

진동굴취기의 설계 및 작업성능에 영향을 미치는 설계요인

Design and Performance Parameters of a Vibrating Digger

文學洙*

정회원

X. Z. Wen

姜和錫**

정회원

W. S. Kang

1. 서론

뿌리작물재배에서 수확작업은 노동 강도가 크고 비교적 많은 노동력을 필요로 하고 있다. 뿌리작물의 수확작업에 주로 전용수확기가 사용되고 있는데 전용수확기는 어떤 특정한 작물에만 사용되기 때문에 이용률이 비교적 낮다. 이런 이용률이 낮은 기계를 구입하는 농민의 입장에서 보나 이런 기계를 공급하는 기업의 입장에서 볼 때 어떤 특정한 작물의 수확에만 국한되지 않고 물성이 서로 다른 뿌리작물의 수확에도 이용할 수 있는 굴취기의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구는 물성이 서로 다른 뿌리작물을 굴취할 때 선별부의 진동방향을 조정할 수 있는 진동굴취기를 설계·제작하고 토양절삭 실험을 통하여 진폭, 진동수, 작업속도의 변화에 따른 견인력과 토크 및 굴취판과 선별판 위에 잔류하는 토양의 평균 높이를 측정하고 진폭, 진동수, 작업속도 등의 요인을 기초로 하여 유도되는 설계요인인 속도비 λ , 속도와 가속도비 ρ , 가속도비 K 및 체공시간비 T 가 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태에 미치는 영향을 분석하고 진동굴취기의 설계에 있어서 바람직할 것으로 판단되는 설계기준을 제공하고 자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 시작기의 설계 및 제작

물성이 서로 다른 뿌리작물을 굴취할 때 작물에 따라 진동량과 진동방향을 조절할 필요가 있는데 기존의 4절 링크를 이용한 굴취기는 진동방향을 조절이 불가능하여 특정작물에만 사용이 가능하였다. 본 연구에서는 기존의 굴취기가 가지고 있는 단점을 보완하기 위하여 원래 하나였던 굴취판을 토양절삭을 주로 하는 굴취판과 뿌리작물에 따라 진동방향을 조절할

* 강원대학교 대학원 농공학과

** 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부

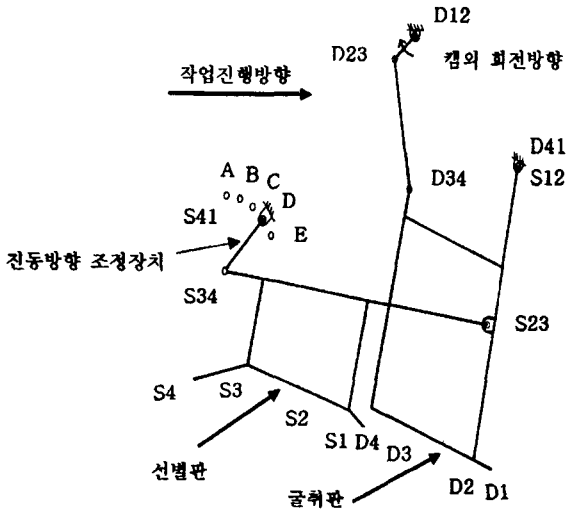


그림 1. 진동굴취기의 기구부

수 있는 선별판으로 나누어 구성하였다. 즉 굴취기는 6절 링크 기구로 구성된 굴취 기구부를 사용하였다. 구동 크랭크는 진동을 발생시키기 위하여 편심 캠으로 제작하였다. 물성이 서로 다른 뿌리작물을 굴취할 때 S41의 위치를 변경시킴으로써 선별판의 운동을 상하, 좌우, 또는 중간형태의 것으로 조정할 수 있도록 설계, 제작하였다(그림 1).

