

인발식 마늘수확기 개발(1)⁺

- 개념설계 및 설계인자 분석 -

Development of a Lifting Type Garlic Harvester(1)⁺

- Design Concept and Analysis of Design Factors -

장영창*	노광모**	박준걸**
정희원	정희원	정희원
Y. C. Chang	K. M. Noh	J. G. Park

1. 서론

현재까지 마늘 생산의 생력기계화 작업체계는 확립되어 있지 않으며, 특히 마늘의 수확은 많은 노동력을 필요로 하여 마늘 생산비에 수확비용이 차지하는 비중은 매우 높다. 따라서 마늘 수확의 생력화를 위해 마늘수확기 개발이 시급한 실정이다.

마늘수확기의 개발을 위해 분석, 구명되어야 할 중요한 인자는 수확기의 소모동력, 작업 성능, 메커니즘의 간결성과 편리성, 수확효율 및 수확후 처리 등에 관계되는 모든 인자들이 포함된다. 나아가 마늘수확기에 고려되어야 할 주요 작동부는 동력발생부, 동력전달부, 마늘 수확부 및 이송부, 마늘 수확을 위한 전처리부 및 후처리부, 마늘수확기 운행에 필요한 운전부 등으로 나눌 수 있다.

마늘수확기가 최적의 수확효율과 경제적인 작업성능을 발휘하기 위하여 수확부 및 이송부, 동력전달부의 설계는 매우 중요하다. 본 연구에서는 수확 시기에 마늘의 기계적, 형상적 물성(노광모 등, 1999)을 바탕으로 보행형 인발식 마늘수확기를 개발하고자 마늘수확기의 개념설계를 수행하고 주요 설계인자를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

마늘수확기는 트랙터/동력경운기 부착형, 자주형 수확기로 분리될 수 있다. 부착형과 자주형 수확기를 개발하는 데에는 설계에 많은 차이점이 있으나, 수확효율과 작업성능은 정밀한 수확부의 설계에 관계되며 수확부의 기본 설계개념은 부착형과 자주형 수확기가 동일하다.

본 연구에서 채택한 마늘수확의 기본 개념은 생육 마늘줄기가 인발 가이드를 따라 마늘줄기 고정부로 안내된 후, 지면 상방향으로 마늘을 인발함으로써 뿌리와 흙 사이의 접촉력을 분리하고 이송되는 방식이다. 따라서 수확기가 전진함에 따라 마늘은 연속적으로 인발된다. 이와 같은 방식은 기존 굴취형에 대해 동력소모가 작고 수확기의 메커니즘이 간단한 장점이 있다.

+ 본 연구는 농림수산부 특정연구과제 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 서울대학교 농생대 농업개발연구소

** 건국대학교 자연대 생물산업기계공학과

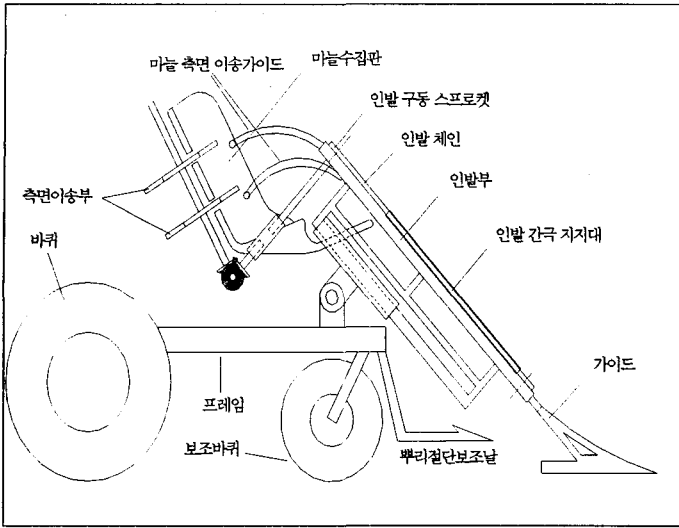


그림 1. 보행형 인발식 마늘수확기의 개념도.

