

초음파 센서를 이용한 인프로세스 공구마멸 감시에 관한 연구

정의식*, 황 준**

A Study on the In-Process Monitoring of Tool Wear via Ultrasonic Sensor

Eui Sik Chung*, Joon Hwang**

ABSTRACT

This paper presents a methodology for In-Process monitoring of tool wear by using ultrasonic sensor in turning operation. An integrated single ultrasonic transducer operating at a frequency of 10MHz is placed in contact with the insert tip. The change in amount of the reflected energy from the nose and flank of the tool can be related to the level of tool wear and the mechanical integrity of the tool. As the results, the tool wear monitoring system based on the ultrasonic pulse-echo method was proposed, it is useful to determine a tool life and tool change time.

Key Words : Tool Wear(공구마멸), Ultrasonic Sensor(초음파 센서), In-Process Monitoring(인프로세스 감시), Turning Operation(선삭공정)

1. 서론

생산현장에서 수치제어 공작기계나 머시닝센터 등의 보급으로 인해 가공시스템의 자동화, 무인화가 급격히 이루어짐에 따라 절삭가공시 공구마멸, 공작물의 치수, 형상등의 상태를 인프로세스로 측정하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이는 가공시스템의 능률과 가공정밀도 향상 등의 측면에서 매우 중요한 과제가 되고 있다.

특히, 공구마멸은 제품의 정밀도는 물론, 공작기계 수명 및 안전성 측면에서 밀접한 관련이 있어 다양한 형태의 연구가 이루어져 왔다¹⁻²⁾. 이 중에서도 초음파 센서를 이용한 공구마멸 검출에 관한

연구로서 Spur 등³⁾은 공구로부터 공작물에 초음파를 투사하여 반사파가 발생하는 곳까지의 시간의 변화로부터 공구마멸량을 검출하는 방법을 제안하고 있다. 또한, 정의식 등⁴⁾은 초음파 탐상법을 이용하여 공구마멸에 따른 반사 에너지의 변화량, 즉 음압반사율에 의한 검출방법을 제시하였다. 그러나, 이들의 연구결과에서 제시한 방법들은 절삭열이 외란으로 작용하여 검출결과에 영향을 미치므로, 검출신뢰성을 높이는 문제와 센서를 일체화시켜 사용의 편리성을 높임으로써 현장적용성을 개선하는 문제등이 지적되고 있다.

본 연구에서는 이러한 개선사항에 목표를 두고 선삭가공시 공구마멸에 따른 절삭공구의 nose부와

* 대전산업대학교 기계설계공학과

** 충주대학교 기계설계학과

flank부에서 반사되는 초음파 에너지의 변화, 즉 초음파 신호의 반사율과 공구마멸과의 상관성을 다양한 절삭조건하에서 실험을 통해 확인하고, 초음파 센서 내장형 공구의 제안을 통해 현장적용을 검토하였다.

2. 측정원리

초음파 센서를 스프링의 압축력을 이용하여 인서트 팁의 후단에 고정시키고, 초음파를 발생시키면 Fig.1에 나타낸 바와 같이 인서트의 기하학적 특성에 의하여 오실로스코프 상에 송신파 진폭 h_i 와 공구인선의 nose부와 flank부에서 각각 반사되는 반사파 진폭 he_n 과 he_f 가 나타나며, 공구가 마멸되는 경우 nose부의 반사파 he_n 로부터 T_e^* 만큼 앞선 곳에 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 ϵ 에 대응하는 반사파 he_e 가 나타나게 된다. 따라서, 이들 반사파 가운데 he_e 와 아래의 식(1)로 정의되는 E_R^* 을 각각 특징인자로 사용하여 공구마멸 V_B 를 검출하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

$$V_B = \frac{\epsilon}{\tan \alpha} \propto E_R^* = \frac{he_e}{he_n} \times 100(\%) \quad (1)$$

