

드릴링 작업의 가공 정밀도 개선에 관하여



이 상 조
연세대학교 기계공학과 교수

● 1953년생
● 加工力學 및 工作機械動力學을 專攻하고 切削加工狀態의 온라인 모니터링, 信號處理 및 設備診斷, 로봇應用 및 自動化 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

드릴링 가공은 선삭이나 밀링가공과는 달리 드릴 공구 자체내의 기하학적 형상(상면 경사각, 선단여유각, 나선각) 및 절삭조건(절삭속도, 칩두께, inclination각) 등이 인선에 따라

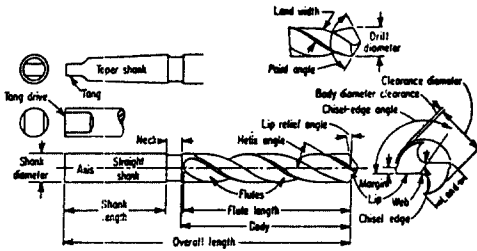


그림 1 표준 트위스트 드릴

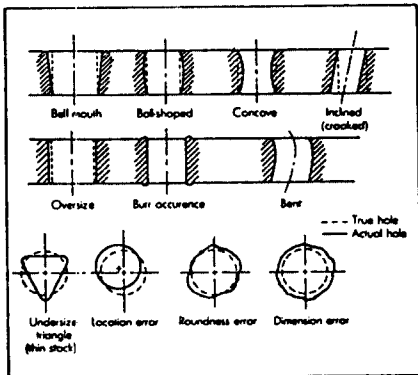


그림 2 드릴링한 구멍의 부정확성

변화될 뿐 더러(그림 1), 칩이 제한된 공간 즉 나선홈을 통하여 배출되어야 하며, 일반적으로 같은 통로를 이용하여 절삭유를 공급하여야 하므로 칩유동이 매우 구속되는 등 복잡한 절삭 과정을 내포하고 있다. 드릴링 가공의 이상적인 결과는 원하는 위치에, 원하는 치수의 구멍이 수직으로 뚫리는 것이다. 그러나 실제의 경우에 있어 드릴 선단부의 비대칭성, 회전축의 편심, 횡방향 진동 등 여러 가지 불안정한 요인들에 의해 야기되는 드릴 선단부의 미끄러짐 및 표류현상 등은 가공된 구멍의 크기를 확장시키거나, 구멍의 직원도 및 직직도를 저하시키는 등 가공 정밀도에 큰 영향을 초래한다(그림 2). 이후의 연속되는 리이밍 등의 다른 가공 작업의 정밀도도 보장되지 않는다. 따라서 본 글에서는 전반부에 드릴 선단부의 비대칭성과, 드릴의 횡방향 진동이 구멍의 가공정밀도에 미치는 영향에 대한 간단한 수학적 모델링을 소개하고 후반부에는 정밀도를 향상시키기 위한 수동적 방법으로 최근에 소개된 다면드릴(multi-facet drill)의 능력과 실제 드릴 가공 중 발생하는 드릴 힘을 능동적으로 제어하는 방법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 드릴의 가공 정밀도 해석

