

신경회로망을 이용한 원격모니터링을 위한 가공공정의 공구마모와 표면조도에 관한 연구

권정희*, 장우일*, 정성현*, 김도연*, 홍대선⁺

(논문접수일 2010. 12. 27, 수정일 2011. 09. 09, 심사완료일 2011. 09. 09)

A Study on the Tool Wear and Surface Roughness in Cutting Processes for a Neural-Network-Based Remote Monitoring system

Jung-Hee Kwon*, U-Il Jang*, Seong Hyun Jeong*, Do-Un Kim*, Dae Sun Hong⁺

Abstract

The tool wear and failure in automatic production system directly influences the quality and productivity of a product, thus it is essential to monitor the tool state in real time. For such purpose, an ART2-based remote monitoring system has been developed to predict the appropriate tool change time in accordance with the tool wear, and this study aims to experimentally find the relationship between the tool wear and the monitoring signals in cutting processes. Also, the roughness of workpiece according to the tool wear is examined. Here, the tool wear is indirectly monitored by signals from a vibration sensor attached to a machining center. and the wear dimension is measured by a microscope at the start, midways and the end of a cutting process. A series of experiments are carried out with various feedrates and spindle speeds, and the results show that the sensor signal properly represents the degree of wear of a tool being used, and the roughnesses measured has direct relation with the tool wear dimension. Thus, it is concluded that the monitoring signals from the vibration sensor can be used as a useful measure for the tool wear monitoring.

Key Words : Tool wear(공구 마모), Remote monitoring(원격 모니터링), Vibration sensor(진동 센서), ART2(ART2), Surface roughness (표면조도)

1. 서론

최근의 생산시스템은 제품의 단가를 낮추면서 제품을 향상시킬 수 있는 유연성을 가진 무인 시스템이 널리 도입되어 사용되고 있다. 이러한 자동화된 생산 시스템에서 생산 설비의 상태 모니터링은 시스템의 신뢰성 및 가동률 향상을 위해 중요한 부

분이며 많은 연구가 진행되고 있다.

제조공정에서 기계 가공의 효율성과 생산품의 품질은 공구상태의 영향을 받는데, 이는 마모 및 파손된 공구는 작업의 안전성 및 가공시간의 손실뿐 아니라 공정성능과 생산품의 품질 저하에 더 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 자동화의 관점에서 공구가 적절한 시기에 교체 될 수 있도록 공구마모진행 상태를

* 창원대학교 대학원 기계설계공학과

+ 교신저자, 창원대학교 메카트로닉스공학부 (dshong@changwon.ac.kr)

주소: 641-773, 경남 창원시 사림동 9번지

모니터링하여 공구 파손 방지를 위한 시스템 개발이 요구되고 있다.

공구 모니터링에 관한 연구 동향을 살펴보면, 고정현⁽¹⁾ 등이 터치센서를 이용한 선삭공정에서의 공구 모니터링 방법이 제안되었고, 이외에도 Jantunen⁽²⁾에 드릴링공정에서의 여러 가지 간접적인 공구마모 검출 방법들도 소개되어 있다. 고장진단 기법으로는 이진⁽³⁾ 등의 모터 전류의 웨이브렛 신호변환을 이용하는 방법과 심재환⁽⁴⁾ 등이 전산 알고리즘을 이용하는 방법이 제안되었다. 한편, 김문성⁽⁵⁾ 등은 다층 신경회로망을 적용하였으나, 이 다층 신경회로망은 새로운 고장이 발생하면 재학습을 해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 이인수⁽⁶⁾ 등이 ART2(Artificial resonance theory 2) 신경회로망 알고리즘을 모터제어 선형 시스템의 다중고장진단에 적용하였고, 장상주⁽⁷⁾는 이 ART2 알고리즘을 진동센서를 이용한 기계 성능저하에 적용하였다.

생산 가공 시스템에서 공구의 마모로 인한 소재의 파손이나 가공 정밀도, 표면조도 정도는 생산품의 품질과 생산성에 직접적인 영향을 미치므로 실시간 공구 상태 감시는 중요하게 인식되고 있다.

