

현장계측용 변위계의 환경영향 특성연구

이한준*, 최만용⁺, 박정학⁺, 임재학⁺⁺

Environmental Stress on the Displacement Sensor for Infrastructure

Han-Joon Lee*, Man-Yong Choi⁺, Jung-Hak Park⁺, Jae-Hak Yim⁺⁺

Abstract

The sensor and measuring instrument that are used for the infrastructure is discussed the reliability problem from the various environment factors. In the domestic infrastructure, the low reliability products are produced, because of lack of the pertinent test methods and equipments. To improve the practical use and accuracy of the sensor, it raises the measurement reliability about the sensor and measurement instrument.

In this study, the variance of the displacement value according to temperature was investigated using the LVDT for the infrastructure. The experimental results showed that a sensor is affected by environment factor such as temperature.

Key Words : infrastructure(산업시설), environment factor(환경인자), displacement(변위), Linear Variable Differential Transducer(LVDT)

1. 서론

현장에서 사용되는 센서 및 계측기기는 다양한 환경인자에서 작동하므로 항상 신뢰성이 문제가 된다. 특히 국내 생산품의 경우 생산 단계에서 적절한 시험 방법 및 시험 장비의 부족으로 신뢰성 설계를 등한시하여 신뢰성이 낮은 제품이 생산되고 있다.

건설 현장이나 구조물 안전진단 및 감시에 사용되는 센서 및 계측기기는 현장의 환경시험을 통하여 계측신뢰성을 평가받아야 할 것으로 판단되지만 국내에서는 아직 그러한 체계가 확립되어 있지 못하므로 현장계측데이터에 대한 불신이 팽배하여 있다. 반면에 관리자들은 정확한 측정 데이터를 요구하고 있는 실정이어서 계측 기술자들의 도움이 절실히 필요한 시점이라고 생각된다.

* 이한준 한국표준과학연구원(joon@kriss.re.kr)

주소: 305-600 대전시 유성구 도룡동 1

+ 한국표준과학연구원 환경안전계측센터

++ 한밭대학교

따라서 시설물 현장계측에 사용되는 각종 측정기술을 분석해서 건설 현장이나 구조물 유지관리에 사용되는 센서 및 계측기에 대하여 현장계측시의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 계측기술향상에 연구의 목적을 둔다.

현장계측용 센서 및 계측기의 측정 실험을 통하여 센서의 활용도 및 정밀도를 향상시킬 필요가 있으며 보다 신뢰할 수 있는 건설 현장이나 구조물의 안전진단 및 감시를 위해서는 실제 현장에서 사용되는 센서 및 계측기에 대해 기술의 개량 또는 새로운 보급체제를 구성해서 센서 및 계측기에 대한 측정신뢰도를 제고한다.

본 연구에서는 현장계측용 센서 및 계측기에 대한 환경 영향시험을 조사하기 위한 기초연구로서 계측기의 정확도가 온도에 어떤 영향을 받는지 온도에 대한 변위 값의 변화를 조사하였다.

2. 환경시험장치

2.1 Linear Variable Differential transducer(LVDT)

초소형 전자장치로 변위의 측정에 사용되는데 LVDT는 외부 Coil과 가동 중앙 core로 구성된 transformer이다. 이 core가 구조적인 변위로 부터 움직이므로서 원격적으로, 자동적으로 기록 가능한 전기적 신호를 생산하며 정적 동적응답이 모두 가능하다. LVDT는 변위를 측정하는데 주로 사용되는 계측기이다.

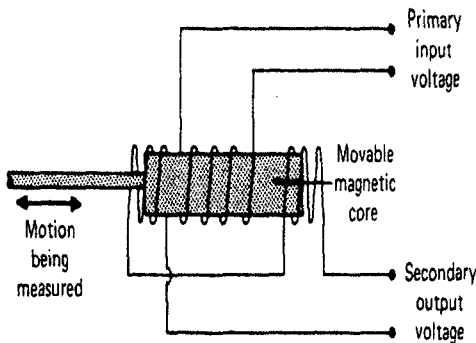


Fig. 2.1.1. schematic of linear variable differential transformer(LVDT)

Fig. 2.1.1는 움직이는 자석심(magnetic core) 하나의 Primary coil,과 두 개의 secondary coil로 구성된다. 교류가 primary coil에 흐르면 magnetic core와 secondary coil의 근접 정도에 따라 secondary coil에 유도된다. LVDT의 output 은 두 개의 secondary coil의 전압 차이이다. Core가 중간 위치에 있으면 LVDT는 0 Volt를 나타내고, 중간 위치에서 움직이는 방향에 따라 + 또는 - 전압값을 나타낸다.

