

# 소요동력 최적 분배를 위한 휠로더 프론트 링크지 최적화 Front linkage optimization for required energy distribution

\*신기한<sup>1</sup>, 이성철<sup>2</sup>, 이수엽<sup>3</sup>, 박흥근<sup>4</sup>, #김종원<sup>5</sup>

\*K. H. Shin<sup>1</sup>, S. C. Lee<sup>2</sup>, S. Y. Lee<sup>3</sup>, H. G. Park<sup>4</sup>, #J. W. Kim<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부, <sup>2</sup> 한국기계연구원, <sup>3</sup> 두산 인프라코어, <sup>4</sup> 두산 인프라코어, <sup>5</sup> 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Parallel Mechanism, Optimization, Wheel Loader, Kinematics Analysis

## 1. 서론

중국의 급격한 발전은 중국의 건설시장에 활력을 불어넣었고, 중국 정부의 정책적인 국토 개발 지원에 따른 엄청난 자원과 자본이 중국으로 집중되고 있다. 뿐만 아니라 중동의 국가들이 과거에 석유를 팔아서 부를 축적하던 것과 달리, 자신들의 기술 발전과 생활 개선을 위해서 적극적으로 투자를 함으로써 중동의 건설시장 역시 점차 커지고 있는 실정이다.

이와 같이 신흥 시장의 발전은 대중적으로 사용되는 중대형 건설 장비인 휠로더의 수요를 증가시켰다. 휠로더는 오랜 시간 다양한 건설현장에서 사용되어온 중장비로써, 초기에는 대량을 흙을 나르거나 트럭에 실어 나르는 역할을 수행하였다. 현재는 휠로더의 버킷을 다른 기구로 교체하여 나무를 나르거나 땅을 다지는 등의 여러 역할을 수행할 수 있는 건설 장비로 업그레이드 되었다.

이와 같이 신흥 시장의 발전은 대중적으로 사용되는 중대형 건설 장비인 휠로더의 수요를 증가시켰다. 휠로더는 오랜 시간 다양한 건설현장에서 사용되어온 중장비로써, 초기에는 대량을 흙을 나르거나 트럭에 실어 나르는 역할을 수행하였다. 현재는 휠로더의 버킷을 다른 기구로 교체하여 나무를 나르거나 땅을 다지는 등의 여러 역할을 수행할 수 있는 건설 장비로 업그레이드 되었다.

이와 같이 신흥 시장의 발전은 대중적으로 사용되는 중대형 건설 장비인 휠로더의 수요를 증가시켰다. 휠로더는 오랜 시간 다양한 건설현장에서 사용되어온 중장비로써, 초기에는 대량을 흙을 나르거나 트럭에 실어 나르는 역할을 수행하였다. 현재는 휠로더의 버킷을 다른 기구로 교체하여 나무를 나르거나 땅을 다지는 등의 여러 역할을 수행할 수 있는 건설 장비로 업그레이드 되었다.

이와 같이 신흥 시장의 발전은 대중적으로 사용되는 중대형 건설 장비인 휠로더의 수요를 증가시켰다. 휠로더는 오랜 시간 다양한 건설현장에서 사용되어온 중장비로써, 초기에는 대량을 흙을 나르거나 트럭에 실어 나르는 역할을 수행하였다. 현재는 휠로더의 버킷을 다른 기구로 교체하여 나무를 나르거나 땅을 다지는 등의 여러 역할을 수행할 수 있는 건설 장비로 업그레이드 되었다.

이와 같이 신흥 시장의 발전은 대중적으로 사용되는 중대형 건설 장비인 휠로더의 수요를 증가시켰다. 휠로더는 오랜 시간 다양한 건설현장에서 사용되어온 중장비로써, 초기에는 대량을 흙을 나르거나 트럭에 실어 나르는 역할을 수행하였다. 현재는 휠로더의 버킷을 다른 기구로 교체하여 나무를 나르거나 땅을 다지는 등의 여러 역할을 수행할 수 있는 건설 장비로 업그레이드 되었다.

