

동력식 조립공구의 측정불확도 산출방법 개발

오세현^a, 강기영^b, 홍민성^{c*}

Calibration Methods for Measurement Uncertainty of Power Assembly Tools

Se-heon Oh^a, Ki-young Kang^b, Min-sung Hong^{c*}^a Graduate School of Engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea^b Dept. of Precision Mechanical Engineering, Daeduk College, 68, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Korea^c Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	October	2015
Revised	7	October	2015
Accepted	14	October	2015

Keywords:

Measurement uncertainty
Power assembly tools
Traceability
Joint simulator bench (JSB)

ABSTRACT

In this study, calibration procedure of power assembly tools is suggested and methods are developed for calculating measurement uncertainty. First of all, the calibration of joint simulator bench (JSB) was carried out for maintaining traceability and the uncertainty components of JSB were analyzed. The influences of tool speed, tolerance, temperature and length of the adapter were examined by the torque measurement values through experiments. From this research, credibility for calibration results could be enhanced. This experimental results, being used as an effective tool for calibration of power assembly tools, will provide and improve the accuracy of the use of the power assembly tools.

1. 서론

자동차 분야와 같이 높은 생산성과 체결의 정확성을 중시하는 분야에 사용되는 동력식 조립공구는 자동차 조립라인 중심으로 급속히 증가하는 추세이다. 하지만 높은 구매비용과 익숙하지 않은 사용법 등의 이유로 중요 체결공정임에도 불구하고 아직까지 임팩트렌치 또는 토크렌치 같은 일반 공구로 작업하는 곳이 대부분이다. 임팩트렌치는 타격방식의 체결로서 볼트 및 제품의 손상을 야기할 수 있으며, 토크렌치는 작업자 및 환경에 따른 체결오차가 많게는 10% 이상 높게 발생할 수 있다. 부정확한 체결로 인한 제품의 결함은 품질경쟁력을 하락시킬 뿐 아니라 생명과 관련된 각종 안전사고를 유발시킬 수 있는 만큼 체결품질의 관리는 갈수록 강화될 것으로 보인다^[1].

최근 위와 같은 문제점과 필요성을 인식한 기업, 연구소, 공구제조사는 높은 토크 정확도를 가지며 생산성까지 높일 수 있는 동력식 조립공구 사용을 권장함에 따라 그 수요는 점진적으로 증가하는 추세이다^[2]. 더불어 공구 체결토크의 검증에 관한 관심도 높아지고 있다. 이와 같이 동력식 조립공구에 대한 관심과 중요성이 증가되고 있는 만큼 관리 또한 철저히 이루어져야함에도 불구하고, 동력식 조립공구는 토크렌치와 같이 주기적인 교정을 받아야 하는 권장 사항이 제도적으로 마련되어 있지 않은 상태이다. 따라서 대부분 현장에서는 성능 시험 및 교정을 실시하지 않거나, 휴대용 토크센서를 공구와 공작물 사이에 삽입하여 공구의 정확도만 확인하는 정도의 관리만 하고 있는 실정이다. 이는 장비 교정의 필요성에 대한 인식부재와 측정법 및 데이터 산출 방법 등이 잘 확립이 아직 되지 못했기 때문이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2526

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: mshong@ajou.ac.kr (Min-sung Hong).

동력식 조립공구 시험에 관련된 연구는 시험방법과 시험장비에 관한 사항 등이 수록된 국제규격이 이미 발간된 만큼 활발히 이루어진 상태이다. 1995년 개정된 ISO 5393(동력식 조립공구의 성능 시험)이 기본적인 시험의 개요와 방법을 수록하고 있으며, 이를 기반으로 좀 더 구체적인 시험방법을 소개한 VDI/VDE 2647이 최근 개정되어 동력식 조립공구 시험과 관련된 최신 규격이라고 할 수 있다.

국내의 경우 동력식 조립공구 제조사는 극히 드물기 때문에 거의 대부분 해외제품에 의존하고 있으며, 공구의 시험 또한 실시하지 않는 곳이 대부분이다. 이는 공구 교정에 관한 산업당국의 제도적인 미비와 해당 시험장비의 미보유, 시험규격의 보급율이 해외에 비해 매우 낮기 때문으로 판단된다.

