

Development of an Investigation Method for Variation Factors of Measurement Processes

In-Soo Choi* · Chang Wook Kang**†

*Department of Nano Metrology, Korea Polytechnics II

**Department of Industrial and Management Engineering, Hanyang University

측정 프로세스의 변동 요인 조사 방법 개발

최인수* · 강창욱**†

*한국폴리텍대학II 나노측정과

**한양대학교 산업경영공학과

There can be included a variety of uncertainties in all measurement results whether we can perceive or not on the causes. These uncertainties may end up in lowering the reliability of measurement results and also deteriorate the level of quality. For the purpose, we tried to combine the strengths of measurement uncertainty and measurement system analysis together to present a practical flowchart so as to verify those potential variation factors in general measurement processes. As a case study, we did an experiment and gathered data on the length between two holes of an engine cylinder head which is a core part for vehicles with a coordinate measuring machine and estimated nine uncertainty factors of it. Consequently, it was identified that the four primary factors among the nine which were related to the measurement standard, random errors or spread of the repeat measurements, differences between the coefficients of thermal expansion and the environment especially had been the influence around the laboratory. Since it is impossible to analyze the equipment and appraisal variations respectively through the only measurement uncertainty, we have used the measurement system analysis following the flowchart. Showing the result of being just about 0.5 % lower for the appraisal variation, and the equipment variation occupied about 7% for the total Gage R&R. Through this research, we have come to a conclusion that much more detail analysis on variation factors can be possible to be identified in measurement processes by using the developed flowchart which is composed of measurement uncertainty and measurement system analysis. Therefore, we expect engineers who are involved in quality and measurements to utilize this developed method.

Keywords : Measurement uncertainty, Measurement results, Uncertainties, MSA

1. 서 론

모든 측정결과에는 우리가 인지하고 있거나 또는 그렇지 못한 여러 가지의 원인에 의하여 불확실성이 포

함될 수 있다. 이러한 불확실한 요인들은 측정결과의 신뢰성을 저하시키고 결과적으로 품질에 영향을 미치게 된다[2]. 과거 측정결과는 반복측정에 대한 오차 위주의 관리가 이루어졌지만 이에 대한 한계로 보다 정확하고 상세한 측정결과에 대한 분석이 요구됨에 따라 측정데이터의 질을 높이고 신뢰성을 확보하기 위한 하나의 척도로써 불확도(uncertainty)의 개념이 도입되고, 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 여러 국제기구와 합동으로 “측정불확도

Received 25 February 2016; Finally Revised 26 April 2016;

Accepted 4 June 2016

† Corresponding Author : cw kang57@hanyang.ac.kr

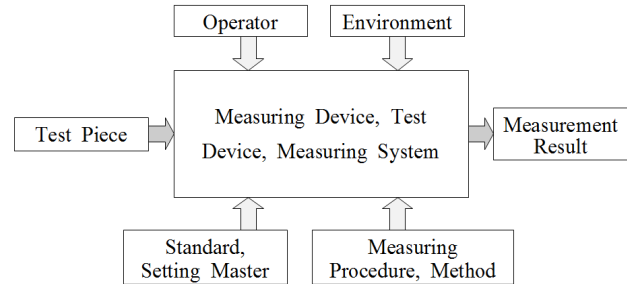
표현지침”(GUM : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)을 발간하여 계측기의 교정·시험 분야에서 널리 활용되고 있다. 교정 및 시험기관에서는 국가 표준법에 의거하여 의무적으로 측정결과에 대한 측정불확도를 성적서에 명시하고 이를 철저히 준수하도록 하고 있다[12, 13]. 이에 비하여 산업현장의 측정실에서는 해당 기업의 측정 데이터 관리 방침에 따라 비교적 자유롭게 측정 데이터를 관리하고 있으며 측정시스템분석(MSA : Measurement System Analysis)을 통해 측정기기 및 작업자에 대한 분석과 평가가 이루어지는 것이 일반적이다[28]. 하지만 과학기술이 급속도로 진보함에 따라 요구되는 품질의 수준 또한 지속적으로 높아지고 상업적 경쟁우위를 확보하고 유지하기 위한 노력의 일환으로 미국, 일본, 영국 등 선진국에서는 이미 점차 일반 측정분야에까지 측정불확도를 적용하여 고객의 입장을 적극 고려하여 세밀한 부분의 정보까지 고객에게 제공하고 있는 추세이다. 또한 교정이나 시험분야 뿐만 아니라 일반 측정 분야에서의 측정결과에 대한 변동 요인 및 측정불확도를 추정하고 적용하는 방안에 대한 연구도 기계, 전기·전자, 화학, 생물, 식품, 환경, 재료, 품질, 미디어, 시스템 등 다양한 분야에서 교정절차서를 참조하거나 또는 주관적 필요에 따라 제한적인 범위 내에서 측정불확도를 추정하여 적용하는 시도가 최근 다수의 논문에서 활발하게 연구되고 있음을 알 수 있다[3, 4, 6-11, 16, 17, 19-26, 30, 31]. 본 연구에서는 이러한 국제적 추세에 대응하는 하나의 방편으로 기존의 측정시스템분석과 측정불확도가 지닌 특징 및 장단점을 비교 분석하여 이를 바탕으로 일반적인 측정 프로세스에서의 변동 요인을 조사하고 분석할 수 있는 방법을 모색하여 하나의 흐름도(flowchart)를 고안하고, 실험을 통하여 이를 실증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 측정 프로세스의 기본 개념

측정 프로세스(measurement process)는 측정 데이터를 얻기 위한 프로세스로서 측정결과에 미치는 모든 인자들과의 상관관계를 맺고 있다. 측정기를 이용하여 측정결과가 얻어지기까지 다양한 측정기기, 시험기기 그리고 시스템이 필요하며 이러한 것은 소프트웨어를 포함하여 측정자, 측정표준, 표준물질, 보조기구, 측정절차와 방법 그리고 측정환경 등에 의해 영향을 받음으로 인하여 측정결과에 변동을 발생시킬 수 있다. <Figure

1>은 측정 프로세스의 기본 개념을 도식화하여 나타낸 것이다[5].



