

초음파 인프로세스 센서를 이용한 공구마멸 검출

강형식*, 황준**, 고준빈***, 정의식***

Detection of Tool Wear by Using the Ultrasonic In-Process Sensor

H. S. Kang*, J. Hwang**, B. J. Ko***, E. S. Chung***

Abstract

A technique on the detection of tool wear based on the ultrasonic pulse-echo method in turning process is presented. The change in amount of the reflected energy from nose and flank of the tool can be related to the level of tool wear and mechanical integrity of the tool. that is, there exists an excellent correlation between the ultrasonic measurement and tool wear. As a results, The method is very useful for the prediction of cutting tool life and the determination of tool exchange period.

Key Words : Ultrasonic Detection(초음파 검출), Pulse echo method(펄스 에코법), Reflection ratio(반사율), Transducer(초음파 센서)

1. 서 론

최근 생산가공 현장에서 수치제어 공작기계나 머시닝센터 등이 보급되어 가공시스템의 자동화, 무인화가 급격히 이루어짐에 따라, 절삭가공시 공작물의 치수, 형상 및 공구마멸량 등의 절삭상태량을 인프로세스로 측정하기 위한 연구가 이루어지고 있으며, 이는 가공시스템의 능률과 가공정밀도 향상 등의 측면에서 대단히 중요한 과제로 되고 있다.

따라서, 지금까지 여러 가지 측정방법과 측정원리에 바

탕을 둔 공구마멸 측정용 인프로세스 센서^(1,2)가 개발되고 있다. 이들 가운데 초음파 신호를 이용한 공구마멸 검출에 관한 연구로서, 베를린 공대의 Spur 등⁽³⁾은 공구로부터 피삭재에 초음파를 투사하여 반사파가 발생하는 곳까지의 시간의 변화로부터 공구마멸량을 검출하는 방법을 제안하고 있다. 또한, 정의식 등⁽⁴⁾은 초음파 탐상법을 이용하여, 공구마멸에 따른 반사 에너지의 변화량, 즉 음압반사율에 의한 검출방법을 제시하였다. 그러나, 이들이 제시한 방법들은 절삭열에 의한 공구의 팽창이 검출결과에 커다란 영향을 미쳐서 신뢰성에 문제가 있는 것으로 지적되고

* 한밭대학교 대학원
** 충주산업대학교
*** 한밭대학교
(고준빈:kjb1002@hanbat.ac.kr)

있으며, 실용화하는데는 앞으로도 해결해야 할 많은 과제가 남아 있다.

본 연구에서는 선삭가공시 공구의 마멸에 따른 절삭공구의 nose부 와 flank부에서 반사되는 초음파 에너지의 변화, 즉 초음파 신호의 반사율을 이용하여 공구의 점진적인 마멸량을 검출하는 방법에 대하여, 여러 절삭조건하에서 실험을 행하고, 그 검출결과와 타당성을 검토하였다.

2. 측정원리

Fig. 1에 나타낸 바와같이 초음파 센서를 인서트 팁의 후단에 스프링의 압축력을 이용하여 고정시키면, 인서트 팁의 기하학적 특성에 의하여 오실로스코프의 CRT상에 송신파 h_i 과 공구인선의 nose 부와 flank 부에서 각각 반사되는 반사파 he_n 과 he_f 가 나타나며, 공구가 마멸되는 경우, nose 부의 반사파 he_n 로 부터 T_r^* 만큼 앞선곳에 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 ϵ 에 대응하는 반사파 he 가 출현하게 된다. 따라서 이들 반사파 가운데 he 와 아래의 식(1)로 정의되는 E_R^* 을 각각 특징인자로 사용하여 공구마멸 V_B 를 검출하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

