

## 상관관계 해석을 고려한 온 더 머신 자동측정 시스템

\*정 성중, 김 승철, 안 중용, 김 경돈, 이 성일  
한양대학교 공과대학 기계설계학과, 생산시스템 및 제어 실험실

### Measuring Automation System for Analysis of Dimensional Relationships On the Machine

S.C.Chung, S.C.Kim, C.Y.An, K.D.Kim, S.I.Lee  
MAnufacturing System & Control Laboratory  
HANYANG UNIVERSITY

Abstract : On the machine measuring system composed of touch trigger probes, a DNC module, a CMM module, an analysis module and a man-machine interface unit was developed. Measuring accuracy is affected by working accuracy of the on the machine measuring system. The working accuracy of the system is due to geometric errors of the machine tool, servo errors of feed drives and positioning errors of probes. In order to compensate for the measuring errors due to the working accuracy, a calibration module was developed. The measuring automation system was realized with the on the machine measuring system and an IBM-PC on the machine center through a RS-232C. It turns the machining center into a coordinate measuring machine (CMM). The system is used for dimensional checking of machined components, initial job setup, part identification, identification of machining errors due to deflection and wear of tools, cutter runout, and calibration of machine tools. A horizontal machining center equipped with FANUC OMC were used for verification of the system. The validity and reliability of the system were confirmed through a series of experiments with gage blocks, ring gages, comparison measurement with a commercial CMM, and so on.

#### 1. 서론

제조공장에서 설계, 가공, 측정 및 검사, 그리고 조립으로 이어지는 생산공정의 자동화와 통합화를 추진하기 위해 많은 연구들이 수행되고 있다. 이 중 다품종 소량생산 체제가 정착되어 갈수록 측정과 검사공정의 자동화에 대한 필요성이 증대되고 있다. 정도가 요구되는 부품의 경우 검사는 별도의 공간에 설치되어 있는 3 차원 좌표측정기(CMM)를 이용하고 있으나 빈번한 부품 이동에 따른 시간적 손해와 필요 이상의 고가 장비 사용에 따른 경제적 비효율성이 야기된다. 이 때문에 가공공정과 측정 및 검사공정을 일괄처리로 공작기계상에서 구현함으로써 생산공정의 고정도화, 효율화 그리고 자동화를 시도하고자 하는 연구가 이루어져 왔다.<sup>[1-9]</sup>

본 연구에서는 공작기계에 접촉식 측정프로브를 장착하여, 공작기계상에서 가공전·후(Pre- and Post-Processing) 또는 중간(In Cycle)에 공작물의 장착상태, 가공 상태, 치수들 사이의 상관관계 등을 자동측정하고, 측정데이터의 측정정도를 보상하여 공작물의 상태를 해석 및 검사할 수 있는 온 더 머신(On the Machine) 좌표측정기 시스템(MAS-I)을 개발하였다.

이 시스템은 측정프로그램을 대화식으로 작성하여 머시닝센터에 CNC형 좌표측정기의 기능을 부여한 것으로, 기존의 3차원 좌표측정기와는 달리 온더머신 오차측정 및 보상 제어시스템이기 때문에 가공중이나 가공 완료후 머시닝센터 상에서 인프로세스 (In-Process) 측정 및 검사가 가능하며, 각종 머시닝센터에 오차 보상제어 시스템을 적용함으로써 머시닝센터의 정밀도 향상에도 기여할 수 있다.

#### 2. MAS-I 시스템의 구조

Fig. 1 은 MAS-I 시스템의 구조이며, Fig. 2 는 MAS-I 시스템의 초기 화면이다.

MAS-I 시스템의 파일관리와 환경설정 모듈은 사용자가 좌표측정 작업을 편리하게 이용할 수 있도록 도와준다.

DNC 모듈은 FANUC OMC와 15M을 대상으로 개발하였다. 이 모듈은 머시닝센터와 MAS-I 시스템이 설치되어 있는 PC를 RS-232C 통신으로 연결하여 NC 파라미터, NC 프로그램, 측정프로그램, 측정데이터 등의 송수신을 담당한다. 또한 Remote DNC 기능을 통해 NC상에서 직접 PC를 제어하여 원하는 송수신 작업을 수행할 수도 있다.<sup>[10]</sup>

모의측정 모듈은 좌표측정기 모듈에서 대화식으로 작성된 측정프로그램을 사전에 시뮬레이션할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 이를 통해 측정오류나 측정시간 등을 미리 예측하고 검증 및 편집할 수 있는 오프라인 프로그래밍 (Off-line Programming) 기능을 가지고 있다. Fig. 3 은 모의측정 화면을 보인 것이다.