나. 실험방법

1) 진폭, 진동수 및 작업속도

시작기에는 직경이 74 mm이고, 편심량이 3, 6, 9 mm로 제작된 3쌍의 편심 캠이 사용되었고 필요한 경우에 한 쌍의 캠을 교환하여 원하는 진폭으로 실험을 하였다. 진동수는 고정된 엔진 회전수에서 트랙터에 설치되어 있는 동력취출장치 변속기를 2단, 3단, 4단으로 조작하여 변화시켰고 작업속도는 트랙터의 변속기를 1단, 2단, 3단으로 조작하여 변화시켰다.

굴취기의 토양절삭실험은 선별부를 구성하는 4절 링크장치의 출력링크를 상하진동이 가장 큰 위치(E점)에 연결시킨 상태에서 진폭, 진동수, 작업속도를 각각 변화시키면서 3 반복으로 진행하였고 실험에 이용된 진폭, 진동수 및 시작기의 작업속도는 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1 실험에 사용된 진폭, 진동수 및 작업속도

변수	수준		
진폭(mm)	3	6	9
진동수(Hz)	11.2	14.9	17.0
작업속도(km/hr)	0.91	1.13	1.56

2) 굴취성능에 영향을 미치는 파라미터

본 연구에서는 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태에 미치는 영향을 분석하기 위하여 진폭, 진동수, 작업속도 등에 의해 유도되는 파라미터- λ , ρ , K , T 를 다음과 같이 정의하고 사용하였다. 굴취날의 최대 작업속도와 트랙터의 전진속도의 비를 $\lambda = \omega A / V_t$, 굴취날

의 최대 가속도와 트랙터의 전진속도의 비(s^{-1})를 $\rho = \omega^2 A / V_t$, 굴취날의 최대 가속도와 중력가속도의 비를 $K = \omega^2 A / g$, 체공시간비를 $T = \lambda K$ 로 정의하였다. 여기서, A는 0에서부터 피크에 도달하는 진폭(m), ω 는 캠축의 각 속도(rad/s), V_t 는 트랙터의 전진속도(m/s), g는 중력가속도(m/s^2)이다.

3) 굴취성능에 미치는 파라미터의 영향

진폭, 진동수, 작업속도를 변화시키면서 각 조합에서 진폭, 진동수, 작업속도의 변화에 따른 견인력과 토크 및 굴취판과 선별판을 통과하는 토양의 평균 높이를 측정하고 진폭, 진동수, 작업속도 등의 요인을 기초로 하여 유도되는 설계요인인 속도비 λ , 속도와 가속도비 ρ , 가속도비 K 및 체공시간비 T가 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

진폭이 3 mm인 처리조합에서는 대부분의 경우 심한 체류현상이 발생되었기 때문에 실제 굴취작업에서는 사용할 수 없을 것으로 판단되어 파라미터가 굴취판과 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이에 미치는 영향을 분석할 때에만 고려하고 견인력, 토크 및 소요동력을 분석할 때에는 제외하였다. 견인력, 토크 및 소요동력을 분석할 때에는 총 54개의 실험데이터 중에서 outlier로 판단된 9개의 데이터를 제외한 45개의 데이터가 이용되었다.

파라미터- λ , ρ , K, T가 굴취성능에 미치는 영향을 구명하기 위하여 파라미터 값을 이용하여 견인력, 토크, 소요동력 및 굴취판과 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이에 대한 회귀방정식을 구하고 회귀모형을 변화시키면서 회귀모형에 따른 결정계수를 구하여 비교하였으며 회귀정도를 가장 잘 반영하는 경우의 결정계수를 표 2에 나타내었다.

