

농업용트랙터 ROPS 시험의 신뢰성 향상을 위한 측정불확도 추정 Measurement Uncertainty calculation for improving test reliability of Agricultural tractor ROPS Test

임류갑¹ · 강영선² · 김택진^{3*}

Ryu Gap Lim¹, Young Sun Kang² and Taek Jin Kim^{3*}

Received: 15 Feb. 2023, Accepted: 20 Feb. 2023

Key Words : Agricultural tractor(농업용트랙터), Measurement Uncertainty(측정불확도), Repeatability(반복성), ROPS(전도보호구조물)

Abstract: The agricultural tractor ROPS test method according to OECD code 4 is a test to assess whether the driver's safety area can be secured when a tractor overturns, and reliability should be ensured. In this study, a model formula and procedure for calculating measurement uncertainty expressing reliability in the field of agricultural machinery testing were established according to the ISO/IEC Guide 98-3:2008. The characteristics of the ROPS test device were assessed and repeated tests were performed, and the were used as factors to calculate the measurement uncertainty. As a result of repeated tests, the accuracy was higher than 1.9 % in all load directions; thus, they were, applied to calculate the type A standard uncertainty. The final expanded uncertainty was calculated within the range of less than ± 7.76 kN of force and ± 6.96 mm of deformation in all load directions.

기호 설명

$u(x_i)$: standard uncertainty
 $u(F_{cal})$: uncertainty of load cell calibration
 $u(F_{res})$: uncertainty of load cell resolution
 $u(D_{cal})$: uncertainty of LVDT calibration
 $u(D_{res})$: uncertainty of LVDT resolution
 u_{repeat} : uncertainty of repeat test
 $u_c(y)$: combined standard uncertain
 v_i : degree of freedom
 v_{eff} : effective degree of freedom
 k : coverage factor

1. 서론

측정 결과의 신뢰성은 일반적으로 오차, 정확도, 정밀도 등 다양한 용어들이 사용되어왔다.¹⁾ 다양한 용어는 신뢰성 확인의 문제가 있을 뿐만 아니라 특히, 정확도와 정밀도의 경우 정성적인 부분이 많이 포함되어 있어 이를 보다 수치화하고 정량화한 평가 방법이 필요하다. 따라서, 국제표준화기구인 ISO에서 측정불확도 표현 지침서의 사용을 권장하였다. 이후, 측정불확도를 추정하고 표현하는 방법이 다양한 분야로 확산되고 있다.²⁻³⁾ 측정불확도는 측정 기술의 적합성, 측정 장비의 수준, 환경조건 및 시험자의 능력 등 측정에서 상이하게 발생하는 모든 오차 요인들을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 국내에서도 최근 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)의 국제공인시험 및 교정기관 인정 제도와 함께 확산되고 있는 추세이다.⁴⁾

한편, 농업용 트랙터는 주행하거나 경운, 정지 및 운반 등 다양한 농작업을 수행하며,⁵⁻⁶⁾ 대표적인 농업 기계인 트랙터는⁷⁾ 운전이나 조작 미숙으로 인한 사고 사례가 꾸준히 발생하고 있다.⁸⁾ 전도 사고의 안전

* Corresponding author: taek.kim@tym.world

¹ Department of Smart Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan 54667, Korea

² Korea Agriculture Mechanization Policy Institute, Chungnam, Daejeon 34134, Korea

