

## 휠로다용 적재량 계측 알고리즘의 개발

양순용

기계·자동차공학부

### <요약>

본 논문에서는 휠로다의 굴삭상차 작업시 버킷으로 퍼올린 적재물의 중량을 계측하는 새로운 알고리즘에 관한 연구이다. 구체적으로는 붐회전각 및 붐실린더의 상승측 유실의 압력을 측정하여 각각의 붐회전각 및 압력을 통해 그 때의 적재중량을 계산한다. 설정된 붐회전각의 범위 내에서 연산된 적재중량값 중 최고값 및 최저값 일부의 평균치를 적재중량으로 산정한다. 이러한 연산작업이 굴삭상차 작업 중에 실시간으로 이루어지므로 계측을 위해 장비의 작동을 멈추는 일없이 작업을 계속하면서도 정확한 적재중량이 가능하도록 하였다.

## Development of Payload Measurement Algorithm for Wheel Loader

Soon Yong Yang

School of mechanical and Automotive Engineering

### <Abstract>

This paper is toward the development of the payload measurement algorithm for a wheel loader. The payload is calculated at each boom rotation angle position by measuring both boom rotation angle and boom cylinder pressure. The peak and the bottom values of the payloads calculated above are selectively averaged and its result is assigned to the payload. All the computing processes for the payload are executed in real time. And then, it is possible to continue loading process of the wheel loader

without any stop for measuring its payload.

## 1. 서론

펠로다는 적재물을 굴삭하여 트럭 등에 적재하는 작업을 주요 작업으로 하는 건설기계로서 트럭에 적재시 차량의 적정 적재중량을 넘지 않도록 신는 것이 중요하다. 종래에는 트럭에 적재시 운전자의 경험에 의해 적재중량을 추정하여 적정 적재중량을 넘지 않도록 작업을 하거나 아니면 적재중량을 계량대에서 계측후 다시 작업장으로 돌아와 적재량을 적정적재량이 되도록 가감하는 방법으로 작업을 수행했다. 따라서, 작업의 효율이 떨어지고 정확하게 적정 적재중량을 신는 작업이 불가능하였다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 선진 외국에서는 많은 연구가 행해지고 있다<sup>1)-4)</sup>

봄 회전각센서, 봄 압력센서를 이용하여 버킷에 떠담은 적재물의 무게중심이 버킷 회전 중심점을 지나는 연직선 상에 있다고 가정하여 적재중량을 계산하는 방식과 봄 회전각 및 봄압력을 이용하되, 빈 버킷 및 미리 중량을 알고있는 적재물에 대한 봄 회전각-봄 압력선도를 구하여 놓고 실 적재작업시의 봄 회전각-봄 압력선도를 커브피팅으로 구하여 이들 3개의 봄 회전각-봄 압력선도를 이용하는 방법 등이 있다.

이러한 종래의 적재량 계측시스템은 다음과 같은 문제점이 있다. 실제 작업시 봄 상승속도 및 봄 회전각에 따라 계산된 적재량이 각기 다르게 나타나게 되는데 이에 대한 해결방법을 제시하지 못하고 있다. 또한 계측 알고리즘에서 실제 작업시의 봄 회전각-압력선도를 구하는데 있어서 빈 버킷시 및 아는 중량에 대한 봄 회전각-압력선도와 같은 조작조건에서 비교를 하는 바 실제 작업시 조작량이 다르게 되면 정확한 적재량을 구할 수 없게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 종래의 적재중량 계측시스템의 적재중량 계측 알고리즘을 보완하여 봄 회전각에 따른 각각의 압력에 대해 그때의 적재중량을 연산하고 그 적재 중량 값 중 봄의 특정회전구간에서의 피크값 및 바텀값을 구하여 이들의 평균치를 적재중량으로 판정함으로써 봄 상승속도 변화나 버킷 자체의 중량변화 등에 관계없이 적재중량을 계측할 수 있고 또한, 적재중량 연산시 수반되는 삼각함수를 동반하는 무게중심 거리값을 봄 회전각도에 따라 미리 ROM에 저장하여 놓고 이들 값을 필요시 불러서 계산하도록 함으로써 저성능의CPU로도 적재중량계측이 가능한 제어알고리즘을 개발하였다.

