

## 이중 스프링 구조를 이용한 유연 부품의 내경 측정 장치 개발

송 호 진<sup>1)</sup> · 서 민 석<sup>1)</sup> · 이 준 석<sup>1)</sup> · 오 병 가<sup>2)</sup> · 이 형 욱<sup>\*1)</sup>

국립한국교통대학교 자동차공학과<sup>1)</sup> · 서한기술연구소<sup>2)</sup>

### Development of Measurement Device for the Inner Diameters of Flexible Parts Using Dual Spring Structures

Hojin Song<sup>1)</sup> · Minseok Seo<sup>1)</sup> · Junseok Lee<sup>1)</sup> · Byungki Oh<sup>2)</sup> · Hyoungwook Lee<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation, Chungbuk 27469, Korea

<sup>2)</sup>Seohan Engineering Research Institute, Seohan Immobility, 95-13, Inseok-ro, Deoksan-eup, Jincheon-gun, Gyeonggi 18449, Korea

(Received 7 November 2025 / Revised 7 January 2026 / Accepted 8 January 2026)

**Abstract :** In this study, existing inner-diameter measurement devices were identified through Gage R&R analysis, and a new inner-diameter measurement device was developed. This device is capable of measuring dust covers for CV joints with an inner diameter range of 38.5 to 73 mm in a single unit, and it addresses the central alignment of dust covers in previous devices by designing a V-shaped alignment jig. Additionally, the dual-spring structure design leads to the automatic alignment of the dust cover, addressing operator skill dependency in the previous measurement devices. Calibration results and Gage R&R analysis showed that the new device achieved a % contribution of less than 1.8 %, a % study variation of less than 13.4 %, and more than 10 distinct categories, thus meeting the reliability criteria for measurement systems. These results demonstrate that the new device can meet the required precision, repeatability, and reproducibility within the allowed tolerance range. The proposed device is expected to provide significant improvement in the tolerance management of dust cover inner diameters in production environments.

**Key words :** Dust cover(더스트 커버), CV joint(등속조인트), Gage R&R(게이지 반복성 및 재현성, Repeatability & Reproducibility), Align jig(정렬 지그), Inner diameter measurement device(내경측정장비), Dual spring structure(이중 스프링 구조)

### 1. 서 론

등속조인트는 차량의 엔진, 변속기 등에서 나온 구동력을 바퀴로 전달하는 핵심부품으로 휠 측에는 BJ(Ball Joint)가 많이 사용된다.<sup>1)</sup> 이 부품은 차량 주행 중 외부 환경하에서 회전 구동을 하므로 먼지와 같은 외부 이물질의 유입을 막을 필요가 있다. 자동차용 구동계 부품 중 하나인 더스트 커버는 두 가지 역할을 한다. 첫 번째는 중간축(Intermediate shaft)을 지지하는 베어링 브라켓의 커버 역할로 외부 이물질이 베어링 브라켓 내부로 침투하는 것을 방지한다. 두 번째 역할은 휠측 조인트(Outboard joint) 외륜 외부에 장착되어 장착부와 상대 부품 사이의 빈 곳에 외부 이물질이 쌓이는 것을 방지한다.

더스트 커버의 내경이 기준 치수보다 클 경우 상대품에서 이탈되며 작을 경우 압입이 되지 않는 문제가 발생한다. 따라서 부품의 내경을 정확히 측정하는 것은 필수적이며, 내경 공차는 더스트 커버의 기능과 품질에 직접 영향을 주므로 엄격한 관리가 필요하다. 하지만 기존의 내경 측정 장비는 더스트 커버 중앙 정렬 실패, 측정자 간 측정 편차 등 여러 가지 문제로 인해 신뢰성 있는 측정이 어려웠다.<sup>2)</sup>

기계부품에서 내경의 측정은 베어링, 부싱, 원형 구멍, 박격포 포신 등 다양한 부품에서 품질관리를 위해 필수적으로 사용된다. Kim 등<sup>3)</sup>은 베어링의 내경 측정 시 3점 지지법에서 나타날 수 있는 오차를 분석하였고, Park

\*Corresponding author, E-mail: hwlee@ut.ac.kr

<sup>1)</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

등<sup>4)</sup>은 원형 구멍의 정밀 내경측정을 위하여 비접촉식 방식에 대한 연구 중 머신비전 시스템을 활용한 영상처리 개선을 연구하였다. Lee<sup>5)</sup>는 전차궤도용 부상 가공품의 불량 감소를 위하여 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 활용하여 인라인 가공 품질 예측 시스템을 개발하였다. Ha 등<sup>6)</sup>은 박격포 포신의 내경 측정장비의 신뢰성을 검증하고 분석하기 위하여 게이지 R&R 방법을 사용하고, 센서를 소형화하고 추가하여 신규 측정장비를 개발하였다. 이와 같은 연구에서도 측정 중 변형이 일어날 수 있는 유연한 부품의 내경 측정에 대한 연구는 찾기가 힘들다.

측정 시스템의 신뢰도를 평가하는 통계적 방법으로 게이지 R&R(Repeatability and Reproducibility, 반복성 및 재현성)이 주로 사용된다. 이는 측정 기기 자체의 변동(반복성)과 측정자(작업자)에 의한 변동(재현성)이 전체 측정 오차에 얼마나 기여하는지를 분석하여 측정 시스템이 허용할 수 있는 수준인지 판단하는 품질관리 기법이다. 이는 주로 제조 공정에서 부품의 품질을 정확하게 검사하기 위해 사용되며, 분석을 통해 계측기 보정, 작업자 교육 등의 개선 조치를 결정한다.<sup>7)</sup>

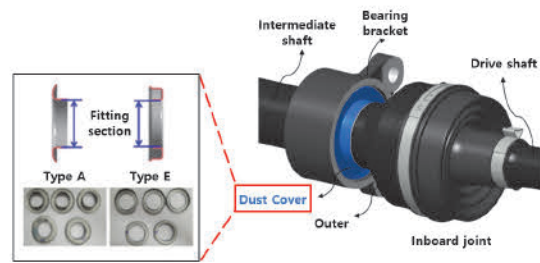
본 연구에서는 유연한 부품의 정밀한 내경 측정을 위하여 통계적 방법인 게이지 R&R 분석을 통해 기존 측정장비의 수준을 진단하고, 문제점을 해결하기 위한 방향을 설정하여 신규 내경 측정 장비를 개발하였다. 초기 3점 측정식 장치를 개발하였으나 장점과 반대로 여러 단점으로 인하여 2점 측정식 장치를 새로이 개발하였다. 자동정렬을 위하여 이중 스프링 구조를 제안하였고, 스프링 구조를 설계하기 위하여 유한요소해석을 사용하였다. 개발된 장치를 이용하여 실제 제품을 측정하고, 통계적 방법인 게이지 R&R을 통하여 측정장치로서의 신뢰도를 평가하였다.

