실험결과를 이용한 휠로더 작업장치부의 동역학 해석

고경은† · 김희원* · 배종국* · 유완석**

Dynamic analysis of an wheel loader manipulator by experimental data

Kyung-Eun Ko, Heui-Won Kim, Jong-Gug Bae and Wan-Suk Yoo

Key Words: Wheel Loader(휠로더), Experimental Data(실험자료), Inverse Dynamics(역동역학)

Abstract

This paper presents the inverse dynamic analysis of the wheel loader manipulator based on the experimental data. A three dimensional rigid multi-body model of the wheel loader manipulator was built up. The inverse dynamic analysis for the typical operation mode was carried out by the ADAMS program. In order to verify the analysis result with the measured one, the hydraulic pressure and displacements of the cylinders were measured and the inverse dynamic analysis was carried out using experimental data. From the results of the analysis and measurement, it was concluded that the computational driving force showed good agreement with the measured one.

1. 서 론

휠로더는 토사 및 암석 등의 굴착 도는 운반 작업에 사용되는 건설차량으로 광범위한 수요로 인하여 성능 측면에서 괄목할만한 발전을 거듭하였다. 이에 따라 앞으로의 시장경쟁력은 기본적인 성능은 물론, 내구수명 향상, 작업자의 안락성/편의성, 저진동/저소음 등의 부수적인 성능의 차별화에 있다.

휠로더가 수행하는 다양한 동적 거동에 대한 동역학 해석을 수행하여 연결부에서의 반력을 계산하고 이를 이용한 피로 및 강도평가의 결과를 설계에 반영함으로써, 초기 설계 단계에서의 과다한 설계 적용을 줄일 수 있고 또한 제품의 결함 발생시에 명확한 원인을 찾을 수 있다.

† 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : kekopro78@hhi.co.kr
TEL : (052)230-5558 FAX : (052)230-5495
* 현대중공업 선박해양연구소
** 부산대학교 기계기술연구소

본 연구에서는 동역학 해석 프로그램인 ADAMS[(1)]를 이용하여 당사에서 양산중인 휠로더의 작업 장치부를 대상으로 동역학 해석 모델을 구축하고 운동해석을 수행하였다. 그리고 실차 계측을 통해 얻은 휠로더의 운동데이터를 이용한 역동역학 해석을 수행하고, 해석과 계측에 의한 구동력을 비교하여 해석의 타당성을 검토하였다.

2. 휠로더 동역학 해석 모델

2.1 동역학 해석 모델 구축

휠로더의 작업장치 부분은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 붐(boom), 벨 크랭크(bell crank), 버켓(bucket), 전방 프레임(front frame), 후방 프레임(rear frame), 링크(link), 붐 실린더, 버켓 실린더, 조향 실린더(steering cylinder)의 보아/로드(bore/rod)로 구성되어 있다. 붐 실린더와 조향 실린더는 좌우 한개 씩 두개가 설치되어 있다.

작업장치부의 CAD 모델은 3차원 CAD 소프트웨어인 I-DEAS를 이용하여 작성하였으며, 동역학

해석용 모델은 ADAMS를 사용하여 구축하였다. 작업 장치부의 각 실린더는 두개의 물체(bore, rod)가 병진 조인트(translational joint)로 연결되어 있는 것으로 모델링 하였다. 후방 프레임과 지면(ground)과는 고정 조인트(fixed joint)로 연결하여 후방 프레임을 지면으로 설정하였다. 휠로더 동역학 모델은 지면을 제외한 16개의 물체(body)와 23개의 조인트(joint)로 구성된 5 자유도 시스템이다. 각 물체들 간의 상대적인 운동을 구속하기 위해 Revolute Joint(RJ), Universal Joint(UJ), Spherical Joint(SJ), Translational Joint(TJ)와 Fixed Joint(FJ) 를 사용하였다. 동역학 해석 모델은 휠로더의 실제 움직임을 고려하여 잉여 구속(reducdant constraint)이 발생하지 않도록 적절한 조인트를 선정하여야 한다.(2)

