

3차원 측정기의 현상과 문제점

정 석 주

서울산업대학 기계설계학과 교수



●1936년생
●고체역학에서 응력해석 및 재료거동 특성을 전공하였으며, 특히 各種 응력해석 및 構架과 구조물의 동적거동 등에 많은 관심을 가지고 있다.

1. 머리 말

3次元 測定器가 測定器 分野에서 重要な 位置를 차지한 지도 7~8年 정도가 되고 있다. 오늘날에는 各種測定機器의 展示會 등에서도 3次元 測定器가 차지하는 공간이 점차로 커져가고 있으며 省力化機器로서의 3次元 測定器의 急速한 發達을 볼 수 있다. 加工과 計測은 불가불의 關係^(1,2)에 있음에도 불구하고 從來에는, 加工品은 3次元의 立體的인 形狀이면서, 測定은 1次元的, 2次元的으로 행하여져 왔는데 이러한 理由는 3次元 空間內的 任意의 두 점간의 크기 및 相互의 關係位置를 구하는데 있어서 座標計算에 많은 시간을 소비하게 되고 現實的으로 3次元測定이 곤란하였기 때문이다. 그러나 近年 컴퓨터의 發達로 3次元測定の 難點이었던 座標計測을 容易하게 할 수 있게 됨으로써 3次元 測定器 發展의 原動力^(3,4)이 되었다고 해도 過言은 아닐 것이다.

또한 低成長時代로의 突入에 따라 量的擴大로부터 質的向上으로 轉換하고 計測分野에 있어서의 測定精度의 向上과 省力化의 要求에 의해 3次元 測定器의 發達이 急速히 進展되고 있다. 이 글에서는 最近의 CNC 3次元測定器, 3次元測定器 데이터 處理裝置, 3次元測定器用 센서 등에 관한 現狀과 問題點에 관하여 알아보고자 한다.

2. CNC 3次元 測定器

2.1 CNC 3次元 測定器의 分類

表 1에 나타나 있듯이 實用化되고 있는 CNC 3次元 測定器는 開發目的에 의해 세 종류⁽⁵⁾로 나뉘어 진다. 첫째는 高精密 3次元 測定器로서 測定室內에서 사용하기 위한 것으로 測定誤差를 最小로 하고 自動測定器로서의 高效率化를 目的으로 한 것이다. 두번째는 汎用 CNC 3次元 測定器라고 할 수 있는 것으로 從來의 手動 타이프(manual type) 3次元 測定器가 發達된 것이다.

이것은 省力化 機器로서의 3次元 測定器를 만들기 위한 것으로 手動測定과 CNC 自動測定이 可能한 機種도 있다. 세번째는 生産라인에 密接한 3次元 測定器인 CNC 專用機이다. 이것은 生産工場의 FMS化, 無人化를 추구하기 위한 것으로 測定로봇이라고도 불리우고 있다.

2.2 CNC 3次元 測定器의 特性

制御系를 包含하여 CNC 3次元 測定器를 크게 나누면 그림 1에 나타난 것과 같이 터치(touch) 信號 프로브를 이용하여 PTP(point-to-point)의 自動測定을 하는 것과 그림 2와 같이 輪刻形狀의 連續測定을 하는 것의 두 가지가 있지만 모두 機械本體의 X,Y,Z 各軸의

표 1 CNC 3次元 測定器의 分類

	高精度 CNC	汎用 CNC	인프로세스 CNC
發生要因	工作機械의 加工精度 向上 人間的 操作 影響 排除	뉴얼기의 延長 省力化	生産工場의 自動化 CAD/CAM
測定範圍	小	中-大	小-大
價格/測定範圍	高價	安價-中價	中-高價
測定精度 價值決定精度	高精度	中-高 精度	中精度
使用環境	檢査室	檢査室	加工場所
測定速度	低速	中-高速	高速
測定로트	小	小-中	大
被測定物 種類	大	大	小-中
測定方法	point-to-point	point-to-point	point-to-point
複雑한 形狀 및 斜面測定	多軸 프로브 回轉 프로브 回轉 테이블	多軸 프로브 回轉 프로브 回轉 테이블	多軸 프로브 回轉 테이블
人間的 介在	初期條件의 設定이 必要	初期條件의 設定이 必要	完全 無人化도 可能
測定器 例	H4222(三豐) UMM, UMC, UPMC (ZEISS) PMM(LEITZ)	FN, BN(三豐) WMM, WPM(ZEISS) WPN(LEITZ) IOTO(DEA) GA800A(東京精密) VALIDATOR(B&S) FERRANTI	MIC(三豐) PAG(PRIMA)

