

Development of a Real-Time Deformation Measurement System for Falling Object Protective Structures on Agricultural Tractors Using Laser Sensors

Seung-Yong Seo*, Ki-Dong Park**, Ryu-Gap Lim***

*Master's course, Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

**Ph.D. course, Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

***Professor, Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

[Abstract]

This study developed a real-time deformation measurement system using a triangulation-based laser displacement sensor to evaluate the structural safety of Falling Object Protective Structures (FOPS) on agricultural tractors. The system was applied during drop impact tests compliant with OECD Code 10, where a 45 kg steel sphere was dropped from 3.06 m, generating 1365.8 J of impact energy. Two FOPS configurations were tested: Case 1 with a steel roof and Case 2 with a frame-only structure. The sensor system successfully captured maximum elastic deflections of 45.4 mm at 0.06 s (Case 1) and 132.3 mm at 0.14 s (Case 2), both within the safety clearance zone. Measurement reliability was validated using gage blocks, yielding RMSE < 0.53 mm and $R^2 > 0.99$. These results confirm the system's capability for accurate, high-speed deformation monitoring under dynamic loading, offering a robust tool for future FOPS certification and analysis.

▶ **Key words:** Agricultural tractor, FOPS, Laser sensor, Deflection, Impact test, Real-time response

[요 약]

본 연구는 농업용 트랙터 낙하물보호구조물(FOPS)의 구조적 안전성 평가를 위해 삼각측량 기반 레이저 변위 센서를 활용한 실시간 변형량 측정 시스템을 개발하였다. 시스템은 OECD Code 10 기준 낙하충격시험에 적용되었으며, 45 kg 강구를 3.06 m 높이에서 낙하시켜 1365.8 J의 충격에너지를 부여하였다. 강철 지붕 구조(Case 1)와 프레임 구조(Case 2)를 대상으로 각각 최대 45.4 mm와 132.3 mm의 변형이 측정되었으며, 모두 안전 여유 공간 내에 위치하였다. 또한 게이지 블록 검증 결과 RMSE 0.53 mm 이하, R^2 0.99 이상으로 높은 정확도를 확인하였다. 본 시스템은 동적 하중 조건에서의 고속·정밀 변형 측정에 유효한 것으로 판단된다.

▶ **주제어:** 농업용 트랙터, 낙하보호구조물, 레이저 센서, 변형, 충격 실험, 실시간 반응

• First Author: Seung-Yong Seo, Corresponding Author: Ryu-Gap Lim

*Seung-Yong Seo (ajsrpdla123@naver.com), Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University

**Ki-Dong Park (pkd2566@scnu.ac.kr), Dept. of Smart Agricultural Engineering, Suncheon National University

***Ryu-Gap Lim (limrg11@scnu.ac.kr), Dept. of Convergence Biosystems Engineering, Suncheon National University

• Received: 2026. 04. 15, Revised: 2026. 06. 15, Accepted: 2026. 06. 24.

I. Introduction

1.1 Background

농업용 트랙터 및 로더와 같은 승용형 농업기계는 작업자가 한정된 공간에서 좌석에 앉아 작업을 수행하는 구조적 특성을 가진다. 장비 전복이나 낙하물 충돌 시 신속한 회피나 보호가 어렵기 때문에 낙하물이나 전복 사고 시 상해 또는 사망의 위험에 직접적으로 노출된다[1][2]. 이러한 사고 위험을 최소화하기 위해, 운전자의 생존 공간을 확보하고 외부 충격을 흡수할 수 있는 낙하보호구조물(FOPS: Falling Object Protective Structures)과 전복보호구조물(ROPS: Roll-Over Protective Structures)은 농업기계의 필수 안전장치로 규정하고 있다.[3]

농촌진흥청 농기계 사고 조사(2023)[4]에 따르면, 농업기계 사고의 약 78%가 전도, 추락, 타격에 발생하며, 이 중 트랙터와 같은 대형 농기계가 높은 비율을 차지한다. 이에 따라 국내외적으로 농업기계의 보호구조물에 대한 안전 기준 및 성능 시험 요구가 강화되고 있으며, 특히 OECD, ISO, SAE 등 국제 표준화 기구에서는 다양한 형태의 보호구조물 시험 코드를 운영하고 있다[5][6][7].

이 중 OECD Code 10은 낙하 충격 시 구조물의 변형량을 엄격하게 관리하도록 규정하고 있는 대표적인 국제 시험 표준으로, 낙하물의 형상, 질량, 낙하 높이, 낙하 위치, 충격에너지 수준, 그리고 충격 후 구조물의 변형 정도에 따른 인증 기준을 상세히 제시하고 있다. 본 표준에 따르면 FOPS는 낙하물 충격 시 운전자의 생존 공간인 안전 영역(Clearance Zone)을 확보해야 하며, 충격 후 구조물이 안전 영역을 침범하지 않아야 하고, 낙하물과의 접촉 시 발생하는 구조적 변형은 허용 기준 내에 있어야 한다.

1.2 Limitations of Existing Measurement

Methods and Related Works

현재 국내에서는 FOPS 시험 시 주로 육안이나 Fig. 1과 같은 기계적 장치를 이용한 변형량 측정 방법을 사용하고 있으며, 이는 탄성 구간에서의 순간적인 변형을 정밀하게 측정하기 어렵다는 한계를 지닌다. 특히, 찰나의 순간에 발생하는 최대 변형량을 정량적으로 취득하지 못해 시험 결과의 정확도와 신뢰성에 한계가 있다[8].

