

신뢰도를 고려한 측정시스템의 개선 (High Accuracy Measuring System on the Machine Tool by Measurement Error Compensation)

공민규* (한양대 기계설계학과 대학원), 정성중 (한양대 기계설계학과)

Min-Kyu Kong (Graduate School of Hanyang Univ.) and Sung-Chong Chung (Hanyang Univ.)

Keywords : CMM (3 차원 좌표측정기), Error Identification (오차 규명), Error Calibration (오차 보정), Error compensation (오차보상), Confidence Interval (신뢰구간), On the Machine (온더미신), MascMC

ABSTRACT : MascMC system is one of the MMC system module which performs measuring and checking of machined workpieces on the machine tools. Accuracy of the MascMC was compensated for developing a reliable measuring system by measurement error calibration. Reference gauges, ring gauges, block gauges, squares, spheres and cylindrical squares, were used for error identification and compensation. $\pm 10\mu\text{m}$ accuracy with 95% confidence interval was confirmed on the vertical and the horizontal machining center through the large number of experiments.

1. 서론

FMS의 도입과 CIM의 추진등 생산공정의 고효율화에 대한 필요성이 증가 하면서 공작기계 가공기능 이외에 측정, 일치리, 조립등 복합적인 기능을 부여시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 실험실에서는 공작기계 좌표측정기의 기능을 부여하여 온더미신 오차 측정 및 보상제어 시스템^[1] 개발을 추진해오고 있다. 자동 측정 및 검사 시스템인 MascMC^[2,3]는 측정 및 검사를 위하여 별도의 측정기계를 필요로 하지 않고 공작기계상에서 각종 측정프로그램을 이용하여 기존의 NC 공작기계가 3 차원 좌표측정기의 역할을 수행할 수 있도록 개발하고 있다. MascMC는 기존의 가공공장에서 3 차원 좌표측정기를 이용하는 경우와는 달리 가공중이나 가공 완료 후 공작기계 상에서 인프로세스 (In-Process) 측정 및 검사가 가능하기 때문에 공작물의 상태검사 및 오차위인 진단용 시스템인 온더미신 오차 측정 및 보상 제어 시스템 (On the Machine Error Measurement and Compensation System)의 기초기술로 개발되었다. 본 측정시스템은 Boland C¹ 환경에서 개발되었고 FANUC OMC가 장착된 수직형, 수평형 머시닝센터에 적용하였다.

MascMC를 이용한 머시닝센터가 좌표측정기의 기능을 수행하기 위해서는 측정 및 검사 정도와 신뢰도의 확보가 중요하며, 정도와 신뢰도를 향상시키기 위하여 머시닝센터의 오차를 보정한 후 기준 게이지를 이용한 정밀 강체를 측정하여 측정 오차를 야기시키는 성분들의 영향을 보상 및 보정하였다. 머시닝센터의 오차보상은 HIP 5520A 레이저 시스템을 이용하여 머시닝센터의 위치오차를 보정한 후 레이저, 분극 게이지, 워동스케이, 서각사등을 이용하여 측정, 해석하여 오차들은 분리한 후 이를 보정함으로써 측정시 발생하는 오차위인의 영향을 줄이고 소형 공작물급 (100×100×100mm)의 경우 95% 신뢰도 구간에서 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 향상된 측정정도를 실현하였다.

해석 및 검사기능에 있어서도 도면의 설정치와 비교하여 가공의 정도를 판정할 수 있는 기능을 부여하였으며, 공작물 내의 요소들을 일괄적으로 검토할 수 있도록 대표형식으로 구성된 종합 검사장지를 화면에 표시하고 이를 컴퓨터의 화면으로

저장하는 기능을 부여하였다. 향상된 정밀측정 기능을 바탕으로 단일 요소를 반복측정 검사함으로써 가공상태 편정에 높은 신뢰도를 확보하였다.

Fig. 1은 개선된 MascMC 시스템의 작업 흐름도를 보여준다.