표 2 파라미터 변화에 따른 견인력, 토크, 소요동력 및 굴취판과 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이에 대한 회귀식의 결정계수, R^2

항목	평균 견인력	최대 견인력	평균 토크	최대 토크	총 동력	굴취판 토양높이	선별판 토양높이
λ	0.461	0.325	0.299	0.012	0.114	0.804	0.729
ρ	0.408	0.225	0.439	0.108	0.168	0.729	0.661
K	0.328	0.153	0.511	0.210	0.375	0.600	0.517
T	0.444	0.259	0.442	0.077	0.198	0.742	0.655

가. 평균 견인력에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 평균 견인력을 가장 잘 반영하는 것은 λ 로 표현된 로그 회귀모

형이고, λ 다음으로 T로 표현된 로그 회귀모형이 평균 견인력에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. λ 가 0.975에서 3.785로 증가함에 따라 평균 견인력은 6569.7 N에서 4048.4 N으로 감소하는 추세로 나타났고, T가 2.95에서 39.62로 증가함에 따라 평균 견인력은 6542.3 N에서 4123.1 N으로 감소하는 추세로 나타났다.

나. 최대 견인력에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 최대 견인력을 가장 잘 반영하는 것은 λ 로 표현된 로그 회귀모형이고, λ 다음으로 T로 표현된 로그 회귀모형이 최대 견인력에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. λ 가 0.975에서 3.785로 증가함에 따라 최대 견인력은 7811.1 N에서 5870.5 N으로 감소하는 추세로 나타났고, T가 2.95에서 39.62로 증가함에 따라 평균 견인력은 7697.6 N에서 6002.1 N으로 감소하는 추세로 나타났다.

다. 평균 토크에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 평균 토크를 가장 잘 반영하는 것은 K로 표현된 2차함수 회귀모형이고, K 다음으로 T로 표현된 2차함수 회귀모형이 평균 토크에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. K가 3.03에서 10.47로 증가함에 따라 평균 토크는 19.4N-m에서 40.9N-m로 급속히 증가하는 추세로 나타났고, T가 2.95에서 39.62로 증가함에 따라 평균 토크는 20.5N-m에서 43.4N-m로 급속히 증가하는 추세로 나타났다.

라. 최대 토크에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 최대 토크를 가장 잘 반영하는 것은 K로 표현된 2차함수 회귀모형이고, K 다음으로 ρ 로 표현된 2차함수 회귀모형이 최대 토크에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. K가 3.03에서 7.37로 증가함에 따라 최대 토크는 90.3 N-m에서 63.1 N-m로 감소하였고, K가 7.37에서 다시 10.47로 증가함에 따라 최대 토크는 오히려 63.1 N-m에서 77.0 N-m로 증가하는 추세로 나타났다. ρ 로 표현된 회귀식도 K의 경우와 유사한 변화추세를 나타내었다. 이로부터 최대 토크의 감소에는 한계가 있음을 알 수 있다.

마. 총 동력에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 총 동력을 가장 잘 반영하는 것은 K로 표현된 2차함수 회귀모형이고, K 다음으로 T로 표현된 2차함수 회귀모형이 총 동력에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. K가 3.03에서 10.47로 증가함에 따라 총 동력은 3.47 kW에서 5.76 kW로 급속히 증가하는 추세로 나타났고, T가 2.95에서 39.62로 증가함에 따라 총 동력은 3.90 kW에서 5.74 kW로 급속히 증가하는 추세로 나타났다.

바. 굴취판을 통과하는 토양표면 높이에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 굴취판을 통과하는 토양표면 평균높이를 가장 잘 반영하는 것은 λ 로 표현된 로그 회귀모형이고, λ 다음으로 T로 표현된 로그 회귀모형이 굴취판을 통과하는 토양표면 평균높이에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. λ 가 0.488에서 3.785로 증가함에 따라 굴취판을 통과하는 토양표면 평균높이는 339.4 mm에서 95.0mm로 급속히 감소하는 추세로 나타났고, T가 0.74에서 39.62로 증가함에 따라 굴취판을 통과하는 토양표면 평균높이는 330.8 mm에서 103.6mm로 급속히 감소하는 추세로 나타났다.