FOPS의 구조적 안전성을 정확히 평가하기 위해서는 낙하 충격 직후 수십에서 수백 밀리초(ms) 구간에서 발생하는 순간 최대 탄성변형의 정량적 측정이 필수적이다. 탄성변형은 충격 직후 일시적으로 안전 영역을 침범할 가능성이 있으며, 이는 운전자의 실제 안전성에 직접적인 영향을

미치는 요인이다. 그러나 기존의 정적 측정 방식은 이러한 동적 탄성변형 영역을 원리적으로 측정할 수 없어, 시험 결과의 신뢰성 확보에 본질적 한계를 가진다.

농업용 트랙터 보호구조물에 대한 기존 연구는 주로 유한요소해석 기반의 강도 평가와 시뮬레이션 방법론 개발에 집중되어 왔으며, 국외에서는 LS-DYNA 등을 활용한 OECD Code 4, Code 10의 가상 시험 절차가 제안된 바 있다[9]. 또한 레이저 변위 센서를 활용한 변형 계측 연구는 정적 또는 저속 동적 환경에서 100 μm 수준의 정밀도가 확보된 바 있으며, 구조물의 진동 변위 모니터링 등에 적용되어 왔다[10][11][12]. 그러나 OECD Code 10에 부합하는 FOPS 시험에서 충격 직후 발생하는 순간 최대 탄성변형을 다채널로 실시간 계측한 사례는 매우 제한적이며, 국내 시험 현장에서는 여전히 시험 후 영구변형 중심의 정적 계측 방식이 주로 활용되고 있다.



Fig. 1. FOPS deflection measurement by using a link device

1.3 Research Objectives and Contributions

본 연구는 기존의 접촉식 또는 육안 기반 측정 방식의 한계점을 극복하고, 국제 기준에 부합하는 계측 정확도를 확보하기 위해 레이저 센서를 이용한 비접촉식 변형량 측정시스템을 개발하고자 한다. 또한, OECD Code 10 규격에 따라 실제 낙하 시험에 적용하여 그 유효성과 신뢰성을 검증하는 데 목적이 있다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다.

- OECD Code 10 시험 환경에서 적용 가능한 비접촉 실시간 변형량 측정 시스템을 제안한다. 기존의 육안 및 기계식 측정 방식이 다루지 못했던 충격 직후 순간 탄성변형 영역을 다채널 동기 계측을 통해 정량적으로 포착할 수 있는 계측 방법론을 제시한다.
- 상부 구조 형태가 상이한 FOPS의 동적 변형 거동을 시간-변형 곡선 기반으로 비교·분석하는 평가 절차를

제시한다. 이를 통해 단순 영구변형 측정에 의존하던 기존 평가 방식의 한계를 보완하고, 구조 설계 단계에서 활용 가능한 동적 응답 데이터의 확보 가능성을 제시한다.

- 정적 정확도 검증과 동적 적용성 검증을 병행한 계측 시스템 검증 절차를 제시한다. 본 절차는 FOPS 인증 시험뿐만 아니라 ROPS 등 농업기계 안전구조물 시험 전반으로 확장 적용 가능한 계측 신뢰성 확보 방법으로 활용될 수 있다.

II. Materials and System Configuration

2.1 Theoretical Background

낙하물의 충격 하중은 중력에 의한 낙하 속력과 충돌 시간에 따라 결정된다. 물체가 높이 h 에서 낙하할 때 충격 속력은 식 (1)로 나타낼 수 있고, 충격량 I 는 운동량 변화량에 해당하며, 식 (2)와 같다.

$$v_{fall} = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$I = \Delta p = m\Delta v \quad (2)$$

충격하중 F 은 접촉시간 Δt 에 따라 아래 식 (3)과 같이 표현되고, 낙하물의 충격 시 접촉시간이 짧을수록 순간적인 충격력이 커지므로, 보호구조물의 순간 변형량이 중요하다.

$$F = \frac{I}{\Delta t} = \frac{mv}{\Delta t} \quad (3)$$

레이저 변위 센서는 구조물 표면과의 거리를 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 센서로, 변형량 계측의 정밀도와 반응속도 측면에서 매우 유리하다[9]. 대표적인 측정 원리는 삼각측정(Triangulation) 방식과 시간차 측정(TOF: Time of Flight) 방식이 있으며, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 삼각측정 방식의 센서를 활용하였다[10]. 삼각측정 방식은 일정 각도로 조사된 레이저광이 대상 표면에서 반사되어 수광소자에 도달하는 위치를 기반으로 거리를 산출한다. 삼각 측정 방식의 원리는 아래 식 (4)와 같다.

$$x = \frac{d \tan(\alpha + \alpha_x)}{\cot \gamma + \tan(\alpha + \alpha_x)} \quad z = \frac{d}{\cot \gamma + \tan(\alpha + \alpha_x)}$$

$$\alpha_x = \tan^{-1} \left(\frac{w_x}{l} \right) \quad (4)$$

여기서 x 는 측정 대상물 표면상의 광 조사 위치(수평 성분), z 는 측정 대상물까지의 수직 거리, d 는 발광부(LD: Laser Diode)와 수광부(PD: Photo Diode) 사이의 베이스 거리, α 는 레이저의 투광 기준 각도, α_x 는 반사광의 입사 각도 편차, γ 는 수광부 광학계의 기울기 각도, w_x 는 수광 소자 상에서 측정된 반사광의 수광 위치, l 은 수광 렌즈와 수광소자 사이의 거리를 의미한다.

