Gage R&R 분석을 통한 인상재 기반 비파괴 정밀측정의 산업현장 적용성에 대한 연구

유민우*, 정호연*
*전주대학교 산업공학과
e-mail:hychung@jj.ac.kr

A Study on the Industrial Applicability of Impression Material-Based Non-Destructive Precision Measurement Using Gage R&R Analysis

Min-Woo Yoo*, Ho-Yeon Chung*
*Dept. of Industrial Engineering, Jeonju University

요 약

본 논문에서는 기계 부품의 복잡한 내부 형상을 비파괴적으로 측정할 수 있는 인상재 기반 정밀측정 기법의 산업현장 적용 가능성을 평가하였다. 특히, 측정 시스템의 신뢰도를 확보하고자 Gage R&R(Repeatability and Reproducibility) 평균-범위법 분석을 도입하였으며, 반복성(EV), 재현성(AV), 그리고 부품 간 변동(PV)에 따른 총 측정 변동(GRR)을 정량적으로 분석하였다. 측정 대상은 Dovetail groove와 같이 내부로 오목한 형상을 가진 구조물로, 접촉식 측정기로는 접근이 불가능한 시편으로 설정하였다. 형상 복제에는 치과용 Hydrophilic Vinyl Polysiloxane 계열 인상재를 활용하였으며, 경화 후 슬라이싱하여 측정 단면을 확보하였다.

측정 장비로는 Mitutoyo 사의 비접촉식 광학 투영기(PH-3515F)를 사용하였다. 3명의 측정자가 10개의 단면을 각 2회 반복 측정하여 총 60개의 데이터를 확보하였으며, 모든 측정값은 설계 공차 80.0±0.5° 이내에서 수집되었다.

Gage R&R 분석 결과, %EV는 12.75%, %AV는 5.5%, %GRR은 13.9%로 나타났다. 이는 AIAG MSA 기준상 조건부 허용(10~30%)에 해당하는 측정 시스템으로 평가되며, 실무 적용은 가능하나 반복성 개선의 여지가 존재함을 시사한다. 측정자 간 일관성(재현성)은 비교적 우수하게 유지되었으며, 전체 측정값이 공차 범위 내에 분포함으로써 해당 비파괴 측정 기법이 실제 산업 현장에서 품질 판정 도구로 활용될 수 있음을 실증적으로 입증하였다.

또한, 향후 인상재 복제 형상의 디지털 이미지 처리와 AI 기반 경계 인식 기술의 융합을 통해 자동화 정밀측정 시스템으로의 확장 가능성도 기대된다.

1. 서론

정밀기계 산업에서 부품의 치수, 형상, 각도는 품질과 직결되는 핵심 요소이다. 그러나 Dovetail groove와 같은 내부로 오목한 구조의 부품은 접촉식 측정기로는 접근이 어렵고, 측정 자체를 위해 시편을 절단해야 하는 경우가 많다.

이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 비파괴 측정 기술이 주목받고 있으며, 그중 인상재를 활용한 복제 기반 측정은 내면 형상의 원형 유지와 고정밀 재현이 가능한 장점을 가진다[6][8].

한편 측정 시스템의 품질을 판단하기 위한 정량적 분석 방법으로는 Gage R&R(평균범위법)분석이 널리 활용되고 있으며, 이는 반복성과 재현성을 통하여 측정 오차의 구성요소를 분해할 수 있는 기법이다[1][2].

본 연구에서는 치과용 인상재를 기계 부품 측정에 적용하고, Gage R&R 분석을 통해 반복성과 재현성, 부품 변동성을 정량적으로 분석함으로써 해당 방식의 산업 적용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

Gage R&R 분석은 측정 시스템의 품질을 정량적으로 평가하기 위한 대표적인 도구로서, AIAG(Automotive Industry Action Group)에서 제시한 MSA(Measurement Systems Analysis) 지침에 기반한다[1].

Montgomery는 품질관리에서의 측정 시스템 분석을 통해 총 변동 내 측정 시스템이 차지하는 기여도를 파악하는 것이 중요하다고 강조하였으며[2], 일반적으로 %GRR이 10% 이하일 경우 매우 우수한 측정 시스템으로 간주된다.

EV는 동일 측정자에 의한 반복 측정의 오차를, AV는 서로 다른 측정자 간 오차를 의미하며, GRR은 EV와 AV를 통합한 측정 시스템 전체의 오차를 의미한다.

GRR이 전체 변동의 과반을 차지할 경우 측정 시스템 자체가 공정 변동보다 불안정하다는 결론에 이를 수 있다[4].