## 2. 기구학 해석

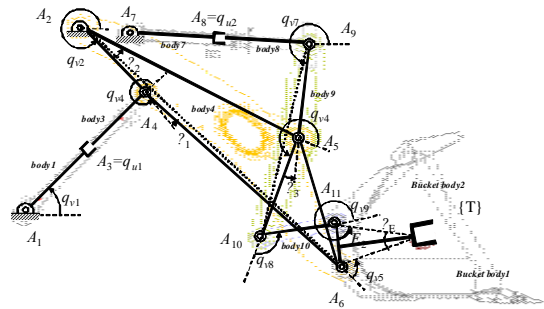


Fig.1 Front Linkage Structure of Wheel loader

본 논문은 대량의 흙을 퍼담아 옮기는 건설장비인 휠로더를 대상으로 최적화를 진행한다. 휠로더의 기구학 해석을 병렬기구 기구형태로 구하여 살펴본다. 휠로더는 두 개의 구동실린더가 복합되어 버킷을 움직이는 병렬기구 형태를 지닌다.<sup>6</sup> 휠로더 링크지는 링크지의 높이를 조절하는 붐 실린더와 버킷의 각도를 조절하는 버킷 실린더에 의해서 구동되고, 메인 암, 틸트 레버, 프론트 링크, 그리고 흙을 담은 bucket 으로 구성되어 있다.

휠로더의 기구학 해석을 위해서 정기구학과 자코비안 해석을 수행하였다. 각각의 관절에 대해서 A<sub>1</sub> 부터 A<sub>11</sub> 까지 명칭을 부여하였다. 버킷의 중심을 툴 플랫폼 {T}로 표시하였고, i 번째 관절과 j 번째 관절사이의 거리는 L<sub>ij</sub> 로 표시하였다. 각 관절의 회전 각도는 q<sub>v1</sub> 부터 q<sub>v9</sub> 까지 지칭하며 실린더의 길이를 각각 q<sub>u1</sub>, q<sub>u2</sub> 라고 지칭한다. θ<sub>1</sub>-θ<sub>3</sub> 는 형상이 따라 고정되는 각도이다. 정기구학 해석 결과는 다음과 같다.

$$q_{v1} = \frac{\pi}{2} - \text{asin}\left(\frac{A_{2x} - A_{1x}}{L_{12}}\right) + \text{acos}\left(\frac{q_u^2 + L_{12}^2 - L_{24}^2}{2q_{u1}L_{12}}\right)$$

$$q_{v2} = \pi + \text{acos}\left(\frac{(A_{2x} - A_{1x})^2 + L_{12}^2 - (A_{2y} - A_{1y})^2}{2(A_{2x} - A_{1x})L_{12}}\right) + \text{acos}\left(\frac{-q_u^2 + L_{12}^2 + L_{24}^2}{2L_{12}L_{24}}\right)$$

$$q_{v1} = 2\pi - \text{acos}\left(\frac{q_u^2 - L_{12}^2 + L_{24}^2}{2q_{u1}L_{24}}\right) + \theta_1$$

$$q_{v7} = \pi + \text{acos}\left(\frac{q_u^2 + L_{59}^2 - L_{57}^2}{2q_{u2}L_{59}}\right)$$

$$q_{v6} = 2\pi + \text{acos}\left(\frac{L_{57}^2 + q_u^2 - L_{59}^2}{2L_{57}q_{u2}}\right) + \text{asin}\left(\frac{A_{2y} + L_{25} \times \sin(q_{v2} + \theta_2) - A_{1y}}{L_{57}}\right)$$

