

평면 다물체 동역학 해석을 이용한 건설장비 작업장치의 링크 피봇점 설계 지원 프로그램 개발

박현규*, 장진석*, 유완석*[#], 김민석**, 이희종**, 이재욱***

*부산대학교 기계공학부, **현대중공업, ***한국생산기술연구원 대경지역본부

Development of a Design Support Program for Pivot Points of Working Devices in Construction Equipment using Planar Multi-body Dynamic Analysis

Hyun-Gyu Park*, Jin-Seok Jang*, Wan-Suk Yoo*[#], Min-Seok Kim**,
Hee-Jong Lee**, Jae-Wook Lee***

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

**Construction Equipment Research and Development Center, Hyundai Heavy Industries,

***Korea Institute of Industrial Technology

(Received 13 August 2015; received in revised form 16 September 2015; accepted 2 October 2015)

ABSTRACT

For designing working devices of construction equipment, it is necessary to consider not only sufficient working ability but also available working range. Therefore, it is important to select the appropriate pivot positions of links. This paper presents a study on selection of pivot points of links used in construction equipment. To analyze the effect of each pivot point, a design program for pivot selection is developed.

A conventional pivot design method requires a complicated process because it needs to create a certain working position manually to evaluate its performance. However, the developed program includes an automatic link assembly algorithm; thus, the working device can easily be analyzed by using pivot information of links. The developed program also included a kinematic/static analysis module and characteristic analysis algorithms. Therefore, it is possible to easily analyze a working device model created through the automatic assembly algorithm, whereby users can easily analyze the effect of each link pivot point for the actual product design.

Key Words : Working Device(작업장치), Automatic Assembly Algorithm(자동조립 알고리즘), Design Pivot Point(피봇점 설계)

1. 서 론

휠로더, 굴삭기 등과 같은 건설 장비들은 건설 현장뿐만 아니라 건설 골재 채취 및 운반, 제조업,

농업 등 다양한 용도로 활용된다. 따라서 작업장치 설계 시에는 작업성능 향상을 위한 유압특성^[1] 및 구조적 안정성 확보^[2-3]를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 범용적인 활용성을 위해서 충분한 작업 범위를 확보 할 수 있도록 링크 피봇점을 선정할 필요가 있다. 기존의 작업장치 설계 프로세스에서는 작업장치 링크 피봇점을 선정하고 각 작업자세

Corresponding Author : wsyoo@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1457, Fax: +82-51-581-8514

별 조립을 통해서 자체별 작업성능, 작업범위 및 링크 피봇점에 작용하는 하중을 구하는 방법으로 설계를 수행해왔다^[4-7]. 따라서 기존의 설계 방법으로는 전체 작업구간에서 발생하는 작업성능, 피봇점에 발생하는 하중을 구하는 것에 어려움이 있었고, 다양한 링크 피봇점 설계안에 대한 분석에 많은 시간이 소모되었다. 따라서 최근에는 특정 제품을 위한 설계 지원 프로그램의 개발을 통하여 제품 개발시간을 절감하고 있다^[8-9].

일반적으로 건설장비의 작업장치들은 안정성 및 작업능력 향상을 위해서 좌우 대칭구조로 설계된다. 이를 상용프로그램을 이용한 3차원 다물체 동역학 모델로 모델링할 경우, 과구속으로 인한 특이점(Singularity) 문제가 발생하거나 유압 특성 모델을 추가하는데 어려움이 따를 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 평면 다물체 동역학 해석을 이용한 건설장비 작업장치의 링크 피봇점 설계 분석 프로그램 개발을 통하여 작업장치 기본 설계안을 도출하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 프로그램 개발

2.1 프로그램 개요

링크 피봇점 설계 분석 프로그램은 좌우 대칭구조인 건설장비 작업장치의 특징을 활용하여 3차원 모델을 2차원으로 묘사하여 평면 다물체 동역학 해석을 수행하였으며 Fig. 1과 같이 작업 장치 모델을 생성하기 위한 자동 조립 모듈 및 기구 해석(Kinematic), 정 해석(Static) 그리고 작업장치 성능분석을 수행하는 성능 분석 모듈로 구성되어 있다.