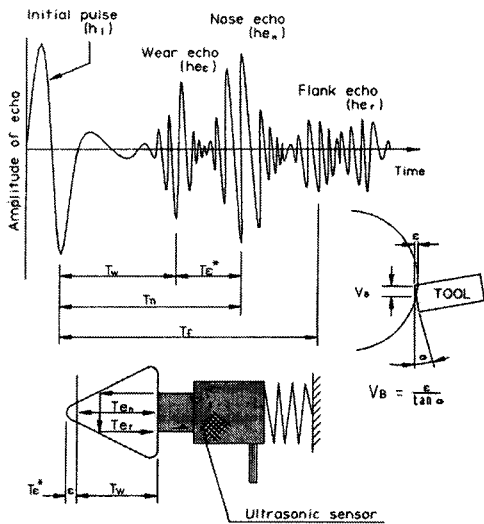


Fig. 1 Wave form of tool's echo

3. 실험장치 구성 및 실험방법

본 연구에서 구성한 실험장치의 개략도는 Fig.2에 나타낸 바와 같다. 실험에서 사용된 공구는 P20재종의 초경 표준 인서트팁(TPGN220416)을 사용하였으며, 공구홀더는 Fig.3에 나타낸 바와 같이, 초음파 센서를 내장하고 팁을 클램핑 할 수 있도록 특별히 설계·제작하였다. 또한, 초음파 센서 (10MHz, 직경 3.175 mm)는 인서트 팁의 후단면에 설치하고, 공구와 초음파 센서의 탐촉면이 항상 일정한 접촉면압을 유지하도록 센서의 후면에 스프링을 이용하여 가압 하였으며, 절삭온도의 영향을 없애기 위해 인서트 팁과 초음파 센서 사이에 delay-line을 삽입하고, 상온에서 압축된 공기를 air-nozzle을 통하여 공구 날끝 부위에 분사하도록 구성하였다.

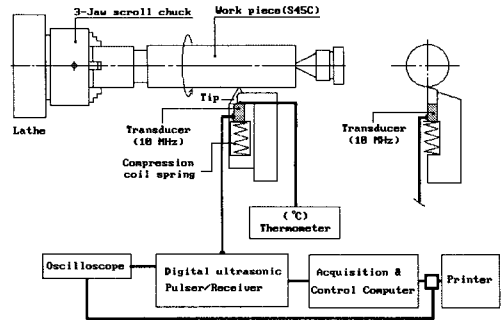


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up for tool wear monitoring

한편, 데이터 처리는 디지털 초음파 발생기 (digital ultrasonic pulser/receiver)를 이용하여 10MHz의 트랜스듀서에서 처음 입사한 초음파 신호와 반사파 신호를 디지털 처리하여, RF 혹은 Pulse 신호의 형태로 출력하고, 본 연구의 목적에 부합된 신호로서 컴퓨터에 저장하였으며, 매 절삭마다 공구의 nose부와 flank부의 반사파, he_n 및 he_f 의 진폭과 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 ϵ 에 대응하는 반사파, he_e 을 측정하여 식(1)로부터 정의된 반사율 E_R^* 값을 이용하여 공구마멸을 측정하였다. 또한, 공구 인선부의 마멸량을 크게 V_B -Height와

$V_{B-Width}$ 로 나누어 매질험 전후에 공구 현미경을 이용하여 측정하였다.

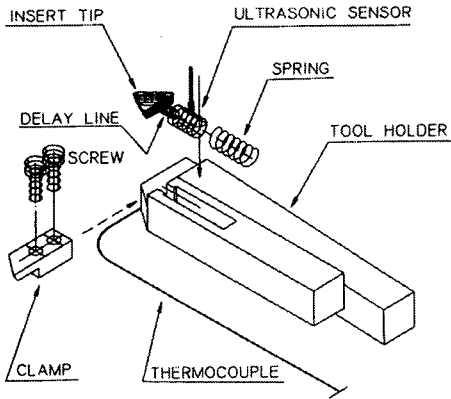


Fig. 3 Ultrasonic sensor & tool holder assembly

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭열이 초음파 신호에 미치는 영향

절삭가공중 발생하는 절삭열은 피삭재와 공구의 절삭면 사이의 마찰에 의해서 발생되는데, 열에너지의 일부는 피삭재나 혹은 칩으로 배출되고, 나머지는 공구면을 통해 초음파 센서의 탐촉면에 전달되어 검출신호에 영향을 미칠것으로 생각된다. 이러한 절삭열이 초음파 신호에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보기 위하여 air jet 분사에 의한 공냉 절삭과 비공냉 절삭을 행하였을 때, 인서트 팁의 후단면과 초음파 센서의 선단면 사이에 열전대를 삽입하여 두 매질간의 접촉온도를 측정하고, 그 때의 echo 의 변화를 조사하여 Fig.4 ~ Fig.7 에 나타내었다.

