휠로더의 정적/동적 실차 계측 및 강도 평가법에 대한 연구

정준모†· 김규성†· 장영식†· 최익흥†· 허민수*

Study on the Static/Dynamic Measurements and Structural Analysis Procedure of Wheel Loaders

Joon-Mo Choung, Gyu-Sung Kim, Young-Sik Jang, Ick-Hung Choe, Min-Soo Heo

Key Words : Boom(붐), Bucket(버킷), Bell crank(벨 크랭크), 링크(Link), Tire stiffness(타이어 강성) , Digging force(굴삭력), Roll back(롤백), Turning traveling(회전 주행)

Abstract

This paper presents the static and dynamic measurements for the strength and motion characteristics as well as the improved procedures to assess strength of wheel loaders. Two scenarios for static measurement were decided by which cylinder was actuating. The dynamic measurement was performed for two types of motion, that is, simple reciprocation of the working devices and actual working motion including traveling, digging and dumping. The measured items were stresses, cylinder pressures and strokes. Stress induced by bucket working showed higher level than that by boom working. The measured cylinder speeds were relatively superior to the design speeds. Working stress histories were thought to be closer to static rather than dynamic. A fully assembled FE model was prepared for structural analysis. In this paper, a more simple method was suggested to avoid nonlinearity caused by heave of rear frame under digging forces. Also how brake affected on structural behavior and digging force was examined closely in relation with tire pressure. It was confirmed that the overall stress level of wheel loader during turning traveling with loaded bucket was far lower than the yield stress of material.

1. 서 론

휠로더(Wheel loader)는 비교적 다양한 작업이 가능한 건설장비 중의 하나로서 기능적 다양성과 더불어 구조적 신뢰성 향상의 요구도 증대되고 있는 실정이다. 휠로더는 주로 버킷의 형태를 바꾸어 가며 여러가지 작업을 수행할 수 있으며 대표적으로 골재 또는 모래 채취장, 석산, 벌목장 등에서 채취된 인양물을 덤프 트럭 등에 적재하는 역할을 수행하며 종종 지게차의 용도로 사용되기도 한다. 이와 같이 휠로더는 다양한 작업을 수행함에 따라 구조물에 작용하는 하중을 정확히 산정할 필요가 있다. 또한 이 하중 데이터를 바탕으로하는 구조안전성 평가 및 수명 예측을 위해서는 구동 특성과 강도 특성의 파악이 필요하다.

이를 위하여 본 연구에서는 11 톤급 휠로더를 대상으로 정적/동적 강도 특성과 운동 특성을 계측하였다. 구동 특성치 중에서 계측된 압력 데이터는 휠로다의 구조 강도 해석을 위한 입력 하중으로 사용되어 계측된 응력 데이터와 비교 검증이 실시되었다. 이와 같은 과정을 통하여 휠로다의 구조 강도를 평가하는 방법을 체계화하였다. 특히 제동 장치 사용 여부로 인한 구조적 거동 특성, 타이어 압력과 굴삭력의 민감도, 회전 주행시 구조적 거동 특성 등을 규명하였다. 또한 치수 최적화 개념을 도입하여 기존 구조물의 중량을 유지하면서 보다 나은 강도를 제시하는 최적의 치수를 제안하였다. 이렇게 체계화된 해석법

† 현대중공업 구조연구실
E-mail : jmchung@hhi.co.kr
TEL : (052)230-5549 FAX : (052)250-9580
* 현대중공업 건설장비건장설계부

은 설계 단계 또는 생산 이전 단계에 적용되어 신뢰성 있는 설계 시스템을 구축하기 위한 필수적 토대가 되리라 예상된다.