<Figure 1> Measurement Process Definition[5]

2.2 측정시스템 분석의 변동 요인 평가방법

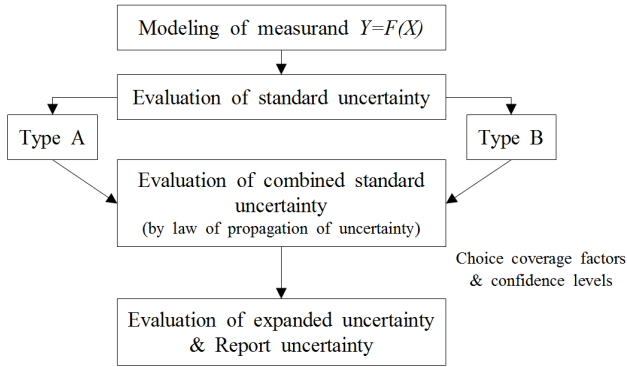
평가는 크게 정확도와 정밀도에 대한 평가를 통해 측정 프로세스의 상태를 알 수 있다. 측정기기를 이용하여 측정결과를 얻는 데에 반복 측정된 측정결과가 중심(기준)위치에서 벗어난 것으로 치우침, 선형성, 안정성을 들 수 있으며 이러한 요인들을 통해 정확도를 평가할 수 있다. 반복성과 재현성을 통해 측정자 또는 측정기의 산포를 관측하여 정밀도를 평가할 수 있다[1, 14, 18, 29].

2.3 측정불확도의 기본 개념

측정의 목적은 측정량의 값 즉, 측정하고자 하는 특정한 양의 값을 결정하는 것으로서 이러한 측정결과는 측정량의 값에 대한 근사값 또는 추정값이다. 따라서 추정된 측정결과에 대한 불확도가 함께 명시될 때에 비로소 참값에 더욱 근접할 수 있다고 볼 수 있다. 측정불확도 표현지침(GUM)에 근거하여 측정불확도는 “어떠한 측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터”로 정의한다.

2.4 측정불확도의 추정방법

GUM에서 제시한 측정불확도를 추정하는 방법은 <Figure 2>의 흐름에 따라 산출된다. 우선 측정 모델을 구축하고, 그에 대한 각각의 표준불확도를 추정하는데 요인의 유형에 따라 A형과 B형으로 구분되며, 이러한 모든 요인을 불확도 전파의 법칙을 이용하여 합성표준불확도를 산정한다. 여기에 유효자유도를 통하여 표준정규분포 또는 t-분포표에서 신뢰구간과 포함인자 k 를 결정하여 최종적으로 확장불확도를 추정하는 흐름으로써 크게 모두 4가지의 단계로 구분하였다[12, 13, 14].



sources : ISO, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, 92-67-10188-9.

<Figure 2> Estimating for Measurement Uncertainty

2.4.1 A형 표준불확도의 추정

반복적인 측정에서 얻어진 통계량으로 평균(\bar{x})과 표준편차(s_x)를 구하여 평균에 대한 표준편차(s_x), 즉, 표준 불확도($u(x)$)를 구한다. 또한 자유도(v)를 추정하여 신뢰성에 대한 근거를 제시한다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \\ s_x &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \\ u(x) &= s_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}}, \\ v &= n - 1 \end{aligned} \tag{1}$$

2.4.2 B형 표준불확도의 추정

과학적인 근거를 둔 정보에 대하여 표준편차를 추정하는 방법으로써 요소가 지닌 확률분포의 유형에 따라 삼각형, 정규분포, 직사각형, 사다리꼴, U자형 등의 확률분포 등을 이용하여 산출한다. B형 불확도의 자유도는 추정된 표준불확도의 확신의 정도에 따라 각각 다르게 추정될 수 있다. 만일 추정된 표준불확도에 대한 확신의 정도가 강하다면 자유도는 무한대(∞)를 적용하여 추정할 수 있으며, 무한대가 아닐 경우 다음의 식에 의하여 추정할 수 있으며, 여기서 R은 상대불확도로서 $R = (100 \cdot \text{추정된 표준불확도에 대한 확신의 정도})$ 를 적용한다.

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

2.4.3 합성표준불확도 추정

합성표준불확도는 모든 표준불확도에 대한 불확도를 추정된 각각의 불확도 기여도를 공급하여 합한 값에 제

곱근을 씌워 다음과 같이 추정한다(RSSM).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \tag{3}$$

2.4.4 유효자유도의 추정

유효자유도는 Welch-Satterthwaite의 공식을 이용한다. 이 값의 크기에 따라 신뢰수준 및 구간이 다르게 적용된다.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{v_1} + \frac{u_2^4(y)}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4(y)}{v_n}} \leq \sum_{i=1}^N v_i \tag{4}$$

2.4.5 포함인자 k의 추정

포함인자는 유효자유도의 크기와 밀접한 관련이 있으며, 유효자유도가 10초과일 경우 표준정규분포상에서 약 95.45%의 신뢰수준에서 $k = 2$ 로 간주하고 그보다 작을 경우는 t-분포표의 95%에서 k값을 참조한다.