Figure 4에는 절삭가공을 행하지 않은 상태에서 인서트 팁의 선단 부위에 히터를 이용하여 인위적인 열을 가하면서 air jet 냉각을 가한 경우와 그렇지 않은 경우에 초음파 센서의 탐촉면에 전달된 온도변화를 조사한 것으로서, 가열시간이 증가함에 따라 air jet 냉각인 경우 약 35°C 전후에서 온도가 유지되는 반면, 비공냉 상태에서는 가열시간에 비례하여 탐촉면의 온도가 지속적으로 상승하는 것을 알 수 있다.

Figure 5에는 비공냉 절삭을 행하였을 때, 두 매

질간의 접촉온도와 he_n 과의 대응관계를 나타낸 것으로서, 접촉온도 약 45°C 이내의 범위에서 he_n 의 증가폭이 작은 반면, 인선부의 온도가 그 이상이 되면 echo 진폭이 급격히 증대하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 볼 때, 절삭열은 초음파의 검출신호에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 따라서 초음파 신호를 이용하여 공구마멸 상태를 측정하는 경우에는 절삭과정에서 발생하는 절삭열의 영향을 최소화할 수 있는 대책이 반드시 마련되어야 함을 보여주고 있다. 또한, 이들 결과에서 매우 흥미있는 것은 상온으로부터 약 45°C 이하의 접촉온도 범위내에서는 초음파 검출신호에 커다란 영향을 주지 않고 있어서 적절한 냉각법에 의해 접촉온도를 일정하게 유지, 제어하며 절삭할 경우, 절삭열의 영향을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

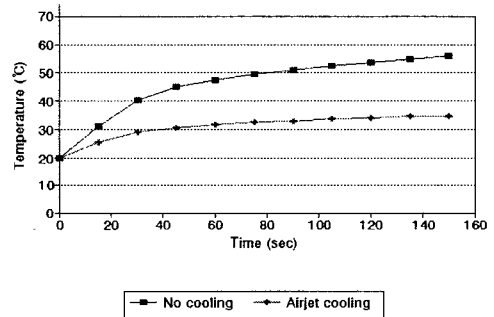


Fig. 4 Variation of sensor face temperature with respect to heating time of insert at non-cutting state

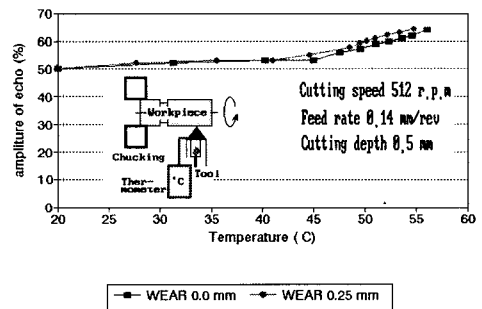


Fig. 5 Variation of amplitude of nose echo with respect to temperature under without air jet cooling at cutting state

절삭가공중 발생하는 절삭열이 초음파 센서의 공구마멸 검출 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 동일 절삭조건에서 air jet을 이용한 공냉절삭과 비공냉절삭을 수행하였을 때, 공구마멸량에 따른 nose echo he_n 의 변화를 절삭시간에 대해 Fig.6 과 Fig.7 에 각각 나타내었다.

