

연삭가공시 발생하는 자려진동에 관한연구

이상태*(창원기능대), 이재환**(창원대 대학원), 정윤교***, 김재실***(창원대)

A Study on the Chatter Vibration in a Grinding Process

Sangtae Lee*(Changwon tech. college.), JaeWhan Lee**(Changwon univ. Graduate Schools)
Yoongyo Jung***, Chaesil Kim*** (Changwon univ.)

Abstract

연삭 가공시 발생하는 채터는 정밀도 및 품질을 저하시킨다. 본 논문에서는 연삭가공시 작업시간에 따른 연삭 법선력 및 AE 신호의 거동을 관찰함으로써 (1) 연삭법선력의 수학적 모델은 그 진폭이 지수적으로 변하는 형태이고, (2) 그 지수가 음(minus)이 될 때가 채터 발생시점이며 (3) 이를 토대로 이론적으로 (2)를 규명할 수 있는 방법을 고찰하였다.

Key Words : Work time, Normal force, Chatter, Lumped mass method

1. 서론

연삭가공은 무수히 많은 예리한 입자로 공작물을 깎아내는 절삭가공 공정의 마무리단계에 속하는 가공으로 정밀가공 제품의 생산에 중요한 가공 단계에 속한다.

연삭가공 중에 기계의 진동이 발생하면 가공을 계속할 수 없거나, 가공은 가능하지만 양호한 다듬질 면을 얻을 수 없다. 특히 연삭가공은 연삭숫돌을 주축에 부착할 때 불평형과 편심이 생길 가능성이 크고, 주축이 고속으로 회전하기 때문에 이것이 주기적인 가진력으로 작용하여 강제진동이 생기기 쉽다. 그러나 외부로부터 주기적인 가진력이 작용하지 않아도, 공작기계의 동특성과 절삭공정간의 상호작용에 의해서 일어나는 동적인 불안정 현상인 채터 진동은 일반 절삭가공에서는 볼 수 없는 형태를 갖는다.

연삭기의 기초, 유압장치, 베어링 및 기타 전동장치 등에 의해서 발생하는 강제 진동은 원인의 규명과 대처가 비교적 용이하지만, 채터 진동의 발생시기 예측과 그 대처방법은 난해하다.

평면 연삭기는 구조상 공작물의 가공중에 숫돌-공작물간의 상대강성이 타 형식의 공작기계에 비해서 상당히 낮다. 이러한 이유로 마무리 가공면에는 여러 가지 채터마크(Chatter-mark)가 발생한다는 것이 알려져있다^(1~3). 그러나, 이러한 채터마크의 발생메카니즘은, 아직 충분히 해명되지 않았으며, 이에 대한 적절한 대책도 확립되어 있지 않다. 또한, 평면연삭기는 가공중에, 채터라 불리는 자려진동이 발생하여, 제품의 정밀도를 저하시키거나 작업상의 방해가 되는 것을 자주 경험한다. 이 채터진동은, 숫돌 공작면의 굴곡과 균는 변화등, 공구인 숫돌 자체가 원인으로 발생하는 경우와, 공작물 가공면위의 굴곡이 원인으로 발생하는 경우의 재생자려채터(Work regenerative chatter)로 크게 구별된다⁽⁴⁾. 전자의 채터가 발생하는 경우에는, 보통 연삭 개시후 수십분 이상이나 경과한 후에 서서히 발생하고, 그 진폭도 극소한 것에 비해서, 후자의 채터가 발생하는 경우에는 연삭 개시 직후에 발생하고, 그 진폭은 작업에 위협을 느낄 정도로 발달한다. 따라서 가공조건의 선정에 맞는 것은, 재생 채터가 발생하지 않도록 연구하는 것이 희망되어지며, R.

Snoeys 도 같은 제언을 하고 있다⁽⁵⁾. 연삭숫돌의 급속하고 불균일한 마모현상으로 휠 표면의 파형(Wave) 형상을 증가시키게 되고 연삭트러블 중의 하나인 채터진동의 주요 원인으로 발전하게 된다⁽⁶⁻⁷⁾.

Tetsutaro Hoshi⁽⁸⁾ 등은 연삭가공에서의 채터진동은 다른 가공공정의 채터진동과는 재생효과 등의 면에서 상당히 다른 것으로 알려져 있다. 이러한 연삭가공에서의 채터진동의 안정성을 해석하기 위하여 연삭가공계의 특성방정식의 근으로부터 채터진동의 진전을 시간영역에서 채터진동을 억제할 수 있다고 기술하고 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾.