2.4.6 확장불확도의 추정

확장불확도는 합성표준불확도(u_c)와 포함인자(k)를 서로 곱하여 계산한다[2, 12, 13, 14].

$$U = u_c \cdot k \tag{5}$$

3. 측정 프로세스의 변동 요인 조사 방법 개발

3.1 측정 프로세스의 변동 요인 도출 및 상관관계

동일한 측정 프로세스의 조건하에서 측정이 이루어진다 하여도 일반적으로 얻어지는 측정결과가 항상 동일하지는 않다. 그 원인은 다양한 오차의 요인들이 엮고자 하는 측정결과에 동시다발적으로 영향을 미치기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 측정자 또는 품질 관계자는 이에 대한 관심을 갖고 지속적으로 그러한 원인에 대한 파악과 해결책을 모색함으로 측정 데이터의 질을 높임으로써 제품의 품질 수준을 상승시키는 데에 노력을 기울여야 할 것이다. 측정 프로세스를 관리해야 하는 목적은 이러한 목적을 충족시키기 위함이며 이러한 관리를 위해서는 어떠한 요인이 얼마의 양으로 영향을 받고 있는지 정량적으로 분석하는 것이 요구되며 이들 요인을 최소화시키기 위한 통제는 가능한지 등 구체적이고 현실 가능한 방안이 모색되어야 한다. 기본적으로 일반적인 모든 측정이 이루어지는 프로세스에는 Input 요소가 존재하며 이를 바탕으로 Output을 얻게 된다. Input의 요소가 양호한

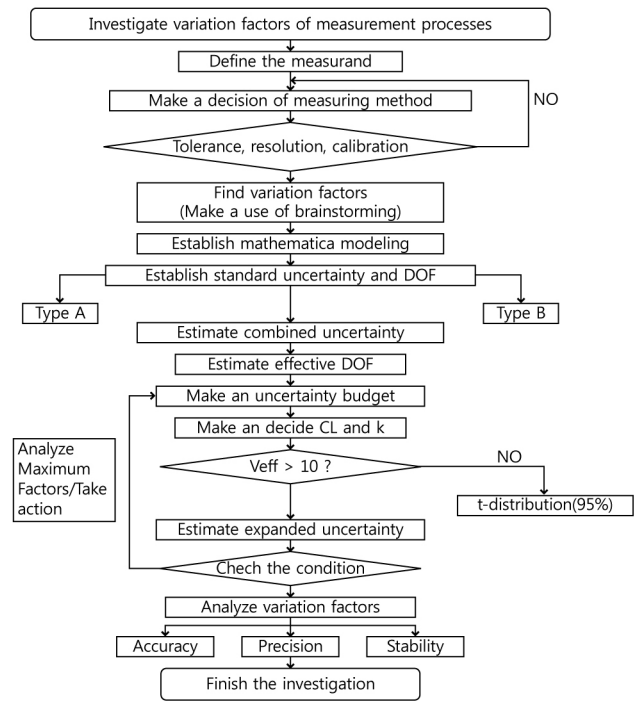
수준일수록 Output의 수준 또한 비례적인 효과를 함께 기대할 수 있다.

3.2 측정불확도와 측정시스템 분석의 특징 비교

측정 프로세스의 변동 요인을 조사할 수 있는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있겠으나 대표적인 방법으로서 측정시스템을 통해 분석이 이루어진다. 특히 현장에서는 이러한 측정시스템의 분석을 통한 변동 요인을 분석하는 것에 대해 이미 익숙하게 접하고 있는 부분이다. 분석의 방식은 다르나 동일한 목적을 지니는 측정불확도는 국제적 동향을 살펴보면 지속적으로 품질의 수준이 상승함에 따라 그러한 측정 결과에 대하여 영향을 미치는 요인들과 그에 대한 정량적인 양이 얼마나 작용하고 있는지에 대한 자료로써 객관적 정보 뿐 아니라 실무적 경험을 통해 추정된 주관적 정보까지 요구되고 있다. 실제 이러한 요구에 대한 제공된 자료는 직접적으로 적용이 되는 경우도 있는 반면, 단지 참조용으로서 얻어진 측정 결과에 대한 불확실한 요인들이 얼마나 어떻게 미치고 있는지를 파악하기 위함일 경우도 있다. 따라서 이러한 측정 프로세스에서 변동 요인을 조사하기 위한 방법으로 측정시스템과 측정불확도의 특징과 장단점에 대한 비교 분석을 통하여 보다 효율적이고 실용적으로 활용할 수 있는 방법에 대하여 살펴보기로 하였다. 본 연구에서 측정불확도와 측정시스템의 특징과 장단점은 <Table 1>에 정리하였다.

3.4 측정 프로세스의 변동 요인 조사 흐름도 개발

어떤 측정량에 대한 결과를 얻기까지 발생 가능한 변동 요인을 도출하고 추정하는 전반적인 방법 및 흐름을 파악하기 위한 flowchart를 개발하고, <Figure 3>에 나타내었다.



<Figure 3> Flowchart of an Investigation Method for Variation Factors of Measurement Processes

<Table 1> Characteristics, Strengths and Weaknesses of MSA and Measurement Uncertainty

| | Characteristics | Strengths | Weaknesses |
|-------------------------|---|--|---|
| MSA | <ul style="list-style-type: none"> • Extensive analysis on variation factors of measurement processes(accuracy, precision, linearity, and stability) • A field-oriented and high system utilization • An autonomous utilization (no legal obligation) | <ul style="list-style-type: none"> • Systematic and settled already at home and abroad • A variety of software programs only for MSA • Possible to separate evaluation between equipment and appraiser variations • Easy to analyze variation factors both long and short terms | <ul style="list-style-type: none"> • It is difficult to consider all actual measuring environment • It is difficult to obtain a true value (reference value) and process variation (spread) for calculation • It is difficult to make the best decision due to a vague criteria |
| Measurement uncertainty | <ul style="list-style-type: none"> • Opinions, there can be existing uncertainties in all measurements and those should be quantified • Mandatory indication of measurement uncertainty on calibration and test certificates under the National Standard Method | <ul style="list-style-type: none"> • Considering all real measuring situations related to 4M 1E • Estimating by the empirical objective as well as subjective judgments about the factors derived • Corresponding to international trends • Providing sufficient information such as measurement results, variation factors and confidence level based on Statistics | <ul style="list-style-type: none"> • Opinions, continuously raised about incompleteness of the methodology of measurement uncertainty(establishing mathematical modeling, estimating one probability distribution with combining several probability distributions, making a mistake of subjective judgment when estimating spread of measurement data, getting accurate information and source) • Field workers burden for applying to general measurement • Ambiguity of understanding, judgment and taking action |

4. 측정 프로세스의 변동 요인 분석

<Figure 3>을 이용하여 측정 프로세스의 변동 요인을 분석하는 사례로 현장에서 길이와 각도 등 다양한 기하학적 요소를 측정하기 위한 용도로 활발히 사용되고 있는 좌표 측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)를 사용하여 측정하고, 그 결과와 결과에 영향을 미치는 불확실한 요인들을 상세히 도출하여 측정불확도, 정확도, 정밀도, 직선성을 분석하는 전체적인 과정을 살펴보고자 한다. 본 연구에서 안정성의 분석은 장기적 시간을 요하므로 배제하고 진행하기로 하였다.

