

연마 다듬질 가공면의 표면 미세형상 평가에 관한 연구

조남규*, 김현국**, 권기환**, 한창수*, 안유민*, 이성환*, 박균명***

A study on the surface roughness assessment of polished surfaces

Nahm-Gyoo Cho*, Hyun-Koog Kim**, Ki-Hwan Kwon**, Chang-Soo Han*, Yoo-Min An*,
Seoung-Hwan Lee*, Gyun-Myung Park***

ABSTRACT

This paper describes the statistical analysis techniques for the surface roughness assessment of polished surfaces. In experiments, the polishing process of the sample surfaces which are manufactured by ball end mill is consist of two steps; the cusp removal process and the surface finishing process. For the cusp removal process, the criterion of cusp removal was established from the power spectrum analysis to assess the change of the cusp removal rate. For the finishing process, the surface was polished by the rotational CBN tool and vibration wood tool. And the surface quality of polished surface was assessed using the functional parameters based on the statistical values of surface profiles. Consequently, the surface finish performance of the polished surface using the vibration wood tool was improved.

Keywords : surface roughness, measurement, polished surfaces

1. 서론

고성능, 고기능의 고부가가치 제품 개발을 위하여, 고정밀 부품에 대한 요구가 증가함에 따라, 고정도의 가공기술과 함께 부품 가공정도의 엄밀한 평가를 위하여 정밀측정 및 분석기술의 중요성이 날로 증대되고 있다. 종래에는 가공정도의 평가정보가 부품의 불량 판정의 기준으로 이용되어 왔으나, 최근에는 제품의 설계 및 개발, 가공 공정의 최적화 및 자동화 등, 생산 전반에 걸친 지표로 사용되고 있어 정밀평가기술은 산업의 기반기술로서 그 가치를 달리하게 되었다.

가공 정도의 평가에 있어서, 가공부품의 표면 미세형상 특성은 부품의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 특히, 경면 가공에 의해 가공된 광학면의 반사특성이나, 미케니컬 실(Mechanical seal)의 누설 문제, 기계적인 접촉을 하는 기계부품의 마찰, 마모 특성, 윤활 특성 등은 표면의 미세형상특성에 의하여 큰 영향을 받는다.¹⁾²⁾ 이러한 가공부품의 성능을 좌우하는 표면미세형상을 분석하기 위해서는 표면의 미세형상정보를 표현할 수 있는

적절한 파라미터가 필요하다. 현재, 국내의 산업현장 및 연구분야에서 부품의 표면 정도 평가를 위하여 대표적인 파라미터로 R_a , R_{max} 가 일반적으로 사용되고 있다. 그러나, R_a , R_{max} 는 다양한 가공조건 및 방법에 따른 표면 가공상태의 특성, 부품의 기능적 특성을 고려한 표면 가공형상의 적합성 등 표면미세형상의 특성을 평가하는데 한계가 있다.³⁾

따라서, 본 연구에서는 가공 부품의 사용목적 및 그 기능에 따라 적절하게 가공표면을 분석할 수 있는 평가 파라미터들의 통계적, 물리적 특성에 대하여 설명하고, 볼엔드밀(ball end mill)가공 시편을 대상으로 연마 다듬질 과정을 cusp 제거단계와 최종 다듬질 가공단계로 나누어 가공면의 표면 가공상태 평가에 적용하였다.

Cusp 제거단계에서는 가공면에 생성된 cusp의 제거정도를 평가하기 위하여 표면 파워스펙트럼(surface power spectrum)을 이용한 방법을 제시하고, 최종 다듬질 가공단계에서는 가공면의 기능적 시각적 특성에 중요한 표면미세형상 파라미터를 이용하여 다듬질 공구에 의한 최종다듬질 가공면의 품질을 평가하고자 한다.

