

# 응력집중 저감을 위한 트랙터용 프론트 로더의 설계개선 및 충격 안전성 평가

이부윤\*<sup>#</sup>

\*계명대학교 기계자동차공학전공

## Design Improvement of Front-End Loader for Tractor to Reduce Stress Concentration and Evaluation of Impact Safety

Boo-Youn Lee\*<sup>#</sup>

\*Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, KEIMYUNG UNIV.

(Received 22 February 2018; received in revised form 10 March 2018; accepted 14 March 2018)

### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the structural safety of the front-end loader for the 90 kW class of agricultural tractors in impact test conditions. Deformation and stress on the loader under the impact test conditions are analyzed using the commercial finite element analysis software ANSYS. In previous research dealing with the initial design of the loader, the maximum stress occurred in the mount and exceeded the yield strength of the material. In this paper, an improved design of the mount of the loader was proposed to reduce the stress concentration in the initial design. The safety of the improved design was verified by performing rigid-body dynamics analysis, transient structural analysis, and static structural analysis under three impact test conditions: a drop and catch test, a corner pull test, a corner push test. It was found that the local stress concentration in the mount that appeared in the initial design was greatly reduced in the improved design, and that the maximum stresses occurred in the three impact test conditions are smaller than the yield strength. It is expected that the design improvement of the mount proposed in this study and the method of analysis may be effectively used to enhance structural safety in the development of new model front loaders in the future.

**Key Words** : Front-End Loader(프론트 로더), Agricultural Tractor(농업용 트랙터), Impact(충격), Finite Element Analysis(유한요소해석), Structural Design(구조설계)

### 1. 서 론

농업용 트랙터의 전면에 장착되는 작업기의 일종인 프론트 로더(front-end loader)는 유압시스템을 이용하여 작동되는 장비로서, 적재물의 상·하차 및 트

랙터가 불규칙한 노면 조건에서 사용되는 특성으로 인하여 외부 진동 및 충격에 자주 노출된다<sup>[1]</sup>.

프론트 로더 제조업체는 신제품 개발 단계에서 충격에 대해 안전하게 구조를 설계하여 주요 부품들이 파손될 가능성이 없게 해야 한다. 이를 위하여 신제품 개발 중에 수차례 시제품(prototype)을 제작하고 충격시험을 실시하여 안전성을 평가한다. 일반적으로 프론트 로더의 충격시험으로는 낙하정

# Corresponding Author : [bylee@kmu.ac.kr](mailto:bylee@kmu.ac.kr)

Tel: +82-53-580-5922, Fax: +82-53-580-5165

지시험(drop and catch test), 코너당김시험(corner pull test), 코너충돌시험(corner push test)의 세 가지 시험을 실시하게 된다<sup>[2]</sup>. 신모델 개발을 위한 구조설계 과정에서 여러 차례 시작품을 제작하여 충격시험을 실시하게 되면 개발에 장시간과 많은 비용이 소요될 수밖에 없다. 따라서 유한요소법을 사용하여 충격시험 시에 발생하는 주요 부품의 응력을 미리 분석하여 구조설계에 반영하는 것이 효율적이다.

프론트 로더에 관한 선행 연구를 보면, 우선 충격 저감을 위한 유압회로 설계 분야를 들 수 있다. Cho 등<sup>[1]</sup>은 트랙터 주행 중의 요철 충격에 의한 프론트 로더의 진동을 저감하기 위한 유압회로시스템을 설계하고 충격저감 효과를 검증하였고, Ahn 등<sup>[3]</sup>은 트랙터 주행 시 프론트 로더에 의한 충격특성을 실험적으로 규명하여 진동 및 충격압력을 감소시키는 어큐뮬레이터 설계 및 주행 중의 진동저감을 연구하였고, Cho<sup>[4]</sup>는 좁은 공간에서 작업을 위한 농기계용 로더의 4륜 구동 및 4방식 조향장치의 유압회로를 연구하였다. 다음으로는 동역학 해석 분야를 들 수 있는데 Go 등<sup>[5]</sup>과 Chung 등<sup>[6]</sup>은 농업용 트랙터를 대상으로 하여 동적 모델링과 동역학 해석을 수행하였고, Park 등<sup>[7]</sup>은 트랙터 주행 조건에 대한 동역학 해석을 수행하고 조인트 반력을 이용하여 부품의 내구수명을 계산하였고, Han<sup>[8]</sup>은 기구해석과 동역학 해석을 이용하여 굴삭력이 높고 작업부의 각도 변화가 작도록 하는 프론트 로더의 링크기구를 연구하였다. 다음으로는 응력 측정과 해석 분야를 들 수 있는데 자동차 관련 충격 및 충돌 해석에 관한 연구는 많이 수행되고 있지만<sup>[9]</sup>, 농기계 프론트 로더에 대한 충격해석 선행연구는 그다지 많지 않다. Kwon 등<sup>[10]</sup>은 미니로더에서 버킷(bucket)이 부하물을 적재하여 최고높이에서 정지했을 때 붐 실린더(boom cylinder)에서 계속한 압력하중을 정적으로 가하여 마운트(mount)를 해석하고 실험계획법으로 최적구조를 설계하였다. Park 등<sup>[11]</sup>은 프론트 로더에 스트레인지지를 부착하고 버킷 낙하에 대한 충격시험을 실시하여 응력을 측정하고 정하중에 의한 응력측정 결과와 비교하여 구조적 안전성을 검증하였다.