³ Department of Drive System Team, TYM R&D Center, Iksan 54576, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성을 위해 보호구조물은 필수적으로 설치한다. 전도 보호구조물(roll over protective structure, ROPS) 시험은 농업용 트랙터가 전도되는 경우 운전자의 안전영역을 확보해 주는지 트랙터의 재원을 기준으로 정해진 부하를 가하는 시험이다. 재료의 압착, 변형을 동반하기 때문에 시험의 재현 및 결과의 신뢰도 확보가 어렵다. Park 등(2022)은 버스 전복 안전성 시험을 통과할 수 있는지에 대해 고찰하고 전복 안전성 시험 절차에 대한 고찰이 필요함을 연구하였다.⁹⁾ 한편, 시험결과와 신뢰도를 나타내기 위해서는 시험 값의 정확도, 반복성 또는 재현성이 대표적인 척도로 사용되며,¹⁰⁾ 결과에 영향을 미치는 인자를 파악하고 합리적인 수학적 모델식을 통해 측정불확도로 신뢰성을 나타낼 수 있다.¹¹⁾ Jeong 등(2010)은 자동차용 강판 동적물성 측정에서의 불확도 수학적 모델식을 수립하였으며 변형을 속도별 고속인장시험에 대하여 불확도 추정 절차를 제시 및 평가하였다.¹²⁾ Huh 등(2010)은 장치, 시설 구조물에 사용하는 스테인리스 시편을 ASTM A240/480에 따라 제작하여 인장 물성 시험을 수행하고 측정에 영향을 주는 인자에 대한 분석을 통하여 탄성계수, 항복강도 그리고 인장강도 측정 불확도 모델을 확립하였다.¹³⁾ Kim과 Lee(2013)는 자체 개발한 질량/중심위치 측정 장비와 관성모멘트 측정장비를 이용하여 시험체의 피치 관성모멘트와 롤 관성모멘트 각각을 측정하였고, 질량, 스프링 상수, 진동 주파수, 길이 측정을 불확도 요인들로 식별하여 측정불확도 추정 방법을 연구하였다.¹⁴⁾ 그러나 기존의 측정불확도 추정 방법에 대한 연구는 기존에 알고 있는 정보만 활용하여 제한적으로 이루어지고¹⁵⁻¹⁶⁾ 농업기계 시험 분야에 대한 측정불확도 연구는 찾아보기가 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 농업용트랙터 전도사고로부터 운전자를 보호하는 ROPS에 대해 반복 시험을 수행하고 확보된 데이터를 정밀도 평가기반으로 검증 후 불확도를 추정하였다. 또한, 시험장치를 구성하는 각각의 유닛 특성을 이용하여 불확도를 산출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 ROPS 보호구조물 시험과 불확도 요인

ROPS 시험에 대한 측정불확도를 산출하기 위해 55 kW급 농업용트랙터에 부착되는 동일한 ROPS 3개를 준비하였으며, 본 연구에서 활용한 트랙터 및 ROPS의 재원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of tractor with ROPS used in this study

Item	Specification
Tractor mass (kg)	1,755
Tractor engine power (kW)	55
ROPS Type	2 post frame
Frame external width (mm)	727
Frame interior width (mm)	627
Main frame (Length×Width×Thickness)	75×50×5.0
Main frame material	SPSR

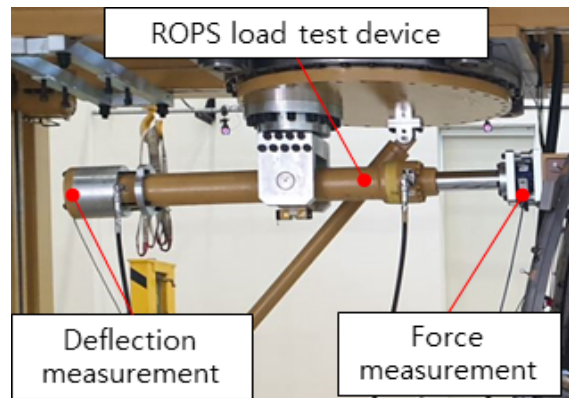


Fig. 1 A photo of roll over protective structure (ROPS) loading test device

ROPS 시험은 고정된 구조물에 부하를 가하는 시험으로 Fig. 1과 같은 특수한 형태의 부하 시험장치가 필요하며, OECD code 4 규정에서 시험장치에 대한 가이드라인을 제시하고 있다.¹⁷⁾

부하 시험장치는 Fig. 2와 같이 유압 실린더와 변형을 측정할 수 있는 LVDT (IK4, GeFRAN corp., Provaglio d'Iseo, Italy) 및 10톤 용량의 로드셀(LS-10B, CAS corp., Seongnam, Republic of Korea)로 구성되어 있다.