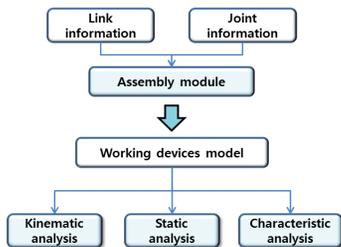


Fig. 1 Process of the developed program

2.2 자동 조립 모듈

자동조립이란 사용자가 입력한 국부(Local) 좌표계 기준의 링크 정보와 링크 피봇 연결정보를 이용하여 전역(Global) 좌표계 기준의 작업장치 모델을 생성하는 것을 말한다.

Fig. 2와 같이 링크 정보는 각 링크의 질량 정보와 관성모멘트, 기준 피봇점을 기준으로 하는 각 피봇점의 상대 길이를 포함하고 있다.

작업장치 링크는 피봇 연결정보를 이용하여 회전 조인트 또는 병진조인트로 연결된다. Fig. 3은 회전 조인트로 연결된 물체 i와 j를 나타낸다. 회전 조인트는 2개의 링크를 피봇점을 중심으로 하는 축에 대하여 회전 운동만 가능하도록 구속식이 주어진다. 식 (1)과 같은 i-Body와 j-Body의 일반좌표에서 자동 조립 및 기구해석을 하기 위해서는 구속식 (2)과 구속식 (2)를 일반좌표에 대한 편미분한 자코비안 행렬식(Jacobian matrix) (3)이 필요하다.

$$\bar{q} = \{x_i \quad y_i \quad \phi_i \quad x_j \quad y_j \quad \phi_j\}^T \quad (1)$$

$$\Phi^{(r,2)} = \bar{r}_i + A_i \bar{s}_i' - \bar{r}_j + A_j \bar{s}_j' = \begin{bmatrix} x_i^p - x_j^p \\ y_i^p - y_j^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Phi_{\bar{q}} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & -\xi_i^p \sin \phi_i - \eta_i^p \cos \phi_i & -1.0 & 0 & \xi_j^p \sin \phi_j + \eta_j^p \cos \phi_j \\ 0 & 1.0 & \xi_i^p \cos \phi_i - \eta_i^p \sin \phi_i & 0 & -1.0 & -\xi_j^p \cos \phi_j + \eta_j^p \sin \phi_j \end{bmatrix} \quad (3)$$



Fig. 2 Bucket information

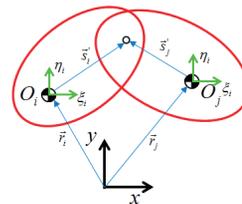


Fig. 3 Revolute joint between i-Body and j-Body

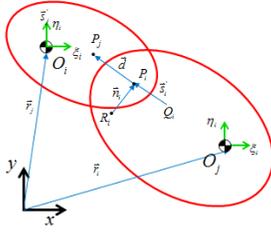


Fig. 4 Translational joint between i-Body and j-Body

Fig. 4는 병진 조인트로 연결된 물체 i와 j를 나타낸다. 병진 조인트는 두 물체가 1개의 축에 대하여 병진 운동이 일어나도록 하는 조인트로 구속식은 식 (4)와 같다. 회전 조인트와 마찬가지로 기구해석을 위해 각 좌표에 관하여 편미분하면 식 (5)와 같은 자코비안 행렬을 구할 수 있다^[10].