## 2. 기존 측정 장비 개선 사항 검토 및 개선안 도출

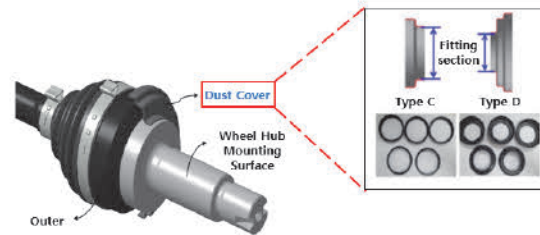
본 연구에서는 총 4가지의 더스트 커버를 대상으로 하였다. Table 1에는 4가지 종류의 더스트 커버에 대하여 기준 내경치수와 공차를 요약하였다. 더스트 커버는 중

Table 1 Inner diameter specifications and tolerances of dust covers

Type	Spec. [mm]	Tolerance [mm]
A	38.5	(0/-0.15)
C	73	(-0.1/-0.25)
D	57.15	(-0.1/-0.25)
E	42	(-0.1/-0.25)



(a) Dust Cover (Type A & Type E)



(b) Dust Cover (Type C & Type D)

Fig. 1 Mounting configuration of 2 different series of dust covers

류별로 조립부에 맞는 내경 크기와 그에 따른 공차가 존재하며, 내경은 최소 38.5에서 최대 73 mm까지로 측정해야 할 범위가 넓은 것을 알 수 있다. 각 더스트 커버는 Fig. 1(a)와 같이 베어링 브라켓 커버 역할의 A, E 타입과 Fig. 1(b)와 같이 휠축 조인트 외륜 외부에 장착되는 C, D 타입이다.

### 2.1 기존 측정 장비 개선 사항 검토

신규 내경 측정 장비 개발에 앞서 기존 측정 장비의 문제점 분석 및 개선 사항 검토를 위해 기존 측정 장비로 A와 C 두 다른 타입의 더스트 커버의 내경을 측정하고 측정된 결과를 미니탭을 활용하여 신뢰성 분석을 수행하였다.

#### 2.1.1 Gage R&R 분석 결과

더스트 커버 2가지 종류에 대해 각각 5개를 4명의 측정자가 기존 측정 장비로 4번 측정된 결과에 대해 분석을 수행하였다. C 타입의 더스트 커버는 기존 측정장비를 사용한 경우, %기여(%Contribution)는 10% 이상, %연구변동(%Study Variation)은 30% 이상, 구별되는 범주 수(Number of distinct categories)는 3으로 나타났다.

일반적으로 공정 모니터링 용도의 측정시스템은 %기여는 1% 미만, %연구변동은 10% 미만, 구별되는 범주 수는 최소 5 이상이 되어야 하며, 합부 판정용인 경우 %기여는 9% 미만, %연구변동은 30% 미만, 구별되는 범주 수는 5 이상이어야 한다.<sup>7)</sup> 본 연구는 합부 판정용으로

이 기준으로 판단하면 기존 측정 장치는 신뢰성 기준을 만족하지 못함을 알 수 있다.

참고로 Type C에 대한 세부적인 분석결과를 Fig. 2에 도시하고, 데이터를 Table 3에 요약하였다. 좌측 상단의 그래프는 변동성분으로 %기여와 %연구 변동을 %를 기준으로 나타낸다. 게이지 R&R, 반복성, 재현성, 부품 대 부품 구분을 각각 도시하였다. %기여에서 반복성(10.07%)과 재현성(작업자, 2.37%)의 합이 게이지 R&R(12.44%)이고, 부품 대 부품은 나머진 87.56%이다. 이것은 측정 장비가 반복적인 측정과 작업자에 대한 영향이 작고 부품간의 치수 차이에 의한 영향이 크게 나와야 하는데 반복성과 재현성에 대한 %기여가 12.44%로 특히 반복해서 측정할 때 문제가 있다는 것을 의미한다. %연구 기여는 합이 35.27%로 나타나 합부 판정용으로도 사용이 어려운 것으로 나타났다.

좌측 두 번째 그림은 작업자에 따른 범위선도이고, 세 번째 그림은 작업자에 따른 부분군 평균선도이다. 우측 그림은 부품 5개에 따른 상자그림과 작업자에 따른 상자그림, 두 요인에 대한 교호작용을 도시하였다. 이와 같은 분석을 통하여 최종적으로 Table 2에서 %기여와 %연구 기여의 총 게이지 R&R 값으로 요약하여 분석하도록

Table 2 Summary of gage R&R for A and C type dust covers using the existing inner diameter measuring device

	Type A	Type C
Variance components		
Total gage R&R	7.60	12.44
Repeatability	6.55	10.07
Reproducibility	1.05	2.37
Worker	1.05	2.37
Worker*Product No.	0.00	0.00
Part-To-Part	92.40	87.56
Total variation	100.00	100.00
Gage evaluation		
%Study variance		
Total gage R&R	27.57	35.27
Repeatability	25.59	31.74
Reproducibility	10.25	15.39
Worker	10.25	15.39
Worker*Product No.	0.00	0.00
Part-To-Part	96.12	93.57
Total variation	100.00	100.00
Number of distinct categories	4	3