따라서, 유효성이 입증된 측정방법, 데이터 및 불확도 산출방법을 따라 교정을 실시할 수 있는 일련된 과정을 문서화한 동력식 조립공구의 측정불확도 산출방법 개발이 절실하다. 이는 소급성(traceability)이 유지된 고성능 토크센서를 기준장비로 이용한 토크값 교정을 말하며 측정된 대표값이 가지는 불확실성 즉, 측정불확도를 표현함으로써 측정된 대표값 주변에 알 수 없는 어떤 범위의 불확실한 구간을 통계적으로 해석할지를 포괄적으로 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 동력식 조립공구의 어떠한 요소가 측정불확도를 발생시키는지 실험을 통해 밝혀내고, 그 인자들을 통계적인 기법을 통해 산출하는 방법을 개발하고자 한다.

2. 측정불확도의 이론

2.1 측정불확도의 개요

측정불확도는 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터로 정의되며, 측정결과와 불확도는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영하고 있다. 측정결과와 신뢰성을 나타내기 위하여 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었다. 1993년 ISO에서 측정불확도 표현지침서가 발행된 후 교정분야는 EA-4/06(European co-operation for Accreditation)에 따라 측정불확도를 구하고 표현하는 방법을 채택하여 사용되고 있다³⁾.

Fig. 1에서 나타난 것처럼 수학적 모델에 따라 불확도 요소가 A형 불확도인지 B형 불확도인지를 먼저 판별하고 그에 따른 개별 표준불확도를 평가한다. 그 개별 표준불확도들을 합성하여 합성표준불확도를 계산하고 포함인자 값을 곱함으로써 최종 불확도로 보고하여 완료한다. A형 불확도와 B형 불확도에 대한 추정은 4장에

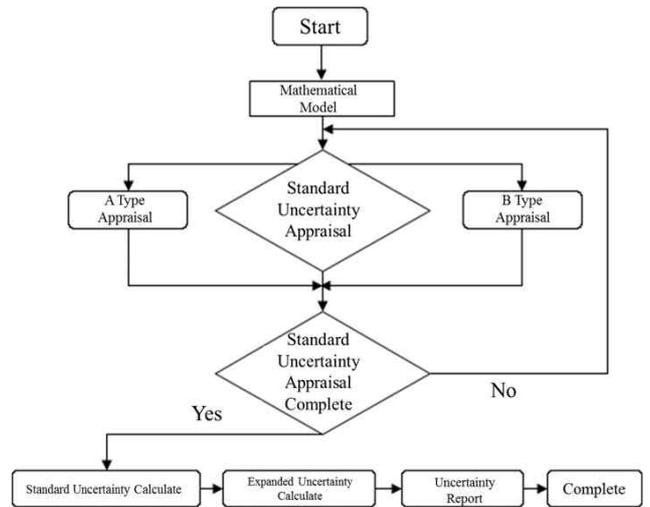


Fig. 1 Diagram of uncertainty calculating

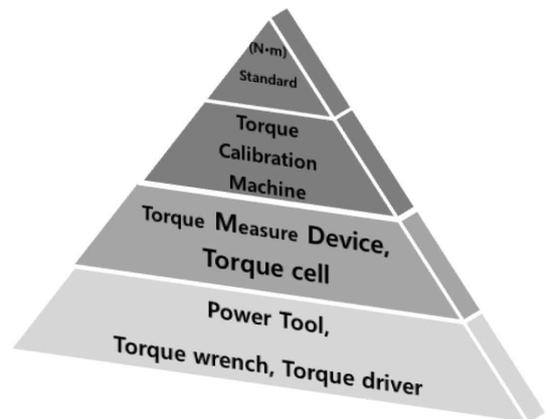


Fig. 2 Traceability system of torque field

서 상세히 다루겠다.

2.2 소급성

소급성이란 표준기 또는 측정기가 보다 높은 수준의 표준에 의해 차례로 교정되고, 국가 표준에 연결되는 경로가 확보되어 있는 것을 말한다. 측정장비의 정확도를 더 높은 정확도를 가진 다른 측정장비, 그리고 궁극적으로는 1차 표준(primary standard)으로 연결시키는 문서화된 비교 고리로서 측정장비의 소급성에 대하여 정의하고 있다.