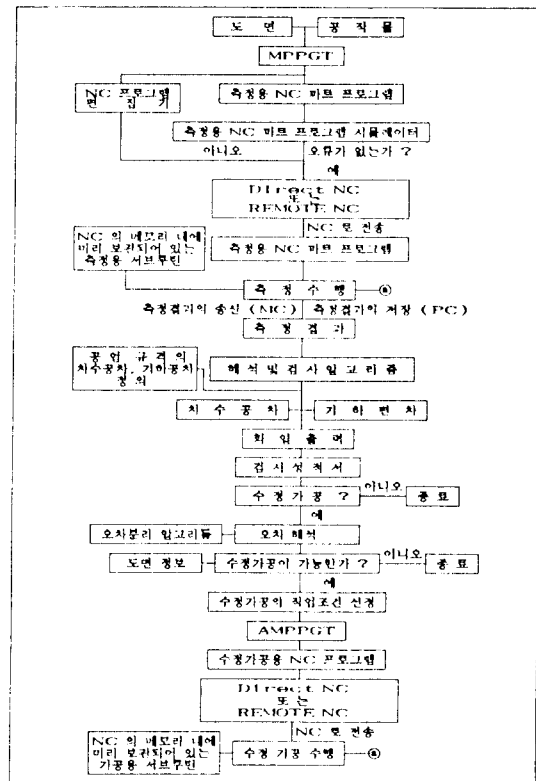


Fig. 1. MascMC 작업흐름도

2. 측정오차의 원인과 보상법

머시닝센터의 정도를 보상하는 방법으로 널리 사용되는 방법으로는 Laser 시스템을 이용하여 각축의 운동오차를 교정하는 방법을 비롯하여 다양한 정밀 강재를 이용하여 교정하는 방법 등 여러 방법이 사용되고 있다.^{11,56)}

MascMC 시스템에서는 온도미션 오차 측정 및 보상이 시스템의 기초기술개발을 목적으로 HP사의 5520A Laser 시스템을 이용하여 머시닝센터 각축의 위치 오차를 교정한 후 집축식 Probe의 측정조건에 따른 오차를 보상하여 머시닝센터상의 측정정도를 개선하였다.

측정시 측정점에 의하여 야기되는 오차에는 측정방향이 물체의 직각으로 잡히지 못하게 됨에 따라 발생하는 오차와, 측정속도에 따라 측정점의 변형과 서보 지연에 따라 야기되는 오차가 있다.¹²⁾ 정확한 측정값을 구하기 위해서는 이들 오차성분들이 측정의 정도에 미치는 영향을 규명하고 보상하여야 한다.

본 연구에서는 공작물의 정착상태를 미리 측정하여 전자의 오차성분과 기준게이지(링게이지, 블록게이지) 등을 이용하여 측정속도와 방향의 변화에 따른 오차성분을 보상함으로써 측정시의 오차를 최소화 하였다. 측정방향에 따른 오차를 줄이기 위하여 여러 조건에서 반복측정하여 얻어진 법선벡터의 평균을 취하여 실험한다.

$$\vec{n}_m = \frac{\sum \vec{n}_i}{R} \quad (1)$$

여기서, \vec{n}_m : 측정방향 평균

\vec{n}_i : 측정 i 번째 법선벡터

R : 총 측정수.

이 평균값 방향은 측정오차를 최소화 할 수 있는 방향이 된다. 한편 측정속도를 v_i 에 따른 오차를 실험을 통하여 n 개의 속도 구간내에서

$$a_i \times v_i + b_i = e_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

와 같이 얻어짐을 확인하였다. 여기서 a_i 와 b_i 는 속도 구간 및 오차함수의 계수이고, e_i 는 i 번째 속도 구간에서 측정시 얻어진 오차의 평균치이다.