2.1 선단부의 비대칭 영향

일반적으로 드릴 선단부를 대칭적으로 연삭하기는 매우 어려운 실정이다. 그림 3은 선단

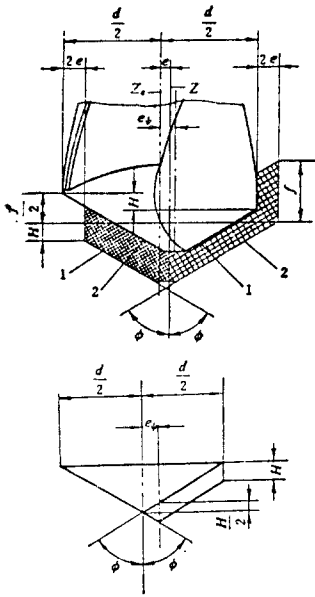


그림 3 날의 상대적 높이에 의한 구멍의 확대

부가 드릴축을 중심으로 같은 선단각($\phi_1 = \phi_2$)을 유지하여도 양쪽 인선부의 길이차가 유발되는 것을 나타내고 있다. 이와 같이 인선간의 상대 높이차 H 에 의하여 드릴 선단은 드릴축으로부터 $e = 1/2H \tan \phi$ 만큼 이동한다. 그러므로 초기 Z_c 축 주위로 선회 운동하던 드릴은 공작물과 접촉후 새로운 회전축 Z 를 중심으로 운동한다. 드릴의 상대 인선 높이차 H 에 의해 발생하는 직경오차 $2e_H$ 는 선단각 2ϕ 에 의하여 생기는 반경방향힘의 평형조건을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{f}{2} + H - 2e_H \cot \phi \right] \left[\frac{5}{12}d - \frac{H \tan \phi}{2} \right] \\ &= 2e_H f + \left[\frac{f}{2} - H + 2e_H \cot \phi \right] \left[\frac{5}{12}d - \frac{H \tan \phi}{2} \right] + \frac{f}{2} [H - 2e_H \cot \phi] \tan \phi \\ & \quad - \frac{1}{2} [H - 2e_H \cot \phi]^2 \tan \phi \end{aligned}$$

윗 식을 정리하여 2차 이상의 고차항을 무시하면 상대 인선 높이차에 의하여 생기는 직경

오차 $2e_H$ 는 다음식으로 표시된다.

$$\text{Hole oversize} = 2e_H = H \tan \phi$$

2.2 드릴의 표류현상 해석

드릴의 취즐에지가 공작물 표면과 접촉이 시작되면 드릴은 일반적으로 드릴표면을 표류하기 시작한다. 그 원인으로는 여러 가지 복합적인 요인들을 생각할 수 있다. 즉 취즐에지부의 편심, 드릴자체 및 주축의 강성 부족, 설치 불량, 인선부의 기하학적 비대칭성 및 양인선의 sharpness 차에 의한 불평형력, 횡방향 휨 등이다 그러나 이와 같이 여러 복합적인 요인들에 의해 가공중 발생하는 드릴축의 운동을 다음과 같은 두 가지 운동의 합으로 표시할 수 있다.

- (1) 스핀들의 회전축과 드릴축과의 편심으로 야기되는 각속도 ω_s 인 원운동.
- (2) 취즐부가 공작물 위를 표류함으로써 야기되는 각속도 ω_r 인 일반적인 타원운동.

