



드릴링 추력을 이용한 드릴의 인프로세스 파손 검출

차에나^a, 박동삼^{b*}

In-Process Detection of Drill Breakage Using Thrust Forces

Ye Na Cha^a, Dong Sam Park^{b*}^a Wonju Medical Instruments High School, 1756, Wonmun-ro, Munmak-eup, Wonju, Gangwon-do, 26370, Korea^b Dept. of Mech. Eng., Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	July	2018
Revised	28	August	2018
Accepted	30	August	2018

Keywords:

Tool monitoring system
Drilling
Drill breakage
Thrust force
In-process

ABSTRACT

To fully automate production processes, a monitoring system is required to detect abnormal phenomena that may occur during a cutting process, such as tool wear, chipping and fracture, excessive chatter, and built-up edge formation. In this study, a system is developed to detect drill breakage in real-time and in-process conditions during drilling. Through a number of preliminary experiments, it was confirmed that the thrust forces could be effectively used to detect drill breakage, and an algorithm for detecting breakage was thus established through signal processing of these thrust forces. The detection algorithm was implemented using LabVIEW on a PC. It is thus confirmed that drill breakages can be detected in-process and in real-time by applying the developed drill breakage detection system to actual NC drilling operations.

1. 서론

기계가공의 생산성과 정밀도 향상을 위하여 생산시스템의 자동화와 무인화가 필수적이며 이에 따라 CAD/CAM 시스템, NC 공작기계, FMS 및 CIM 등이 생산현장에 도입되고 있다. 그러나, 생산현장의 완전한 자동화나 무인화를 위해서는 공작기계 자체뿐만 아니라 절삭과정에서 발생할 수 있는 이상현상인 공구의 마멸, 크랙, 칩핑(chipping) 및 파괴는 물론 과도한 채터(chatter)의 발생 및 구성인성(built-up edge)의 형성 등을 가공도중에 자동적으로 검출(monitoring)하는 공구 모니터링 시스템(TMS, tool monitoring system)의 도입이 필수적으로 요구된다.

이러한 TMS를 구현하는 과정에서 기존 작업자의 이상검출 기

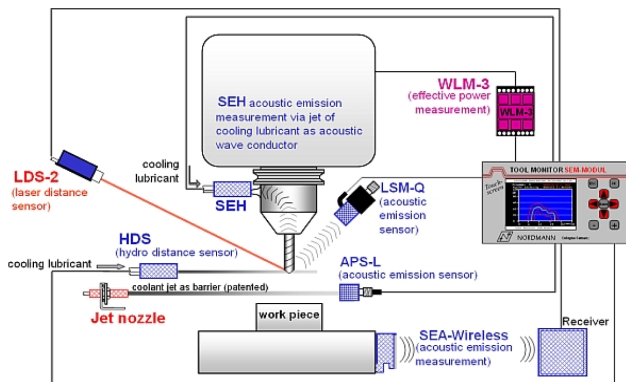
능 즉, 인식(recognition), 적응(adaption) 및 학습(learning) 등의 지적 기능을 모두 기계화시켜야 하는 어려움과 복잡 다양한 절삭상태에 대응하는 센서(sensor)의 선정과 신호처리 및 절삭상태와 검출신호 간의 수학적인 모델링 설정 등의 어려움 때문에 실험실 수준에서는 많은 연구가 이루어져 왔으나 이를 생산현장에서 적용하고 활용하는 데는 많은 어려움이 있다.

TMS를 구현하기 위한 연구는 오래전부터 이루어져 왔는데 국내의 경우 Park은 뉴럴패턴인식법을 이용한 절삭가공의 이상진단 기법을 처음으로 도입하였으며^[1], 비교적 최근에 발표된 연구로는 Cha 등이 드릴의 파손을 검출하고자 하였고^[2], Cai 등은 절삭공구의 모니터링을 위한 proportional covariate model을 제안하여 유용함을 보였으며^[3], Chung 등은 밀링 공정 및 커터의 마멸과 파손을 검출하고자 하였다^[4]. Bukkapatnam 등은 선삭 공구의 플랭크

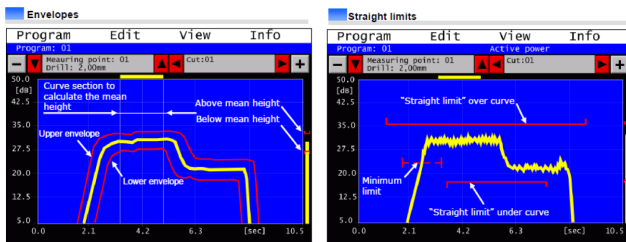
* Corresponding author. Tel.: +82-32-835-8418

Fax: +82-32-835-0793

E-mail address: dspark@inu.ac.kr (Dong Sam Park).



