

정밀가공 부품 검사에 사용되는 삼차원측정기의 측정불확도 연구

이갑조*, 오상록+, 김종관++

A Study on Measurement Uncertainty of CMM used for Inspection of Precision Machined parts.

Gab-Jo Lee* (Graduate School, Chosun University, Carrier Ltd. Korea), sang-Lok Oh+ (Graduate School, Chosun University), Jong-Kwan Kim++ (Dept. of Mechanical Eng., Chosun University)

Abstract

The machining parts must be produced within the specification of drawing and those will be able to meet function and efficiency. At that time, it is necessary not only precision machine or machining technique but also the measurement technique is very important. So, the improvement of precise measurement technique is to be joined together at once with improvement of product technique. Finally, the quality and value of the parts are decided by precision measurement. This paper aims to study on the measurement uncertainty when the machined parts are inspected with 3-dimensional coordinate measuring machine. The objectives are to remove an error of measurement and to improve quality and productivity of the mass products.

Key Words : measurement uncertainty(측정불확도), 3-dimensional coordinate measuring machine(삼차원 측정기), mass products(양산제품)

1. 서론

국가 경쟁력이 더욱 치열해지고 제품의 고급화와 고부가 가치화가 절실하게 요구됨에 따라 양산 부품들의 형상은 더 까다로워지고 품질의 수준도 더욱 높아지고 있다. 뿐만 아니라 산업발전을 주도하는 핵심 기반시설인 초정밀 공작 기계의 발전으로 CNC 기술이 도입되어 기하학적 특성¹⁾의 다양한 형태를 지닌 정밀한 부품들을 생산할 수 있게 되었다. 초정밀 제품을 제작하거나 수정, 보완하기 위해서는 고성능 정밀기계도 필요하지만, 그 부품이 설계자의 의도대로 정확하게 가공되었는지를 판단하기 위해서는 정밀 측정

기에 의한 측정기술이 필요하게 되며, 이들의 상호 협조 없는 정밀하고 호환성 있는 제품의 생산은 기대할 수 없다. 복잡한 형상의 부품에 대한 기하학적 특성을 공간좌표 상에서 쉽게 측정할 수 있도록 제작된 측정기가 삼차원 측정기(CMM)이며, 1950년대 영국의 Ferranti사에서 최초로 개발된 이래 가공기술의 발전과 함께 측정기술²⁻⁴⁾의 발전이 급진전되어 지금은 CNC, CAD/CAM 기술과 삼차원 측정기술이 접목되어 보다 용이하게 국내산업 현장에서 서서도 사용되고 있다. 최근 산업이 선진화 고도화되고 경제의 글로벌(Global)화가 진행되어 생산제품의 품질이

* 이갑조, 조선대학교 기계공학과 대학원 (gj.lee@carrier.co.kr)

주소: 501-759, 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 오상록, 조선대학교 기계공학과 대학원

++ 김종관, 조선대학교 기계공학과

기업이나 국가의 기술경쟁력을 결정짓는 중요한 요인이 되기 때문에 부품의 품질검사에 사용된 측정기술이나 측정불확도⁵⁻⁸⁾의 산출과 평가가 양산제품의 품질향상을 위하여 더욱더 중요시 되고 있다. 이에 따라 ISO는 관련국제기구와 합동으로 “측정불확도 표현지침”을 발간하였으며, 현재로서는 불확도 평가와 표현에 있어 가장 절적인 접근방법으로 인정받고 있기 때문에 많은 나라들이 ISO의 지침을 그대로 자국기준으로 받아들이고 있다. 우리나라도 최근 수년 동안 정부와 국가 투자연구기관에서 ISO 지침서를 기준으로 측정불확도 평가와 표현방법 보급에 노력하여 대부분의 현장에서 총론적인 이해 수준에는 도달하였으나, 이제는 실무 적용에 용이한 측정분야별 사례연구가 절실히 필요한 실정이다. 측정결과와 신뢰도를 나타내는 정량적인 지표인 측정불확도가 표시되지 않은 측정결과는 신뢰성 문제로 산업체에서 품질 수준에 대한 결과 판정시 논쟁의 원인이 되기도 한다. 따라서 기능에 중요한 영향을 미치는 항목이나 요구되는 정확도가 높은 측정일수록 측정불확도가 표시되어야 한다. 본 연구에서는 산업현장에서 절삭가공되는 정밀부품들의 형상공차를 삼차원측정기로 측정함에 있어서 측정결과에 영향을 주는 측정불확도를 평가하여 측정값의 신뢰범위를 고찰해 보고자 한다.