그림 4와 5는 각각 회전축의 정의 및 가공중

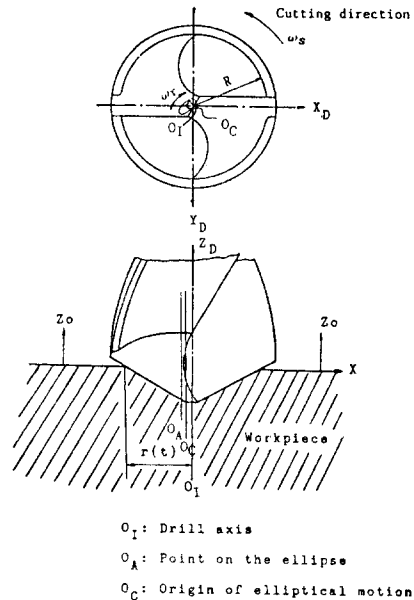


그림 4 드릴 해석에 사용되는 축

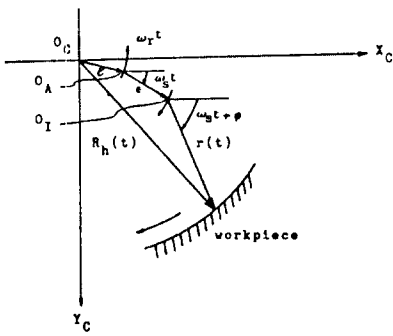


그림 5 드릴링시 커팅에주의 궤적

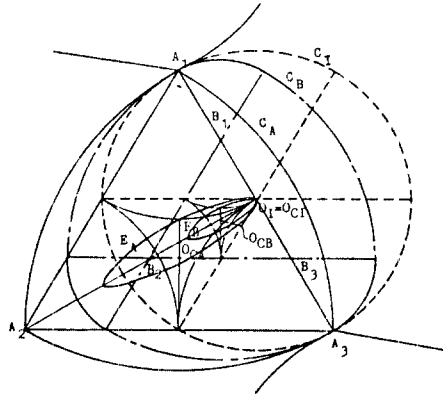
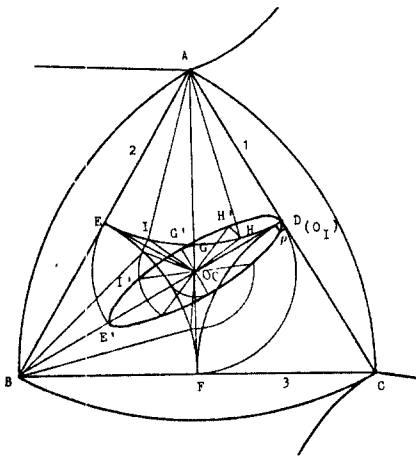
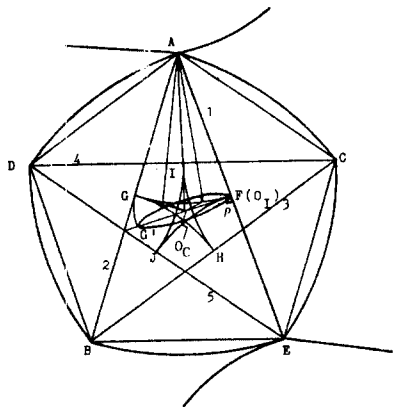


그림 7 원형 모양의 구멍 형성



$$\angle BAC = \frac{1}{2} \angle DO_2E$$

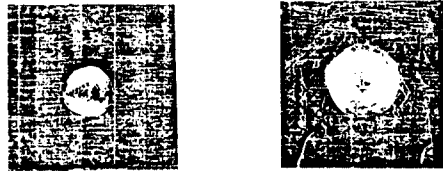
$$(60^\circ) \quad (120^\circ)$$



$$\angle BAE = \frac{1}{2} \angle GO_2F$$

$$(36^\circ) \quad (144^\circ)$$

그림 6 삼각형 모양, 오각형 모양



(a) Trigon

(b) Pentagon



(c) Heptagon

(d) Nonagon



(e) Eleven-side polygon

(f) Round shape

그림 8 다각형 모양의 구멍 형성들

절삭인선의 궤적을 나타내고 있다. 따라서 가공된 구멍단면의 반경 변화는 다음 식으로 표시된다.

$$R_h(t) = [x_i^2(t) + y_i^2(t)]^{1/2}$$

$$= \left\{ e^2(t) + r^2(t) + 2e(t)r(t)\cos \right.$$

$$\times \left[\left(\frac{r}{\omega_s} + 1 \right) \omega_s t + (\xi + \psi) \right]^{1/2}$$

여기서 양인선이 180회전 후 같은 위치를 절삭한다고 하면 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\cos(\omega_r t + \xi) = \cos\left(\omega_r t + \xi + \frac{\omega_r}{\omega_s} \pi\right)$$

즉, $\omega_r/\omega_s = 2n (n=1, 2, 3, \dots)$

이 조건을 이용하면 구멍의 단면형상은 진원을 유지하지 못하고 변의 갯수 $N_p = 2n + 1$ 인 다각형 모양을 유지함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 6, 7 같이 기하학적으로 설명이 가능하다. 실제의 경우 구멍 가공이 진행됨에 따라 드릴의 마이진부의 안내작용에 의하여 그림 6과 같이 변의 갯수의 증가 없이도 회전축 운동의 변위가 감소함에 따라 원형으로 가까워질 수도 있다. 그림 8은 실제 가공시 관찰된 홀수 개의 변을 갖는 구멍의 형상을 나타내고 있다.

3. 정밀도 개선 방안

3.1 다면드릴을 이용한 정밀도 개선

전형적인 다면드릴(MFD: multi-facet drill) 선단의 기하학적 형상은 그림 9에 표시한 바와 같이 크게 3개의 2차 곡면(곡면 1, 곡면 2, 곡면 3)으로 이루어져 있으며 곡면 2와 3은 다시 곡면 21, 22, 곡면 31, 32로 각각 세분할 수 있다.

직선 인선부 AB를 형성하는 곡면 1은 일반 드릴과 같이 원추곡면(conical surface)이며 곡면 인선부 BC를 형성하는 곡면 21인 cylindroid, 안쪽 직선 인선부 CD는 평면 22와 평면 32로 구성되어지며 곡면 31은 cylindroid 부분이다. 또한 취월에주는 표준드릴보다 일반적으로 매우 짧다. 그림 10은 실험에 사용한 일반드릴과 다면드릴을 나타내고 있으며 가공중 발생하는 드릴의 횡방향 변위는 실험장치로 그림 11과 같이 갠센서를 이용하여 측정하였다. 결과는 그림 12와 13에 표시한 바