(a) Compositions of TMS



(b) Thresholds for tool monitoring

Fig. 1 An example of TMS (N company, Germany)

마멸(flank wear)을 온라인(on-line)으로 검출하기 위한 연구를 수행하였으며^[5], Balsamo 등은 선삭시 다중센서의 신호처리를 통하여 효과적으로 공구파손을 검출할 수 있음을 보였다^[6].

또한, Bombiński 등은 절삭과정에서 공구의 모니터링 자동화를 위한 센서 신호의 처리 알고리즘을 제안하였으며^[7], Lauro 등은 가공공정에 적용되는 모니터링과 신호처리에 대한 지금까지의 연구를 종합적으로 분석하였다^[8].

그러나, 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 신뢰성과 재현성의 부족으로 실제 생산현장에서 적용되는 시스템은 극소수에 불과하며, 최근 독일 N사의 TMS^[9]가 유럽을 중심으로 많이 사용되고 있으나 고가인 문제점이 있다. Fig. 1(a)는 머시닝센터에서 AE나 레이저 센서 등을 이용한 N사의 TMS이며, Fig. 1(b)는 가공시 포락선(envelope) 신호와 미리 설정된 상하한 값을 이용하여 공구상태를 모니터링하는 예를 보인 것이다.

우리나라의 경우 몇몇 공작기계에 TMS의 간단한 기능이 구비되어 있으나 보다 현장에 적합한 형태의 시스템 개발이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 생산현장에서 실용적으로 활용될 수 있는 TMS를 개발하고자 하며, 특히 머시닝센터에서의 드릴링 작업 시 추력(thrust force)을 이용하여 드릴 파손을 실시간으로 검출할 수 있는 알고리즘을 제안하고 드릴링 실험을 통하여 그 유용성을 검증하고자 한다. 추력 신호의 처리 및 드릴의 파손 검출 알고리즘과 실시간 모니터링 시스템은 LabVIEW를 이용하여 구현하였다.

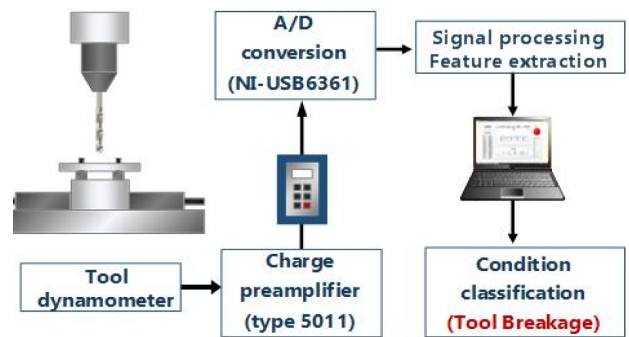


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

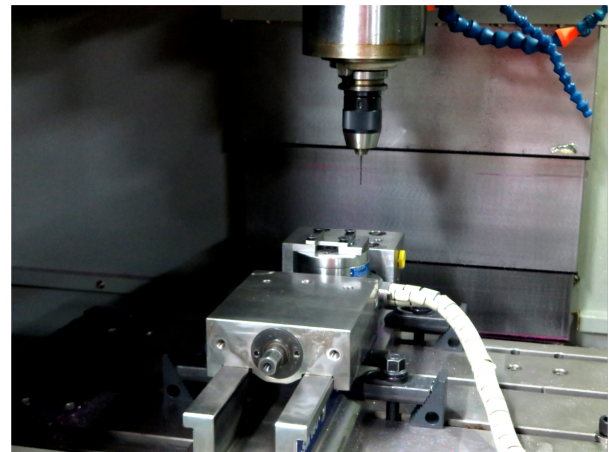


Fig. 3 Set-up of tool dynamometer and specimen

Table 1 Lists of experimental equipments

Equipments	Model
Vertical machining center	HI-V360
Tool dynamometer	Type 9272 (Kistler)
Charge amplifier	Type 5011 (Kistler)
Data acquisition system	NI-USB-6361