사. 선별판을 통과하는 토양표면 높이에 미치는 파라미터의 영향

표 2에 나타낸 바와 같이 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이를 가장 잘 반영하는 것은 λ 로 표현된 2차함수 회귀모형이고, λ 다음으로 ρ 로 표현된 로그 회귀모형이 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이에 대한 회귀정도를 잘 반영하고 T로 표현된 로그 회귀모형은 3위로 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이를 잘 반영것으로 나타났다. λ 가 0.488에서 3.785로 증가함에 따라 선별판을 통과하는 토양표면 평균높이는 249.3 mm에서 32.7mm로 급속히 감소하는 추세로 나타났고, T가 0.74에서 39.62로 증가함에 따라 굴취판을 통과하는 토양표면 평균높이는 260.2 mm에서 40.9mm로 급속히 감소하는 추세로 나타났다.

이상의 고찰에서 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태에 주로 영향을 미치는 파라미터에는 λ , K 등이 있으나, λ 로 표현된 회귀모형은 견인력에 대한 회귀정도와 굴취판 및 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이에 대한 회귀정도를 가장 잘 반영하고, K로 표현된 회귀모형은 토크와 총 동력에 대한 회귀정도를 가장 잘 반영하지만 거의 모든 경우에 T로 표현된 회귀모형이 두 번째로 견인력, 굴취판과 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이, 토크 및 총 동력에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서, 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태를 평가하는 지표로서는 진동 굴취기에 관한 모든 변수의 영향을 포함하는 T가 적당할 것으로 판단되고, 토양의 흐름상태를 고려할 때 $T > 2.4$ 인 값을 취하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 강화석(2000)은 토양의 흐름상태를 관찰하고 $T > 2.0$ 값을 추천하였는데 본 연구에서 사용한 변수조합에서 $T = 2.39$ 는 $T > 2.0$ 을 만족시키는 최소의 값이다. 본 연구에서의 관찰결과를 T 값으로 고찰하여 진동형 굴취기의 설계와 작업성능을 평가할 때 이용할 수 있는 T 값을 추천하면 그림 2, 그림 3에 나타낸 바와 같다.

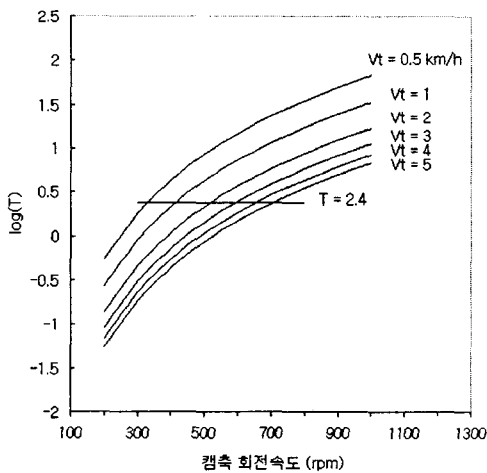


그림2. 진폭 9 mm일 때 캠축의 회전속도와 굴취기의 작업속도에 대한 $\log(T)$ 값

이상의 고찰에서 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태에 주로 영향을 미치는 파라미터에는 λ , K 등이 있으나, λ 로 표현된 회귀모형은 견인력에 대한 회귀정도와 굴취판 및 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이에 대한 회귀정도를 가장 잘 반영하고, K로 표현된 회귀모형은 토크와 총 동력에 대한 회귀정도를 가장 잘 반영하지만 거의 모든 경우에 T로 표현된 회귀모형이 두 번째로 견인력, 굴취판과 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이, 토크 및 총 동력에 대한 회귀정도를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서, 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태를 평가하는 지표로서는 진동 굴취기에 관한 모든 변수의 영향을 포함하는 T가 적당할 것으로 판단되고, 토양의 흐름상태를 고려할 때 $T > 2.4$ 인 값을 취하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 강화석(2000)은 토양의 흐름상태를 관찰하고 $T > 2.0$ 값을 추천하였는데 본 연구에서 사용한 변수조합에서 $T = 2.39$ 는 $T > 2.0$ 을 만족시키는 최소의 값이다. 본 연구에서의 관찰결과를 T 값으로 고찰하여 진동형 굴취기의 설계와 작업성능을 평가할 때 이용할 수 있는 T 값을 추천하면 그림 2, 그림 3에 나타낸 바와 같다.

