

Drill가공의 형상정도에 의한 Chatter발생 규명

박 종 권*, 성 활 경**

The Identification of drilling chatter on the machining accuracy

Jong-Kweon Park*, Hwal-Gyeong Seong**

ABSTRACT

Drilling chatter is regenerative type self-excited vibration and can be predicted by the measurements of the dynamic compliance between tool and workpiece based on structural dynamics and cutting dynamics.

This paper describes the theoretical prediction about drilling chatter and the mechanism of the formation of multi-coner shape in holes by drilling chatter. By the experiments and theoretical study, it is found that the odd number of multi-coner shape is always generated by drilling chatter.

Key Words : Chatter vibration(채터진동), Dynamic compliance(동적 킴플라이언스), Transfer function(전달함수), Stability chart(안정성 도표), Lobed border-line(균 곡선)

기호설명

b : 절삭폭(mm)
 Kc : 절삭강성(kg/mm)
 Km : 기계구조물의 강성(kg/mm)
 $Gm(j\omega)$: Normalized Dynamic Compliance
 Z : Chatter 발생 Cycle수(정수)
 ν : 위상계수($0 \leq \nu \leq 1$)
 μ : 중복계수(= 1, 0)
 T : 회전주기(Sec) (= $1/2N$), $T=(Z+\nu)/f$
 f : Chatter주파수(Hz)

ω : 각속도(rad/sec), $\omega T= 2\pi(Z+\nu)/f$
 N : 주축의 회전속도(rps), $N = f/2(Z+\nu)$
 γ_{w0} : Drilling구멍의 평균반경
 d_0 : 평균직경($2\gamma_{w0}=d_0$)
 P_1 : Drill의 첫째날(Cutter)에 의해 절삭되는 점
 P_2 : Drill의 둘째날(Cutter)에 의해 절삭되는 점
 $\gamma_w(\varphi)$: 피삭재 내부 점 P_1 에서의 파상(Wave)
 $\gamma_w(\varphi - \pi)$: 피삭재 내부 점 P_2 에서의 파상(Wave)
 φ : 좌표축 (O_w, X)에서 점 P_1 까지의 회전각
 $\varphi - \pi$: 좌표축 (O_w, X)에서 점 P_2 까지의 회전각

* 한국기계연구원 공작기계그룹

** 국립 창원대학교 기계공학과

1. 서 론

항공기, 자동차 및 반도체산업에 이르기까지 정밀가공이 요구되고 있는 오늘날의 정밀기계 산업은 가공기의 성능뿐만 아니라 가공기술의 첨단화가 중추적인 역할로 등장하고 있다. 여기서 가공기의 성능을 좌우하는 요인중에 중요시 다루어야 하는 요소는 동특성에 관계되는 Chatter현상으로서 이는 정밀도의 저하 뿐만 아니라 생산성저하와 공구마모 및 파손 등 가공기술상의 여러가지 취약적인 문제들을 야기시킨다. 일반적으로 공작기계에서 가공중에 발생하는 진동은 강제진동(Forced vibration)과 자려진동(Self-excited vibration)으로 나눌 수가 있으며 강제진동은 절삭구역에서 떨어진 곳의 모터와 Gear 및 베어링 등의 운동결합에 따른 진동적인 힘에 의해 발생되거나 절삭개시 시점의 구성인선(Built-up edge)발생 등 단속절삭작업에 의한 변동절삭력 또는 외부기계로부터 전달되는 외력(External disturbance)에 의해 발생이 되고 자려진동은 Chatter발생의 주된 요인으로서 절삭작업중 강제진동에서와 같은 진동발생 인자는 없는데도 절삭과정중 순간 순간의 절삭력의 변화가 가공물과 공구의 상대운동을 유발시키는 데에서 기인된다. 그러므로 강제진동은 진동발생의 주파수성분을 분석하여 가진요인을 제거하거나 기계의 재배치 등에 의해 진동발생인자를 제거함으로써 쉽게 방지할 수 있으나 자려진동은 그 진동발생 인자를 정확히 인식하기가 어렵기 때문에 방지에 대해서는 그렇게 용이하지가 않다. 다만, 절삭동역학(Cutting dynamics)과 구조동역학(Structural dynamics)을 고려한 해석적 수법을 이용하여 이로부터 Chatter현상을 예측하고 동적안정성(Dynamic stability)을 평가함으로써 Chatter현상을 유발할 수 있는 기계구조상의 문제점 및 진동조건 등 이른바 방지에 대한 주요 파라메타들을 개선함에 의해 감소시킬 수 있게 된다. 여기서 자려진동의 발생을 유형별로 보면 실제로 절삭작업에서 가장문제가 되는 가공한 면(Work-piece surface)을 재 가공할때 발생하는 재생형(Regenerative)의 경우와 새로운 가공면을 절삭할때 발생하는 비재생형(Nonregenerative)의 경우로 구분되나 가공상에서 문제가 되는 것은 재생형의 경우가 지배적이다.⁽¹⁾