밀링작업에서 작업공구 실시간 모니터링을 위하여 노민석^(8,9) 등의 연구에서 진동센서를 이용한 원격 모니터링 시스템을 구축하여 그 성능에 대한 연구가 수행되었다. 그러나 여기에서는 가공 완료 시점의 공구 마모량만을 측정하였고 가공 중간 단계의 공구마모량은 측정하지 않았다. 따라서 가공 중간단계에서의 공구 마모량과 모니터링 신호간의 관계는 제대로 규명되지 않아, 본 연구에서는 일련의 가공 공정에 대하여 가공 초기와 완료시점의 공구 마모량은 물론 가공 중간과정의 공구 마모량도 측정하여, 이 공구 마모량과 모니터링 센서신호 간의 관계를 보다 상세하게 분석하는데 그 목적을 둔다.

또한, 가공 중간단계에서 공작물의 표면조도⁽¹⁰⁾를 측정하여 모니터링 결과를 검증하도록 한다. 이를 위하여, 본 연구에서는 실제 공작기계에서 철강소재의 가공 실험을 수행하고, 공구 근처에 설치된 진동센서 신호를 이용하여 이를 개발된 신경회로

망 원격모니터링 시스템⁽¹¹⁾에 의해 실시간으로 공구마모상태를 모니터링하고자 한다.

본 연구 결과를 보면 전체 가공공정 중의 공구마모량과 모니터링 신호, 그리고 공작물의 표면조도는 직접적인 관계를 갖고 있음을 보이며, 따라서 본 실시간 원격 모니터링 시스템은 실제 가공공정에서 절삭 공구의 마모상태를 모니터링 하는데 유용하고, 또한 적절한 공구 교체시기를 결정할 수 있음을 보인다.

2. ART2를 이용한 모니터링 시스템

가공공정 모니터링 시스템은 기계의 상태나 공구를 감시(Monitoring)하고 기계의 고장이나 공구의 교체시기를 사전에 예측할 수 있는 하나의 수단이다. 이러한 모니터링 시스템을 이용하면 기계의 공장이나 공구의 교체시기를 사전에 예측할 수 있어 실제 산업 현장의 실시간 유지 보수와 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1은 개발되어 있는 모니터링 시스템⁽¹¹⁾의 개념을 나타낸다. 이는 기계로부터 상태에 대한 정보를 센서 신호나 제어기 신호형태로 받고, 소프트웨어의 형태로 구현될 수 있고, 향후 IC 형태로 기계에 부착할 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 모니터링 시스템을 이용하여 실제 산업 현장에서 사용 중인 공작 기계의 공구마모 정도를 평가하는데 적용하고자 한다.

2.1 ART2를 이용한 모니터링 시스템

ART2를 이용한 모니터링 시스템은 정상상태신호와 고장신호를 모두 입력패턴으로 할 수 있고, 이 패턴들에 의해 학습을 한다. 이에 대한 개념을 Fig. 2에 나타낸다. 학습의 결과로서 정상 또는 고장신호를 대표하는 여러 개의 클래스(Class)들이 생성되는데, 이 클래스들은 이후 모니터링시 입력되는 센서신호가 정상 또는 마모인가를 판단하는 기준이 된다.

ART2를 이용한 모니터링 시스템은 학습의 결과로 정상상태와 고장신호에 대한 클래스를 생성시키고, 이렇게 학습한 ART2를 이용한 모니터링 시스템은 이후 기계의 성능저하 평가를 위