2. 계측

2.1 작업자세의 고찰

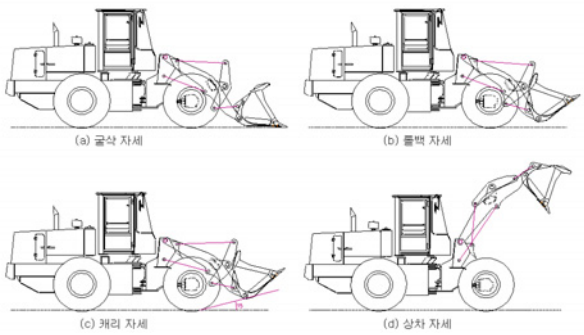

Fig. 1 Standing working positions of an wheel loader

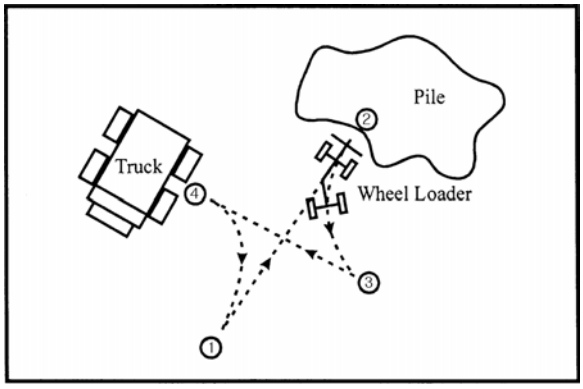

Fig. 2 Traveling working motions of an wheel loader[1]

휠로더의 작업 자세는 크게 작업 장치의 이동 자세와 적재를 위한 주행 자세로 구분할 수 있다. 작업 장치의 이동은 붐 실린더와 버킷 실린더의 확장/수축에 의한 각 작업 장치의 이동을 의미한다. Fig. 1 은 작업 장치의 위치에 따른 대표적인 4 개의 정지 굴삭 자세(굴삭, 롤백, 캐리, 상차)를 나타낸다. 적재를 위한 주행 자세를 살펴보면, Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 적재 방법은 토사(Pile) 등을 전진 주행하여 굴삭(① → ②) 하고 곡 후진 주행(② → ③)한 후 트럭에 상차(③ → ④)하는 자세이다. 본 연구에서는 이러한 자세를 기본으로 하여 정지 굴삭 자세와 주행 자세를 포함하는 동적 굴삭 자세를 계측하였다.

2.2 계측 시나리오

2.2.1 정지 굴삭력 자세

Table 1 Scenarios for static measurement

	Actuating cylinder		Steering
	Boom	Bucket	
SLC1	O	X	Center
SLC2	X	O	

위에서 검토한 작업 자세를 바탕으로 Table 1 과 같이 정지 굴삭력을 계측하기 위한 시나리오를 작성하였다. 조향 중앙 상태에서 붐 실린더와 버킷 실린더로 구동하는 두 가지 구동 경우에 대한 시나리오를 구성하였다. 각 하중 경우는 실린더 작동유의 릴리프가 발생하는 최대 압력까지 최대 하중으로 구동하는 상태이다. 버킷에 담겨지는 토사의 밀도나 양의 불균일로 인하여 버킷의 좌우 방향으로 편심되는 경우도 작업 자세로서 검토의 대상이지만 현실적으로 계측이 매우 어려우므로 버킷의 편심 적재를 고려하지 않았다.

장비의 자중에 의하여 발생하는 압력 및 응력을 동시에 영점 상태로 맞추는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 캐리 자세를 영점 자세로 설정하고, 스트레인 게이지, 압력계, 변위계의 영점을 설정하였다. 그리고 버킷날을 중량물로 고정한 후 최대 압력으로 붐 실린더 및 버킷 실린더를 각각 구동하였다. 각 하중 경우에 대하여 3 회 정도의 반복 계측을 실시하였다.

2.2.2 동적 굴삭 자세

무부하 단일 동작은 버킷에 중량물을 적재하지 않은 상태로 각 실린더를 독립적으로 운동시키는 자세이다. 이 자세는 강도 평가보다는 각 작업 장치의 성능을 시험하기 위함이다. Table 2 의 DLC1 은 붐을 단독으로 상승 하강 시키는 무부하 단일 동작으로서 조향 상태를 중앙, 붐 및 버킷 실린더를 캐리 자세로 취한 후 영점을 설정하고 붐 실린더를 구동하는 자세이다. DLC2 는 버킷을 상차 롤백하는 무부하 단일 동작으로서 조향 상태를 중앙, 붐 실린더를 최대로 확장하여 상차 자세, 버킷 실린더를 캐리 자세로 취한 후 영점을 설정하고 붐 실린더를 구동하는 자세이다. DLC3 은 조향 실린더를 확장 수축하는 무부하 단일 동작으로서 DLC1 과 동일한 자세에서 영점을 설정하였다. 부하 단일 동작(DLC3 - DLC6)은 버킷에 중량물을 적재한 후 무부하 단일 동작과 동일한 동작을 모사한 것이다.