Fig. 2.1.2는 두 방향 변위의 측정이 가능한 LVDT이다. Core가 coil에 접촉되지 않아 마찰이 우려가 없어 장기간 사용이 가능하다. 특히, oil로 채워진 housing 속에 내장된 LVDT는 부식의 우려도 전혀 없다. 또한 Hysteresis도 없이 동적 계측과 작은 변위측정에 적합하다. 그러나 원격에서 측정되어 긴 리드선이 사용될 경우 교류로 인한 잡음이 측정에 영향을 미친다.

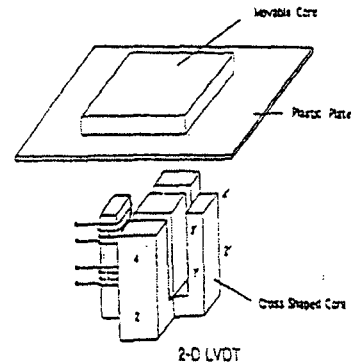


Fig. 2.1.2. Interactive LVDT

2.2 환경시험장치구성

환경신뢰성시험을 하기위해서 Fig. 2.2.1과 같이 환경시험장치를 구성하였다. 센서는 계측 정확도가 온도에 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 건설, 해양, 산업 시설물 현장에서 사용되는 LVDT를 선정해서 이태리 Angelantoni사의 기후환경시험장비 Challenge 600CES형에서 시험 측정하였다.

Fig. 2.2.1는 PC에서 제어장치를 제어해서 변위이동장치가 센서의 변위를 0.0mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm으로 이동시

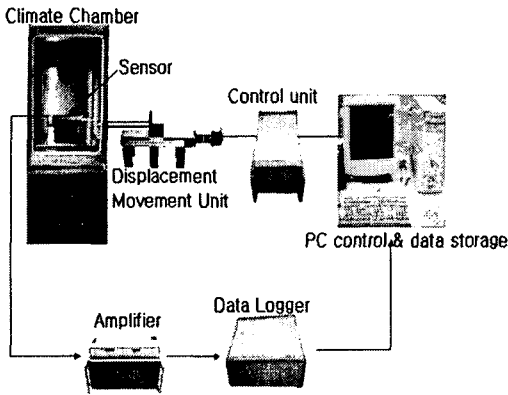


Fig. 2.2.1 Environmental Experiment Instrument

키고, 온도변화에 따라 측정된 출력 값을 amplifier로 증폭시켜 LOKAS사의 데이터로거를 사용해서 데이터를 PC에 모니터링 및 저장을 보여준다.

2.3 측정결과

LVDT의 계측 정확도가 온도에 어떤 영향을 받는지 알아보기 위하여 다른 계측기를 사용하여 비교하였다. 상온(25℃)에서 변위를 0.0mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm로 하였을 경우, 계측기의 출력 값(V)을 측정한 결과는 Table 2.3.1과 같다.

변위를 위와 동일하게 설정한 후 다른 계측기의 출력을 측정하였으며 이 결과는 Table 2.3.2~Table 2.3.5에 정리된 바와 같다. 측정에 적용한 온도는 -20℃, 0℃, 20℃, 40℃, 60℃의 5가지 수준으로 정하였으며 각 온도에 대하여 5분 간격으로 6회 측정을 실시하였다.

Table 2.3.1 output value in high temperature(25℃)

Displacement	Output(V)
0.0mm	0.0000
1.0mm	0.1923
2.0mm	0.3826
3.0mm	0.5699

Table 2.3.2 measurement data(displacement 0.0mm)

	-20℃	0℃	20℃	40℃	60℃
5	-0.0041	-0.0051	-0.0044	-0.0042	-0.0047
10	-0.0043	-0.0047	-0.0040	-0.0039	-0.0046
15	-0.0043	-0.0044	-0.0039	-0.0039	-0.0046
20	-0.0045	-0.0043	-0.0038	-0.0038	-0.0045
25	-0.0046	-0.0042	-0.0038	-0.0038	-0.0046
30	-0.0046	-0.0043	-0.0037	-0.0039	-0.0046

Table 2.3.3 measurement data(displacement 1.0mm)