### 3. 좌표측정기 시스템

#### 3.1 형상측정검사공정 언어

머시닝센터에서의 측정작업은 좌표측정기 모듈에서 생성된 측정프로그램을 DNC 모듈로 전송하여 수행된다. 이때 측정작업을 수행하는 측정프로그램은 머시닝센터를 제어하는 내용과 측정형상에 대한 모든 정보를 포함하고 있어야 한다.

본 연구에서는 이러한 모든 정보들의 확장, 유지 및 관리가 용이하고 일반화되게 하기 위하여, 각 요소별로 모듈화되고 일정한 형식을 갖춘 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에 의해 머시닝센터상에서의 좌표측정기 시스템 구현이 가능하게 된다. 이러한 측정프로그램을 작성하는 규칙을 형상측정검사공정 언어라 명하였다.

형상측정검사공정 언어의 규칙에 따라 측정프로그램은 좌표측정기 모듈에서 생성되며, 형상측정검사공정 언어에 대한 컴파일은 해석/검사 모듈에서 실행된다.

형상측정검사공정 언어는 기계제어문, 측정환경 정의문, 좌표계 정의문, 도형 정의문, 상관관계 정의문, 해석/검사 정의문, 형상측정 정의문 등으로 구성된다. Table 1 은 형상측정검사공정 언어의 구성 내용을 보였다.

Table 1 형상측정검사공정 언어 구성

정의문 종류	구성 내용
기계제어문	원점복귀, 이송지령 등
측정환경 정의문	측정침반경, 측정속도, 반복측정회수 등
좌표계 정의문	좌표계 설정, 변환, 측정 등
도형 정의문	점, 직선, 평면, 원, 원통, 구, 자유곡면 등
상관관계 정의문	점·점, 점·직선, 평면·평면, 원·원 등
해석/검사 정의문	치수공차, 기하공차, 해석결과 출력형식 등
형상측정 정의문	점, 평면, 원, 원통, 구, 자유곡면 측정 등