2. 측정실험 및 데이터의 획득

기계 가공면의 가공상태 평가를 위하여 볼 엔드밀(ball end mill)가공 시편을 대상으로 cusp제거 단계와 최종 다듬질 가공 단계의 시편을 접촉식 표면 거칠기 측정기(form Talysurfseries 2)를 사용하여 각각의 측정 프로파일을 얻었다. 측정에는 선단 반경 2 μ m 의 다이아몬드 촉침을 사용하여 측정압 70mf로 측정된 데이터를 사용하였으며, 표본 간격 (sampling interval)은 1 μ m 로 하였다.

2.1 cusp 제거단계의 가공면 프로파일

cusp제거 단계의 시편에 대하여는 6개의 시편을 준비하여 cusp 가공 횟수에 따른 각각의 표면 프로파일을 얻었으며, 프로파일의 개수는 2⁴개로 하였다. 측정 프로파일의 스펙트럼 분석을 위하여 직선회귀(least squares method)에 의하여 측정시 시편 자세의 기울어짐에 의한 효과를 보정하였으며, 프로파일의 형상 성분의 영향을 충분히 제거하기 위하여 cut off=2.5mm 의 고역 통과 필터(high pass filter)를 사용하여 필터링 하였다. Table.1은 볼 엔드밀 가공에 의하여 생성된 6개 시편의 거칠기 파라미터(R_a , R_q)값을 보이고 있다.

시편(specimen)	R_a 거칠기 (μ m)	R_q 거칠기(μ m)
Test1	3.9628	4.8165
Test2	4.3596	5.1589
Test3	3.7452	4.4859
Test4	4.3689	5.1692
Test5	4.4645	5.2620
Test6	4.9161	5.8879

Table.1 surface roughness of cusp profile

2.2 최종 다듬질 단계의 가공면 프로파일

다듬질 가공면의 표면 품질을 평가하기위해서 사용된 경면과 가공방법 및 조건을 Table.2에서 보이고 있다. Cusp 가 완전히 제거된 가공면을 1차로 4개의 시편에 대하여 회전식 CBN 휠로 메쉬(mesh)를 달리하여 가공하고, 2차로 진동식 목재(나왕 종류) 공구로 최종 가공을 한다. 진동식 목재 공구는 생산기술연구원에서 특수하게 제작되어 경면 다듬질 장치에 부착하여 사용하며, 진동식 경면 가공시 연삭제는 CBN/다이아몬드 가루를 베어링 구리스와 혼합하여

사용하였다. 평가 파라미터 산출을 위하여 전체 평가길이는 5.6mm로 하였으며, 평가길이는 0.8mm로 하였다. 이 경우, ISO의 추천에 의해 5개의 표본을 얻도록 하였으며, 필터의 적용을 고려하면 총 측정길이는 평가길이의 7배인 5.6mm 가 요구된다.⁹

시료	가공방법	가공횟수	grain size & 연마제
Surface 1	회전식	왕복 5회×2	#60→# 220
	진동식	왕복 5회	CBN/Diamond 가루+구리스
Surface 2	회전식	왕복 5회×3	#60→#220→#400
	진동식	왕복 5회	CBN/Diamond 가루+구리스
Surface 3	회전식	왕복 5회×4	#60→#220→#400→#800
	진동식	왕복 5회	CBN/Diamond 가루+구리스
Surface 4	회전식	왕복 5회×4	#60→#220→#400→#1000
	진동식	왕복 5회	CBN/Diamond 가루+구리스

Table. 2 manufacturing condition for polishing

3. cusp제거 기준의 설정

3.1 파워스펙트럼과 가공면의 cusp형상

연삭 가공면(ground surface), 래핑 가공면(lapping surface)의 등의 기계 가공면의 경우, 수많은 미세한 스톱입자의 불규칙한 작용에 의하여 랜덤한 표면 형상을 형성하여 광범위한 주파수 영역에 대한 진폭 성분들이 포함되어 주기적 성질이 거의 나타나지 않는다. 이에 반해, 선삭(turning), 볼 엔드밀(ball end mill)에 의한 절삭 가공면의 경우, 절삭 공구의 피드 (feed)폭에 의하여 가공 표면의 형상이 주기적 특성을 지니고 있어 표면 파워스펙트럼의 주에너지가 프로파일의 주기적 성질을 갖는 주파수 성분에 집중되어 나타난다.⁹