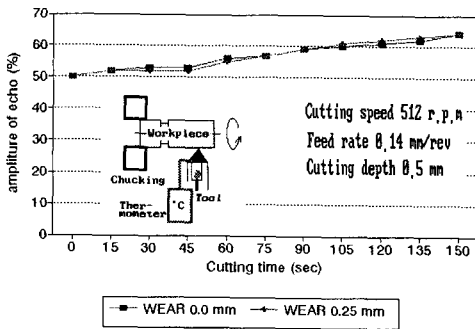


Fig. 6 Variation of amplitude of nose echo with respect to cutting time under no cooling state

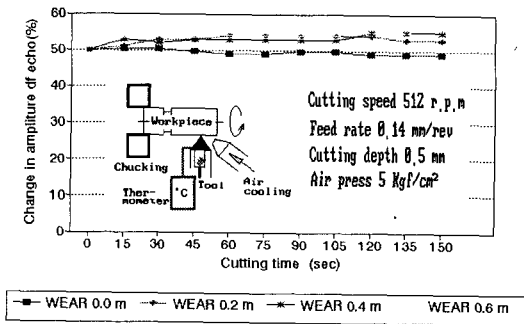


Fig. 7 Variation of amplitude of nose echo with respect to cutting time under air jet cooling state

이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 비공냉 절삭시(Fig.6) he_n 의 진폭은 절삭시간의 증가에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 절삭온도의 증가패턴과 유사하게 나타나고 있다. 특히, 초기 공구마멸량이 각각 다른 두 가지

인서트 팁을 사용하였음에도 불구하고, 공구마멸량을 nose echo를 통해서 구분할 수 없었다. 반면에 공냉절삭시(Fig.7) 공구마멸 정도에 비례하여 nose echo 량의 차이를 검출할 수 있으며, 절삭시간 증가에 관계없이 일정한 값을 유지하고 있어 검출 신뢰성이 향상되고 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 채택한 air jet 냉각 방식에 의한 공냉절삭 방법은 초음파 검출에 미치는 절삭온도의 영향을 최소화하는데 효과가 있으며, 공구마멸 검출민감도를 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

4.2 초음파 신호에 의한 공구마멸 검출

공구마멸에 의한 초음파 검출의 거동특성을 알아보기 위하여 연삭작업에 의해 공구에 인위적인 마멸을 주면서, 공구마멸 (V_B -Width 와 V_B -Height)의 증가에 따른 초음파 echo의 변화, 즉 he_s 과 he_n 의 측정결과를 Fig.8 과 Fig.9 에 각각 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 공구날끝반경 부분에서 반사되는 nose echo he_n 은 V_B -Width 와 V_B -Height가 증대함에 따라 약 10% 미만의 좁은 범위에서 증가하다가 다시 감소하고 있는데 반하여, he_s 은 동일 마멸 조건에서 약 40% 범위의 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 큰폭으로 점진적으로 증대하고 있다.

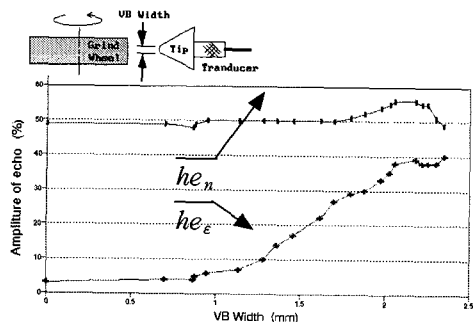


Fig. 8 Comparison of amplitude of nose echo & wear echo with respect to flank wear width under grinding state

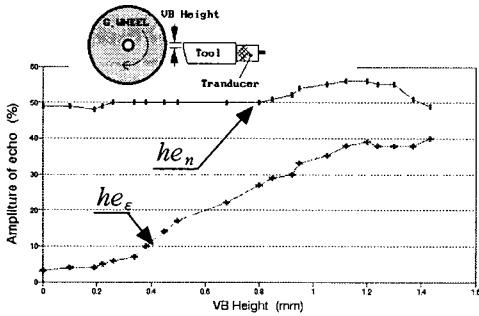


Fig. 9 Comparison of amplitude of nose echo & wear echo with respect to flank wear height growth under grinding state

이는 절삭중 공구가 마멸에 따른 인선후퇴에 의한 초음파 반사에너지의 증대효과가 크게 작용하여 wear echo he_ϵ 의 진폭이 공구마멸량에 비례하여 증대되는 것으로 판단된다.