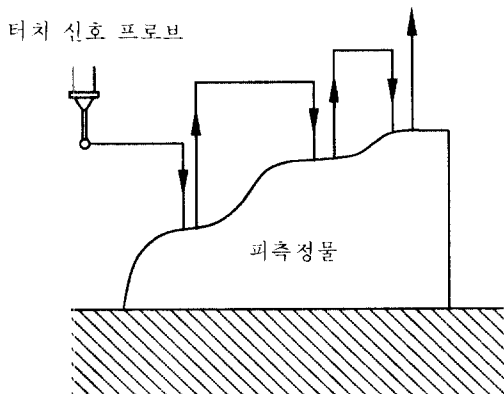


그림 1 터치 신호 프로브에 의한 point to point 測定

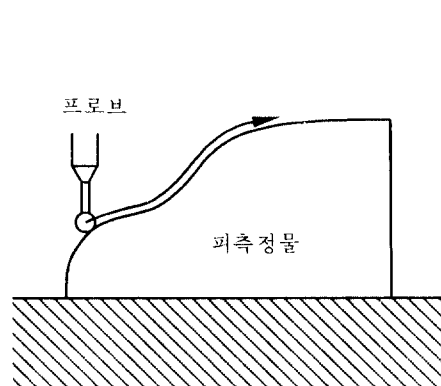


그림 2 輪刻形狀의 連續測定

多動量으로 分解하고 서보모터 (servo moter) 를 구동시키고 있다.

2.3 驅動, 位置決定의 制御

그림 3에 PTP測定을 目的으로 한 3次元 測定器의 한軸을 나타낸다. 測定順序는 매뉴얼 操作을 CPU에 알리거나, 프로그램을 作成하고 CPU에 記憶시켜 두어, 測定順序를 나타내는 一運의 命令을 CPU로부터 移動命令 펄스 로써 서보機構에 보내 DC 서보모터를 回轉시켜 各軸을 移動시켜서 그 位置를 比較回路에 휘드백 (feed-back) 하여 安정한 驅動을 얻고 있다. 휘드백에는 모터 回轉 檢出用 펄스 제너레이터(pulse generator)에 의한 方式(semi closed 方式)과 스케일(scale) 信號로부터 휘드백하는 方式(closed 方式)이 있다.

3次元 測定器에는 測定の 基準이 되는 高精度 스케일⁽⁶⁾이 붙여져 있기 때문에 이 스케일(scale) 信號를 位置 휘드백에 使用하면 高精度의 位置決定을 할 수 있다.

여기서는 프로브가 測定物에 接觸한 瞬間의 座標值를 정확히 알아낼 需要가 있으며 各軸의 加減速制御를 원만히 하고 큰 加速度를 주지 않도록 컨트롤하지 않으면 안 된다.

또한, 3次元의 구동이기 때문에 複數軸同時 制御(3~7軸)를 할 必要가 있고 이들 制御에는

보통 複數值의 마이크로 프로세서(micro proceaser)와 함수발생용 LSI, 테이블 演算 등을 조합하여 구성하고 있다.

2.4 今後의 課題

工作 機械의 CNC化는 旋盤 80%, 후라이즈 盤은 70%를 넘고 있는 現在, 3次元 測定器의 CNC化는 급속히 進전되고 있다.

工作 機械의 CNC化가 計測에 要求되고 있는 機能은 다음의 두 가지^(7~9)로 要約할 수 있다.

(1) 測定物 및 測定部의 形狀은 여러 가지이며, 이 多樣性에 對應하기 위해서는, 프로브와 測定物의 相對的인 位置關係 및 프로브의 先端 形狀을 人間의 介入 없이 測定物에 適合시키지 않으면 안 된다.

이 때문에 測定物 및 프로브의 姿勢制御 및 프로브의 自動 交換 機能이 不可決하게 된다.

(2) 測定對象은 直線, 平面, 丹弧 등의 座標크기와 自由曲面의 形狀測定이 대부분이다. 따라서 종래의 測定機能과 PTP 測定機能을 병합시키는 것이 바람직하다.^(10,11)

(1, 2)의 機能을 모두 갖춘 CNC 3次元 測定器는 아직 實現되지 않는 實情이지만, 今後의 課題로서 해결해야 될 것으로 여겨진다.