$$\Phi_{(i,2)} = \begin{bmatrix} (x_i^P - x_i^Q)(y_j^P - y_i^P) - (y_i^P - y_i^Q)(x_j^P - x_i^P) \\ (\phi_i - \phi_j) - (\phi_i^0 - \phi_j^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Phi_q = \begin{bmatrix} y_i^P - y_i^Q & -x_i^P + x_i^Q & \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_i} & -y_i^P + y_i^Q & x_i^P - x_i^Q & \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_j} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{where, } \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_i} = -(x_j^P - x_i^P)(x_i^P - x_i^Q) - (y_j^P - y_i^P)(y_i^P - y_i^Q)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \phi_j} = (x_j^P - x_j^Q)(x_i^P - x_i^Q) + (y_j^P - y_j^Q)(y_i^P - y_i^Q)$$

사용자는 피봇 연결 정보에 조인트 타입, 서로 연결될 링크와 피봇 포인트를 Fig. 5와 같이 설정한다.

자동 조립 모듈은 사용자가 입력한 링크 정보와 피봇 연결 정보를 통해서 전체 작업장치의 구속식을 생성하고 사용자의 초기 자세 입력을 통해 추가적으로 구속식을 생성하여 전체 구속식 $\Phi(q) = 0$ 을 만족하는 좌표 q 의 해를 찾는다.

구속식을 만족하는 좌표 q 는 식 (6)과 같은 뉴턴-랩슨법을 사용하여 찾을 수 있다.

$$q^{i+1} = q^i - \frac{\Phi(q^i)}{\Phi_q(q^i)} \quad (6)$$

초기값 q^i 로부터 전체 구속식 $\Phi(q^i)$ 와 자코비안 행렬식 $\Phi_q(q^i)$ 를 이용하여 q^{i+1} 값을 구하고 Δq 가

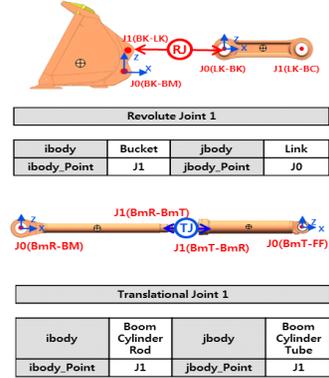


Fig. 5 Pivot connecting information

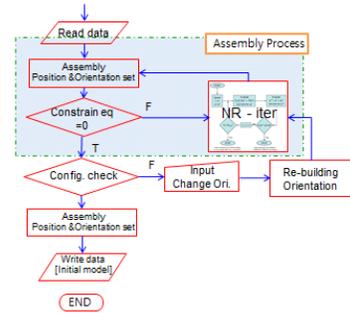


Fig. 6 Procedure for assembly process

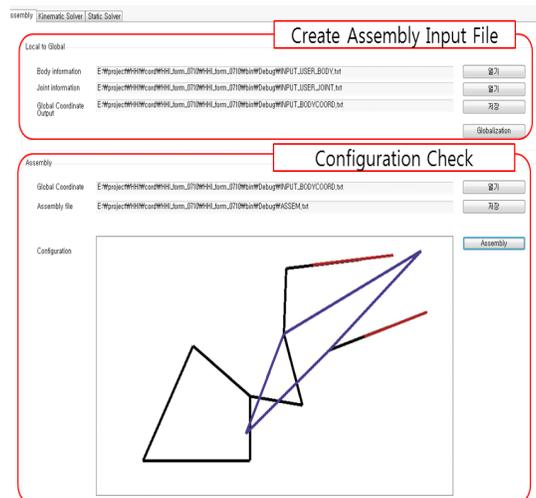


Fig. 7 GUI for assembly and configuration check

특정 값보다 작을 때 해석을 중단한다. 전체적인 조립모듈의 순서도와 링크의 연결정보를 확인할 수 있는 GUI(Graphic User Interface)를 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다.