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성

드릴 파손에 따른 드릴링 추력(thrust)을 측정하기 위해 공구동력계를 사용하였으며 CNC 수직 머시닝센터에서 드릴링 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 실험장치의 구성도이며 추력 신호는 증폭 및 A/D 변환을 통하여 Notebook에서 신호처리를 하였다.

Fig. 3은 머시닝센터에 설치된 공구동력계 및 실험시편의 사진을 나타낸 것이다. 드릴은 고속도강인 국내 H사의 트위스트 드릴이며 실험에 사용된 각종 장치의 모델은 Table 1과 같다.

Table 2 Drilling parameters

Drill diameter (mm)	1.5, 2
Spindle speed (rpm)	4,000
Feed rate (mm/min)	300
Drilling depth for pecking (mm)	2
Pecking length (mm)	10

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 시편의 재질은 SM45C이며, 시편의 크기는 60 mm × 30 mm × 10 mm로 하여 드릴링 가공 시 관통 두께를 10 mm로 하였다.

드릴의 직경은 1.5 mm와 2 mm를 사용하였으며, 주축회전수는 4,000 rpm, 드릴의 이송속도는 300 mm/min으로 설정하였다. 드릴링 시 1회당 실제 드릴링 깊이는 2 mm로 하였으며, 칩의 제거를 위하여 2 mm 가공 후 페킹(pecking) 작업을 하며 그 길이는 10 mm가 되도록 NC 프로그램을 작성하였다.

한편, 각 구멍 가공시 총 9회의 드릴링 작업이 이루어지도록 하였는데 최초 1회의 드릴링은 시편 표면에 구멍의 초기 위치를 표시하는 정도의 미세 절삭이 이루어지도록 하고 2번째부터 7번째 드릴링은 드릴링 깊이 2 mm씩 절삭이 이루어지도록 하여 구멍이 완전히 관통되도록 하였고, 마지막 2회는 구멍은 이미 관통되었지만 혹시 나타날지도 모르는 미 관통을 예방하기 위하여 추가 2회 드릴링으로 최종 가공을 완료하도록 하였다.

Table 2에 드릴링 조건을 나타내었다.

3. 드릴의 파손검출 알고리즘

Table 2의 드릴링 조건으로 지름이 1.5 mm 및 2 mm인 드릴을 사용하여 수차례의 예비실험을 수행하였다.

드릴링 가공의 절삭신호로는 드릴에 작용하는 추력과 토크(torque)가 있으나 예비실험 결과 드릴의 파손 시 드릴에 수직으로 작용하는 추력이 토크 신호보다는 더 민감하게 나타나는 것을 확인하여 추력의 변화 특성을 분석하여 드릴 파손을 검출하는 알고리즘을 수립하였다.

이후 수립된 알고리즘의 검증을 위하여 실제 드릴링이 이루어지고 있는 동안 추력의 변화를 측정하고 알고리즘에 적용하여 공구파손을 실시간으로 검출하여 비상정지 신호를 출력하도록 하였으며, 이를 LabVIEW를 이용하여 구현하였다.

드릴링 도중 추력은 정적인 성분에 어느 정도의 동적 성분이 실리므로 파손 알고리즘을 수립할 때 오류발생의 원인이 될 수 있다. 따라서, 일정 수준 이상의 추력 신호(T_h , threshold)가 들어올 때는 Fig. 4와 같이 계단(step) 파형으로 변환하여 이를 기초로 파손 검