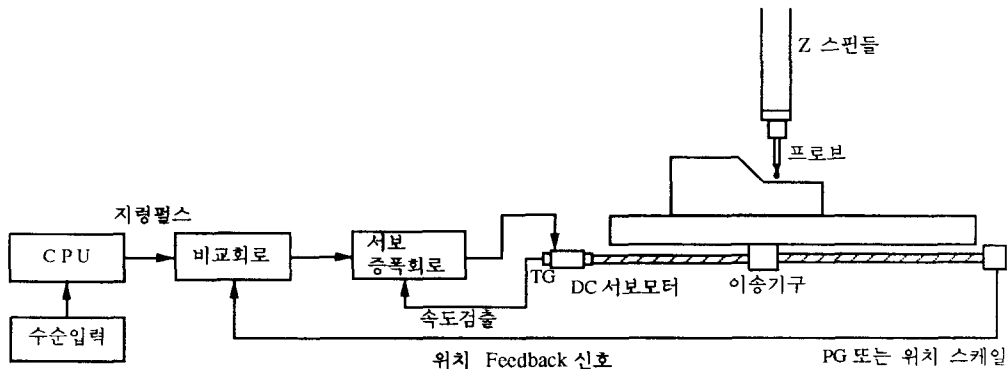


그림 3 CNC 3次元 測定器 驅動系

표 2 3次元 測定에 使用된 CPU와 그 內容

番 號	CPU 分類	프로그램의 種類	汎用 프로 그램	形狀 프로 그램	統計 프로 그램	NC테이프 作成 프로그램	形狀設計 值 作成 프로그램	汎用 CPU로 使用
		컴퓨터의 種類						
1	專 用	자이아나 8	○	○		○	○	
2		자이아나16	○	○	○	○	○	○
3	미 니 컴 · 퍼 스 컴	NOVA 4	○	○	○		○	○
4		HITAC E600	○	○			○	○
5		PANACOM U1100	○	○				○
6		YHP 9825T	○	○			○	○
7		HP 85F	○	○				○

3. 3次元 測定器 데이터 處理裝置와 使用法

3.1 3次元 測定과 데이터 處理

最近, 機械 製品이 각종 크기(원의 中心 位置와 직경, 軸 또는 面의 벗어남 각도)를 測定해 보기 위한 3次元 座標 測定器의 使用이 대폭 증가하고 있다.

이것은 NC機械 工作의 導入에 의하여 測定을 必要로 하는 部品의 形狀이 복잡하게 되고, 또한 製品의 生産 機種의 擴大에 의해 多品種 少量 生産의 傾向이 높아짐에 따라 從來의 旋盤을 사용하거나, 또는 治具를 제작하여 測定함으로써는 測定效率이 나쁜은 물론, 長時間 測定에 있어서는 迅速性도 저하하게 된다.

또, 最近의 3次元 測定器의 扱速한 정도의 向上 및 本體에 접속된 데이터 處理用으로서의 전용 마이콤 시스템의 開發도 커다란 要因이라고 생각되어 진다.

데이터 處理의 컴퓨터화는 作業性的의 向上에 비약적인 效果를 보여 주고 있기 때문에 그 例를 몇 가지 설명하고자 한다.

3次元 測定器의 데이터 處理에 사용되어지는 컴퓨터의 例를 表 2에 나타내었다.

3次元 測定器에 使用되어지는 컴퓨터는 크게 나누어 미니컴, 퍼스컴, 전용컴퓨터 등 세 가

지로 나눌 수 있다.

이 중 가장 많이 이용되는 것이 전용컴퓨터이며 전용컴퓨터는 測定者가 測定時에 될 수 있으면 負荷를 적게 받도록 設計되어 있기 때문에 초보자도 쉽게 응용할 수 있으며 미니컴은 현재 지니고 있는 프로그램으로는 處理할 수 없는 特殊한 프로그램이 필요한 경우, 또는 大形 컴퓨터와 온라인(on-line)하여 사용할 경우에 많이 應用되어 진다. 퍼스컴은 전용컴퓨터가 開發되기 전에 많이 쓰여지던 데이터 處理裝置였지만 지금은 점차로 적게 應用되어지고 있다.

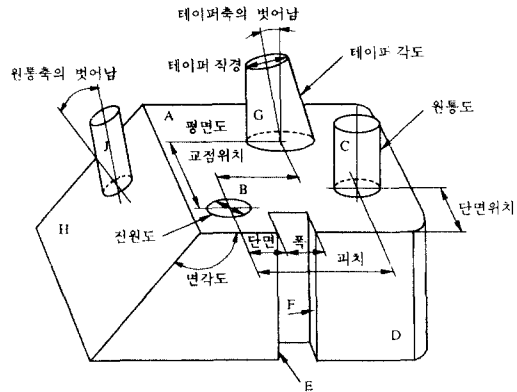


그림 4 一汎用 測定用 測定物

표 3 汎用 測定用的 프린트 例

Data 番號	處理 番號	各種 項目	實際值	設計值	誤差	上限 公差	下限 公差	公差
2	22	DC	25.079	25.000	0.079	0.050	-0.050	0.029
		ROUND			0.012	0.010	0.000	0.002
3	100	DC	15.071	15.000	0.071	0.050	-0.050	0.021
		CYL			0.006	0.050	0.000	
4	176	R	79.926	80.000	-0.074	0.050	-0.050	-0.024
5	300	Y	-47.313	47.300	0.013	0.100	-0.100	
6	300	X	28.299	28.300	-0.001	0.100	-0.100	
7	308	X	47.897	48.000	-0.103	0.100	-0.100	-0.003
		DX	-19.597	19.700	-0.103	0.100	-0.100	-0.003
8	110	TP	0.063	0.070	-0.007			
9	171	X	30.075	30.000	0.075	0.100	0.000	
		Y	13.940	14.000	-0.060	0.100	-0.100	

