

# 금형연마 로봇시스템



박 종 오

한국과학기술원 로봇 응용 및 유공압연구실

● 1955년생  
● 로봇이용 가공자동화 기술을 전공하였으며 로봇이용 가공/조립 자동화 및 공장라인 자동화에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

금형생산 자동화는 대부분 NC가공 공정까지 진전되어 있고 그 이후의 공정인 금형마무리 공정은 수작업으로 수행되고 있다. 그러나 전체금형생산 시간 중에서 사상공정(연마)의 비율을 볼 때 이 공정의 고속화 없이는 금형생산성 향상에는 근본적인 한계가 있다. (금형 생산시간 비율 : 설계 11%, NC가공 52%, 사상 37%) 금형생산의 한 특징으로서 소량 또는 단량 다품종을 들 수 있다. 복잡한 자유곡면을 갖는 금형면의 연마공정 자동화시 로봇 경로정보를 CAD정보에서 도출함으로써 생산성향상의 극대화 및 자동화라인에의 집적성을 갖는다. 현재 외국에서는 연마공정 자동화기술 연구와 제품개발이 계속 진행되고 있다. Die

polisher (Aida), robot polisher (Showa), flex-polisher (Nagase), auto surface finishing M/c (Kurata), PGM (대판기공), 패치연삭, 자력공구 (II SUT) 등이 있다. 문제점으로 다양한 금형면에의 적용성을 들 수 있다. 국내에서는 대부분 수동/동력공구에 의한 수작업으로 수행되고 있으며 소량의 일본제품 수입에 의한 적용 사례를 들 수 있다. KIST에서는 국책과제 사업으로 금형연마자동화시스템을 개발하였으며 여기서는 이에 대한 설명과 외국기술과의 비교를 하고자 한다.

## 2. 파상도 (Waviness)

### 2.1 중요성

금형면은 그림 1과 같은 요소로 구성되어 있다.

표 면	조 도	실제의 표면형성도구에 의해 표면에 남겨진 생산공정의 고유한 속성인 표면상에 존재하는 불규칙 성분들
	파상도	이 파상도위에 조도가 중첩되는 표면형성조직의 한 성분
	형 상	조도와 파상도를 무시한 표면의 일반적인 형상

그림 1 금형면의 구성

금형 연마 즉, 마무리작업의 목적은 NC 가공에 의해 생성된 형상면의 품질을 향상시키는 것이며 이는 기하학적인 형상을 유지하면서 면조도를 목표치만큼 낮추는 작업이다. 이 공정을 자동화하기 위해 저석의 다양한 입도, 가압력, 자유곡면 적응을 위한 다차원 킴클라이언스 기능들이 집적된 로봇용 공구시스템들이 개발되었다. 이를 통해 국부 면적에서의 목표조도를 달성할 수 있었으나 전체 금형면에서의 파상도가 또 하나의 중요한 해결 과제로 도출됐다. 그 후 이 해결방안으로 무방향성 연마자동화기술 개발 및 2축 테이블방식의 연마시스템이 제작됐으며 적용성을 향상시키기 위해 3자유도를 가진 새로운 무방향성 연마자동화시스템이 개발됐다. 본 시스템의 특징은 다음과 같다.

- 연마 패턴의 자유 프로그래밍 기능(르싸쥬, 지그재그, 지그재그 크로스 패턴 포함)
- 연마 면적의 자유 프로그래밍기능(x,y연마폭, 연마 경로 밀도 입력)
- 복잡하고, 좁은 금형면에서의 접근성(수직 다관절 형태의 연마공구시스템)
- 연마의 고속성(PC에서 연마 패턴 생성/제어/저장 기능)
- 연마로봇 시스템의 제어 집적성(셀 제어기인 PC에서 전체 제어기능 관장)

**2.2 저석의 최적 형상에 의한 파상도 감소**

기존 간과되어 온 저석 형상을 균일한 파상도 관점에서 최적화시키면 그림 2와 같다.

연마량은 다음과 같이 정의될 수 있다.

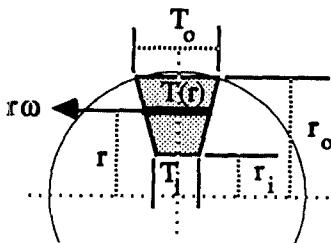


그림 2 저석의 형상

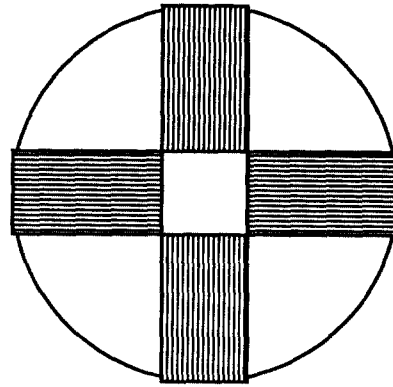


그림 3 연마로봇 시스템 분석

$$S(r) = k \cdot \int_0^{T(r)} |rw| dt \tag{1}$$

여기서  $T(r)$ 은 연마 시간이다.  $S(r)$ 의 표준편차가 최소일 때의  $r_0/r_i$  값을 최적 저석형상으로 할 수 있다. 결론으로서  $r_0=r_i$ 를 도출하게 되며 그 형상은 그림 3과 같다.

**3. 연마 로봇 시스템 분석**

**3.1 본 체**

본체는 연마작업을 수행하는 공구를 핸들링 하여 금형면을 이동하는 기구부로 정의된다. 강성이나 정밀도면에서 우위를 강조하여 공작기계형태를 주장하나 기술적인 측면에서 볼 때

표 1 금형연마용 핸들링 방식의 비교

비교	NC공작기계형	수직 다관절 로봇형
장점	· 작업자에게 친숙 · 단품 개념	· 복잡한 금형면에서의 접근성 · 보다 큰 작업공간 · 주변기기와의 정보교환기능
단점	· 비싸다 · 큰 설치공간소요	· 시스템 개념

표 2 금형 연마용 핸들링 방식의 제원 비교

비교항목	NAGASE	DAIKIN	AIDA	KIST	
모델명	FP-2010	KM2500	DPR-5	미정	
형태	갠트리	직교좌표	수평다관절	수직다관절	
축 수	4축	5축	2축+1축	6축	
작업 영역 (mm)	H	600	800	300	2200
	W	2000	2000	1000	3000
	D	1000	700	500	1500
정밀도(mm)	0.1(추정)	0.2	0.1(추정)	0.1	

표 3 연마운동 수행 주체에 따른 비교

운동 종류	수작업	DAIKIN, NAGASE, AIDA	KIST
기본 경로	작업자	로봇	로봇
패턴	작업자	로봇	공구시스템
공구 구동	공구/작업자	공구	공구

금형 연마는 본체정밀도와 금형면의 품질(조도, 파상도)과는 무관한 개념이며 금형면의 정밀도는 이미 전 단계인 NC 가공에서 형성되고 연마 공정은 정밀도를 해치지 않으면서 품질(조도와 파상도)을 높히는 작업이다. 즉 정밀도를 유지하며 품질(조도와 파상도)을 높힐 수 있는 연마 패턴 및 제어기술이 핵심이 되겠다. 표 1은 공작기계형과 로봇형의 비교를 보여준다.

실제 적용하고 있는 방식들의 기술적인 제원비교는 다음 표 2와 같다.

### 3.2 공구 시스템

금형 연마용 공구를 지지 및 핸들링하는 기능을 담당한다. 연마운동 기능의 수행 주체의 차이점은 표 3과 같다.

KIST 방식은 기본 경로와 사상패턴 운동의 주체를 분리함으로써 고속성과 로봇의 수명에서 보다 유리하다. 다음은 KIST에서 개발된 무방향성 연마공구시스템의 기구부에 관한 설명이다.

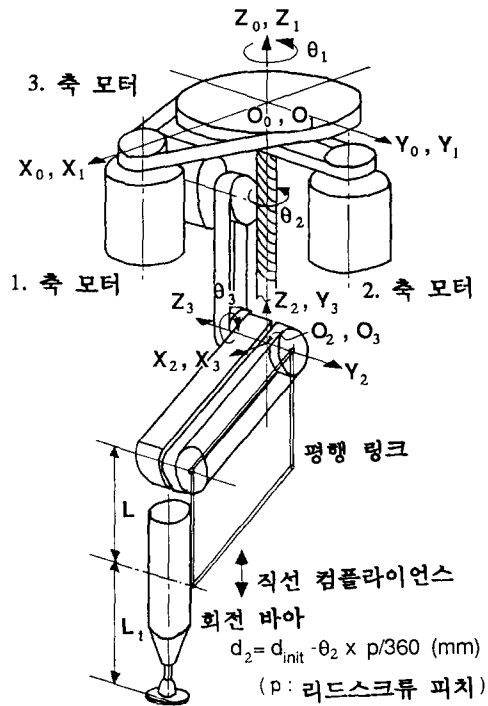


그림 4 무방향성 금형 연마 공구 시스템 기구부의 외관

표 4 연마공구시스템의 링크매개변수

링크	조인트 변수	링크 크 트위스트	링크 길이	링크 윽셋
1	$\theta_1$	0	0	0
2	$d_2$	0	0	$d - \theta_2/90$
3	$\theta_3$	$-90^\circ$	0	0

르싸쥬, 지그재그, 지그재그 크로스, 원, 삼각형 등 다양한 연마 패턴을 금형 자유곡면 위에서 생성시키기 위해 3 자유도(RTR)를 가진 로봇용 연마공구 시스템이 개발되었다. 이는 무엇보다도 복잡한 또는 좁거나 깊은 금형곡면에도 그 접근성이 높으며 신속한 대처가 가능하다. 다음 그림 4는 개발된 연마공구 시스템의 모델링을 보여주고 있다. 각 모터 1, 2, 3의 회전각을  $\theta_{M1}, \theta_{M2}, \theta_{M3}$ 라 하고 기구부의 최종 회전각을  $\theta_1, d_2, \theta_3$ 라 하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 1/6 \theta_{M1}, \theta_2 = \theta_{M2}, d_2 = d - \theta_{M2}/90, \\ \theta_3 &= 1/12 \theta_{M3} \end{aligned} \quad (2)$$

연마공구 시스템은 기구학적으로 3자유도를 가진 링크시스템으로 각 링크 매개변수를 정리하면 표 4와 같다.

각 링크간의 변환 행렬은 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d - \theta_2/90 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 96.5C\theta_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ C\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 96.5S\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $L=96.526\text{mm}$ 이고  $L_i$ 는 공구에 따라 변화한다.

저석의 공구끝점은 다음과 같다.

$$X = 96.5C\theta_3 C\theta_1 \quad (6)$$

$$Y = 96.5C\theta_3 S\theta_1 \quad (7)$$

$$Z = 96.5S\theta_3 - d - \theta_2/90 - L_i \quad (8)$$

위 식에서 표 5와 같은 두 가지 해를 구할 수 있다.

표 5 연마공구시스템의 역기구학 해

	해1	해2
$C\theta_1$	$x/(x^2+y^2)^{0.5}$	$-x/(x^2+y^2)^{0.5}$
$C\theta_3$	$(x^2+y^2)^{0.5}/96.5$	$-(x^2+y^2)^{0.5}/96.5$
$\theta_2$	$90(96.5 S\theta_3 + d - L_i - z)$	

공구는 3번째 축으로부터 동기 풀리와 타이밍 벨트를 통해 연결되어 있으며 평행 사변형을 구성하여 공구가 항상 수직을 이루게 한다. 공구는 공압실린더에 의한 수직 컴플라이언스를 통해 가압력 고정 및 위치공차 흡수기능을 하고 있다. 각 축의 기준점은 광 인터럽터를 사용하여 초기 구도가 설정된다. 안정성을 고려한 각 축의 작업 영역은 다음과 같다.

$$0^\circ < \theta_1 < 180^\circ \quad (9)$$

$$0^\circ < \theta_2 < 360^\circ \times 20 \text{ (직선 길이 } 0-80\text{mm)} \quad (10)$$

$$-165^\circ < \theta_3 < 15^\circ \quad (11)$$

대부분 공압 실린더에 의한 정압 기능이 있으며 공압 실린더에 의한 공구 각도의 변경이 가능하다.