이 방식은 고속 응답성과 높은 해상도를 가지며, 수 mm 이내의 급격한 거리 변화도 실시간으로 측정할 수 있어 찰나의 탄성변형을 계측하는 데 적합하다. 기존 연구에서도 광 삼각법 기반 센서를 활용하여 100 μm 이하의 정밀도로 다양한 반사 물질의 거리 측정 실험을 수행하였으며, 레이저의 설치 각도, 표면 반사율 등에 따른 민감도 분석을 통해 계측 신뢰성을 확보한 바 있다[11].

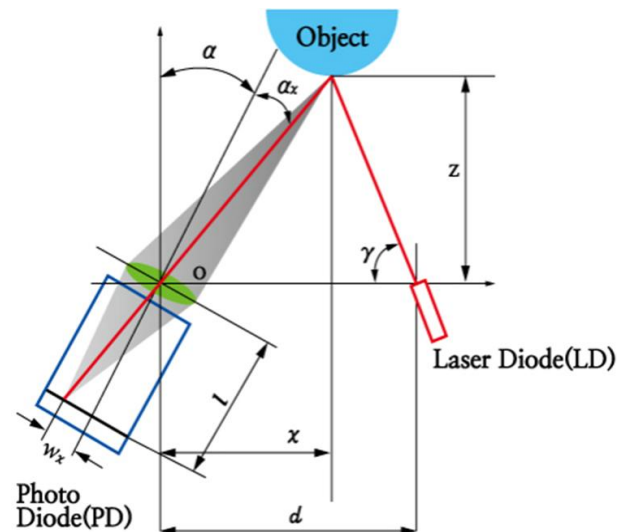


Fig. 2. Principle of triangular measurement

2.2 Configuration and Validation of the Deformation Measurement System

본 연구는 FOPS 시험 중 발생하는 순간의 탄성변형을 정확하게 계측하기 위해, 레이저 센서를 활용한 변형량 측정시스템을 구성하였다. 레이저 센서는 외부 환경에 영향을 받지 않고 일정한 거리를 비접촉 방식으로 측정할 수 있으며, 반응성이 뛰어난 삼각측정(Triangulation) 방식을 적용한 Fig. 3와 같은 DT20/HI (SICK, Waldkirch, Germany) 모델을 활용했으며[12], 레이저 센서의 측정범위는 0~1,000 mm, 분해능 0.1 mm, 응답속도 2.510 ms,

직선성 ± 0.5 mm이다. 레이저 센서의 주요 사양은 Table 1과 같다.

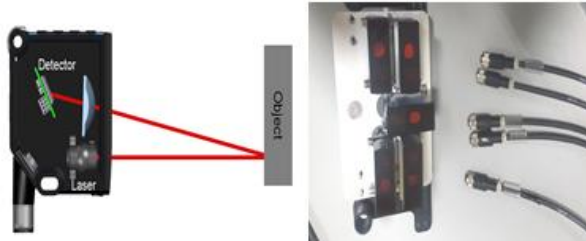


Fig. 3. Laser sensor using this study

Table 1. Specification of laser sensor

Item	Specification
Type	Triangulation
Measuring ranges	0 ~ 1000 mm
Resolution	0.1 mm
Supply voltage	10 ~ 30V/DC
Output	Analogue
Response time	2.5 ~ 10 ms
Linearity	± 0.5 mm
Light source	Red laser
Laser class	2(EN 60825-1)
Light spot size	3mm×6mm

또한 센서 설치 시 표면 반사 특성에 의한 측정 오차를 최소화하기 위해, 레이저 광이 조사되는 FOPS 내측 표면을 평탄하고 광 반사가 균일한 영역으로 선정하였으며, 센서의 광축은 측정 표면에 수직($\pm 2^\circ$ 이내)으로 정렬하였다.

변형량 측정시스템의 주요 구성품인 레이저 센서의 정확도 검증을 위해 Fig. 4와 같은 공인 교정기관의 표준 블록 게이지(516 Series, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 비교하였다. 레이저 센서는 삼각대를 이용하여 지면에서 700 mm 높이에 설치하였으며, 25 mm 단위로 총 20단계, 최대 500 mm까지 표준 블록 게이지를 이용하여 거리에 대한 데이터를 측정하였다. 수집된 아날로그 신호는 Fig. 5와 같은 DAQ 장치 SIRIUS (DEWETRON, Graz, Austria)를 통해 디지털 신호로 변환하였다. 재현성을 판단하기 위해 국가표준교정기술원의 동일한 블록게이지를 활용하여 각 센서들의 평균과 표준편차를 산출하고 변동 계수(coefficient of variation)값을 계산하였다.