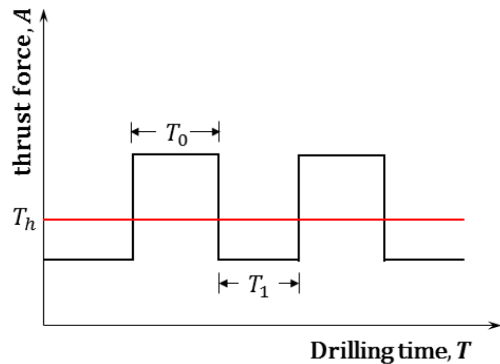


Fig. 4 Parameters for drill breakage monitoring

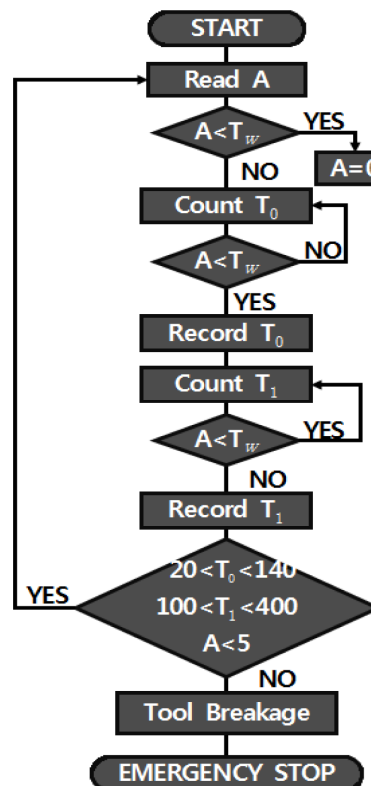


Fig. 5 Algorithm for drill breakage monitoring

출 알고리즘을 수립하였다.

Fig. 4에서 A는 드릴링 추력 신호, T_0 는 실제 드릴링 지속시간, T_1 은 페킹에 따른 비 절삭시간이다. 많은 예비실험을 통하여 드릴의 파손이 일어날 때 파손을 효과적으로 검출할 수 있는 T_0 , T_1 의 적정 범위 및 T_h 를 결정하였다. 특히 T_0 , T_1 는 동적 성분이 실린 원래의 신호를 계단파형으로 변환 후 그 카운트 수가 각각 $20 < T_0 < 140$, $100 < T_1 < 400$ 일 때 드릴 파손을 가장 효과적으로 검출할 수 있는 범위임을 확인하였다.

이후 실험에서 이러한 패턴의 변화가 생기면 드릴 파손으로 진단하고 비상정지 신호를 발생하도록 프로그래밍 하였으며 전체 알고리즘을 Fig. 5에 나타내었다.

4. 드릴의 파손검출 실험 및 결과분석

드릴의 파손검출 알고리즘을 LabVIEW로 프로그래밍 한 후 실제 드릴링 시 드릴의 파손을 실시간으로 검출할 수 있는지에 대한 검증 실험을 수행하였으며 지름이 1.5 mm와 2 mm인 드릴을 이용하여 드릴의 지름과 관계없이 드릴 파손을 검출하고자 하였다.

Fig. 6(a)는 지름 1.5 mm인 드릴의 실험결과로 드릴 파손이 일어날 때까지의 전체 추력의 변화를 나타낸 그림이다. 12번째의 구멍을 가공할 때 드릴이 파손되었으며 파손이 일어나기 전의 드릴링 추력의 변화패턴은 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

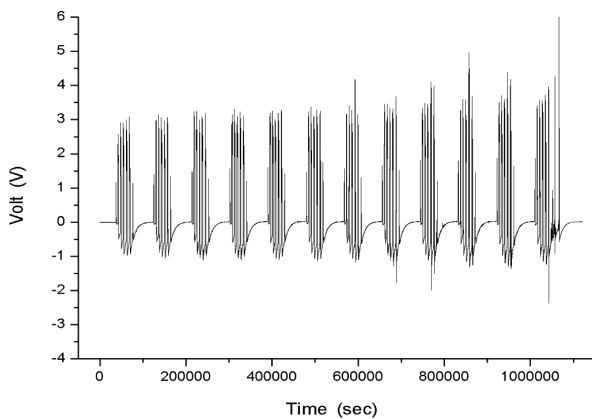
Fig. 6(b)는 드릴의 파손이 일어날 때 마지막 3개의 구멍을 가공할 때 나타나는 추력을 보다 자세히 보여주는 그림으로 각 구멍 가공 시 7번의 추력 피크가 나타나는데 1번째 피크는 드릴이 시편의 표면에 드릴링 자리를 정확하게 잡아주도록 미세하게 드릴링 할 때 발생하는 추력이며, 이후 5개의 피크는 2 mm 씩 드릴링 후 10 mm 씩 폐킹할 때 나타나는 추력으로 이 과정에서 시편은 거의 관통이 되며, 마지막 7번째 피크는 최종 관통을 위한 드릴링으로 시편 하단의 마지막 일부가 제거되어 완벽한 관통 구멍이 가공된다는 것을 보여주고 있다.