토크분야의 소급체계는 Fig. 2와 같이 질량(N)과 길이(m)의 1차 표준으로부터 (N·m)단위가 형성되며, 이 표준으로부터 정확도와, 측정불확도를 소급받은 고성능 토크교정기들에 의해 토크셀, 토크 측정기들이 교정 받게 된다. 이어서 토크 소급체계 중 최하위 단계는 동력식 조립공구, 토크렌치, 토크드라이버들이 있는데, 이것들은 상위 단계의 토크측정기 및 토크셀 류 등에 의해 주기적으로 교정받게 됨으로써 궁극적인 1차 표준으로부터 오차 및 불확도를 적용받아 소급성을 유지할 수 있게 된다.

3. 동력식 조립 공구 및 교정장비

3.1 동력식 조립 공구

빠르고 정확한 체결을 목적으로 하는 동력식 조립공구는 3가지 구성요소로 이루어졌다. 목표 토크 및 다양한 조건들을 설정하고든 입출력 신호들을 처리하는 콘트롤러, 그 신호들을 받아 체결을 수행하는 공구, 전원 및 각종 신호를 전달하는 케이블, 그리고 추가적으로 각종 설정 및 데이터 확인을 쉽게 하기위해 PC를 콘트롤러에 연결시켜 사용이 가능하다 (Fig. 3 참조).

3.2 교정 장비

조립공구를 교정하기 위한 기준장비는 규정에 따른 다양한 테스트항목을 무리없이 수행할 수 있어야 하며, 높은 정확도 성능과 다양한 조인트(joint) 구현이 가능하여야 한다. 이러한 기능을 만족하는 동력식 조립공구 전용 교정장비인 JSB(joint simulator bench)는 Fig. 4에 나타나 있다.



Fig. 3 Composition of power assembly tool

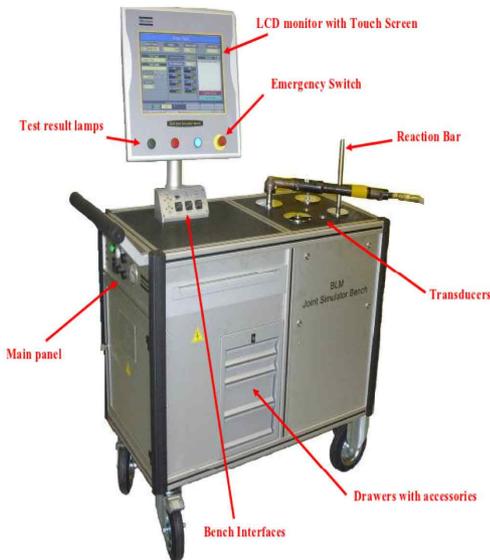


Fig. 4 JSB (joint simulator bench) overview^[4]

구성품으로는 토크를 측정할 수 있는 토크센서가 각 범위별로 내장되어 있고, 조인트를 구현할 수 있는 brake 장치, 토크값 및 각도값 측정에 대한 결과를 보여주는 지시장치, 콘트롤러, PC, 제어용 프로그램, reaction bar, 기타 아답터 및 지그(jig) 등이 있다.

3.3 교정 장비 및 절차

본 연구의 조립공구 시험방법은 최신 규격이 적용된 2013년 개정판 독일규격 VDI/VDE 2647을 준용하여 작성하였다. 다만, 준비사항 및 세부 절차에 있어 중요하다고 판단된 일부 사항은 토크렌치 교정 절차를 참고하여 규격의 내용을 크게 벗어나지 않는 범위 내에서 첨가하여 작성하였다.

4. 측정불확도

4.1 A형 불확도

A형 불확도의 추정은 반복 측정하여 얻은 값에 대한 평균값 및 추정 표준편차에 의해 산출한다. 그러므로 조립공구에 설정한 교정 토크값에 대해 반복 측정한 각각의 데이터들, 평균값, 측정횟수는 A형 불확도를 산출하는데 필수요소라 할 수 있다.

따라서, 먼저 n 회 반복 측정한 데이터들의 평균값을 먼저 구한 후, 표준편차를 구하고 평균값에 미치는 정도를 상대값으로 계산하여 산출한다. n 회 측정값이 Table 1과 같을 때 평균값과 반복성에 의한 상대표준불확도, w_{rep} 는 각각 식 (1)과 식 (2) 또는 식 (3)과 같다^[5].

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{n} \quad (1)$$

$$w_{rep} = \frac{100}{\bar{T}} \times \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} (\%) \quad (2)$$

$$w_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{100}{\bar{T}_i} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_i)^2} \right) (\%) \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots)$

이 때 자유도는 $v = n - 1$ 이다.