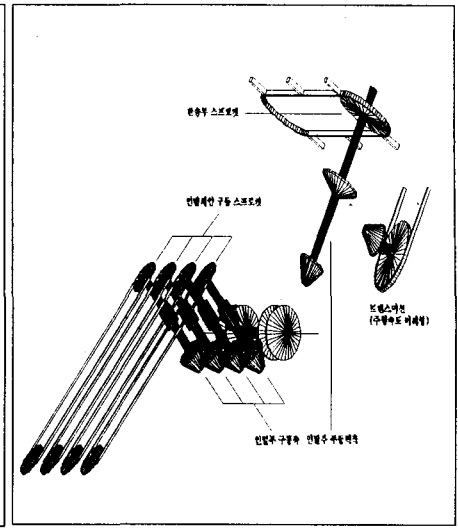


그림 2. 인발식 마늘수확기의 동력 전달부 개념도.

그림 1은 보행형 인발식 마늘수확기의 기본 개념에 근거하여 설정된 마늘수확기의 개념도를 보여주고 있다. 인발식 마늘수확기의 주요부는 안내 가이드, 인발부 및 이송부, 측면반송부, 결속부, 엔진부와 프레임, 바퀴 등으로 이루어진다. 그림에서 보는 바와 같이 마늘줄기는 인발체인 사이에 안내되고 체인의 상부 회전에 의해 마늘은 인발, 이송되어진다. 마늘은 인발되어 상부로 이송되어진 후 측면반송부에 의해 결속부로 보내지며 적절한 크기의 마늘 단으로 결속되어 배출된다. 배출된 마늘단은 포장 옆에 일정 배열되고 자연 건조된 후 일괄 수거된다.

그림 2는 인발식 마늘수확기 동력전달부의 개념도를 보여주고 있다. 마늘수확기의 동력 전달부는 5종의 서로 다른 베벨기어와 3종의 스프로켓으로 구성되었다. 그림에서 보는 바와 같이 차륜 축으로부터 전달되어 온 동력은 베벨기어를 통하여 인발부 주동력 축을 구동한다. 인발부 주동력축의 회전은 주행속도 비례형으로 스프로켓과 베벨기어의 잇수비로 조정된다. 인발부 주동력 축이 회전함에 따라 반송부의 스프로켓이 회전하며 인발된 마늘을 측면 반송하게 된다. 인발부의 주동력은 U-조인트와 스프라인을 통하여 인발체인 구동 스프로켓을 회전시킨다.

3. 결과 및 고찰

(1) 마늘 예취폭

수확시기 생육마늘의 물성연구에 따르면 마늘줄기는 지면 위 15cm~20cm에서 마디가 존재하며 매우 적은 힘으로도 줄기가 끊어진다. 따라서 마늘줄기를 인발할 때 끊어짐이 발생하지 않는 최대높이 h 는 지면으로부터 15cm로 볼 수 있다. 또한 줄기를 붙잡을 때의 폭을 대략 5-10cm로 가정하면 줄기를 붙잡는 장치의 높이는 대략 지면 위 10cm에 위치하여야 한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 마늘줄기를 붙잡는 장치의 높이 h_{max} 가 지면 위 10cm

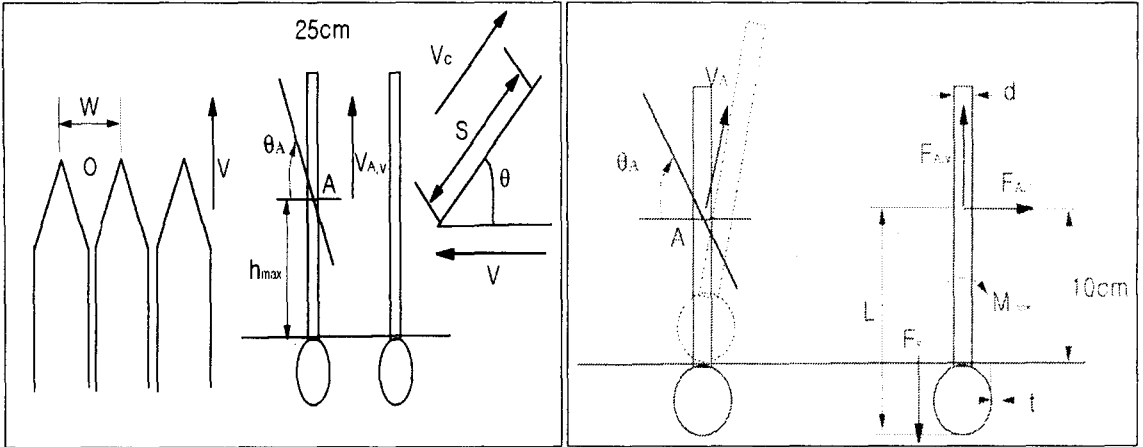


그림 4. 마늘수확부의 예취폭, 인발길이 및 인발상승각. 그림 3. 마늘 인발시 인발력적 및 응력분석.

일 때, 마늘줄기가 옆으로 기울어진 상태에서도 마늘줄기는 마디 밑에서 붙잡혀야 하므로 인발부 1조의 최대 예취폭 W 는 $(W/2)^2 + 10^2 < 15^2$ 로부터 대략 22cm이다.

(2) 인발/이송부의 길이 및 상승각

그림 3에서 마늘줄기가 붙잡힌 후 인발과 더불어 마늘은 각도 θ 를 따라 상방향으로 이송된다. 마늘뿌리가 지면 위로 올라올 때 인발이 마무리되었다고 가정하면 통마늘 및 뿌리의 길이를 고려하여 A점은 수직방향으로 최소 25cm만큼 상승되어야 한다. 이를 기준할 때 인발/이송부의 길이 S 는 최소 $25/\sin\theta$ cm가 되어야 한다. 마늘의 인발상승각 θ 는 인발성능, 효율에 매우 중요한 요인으로서 실험적 방법에 의거해 결정된다.

(3) 인발부의 속도

그림 3에서 마늘줄기가 인발부에 붙잡히는 점을 A라 하면 A점 궤적과 속도는 다음과 같다.

$$\theta_A = \tan^{-1}\{ V_c \sin\theta / (V - V_c \cos\theta) \}, \quad \text{단 } 180 - \theta > \theta_A > \theta$$

$$V_{A,h} = V_c \cos\theta$$

$$V_{A,v} = V_c \sin\theta$$

- 여기서 θ_A = A점의 상승각
- $V_{A,h}$ = A점의 수평속도
- $V_{A,v}$ = A점의 수직속도
- V_c = 인발부 회전에 따른 선속도
- V = 마늘수확기의 전진속도
- θ = 인발각(인발부의 설치각)

수확기의 전진속도 V 가 증가되면 θ_A 는 감소하게 되어 마늘줄기는 전진방향으로 쉽게 되

며 마늘줄기 인발은 어렵게 된다. 가장 이상적인 인발은 θ_A 가 90° 일 때로 이 상태를 유지하기 위해서는 인발부 선속도의 수평방향 분속도 $V_c \cos\theta$ 가 수확기 전진속도 V 와 같아져야 한다. 보행형 수확기의 경우 전진속도는 작업자의 포장내 이동 가능속도인 $0.4m \sim 1.0m/sec$ 내외로 설정되어야 할 것으로 판단된다.

수확기의 전진속도가 αV 로(α 는 전진속도의 증감비) 변할 때 θ_A 가 90° 도를 유지하기 위해서 V_c 의 수평방향 속도는 αV 가 되어야하며, 따라서 인발부의 선속도 V_c 는 αV_c 가 되어야 한다. 수확기가 포장내에서 전진할 때 바퀴와 지면 사이에서는 약간의 슬립이 발생되므로 실제 주행속도는 바퀴 회전수에 따르는 이론 주행속도보다 약간 작아진다. 따라서 바퀴의 회전속도에 비례하도록 인발부의 선속도를 설계할 경우 인발부의 선속도는 실제 주행속도에 상대적으로 크게 되므로 인발각 θ_A 는 대략 $90^\circ \sim 100^\circ$ 가 된다. 이 경우에 수확시 마늘의 껍적은 그림 4와 같게 된다.