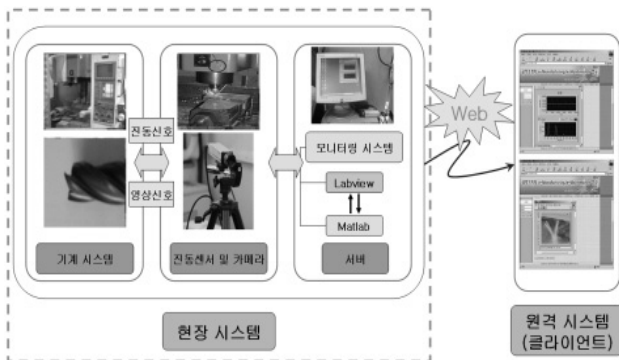


Fig. 1 Overall monitoring system

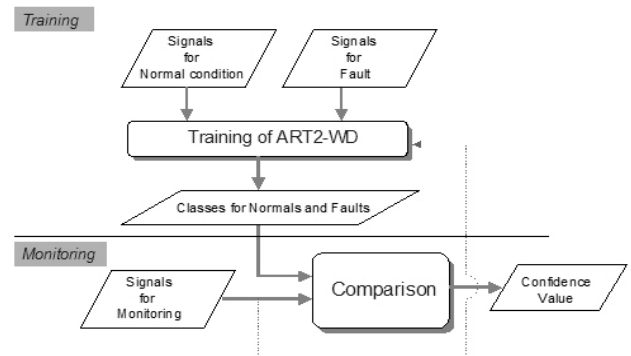


Fig. 2 Concept of the ART2 monitoring system

한 모니터링에 사용된다. 이 그림에 나타나 있듯이, 새로운 신호가 들어오면 이 신호는 학습된 클래스들과 비교하여 최종적인 유사도(Vigilance)를 출력한다. 그리고 새로운 신호를 추가로 정상상태나 고장신호로 학습을 시켜야 되는 경우에는 ART2를 재학습시킨다.

한편, 본 ART2 알고리즘에 의해 학습을 하는 경우 어느 정도의 유사도로 패턴을 분류할 것인가가 관심의 대상이 된다. 이를 결정하는 인자가 임계 유사도(Threshold vigilance) ρ 인데, 이 ρ 는 1이하의 값으로 설정한다. 이 값을 높게 설정하면 분류 클래스 수는 증가하고, 낮게 설정하면 클래스 수는 감소한다⁽¹²⁾. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 ART2를 이용한 모니터링 시스템의 순서를 나타낸다.

Fig. 3을 보면 본 방법은 크게 학습(Training)과 모니터링의 두 부분으로 구분되어 있고, 또한 모니터링시 추가 학습이 필요한 경우에는 재학습(Re-training)을 행한다. 여기서 재학습 판단은 사용자가 결정한다.

본 연구에서는 학습 데이터는 진동센서(SA51SC)를 이용하여 데이터를 획득하였고 NI의 DAQ 보드를 통해 획득된 신호를 ART2 알고리즘의 입력패턴으로 입력하게 된다.

2.2 성능평가지표

본 연구에서는 ART2 알고리즘의 출력을 이용하여 패턴간의 유사도(Vigilance)를 계산하고 이를 성능평가지표로 사용한다. 이 유사도는 두 패턴이 같은 경우 1이고, 완전히 다른 경우에는 이론적으로 0.7462의 값을 갖는다⁽¹²⁾. 이 유사도는 공구마모 신호로부터 계산되는데, 이는 뒤에서 다루게 될 가공에 사용 중인 공구의 마모량과 공작물의 표면조도를 간접적으로 나타내는

지표에 해당된다. 따라서 본 모니터링 시스템에서는 이 유사도가 성능지표 값을 계산하는 기준이 된다. 본 연구에서는 진동센서에 의해 얻어진 k 번째 입력신호 I_k 의 유사도 ρ_k 를 아래의 식에 의해 계산한다.

$$\rho_k = \bigvee_j \{ \rho(I_k, C_j) \}, j = 1, 2, \dots, M.$$

여기서, $\rho(I_k, C_j)$ 는 패턴 I_k 와 미리 학습되어진 클래스 C_j 간의 유사도를 나타내고, M 은 사전에 학습된 정상상태 클래스 수이며, \bigvee 는 최대 연산자(Maximum operator)를 나타낸다. 위 식을 살펴보면 임의의 모니터링 신호에 대한 성능지표는 그 모니터링 신호와 사전에 학습된 정상상태 클래스들 간의 유사도 중 최대값을 그 성능지표로 취한다는 것을 의미한다.