	-20℃	0℃	20℃	40℃	60℃
5	0.1777	0.1762	0.1814	0.1858	0.1887
10	0.1767	0.1776	0.1828	0.1867	0.1893
15	0.1758	0.1784	0.1834	0.1871	0.1897
20	0.1753	0.1787	0.1836	0.1874	0.1899
25	0.1749	0.1788	0.1838	0.1874	0.1900
30	0.1747	0.1789	0.1839	0.1874	0.1901

Table 2.3.4 measurement data(displacement 2.0mm)

	-20℃	0℃	20℃	40℃	60℃
5	0.3665	0.3620	0.3703	0.3784	0.3843
10	0.3637	0.3638	0.3723	0.3799	0.3858
15	0.3620	0.3648	0.3734	0.3808	0.3867
20	0.3607	0.3654	0.3741	0.3814	0.3872
25	0.3598	0.3657	0.3746	0.3819	0.3876
30	0.3591	0.3660	0.3749	0.3822	0.3879

Table 2.3.5 measurement data(displacement 3.0mm)

	-20℃	0℃	20℃	40℃	60℃
5	0.5549	0.5497	0.5617	0.5732	0.5826
10	0.5513	0.5521	0.5643	0.5756	0.5847
15	0.5488	0.5535	0.5659	0.5768	0.5860
20	0.5473	0.5542	0.5668	0.5773	0.5868
25	0.5460	0.5546	0.5673	0.5777	0.5876
30	0.5455	0.5548	0.5677	0.5781	0.5881

3. 분석결과 및 이론적 고찰

3.1 데이터수집

계측기에 대해 4종류의 변위 값을 설정한 뒤, 온도를 -20℃에서 60℃까지 20℃ 간격으로 변화시키면서 계측기의 출력 값을 5분에서 30분까지 5분 간격으로 반복 측정하였다. 따라서 이 자료는 반복 측정자료의 전형적인 예가 된다.

우선 온도의 변화에 대해 출력 값이 어떤 변화를 보이는지 분석하고자 한다. 이러한 목적을 달성하는데 가장 적합한 방법은 회귀분석을 실시하는 것인데 이 자료는 반복측정을 한 자료이기 때문에 회귀식의 적합결여검정이 가능하다. 따라서 적합결여검정을 포함한 회귀분석을 실시하고자 한다.

3.2 분석 방법

각 x_i 에서 n_i 개의 반복적인 데이터가 있는 반복으로 있는 경우 이에 대한 회귀분석은 x 의 수준으로 x_1, x_2, \dots, x_k 가 있고, 각 수준에서 n_1, n_2, \dots, n_k 개의 반복된 관찰치가 있는 자료의 구조는 다음과 같다.

x_1 에서 $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n_1}$
 x_2 에서 $y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n_2}$
 \vdots
 x_k 에서 $y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn_k}$

그리고 데이터의 구조식은 다음과 같이 된다.

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_{ij} \quad (3-1)$$

여기서 $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$, $i=1, 2, \dots, k$ 이며, $j=1, 2, \dots, n_i$ 가 된다.

식(3-1)의 모형은 일반적인 회귀분석 모형과 같이 $n = \sum_{i=1}^k n_i$ 로 놓고

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n$$

으로 바꾸어 회귀직선을 적합시켜도 좋다. 그러나 같은

x_i 가 n_i 번씩 반복되므로, 이러한 특색을 이용하여 다음의 계산방법을 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k &= \sum_i, \quad \sum_{j=1}^{n_i} = \sum_j \\ n &= \sum_i n_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i n_i \bar{x}_i, \quad T_i = \sum_j y_{ij} \\ T &= \sum_i T_i = \sum_i \sum_j y_{ij}, \quad \bar{y} = \frac{T}{n} \end{aligned}$$

그러면,

$$\begin{aligned} S_{(xx)} &= \sum_i \sum_j (x_i - \bar{x})^2 = \sum_i n_i (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \sum_i n_i \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_i n_i \bar{x}_i)^2}{n} \quad (3-2) \end{aligned}$$

$$S_{(yy)} = \sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_i \sum_j y_{ij}^2 - \frac{T^2}{n} \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} S_{(xy)} &= \sum_i \sum_j (x_i - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})^2 \\ &= \sum_i \sum_j x_i y_{ij} - \frac{(\sum_i n_i \bar{x}_i)(\sum_j y_{ij})}{n} \\ &= \sum_i x_i T_i - \frac{(\sum_i n_i \bar{x}_i)T}{n} \quad (3-4) \end{aligned}$$