볼 엔드밀에 의해 피드폭(0.34mm), cusp (3 μ m), 절입량 (0.3mm) 로 Fig.1에서와 같이 가공할 때, 가공된 표면 프로파일의 형상 일부와 표면 파워 스펙트럼이 fig.2에서 보이고 있다. Fig.2에서 보는 바와 같이 프로파일의 cusp 형상이 약 0.34mm 의 파장으로 주기적으로 나타나고 있음을 알 수 있으며, 표면 파워 스펙트럼의 경우, 파장이 약 0.34mm 와 0.65mm에서 파워 밀도가 집중되어 나타남을 관찰 할 수 있다

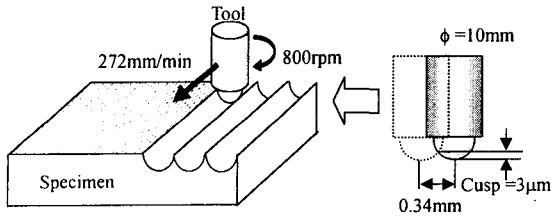


Fig. 1 ball end mill manufacturing and its condition

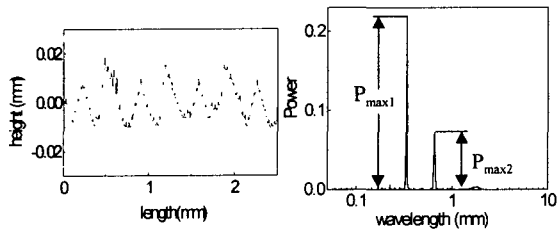


Fig. 2 cusp profile and its power spectrum

3.2 파워스펙트럼을 이용한 cusp 제거기준 설정

파워 스펙트럼의 주에너지는 프로파일의 주기적 성분에 집중된다. 따라서, 각각의 cusp 형상 제거 과정 단계의 표면 프로파일에 대하여 파워 스펙트럼의 주에너지가 집중된 주파수에서의 파워변화를 분석함으로써 cusp 제거 정도를 효과적으로 파악할 수 있다. Fig. 2 에서 약 0.34mm와 0.65mm의 파장에서 다른 성분들에 비교하여 월등하게 큰 값을 볼 수 있으며, 각각의 시편(test1~test6)에서 공통적으로 같은 파장에서 나타났다. 이러한 현상은 볼 엔드밀에 의한 가공시 같은 피드(feed) 폭으로 동일한 조건하에서 가공되었기 때문이며, 이 성분은 cusp 의 주기적 형상 성분에 기인한다는 것을 Fig. 2의 cusp 프로파일 형상에서 확인할 수 있다.

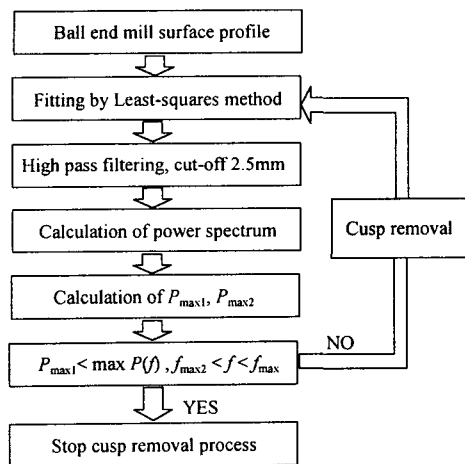
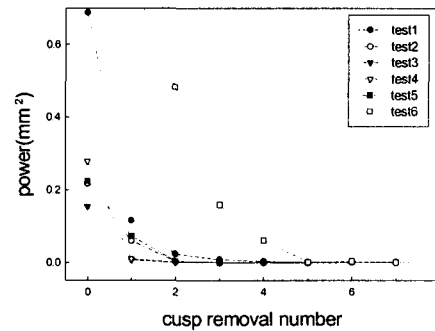
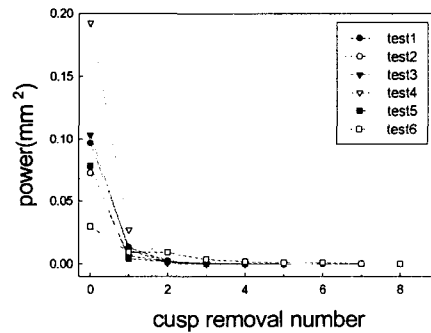