3. 실험 내용

3.1 실험장치

실험은 공작기계인 머시닝센터에 개발된 모니터링 시스템을 구축하여 실시하였다. 공구의 진동을 측정하여 공구의 마모 정도를 측정하는 시스템으로 공구에 직접적으로 설치하면 가장 신뢰할 수 있는 데이터를 획득할 수 있으나, 이는 현실적으로 불가능하므로 공구의 이송부가 공구에 가장 근접한 이 이송부에 가속도 센서를 부착하여 진동 신호를 획득하였다. 실험 장치에 설치된 가속도 센서를 이용하여 획득한 진동 데이터를 서버 PC에서 Labview를 이용하여 FFT변화 후, 이 데이터는 로컬 PC에서 개발된 ART2 알고리즘에 의해 모니터링 된다. Fig. 4는 실험에 이용된 공작기계인 머시닝센터에 설치된 모니터링 시스템의 모습이다.

실험에 사용된 공구는 정삭용 고속도강 엔드밀($\phi 16$)을 사용하였으며, 사용된 소재로는 S45C 계열의 탄소강 재질로 실험을 실시하였다.

3.2 실험 조건

실험의 가공 조건으로 공구의 회전속도(rpm), 이송속도(mm/min), 가공깊이(mm), 공구 날수, 절삭력 크기(N) 등의 가공 조

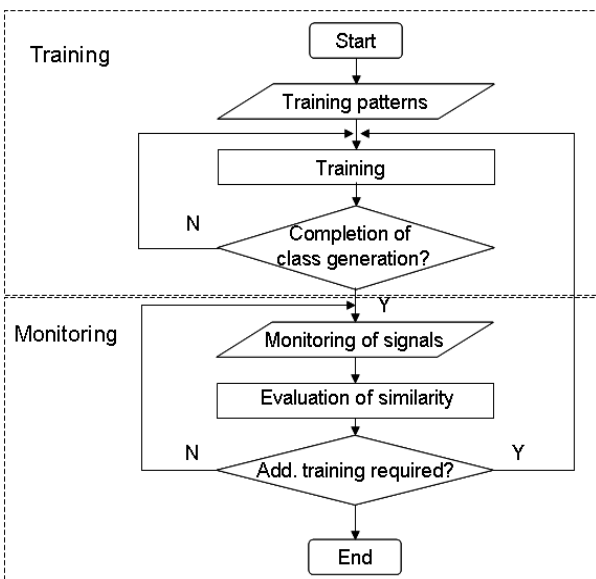


Fig. 3 Flow chart of ART2 monitoring system algorithm

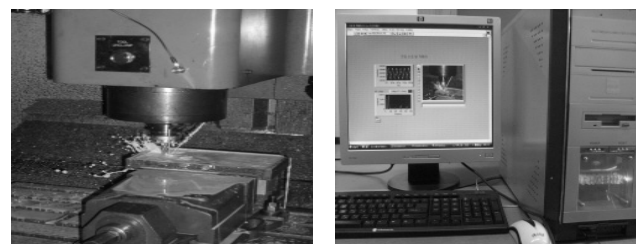


Fig. 4 Installation of the monitoring system

Table 1 Experiment condition

	Feed rate (mm/min)	Rotational speed (rpm)
CASE 1	100	100
CASE 2	100	200
CASE 3	100	300
CASE 4	200	300
CASE 5	300	300

건 중에서 가공 품질과 가공속도에 가장 큰 영향을 미치는 공구의 회전속도와 이송속도를 고려하여 총 5개의 케이스에 대하여 공구마모도와 이에 따른 소재의 표면조도를 측정하였다. Table 1은 실험에 사용된 실험조건을 나타낸다.

구현된 모니터링 시스템을 이용하여 학습데이터와 모니터링 데이터를 모두 획득한 후 랩뷰(Labview)에서 FFT형태로 출력된 데이터를 이용하여 매트랩(Matlab)으로 만들어진 ART2 알고리즘에 의해 학습 및 모니터링하였다. 공구의 사용초기에는 마모가 없는 상태이므로 초기의 신호는 정상신호로 볼 수 있고, 본 연구에서는 초기 10분간의 데이터를 정상신호로 학습하고 이후 작업 시간의 데이터를 모니터링하는 방법을 사용하였다. 또한 가공 전 상태를 포함하여 약 3시간 간격으로 공구의 마모량 정도와 소재의 표면조도를 측정하였다. 여기서 데이터 획득 주기의 샘플링 시간은 3s이고, 사용된 진동센서의 주파수 범위는 0~500Hz이다. 따라서 초기 10분간 200개의 데이터를 정상 학습신호로 사용한다.