n 개의 이송속도 구간에서 오차계수 (a, b) 는 측정 프로브로 Renishaw 사의 LP2 와 MP10, 머시닝센터 A와 B 를 보상한 결과 Table 1 그리고 Table 2 와 같은 결과를 얻었다. 이송속도로 mm/min, 오차단위로 mm 를 취한 경우 오차 계수 a, b 값의 10^{-5} 자릿수 까지 고려하여 측정데이터를 보상하여 해석하였으며, 10^{-6} 에서 인치하지 않을 경우 마다 측정속도의 구간을 나누어 측정속도의 변화에 따라 새로운 보상계수 (a, b) 를 취하였다. MascMC 의 측정에서는 측정속도를 10 ~ 400 mm/min 에서 보정하여 사용하며 구간별로 보정법을 이용한다. Table 1 과 Table 2 는 보상치의 일부구간을 보여준다.

Table 1. Machine A

V (mm/min)	Error (mm)	a (min)	b (mm)
70	0.046850	0.00053	0.00952
80	0.052031	0.00054	0.00895
90	0.057638	0.00056	0.00742
100	0.063190	0.00054	0.00939
110	0.068386	0.00056	0.00726
120	0.074327	0.00058	0.00416
130	0.080076	0.00051	0.01382

Table 2. Machine B

V (mm/min)	Error (mm)	a (min)	b (mm)
70	0.063511	0.00079	0.00839
80	0.071625	0.00082	0.00628
90	0.079852	0.00080	0.00775
100	0.087631	0.00077	0.01097
110	0.095176	0.00079	0.00794
120	0.103517	0.00078	0.00929
130	0.110853	0.00079	0.00787

Table 3. Experimental Equipments

Machining center	Vertical or Horizontal (A or B) Type
Touch probe	Renishaw MP10, LP2
Ring gauge	Mahr $\phi 30, \phi 50, \phi 100, \phi 150, \phi 200, \phi 250$
Sphere	$\phi 25 \times 12$
Block gauge	Mitutoyo 1.005 - 100 mm
Square	RIKEN 300.0mm
Cylindrical Square	RIKEN $\phi 100.500$

3. 원주형 게이지류 측정 결과

앞선에서 개발된 측정방향과 측정속도에 따른 오차의 영향 보정 후, MascMC 의 정도와 신뢰도를 실험하기 위하여 Table 3 에 제시된 링게이지, 원통스케이등의 게이지류를 측정 하였다. 본 논문에서는 $\phi 200$ 링 게이지 측정결과와 $\phi 100.50$ 원통스케이의 측정결과를 보았다. 측정방식은 원주상을 등각 분할하여 360점 채취하였다.

Fig. 2 는 $\phi 200$ 링게이지의 측정후 해석 결과이다. 1σ 내에 67.5%, 2σ 내부에 96.7% 존재하는 정규분포를 보여준다. 기준치에 대하여 반경오차 1 μm , 편차 2.6 μm 수준으로 공작 기계 상의 넓은 위치에서 측정결과인시도 95% 신뢰도 구간에서 $\pm 5\mu m$ 이내의 측정 및 해석 결과를 보여준다. Fig. 3 은 측정치의 분포도이다. Fig. 4 는 측정결과를 각 축별 오차로 분리했을 때 X 축은 평균 0 으로서 Y 축의 0.6 μm 보다 뛰어나 분산이 2.5 μm 로 Y 축 1.6 μm 보다 크고 또 X 축의 경우 3σ 외부의 점이 4 점 측정되었기 때문에 X 축이 Y 축보다 정밀도가 높다고 할 수는 없다. 이 링게이지의 전원도는 0.3 μm 이다.

Fig. 5 는 $\phi 100.500$ 인 원통스케이의 측정 및 검사결과이다. Fig. 6 은 분포곡선을 보였는데 좋은 정규분포를 보여준다. Fig. 7 에서 XY 축으로 분리된 오차를 보면 X 축의 편차가 Y 축의 편차보다 크다.

이상의 결과로부터 위치간정정도 7 μ m (ISO 규격) 을 갖는 미시낭센타에서 링개이지와 원통스케이를 마스타게이지로 하여 측정기화 한 경우, 95% 신뢰도를 가지면서 정확도 3 μ m 이내 정민도 \pm 10 μ m 의 정도를 확보할 수 있다.