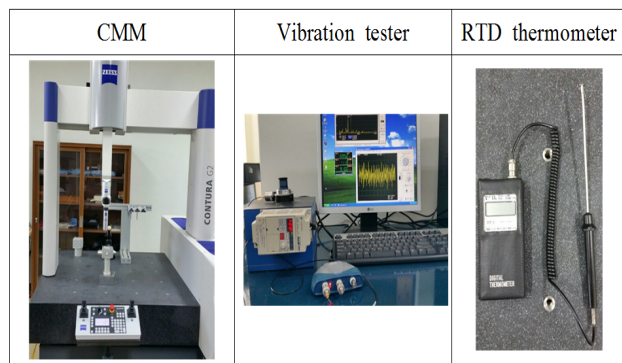
4.1 실험장치 및 방법

4.1.1 실험기기 및 장치

본 연구에 사용된 측정기는 접촉식 좌표측정기, 진동 측정기, 표준 백금온도계이며 측정시편은 자동차의 핵심 부품 중 하나인 실린더 헤드이다.

<Table 2> Specification of Devices

| Device | Model | Specification | Software | Manufacturer |
|------------------|-------------|--|---------------|--------------|
| CMM | CONTURA G 2 | 700×700×600mm (1.8+L/300)μm 0.1 μm/Div | Calypso | Carl Zeiss |
| Vibration tester | B&K 4370 | 0~500 Hz 0.1mV/Div | Easy Scope II | B&K |
| RTD thermometer | DT-5 | -50~200℃ 0.1℃/Div | - | YUIL |

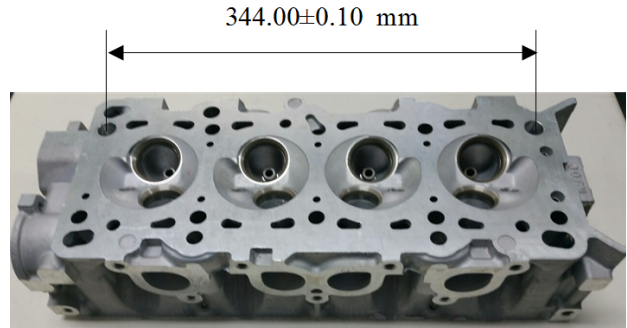


<Figure 4> Device Photos

4.1.2 실험시편 사양 및 측정 방법

본 연구에서 사용된 측정시편은 자동차 엔진부품 중 하나이다. 모기업의 실린더 헤드(cylinder head)로 측정 부위는 부품의 사진과 같이 홀(hole)과 홀의 중심간 거리의 측정이다. 시편의 실제 도면은 업체의 대외비 사정으로

임의의 기준값 및 허용공차를 344.00±0.10mm로 부여하여 분석하였다.



<Figure 5> Workpiece

4.1.3 사전 점검

원활한 측정이 이루어지기 위한 측정의 가장 기본 단계로써 주변 환경으로부터 미치는 인자들에 대한 영향을 살펴보고자 약 1시간 이상의 장비 예열(device warming up)을 시킨 후 사용 장비의 On/OFF에 대한 각각의 진동 측정을 실시하고, 측정 데이터의 안정성을 위하여 일정 공기압의 공급량에 대한 측정을 함께 실시하여 <Table 3>과 <Table 4>와 같이 정리하여 양호한 상태임을 우선적으로 파악한 이후 본 연구를 진행하였다.

<Table 3> Vibration Measurement

(unit : Hz)

| No. | Device OFF | | | Device ON | | |
|-----------|--|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Data | 8.070 | 8.084 | 8.070 | 8.149 | 8.154 | 8.150 |
| \bar{x} | 8.075 | | | 8.151 | | |
| Criteria | Less than 10 Hz(KS B 5542 : 2014)[15]. | | | | | |
| Decision | Accept | | | Accept | | |

<Table 4> Air pressure Measurement

(unit : kPa)

| No. | 1 | 2 | 3 | \bar{x} | Criteria | Decision |
|------|-------|-------|-------|-----------|----------|----------|
| Data | 496.4 | 496.4 | 482.7 | 491.8 | 470~500 | Accept |

4.1.4 실험방법 및 측정결과

동일 시편에 대하여 두 명의 측정자에 의해 각각 10회씩 세 번 반복하여 <Table 5>와 같이 측정의 원시 데이터(raw data)를 확보하고, 통계프로그램 eZ-SPC 2.0을 이용하여 기본적인 통계량을 얻었다.

<Table 5> Measurement Data

(unit : mm)

| No. | A | | | B | | |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1st | 2nd | 3rd | 1st | 2nd | 3rd |
| 1 | 343.9789 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9816 | 343.9782 |
| 2 | 343.9785 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9817 | 343.9781 |
| 3 | 343.9784 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9817 | 343.9781 |
| 4 | 343.9783 | 343.9790 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| 5 | 343.9783 | 343.9789 | 343.9799 | 343.9797 | 343.9817 | 343.9781 |
| 6 | 343.9782 | 343.9790 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| 7 | 343.9782 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9799 | 343.9817 | 343.9781 |
| 8 | 343.9782 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9799 | 343.9817 | 343.9781 |
| 9 | 343.9781 | 343.9792 | 343.9800 | 343.9800 | 343.9817 | 343.9781 |
| 10 | 343.9781 | 343.9793 | 343.9801 | 343.9800 | 343.9817 | 343.9782 |
| \bar{x} | 343.9783 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| s | 0.00024 | 0.00011 | 0.00007 | 0.00016 | 0.00003 | 0.00004 |
| $\bar{\bar{x}}$ | 343.9795 | | | | | |