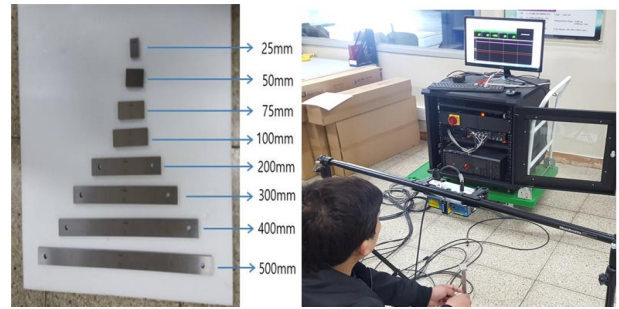


Fig. 4. Standard block gauge for laser sensor validation



Fig. 5. Data Acquisition device

수집된 거리 데이터에 대한 저장과 분석 및 시각화를 위한 소프트웨어는 DEWSoft (DEWETRON, Graz, Austria)를 활용하여 Fig. 6과 같이 실시간 저장 및 시각화가 가능하도록 구성하였다. 프로그램은 최대 20,000 data/s의 속도로 수집 및 처리하였으며, 전체 실험에 대한 사이클을 그래프 형식과 정량적 수치로 나타낼 수 있도록 구성하였다. 레이저 센서 데이터는 아날로그 신호로 수집되기 때문에 낮은 입력 대역폭으로 고정밀 신호 측정이 가능한 Delta-sigma 방식의 AD 컨버터를 활용하였다.



Fig. 6. Deformation measurement program

2.3 Agricultural Tractor and Falling Object Protective Structure (FOPS)

변형량 측정시스템의 유효성을 검증하기 위해 낙하시험에 사용된 농업용트랙터는 Fig. 7과 같은 LS Mtron사의 XR4155, XU6168 모델로 엔진출력은 각각 40 kW, 50 kW이며, 상부 보호구조물의 형태가 다른 두 가지 모델을 활용하였다.



Fig. 7. Agricultural tractor to which the FOPS fitted

두 모델 모두 4개의 프레임을 기반으로 전·후방, 상부 프레임 및 지붕으로 구성되어 있으며, 지붕과 프레임 사이에는 전선, 에어컨 모듈, 내장재가 설치된 상태로 실험이 진행되었다. 본 연구에서 개발한 센서의 위치는 Fig. 8과 같이 낙하물이 충돌하는 지점의 수직투영면 구조물 내부에 5개를 분산 배치하였다. 이는 보호구조물에서 가장 큰 변형이 발생하는 영역이 낙하물과의 직접 접촉면 하부이며, 단일 지점 측정만으로는 해당 영역 내 변형 분포와 최대 변형 발생 위치를 정확히 포착할 수 없다는 판단에 따른 것이다. 채널 수를 5개로 결정한 것은 DAQ 장비의 동기 채널 자원과 낙하물 투영면 내부의 공간 해상도, 그리고 채널 간 데이터 일관성 확보를 위한 최소 표본 수를 종합적으로 고려한 결과이며, 트랙터 상부 프레임 및 지붕의 제원은 Table 2와 같다.

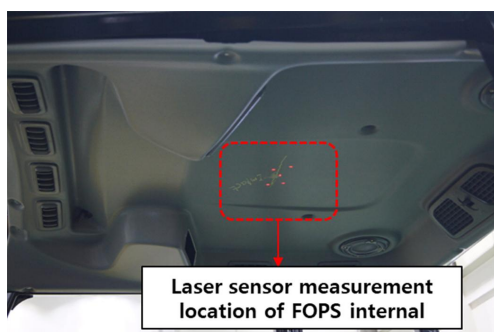


Fig. 8. Laser sensor measurement locations according to OECD Code 10

Table 2. Specifications of the tractor FOPS used in the study

Model	Item	Factor	Specification (mm)
XR4155	Frame	Steel tube	Rimmed, ISO 630 E275 A, 65×65×2.3, 50×40×2.3, 40×20×2.3
		Steel plate	Rimmed, ISO 630 E275 A, 2.3, 3.2, 9.0
	Roof	Top layer	ABS Sheet, 3.0
		Inner layer	ABS Sheet, 3.0
		Top ceiling	ABS+PP+PVC, 4.5
XU6168	Frame	Steel tube	Rimmed, ISO 630 E275 A, 75×75×3.2, 50×50×2.3, 40×20×2.3
		Steel plate	Rimmed, ISO 630 E275 A, 2.3, 3.2
	Roof	Top layer	ABS Sheet, 3.0
		Inner layer	ABS Sheet, 3.0
		Top ceiling	ABS+PP+PVC, 4.5

III. Experimental Methods

낙하 위치는 Fig. 9과 같이 지붕 재료의 두께가 균일하고 가장 취약한 부위로 판단되는 상부 중앙 1개 지점으로 설정하였다. FOPS는 상부 구조 형상에 따라 Case 1(상부 프레임과 보강 철판 구성)과 Case 2(프레임만 구성)로 구분했으며, 각각의 구조물에 동일한 조건으로 낙하 시험을 수행하였다. 레이저 센서는 시험 중 구조물과 충돌하지 않도록 보호구조물 내측 하부에 설치되었으며, 시험 도중 실시간으로 데이터를 수집하여 낙하 직후 순간적으로 발생하는 탄성변형부터 최대 변형까지 측정할 수 있도록 구성하였다. 낙하 물체와 높이는 OECD code 10에 따라 Fig. 10과 같이 요구에너지를 충족하는 질량 45 kg $\pm$ 2 kg의 강철 구형체를 3.06 m 높이에서 자유 낙하시켰으며, 충격 에너지는 에너지 보존법칙에 따라 1365.8 J의 충격이 가해지도록 설정하였다.