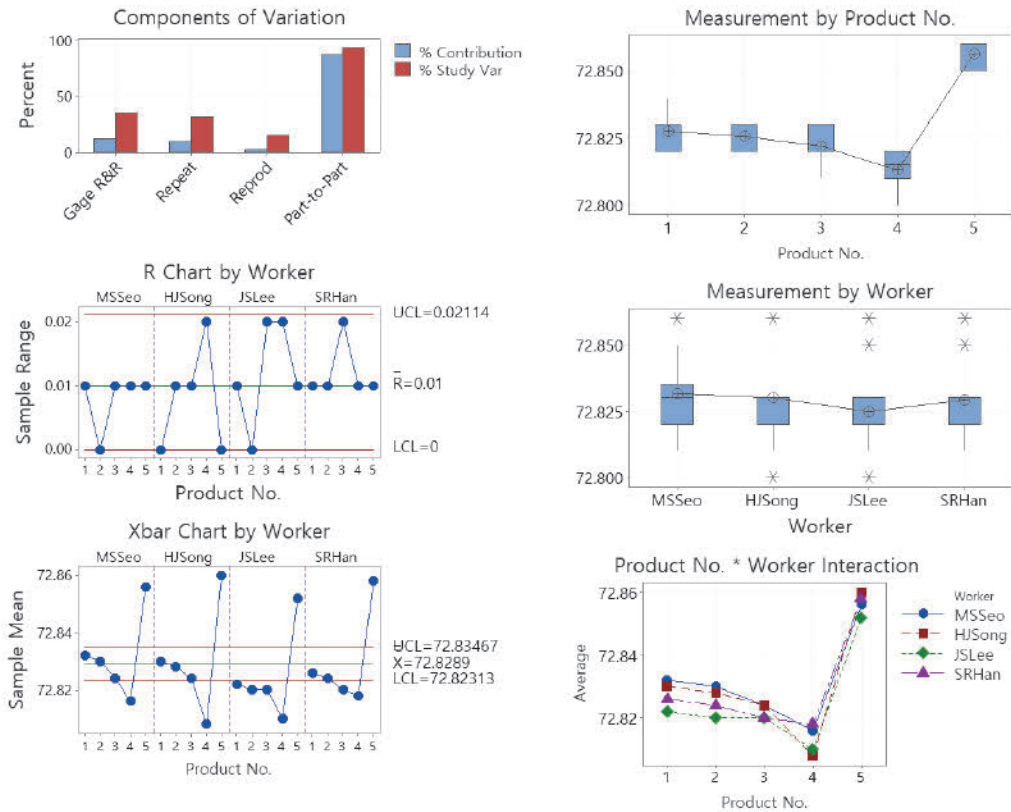


Fig. 2 Results of gage R&R for type C dust covers using the existing measurement device

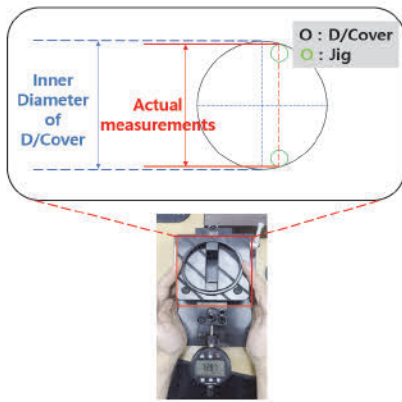


Fig. 3 Measurement error in inner diameter measurement device by eccentricity of alignment

특 한다.

### 2.1.2 기존 측정 장비 문제점 분석

기존 측정 장비가 측정시스템 신뢰성 기준을 만족하지 못하는 이유를 분석하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 기존 측정 장비는 접촉식 2점 측정 방식을 사용하고 측정자가 수동으로 더스트 커버의 중앙 정렬을 수행하게 된다. 이 방식은 측정자의 숙련도에 따라 측정 편차가 발생하게 되는 원인이 된다. 더스트 커버는 약 1 mm의 얇은 두께를 가지므로 정렬 및 측정 시 가해지는 하중에 의해 국부적인 변형이 발생할 가능성과 이로 인한 측정 오차가 발생할 가능성이 있다.

정렬에 대한 문제점을 해결하기 위해서는 기존 내경 측정 장비의 접촉식 2점 측정 방식에 비해 접촉식 3점 측정 방식을 적용하는 것이 중앙 정렬을 수행하기에 더 유리하다고 판단하였고, 접촉식 3점 측정 방식을 적용한 내경 측정 장비에 대한 개발 연구를 진행하였다. 또한 공차 내의 변형을 발생시키는 하중도 계산하였다.

## 2.2 개선안 도출

### 2.2.1 접촉식 3점 측정 장비 개발 연구

장비 개발 연구에 앞서 측정 방식, 측정 하중에 따른 더스트 커버의 변형량 해석을 진행하였다. 해석 조건은 Fig. 4의 하중 조건 개략도에 나타난 것처럼 원주방향 위치는 접촉식 2점, 3점 측정 방식에 맞게 설정하고 높이 방향의 위치는 변형에 가장 취약하다고 판단되는 자유단 끝단으로 설정하여 각 위치에 10N의 하중을 부과하였다.

더스트 커버의 반경방향 변형량 해석 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 A타입에서 접촉식 3점 측정 방식을 사용하였을 때 측정 하중 3.5 N에서 공차 범위인 0.01 mm

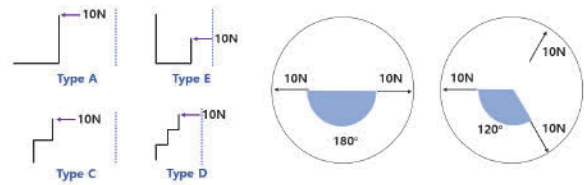


Fig. 4 Schematic diagram of load analysis conditions for 2 or 3 points measuring method