한편, 최근에 Lim 등<sup>[2]</sup>은 90 kW급 농업용 트랙터용 프론트 로더의 신모델 개발 단계에서 도출된 초

기설계안에 대하여 세 가지 충격시험 조건에 대하여 유한요소해석을 수행하였으며, 마운트의 기하학적 불연속 위치인 사각관 모서리에서 응력집중으로 인하여 항복강도를 초과하는 응력 피크가 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구는 Lim 등<sup>[2]</sup>의 연구에서 나타난 프론트 로더 마운트에서 발생하는 응력집중을 저감하기 위한 후속 연구에 해당한다. 본 연구에서는 90 kW급 농업용 트랙터 프론트 로더의 초기설계안에서 나타난 마운트의 응력집중을 줄이기 위한 설계개선안 도출과 충격시험 조건에서의 안전성 평가를 다루고자 한다. 도출된 설계개선안에 대하여 세 가지의 충격시험(낙하정지시험, 코너당김시험, 코너충돌시험) 조건을 해석하기 위하여 강체동해석(rigid body dynamic analysis), 과도구조해석(transient structural analysis), 정적구조해석(static structural analysis) 등을 수행하였다. 그리고 충격시험 조건의 해석결과로부터, 초기설계안에서 나타난 국부적 응력집중이 설계개선안에서 어느 정도로 저감되는지를 고찰하고 최대응력을 항복강도와 비교하여 각 부품의 안전성을 평가하였다.

## 2. 초기설계안 해석결과 평가 및 설계개선안 도출

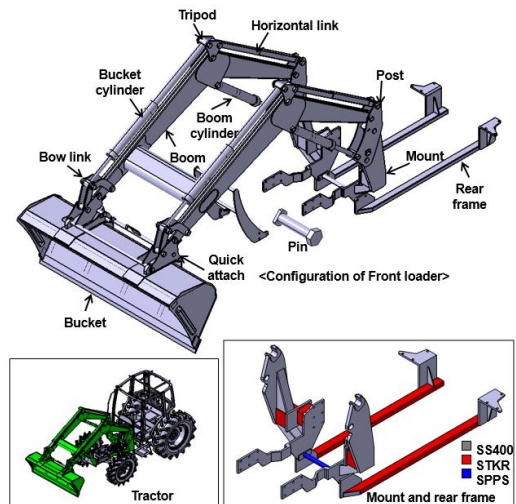
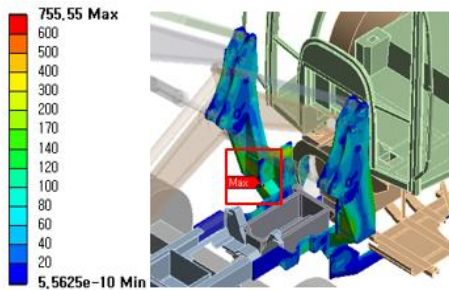


Fig. 1 Initial design of front loader and mount

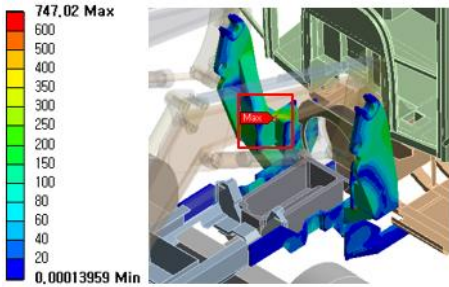
여기에서는 프론트 로더의 초기설계안 해석결과 [2] 최대응력이 발생한 위치의 응력집중과 이에 의거하여 도출된 설계개선안을 설명하고자 한다.

**Table 1 Material properties**

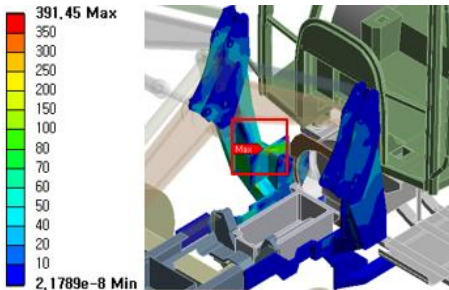
Material type	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)
SS400	200	0.28	7,860	250
S45C	208	0.30	7,840	343
STKR	201.6	0.26	7,850	345
SPPS	201.6	0.26	7,850	345



(a) Drop and catch test

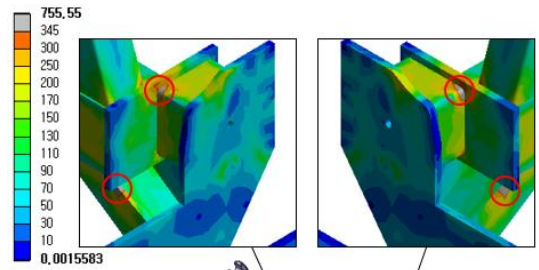


(b) Corner pull test

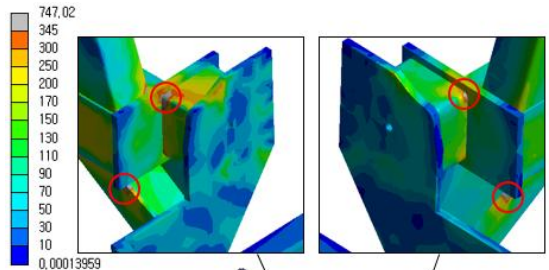


(c) Corner push test

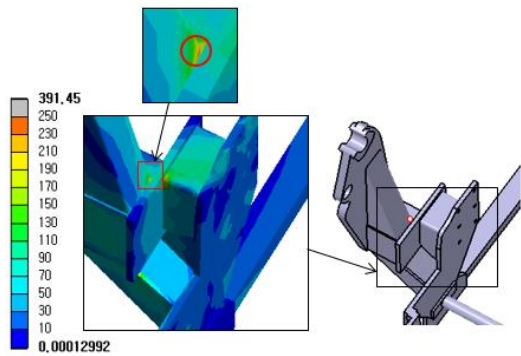
**Fig. 2 Distribution of von Mises stress at mount (initial design)**



(a) Drop and catch test



(b) Corner pull test



(c) Corner push test

**Fig. 3 Stress concentration at mount (initial design)**

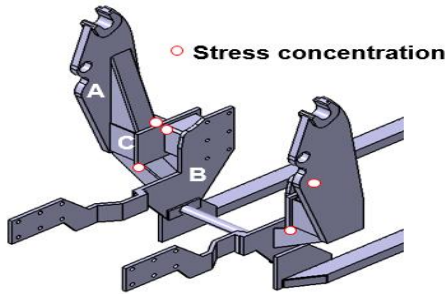


Fig. 4 Location of stress concentration at mount (initial design)