Fig. 1 Dynamic model of a wheel loader

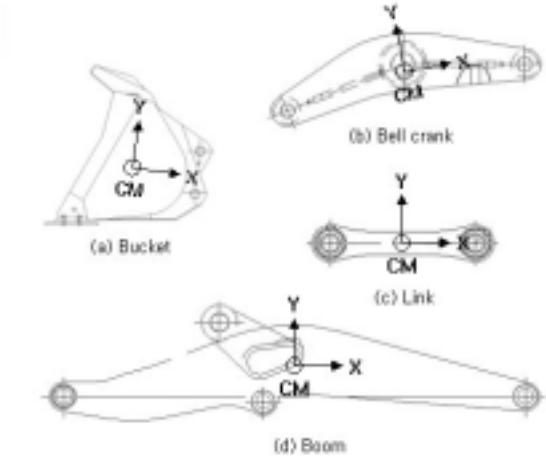

Fig. 2 Local coordinates of main parts

휠로더 작업 장치부 전체 모델의 관성 좌표계(inertial coordinate system)는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 RJ1에 설정하였고, 각 부재의 물리량의 정의에 필요한 국부좌표계(local coordinate)는 Fig. 2와 같이 각 단품의 무게 중심에 설정하였다.

2.2 휠로더 작업 특성 및 작업 자세

휠로더는 흙을 인양해서 덤핑하거나 흙을 담기 위하여 흙더미에 충돌하는 등의 비교적 정해진 작업을 수행하며, 흙을 나르거나 선회를 하기 위해 주행이 고려되어진다.

휠로더의 주요 작업 자세는 Fig. 3과 같다. 우선 흙을 내리는 Dump Position(Max Height), 흙더미에 충돌하는 자세인 Breakout Force Position, 흙을 담기 위해 버켓을 접는 동작인 Bucket Roll Back Position과 흙을 나르기 위해 붐을 약간 들어올리는 Carry Position 등이 있다.

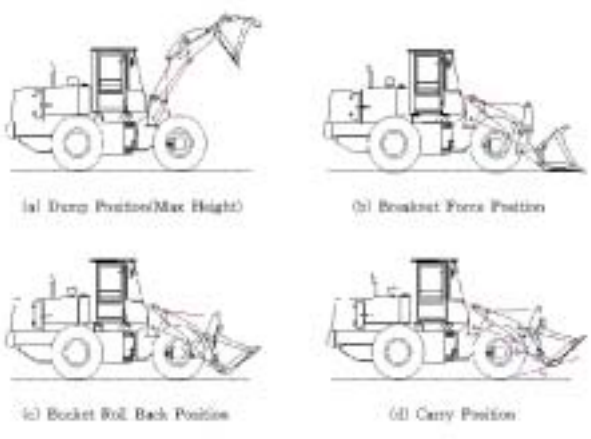

Fig. 3 Main operating position

3. 실험 결과를 이용한 해석

3.1 실험

휠로더 작업 장치부의 동역학 해석 모델을 검증하기 위하여 실제 운전 중인 작업 장치부의 실린더 변위와 유압을 계측하였다. 단일 동작인 붐 up-down의 작업 모드 A와 일반적인 휠로더 적재 작업인 작업 모드 B에 대한 계측을 수행하였다.

작업 모드 A는 Fig. 4와 같이 Breakout Force 자세에서 다른 실린더의 운동 없이 붐 실린더만을 구동시켜 붐을 up-down하는 작업이다. 작업 모드 B는 Breakout Force 자세에서 Bucket Roll Back 후 붐을 들어올리며 회전하고 Dump 한 후 다시 초기의 자세로 되돌아오는 작업이다. 각 작업 모드에서 주행은 고려하지 않았으며, 또한 흙을 적재하지 않고 실린더 운동만 하는 무부하 운

동에 대한 계측을 수행하였다. 각 작업 모드에 대해 버켓, 붐과 좌측 조향 실린더 3개 지점의 변위와 각 실린더 large/small chamber의 6개의 실린더 유압을 계측하였다. Fig. 6에는 붐에 설치된 변위 센서의 모습을 보였다.