*DC Round : 진원도, DC CYC : 원동도, R : 지름, X : 3차원 상의 시편 x좌표치, Y : 3차원 상의 시편 Y좌표치, DX : 원의 x좌표치, TP : 나사의 피치각 의미.

3.2 汎用 測定에 있어서의 측정 例

그림 4에 나타난 항목의 데이터를 구하려면 汎用 測定用 프로그램이 이용되어 진다. 이 중에는 測定形狀과 目的에 따라 여러 가지의 處理番號가 있어 測定者는 處理番號表에서 處理番號를 찾아 키보드(key board)로부터 번호를 입력한 후 實際의 測定을 한다.

測定 데이터는 여러 가지가 구해지며 그 중에서 必要한 데이터만 프린트할 수도 있다. 測定 데이터의 一例를 표 3에 나타내며 設計值組합한 誤差를 프린트시킬 수도 있다.

3.3 形狀測定에 있어서의 測定 例

그림 5에 나타난 실린더 內側의 形狀 데이터를 구하는 데에는 形狀 프로그램을 사용할 수 있다. 일반적으로는 汎用 프로그램으로 基準을 設定하고 그 후 形狀 데이터의 프린트, 作圖를 한다.

形狀測定の 方法으로서 測定者(以下 프로브라고 함)를 測定物의 形狀에 따라 움직이게 하여 連續데이터를 自動적으로 움직이게 하는 方法⁽¹²⁾, 測定面이 약할 때에는 전자 프로브를

이용하여 測定하는 方法이다.⁽¹³⁾

入力된 데이터는 플로피 디스켓에 入力시킨 후 形狀데이터를 프린트하거나 作圖하게 된다. 그림 6은 設計值形狀을 그린 후에 實測值形狀을 그려 그 誤差만을 100倍 또는 500倍로 擴大한 것이며 그림 7은 P點을 나타내는 方法과 誤差組合方向을 나타낸 것이다. 點 P를 나타내는 方法은 (X,Y), (A,R)의 두 가지가 있다.

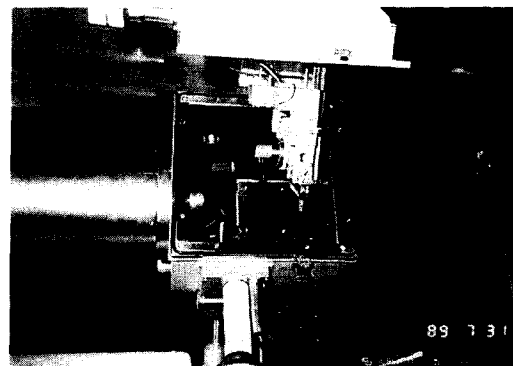


그림 5 形狀測定用的 실린더 시편

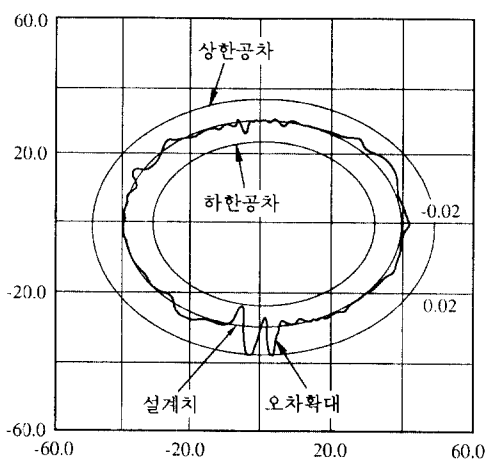


그림 6 형상 오차의 작도 예

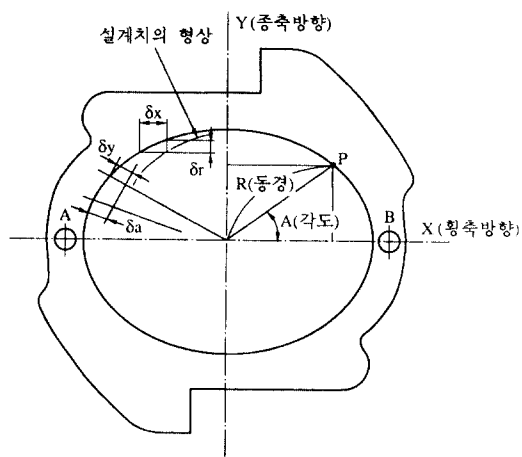


그림 7 점 P를 나타내는 방법과 오차 조합 예

誤差를 나타내는 방법은 橫軸方向(δx), 縱軸方向(δy), 放射線方向(δr), 法線方向(δa)의 네 가지가 있으며 目的에 따라 적절한 것을 선택하면 된다.