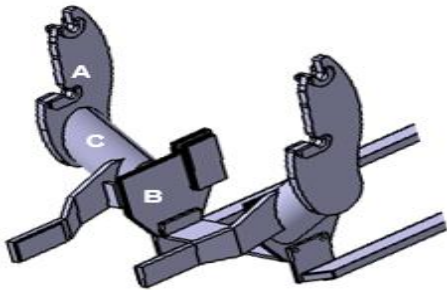


Fig. 5 Improved design of mount

Fig. 1은 프론트 로더 초기설계안의 형상, 주요 부품 명칭, 마운트와 후방 프레임(rear frame)의 형상과 재질을 나타낸다. 프론트 로더는 크게 버킷, 버킷 실린더, 붐, 붐 실린더, 수평링크, 포스트(post), 마운트, 후방프레임 등으로 구성되어 있다.

버킷은 적재 시 흙이나 물건 등을 담을 수 있는 용기 역할을 하며 버킷 실린더는 유압을 이용하여 버킷의 각도를 움직이는 역할을 한다. 붐은 프론트 로더의 뼈대 역할을 하며 붐 실린더는 유압을 이용하여 붐의 위치를 이동시킨다. 수평링크는 붐의 움직임에 상관없이 버킷의 초기각도를 유지시키는 역할을 한다. 마운트와 후방프레임은 프론트 로더를 트랙터 본기와 연결하는 부품으로서, 프론트 로더의 모든 무게와 충격, 비틀림을 지지해주는 역할을 한다. 따라서 마운트는 로더의 충격 대부분을 지지하기 때문에 파손의 위험성이 가장 큰 부품 중의 하나이다.

프론트 로더를 구성하는 부품들의 재질은 SS400, S45C, STKR, SPPS, S45C이며 재료 물성치는 Table

1에 수록하였다. 특히, 프론트 로더를 본기에 체결하는 역할을 하는 주요 부품인 마운트와 후방 프레임은 판재를 절단, 절곡 및 용접하여 제작하도록 설계되었으며, Fig. 1과 같이 SS400 재질의 철판과 STKR 재질의 사각관, SPPS의 원형관 등으로 구성된다.

Fig. 2(a), (b), (c)는 각각 초기설계안에 대한 낙하정지시험, 코너당김시험, 코너충돌시험 조건의 유한요소해석에서 최대응력이 발생한 마운트 부의 von Mises 응력분포인데<sup>[2]</sup>, 판재가 꺾어진 기하학적 불연속 위치에서 응력집중으로 인한 응력 피크가 발생하는 것으로 나타났다. 초기설계안에서 나타난 최대응력 값은 낙하정지시험, 코너당김시험, 코너충돌시험 조건에서 각각 756 MPa, 747 MPa, 391 MPa로 Table 1에 표시된 항복강도(SS400: 250 MPa, STKR, SPPS: 345 MPa)를 초과하였다.

Fig. 3은 마운트에서 항복강도를 초과하는 응력집중 부위를 확인하기 위하여 응력분포도의 범례의 두 번째 값이 항복강도와 같은 값이 되게 하여 나타낸 그림으로, 응력이 항복강도를 초과하는 위치는 응력분포도에 원으로 표시하였다. 응력이 항복강도를 초과하는 위치를 취합하여 Fig. 4에 다시 나타내었는데, 사각관이 수직방향에서 수평방향으로 꺾어진 부위, 그리고 후방프레임에 체결되는 수직판재와 사각관의 용접부 등이다. 이는 모두 기하학적 형상이 불연속인 위치이므로 응력집중에 의해 국부적인 응력 피크가 발생한 것으로 판단된다.

이상과 같이 프론트 로더의 초기설계안에서 나타난 응력집중을 저감하기 위하여 마운트 부의 설계개선안을 도출하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5를 참조하여 구조적 관점에서 중요한 변경 사항만 설명하자면, 포스트에 체결되는 마운트의 수직판재(A)와 후방프레임에 체결되는 수직판재(B)를 연결하는 부재(C)가 초기설계안에서는 사각관이 L자 형태로 꺾인 형상이었으나 설계개선안에서는 직선 형상의 경사진 원형관으로 변경되었다. 이와 같이 마운트 설계를 변경함으로써 Fig. 4에 표시된 초기설계안 마운트의 응력집중 위치의 응력 피크를 완화할 수 있을 것으로 예상하였다. 설계개선안의 해석결과와 응력집중 저감 효과는 다음 장에 기술하였다.



### 3. 설계개선안의 해석결과

#### 3.1 낙하정지시험 조건

트랙터에서 낙하정지시험은 버킷을 수평상태로 유지한 상태에서 지면으로부터 최대높이에서 시작하여 최저높이까지 세 단계로 나누어 최대 유압으로 낙하 후 정지시켜서 충격을 가하는 시험이다. 개발 중인 90 kW급의 경우에 낙하정지시험의 최대 높이는 지면으로부터 3,108 mm, 최저높이는 800 mm이다. 그러나 통상적으로 프론트 로더 제조업체에서는 개발 단계에서 본기에 장착하기 전에 프론트 로더 시작품만을 대상으로 낙하정지시험을 수행하게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하여 낙하정지시험 조건의 해석 시에는 본기를 제외하고 프론트 로더만에 대한 해석을 수행하였다.

