비구면 평행연삭에서의 휠구면형상 창성오차

황연*(광주과학기술원 기전공학과), T.Kuriyagawa**(Tohoku Univ. Nanomechanics),
이선규#(광주과학기술원 기전공학과)

Wheel curve generation error of aspheric grinding in parallel grinding method

Yeon Hwang*(GIST, Dept. Mechatronics), T.Kuriyagawa**(Tohoku University, Dept. Nanomechanics),
Sun-Kyu Lee# (GIST, Dept. Mechatronics)

ABSTRACT

This paper presents a geometrical error analysis of wheel curve generation method for micro aspheric surface machining using parallel grinding method. In aspheric grinding, wheel wear in process is crucial parameter for profile error of the ground surface. To decrease wheel wear, parallel grinding method is adopted. Wheel and work piece (Tungsten carbide) contact point changes during machining process. In truing process of the wheel, radius is determined by the angle and distance between wheel and truer. Wheel radius error is predominantly affected by vertical deviation between the wheel rotation center and the truer center. Simulation for vertical error and wheel radius error shows same tendency that expected by geometrical analysis. Experimental results show that the analysis of curve generation method matches with simulations and wheel radius errors.

Key Words : Curve generation method(구면창성법), Parallel grinding(평행연삭), aspheric grinding(비구면 연삭), wheel wear(휠 마모)

기호설명

d = radius of truer
q = angle between truer and wheel
l = distance between truer center line and wheel center line
$A(x_1, y_1, z_1)$ = Truing line on truer
$B(x_2, y_2, z_2)$ = Rotation center of A on wheel center line
$C(x_3, y_3, z_3)$ = Wheel surface locus on horizontal plain

1. 서론

최근 급속한 IT 산업의 발달과 더불어 디지털 제품의 융복합화가 가속화 되고 있는 시점에서 카메라폰 및 디지털 카메라등의 광학부품은 소형화 경량화가 강하게 요구되고 있다. 특히 기존의 구면 광학계가 비구면 광학계로 급속히 대체되고 있는 추세이며, 동시에 고정도, 고해상도의 고성능이 요구되고 있다.[1,2,3]

고정도의 비구면 렌즈의 제조를 위한 금형 가공에는 초경재질이 이용되는데, 난삭재인 초경의 특성상 가공방식으로는 초정밀 연삭이 주로 적용되고 있다.[4] 기존의 상용화된 연삭방식으로는 주판알형 휠을 사용하는 수직연삭과 봉형의 휠을 사

용하는 경사축이 있다. 수직연삭과 경사축연삭의 경우 휠과 가공물의 접촉면이 연삭과정중 고정되어 휠의 트루잉 오차가 가공물결과에 영향을 주지 않는 장점이 있다.[5]

그러나, 중대형의 렌즈 및 비구면 금형 연삭공정에서는 기존의 수직 연삭이 주로 적용되는데 수직연삭의 경우 가공조건에 따라 무시할수 없는 휠의 마모가 발생하게 된다. 즉 연삭과정에서 가공참여 휠 영역이 고정되어 휠의 마모가 제한된 영역에 집중되고, 이는 가공물의 가공오차로 나타나게 된다.[6]

또한 마이크로렌즈의 가공에 적용되는 경사축 연삭의 경우 휠 반경 오차에 따른 가공오차의 영향이 크고, 가공 효율이 떨어지게 된다. 경사축 연삭은 휠과 공작물이 일정각도를 이루고 설치되어 휠과 가공물의 간섭현상을 배제 할수 있으나 수직축 연삭의 경우와 동일하게 휠의 마모가 제한된 영역에 집중되어 가공과정중 발생되는 휠 반경오차의 영향을 고려해야 한다.