2. 측정 불확도 이론

2.1 측정불확도 개요

불확도(Uncertainty)란 참값이 존재하는 범위를 나타내는 추정값을 말한다. 일반적으로 측정은 유한한 측정을 하게 되며, n번 측정한 대표값으로 산술 평균값을 취하므로 이를 표본평균 \bar{x} 라고 하며, 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

측정을 무한히 반복하면 측정결과와 분포함수는 정규 분포에 근사하겠지만 실제 측정에 있어서 유한한 측정을 행하기 때문에 표본평균 \bar{x} 가 무한한 측정의 평균값(모평균)인 μ 와 일치하지 않는다. 그러나 \bar{x} 에 일정범위를 부여하고 그 범위 내에서 일정 확률로 기대값 μ 가 존재하는 것으로 표현은 가능하다. 일반적으로 모평균 μ 와 참값을 정확히 알 수는 없지만 참값이 표본평균 \bar{x} 의 어떤 범위내에 일정

한 확률로 존재한다고 추정할 수 있으며 이 때의 범위를 불확도라고 정의 한다.

2.2 삼차원 측정에서 발생하는 불확도 요인

접촉식 삼차원측정기를 이용하여 가공부품의 치수나 형상공차를 측정할 때 나타나는 일반적인 오차는 계기오차, 환경⁹⁾오차, 개인오차 등이며, 측정불확도에 영향을 미치는 요인이기도 한다. 그러나 현재까지 불확도 요인에 대한 시험이나 연구가 전무한 실정이므로 본 연구에서는 삼차원측정기의 교정 시 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 아래의 항목들을 선정하여 측정불확도를 평가하였다.

- 부품의 반복측정에서 발생하는 오차가 미치는 영향
- 접촉식 삼차원측정기의 계기 오차가 측정에 미치는 영향
- 측정 환경(온도)에 의해서 발생하는 오차의 영향

2.3 측정불확도의 평가 이론

본 실험에서는 측정불확도 평가에서 구체적인 통계적 방법이나 다양한 가능성에 기초한 이론적 접근방법을 배제하고 산업현장에서 삼차원측정기를 다루는 측정 실무자가 쉬게 접근하여 활용할 수 있도록 하는데 역점을 두고 삼차원측정에서 발생하는 불확도 요인을 중심으로 실용적인 측정불확도를 산출할 수 있도록 하였다.

2.3.1 A형 표준불확도의 평가

대부분 측정량 Y는 직접 측정되지 않고 측정방정식이라 부르는 함수관계 f를 통하여 N개의 다른 양 X_1, X_2, \dots, X_n 으로부터 결정 된다면 측정량 Y는.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

Y의 추정값은 y로 표시하며 N개의 입력량 X_1, X_2, \dots, X_n 의 입력 추정값 x_1, x_2, \dots, x_n 을 이용하여 식(2)로부터 얻어진다. 따라서 측정결과인 출력 추정값 y는,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

n개의 독립된 반복 관측값으로부터 추정되는 입력량 X_i 에 대하여 식(1)로부터 얻어진 산술평균이 식(3)으로 사용되어 측정결과 y를 결정한다. 그러므로 입력량 X_i 가 가질

수 있는 값들의 빈도분포로부터 얻어진 입력량의 추정값 x_i 에 대한 표준불확도 $u(x_i)$ 는 식(4)로 표현된다. 여기서 s 는 추정표준편차, n 은 측정회수이다.