$$q_{v4} = q_{v6} + q_{v7} - q_{v2} - \theta_2 - \theta_3$$

$$\text{cross}L_{510}L_{56} = \text{cross}(L_{510}, L_{56})$$

$$q_{v8} = \frac{\text{cross}L_{510}L_{56}(3)}{|\text{cross}L_{510}L_{56}(3)|} \times \left( \varphi - \text{acos}\left(\frac{L_{510}^2 + L_{610}^2 - L_{56}^2}{2L_{510}L_{610}}\right) \right) + \text{acos}\left(\frac{L_{1011}^2 + L_{610}^2 - L_{611}^2}{2L_{1011}L_{610}}\right)$$

$$q_{v9} = \pi + \text{acos}\left(\frac{L_{1011}^2 + L_{611}^2 - L_{610}^2}{2L_{1011}L_{611}}\right) + \theta_{E2}$$

$$q_{v5} = \theta_2 - 4\pi + q_{v4} + q_{v8} + q_{v9} + \theta_E - \theta_1$$

자코비안 해석을 위해서 조인트 A<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>, A<sub>E</sub> 각각에서 x 축, y 축, 회전각에 대한 총 9 개의 구속식을 세웠다. 이를 바탕으로 다음의 과정을 통해서 자코비안을 계산하였다.

$$\frac{dg}{dt} = \frac{dg}{dq_u} \dot{q}_u + \frac{dg}{dq_v} \dot{q}_v = [G_u \ G_v] \begin{bmatrix} \dot{q}_u \\ \dot{q}_v \end{bmatrix}$$

$$G_u \dot{q}_v = -G_v \dot{q}_u$$

$$\dot{q}_v = \Phi \dot{q}_u, \quad \Phi = -G_v^{-1} G_u$$

$$\dot{A}_E = \frac{dA_E}{dt} = \frac{dA_E}{dq_u} \dot{q}_u + \frac{dA_E}{dq_v} \dot{q}_v = \frac{dA_E}{dq_u} \dot{q}_u + \frac{dA_E}{dq_v} \Phi \dot{q}_u = (J_u + J_v \Phi) \dot{q}_u = J \dot{q}_u$$

$$J_u = \frac{dA_E}{dq_u}, \quad J_v = \frac{dA_E}{dq_v}, \quad J = J_u + J_v \Phi$$

이로써 최적화를 위한 기구학 해석을 완료하였다.

### 3. 최적화 알고리즘

휠로더의 링크 구조는 액츄에이터간의 상관관계에 의해 버킷의 움직임이 서로 독립적이지 않다. 이는 최적화의 변수인 조인트 위치를 변화시키기에 따라 두 액츄에이터 모두의 움직임에 영향을 미친다는 의미이다. 이로써 최적화는 상당히 복잡해 지고, 그로 인해 기존에 많이 사용하는 최적화 기법을 사용하기 어려워진다.

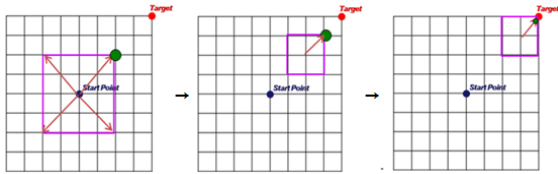


Fig. 2 Algorithm of Branch Exhaustive Search Method(BESM)

본 논문에서는 이와 같이 복잡한 링크 구조에 적합한 최적화 방법으로 Branch Exhaustive search method[BESM]를 고안하였다. 이는 ESM 을 개량한 방법으로써, 기존에 최적화 영역 내의 모든 점에 대해 결과값을 도출하는 것과 달리, 초기 기준점을 기준으로 네 방향에 대한 점들과 비교 분석한 뒤 더 좋은 결과값을 새로운 초기값을 선정하는 것이다. 이러한 과정을 검색 반경을 줄여가면서 반복하면 최적화된 결과값에 근접할 수 있다. 이는 연속적인 물리량을 목적 함수로 가지는 경우 사용할 수 있고, 복잡한 목적 함수와 제한 조건에서도 쉽게 사용할 수 있다. 또 ESM 에 비하여 상당히 빠른 속도로 결과 값을 얻을 수 있다는 장점을 가진다.