그러나 이들은 실제 연삭가공에서 일어나는 실질적인 문제나 돌발사태로 배제되어 있다.

특히 공작기계의 경향이 강력화, 고정밀화로 발전되면서 주축시스템이 받아야 할 연삭력이 증가되어 주축의 고강성화 요구가 증가하는 추세이므로 공작기계의 설계 시에는 주축의 기하학적, 물리적 설계변수를 적절히 조합하여 가능한 한 최대의 주축강성을 얻어야 할 필요가 있다. 이때 각 설계변수의 변경은 주위 부품과의 연계성 때문에, 독립적으로 이루어질 수 없으며 특정변수에 대한 강성증가를 간단히 예측하기도 어렵다. Low Siak⁽¹¹⁾은 고유진동수 F_n 만을 변화시켰을 때의 연삭속도 V_s 와 종축(縱軸)에 속도비 K_v 의 관계를 나타내어 연삭 속도가 빨라지면 chatter 안정영역은 넓어지고, 고능률 연삭은 chatter에 대하여 유리하다는 것과 F_n 이 높을수록 안정영역이 넓어진다는 이론 값과 실험 값의 일치도 한다고 제시하였다. 그러나 지금까지의 연구에서 chatter의 실험적인 연구와 발생감시 및 안전해석 등은 고려되어 있었지만^(6,12), 연삭중의 주축시스템을 고려한 이론적인 지수를 밝혀서 Chatter를 미리 예측하는 시스템은 없었다.

따라서, 본 논문에서는 연삭가공중에 발생하는 불안정 시점을 공구동력계를 이용한 법선력의 측정으로 채터 발생과의 관계를 규명하고, 각각의 조건에 따른 채터 발생시점을 조사하여 AE 신호와 비교, 검토하였고, 이를 토대로 이론적으로 채터 발생시점을 규명할 수 있는 방법을 고찰하였다.

2. 실험

연삭 공정시 숫돌과 공작물 사이에 작용하는 법선력은 정밀도 및 채터 발생에 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 그 수학적인 모델은 여러 가지 형태로 가정되고 있다. 본 실험에서는 공구동력계로 법선력을 측정하여 가장 타당한 수학적 모델을 선정하고, 법선력과 채터 발생과의 관계를 규명하며, 이의 확인을 위하여 절입깊이, 이송속도 및 숫돌 종류에 따른 채터 발생시점을 다각도로 조사하고, AE 센서에 의한 신호와 상호 비교, 검토 하고자 한다.

2.1 실험장치구성 및 방법

본 실험에서 사용한 연삭기는 화천(주) 제품의 평면연삭기(Model type HGS-65A)로 주축동력 3.75kW이다. 연삭가공을 행할 때 발생하는 연삭저항을 측정하기 위하여 AKistler사의 Tool-dynamometer (Piezo type 9257B)를 사용하였다. Working time에 도달했을 때 공구동력의 신호와 동시에 AE Sensor를 이용하여 Working time을 결정하였으며, 신호(F_n)가 변화할 때까지 공구동력계와 AE Sensor를 신호를 관찰하였다.

연삭숫돌은 일반적으로 많이 사용되어지고 있는 산화 알루미늄계인 WA와 탄화 규소계인 GC를 사용하였으며, 공작물은 열처리하지 않은 기계구조용 탄소강 SM45C를 사용하였고, 공작물의 크기는 길이 168mm, 폭 38mm, 높이 60mm로 하였다.

연삭숫돌 및 공작물의 회전수는 회전속도계(Model DT5350)로 확인하였고, 숫돌의 회전수 1725rpm, 테이블의 이송 및 연삭깊이는 다양하게 변화시켜 연삭가공을 수행하였으며 숫돌의 입도는 100번을 사용하였다. 또한, 연삭조건을 설정하여 공작물 양 끝단에서 매행정마다 절입을 행하여 Spark-out 연삭없이 연삭가공을 수행하여 Working time이 일어나는 시점까지 연삭가공을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 실험장치 구성도를 Fig. 1과 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