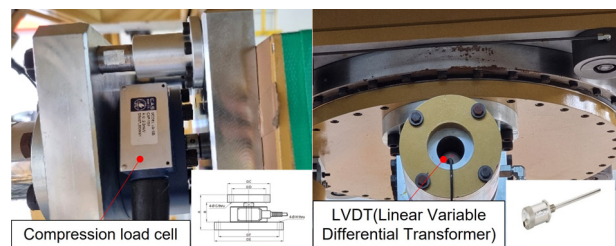


Fig. 2 A photo of data acquisition sensor for roll over protective structure (ROPS) loading test device

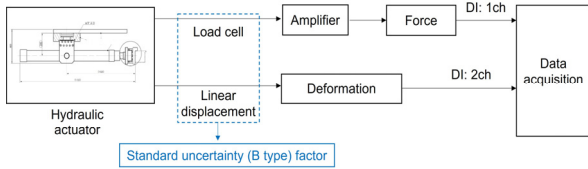


Fig. 3 A photo of data acquisition sensor for roll over protective structure (ROPS) loading test

로드셀과 변위계로부터 측정된 힘과 변형 값 데이터를 이용해 아래의 식 (1)과 같이 에너지가 계산된다. 시험데이터를 취득하는 로드셀과 같은 측정기의 교정성적서는 외부에서의 정보에 의한 불확도로 정규분포를 나타낸다고 가정할 수 있으며, B형 표준불확도를 적용할 수 있다. Fig. 3은 ROPS 시험에서 데이터를 취득하기 위한 시스템 구성도를 나타내며, B형 표준불확도를 적용할 수 있는 요인으로 힘을 측정하는 로드셀과 변형을 측정하는 변위계로 설정하였다.

$$E(J) = \frac{\Delta_1 F_1}{2} + (\Delta_2 - \Delta_1) \frac{F_1 + F_2}{2} + \dots + (\Delta_N - \Delta_{N-1}) \frac{F_{N-1} + F_N}{2} \quad (1)$$

- where, F_1 = First measured value of force (N)
- F_2 = Second measured value of force (N)
- Δ_1 = First measured value of deformation (mm)
- Δ_2 = Second measured value of deformation(mm)

ROPS 시험은 재료에 대해 부하를 가하는 역학시험으로 농업용트랙터를 반복적으로 준비하는데 비용이 많이 소요되기 때문에 ROPS를 장착할 수 있는 간단한 구조물을 활용하였다. ROPS가 장착된 구조물을 시험실 바닥에 고정하여 부하시험 중 움직임이 없도록 Fig. 4와 같이 설치하였다.

동일한 보호구조물 3개를 준비하여 OECD code 4 시험방법에 따라 반복시험을 수행하고 측정된 힘, 변형 값의 평균과 표준편차를 계산하였다. A형 표준불확도로 활용하기 위해 성능시험 자체에 대한 신뢰