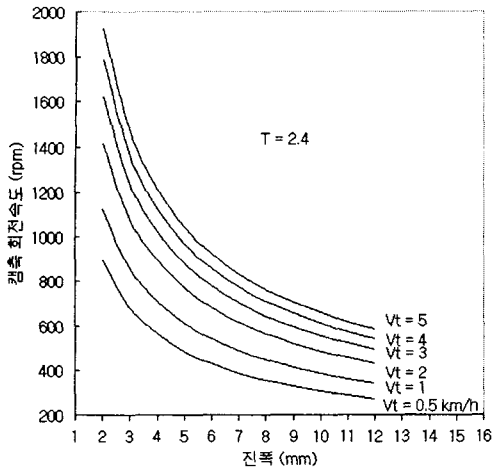


그림 3. T = 2.4일 때 진폭과 굴취기의
작업속도에 대한 캠축의 회전속도

하는 추세로 나타났고, 토크와 총 동력은 증가하는 추세로 나타났다. 총 동력의 25.7~84.6%가 진동동력에 소비되었고, 총 동력은 진동동력의 증가에 따라 증가하는 추세로 나타났으며, 진동동력의 증가는 진동수가 증가하였기 때문인 것으로 분석되었다.

$$T = \lambda K = \frac{\omega A}{V_t} \frac{\omega^2 A}{g} = \frac{\omega^3 A^2}{g V_t} \text{ 이기 때문에 제공시간비 } T \text{가 동일하더라도 동력절감의 관점에}$$

서 볼 때 진폭을 크게, 진동수를 작게 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과에서 T 값을 기준으로 제공한 그림 2는 진폭이 9 mm인 경우에 캠축의 회전속도가 결정되면 트랙터의 최대 작업속도를 선택할 때, 또는 트랙터의 작업속도가 결정되면 캠축의 최소 회전속도를 선택할 때 유용한 자료로 사용될 수 있고, 그림 3은 진폭, 진동수, 작업속도 중에서 2가지 변수가 결정되면 나머지 변수의 최대 또는 최소 값을 선택할 때 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

姜和錫, 辛英範, 金相憲, 咸泳昌. 1993. 트랙터용 감자收穫機의 開發. 한국농업기계학회지 18(1): 21~29.

Kang, W. S. 2000. DEVELOPING A SMALL COMMERCIAL VIBRATING POTATO DIGGER(I) -Assessment of Kinematic Design Parameters-. ASAE Paper No. 001077.

Kang, W. S. and J. L. Halderson. 1991a. Development of a vibratory potato digger for small farms. American Potato Jour, 68:557-568.

Kang, W. S. and M. E. Wright. 1996. Design and performance parameters of vibrating potato diggers. SAE Paper No. 961777.

4. 요약 및 결론

본 연구는 선별부의 진동방향을 조정할 수 있는 진동굴취기를 설계·제작하고, 토양절삭 실험을 통하여 진동굴취기의 설계에 있어서 바람직할 것으로 판단되는 설계기준을 제공하고자 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다. 견인력, 토크, 소요동력 및 토양의 체류상태를 평가하는 지표로서는 진동굴취기에 관한 모든 변수의 영향을 포함하는 T가 적당할 것으로 판단되고, 토양의 흐름상태를 고려할 때 T > 2.4인 값을 취하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

T 값의 증가에 따라 견인력과 굴취판 및 선별판을 통과하는 토양표면의 평균높이는 감소