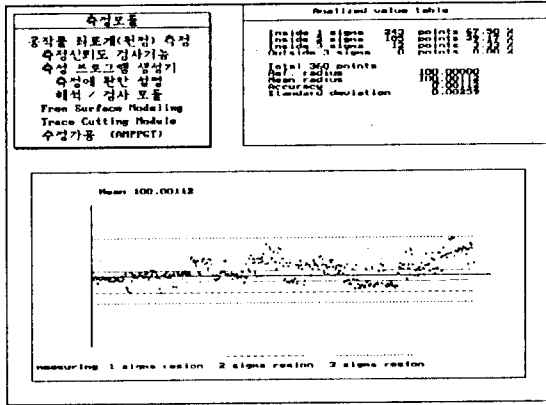


Fig 2. ϕ 200 링개이지 측정 결과

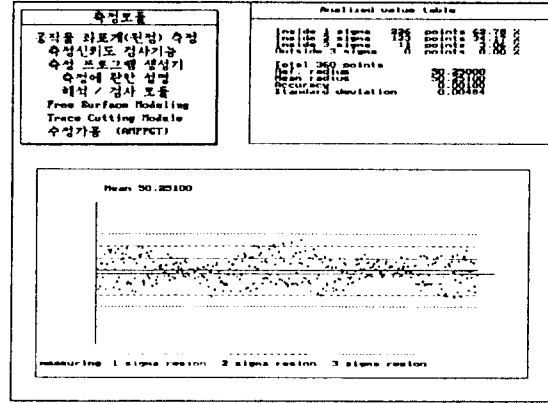


Fig 5. ϕ 100.50 원통스케이 측정 결과

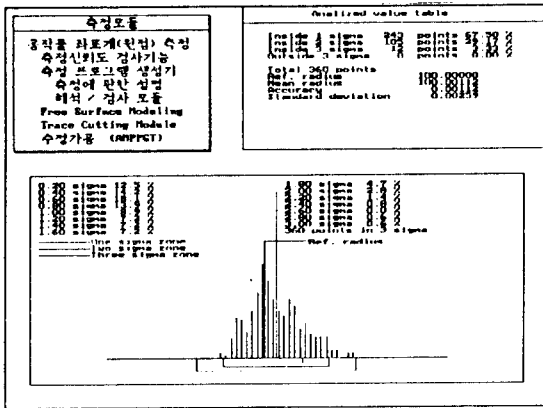


Fig 3. ϕ 200 링개이지 분포도

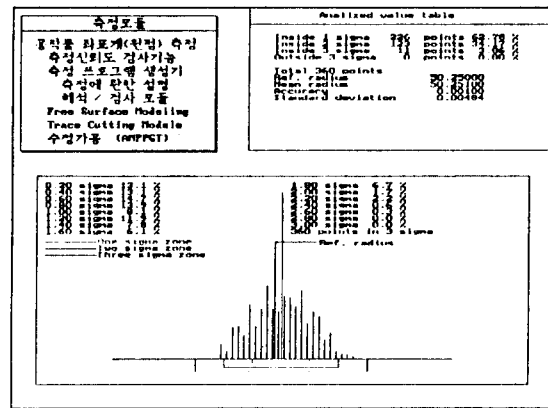


Fig 6. ϕ 100.50 원통스케이 분포도

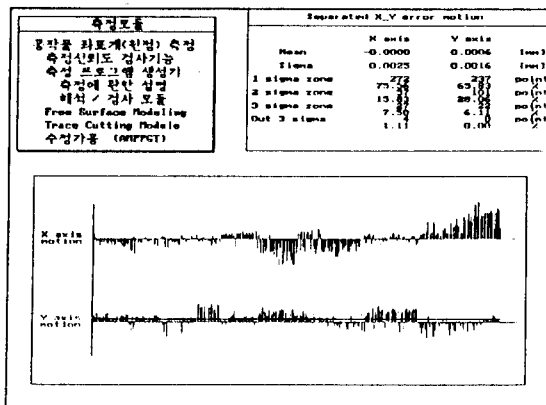


Fig 4. ϕ 200 링개이지 기 측면 오차분리

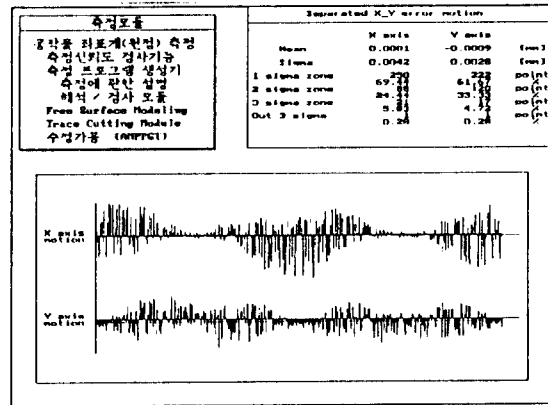


Fig 7. ϕ 100.50 원통스케이 기 측면 오차분리

4. 각주형 게이지류 측정 결과

블록게이지류 이용, 폭 (Pocket), 두께 (Web), 단차 (Step) 등을 만들어 측정하였다. 이 경우, 블록의 정착상태를 확실히 검증한 후 반드시 측정점을 지각으로 측정하여야만 측정오차가 없는 정확한 값을 구할 수 있다. 두께의 경우 기장 정밀도가 우수한데, 이는 블록의 조립에서 발생하는 오차가 단차 및 폭 등에 비하여 지기 때문이다. 폭의 경우 블록의 조립과정에서 오차가 발생하는 경우가 많고 두께나 단차보다 측정이 까다롭다. Fig. 8 ~ Fig. 10 은 두께, 폭, 단차의 측정결과를 보여 준다. 기하원리중 관련형태인 직각자의 직각도를 측정하였다. Fig. 11에 직각자 측정결과와 검사성적서를 보였고, Fig. 12, Fig. 13은 V 블록의 도면과 측정결과와 검사성적서이다.