따라서, 회귀모수, β_0 와 β_1 의 추정치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b = \frac{S_{(xy)}}{S_{(xx)}}, \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (3-5)$$

또한 분산분석에 필요한 자승합은 다음과 같다.

$$SST = S_{(yy)} \quad (3-6)$$

$$SSR = [S_{(xy)}]^2 / S_{(xx)} \quad (3-7)$$

$$SSE = SST - SSR \quad (3-8)$$

각 x_i 에서 y 의 값을 반복측정하였을 경우에는 오차자승합 (SSE)은 순오차자승합 (SSPE)과 적합결여자승합 (SSLF)으로 나눌 수 있으며, 가정된 회귀식의 적합결여 검정이 가능하여진다.

전체 자료의 수 $n = \sum_{i=1}^k n_i$ 를 가지고 최소자승법에 의하여 구한 회귀직선을

$\widehat{y}_i = b_0 + b_1 x_i, i=1, 2, \dots, n$ 라고 하자. 하나의 x_i 점에서는 n_i 개의 y 의 측정치가 있지만, 회귀직선에 의한 y 의 추정치는 \widehat{y}_i 하나뿐이다. 잔차변동 $SSE (= SST - SSE)$ 의 표현은 이 경우에는

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \widehat{y}_i)^2 \quad (3-9)$$

이 되며, $\overline{y}_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} / n_i$ 라 놓고 SSE를 다음과 같이 둘로 분해할 수 있다.

$$\begin{aligned} SSE &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} [(y_{ij} - \overline{y}_i) + (\overline{y}_i - \widehat{y}_i)]^2 \\ &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \overline{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^k (\overline{y}_i - \widehat{y}_i)^2 \end{aligned} \quad (3-10)$$

식(3-10)에서 첫 번째 자승합을 순오차자승합(pure error sum of squares)

$$SSPE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \overline{y}_i)^2 \quad (3-11)$$

이라 하고, 두 번째 자승합을 적합결여자승합(lack-of-fit sum of squares)

$$SSLF = \sum_{i=1}^k n_i (\overline{y}_i - \widehat{y}_i)^2 \quad (3-12)$$

이라 한다.

SSPE와 관련된 자유도는 $n-k$ 이다. 왜냐하면, 식 (3-11)에서 $\sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \overline{y}_i)^2$ 은 n_i-1 의 자유도를 가지고 있

으며 k 개의 x 수준에서는 총합 $\sum_{i=1}^k (n_i - 1) = n - k$ 의 자유도가 되기 때문이다. 따라서, 순오차자승평균(pure error sum of square)은

$$MSPE = \frac{SSPE}{n-k} \quad (3-13)$$

SSLF와 관련된 자유도는 $k-2$ 이다. 왜냐하면, 식 (3-12)에서 k 개의 x 수준이 있고 \widehat{y}_i 는 두 개의 모수를 추정하여 얻어지며, 이 때 자유도 두 개를 상실하게 되므로 $k-2$ 가 된다. 따라서, 적합결여자승평균(lack-of-fit mean of square)은

$$MSLF = \frac{SSLF}{k-2} \quad (3-14)$$

회귀직선 $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x$ 가 옳은가를 검정하기 위한 통계량으로 쓰여지는 것은

$$F_0 = \frac{MSLF}{MSPE} \quad (3-15)$$

이며, 회귀직선이 옳든 아니든 간에

$$\begin{aligned} E(MSPE) &= \sigma^2 \\ E(MSLF) &= \sigma^2 + \frac{\sum_{i=1}^k n_i [E(y_i) - (\beta_0 + \beta_1 x_i)]^2}{k-2} \end{aligned} \quad (3-16)$$

이 성립한다. 만약, $E(y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i$ 이면 $E(MSLF) = \sigma^2$ 으로 $E(MSPE)$ 와 같다. 따라서 식 (3-115)의 F_0 의 값이 1에 가까우면 회귀직선모형이 옳은 가정이며, F_0 의 값이 커지면 $E(y) \neq \beta_0 + \beta_1 x$ 라는 의미가 된다.