Table 2 Scenarios for dynamic measurement

	Motion	Action	Remarks
DLC1	Boom up & down	Steering center Carry position Boom recipro.	Unloaded recipro.
DLC2	Bucket dump & roll back	Steering center Carry position Bucket recipro.	
DLC3	Steering left & right	Carry position Steering recipro.	
DLC4	Same as DLC1	Same as DLC1	Loaded recipro.
DLC5	Same as DLC2	Same as DLC2	
DLC6	Same as DLC3	Same as DLC3	
DLC7	Continuous working	Ref. Fig. 2	Actual working

Fig. 3 Strain gages attached on a wheel loader

연속 동작(DLC7)은 캐리 자세에서 영점을 설정하고 붐과 버킷을 굴삭할 수 있는 자세로 조정하면서 야적장으로 전진하여 굴삭하고 캐리 자세로 직후진 주행하여 초기 위치로 돌아오는 자세이다. 그리고 곡전진 주행 후 곡 후진 주행하여 초기 위치로 돌아온 다음 직전진 주행하여 야적 위치로 이동하고 붐을 인양, 버킷을 덤프하여 한 사이클을 완료하였다.

2.3 계측 아이템

계측 아이템은 응력, 변위 및 압력이며 각각에 대하여 스트레인 게이지, 변위계 및 압력계를 이용하여 계측을 수행하였다. 1 축 스트레인 게이지를 버킷에 6 개(No. 1 – 6), 링크에 2 개(No. 7 – 8), 벨 크랭크에 12 개(No. 9 – 20), 붐에 12 개(No. 21 – 32), 전방 프레임에 11 개(No. 33 – 43), 후방 프레임에 4 개(No. 44 – 47) 총 47 개를 설치하였다. 정적 계측시에는 모든 채널에 대하여 응력 데이터를 취득하고 동적 계측시에는 각 구조부재에서 일부(12 채널)를 선정하여 응력을 취득하였다. Fig 3 은 휠로더에 부착된 스트레인 게이지를 나타내고 있다. 운전자 기준으로 우측 붐 실린더, 버킷 실린더, 우측 조향 실린더에 총 3 개의 변위계를 부착하였다. 또한 좌측 붐 실린더, 버킷 실린더, 좌우 조향 실린더(소실) 포트에 총 4 개의 압력계가 설치되었다.

2.4 계측 결과

2.4.1 정적 계측 결과

붐 실린더를 구동할 경우 전반적으로 좌우 대칭적인 응력 분포를 보여주며 전반적으로 150 MPa 를 초과하지 않는 비교적 안전한 수준의 응력 분포를 나타내었다. 버킷 실린더를 구동할 경우에도 좌우 대칭적인 응력 분포를 보여주지만 붐 실린더를 구동할 경우에 비하여 전반적으로 큰 응력 수준을 나타내었다. 벨 크랭크에서 최대 268 MPa 에 이르는 응력이 나타났다(Fig. 8 참조).

2.4.2 동적 계측 결과

(1) 실린더 성능 평가

Table 3 Comparison of cylinder performance

	Boom Speed [%]		Bucket Speed [%]	
	Ext.	Comp.	Ext.	Comp.
DLC1	+17.4	-2.1	-	-
DLC2	-	-	-5.8	-9.22
DLC4	+7.0	+17.8	-	-
DLC5	-	-	-5.5	+5.8

Table 3 은 무부하 및 부하 상태에서 붐 및 버킷 실린더의 확장/수축 속도를 설계속도에 비교하여 나타내고 있다. 전반적으로 설계속도보다 우수한 성능을 나타내고 있으며, 특히 작업 속도를 좌우하는 것은 붐 실린더의 확장 수축임을 감안할 때 부하시에도 붐 실린더는 설계속도보다 우수한 성능을 보여준다.

