

# 미디어유동 시뮬레이션을 이용한 입자유동가공의 해석에 관한 연구

(A Study on the Analysis of Abrasive Flow Machining Using the Simulation of Media Flow)

김지웅\*, 김동식(한국과학기술원 대학원), 김정두(한국과학기술원)

Chi-Ung Kim\*, Dong-Sik Kim and Jeong-Du Kim(KAIST)

**Keywords :** Abrasive Flow Machining(입자유동가공), 3-Dimensional Shape Part(3차원 형상부품), Media Flow(미디어 유동), Material Removal(가공량), Surface Roughness(표면조도)

**ABSTRACT :** The 3-dimensional complex parts which construct automobile and aerospace parts are very difficult to polish by traditional polishing method. Abrasive flow machining is useful to polish an internal or external surface of the 3-dimensional shape part. In this paper, media flow between workpiece and tooling part has been simulated and, the characteristics of abrasive flow machining process have been analyzed according to various machining conditions by calculating the material removal and surface roughness.

## 1. 서 론

기계가공에 있어서 마무리 연마가공은 가공 정밀도나 생산성의 측면에서 전체 가공에 지대한 영향을 끼치게 되며 특히, 복잡한 3차원 형상을 가진 재료의 내면이나 외면의 마무리가공은 기존의 연마가공으로는 가공이 매우 어렵다. 따라서 입자유동가공은 이러한 복잡한 3차원 형상의 외면 및 내면의 연마가공을 수행하는데 매우 유용하게 사용되는데, 자동차의 연료분사노즐, 조향장치, 분기관, 에어컨의 콤프레셔부품, 항공기의 연료분사계통, 터빈블레이드 등에 다방면으로 이용이 되고 있다. 입자유동가공에 관한 기존의 연구로는 L. Rhoades가 항공기의 터빈엔진 연료분사노즐 부품이나 자동차의 디젤엔진 연료분사노즐 부품과 같은 복잡하고 불규칙적인 3차원 형상의 내면이나 터빈블레이드와 같은 복잡한 외형을 가공하는데 있어서, 입자유동가공의 폭넓은 적용성 및 균일한 가공성에 대해서 연구하였고<sup>(1)</sup>, 방전 가공한 재료에 입자유동가공을 수행하여 표면조도를 Ra 1.9 $\mu$ m에서 0.18 $\mu$ m로 향상시키고, 미디어가 통과하는 통과구멍의 치수에 맞는 미디어의 점도를 선정하는 연구가 수행되었다.<sup>(2)</sup> Sakamoto는 입자유동가공의 폭넓은 적용성을 보고했는데, 호브나 피니언커터 등의 연마가공에 있어서 다른 기계가공이나 수작업을 하면 표면 코팅의 박리현상이 일어나는 것을 입자유동가공을 이용하여 이러한 박리현상을 방지하는 효과를 얻어내었다.<sup>(3)</sup> R. E. Williams는 전가공으로서 방전가공 및 와이어가공, 밀링, 연삭가공을 마친 재료를 입자유동가공한 것의 가공결과를 통계적으로 접근한 연구를 하였다. 여기에서, 방전가공이나 와이어가공된 재료보다 입자유동가공을 수행한 것이 밀링이나 연삭가공된 재료보다 표면조도의 향상이 나타났고 특히, 방전가공후에 표면에 남아 있는 재료의 탄화층을 제거하는데 효과적임을 증명하였다.<sup>(4)</sup> 또 Williams는 미디어의 점도, 압출압력에 따른 원형직관의 내면가공에 의하여 가공된 표면조도의 통계적인 비교를 연구하였다. 여기에서, 압력이 재료의 표면조도의 향상에 중요한 인자임을 밝히고 있다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 연마입자 미디어의 유동해석 시뮬레이션을 통하여 3차원 형상을 가진 원추형 재료에 대한 입자유동가공의 특성을 알아보려고 한다. 입자유동가공에 미치는 가공조건 으로서는 미디어에 공급되는 피스톤의 압력, 툴링과 재료표면 사이의 틈새로 공급되는 미디어의 유량, 미디어의 점도, 틈새의 크기, 미디어가 담는 연마입자의 함유율로 나누어 볼 수 있는데, 이들 조건의 변화에 따른 재료의 가공량 및 표면조도 해석을 통하여 가공조건에 따른 입자유동가공의 특성을 파악하고, 최적 가공조건을 도출하고자 한다.

## 2. 입자유동가공시스템의 구성 및 원리

입자유동가공은 미디어라고 불리우는 점탄성 폴리머와 연마입자의 혼합체를 유압실린더의 피스톤의 힘에 의하여 미디어실린더로부터 미디어를 압출시켜 가공물을 통해 흐르게 함으로써 미디어가 포함하고 있는 연마입자에 의하여 가공이 이루어지게 된다.

입자유동가공 시스템의 기본적인 구성은 Fig.1에서 보는 것처럼 미디어를 유동시키는 유압장치, 유압실린더 및 피스톤, 미디어를 담고 있는 미디어 실린더, 미디어가 가공물에 적절히 흘러들어가도록 유도해 주는 툴링(Tooling) 부품, 고압의 미디어의 외부유출을 막아주고 툴링부품의 이탈착의 역할을 하는 클램핑 등으로 이루어져 있다. 툴링은 가공하고자 하는 재료의 형상 및 치수 등에 의해 결정되므로 이 툴링을 다양하게 설계하여 다양한 분야의 복잡한 3차원 형상의 부품 가공이 가능하다.

이와 같은 입자유동가공의 작동원리는 Fig.2와 같으며 상하의 미디어실린더는 각기 유압에 의하여 미디어를 교대로 압출하여 가공물에 흐르게 함으로써 미디어가 가공물물 사이에 두고 상하방향으로 왕복운동을 하면서 연마가공이 이루어지게 된다.

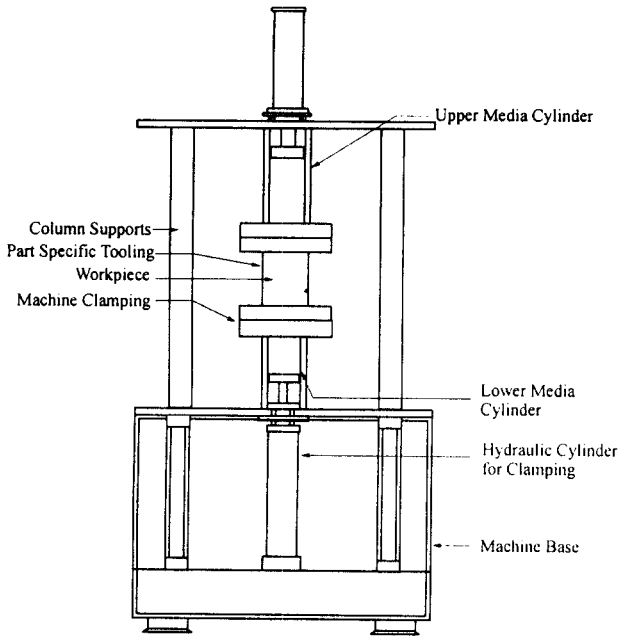


Fig.1 Diagram of Abrasive Flow Machining System

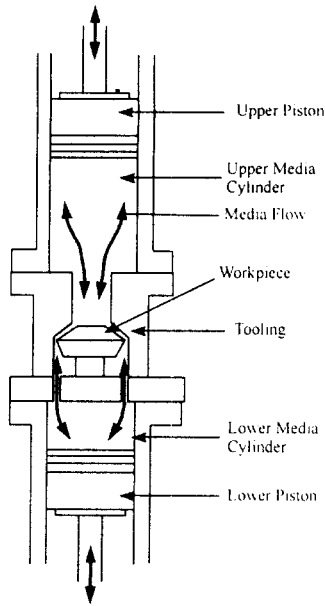


Fig.2 Diagram of Abrasive Flow Machining Process

### 3. 입자유동가공 시뮬레이션

#### 3.1 미디어의 유동속도 및 전단응력

입자유동가공의 모델링을 하는데 있어서 미디어의 유동은 연마입자를 담고 있는 폴리머의 유동으로 가정하였으며 연마입자 미디어는 비압축성 뉴턴유체유동으로 가정하였다. 입자유동가공에 영향을 미치는 중요한 인자로서는 피스톤에 의해 미쳐지는 공급압력, 미디어의 유량, 연마입자 미디어의 점도, 툴링과 재료사이의 간극, 미디어가 포함하는 연마입자의 함유율을 들 수가 있다.

Fig.3은 입자유동가공에 의한 원추형 재료의 연마가공 모델을 나타낸 것이다. 그림에서 가공영역은 원추형을 가지는 3차

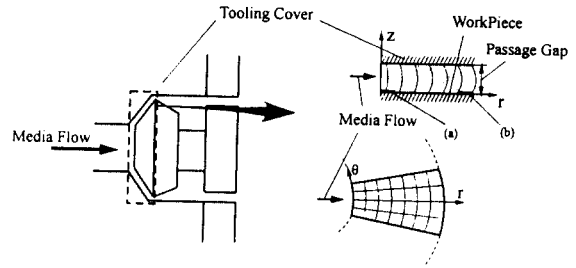


Fig.3 Simulation Region on the Surface of Conical Shape Workpiece

원 형태인데, 이것을 해석하기 쉽도록 평면으로 전개하여 펼쳐놓은 부분을 해석영역으로 하였다.

본 연구에서 입자유동가공 시뮬레이션에 관련된 수식을 정리하면 다음과 같다. 입자유동가공에 쓰이는 연마입자 미디어는 점탄성 폴리머로서 점탄성유동을 한다고 가정하면, 미디어의 전체변형률  $\gamma$ 는 탄성변형률  $\gamma_1$ 과 소성변형률  $\gamma_2$ 로 구성되며 식(1)과 같이 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (1)$$

양변을 시간으로 미분하면 식(2)와 같다.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt} \quad (2)$$

응력-변형률 관계로부터 식(2)는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \left( \frac{d\tau}{dt} \right) + \frac{\tau}{\mu} \quad (3)$$

여기에서, G는 영률(Young's modulus),  $\tau$ 는 연마입자 미디어의 전단응력(Shear Stress),  $\mu$ 는 연마입자 미디어의 점도(Viscosity)를 나타낸다.

탄성변형률은 입자유동의 유량이 클 경우에는 점성변형률에 비하여 미소한 양을 가진다. 따라서, 식(3) 우변의 제 1항은 무시될 수 있다.

$$\frac{d\gamma}{dt} \approx \frac{\tau}{\mu} \quad (4)$$

변형률과 속도구배와의 관계는 식(5)와 같다.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)의 관계에 의해서 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\mu} \quad (6)$$

여기서,  $u$ 는 축방향으로 흐르는 미디어의 속도이다.

식(6)은 뉴턴의 점성법칙에 상응하므로 탄성변형률을 무시한 경우의 미디어의 흐름은 뉴턴유체의 흐름으로 가정할 수 있다. 이와 같은 가정하에 입자유동가공에 쓰이는 연마입자 미디어의 연속방정식 및 운동량방정식으로부터 유체의 속도 분포를 얻어낸다. 미디어의 연속방정식은 식(7)과 같이 표현된다.<sup>(7)</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (7)$$

여기에서,  $\rho$ 는 미디어의 밀도,  $v_r$ 은  $r$ 방향으로의 속도 성분,  $v_\theta$ 는  $\theta$ 방향으로의 속도 성분,  $v_z$ 는  $z$ 방향으로의 속도 성분이다. 미디어의 유동이 정상유동이고,  $\theta$ 방향으로의 속도와  $z$ 방향으로의 속도가 없다고 가정한다면, 식(1)에서 제1항과 제3항, 제4항은 무시될 수 있으므로 연속방정식은 식(8)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0 \quad (8)$$

미디어의 운동량방정식은 식(9)와 같다.

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

여기에서,  $P$ 는 미디어가 피스톤에 의해 받는 압력이다.

입자유동 미디어의 유동이 대칭유동이며 정상유동이라고 가정하면  $\theta$ 방향 속도 성분  $v_\theta$  및  $z$ 방향 속도 성분  $v_z$ 는 0이 되고,  $\theta$ 방향에 대하여  $r$ 방향 속도 성분  $v_r$ 은 변화가 없으므로  $\frac{\partial v_r}{\partial \theta}$ 는 0이고, 시간에 대한 속도 변화  $\frac{\partial v_r}{\partial t}$ 는 0이 된다. 또 식(8)에 의하여 식(9)의 우변의 제2항은 0이 된다. 따라서, 식(9)는 식(10)으로 단순화된다.

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (10)$$

식(8)과 식(10)에서 얻어진 미분방정식으로부터 앞에서 모델링한 시스템을 Fig.3에 나타나 있는 영역내에서 가공물과 불링으로 이루어진 입자유동가공 통로의 입구에서부터 출구방향으로의 유한한 노드로 나누어 결과적으로 각 노드에서의 입자유동가공 미디어의 속도분포를 찾는다. 여기에서, 가공물의 위치에 따른 가공특성을 알아보기 위하여 입자유동가공 통로입구의 영역(a)와 통로출구에서의 영역(b)로 나누어 통로입구와 출구에서의 가공특성을 알아보려고 한다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 가공조건이다. 시스템의 정성적인 가공특성을 얻기 위하여 입자유동가공 미디어의 유량은 10, 20, 30  $\text{cm}^3/\text{sec}$ , 통로의 간극은 2, 3, 4 mm, 공급압력은 20, 40, 60 bar, 점도는 0.1, 0.5, 1  $\text{Nsec}/\text{cm}^2$ 으로 입자유동가공의 가공조건을 변화시켜 주어 입력데이터를 정해주었다.

### 3.2 입자유동가공에 의한 가공량 및 표면조도

앞절에서의 입자유동가공 미디어의 속도분포를 이용하여 가공영역에서의 입자유동가공에 의한 가공량 및 표면조도를 예측하고자 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1)연마입자의 속도는 미디어의 속도와 같다.
- 2)입자유동의 재료표면에서의 속도의 수직방향 성분은 무시한다.
- 3)연마입자의 수직력은 주어진 압력에 의해 결정된다.
- 4)연마입자의 수평력은 미디어의 전단응력에 의해 결정된다.
- 5)입자유동가공 미디어에 포함된 연마입자는 평균입자거리만큼 차이를 둔 정방형 분포를 가진다.
- 6)연마입자는 충분한 강성을 가져서 입자의 마모를 무시한다.
- 7)연마입자의 가공면에서의 형상은 원추형으로 가정한다.

이러한 가정에 입자유동가공 미디어의 압력이 연마입자에 미치는 압력에 의해 가공물에 입자가 침투해 들어간다는 Finnie의 이론에 의해 연마입자의 수직력에 의한 연마입자의

Table 1 Machining Condition of Abrasive Flow Machining

System Parameter	Machining Condition
Media Flow Rate (Q)	10, 20, 30 $\text{cm}^3/\text{sec}$
Passage Gap ( $d_G$ )	2, 3, 4 mm
Abrasive Content ( $C_A$ )	1:1, 1:2, 1:3
Media Viscosity ( $\mu$ )	0.1, 0.5, 1 $\text{Nsec}/\text{cm}^2$
Supplied Pressure (P)	2, 4, 6 MPa

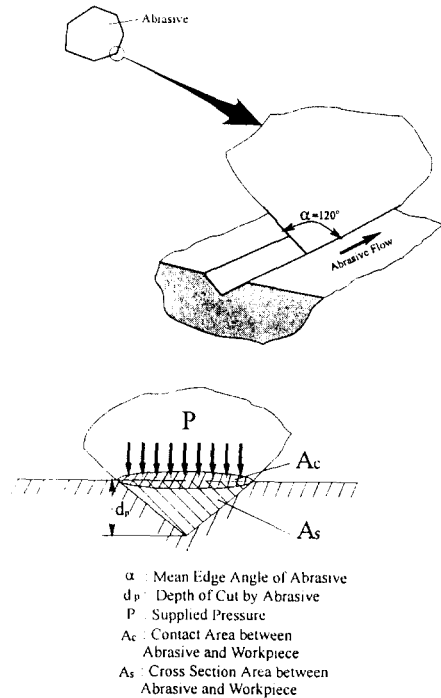


Fig.4 Mechanism of Material Removal on the Surface of Workpiece

절삭깊이를 계산할 수 있다.<sup>(8)</sup> Fig.4에 도시된 바와 같이 입자유동가공 미디어가 연마입자에 미치는 압력이 입자에 미치는 수직력과 가공재료의 유동응력(Flow Stress)<sup>(9)</sup>에 의한 저항력과 의 평형에 의해 접촉면적  $A_c$ 를 구할수 있다. 이와 같은 평형식은 식(11)과 같다.

$$P \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = s \cdot A_c \quad (11)$$

여기에서,  $P$ 는 입자에 미치는 입자유동가공 미디어의 압력이고  $d$ 는 연마입자의 직경,  $s$ 는 가공재료의 유동응력(Flow Stress),  $A_c$ 는 연마입자와 가공물 표면과의 접촉면적이다. 미디어의 전단응력에 의한 연마입자의 수평력과 유동응력에 의한 재료의 수평저항력의 평형식에 의하여 연마입자가 미디어의 속도방향으로 가공이 이루어질 수 있을지를 결정한다. 다음은 재료표면의 전단응력  $\tau_w$ 과 유동응력에 의한 수평력의 평형식을 나타낸다.

$$\tau_w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = s \cdot A_s \quad (12)$$

여기에서,  $\tau_w$ 은 재료표면의 전단응력,  $A_s$ 는 연마입자가 재료표면에 파고들어간 단면적이다.

Fig.4에서 절삭깊이는 식(13) 및 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{pc} = \frac{\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (13)$$

$$d_{ps} = \sqrt{\frac{A_s}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \quad (14)$$

여기에서,  $\alpha$ 는 연마입자의 평균 날끝각이다. 일반적으로  $\alpha$ 는 SiC 입자의 경우 평균  $120^\circ$ 를 가진다.

식(13)은 미디어의 압력에 의하여 연마입자가 재료에 수직 방향으로 미치는 힘에 의하여 파고들어간 절삭깊이를 의미하며, 식(14)는 미디어가 연마입자에 미치는 전단응력에 의한 수평력이 재료의 수평반력과의 평형식에서 얻어진 절삭깊이의 임계수치를 나타낸다. 이때, 식(13)에서 얻어진 절삭깊이가 식(14)에서 얻어진 절삭깊이보다 크면 연마입자가 수평방향으로 움직일 수 없기 때문에 연마입자는 수평방향으로 움직이기 가능한 식(14)의 임계 절삭깊이만큼 재료표면에 파고들어간다고 가정할 수 있으며, 식(13)에서 얻어진 절삭깊이가 식(14)에서 얻어진 절삭깊이보다 작으면 연마입자가 수평방향으로 충분한 힘을 얻어서 가공이 이루어지기 때문에 수직방향으로 파고들어간 절삭깊이는 식(13)의 값을 취한다고 가정할 수 있다. 따라서, 절삭깊이  $d_p$ 는 다음의 식(15)와 같이 정의된다.

$$d_p = \min[d_{pc}, d_{ps}] \quad (15)$$

식(15)에서 얻어진 절삭깊이로부터 단일입자의 가공량은 식(16)과 같다.

$$\text{Material Removal} = d_p^2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot S \quad (16)$$

여기에서, S는 연마거리이다.

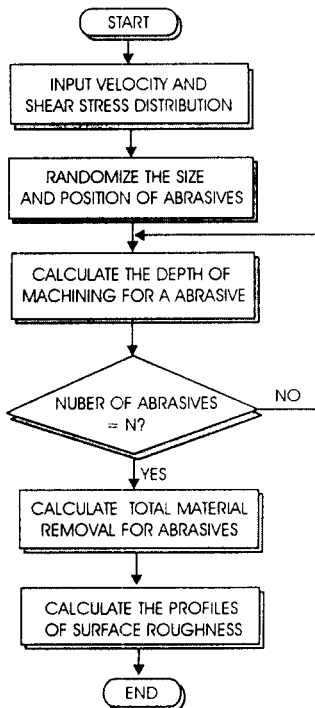


Fig.5 Flow Chart to Simulate Material Removal and Surface Roughness in the Abrasive Flow Machining

입자유동가공에 의한 원추형 재료표면의 표면조도의 계산<sup>(10,11)</sup>은 미디어가 단위체적내에 포함하는 연마입자의 개수를 계산하여 입자간의 평균거리를 계산한 다음 소정의 가공시간 동안 일정한 영역안을 통과하는 입자의 개수를 계산한다. 그리고, 단일 연마입자를 난수분포화하여 얻어진 입자의 위치에 입자의 크기를 정규분포시켜서 식(13) 및 식(14)로부터 절삭깊이를 얻어내어 미리 난수분포한 표면에서 가공입자의 자취로부터 얻어진다.

입자유동 가공에 의한 재료의 가공량 및 표면조도 시뮬레이션 계산과정의 흐름도는 Fig.5에 나타난 바와 같다. 그림에서 시뮬레이션의 과정을 살펴보면, 앞서 구한 미디어의 속도 분포와 가공물 표면의 전단응력분포를 입력으로하고, 여기에서 연마입자 함유율(연마입자와 점탄성폴리머의 부피비)로부터 단위체적내의 연마입자의 개수를 계산한 다음 일정영역에 난수분포한 후 압력과 전단응력 으로부터 단일입자의 절삭깊이를 계산하고 이것을 n개의 입자에 대하여 시행한 후 이 가공된 입자들의 체적으로부터 표면조도 및 가공량을 계산해낸다. 여기에서, 입력 속도는 앞 절에서의 미디어의 유량, 공급 압력, 통로간극, 미디어의 점도의 변화에 따른 속도분포 데이터를 사용하고 여기에 미디어의 연마입자 함유율의 변화에 따른 가공량 및 표면조도를 구한다. Table 2는 시뮬레이션에서 이용한 재료의 물성치 및 가공조건을 나타내고 있다.

Table 2 Material Properties and Machining Conditions used in the Simulation for Material Removal and Roughness Profile

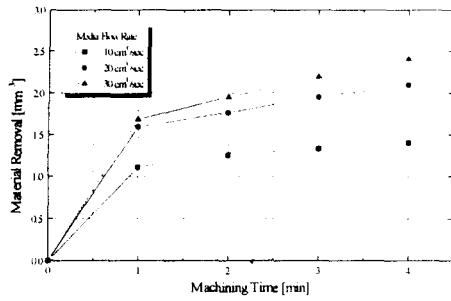
Media	Viscoelastic Polymer density $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$ Viscosity $\mu = 10^4 \text{ Nsec/m}^2$
Abrasive	SiC #70 (abrasive diameter = 0.15~0.35 mm ) density $\rho = 3,218 \text{ kg/m}^3$
Workpiece	SM45C flow stress $s = 4,200 \text{ MPa}$
Input Velocity	Velocity on the Surface of Spiral Bevel Gear by the Media Flow Simulation
Machining Time	1, 2, 3, 4 min

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

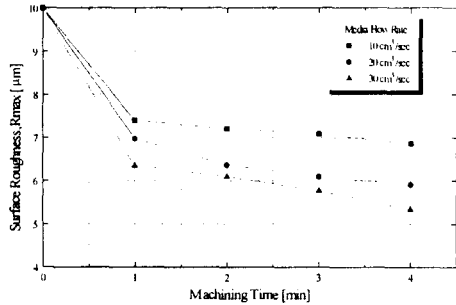
각각의 가공조건에 따른 톨링갯과 가공물로 이루어지는 통로내에서 입자유동가공 미디어의 속도분포 경향은 연마입자 미디어의 유량, 압력, 점도가 증가하고 통로간극이 감소하면 속도가 증가하였다. 여기서 얻어진 속도분포로부터 재료 표면의 가공량 및 표면조도의 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig.6은 미디어의 유량에 대하여 가공시간에 따른 가공량 및 표면조도변화를 나타낸 것으로서 전체적인 특성은 가공시간이 증가하면 가공량은 증가하며, 표면조도는 감소하였다. 유량의 변화에 따른 변화는 가공량의 경우 유량이 증가함에 따라 증가하였고 표면조도는 감소함을 볼 수 있다. 이것은 유량이 증가하면 단위시간당 가공을 수행하는 미디어의 연마입자 개수가 증가하기 때문이다.

Fig.7은 가공물 표면과 톨링사이의 간극의 변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화를 나타낸 것으로서 가공시간이 증가하면 가공량은 점차 증가하였고 이때 가공량의 증분은 감소하였다. 표면조도의 경우는 가공시간이 증가하면 점점 감소하였다. 간극의 크기에 따른 가공량 및 표면조도의 변화는 간극의 크기가 증가할수록 가공량은 감소하였고 표면조도는 증가하였다. 이것은 간극이 작으면 톨링과 가공면이 이루는 단면적이 작아서 유량이 증가하기 때문이다.



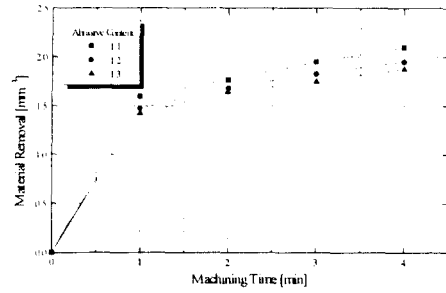
(a) Material Removal



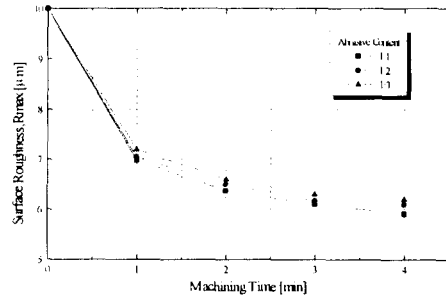
(b) Surface Roughness( $R_{max}$ )

· Supplied Pressure : 4 MPa, · Media Viscosity : 1 Nsec/cm<sup>2</sup>  
 · Abrasive Content : 1:1, · Passage Gap : 3 mm  
 · Initial Surface Roughness,  $R_{max}$  : 10 µm

Fig.6 Material Removal and Surface Roughness( $R_{max}$ ) according to Machining Time with respect to Flow Rate



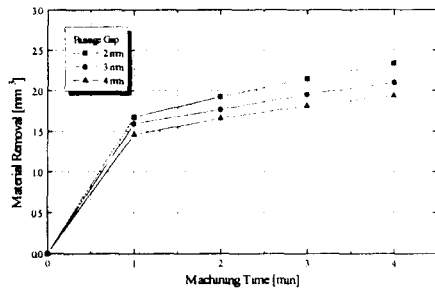
(a) Material Removal



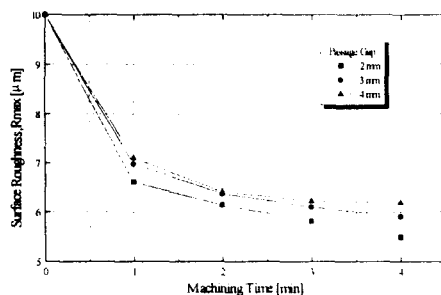
(b) Surface Roughness( $R_{max}$ )

· Flow Rate : 20 cm<sup>3</sup>/sec, · Supplied Pressure : 4 MPa  
 · Media Viscosity : 1 Nsec/cm<sup>2</sup>, · Passage Gap : 3 mm  
 · Initial Surface Roughness,  $R_{max}$  : 10 µm

Fig.8 Material Removal and Surface Roughness( $R_{max}$ ) according to Machining Time with respect to Abrasive Content



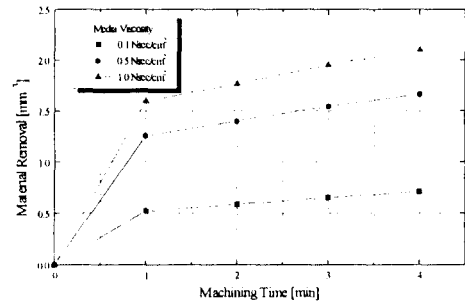
(a) Material Removal



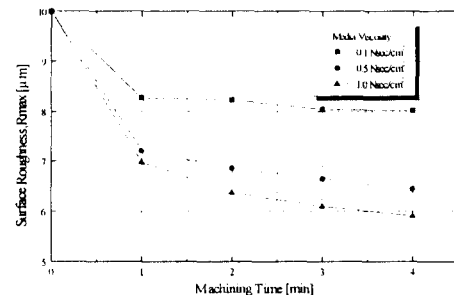
(b) Surface Roughness( $R_{max}$ )

· Flow Rate : 20 cm<sup>3</sup>/sec, · Supplied Pressure : 4 MPa  
 · Media Viscosity : 1 Nsec/cm<sup>2</sup>, · Abrasive Content : 1:1  
 · Initial Surface Roughness,  $R_{max}$  : 10 µm

Fig.7 Material Removal and Surface Roughness( $R_{max}$ ) according to Machining Time with respect to Passage Distance



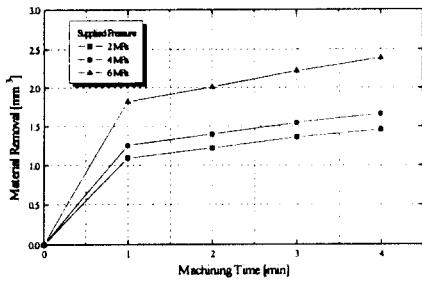
(a) Material Removal



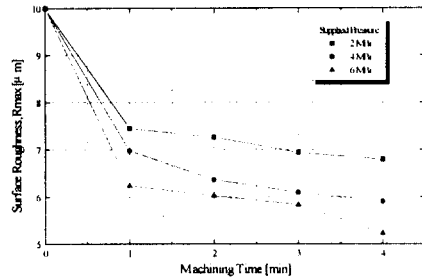
(b) Surface Roughness( $R_{max}$ )

· Flow Rate : 20 cm<sup>3</sup>/sec, · Supplied Pressure : 4 MPa  
 · Abrasive Content : 1:1, · Passage Gap : 3 mm  
 · Initial Surface Roughness,  $R_{max}$  : 10 µm

Fig.9 Material Removal and Surface Roughness( $R_{max}$ ) according to Machining Time with respect to Media Viscosity



(a) Material Removal



(b) Surface Roughness(R<sub>max</sub>)

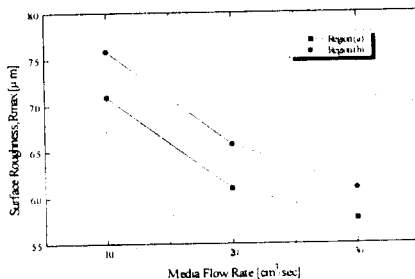
· Flow Rate : 20 cm<sup>3</sup>/sec, · Media Viscosity : 1 Nsec/cm<sup>2</sup>  
 · Abrasive Content : 1:1, · Passage Gap : 3 mm  
 · Initial Surface Roughness, R<sub>max</sub> : 10 μm

Fig.10 Material Removal and Surface Roughness(R<sub>max</sub>) according to Machining Time with respect to Supplied Pressure

Fig.8은 미디어내의 연마입자 함유율에 따른 가공량 및 표면조도의 변화를 나타낸 것으로서 가공시간이 증가하면 가공량은 증가하고 표면조도는 감소하였다. 연마입자 함유율의 변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화는 연마입자 함유율이 증가할수록 가공량은 증가하였고 표면조도의 경우는 감소하였다. 이것은 연마입자 함유율이 증가하면 단위체적당 연마입자가 증가하기 때문에 연마를 수행하는 연마입자의 개수가 증가하기 때문이다.

Fig.9는 미디어의 점도변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화를 나타낸 것으로서 가공시간이 증가하면 가공량은 증가하고 표면조도는 감소하였다. 미디어의 점도변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화는 미디어의 점도가 증가하면 가공량은 증가하고 표면조도는 감소하였다. 이것은 미디어의 점도가 증가하면 미디어에 의한 공작물 표면의 전단응력이 증가하기 때문에 그만큼 절삭력이 증가하기 때문이다.

Fig.10은 미디어의 압력변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화를 나타낸 것으로서 가공시간이 증가하면 가공량은 증가



· Supplied Pressure : 4 MPa, · Media Viscosity : 1 Nsec/cm<sup>2</sup>  
 · Abrasive Content : 1:1, · Passage Gap : 3 mm  
 · Initial Surface Roughness, R<sub>max</sub> : 10 μm

Fig.11 Surface Roughness according to Media Flow Rate with respect to Region

하고 표면조도는 감소하였다. 미디어의 압력변화에 따른 가공량 및 표면조도의 변화는 압력이 증가할수록 가공량은 증가하고 표면조도는 감소하였다. 이것은 압력이 증가할수록 연마입자가 공작물 표면에 깊숙히 파고들어가서 절삭깊이가 커져 가공량이 증가하기 때문이다.

이와 같은 결과에서 가공조건에 따른 가공특성은 미디어의 유량이 증가하고, 가공물 표면과 툴링사이의 간극이 작고, 연마입자함유율이 크고, 미디어의 점도가 크고, 미디어의 압력이 클수록 가공에 좋은 영향이 있음을 알 수 있다.

Fig.11은 가공영역에 따른 표면조도의 그래프로서 미디어유동이 가공물에 처음 진입한 부분에서 즉, 영역 (a)에서 표면조도가 낮은 수치를 보이며, 반대로 가공영역에서 벗어나는 부분 즉, 영역 (b)에서 표면조도가 대체적으로 높은 수치를 보이고 있다. 이것은 원추형 가공물의 진입부분보다 출구부분이 같은 간극이지만 더 큰 지름을 가지기 때문에 미디어가 유동하는 단면적이 더 크기 때문에 미디어의 유량감소의 원인으로 사료된다.

## 5. 결론

원추형 형상 가공물의 입자유동가공에 있어서 입자유동가공의 주요 인자인 미디어의 유량, 가공물 표면과 툴링사이의 간극, 미디어의 연마입자 함유율, 압력 및 점도의 변화에 따른 입자유동가공의 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입자유동가공 미디어의 점성 유동 및 연마입자의 모델링을 기반으로 하여 스파이럴 베벨 기어의 가공량과 표면조도에 관한 시뮬레이션을 수행하였다.
- (2) 입자유동가공에 있어서 미디어의 유량, 압력, 연마입자 함유율, 점도가 증가하면 피삭재의 가공량은 증가하고 표면조도는 감소하였다. 가공물 표면과 툴링사이의 간극이 증가하면 가공량은 감소하였고 표면조도는 증가하였다.
- (3) 입자유동가공에 의한 원추형 가공물의 진입부분과 출구부분의 가공특성은 미디어의 진입부분보다 출구부분의 지름이 크기 때문에 진입부분의 표면조도가 낮은 경향을 보였다.

## 참고문헌

- [1] Larry Rhoades, "Abrasive flow machining: a case study", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 28, 1991, pp107-116
- [2] L. J. Rhoades, "Abrasive Flow Machining", Manufacturing Engineering, NOV., 1988, pp75-78
- [3] 坂本 洋, "砥粒流動加工による研磨加工", 金屬プレス, 1993, 28-37
- [4] T. R. Loveless, R. E. Williams, "A Study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 47, 1994, pp133-151
- [5] R. E. Williams, K. P. Rajurkar, "Stochastic Modeling and Analysis of Abrasive Flow Machining", Trans. of the ASME, Vol. 114, 1992, pp74-81
- [6] J. A. Brydson, "Flow Properties of Polymer Melts", London Iliffe Books, 1970, pp16-20, pp142-143
- [7] R. W. Fox, A. T. McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics", Wiley, 1985, pp28-33
- [8] Marian Mazurkiewicz, "Material Removal by Hydro-Abrasive High-Pressure Jet Mechanism Study", SME Technical Paper, MS89-811, 1989
- [9] T. Altan, S. W. Oh, "Metal Forming Fundamentals and Applications", American Society for Metals, 1983, pp45-7
- [10] 酒井 保男, 柳下 福藏, 古川 勇二, "研削過程のシミュレーションに関する研究 (第2報)", 日本精密工學會誌, Vol. 61, No. 10, 1995, pp1443-1447
- [11] B. S. Gottfried, "Elements of Stochastic Process Simulation", Prentice-Hall, 1984, pp94-98