Fig. 3 procedure for evaluation of cusp removal

본 연구에서는, 볼 엔드밀 가공 시편의 표면 파워스펙트럼을 산출하여 피크(peak)를 보이는 두 파장 성분들 ($\lambda_1 = 0.34\text{mm}$, $\lambda_2 = 0.65\text{mm}$)의 파워의 값을 각각 $P_{\max1}$, $P_{\max2}$ ($P_{\max1} > P_{\max2}$)로 하였을 때, 약 $\lambda_1 = 0.34\text{mm}$ 이하의 짧은 파장 성분들의 파워의 최대값보다 $P_{\max1}$ 의 값이 작아지는 시점을 cusp의 제거 시점으로 정의 하였으며, 그 과정을 Fig. 3에서 설명하였다.



(a) cusp removal number vs. $P_{\max1}$



(b) cusp removal number vs. $P_{\max2}$

Fig. 4 variation of $P_{\max1}$, $P_{\max2}$ according to cusp removal number

Fig. 4는 각각의 시편(test1~test6)에 대하여 cusp 제거 가공의 횟수에 따른 $P_{\max1}$, $P_{\max2}$ 의 변화를 보이고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 cusp 형상 성분의 파워가 급격히 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 시편 test 1 과 test 2의 경우 다른 시편들에 비교하여 cusp 제거 과정에 따른 감소율이 작음을 볼 수 있는데, 이것은 Table. 1의 초기의 거칠기 값으로부터 알 수 있듯이 볼 엔드밀 가공시 초기의 cusp의 크기가 다른 시편들에 비해 크기 때문이라 사료된다.

Table. 3은 cusp 제거 가공전과 cusp 제거 시점에서의 거칠기 값을 비교하여 정리 하였다.

시험	Cuspnum	Cusp 제거 여부	R_a (mm)	R_{fi} (mm)
Test1	5	Cusp 제거전	3.9628	4.8165
		Cusp 제거후	0.2510	0.3136
Test2	3	Cusp 제거전	4.3596	5.1589
		Cusp 제거후	0.6148	0.7888
Test3	3	Cusp 제거전	3.7452	4.4859
		Cusp 제거후	0.3679	0.4611
Test4	4	Cusp 제거전	4.3689	5.1692
		Cusp 제거후	0.5458	0.7263
Test5	3	Cusp 제거전	4.4645	5.2620
		Cusp 제거후	0.6199	0.7940
Test6	6	Cusp 제거전	4.9161	5.8879
		Cusp 제거후	0.7081	0.8870

Table.3 cusp removal number and surface roughness evaluated from procedure of fig.3

4. 최종 연마면(polished surface)의 분석

4.1 가공면의 기계적 특성과 평가 척도

기계의 윤활마찰 성능을 평가하기 위해 표면형상평가 파라미터인 프로파일의 비대칭성 척도(skewness)와, 정량적 평가지수로 베어링 표면의 마찰,마모 정도를 나타내는 상층부의 피크영역(peak zone)에서의 베어링 지수(bearing index)와 윤활유(oil)의 보유량 정도를 평가하는 오일보유척도(oil volume index)가 중요한 척도가 된다. DIN규격 4776에는 윤활면, 실링면, 마찰면 등에 중요한 표면형상 파라미터의 산출기준을 제시하고 있다.