2.3 기구 해석 (Kinematic analysis)

기구 해석은 작업장치의 자동 조립 모듈을 통해 생성한 모델의 위치, 속도 해석을 수행한다. 초기 작업장치 모델의 위치, 자세로부터 병진/회전 조인트에 대하여 식 (7), (8)과 같은 구동 구속식을 추가하여 시스템 전체의 구속식을 생성한다. 속도 해석의 경우, 식 (9)의 위치 구속 방정식을 시간에 대하여 한번 미분한 식 (10)을 이용하여 해석을 수행한다. 사용자가 Constant, STEP(11)함수 또는 Akima, Cubic Spline을 통해 구동 구속을 입력하면, 실험데이터 및 다양한 작업시나리오에 대한 분석이 가능하도록 개발하였다^[11-12].

$$\frac{\vec{v}_i^T \vec{d}_{ij}}{|\vec{v}_i|} - C(t) = 0$$

$$\vec{d}_{ij} = (\vec{r}_i + A_i \vec{s}'_i - \vec{r}_j - A_j \vec{s}'_j) \quad (7)$$

$$(\phi_i + \theta_i) - (\phi_j + \theta_j) - C(t) = 0 \quad (8)$$

$$\Phi(q, t) = 0 \quad (9)$$

$$\dot{\Phi} = \Phi_q \dot{q} + \Phi_t = 0$$

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \quad (10)$$

$$STEP(t_0, x_0, t_1, x_1)$$

$$STEP = x_0, \quad \text{when } t \leq t_0$$

$$= x_0 + (x_1 - x_0) \times \frac{(t - t_0)^2}{(t_1 - t_0)^2} \times [3 - 2 \times \frac{(t - t_0)}{(t_1 - t_0)}], \quad \text{when } t_0 \leq t \leq t_1$$

$$= x_1, \quad \text{when } t \geq t_1 \quad (11)$$

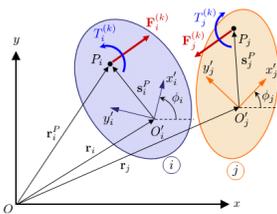


Fig. 8 Joint Reaction Force

2.4 정 해석 (Static analysis)

정 해석은 기구해석을 통해서 구한 각 자세에서 자중, 외력, 액추에이터에 의해 발생하는 힘에 의해 작업장치의 각 조인트에서 발생하는 정하중을 구한다.

각 자세별 링크에 작용하는 힘이 Q일 때 식 (12)을 이용하여 라그랑지 곱수(Lagrange Multiplier) λ를 구하고 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 i-Body 및 j-Body의 특정 국부(local) 지점 P_i, P_j에서 발생하는 정하중을 식 (13)을 이용하여 구할 수 있다^[13].

$$\Phi_q^T \lambda = Q \quad (12)$$

$$F_i^{(k)} = (\Phi_{r_i}^{(k)})^T \lambda^{(k)}$$

$$T_i^{(k)} = (\Phi_{\phi_i}^{(k)} \Phi_{r_i}^{(k)} B_i s_i^P)^T \lambda^{(k)} \quad (13)$$

2.5 성능 특성 분석

건설장비 작업장치의 성능 특성으로는 굴삭력(Breakout force)과 인양력(Lifting force)이 있다.

굴삭력은 Fig. 9와 같이 작업장치 실린더의 작용력에 의해서 버킷 끝단에서 버킷 안쪽면에 수직인 방향으로 작용하는 최대의 힘을 나타내며, 작업물을 굴삭 할 수 있는 능력을 의미한다.

인양력은 Fig. 10과 같이 작업장치 실린더의 작용력에 의해서 버킷의 질량 중심점(Center of gravity)에서 지면과 수직인 방향으로 작용할 수 있는 최대