## 2. 기본알고리즘

그림.1의 블록다이어그램은 봄이 정지하여 있는 정적인 상태에서의 자유물체도를 나타낸다. 봄의 회전중심인 점A를 중심으로 한 모멘트 평형으로부터 빈 버킷일 경우

$$\sum M_A = W' \cdot \overline{AM'} - F' \cdot \overline{AN} = 0 \quad (1)$$

적재중량 W를 적재하였을 경우

$$\sum M_A = W \cdot \overline{AM} - W' \cdot \overline{AM'} - F \cdot \overline{AN} = 0 \quad (2)$$

(1),(2)식에서

$$W = (F - F') \cdot \overline{AN} / \overline{AM} \tag{3}$$

$$= (P - P') \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \cdot \overline{AN} / \overline{AM}$$

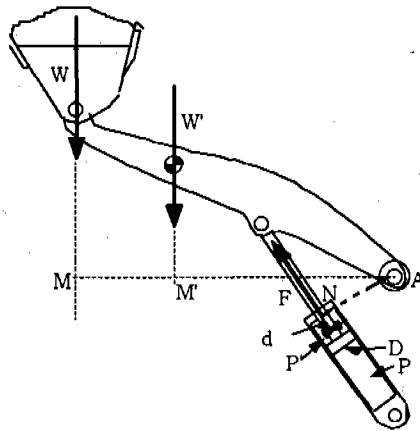


그림 1. Schematic diagram of measurement system of wheel loader

- 단, W : 버킷에 적재한 적재물의 중량  
 W' : 빈 버킷일 때의 붐 및 버킷의 자중  
 F : 버킷에 W를 적재하였을 때의 붐 실린더 로드 에 걸리는 힘  
 F' : 빈 버킷일 때의 붐 실린더 로드 에 걸리는 힘  
 P : 버킷에 W를 적재하였을 때의 붐 실린더 상승측 유실의 압력  
 P' : 빈 버킷일 때의 붐 실린더 상승측 유실의 압력  
 p : 버킷 실린더의 하강측 유실의 압력  
 D : 붐 실린더헤드의 직경  
 d : 붐 실린더로드의 직경

따라서, 빈 버킷에서의 붐 회전각에 대한 붐 압력을 알면 실 작업시 붐 압력을 계측하여 적재중량을 계산 할 수 있다. (3)식은 붐이 정지상태에 있을 때의 적재중량을 구하는 식이고 실제 적재 작업시에는 붐을 정지한 상태는 거의 없고 계속 붐을 작동시키면서 작업을 하게된다. 따라서, (3)식만으로는 연속 작업시 적재중량을 계측 할 수 없다. 즉, 연속 작업시에는 (1),(2)식에 붐 실린더헤드와 실린더내면과의 마찰력 및 유체력, 붐·버킷의 자중 및 적재중량의 관성모멘트 등을 고려하여야 한다. 그런데 마찰력 및 유체력에 영향을 미치는 요소로는 유압 작동유의 점도, 체적탄성계수 등이 있는데 이는 작동유의 열화 정도, 온도 등에 따라 각기 다르다. 또한 관성모멘트를 고려하려면 버킷의 적재물의 형태에 대한 정보가 있어야하고 붐 회전각속도를 반영하여야 한다. 그러나 다음의 이유들로 인해서 붐 연속작동시 적재중량의 정량적 해석은 매우 어려울 뿐 아니라 설사 가능하더라도 상품화 적용은 사실상 불가능하다.

- 첫째: 유압작동유의 점도, 체적탄성계수 등의 정확한 상태파악이 어렵다.  
 둘째: 버킷에 퍼담은 적재물의 형태가 어떻게 되어있는지를 알 수 없다.

셋째: 붐 압력상승의 원인을 정확히 알 수가 없다. 즉, 운전자가 굴삭후 급상승 조작을 하면 초기의 압력이 매우 높게 되는데 이 높은 압력이 적재량이 많아서 발생한 것인지 아니면 급조작하여 발생한 것인지를 알 수가 없다.

이상과 같은 이유에서 적재 중량 계측시 정확한 정량분석에 의한 방법보다는 실험적으로 구하는 방법이 실제 적용되고 있는데 일례로 미국특허 US 5,105,896 에서는 빈 버킷시의 붐 회전각-붐 압력선도와 아는 중량에 대한 붐 회전각-붐 압력선도를 구하여 놓고 알고자하는 적재물에 대하여 붐 회전각-압력선도를 구하여 특정 붐 회전각 구간에서 압력편차를 구하여 보간법에 의해 적재중량을 구하고 이 값에 실험적으로 구한 붐 회전 각속도에 비례한 상수값을 구하여 더해줌으로써 적재중량을 구하고 있다.