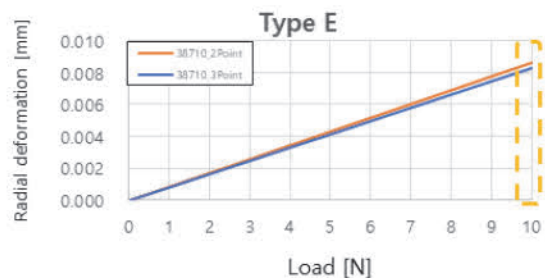
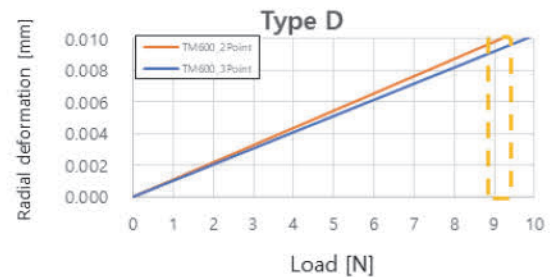
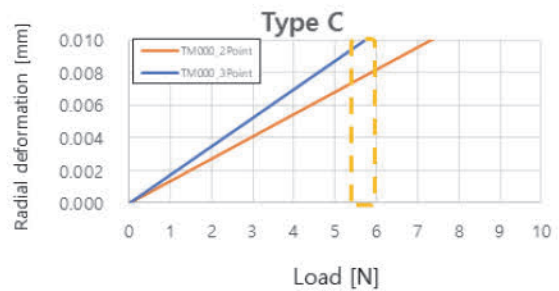
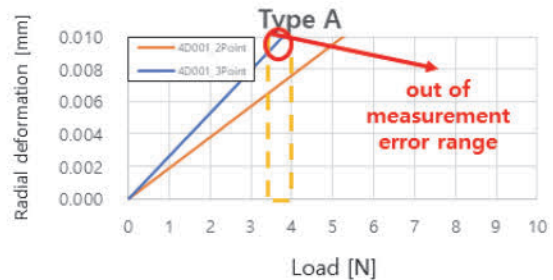


Fig. 5 FE Analysis results of various dust covers deformation

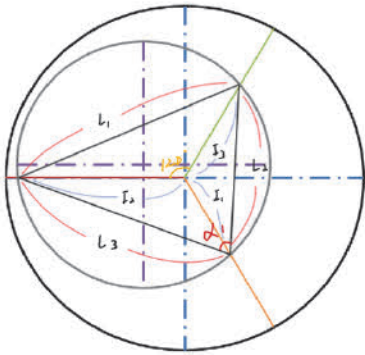


Fig. 6 Inner diameter calculation using the second law of cosines

이상의 변형이 발생하였다. 4가지 타입을 모두 고려하면 접촉식 3점 측정 장비에서 측정 시 부품에 부과되는 하중은 3 N 이하가 되도록 설정하는 것이 타당하다고 판단된다.

접촉식 3점 측정 장비의 경우 3점에서의 변위는 다이얼 게이지를 사용하여 측정할 수 있다. 3점에서 얻은 다이얼 게이지 변위( $L_1, L_2, L_3$ )로부터 대상물의 내경을 계산하기 위하여 Fig. 6과 같이 제2 코사인 법칙을 사용한다. 다이얼 게이지는 120도 각도로 설치되어 있으므로 대상물에 내접하는 삼각형의 길이( $L_1, L_2, L_3$ )를 구할 수 있고, 내접 삼각형 치수에서 대상물의 반지름을 구할 수 있다. 따라서 더스트 커버의 변형이 없다고 가정하면 커버의 측정 위치 편심 여부와 관계없이 내경 측정이 가능하다.<sup>8)</sup>

하지만, 이 과정에서 측정값을 사용하여 내경을 계산하는 별도의 계산 과정이 필요하여 내경 측정값을 직관적으로 확인하기 어려운 한계점을 가진다. 제작된 3점 측정장비는 Fig. 7과 같다. 측정에 사용된 다이얼 게이지의 측정 하중은 1.74 N으로 측정 하중 3 N 미만의 측정 하중 조건을 충족한다.



Fig. 7 Developed three-point contact-type inner diameter measuring device

접촉식 3점 측정 장비가 신뢰성 기준을 충족하는지 평가하기 위해 게이지 R&R 분석을 수행하였다. 더스트 커버 4가지 종류 5개를 3명의 측정자가 접촉식 3점 측정 장비로 측정한 결과에 대해 분석을 수행하였고, 요약한 결과는 Table 3과 같다.

접촉식 3점 측정 장비는 4가지 더스트 커버의 %기여는 10 % 이상, %연구변동은 30 % 이상, 구별되는 범주 수는 4 미만으로 기존의 장치와 동일하게 측정시스템이 신뢰성 기준을 만족하지 못함을 알 수 있다.

다음으로 접촉식 3점 측정 장비가 측정시스템 신뢰성 기준을 만족하지 못하는 이유를 분석하였다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 개발한 접촉식 3점 측정 장비의 경우 상용 다이얼 게이지 제품에 내경 측정이 가능하도록 별도의 설계를 통해 가공한 측정자를 사용하였다. 하지만 반복적인 사용 시 측정자의 고정성이 풀리는 문제가 발생하며 측정자 축의 흔들림이 발생하고 공차로 인해 더스트 커버의 중심 정렬 과정에서 측정자 축의 편심이 발생하였다. 이와 같은 이유로 측정 오차가 발생하며 이는 측정시스템 신뢰성 기준을 만족하지 못하는 결정적인 원인으로 작용하였다.

결과적으로 복잡한 계산 구조로 인해 내경 측정값을 직관적으로 확인하기 어려운 단점이 있으며 신뢰도 평가 결과 역시 기존 내경 측정 장비에 비해 좋지 않기 때문에 접촉식 3점 내경 측정 장비는 더스트 커버 내경 측정 장비로는 부적합하다는 결론을 얻을 수 있었다. 따라

Table 3 Results of gage R&R for contact-type three-point inner diameter measuring device

Type	%Contribution	%Study Var	# of distinct categories
A	100	100	1
C	94.38	97.15	1
D	98.95	99.47	1
E	100	100	1

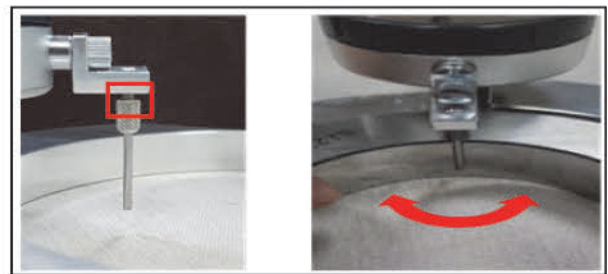


Fig. 8 Reason of measurement errors in the developed three-point contact-type measuring device

서 기존의 접촉식 2점 측정 방식을 활용하고 해당 방식의 문제점을 개선한 신규 내경 측정 장비의 개발이 필요하다고 판단하였다.

**2.2.2 접촉식 2점 측정 장비 개선 방안**

접촉식 2점 측정 장비는 더스트 커버의 중심 정렬 정확도를 확보하기 어려운 문제가 있었다. 해당 문제를 개선하기 위해 더스트 커버의 중앙 정렬 기능을 수행하는 별도의 정렬 지그를 Fig. 9와 같이 설계하였다. 측정 대상인 더스트 커버는 총 4가지 종류이며 내경 범위는 38.5 ~ 73 mm이다. 따라서 중앙 정렬을 위한 정렬 지그는 해당 내경 범위를 갖는 모든 더스트 커버에 대응할 수 있어야 하는 특징을 가진다.

Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 초기 정렬 지그는 측정 대상인 더스트 커버의 내경 범위를 모두 대응할 수 없는 한계를 가진다. 따라서, 측정 대상인 더스트 커버의 내경 범위를 모두 포함할 수 있는 형상으로 Fig. 10과 같은 V-형상의 정렬 지그를 고안하였다.

Fig. 3의 슬라이드 레일에 고안된 V-형 정렬 지그를 부착할 수 있도록 수정 후 더스트 커버의 중앙 정렬을 수행했을 때의 측정 결과 개선 효과를 확인하기 위해 게이지 R&R 분석을 진행하였다. 3D 프린팅을 사용하여

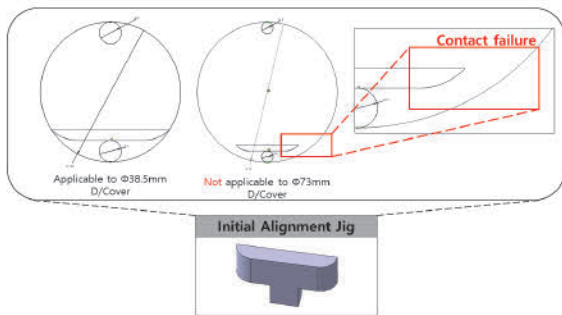


Fig. 9 Insufficient measurement range of the initial alignment jig

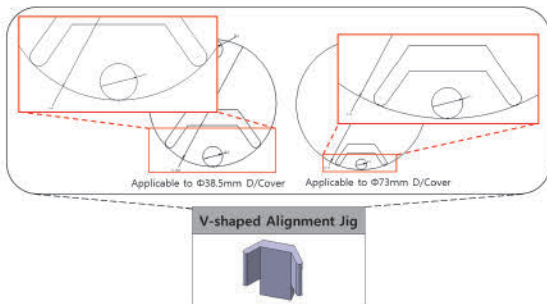


Fig. 10 The V-shaped alignment jig developed with sufficient measurement range

PLA(Poly Lactic Acid) 소재로 정렬 지그를 제작한 후 접촉식 2점 측정 장치에 이를 적용하여 더스트 커버의 중앙 정렬을 수행하였다.

측정시스템의 신뢰성 기준 평가는 더스트 커버 4가지를 3명의 작업자가 5번씩 측정한 결과에 대해 게이지 R&R 분석을 통해 진행하였으며 그 결과는 Fig. 11에 제시하였다.

D 타입을 제외한 나머지 더스트 커버에서는 측정시스템을 신뢰할 수 있는 수준의 평가 결과를 보였다. 하지만 PLA 소재의 정렬 지그는 금속 소재에 비해 강성이 낮아 외력에 의한 변형에 취약하며, 제작 공차 및 표면 조도 등의 이유로 정렬 지그는 금속 소재로 가공하여 사용하는 것이 바람직하다. D 타입의 측정 결과 또한 이러한 이유로 인해 영향을 받았을 것으로 예상하였다.

따라서, 앞선 문제점들을 해결하고자 정렬 지그의 소재를 알루미늄(AL) 6061로 변경하고, 신뢰성 기준에 미달되었던 D 타입에 대해 재측정 및 재분석을 진행하였다. 3명의 작업자가 D 타입을 5개 측정하였다.

Table 4에서 확인할 수 있듯이 정렬 지그의 소재 변경 이후 신뢰 기준에 미달하였던 D 타입도 신뢰 기준을 만족하였다. 이것은 기구의 강성을 증가시켜 편심이나 처짐을 줄여 반복성과 구별능력이 향상된 것으로 판단된다. 이 결과를 바탕으로 정렬 지그를 통한 더스트 커버 내경 측정 결과의 정확도 개선 효과를 확인할 수 있다.

측정자별로 더스트 커버 정렬 시 가해지는 하중의 차

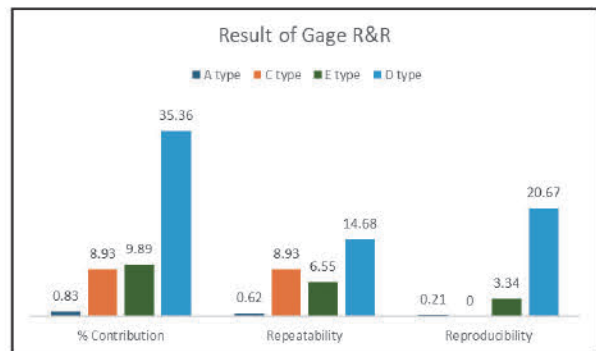


Fig. 11 Gage R&R results using PLA alignment jig

Table 4 Summary of gage R&R results between PLA and AL6061 alignment jigs

Material	%Contribution	%Study Var	# of distinct categories
PLA	35.36	59.46	1
AL6061	0.86	9.28	15

이로 인해 더스트 커버의 변형 정도에 차이가 발생하며 변형 정도는 측정자 속도도에 따라 달라지는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해, 어느 측정자가 측정하더라도 동일한 정렬 및 측정 하중이 가해질 수 있도록 하는 구조를 고안하였다.