추력 신호를 더욱 미세하게 관찰하면 Fig. 6(a)에서 보듯이 가공

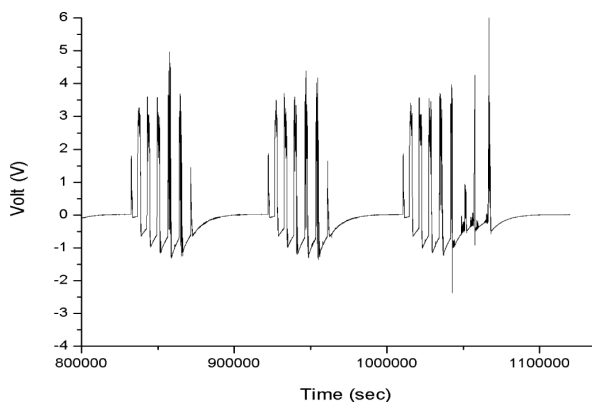
구멍 수가 증가할수록 각 드릴링 사이클에서 추력의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 즉 12개 구멍을 가공하는 과정에서 추력 신호의 진폭이 드릴링 구멍의 개수 증가에 따라 완만히 증가한다는 것을 알 수 있는데 이는 가공 구멍의 개수가 증가할수록 드릴날의 마멸이 증가되어 나타나는 현상이라고 판단된다. 또한, 각 구멍의 드릴링 시 관통되기 직전의 추력이 크게 나타나고 있는데 이는 각 구멍의 드릴링 시 폐킹작업을 주고 있음에도 불구하고 칩의 배출이 원활하지 못하여 나타나는 현상이라 판단되며 이러한 경향은 가공 구멍의 개수가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

한편, 파손상태에서의 추력신호를 나타내는 Fig. 6(b)의 3번째 추력의 변화를 보면 6번째 드릴링 과정에서 드릴이 파손되어 추력이 (-) 방향으로 급격히 떨어진다 것을 알 수 있으며, 이후 7번째에 나타나는 신호는 마지막 관통 가공에서 이전 6번째 가공에서 드릴의 파손이 일어나 프로그램 되어 있는 2 mm의 가공 깊이와는 달리 드릴과 공작물의 접촉이 거의 미미한 상태에서 일부만 가공이 일어났다는 것을 의미하고 있다. 또한, 2회의 추가 여유 가공과정에서 나타나는 신호는 드릴이 파손된 상태에서 가공이 일어나 추력이 급격히 증가된 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 7(a)는 지름 2 mm인 드릴을 사용한 실험결과로 14번