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

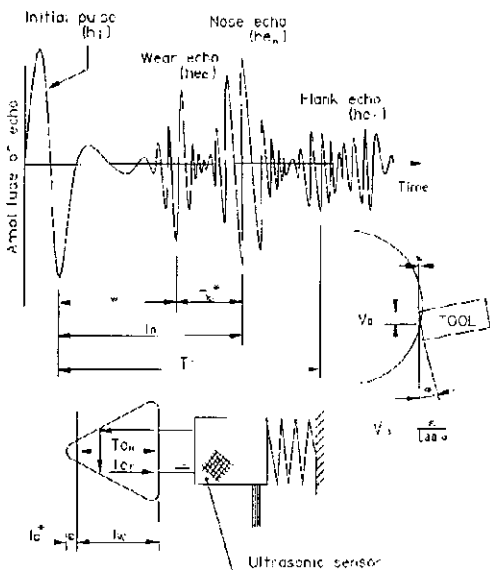


Fig.1 Wave form of tool's echo

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Table 1에는 시험장비의 규격 및 사양 대하여 나타내 있다. 시험편은 척과 심압대에 의해 지지되고 공구대는 Fig. 3과 같이 공구 홀더에 초음파 센서(transducer)삽입하고 팁을 클램핑 할 수 있도록 특별하게 설계하였다. 또한 초음파센서(10MHz, 진동자 직경:3.175mm,중심주파수 9.5MHz)는 인서트 팁의 후단면에 설치하고, 공구와 초음파 센서의 탐촉면이 항상 일정한 접촉면압을 유지하도록 센서의 후면에 스프링을 이용하여 가압 하였으며, 절삭온도의 영향을 없애기 위하여, 인서트 팁과 초음파 센서 사이에 delay-line 을 삽입하고, 상온에서 압축된 공기를 공기노즐을 통하여 공구 끝 칩 생성 부위에 분사하다.

한편, 데이터 처리는 디지털 초음파 발생기(digital ultrasonic pulser/receiver)를 이용하여 초음파 센서로 연결되어

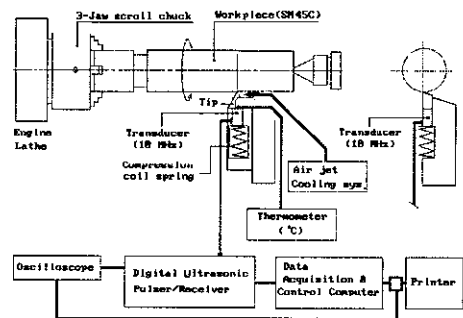


Fig. 2 Schematic representation of the experimental set-up

Table 1 Specifications of experimental equipment

No	Equipment name	Description and Specification
1	Engine Lathe	Nam Sum Co.(400×1900mm)
2	Transducer	INC(V-203-RM) 10MHz
3	Ultrasonic equipment	Panametric Epoch II (Distal)
4	Oscilloscope	Tektronia 2230 0,15div/MS,100MHz
5	Acquisition&Control computer H/W	S/W:EPOCH II Interface V.3.21
6	Digital Thermometer	Hung Chang(TM1300K)
7	Tool Microscope	Distance readout: 0.005 div/mm
8	Compressed Air Engine	Power : 1/2 HP 220V

처음 입사한 초음파 신호와 반사파 신호를 디지털 처리할 수 있도록 하였다.

또한 처리 컴퓨터에 보내어져 RF 신호 또는 FFT신호 형태로 출력되어지고, 본연구의 목적에 부합된 신호를 파 일저장하였으며, 매 절삭마다 공구의 노우즈 부와 플랭크 부의 반사파, he_n 및 he_f 의 진폭과, 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 ϵ 에 대응하는 반사파, he_c 을 측정하여, 식(1)로부터 정의된 반사율 E_R^* 값을 이용하여 공구마멸을 측정하였다. 또한, 공구 인선부의 마멸량 $V_{B-height}$ 와 $V_{B-width}$ 는 매실험 전후에 공구 현미경을 이용하여 측정하였다.

처음 초음파 발생기는 0점 조정을 한후 초경을 한후 초경합금 팁(P20)의 유속속도가 측정되었고, 그값은 7025m/s이며, 팁의 길이를 토대로 팁 끝 부위 발생하는 신호들을 구간 설정되며, 오실로스코프(oscilloscope)와 연결하여 아나로그 신호로 검증하였고 프린터와 연결 데이터 및 파형 출력을 행하였다. 또한 실험에서는 3가지의 패턴의 공구마멸 시험을 행하였는데 처음에는 연삭에 의한 인위적으로 공구에 마멸을 주어 초음파 파형을 살폈고, 실제 시험편의 절삭 시험에서는 저속과 고속절삭 2가지 형태를 분석한 결과 그때 각각의 절삭조건이 Fig. 5~12에 나타나 있다.