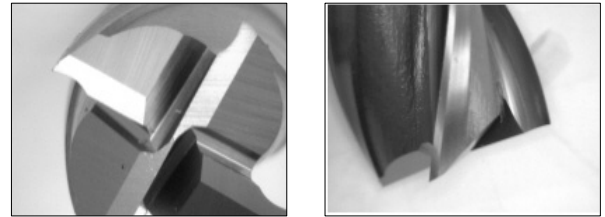
3.3 측정 방법 및 결과 분석

사용한 공구를 이용하여 성능지표 값을 결정하기 위해 작업이 끝난 후의 공구를 이용해 공구의 마모량을 측정하였다. 일반적으로 밀링 공구의 마모량은 주로 균일 플랭크 마모가 국부적으로 발생하는 부 플랭크 마모를 기준으로 삼는데⁽¹³⁾, 본 실험에서는 엔드밀이 공작물과 접촉하는 엔드밀 날끝 밀면 부위에서 최대 부 플랭크 마모가 발생하였다. 따라서 이 최대마모량을 기준으로 공구마모정도를 판단하였고, 여기서 공구 마모량은 공구 현미경을 사용하여 측정하였다.

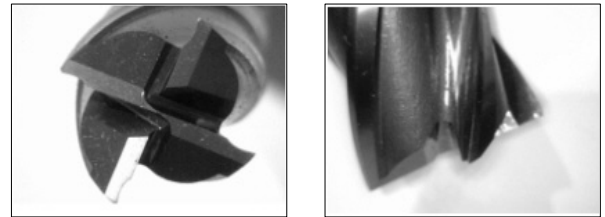
현미경을 이용하여 공구 끝단의 정면부분과 측면부분을 촬영하여 가공전의 마모량을 0으로 하고 3시간 간격 기준으로 총 4구간을 나눠서 가공 시에 공구의 마모 정도를 측정하였다. Fig. 5는 공구의 끝부분을 촬영한 후 공구 마모량을 현미경으로 측정한 화면이다.

표면조도 측정법은 축침법을 사용하여 측정하였으며, 표면조도의 기준은 중심선 평균거칠기(R_a)를 사용하였다.

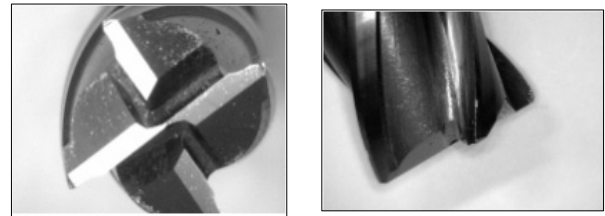
측정 1 : 정상상태(가공 전)



측정 2 : 3시간 가공 후(0.105mm)



측정 3 : 6시간 가공 후(1.907mm)



측정 4 : 9시간 가공 후(2.179mm)

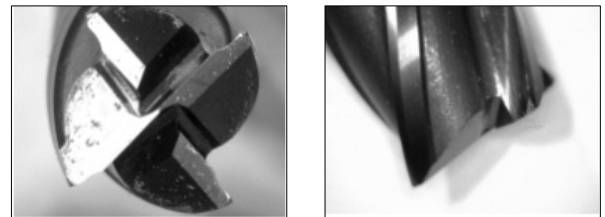


Fig. 5 Measurement of the tool wear using a microscope

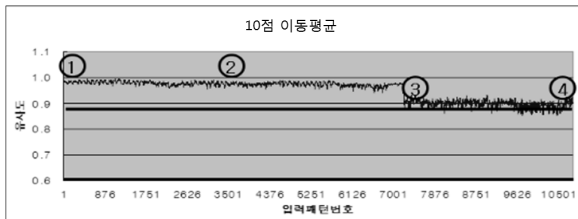
3.4 실험결과

가공 실험을 실시한 공구를 대상으로 초기 10분간 얻은 센서 신호를 정상신호로 보고 이 데이터를 이용하여 ART2를 학습하였다. 그리고 이 이후부터 작업이 끝날 때까지의 데이터를 모니터링 데이터로 정하고 분석하였다. 여기서, 사용된 임계유사도는 $\rho_t=0.89$ 이다.