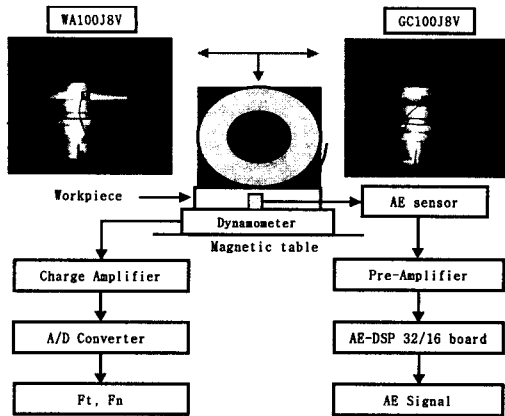


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	HGS-65A(Hwacheon Co.)
Grinding wheel type	WA100J8V, GC100J8V Shape: $\phi 305 \times t 38 \times \phi 127$
Workpiece	SM45C (168L \times 38W \times 60H)
Grinding type	Up cut grinding
Wheel speed(V)	1725rpm
Table speed(v)	5m/min, 10 m/min
Depth of cut(d)	10 μ m, 15 μ m, 20 μ m/pass
Tool Dynamometer	Piezo type 9257B (Kistler Co.)
Charge amplifier	5019A (Kistler Co.)
A/D converter	PCL-812PG (Advantech Co.)
AE sensor	A50 (Pac.)
Pre-amplifier	1220A (PAC.)
AE main	AE DSP-32/16 (PAC.)

2.3 실험결과

본 연구에서의 실험에 대한결과를 Working time과 테이블이송속도의 Chatter 거동 형태를 그림에 나타내었다 Fig. 2는 WA100J8V 슛들로 절입깊이 $d=10\mu\text{m}$, 테이블속도 $v=5\text{m/min}$ 으로 연삭가공을 수행하였을 때, 공작물 가공시간의 변화에 대하여 AE신호, 연삭저항의법선분력 F_n 및 표면조도의 최대거칠기 R_{max} 거동을 표시한 그림이다.

연삭가공 초기에는 AE신호 및 F_n 이 안정된 거동을 보이고 있으나 Working time이 2.7min을 지나서 부터 AE는 격심한 변동의 양상을 보이며, F_n 의 연삭저항의 절대값이 급격히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 또한 표면조도의 변화로 AE신호 및 F_n 의 변화에 맞추어 Working time이 2.5min 부분에서 거칠게 되어지고 있음으로부터,

본 실험조건에서 연삭을 수행하게 되면 공작물의 연삭가공 시간이 2.5min에서부터 연삭스툴 입자 선단의 마멸적 마모 및 눈막힘 현상이 현저하여 AE신호의 격심한 변동이 초래되며, 또한, 연삭저항은 입자의 선단마멸에 의한 대규모 파쇄가 일어나 연삭저항의 감소를 가져온다고 판단된다. 이러한 결과로부터 AE신호를 측정함으로써 슛들의 Chatter가 발생되어 지는 양상이 확인되었다.

Fig. 3 및 Fig. 4에서도 연삭저항과 AE신호를 동시에 주어 연삭깊이와 이송속도를 Working time 의 거동현상이 나타나는 시점의 Chatter형태를 보이고 있다.

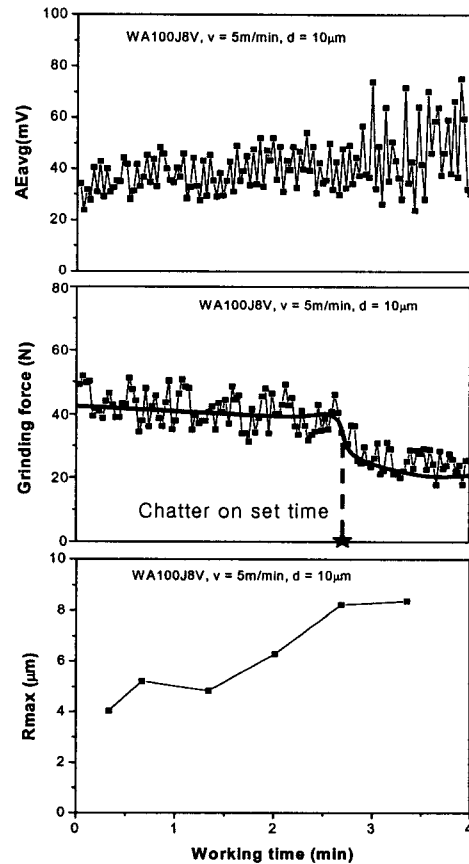


Fig. 2 Determination of Working time using AE signal, grinding force and surface roughness

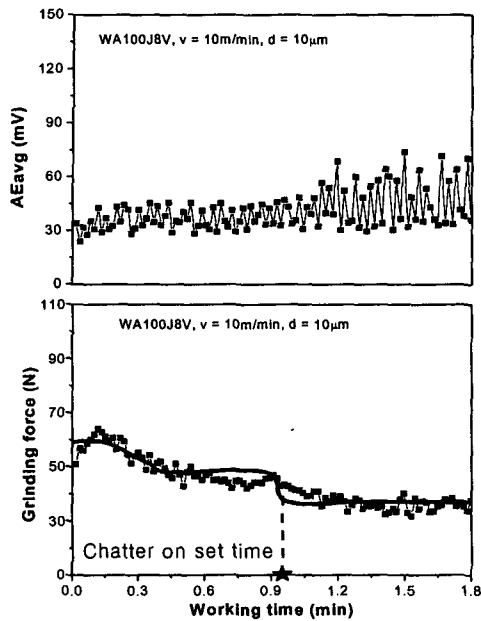


Fig. 3 Determination of Working time using AE signal, grinding force

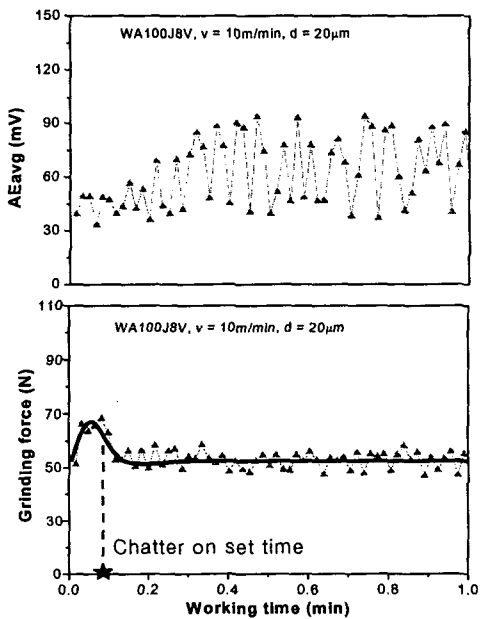


Fig. 4 Determination of Working time using AE signal, grinding force

또한, 실험 결과의 그림을 전부 나타낼 수 는 없었지만 WA와 GC숫들의 채터현상을 Table 2에 나타내어 보았다. 표에 나와 있듯이 GC숫들의 채

터발생이 WA숫들보다는 빠르게 나타나는 것을 보이고 있다. 이것은 역시 일반적으로 SM45C에서는 GC숫들이 적합하지 않다는 것이 본 연구에서 확인되었다.

Table 2 The chatters onset time under various condition

unit : sec

절입깊이	이송속도 5m/min		10m/min	
	WA	GC	WA	GC
10 μ m	2.7	1.30	1	0.35
15 μ m	2	0.4	0.3	0.15
20 μ m	1	0.3	0.1	

3. 연삭작업중 채터 발생의 이론적 고찰

2절의 실험으로부터 채터에 대한 흥미로운 결과가 도출되었다. 즉, 연삭법선력은 식 (1)과 같이 표현되어지고,

$$F_n = F_0 e^{at} \sin \omega t \quad (1)$$

연삭 법선력에서 지수값, a 가 음(minus)으로 되는 순간이 채터 발생 시발점이라고 추정되었다.

이를 이론적으로 뒷받침하기 위하여 채터 발생 메카니즘(Mechanism)을 규명하고, 연삭기 주축 및 연삭공정의 동적 모델링 방법을 제시하여 채터와 연삭 법선력과의 관계를 관찰하고자 한다.

3.1 채터 발생 메카니즘(Mechanism)

연삭 시스템에서의 가공성능은 주로 공구와 공작물사이의 상대운동에 영향을 받는다. 그러한 운동을 야기시키는 동적현상은 2가지 형태가 있다. 첫째는 외부 가진 운동으로써 충격하중에 의해 발생하는 과도 운동과 정상 상태 운동이다. 두 번째는 이러한 강제 감쇠 진동과는 다른 "채터"라고 하는 자력(self-excited)진동으로, 어떤 특정한 조건하에서는 공작물을 여자시킨다. 만일 구조물의 맵핑 또는 절삭 공정중의 마찰에 의해 에너지가 충분히 소산되지 않으면, 공구와 공작물사이의 상대 운동은 시스템의 고유 진동수중의 하나에서 허용한계를 초과하여 성장한다. 이 현상을 채터라고 하며, 채터의 발생은 가공면의 불량, 정밀도 저하, 공구 마모의 증가, 기계수명의

단축 및 가공능률의 저하를 초래한다. 강제 감쇠 진동은 예측 가능한 것으로써 설계단계에서 충분히 고려가 가능하지만, 자려 진동인 채터는 Fig. 4에서와 같이 연삭기의 동적모델(Dynamics of the grinder)과 연삭공정 동적모델(Dynamics of the grinding process)에 대한 폐루프에 의해 상대 변위, \bar{X} 에 대한 변동 연삭력, \bar{F} 로 결정됨으로써 공작물의 형태 연삭조건에 따라 달라지므로 설계초기에서 예측하기란 쉽지 않다.