Fig.5는 표면프로파일의 베어링영역곡선(abott firestone curve)으로부터 베어링지수와 오일보유척도의 산출방법을 보이고 있다. Fig.5에서는 프로파일의 각 영역을 나타내는데, 이때 표면 마찰정도를 평가하는 베어링지수(bearing index, R_{bi})와 계곡영역에서의 오일보유척도(oil volume index, R_{fi})는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R_{bi} = \frac{R_q}{z_{0.05}} = \frac{1}{h_{0.05}} \quad (1)$$

$$R_{fi} = h_{0.8}(1-0.8) - \int_{0.8}^1 h(t)dt \quad (2)$$

여기서, t ($0 < t < 1$)는 베어링 영역비(bearing area ratio)를 나타낸다.

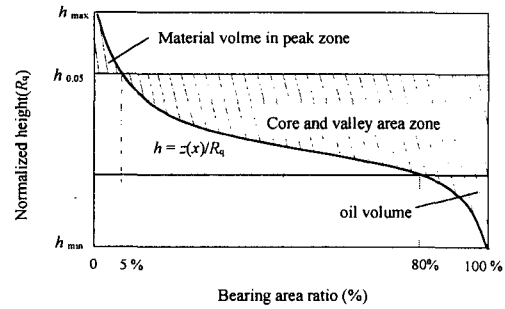


Fig.5 Abbott firestone curve of machined surface

따라서, 비슷한 표면 거칠기값(R_a, R_{max})의 표면일지라도, R_{bi}, R_{fi} 가 클수록 내마모성이 좋고, 마찰이 적으며 동시 윤활성능이 좋은 가공표면이라 할 수 있다.

4.2 가공면의 광택도 특성과 평가척도

가공표면의 광택도는 면에 빛을 입사하였을 때 면의 거칠기에 따라 반사광의 산란정도가 다르다는 특징으로 측정할 수 있으며, 표면의 경사각 분포에 의존한다. 측정표면의 기하학적 단면곡선으로부터 얻어지는 표면경사각이 정규분포한다고 가정하면, 표면경사각 분포함수는 다음과 같다.

$$f(\theta_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_s}{\sigma_s}\right)^2\right), \theta_s = \tan^{-1} \frac{dz(x)}{dx} \quad (3)$$

여기서, θ_s 는 표면경사각, σ_s 는 표면경사각의 표준편차(rms 경사각)를 의미한다.

면에 입사된 광의 크기를 1이라 할 때, 반사된 광의 총량 Φ 는 다음과 같다.

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} f(\theta_s) d\theta_s \quad (4)$$

그러나, 반사 산란광을 수광렌즈가 모두 포착할 수 없으므로, 반사광량은 수광렌즈의 유효 수광각에 의존한다. 그리고, 빛의 산란특성으로부터 산란각이 표면 경사각의 2배이므로 표면경사각의 측정영역은 유효 수광각 θ_0 의 1/2이 된다. 따라서, 반사광이

안구 수광부에 포착되는 양은 다음과 같다.

$$\varphi = \int_{-0.5\theta_0}^{0.5\theta_0} f(\theta_s) d\theta_s \quad (5)$$

따라서, 안구 수광부에서 빛이 검출될 확률 Q 은 다음과 같다.

$$Q = \frac{\varphi}{\Phi} \quad (6)$$

결국, 반사광이 수광렌즈에 포착될 확률은 σ_s 와 직접적 연관을 가지며, σ_s 는 표면거칠기 R_a 와 다음과 같은 관계를 갖는다.⁸⁾

$$R_a = \exp\left(\frac{\sigma_s - a}{b}\right) \quad (7)$$

여기서, a, b 는 가공면 종류에 따른 상수이다.

따라서, 검출확률 Q 가 증가하면 표면의 빛의 반사정도가 좋고, 표면이 고운 고 광택의 경면이라 할 수 있다. 본 연구에서는 가공 경면의 표면 경사각 분포를 이용하여 경면 가공 단계 및 방법에 따른 시각적 표면 품위를 비교 분석할 것이다.