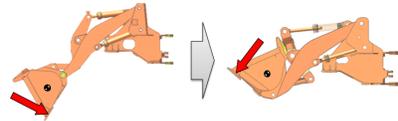


Fig. 9 Working range for measuring breakout force

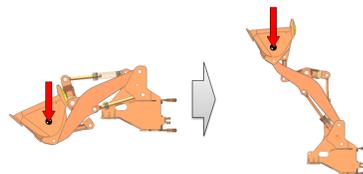


Fig. 10 Working range for measuring lifting force

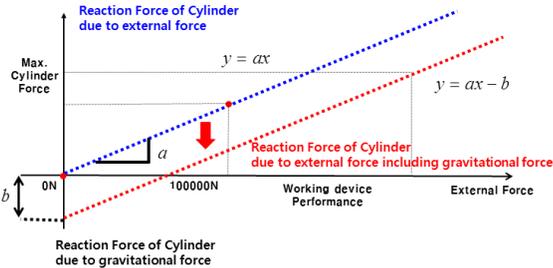


Fig. 11 Process for evaluate working device performance

의 힘을 나타내며, 작업물을 작업 높이 까지 들어 올릴 수 있는 능력을 의미한다.

작업장치 성능 특성은 유압 실린더 릴리프 압과 작업장치 링크 구조에 의해 결정된다. 따라서 기존의 정/동 해석을 통해서 성능을 구하기 위해서는 복잡한 과정이 필요하다.

성능 분석 모듈에서는 실린더의 유압 특성을 동시에 고려하여 성능을 구하는 복잡한 해석 과정을 단순화시켰다.

성능 특성을 구하기 위해서는 먼저 작업장치 자중만을 고려한 상태에서 실린더에 발생하는 반력을 구한다. 그리고 작업성능을 구하고자 하는 지점(버킷 끝단 / 버킷 질량 중심점)에 임의의 외력을 작용하고 작업장치 링크의 자중을 무시한 상태에서 실린더에 발생하는 반력을 구한다. 이때 유압 액추에이터에 발생하는 반력은 특정 지점에 작용한 외력에 비례한다.

자중의 영향과 특정 지점에 작용한 임의의 외력의 영향을 더하면 작업장치의 특정지점에 발생하는 외력에 의하여 유압 액추에이터에서 발생하는 반력을 구할 수 있다. 유압 액추에이터에 최대로 작용할 수 있는 반력은 액추에이터의 직경 및 릴리프 압력에 의해 결정되는 최대 작용 힘에 의해 결정된다. 따라서 작업장치의 작업 능력은 외력에 의해 액추에이터에 발생하는 반력이 액추에이터 최대 작용력과 일치하는 외력의 크기이다. 이를 이용하여 Fig. 11에 나타난 방법을 이용하여 각 상태에서 작업장치의 작업능력을 측정할 수 있다.

3. 프로그램 검증 및 활용

3.1 기구 해석

링크 피봇점 설계 분석 프로그램의 기구 해석 결과를 Z-bar Type 휠로더 모델에 대하여 상용 다물



Fig. 12 Z-bar type wheel loader

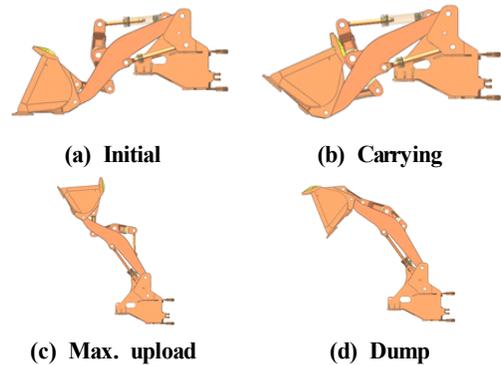


Fig. 13 Simulation conditions

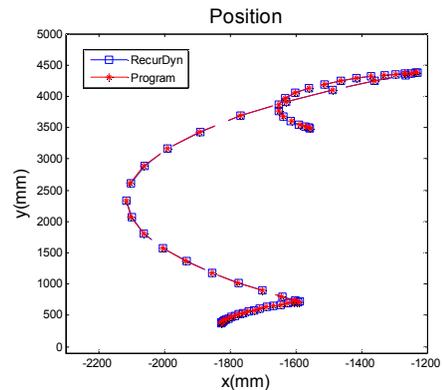


Fig. 14 During operation the locus of the center of gravity of bucket - RecurDyn and Developed Program

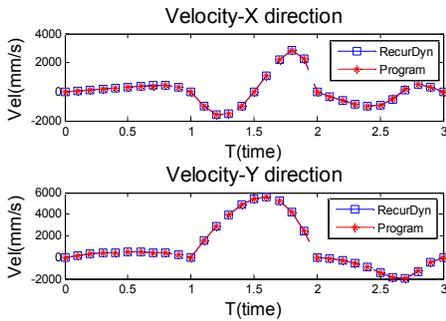


Fig. 15 Velocity of the center of gravity of bucket - RecurDyn and Developed Program

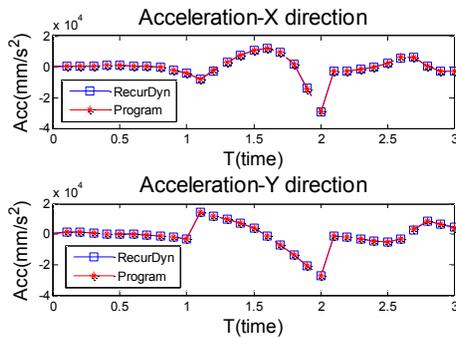


Fig. 16 Acceleration of the center of gravity of bucket - RecurDyn and Developed Program

체 동역학 프로그램 RecurDyn^[11]의 기구 해석 결과와의 비교를 통하여 검증 하였다. 작업장치가 Fig. 13과 같이 Initial position, Carrying, Max. Upload, Dump Condition 순으로 움직이는 작업 시나리오에 대하여 기구 해석을 수행하였다. Fig. 14는 버킷 질량 중심점(Center of Gravity)의 궤적, Fig. 15는 속도, Fig. 16은 가속도를 각각 비교한 결과이다. RecurDyn 해석 결과와 비교검증을 하여 개발된 프로그램을 검증하였다.

3.2 정 해석

정 해석 결과 검증 또한 기구 해석과 같은 시나리오로 Initial position, Carrying, Max. Upload, Dump Condition으로 움직이는 동안 작업장치의 Fig. 17에

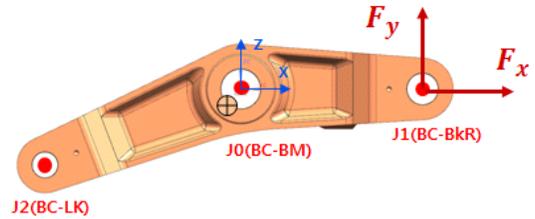


Fig. 17 Bell Crank pivot 1

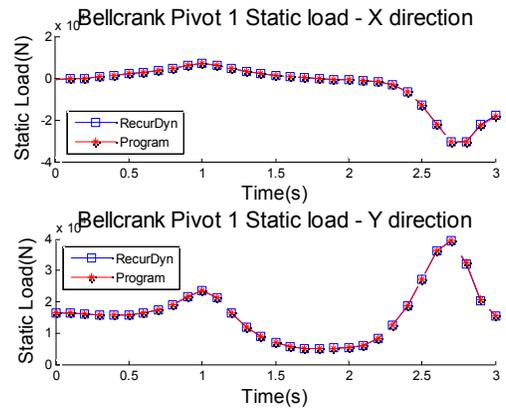


Fig. 18 Static load on Bell Crank pivot 1

보여진 Bell Crank의 첫 번째 피봇 조인트에서 발생하는 정하중을 상용 다물체 동역학 프로그램 RecurDyn을 통해 구한 값과 비교 검증하였다.

Fig. 18에는 작업장치 Bell Crank의 pivot 1 지점의 x, y 축에 대한 정적하중 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 만든 해석 프로그램과 상용 프로그램 RecurDyn을 통해 구한 결과가 일치하는 것을 볼 수 있으며, 이를 통하여 본 연구에서 개발한 프로그램의 결과가 신뢰성이 있음을 확인하였다.