4. 3次元 測定器用 센서의 形狀

4.1 3次元 測定器用 센서

最近, 機械加工品이 점차로 複雑한 形狀을 지니게 되고 더욱이 高精度 形狀이 要求되는

製品이 많아지고 있다. 따라서, 이러한 製品의 3次元 形狀을 高能率, 高精度로 測定하기 위해서는 使用하는 3次元 測定器의 센싱프로브 (sensing probe)의 性能이 重要한 問題가 된다. 이제까지 많은 3次元 測定用 센서가 開發되어 있고 이들은 位置決定 센서와 變位決定 센서로 크게 나뉘어 진다. 더욱이, 이들 센서는 3次元 測定器의 센싱프로브로서뿐만 아니라 工作機械의 位置 決定 센서, 加工後 直接 形狀을 測定하는 測定器用 센서로서도 利用되어지고 있다. 하지만 이들 센서중 대부분은 接觸形으로서 信賴性이 높지만 ① 被測定物에 變形을 주거나 또는 흠집을 낼 염려가 있으며 ② 動的 應答이 느리고 ③ 프로브 直徑의 補正이 必要하다는 등의 短點^(12,13)이 있다. 여기에서는 이제까지 開發되고 있는 接觸形의 3次元 測定用 센서에 대해서 알아 보고 그 特徵과 問題點에 대해서 기술한다.

4.2 3次元 測定用 接觸 센서

센서의 機能은 原理적으로 프로브가 接觸時에 發生시키는 位置決定信號를 檢出하는 位置檢出(디지털) 방식과 프로브 本體가 變位하고 그 變位量으로부터 接觸點의 位置座標를 連續적으로 測定할 수 있는 變位檢出(아날로그) 방식이 있다.

또한, 變位檢出 방식은 可動部가 各 軸에 대하여 獨立하게 存在하고 各可動部에 붙여진 세 개의 檢出器에 의해 變位를 읽는 3軸變位 방식과 可動部는 하나이지만 各 軸方向에 붙여진 세 개의 檢出器에 의해 變位를 읽는 3次元 變位 방식으로 나뉘어진다. 輕量, 小型으로 汎用性이 높은 Renishaw사의 터치 트리거 프로브(touch trigger probe)는 그림 8에 나타나 있는 것처럼 간단한 構造이며 프로브가 被測定面에 接觸한 순간에 세 점 지지되어 있는 부분의 어느 쪽인가가 늘어서 回路가 切斷되어 트러그 신호를 낸다.

測定精度는 $2\mu m$, 觸針壓은 수백 g이며, 接觸方向에 의해서 測定壓이 다르고 接觸點의 位

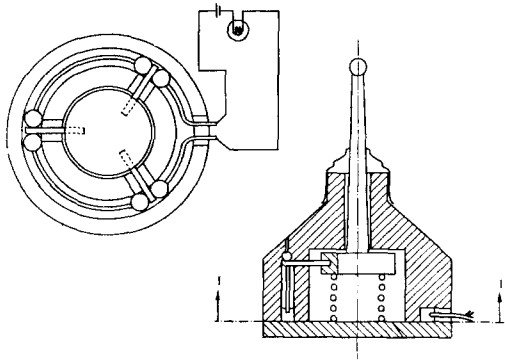


그림 8 Renishaw의 터치 트리거 프로브의 기본구조

置座標를 알 수 없는 缺點이 있다. 그림 9는 面, 法線 檢出型 3次元 센싱 프로브의 構造를 나타낸 것이다. 測定原理은 프로브가 被測定面에 接觸한 순간 壓電素子에 힘이 傳達되어 트리거 信號를 내는 동시에 x,y,z 3분력이 檢出되어 接觸點의 面, 法線 벡터를 檢出하고 接觸點의 位置座標를 구하는 方式이다. 또한 프로브를 微小角 回轉振動시킴으로써 摩擦力을 除去하고 있다. 現在는 測定精度 30 μ m이지만 프로브의 偏心, 3분력의 干涉 등의 改善에 의해 精度向上을 꾀할 수 있으리라 여겨진다.