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

2.3.2. B형 표준불확도의 평가

반복된 관측으로부터 얻어지지 않은 입력량 X_i 의 추정값 x_i 에 대하여 관련된 추정분산 $u^2(x_i)$ 또는 표준불확도 $u(x_i)$ 는 X_i 의 변동성에 관하여 얻을 수 있는 모든 정보에 근거한 과학적 판단에 의해 평가된다. 실험에서의 B형 표준불확도는 대칭 직사각형 분포에서 입력량 X_i 값이 a 와 a_+ 구간에 있을 확률이 1이고 이 구간밖에 있을 확률이 반드시 0인 경우로 가정하여 계산하였다. X_i 의 기대값 x_i 는 구간의 중앙점 $x_i=(a_- + a_+)/2$ 되므로 추정분산 $u^2(x_i)$ 는,

$$u^2(x_i) = (a_- - a_+)^2 / 12 \quad (5)$$

만약 한계값들 사이의 차($a_+ - a_-$)를 $2a$ 라고 한다면,

$$u^2(x_i) = a^2 / 3 \quad (6)$$

따라서 표준불확도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x_i) = a / \sqrt{3} \quad (7)$$

사용한 측정기의 교정성적서와 같은 “외부에서의” 정보에 의한 불확도는 일반적으로 정규분포를 하고 있다고 가정할 수 있을 것이다. 이때 적용될 수 있는 B형 표준불확도는 $u(x_i) = a/k$ 로 계산할 수 있다.

2.3.3. 합성표준불확도

측정값의 추정값 y 는 식(3)과 같이 입력량의 추정값 x_1, x_2, \dots, x_n 들의 함수로 표현되기 때문에 y 의 표준불확도는 x_i 의 표준불확도를 제곱합의 제곱근법(RSSM: Root Sum Square Method)으로 합성하여 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 측정량의 추정값 y 의 표준불확도를 합성표준불확도라 부르고 $u_c(y)$ 로 표현한다. 따라서 합성표준불확도 $u_c(y)$ 는 측정량의 추정값 y 에 대한 추정 표준편차이다. 실험에서의 입력량들은 서로 상관관계가 없이 독립적으로 구해졌으

므로 공분산이 0이되며 합성표준불확 $u_c(y)$ 는 합성분산인 $u_c^2(y)$ 의 양의 제곱근으로서 다음 식으로 구해진다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (8)$$

f 는 식(2)와 같은 함수이고 $u(x_i)$ 는 x_i 의 표준불확도, 또 $C_i = \partial f / \partial x_i$ 는 감도계수라 한다.

2.3.4 확장불확도

측정값의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과와 주위의 어떤 구간을 정의해줄 수 있는 불확도의 척도가 필요하게 되는데 이 때 이러한 요구조건을 충족시키는 불확도의 추가적인 척도를 확장불확도(U)라 하며, $u_c(y)$ 와 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다. k 는 포함인자 이다.

$$U = k u_c(y) \quad (9)$$

따라서 측정결과는 $Y=y \pm U$ 로 간단하게 표현된다. 이 표현이 나타내는 것은 측정량 Y 에 대한 최적의 추정값은 y 이고 Y 값이 이루는 분포의 대부분이 $y-U$ 에서 $y+U$ 까지의 구간에 포함될 것으로 기대된다는 것이다. 또 이 구간은 $y-U \leq Y \leq y+U$ 로 표현하기도 한다.

포함인자 k 를 구하기 위해서는 합성표준불확도 $u_c(y)$ 의 유효자유도를 추정하여야 하는데, 이 유효자유도(V_{eff})는 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 식(10)과 같이 추정한다. 유효자유도는 $u_c(y)$ 가 측정량 Y 의 표준편차를 얼마나 잘 추정하였는가를 나타내는 것으로서 “합성표준불확도의 불확도 척도”라 할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (10)$$

여기서 ν_i 는 $u(x_i)$ 의 유효자유도로서 A형 표준불확도의 평가에서는 $\nu = n - 1$ 로, B형 표준불확도의 평가에

서는 $\nu_i \approx \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2$ 로 구해진다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 접촉식 삼차원측정기는 영국 Ferranti 사 제품으로 측정범위가 750 x 750 x 500 mm이며 정확도는 $3+L/300 \mu\text{m}$, 분해능은 $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 측정 순서를 컴퓨터에 입력시키거나 프로그램을 작성하여 입력하여 두고 필요할 때마다 불러내 작동을 명령하면 측정기 스스로 컴퓨터 제어에 의해 측정이 가능한 자동식 삼차원 측정기(CNC Type CMM)이며, 보조기능으로 조이스틱이 부착되어 단품의 측정 등 반복작업이 필요치 않은 경우에도 용이하게 사용할 수 있다.