평행연삭은 기존의 연삭방식에서 발생되는 휠 마모에 의한 공작물 가공오차의 영향을 최소화하기 위한 대안으로 제안되었다. 기존의 연삭방식이 고정된 휠 영역이 가공에 참여하는데 반해 평행연삭은 연삭과정에서 휠표면상의 가공 참여영역이 변하게 된다. 가공 참여 영역이 변화함으로써 휠의 마모를 휠 표면상의 넓은 영역에 분산시키고, 휠 마모에 의한 가공 형상오차를 감소 시켜 가공물의 품질을 향상시킨다.[7,8]

평행연삭의 가공 원리상 휠 형상오차가 가공물에 그대로 전사되므로 휠 형상창성 과정인 트루잉 과정의 오차를 최소화 하는 것이 가공면의 품질을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 휠의 형상창성과정은 CG 방식(Curve Generation Method, 구면창성법)에 기하학적인 근거를 두고 있는데, 휠 회전 중심축과 공작물 회전 중심축 사이의 임의의 각도 q 에 의해 휠 반경이 결정된다. 또한 이 두 회전축이 이루는 평면의 수직 방향 설정오차(Y 축 방향)오차에 의해 형상오차가 결정되게 된다.[9]

본 연구에서는 휠 형상 창성과정을 기하학적으로 접근하고, 휠축설정 오차에 따른 휠 형상오차의 관계를 규명하여, 휠 형상오차를 최소화 하고, 초소형 비구면의 가공오차를 최소화를 위한 해석을 수행하였다. 아울러 제안한 식을 바탕으로 가공된 휠형상을 탄소전사법에 의한 가공면분석을 통하여 휠 설정오차를 구하였다.

2. 휠 형상창성

2.1 평행 연삭 (Parallel grinding)

평행연삭은 Fig.1 과 같이 반구형 휠을 이용하여 공작물이 일정각도 q 를 이루며 연삭과정이 수행되게 된다. 이 과정에서 휠 반경상의 가공 참여 영역은 휠의 이송에 따라 변하게 되고, 휠 마모는 휠의 곡면상에 분산되게 된다.

평행연삭을 위한 휠의 구면형상을 창성하기 위해서는 Fig.2 의 CG 방식을 적용한 트루잉 과정이 적용된다. 트루잉 과정은 공작물의 위치에 트루어를 위치시켜 휠과 트루어의 상대회전으로 휠 표면에 구면을 창성하게 된다.[10]

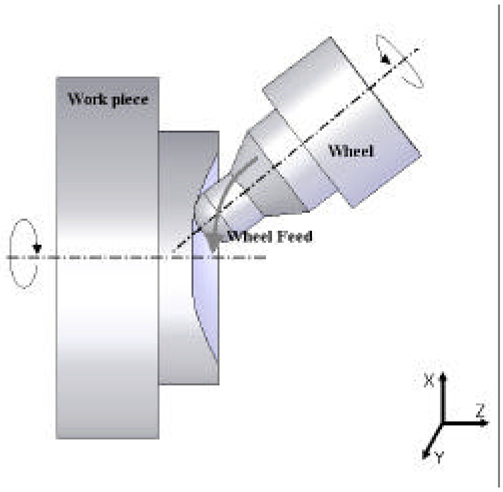

Fig.1 Parallel grinding method

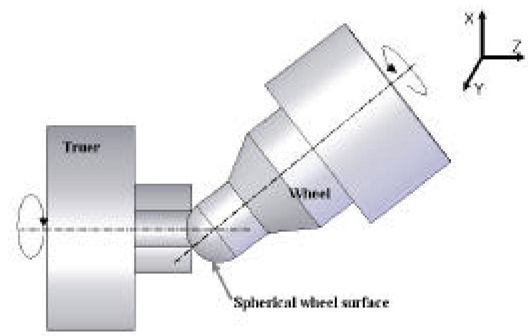

Fig.2 Truing for Parallel grinding wheel generation

2.2 구면 휠 창성법

메탈 본드 타입(metal bonded type)의 컵형(cup type) 트루어를 이용한 트루잉 과정은 CG 방식에 기반을 둔 기하학적 휠 형상창성과정으로 휠 표면에 반경 R 의 구면형상을 창성한다. 이상적인 트루잉 과정은 트루어상의 하나의 트루잉 라인(Truing line)만이 구면창성 (Curve generation)에 관여하는데 이는 Fig.3 과 같은 원리에 의해 설명할수 있다.