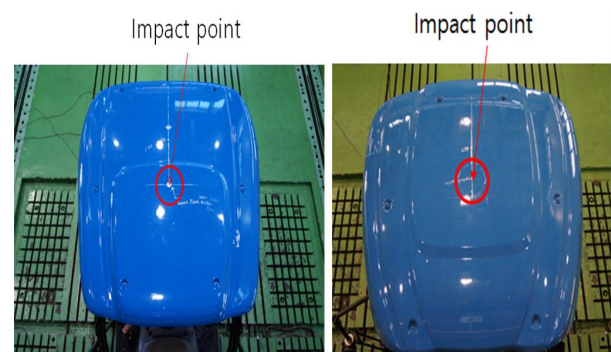


Fig. 9. Impact point of agricultural tractor FOPS test



Fig. 10. FOPS test arrangement of agricultural tractor

본 시험은 OECD Code 10에 따른 낙하 충격 시험을 수행할 수 있는 공인 시험기관에서 실시되었다. OECD Code 10은 낙하물의 질량·낙하 높이·충격에너지·안전영역 침범 여부를 인증 변수로 규정하고 있으며, 시험 환경의 온도·습도·조명 등은 인증 변수에 포함되지 않는다. 또한 본 시험은 시험체의 영구변형을 동반하는 파괴시험의 특성상 각 Case별로 단일 회 수행되었으며, 이는 OECD Code 10, ISO 3449, SAE J167 등 국제 인증 시험 표준이 공통적으로 채택하고 있는 시험 방식이다. 본 연구에서는 이러한 제약 하에서 측정 신뢰성을 보완하기 위해 단일 시험체 내 5개 채널의 공간적 다중 계측을 수행하였다.

IV. Results and Discussion

4.1 Validation Results of Laser Sensor Measurement Accuracy

변형량 측정에 사용된 레이저센서의 정확도 검증을 확인하기 위해 표준게이지 블록(Mitutoyo)을 이용한 신뢰성 검증을 수행하였다. 평평한 지면에 센서를 삼각대를 이용하여 700 mm 높이에 고정하고, 기준점 설정 후 25 mm 단위로 게이지 블록을 누적 조합하여 총 20단계, 최대 500 mm까지 측정하였다. 센서 5개에 대해 측정된 값과 블록 실측값 간의 상관성을 분석한 결과는 Table. 3과 같으며, 각 센서의 RMSE는 0.3274 mm ~ 0.5272 mm 범위로 나타났다. 결정계수(R^2)는 모두 0.99 이상으로 Fig. 11과 같이 매우 우수한 직선 상관성을 보였다. 이를 통해 본 측정 시스템은 실증 실험에 필요한 범위 30~500 mm 내에서 신뢰성 있는 측정이 가능한 것으로 확인되었다[13].

Table 3. Real-time deformation measurements using laser sensors

Gage Block (mm)	Laser Sensor (mm)				
	1	2	3	4	5
25	24.9	24.9	24.2	24.1	25.2
50	49.5	51	49.7	49.6	50.3
75	74	75.7	73.7	74.2	75.5
100	99.2	100.2	99.5	99.8	99.8
125	124.5	125.8	123.6	124.7	125.2
150	149.2	151	148.9	149.6	150.3
175	173.5	175.8	173	175.1	175.5
200	199	199.7	198.2	200.5	200.8
225	223.5	225.2	223.5	224.8	226.1
250	248.3	250.4	248.2	249.8	250.8
275	273.5	275.6	274	274.4	276
300	298.1	299.5	298.8	299.8	300
325	323.3	325.3	323.9	324.6	324.7
350	348	350.6	348.6	349.4	350.9
375	373.5	375.3	374.3	375.2	375.7
400	398.5	399.1	399.1	400	400.4
425	423.1	425.3	424	424.9	424.8
450	448	449.9	448.9	449.6	450.2
475	473.5	474.7	474.3	474.9	475.8
500	498.5	500.2	499.6	500.1	500.8

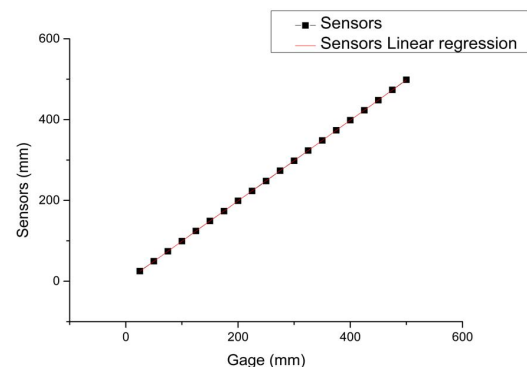


Fig. 11. Correlation curve of the laser sensors

5개 센서에 대한 평균, 표준편차, 변동계수(CV)를 산출하여 Table 4와 같이 정리하였다. 측정 구간별 통계 분석 결과, 25~75 mm 구간에서 CV가 1.23~1.96%로 상대적으로 높게 나타났으나, 100 mm 이상 구간에서 0.66% 이하로 안정화되었으며, 325~500 mm 구간에서는 0.17~0.36% 수준의 안정적인 정밀도를 보였다. 이를 통해 본 측정 시스템은 실제 낙하 시험에서 요구되는 측정 범위 (30~500 mm) 내에서 충분히 높은 재현성을 갖추고 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Statistical Analysis of Laser Sensor Measurements (5 Sensors)