(2) 응력 분포

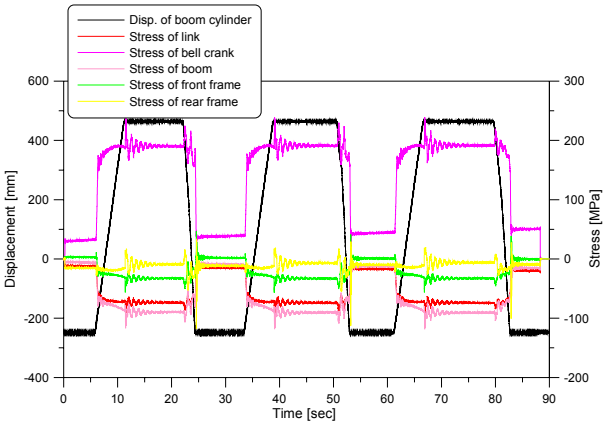

Fig. 4 Stress with variation of boom cylinder (DLC4)

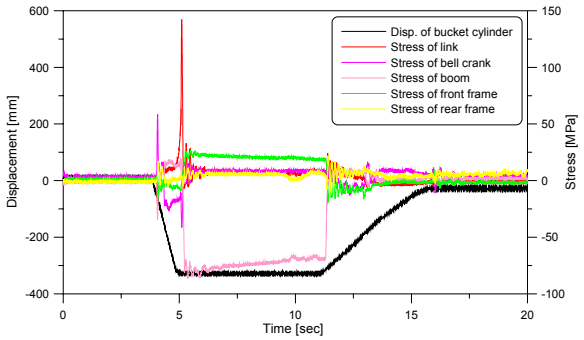

Fig. 5 Stress with variation of bucket cylinder (DLC5)

무부하 상태이던 부하 상태이던 붐을 구동하는 경우 작업 장치와 붐과 차대에서 계측된 응력은 거의 정적인 응력 상태로 간주하여도 무방한 것으로 보여진다(Fig. 4 참조). 버킷실린더를 구동 시작할 때 링키지(링크와 벨 크랭크 연결부) 부근의 응력은 순간적으로 동적 효과를 나타내며 특히 링크에서 약 140 MPa 의 응력이 발생하였다. 그러나 붐 및 차대에서 계측된 응력은 거의 정적인 양상을 나타낸다.

3. 강도 평가

3.1 해석 모델의 구성

휠로다의 강도 해석법을 정립하기 위해서는 우선적으로 계측 결과와 비교 분석을 수행하는 것이 필수적이며, 이점에 주안점을 두고 유한요소 모델을 구성하도록 노력하였다. Fig. 6 은 완전히 조립된 유한요소 모델의 형상을 나타낸다.

타이어의 연직 방향 강성(탄성)을 유한 요소 모델에 고려하기 위해서는 타이어의 압축 시험 결과가 필요하며, Fig 7 은 초기압이 2 bar, 3 bar, 4 bar, 5 bar 의 네가지 경우에 대한 압축 시험 결과를 보여주며, 초기압에 관계없이 하중과 변위의 관계는 선형으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 5 bar 인 경우를 모델에 반영하였다.