4.3 분석 결과

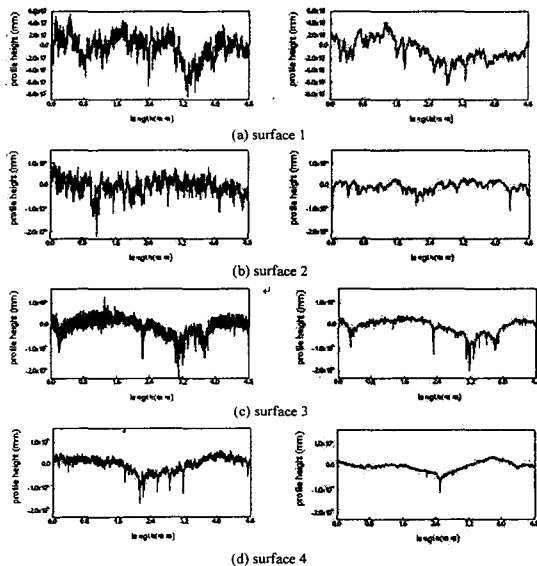


Fig. 6 mirror surface profiles made by finishprocess using rotational tool(left) and vibration wood tool(right)

Fig.6은 Table.2의 가공방법 및 조건에 의해 경면가공된 표면프로파일의 일부이다. 회전식 가공시 가공 메쉬가 #220에서 #1000으로 증가함에 따라 표면형상이 매끄럽게 가공됨을 볼 수 있고, 회전식 가공후 진동식 가공에 의한 최종 경면가공면의 거칠기가 감소함을 관찰할 수 있다.

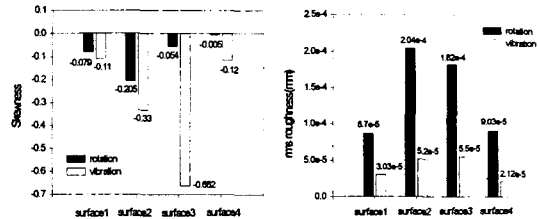


Fig.7 Skewness and rms roughness of surface profiles shown in fig.6

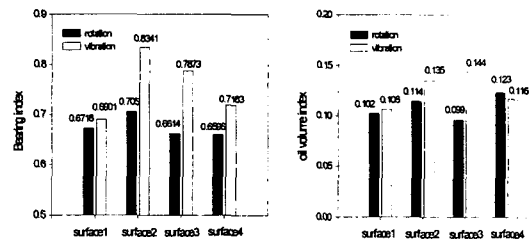


Fig.8 Bearing index and oil volume index of surface profiles shown in fig.6

Fig.7은 회전식 CBN휠로 가공후 진동식 목재공구로 최종가공한 경면 프로파일들(Fig.6)에 대한 skewness값(R_{sk})과 R_q 값을 비교한 것이다. 여기서, R_q 값은 감소하고, R_{sk} 는 음의 값으로 감소됨을 알 수 있다. Skewness는 프로파일 높이 분포함수의 비대칭성을 판별하는 것인데, $R_{sk} < 0$ 인 표면일수록 프로파일의 중심선 상층부 형상이 완만하고, 하층부의 계곡이 상대적으로 많다. 그러므로 $R_{sk} < 0$ 일수록, 베어링 마찰이 적고 윤활성능이 좋다고 할 수 있다.

Fig.8은 같은 프로파일들에 대한 베어링 지수와 오일함유 지수 값을 비교한 것이다. 마찬가지로 최종가공후 가공면의 베어링 지수와 오일함유 지수가 전체적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 진동식 나무공구에 의한 최종 경면가공법은 내마모성이 좋고, 마찰이 적으며, 좋은 윤활성능의 표면형성에 유리하다고 평가할 수 있다.