측정포물		단일 항목 반복 검사			
공작물 좌표계(원점) 측정 측정신뢰도 검사가능 측정 프로그램 생성기 측정에 관한 설명 측정 결과 목록		STEP			
해석 및 검사		검사 대상 :	도면 기준 :	15,000(mm)	검사 대량 :
해석 확인 이름 공차 좌표 변환 종합 검사 단일항목 검사 기하학적 관계	File File File File File File File File File File File File File File File	도면 기준 :	100,000(mm)	실한 공차 :	0,020
		하한 공차 :	-0,020	상한 공차 :	0,020
		속정순서	속정값	오차	편차범위
		1	14,998	-0,002	2
		2	14,999	-0,001	1
		3	15,002	0,002	1
		4	15,000	-0,000	1
		5	15,001	0,001	1
		6	15,001	0,001	1
		7	15,002	0,002	1
		8	15,003	0,003	2
		9	15,003	0,003	2
		10	15,001	0,001	1
		11	15,002	0,002	1
		12	14,999	-0,001	2
		13	15,000	0,000	1
		14	15,001	0,001	1
		15	15,001	0,001	1
		평균 :	15,001		
		최소값 :	14,998	최대값 :	15,003
		편차 :	0,005	편차 :	0,002
		가용한성	입력		

Fig 10. 블록게이지 측정 (단차 15 mm)