4.2 CMM을 이용한 측정 프로세스의 변동 요인 조사 방법

<Figure 3>의 흐름에 따라 우선적으로 측정량에 대한 명확한 정의를 내리고, 측정방법을 선정하여 전체 측정 프로세스에서 발생 가능한 불확도 요인들을 도출한다. 이를 정량화시키기 위하여 도출한 요인들을 모두 포함한 수학적 모델을 수립하고, 모든 요인들에 대한 기본적인 추정값 및 표준불확도 등을 추정한다. 이후 추정한 모든 요인들을 합성하고 표준정규분포 상에서 신뢰구간을 부여하여 확장불확도를 추정함으로써 측정불확도의 추정은 종료한다. 이후 각각의 요인이 미치는 불확도의 상태가 양호 또는 부적합한 상태인지에 대한 분석을 거친 후 정확성 평가와 게이지 R&R을 통한 장비의 변동 요인과 측정자(평가자)에 대한 분석 그리고 직선성에 대한 분석을 진행한다.

4.3 변동 요인 분석 및 결과 분석

7개의 측정불확도 주요 인자를 고려하여 기본적 인수학적 모델을 수립하고 측정불확도를 추정하기 위하여 불확도 전파법칙을 이용하여 합성표준불확도의 식을 수립한다. 1차적으로 측정결과의 변동 요인에 대한 측정불확도를 추정하였다. 여기서 l_x 는 실제 측정값을 구하고자 하는 측정량으로써 시편의 홀과 홀의 중심간 거리의 길이 치수다. l_0 는 도면의 기준치수로 344.00mm이다.

$$l_x = l_r + d - (\bar{\alpha} \cdot \Delta t + \Delta\alpha \cdot \delta t)l_0 + \delta_{res} \quad (6)$$

<Table 6> Key Factors on the Measurement Uncertainty

| Types | variables | Key factors on the measurement uncertainty |
|-------|----------------|--|
| A | d | Workpiece measurement errors(random effects, maximum equipment errors, incomplete same measuring points) |
| B | l_r | reference measurement(standards, step gage, probe calibration) |
| | $\bar{\alpha}$ | average coefficients of thermal expansion |
| | Δt | temperature difference between CMM and workpiece |
| | $\Delta\alpha$ | differences between the coefficients of thermal expansion between CMM and workpiece |
| | δt | temperature difference of CMM and workpiece compared with standard temperature |
| | δ_{res} | limitation of CMM's resolution |

$$u_c^2(l_x) = u^2(l_r) + u^2(d) + (\Delta t \cdot l_0)^2 u^2(\bar{\alpha}) + (\bar{\alpha} \cdot l_0)^2 u^2(\Delta t) + (\delta t \cdot l_0)^2 u^2(\Delta\alpha) + (\Delta\alpha \cdot l_0)^2 u^2(\delta t) + u^2(\delta_{res}) \quad (7)$$

각 요인들에 대한 불확도의 유형(A형/B형), 입력변수, 추정값, 표준불확도, 확률분포, 감도 계수, 불확도 기여량, 자유도 및 유효자유도를 한 눈에 알아볼 수 있도록 불확도 총괄표로 정리하였다[18].

<Table 7> Uncertainty Budget[18]

| Type | Variables x_i | Estimator x_i | Standard uncertainty $u(x_i)$ | Probability distribution | Sensitivity coefficient c_i | Uncertainty contribution $c_i \cdot u(x_i)$ | DOF $v(x_i)$ |
|------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|----------------------|
| A | d | -0.0201mm | 1.47 μ m | normal | 1 | 1.47 μ m | 1254883 (∞) |
| B | l_r | 343.9889mm | 1.48 μ m | normal | 1 | 1.48 μ m | 115688 (∞) |
| | $\bar{\alpha}$ | $17.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | $3.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | triangular | 0 | 0 | ∞ |
| | Δt | 0°C | 0.041°C | rectangular | -6.0 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ | -0.24 μm | 51599 (∞) |
| | $\Delta\alpha$ | $11.53 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | $3.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ | rectangular | -275 $^\circ\text{C} \cdot \text{mm}$ | -0.91 μm | ∞ |
| | δt | 0.8°C | 0.23°C | rectangular | -4.0 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ | -0.92 μm | 5628 (∞) |
| | δ_{res} | 0mm | 0.03 μm | rectangular | 1 | 0.03 μm | 200 |
| | l_x | $343.9688 \cong 343.97\text{mm}$ | | - | | 2.466 μm | 214314 (∞) |

4.3.1 신뢰수준 고려 및 포함인자 k 결정

합성표준불확도까지 추정된 것은 점추정으로 이에 대한 신뢰수준 및 신뢰구간을 추정하여 대부분의 측정량이 정규분포 또는 그 밖의 다른 종류의 분포 상에서 어떻게 분산되어 있는지를 나타내기 위한 단계로써 포함인자 k 값을 결정한다. 유효자유도의 크기가 약 214314로 충분하므로 표준정규분포의 신뢰구간 약 95.45%에서 k = 2를 선택한다.

4.3.2 확장불확도 추정 및 보고

확장불확도는 추정된 합성표준불확도에 유효자유도에 의해 추정된 포함인자 k를 곱하여 줌으로써 다음과 같이 산출된다.

$$U = u_c \times k = 2.466\mu\text{m} \times 2 = 4.932\mu\text{m} \cong 5.0\mu\text{m}$$

즉, 추정된 측정결과 및 측정불확도는 다음과 같다.

$$343.97\text{mm} \pm 5.0\mu\text{m} (\text{신뢰수준 약 } 95.45\%, k = 2)$$

4.4 측정시스템 분석

제품의 기준치수와 허용공차는 $344.00 \pm 0.1\text{mm}$ 이며 이에 대한 측정불확도의 추정 결과는 $343.97\text{mm} \pm 5.0\mu\text{m}$ (신뢰수준 약 95.45%, k = 2)이다. 확장불확도의 값이 약 $5.0\mu\text{m}$ 로 허용공차와 비교해 본다면 양호한 상태로 판단할 수 있다. 따라서 <Figure 9>의 flowchart의 흐름에 따라 다음 단계로 정확성, 정밀도, 직선성의 평가를 이어 진행한다.