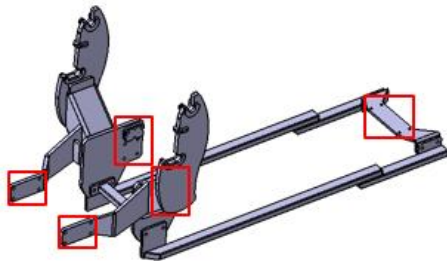


Fig. 6 Location with fixed boundary condition at mount and rear frame

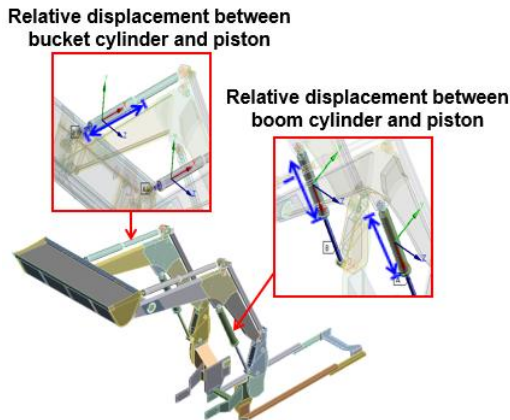


Fig. 7 Boundary condition at bucket cylinder and boom cylinder

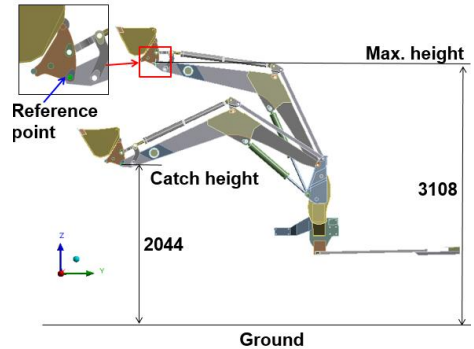


Fig. 8 Rigid dynamics model for drop simulation

Table 2 Results of velocity of the parts (before catch) (unit: mm/s)

Parts	$V_x$	$V_y$	$V_z$
Bucket	6	-49	-1,414
Quick attach	6	-49	-1,414
Bow link	6	-62	-1,372
Bucket cylinder	4	-249	-960
Boom	3	-219	-691
Tripod	2	-408	-605
Boom cylinder	2	-59	-376
Horizontal link	1	-204	-303
Mount	0	0	0

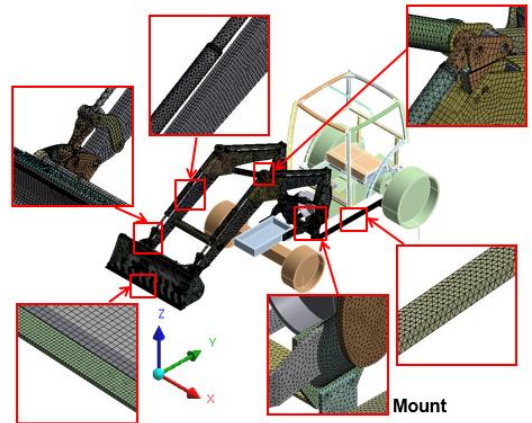


Fig. 9 Finite element model for improved design

복잡한 형상의 프론트 로더 구조에 따라 수반될 수밖에 없는 해석 시간을 단축하기 위하여 해석을 두 단계로 나누어 수행하였다. 1단계 해석에서는 프론트 로더의 낙하에 대한 강체 동역학 해석을 수

행하여 정지 직전의 각 부품의 속도를 구하였다. 2 단계 해석에서는 1단계 해석에서 구한 부품들의 속도를 초기조건으로 사용하여 과도응력해석을 수행함으로써 정지 시의 충격에 의한 응력을 구하였다.

1단계의 강체 동역학 해석을 위하여 마운트와 후방프레임이 본기에 체결되는 위치를 고정하기 위하여 Fig. 6에 나타난 위치의 변위를 구속하였다. 그리고 낙하정지 시에 버킷이 수평상태로 유지되는 점을 고려하여 Fig. 7에 나타난 것과 같이 버킷 실린더와 피스톤 사이의 상대변위는 구속하였다. 한편, 버킷이 낙하할 때 붐 실린더와 피스톤은 상대운동을 하게 되며 피스톤이 실린더 안쪽으로 이동하면서 버킷의 높이가 아래로 떨어지게 된다. 그러므로 추가적인 경계조건으로서 Fig. 7에 나타난 바와 같이 낙하 시 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위가 필요하다. 실제 낙하충격시험 시의 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위를 정량화하기 위하여, 기존의 70 kW급 트랙터에 대하여 낙하정지시험을 실시하여 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위를 측정하였다. 버킷을 최대높이까지 들어 올린 상태에서 첫 번째 낙하 후 정지시켰을 때 지면으로부터 버킷의 높이는 2,044 mm, 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위는 264 mm로 측정되었다. 70 kW급에 대한 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위 측정 결과는 90 kW급과 다소 차이가 있겠지만 첫 번째 낙하 시의 강체 동역학 해석을 위한 경계조건으로 사용하기에 크게 무리가 없을 것으로 판단된다. 이와 같이 구한 상대변위 264 mm를 붐 실린더와 피스톤 사이의 경계조건으로 지정하였다.

이상의 경계조건을 사용하여 본기를 제외하고 프론트 로더만을 대상으로 하여 ANSYS Workbench<sup>[12]</sup>를 사용하여 1단계의 강체 동역학 해석을 수행하였다. Fig. 8은 강체 동해석 모델과 낙하 및 정지 높이를 나타낸다. 해석결과로서 낙하 후 정지하기 직전 시간에서 각 부품들의 속도를 추출하였으며, 추출한 x, y, z축 방향의 속도  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ 를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 속도 중 대표값인 버킷의 z축 방향 속도는 1,414 mm/s로서, 낙하정지시험 조건을 세 단계로 나누어 해석한 Lim 등<sup>[2]</sup>의 결과인 548 mm/s보다 꽤 크다. 따라서 본 연구에서 사용한 낙하 후 정지 직전의 부품들의 속도조건이 Lim 등

<sup>[2]</sup>에 비해서 더 보수적이라는 것을 의미한다. 이러한 보수적인 속도조건은 앞에서 설명한대로 동역학 해석 시에 70 kW급에 대한 붐 실린더와 피스톤 사이의 상대변위 측정 결과를 사용하면서 기인한다.