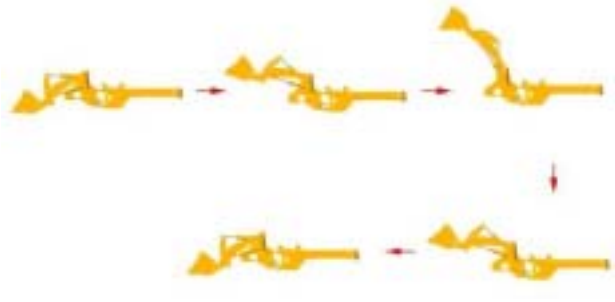

Fig. 4 Boom up-down motion (operation mode A)

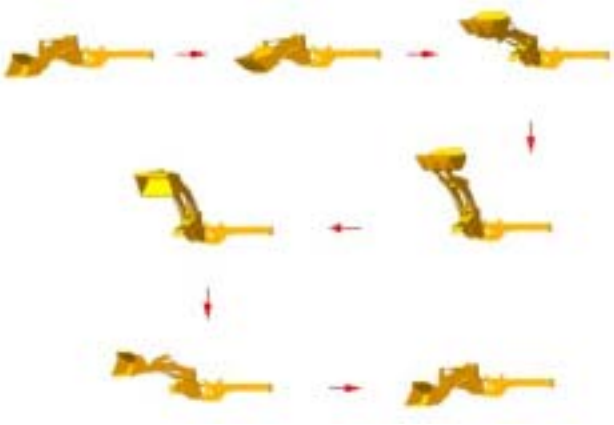

Fig. 5 Loading operation mode (operation mode B)

Fig. 6 Measurement for boom cylinder displacement

3.2 실험 결과를 이용한 역동역학 해석

실차 계측을 통하여 얻은 실린더 변위 이력 데이터를 구속조건으로 부과하여 역동역학 해석을 수행한 후, 해석에 의한 실린더 구동력과 계측 실린더 압력을 바탕으로 계산한 계측 실린더 구동력을 비교하였다. 역동역학 해석과 정동역학 해석간의 가역성, 계측 자료를 이용한 역동역학 해석 및 동역학 해석모델 검증 과정은 이미 기존의 연구결과[3), (4)] 에서 제시되어진바 있으며, 계측 자료를 이용한 해석 및 검증 과정을 순서도로 정리하면 Fig. 7과 같다.

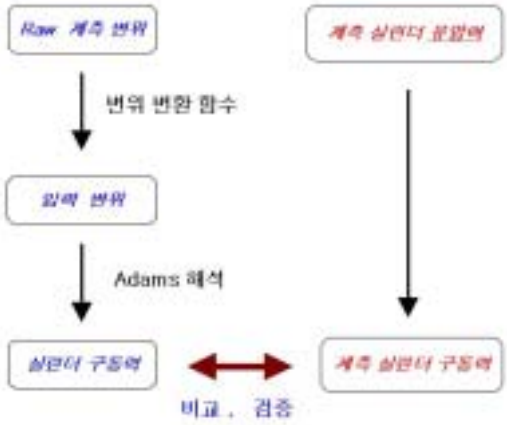

Fig. 7 Flow chart for dynamic analysis using experimental data

작업 모드 A에 대한 붐과 버켓 실린더의 구동력과 계측 실린더 구동력을 Fig. 8과 Fig. 9에 비교하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 해석과 계측에 의한 붐 실린더 구동력이 동일한 경향과 유사한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 붐을 들어올린 후 정지해 있는 부분에서 계측값과 해석 결과의 차이가 크게 나타나고 있는데, 이는 계측 시에는 작업자가 임의로 압력을 과도하게 부과하는 반면, ADAMS 해석 결과는 그 동작을 수행하기 위해 필요한 실린더 구동력만을 나타내기 때문이라 판단된다. Fig. 8의 9초 부근에서 붐 실린더 구동이 정지했다가 다시 시작하는데, 이때 계측에 의한 실린더 구동력이 갑자기 감소한 후 다시 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 붐을 들어올리기 위해 large chamber의 유압이 크게 작용하다가 붐을 내리는 동작에서 급격히 large chamber의 유압을 뺀 후 다시 일정 크기의 유압으로 붐을 지지하면서 내리기 때문이다. ADAMS 해석 결과에서 붐을 들어올린 후 정지하는 부분 또는 정지 후 붐을 내리는 부분에서 구동력이 크게 변하는 것은 시스템의 관성력에 의한 영향으로 판단된다. Fig. 9의 버켓 실린더 구동력 또한