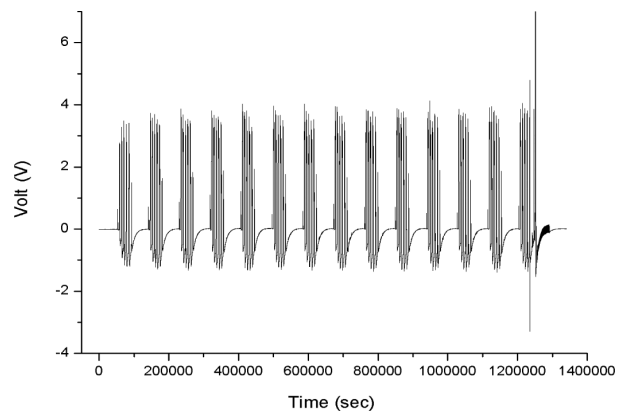


(a) Overall thrust forces in drilling 12 holes

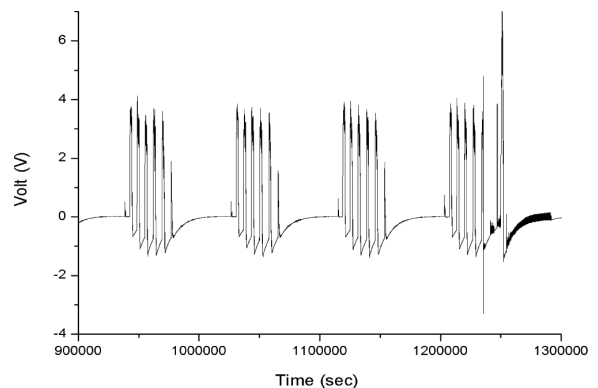


(b) Thrust forces in drilling last 3 holes

Fig. 6 Thrust forces during drilling (\varnothing 1.5 mm drill)



(a) Overall thrust forces in drilling 14 holes



(b) Thrust forces in drilling last 3 holes

Fig. 7 Thrust forces during drilling (\varnothing 2 mm drill)

재의 구멍을 가공할 때 드릴이 파손되었으며 파손이 일어나기 전의 드릴링 추력의 변화패턴은 거의 일정함을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 파손이 일어나기 직전의 4개 구멍 가공시의 추력을 나타낸 것으로 지름이 1.5 mm인 드릴의 추력 신호를 나타내는 Fig. 6(b)의 결과와 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉, 6회째 드릴링 과정에서 드릴이 파손되어 7번째 드릴링에서는 가공이 거의 이루어지지 않으며, 2회의 추가 여유 가공 시 파손된 상태의 드릴링으로 추력이 급격히 증가하고 있다. 이러한 두 실험결과로부터 Fig. 5에 제시된 파손검출 알고리즘을 드릴 지름과 관계없이 적용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 드릴의 파손검출 시스템

개발된 드릴 파손 알고리즘을 LabVIEW로 프로그래밍하여 실제 드릴링 가공 시 드릴 파손을 실시간으로 검출할 수 있는지에 대한 검증 실험을 수행하였다.

드릴링 시 측정되는 추력 신호를 A/D 변환한 원래의 추력신호와 필터링된 계단형 신호가 실시간으로 그래프로 출력되도록 하였으며, 드릴 파손 조건을 만족하면 컴퓨터 화면에 붉은색으로 파손 경고 LED를 ON 시킴과 동시에 외부로 연결된 경광등에도 시각적 효과와 더불어 경고음을 발생시키도록 하였다.

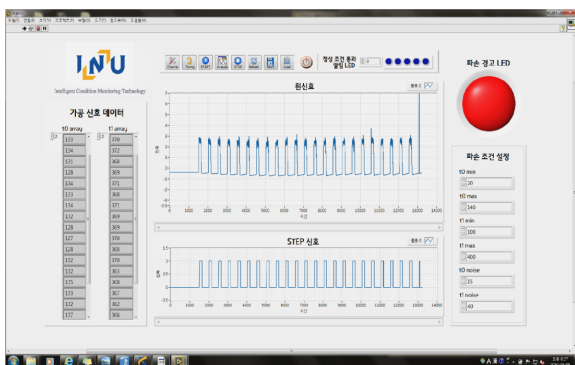


Fig. 8 Graphic display of thrust forces and LED

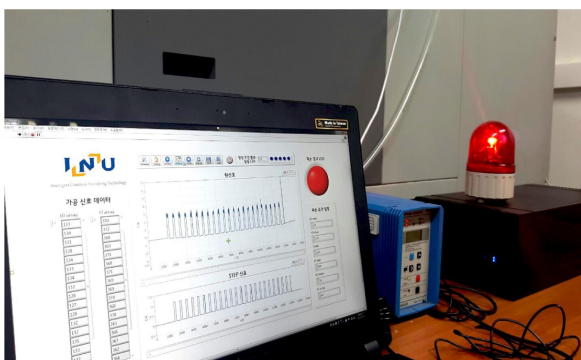


Fig. 9 Photograph of the developed TMS

Fig. 8은 실시간으로 드릴의 파손을 검출하기 위하여 LabVIEW 프로그램의 실제 실행 상태를 나타낸 그림으로, 위쪽의 그래프는 원래의 추력 신호이며 아래쪽 그래프는 알고리즘을 적용한 계단형 신호로 변환된 것이며 이 실험에서는 24번째 드릴링 과정에서 파손이 일어남을 나타내고 있다. 또한, 드릴링이 정상적으로 이루어지는 동안에는 LED가 노란색이나 드릴이 파손되면 LED가 ON 되어 적색으로 표시되는 상태를 보여주고 있다.