다음은 2단계 해석으로 낙하 후의 정지에 대하여 ANSYS로 과도구조해석을 수행하였다. Fig. 9는 ANSYS의 자동요소생성 기능을 사용하여 구성된 프론트 로더 설계개선안의 유한요소모델이다. 자동요소생성 시에 요소 크기는 부품에 따라 10 mm 또는 20 mm로 설정하였다. 모델링에 사용된 요소 종류는 20절점 2차육면체요소(20-nodes quadratic hexahedron)와 10절점 2차사면체요소(10-nodes quadratic tetrahedron)이며, 총 요소 수는 181,776개이고 총 절점 수는 327,997개이다. 2차 요소를 사용하는 이유는 자동요소생성 시에 사면체요소와 육면체요소가 혼재되어 생성되므로, 1차 사면체 요소가 갖는 응력의 부정확성<sup>[13]</sup>을 피하기 위한 것이다.

Fig. 10은 과도구조해석의 변위 결과로서, 초기 시간과 최대변위 발생 시점에서 프론트 로더의 변형형상과 변위크기의 분포를 나타내는데 버킷 끝단에서 발생하는 최대변위는 296 mm이다.

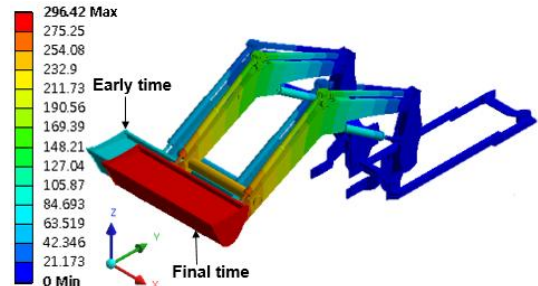


Fig. 10 Displacement distribution (drop and catch)

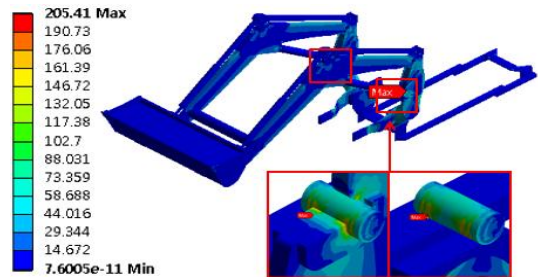


Fig. 11 von Mises stress distribution (drop and catch)

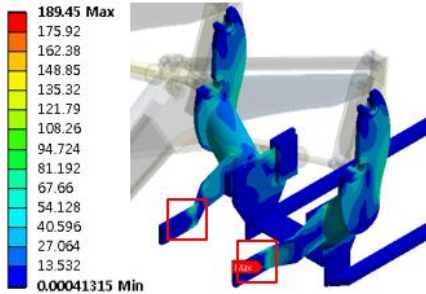


Fig. 12 von Mises stress distribution at mount (drop and catch)

Fig. 11은 과도구조해석에서 최대응력이 발생 한 시간에서 프론트 로더의 von Mises 응력분포를 나타낸다. 전체적으로 응력 수준이 항복강도보다 작게 나타났으며, 최대응력은 205 MPa로 포스트와 마운트의 수직부재를 연결하는 포스트 핀 위치에서 발생하였다. 최대응력 발생 위치는 운전자 기준에서 좌측 포스트 핀이지만, 우측 포스트 핀의 응력과 거의 차이가 없다.

특히 Fig. 12에 나타난 바와 같이 설계개선안에서 마운트의 최대응력은 189 MPa로서, 초기설계안 해석결과(Fig. 2(a), 3(a) 참조)에서 나타났던 응력집중에 의한 응력 피크(최대응력 756 MPa)가 크게 저감된 것을 알 수 있다. 마운트의 최대응력은 운전자 기준에서 트랙터 본기와 마운트 좌측의 체결부이지만, 마운트 우측의 체결부의 응력과 거의 차이가 없다.

### 3.2 코너당김시험 조건

이 절의 코너당김시험과 다음 절의 코너충돌시험 조건의 해석 시에는 프론트 로더만을 해석한 낙하 충격시험 조건과 달리 트랙터 본기도 해석모델에 포함하였다. 설계개선안의 프론트 로더 유한요소모델은 앞 절에서 설명한 것과 같으며, 트랙터 본기는 형상을 단순화하여 강체로 모델링하고, 트랙터 본기의 질량(3,457 kg)을 무게중심에 위치한 집중질량으로 모델링하였다. 그리고 타이어는 지면과 4개의 휠 사이에 스프링요소로 모델링하였다. 트랙터가 정지한 상태에서 각 타이어에 걸리는 반력 및 타이어 반경의 압축량을 측정하고, 반력을 압축량으로 나누어 스프링요소의 강성계수를 계산하였다

[2]. 이렇게 구한 전륜과 후륜의 스프링요소는 각각 314 N/mm, 2,940 N/mm이다.

코너당김시험은 지면으로부터 300 mm 높이에 버킷을 정지시키고 버킷 밑면의 모서리에서 50 mm 떨어진 위치 또는 버킷 밑면의 가운데 위치를 체인을 사용하여 지면과 연결한 상태에서 프론트 로더를 상승시켜 충격 하중을 가하게 된다.

체인으로 지지된 버킷을 상승시킬 때 붐 실린더 내부의 압력은 0에서 18 MPa까지 증가하게 된다. 이를 고려하여 코너당김시험 조건의 해석은 붐 실린더 내부에 최대압력(18 MPa)이 일정하게 작용하는 보수적인 조건의 정적구조해석으로 평가하였다.

체인의 특성을 고려하기 위해 스프링요소로 모델링하였다. 스프링요소의 강성계수를 구하기 위하여 Fig. 13과 같이 체인에 인장력 10,000 N을 가할 때 해석된 체인의 변형량 0.67577 mm로부터 강성계수는  $10000/0.67577=14,798$  N/mm로 계산되었다.