해석 결과와 계측값이 동일한 경향을 보임을 알 수 있고, 붐 실린더 구동의 정지 및 시작 부분에서 구동력이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

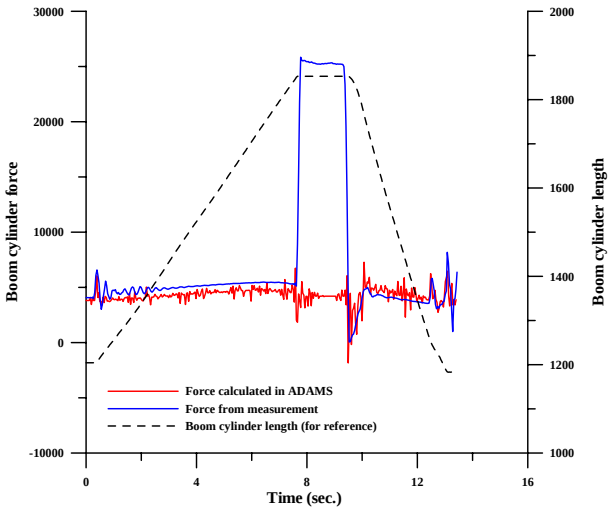

Fig. 8 Comparison of boom cylinder driving forces

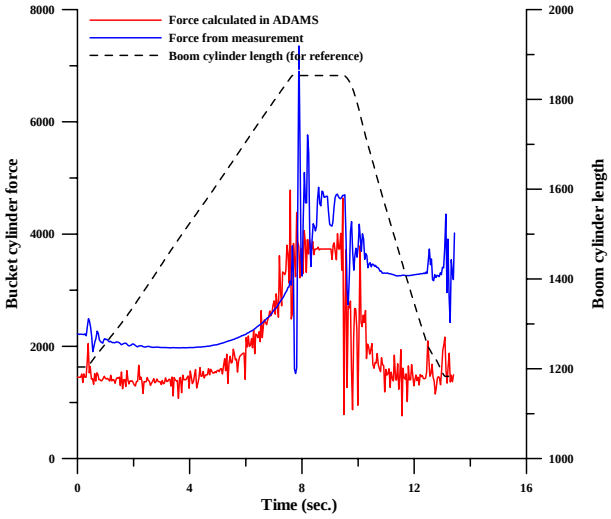

Fig. 9 Comparison of bucket cylinder driving forces

작업 모드 B에 대한 붐과 버켓 실린더 길이의 시간 이력을 Fig. 10에 나타내었으며, 이로부터 ADAMS 운동해석에서 얻은 실린더 변위 결과가 입력 계측 변위를 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 붐과 버켓 실린더의 해석 구동력과 실차 계측을 통해 취득한 계측 실린더 구동력을 Fig. 11과 Fig. 12에서 각각 비교하였다. 작업 모드 A의 경우와 마찬가지로, 붐 또는 버켓 실린더 정지 시에는 작업자 임의의 과도한 유압의 작용으로 차이가 존재함을 알 수 있고 그 외의 동작에서는 계측값과 해석 결과가 동일한 경향을 보임을 알 수 있다.