3.3 성능 분석

개발된 성능 분석 모듈을 통해서 링크 피봇점 위치 변화에 따라 간편하게 작업장치 성능과 사양을 구할 수 있다. 성능 분석 모듈을 이용하여 Z-bar Type 휠로더 작업장치의 굴삭력을 분석하고 최적설계를 통하여 작업장치 Boom의 피봇점 위치를 변경하여 굴삭력을 개선하였다. 구체적인 수치는 보안상의 이유로 Normalizing 하였다.

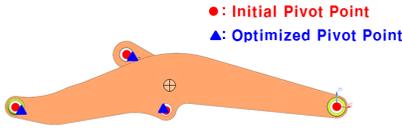
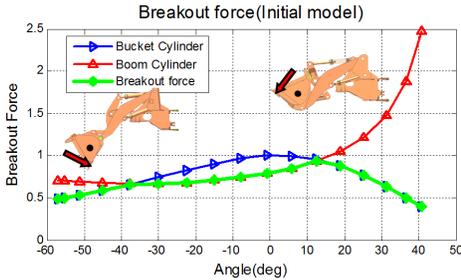
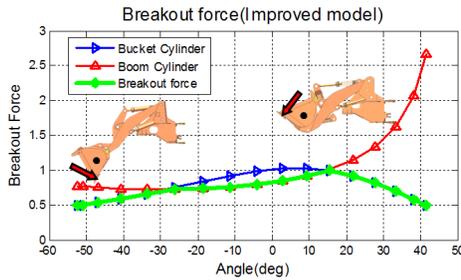


Fig. 19 Boom Pivot Point



(a) Breakout force of the initial model



(b) Breakout force of the improved model

Fig. 20 Breakout force at working device

Fig. 20 (a)는 초기 작업장치 모델, Fig. 20 (b)는 기존 모델에서 최적설계를 이용하여 피봇점을 개선한 모델에 대하여 버킷 각도에 따른 붐 실린더와 버킷 실린더에 의한 굴삭력 두 실린더에 의한 굴삭력의 최소값을 나타내었다. 실제 작업장치의 굴삭력은 두 실린더의 최소값으로 결정된다.

Fig. 21는 기존 모델과 개선 모델의 버킷 각도에 따른 굴삭력을 비교하여 나타낸 것이다. 비교 결과 실제 굴삭 작업 구간(-30 ~ 30 °)에서 굴삭력이 향상되었으며, 버킷 각도 0 °에서 굴삭력은 약 5% 증가하였다.

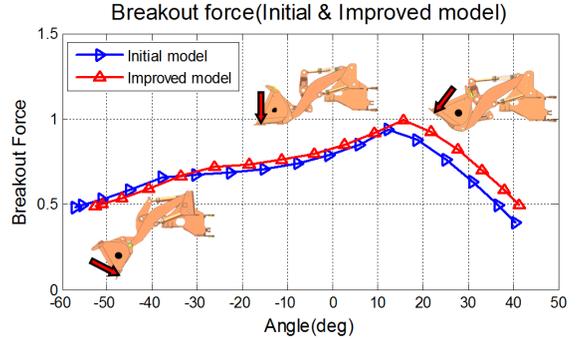


Fig. 21 Comparison of breakout force between initial and improved model

4. 결론

본 연구에서는 건설장비 작업장치 링크 피봇점 설계 분석 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 각 링크의 로컬 모델링 정보를 이용하여 전체 작업장치 모델을 생성
- 2) 작업장치의 유압 액추에이터 특성을 고려, 작업장치 성능 특성 분석 알고리즘을 이용하여 작업장치 특성 동시 해석
- 3) 텍스트 기반의 정보를 활용 간편하게 해석 정보 및 모델정보를 수정하여 반복적인 해석이 가능하며, 최적설계 기법을 이용하여 링크 구조 설계 시 활용 가능

자동 조립 모듈을 통해 구성된 작업장치 모델을 이용하여 기구, 정 해석을 수행하여 특정 작업 시나리오 및 전체 작업구간에서 특정 피봇점에 발생하는 정하중을 구할 수 있다.