Fig.3에서 휠이 회전하면서 트루어에 접근할 때 트루잉 라인 $A(x_1,y_1,z_1)$ 가 휠의 표면(Wheel surface)에 궤적 $C(x_3,y_3,z_3)$ 를 생성하게 된다.[11]

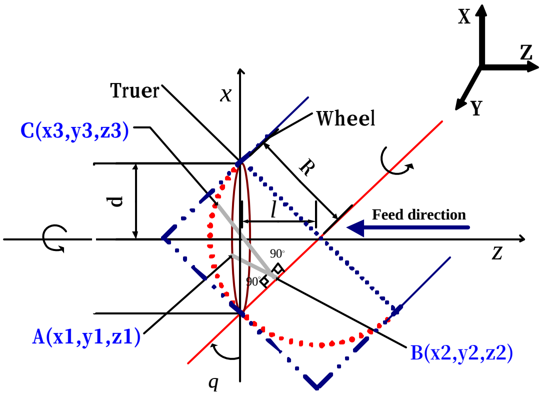

Fig.3 Curve Generation by Cup type truer

그림에서 궤적 $A(x_1,y_1,z_1)$ 의 좌표는 반경 d의 트루어 상에 있으므로 식(1)과 같이 나타낼수 있다.

$$A(x_1,y_1,z_1) = A(x_1,\sqrt{d^2 - x_1^2},0) \qquad (1)$$

$B(x_2,y_2,z_2)$ 는 휠중심선 상에 있고 이 궤적은 좌표 $(0,0,l)$ 을 지나고 기울기는 $\tan q$ 가 되므로 식 (2)와 같이 표현 된다.

$$B(x_2,y_2,z_2) = B(x_2,0,\tan q \cdot x_2 + l) \qquad (2)$$

식(2)로부터 좌표 $A(x_1,y_1,z_1)$ 와 $B(x_2,y_2,z_2)$ 사이의 거리, $\overline{AB}$ 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\overline{AB}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$
$$= (1+\tan^2 q)x_2^2 - 2(x_1 - l\tan q)x_2 + d^2 + l^2 \qquad (3)$$

A, B 사이의 거리, $\overline{AB}$ 가 최소일 때 궤적 $B(x_2,y_2,z_2)$ 는 $A(x_1,y_1,z_1)$ 의 휠상의 회전중심이 된다. 즉 $\frac{d\overline{AB}}{dx}$ 는 식(4)을 만족시킨다.

$$\frac{d\overline{AB}^2}{dx^2} = 0\ ,\ x_2 = \frac{x_1 - l\tan q}{1+\tan^2 q} \qquad (4)$$

여기서 $S = x_1 - l\tan q$, $R = \sqrt{d^2 + l^2}$ 로 치환하면 $\overline{AB}^2$ 와 $B(x_2,y_2,z_2)$ 는 식(5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{AB}^2 = -\frac{S^2}{1+\tan^2 q} + R^2 \qquad (5)$$

$$B\left(\frac{S}{1+\tan^2 q}, 0, \frac{\tan q \cdot S}{1+\tan^2 q} + l\right) \qquad (6)$$

한편, $B(x_2,y_2,z_2)$, $C(x_3,y_3,z_3)$ 는 XZ 평면상의 궤적이 된다.

또한 $\overline{BC}$ 와 휠 회전 중심선은 90° 를 이루므로 기울기는 $-\frac{1}{\tan q}$ 이 되고, $C(x_3,y_3,z_3)$ 의 z_3 는 식(7)과 같이 표현된다.

$$z_3 = -\frac{1}{\tan q}(x_3 - x_2) + z_2$$
$$= -\frac{1}{\tan q}\left(x_3 - \frac{S}{1+\tan^2 q}\right) + \frac{\tan q}{1+\tan^2 q} \qquad (7)$$

식(7)로부터 $\overline{BC}^2$ 를 유도하면 식(8)과 같이 된다.

$$\overline{BC}^2 = \left(\frac{x_3 - x_2}{\sin q}\right)^2 = \frac{(x_3 - \cos^2 q \cdot S)^2}{\sin^2 q} \qquad (8)$$

$\overline{AB}^2 = \overline{BC}^2$ 과 식(5) 및 식(8)로부터 XZ 평면상의 휠의 궤적 $C(x_3,y_3,z_3)$ 는 식(9)와 같이 표현된다.