본 논문에서는 이러한 붐 연속작동시의 정량적 분석, 계산이 어려운 적재중량을 정확하게 계측하기 위한 계산 알고리즘을 실차 시험결과를 분석, 유추하여 얻을 수 있었다.

### 3. 기본 알고리즘에 의한 시험결과

(3)식의 기본알고리즘을 이용하여 붐을 연속작동 하였을 때 붐 회전각에 따라 적재중량이 어떻게 변하는지를 시험하였다. 버킷에 실은 시료 적재중량은 1, 3, 4, 8 TON의 4종류를 각각 사용하였고 버킷의 각도 및 붐 상승속도는 각각 최대치로 하여 같은 조건에서 실시하였다. 1, 3, 4, 8 TON 각각에 대한 시험결과는 그림 2, 그림 3, 그림 4, 그림 5 와 같다.

결과를 살펴보면 그림 1, 그림 2, 그림 3, 그림 4 공히 붐이 수평일 때를 0°로 기준 했을 때 -38° 즉 붐을 들어올리는 시점에서는 붐 및 적재물의 관성력 때문에 생기는 피크압력 때문에 원래 적재중량의 2.5배 정도의 적재중량이 계측되고 있고 붐이 상승함에 따라 오차가 점점 줄어들어 그림 2, 그림 3, 그림 4의 경우 -10°~+10°의 부근에서는 원래의 적재 중량값으로 되고 그림 5의 경우 -20°부근에서 원래의 값과 비슷하게 된 후 적재중량이 더 작게 계측되다가 +30°부근에서부터 약간 더 많이 계측되었다.

또한, 붐 회전각 -10°~+10°의 영역에서 이들 시험 계측한 적재 중량값을 면밀히 분석한 결과 그림 6과 같이 이들 값의 피크값 (증가에서 감소로 변화가 일어나는 값) 과 바텀값 (감소에서 증가로 변화가 일어나는 값) 의 발생횟수를 조사하여 이들이 7번째의 적재 중량값이 시료 적재 중량값과 비슷하였다. 그래서, 7번째를 전후로 한 개씩을 더하여 이들의 평균치를 구하여 얻은 값은 시료 중량과의 오차가 모두 5% 미만으로 좋은 오차를 보이고 있다. 표 1.은 이 결과를 나타내고 있다.