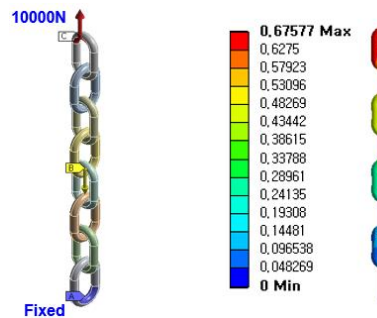


Fig. 13 Results of analysis for calculating spring constant of chain used in corner pull

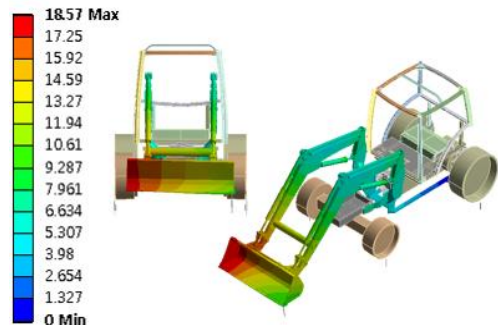


Fig. 14 Displacement distribution (pull of left corner)

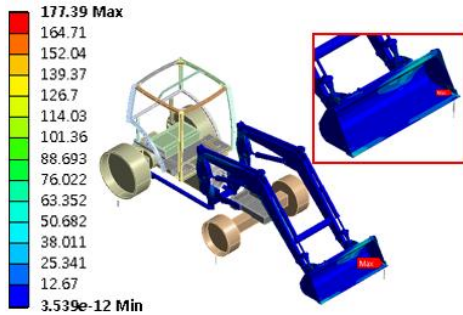


Fig. 15 von Mises stress distribution (pull of left corner)

코너당김시험 조건의 체인 위치가 운전자 기준으로 버킷의 좌측 모서리에서 50 mm 위치인 경우와 버킷의 가운데인 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, 해석 결과는 다음과 같이 정리된다.

운전자 기준으로 버킷의 좌측 모서리 위치를 체인으로 연결하고 로더를 상승할 경우의 해석결과를 Fig. 14~16에 나타내었다. Fig. 14는 전체 모델의 변형형상과 변위크기의 분포를 나타내는데, 체인으로 한쪽 모서리가 지지된 상태에서 버킷이 전단변형하고 최대변위는 체인 반대쪽의 버킷에서 19 mm로 나타났다. Fig. 15는 전체 모델의 von Mises 응력분포를 나타낸다. 전체적으로 응력 수준이 항복강도보다 작게 나타났으며, 최대응력은 177 MPa로 버킷의 체인 연결부에서 발생하였다. 특히 Fig. 16에 나타낸 바와 같이 설계개선안에서 마운트의 최대응력은 운전자 기준 좌측 수직판의 모서리에서 92 MPa로서, 초기설계안의 해석결과(Fig. 2(b), 3(b) 참조)에서 나타났던 응력집중에 의한 응력 피크(최대응력 747 MPa)가 크게 저감된 것을 알 수 있다.

운전자 기준으로 버킷의 가운데를 체인으로 연결하고 로더를 상승할 경우의 해석결과를 Fig. 17~19에 나타내었다. Fig. 17은 전체 모델의 변형형상과 변위크기의 분포를 나타내는데, 버킷이 밀면 가운데가 지지된 상태로 위쪽으로 변형되는 양상을 보이며 버킷의 최대변위는 28 mm이다. Fig. 18은 전체 모델의 von Mises 응력분포를 나타낸다. 전체적으로 응력 수준이 항복강도보다 작게 나타났으며, 최대응력은 182 MPa로 버킷의 체인 연결부에서 발생하였다. 특히 Fig. 19에 나타낸 바와 같이 설계개

선안에서 마운트의 최대응력은 운전자 기준 우측 수직판의 모서리에서 78 MPa로서, 초기설계안의 해석결과에서 나타났던 응력집중에 의한 응력 피크가 크게 저감되었다. 마운트의 최대응력은 운전자 기준에서 트랙터 본기와 마운트 우측의 체결부이지만, 좌측의 체결부의 응력과 거의 차이가 없다.

### 3.3 코너충돌시험 조건

코너충돌시험에서는 버킷 밀면을 지면에서 1,203 mm 높이에 수평으로 유지한 상태에서 트랙터를 8 km/h의 속도로 주행하여 버킷의 좌측 또는 우측 모서리에 위치한 기둥 형태의 충격장애물과 충돌시킬 때의 충격을 평가하게 된다. 충격장애물 규격은 Fig. 20과 같으며 S45C 재질의 판과 SPPS 재질의 원통관으로 제작된다. 프론트 로더 전문제조업체가 정한 시험규격에 의하여, 코너충돌시험 시에 충격장애물 기둥의 아랫부분은 바닥에 고정되지 않고 지면에 놓여 있는 상태에서 트랙터와 충돌하게 된다. 충격장애물과 버킷 사이의 충돌 각도는 30°이다. 코너충돌시험 조건의 해석을 위하여 만든 충격장애물의 유한요소모델도 Fig. 20에 나타내었다.

운전자 기준 좌측에 충격장애물이 위치한 상태의 코너충돌시험 조건을 해석하였다. 충격장애물을 버킷의 좌측 모서리 전방에 위치시키고 트랙터에 8 km/h의 속도를 초기조건으로 적용하여 과도구조해석을 수행하였다. 충격장애물의 충돌면과 버킷의 모서리 사이에는 무마찰 접촉조건을 부여하였으며, 버킷 실린더와 붐 실린더에서 실린더와 피스톤 사이의 상대변위는 구속하였다. 과도구조해석 결과는 다음과 같이 정리된다.