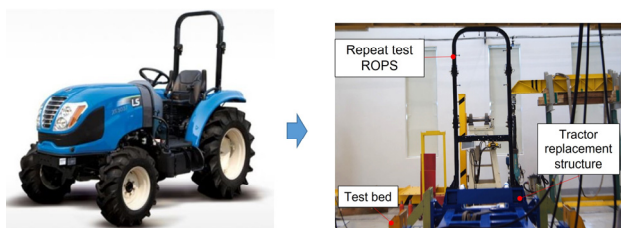


Fig. 4 A photo of tractor replacement structure and test bed

도는 일반적으로 정밀성을 표현할 때 사용하는 척도인 상대표준편차를 활용하였다.¹⁸⁾

2.2 측정불확도 추정 절차

측정불확도를 추정하기 위한 절차는 Fig. 5와 같으며, 각각의 불확도는 측정불확도 표현지침서에 따라 추정하였다. 측정불확도 산출을 위해서는 먼저 측정에 대한 수학적 모델식을 정립하여야 한다. 본 연구에서는 수학적 모델식을 정립하기 위해 OECD code 4에서 규정하는 에너지 계산식을 활용하였다. 다음으로 측정에서 불확실성을 가질 수 있는 요인을 분석하고 표준불확도(standard uncertainty)를 산출하는데 크게 두 형태로 나눌 수 있다. 한 형태는 반복적인 측정값을 통계적 분포로부터 값이 결정되는 것으로서 표준편차로 나타내는 방법인 A형 불확도이다. 다른 형태인 B형 불확도는 기존의 정보, 규격, 교정성적서를 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구한다. B형 불확도 성분에 대한 평가의 신뢰도는 사용될 수 있는 정보의 질에 좌우되기 때문에 측정 대상에 영향을 주는 모든 변수를 최대한 반영시켜 가능한 많은 측정 자료에 의해 산출할 수 있도록 해야 한다. A형, B형 불확도 모두 확률분포에 근거하여 구해지며, 어떤 방법으로 구하든지 불확도 성분은 분산이나 표준편차에 의하여 정량화된다. 다음으로 합성표준불확도(combined standard uncertainty)는 측정 결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정 결과의 표준불확도이다. 이는 측정 결과에 대한 추정 표준편차로서, A형, B형 불확도를 통상적인 표준편차 결합방식을 사용하여 구한다. 확장불확도(expanded uncertainty)는 측정 결과에 대한 불확도를 정량적으로 표현하는 파라미터로서 측정량의 합리적인 추정 값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정 결과 주위의 어떤 구간을 정의하는 양이며, 최종적으로 합성표준불확도에 포함인자(coverage factor) k를 곱하여 얻는다. 측정불확도 표현지침서에서 포함인자 k는 합성표준불확도에 곱하여 확장불확도를 얻기 위해 사용되는 수치적인 인자로 정의하고 있다.

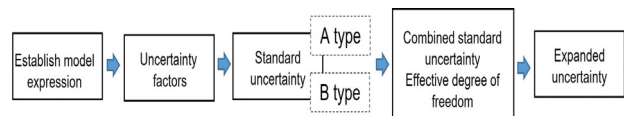


Fig. 5 Procedure of measurement uncertainty calculation

3. 결과 및 고찰

3.1 ROPS 반복시험 결과

ROPS 반복시험에서 로드셀과 LVDT로부터 측정된 힘, 최대변형에 대한 평균과 표준편차를 Table 2에 나타내었다. 측정된 힘에 대한 상대표준편차는 후방 1.9%, 측방 1.9%, 전방 1.2%, 최대변형은 1.5%, 1.5%, 1.9%로 나타났다. 반복시험에서 전체적으로 Fig. 6과 같이 1.9% 미만의 상대표준편차가 나타났으며, 시험에서 규정하는 허용오차 조건(3% 이내)을 만족하였다. 따라서, 반복시험에 대한 정밀도는 확보되었다고 판단하여 불확도 요인으로 활용하였다.

Table 2 Mean and standard deviation for ROPS repeat test result

Load direction	Force (kN)	Maximum deformation (mm)
Rear	13.770 ± 0.226*	312.0 ± 4.4*
Side	20.871 ± 0.388	231.2 ± 3.5
Front	7.350 ± 0.085	178.7 ± 3.3

*Mean ± Standard deviation

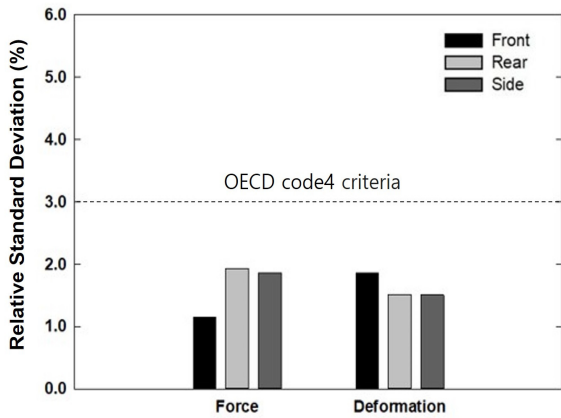


Fig. 6 Relative standard deviation of force and deformation for ROPS repeat test

3.2 ROPS 시험의 측정불확도 추정결과

3.2.1 모델식 정립

측정불확도에 대한 모델식은 식(2)와 같이 시험에서 측정을 통해 나타날 수 있는 변형, 힘 값과 반복시험을 통해 확보한 요인을 합성하는 것으로 정립하였다. 변형 값은 식(3)과 같이 측정에서 나타날 수 있는 변형과 반복시험에서 확보한 요인을 합성하는 식으로 정의된다. 세부적으로 요인을 살펴보면 에너지를 계산하기 위한 힘을 측정하는 로드셀의 교정, 분