측정기의 기계적 구조는 Moving Bridge이며 이송속도 380 mm/sec, 검출장치는 접촉식 Probe 시스템이다. Photo. 1은 본실험에 사용된 삼차원측정기 형상이다.



Photo. 1 Photograph of CMM

3.2 실험에 사용된 측정부품

측정실험에 사용된 절삭가공 부품은 에어컨용 압축기의 핵심부품인 실린더로 기하학적 특성의 형상 및 위치공차가 적용되어 측정결과에 대한 신뢰도가 제품의 성능을 결정 지을 수 있는 부품이다. Fig. 1에서 보여주고 있는 5개의 위치도는 샤프트의 축이 실린더의 축과 잘 정렬(Align)되어 기능을 원활히 수행할 수 있도록 샤프트를 잡아주는 베어링이 실린더에 체결되는 위치이다. 이와 같이 제품의 성능에 지대한 영향을 미치고 있는 항목에 대해 측정중 발생할 수 있는 불확도 성분을 고찰하여 양산제품의 품질향상에 기여해 보고자 본 부품을 연구대상으로 선정하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 부품의 사진을 나타낸 것이다.

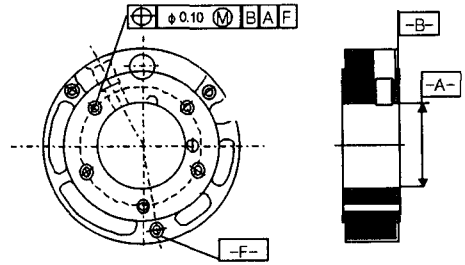


Fig. 1 Drawing of Cylinder



Fig. 2 Photograph of Cylinder

3.3 실험 방법

절삭가공된 부품의 측정결과에 대한 신뢰성 확보와 호환성 유지를 위하여 Fig. 1에서 보여주고 있는 위치정도를 준비된 삼차원측정기로 측정된 후 측정불확도를 산출하여 고찰하는 방법이다. 측정은 절삭가공된 부품을 세척후 충분히 정밀측정실에서 온도평형을 유지시키고 측정시 발생할 수 있는 개인오차를 최소화하기 위하여 CNC 자동 프로그램을 이용하여 측정을 실시하였다. 측정회수는 5회로 하였으며 측정시 온도가 미치는 영향에 대한 평가는 국가교정기관의 환경조건을 적용하였다. 삼차원측정기의 지시값을 M, 삼차원측정기의 참값을 S, 삼차원측정기와 측정시료의 평균 열팽창계수를 α , 삼차원측정기와 측정시료의 온도차를 Δt , 측정시료의 길이를 L이라 한다면, 측정시 표준온도에서의 지시오차 값 E는 다음과 같은 모델을 통해서 구할 수 있다.

$$E = M - S + L \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Photo. 2는 삼차원측정기를 이용하여 실린더를 자동으로 측정하고 있는 사진이다.

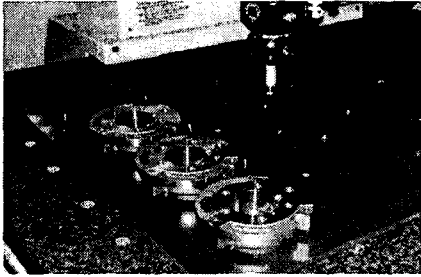


Photo. 2 Photograph of Measuring Cylinder

4. 실험결과 및 고찰

4.1 반복측정에 대한 표준불확도

본 연구에서 측정에 사용된 부품 3개에 대한 구멍의 위치정도 측정결과는 Table 1과 같다. 측정결과는 원주피치(Pitch Circle) 120 mm이하에서 5개의 구멍에 대한 위치도의 허용공차 100 μm 에 대한 평균값과 표준편차값을 표기하였으며, 각각의 구멍은 MMC로 가정 했다. 여기서 반복측정에 대한 표준불확도의 산정은 표준편차값이 가장 크게 나타난 시료 1번의 구멍 5번 4.50 μm 로 하였다.