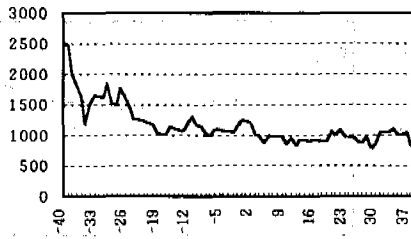


그림 2. 1TON 적재중량 계측결과

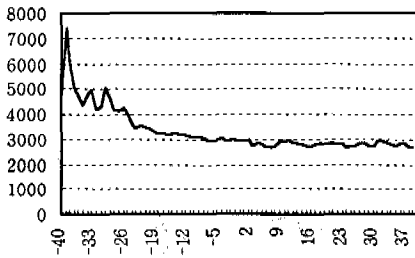


그림 3. 3TON 적재중량 계측결과

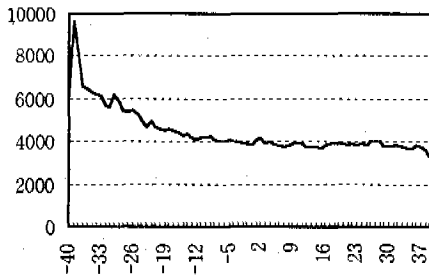


그림 4. 4TON 적재중량 계측결과

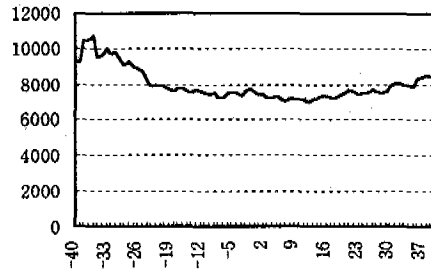


그림 5. 8TON 적재중량 계측결과

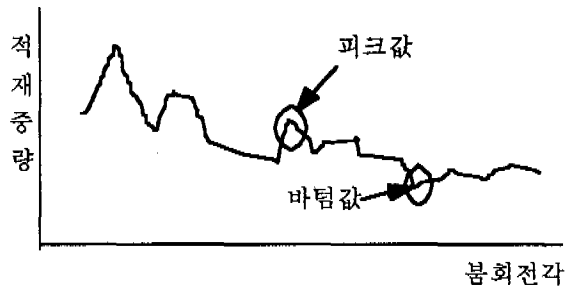


그림 6. 적재중량의 피크값과 바텀값

표 1. (6,7,8 회째) 피크값·바텀값의 평균적재중량

시료 중량	1 TON	3 TON	4 TON	8 TON
6,7,8 평균값	1043 kg	3056 kg	4105 kg	7717 kg
오차	+4.3%	+1.9%	+2.6%	-3.5%

시험결과로부터 다음과 같은 결론을 유추 할 수 있었다.

**첫째 :** 굴삭작업 직후 붐을 들어올리기 시작한 시점(-38 °부근)에서 어느 정도 붐이 상승작동을 한 후(-20 °~-10 °부근)까지는 버켓·붐의 자중 및 적재물의 관성모멘트 때문에 압력이 증가하여 적재중량이 많이 나오기 때문에 연속작업시 이 구간에서의 계측은 피해야 한다. 즉, 붐을 상승조작을 하게되면 발생하는 압력은 그림 7과 같은 파도모양을 일으키게 되는데 붐 상승조작 초기에 진폭이 크고 -10 °부근에서부터는 진폭이 작아진다.

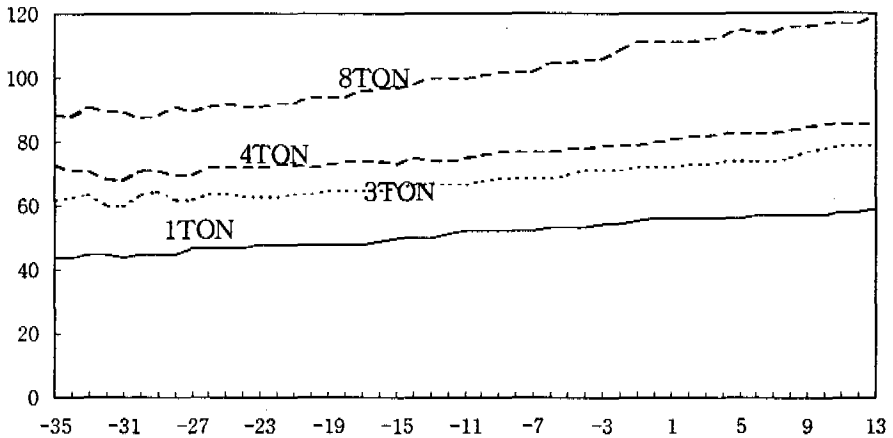


그림 7. 붐회전각-압력 계측 선도

**둘째 :** 계측한 적재 중량 피크값 및 바텀값 중의 6,7,8번째 값들의 평균값이 시료중량의 5% 이내의 정확성을 갖고 있다.

**셋째 :** 적재중량 계측에 사용되는 압력센서 자체의 오차, 운전자의 붐 상승속도 변화에 따른 압력오차 등을 고려 연속작업시는 어떤 연산된 적재중량의 특정값 으로는 오차를 유발할 가능성이 있으므로 구한 적재중량값 들의 평균치를 취하여 최종 적재중량 값으로 할 필요가 있다.

#### 4.개선된 알고리즘

기본 알고리즘에 의한 시험결과로부터 얻은 결론에 의거 적재중량 계측알고리즘은 다음과 같이 개선된 알고리즘을 획득할 수 있었다.

- 1) 연속작업시에는 붐 회전각이 -10 °~ 5 °사이의 구간에서만 적재중량을 연산한다.
- 2) 1)에서 연산된 적재중량값의 피크값 및 바텀값을 구하여 이들 중 6,7,8번째값들의 평균치를 구하여 적재중량으로 채택한다.
- 3) 만일 붐이 3초 이상 정지하여 있을 경우는 그 때의 연산된 값을 적재중량으로 채

택한다.

이상의 알고리즘에 의해 적재중량을 연산한 시험결과가 표 2에 나타나 있다.