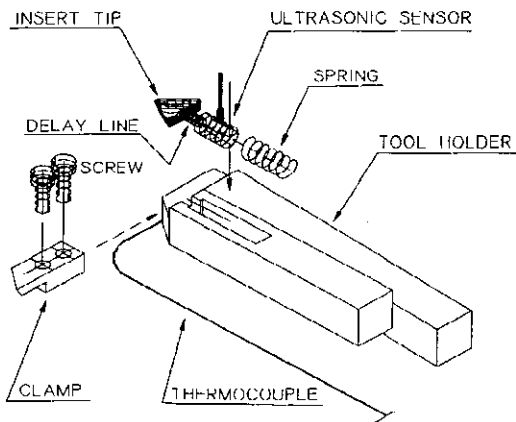


Fig. 3 Tool holder and transducer assembly

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 미칠 것으로 생각된다. 이러한 절삭열이 초음파 신호에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보기 위하여, air jet 분사에 의한 공냉절삭과 비공냉절삭을 행하였을 때, 인서트 팁의 후단면과 초음파 센서의 선단면 사이에 열전대를 삽입하여 두 매질간의 접촉온도를 측정하고, 그때의 echo의 변화를 조사하여 Fig. 4~Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 4는, 비공냉 상태로 절삭가공을 행하지 않은 상태에서, 인서트 팁의 선단부위에 히터를 이용하여 인위적인 열을 가했을 때, nose echo (he_n)의 진폭변화를 조사한 것으로서, 온도에 따른 he_n 의 변화는 상온(약20℃)으로부터 40℃까지는 거의 일정한 값을 유지하다가, 그 이상의 온도가 되면 he_n 의 진폭이 상승 곡선을 알 수 있다. 또한, Fig. 5는 비공냉 절삭을 행하였을 때, 두 매질간의 접촉온도와 he_n 과의 대응관계로 나타난 것으로서, 접촉온도 약 45℃ 이내의 범위에서 he_n 은 좁은 폭으로서 서서히 증대하다가 그 이상이 되면 상승곡선을 알 수 있다. 이와같은 결과는, 절삭열이 초음파의 검출신호에 직접적인 영향을 미치고 있음을 나타내며, 따라서 초음파 신호를 이용하여 공구의 마멸을 측정하는 경우, 절삭과정에서 발생하는 절삭열의 영향을 최소화 할 수 있는 방안이 반드시 마련되어야 함을 보여주고 있다. 또한 이들 결과에서 매우 흥미 있는 것은 상온으로부터 약45℃ 이하의 접촉온도 범위 내에서는 초음파 검출신호에 커다란 영향을 주지않고 있어서, 적절한 냉각법에 의해 접촉온도를 일정하게 유지하여 절삭하는 경우, 이러한 절삭온도의 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 생각된다.

이점을 확인하기 위하여, 동일절삭조건에서 air jet 냉각에 의해 공냉절삭을 행한 경우와 비공냉 절삭을 행하였을 때 he_n 의 변화를 절삭시간과의 대응관계를 조사하여 그 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 이들 그림에서 볼 수 있는 바와같이, 비공냉 절삭시(Fig.7) he_n 의 진폭은 약 15%의 비교적 넓은 범위에 걸쳐 절삭시간에 따라 일정한 비율로 증대하는 경향을 나타내고 있으나, 공냉절삭시(Fig.6)는 공구의 마멸정도에 따라 약간의 정도 차이는 있으나, 각각의 공구상태에 대하여 거의 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 채용한 air jet 냉각에 의한 공냉절삭방법은 초음파 검출에 미치는 절삭온도의 영향을 최소화하는데 효과가 있을 것으로 생각된다.

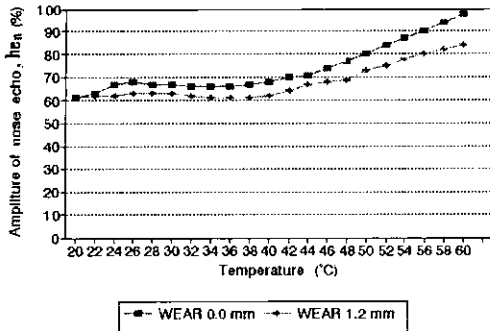


Fig. 4 Temperature vs amplitude of nose echo

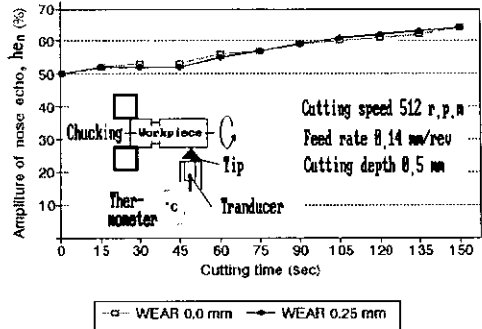


Fig. 7 Relationships between cutting time and amplitude of nose echo (without air jet cooling cut)