Table 1 Measurement values (N·m)

Number	Value	Number	Value	Number	Value	Number	Value
1	34.28	7	33.48	13	34.04	19	33.70
2	34.18	8	33.37	14	33.99	20	34.15
3	34.13	9	34.09	15	33.53	21	33.78
4	33.87	10	34.20	16	33.92	22	33.50
5	33.81	11	33.73	17	34.06	23	33.70
6	33.78	12	33.46	18	34.05		

따라서, $n=25$ 일 때 A형 불확도는 상대반복성 불확도는 0.015%로 추정하였다.

4.2 B형 불확도

조립공구 교정 시 측정되는 데이터는 기준장비인 JSB의 지시값으로 취득할 수 있으며, 불확도 산출에 사용되는 기초 데이터로 사용된다. 따라서, JSB의 측정값의 정확성, 정밀도, 각종 환경에 대한 안정성과 같은 기준장비로서 적합한지에 대한 검토가 요구된다^[5,6]. 만일 기준장비가 갖추어야 할 기본 요건에는 만족한다 할지라도 기준장비의 어떤 불안정한 특성이 측정 결과 값에 영향을 끼친다면 그 요소는 기준기가 가진 불확실한 인자로 간주 할 수 있다. 대부분의 경우 이런 불확실한 요소들은 사용자 매뉴얼에 오차범위 및 감도계수 등으로 정보를 게시하고 있다.

따라서 장비 매뉴얼에 기재된 오차 요인들은 B형 불확도 요소로 선정하여 불확도 수식에 따라 추정이 가능하다. 제공된 기술사양들과 조립공구를 시험할 때 발생할 수 있는 여러 가지 측정변수, 환경변수, 기타 JSB의 특성이 측정에 미치는 영향들을 모두 B형 불확도로 간주하여 최종 측정값에 어떠한 영향을 줄 수 있는지를 분석하고, 그 해당하는 값을 불확도로 산출하였다. 특히, 조립공구의 회전속도와 조립공구와 JSB를 연결할 때 사용되는 아답터 길이가 측정값에 어떤 영향을 주는지 실험을 통해 확인하였다. 하기 요소들에 대해서는 적절한 설정값을 정하여 실험을 진행하였다^[7-9].

- 조립공구 분해능에 의한 상대불확도
- 기준장비에 대한 상대불확도
- 기준장비의 상대합성표준불확도
- 기준장비 감도드리프트에 의한 상대불확도
- 온도 편차에 의한 상대불확도
- 각도 오차에 의한 상대불확도
- 회전 속도에 의한 상대불확도
- 아답터 공차에 의한 불확도
- 아답터 길이에 의한 상대불확도

5. 실험 결과

5.1 조립공구 및 JSB의 기본정보

교정에 사용된 조립공구에 대하여는 Table 2에 나타내었고, JSB에 대한 기본 사양 및 불확도 산출에 필요한 정보들을 Table 3에 제시하였다.

5.2 측정데이터 및 보정값

측정된 각 설정당 25개의 데이터는 불확도 산출에 그대로 사용하는 것이 아닌, JSB에 대한 측정오차를 보정한 새로운 25개의 데

Table 2 Specifications of assembly tools

Type	Horizontal type
Application range	14~80 N·m
Resolution	0.01 N·m
Spindle	50 rpm
Length of adaptor	28 mm

Table 3 Specifications of JSB

Uncertainty of relative measurement	0.14% ($k=2$)
Sensitivity drift	0.06 %
Temperature (average value)	22.8°C, temperature stability coefficient 0.1 (%/°C)
Angle of error	±0.278%
Temperature of tool (average value)	23.45°C
Measured velocity (25th average)	48 rpm
Tool rotative velocity sensitivity coefficient (%/rpm)	H: 0.038 S: 0.012
(1/2") Rotative velocity error of adaptor allowance	0.052 %
Sensitivity coefficient of adaptor length (%/mm)	Horizontal type.: 0.018 Vertical type.: 0.005

이터로 변환하여 사용하여야 한다.

기준장비 교정성적서를 통해 알 수 있듯이 JSB는 실토크 대비 약간 오차를 가지고 있으므로 그 오차만큼 보정하여 실토크에 가깝게 측정값을 보정하였다. 이는 측정값의 소급성 유지하는 방법으로 서, 교정곡선식에 대입하여 산출하였다.