Table 3.2.1. The analysis of variance

	Sum of square	Degree of freedom	Mean of square	F_0
Regression	SSR	1	MSR	$F_0 = \frac{MSR}{MSE}$
Residual	SSE	$n-2$	MSE	
Lack of fit	SSLF	$k-2$	MSLF	$F_0 = \frac{MSLF}{MSPE}$
Pure error	SSPE	$n-k$	MSPE	
Total	SST	$n-1$		

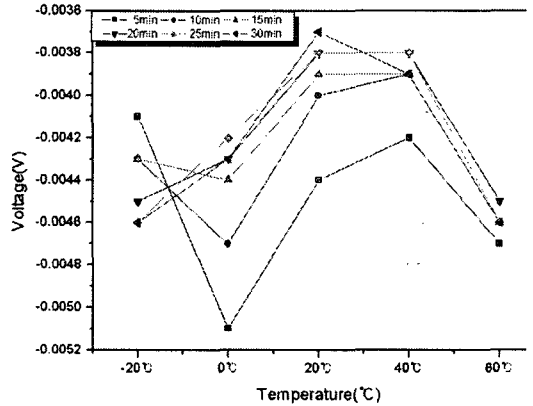


Fig. 3.3.1. output value according to temperature(0.0mm)

분산분석표를 보면 Table 3.2.1과 같다.

3.3 분석결과

분산분석결과는 Table 3.3.1~Table 3.3.4에 정리되어 있으며, Fig. 3.3.1 ~ Fig. 3.3.4은 온도가 변화함에 따라 출력값의 변화를 주어진 변위 0.0mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm에 따라 나타내었다.

Fig. 3.3.1에서처럼 그래프를 그려보면 변위가 0.0mm인 경우에는 온도에 따른 출력 값의 변화에 경향을 찾아 볼 수 없다. 그러나 다른 변위 값(1.0mm, 2.0mm, 3.0mm)에 대해서는 Fig. 3.3.2 ~ Fig. 3.3.4에서 알 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 출력 값도 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3.3.1. The result of displacement(0.0mm)

	Sum of square	Degree of freedom
Regression	0.0000000	1
Residual	0.0000037	28
Lack of fit	0.0000025	3
Pure error	0.0000012	5
Total	0.0000037	29

Table 3.3.2. The result of displacement(1.0mm)

	Sum of square	Degree of freedom
Regression	0.0007950	1.0000000
Residual	0.0000309	28.0000000
Lack of fit	0.0000110	3.0000000
Pure error	0.0000200	5.0000000
Total	0.0008259	29.0000000

	Mean of square	F_0
Regression	0.0000000	0.1524958
Residual	0.0000001	
Lack of fit	0.0000008	3.3849477
Pure error	0.0000002	
Total	0.0000001	

	Mean of square	F_0
Regression	0.0007950	719.5825907
Residual	0.0000011	
Lack of fit	0.0000037	0.9147960
Pure error	0.0000040	
Total	0.0000285	

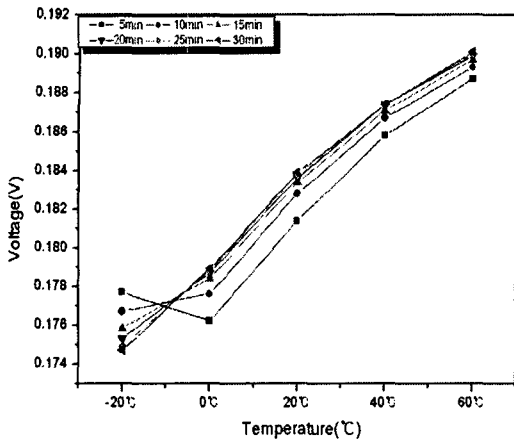


Fig. 3.3.2. output value according to temperature(1.0mm)

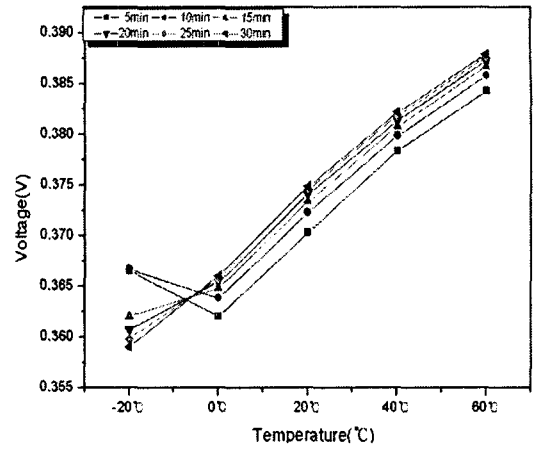


Fig. 3.3.4. output value according to temperature(2.0mm)