4.4.1 정확성 평가

<Table 8> Accuracy Evaluation

(unit : mm)

| No. | A | | | B | | |
|-----------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1st | 2nd | 3rd | 1st | 2nd | 3rd |
| 1 | 343.9789 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9816 | 343.9782 |
| 2 | 343.9785 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9817 | 343.9781 |
| 3 | 343.9784 | 343.9791 | 343.9799 | 343.9796 | 343.9817 | 343.9781 |
| 4 | 343.9783 | 343.9790 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| 5 | 343.9783 | 343.9789 | 343.9799 | 343.9797 | 343.9817 | 343.9781 |
| 6 | 343.9782 | 343.9790 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| 7 | 343.9782 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9799 | 343.9817 | 343.9781 |
| 8 | 343.9782 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9799 | 343.9817 | 343.9781 |
| 9 | 343.9781 | 343.9792 | 343.9800 | 343.9800 | 343.9817 | 343.9781 |
| 10 | 343.9781 | 343.9793 | 343.9801 | 343.9800 | 343.9817 | 343.9782 |
| \bar{X} | 343.9795 | | | | | |
| Bias | $\bar{X} - \text{reference value} = 343.9795 - 344.00 = -0.0205\text{mm}$ | | | | | |
| % Bias | $(\text{Bias} / \text{process spread}) \times 100 = (0.0205 / 0.2) \times 100 = 10.25\%$ | | | | | |

4.4.2 정밀도 평가

<Table 9> Valuation of Gage R and R

(unit : mm)

| No. | A | | | B | | |
|------------------|---|-----|-----|---------------------------------------|-----|-----|
| | 1st | 2nd | 3rd | 1st | 2nd | 3rd |
| \bar{X} | $\bar{X}_A = 343.9791$ | | | $\bar{X}_B = 343.9799$ | | |
| \bar{R} | $\bar{R}_A = 0.0020$ | | | $\bar{R}_B = 0.0036$ | | |
| $\Delta \bar{X}$ | $\bar{X}_{\text{max}} - \bar{X}_{\text{min}} = \bar{X}_B - \bar{X}_A = 343.9799 - 343.9791 = 0.0008\text{mm}$ | | | | | |
| \bar{R} | $(\bar{R}_A + \bar{R}_B) / 2 = 0.0056\text{mm}$ | | | | | |
| % E.V. | * $E.V. = \bar{R} \times K_1 = 0.0056 \times 3.05 = 0.017$ * $\% E.V. = 100[(E.V.) / (\text{tolerance})] = 100[(0.017) / (0.2)] = 7.0\%$ | | | | | |
| % A.V. | * $A.V. = \sqrt{[(\Delta \bar{X} \times K_2)^2 - (E.V.)^2 / (n \times r)]}$ $= \sqrt{[0.0008 \times 3.65]^2 - [(0.017)^2 / (10 \times 3)]} = 0.00105$ * $\% A.V. = 100[(0.00105) / (\text{tolerance})] = 100[(0.00105) / (0.2)] = 0.53\%$ | | | | | |
| % GRR | * $GRR = \sqrt{(E.V.)^2 + (A.V.)^2} = \sqrt{(0.017)^2 + (0.00105)^2} = 0.01703$ * $\% GRR = 100[(R\&R) / (\text{tolerance})] = 100[(0.01703) / (0.2)] = 8.52\%$ | | | | | |
| Criteria | * $GRR \leq 10\%$ * $10\% < GRR \leq 30\%$ * $GRR > 30\%$ | | | accept may be acceptable reject | | |

4.4.3 직선성 평가

<Table 10> Evaluation of Linearity

(unit : mm)

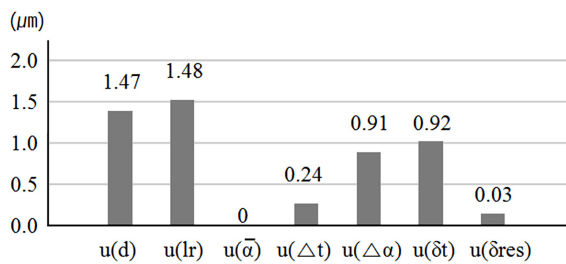
| No. | A | | | B | | |
|--------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1st | 2nd | 3rd | 1st | 2nd | 3rd |
| \bar{X} | 343.9783 | 343.9791 | 343.9800 | 343.9798 | 343.9817 | 343.9781 |
| Bias ($\bar{X} - l_0$) | -0.0217 | -0.0209 | -0.0200 | -0.0183 | -0.0183 | -0.0219 |
| Linearity | $Bias_{\text{max}} = -0.0219$ | | | | | |
| % Linearity | * $\% \text{ linearity} = (\text{linearity} / \text{selected range}) \times 100$ $= (0.0219 / 0.2) \times 100 = 11.0\%$ | | | | | |

4.5 측정불확도의 종합적 분석

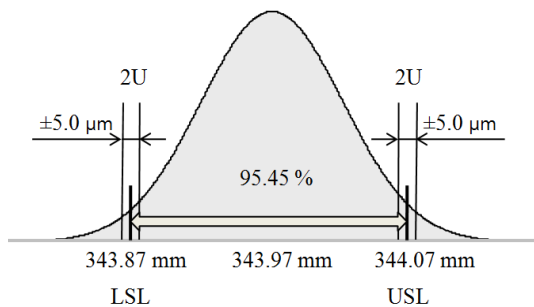
추정된 불확도 기여량은 불확도 전과 법칙에 의하여 각각의 인자들의 값을 제공하여 이들을 모두 합한 후 루트를 씌워 합성표준불확도를 구하는 데에 이용된다. <Figure 6>은 불확도 기여량의 절대값을 나타낸 것으로써 측정불확도의 7가지 요인들 중 반복 측정에 의한 영향 $u(d)$, 표준기의 불완전성에 의한 영향 $u(l_r)$, 열팽창계수의 차에 의한 영향 $u(\Delta\alpha)$, 측정 당시 실험실의 환경 변화(온도)에 대한 영향 $u(\delta_t)$ 이 미치는 정도가 나머지 요인들에 비해 크게 나타난 것을 알 수 있다.