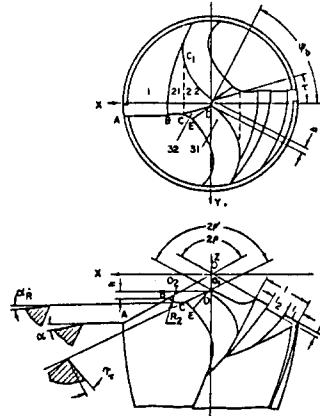
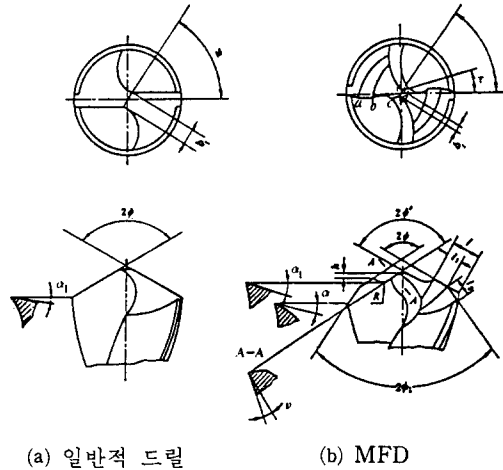


그림 9 일반적인 MFD



(a) 일반적 드릴 (b) MFD
그림 10 드릴의 여러 지점에서 측정된 변수들

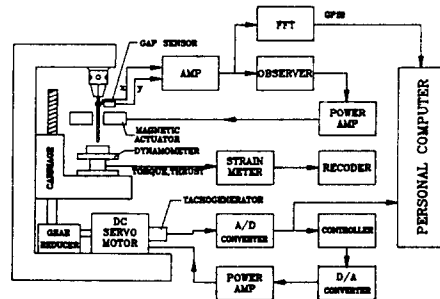


그림 11 실험장치의 계략도

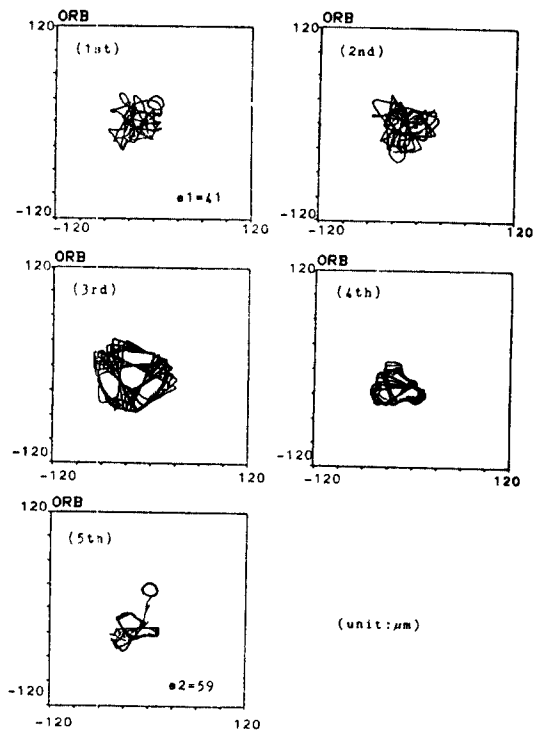


그림 12 일반드릴의 반경방향 변위의 궤적

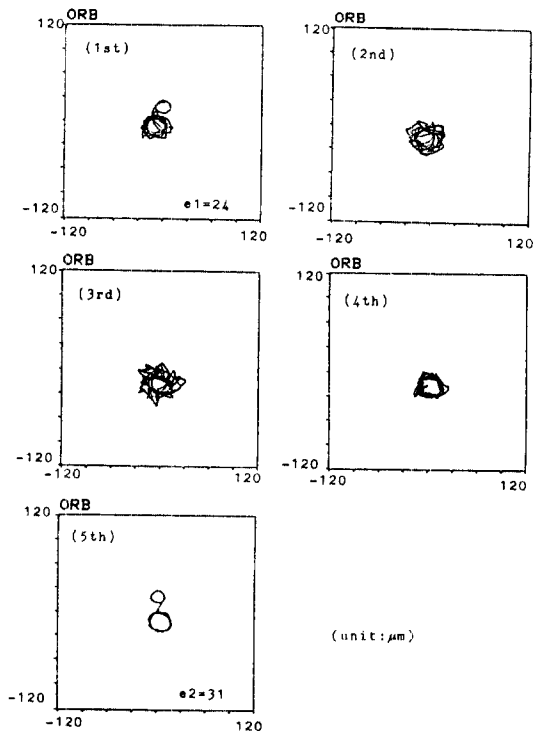


그림 13 MFD의 반경방향 변위의 궤적

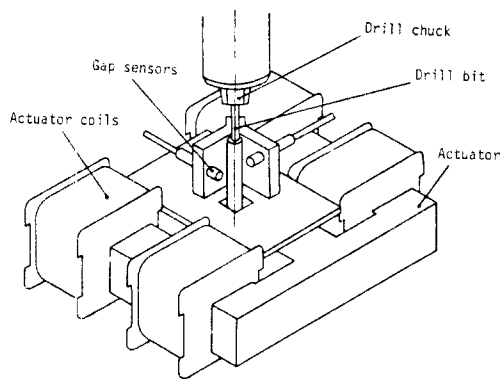


그림 14 전자식 작동기와 센서

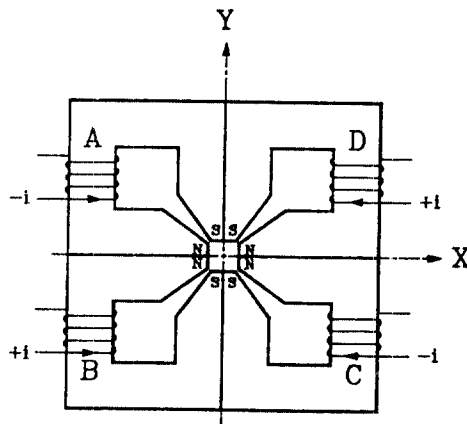