### 4. 최적화 결과

휠로더의 작업 수행에 따른 외력 변화와 버킷 위치 및 자세 데이터를 입력하고, 두산 DL400 을 대상으로 최적화를 수행하였다. 목적함수는

$$\min I = \max(F_{boom\_cyl} \cdot v_{boom\_cyl} + F_{bucket\_cyl} \cdot v_{bucket\_cyl})$$

이고 최적화 결과는 다음과 같다.

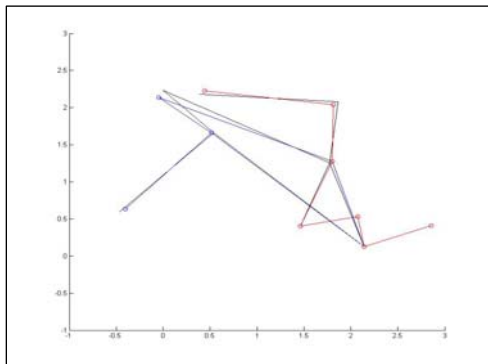


Fig. 3 Optimization Result of Loader

Fig3 상의 검정 선은 최적화 이전, 파란 선과 붉은 선은 최적화 된 형상을 말한다. 최적화 결과, 동력이 최대화 되

는 구간을 비교하면 다음 표와 같다.

Table 1 Comparison of Maximum Power Consumption

Model	Beginning Model	Optimized Model
Power(W)	89,989	82,513
Percentage(%)	100(%)	91.7(%)

위의 결과와 같이 최적화를 수행한 결과 프론트 링크의 최대 동력 소모량은 약 8.3% 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 z-bar 형태의 휠로더 프론트 링크를 대상으로, 작업 수행에 따른 소모 동력을 최소화 하는 구조를 찾는 것을 목표로 한다. 이를 위해서 자코비안 해석을 수행하고, Branch Exhaustive Search Method 를 고안, 활용하였다. 또 이를 적용한 최적화 결과를 확인하기 위해서 두산 인프라코어의 휠로더를 대상으로 z-bar 링크가 소모하는 동력을 해석 및 최적화 수행하였다. 이와 같은 해석을 통해서 기존의 휠로더가 소모하는 동력의 최대값을 줄일 수 있는 구조를 손쉽게 찾아내는데 성공하였다. 본 논문 주제는 후에 동역학 해석을 통하여 외력뿐만 아니라 자체 중량에 따른 힘을 고려할 예정이며, 좀더 정확한 결과를 제시할 수 있을 것이다. 본 논문의 최적화 방식은 다른 형태의 링크 구조에서도 최적화 결과를 얻을 수 있다는 가능성을 제시한다. 본 논문의 연구는 휠로더 뿐만 아니라 특정 경로를 따라 움직이는데 초점이 맞추어진 링크 구조 연구에 대해서 긍정적인 영향을 미칠 것이라 판단된다.

### 참고문헌

1. Lin, T., Wang, Q., Hu, B., "Development of hybrid powered hydraulic construction machinery," Automation in construction, Vol.19, No.1, pp.11-19, 2010
2. 윤용권, 이근호, 김도식, "휠로더 자동변속기용 변속제어 알고리즘 모델링 및 해석," 한국정밀공학회 2007 년도 춘계 학술대회 논문집, pp.129-130, 2007
3. Sarata, S., Koyachi, N., Sugawara, K., "Development of Autonomous System for Loading Operation by Wheel Loader," Automation and robotics in construction; ISARC 2006, pp.466-471, 2006
4. Filla, R., Ericsson, A., Palmberg, J. -O., "Dynamic Simulation of Construction Machinery: Towards an Operator Model," Proceedings of the National Conference on Fluid Power, Vol.50, pp.429-438, 2005
5. 고경은, 김희원, 배종국, "실험결과를 이용한 휠로더 작업장치부의 동역학 해석," 대한기계학회 2004 년도 춘계 학술대회, pp.881-886, 2004
6. Merlet, J.-P., "Parallel Robots," Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 2000