본 연구에서는 30% 토크레벨의 Hard Joint에 대해서만 예시로 하여 불확도를 산출하였으며, 따라서 보정값도 해당 데이터만으로 아래와 같이 산출한다. 교정곡선 식 (4)를 적용하여 계산하였다.

$$M_i = 1.000760E+01 \times d_i + (-4.142120E-06) \times d_i^2 \quad (4)$$

여기서 M_i 은 실토크이고, d_i 는 JSB 지시토크이다.

JSB의 첫번째 측정값 $d_i = 34.26$ N·m 이므로 식 (4)에 적용하면 34.28의 값을 얻을 수 있다. 즉, Table 4의 ②와 같이 34.28 Nm로 보정된다. 이와 같이 기존의 모든 데이터를 교정곡선식에 대입하여 JSB의 오차를 보정한 결과는 Table 4와 같다.

5.3 수학적 모델식

동력식 조립공구의 교정 후 설정한 토크값과 25회 평균값과의 오차를 구하는 모델식은 식 (5)와 같다. 오차 계산과 더불어 불확도 보정값을 더하여 JSB 지시값의 불확실한 정도, 즉 측정불확도 범

Table 4 Values after applied for calibration curve

Calibration level	30%	80%	100%
Calibration torque	33.80 N·m	66.80 N·m	80.00 N·m
Joint	Hard (30°)	Hard (30°)	Hard (30°)
No.1	② 34.28	65.74	79.25
2	34.18	66.52	79.02
3	34.13	65.91	78.39
4	33.87	66.51	79.56
5	33.81	67.00	79.23
6	33.78	65.95	79.28
7	33.48	66.03	79.35
8	33.37	65.81	79.59
9	34.09	66.77	79.69
10	34.20	65.81	79.41
11	33.73	66.25	80.03
12	33.80	66.44	79.63
13	33.46	66.67	79.03
14	34.04	65.98	80.00
15	33.99	66.36	78.53
16	33.53	65.58	79.31
17	33.92	66.08	78.59
18	33.61	65.78	79.55
19	34.06	66.17	79.74
20	34.05	66.41	78.65
21	33.70	66.33	78.49
22	34.15	67.12	78.42
23	33.78	66.09	79.71
24	33.55	66.55	78.79
25	33.70	67.18	79.88

위를 산출할 수 있도록 모델식을 구성하였다.

$$E_x = T_x - T_s + \delta_r + \delta_s + \delta_v + \delta_t + \delta_l \quad (5)$$

여기서 E_x : 조립공구의 지시 오차

T_x : 조립공구 설정값

T_s : JSB 지시값

δ_r : 조립공구 분해능에 의한 보정값

δ_s : JSB에 관련된 보정값

δ_v : 공구 회전속도에 의한 보정값

δ_t : 아답터 공차에 의한 보정값

δ_l : 아답터 길이에 의한 보정값

또한, δ_s 은 다음과 같은 보정값들을 포함한다.

- $u(\delta_{s1})$: JSB 불확도 보정값

- $u(\delta_{s2})$: JSB 감도드리프트 보정값

- $u(\delta_{s2})$: 온도 안정도에 의한 보정값

- $u(\delta_{s2})$: 각도 감도에 의한 보정값

5.4 불확도 총괄표

5.1절의 기본 정보들과 Table 4의 보정된 데이터를 모델식에 따라 불확도를 산출하였고, 그 성분들의 요약하여 Table 5과 같이 정리하였다.

5.5 상대측정불확도

동력식 조립공구의 상대측정불확도, U 는 포함인자(k)와 상대합성 표준불확도, $u(E_x)$ 곱으로서 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$U = k \times u(E_x) \quad (\%) \quad (6)$$

Table 5 Uncertainty budget

	1	2	3	4	5	6
X_i	Estimation value (N·m) x_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Probability distribution	Sensitivity coefficient C_i	Uncertainty contribution $u_i(y)$	Degree of freedom v
T_s	33.85	0.154 %	t-distribution	-1	-0.154 %	24
δ_r	0	0.009 %	Rectangle	1	0.009 %	∞
δ_s	0	0.179 %	Rectangle	1	0.179 %	∞
δ_v	0	0.022 %	Rectangle	1	0.022 %	∞
δ_t	0	0.015 %	Rectangle	1	0.015 %	∞
δ_l	0	0.145 %	Rectangle	1	0.145 %	∞
T_x	33.80	-	-	-	-	-
E_x	-0.05	-	-	-	0.279 %	21