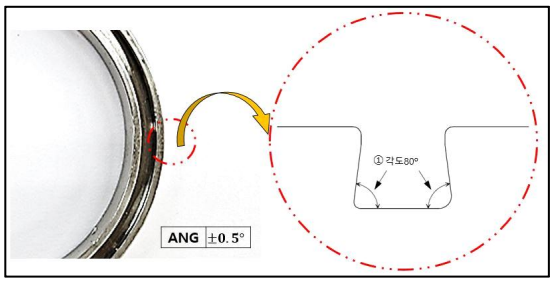
기존 연구에서는 주로 자동차 및 금형 부품 등 정형화된 형상에 대해 Gage R&R 분석이 수행되었으며[4][5], 복잡 내면 형상을 대상으로 하는 정밀 측정은 여전히 접촉식 측정이나 파괴 측정에 의존하는 경우가 많았다. 그러나 치과 재료로서 활용되던 Hydrophilic Vinyl Polysiloxane 계열의 인상재가 우수한 형상 재현성과 경화 안정성을 가지며[6], 이를 기반으로 한 정밀 측정

기법이 최근 산업 분야로 확장되고 있다[7]. 본 연구는 인상재 기반 측정 방식에 Gage R&R(평균범위법) 분석을 결합하여, 실제 산업현장에서의 측정 신뢰성과 공차 내 유효성 평가를 동시에 수행한 실증적 접근이라는 점에서 기존 문헌과 차별화된다.

3. 실험 방법

3.1 시험편 및 장비 구성

본 연구에서 측정 대상으로 설정한 시편은 [그림 1]과 같이 Dovetail groove 형상을 가진 기계 부품으로, 일반적인 접촉식 측정기로는 접근이 불가능한 오목한 내벽 구조를 갖는다. 이러한 구조는 일반적으로 절단을 통한 파괴 측정이 요구되므로, 본 연구에서는 이를 치과용 인상재를 통해 복제함으로써 비파괴 방식으로 정밀 측정을 가능하게 하였다.



[그림 1] A Dovetail groove test piece

복제 재료로는 [그림 2] Hydrophilic Vinyl Polysiloxane 계열의 치과용 인상재를 사용하였으며, 해당 재료는 치과 분야에서 입증된 정밀 형상 재현성과 경화 안정성을 바탕으로, 미세한 내벽 형상을 손상 없이 복제할 수 있어 비파괴 정밀측정에 적합하다. 복제된 인상재는 경화 후 시편에서 분리하고, 1~2 mm 두께로 슬라이싱하여 측정에 사용하였다.

[그림 2] Hydrophilic Vinyl Polysiloxane

[그림 3] mitutoyo projector ph-3515F

측정 장비는 [그림 3]과 같은 Mitutoyo 비접촉식 광학 투영기(PH-3515F)를 통해 수행하였다. 슬라이싱된 인상재 단면을 투영 스크린에 확대하여 각도 기준선과 비교 측정하는 방식으로, 기준 각도는 80.0°이며, 허용 공차는 ±0.5°로 설정하였다. 이 측정 시스템은 측정값의 반복성과 재현성을 확보하고자 Gage R&R 분석을 통해 정량적 신뢰성 평가에 활용되었다.

3.2 측정 절차

3.2.1 인상재 준비 및 충진

기계부품의 Dovetail groove 내부에 Hydrophilic Vinyl Polysiloxane 계열의 인상재를 충진한 뒤, 2분간 경화시켰다. 이때, 형상 내부의 공기포집 방지를 위해 서서히 주입하고 경화 시간을 충분히 확보하였다.

3.2.2 인상재 추출 및 슬라이싱

경화가 완료된 인상재를 시편에서 조심스럽게 분리한 후, 1~2 mm 두께로 슬라이싱하였다. 이 과정을 통해 측정 가능한 평탄한 단면 형상을 확보하였으며, 측정부위 영역을 중심으로 절단하였다.

3.2.3 단면 측정

슬라이싱된 인상재 단면을 비접촉식 광학 투영기에 고정한 뒤, 측정 기준선을 정렬하여 주요 치수에 대한 정밀 측정을 수행하였다. 측정 결과는 [표 2] Gage R&R 분석을 위한 반복 측정 데이터로 저장되었다.

3.4 Gage R&R(평균범위법) 실험 설계

본 연구에서는 인상재 기반 비파괴 측정의 신뢰성 분석을 위해 Gage R&R(Repeatability & Reproducibility) 평균범위법 실험을 설계하였고, 측정 시스템의 반복성 및 재현성을 정량적으로 평가하기 위해 [표 1]과 같은 조건을 설정하였다.