Table 1 Measurement Result of Hole Position

Parts No.	Hole position (unit: μm)					
	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5	
1	Average	82.3	48.4	42.9	84.8	95.3
	Standard Deviation	3.03	3.81	3.42	4.01	4.50
2	Average	67.7	24.2	26.6	55.4	71.2
	Standard Deviation	3.32	3.60	3.11	4.34	3.52
3	Average	57.4	26.5	30.6	41.6	53.7
	Standard Deviation	3.97	3.89	3.53	3.51	4.18

3.18 μm 를 식 (4)에 대입하여 A형 표준불확도(u_A)를 계산하면,

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{4.50}{\sqrt{5}} = 2.013 \cong 2.02 \mu\text{m}$$

감도 계수는,

$$\frac{\partial E}{\partial M} = 1$$

A형 불확도 평가에 대한 자유도(ν)는 다음과 같다.

$$\nu = n - 1 = 5 - 1 = 4$$

4.2 측정기가 측정에 미치는 영향에 대한 표준 불확도

측정중 측정기가 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 인자로는 삼차원측정기의 불확도를 꼽을 수 있으며 이 불확도는 교정성적서의 결과에서 인용이 가능하다. 본 실험에 사용한 측정기의 교정성적서에 표기된 불확도는 $U=(4.5+5.0L) \mu\text{m}$ ($k=2, L=m$)이며. 여기서 120 mm이하의 측정일 때 불확도를 계산하면 5.1 μm 가 된다. 이 값으로 식 (7)을 이용하여 B형 표준불확도 (u_{B1})를 계산하면,

$$u_{B1} = \frac{a}{k} = \frac{5.1}{2} = 2.55 \mu\text{m}$$

이 때의 감도계수는,

$$\frac{\partial E}{\partial S} = -1$$

자유도는 측정기의 교정성적서에 대한 불확도를 100% 신뢰하고 인용하였으므로 무한대($\nu = \infty$)가 된다.

4.3 측정중 온도변화가 미치는 영향에 대한 표준불확도

측정중 온도변화가 미치는 영향은 온도 변화율을 적용하여 계산할 수 있으므로 본 실험을 위한 정밀측정실의 환경조건이 측정기와 측정시료 사이에서 발생할 수 있는 최대 온도 편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 추정할 수 있다. 또한 측정기와 측정시료의 평균 열팽창계수를 11.5×10^{-6} , 측정시료의 위치도를 측정하는 피치원이 120 mm이므로 이를 측정길이 L로 적용하여 식 (7)로 계산하면 표준불확도 u_{B2} 는,

$$u_{B2} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \cong 0.58 \text{ }^\circ\text{C}$$

이 때의 감도 계수는

$$-\frac{\partial E}{\partial \Delta t} = \alpha \cdot L = 1.38 \mu\text{m}/\text{C}$$

이 때의 자유도는 온도 차이 값이 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내에 있을 것으로 100 % 확신이 가능하므로 무한대($\nu = \infty$)로 표시할 수 있다.

4.4 합성표준불확도의 고찰

입력량의 추정값에 대한 표준불확도는 얻어진 정보에 근거하여 A형 표준불확도와 B형 표준불확도로 각각 산출하였다. 표준불확도 성분의 요인을 더 찾을 수도 있겠으나 본 연구에서는 측정불확도에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단되어 생략하였다. 다음은 산출된 각각의 표준불확도들 식 (8)에 의한 제곱합의 제곱근법으로 계산한 합성표준불확도($u_c(y)$)이다.

$$u_c(y) = \sqrt{(2.02 \times 1)^2 + (2.55 \times -1)^2 + (0.58 \times 1.38)^2} = 3.35 \mu\text{m}$$

Table 2 Uncertainty Budget

Quantity Xi	Estimate x i	Standard uncertainty u(xi)	Probability distribution	Sensitivity coefficient Ci	Uncertainty contribution ui(y)
M	95.3 μm	2.02 μm	normal	1	2.02 μm
S	0	2.55 μm	normal	-1	-2.55 μm
Δt	0	0.58 $^\circ\text{C}$	rectangular	1.38 $\mu\text{m}/\text{C}$	0.80 μm
E	95.3 μm				3.35 μm

4.5 확장불확도의 고찰

확장불확도 U는 출력추정값의 합성표준불확도 $u_c(y)$ 에 포함인자 k를 곱하여 결정함으로 식 (9)에 의해서 산출할 수 있으며, 포함인자 k를 구하기 위해서는 식 (10)에 의한 합성표준불확도 $u_c(y)$ 의 유효자유도(ν_{eff})를 추정하여야 한다.