따라서 본 연구에서는 재생형 자려진동에 대한 Drilling chatter현상을 구조물의 동적Compliance를

측정함으로써 예측하고 실제로 절삭시험을 통한 Chatter현상을 발생시켜 Drilling chatter가 가공정밀도에 미치는 영향을 이론적, 실험적으로 규명하였다.

2. Chatter Mark와 가공형상의 기본이론

2-1 Drilling Chatter에 대한 안정성 판별

Drilling M/C에 있어서의 Chatter해석은 가공상태가 불안정해지기 시작하는 Chatter발생의 임계상태를 판별함으로써 해석이 된다.⁽²⁾ 즉 공구(Drill)가 2개의 절삭날에 의해 이루어지는 절삭기구에서의 절삭변위인 Inner/Outer Modulation이 서로간에 어떤 위상을 갖고 존재하느냐에 따라 Drilling가공시스템은 안정 혹은 불안정해지므로 안정성판별에 대한 관계식은 위상계수(ν)와 Chatter발생 Cycle수(Z)를 이용하여 식(2-1)과 같이 유도할 수 있다.⁽³⁾

$$\frac{b \cdot K_c}{K_m} \cdot G_m(j\omega) = \frac{-1}{1 - \mu e^{-j\omega T}} \quad (2-1)$$

식(2-1)에서 좌, 우항에 대한 그래프가 서로 만나게 되는 점에서 가공시스템은 불안정해지기 시작하며 이때를 Drilling chatter가 발생하는 임계상태라고 표현한다. 이경우 중복계수(μ)의 값은 일반적인 기계가공에 있어서는 $0 \leq \mu \leq 1.0$ 사이에 있게되나 Drill가공에 있어서는 2개의 절삭날이 연속적으로 중복되어 절삭을 하는 메카니즘을 갖게 되므로 $\mu = 1.0$ 이 된다.

2-2 Chatter발생에서의 형상정도

이론전개를 용이하게 하기위해 Drilling가공시 Drill은 정지하고 대신 공작물이 Drill회전방향의 반대로 회전한다고 가정할때 Fig. (2-1)과 같이 공작물의 중심을 O_w 라 하고 공작물의 임의의 위치에 고정된 좌표축을 $O_w \cdot X$ 라고 하면 Drill의 직경(가공구멍의 평균직경)은 식(2-2)와 같이 표시된다.

$$\{y_w(\varphi) + \gamma_{w0}\} + \{y_w(\varphi - \pi) + \gamma_{w0}\} = d. \quad (2-2)$$

그러므로 식(2-2)를 정리하면

$$\gamma_w(\varphi) + \gamma_w(\varphi - \pi) = 0 \quad (2-3)$$

와 같이 되며, 여기서 내면의 점 P_1 에 있어서의 가공형상 파형(Wave)이凸이면 점 P_2 의 파형(Wave)은凹이 되고 이를 Laplace 변환하면,