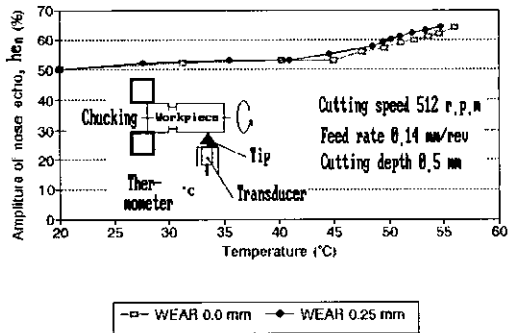


Fig. 5 Temperature vs amplitude of nose echo (without air jet cooling cut)

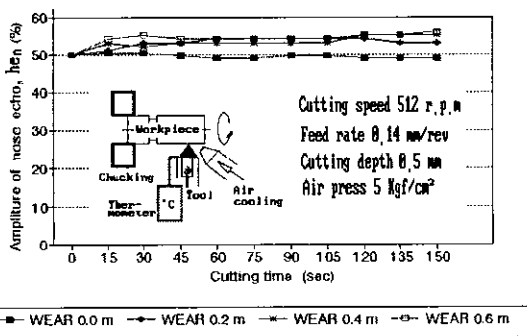


Fig. 6 Relationships between cutting time and amplitude of nose echo (with air jet cooling cut)

4.2 초음파 신호에 의한 공구마멸 검출

먼저, 공구마멸⁽⁵⁾에 따른 초음파 검출의 거동특성을 조사하기 위하여, 그라인딩 작업에 의해 공구에 인위적인 마

멸을 주었을 때 공구마멸($V_{B-width}$ 및 $V_{B-height}$)에 따른 echo의 변화, h_{ec} 와 h_{en} 을 측정 한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 이들 그림에서 볼 수 있는 바와같이, 공구의 노스반경(nose radius)으로 둘러 쌓인 부분에서 반사되는 nose echo, h_{en} 은 $V_{B-width}$ 와 $V_{B-height}$ 가 증대함에 따라 약 10% 미만의 좁은 범위에서 증가하다가 다시 감소하고 있는데 반하여, h_{ec} 은 동일 마멸조건에서 약 40% 범위의 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 큰 폭으로서 점진적으로 증대하고 있다. 이 경우 일반적으로 절삭중 공구가 마멸되면 공구와 공작물과의 접촉면적이 증가하고, 동시에 초음파 입사 에너지의 일부가 공작물에 흡수되어 초음파의 반사와 h_{en} 의 진폭이 감소될 것으로 예상되나⁽⁴⁾, 여기에서는 매 사이클의 절삭이 끝난 후 공구와 공작물이 비접촉된 off-line 상태에서 echo의 진폭을 측정하였기 때문에, 이러한 초음파 에너지의 흡수효과 보다는 공구마멸에 따른 인선 후퇴에 의한 반사에너지의 증대효과가 더욱 크게 작용하여 h_{ec} 의 진폭이 점진적으로 증대하고 있는 것으로 생각된다.

따라서 이상의 결과에 따르면, 측정 한 초음파 신호의 반사와 가운데 h_{ec} 은 공구마멸량을 측정하는데 유용하게 이용될 수 있으며, 이 경우 특히 주목할 것은 $V_{B-width}=1mm$ 와 $V_{B-height}=0.3mm$ 의 부근에서 h_{ec} 의 진폭이 급격히 증대하고 있는데, 이는($V_{B-height}=0.3mm$) 공구수명 판정기준과 관련된 ISO의 규정을 충족시키는 것으로서 매우 흥미 있는 결과로 생각된다.