따라서 이상의 결과를 종합해 보면, Tool holder에 내장된 초음파 센서의 반사파 신호 성분중에 wear echo 성분인 he_ϵ 은 공구마멸량을 측정하는데 유용하게 이용될 수 있으며, 이 경우 특히 주목할 것은 $V_{B-Width} \approx 1\text{mm}$ 와 $V_{B-Height} \approx 0.3\text{mm}$ 의 부근에서 he_ϵ 의 진폭이 급격히 증대하고 있는데 이는 ISO의 공구수명판정기준을 충족시키는 것으로서 매우 흥미있는 결과로 생각된다

또한, 절삭속도 변화에 따른 초음파 센서의 공구마멸 검출특성을 알아보기 위하여, 절삭깊이 0.5mm, 이송량 0.14mm/rev은 동일조건하에서 주축속도를 각각 293rpm과 512rpm으로 하여 air jet 공냉상태로 절삭실험을 행하였을 때의 echo변화를 Fig.10과 Fig.11에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 공구의 nose부의 반사되는 반사와 he_n 은 앞의 실험결과들과 마찬가지로 공구마멸량 $V_{B-Height}$ 의 증가를 민감하게 검출하지 못하고 불규칙하게 미소진폭 변화만을 나타내는 반면, wear echo he_ϵ 은 절삭초기에는 거의 일정한 값을 유지하다가 293rpm 조건에서는 $V_{B-Height} \approx 0.3\text{mm}$, 512rpm 조건에서는 $V_{B-Height} \approx 0.4\text{mm}$ 에서 급격히

증대하여 공구의 마멸상태를 매우 명확하게 검출할 수 있음을 확인할 수 있다.

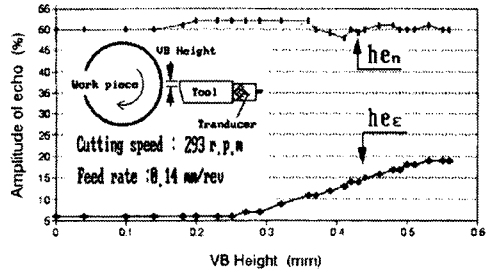


Fig. 10 Comparison of amplitude of nose echo & wear echo with respect to flank wear width growth under cutting state

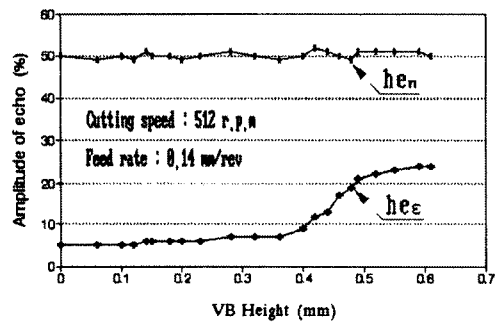


Fig. 11 Comparison of amplitude of nose echo & wear echo with respect to flank wear width growth under cutting state

공구마멸 검출민감도를 높이기 위해서 식(1)에 정의한 바 있는 특징인자 $E_R^* (\frac{he_\epsilon}{he_n} \times 100\%)$ 와 공구마멸량 V_B 과의 관계를 Fig.12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭속도에 큰 영향을 받지 않는 범위내에서 공구의 여유면 마멸량 $V_{B-Height}$ 의 증가패턴을 잘 반영하고 있으며, 특히, $V_{B-Height}$ 0.3~0.4 범위에서 E_R^* 값이 급증하는 경향을 보이고 있어 공구마멸량의 효과적인 검출과 특히, 적절한 임계값(threshold)의 설정이 가능하여 공구교환시기를 판정하는데 매우 유용하게 이

용될 수 있을 것으로 판단된다.