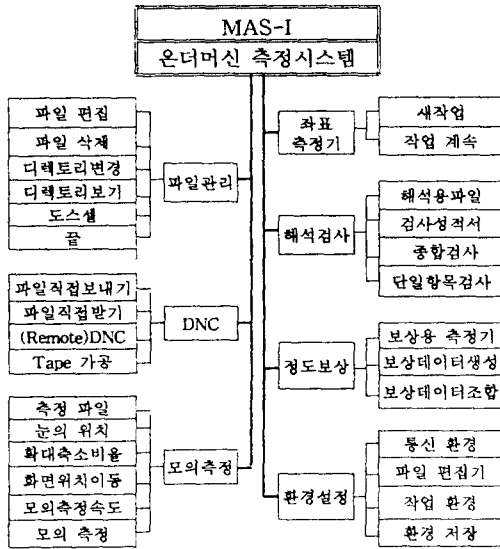


Fig. 1 MAS-I 시스템의 구조

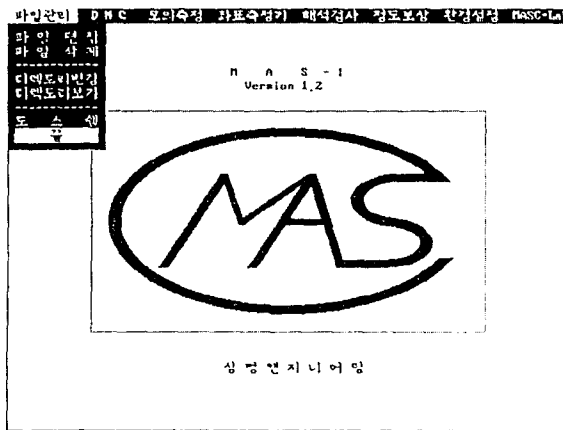


Fig. 2 MAS-I 시스템 초기 화면

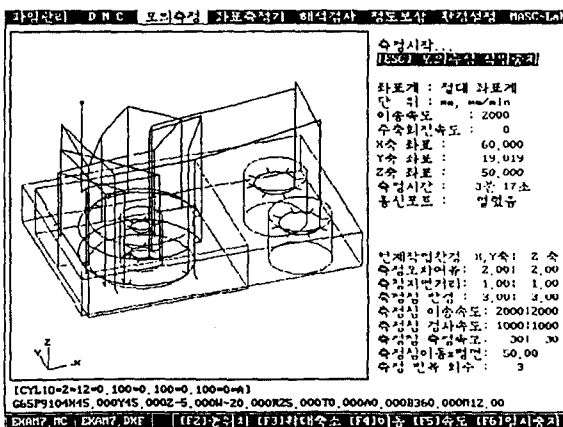


Fig. 3 모의측정 실행화면

#### 3.2 좌표측정기 모듈

좌표측정기 모듈에서는 머시닝센터상에서의 자동 측정을 위한 측정프로그램을 생성한다. 은더머신에서 가공된 부품의 치수 및 형상을 측정하기 위해 사용자가 직접 형상측정검사공정 언어의 문법에 맞추어 측정프로그램을 작성하는 작업은 많은 시간과 숙련된 기술을 요구하게 된다.<sup>[12,9]</sup> 따라서 여기서는 비전문가라도 쉽고 신속하게 상관관계까지의 측정프로그램을 작성할 수 있도록 대화형식의 User Interface 환경을 구축하였다.

Fig. 4 는 좌표측정기 모듈의 구조이다. 사용자는 먼저 작업환경을 설정하고 측정하고자 하는 형상을 형상측정 모듈에서 선택한다. 그러면 MAS-I 화면에서 그 형상에 대한 입력창이 열리고 화면에서 요구하는 지시내용에 따라 대화식으로 측정을 위한 문자 또는 숫자 정보 등을 입력한다. 입력이 끝나면 기계상에서의 측정을 위한 동작과 데이터처리를 위해 필요한 각각의 형상에 대한 도형정의, 해석/검사정의, 그리고 형상측정정의들 모두 포함하는 측정프로그램이 완성된다. 이에 대한 형상측정정의 작업화면을 Fig. 5 에 보

었다. 형상측정 모듈의 기본형상에는 점, 직선, 평면, 원, 원통, 구, 자유곡면등이 있다. 이렇게 선정된 기본형상들에 대한 상관관계 해석정의는 상관관계 모듈에서 수행된다.