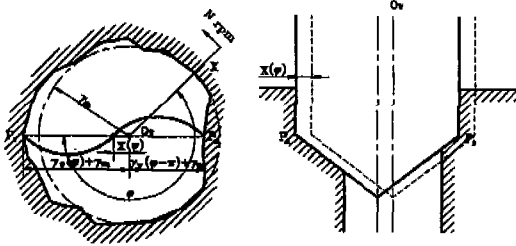


Fig. (2-1) Generation of cutting wave in drilling hole

$$R_w(S) \cdot (1 + e^{-zS}) = 0 \quad (2-4)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 그러므로 가공구멍의 파형(Wave)에 관한 특성방정식은

$$1 + e^{-zS} = 0 \quad (2-5)$$

이 되며 이와같은 가공시스템에서 안정된 가공현상을 나타낼 조건은 근(Pole)이 S-평면(S = σ + jn)의 왼쪽에 존재할때가 되므로 σ=0인 S = jn을 식(2-5)에 대입시키면 다음의 관계가 된다.

$$1 + e^{-jzn} = 0 \quad (2-6)$$

이경우 식(2-6)에 의해 가공Mark의 갯수는 n개로 서 가공된 구멍의 내면에 형성되기 쉽다. 그러나 실제로 불안정한 가공시에는 Fig. (2-1)에서와 같이 구멍중심(O_w)이 Chatter발생에 따라 야기되는 Disturbance의 양에 의해 X(φ)만큼 반경방향의 변위를 발생시키므로 식(2-3)은

$$\gamma_w(\varphi) + \gamma_w(\varphi - \pi) = X(\varphi) \quad (2-7)$$

로 표현할 수 있고 이것을 Laplace 변환을 시켜 반경방향의 변위인 X(S)와 가공내면의 파형(Wave)인 R_w(S)사이를 전달함수(Transfer function)로서 표시하면 다음과 같이 정리할 수 있게 된다.⁽⁴⁾

$$\frac{R_w(S)}{X(S)} = \frac{1}{1 + e^{-zS}} \quad (2-8)$$

여기서 S = jn을 적용시키면

$$\frac{R_w(jn)}{X(jn)} = \frac{1}{1 + e^{-jzn}} \quad (2-9)$$

가 되며 이를 토대로 가공중 반경방향의 진동이 Drilling구멍 내면에 파형(Wave)을 증폭시켜 나타나는 변

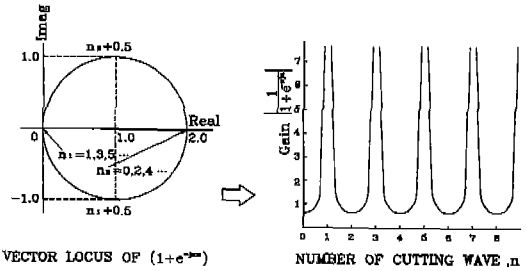


Fig. (2-2) Transfer characteristic of radial vibration(displacement) and cutting wave

위(Gain)특성을 구하면 Fig. (2-2)와 같은 현상이 될을 알 수 있다.

즉 Fig. (2-2)에 의하면 n = (n₁, n₂)에서 가공중 Chatter진동에 의해 공작물의 1회전당 발생하는 진동진폭(Chatter mark)은 n₁ = 1, 3, 5 ...의 홀수로 나타나고 n₂ = 2, 4, 6 ...의 짝수에 대해서는 감소되는 것을 알수가 있다.

3. 동특성 실험

3-1 기계구조물의 동특성해석

Drilling에서 Chatter발생 상태를 이론적으로 예측하기 위해 가공기구조물의 절삭구역에 대한 동적조화응답함수(Harmonic response function)와 전체구조물에 대한 진동모우드를 해석하였다. 즉 해석대상 모델기계는 우창기계의 DUA560으로 선정하였으며 Fig. (3-1)과 같은 방법으로 절삭구역을 포함한 가진점7개를 선정하여 가진시험(Modal testing)을 수행한후 식(2-1)

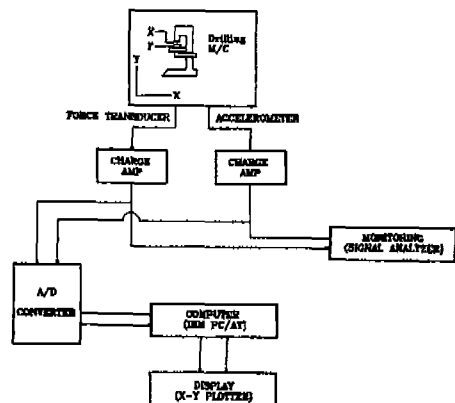


Fig. (3-1) Schematic diagram of impulse testing and signal processing

의 안정도판별에서 사용되는 Tool과 공작물사이의 동적 Compliance와 고유진동수(f_n), Damping ratio(ξ), 구조물의 강성(K_m) 등을 구하고,⁽³⁾ 이어서 Drilling M/C구조물에 대한 진동모우드를 측정하여 Drilling M/C의 Chatter발생상태를 예측하였다.

3-2 Chatter mark 질삭시험

질삭시험은 2가지로 구분하여 수행하며 이중에 첫번째는 안정성판별의 이론식인 식(2-1)에서 필요한 질삭강성(K_c)을 계산하기 위해 수행하고 두번째는 인위적으로 Drilling chatter를 발생시켜 이론적 예측결과와 비교하면서 가공형상에 대한 파형(Wave)을 Fig. (2-2)를 토대로 검토하기 위해서 수행하였다. 여기서 사용된 공작물(SM45C)은 소둔처리(Hs35±2)한후 Drill의 Chisel edge가 접하는 부분에 Pre-hole를 설치하여 Penetration효과가 배제되도록 하였다. 즉 Drill가공에서 발생되는 Chatter는 질삭초기단계와 질삭종료단계인 피삭재를 관통할때에 발생하기 쉬우며 특히 가공된 구멍을 가공할때에는 더욱 전 행정에 걸쳐 발생하기 쉽다. 이는 Drill의 Chisel-edge부가 가공물에 접촉되지 않으므로 가공시 나타나는 축방향의 진동을 억제시키지 못하기 때문이다. 가공된 구멍(Pre-hole)이 없는 가공물을 가공할때에는 Chisel-edge부가 피삭재에 접촉되지 되어 기계구동부의 백래쉬 등 가공시스템의 느슨해짐(Clearance)이 없어지고 동시에 주축 Spindle(Tool)과 테이블(공작물) 사이를 Drill의 Chisel-edge를 통하여 강제로 결합된 Closed loop을 형성하기 때문에 질삭중 공구-공작물사이에는 동강성(Dynamic stiffness)이 향상되는데 원인이 있고 이에 대해 Tobias는 Chisel-edge와 피삭재 사이의 접촉점에서는 이송속도에 의존하는 감쇠력(Penetrating force)이 작용되기 때문에 안정성이 증가되어 Chatter 발생은 어렵게 된다고 발표한 바도 있다.⁽⁴⁾ 그러므로 본 실험에서는 Chatter발생이 용이하도록 Table (3-1)과 같이 가공시편에 Pre-hole를 설치한후 Drill직경(D)과 Pre-hole의 직경(d)을 증가시키면서 질삭시험을 수행하였다. 이경우 질삭과정에서의 불안정성은 Drill의 회전속도와 질삭폭의 증대에 관계되므로 Drill 축방향의 이송속도는 0.1mm/rev로 일정히 유지하였다.

따라서 질삭강성은 각 회전속도에 대해 질삭폭을 변

Table (3-1) Cutting condition for chatter test

215	16	2.35	2.35에서 16까지 증가
405	12	1.86	1.86에서 12까지 증가
690	10	1.60	1.60에서 10까지 증가
890	8	1.37	1.37에서 8까지 증가
1150	6	1.14	1.14에서 6까지 증가
1525	4	0.81	0.81에서 4까지 증가

화(Δb)시킴에 따른 축방향의 질삭력변화(ΔF)를 측정하여 이들 변동질삭력과 변동질삭폭사이의 기울기를 계산함으로써 구했으며,⁽⁶⁾ Chatter현상 발생여부는 질삭폭을 증가시키면서 가공시 급격히 증대되는 질삭소음과 Oscilloscope에서 모니터링되는 진동변위의 Time signal을 관찰함에 의해 판별하였으며 아울러 FFT처리하여 Chatter주파수(f)를 구하였다. 그리고 Chatter가 발생한 공작물을 진원도측정기에 의해 Drilling구멍의 내면에 대한 진원도(형상정밀도)를 측정하여 가공파형(Wave)을 검토하였다. Fig. (3-2)는 공구동력계(감도 2.0 mV/kg)와 비접촉센서(감도 5.0mV/ μ)에 의해 질삭강성과 Chatter진동의 발생상태를 측정하는 상황을 보여 준다.