시험편 [그림 1]의 각도를 측정하여 [표 2]와 같은 Gage R&R Data sheet를 작성하였다.

[표 1] Test conditions

측정자 수	시험편 수	반복측정 수	총 DATA 수
3명	10개	2번	60개

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 반복성-측정기 변동(EV): 반복성

$$EV = \overline{\overline{R}} \times K_1 \quad \text{(식1)}$$

$$= 0.041 \times 0.8662 = 0.0355$$

4.2 재현성-측정자 변동(AV): 재현성

$$AV = \sqrt{(\bar{x}_{DIFF} \times K_2)^2 - (\frac{EV^2}{(nr)})} \quad \text{(식2)}$$

$$= \sqrt{(0.033 \times 0.5231)^2 - (\frac{0.0355^2}{(10 \times 2)})} = 0.0153$$

4.3 반복성&재현성(GRR): 반복성 및 재현성

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad \text{(식3)}$$

$$= \sqrt{(0.0355)^2 + (0.0153)^2} = 0.0387$$

4.4 부품 변동(PV): 부품 변동

$$PV = R_p \times K_3 \quad \text{(식4)}$$

$$= 0.8767 \times 0.3146 = 0.2758$$

4.5 총 변동(TV): 총 변동

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad \text{(식5)}$$

$$= \sqrt{(0.0387)^2 + (0.2758)^2} = 0.2785$$

4.6 $\%EV$, $\%AV$, $\%GRR$

측정 시스템 평가를 위해 계산된 Gage R&R 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.6.1 $\%EV$(Equipment Variation, 장비 반복 오차 비율)

Gage R&R 분석 중 측정 장비의 반복성에 해당하는 %EV(Equipment Variation, 장비 반복 오차 비율)를 평가하였으며, 동일 측정자에 의한 반복 측정 시 발생하는 오차가 전체 측정 변동 중 차지하는 비율로 해석한다.

$$\%EV = \frac{EV}{TV} \times 100 = \frac{0.0355}{0.2785} \times 100 = 12.75\% \quad \text{(식6)}$$

[표 2] Gage R&R Data sheet

행	시행 / 측정자		각도 (80° ±0.5)										평균
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	A	1	79.55	79.75	79.75	79.87	80.02	80.03	80.14	80.27	80.35	80.42	80.0150
2		2	79.55	79.65	79.78	79.80	79.94	80.10	80.23	80.20	80.39	80.42	80.0060
3	평균		79.5500	79.7000	79.7650	79.8350	79.9800	80.0650	80.1850	80.2350	80.3700	80.4200	$\bar{x}_A$ = 80.0105
4	범위		0.000	0.100	0.030	0.070	0.080	0.070	0.090	0.070	0.040	0.000	$\bar{R}_A$ = 0.0550
5	B	1	79.50	79.61	79.77	79.85	79.93	80.01	80.13	80.22	80.36	80.40	79.9780
6		2	79.53	79.62	79.73	79.84	79.94	80.08	80.12	80.29	80.32	80.41	79.9880
7	평균		79.5150	79.6150	79.7500	79.8450	79.9350	80.0450	80.1250	80.2550	80.3400	80.4050	$\bar{x}_B$ =79.9830
8	범위		0.030	0.010	0.040	0.010	0.010	0.070	0.010	0.070	0.040	0.010	$\bar{R}_B$ =0.0300
9	C	1	79.57	79.66	79.80	79.90	79.97	80.04	80.15	80.31	80.36	80.40	80.0160
10		2	79.53	79.63	79.80	79.85	80.04	80.08	80.16	80.24	80.39	80.44	80.0160
11	평균		79.5500	79.6450	79.8000	79.8750	80.0050	80.0600	80.1550	80.2750	80.3750	80.4200	$\bar{x}_C$ = 80.0160
12	범위		0.040	0.030	0.000	0.050	0.070	0.040	0.010	0.070	0.030	0.040	$\bar{R}_C$ = 0.0380
15	부품 평균		79.5383	79.6533	79.7717	79.8517	79.9733	80.0567	80.1550	80.2550	80.3617	80.4150	$\bar{\bar{x}}$ = 80.0032 R_p = 0.8767

4.6.2 $\%AV$(Appraiser Variation, 측정자 간 변동 비율)

Gage R&R 분석의 일환으로 평가된 %AV(Appraiser Variation, 측정자 간 변동 비율)는 서로 다른 측정자가 동일 시편을 측정할 때 발생하는 오차를 의미하며, 이는 측정 절차의 일관성 및 숙련도에 따라 영향을 받는다.

$$\%AV = \frac{AV}{TV} \times 100 = \frac{0.0153}{0.2785} \times 100 = 5.5\% \quad (식7)$$

4.6.3 $\%GRR$(Total Gage R&R)

측정 시스템 전체의 오차를 나타내는 %GRR(Total Gage R&R)은 반복성과 재현성을 통합한 측정 시스템의 총 변동 비율로 정의된다.