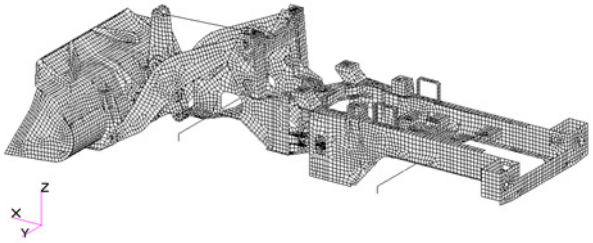

Fig. 6 Fully assembled finite element model

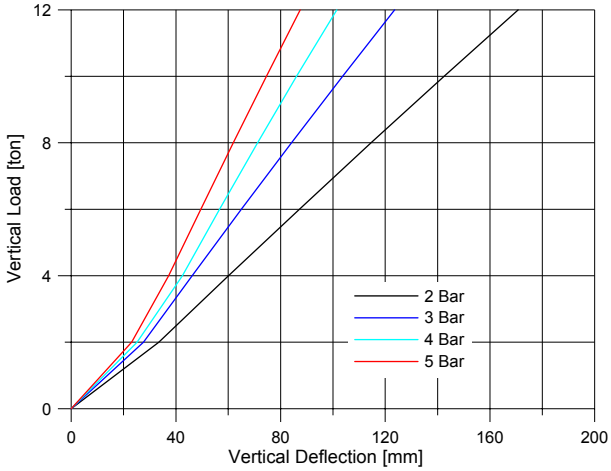

Fig. 7 Tire stiffness for various initial pressure

3.2 하중 및 경계조건

3.2.1 정지굴삭자세

버킷의 경계조건으로서 계측할 때와 동일하게 버킷의 날에 고정 조건을 부여하였다. 타이어와 지면과의 마찰력이 매우 크다고 가정하여 차축의 양쪽 끝단에 좌우 방향으로 고정 조건을 부여하였다. 타이어 탄성을 나타내는 요소가 지면과 접촉하는 절점에 연직 방향으로 고정 조건을 부여하였다. 그러나 타이어가 지면과 연직 방향으로 접촉하는 경계 조건은 하중 조건에 따라서 부분적으로 제거해야 할 필요가 있다. 즉 작업 장치의 구동에 의하여 차대가 위로 들리는 현상이 발생할 경우 타이어 요소에 인장이 발생기 때문이다. 또한 타이어를 제동 시킬 경우에는 추가적으로 차축의 양쪽 끝단에 길이 방향 변위를 구속시킬 필요가 있다.

실제 굴삭 작업시 조향 상태에서 굴삭하는 경우는 거의 없는 것으로 조사되었기 때문에 하중 조건으로서 정적 계측 시나리오와 동일하지만 타이어 제동 유무에 따른 거동의 차이를 별도로 파악

하였다.

3.2.2 회전주행자세

회전 주행하는 동안의 구조 거동을 파악하기 위하여 적재물을 버킷에 적재하지 않은 경우와 적재한 경우를 하중 조건에 포함하였다. 회전 주행시 조향 각도는 40 도(최대 조향)로 가정하였으며, 작업장치 캐리 자세에 대하여 해석을 수행하였다. 실제 작업자가 가장 많이 사용하는 변속상태 2 단을 작업 하중 조건으로 설정하였다. 버킷의 적재상태는 평적을 가정하였다. 계측 당시 약 3 회에 걸쳐 작업장 토사(골재)의 질량 밀도를 확인한 결과 1.5 ton/m^3 이었다.

3.3 타이어 시뮬레이션 방법의 고찰

타이어는 차체의 자중에 의하여 지면과 접촉하지만 작업 장치의 구동으로 인하여 바퀴가 들리는 현상이 발생할 때 타이어는 지면에 구속되지 않는다. 유한 요소 해석에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 다음의 두가지 방법을 고려할 수 있다.

첫째 타이어의 압축 강성을 비선형 문제로 간주하여 해결하는 방법, 즉 압축 강성은 존재하되 인장 강성이 없는 것으로 간주하는 방법이고, 둘째 해석 결과를 관찰한 후 타이어 요소에 인장이 발생할 경우 그 요소를 제거 후 재해석을 수행하는 방법이다.

첫번째 방법은 비선형 스프링을 사용하는 기하학적 비선형 해석과 접촉을 정의하는 경계적 비선형 해석으로 구분되지만 선형 해석에 비하여 우선 계산 시간이 비교적 많이 소요되고, 입력 파라메터가 복잡하다. 또한 수렴성으로 인하여 가상의 인장 강성을 부여하기 때문에 결과의 정도가 우수하다고 간주할 수도 없다. 위와 같은 문제점들로 인하여 본 연구에서는 타이어 요소의 인장 여부를 확인하면서 재해석을 수행하는 해석법을 선택하였다.

3.4 계산 결과 및 평가

3.4.1 정지 굴삭 자세

Table 4 는 해석 반력과 계측 반력을 비교하여 나타내고 있다. 모든 해석 결과는 타이어 들림 현상을 고려한 것이다. Table 4 에서 계측 반력(Measured reaction force)이란 붐 실린더를 구동할 경우 버킷 실린더에서 계측된 반력과 버킷 실린더를 구동할 경우 붐 실린더에서 계측된 반력을 나타낸다. 이때 유한 요소 해석을 수행하기 위한 입력 하중(Input force)으로는 붐 실린더를 구동할 경우 계측된 붐 실린더 하중을, 버킷 실린더를 구동할 경우 계측된 버킷 실린더 하중을 사용하였다. 제동 유무에 따른 해석 결과(Calculated reaction force)를 계측 반력과 비교해서 나타내었다.

