. 1988. Bodenphysicalische und bodenmechanische Informationen der forstlichen Standortskarte. Forstw. Cbl. 107 : 104-111
  22. Nipkow, F. 1983. Holzrücken auf schlecht tragfähigen Waldböden : Raupen oder Breitreifen?. AFZ. Nr.4 : 94-97
  23. Olfe, G. und H. Schön. 1986. Bodenbelastung durch Schlepper- und Maschineneinsatz in der Landwirtschaft - Bodenverdichtung. KTBL : 35-48
  24. Reinhardt, D. 1988. Anforderungen an Forstreifen und Radausrüstungen für einen bodenschonenden Einsatz auf Forstmaschinen. In Bodenschäden durch Forstmaschinen. Hrsg. KWF : 83-88
  25. Sommer, C. und M. Zach. 1986. Bodenverdichtung und deren Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und den Ertrag - Bodenverdichtung. KTBL : 73-88
  26. Sommer, C. 1988. Bodenphysicalische Grundlagen hinsichtlich Belastung und Beanspruchung beim Befahren von Böden. In Bodenschäden durch Forstmaschinen. Hrsg. KWF : 11-22
  27. Starke, B. 1986. Probleme bei der Einführung von Niederdruck-Breitreifen. ÖFZ. Juni : 332-333
  28. Zander, J., U. Ammer und J. Breitsameter. 1988. Experimentale Untersuchungen für den Einfluss des Befahrens auf die Oberbodenverdichtung. Forstw. Cbl. 107 : 112-122