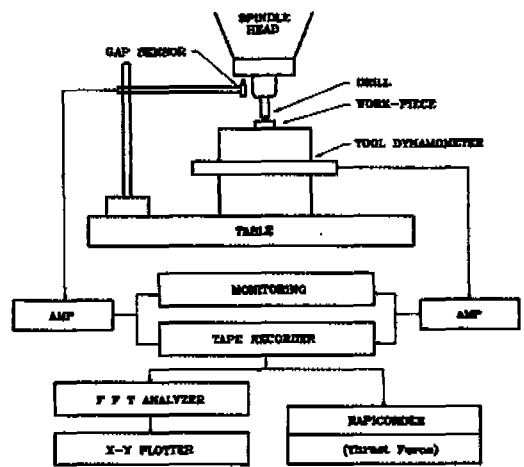


Fig. (3-2) Schematic diagram of cutting test for structural dynamic analysis

4. 결과 및 고찰

Drilling M/C의 구조물에서 가진시험에 의해 측정된 공작물과 공구사이의 상대변위특성인 동적Compliance는 Fig. (4-1)과 같다. 여기서 측정된 동적성분들을 토대로 식 (2-1)에 의한 안정성판별(Stability chart)을 해보면 Fig. (4-2)와 같이 z개 군마다의 곡선(Lobed border line)으로 나타나면서 주축속도에 따른 Chatter주파수는 90Hz와 110Hz로 되고 한계절삭폭은 약 3~7mm로 되었다. 이는 절삭시험결과로서 Chatter발생점을 경계로 나타난 안정한계(Stability limit chart)선도인 Fig. (4-3)과 비교할때 잘 일치되는 결과로 볼 수 있으며 여기서 안정구역(Stable region)은 전가공(Pre-hole)이 없는 공작물을 가공할 경우와 절삭폭이 약 5mm이내 및 낮은 절삭속도(200rpm이하) 구역에서 가공할 경우가 되고 있다. 특히 공작물에 설치된 Pre-hole의 크기에 따른 가공특성을 검토해볼때 공구(Drill)에서의 Chisel edge부는 가공시 공작물에 지지되어 동적강성을 증가시키는 이른바 Penetration효과(Dynamic penetration resistance)에 의한 안정화(Stabilizing action)를 야기시키는 역할을 한다는 것을 규명할 수 있으며 아울러 Chatter주파수는 주축속도에 따라 증가하는 주축속도의 함수임을 알 수 있다.

한편, Drilling M/C구조물에 대한 진동모우드를 해석한 결과 Fig. (4-1)내부에서 표현된 기계구조물의 진동형태와 같이 Chatter발생에 관련한 모우드는 공구와 공작물사이의 동적Compliance에서 측정된 주파수와

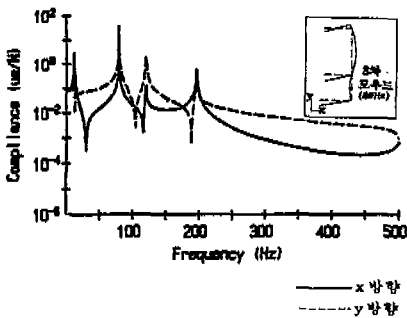


Fig. (4-1) Dynamic compliance(Relative compliance) of structure by exciting test ($f_0=88.9\text{Hz}$, $\xi=0.0697$, $K_m=3.0\text{N}/\mu\text{m}$, $|y/F| = |H|_{\text{max}}=2.89 \times 10^{-6}\text{m}/\text{N}$)