1회차 연산중량	7500 kg
2회차 연산중량	6730 kg
(1+2)회 중량합계	14230 kg
실 계측중량	14520 kg
오 차	-2.0 %

표 2. 개선된 알고리즘에 의한 시험결과 (2회)

이 시험은 13 TON 덤프트럭을 이용하여 실 굴삭 덤프작업을 2회에 걸쳐 실시한 후 트럭을 계근대에서 계근한후 차체중량을 빼는 방식으로 실 계측 중량값을 얻었으며 이 값과 개선된 제어알고리즘에 의한 값이 2%의 오차를 보이고 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

표 3은 같은 개선된 알고리즘에 의해 굴삭 덤프작업을 4회에 걸쳐 실은 결과를 나타낸 것이다.

1회차 연산중량	3530 kg
2회차 연산중량	4250 kg
3회차 연산중량	4070 kg
4회차 연산중량	3700 kg
(1+2+3+4)회 중량합계	15500 kg
실 계측중량	15830 kg
오 차	-2.1 %

표 3. 개선된 알고리즘에 의한 시험결과(4회)

이 시험결과에서 볼 수 있듯이 한 트럭에 여러번 나누어 실어도 좋은 계측결과를 얻을 수 있었다. 또한 적재중량의 연산에 사용되는 식(3)에서  $\overline{AN}$ ,  $\overline{AM}$ 의 값을 붐 회전각에 대하여 구하여 이 값을 ROM에 저장하여 놓고 필요시마다 불러서 사용함으로써 CPU가 삼각함수 계산을 위한 계산부담을 덜어줌으로써 저성능의 CPU로서도 실시간 적재량 계측이 가능하기 때문에 콘트롤러를 저가로 만들 수가 있었고 또한 제어성능도 향상시킬 수가 있었다. 또한 버킷에 철판을 보강하였을 경우 빈 버킷일 때의 적재중량을 계측하여 그 값을 EEPROM에 저장하여 놓고 실작업 적재중량 계측시 그 값만큼 빼주면 실 적재물의 중량을 정확하게 얻을 수 있다.



## 5.결 론

휠로더의 굴삭덤프 작업시 덤프한 작업물의 중량을 연속작업 중에 실시간으로 계측하는 알고리즘을 찾는데 있어서 정량적인 수치해석에 의한 방법은 필요한 센서성능의 한계, 분석을 위한 모델링의 어려움, 운전자의 작동방법의 불확정성 등의 요인들 때문에 실제 어려움을 뚫더러 좋은 결과를 얻기도 어렵다.

본 논문에서는 이러한 이유로 실험적인 방법에 의해 단기간 내에 연속작업 시에도 정확한 적재중량을 계측 할 수 있는 제어알고리즘을 개발 할 수 있었고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

**첫째** : 붐을 상승작동 시킨 직후(-38 °부근)부터 어느 정도 붐이 상승 할 때(-10 °부근)까지는 붐 압력이 과도기적으로 변화가 심한 상태이므로 이때의 중량연산은 오차를 많이 유발하므로 이 구간에서의 중량연산은 피하여야 함을 알 수 있다.

**둘째** : 유효계측구간(붐 회전각이 -10 ~5 °)에서 (3)식에 의해 구한 적재 중량값의 피크 값과 바텀값의 6,7,8번째 값의 평균치와 실적재량과의 오차가 3%이내의 좋은 결과를 보였다

이것은 붐이 상승작동 후 유효계측구간에 다다르면 붐의 회전가속도에 의한 힘과 붐 실린더의 점성마찰력 및 Coulomb 마찰력이 어느 정도 평형을 이루는 결과로 생각되며 향후 정량적 수치해석을 통한 분석이 필요하다.

**셋째** : 적재중량연산에 필요한  $\overline{AN}$ ,  $\overline{AM}$  의 값을 미리 연산하여 ROM에 저장하여 놓고 사용함으로써 저가의 CPU사용이 가능하였고 제어성능도 향상시킬 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 적재기계의 작업제어장치 : FURUKAWA, 1988.10.31, 特許 昭55-94773
- [2] DYNAMIC PAYLOAD MONITOR : CATERPILLAR, 1991.03.05, 特許 5,105,896
- [3] 하역적재중량 감시장치 : 신CAT-MITSU, 1992.09.18, 實用新案 昭57-133153
- [4] 굴삭적재기의 작업량 검출장치 : KOMATSU, 1992.06.26, 特許 平4-191407
- [5] Youichi Sakajo, "휠로더", 建設機械, '92. 1, pp.27-32