측정포물		단일 항목 반복 검사			
공작물 좌표계(원점) 측정 측정신뢰도 검사가능 측정 프로그램 생성기 측정에 관한 설명 측정 결과 목록		LINE			
해석 및 검사		검사 대상 :	도면 기준 :	100,000(mm)	검사 대량 :
해석 확인 이름 공차 좌표 변환 종합 검사 단일항목 검사 기하학적 관계	File File File File File File File File File File File File File File File	도면 기준 :	100,000(mm)	실한 공차 :	0,020
		하한 공차 :	-0,020	상한 공차 :	0,020
		속정순서	속정값	오차	편차범위
		1	99,999	-0,001	1
		2	99,998	-0,002	1
		3	99,999	-0,001	1
		4	99,999	-0,001	1
		5	99,999	-0,001	1
		6	99,998	-0,002	2
		7	100,000	0,000	1
		8	99,999	-0,001	1
		9	99,999	-0,001	1
		10	100,000	-0,000	1
		11	100,000	-0,000	1
		12	100,000	-0,000	1
		13	100,000	-0,000	1
		14	100,000	-0,000	1
		15	99,999	-0,001	1
		평균 :	99,999		
		최소값 :	99,998	최대값 :	100,000
		편차 :	0,002	편차 :	0,001
		가용한성	입력		

Fig 8. 블록게이지 측정 (두께 100 mm)

측정포물		검사성적서			
공작물 좌표계(원점) 측정 측정신뢰도 검사가능 측정 프로그램 생성기 측정에 관한 설명 측정 결과 목록		측정항목 : 직각도			
해석 및 검사		속정순서 :	20	일련번호 :	1
해석 확인 이름 공차 좌표 변환 종합 검사 단일항목 검사 기하학적 관계	File File File File File File File File File File File File File File File	상한치용공차 :		하한치용공차 :	0,026
		기하원리 :	mm		
		검사항목	결과		
		기준값	-0,004	1,000	0,002
		측정결과	-2,274		
		편차			
		측정결과	-1,000	-0,003	-0,001
		편차			
		측정결과	-1,960		
		편차			
		직각도 해석			
		최소값	-0,003		
		최대값	-0,001		
		평균	-0,000		
		직각도	0,003		
		반정	입력		

Fig 11. 직각자 측정결과

측정포물		단일 항목 반복 검사			
공작물 좌표계(원점) 측정 측정신뢰도 검사가능 측정 프로그램 생성기 측정에 관한 설명 측정 결과 목록		POCKET			
해석 및 검사		검사 대상 :	도면 기준 :	20,000(mm)	검사 대량 :
해석 확인 이름 공차 좌표 변환 종합 검사 단일항목 검사 기하학적 관계	File File File File File File File File File File File File File File File	도면 기준 :	20,000(mm)	실한 공차 :	0,020
		하한 공차 :	-0,020	상한 공차 :	0,020
		속정순서	속정값	오차	편차범위
		1	20,001	0,001	1
		2	20,002	0,002	1
		3	20,005	0,005	1
		4	20,005	0,005	1
		5	20,000	-0,000	1
		6	20,005	0,005	1
		7	20,005	0,005	1
		8	19,999	-0,001	2
		9	20,000	-0,000	1
		10	20,000	-0,000	1
		11	20,000	-0,000	1
		12	20,005	0,005	1
		13	20,004	0,004	1
		14	20,005	0,005	1
		15	20,000	-0,000	1
		평균 :	20,002		
		최소값 :	19,999	최대값 :	20,005
		편차 :	0,007	편차 :	0,004
		가용한성	입력		

Fig 9. 블록게이지 측정 (폭 20 mm)