$$\nu_{eff} = \frac{3.35^4}{\frac{2.02^4}{4} + \frac{2.55^4}{\infty} + \frac{0.80^4}{\infty}} = 30.2 \approx 30$$

유효자유도 30을 t 분포표에서 신뢰수준 약 95% (95.45 %)의 포함확률에 상응하는 포함인자를 구하면 $k = 2.09$ 가 된다. 따라서 확장불확도는 다음과 같다. 단, 출력

추정값과 연관된 표준불확도가 충분한 신뢰도를 가지고 있다면 포함인자는 $k = 2$ 로 사용된다.

$$U = k u_c(y) = 2.09 \times 3.35 = 7.002 \approx 7.0 \mu\text{m}$$

본 연구에서는 명목값에 대한 측정값을 구한 것이 아니고 삼차원측정기로 120 mm이하의 길이에서 형상공차를 측정하였을 때 측정된 결과 값에 대한 불확도 값을 구한 것이다. 때문에 위치도는 $95.3 \mu\text{m} \pm 7.0 \mu\text{m}$ 로 표시하며, 95.3 μm 는 94.6 ~ 102.3 μm 의 구간에 분포되어 있을 것으로 기대되는 대표 값이다. 이 경우 제품에서 허용하는 위치공차가 100 μm 이지만 삼차원 측정기를 통하여 합부판정을 수행할 경우 측정불확도 값을 감안하여 93.0 μm 를 합격허용 범위로 결정해야 판정의 오류를 피할 수 있다.

5. 결론

산업현장에서 정밀부품들의 검사결과 판정문제로 논쟁의 대상이 될 수 있는 삼차원 측정기에 의한 형상공차 측정에 있어서 측정에 영향을 미치는 여러 가지 오차 요인들에 대한 측정불확도를 산출하고 평가하는 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 허용하는 위치공차가 100 μm 이고 측정값이 95.3 μm 로 측정불확도를 적용하지 않을 경우 측정값은 허용공차의 범위 내에 있는 것으로 판정할 수 있겠으나, 측정불확도를 적용하여 해석하면 위치도는 $95.3 \mu\text{m} \pm 7.0 \mu\text{m}$ 로 측정값 95.3 μm 는 94.6 ~ 102.3 μm 의 구간에 분포되어 있어 허용공차의 범위를 벗어나고 있음을 확인할 수 있다.

2. 삼차원 측정기를 이용하여 정밀가공부품을 측정함에 있어서 측정결과에 영향을 미치는 오차항(반복측정에 따른 측정편차, 삼차원 측정기의 표준불확도, 측정에 영향을 미치는 온도의 변화량 등)에 대한 측정불확도가 적용되지 않을 경우 판정에 오류를 범할 수 있다.

3. 본 실험의 결론은 한 대의 삼차원측정기를 사용하여 측정결과에서 나타난 측정불확도 값을 산출하고 분석하여 연구한 결과이다. 그러나 산업현장에서 모기업과 협력업체 간 납품의 경우 각기 다른 측정기를 사용하게 되며, 두 측정기의 측정불확도 또한 서로 다르게 나타날 것이다. 이 경우에는 본 연구에서 보여준 과정을 통하여 두 대의 측정기에 대한 각각의 측정불확도를 산출한 후 그중 큰 값을 허용공

차영역에 반영하여 사용하면 분쟁의 소지를 없애줄 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. ANSI Y14.5M, 1982 "Dimensioning and Tolerancing"
2. M.S.Jung, 1985, "Theory of Errors in dimensional Measurements 2nd Edition", KRISS
3. T.B.Eom, 2002, "Standard Calibration Procedure of Coordinate Measuring Machines", KASTO
4. J.S.Lim and S.H.Yang, 2000, "Standard Calibration Procedure of Coordinate Measuring Machines", KASTO
5. M.S.Jung, 1999, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", KRISS
6. EA-4/02, 1999, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration"
7. KOLAS-SG-101, 2002, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of Measurement Results", KOLAS
8. G.T.Lee, D.J.Lee, Y.S.Yoon, H.C.Park, J.M.Oh, 2003, A Study on Measurement Uncertainty of Theodolite System", Journal of the KSMTE, No.1, pp.229~233
9. ISO/IEC 17025, 1999, "General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories"