

## 고정입자패드를 이용한 사출금형의 나노 폴리싱에 관한 연구

최재영\*, 김호윤\*\*, 박재홍\*\*\*, 정해도\*\*\*\*, 서현덕\*\*\*\*\*

### A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad

Jae-Young Choi\*, Ho-Houn Kim\*\*, Jae-Hong Park\*\*\*, Hae-Do Jeong\*\*\*\* and Hyun-Duc Seo\*\*\*\*\*

#### ABSTRACT

The finishing process for die and mold manufacturing is very important because it influences the final quality of products. Injection molds need higher quality surface than general purpose dies and molds. Conventional polishing can not make mold surface down to nanometer roughness efficiently because of their loading and glazing. This paper focused on the development of fixed abrasive pad using water swelling mechanism of polymer binder network. Self-conditioning was recognized as the long term polishing stabilization tool without any loading or glazing because water makes fixed abrasives free by swelling of the pad. Consequently, stable nano-polishing process has been applied on the injection mold, from the experimental results with polished surface roughness of Ra 15.1nm on STD-11 die steel.

**Key Words** : Finishing Process (마무리공정), Injection Molds (사출금형), Polishing Pad (연마패드), Fixed Abrasive Pad (고정입자패드), Self-Conditioning (자체컨디셔닝)

#### 1. 서론

금형은 제품 생산에 널리 이용되는 필수적인 도구로써 그 가공 기술은 제품의 성능을 결정짓는 필수적인 요소이다. 금형을 이용하여 생산된 공업 제품은 전기, 전자, 자동차, 기계부품 및 일용품 등 수없이 많다. 더구나 다품종 소량 생산에 의하여 다양화, 소형화, 고 기능화 되어 가고 있다. 이에 부합하여 금형의 제조 기술 역시 더욱 중요시되고 있으며 급속히 발전해 가고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 금형의 제조

공정은 크게 두 부분으로 구분할 수 있는데, 형상 가공 공정과 표면 마무리 공정으로 나눌 수 있다. 금형용 소재를 금형의 종류와 형상 등에 따라 절삭 가공, 방전 가공, 연삭 가공 등에 의해 원하는 형상을 얻는다. 일반적으로 이러한 형상 가공에 의해 금형의 형상 정밀도가 거의 결정되게 된다. 형상 가공은 가공 공구의 형상이 그대로 공작물에 전사되므로 가공 흔적이 남게 되며, 금형을 이용하여 생산된 제품의 표면 품질은 금형의 표면 상태에 크게 의존하므로 형상 가공 이후 원하는 표면 거칠기를

2002년 4월 16일 접수

- \* 부산대학교 정밀정형협동과정
- \*\* 부산대학교 기계기술연구소
- \*\*\* 부산대학교 정밀기계공학과
- \*\*\*\* 부산대학교 기계공학부
- \*\*\*\*\* 지엔피테크놀러지(주)

얻기 위해 연마 가공을 수행한다. 일반적으로 산업체에서는 프레스 금형과 사출금형이 많이 이용되고 있다. 프레스 금형은 주로 자동차 산업이나 중공업 분야에 이용되며 그 크거나 가공제품의 특성상 cusp의 고능률 가공이 필수적이며 또한 가공 후 도장이나 다른 후처리가 필요하므로 경면의 표면거칠기보다는 제품을 직접 가공했을 경우 그 형상의 오차나 균일한 표면거칠기가 우선이다. 반면에 사출금형의 경우에는 프레스 금형과 달리 금형의 표면형상과 표면거칠기가 그대로 제품에 전사되게 되므로 금형의 요구 표면 거칠기는 나노미터 범위까지 요구하고 있다<sup>[3]</sup>.

그러나 이러한 나노영역의 금형 표면을 얻기 위해서 열경화성 결합재를 이용한 상용 고정입자패드를 이용할 경우, 가공이 진행이 됨에 따라 눈매움 (loading)과 날무덤(glazing) 현상이 발생하고, 이러한 현상은 입자가 미세할수록 심하게 발생하게 된다. 이에 본 논문에서는 사출금형을 나노영역까지 연마하기 위해 폴리머의 팽창(swelling) 현상을 이용하여 연마패드에 자체 컨디셔닝(self-conditioning) 개념을 넣은 고정입자(다이아몬드) 패드를 개발하게 되었다.

## 2. 고정입자패드

### 2.1 고분자의 팽창 메커니즘<sup>[4]</sup>

수용성 및 친수성 폴리머의 팽창 메커니즘은 친수성 기로 설명할 수 있다. 친수성 기는 주위의 수분을 흡착하는 특성을 가지고 있다. 일반적으로 친수성 기는 hydroxyl group(-OH), carbonyl group(-CO), carboxyl group(-COOH) 등이 있으며, 이러한 친수성기가 물과 접촉하면 물분자는 폴리머 내로 침투하여 기 주위로 모이게 되며, 폴리머 구조는 팽창하게 된다. 물의 침투와 흡수가 어느 이상이 되면 폴리머 구조는 점점 더 팽창하여 폴리머는 하나씩 분리되어지는 것을 수용성(Soluble) 폴리머라고 한다. 한편, 폴리머 구조가 분리되지 않고 팽창 특성을 가지는 것을 친수성(Hydrophilic) 폴리머라고 한다.

수용성 및 친수성 폴리머로 구성된 연마입자가 물과 접촉하면 친수성 폴리머는 팽창함과 동시에 수용성 폴리머는 분해되게 된다. 이러한 과정을 거치면서 연마패드는 자체적으로 컨디셔닝이 되면서 연

마 시 날무덤 및 눈매움 현상을 발생시키지 않는다. Fig. 1은 친수성 폴리머의 팽창 메커니즘을 나타낸다.

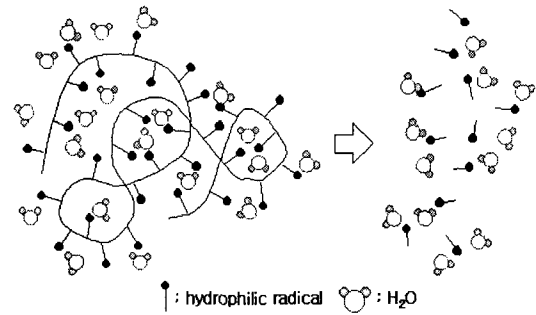


Fig. 1 The mechanism of swelling

### 2.2 고정입자패드의 제작방법

친수성 바인더를 이용한 고정입자패드의 제조 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 연마입자는 다이아몬드를 사용하였으며, 사용되어진 친수성 폴리머 바인더는 polyethylene glycol(PEG), polyethylene glycol monomethacrylate(PEGMA), trimethylpropane trimethacrylate(TMPTA) 등이 있다. 그리고 금형연마용 패드이므로 높은 가압력에 견딜 수 있는 내구성을 가질 수 있게 ulethane을 첨가하였다.

제조과정을 순서대로 살펴보면, 먼저 3종의 바인더와 ulethane을 고르게 혼합한 다음, 연마입자를 혼합 바인더에 충분히 분산시킨 후, 스크린 프린팅을 위해 일정한 점도 유지제로서 알루미늄 분말을 넣고 UV 경화를 위한 광개시제를 혼합한다. polycarbonate 필름위에 혼합제를 프린팅한 후, UV 램프를 이용하여 광경화 반응에 의해 경화된다.

이때, 적절한 시간과 광량을 조절하여야만 충분한 경화와 필름의 변형을 방지 할 수 있다.

공정의 조건 및 장치를 세부적으로 보면 입자와 바인더와의 혼합을 위하여 stirrer를 이용하였으며, 폴리우레탄 패드상에 연마입자층 형성을 위하여 프린터 스크린을 사용하였다. 바인더 경화 방법은 크게 열경화와 광경화로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 자외선을 이용한 광경화법을 적용하였다. 이외에도, 입자와 바인더의 혼합과 분산, 인쇄 공정 시 점도의 확보, 경화 시 UV조사량이 중요한 요소로 나타났다.

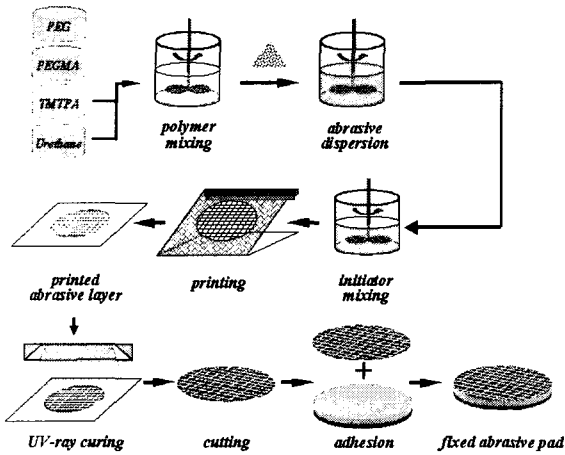


Fig. 2 The manufacturing sequence of an fixed abrasive pad

### 3 제작되어진 고정입자패드의 특성

#### 3.1 친수성 폴리머의 팽창특성

본 연구에서 사용한 바인더는 polyethylene glycol(PEG), polyethylene glycol monomethacrylate (PEGMA), trimethylolpropane trimethacrylate(TMPTA) 세 가지를 이용하였다. 친수성 바인더를 이용한 패드를 구성하는 바인더의 가장 중요한 특성은 swelling ratio와 abrasion ratio이다.

이러한 요소를 파악하기 위하여 바인더의 조성비에 따른 특성 변화를 관찰하였다. 팽창특성은 컨디셔닝과 관계가 있으며, abrasion ratio는 패드의 내구성 및 압력 전사에 필수적인 항목이다. 즉, 팽창이 클수록 표면 경도는 낮아지는 경향이 있으며, 일정 이하의 폴리머 경도는 금형에 압력을 가할 때 불리하다.

Abrasion ratio의 평가를 위하여 각 조성비에 따라 마멸 테스트를 시행하였으며, 연마 공정과 유사한 분위기를 위하여 유사 가공액을 공급하였다. 마멸 테스트 전, 후 질량 변화를 측정하여 abrasion ratio를 평가하였다. 실험 결과 TMPTA가 내마모성에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다 (Fig. 3). TMPTA의 경우 three-functional로서 네트워크 구조를 강화시켜 표면 경도를 향상시키므로, TMPTA의 비율이 높을수록, abrasion ratio가 향상되는 것으로 생각된다.

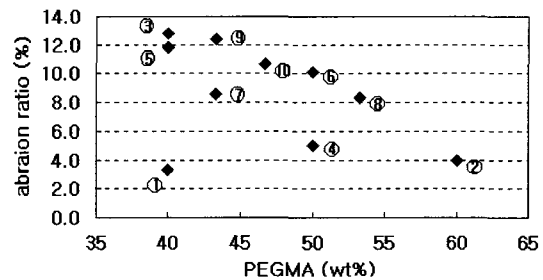
Swelling ratio는 KOH solution(pH 10.8, 5wt%)에 dipping test로 평가하였으며, dipping 전, 후의 질량 변화로 산출하였다. Swelling ratio는 PEGMA 비율이 높을수록, TMPTA 비율이 낮을수록 증가하였다. PEGMA의 경우 meta-acolyte를 가지므로 swelling ratio 증가에 가장 민감한 영향을 미치는 것이며, 반면에, TMPTA의 경우 네트워크 밀도를 높이므로 swelling ratio를 감소시키는 것이다(Fig. 4).

위의 실험결과 얻어진 상관 관계(Fig. 5)를 보면 swelling 특성과 abrasion특성이 음의 상관 관계를 나타내고 있다. 이는 swelling특성이 우수한 경우는 가공액 분위기에서 바인더의 네트워크가 약화되는 경향이 강해 연마 입자의 도출은 원활하나 내마모성이 약해진다는 것으로 추론 할 수 있다.

Fig. 6은 이러한 팽창특성과 마모특성을 고려하여 금형연마에 최적인 조성비를 선택하여 제작되어진 고정입자 패드 사진이다.

Table 1 The formulation of water swelling polymer

	PEG	PEGMA	TMPTA
1	6	4	0
2	4	6	0
3	4	4	2
4	5	5	0
5	5	4	1
6	4	5	1
7	16	12	1
8	12	16	1
9	3	3	1
10	7	7	1



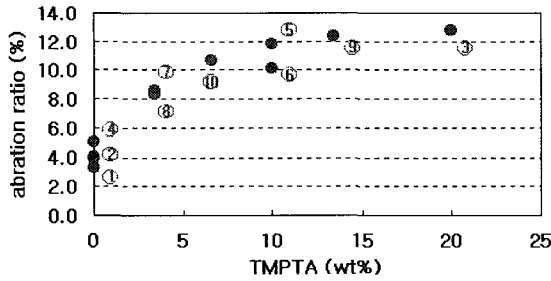


Fig. 3 The abrasion ratio vs. polymer formulation

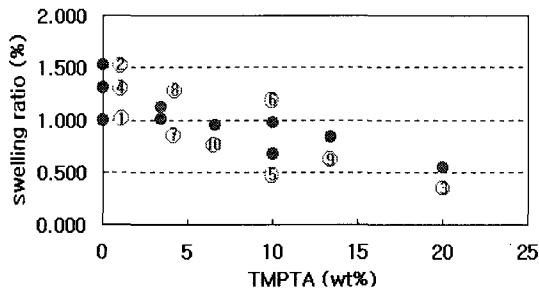
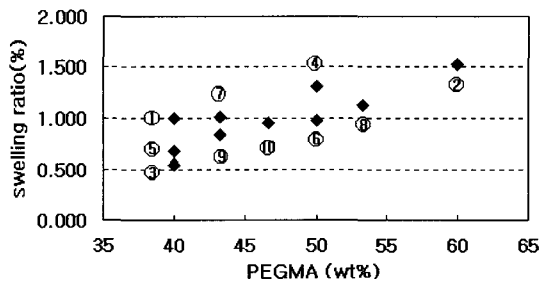


Fig. 4 The swelling ratio vs. polymer formulation

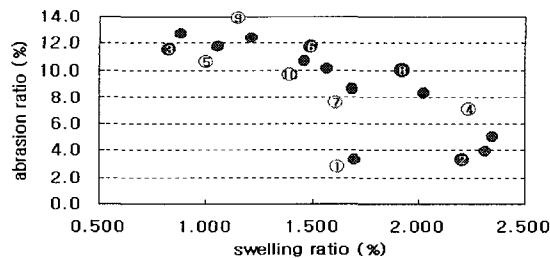


Fig. 5 Result of Swelling & Abrasion test



Fig. 6 Photos of the fixed abrasive pad with hydrophilic polymers

#### 4. 실험 및 고찰

##### 4.1 실험장치

제작 되어진 고정입자 패드를 이용하여 실제 금형 재료를 연마하였다. Fig. 7은 실험에 사용되어진 금형연마기(한국공작기계(주))를 나타내었다. 금형연마기는 5축 동시제어에 의해 자유곡면을 연마할 수 있도록 개발되었다.

본 논문의 실험조건은 Table 2와 같다. 연마패드는 금형 연마용으로 직접 제작되어진 고정입자 패드로서 자동연마기에 사용되는 유니버설 조인트형 attachment 앞부분에 실리콘 러버와 함께 부착하여 사용하였다. 공작물은 금형 재료로 널리 쓰이고 있는 금형강 STD-11(JIS SKD-11)을 사용하였다. 연마패드는 #100, #600, #1000 3종류의 다이아몬드 입자를 사용하였다. 공작물의 가공은 6회 왕복하여 Tayler-Hobson사의 stylus를 사용하여 가공되어진 표면을 측정하였고 또한 광학 현미경을 사용하여 공작물의 표면을 관찰하였다.

또한 현재 금형 연마업체에서 상용으로 많이 사용되는 열경화성 고정입자패드(3M #100, #400, #800, #1800)와 연마특성을 평가하였으며 SEM을 이용하여 가공중의 패드 표면을 관찰하여 자체 컨디셔닝 효과를 조사하였다.

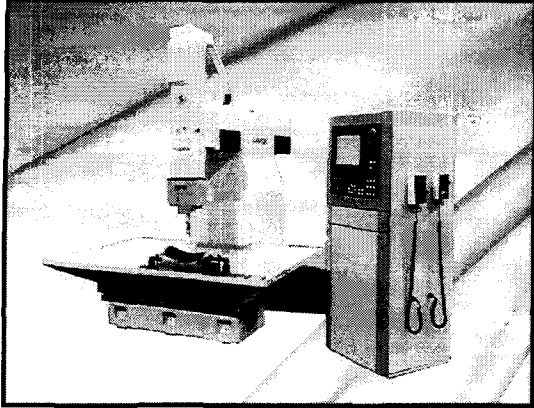


Fig. 7 Automatic die polishing machine (5-axial)

Table 2 experimental condition

Polishing Machine	(POLYEM-1205)
Spindle Speed(RPM)	800~900
Workpiece	SKD-11
Feedrate(mm/min)	400
Polishing length(mm)	120
Pressure(kg/cm <sup>2</sup> )	5
Grain Size(mesh)	100, 600, 1000
Initial surface roughness	Ra 1.5639 $\mu m$

## 4.2 실험결과

### 4.2.1 상용 열경화성고정입자패드와의 연마특성

Fig. 8은 현재 상용으로 사용되어 지고 있는 열경화성 고정입자패드를 사용하여 공작물을 연마한 후 stylus를 이용하여 표면거칠기를 측정된 결과이다. 그림에서 보듯이 #100 열경화성 고정입자패드를 사용하여 연마한 공작물에 표면에는 여전히 절삭마크가 남아 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과

공작물을 가공함에 따라 자체 건디셔닝 기능이 없어 눈메움이나 날무덤 현상이 발생하여 가공에 참여하는 입자의 숫자가 감소함에 따른 결과로 생각된다. Fig. 9는 가공되어진 공작물의 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과이다.

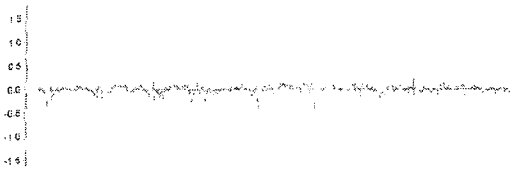
#100 연마패드를 사용하여 연마된 표면에는 절삭마크가 뚜렷하게 남아 있는 것이 나타나 있다.



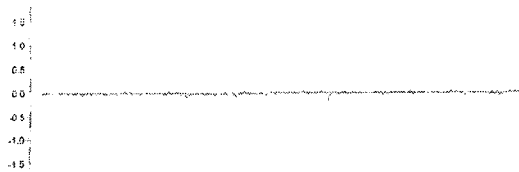
#100(Ra: 0.3403  $\mu m$ )



#400(Ra: 0.0841  $\mu m$ )

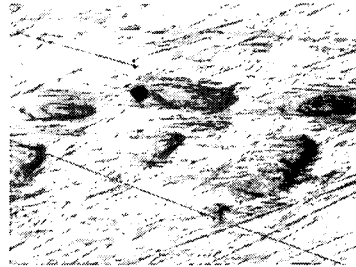


#800(Ra: 0.0556  $\mu m$ )

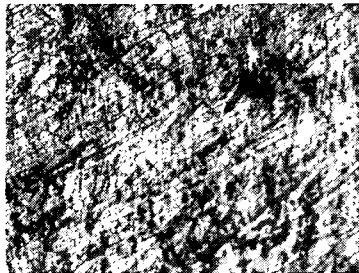


#1800(Ra: 0.0168  $\mu m$ )

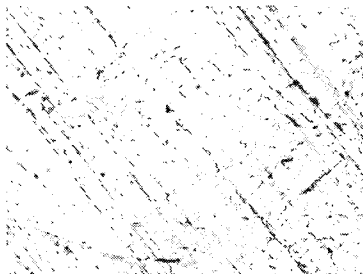
Fig. 8 Surface roughness of workpiece using Thermo-curable FAP



#100



#400



#800



#1800

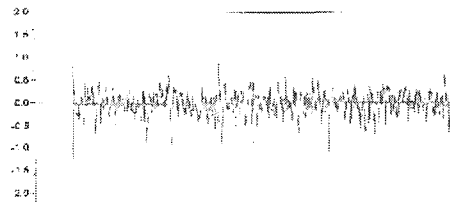
Fig. 9 Microscopic photo of workpiece using Thermo-curable FAP

#### 4.2.2 친수성 고정입자패드의 연마특성

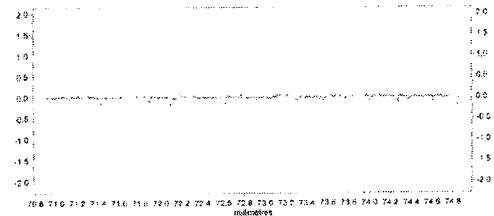
Fig. 10은 개발되어진 친수성 고정입자패드를 이용하여 사용하여 공작물을 연마한 후 stylus를 이용하여 표면거칠기를 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 절삭마크는 완전히 제거 되었으며 최종 마무리면의 표면 거칠기는 Ra 15.1nm의 초정밀 나노 영역의 폴리싱 표면을 얻을 수 있었다.

이러한 나노영역의 표면을 얻을 수 있는 것은 가공이 진행이 됨에 따라 폴리머의 스웰링 현상에 의해 입자가 자연스럽게 표출이 되며 또한 눈메움이나 날무덤 현상을 방지해 주기 때문이다

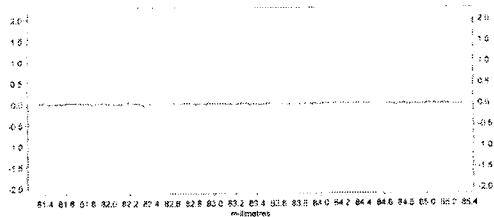
Fig. 11은 가공되어진 공작물의 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 마무리 되어진 표면은 거의 스크래치가 없는 가공 표면이 창성되었다.



#100(Ra:0.1879  $\mu\text{m}$ )



#600(Ra:0.0311  $\mu\text{m}$ )



#1000(Ra:0.0151  $\mu\text{m}$ )

Fig. 10 Surface roughness of workpiece using Hydrophilic FAP

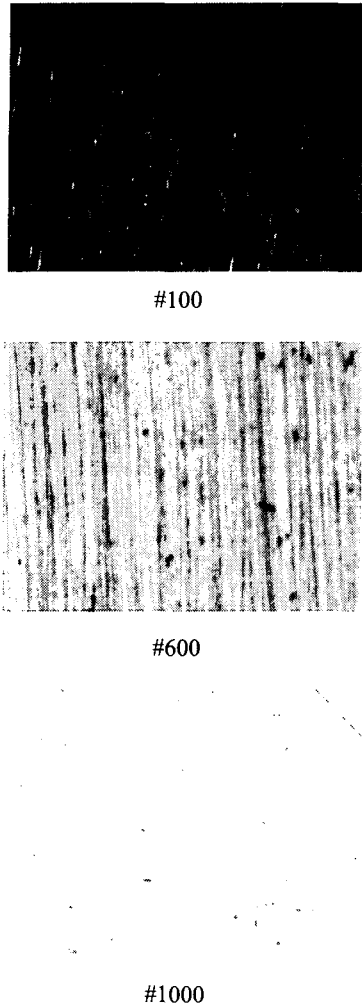
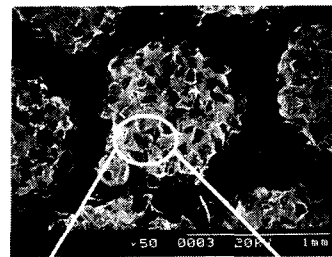


Fig. 11 Microscopic photo of workpiece using Hydrophilic FAP

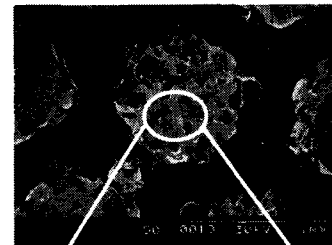
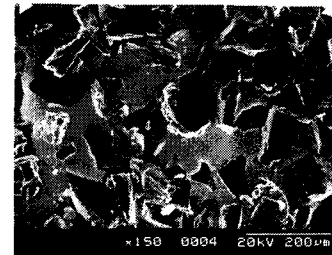
#### 4.2.3 연마특성의 비교결과

Fig. 12는 가공하기전의 열경화성패드(3M)와 가공 후 패드의 SEM사진이다. 그림에서 보듯이 가공 후 3M 패드는 연마입자인 다이아몬드가 떨어져 나갔고 또한 연마 되어진 칩이 연마 입자에 붙어 날무덤 현상이나 눈메움 현상을 발생 시키고 있는 것이 관찰되었다. Fig. 13은 제작 되어진 친수성 고정입자 패드의 가공전과 가공후의 SEM사진이다. 그림에서 보듯이 패드와 금형강과의 마찰에 의해 스웰링 현상으로 강도가 약해진 폴리머 부분이 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 그러므로 제작되어진

고정입자패드는 가공이 진행됨에 따라 이러한 스웰링 현상에 의해 auto-conditioning이 가능해져 금형 가공 시 날무덤이나 눈메움 현상이 발생하지 않는다. Fig. 14는 친수성 고정입자패드를 이용하여 금형강을 연마하여 경면을 달성한 사진이다.