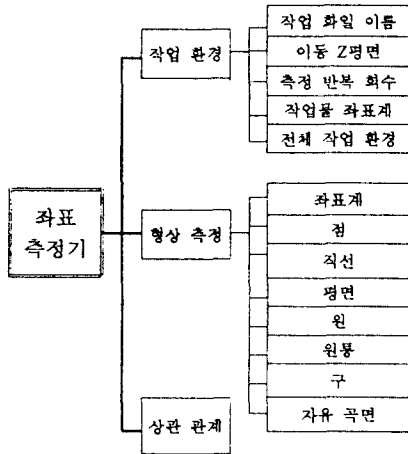


Fig. 4 좌표측정기 모듈 구조

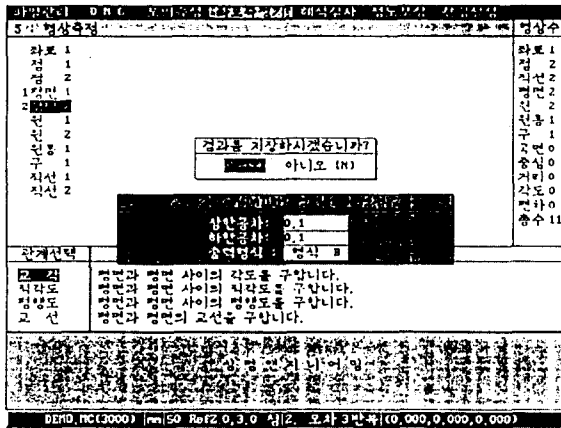


Fig. 5 형상측정정의 실행 화면

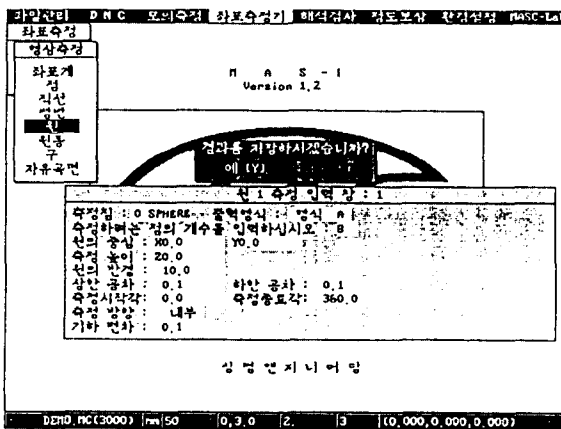


Fig. 6 상관관계정의 실행 화면

Table 2 는 기본형상 측정항목에 기초하여 정의된 상관관계 해석 범위를 보인 것이다. 상관관계정의 방법은, 상관관계 모듈을 선택하면 형상선택 입력창이 열리고 지금까지 설정된 모든 형상이 열거된다. 이 형상들은 형상측정 모듈에 의하여 설정된 형상과 이전의 상관관계정의에 의하여 생성된 형상을 모두 포함한다. 이 입력창에서 형상들을 선택하여 원하는 상관관계를 지정하고 화면에서 요구하는 입력을 수행한다. 이렇게 함으로써 하나의 상관관계에 대한 상관관계정의가 완성되며, 해석검사정의를 위해 필요한 측정프로그램이 완성된다. 이에 대한 상관관계정의 작업화면을 Fig. 6 에 보였다.

Table 2 상관관계 정의

형상간 관계	관계종류	형상간 관계	관계종류
1 점:점	거리	11 평면 : 평면	교각
	중점		직각도
	직선		평행도
2 점 : 직선	거리	12 평면 : 원통	교선
	공동면		교각
3 점 : 평면	거리	13 평면 : 구	거리
4 점 : 원	거리	14 원 : 원	거리
5 점 : 구	거리		교점 1,2
6 직선 : 직선	거리	15 원통 : 원통	거리
	교각		동심도
	교점		거리
7 직선 : 평면	교각	16 원통 : 구	거리
	거리		중심
	교점		중심축
8 직선 : 원	교점 1,2	20 구 : 구	중심
			중심
9 직선 : 원통	거리	21 점들	직선
	교각		평면
	교점 1,2		원
10 직선 : 구	거리		원통
	교점 1,2		구

#### 4. 해석 및 검사 모듈

머시닝센터상에서 측정프로그램에 따라 자동 측정된 좌표값은 DNC 모듈을 통해 수신하여 PC 메모리에 자동 저장된다. 저장된 측정데이터와 측정프로그램을 가지고 해석/검사 모듈에서는 측정프로그램의 형상측정검사공정 언어를 컴파일하여 순서대로 측정된 결과 형상을 해석하고 검사를 수행한다. 해석/검사 결과는 단일항목검사 모듈에서는 각 항목별로, 종합검사 모듈에서는 전체 결과를 화면상에서 볼 수 있으며 검사성적서로도 출력할 수 있다.

해석/검사 공정은 정도보상 모듈에서 측정조건과 동작기계 상태에 따라서 미리 생성된 정도보상데이터<sup>[7,9,11]</sup>를 이용하여 접촉식 측정프로브와 머시닝센터의 측정과정에서 발생하는 오차를 보상한다. 이렇게 보상된 측정데이터로 머시닝센터의 정도에 상응하는 범위 내에서 측정 결과를 얻을 수 있다. 보상된 측정데이터는 최소오차자승법 또는 최적설계기법<sup>[6]</sup>을 이용하여 해석하고, 이를 주어진 형상정보와 비교함으로써 측정 공작물의 치수정밀도와 기하편차를 검사한다.