그림 15 진동 제어를 위한 전자식 작동기

와 같이 일반드릴에 비하여 다면드릴의 경우 횡방향의 변위를 약 40% 이상 줄일 수 있음을 보이고 있다. 이는 다면드릴의 기하학적 형상

에서 예측할 수 있듯이 self-centering 능력이 우수하며 또한 일단 가공이 진행됨에 따라 가공표면에 볼록(convex)한 표면을 만들므로 드

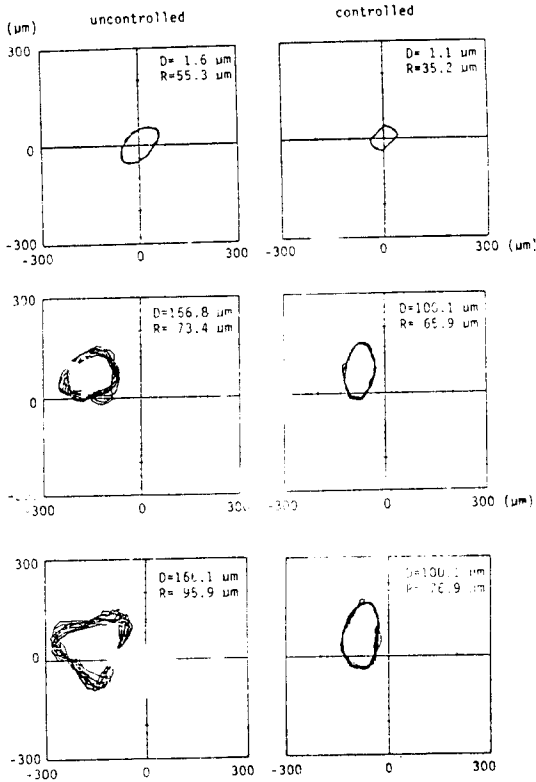


그림 16 반경 방향 변위의 제적 (feedrate=10mm/min.)

릴 가공화의 안정화를 이룰 수 있다.

3.2 드릴 횡진동의 능동제어

드릴축의 편심이나 드릴링 공정자체에서 야기되는 불평형운동에 의한 드릴의 횡진동을 능동적으로 제어함으로써 구멍의 직각도 및 진원도를 향상시킬 수 있다. 실험장치의 제작도는 그림 11과 같으며 드릴의 횡진동을 감쇠시키기 위한 진동감쇠제어 부와 공작물 이송을 위한 이송제어부로 구성된다.