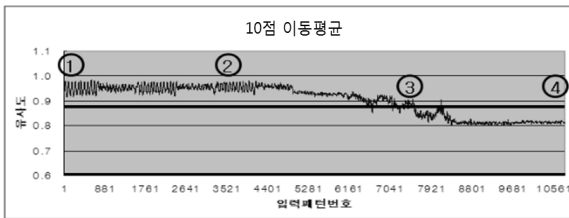
임계유사도 0.89 이하의 유사도가 나타나게 되면 이상신호로 초기 정상 신호와 다른 신호의 값으로 공구의 마모가 발생된 것으로 판단할 수 있다. Fig. 6은 각 케이스별 모니터링 결과를 나타내고 그래프의 굵은 직선은 임계유사도 값을 의미하며 원숫자는 공구의 측정 시기를 나타낸다.

진동신호로부터 얻은 원래의 모니터링 데이터는 절삭유의 비산현상 및 센서 노이즈의 영향으로 인하여 예기치 않게 낮은 유사도를 나타내는 경우가 종종 발생한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Fig. 6은 원래 얻은 모니터링 데이터에 통계 기

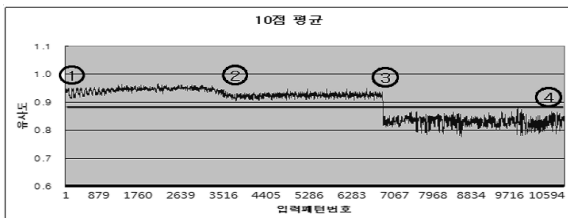
법 중의 하나인 이동평균법⁽⁸⁾을 적용하여 얻은 결과로서, 이는 원 데이터에 비해 유사도 변화 경향을 더 뚜렷하게 나타낸다. 이 이동 평균법 사용 시 사용하는 데이터의 개수에 따라 결과가 달라지는데, 본 실험에서는 초기 3시간 이내의 정상상태 구간에서 5점 평균을 적용하면 1,000개 데이터 중 1~2개의 유사도가 임계유사도 값 이하로 나타났으나 10점 평균사용 시에는 이러한 현상이 나타나지 않아, 여기에서는 10점 평균값을 사용하였다.



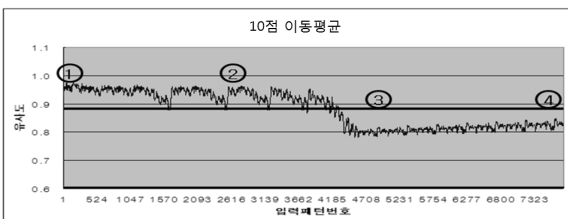
(a) CASE 1(100rpm, 100mm/min)



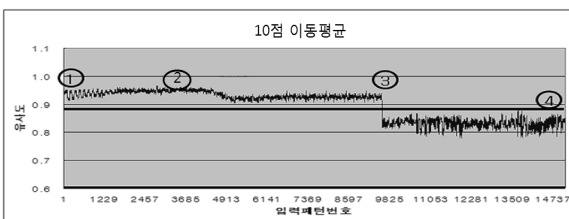
(b) CASE 2(200rpm, 100mm/min)



(c) CASE 3(300rpm, 100mm/min)



(d) CASE 4(300rpm, 200mm/min)



(e) CASE 5(300rpm, 300mm/min)