Gage Block (mm)	Mean* (mm)	Std Dev ** (mm)	CV*** (%)
25	24.66	0.483	1.96
50	50.02	0.630	1.26
75	74.62	0.915	1.23
100	99.70	0.374	0.38
125	124.76	0.820	0.66
150	149.80	0.851	0.57
175	174.58	1.252	0.72
200	199.64	1.069	0.54
225	224.62	1.126	0.50
250	249.50	1.196	0.48
275	274.70	1.063	0.39
300	299.24	0.783	0.26
325	324.36	0.773	0.24
350	349.50	1.249	0.36
375	374.80	0.889	0.24
400	399.42	0.766	0.19
425	424.42	0.876	0.21
450	449.32	0.881	0.20
475	474.64	0.841	0.18
500	499.84	0.862	0.17

* Mean: Arithmetic mean of five sensor measurements

** Std Dev: Sample standard deviation of five sensor measurements (n = 5)

*** CV: Coefficient of Variation; $CV(\%) = (s/\bar{x}) \times 100$, used as an indicator of measurement repeatability

4.2 Experimental Results Using the Deformation Measurement System

4.2.1 Case 1: FOPS with Steel Roof Plate

낙하 실험은 상부 구조 형태에 따라 Case 1(상부에 철판이 있는 경우)과 Case 2(프레임만 있는 경우)로 구분하여 동일한 낙하 조건으로 수행되었다. 센서는 구조물 내부 상단 하부 지점 5개소에 설치되었으며, 낙하 직후부터 시간에 따른 거리 변화를 실시간으로 측정하였다. Case 1에서는 낙하물 충돌 직후 약 0.06초 시점에서 최대 탄성변형이 측정되었다. 수집된 데이터를 활용하여 Fig. 12과 같이 그래프로 나타내었으며 각각의 센서별 최대 탄성변형은 43.3 mm ~ 45.4 mm 범위였으며, 영구변형은 6.2 mm ~ 9.8 mm로 나타났다.

5개 센서 채널에서 측정된 최대 탄성변형의 평균은 약 44.5 mm, 표준편차는 약 0.9 mm로, 충격 중심부 인근에서 공간적으로 균질한 변형 응답이 발생하였음을 확인하였다.

탄성변형 후 낙하물이 튕기는 현상이 나타났으며, 이는 지붕 소재의 탄성 회복력에 따른 반응으로 해석되고 낙하물과의 충돌 이후의 트랙터 상부 보호구조물은 Fig. 12와 같다. 낙하 전 상부 프레임과 안전 영역 간의 초기 간격은

112 mm로, 측정된 최대 탄성변형은 안전 영역을 침범하지 않았다.

Case 1에서 관찰된 낙하물의 반동 현상은 입력된 충격 에너지의 상당 부분이 탄성 영역에 저장된 후 회복되었음을 의미한다. 상부 철판은 면 강성(plate stiffness)을 추가로 제공하여 충격 하중을 넓은 영역으로 분산시키며, 이로 인해 Fig. 12의 시간-변형 곡선은 최대 변형 이후 진동을 동반한 점진적 수렴 형태를 나타낸다.

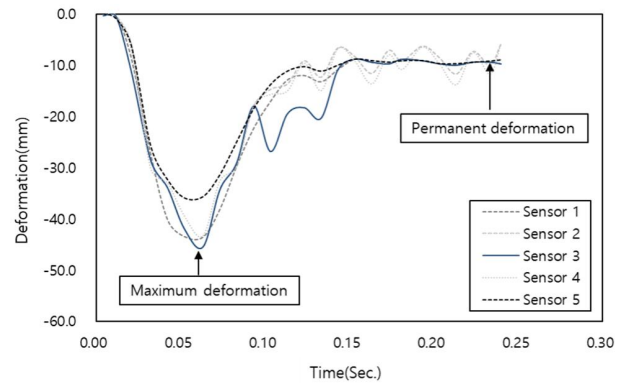


Fig. 12. Time-deflection curve(case 1)



Fig. 13. Test results of agricultural tractor FOPS (Case 1)

4.2.2 Case 2: Frame-only FOPS

Case 2의 경우 최대 탄성변형은 약 0.14초 시점에서 발생하였으며, 수집된 데이터는 Fig. 14과 같이 그래프로 나타내었다. 각각의 센서별 탄성변형 측정값은 124.6 mm ~ 132.3 mm 범위로 나타났고, 영구변형은 33.4 mm ~ 35.8 mm로 확인되었다.

5개 센서 채널에서 측정된 최대 탄성변형의 평균은 약 127.8 mm, 표준편차는 약 3.4 mm로, Case 1(표준편차 약 0.9 mm) 대비 채널 간 편차가 크게 나타났다. 이는 상부 철판의 부재로 인해 충격 에너지가 프레임을 따라 비대칭적으로 분산되어, 충격점 인근에서도 위치에 따라 변형

량 차이가 발생한 결과로 해석된다.

Fig. 15와 같이 낙하 물체의 반동 현상은 발생하지 않았다. 상부에 철판이 없는 구조로 탄성보다는 소성변형이 지배적이고, 복원력이 낮아 낙하 물체에 대한 반동이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 안전 영역 간의 초기 간격은 160 mm로 측정되었으며, 변형량은 크게 측정되었으나 안전 영역은 침범하지 않은 것으로 나타났다.