이번에는 절삭깊이 0.5mm, 이송량 0.14mm/rev으로 일정하게 하고, 주축의 속도를 각각 293rpm과 512rpm으로 하여, air jet 공냉상태에서 절삭실험을 행하였을 때의 echo 변화를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 이들 그림에

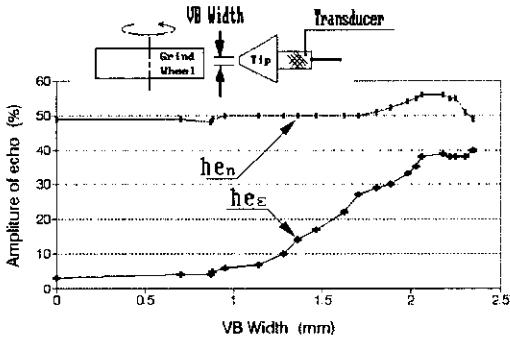


Fig. 8 Relations of tool wear and amplitude of echo for artificially worn by grinding

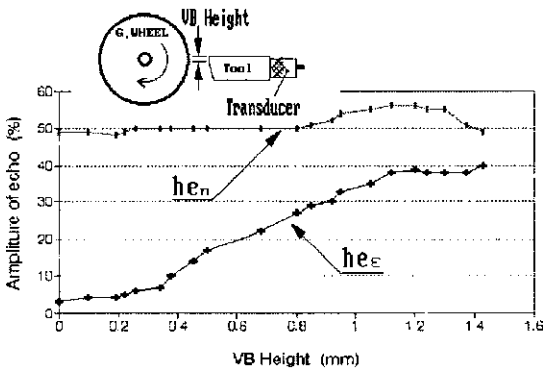


Fig. 9 Relations of tool wear and amplitude of echo for artificially worn by grinding

서 볼 수 있는 바와같이, 공구의 nose 부의 반사되는 반사파 h_{en} 은, 앞의 실험결과와 마찬가지로, 공구마멸량 V_{B-High} 의 증가와 관계없이 불규칙적으로 미소의 진폭변화를 나타내고 있으나, 반사파 h_{ee} 은 절삭초기에는 거의 일정한 값을 유지하다가 저속의 $V_{B-High} \approx 0.3\text{mm}$ 와 고속의 $V_{B-High} \approx 0.4\text{mm}$ 에서 급격히 증대하여, 공구의 마멸상태를 매우 명확하게 반영하고 있다.

또한, Fig. 12는 위의 두 결과를 절삭횟수에 따른 E_R^* ($\propto \frac{he_e}{he_n} \times 100(\%)$) 과의 대응관계로 나타낸 것으로서, 이 경우에도 절삭속도에 따른 공구마멸의 패턴, 즉 고속절삭에서 공구의 마멸이 급진적으로 진행되는 경향을 아주 잘 반영하고 있다. 따라서, 이상의 결과로부터 본 연구에서 사용한 초음파 신호의 반사파 he_e 과 반사파의 비율 E_R^*

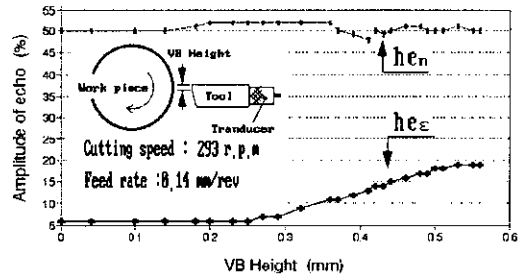


Fig. 10 Relations of tool wear and amplitude of echo for low speed cutting operations

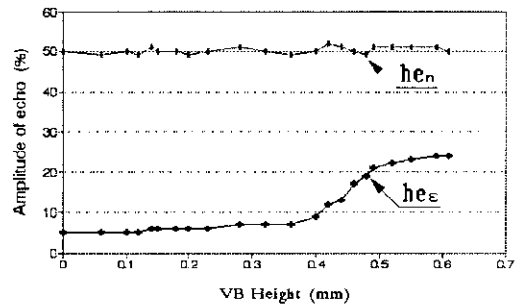


Fig. 11 Relations of tool wear and amplitude of echo for high speed cutting operations