Fig. 9는 개발된 전체 TMS시스템의 사진을 보여주고 있다.

이상의 검증 실험 결과로부터 본 연구에서 개발된 실시간 드릴 파손 검출 시스템의 성능을 확인할 수 있었으며 실제 드릴 파손이 발생할 경우 대부분의 경우 실시간으로 검출이 가능하였다.

본 연구에서는 드릴 파손을 검출하기 위하여 공구동력계를 이용한 추력 신호를 사용하였으나 보다 다양한 형태의 센서나 신호를 사용하여 신뢰성을 높일 수 있는 연구가 필요하며, 일반적인 다양한 드릴링 조건에서도 활용할 수 있는 드릴 파손 검출 알고리즘을 개발한다면 보다 효과적이고 실용적인 파손 검출시스템을 구현할 수 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 NC 공작기계를 이용한 드릴 가공 시 드릴 파손을 실시간으로 검출하는 시스템을 개발하고자 하였다. 많은 예비실험을 통하여 드릴링 시 발생하는 추력신호가 드릴 파손을 검출하는데 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였으며, 동적 성분이 실린 추력신호를 계단함수 형태의 신호로 필터링하는 신호처리방법과 추력 인자의 카운트 수를 도입하여 드릴의 파손검출 알고리즘을 수립하였다. 검출 알고리즘을 LabVIEW를 이용하여 구현하고 실시간으로 공구파손을 검출하고 LED나 경광등을 통하여 비상신호를 발생하도록 하였다. 개발된 드릴 파손 검출 시스템을 이용하여 실제 NC 드릴링 가공에 적용한 결과 드릴의 지름과 관계없이 파손을 실시간으로 검출해 낼 수 있음을 확인하였다.

후기

이 논문은 인천대학교 2016년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

References

[1] Park, D. S., 1992, A Study on the Chip-Breaking Frequency and Monitoring and Diagnosis of Cutting Process Using Neural Pattern Recognition Method, Doctoral Dissertation, Seoul National University,

- Republic of Korea.
- [2] Cha, Y. N., 2017, A Study on the Detection of Drill Fracture Using Tool Dynamometer, Master Thesis, Incheon National University, Republic of Korea.
- [3] Cai, G., Chen, X., Li, B., Chen, B., He, Z., 2012, Operation Reliability Assessment for Cutting Tools by Applying a Proportional Covariate Model to Condition Monitoring Information, *Sensors* 12 12964-12987.
- [4] Chung, T. K., Yeh, P. C., Lee, H., Lin, C. M., Tseng, C. Y., Lo, W. T., Wang, C. M., Wang, W. C., Tu, C. J., Tasi, P. Y., Chang, J. W., 2016, An Attachable Electromagnetic Energy Harvester Driven Wireless Sensing System Demonstrating Milling-Processes and Cutter-Wear/Breakage-Condition Monitoring, *Sensors* 16 269-286.
- [5] Bukkapatnam, Satish T. S., Kumara, Soundar R. T., Lakhtakia, A., 2000, Fractal Estimation of Flank Wear in Turning, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 122 89-94.
- [6] Balsamo, V., Caggiano, A., Jemielniak, K., Kossakowska, J., Nejman, M., Teti, R., 2016, Multi Sensor Signal Processing for Catastrophic Tool Failure Detection in Turning, *Procedia CIRP* 41 939-944.
- [7] Bombiński, S., Błażej, K., Nejman, M., Jemielniak, K., 2016, Sensor Signal Segmentation for Tool Condition Monitoring, *Procedia CIRP* 46 155-160.
- [8] Lauro, C. H., Brandão, L. C., Baldo, D., Reis, R. A., Davim, J. P., 2014, Monitoring and Processing Signal Applied in Machining Processes – A Review, *Measurement* 58 73-86.
- [9] Nordmann GmbH & Co. KG, n.d. viewed 28 June 2018, <<http://www.toolmonitoring.com>>.