아날로그 多次元 檢出器는 그림 10에 나타난 構造이며 테이퍼 對向形靜壓空氣軸受에 의해 直動, 回轉이 可能하고 더욱이 方向性이 없는 均一한 스프링 특성이 얻어지는 3次元 變位센서이다. 水平方向 變位는 過電流變位計, 垂直方向變位는 전기마이크로메타로 檢出한다. 靜的測定精度는 0.3 μ m, 動的測定精度는 4 μ m, 스

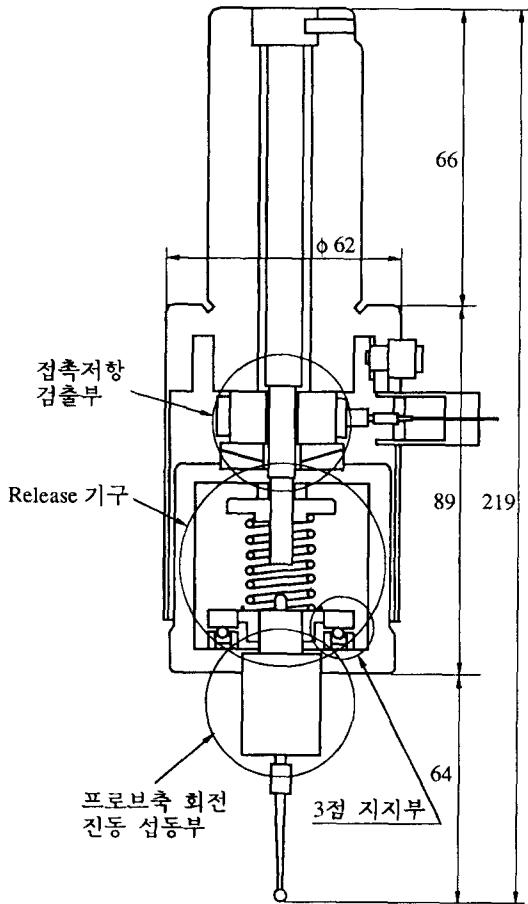


그림 9 面-法線 檢出型의 3次元 센싱프로브의 기본 구조 (단위 ; mm)

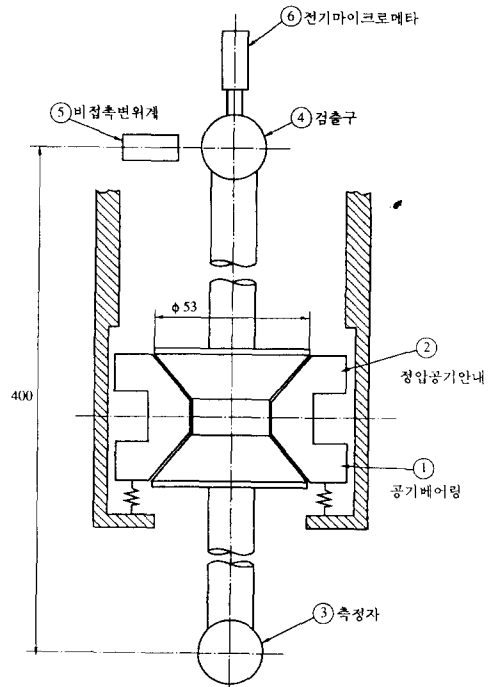


그림 10 아날로그식 다차원 검출기의 기본구조 (단위 ; mm)

프링剛性は $0.55gf/\mu m\mu$ 으로 작고 測定壓은 수십 gf이다.

4.3 SML 부광 화이버 변위센서에 의한 3차원 형상측정

從來의 光화이버 變位센서는 直線性을 지닌 測定범위가 좁고, 測定位置는 被測定面으로부터 1mm 以下로 接近하고 있다. 照射面積은 작다고 해도 그 直徑은 $\phi 1mm$ 이상인 問題點 등이 있다. 또 正反射方向의 光強度만으로 變位를 測定하기 때문에 表面反射率의 影響을 받는 短點이 있다. 따라서 入射光 化이버 대신에 焦點을 갖는 마이크로 렌즈(SML)를 이용하고 또, 對比受光束을 구하기 위하여 外周의 受光部가 2층의 光화이버로 구성되어 있는 새로운 形의 光화이버를 試作하였다. 그림 11에 이것을 나타내었다.