해당 구조는 Fig. 12에 나타내었다. 이 구조는 이중 스프링 구조로, 정렬과 측정이 동시에 이루어지도록 정렬, 측정, 고정 지그 사이에 두 개의 스프링이 배치된 특징을 가진다. 고정지그와 정렬지그 사이의 스프링과 정렬지그와 측정지그 사이의 스프링으로 구성된다. 해당 구조에 적용할 스프링을 선정하기 위해 스프링 하중에 따른 더스트 커버의 변형량 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 두 개의 스프링 제원은 Table 5에 요약하였다.

상용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS/Standard[8]를 이용하여 변형 해석을 진행하였다. 모델링에서 스프링은 공학적 요소로 강성을 입력하는 방식을 사용하였다. 변형 해석 결과는 Table 6과 같고, Fig. 13에는 각 해석 경우에 대하여 변위를 도시하였다. C 타입에서 측정 장비의 측정 허용 오차범위인 0.01 mm를 초과하는 변형이 발생하였다.

앞서 Fig. 12에 나타낸 구조는 고정 지그의 위치에 따라 스프링 하중의 차이가 발생하게 된다. 그러나 본 해석은 적용한 스프링에 의해 발생하는 더스트 커버의 최대 변형량을 확인하기 위한 해석이므로, 해석에서는 실제 발생하는 변형보다 더 큰 변형이 발생하게 된다. 즉, 실제 측정 시에는 해석에서 가해지는 스프링 하중에 비해 더 적은 하중이 가해질 것이므로 해당 문제는 실측을 통한 확인이 필요하다.

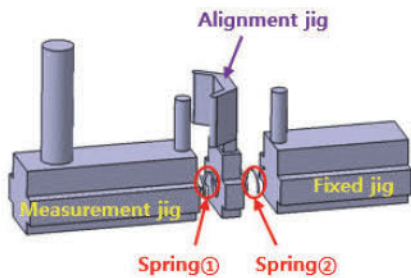


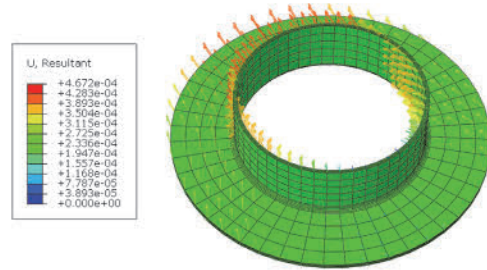
Fig. 12 Schematic diagram of dual-spring structure

Table 5 Spring specifications applied in FE Analysis

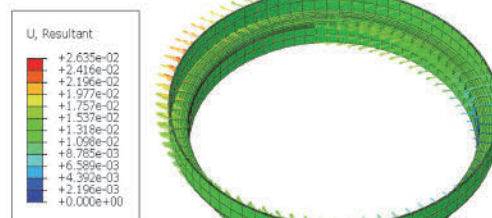
Spring	Free length [mm]	Spring constant [N/mm]	Outer diameter [mm]	Allowable deflection [mm]	Maximum load [N]
①	15	2	10	10	9.8
②	25	0.98	10	6	11.8

Table 6 Deformation results of dust covers by FE Analysis under dual-spring structures

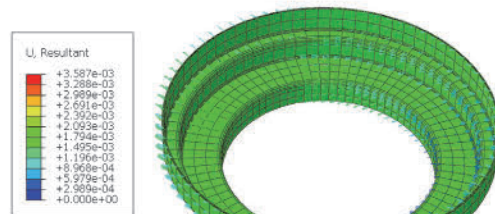
Type	Deformation of dust cover [mm]
A	0.00046
C	0.026
D	0.0035
E	0.0015



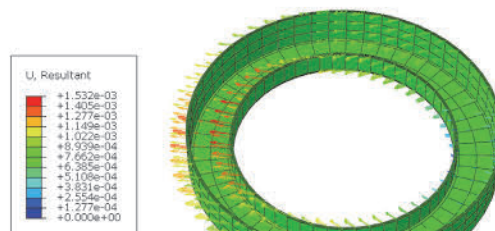
(a) FE Analysis results of Type A



(b) FE analysis results of type C



(c) FE analysis results of type D



(d) FE analysis results of type E

Fig. 13 Deformation results of dust covers by FE analysis

하지만 해당 구조는 기존 접촉식 2점 측정 장비에 적용할 수 없기 때문에, 앞서 고안한 V형 정렬 지그 및 이중 스프링 구조를 적용한 신규 내경 측정 장비를 설계하였다.

### 3. 연구 결과 및 고찰

#### 3.1 신규 내경 측정 장비 개발

신규 내경 측정 장비는 Fig. 14와 같이 접촉식 2점 측정 방식을 기반으로 V형 정렬 지그와 이중 스프링 구조를 통한 자동 정렬 기능을 가진다.

측정시스템 신뢰성 평가에 앞서 개발한 신규 내경 측정 장비의 실제 측정 오차를 알아보기 위해 측정 및 정렬 하중에 의해 변형이 발생하지 않으며 이상적인 진원도를 가지도록 특수 가공된 교정자의 내경 측정을 진행하였다.

교정자 4가지를 측정하였으며, 종류별로 45도씩 회전시켜 총 7번씩 측정을 진행하였다. Fig. 15에 도시하였듯이 교정자 측정 결과 교정자의 내경을 기준으로 하여 최

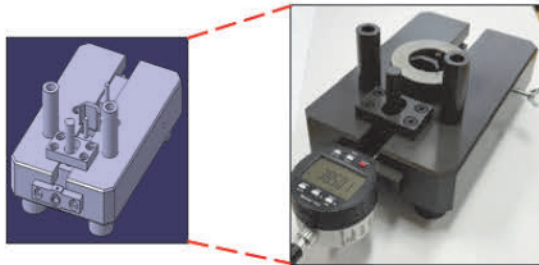


Fig. 14 Developed inner diameter measuring device

대 ± 0.006 mm 정도의 측정 오차 수준으로 더스트 커버의 허용 측정오차 범위인 0.01 mm를 충족함을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 Gage R&R 분석 결과

신규 내경 측정 장비가 신뢰성 기준을 충족하는지 평가하기 위해 게이지 R&R 분석을 수행하였다. 더스트 커버 4가지를 3명의 작업자가 5개씩 개발한 측정 장비로 측정한 결과에 대해 분석하였고 그 결과는 Table 7과 같다.