Fig. 6 Monitoring results

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 임계유사도를 나타내는 굵은 직선 아래의 값은 공구마모 신호로 볼 수 있는데, 다음으로는 이에 대하여 공구마모량과 공작물의 표면조도를 측정하여 이를 규명하고자 한다. 이 모니터링 실험에서 CASE 1과 2에서는 약 3시간 주기(데이터 수 약 3,600개에 해당)로 진행 중인 가공을 일시 중지하고 공작물을 탈착하여 표면조도를 측정하였다(Fig. 6(a)와 (b)). 그리고 CASE 3~5에서는 원칙적으로 3시간 기준으로 공작물의 표면조도 측정을 하되, 이 때 실험 현장에서 가공 시 발생하는 소음과 공작물의 상태를 보아 마모가 극히 없다고 판단되는 경우에는 표면조도 측정과정을 생략하고 가공을 계속하였다(Fig. 6(c)의 ②-③구간과 Fig. 6(e)의 ②-③구간). 이와 반대로 3시간이 경과되지 않더라도 이상 소음 발생 시에는 가공작업을 중지하고 표면조도를 측정한 후에 실험을 재개하였다(Fig. 6(d)의 ②, ③지점과 Fig. 6(e)의 ③지점).

공구의 마모 상태와 그에 따른 소재의 표면조도 상태를 비교한 결과를 Table 2에 나타낸다. 가공 초기의 공구 마모량을 0으로 가정하고, 이 표에 나타난 각 수치는 Fig. 6의 각 경우에 나타나 있는 지점에서 측정된 결과를 의미한다.

CASE 1의 모니터링 결과를 보면 가공 완료시까지 공구마모가 크게 발생하지 않았다고 판단된다. 실제로 공구의 마모량을 측정된 결과 어느 정도의 마모가 발생하였으나(Table 2), 이 경우 공작물의 표면조도는 3.544 μ m 이하로서 가공 정밀도에는 그다지 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 2 Surface roughness and tool wear comparison

CASE	Measuring point	Wear dimension (mm)	Surface roughness (μ m)
CASE 1	①	0	-
	②	0	3.150
	③	0.984	3.240
	④	1.609	3.544
CASE 2	①	0	-
	②	0.243	5.767
	③	1.715	6.050
	④	2.399	8.805
CASE 3	①	0	-
	②	0.105	5.435
	③	1.907	6.050
	④	2.179	8.815
CASE 4	①	0	-
	②	0.816	4.403
	③	1.907	7.280
	④	2.168	9.846
CASE 5	①	0	-
	②	0.981	5.767
	③	1.879	6.609
	④	2.209	9.768

CASE 2~CASE 4의 경우를 보면 가공이 진행됨에 따라 표면조도가 커짐을 볼 수 있고(Table 2), 모니터링 신호가 감소하여 임계 유사도보다 낮아지게 되는 ③지점에서 공구마모량과 표면조도가 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 실험 결과, 공구마모가 진행되면 필수로 공구의 성능 평가지표가 낮아지게 되고, 모니터링 신호가 임계유사도보다 낮아지게 되는 시점을 전후로 표면조도가 악화됨을 알 수 있다. 이는 공작물의 가공품질을 유지하기 위해서는 성능평가 지표가 임계유사도보다 낮아지는 시점에서 새로운 공구로 교체하여야 함을 의미한다.

한편, Table 2의 공구마모가 급격하게 낮아지는 지점, 즉 CASE 2~CASE 5의 ③지점에서 약 1.8mm 이상의 과도한 공구마모가 발생되었음을 보인다. 이는 실제 현장적용시에는 보다 낮은 공구마모량을 검출할 수 있도록 개선되어야함을 의미한다. 그리고, 모니터링신호를 처리하는데 이동평균법을 이용하였는데, 이 방법에서 최적의 점수 선정 방법에 대해서는 별도 연구가 요구된다.

이상과 같은 본 연구의 결과는 기개발한 ART2 모니터링 시스템을 이용하여 실제 가공공정에서 절삭 공구의 마모상태를 모니터링 할 수 있고, 또한 적절한 공구 교체시기를 결정할 수 있음을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 산업 현장에서 사용되는 머시닝 센터용 절삭용 엔드밀 공구에 대하여 ART2 모니터링 시스템을 이용하여 공구마모 정도를 실시간으로 모니터링하였고, 또한, 가공 중간단계에서 공작물의 표면조도 측정을 통하여 모니터링 결과를 검증하였다.