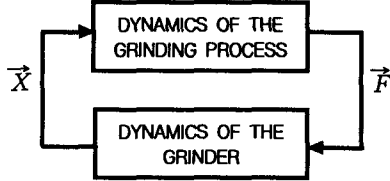


Fig. 5 Block diagram representation of the grinding dynamics

3.2 연삭기 주축 및 연삭공정 동적 모델

연삭기 주축 시스템 분석을 위하여 회전체 시스템[Fig. 6]의 진동을 분석하기에 앞서 회전체 모델링이 필요하다. 연속적인 유연축은 유한요소 법으로 이산되어질 수 있다. 원통형 보요소 회전체는 집중 질량 해석법(lumped mass method)을 적용, Euler의 가정을 기초로 모델링된다. 즉 각 요소는 두 개의 절점을 가지고, 보요소는 각 절점에서 요소의 관성모멘트와 질량을 가지며 회전체의 보요소의 질량은 무시한다. 요소의 질량, 극관성 모멘트와 횡관성모멘트는 각 절점에 2등분되어 집중된다. 그리고 각 절점은 4개의 자유도(x-y면에서 2개의 병진 변위와 y축에서의 2개의 회전 변위)를 가지며 z축의 운동은 고려하지 않는다.

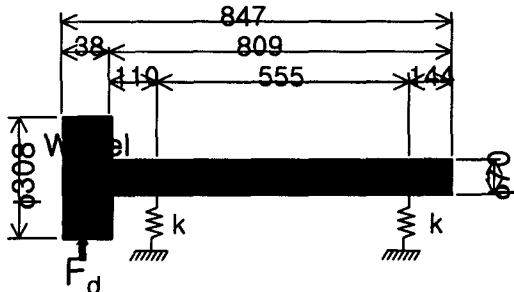


Fig. 6 Finite Element Rotor Model for A Grinder

이 모델링 방법에 의한 회전체 시스템(4×절점, 4×절점)의 행렬미분 방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = E_n(t) \quad (2)$$

여기서 M 은 축의 유한요소의 질량행렬, C 는 자이로스코픽 효과 및 감쇠에 대한 행렬, K 는 강성행렬로 각 요소의 강성과 외부에서 지지하는 베어링의 위치강성을 포함하고, X 는 회전체 시스템의 각 절점들에 대한 위치행렬을 나타내며 $E_n(t)$ 는 외력과 궤환 제어력을 포함하는 행렬이다.

연삭기와 연삭공정간의 상대변위에 대한 변동연삭력에 대하여, Thompson⁽¹³⁾은 식 (1)에서 지수값, a 가 영(zero)에서 음(minus)으로 될 때 채터가 발생한다고 언급하였다.

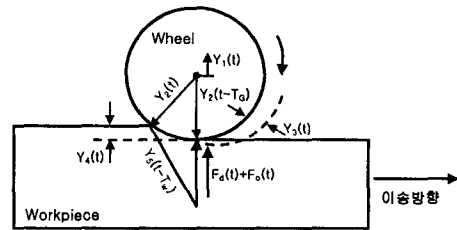


Fig. 7 Geometry of the grinding process

이는 Fig. 7과 식 (3)에서 보는 바와 같이 스프링 평형식($F_d = ky$)에서의 공작물의 강성(stiffness)값의 저하를 초래한다.

$$K = \frac{F_d}{\text{절입깊이}} \quad (3)$$

3.3 연삭 채터 발생의 이론적 고찰

Palazzolo 및 Wang(1983)⁽¹⁴⁾은 이 시스템의 방정식으로부터 고유값의 도출과정을 다음과 같이 제시하였다.

$$\dot{Y} = AY \quad (4)$$

여기서

$$A = \begin{pmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & \Omega \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$Y = [\dot{X} \ X]^T \quad (6)$$

회전체 시스템은 복소수 형태의 고유값을 가지므로 식 (4)의 해를 가정하면 다음과 같다.

$$Y_j = \mathcal{X}_j e^{\lambda_j t} \quad (7)$$

여기서

$$\lambda_j = a + bj \quad (8)$$

고유값을 계산하기 위해 특이값 해석을 이용하여 수치해석적으로 구하여 그 고유값의 허수로부터 고유진동수를 산출할 수 있다.