中心部는 入射光用 SML로 0.2mm의 入射光 化이버가 렌즈단면의 中心에 位置하고 있다. 2층의 光화이버는 內側值 正反射光用, 外側이 擴散反射光用으로 가장 바깥 부근의 直徑은 $\phi 4.6mm$ 이다. 그림 12는 SC45의 試料表面

에 대한 反射受光束 Φ_1 , Φ_2 와 測定距離 d 와의 關係이다. Φ_1 은 測定距離 3.5mm에서 피크치를 나타내고, 1~2mm의 範圍에서 直線性을

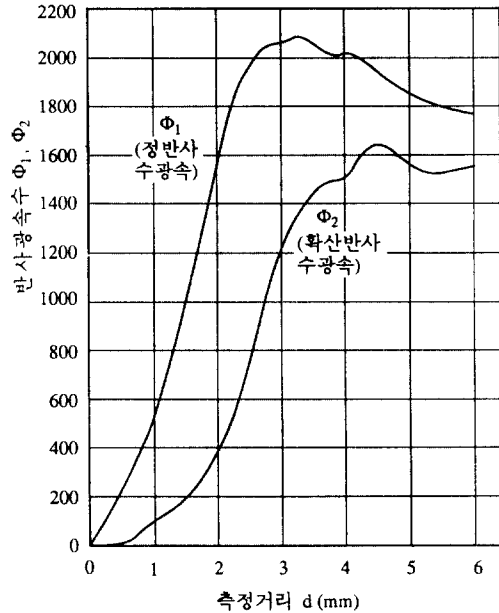


그림 12 반사광 수속의 특성곡선 (mm/sec)

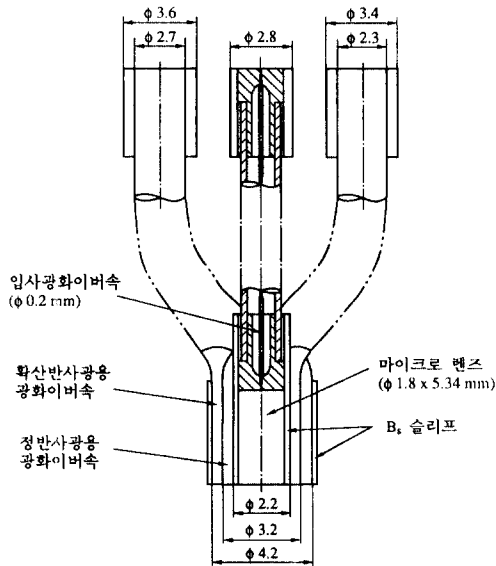


그림 11 마이크로렌즈 光 化이버의 구조

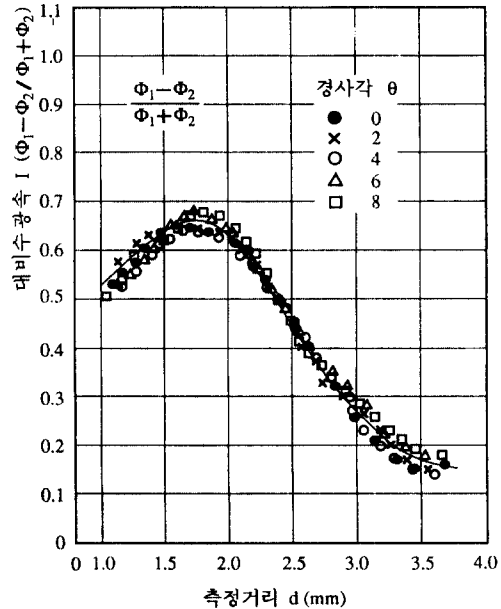


그림 13 경사각을 파라메트로 한 대비수 광속의 특성 곡선

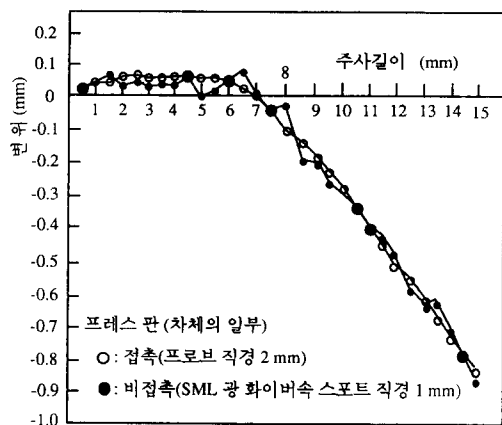


그림 14 프레스판의 형상측정 예

나타내고 있다.

한편, ϕ_2 는 2~3mm의 범위에서 직선성을 나타내고, 45mm의 위치에서 피크치를 보이고 그 값은 ϕ_1 보다도 작다. 이러한 ϕ_1 , ϕ_2 의 受光束으로부터 $I = ((\phi_1 - \phi_2) / (\phi_1 + \phi_2))$ 를 구해 傾斜角 θ 를 파라메타로써 測定距離 d 와의 關係를 보이는 것이 그림 13이다.

I 는 $d=1.8\text{mm}$ 근처에서 피크치를 지니며 2~3mm의 범위에서 직선성을 나타내고 있다. 여기에서 角度的 影響을 무시할 수 있으며 더욱이 感度도 높은 測定距離에 센서를 位置決定 하면서 0.5mm 間隔으로 프레스판의 形狀測定 한 例를 그림 14에 나타내었다. Renishaw의 터치 트리거 프로브(直徑 2mm)로 測定한 缺課(0표시)에 比較하면 약간의 誤差는 있지만 마이크로적으로는 잘 일치하고 測定誤差(標準 偏差)는 $30\mu\text{m}$ 이다.