### 3.3 공 구

수작업 금형 연마에서는 매우 다양한 공구들이 사용되고 있다. 이런 다양한 공구들을 자동화개념으로 묶기 위해서는 표준화 및 간소화가 선행되어야 한다. 매우 다양한 공구 팁들을 수용하기 위해 구동방식에 따라 크게 그림 5와 같이 분류될 수 있다.

금형 연마는 기본적으로 면접촉이며 동시에

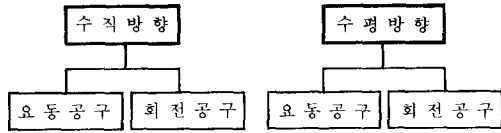


그림 5 공구 구동방식의 분류

넓은 면적이 접촉될수록 파상도면에서 품질이 좋다. 곡면 또는 위치 부정확성에의 대처기능으로 보통 공구팁에의 탄성 패드 또는 유니버설 조인트방식을 사용하고 있다. 수직에서 수평 또는 경사 방향으로의 전환은 앵글/경사 어댑터를 사용하고 있다.

### 3.4 자동공구 교환장치

위에서 언급된 공구구동부들을 한 작업장에서 1개 이상 필요시는 공구 자동교환장치가 집적되어야 한다. 직접방식은 보통스위치에 의한 수동 교환 방식과 자동 교환 방식을 사용할 수 있겠다.

### 3.5 자동공구팁 교환장치

동일 공구구동부에 다양한 공구팁을 교환하여 사용할 경우나 긴 작업시간에 자동으로 지속적으로 수행되기 위해서는 공구팁의 자동교환기능이 직접되어야 한다.

### 3.6 연마액 순환장치

연마 효율 향상 및 마모편의 연마면 품질 저해를 방지하기 위해 필요하다. 특히 경면연마의 경우 미세 마모편을 제거할 수 있는 필터 사용이 요구되며 보통 수용성 연마액을 사용한다.

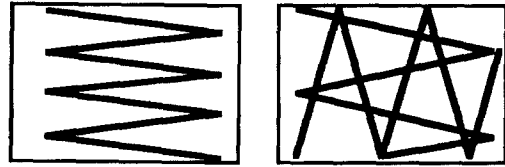
### 3.7 연마 패턴

#### (1) 수작업 연마 패턴

기존 수작업 금형 연마 경로의 패턴은 그림 6과 같으며 로봇이용 연마작업에도 수작업일 때의 패턴을 보통 그대로 이용하고 있다.

#### (2) 르싸쥬 연마 패턴

앞의 기존 금형연마 패턴은 특정한 방향성이



지그재그

지그재그 크로스

그림 6 수작업 금형 연마 패턴

존재하고 이는 파상도를 증가시킨다. 금형 면의 파상도를 줄이기 위해 가장 이상적인 경우는 랜덤 방향의 연마 패턴이며 이에 근사한 패턴을 생성하며 패턴의 프로그래밍 및 제어성을 높이기 위해 로봇 연마용 르싸쥬 패턴이 도출되었다. 르싸쥬 패턴의 정의, 변수 및 금형연마 변수와의 관계는 식 12, 그림 7과 같다.