또한 이에 대한 측정결과와 확장불확도는 $343.97\text{mm} \pm 5.0\mu\text{m}$ 로 신뢰수준 약 95.45%, 포함인자 k = 2를 얻을 수 있었다. 이는 추정된 대부분의 값들이 표준정규분포의 약 95.45%의 신뢰구간에 포함될 것임을 의미한다. 측정불확

도는 보정값의 개념처럼 직접 가감하여 적용하는 것은 아니지만 이는 사용자의 의사결정에 따라 적용의 유무가 결정될 수 있는 사안이다. 본 논문에서는 추정된 측정불확도를 도면에 제시된 공차를 적용하여 분포를 살펴보기로 하였다. <Figure 7>에서 알 수 있듯이 추정된 결과에 허용 공차를 적용하면 $343.97 \pm 0.1 \text{mm}$ 로 되며 여기에 약 $\pm 5.0 \mu\text{m}$ 의 확장불확도를 함께 적용하면 아래와 같은 분포로 형성됨을 알 수 있다. 이는 실제 시편 도면의 기준값이 $344.0 \pm 0.1 \text{mm}$ 에 비추어 볼 때 하한치로 약간 치우쳐 있음을 알 수 있다. 또한 이에 대한 추정된 확장불확도의 U값을 시편의 공차에 대한 퍼센트로 본다면 $U/T = (0.01/0.2) \times 100 = 5.0\%$ 로 전체 허용공차에 약 5.0%를 차지하는 양만큼의 불확도가 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉, 추정된 측정불확도만 본다면 양호한 것을 알 수 있으나 공차를 적용한 하한치(LSL)에 측정불확도 $5 \mu\text{m}$ 를 적용하면($343.89 - 0.005$) = 343.865mm 로써 도면의 하한치인 343.9mm 에서 0.035mm 를 벗어난 상태임을 알 수 있다. 이것은 정확도에 대한 추가적인 검토 및 조치가 요구될 수 있는 사항으로 볼 수 있으며 이러한 부분은 flowchart의 다음 단계인 정확도 또는 치우침의 분석에서 자세히 살펴볼 수 있다.



<Figure 6> Uncertainty contribution

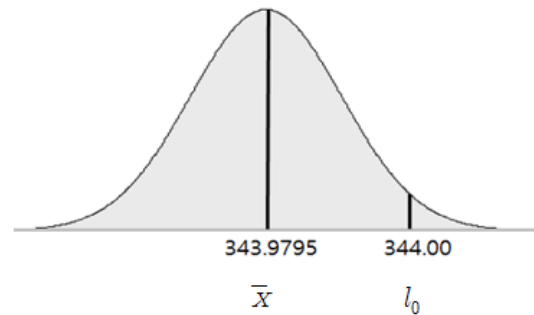


<Figure 7> Impact of the Measurement Uncertainty on Production Tolerance

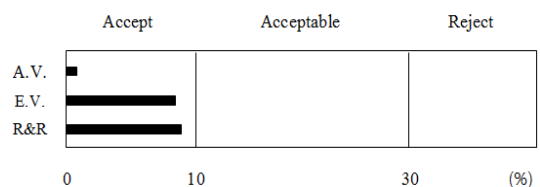
4.5 측정시스템의 종합적 분석

측정시스템 분석을 이용하여 정확성, 정밀도(게이지 R&R), 직선성에 대한 평가를 실시한 결과 측정자들 간의 변동

은 게이지 R&R에서 알 수 있듯이 매우 미미한 것을 알 수 있다. 반면 장비의 변동은 전체 변동의 대부분을 차지하는 것으로써 이는 판정 기준 10% 이내에 포함되므로 양호하다고 판정을 내릴 수는 있겠으나 지속적인 양호 상태를 유지하기 위해서는 장비에 대한 검토 및 관리가 필요하다고 볼 수 있다. 또한 이러한 장비 변동의 영향으로 인해 전체적인 정확성과 직선성에도 기준값으로부터 하한치로 벗어나게 된 원인임을 예측할 수 있다. 직선성은 약 11%로 얻어졌으며 이는 일반적으로 직선성은 허용공차에 대하여 10%를 초과하지 않는 것을 권장하고 있으므로 관리상태를 벗어난 것임을 알 수 있다. 따라서 전반적으로 장비에 의한 영향이 공통적으로 미치고 있음을 알 수 있으며 이에 대한 적절한 조치 및 예방 대책을 마련해 두는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



<Figure 8> Result of the Accuracy Evaluation



<Figure 9> Result of the Precision Evaluation

5. 결론

본 연구에서는 측정 프로세스의 변동 요인을 조사하기 위한 방법으로 측정불확도와 측정시스템이 지닌 특징과 장단점을 분석하여 이를 바탕으로 실용적인 분석방법 및 절차를 위한 하나의 흐름도(flowchart)를 제시하였으며, 이러한 흐름에 따라 사례를 통하여 전반적인 측정 프로세스에서 존재 가능한 측정불확도의 요인을 도출하여 GUM의 지침에 따라 발생 가능한 요인별 객관적·주관적 방법으로 변동량을 정량적으로 추정할 수 있었다. 또한 측정불확도에서는 분석이 어려운 장비와 작업자에 대한 변동량의 분리 평가 및 정확도 등을 측정시스템 분석을