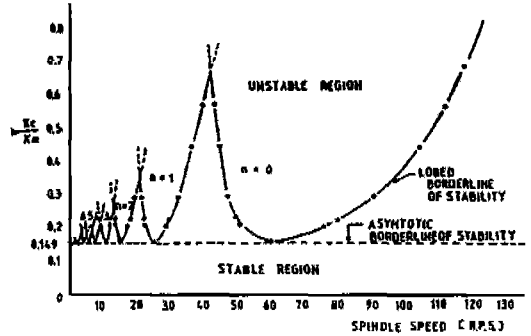


Fig. (4-2) Stability chart for a system with a structure having 1-DOF ($f_0=88.9\text{Hz}$)

일치되는 3차(89Hz) 모우드로 나타났으며 이는 주축스핀들과 테이블사이의 진동이 같은 위상으로 운동올하는 Rocking mode로서 테이블의 수직변위가 주축보다는 크기때문에 이에의한 상대변위가 유발된데에 원인이 있기 때문이다. 그러므로 Drilling chatter는 수직진동 모우드에 관련이 있으므로 Chatter의 진폭은 주로 Drill의 축방향에 있고 회전절삭속도의 방향과는 직접적인 영향이 없음을 고찰해볼 수 있다.

따라서 Drilling가공으로 Chatter가 발생된 공작물을 대표적인 몇개에 대해 진원도측정기에 의해서 가공구멍에 대한 형상정밀도를 측정해보면 Fig. (4-4)와 같이 나타났으며 이는 가공구멍 내면의 파형(Wave)이 흡수개를 이루는 것으로서 식(2-9) 및 Fig. (2-2)의 이론적 근거와 잘 일치되는 결과임을 볼 수 있다. 이에의해 Drilling가공에서 Chatter가 발생될때는 항상 가공형상이 흡수개의 파형(Wave)을 이룬다는 것을 이론 및 실험적으로 잘 입증할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 Drilling Chatter가 가공형상정밀도에 미치는 영향을 이론적으로 예측하고 실험적으로 규명하기 위해 구조물에 대한 구조동역학 측면에서의 가진시험(Modal testing)과 Chatter발생을 위한 절삭시험을 수행한후 상호비교함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 공작기계의 Chatter발생은 구조동특성 시험에 의한 안정성 판별도(Stability chart)에서의 예측결과와 절삭시험에 의한 결과로부터 알 수 있으며 모델기계는 90~110Hz에서 Chatter가 발생하고 있고 이경우에

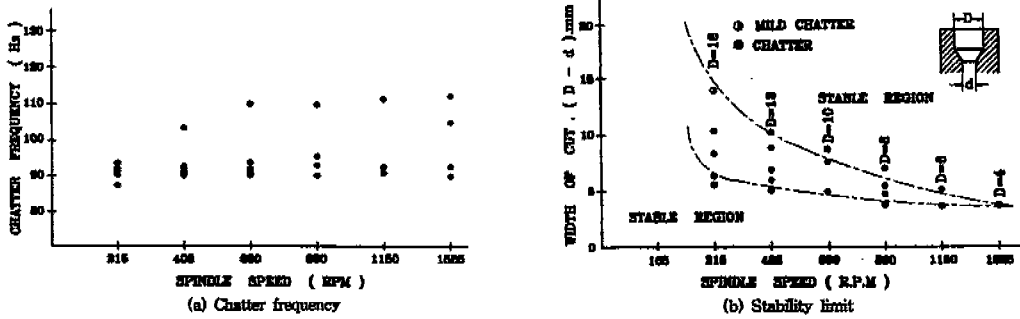


Fig. (4-3) Experimentally obtained stability limit and separated Chatter frequency