Case 2에서 반동이 관찰되지 않은 것은 입력 에너지의 대부분이 소성변형으로 소산되어 반동에 사용될 탄성 에너지가 부족했음을 시사한다. 프레임의 굽힘 강성(bending stiffness)에만 의존하는 구조 특성상 충격점 인근에서 국부적 변형이 크게 발생하며, Fig. 14의 시간-변형 곡선이 반동 없이 영구변형으로 직접 수렴하는 전형적인 소성지배 거동을 보이는 것은 이러한 에너지 소산 메커니즘의 결과이다.

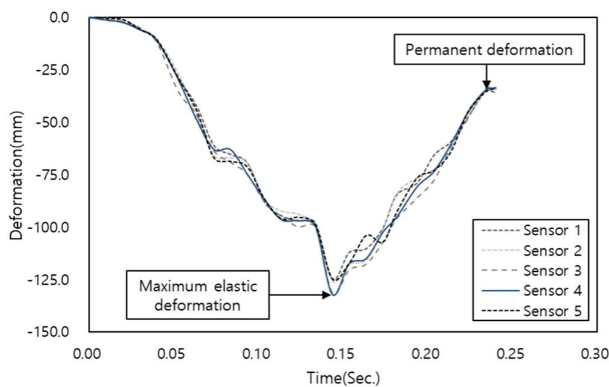


Fig. 14. Time-serial deflection curve(case 2)



Fig. 15. Test results of agricultural tractor FOPS (Case 2)

4.3 Discussion of Experimental Results

Case 1과 Case 2의 비교를 통해 트랙터 상부 구조물의 차이가 낙하 충격에 대한 구조적 응답에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 상부에 철판이 존재하는 Case 1은 비교

적 짧은 시간 내에 충격을 분산시키며, 탄성 복원력이 높은 형태를 보였다.

정량적으로는 Case 1과 Case 2의 최대 탄성변형 비율 (45.4 mm : 132.3 mm)이 두 구조의 등가 강성 차이를 직접적으로 반영한다. 동일한 충격에너지 조건에서 상부 철판의 유무가 변형 응답을 약 3배 차이로 변화시킨다는 것은, 면 강성 부재가 FOPS의 동적 충격 흡수 성능에 결정적 기여함을 정량적으로 입증한다.

반면 프레임만으로 구성된 Case 2는 구조 전체가 충격에 직접 노출되며 큰 변형과 잔류 변형을 보였다. 두 실험 모두 레이저 변위 센서를 통해 짧은 시간에 발생한 최대 변형을 실시간으로 계측하였으며, 이는 기존 접촉식 방식이나 육안 계측으로는 확보하기 어려운 데이터이다. 특히 시간-변형 곡선을 기반으로 구조물의 동적 거동을 비교 분석함으로써 시험 조건에 따른 구조 성능의 정량적 해석이 가능하였다.

한편, 파괴시험의 특성상 각 케이스 별로 단일 회 수행 되었으므로, 반복 시험 기반의 통계적 유의성 검증은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다. 단일 시험 내 5개 채널의 동시 계측을 통해 충격점 인근 변형 응답의 공간적 일관성 (Case 1 표준편차 0.9 mm, Case 2 표준편차 3.4 mm)을 확인하였으며, 이는 본 측정 시스템이 동적 충격 환경에서 안정적으로 동작함을 간접적으로 시사한다.

V. Conclusions

본 연구는 농업용트랙터의 FOPS에 낙하물 충격을 가하였을 때 발생하는 구조물의 변형을 정량적으로 측정하고, 구조적 안전성을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 시각적 또는 기계적 방식에 의존한 기존 계측 방법의 한계를 개선하기 위해 삼각측정 원리를 적용한 레이저 센서를 기반으로 찰나의 탄성변형까지 실시간으로 계측 가능한 변형량 측정시스템을 개발하였다. 시스템의 계측 신뢰성 확보를 위해 표준게이지 블록을 활용한 정확도 검증을 수행하였으며, RMSE와 결정계수(R^2)를 통해 측정값의 정확도를 검증하였다.

낙하 실험은 상부 구조 형태에 따라 상부에 철판이 있는 경우(Case 1)와 프레임만 있는 경우(Case 2)로 구분하여 동일한 조건으로 수행되었다. 레이저 센서를 통해 계측된 최대 탄성변형은 Case 1에서 0.06초 시점에 45.4 mm, Case 2에서 0.14초 시점에 132.3 mm로 나타났으며, 두 조건 모두 안전영역을 침범하지 않아 구조물의 낙하 충격 흡수 성능이 확보된 것으로 판단된다. 이와 같은 실증 데

이터를 통해 레이저 기반 계측 시스템의 동적 응답 측정 유효성이 검증되었으며, 향후 구조물 성능 평가의 기초 자료로 활용 가능성을 확인하였다. 다만 본 실증 결과는 파괴시험의 특성상 각 Case별로 단일 회 수행된 사례 데이터이며, 본 연구에서 정량적으로 입증한 측정 신뢰성은 사전 정적 검증을 통해 확보된 측정 시스템 자체의 정확도 ($RMSE < 0.53 \text{ mm}$, $R^2 > 0.99$)에 한정된다.