(4) 마늘줄기의 인발응력

그림 4에서 보는 바와 같이 인발각 θ_A 를 대략 $90^\circ \sim 100^\circ$ 로 가정하면, 마늘줄기가 인발부에 붙잡힌 후 인발될 때까지 마늘줄기는 통마늘이 지면상으로 배출되기 위한 흙의 저항력, 뿌리와 흙 사이의 점착력에 기인하는 인장력과 수확기 반진행 방향의 토양다짐 반력에 기인하는 굽힘응력을 받게 된다. 흙의 저항력과 뿌리의 점착력의 합을 F_s 라고 하면 수확기의 인발력 $F_{A,V}$ 는 F_s 보다 커야한다. 마늘줄기를 원형으로 가정하여 그 직경을 d 라고 하면 마늘줄기가 받는 응력 σ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_t + \sigma_b \\ &= (k_1 \cdot F_{A,v}) / (\pi d^2/4) + \{k_3 \cdot M_{\max} \cdot (d/2)\} / I \\ M_{\max} &= F_{A,h} \cdot 10 \end{aligned}$$

여기서 σ_t = 인장응력, N/cm^2
 σ_b = 굽힘응력, N/cm^2
 k_1 = 응력집중계수
 F_s = 뿌리와 흙의 점착력 및 마늘과 흙 사이 저항력의 합력, N
 k_3 = 단면 관성모멘트에 관한 응력집중계수
 M_{\max} = 최대 굽힘모우멘트, $N \cdot cm$
 I = 면적모우멘트($3\pi d^3 t/32$, t 는 마늘줄기 내벽의 두께), cm^4
 $F_{A,h}$ = 인발력의 수평분력, N

굽힘응력은 마늘줄기가 인발부에 최초로 붙잡혀서 이송 순간에 발생하는 응력으로서 인발이 시작된 후에는 마늘줄기의 유연성과 토양의 밀립에 기인하여 없어진다고 가정할 수 있다. 이 경우 마늘줄기는 그림 4에서 점선과 같이 위치하게 되며 순수 인장응력만 받게 된다.

생육마늘의 물성연구에 따르면, 마늘뿌리는 최대 $50N$ 정도의 인장력에서 끊어짐이 발생하는 것으로 알려져 있으며 뿌리의 끊어짐이 발생하는 순간에 인발이 완료되었다고 가정할 수 있다. 또한 마늘줄기를 붙잡는데 기인하는 응력집중계수 k_1 을 대략 1.2 로 가정할 때, 직

경 1cm의 마늘줄기가 받는 응력은 대략 77 N/cm^2 정도가 된다. 생육상태 마늘줄기의 허용 응력은 약 110 N/cm^2 로서 마늘줄기는 인장응력을 충분히 견딜 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 마늘줄기 직경이 작을 경우에는 안전계수를 고려해야하며 뿌리의 인장력을 감소시킬 부속장치가 필요할 것으로 생각된다.

(5) 인발부의 인발간격

마늘줄기가 인발부에 잡힌 후 마늘줄기는 인발간격 만큼 압축되고 압축력의 크기는 효과적인 인발력 전달의 주요 요인이 된다. 압축력이 매우 클 경우 마늘줄기는 절단현상이 발생하며, 압축력이 작을 경우 마늘줄기의 내외피 사이에서 발생하는 미끄러짐 현상에 의해 인발력의 전달은 불가능하다.

생육 마늘줄기의 최대 절단력은 약 60N으로 알려져 있으며, 최대 절단력에서 마늘줄기의 직경은 원래 직경의 30%(약 2.5mm정도)로 감소한다. 또한 인발부는 지면 위 10cm 정도의 높이에 위치하여야 하며, 마늘줄기를 잡을 때 줄기와 접하는 부분의 길이는 최대 10cm를 넘을 수 없다. 이를 기준으로 인발체인 간격은 2-3mm로 설정하고 줄기와 접하는 길이는 8cm~10cm로 하여야 한다.

(6) 동력전달부의 기어 및 스프로킷 설정

인발부의 속도 분석에 따르면, 인발부의 선속도 V_c 는 $V/\cos\theta$ 와 같다. 그러므로 인발체인 구동 스프로킷의 각속도는 다음과 같이 결정된다.

$$w_{11} = (1-s) \times \frac{r_w}{r_{11}} \times \frac{1}{\cos\theta} \times w_w$$

여기서, s = 슬립율, r_w = 바퀴의 반경, w_w = 바퀴의 각속도, r_{11} = 인발체인 구동 스프로킷 반경, w_{11} = 인발체인 구동 스프로킷 각속도

그림 2에 보여지고 있는 베벨기어와 스프로킷의 잇수와 직경은 다음 식을 만족하는 기어 및 스프로킷의 조합이 되도록 결정되어야 한다.

$$\frac{w_{11}}{w_0} = \frac{N_5}{N_7} \times \frac{N_2}{N_3} \times \frac{r_0}{r_1}$$