Table 3.3.3. The result of displacement(2.0mm)

	Sum of square	Degree of freedom
Regression	0.0025650	1.0000000
Residual	0.0001340	28.0000000
Lack of fit	0.0000507	3.0000000
Pure error	0.0000833	5.0000000
Total	0.0026990	29.0000000

	Mean of square	F_0
Regression	0.0025650	536.0323472
Residual	0.0000048	
Lack of fit	0.0000169	1.0141896
Pure error	0.0000167	
Total	0.0000931	

Table 3.3.4. The result of displacement(3.0mm)

	Sum of square	Degree of freedom
Regression	0.0056804	1.0000000
Residual	0.0002456	28.0000000
Lack of fit	0.0000992	3.0000000
Pure error	0.0001463	5.0000000
Total	0.0059259	29.0000000

	Mean of square	F_0
Regression	0.0056804	647.6813930
Residual	0.0000088	
Lack of fit	0.0000331	1.1304061
Pure error	0.0000293	
Total	0.0002043	

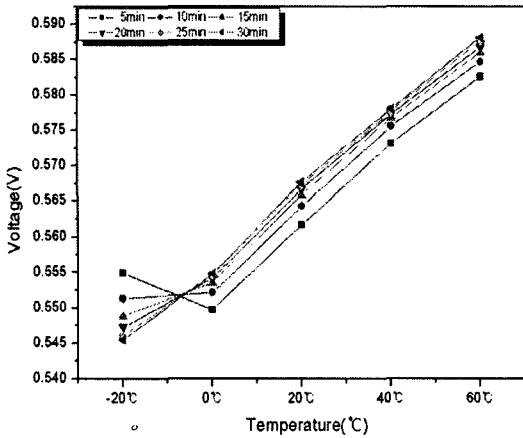


Fig. 3.3.5 output value according to temperature(3.0mm)

각각의 변위 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm에 대하여 온도와 출력 값의 선형 회귀식은 다음과 같다. 단, 변위 0.0mm인 경우의 회귀선은 의미가 없으므로 고려하지 않았다.

변위 1.0mm : $y = 0.001790967 + 0.0001820x$

변위 2.0mm : $y = 0.3669017 + 0.0003269x$

변위 3.0mm : $y = 0.5563000 + 0.0004865x$

4. 결론

본 연구에서는 상온(25°C)에서 0.0mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm의 변위 값을 설정하여 나온 출력 값을 현장계측용 센서 및 계측기기에 대해 온도와 변위 값을 다양하게 설정하면서 반복 측정한 자료를 적합결여검정을 포함한 회귀분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 회귀분석 결과 변위 0.0mm인 경우에는 온도가 변화함에 따라 출력 값의 변화에 경향을 찾아볼 수 없어서 온도와 출력 값에 대한 회귀모형은 의미가 없어서 출력 값에 대한 검토가 요구된다.
- (2) 변위 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm에 대해서는 온도가 증가함에 따라 출력 값도 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 이에 대한 회귀모형도 의미가 있고 모형의 적합성도 타당하다.
- (3) 상온(25°C)에서의 출력 값과 현장계측용 센서 및 계측기기를 비교해 본 결과 온도의 변화가 출력 값의 변화에 미치는 영향도 변위 값에 따라 차이가 있다.

위 분석에서 현장계측용 센서 및 계측기기가 환경외부인자에 의해 영향을 받는 것을 알 수가 있었다. 이에 현장계측용 센서 및 계측기기에 대해 다양한 실내·외 환경시험을 수행해서 현장과 유사한 환경인자를 갖도록 환경 스트레스의 기준을 정하여 신뢰도데이터를 확보가 필요하다. 또한 계측기기의 신뢰도 계산방법을 정리하며 신뢰성데이터 관리방법을 정립하여 현장계측용 센서 및 계측기기에 신뢰도를 향상시키고 추후 불확도 계산에 사용하도록 국가표준기본법에 도모할 수 있다.

참고 문헌

- (1) C. Velayudhan & J.H. Bundell, "Simple Inductive Displacement Transducer", Rev. Sci. Instrum., 55, 1984
- (2) M.S. Dann, "Variable Turns Ratio Inductance Transducer for Measurement of Translational Displacement", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 17, 1984
- (3) E.O Doebelin, "Measurement Systems - Application and Design", New York, McGRAW - HILL, 1975
- (4) KS C 0227, 환경시험방법 - 전기전자 - 온습도 사이클 시험방법, 2001