$$L=f(X, Y), \quad X=A_x \cdot \sin(\omega_x \cdot \theta),$$

$$Y=A_y \cdot \sin(\omega_y \cdot \theta) \quad (12)$$

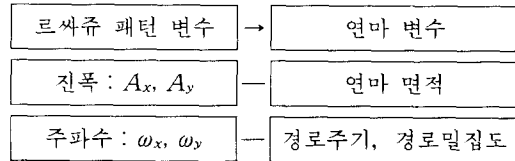


그림 7 르싸쥬 패턴과 연마변수와의 관계

표 6은 기존 지그재그 패턴과 르싸쥬 패턴간의 정량적인 결과에 의한 비교를 보여주고 있다. 실험방식은 광파간섭무늬로서 1개당 1 $\mu$ m의 파상도를 보여준다. (Mitutoyo 사, Optical Flat : 158 시리즈)

KIST에서 개발된 르싸쥬 연마패턴 외에 금형면의 품질을 균일화하기 위한 자동화에 적합

표 6 패턴간의 파상도 비교

	지그재그 패턴	르싸쥬 패턴
파상도	9 $\mu$ m	4 $\mu$ m
실험조건	SKC3, H <sub>rc</sub> 50, #1200, 40min	

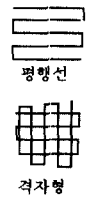


NAGASE	DAIKIN	AIDA	KIST
패턴 변경 불가능			패턴 생성 확장 가능
 <p>평행선 격자형</p>	 <p>평행선 지그재그 경사지그재그</p>	 <p>회전요동</p>	<p>르싸쥬 패턴 지그재그 지그재그크로스 평행선 격자형 경사지그재그 등</p> <p>필요한 패턴을 자유자재로 확장가능</p>

그림 8 시스템들 간의 연마패턴 기능비교

한 연마 패턴이 개발될 수 있다. 그림 8은 대표적인 시스템 간의 연마 패턴기능에 대한 비교를 보여준다.

### 3.8 프로그래밍 방법

금형은 극단의 경우 다품종 단량 생산으로 각 금형당의 프로그래밍 시간도 중요한 요인이 된다. 그러나 전반적으로 금형의 연마면은 비교적 단순한 기하학적인 형상을 가지고 있다. 표 7은 프로그래밍 방식에 의한 비교를 보여주고 있다.

### 3.9 연마 로봇 시스템 레이아웃

전체시스템의 주요 구성요소로서 쉘 제어기능을 수행하는 IBM PC386, 공구 핸들링기능을 수행하는 ABB IRB2000로봇, 3축 연마공구 시스템을 제어하는 공구 제어기(PCL 738B), 직류 서보 모터, 공구 구동부 및 공구들을 들 수 있다.

표 7 프로그래밍 방식 비교

NAGASE	DAIKIN	AIDA	KIST
조이스틱 방식	축정기방식입력	플레이 백 방식	조이스틱방식 수치입력방식 열의 프로그래밍 (표면 모델러 필요)

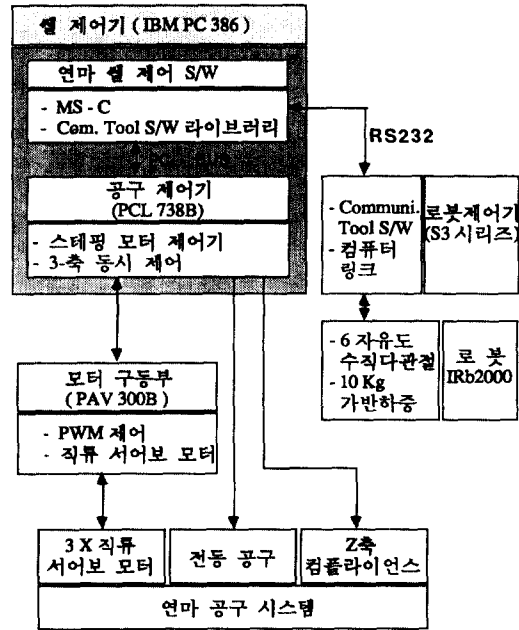


그림 9 연마로봇 시스템 레이아웃

그림 9는 KIST 연마로봇시스템의 구성, 주요 요소, 대표적인 특성 및 상호 연결방식을 보여주고 있다.