드릴진동을 제어하기 위한 작동기는 2축 제어를 위해 4개의 전자석을 이용하였으며 변위센서에서 측정된 진동변위를 근거로 관측기에서 외력을 예측하여 작동기에서 외력에 반대되는 힘을 가하여 진동을 감쇠시킨다. 그림 14에

서 변위센서와 전자석 작동기를 보여주고 있다. 각각의 전자석은 그림 15와 같이 끝단에 자기장이 집중하도록 가공되어 있으며 또한 자기력이 원하는 방향에 집중되도록 동시에 2개 또는 3개가 작동된다. 실험 결과 그림 16에 표시한 바와 같이 드릴 횡방향 진동 변위에 대한 제어효과가 약 40% 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

본 글에서는 드릴링 작업의 가공정밀도 개선 방안에 관하여 살펴보았다. 그러나 이러한 결과들은 현재 산업계에서 그 필요성이 점점增高하고 있는 small-deep hole 드릴링에 적용하기 위하여는 앞으로도 계속 연구가 진행되어야 하며 특히 (1) 칩의 처리 문제, (2) Burr의 처리 문제, (3) 작업 상태에서 드릴휨의 모델링 등의 분야에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Braun, S., Lenz, E. and Wu, C.L., 1982, "Signature Analysis Applied to Drilling", Trans. of ASME, J. Mechanical Design, Vol. 104, pp. 268~276.
- (2) Burnham, M.W., 1982, "An Analysis of Drill Deflection for Deep Miniature Holes", 10th NAMRC, pp. 27~32.
- (3) Chen, L.H. and Wu, S.M., 1984, "Further Investigation of Multifacet Drills (MFD's) Mathematical Models, Methods of Grinding, and Computer Plotting", Trans ASME, Series B, Vol. 106, pp. 313~324.
- (4) Ernst, H. and Haggerty, W.A., 1958, "The Spiral Point Drill A New Concept in Drill Point Geometry", Trans. of ASME, pp. 1059~1072.
- (5) Friedman, M.Y., Kitamura, I. and Wu, S.

- M., 1974, "Roundding Mechanism of Reaming", *Annals of the CIRP*, Vol. 23, No. 1, pp. 27~28.
- (6) Fugelso, M.A. and Wu, S.M., 1979, "The Production of Unconventional Twist Drill Points", *NAMRC VII*.
- (7) Fujii, S., Marui, E. and Ema, S., 1984, "Whirling Vibration in Drilling, Part I, II", *The Winter Annual Meeting of ASME*, pp. 311~331.
- (8) Galloway, D.F., 1957, "Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance", *Trans. of ASME*, Vol. 79, pp. 191~231.
- (9) Griffiths, B.J., 1977, "Axial Hole Runout During Deep Drilling", *2nd Int. Conf. on Deep Hole Drilling and Boring*, Brunel Univ.
- (10) Haggerty, W.A., 1961, "Effect of Point Geometry and Dimensional Symmetry on Drill Performance", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. I, pp. 41~58.
- (11) Kahng, C.H., 1977, "Sources of Roundness Error in Hole Making Process for Metal", *Int. Conf. on Production Engr. Proc.*, Vol. 2, pp. X49~X60, New Delhi.
- (12) Sakuma, K., Kiyota, H., 1980, "Hole Accuracy with Cabide-Tipped Reammer", *Trans. of JSPE*, Vol. 46, No. 7, pp. 58~63.
- (13) Tueda, M., Hasegawa, Y. and Kimura, H., 1961, "On Walking Phenomenon of Drill", *Trans. JSME*, Vol. 27, No. 178, pp. 816~825.
- (14) Lee, S.J., Eman, K.F., and Wu, S.M., 1987, "An Analysys of the Drill Wandering Motion", *Trans. of the ASME, J. of Eng. for Industry*, Vol. 109, pp. 297~305.
- (15) Zolotarev, L.M. and Grankov, M.V., 1976, "Automatic Control of a Drilling Machine to Machine Small Diameter Holes", *Machines and Tooling*, Vol. 47, No. 12, pp. 21~22.
- (16) Stanway, R. and Burrows, C.R., 1983, "Active Vibration Control of a Flexibly-Mounted Journal Bearings", *Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 103, pp. 383~388.
- (17) Okada, Y., Nagai, B. and Matsuda, K., "Application of Electromagnetic Damper for Reducing the Rotor Vibration", *J. of JSME (ser. C)*, Vol. 51, No. 487, pp. 1760~1764.
- (18) 이규섭, 1989, "드릴 작업 중에 발생하는 선회 진동의 해석 및 능동 제어", *연세대학교*, pp. 44~77.