통해 더욱 다양하게 분석하고 평가할 수 있었다. 따라서 상호 간에 존재하는 단점은 보완하고 장점을 보장함으로써 변동 요인에 대한 면밀한 분석이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 위의 연구결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 측정 프로세스의 변동 요인을 조사하는 방법에는 기존의 측정시스템 분석과 측정불확도의 추정 방법을 적용할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 실용적인 변동 요인을 조사하기 위한 방법으로써 측정시스템 분석과 측정불확도를 활용하여 분석할 수 있는 flowchart를 고안할 수 있었다.
- (3) 하나의 사례로써 길이 관련량에 대한 측정 프로세스의 변동 요인에 대한 측정불확도와 정확성, 정밀도(장비 변동, 측정자간 변동), 직선성을 분석할 수 있었다.
- (4) 제시한 flowchart를 이용하여 길이 분야뿐 아니라 다양한 측정량에 대한 일반적인 측정 프로세스에서의 변동 요인에 대한 조사 및 분석이 가능하며, 실제 산업현장에서의 품질 및 측정분야의 관련 실무자에게 유용한 정보를 제공할 수 있는 실용적인 방법이 될 수 있음을 예측할 수 있었다.

본 연구를 진행하면서 정량적인 데이터를 추정한 결과에 대하여 실질적으로 현장 적용이 가능한 명확한 판정기준 또는 표준화된 자료의 필요성이 요구됨을 알 수 있었다. 또한 측정불확도가 하나의 시스템으로 활용될 수 있도록 지속적인 연구와 개발이 이루어져야 함을 제시하고자 한다.

References

- [1] Borrer, C.M., The Certified Quality Engineer, Handbook, *ASQ Quality Press*, 2009.
- [2] Bucher, J.L., The Metrology Handbook, ASQ, 2004, pp. 303-306, pp. 311-320.
- [3] Choi, D.Y., Analysis and evaluation on Variables and uncertainty of ultra-precision position system from environmental alteration, Hanyang University, 2013.
- [4] Choi, S.H., A Study on the Reduction of Uncertainty in Measurement of Hand-transmitted Vibration, Ajou University, 2007.
- [5] Dietrich, E. and Schulze, A., Measurement Process Qualification, Q-DAS, 2006.
- [6] Eom, H.W., Evaluation method and uncertainty analysis for the positioning error of three-DOF manipulator, Hanyang University, 2005.
- [7] Ha, C.I., International Standardization Trend, *Report of Korean Agency of Technology and Standards*, 2008, Vol. 153, pp. 1-5.
- [8] Hwang, J.D., A Study on the Vibration Tests for Reliability of the Mechanical Part Analytical Models, Changwon National University, 2012.
- [9] Jang, W.S., Evaluation of Uncertainty in the results of Material Testing, Yeungnam University, 2005.
- [10] Kang, G.H., A Study on Measurement Error and Uncertainty from the I-V Performance Test of Photo voltaic Modules, Konkuk University, 2009.
- [11] Kang, T.W., Extrapolation and Correlation in Radiated Emission Measurements and Uncertainty in EMC Measurements, Pohang University and Science Technology, 2000.
- [12] KATS, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, KS Q ISO IEC 17025, 2011.
- [13] KATS, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, KS Q 4001, 2015.
- [14] KATS, *Measuring system management guidelines for industry research and development*, KASTO, 2006.
- [15] KATS, *Test code for accuracy of coordinate measuring machines*, KS B 5542, 2014.
- [16] Kim, J.S., A study on the Modeling and Propagation to Evaluate Uncertainties in Measurement Results, Konkook University, 2002.
- [17] Kim, Y.M., Development of an Performance Evaluation Method for Vehicle Detector Speed Measurement Applying Uncertainty in Measurement, Ajou University, 2009.
- [18] Kimothi, S.K., The Uncertainty of Measurements, ASQ Quality Press, 2001.
- [19] Lee, C.J., A study on the technique of measurement uncertainty in the evaluating specification of heavy electrical equipment, Hanyang University, 2001.
- [20] Lee, C.Y., Development of a method for calculating uncertainty value of water quality auto-measurement system, Chungnam National University, 2007.
- [21] Lee, H.S., Evaluation of uncertainties in the friction coefficient of a brake disk lining of passenger trains, Yonsei University, 2004.
- [22] Lee, J.H., Analysis of Uncertainty in the Result of Measurement of Fixed Coaxial Attenuator, Kyungpook National University, 2008.
- [23] Lee, S.H., Uncertainty improvement of the voltage ratio in a DC High Voltage Divider by evaluation of the ratio

- and the voltage coefficient, Chungnam National University, 2010.
- [24] Lee, S.Y., Uncertainty evaluation of the digital imaging system for dimensional metrology, *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, 1998.
- [25] Lim, C.I., Study on Preparation of Fly Ash for Dioxin Proficiency Testing and Uncertainty Estimation, Kwangwoon University, 2006.
- [26] Park, J.H., A study on evaluating uncertainty values of the fundamental measurements in Nakdong River National Water Quality Auto-measurement System, Kyungpook National University, 2012.
- [27] Ryu, H.J., An Empirical Study on the Operations of Measuring Instrument. Inha University, 2010.
- [28] Ryu, Y.C. and Kang, C.W., The Economic Design of $\bar{X}-S$ Chart Considering Measurement Error, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2000, Vol. 23, No. 61, pp. 89-98.
- [29] Seo, S.K., Two-Dimensional Assessment for Measurement for Measurement System Analysis, *Journal of the Korean Society of Quality Management*, 2013, Vol. 42, No. 4, pp. 607-616.
- [30] Yoon, D.J., The effects of uncertainty on the tolerance of surface roughness, Kyungpook National University, 2006.
- [31] Yoon, G.I., Uncertainty Evaluation for the Defect Length Measurements by the Ultrasonic Test, Soongsil University, 2011.

ORCIDIn-Soo Choi | <http://orcid.org/0000-0002-0642-693X>Chang Wook Kang | <http://orcid.org/0000-0003-2923-1147>