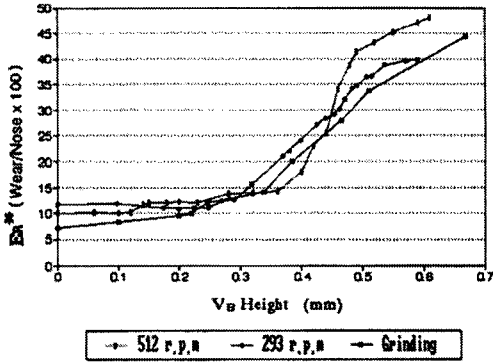


Fig. 12 Variation of extracted feature from amplitude of echo with respect to flank wear height of tool

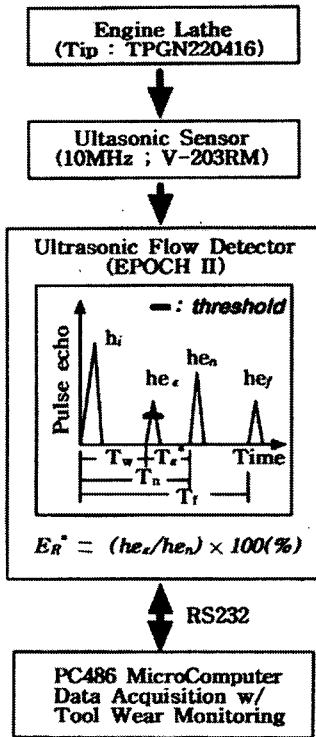


Fig. 13 Configuration of the proposed tool wear monitoring system by ultrasonic sensor method

이상의 실험결과로부터 내장형 초음파 센서와 pulse echo 법을 이용한 인프로세스 공구마멸 검출 시스템의 구성을 Fig.13과 같이 제안할 수 있다. 이 시스템은 초음파 신호의 반사와 가운데 nose 부의 반사와 he_n 으로부터 T_e^* 앞선 임의의 위치, 즉 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 ϵ 을 반영하는 반사와 he_e 에 gate를 지정하여 그때의 진폭을 측정하거나, 혹은 이에 적절한 임계값(threshold)을 설정하여, 공구의 마멸량을 검출하는 동시에 공구의 교환시기를 자동적으로 예측할 수 있도록 구성한다.

5. 결론

절삭가공에 있어서 자동화·무인화를 실현하는데 있어서 가장 중요한 해결사안중의 하나인 공구마멸의 감시와 교환시기의 설정을 효과적으로 수행하기 위한 목적으로 내장형 초음파 센서와 신호를 이용한 검출방법에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 센서를 사용할 경우, 절삭열과 온도상승은 초음파 검출신호의 신뢰성에 직접적인 영향을 미치나, 어느 특정 온도범위 이하에서는 검출신호가 안정성을 유지하므로 적절한 온도제어 및 냉각이 요구된다. 본 연구에서는 air jet 냉각장치를 구성함으로써 절삭열에 의한 영향을 최소화할 수 있었다.
- 2) 공구마멸 검출효율을 보다 높이기 위해서 특징인자로서 선정된 wear echo he_e 과 반사율 E_R^* 는 공구마멸 상태를 명확히 반영하며, 이들 두 인자를 감시하는 것에 의해 공구마멸량의 검출과 공구교환시기의 설정이 가능하다.
- 3) 본 연구에서 제안한 내장형 초음파 센서와 냉각방법, 초음파 pulse echo법에 의한 검출시스템을 이용하여 공구마멸의 인프로세스 검출이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J.Tlusty, G.C.Andrews, "A Critical Review of

- Sensors for Unmanned Machining," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 563, 1983.
2. G.F.Micheletti, W.König, H.R.Victor, "In-Process Tool Wear Sensors for Cutting Operation," Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 2, p. 483, 1976.
 3. G.Spur, F.Leonards, "Sensoren zur Erfassung von Prozesskenngrößen bei der Drehbearbeitung," Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, p. 349, 1975.
 4. 鄭穰植 外 2名, "超音波 インプロセスセンサによる工具磨滅の検出," 關西支部 第63期 定時總會講演會, No. 884-1, p. 161, 1987.
 5. G., Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools," McGraw-Hill, 1975.
 6. H.S.Kang, E.S.Chung, J.Hwang, "Detection of Tool Wear by Using the Ultrasonic In-Process Sensor," Proc. of the KSPE, Spring Annual Meeting, p. 852, 1997.