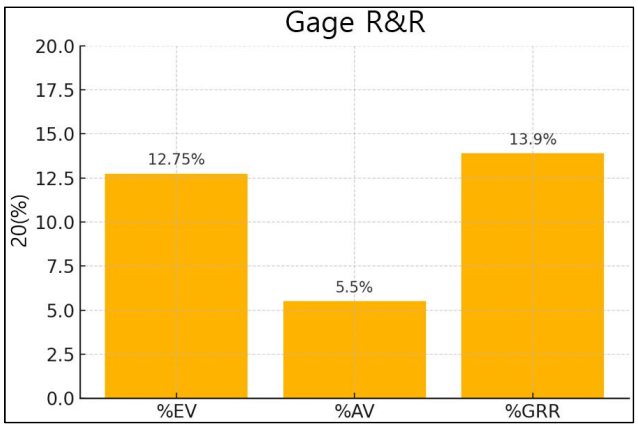
$$\%GRR = \frac{GRR}{TV} \times 100 = \frac{0.0387}{0.2785} \times 100 = 13.9\% \, (식8)$$

반복성(%EV) 12.75%로, 측정 환경의 안정성은 비교적 확보되었으나, 장비 또는 측정 조건의 반복 오차가 전체 변동의 상당 부분을 차지하고 있음을 보여준다.

재현성(%AV)은 5.5%로 나타났으며, 이는 측정자 간 숙련도의 균일성과 측정 절차의 표준화가 잘 이루어졌음을 의미한다.

측정 시스템 전체 오차(%GRR)는 13.9%로 나타났으며, AIAG 기준에서 제시하는 조건부 허용 구간(10~30%)에 해당되며, 실제 산업 적용은 가능하나 반복성 개선을 통해 더욱 높은 정밀성과 신뢰성 확보가 가능하다는 점을 시사한다.

[그림 4] Total Gauge R&R Graph



5. 결론

본 연구에서는 Dovetail groove와 같이 내부로 오목한 형상을 가진 복잡 내면 구조의 기계 부품에 대해, 인상재 기반의 비파괴 정밀측정 기법을 적용하고 Gage R&R 분석을 수행함으로써 측정 시스템의 신뢰성과 산업 적용 가능성을 검증하였다.

측정 결과는 AIAG 기준에 따라 %GRR이 13.9%로 나타났으며, 이는 조건부 허용 범위(10~30%)에 해당하여 측정 시스템의 신뢰성이 산업 현장에서도 일정 수준 이상 확보되었음을 의미한다. 특히 모든 측정값이 제품 공차(80.0±0.5°) 내에 포함됨으로써, 정량적 측정 뿐 아니라 품질 판정 도구로서의 유효성 또한 확보하였다.

본 연구의 의의는 기존에 파괴 측정이 불가피하던 구조물에 대해 인상재 복제를 통한 비접촉식 정밀측정 방식을 실험적으로 검증하였다는 점이며, 향후 다양한 형상 및 산업군에의 확장 가능성을 내포하고 있다. 또한, 추후 인상재 슬라이스 이미지에 대한 AI 기반 자동 경계 검출 알고리즘과 연계함으로써, 측정 데이터의 일관성과 분석 속도 향상도 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] AIAG, Measurement Systems Analysis (MSA), 4th Ed., Automotive Industry Action Group, 2010.

[2] D. C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control, 7th ed., John Wiley & Sons, 2013.

[3] A. Zeid, S. Sundaram, M. Elbestawi, “Limitations of contact-based CMM inspection for complex internal geometries,” Journal of Metrology Engineering, vol. 11, no. 2, pp. 85-94, 2022.

[4] R. Singh, V. Kumar, N. Tandon, “Application of Gage R&R in precision inspection systems: A case study,” International Journal of Manufacturing Science and Production, vol. 19, no. 3, pp. 125-132, 2018.

[5] H. Kim, J. Lee, S. Park, “Trends in non-destructive dimensional inspection of complex machine parts,” Korean Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 34, no. 4, pp. 213-221, 2020.

[6] Y. Oh, M. Choi, S. Lee, “Evaluation of dental impression materials for industrial micro-replication,” Journal of Industrial Science and Technology, vol. 40, no. 1, pp. 19-27, 2021.

[7] ISO, ISO 10360-2:2019, Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMMs), International Organization for Standardization, 2019.