붐 실린더를 구동할 경우 버킷 실린더의 반력은 제동을 하지 않을 경우에 계측 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 버킷 실린더를 구동할 경우 붐 실린더가 완전히 접힌 상태에서 계측이 수행되어야 하지만 실제 계측에서는 붐 실린더에 잔류 변위가 남은 상태에서 계측이 되었고 따라서 수동압을 받는 붐 실린더 대실의 압력이 지속적으로 감소하는 상황이었다. 즉 붐 실린더의 반력이 지속적으로 감소하는 상황에서 계측이 수행되었기 때문에 계측과 계산 결과를 직접 비교하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

Table 4 Comparison of cylinder reaction forces [N]

	Input force	Calculated reaction force		Measured reaction force	Working cylinder
		Brake	No Brake		
SLC1	245987	8722	160682	161100	Boom
SLC2	376044	2736	38021	226195-113097	Bucket

Table 5 Calculated displacement of tires [mm]

	Front tire		Rear tire	
	x	z	x	z
Only Gravity	-3.3	-8.4	-3.2	-26.5
SLC1	-79.3	-71.2	-79.0	-2.0
SLC2	0.57	-7.5	0.71	-14.3

Table 5 는 비제동시 전륜 및 후륜의 해석 변위를 나타낸다. 무게 중심이 피봇에서 후방 프레임 쪽에 있기 때문에 자중에 의하여 타이어의 연직 변위는 후륜에 크게 발생한다. 붐 구동시 전륜을 회전 중심으로 후륜이 들려 올라가는 현상이 발생하지만 자중 때문에 양의 연직 변위를 유발하지는 못하는 것으로 나타났다. 또한 붐 구동시 자중에 의한 영향을 제외한 길이 방향(x) 변위는 약 76 mm 이며 타이어 반경이 702 mm 임을 감안하면 약 6^O 정도 타이어가 회전하는 양이다. 이는 1 회전에 비하면 1.7% 회전에 불과하며 이 정도의 기계적 유격은 타이어 또는 차축에 존재하리라 판단된다. 따라서 만일 계측 당시에 제동을 한 상태에서 계측을 수행했더라도 비제동 상황으로 해석을 하는

것이 타당하다고 추정할 수 있다. 버킷으로 구동하는 경우 붐과 버킷이 접하는 힌지를 중심으로 차대가 들려 올라가는 메커니즘을 보이므로 양의 길이 방향으로 움직이면서 전륜 및 후륜의 연직 방향 변위가 감소하는 경향을 나타낸다. 이상의 비교 분석 결과, 추후에 휠로다의 구조 강도를 평가하기 위해서는 제동을 하지 않은 상태로 강도 평가가 실시되는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

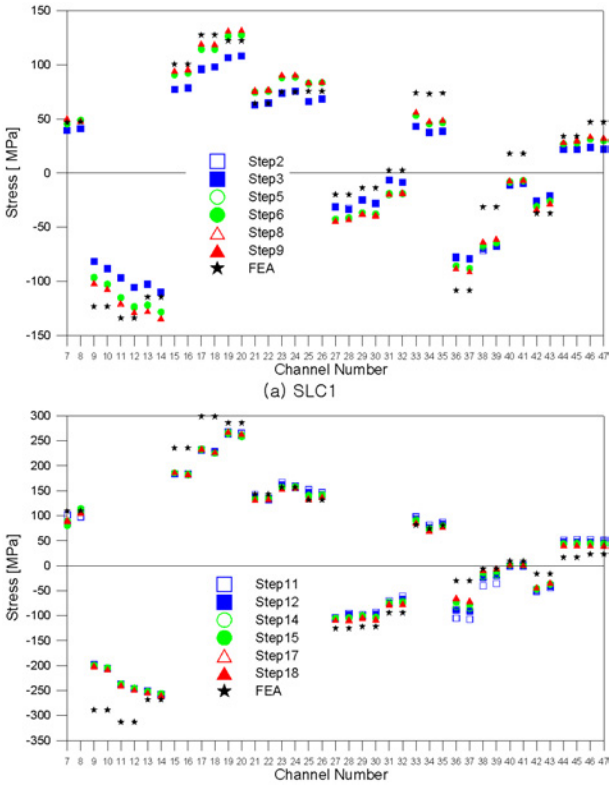

Fig. 8 Comparison of static stresses

Fig. 8 에서 각 구조 부재에서 계측된 응력을 해석 결과와 비교 검토하였으며 전반적으로 해석 응력이 계측 응력과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8 에서 "step"은 한 개의 하중 경우에서 반복 계측을 의미한다. 전반적인 응력 수준은 SLC1 보다는 SLC2 의 응력이 크게 나타나며 SLC2 의 경우 벨 크랭크에서 약 300 MPa 정도의 비교적 큰 응력이 계산되었지만 계측 결과는 268 MPa 로서 비교적 적게 발생하는 것으로 관찰되었다.