각각의 기본형상에서 치수정밀도와 기하편차를 해석하기 위해 적용하는 해석 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 좌표계 : 장착오차 보상을 위한 공작물 좌표계 변환
- ② 점 : 평균, 위치도 해석
- ③ 직선, 평면, 원, 구 : 최소오차자승법, 모양편차 해석
- ④ 원통 : 최적설계 기법 (Variable Metric Method), 원통도
- ⑤ 상관관계 : 기하 해석, 자세 편차, 위치 편차 해석

MAS-I 시스템에서는 모든 기계요소의 치수 및 기하특성 편차를 정의하고 측정하기 위해 각종 공업규격<sup>(12,13,14)</sup>에 의거하여 다음과 같은 기하편차를 해석검사 하였다. 모양편차는 단독형체이며 자세편차와 위치편차는 관련형체이다.

- ① 모양편차 : 진직도, 평면도, 진원도, 원통도, 진구도
- ② 자세편차 : 평행도, 직각도, 경사도
- ③ 위치편차 : 위치도, 동축도

Fig. 7 은 단일항목 검사성적서 출력 화면이며, Fig. 8 은 종합검사성적서 출력 화면이다.

파일관리 DNC 모의측정 좌표측정기 해석검사 정도보상 환경설정 MASC-Lab			
No.1 단일항목 검사성적서 (A)			
측정 검사양쪽	한 (오류명) #1		
측정점수	12		
상한치수공차	0.100		
하한치수공차	0.100		
허용치수편차	0.100		
검사 항목	수치 결과		
〈중심 좌표〉			
도면 표시	( 0.000 0.000 0.000)		
측정 결과	( -0.004 0.015 0.000)		
중심 오차	( -0.004 0.015 0.000)	0.016	
〈반경〉			
도면 표시	15.000		
측정 결과	15.002		
반경 오차	0.002	Overcut	
〈진원도〉			
도면 표시	0.100		
측정 결과	0.006	남적	
파일관리 DNC   EXM11_MD   COM360_CN   1996/5/17   [KEY]계측 [F8]출력 [ESC]닫			

Fig. 7 단일항목 검사성적서 출력 화면

파일관리 DNC 모의측정 좌표측정기 해석검사 정도보상 환경설정 MASC-Lab						
No.1 종합검사성적서 (B)						
측정 검사양쪽	한 (오류명) #1					
측정점수	12					
상한치수공차	0.100					
하한치수공차	0.100					
허용치수편차	0.100					
검사 항목	수치 결과					
1 한 (오류명) #1						
중심좌표	N=	-0.004	0.000	-0.004		
	Y=	0.015	0.000	0.015		
	Z=	0.000	0.000	0.000		
반경		15.002	15.000	0.002	0.100	0.100
진원도		0.006				0.100
2 한 (오류명) #1						
중심좌표	N=	0.000	0.000	0.000		
	Y=	0.000	0.000	0.000		
	Z=	1.000	1.000	-0.000		
반경		15.002	15.000	0.002	0.100	0.100
진원도		0.004				0.100
파일관리 DNC   EXM11_MD   COM360_CN   1996/5/17   [KEY]계측 [F8]출력 [ESC]닫						

Fig. 8 종합검사성적서 출력 화면

## 5. 정도보상

머시닝센터를 좌표측정기화하기 위해서는 먼저 충분한 기계정도를 유지하여야 한다. 머시닝센터의 정도를 보상하는 방법으로 널리 사용되는 방법으로는 Laser 시스템을 이용하여 각축의 운동오차를 교정하는 방법을 비롯하여 다양한 정밀장치를 이용하여 교정하는 방법등 여러방법이 사용되고 있다. 그러나 Laser에 의해 보상된 머시닝센터도 실제 측정 작업에서 오차를 발생한다. 이러한 측정오차를 야기시키는 성분에는 기계의 운동오차와 측정프로브의 기하학적오차 (x,y,z편차량), 측정속도에 따른 측정프로브와 서보기구의 지연오차 그리고 측정프로브의 변형등이 있다.<sup>(9,11)</sup> MAS-I 시스템에서는 이들에 의하여 야기되는 측정오차를 줄이고 보상할 수 있는 정도보상 모듈을 개발하였다. 정도보상 모듈의 보상방식은 측정오차 성분중 반복적으로 발생하는 측정오차의 경향을 기준계이지류를 이용하여 분석한 후 정도보상 데이터를 만들고, 이를 이용하여 측정시 인식된 측정데이터를 보상함으로써 위치 측정 정도를 개선하는 방식으로 이루어진다. 보상데이터 모듈에서는 링계이지의 원주상을 수직 방향으로 측정된 점들을 최소오차자승법으로 해석하고, 여기서 측정값과 기준값과의 차이를 보상하는 정도보상데이터를 생성한다. Fig. 9 는 정도보상을 위하여 링계이지 측정프로그램을 생성하는 정도보상용 측정기 모듈 실행 화면이다.