$$x_3 = \frac{1}{1+\tan^2 q}\cdot S \pm \sqrt{\sin^2 q\left(-\frac{S^2}{1+\tan^2 q}+R\right)}$$

$$y_3 = 0$$

$$z_3 = \frac{\tan q}{1+\tan^2 q}\cdot S + l \mp \frac{\sqrt{\sin^2 q\left(-\frac{S^2}{1+\tan^2 q}+R\right)}}{\tan q} \quad (9)$$

식(9)의 궤적은 아래의 식(10)과 같이 중심이 $(0,0,l)$ 인 원의 방정식으로 가정하여 식을 정리하면 반경이 R인 원의 방정식을 만족한다.

$$x_3^{\,2} + (z_3 - l)^2$$

$$= \left(\frac{1}{1+\tan^2 q}\cdot S \pm \sqrt{\sin^2 q\left(-\frac{S^2}{1+\tan^2 q}+R\right)}\right)^2 + \left(\frac{\tan q}{1+\tan^2 q}\cdot S \mp \frac{\sqrt{\sin^2 q\left(-\frac{S^2}{1+\tan^2 q}+R\right)}}{\tan q}\right)^2$$

$$= \left(\frac{1}{1+\tan^2 q} - \frac{\sin^2 q}{\tan^2 q}\right)\cdot S^2 + R^2$$

$$= R^2 \quad (10)$$

결과적으로 식(10)의 휠의 반경 R 은 식(11)로 표현된다.

$$R = \sqrt{d^2 + l^2} \quad (11)$$

3. 설정오차

3.1 휠 설정오차의 영향

3.1.1 수평면상의 설정오차

$f2$ 의 레진 본드 휠과 $f1$ 의 메탈본드 트루어를 사용한 트루잉 과정에서는 트루어와 휠의 설정 위치에 의한 오차가 발생 된다. 실제적으로 휠 형상에 영향을 주는 것은 수평면상의 오차(Δx , Δz)와 수직방향 오차(Δy)이다. 식(11)로부터 수평면 상의 오차는 $\Delta x = -\Delta z (q = 45^\circ)$ 로 표현될수 있고 Fig.4 와 같이 휠의 반경에 영향을 주지만 형상오차로 작용하지 않게 된다. 수평면 상의 오차 $\Delta z = \Delta l$ 의 영향은 식(12) 와 같이 표현된다.

$$R' = \sqrt{d^2 + (l + \Delta l)^2} \quad (12)$$

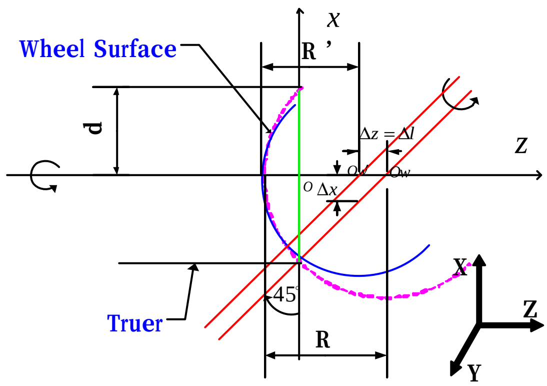

Fig. 4 Horizontal adjustment error

3.1.2 수직축상의 설정오차

X 축, Z 축 설정 오차가 휠의 형상오차에 영향을 주지 않는 것과 달리 Y 축 방향의 오차는 휠의 반경에 오차를 유발 하게 된다.

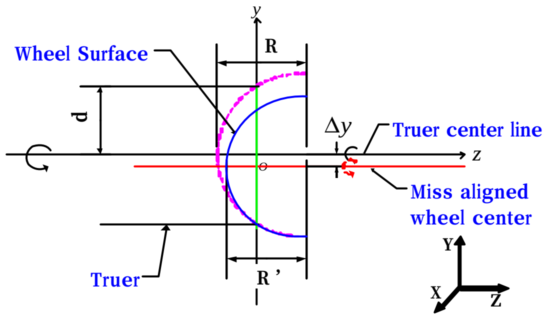

Fig.5 Vertical adjustment error(Y axis)

위 Fig.5 에서의 Y 축 설정 오차 Δy 는 CG 방식에 의해 식(12)의 궤적 $C(x_3, y_3, z_3)$ 를 XZ 평면 상 나타나게 된다.