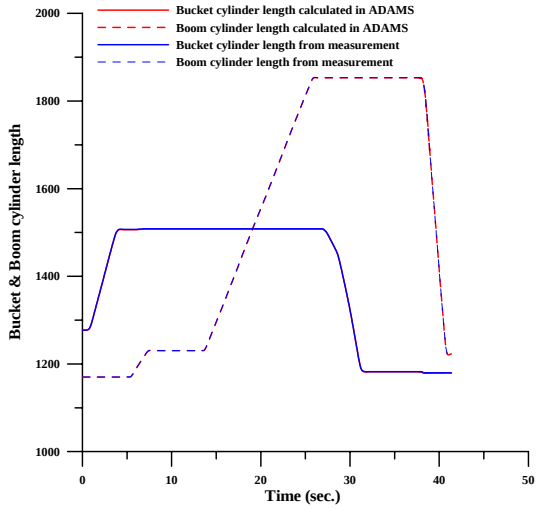

Fig. 10 Measured and calculated cylinder length

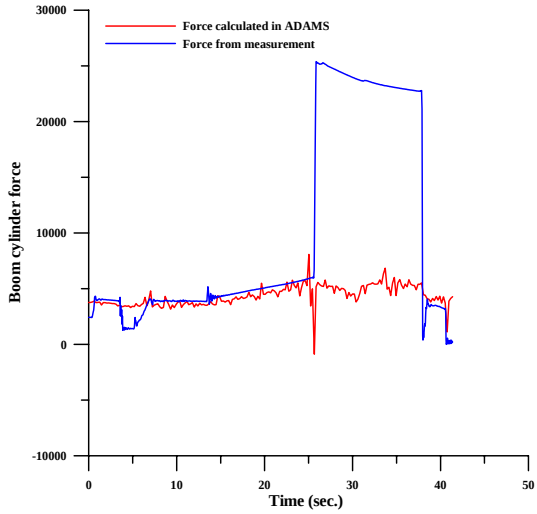

Fig. 11 Comparison of boom cylinder driving forces

4. 시나리오를 이용한 역동역학 해석

실차 계측에 적용하였던 휠로더 일반 적재 작업(작업 모드 B)을 ADAMS 프로그램에서 제공하는 보간 함수를 사용하여 작성된 변위를 구동 구속조건으로 부과하여 역동역학 해석(Case 1)을 수행하였고, 이를 계측 실린더 변위를 구동 구속조건으로 이용한 ADAMS 역동역학 해석(Case 2) 결과와 비교하였다.

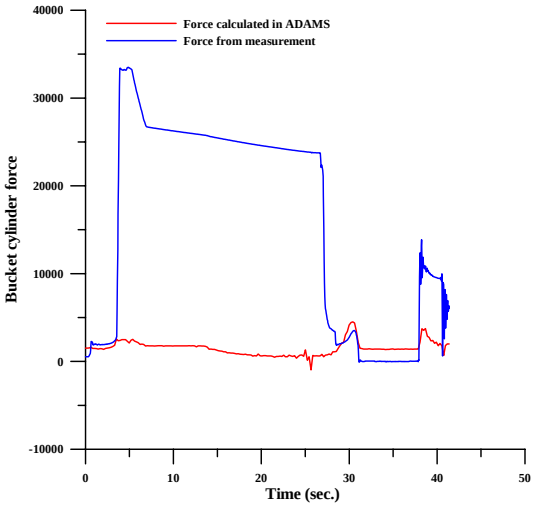

Fig. 12 Comparison of bucket cylinder driving forces

Fig. 13에 Case 1과 Case 2 해석 결과 중에서 붐과 버켓 실린더 길이를 비교하였다. 전체적인 운동의 양상은 유사하나 각 실린더 구동이 시작 또는 종료되는 지점 부근에서 Case 1 해석에 의한 실린더 길이가 좀 더 부드럽게 변하는 것을 알 수 있다. Case 1과 Case 2의 붐과 버켓 실린더 구동력을 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 비교하였다. 평균적인 값에서는 두 해석 결과가 거의 동일함을 알 수 있고, Fig. 13의 Case 1의 변위와는 달리 Case 2의 변위가 작은 크기로 계속 변동(oscillation)하므로 Case 2의 실린더 구동력이 전체적으로 변동하는 값을 가짐을 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 14와 Fig. 15의 Case 2 해석 결과에서 실린더의 운동이 급격하게 변하는 지점에서는 관성력의 변화에 따른 구동력의 변화가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그리고 Case 1과 Case 2로부터 얻은 붐과 전방 프레임의 연결부, 붐과 벨 크랭크의 연결부와 붐과 버켓의 연결부에서 계산한 국부좌표계 x 축 방향과 y 축 방향의 반력을 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. Case 1과 Case 2의 조인트 반력이 유사한 값을 가짐을 알 수 있고, 또한 실린더 구동력과 유사한 시간이력을 보임을 알 수 있다.