본 연구에서 제안한 레이저센서 기반 변형량 측정 시스템은 FOPS 구조물의 낙하 충격에 대한 실시간 계측 기술로서의 가능성을 확인하였으며, 추후 ROPS 구조물 등 다양한 인증 시험 및 낙하 시험 분야에 확장 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 5개 채널의 센서 배치는 낙하물 충격점 인근의 변형 분포를 측정하는데 효과적이었으나, 운전자 안전영역 전체에 대한 지붕 변형의 공간적 분포를 완전히 포착하기에는 채널 수의 확장이 필요하다. 본 연구에서 사용된 데이터 수집장치는 최대 8채널의 센서 데이터 취득이 가능하므로, 센서를 추가 배치한다면 보다 광범위한 영역에 대한 정량적 분석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 트랙터 운전석 내부는 대부분 유사한 구조를 가지므로, 다양한 모델에 대한 적용 가능성도 기대된다. 아울러 시험체의 영구변형을 동반하는 파괴시험 특성상, 트랙터를 포함한 고가의 시험체 1개당 1회의 데이터만 취득 가능하여 반복 비교 분석에 제약이 따르며, 이로 인해 측정값의 재현성(reproducibility)에 대한 통계적 검증은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다.

따라서, 향후 연구에서는 형태가 다른 FOPS를 활용하여 본 실험과 동일한 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고[14], 실험 데이터와 해석 결과 간의 정량적 비교를 통해 본 연구에서 개발한 시스템에 대한 예측 정확도를 검증할 계획이다. 이를 통해 실험-해석 연계 기반의 구조안전성 평가 방법 고도화 및 설계 최적화 체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by Suncheon National University Research Fund in 2024.(Grant number: 2024-0389)

REFERENCES

- [1] K. Kim, H. Kim, M. Lee, W. Jung, and D. Choi, "Incidence Rates of Agricultural Machine-Related Injuries in South Korea," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 19, No. 23, Nov. 2022. DOI: 10.3390/ijerph192315663
- [2] H. Kim, K. Lee, and K. Räsänen, "Agricultural injuries in Korea and errors in systems of safety," *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, Jul. 2016. DOI: 10.5604/12321966.1219170
- [3] M.-K. Jang, S.-J. Kim, B.-S. Shin, and J.-S. Nam, "Lateral Overturning and Backward Rollover of Agricultural Tractors: A Review," *Agriculture*, Vol. 14, No. 2, Feb. 2024. DOI: 10.3390/agriculture14020234
- [4] Rural Development Administration, National Academy of Agricultural Science, "Results Report of 2023 Sample Survey on Agricultural Work Accidents," Jeonju, Korea, Jan. 2024.
- [5] OECD, "OECD Standard Code for the Official Testing of Falling Object Protective Structures on Agricultural and Forestry Tractors (Code 10)," OECD Publishing, 2024.
- [6] ISO 3449, "Earth-moving machinery — Falling-object protective structures — Laboratory tests and performance requirements(ISO 3449)," 2005.
- [7] SAE J167, "Overhead Protection for Agricultural Tractors — Test Procedures and Performance Requirements(SAE J167)," SAE International, 2017.
- [8] D. Hailoua Blanco, C. Martin, and A. Ortalda, "Virtual ROPS and FOPS testing on agricultural tractors according to OECD Standard Code 4 and 10," *Proceedings of the 14th International LS-DYNA Users Conference*, 2016.
- [9] Y. S. Suh, "Laser Sensors for Displacement, Distance and Position," *Sensors*, Apr. 2019. DOI: 10.3390/s19081924
- [10] Soave, E., D'Elia, G., and Mucchi, E., "A laser triangulation sensor for vibrational structural analysis and diagnostics," *Measurement and Control*, Vol. 53, No. 1-2, pp. 3-12, 2020. DOI: 10.1177/0020294019877484
- [11] Iqbal, M.Z. et al., "Performance Evaluation of a Virtual Test Model of the Frame-Type ROPS for Agricultural Tractors Using FEA," *Agriculture*, Vol. 13, No. 10, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13102004
- [12] H. Oh and H. Kim, "Development of Displacement Measurement Equipment for Structures Using Laser Sensors," *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 62, pp. 823-825, 2013.
- [13] S. M. Farhan, J. Yin, Z. Chen, and M. S. Memon, "A Comprehensive Review of LiDAR Applications in Crop Management for Precision Agriculture," *Sensors*, Vol. 24, No. 16, Aug. 2024. DOI: 10.3390/s24165321
- [14] Fabbri, A. et al., "Falling-object protective structure for tractors

in service: Prototype design and validation," *Biosystems Engineering*, Vol. 181, pp. 104-115, 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.02.015

Authors



Seung-Yong Seo received the B.S. degree in Convergence Biosystems Engineering from Sunchon National University, Korea, in 2026. He is currently pursuing the M.S. degree in Convergence Biosystems Engineering at

Sunchon National University. His research interests include autonomous tractors, agricultural robots, and embedded systems.



Ki-Dong Park received the B.S. degree in Industrial Mechanical Engineering from Sunchon National University, Korea, in 2012, and the M.S. degree in Agricultural Machinery Engineering from Sunchon

National University, Korea, in 2014. He is a Ph.D. candidate in the Dept. of Smart Agricultural Engineering at Sunchon National University in Suncheon, South Korea, since 2025. He has been a researcher at the Sunchon National University Industry-University Cooperation Foundation since 2022. He is interested in autonomous tractors, digital twins, agricultural robots, and embedded systems.



Ryu-Gap Lim received the Ph.D. degrees in Agriculture machinery engineering from Chungnam National University, Korea, in 2022. He is a professor in the Dept. of Convergence Biosystems Engineering at

Sunchon National University in Suncheon, South Korea. He is interested in Autonomous tractor, digital twin, agriculture robot and artificial intelligence.