$$x_3 = \frac{x_1 - l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{x_1 + l}{2}\right)^2 + \frac{\left(\sqrt{d^2 - x_1^2} - \Delta y\right)^2}{2}}$$

$$y_3 = 0$$

$$z_3 = \frac{x_1 + l}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{x_1 + l}{2}\right)^2 + \frac{\left(\sqrt{d^2 - x_1^2} - \Delta y\right)^2}{2}} \qquad (13)$$

위 식(13)가 일정 반경 R 을 갖고 Z 축 상에 휠의 중심이 위치하기 위해서는 다음의 식(14)을 만족해야 한다.

$$x_3^{\,2} + (z_3 - a)^2 = R^2 \quad (a = \text{constant}) \qquad (14)$$

식(14)로부터 반경 R 은 x_1 에 관하여 식(15)와 같이 표현 된다.

$$R^2(x_1, y_1, z_1) = \left(\frac{x_1 - l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{x_1 + l}{2}\right)^2 + \frac{\left(\sqrt{d^2 - x_1^2} - \Delta y\right)^2}{2}}\right)^2 + \left(\frac{x_1 + l}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{x_1 + l}{2}\right)^2 + \frac{\left(\sqrt{d^2 - x_1^2} - \Delta y\right)^2}{2}} - a\right)^2 \qquad (15)$$

이때 R이 일정한 값을 갖기 위해서는 식(15)의 $R^2(x_1, y_1, z_1)$ 의 x_1 에 관한 미분값이 0이 되어야 한다. 실제로 미분을 하여 보면 식(16)의 경우 $\Delta y = 0$ 일 경우에만 정확한 반경 R을 얻을수 있다.

$$\frac{dR^2(x_1, y_1, z_1)}{dx_1} = \frac{2\Delta y}{\sqrt{\frac{d^2}{x_1^2} - 1}} \neq 0 \qquad (16)$$

3.2 오차 시뮬레이션

실제 트루잉 과정을 거친 휠을 탄소전사법을 사용하여 휠 반경오차와 설정오차의 관계를 비교하여 보면 비례관계에 있음을 확인할수 있다.

$$R' = \frac{(R^2)'}{2R} \qquad (17)$$

즉 반경 R 은 x_1 의 함수가 되어 휠 반경은 일정하지 않게 된다. 식(16)과 식 (17)로부터 반경 R 의 오차량 ΔR 은 수직방향 설정오차 Δy 에 따라 Fig.6 와 같다.

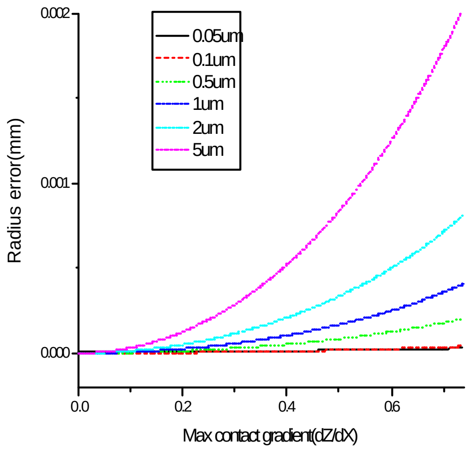

Fig.6 Wheel radius Error simulation of vertical adjustment error

Fig.7 은 $f0.8mm$ 의 컵 트루어를 사용하여 창성된 $f0.92mm$ 의 구형 휠을 형성한 다음 탄소전사법을 이용하여 측정한 휠 형상에 대하여 분석한 것으로, 수직방향 설정오차 $\Delta y_1 \approx 2.5um$ 이고, 탄소편의 특성에 의해 발생하는 불규칙한 값을 제외하면 휠 반경오차는 $\Delta R_1 \approx 1um$ 이 되고, 휠축 설정보정후 Fig.8 에서와 같이 수직축 방향 설정오차는 $\Delta y_2 \approx 0.5um$ 이고, 휠반경오차는 $\Delta R_2 \approx 0.3um$ 에 근접한 것을 확인할수 있다.