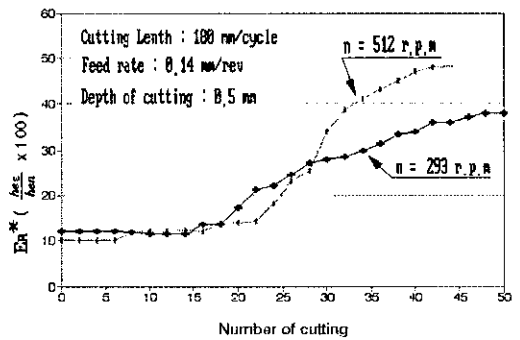


Fig. 12 Relations of cutting numbers and the ratio of reflected echo amplitude

은 공구의 마멸상태를 검지하는데 매우 유용하게 이용될 수 있으며, 이들 두값에 적당한 임계값을 설정함으로써 공구의 교환시기를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, Fig. 13은 이상에서 얻은 실험결과를 바탕으로 하여 초음파 pulse echo 법을 이용한 공구마멸검출시스템의

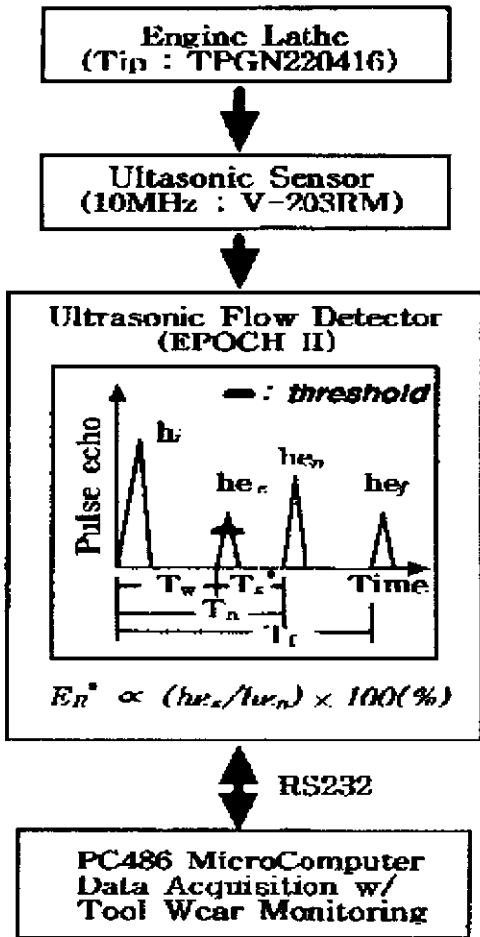


Fig. 13 Configuration of the proposed tool wear monitoring system by ultrasonic method

구성을 제안한 것으로서, 이 시스템은 초음파 신호의 반사파 가운데 nose 부의 반사파 h_n 으로부터 T_n^* 앞선 임의의 위치, 즉 공구마멸에 따른 인선의 후퇴량 e 을 반영하는 반사파 h_e 에 gate 를 지정하여 그때의 진폭을 측정하거나, 혹은 이에 적절한 임계값(threshold)을 설정하여, 공구의 마멸량을 검출하는 동시에 공구의 교환시기를 자동적으로 예측할 수 있도록 구성한 것이다

5. 결론

선삭가공에서 초음파 신호를 이용하여 공구의 마멸검출 방법을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭열은 초음파 검출신호에 직접적인 영향을 미치며, 어느 특정 온도범위에서는 검출신호가 안정성을 유지하므로, 이 온도구간을 넘지 않도록 air jet 냉각 장치를 구성함으로써 절삭열의 영향을 최소화할 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 특징인자로 사용한 반사파 h_e 과 반사율 E_R^* 는 공구마멸상태를 명확히 반영하며, 이들 두 인자를 감시하는 것에 의해 공구마멸량의 검출이 가능하다.
- (3) 제안한 초음파 pulse echo 법에 의한 검출시스템을 이용하여 공구마멸의 on-line 검출이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) J.Thusty, G.C.Andrews, "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining", Annals of the CIRP, Vol.32, 2, p.563, 1983
- (2) G.F.Micheletti, W.Koenig, H.R.Victor, "In-process Tool Wear Sensors for Cutting Operati-on", Annals of the CIRP, Vol.25,2, p. 483, 1976.
- (3) G.Spur, F.Leonards, "Sensoren zur Erfassung von Prozesskenngrößen bei der Drehbearbeitung", Annals of the CIRP, Vol.24, 1, p. 349, 1975
- (4) 鄭 熾 植, 外2名, "超音波インプロセスセンサによる工具磨耗の検出", 關西支部 第63期 定時總會講演會, No884-1, p. 161, 1987
- (5) 이승일 외2명 "엔드밀 변위에 의한 공구 파손 검출", 한국공작기계학회 제8권제2호, pp. 100~107, 199