### 3.10 연마로봇 시스템 제어 S/W 구조 및 내용

시스템 제어 S/W 환경은 MS-C(PWB)이며 그 특징은 다음과 같다.

- 그래픽 유저 인터페이스(GUI)
- 다양한 연마 패턴 생성
- 패턴 데이터 읽기/쓰기
- 모터 제어를 위한 데이터 변환
- 연마공정 모니터링

그림 10은 전체 S/W의 구성 및 각 모듈들의

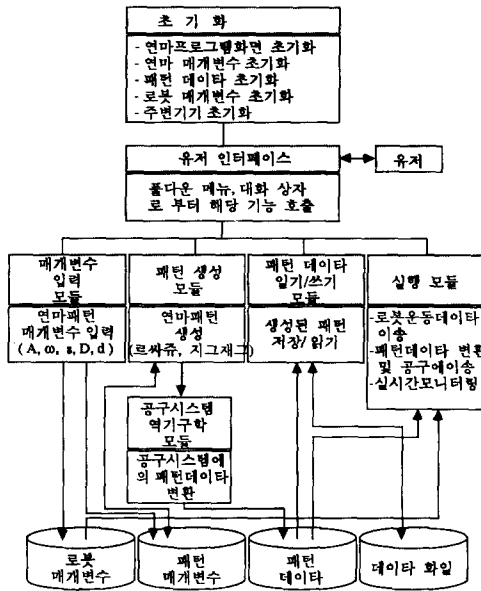


그림 10 연마로봇 시스템 S/W구성

기능과 알고리즘을 부여주고 있다.

### 3.11 금형 연마 로봇 모니터링

다음 항목들은 금형자동연마 공정에서의 유저 입력 사항 및 모니터링 정보들을 보여준다.

- 연마 패턴

패턴 매개변수 : X축, Y폭, 면적, 주파수 팩터, 밀집도, 경로 속도

- 1연마 면에서 로봇 경로

로봇 제어 변수 : 속도, 초기/종료 대기 시간

- 1연마 패턴내에서 연마량

공구 팁 직경, 공구속도, 공구 접촉압력, 저석 입도, 표준 편차, 평균 연마량

- 1연마 면에서의 연마량
- 연마량, 연마량의 균일성

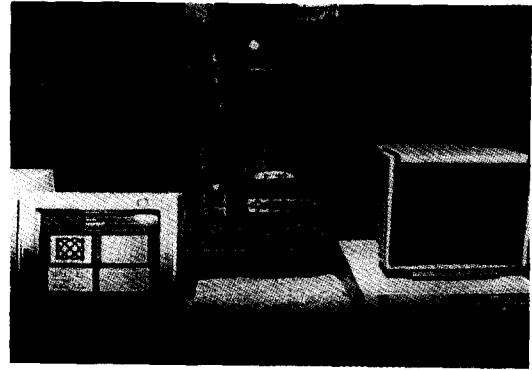


그림 11 금형 연마 모니터링 화면의 한 예

그림 11은 금형연마시의 모니터링의 한 화면을 보여주고 있다.

### 3. 맺음말

이상 금형연마 자동화기술 논의에서 KIST에서 개발된 금형연마 로봇시스템에 대한 분석과 세계적으로 대표적인 금형연마 자동화시스템의 가급적 정량적인 비교를 하여 독자들의 이해를 돕고자 했다. 금형연마 공정의 자동화를 통한 생산성의 향상 없이는 금형생산성 향상에 한계가 있으며 자동화를 통한 생산성 향상은 금형 종류, 크기, 복잡성 등 여러 가지 고려인자들이 있지만 간략화하여 5~8배 정도의 결과를 낼 수 있다. 금형연마 자동화기술의 핵심은 자동화에 적합한 연마패턴의 개발과 실현화에 있으며 금형연마 자동화에의 로봇의 적합성과 그 유연성을 통해 효과를 향상시킬 수 있다. 현재 국내 산업계에서도 금형연마 자동화에 상당한 관심과 투자를 하고 있는 상황이다. 