Table 6 Relative measurement uncertainty of power assembly tool (Reliability level 95 %)

Calibration level	30 %		80 %		100 %	
Calibration torque	33.80 N·m		66.80 N·m		80.00 N·m	
Joint	Hard (30°)	Soft (360°)	Hard (30°)	Soft (360°)	Hard (30°)	Soft (360°)
Average	33.85	33.20	66.28	65.90	79.25	78.44
Relative measurement uncertainty (%)	0.59	0.78	0.56	0.57	0.55	0.52
Coverage factor (<i>k</i>)	2.13	2.37	2.08	2.10	2.07	2.04

따라서, $k=2$ 에서 상대합성 표준불확도는 $u(E_x)=0.279\%$ 로 산출되었으므로, 불확도 표현지침에 따라 상대측정불확도는 59%이다.

그러므로, 해당 동력식 조립공구의 교정레벨 30%(33.80 N·m), Hard Joint (30°)에서의 교정 결과는 평균값이 33.85 N·m이며, 상대측정불확도는 0.59%를 가진다. 이때의 신뢰수준은 약 95%이며 $k = 2.13$ 의 값을 가진다.

평균값 33.85 N·m와 산출된 상대측정불확도 0.59%의 범위는 33.8을 기준으로 0.59만큼의 범위를 가지는 33.65와 34.05의 값을 고려할 수 있다.

교정레벨 80%, 100%에서 상대측정불확도의 산출은 교정레벨 30 % 산출과정에서 다루었던 모든 수식과 절차가 동일하므로 그에 따라 계산하여 Table 6과 같이 모든 교정 토크에서의 상대측정 불확도(%)를 구할 수 있었다.

6. 결론

본 연구들 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) VDI/VDE 2647의 시험방법과 EA-4/06에 따른 불확도 산출 기법을 이용하여 교정데이터에 대한 신뢰성을 제고할 수 있는 측정불확도 산출방법을 개발하였다.

(2) 동력식 조립공구를 교정하는 장비가 내포하고 있는 자체 불확도, 측정드리프트오차, 온도감도오차, 각도오차들은 조립공구 교정 시 측정값에 영향을 미칠 수 있는 요소로 작용할 수 있음을 파악할 수 있었다. 이 중 온도감도오차, 각도오차는 JSB 사양서에 보고된 정보로서 불확도 요인으로 간주하여 상대불확도로 산출할 수 있었다.

(3) 그 동안 정립되지 못했던 동력식 조립공구의 교정 방법 및 절차를 국제규격에 준하여 정립하였다. 분석 및 실험을 통해 발견된 각각의 불확도 요소들에 대한 불확도 산출식을 도출함으로써, 동력식 조립공구의 상대측정불확도 산출 방법을 개발하였다.

References

- [1] White, H. G., 2008, Basics of Estimating Measurement Uncertainty, Clin Biochem Rev., 29:1 3-6.
- [2] Bringmann, B., 2007, Improving Geometric Calibration Methods of Multi-axes Machining Centers by Examining Error Interdependency Effects, A Thesis for a Doctorate, ETH Zurich, Switzerland.
- [3] Bringmann, B., Knapp, W., 2009, Machine Tool Calibration Geometric Test Uncertainty Depends on Machine Tool Performance, Precision Engineering, 33:4 524-529.
- [4] Knapp W., 2002, Measurement Uncertainty and Machine Tool Testing, Institute for Machine Tools and Manufacturing 3-4.
- [5] ISO, 2006, Test Code for Machine Tools – Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions, ISO/CD 230-1.3:2006, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [6] ISO, 2001, Test code for machining centers – Part 2: Geometric test for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis), ISO 10791-2:2001, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [7] ISO, 2005, Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools, ISO 230-4:2005, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [8] ISO, 2003, Geometrical product specifications (GPS) – Systematic errors and contributions to measurement uncertainty of length measurement due to thermal influences, ISO/TR 16015:2003, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [9] Oh, S. H., Hong, M. S., 2015, Development of a Method for Measurement Uncertainty of Power Assembly Tools, Proceedings of KSMTE Spring Conference, 143.