공구마모를 간접적으로 측정하기 위하여 공구에 가장 근접한 이송부에 진동 센서를 부착하였고, 이 센서 신호를 ART2 모니터링 시스템에 입력하여 공구마모 정도를 평가하였다. 실험 결과 소재의 가공이 진행됨에 따라 성능평가지표 값이 점차 낮아지는 경향을 보이며 최종적으로 이 지표 값이 임계유사도 이하의 값으로 변화하였다. 가공 초기와 가공 중간 시점, 그리고 가공 완료시의 공구 마모량과 공작물의 표면조도를 각각 측정한 결과 성능평가지표가 임계유사도보다 낮아지게 되는 시점에서 표면조도가 악화됨을 볼 수 있었고, 따라서 이 시점에서 새로운 공구로 교체하여야 함을 의미한다. 여기서 가공물의 공차 및 오차에 대해서는 고려하지 않았는데, 이들을 고려한 모니터링과 이와 관련된 임계유사도 값의 설정 방법에 대해서는 향후 연구를 수행할 계획이다.

본 연구의 결과로서 신경회로망 모니터링 시스템을 이용하여 공구의 마모상태를 실시간으로 모니터링하여 적절한 절삭공구의 교체시기를 결정할 수 있고, 이를 통하여 기계 고장의 예방

과 함께 가공 정밀도와 가공 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009~2010년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Ko, J. H., Kim, Y. T., and Lee, S. J., 2000, "Research about Tool Wear Monitoring in CNC Lathe Machining," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 54~60.
- (2) Jantunen, E., 2002, "A Summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 9, pp. 997~1010.
- (3) Lee, G., Kim, K. H., and Jeon, D. Y., 2002, "Tool Condition Monitoring Based on Wavelet Transform," *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, pp. 970~975.
- (4) Sim, J. W., Kim, J. H., Yang, J. S., and Choi J. Y., 2005, "Monitoring Method for Fault Tolerance of Real-time System," *Proc. of the KISS Conference*, Vol. 32, No. 1, pp. 772~774.
- (5) Kim, M. S., Yoo, S. S., So, J. H., and Kwak, H. S., 2001, "On-line Fault Diagnosis System using Neural Network," *Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 26, No. 11, pp. 75~84.
- (6) Lee, I. S., Shin, P. J., and Jeon, G. J., 1997, "Multiple Faults Diagnosis of a Linear System Using ART2 Neural Networks," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 244~251.
- (7) Jang, S. J., Choi, K. J., Choi, Y. H., and Hong, D. S., 2006, "A Study on the Remote Monitoring system based on the Web for Machine Tools using ART2," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, pp. 337~341.
- (8) Noh, M. S., Kwon, J. H., Jang, U. I., Hong, D. S., and Jung, H. Y., 2009, "Real Time Monitoring System for Prediction of Tool Wear and Failure in Machining Processes Using ART2," *ICCAS-SICE Japan Conference*, pp. 3105~3110.

- (9) Jang, U. I., Noh, M. S., Choi, K. J., and Hong, D. S., 2008, "Development of a Web-based Remote Monitoring System for Evaluating Degradation of Machine Tools using ART2," *IEEE-ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, pp. 315~320.
- (10) Kim, S. I., Oh, S. H., Mun, S. D., and Kim, T. Y., 1996, "A Study on Characteristics of Tool Wear and Surface Roughness in Face Milling of Automobile Parts," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 4, No. 5, pp. 223~230.
- (11) Kim, C. W., Choi, K. J., Jung, S. H., and Hong, D. S., 2009, "Development of a Web-Based Remote Monitoring System for Evaluating of Machine Tools using ART2," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, pp. 42~49.
- (12) Carpenter, G., and Grossberg, S., 1989, "ART2 Self-organization of Stable Category Recognition Codes for Analog Input Patterns," *Applied Optics*, Vol. 26, pp. 4919~4930.
- (13) Korea Standard Association, 2003, *KS B ISO 8688-2, Tool Life Testing in Milling - Part 2 : End milling*.