해능, 그리고 변형을 측정하는 LVDT의 교정, 분해능 그리고 반복시험으로 구분된다. 측정불확도 추정 절차에서 언급했듯이 각각의 요인들은 A형, B형 불확도로 분류된다.

$$Y = (D_N - D_{N-1}) \frac{F_{N-1} + F_N}{2} + uF + uD + u_{repeat} \quad (2)$$

$$Y = f(x) + uD + u_{repeat} \quad (3)$$

where, D_N = First measured value of deformation from LVDT

F_N = First measured value of force from Loadcell

uD = Overall uncertainty for deformation

u_{repeat} = Uncertainty calculated from repeated tests

$f(x)$ = Mean maximum deformation of test result

3.2.2 표준불확도 산출

보호구조물 시험에서 식 (4)와 같은 에너지를 측정하기 위해서는 관련 장비가 필요하다. 보호구조물의 반력으로 작용되는 실시간 힘과 부하에 따른 변형 측정을 위해서는 로드셀, 변위계 등이 필요하다. 각 장비로부터 측정된 수치들은 모두 불확도를 내재하고 있으며, 교정성적서를 통해 불확도의 크기를 알 수 있다. 이 과정에서 고려되는 불확도 요인은 로드셀과, 변위계의 교정성적서에 의한 B형 불확도 그리고 3회의 반복 측정값들에 대한 A형 불확도가 고려되었다. 로드셀의 분해능은 약 9.8 N이며, 분해능에 의한 확률분포를 대칭 직사각형으로 가정할 수 있다. 또한, 변위계의 분해능은 0.1 mm로 확률분포를 대칭 직사각형으로 가정할 수 있다. A형으로 평가된 표준 불확도의 자유도는 표준불확도를 산출할 때 사용한 결과 값의 측정 횟수 n-1로 구할 수 있다. 그러나 이러한 자료를 구할 수 없는 대부분의 B형 평가의 경우 자유도 v_i 는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$v_i \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (4)$$

where, v_i = Degree of freedom

$u(x_i)$ = Standard uncertainty

여기서, $R = \Delta u(x_i)/u(x_i) \times 100$ [%]는 상대불확도를 백분율로 나타낸 값이며, 값이 작다는 것은 표준 불확도에 대한 신뢰성이 크다는 것을 의미한다. R%

Table 3 Calibration and resolution for test device

Data acquisition sensor	Resolution	Uncertainty(ab.95% level of confidence, k=2)
Load cell	9.8 N	0.19%
LVDT	0.1 mm	$\sqrt{58^2 + 0.005^2 \times 900^2} \mu\text{m}$

Table 4 Calculation of standard uncertainty and degree of freedom

Classification		Formulas	$u(x_i)$	v_i
$u(F_{cal})$		$\frac{u}{k}$	0.93	∞
$u(F_{res})$		$\frac{a}{\sqrt{3}}$	2.83	∞
$u(D_{cal})$		$\frac{u}{k}$	0.03	∞
$u(D_{res})$		$\frac{a}{\sqrt{3}}$	0.03	∞
u_{repeat}	Force	Rear $\frac{s}{\sqrt{n}}$	0.13	2
		Side $\frac{s}{\sqrt{n}}$	0.22	2
		Front $\frac{s}{\sqrt{n}}$	0.05	2
	Maximum deformation	Rear $\frac{s}{\sqrt{n}}$	2.54	2
		Side $\frac{s}{\sqrt{n}}$	2.02	2
		Front $\frac{s}{\sqrt{n}}$	1.90	2

는 표준불확도 또는 추정 범위의 최대 한계값이 그 값으로부터 $\pm R\%$ 까지 벗어날 수 있음을 의미하며, $\pm R\%$ 까지 신뢰할 수 있음을 말한다. 본 논문에서는 100%까지 신뢰할 수 있다고 가정하여 $R=0$ 으로 계산하였으며, 이때 자유도는 무한대(∞)가 된다. Table 3은 각 센서의 분해능과 교정성적서 값이며 에너지 및 변형에 대한 수식과 표준불확도 및 자유도를 Table 4에 나타내었다.