분석 결과 %기여가 1.8 6% 미만, %연구변동은 13.64 % 미만, 구별되는 범주 수는 10 이상으로 측정시스템이 신뢰성 기준을 만족함을 알 수 있다.

Fig. 16의 결과에서 ‘Measurement by Product No.’ 그래프를 보면, 제품 번호별 측정값 분포가 1~4번 부품의 측정값은 거의 유사한 평균을 가지지만, 5번 부품은 상대적으로 높은 측정 평균을 가지는 것을 확인할 수 있다.

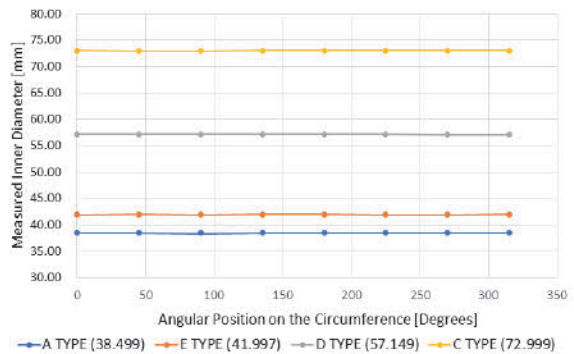


Fig. 15 Measurement on the reference calibration rulers

Table 7 Results of gage R&R for all type dust covers using developed inner diameter measuring device

	Type A	Type C	Type D	Type E	
Variance components		%Contribution of variance components			
Total gage R&R	0.08	0.81	1.80	1.86	
Repeatability	0.07	0.43	1.80	0.89	
Reproducibility	0.01	0.38	0.00	0.97	
Worker	0.01	0.21	0.00	0.00	
Worker*Product No.	0.00	0.17	0.00	0.97	
Part-To-Part	99.92	99.19	98.20	98.14	
Total variation	100.00	100.00	100.00	100.00	
Gage evaluation		%Study variance			
Total gage R&R	2.83	8.98	13.40	13.64	
Repeatability	2.72	6.56	13.40	9.45	
Reproducibility	0.76	6.13	0.00	9.84	
Worker	0.76	4.54	0.00	0.00	
Worker*Product No.	0.00	4.12	0.00	9.84	
Part-To-Part	99.96	99.60	99.10	99.07	
Total variation	100.00	100.00	100.00	100.00	
Number of distinct categories	49	15	10	10	

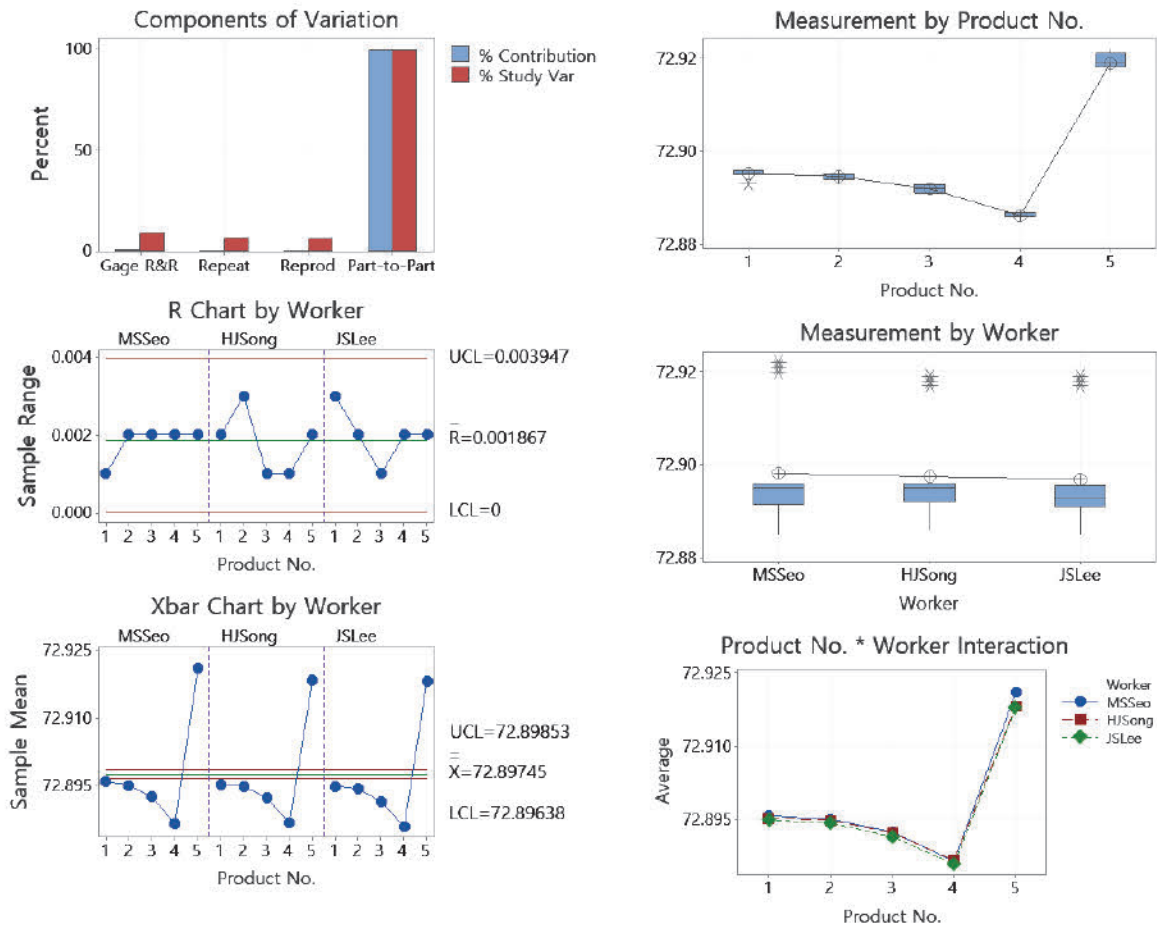


Fig. 16 Results of gage R&R for type C dust covers using developed inner diameter measuring device