이상으로부터, 시나리오를 이용한 역동역학 해석 결과와 계측 실린더 변위를 이용한 역동역학 해석 결과는 유사한 값을 보임을 알 수 있고, 작업 조건에 따른 시나리오 작성에 의한 역동역학 해석 결과도 실험 자료에 의한 해석과 비교해 신뢰할 만한 값을 제시함을 알 수 있다. 그러나 위 결과를 Fig. 11, Fig. 12와 비교해보면 실린더 구동이 정지 또는 시작되는 시점에서의 구동력은 여전히 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 현상은 운동의 정지 및 시작 시점에서 유압의 작용으로 나타나는 변위가 ADAMS 프로그램에서 충분히 묘사되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 구속조건으로 사용되는 실린더 변위를 작성할 때 ADAMS에서 제공하는 보간 함수를 적절히 사용하고 실제 구동 메커니즘을 충분히 고려한다면 보다 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

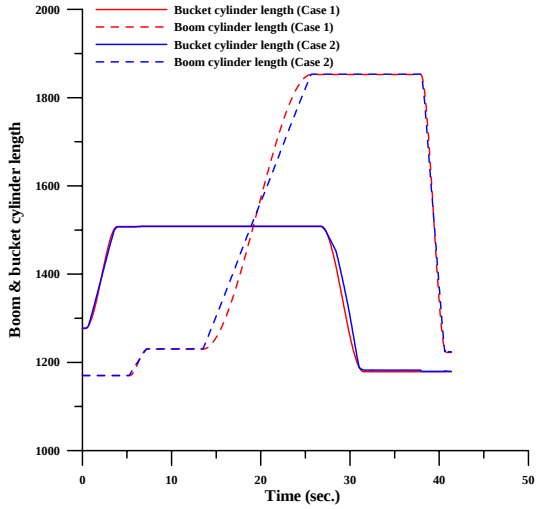

Fig. 13 Comparison of cylinder length

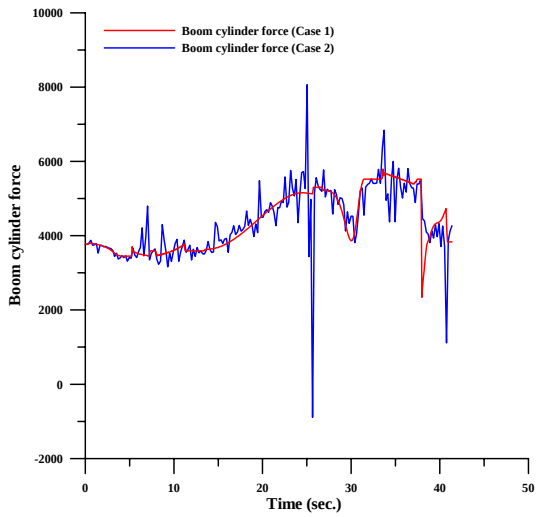

Fig. 14 Comparison of boom cylinder driving forces

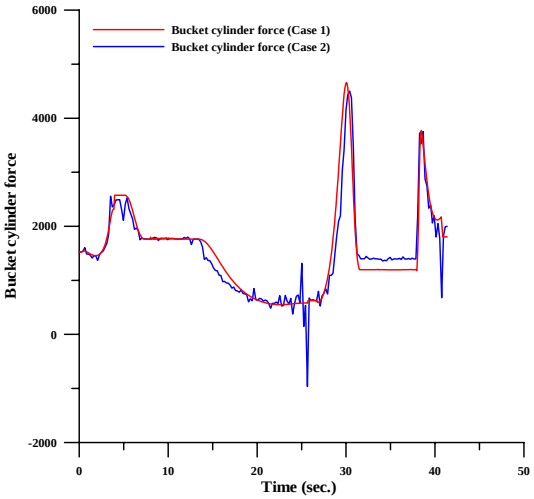

Fig. 15 Comparison of bucket cylinder driving forces

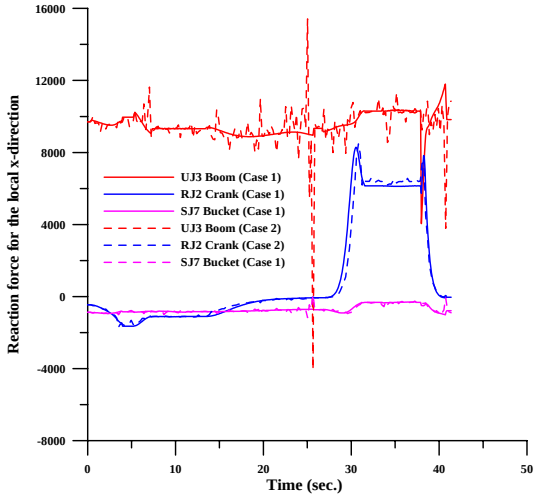

Fig. 16 Reaction force in local x-direction

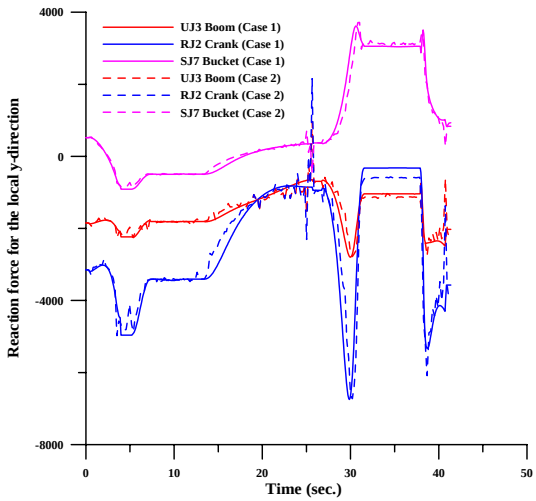

Fig. 17 Reaction force in local y-direction

5. 결 론