3.2.3 합성표준불확도 산출

로드셀의 교정값과 분해능, 변위계의 교정값과 분해능 및 반복시험 각각의 표준불확도는 불확도 계산식에 들어가는 입력량들이 별도의 분리된 측정 과정을 통해 산출되므로 상관관계가 없는 합성표준불확도 $u_c(y)$ 는 다음의 식(5)로부터 구할 수 있다. 여기서 $u(x_i)$ 는 A형과 B형 방법으로 산출한 각각의 표준불확도이다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (5)$$

where, $u_c(y)$ = Combined standard uncertainty

c_i = Sensitivity coefficient

$u(x_i)$ = Standard uncertainty

여기서, c_i 는 감도계수로서 x_i 의 변화에 따라 불확도 기여량이 변화되는 정도를 말하며 위의 모델식을 편미분하면 표준불확도 값들은 같은 단위가 되고 감도계수는 1이 된다. 각각의 불확도 값을 합성하여 산출된 합성표준불확도에 대한 값을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Calculation of combined standard uncertainty

Classification		$u_c(y)$
Force	Rear	2.99
	Side	2.98
	Front	2.99
Maximum deformation	Rear	2.4
	Side	1.4
	Front	2.1

3.2.4 확장불확도 산출

ROPS 시험에서 힘과 변형량 측정 결과에 대한 불확도를 정량적으로 표현하는 확장불확도는 식(7)과 같이 산출한다.

$$U = k \times u_c(y) \quad (7)$$

where, U = Expanded uncertainty

k = Coverage factor

$u_c(y)$ = Combined standard uncertainty

포함인자 k 는 전체 유효자유도 및 신뢰수준을 결정하여 산출해야 하며, 유효자유도는 표준불확도, 자유도, 감도계수 및 합성표준불확도를 이용하여 아래와 같은 Welch - Satterthwate 식으로 각각 산출되었다.¹⁹⁾

$$v_{eff} = \frac{u_c(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(x_i)]^4}{v_i}} = \frac{(u_c(y))^4}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i))^4}{(n-1)}} \quad (8)$$

where, v_{eff} = Effective degree of freedom

$u_c(y)$ = Combined standard uncertainty

v_i = Freedom of $u(x_i)$

Table 6 Calculation of expanded uncertainty

Classification		v_{eff}	k	Expanded uncertainty
Force	Rear	559,682 = ∞	1.6	4.78 N
	Side	67,329 = ∞	1.6	7.76 N
	Front	2,257,6124 = ∞	1.6	4.78 N
Maximum deformation	Rear	2	2.9	6.96 mm
	Side	2	2.9	4.06 mm
	Front	2	2.9	6.09 mm

계산된 유효자유도(v_{eff})와 이에 상응하는 t-분포표 값을 취하여 신뢰수준 95%에 해당되는 포함인자 k 를 Table 6에 나타내었다. 각각의 포함인자 k 를 합성 표준불확도와 곱하여 최종 확장불확도가 산출되었다.

본 연구에서 제안한 불확도 모델은 시험장치를 구성하는 센서만을 활용한 제한적인 결과로 Jeong(2010) 등의 연구와 비교했을 때 데이터가 변환되는 증폭기 및 데이터를 수집하는 DAQ 보드에 대한 불확도 요인을 고려하지 못한 한계점을 가진다. 그러나 ROPS 성능평가를 반복적으로 수행하여 데이터의 정밀도를 분석 후 표준불확도 산출에 적용하였다 시험결과의 신뢰도 평가 및 시험 자체에 내재 되어있는 정량적 오차를 판단하는데 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결론

시험은 신뢰도를 바탕으로 수행되어야 하며, 신뢰성 있는 자동제어 및 계측기의 사용을 요구하고 있다. 측정 결과는 측정값에 대한 근삿값 또는 추정값이기 때문에 불확도와 함께 명시가 필요하다. 본 연구에서는 시험장치에서 나타날 수 있는 불확실성 요인을 분석하였다. 또한, 농업용트랙터 ROPS OECD code 4 시험방법에 따라 반복시험을 수행하여 측정 불확도를 추정하기 위한 요인으로 활용하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) ROPS의 성능시험에서 나타날 수 있는 정량적 측정불확도를 산출하기 위해 시험장치의 특성 및 시험방법의 수식을 고려하여 요인들을 분석하고 수학적 모델식을 수립하였다.