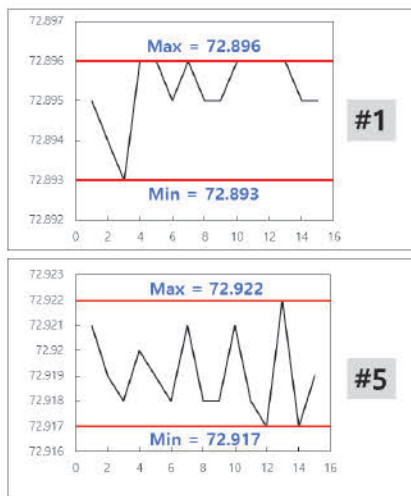


Fig. 17 Summary of measurement for Type C (#1, #5)

이는 측정 장비가 부품 대 부품을 구별할 수 있는 것을 의미한다. 또한, ‘Measurement by Worker’를 통해 측정자

3명의 측정 평균값이 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 측정 장비의 재현성이 우수함을 나타낸다. 그리고 R Chart by Worker를 통해 모든 측정값이 관리 한계선 내에 위치함을 확인할 수 있고 이는 측정 장비의 반복성이 우수한 것을 의미한다.

앞서 Table 6의 해석 결과에서 C 타입의 변형량이 측정 허용 오차 범위를 초과하는 부분이 있었고 실측을 통해 실제 스프링 하중에 의해 발생하는 더스트 커버의 변형에 대한 분석이 필요하다고 언급하였다. Fig. 17에서 Type C의 1번 부품과 5번 부품의 측정값을 통해 해당 부분을 분석하였다. Fig. 19는 1번 부품과 5번 부품의 총 15회 반복 측정값을 나타낸 것이다. 1번 부품의 경우 측정값의 최대, 최소 편차는 0.003 mm 수준이며, 5번 부품의 편차는 0.005 mm 수준이다. 이는 동일 부품에 반복적인 측정 하중을 여러 번 가했음에도 불구하고, 허용 측정 오차범위인 0.01 mm를 초과하는 수준의 측정값 편차가 발생하지 않았음을 의미한다.

Table 1의 더스트 커버 별 공차 범위와 Fig. 17의 결과

값을 비교해 보면, 5번 부품의 경우 C 타입의 공차 범위를 초과하는 더스트 커버임을 알 수 있고 이는 5번 부품이 공차 범위를 초과한 불량 부품임을 의미한다. 이와 같이 신규 내경 측정 장비는 더스트 커버 내경 측정 장비로서의 역할을 문제없이 수행함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존 내경 측정 장비의 더스트 커버 중앙 정렬 실패, 측정자 간 측정 편차로 인한 더스트 커버의 내경 공차 관리가 어려운 문제를 해결하기 위해 더스트 커버 중앙 정렬을 수행하는 정렬 지그 설계와 측정자 간 측정 편차를 개선하기 위한 이중 스프링 구조를 설계하고 시제품을 개발하여 자동 정렬 기능을 구현하였다. 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 38.5 ~ 73 mm의 내경 범위를 가지는 더스트 커버에 단일 장비로 모두 측정이 가능하도록 V-형 정렬 지그를 설계하여 기존 내경 측정 장비의 문제점이었던 더스트 커버의 중앙 정렬 문제를 해결하였다.
- 2) 이중 스프링 구조 설계를 통해 더스트 커버 자동 정렬 기능을 구현하여 기존 내경 측정 장치의 문제점이었던 측정자 숙련도 의존 문제를 해결하였다.
- 3) 교정자 측정 결과 및 게이지 R&R 분석을 통해 신규 더스트 커버 내경 측정 장비가 %기여가 1.86 % 미만, %연구변동은 13.64 % 미만, 구별되는 범주 수는 10 이상으로 측정시스템이 신뢰성 기준을 만족하여 허용 공차 이내의 정밀도와 반복, 재현성을 모두 만족함을 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 글로벌대학30의 결과입니다(2025-RISE-11-004).

#### References

- 1) H. Lee, J. Y. Jeong, H. Cho and B. Oh, "Analysis of Contact Force and Plastic Deformation of Parts in C.V. Joint for Passenger Car Using Quasi-Static Analysis," Transactions of KSAE, Vol.29, No.5, pp.485-492, 2021.
- 2) H. Song, M. Seo, J. Lee, B. Oh and H. Lee, "Development of Measuring Device for the Inner Diameter of Dust Covers of the Outer Constant Velocity Joints on the Vehicle Wheel-Side," KSAE Daejeon Sejong Chungcheong Spring Conference Proceedings, p.23, 2025.
- 3) M. H. Kim and T. Y. Kim, "Geometric Error Analysis of Contact Type Three Points Supporting Method for Inner Diameter Measurement," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.25, No.5, pp.69-76, 2008.
- 4) C. Y. Park, H. K. Kweon, J. H. Li and H. X. Zhang, "A Study on Improvement of Image Processing for Precision Inner Diameter Measurement of Circular Hole," Journal of Semiconductor & Display Technology, Vol.16, No.3, pp.8-13, 2017.
- 5) H. Lee, "Development of In-Line Machining Quality Prediction System Based on Inner-Circle Precision Measurement for Reducing Bushing Machining Defect," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.30, No.3, pp.239-243, 2021.
- 6) J. Ha, Y. Park and P. Koo, "Reliability Verification and Analysis of the 81 mm Mortar Barrel Bore Measurement Equipment," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.26, No.5, pp.1029-1034, 2024.
- 7) S. H. Lee, Minitab Measurement System Analysis: Theory and Practice, Eretec, 2022.
- 8) T. H. Hopp, "The Sensitivity of Three-Point Circle Fitting," National Institute of Standards and Technology (NISTIR 5501), Gaithersburg, 1994.
- 9) Dassault Systèmes Simulia Corp., Abaqus 2020 Documentation: Analysis User's Guide, Providence, RI, USA, 2020.