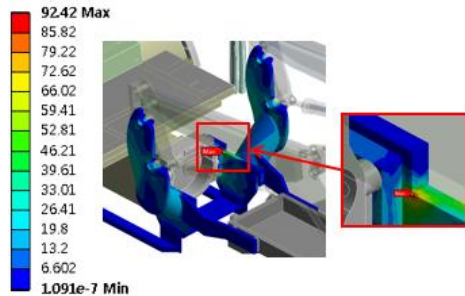


Fig. 16 von Mises stress distribution at mount (pull of left corner)



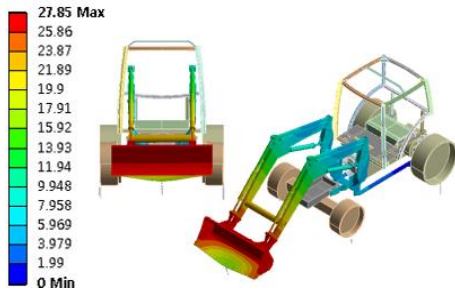


Fig. 17 Displacement distribution (pull of center)

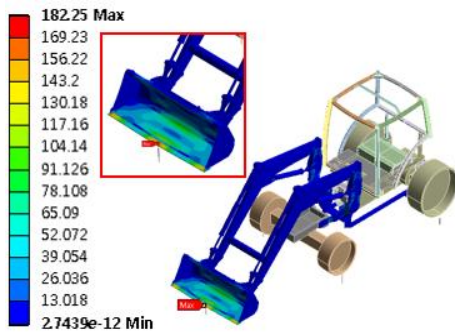


Fig. 18 von Mises stress distribution (pull of center)

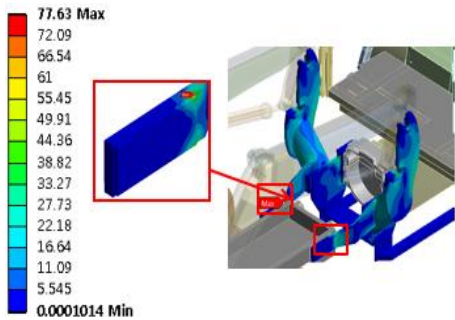


Fig. 19 von Mises stress distribution at mount (pull of center)

Fig. 21은 과도구조해석의 변위 결과로서, 초기 시간과 최대변위 발생 시점에서 프론트 로더의 변형형상과 변위크기의 분포를 나타낸다. 충돌한 후에 장애물은 옆으로 밀려나고 프론트 로더가 비틀리면서 트랙터가 전진하는 형태가 나타났으며, 최대변위는 445 mm이다.

Fig. 22는 과도구조해석에서 최대응력이 발생한 시간에서 전체 모델의 von Mises 응력분포를 나타

낸다. 전체적으로 응력 수준이 항복강도보다 작게 나타났으며, 최대응력은 249 MPa로 볼 실린더(S45C의 항복강도: 343 MPa)에서 발생하였다.

특히 Fig. 23에 나타난 바와 같이 설계개선안에서 마운트의 최대응력은 운전자 기준 우측 수직판 모서리에서 249 MPa로서, 초기설계안의 해석결과(Fig. 2(c), 3(c) 참조)에서 나타났던 응력집중에 의한 응력 피크(최대응력 391 MPa)가 크게 저감되었다.

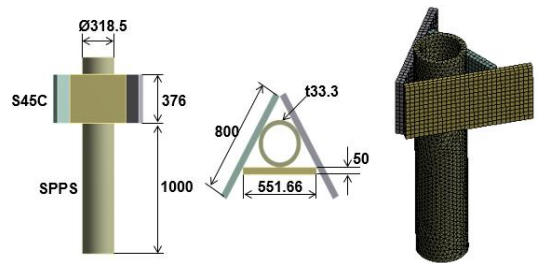


Fig. 20 Specification and finite element model of obstacle for corner push

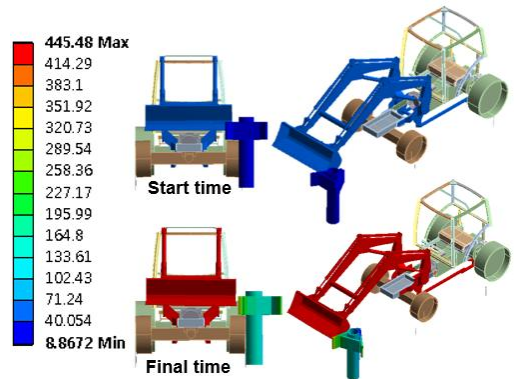


Fig. 21 Displacement distribution (corner push)

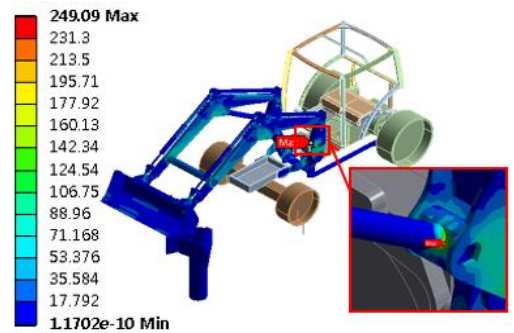


Fig. 22 von Mises stress distribution (corner push)

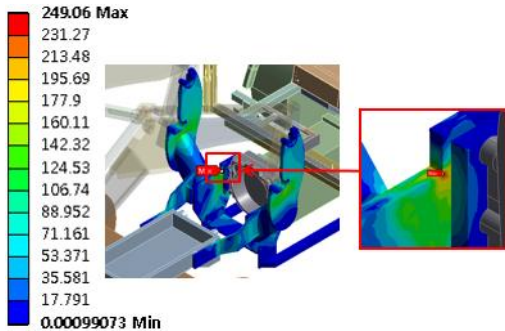


Fig. 23 von Mises stress distribution at mount (corner push)



Fig. 24 Photograph of tractor with front-end loader

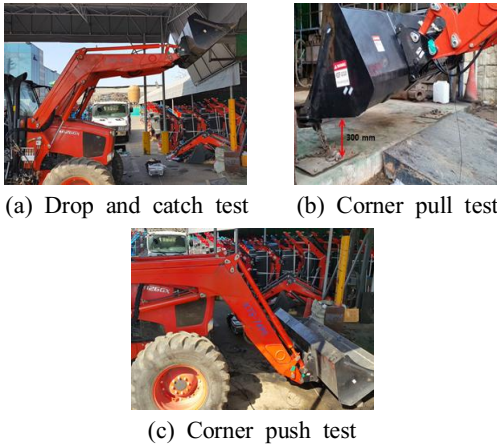


Fig. 25 Photograph of impact test

### 3.4 실제품 시험

본 연구에서 도출된 마운트의 설계개선안을 반영하여 프론트 로더 시작품이 제작되었으며, 트랙터에 시작품을 장착하여 충격시험을 실시하였다.