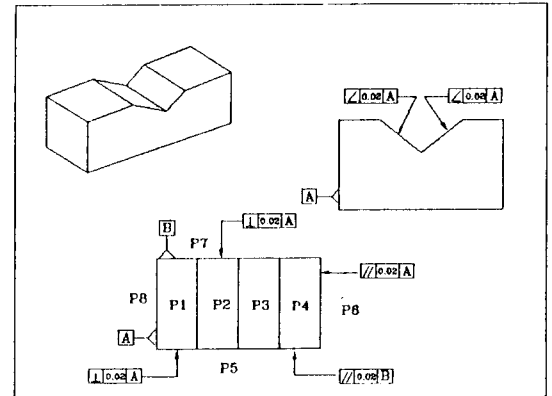


Fig 12. V 블록 도면

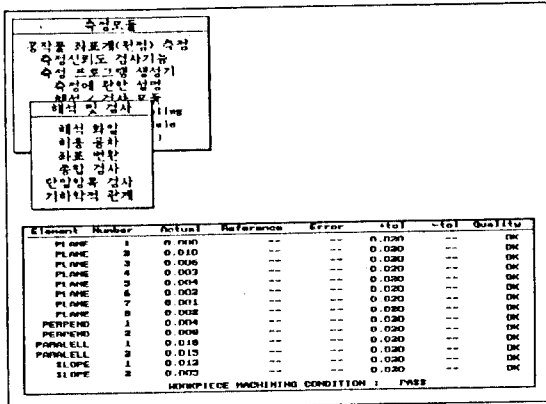


Fig 13. V 블록 종합검사성적서

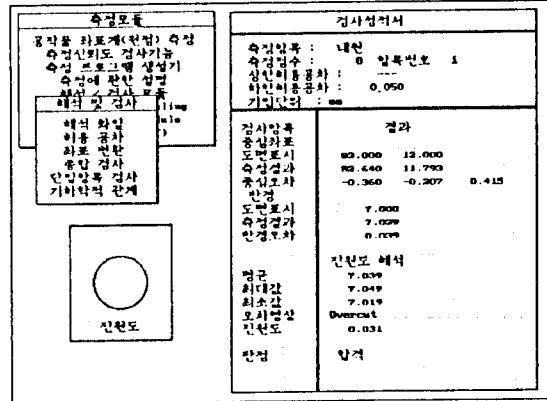


Fig 15. 이크린 공작물 단위검사성적서

5. 아크릴 공작물 측정

Fig. 14 와 같은 이크린 공작물의 가공상태를 치수편차의 기하원자로 나누어 해석하였다. Fig. 15는 각 측정 요소에 대한 도면 기준값, 측정값, 오차 그리고 가공상태를 편정한 그림이고, Fig. 16, Fig. 17 은 종합적인 검사성적서를 보여준다. 전삭 성이 급속에 비하여 밀어지는 칩이 정지시의 변형, 공구 Runout 등으로 인하여 이크린 공작물 계측에서는 많은 오차가 측정된다.