기존 상용프로그램의 경우 실린더 작용력에 의한 작업장치 성능 특성(굴삭력, 인양력)을 추출하는데 복잡한 절차가 필요하다. 특성 분석 모듈에 실린더 작용력을 고려한 작업장치 성능 해석 알고리즘을 내장하여 작업장치 성능 분석시간을 절감하여 설계 시간을 단축시켰다.

이 프로그램을 활용하여 링크 피봇점의 위치를

조절하여 Z-bar 타입 휠로더 작업장치의 굴삭력에 대한 성능분석을 수행하였으며 그 결과, 실제 굴삭 작업 구간(-30 °~30 °)에서 굴삭력이 전체적으로 향상되었으며, 버켓 각도 0 °에서 굴삭력은 약 5% 증가하였다.

개발된 프로그램은 다양한 건설장비에 대해서 링크 피봇점의 변화에 따른 전체 작업장치 성능과 사양을 쉽게 분석하고 각 링크 피봇점을 설계하는 방법을 제시하는데 활용 될 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 2014년도 현대중공업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

- Jung, E. I., Kim, B. H., Ryu, K. H., Kim, D. K. and Lee, S. H., “Flow Performance Analysis of Hydraulic Driven Super-Charger for Excavator,” Proc. KSMPE Autumn Conf. 2010, pp. 199-200, 2010.
- Park, H. K., Kim, T. S., Jang, Y. Y. and Lee, J. C., “Structural Analysis Of The Electric Type Mini-Excavators,” Proc. KSMPE Autumn Conf. 2014, pp. 114, 2014.
- Han, M. S. and Jo, J. W., “Study on Fatigue Durability Analysis of Poclairn Bucket” J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 12, No. 2, pp. 8-13, 2013.
- Oh, K. S., Yun, S., Kim, H., Ko, K. and Yi, K., “Development and Validation of Wheel Loader Simulation Model,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., Vol. 37, No. 5, pp. 601-607, 2013.
- Shin, K. H., Lee, S., Yoo, Y. and Kim, J., “Coupled Linkage System Optimization for Minimum Power Consumption,” J. Mech. Sci. Technol., Vol. 26, No. 2, pp. 1099-1106, 2012.
- Han, Y. H. and Kim, J. W., “Optimal design of pin-point position of wheel loader Z-bar linkage,” Proc. KSPE Spring Conf., pp. 1045-1046. 2012.
- Cho, J. U. and Han, M. S., “Structural Analysis on Door Hinge of Car,” J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 9 No.2, pp. 33-39, 2010.
- Park, J. D., Kim, S. Y., Han, M. S. and Jeon, E. C., “Application of Automatic Design Program for Aspheric Lens Design” J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 6, No. 3, pp. 3-8, 2007.
- So, J. D., Jung, S. W., Kwon, S. G., Park, J. M., Choi, W. S., Kim, J. S. and Jeon, E. C., “Development of Automative Program for Designing Involute Spur Gear” J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., Vol. 12, No. 6, pp. 142-151, 2013.
- Nikravesh. P. E., Computer-Aided Analysis of Mechanical System, Prentice-Hall. Inc, pp. 119-140, 1988.
- Ryu, C. Y., “Optimal Location of Joints in Wheel Loader based on Dynamic Analysis Program,” A Thesis for a Master’s degree, Pusan National University, Republic of Korea, 2014.
- Park, H. G., Jang, J. S., Yoo, W. S., Kim, M. S., Lee, H. J. and Ryu, C. Y., "Analysis of Wheel Loader Capacity via Multibody Dynamics Analysis", Proc. KSME 2014 Fall Annual Meeting, pp. 329-330, 2014.
- Haug. E. J., Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System : Basic Methods, Allyn & Bacon, pp. 49-111, 1989.
- FunctionBay, RecurDyn v8.2 Help, FunctionBay Inc., 2013.