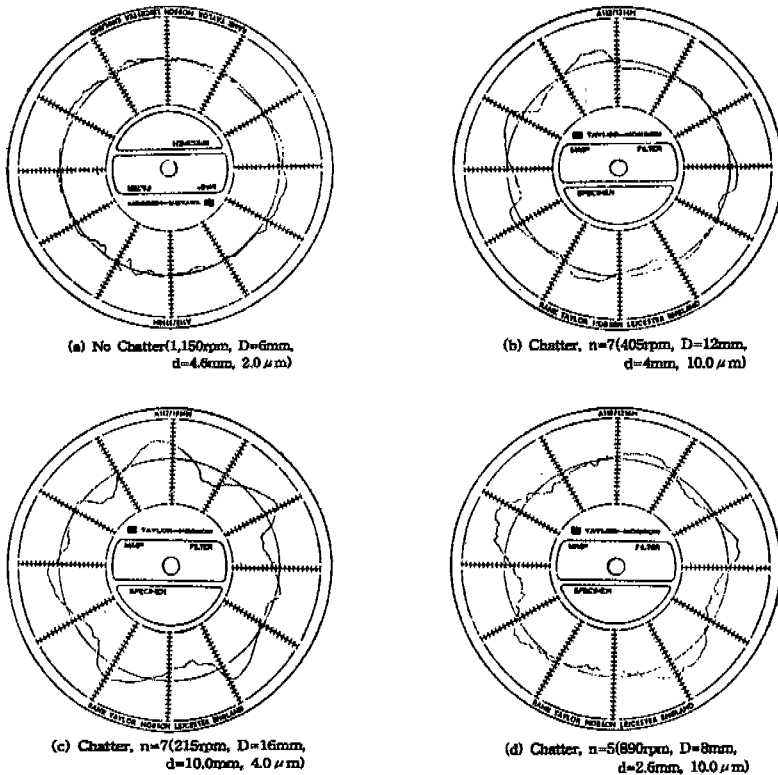


Fig. (4-4) Relation ship of cutting accuracy and chatter mark

한계절삭폭은 약 3~7mm이다.

2) 공작기계에서 안정되게 가공할 수 있는 가공영역은 구조물의 동적 Compliance로 부터 구조물의 감쇠율 (Damping ratio)과 동강성을 향상시키면 증대한다는 것을 알 수 있고 여기서 절삭강성은 회전속도의 증가에 따라 감소하는 경향이 있으며 이는 회전속도의 증가는

드릴의 Penetration효과가 감소하는 이른바 공구와 공작물사이에 접촉되지되는 절삭점에서의 동강성이 감소되기 때문이다.

3) Drilling chatter는 수직진동(Rocking mode)을 일으키는 드릴 축방향과 관련이 있기때문에 드릴의 회전속도 방향과는 관계가 없고 그러므로 가공시에는

이송시 나타나는 Penetration효과에 따라 가공시스템은 안정 또는 불안정해진다. Drill에서의 Chisel edge 부는 가공시 피삭재와 접촉유지되어 Penetration효과를 가져와 가공시스템의 동강성을 순간적으로 향상시키는 역할을 한다.

4) Drilling가공에서의 Chatter mark는 가공구멍의 내면에 형성된 가상적 파형(Wave)에 대한 수학적인 관계식으로 부터 유도된 전달함수(Transfer function)특성에 의해 예측할 수 있다.

5) Drilling가공에서 Chatter발생시의 가공정밀도는 가공구멍내면에 항상 흡수갯수의 파형(Wave)을 형성시킨다는 것을 이론 및 실험적으로 확인하였다.

따라서 본 연구결과는 정밀가공이 요구되는 항공기, 반도체 등의 Drilling가공분야에 있어서 측정된 피삭재 구멍내면의 가공형상에 따라 Chatter발생 유무를 판단할 수 있으므로 품질관리차원에서 가공시스템에 대한 보수유지의 관리최도로도 활용할 수 있다.

참고 문헌

1. S.A. Tobias, "Machine Tool Vibration",

John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.

2. H.E. Merritt, "Theory of Self-excited Machine Tool Chatter. Contribution to Machine Tool Chatter, Reserch-1", J. OF Eng. Industry, Nov., 1965.
3. 박종권, 이후상, "드릴링M/C의 Chatter해석과 동적안정성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제6권, 제2호, pp.77-87, 1989.
4. B.C. Kuo, "Digital Control System", 2nd Edition, Saunder College Publishing, 1992.
5. D.J. Ewins, "Modal Testing Theory and Practice". Research Studies Press LTD. John Wiley & Sons Inc. 1986.
6. W.A. Knight, "Application of the Universal Machinability Chart to the Prediction of Machine Tool Stability. Int. J. of Mach. Tool Design and Research, Vol.8, Pergamon Press 1968.