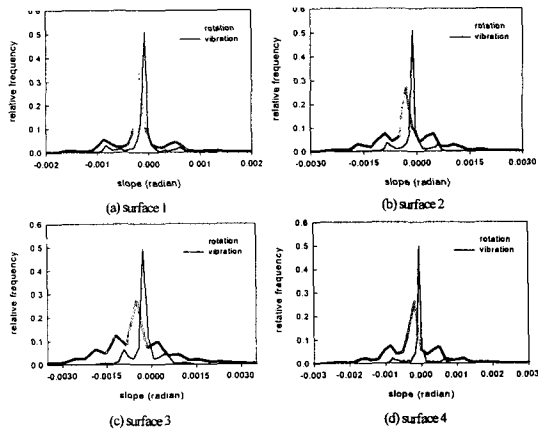


Fig.9 Surface slope distribution of surface profile

Fig.9는 Fig.6의 경면 프로파일들에 대한 표면 경사각 분포를 비교한 것이다. 그림을 보면, 회전식 CBN휠 가공면보다 진동식 목재공구에 의한 최종가공면의 표면경사각 분포의 산포가 적고 중심에 잘 집중되어 있음을 알 수 있다. 이것은 진동식 최종가공후 가공면의 굴곡이 감소되었기 때문이다. 그리고, 경사각 분포의 산포가 적을수록 반사광 산란정도가 감소하여 정반사광 양이 증가하여, 표면 광택도가 증가한다.

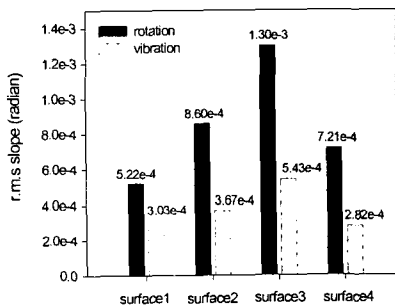


Fig.10 rms slope(standard deviation) calculated from surface slope distribution shown in Fig.9

Fig.10은 표면경사각 분포로부터 계산된 rms경사각을 비교한 것이다. 회전식 CBN휠로 가공된 면보다 진동식 목재공구로 최종 가공후의 면의 rms경사각이 전체적으로 감소됨을 알 수 있다.

5. 결론

연마 다듬질 가공면의 표면 미세형상의 분석을 위한 방법을 제시하고 평가 하였다.

먼저, 볼엔드밀(ball end mill)가공 시편을 대상으로 회전식 CBN휠 가공에 의한 cusp 제거정도를 평가하기 위하여 파워스펙트럼을 이용한 방법을 제시하였고, cusp 제거 시점을 정의하였다. 그리고, 진동식 목재(나왕종류)공구에 의한 최종 연마면의 윤활 마찰 성능의 평가를 위하여 비대칭성 척도(skewness)와 베어링 지수(bearing index), 오일 함유 지수(oil volume index)를 비교 분석하였다. 또한, 최종 연마면의 시각적 표면 품질을 평가하기 위하여 가공 경면의 표면 경사각 분포를 이용하여 표면 광택도와 rms경사각을 분석하였다.

7. 참고문헌

- [1] Tanner,L.H. and Fahoum,M.,“ A study of the surface parameters of ground and lapped metal surfaces using specular and diffuse reflection of laser light”, Wear, Vol.36, pp 299~316, 1979
- [2] A. A.Torrance, “The statistics of the extrema of surfaces as a means of assessing their mechanical performance”, Wear, Vol.156,pp281~299,1992
- [3] I Sherrington, “Parameters for characterizing the surface topography of engineering components”, Proc. Instrn. Mech. Eng., Vol.201, No.C, pp297~305, 1987
- [4] ISO 4288-1985, “Rules and procedures for the measurement of surface roughness using stylus instruments”
- [5] K. S. Moon, J. W. Sutherland, “The origin and interpretation of spatial frequencies in a turned surface profile”, Journal of engineering for industry, Vol.116, pp340~347, 1994
- [6] W. P. Dong, P.J. Sullivan, K. J. Stout, “Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography part III”, Wear, Vol. 178, pp29~43, 1994
- [7] E.C. Teague, T. V. Vorgurger and D. Maystre, “Light scattering from the manufactured”, Annals of the CRIP, Vol.30, No.2, pp.563~569, 1981
- [8] D. J. Whitehouse, “Handbook of Surface Metrology”, 1994