당사에서 양산 중인 휠로더의 작업 장치부를 대상으로 ADAMS를 이용하여 동역학 해석 모델을 구축하였다. 운동해석 결과의 검증을 위하여 작업 장치부의 변위 및 유압을 실차 계측하였으며 계측된 변위 데이터를 이용한 역동역학 해석을 수행하였다. 해석 결과, 실험 결과를 이용하여 계산된 구동력이 계측된 실린더의 구동력과 비교적 잘 일치하였다. 그리고 ADAMS에서 구성된 작업 시나리오의 해석 결과와 계측 변위를 이용한 해석 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 이로부터 실제 구동 메커니즘을 고려한 운동변위를 적용한다면 계측을 수행하지 않고도 신뢰할 만한 실린더 구동력 및 반력을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) ADAMS, Mechanical Dynamics Inc., U.S.A.

(2) Oe-Jo Kim, Wan-Suk Yoo, Byung-Hoon Lee, Man-Hyung Lee and Kyeong-Hwa Yoon, 1993, "Three Dimensional Modeling and Inverse Dynamic Analysis of An Excavator," KSME, Vol. 7, No. 8, pp. 2043~2050.

(3) Je-Min Hong, Heui-Won Kim and Dong-Hae Kim, "Dynamic analysis of an excavator manipulator by experimental data", Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting.

(4) Wan-Suk Yoo, Oe-Jo Kim, Byung-Hoon Lee, Man-Hyung Lee and Kyeong-Hwa Yoon, 1994, "Dynamic Analysis of an Excavator Using Experimental Data," KSME, Vol. 18, No. 5, pp. 1150~1157.