5. 맺음말

以上으로써 現在の 3次元 測定器 중에서 CNC 3次元 測定器, 3次元 測定器의 데이터 處理裝置 및 測定用 센서에 대해서 알아보았다. 3次元 測定器는 工作機械와 많은 關係^(14~16)가 있지만 로봇, CAD/CAM 과도 密接한 關係를 지니고 있다. 또한 3次元 測定器

는 센서와도 密接한 關係가 있다. 앞으로 더욱 바람직한 것은 3次元 形狀의 高速連續測定이 可能하게 하는 것, 接觸點의 位置座標가 高精度로 구해지는 것, 摩擦力을 除去할 수 있는 것, 小型, 輕量化 등을 열거할 수 있겠다.^(17,18) 한편, 非接觸 센서로서는 光學的 方法을 利用한 센서가 많이 開發되어지고 있지만 表面거칠기, 表面反射率, 傾斜角 등의 影響을 받기 쉽기 때문에 高精度의 3次元 測定에 있어서 아직 많은 問題가 남아 있다. 앞으로도 이 같은 많은 問題點을 解決할 수 있는 研究가 계속 進展되기를 바란다.

참고문헌

- (1) Warmbrod, W.M., 1972, "Microinch Machining," SME. Techn. Paper, MR 72~613.
- (2) Williams, R.L. and Warmbrod, W.M., 1973, "Mirror-Like Finishes Achieved by Microinch Machining," Cutting Tool Engg., Nov./Dec.
- (3) Hemburg 사, "Microtrun 超精密精密旋盤," 카타로그((주) 토-멘).
- (4) Tlusty, J., 1979, "Specifications and Tests of Metal Cutting Machine Tools," Univ. Manchester Inst. Sol. and Tech., Vol. 1.
- (5) Moors, W.R., 1970, "Foundations of Mechanical Accuracy, the Moore Special Tool Co.," Bridgeport, Connecticut.
- (6) Moris, S.A., 1976, "Passively and Actively Controlled Externally Pressurized Oil-Film Bearings," Trans. ASME, Ser. F, No.94.
- (7) Tully, N., 1977, "Static and Dynamic Performance of an Infinite Stiffness Hydrostatic Thrust Bearing," Trans. ASME, Ser. F, No.99.
- (8) Mizumoto, H., Okazaki, S., Matsubara T. and Usuki M., 1987, "An Active Restriction System for a Hydrostatic Lead Screw," Proc. 7th IFTMM, No.3.

- (9) Briant, M.R., Velinsky, S.A., Beachley, N. H. and Fronczak, F.J., 1986, A Design Methodology for Abtaining Infinite Stiffness in an Aerostatic Thrust bearing," Trans.ASME,J. Mech., No. 108, p. 448.
- (10) Cooper, M.G., Mikio, B.B. and Yovanovich, M.M., 1966, "Thermal Contaca Conductance," Int.J. Heat Mass Transfer, No.12, p. 279.
- (11) Shlykov, Yu.P. and Ganin, Ye.A., 1964, "Thermal Resistance of Metallic Contacts," Int. J. Heat Mass Transfer, No. 7, p. 921.
- (12) 塚田忠夫, 阿武芳朗, 1972, "表面 おうとつによる接觸部剛性(第5報)," 日本機械學會論文集, Vol. 38, No. 397, p. 655.
- (13) Thornley, R.H., Conolly, R., Barash, M. M., Koenigsberger, F., 1965, "The Effect of Surface Topograpy upon the Static Stiffness of Machine Tool Joints," Int. J. Mach. Too Des. Res., No.5, p. 57.
- (14) 佐野川好母, 1967, "金屬接觸面における傳熱に関する研究(第4報)," 日本機械學會論文集, Vol. 33, No. 251, p. 1331.
- (15) Harris, T.A., 1968, "Rolling Bering Analysis," John Wiley and Sons, New York, N. Y., p. 290.
- (16) Lundberg, G. and Palmgren, A., 1947, "Dynamic Capacity of Rolling Berings," IVA Handlinger, No. 196, p. 25.
- (17) Schmalz, K., 1970, "Reibahle fur Hohe Kreiformgenauigkeit," Werkstatt u. Betrieb, Vol. 103, No. 5, p. 313.
- (18) Kahng, C.H. and Ham, I., 1975, "A Study on Sequential Quality Improvement in Hole-Making Processes," Ann. CIRP, Vol. 24, No.1, p. 27. 