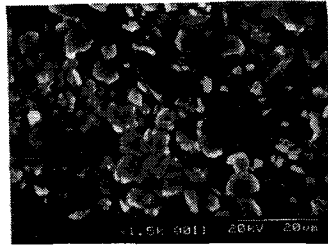


(before polishing)

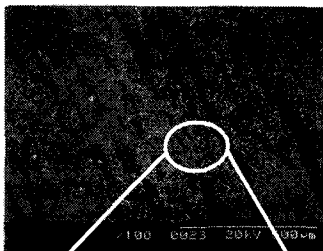


(after polishing)

Fig. 12 SEM photo of Thermo-curable Pad



(before polishing)



(after polishing)

Fig. 13 SEM photo of Hydrophilic FAP



Fig. 14 Mirror surface of workpiece

일반적으로 고정입자패드(FAP)는 원래 금형연마에 이용되고 있던 것이나 나노 영역의 연마 거칠기를 안정적으로 얻을 수 힘들다. 연기 위해서는 많은 반복 작업을 필요로 한다. 또한 이러한 나노 가공 표면을 연기 위해서는 슬러리를 이용한 연마를 통해야 하나, 이러한 방식은 연마능률이 떨어져서 산업 현장에 적용이 불가능하다. 그래서 나노 영역의 거칠기를 안정적으로 구현하기 위해 친수성 고정입자패드를 개발하였다. 특히 3M 패드의 경우 절삭유를 사용하나 여기서는 물만 이용 연마 가공이 되므로 eco machining이라 할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 사출 금형의 초정밀 경면 연마를 위하여 폴리머의 팽창이라는 현상을 이용하여 금형 연마시 패드에 자체 컨디셔닝 개념을 도입한 고정입자패드를 개발하여 그 특성을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 친수성을 가진 폴리머인 PE300, TMTPA, PEGMA를 이용하여 고정입자패드를 제작하였다.
- (2) 바인더의 조성에 따른 팽창 특성과 마모의 상관 관계를 알 수 있었다.
- (3) 제작되어진 입자 함침패드는 자체 컨디셔닝이 가능하여 금형 연마시 날무덤이나 눈메움 현상이 발생하지 않았다
- (4) 제작 되어진 #100, #600, #1000 입자 함침 패드를 금형 가공에 적용하여 절삭 마크를 완전히 제거하고 금형강 표면을 Ra 15.1nm 의 나노영역까지 실현하여, 제작되어진 고정입자패드가 사출 금형과 같은 초정밀 금형에 사용될 수 있음을 보여 주었다
- (5) 상용으로 3M PAD와 연마속도 및 표면 거칠기를 비교하여 개발된 입자 함침 패드가 우수한 성능을 나타내었다.
- (6) 기존의 절삭 유제가 아닌 물만으로도 연마가 가능한 환경 친화적인 가공법이다.

### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.



### 참고문헌

1. 황찬해, 임동재, 정해도, "전성 탄성 공구를 이용한 금형 연마 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp. 96-102, 2000.
2. 황찬해, 유기태, 정해도, 안대균, "주철분드 다이아몬드 펠렛에 의한 프레스 금형의 고능률 연마 가공(I)," 한국정밀공학회지, 제16권, 제3호, pp. 84-90, 1999.
3. 임동재, 이상직, 정해도, "3축 가공기를 이용한 곡면 금형의 연마정밀도 향상에 관한 연구법," 한국정밀공학회지, 제18권, 제3호, pp. 61-67, 2001.
4. 김호윤, 박재홍, 정해도, 서헌덕, 남철우, 이상익, "충간절연막 화학기계연마에서 입자코팅패드에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제11호, pp. 168-173, 2001.