그러므로, 연삭 공정의 동적 모델을 기술하기 위하여 지수값, a 의 변화에 따른 강성(stiffness)의 영향을 판단하여 이를 연삭기 주축을 고려한 동적모델링과 통합한 후 이 전체 방정식의 안정성을 판단하여 chatter 발생시의 지수를 조사할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구는 평면연삭기에서 공작물로 SM45C를 대상으로 연삭가공시 작업시간에 따른 연삭법선력 및 AE 신호의 거동을 관찰함으로써 얻어진 결과를 요약한다.

- (1) 연삭법선력의 수학적 모델은 그 진폭이 지수적 형태, 즉 $F_0 e^{a \sin \omega t}$ 임을 확인하였다.
- (2) WA와 GC숫돌에 대한 공구동력계의 법선력과 AE신호를 측정하여 chatter 발생을 추정할 수 있었다.
- (3) chatter 발생은 연삭기와 연삭공정간의 상대변위에 대한 변동 연삭력에서 지수값, a 가 음(minus)으로 되는 시점에서 발생된다는 것을 확인하였다.
- (4) 실험결과를 토대로 법선 연삭력의 지수값의 변화에 따른 연삭숫돌과 공작물간의 강성을 규명하고 이를 연삭기 주축을 고려한 동적모델링과 통합한 후 이 전체 방정식의 안정성을 판단하여 chatter 발생시의 지수를 조사하는 방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기 계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 鹽崎 進, 中野嘉邦 共同翻譯: 工作機械の力學, 養賢堂(1972)240. (F.Koenigsberger And J. Tlusty : Machin Tool Structures. Vol. 1. Pergamon Press, London.(1970).)
- (2) 志村英男, 矢作秀夫, 吉田喜一, 吉岡潤一 : 平面研削盤の と据付 搖動(Rcking Vibration)について, 日本機械學會 講演 論文集. 750-18 (1975) 151.
- (3) 三井公之, 小澤則光, 新井正雄, 吉田嘉太郎 : 平面研削に おけるしま 目模様の 創成に關する研究. 日本機械學會論文集(C편), 48. 431 (1982) 1059.
- (4) 塩崎, "MTV 研究分科會成果報告書", 日本機械學會, pp.36-281, 1970
- (5) Snoeys, R. and Maris, M., Proc. Int. Conf. Prod. Engng., Tokyo, Part II, F. A., (1974), 70.
- (6) 이찬홍, 이후상, 박천홍 "연삭기용 유정압베어링 주축의 최적화에 관한 연구" 한국정밀공학 회지 제 13권 제 7호 1996. 7.
- (7) G.Xiao, S.Malkin "On-Line Optimization for Internal Plunge Grinding" Annals of the CIRP Vol.45/1/1996
- (8) Tetsutaro Hoshi, Shigeru Matsumoto, Satoshi Mitsui "Suppression of Wheel Regenerative Grinding Vibration by Alterating Wheel Speed" Annals of the CIRP Vol. 35, 1. 1968.
- (9) F. Hashimoto, A Kanai, M. Miyashita Grinding Processes and Chatter Stabilization Index of Grinding Wheel" Annals of the CIRP Vol33, 1. 1984.
- (10) 1. 星鐵太郎, "機械加工の振動解析". 工業調査會 1993.
- (11) Low Siak Kheang, Yoshikuni Nakano and Hideo Kato, "Suppression of Chatter Marks due Pulsation of Hydraulic Oil Pressure in Surface Grinding", JSPE, Vol. 55, pp.514-519, 1989
- (12) 이종렬, 송지복, 하만경, 박재섭 "원통연삭시 휠속도 변화의 패턴인식을 이용한 chatter감시에 관

한 연구” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집 제 1997. 10.

(13) R. A. Thompson, "On the Doubly Regenerative Stability of Grinder: The Theory of Chatter Growth", ASME, Vol. 108, pp. 75-82, 1986

(14) Palazzolo, A. B., Wang, B. P., and Pilkey, W. D., 1983, "Eigensolution Reanalysis of Rotordynamic System by the Generalized Receptance Method", *Jour. of Engin. for Power*, vol. 105, July, pp.543 ~550.