3.4.2 회전주행자세

회전 주행시 발생하는 응력 상태를 관찰하기 위하여 2 단으로 회전 주행시 버킷의 적재 여부에 따라 해석을 수행하였다.

평적재 후 후진 주행할 때 최대 등가 응력은 전방 프레임과 연결되는 좌측 붐에서 발생하며, 전방 프레임의 전면 사각 구멍의 모서리에서도 비교적 높은 응력이 발생함을 확인할 수 있었다. 결론적으로 항복 응력이 315 MPa 임을 감안하면 140 MPa 의 최대 응력은 비교적 안전하다고 판단된다 (Fig. 9 참조).

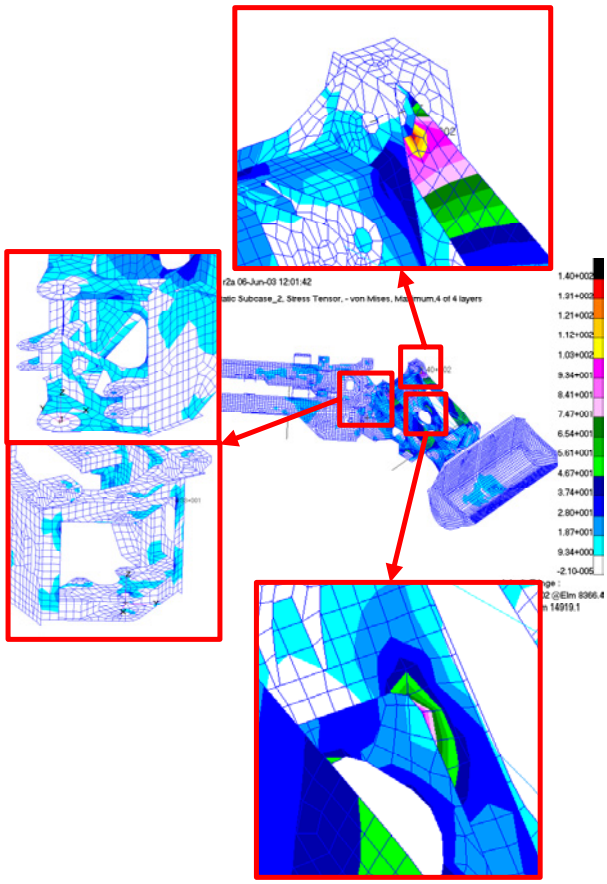

Fig. 9 Stress distribution under turning traveling

3.5 타이어 압력과 굴삭력 민감도

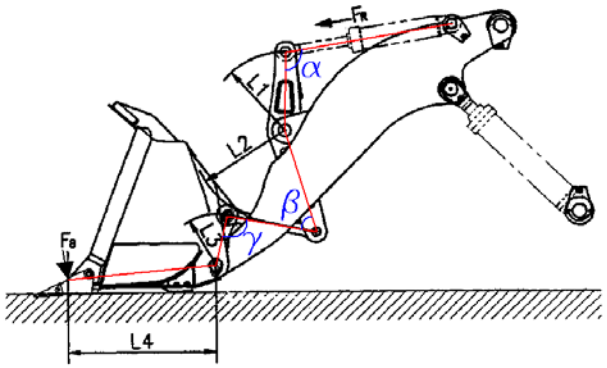

Fig. 10 Schematic for calculation of digging force

굴삭력(F_B)은 레버(Lever)비에 의하여 식(1)과 같다. 이 굴삭력 계산식은 최대 굴삭력을 나타내며 실제로 Fig. 10 에 나타낸 자세와 같이 버킷이 지면에 접촉하는 자세에서의 굴삭력은 레버 길이(L1,

L2, L3, L4) 뿐만 아니라 레버가 이루는 각도(α, β, γ)에 의하여 결정된다. 현재 자세에서 α 와 γ 가 거의 90 도에 가까우므로 식(2)와 같이 굴삭력을 계산할 수 있다.

$$F_B = (L1 \times L3) / (L2 \times L4) \times F_R \quad (1)$$

$$F_B = (L1 \times L3) / (L2 \times L4) \times F_R \times \mathrm{Cos}\,(90-\beta) \quad (2)$$