여기서 w_0 = 엔진 회전 전달 스프로킷의 각속도
 r_0 = 엔진 회전 전달 스프로킷의 반경
 w_n = n번 기어 또는 스프로킷의 회전 각속도
 N_n = n번 기어의 잇수
 r_n = n번 스프로킷의 반경

(7) 인발 보조장치

그림 1에서 마늘줄기가 붙잡힌 후 마늘이 수직방향으로 대략 20cm 정도 상승했을 때 뿌리를 제외한 통마늘과 마늘줄기는 지상에 위치하게 된다. 그 위치에서 실제적인 인발은 완료되었다고 볼 수 있으나 뿌리의 신장에 기인하여 인발체인에 인장력이 계속 남아 있게 된

다. 따라서 이를 제거하기 위한 인발보조장치로서 마늘뿌리 절단날의 위치는 지상 위 5cm, 인발부 앞단으로부터 31cm~32cm 정도에 위치해야할 것으로 판단되었다.

(8) 인발부의 소요동력

마늘 재배양식을 분석한 결과에 따르면 재식거리는 대략 12cm~18cm, 재배거리는 약 10cm인 것으로 나타났다. 인발식 수확기에서 인발부 1조를 기준할 때, 전진속도는 최대 1m/sec정도이므로 초당 10조의 마늘이 인발된다. 최대 인발력을 $55N(k_1 \times F_s)$ 으로 가정하고 마늘줄기가 25cm 수직 상승되었을 때 인발이 완료된 것으로 가정하면 1조의 마늘을 인발하기 위해 소요되는 에너지는 $55N \times 25cm$, 즉 $13.75N \cdot m$ 이다. 따라서 인발부 1조가 소요하는 동력은 137.5W(0.18마력)가 된다.

마늘재배시 두둑의 폭은 약 1.6-1.8m로 왕복작업을 통해 한 두둑의 마늘이 수확된다고 가정하면 1조의 인발부의 최대 작업폭은 대략 22cm이므로 4조가 필요하다. 이 경우 인발부에 의해 소요되는 총동력은 약 0.8마력이며 보행형 인발식 마늘수확기의 엔진 크기는 주행장치 등을 고려하여 2~3마력 정도가 바람직할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 마늘줄기가 인발 가이드를 따라 마늘줄기 고정부로 안내되고 지면 상방향으로 마늘을 인발함으로써 뿌리와 흙 사이의 점착력을 분리하고 마늘을 수확하는 보행형 인발식 마늘수확기를 개발하고자 마늘수확기의 개념설계를 수행하고 주요 설계인자를 분석하였다.

분석 결과에 따르면, 마늘의 최대 예취폭은 대략 22cm였으며 인발부의 길이는 인발상승각의 함수로 인발성능에 매우 중요한 요인이었다. 또한 이상적인 인발을 위해 인발부 선속도의 수평방향 분속도는 수확기 전진속도 V 와 같아져야 하고, 인발시 마늘줄기가 받는 응력은 대략 $77 N/cm^2$ 였으며 인발체인의 간격은 2-3mm, 줄기를 붙잡는 폭은 8cm~10cm가 바람직한 것으로 나타났다. 동력전달부의 기어 및 스프로킷은 인발부 선속도와 수확기 전진속도가 조합을 이루도록 설정되어야 하며, 인발부의 소요동력은 인발부 1조당 약 137.5W(0.18마력)이었으며 4조 기준 마늘수확기의 총 요구동력은 약 2~3마력인 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 노광모, 장영창, 박준걸. 1999(2월). 마늘수확기 개발을 위한 기초연구(1) -수확기 마늘의 물성 -. 한국농업기계학회지 24(1):1-8.
2. 농촌진흥청. 1994. 진동굴취날형 마늘, 양파수확기 개발. 농시보, 300-313.
3. 古谷 正. 1979. 根菜의 引拔力에 關한 研究(第 1報). 日本農業機械學會誌 40(1):47-52
4. 古谷 正. 1979. 根菜의 引拔力에 關한 研究(第 2報). 日本農業機械學會誌 40(2):195-200
5. LePori, Wayne and Price Hobgood. 1970. Mechanical Harvester for Fresh Market Onions. 1970. Transactions of the ASAE 13(4):517-519, 222