Fig. 24는 프론트 로더 시작품이 장착된 90 kW급 트랙터의 실제품 사진을 나타낸다. Fig. 25(a)~(c)는

각각 낙하정지시험, 코너당김시험, 코너충돌시험을 실시하는 사진을 나타낸다. 3 가지의 충격시험을 수행한 후에, 마운트를 포함하여 프론트 로더의 각 부품을 검사한 결과 영구변형이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

결론적으로 본 연구를 통하여 마운트의 초기설계안에서 나타났던 응력집중으로 인한 항복이 제거된 것을 충격시험을 통하여 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 프론트 로더의 신모델 개발 단계에서 도출된 설계개선안에 대하여 충격시험 조건에 대한 유한요소해석을 수행하여 안전성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 초기설계안 해석결과에서 나타난 마운트의 국부적 응력집중을 저감하기 위한 설계개선안을 도출하였다. 초기설계안에서는 마운트의 수직판재와 후방프레임에 체결되는 수직판재를 연결하는 부재가 사각관이 L자 형태로 꺾인 형상이었으나, 설계개선안에서는 직선 형상의 경사진 원형관으로 변경하였다.
2. 설계개선안에 대하여 낙하정지시험, 코너당김시험, 코너충돌시험의 세 가지 충격시험 조건에 대하여 강제동해석, 과도구조해석, 정적구조해석 등을 수행하여 충격에 대한 안전성을 검증하였다.
3. 설계개선안의 해석결과에서는 초기설계안에서 나타났던 마운트 부의 국부적 응력집중이 대폭적으로 저감되었다.
4. 설계개선안의 해석결과에서 최대응력이 발생한 위치는 낙하정지시험에서는 포스트 핀, 코너당김시험에서는 버킷, 코너충돌시험에서는 붐 실린더이며 모두 항복강도보다 작은 것을 확인하였다.
5. 도출된 마운트의 설계개선안을 반영하여 제작된 프론트 로더 시작품을 트랙터에 장착하여 충격시험을 실시하였다. 시작품의 충격시험결과에서 초기설계안의 해석결과에서 나타났던 항복에 의한 영구변형이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.
6. 본 연구에서 제시한 마운트의 설계개선안을 참

고하면, 향후 신모델 프론트 로더 개발 시에 충격에 대한 안전성을 강화하는데 크게 도움이 될 것으로 기대된다.

## REFERENCES

1. Cho, B. J., Ahn, S. W., Lee, C. J., Yoon, Y. H., Lee, S. S. and Kim, H. J., "Improved Design of Hydraulic Circuit of Front-end Loader for Bump Shock Reduction of an Agricultural Tractor," *Journal of Drive and Control*, Vol. 13, No. 2, pp. 10-18, 2016.
2. Lim, G. S. and Lee, B. Y., "Study on the Impact Analysis of Front Loader for Tractor," *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 8, pp. 5051-5059, 2015.
3. Ahn, S. W., Kim, H. J., Lee, S. S. and Choi, D. S., "Study on Driving Shock Reduction of a Front End Loader by Accumulator," *Proc. of Spring Conference of Korean Society for Agricultural Machinery*, Vol. 19, No. 1, pp. 91-92, 2014.
4. Cho, H. D., "Development of Loader with Four Wheel Driving and Four-Type Wheel Steering System," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 3, No. 3, pp. 71-78, 2004.
5. Go, K. E., Kim, H. W., Bae, J. G., and Yoo, W. S., "Dynamic Analysis of an Wheel Loader Manipulator by Experimental Data," *Proc. of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp. 881-886, 2004.
6. Chung, W. J., Oh, J. S., Park, Y., Kim, D. C., and Park, Y. J., "Optimization of the Suspension Design to Reduce the Ride Vibration of 90kW-Class Tractor Cabin," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 91-98, 2017.
7. Park, J. Y., Yoo, W. S., Kim, H. W., Hong, J. M. and Ko, K. E., "Three Dimensional Modeling and Simulation of a Wheel Loader," *Proc. of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp. 870-874, 2004.
8. Han, Y. H., "Development of the Wheel Loader Front Linkage Retaining High Breakout Force and Small Angle Change of an Attachment," A Thesis for MS, Seoul National University, Republic of Korea, 2012.
9. Cho, J. U., Min, B. A. and Han, M. S., "Basic Study on Impact Analysis of Automobiles," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 64-70, 2009.
10. Kwon, G. B. and Shin, D. Y., "Optimum Design of Mini Loader Using the Design of Experiment", *Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 35, No. 6, pp. 693-699, 2011.
11. Park, Y. J., Shim, S. B. and Nam, J. S., "Experimental Study on Driving Shock Reduction of a Front End Loader by Accumulator," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 41, No. 3, pp. 153-160, 2016.
12. ANSYS, *ANSYS Workbench User's Manual*, Revision 11.0, ANSYS Inc. 2007.
13. Rokey, K. C., Evans, H. R., Griffiths, D. W. and Nethercot, D. A., *The Finite Element Method*, Crosby Lockwood Staples, pp. 216-220, 1975.