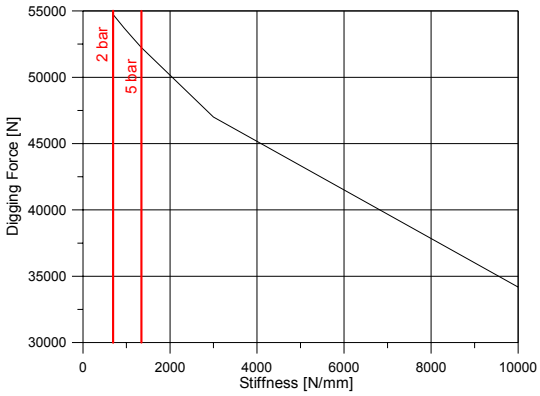

Fig. 11 Sensitivity of digging force according to tire pressure

대상 휠로다의 수치 계산에 의한 버킷 실린더 하중(376044 N)을 식(1)에 대입하여 계산된 굴삭력은 101926 N, 식(2)에 의하여 계산된 굴삭력은 90410 N 이다. 그러나 수치계산에 의한 굴삭력은 52235 N 으로 계산되었으며(비제동시) 따라서 계산식에 의한 굴삭력을 기준으로 해석에 의한 굴삭력이 최소 46.8%, 최대 55.5%에 불과한 것으로 나타났다. 간이식에서는 붐을 강체로 간주하여 굴삭력을 계산하였기 때문에 해석 결과와 큰 차이를 보여 주고 있기 때문으로 판단된다. 즉 휠로다는 버킷, 전륜, 후륜의 3 지점이 지면에 접촉하는 기구를 가지며 따라서 전륜 및 후륜의 탄성에 의하여 버킷의 굴삭력이 결정되는 구조이다. 이를 규명하기 위하여 본 연구에서는 타이어의 강성에 따른 민감도 조사를 수행하였으며 이 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 타이어 강성이 크면 클수록 버킷의 굴삭력은 감소함을 볼 수 있으며 따라서 타이어의 초기압을 비교적 작게하여 작업하는 것이 굴삭력 측면에서 유리하다고 볼 수 있다.

4. 결론

(1) 정지 굴삭 자세 계측

당사 생산 휠로다 중의 한 모델을 대상으로 다음과 같은 항목에 대한 계측을 실시하였다. 47 채널의 정적 응력, 6 채널에 걸쳐 각 실린더의 대실 및 소실 압력, 3 채널의 실린더 변위를 계측하였다. 붐 실린더를 구동하는 경우보다 버킷 실린더를 구동하는 경우에 전반적으로 큰 응력이 발생하였으며 벨 크랭크에서 최대 응력이 계측되었다.

(2) 동적 굴삭 자세 계측

동일 실차에 대하여 15 채널의 동적 응력을 계측하였으며 압력 및 변위는 정적 계측과 동일하다. 각 실린더 구동 속도는 설계 속도에 비하여 전반적으로 우수한 성능을 나타내었다. 붐을 구동하는 경우 전반적으로 정적 응력 상태를 나타냈지만, 버킷을 구동하는 경우 링키지에서 동적인 응력 상태를 보여주었다.

(3) 강도 평가

타이어를 수치적으로 묘사하기 위한 현실적 방안을 제시하였으며 계측된 실린더 반력을 입력 하중으로 하여 타이어 제동이 구조적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 정지 굴삭 자세에 대하여 계측 응력과 해석 응력을 비교한 결과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 실린더 반력과 타이어의 변위를 정밀히 분석한 결과 비제동 상태를 해석조건으로 보는 것이 타당함을 밝혔다. 레버비에 의하여 간이식으로 나타내어지는 굴삭력은 수치 계산 결과와 큰 차이가 있음을 확인하였으며 타이어 탄성 - 굴삭력 민감도 조사를 통하여 증명하였다. 이 결과 타이어 공기압이 낮을수록 굴삭력이 증가됨을 확인하였다.

참고문헌

(1) Mike Cobo et al., “Modeling, identification, and real-time control of bucket hydraulic system for a wheel type loader earth moving equipment”, Mechatronics, v.8, no.8, pp.863-885, 1998

(2) JSA, “Japanese Industrial Standard JIS G 3106 : Rolled steels for welded structure”, 1999