파일관리 DNC 모의측정 좌표측정기 해석검사 정도보상 환경설정 MASC-Lab	
M A S - I Version 1.2	
보상용 측정 프로그램 생성 화면 입력	
보상용 측정 프로그램 파일 :	COM360.CC
MC 동작 프로그램 번호 :	4000
링계이지 반경 :	150.0
측정시 형태 :	SPHERE
측정시 반경 :	X 3.0 Z 3.0
측정시 오프셋 :	X 0.1 Y 0.2 Z 0.0
안전하게 측정시용 이동할 수 있는 Z 평면 :	50.0
측정 반복 회수 :	3
상면면치니어링	

Fig. 9 정도보상 측정프로그램 생성 화면

## 6. 사례 연구

개발한 시스템의 측정 및 해석결과의 타당성을 입증하기 위해 상용의 CMM과의 비교 측정을 수행하였다. 각각의 측정 조건 및 장비를 Table 3 에 보였다.

Table 4 는 수평형 공작기계와 CMM에서 측정 후 각각의 측정결과 및 측정시간을 비교한 것이다. 측정결과를 살펴 보면, 직각자의 각도 측정시 200mm 구간에서 직각도에 10 $\mu$ m 정도 편차의 차이가 있을 뿐, 그외의 측정에서는 기준값 및 CMM 측정값과의 차이가  $\pm 5\mu$ m 편차내에 모두 들어옴을 알 수 있었다. 이  $\pm 5\mu$ m 편차는 공작기계의 위치결정기구와 측정프로브의 반복정도로 인해 야기되는 결과이다. 공작기계 정도에 의한 오차는 열변형 등에 크게 영향을 받으며,

±10 $\mu$ m 내에서 열변형오차의 보정을 달성할 수 있었다.<sup>1)</sup> 측정에 소요되는 시간의 비교에 있어서는 개발된 시스템이 측정프로그램 작성 및 측정의 용이성 때문에, CMM에서 수동 및 자동으로 측정한 시간보다 짧은 시간내에 측정 및 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 3 측정 실험 장비 사양

	MAS-I 시스템	CMM
공작기계	수평형 M/C (통일중공업(주)) X530, Y460, Z440	UMM550 (Carl Zeiss 사)
프로브 측정침	MP7 길이 50 mm, 직경 6 mm	직경, 6 mm
측정방법	자동프로그래밍 (측정점 입력)	수동(조이스틱이용) 자동프로그래밍 (측정점 입력)
측정환경	실제 작업환경	항온항습상태

Table 4 MAS-I 과 CMM 비교측정 결과

비교항목	측정항목	측정결과(mm, 각도)			측정시간 (측정+해석시간)			
		기준값	MAS	CMM	차이	MAS	CMM	차이
직각자	평면도	-	0.001	0.000	0.001	12'15"	13'14" (수동)	0'59"
	각도	90°	90.002	89.999	0.003	"	"	"
블록 게이지	평면도	-	0.001	0.000	0.001	9'30"	8'02" (수동)	1'28"
	두께	21	20.999	21.000	-0.001	"	"	"
링 게이지	직경	30.001	30.004	30.002	0.002	4'34"	4'05" (자동)	0'29"
	진원도	0	0.006	0.001	0.005	"	"	"
	원통도	0	0.004	0.000	0.004	"	"	"
진구	직경	25	24.994	24.999	-0.005	2'31"	2'45" (수동)	0'14"

## 7. 결론

머시닝센터에 접촉식 측정프로브를 장착하여 종래의 가공기능에 측정기능을 부여한 온 더 머신 (On the Machine) 좌표측정기 시스템 (MAS-I)을 개발하였다.

MAS-I 시스템의 구체적인 기술개발 내용은 다음과 같다.