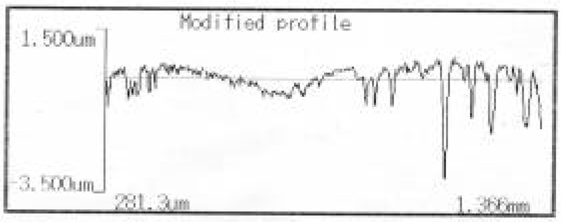

Fig.7 Wheel radius Error measured by carbon transcription method($\Delta y_1 \approx 2.5um$)

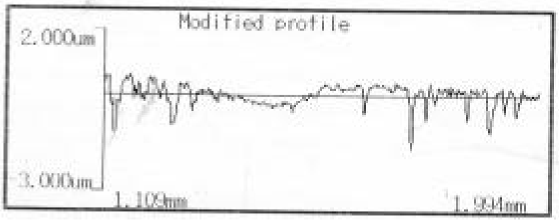

Fig.8 Wheel radius Error measured after vertical adjustment by carbon transcription method
($\Delta y_2 \approx 0.5um$)

4. 결론

본 논문은 비구면 연삭과정중 휠마모을 최소화하기 위해 제안된 평행연삭을 마이크로 비구면 렌즈 금형 가공에 적용하기 위하여, 휠 형상창성으로서의 구면창성법을 기하학적 접근으로 해석하였다.

기하학적 해석을 통해 평행연삭의 휠형상오차는 수직방향 휠 설정이 중요한 오차 요인이 됨을 확인하였는데, 이러한 휠 형상오차는 가공면의 형상오차에 중대한 영향을 주게 된다.

설정오차의 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 이는 탄소전사법을 적용한 실제 트루잉과정을 통하여 확인하여 반경 0.9mm 평행연삭용휠에서 0.5um 이하의 수평방향 휠 설정을 통해 0.3um 이하 오차의 휠 형상을 창성하는 결과를 얻었다.

참고문헌

1. 박천홍, 황경현, "초정밀 가공시스템 기술의 국가 기술 로드맵", 한국정밀공학회지, 제 20 권 12 호 , pp.11-18 , 2003
2. 이후상, 초정밀 가공 시스템, 한국정밀공학회지, 제 10 권 1 호, pp.14-21, 1994
3. G..H.Kim, K.H.Hong, H.S.Kim, H.B.Kim "A study on Ultra Precision machining process for Aspheric", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference Spring 03, pp.90-93, 2003
4. H.Suzuki, N.Wajima, K.Syoji, T.Kuriyagawa, S.Okuyama, T.Kitajima., “Precision Grinding of aspheical surface – Grinding of Axi-symmetric aspherical CVD-SiC Molding Die”, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, 43 (9), pp.411 – 417,1999
5. 이주상, K. Syoji, "비구면 광학부품의 초정밀 가공에 관한 연구", 한국정밀공학회지,제 19 권 10 호, pp.195-201, 2002
6. 이주상, Masaru Saeki, Tsunemoto Kuriyagawa, Katsuo Syoji, “소형 비구면 렌즈 금형의 경면연삭 가공에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제 18 권 12 호, pp.82-87 , 2001.
7. Tsunemoto Kuriyagawa, Mohammad Saeed Sepasy Zahmaty and Katsuo Syoji, "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors*1" Journal of Materials Processing Technology, Volume 62, Issue 4, pp. 387-392, 1996
8. T. Kuriyagawa, N. Yoshihara, M. Saeki, K. Syoji, “N ano topography Characteristic of Axisymmetric Asph erical Grinding Surface”, , Key Engineering Material s Vol 238-239, pp.125-130, 2003
9. W.K. Chen, T. Kuriyagawa, H. Huang and N. Yosihara "Machining of micro aspherical mould inserts", Precision Engineering, Volume 29, Issue 3, Pages 315-323, 2005
10. W. Saeki, “Study of processing of axis symmetric aspheric by Parallel grinding method”, Tohoku University, Depatment of NanoMechanics, Dr.Thesis, pp.7, 2003.
11. K.Syoji, T.Kuriyagawa, L.Zhou, H.Suzuki and H.Aihara, “Development of truing and dressing technology of form wheel with ultra fine grain”, J. JSPE, 59-3(1993) 117.