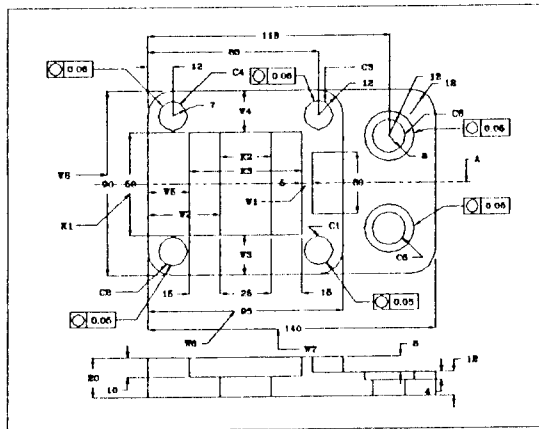


Fig 14. 이크린 공작물 도면

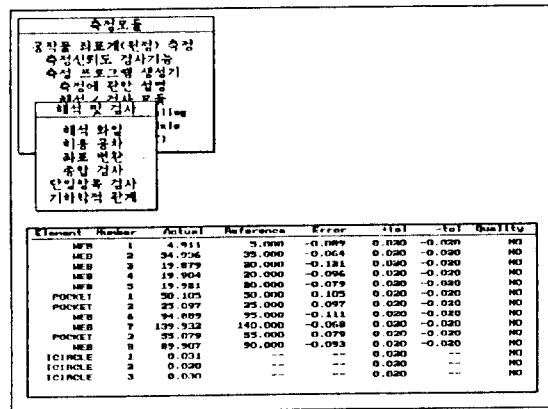


Fig 16. 이크린 공작물 종합검사성적서

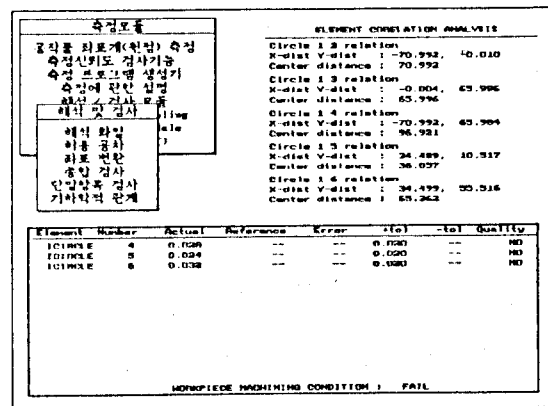


Fig 17. 이크린 공작물 종합검사성적서

6. 결론

(1) 가공이 수행된 공작기계상에서 공작물의 정밀도를 인프로 세스로 측정 및 검사항 수 있는 기존의 MascMC 의 측정 신뢰도를 확보하기 위한 측정 오차 규명 및 보상 제어법은 개발하였다.

(2) 위치기정정도 $7\mu\text{m}$ (ISO 규격) 을 갖는 미지닝센터상에서 95% 의 신뢰도를 가지면서 정확도 $3\mu\text{m}$ 이내, 정면도 $\pm 10\mu\text{m}$ 이내의 측정 정도를 확보하였다.

(3) MascMC 시스템은 크게 공작물 원점 측정 모듈, 측정신뢰도 검사 모듈, 측정프로그램 생성기 모듈, 측정 프로그램 시뮬러 모듈, 측정 모듈, 해석 및 검사 모듈, 자유곡면 모델링 모듈, Trace Cutting 용 CAM 모듈, 수정가공 프로그램 생성모듈 (AMPIGT) 로 구성되어 있다.

(4) 단위요소에 대한 통계적인 해석은 물론 전체 요소들의 해석결과와 가공의 편정을 표시하는 종합검사성지시를 제공하도록 하였다.

참고 문헌

- (1) 정성중, 신동수, 박우열, 1993, "NC공작기계에서 자동가공, 측정 및 오차보정을 위한 DNC 시스템 개발", 제 1 회 G7 첨단생산 시스템 Workshop, 생산기술연구원, pp.215-222.
- (2) 정성중, 박우열, 박영진, 김승현, 공민규, 은용, 양종태, 1993, "시스템 상태감시 및 진단기술", G7 프로젝트 1 차년도 중간보고서, pp.232-431.
- (3) 정성중, 박영진, 김승현, 공민규, 은용, 양종태, 안중용, 1994, "시스템 상태감시 및 진단기술", G7 프로젝트 2 차년도 중간보고서, pp.163-270.
- (4) 정성중, 박영진, 공민규, 은용, 안중용, "고속, 고정밀 가공용 FMS 를 위한 시스템 상태감시 및 진단기술", 제 2 회 G7 첨단생산 시스템 Workshop, 생산기술연구원, 1994.6, pp.282-289.
- (5) 정성중, 현광이, 1989, "산차 오차 모형을 이용한 다축공작 기계의 기하학적 오차규명 및 측정장치 개발", 한국정밀공학회 추계학술대회 초록집, pp.132-139.
- (6) 일본공업규격, 공작기계-시험방법 통칙, JIS B 6201, 1990.
- (7) 한국공업규격
KS B 0146-1992 보통공차 - 제 2 부 : 개별적인 공차의 지시가 없는 형태에 대한 기하 공차
KS B 0147-1992 제도 - 공차 표시 방식의 기본 원칙
KS B 0148-1992 제도 - 기하공차 표시방식 - 위치도 공차 방식
KS B 0242-1986 최대 실체 공차 방식
KS B 0243-1987 기하공차를 위한 데이터
KS B 0425-1986 기하원차의 정의 및 표시
KS B 0608-1987 기하공차의 표시 방법
- (8) Dimensioning and Tolerancing, American National Standard Engineering Drawings and Related Documentation Practices, ANSY Y14.5M - 1982.