- ① 모든 작업을 한글처리화하고 대화식 User Interface 환경으로 개발되어 있으므로 비전문가도 손쉽게 신속하게 측정작업을 수행할 수 있다.
- ② 머시닝센터상에서 좌표측정기 시스템을 구현하기 위해 필요한 형상측정검사공정 언어를 개발하였다.
- ③ 형상측정검사공정 언어의 형식에 따라 측정프로그램을 자동으로 생성하는 대화식 측정프로그램 생성기(좌표측정기)를 개발하였다.
- ④ 형상측정검사공정 언어의 컴파일러를 개발함으로써, 측정 데이터에 대한 해석/검사 결과를 검사성적서로 출력할 수 있도록 하였다.
- ⑤ 기준형상을 정의하고 각 형상간의 상관관계를 해석함으로써 다양한 측정/해석 기능을 갖춘 좌표측정기 시스템으로 개발하였다.

⑥ 측정시 오차를 보상할 수 있는 정도보상 방법을 개발하여 측정정도를 개선하였다.

⑦ 온더머신 오차측정과 정도보상법을 시스템이 적용함으로써 머시닝센터의 정밀도 향상에도 기여할 수 있다.

⑧ 기준게이지류와 상용의 CMM과의 비교측정을 통하여 MAS-I 시스템의 측정능력이 ±5 $\mu$ m 정도임을 확인할 수 있었다.

⑨ 머시닝센터상에서 가공전·후 또는 중간에 공작물의 장착상태, 가공 상태, 치수들 사이의 상관관계 등을 해석 및 검사할 수 있는 시스템이기 때문에 정밀 FMS의 개발이나 JIT 생산체제의 구축에 필수적이라 하겠다.

## 참고문헌

- 1) 박우열, 정성중, 1993, "온더머신 오차측정 및 검사 시스템의 개발," 대한기계학회 '93년도 추계학술대회 논문집 (1), pp.749-752.
- 2) 박우열, 정성중, 1993, "공작기계용 자동 측정 및 해석 시스템에 관한 연구," 한국정밀공학회 '93년도 추계학술대회 초록집, pp.228-232.
- 3) 김승철, 정성중, 1993, "특징형상에 기초한 금형 가공용 CAM 시스템 개발," 대한기계학회 '93년도 추계학술대회 논문집 (1), pp. 456-459.
- 4) 김승철, 정성중, 1993, "특징형상에 기초한 자동 가공 및 측정 시스템에 관한 연구," 한국정밀공학회 '93년도 추계학술대회 초록집, pp. 238-242.
- 5) 정성중, 박우열, 박영진, 김승철, 공민규, 은울, 양종태, 1993, "시스템 상태감시 및 진단기술", G7 프로젝트 1차년도 중간보고서.
- 6) 정성중, 박영진, 김승철, 공민규, 은울, 안중용, 양종태, 김창성, 1994, "시스템 상태감시 및 진단기술", G7 프로젝트 2차년도 중간보고서.
- 7) 정성중, 신동수, 박우열, 1993, "NC공작기계에서 자동가공, 측정 및 오차보정을 위한 DNC 시스템 개발", 제 1 회 G7 첨단생산 시스템 Workshop, 생산기술연구원, pp. 215-222.
- 8) 정성중, 박영진, 공민규, 은 울, 안중용, 1994, "고속, 고정밀 가공용 FMS 를 위한 시스템 상태감시 및 진단기술", 제 2 회 G7 첨단생산 시스템 Workshop, 생산기술연구원, pp. 282-289.
- 9) 정성중, 1995, 자동측정 및 CAD/CAM/CAT 일괄처리시스템, 한양대학교 생산시스템 및 제어실험실, 제 4, 5 장.
- 10) 신동수, 정성중, 1992, "NC 공작기계용 DNC SYSTEM 개발", 한국자동제어학술회의논문집, pp. 887-891.
- 11) 공민규, 정성중, 1994, "신뢰도를 고려한 측정시스템의 개선", 한국정밀공학회 '94년도 추계학술대회논문집, pp. 527~532.
- 12) 한국공업규격, KS B 0146-1992, 0147-1992, 0148-1992, 0242-1986, 0243-1987, 0425-1986, 0608-1987.
- 13) 일본공업규격, JIS B 6201, 1990.
- 14) ANSI, Y14.5M, Dimensioning and Tolerancing, The ASME, N.Y., 1982.