(2) ROPS의 A형 표준불확도 추정을 위해 반복시험을 수행하였으며, 동일한 ROPS 및 방법으로 평가하였다. 반복시험 결과 정밀도는 모든 방향에서 최대

1.9%로 나타났으며, 측정된 힘과 변형에 대한 결과를 불확도 계산에 적용하였다.

(3) B형 표준불확도를 산출하고 반복적 시험을 통하여 A형 표준불확도를 산출하였다. A형과 B형 표준 불확도를 합성하기 위하여 감도계수를 결정하고 합성표준불확도를 계산하였다. 이후, 최종 측정불확도를 나타내는 확장불확도를 산출하기 위해 유효자유도를 계산하고 t-분포표를 이용하여 포함인자를 결정하였다. 합성표준불확도에 포함인자를 곱해줌으로써 최종 확장불확도를 산출하였다.

후 기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 첨단농기계산업화기술개발사업(121030-02)과 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업(821053-3)의 지원을 받아 연구되었음.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) D. Y. Um, "Consideration of the measurement uncertainty for reliability improvement of surveying results," Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, pp.107~112, 2011.
- 2) ISO. 2011. Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) - Supplement 2: Extension to any number of output quantities. In ISO/IEC GUIDE 98-3:2008/SUPPL 2:2011.
- 3) APLAC. 2006. "Interpretation and guidance on the estimation of uncertainty of measurement in Testing", In APLAC TC 005.
- 4) S. J. Moon and J. H. Chung, "Measurement uncertainty of vibration testing result with including uncertainty of testing facilities", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.26, No.7, pp.781~786, 2007.
- 5) B. J. Cho et al., "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.
- 6) N. G. Lee et al., "Analysis of Traction Performance for Agricultural Tractor According to Soil Condition", *Journal of Drive and Control*, Vol.17, No.4, pp.133-140, 2020.
 - 7) S. M. Baek et al., "Analysis of Engine Load Factor for a 78 kW Class Agricultural Tractor According to Agricultural Operations" *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.1, pp.16-25, 2022.
 - 8) J. H. Won et al., "Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery" *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, pp.19-28, 2022.
 - 9) S. W. Park, Y. H. Choi and C. H. Lee, "Review of Regulation for Rollover Test and Evaluation of Safety for Buses by using Simulation of Multi-body Dynamics", *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.3, pp.39-46, 2022.
 - 10) J. K. Lee et al., "Uncertainty analysis and ANOVA for the confidence estimation of altitude engine test." *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.21, No.4, pp.664-671, 2006.
 - 11) S. H. Park, K. H. Lee and H. S. Han, "Estimation of uncertainty in vibration measurement of shipboard equipment", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.24, No.7, pp.509-516, 2014.
 - 12) S. H. Jeong et al., "Standard Uncertainty Evaluation for Dynamic Material Properties of Auto-body Steel Sheets," *The Korean Society of Automotive Engineers*, pp.2784-2793, 2010.
 - 13) Y. H. Huh, H. M. Lee, D. J. Kim and J. S. Park, "Estimation of Measurement Uncertainty in Evaluation of Tensile Properties." *The Korean Society of Mechanical Engineers-A* 34(1), 2010.1, pp.73-78.
 - 14) K. R. Kim and Y. S. Lee, "Study on the Estimation of Measurement Uncertainty in MOI Measurement." *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.16, No.6, pp.797-802, 2013.
 - 15) W. S. Cheung, Y. T. Kim and D. P. Hong, "Study on uncertainty factors of head vibration measurements," *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.15, No.94, pp.20-28, 2005.
 - 16) G. G. Song, C. S. Lee and Y. H. Kim, "Effects of environmental conditions on uncertainty of reverberation time," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp.439-440, 2014.
 - 17) OECD code 4. 2021. "OECD standard code for the official testing of protective structures on agriculture and forestry tractors", OECD Headquarters, Paris, France
 - 18) R. G. Lim et al., "Agricultural tractor roll over protective structure (ROPS) test using simplified ROPS model", *Korean Journal of Agricultural Science*, 49(4) 2022, pp.771-783.
 - 19) B. L. Welch, "The generalization of 'STUDENT'S' problem when several different population variances are involved," *Biometrika*, Vol.34 No.1/2, pp.28-35, 1947.