

◆특집◆ 금형가공용 초고속 지능형 절삭 시스템

고속 주축의 상태모니터링 및 제어 알고리즘 설계

최현진*, 박철우*, 배정섭*, 안정훈*, 최성대#

Design of High Speed Spindles Active Monitoring and Control Algorithm

Hyun-Jin Choi*, Chul-Woo Park*, Jung-Sub Bae*, Jeong-Hun Ahn*, Seong-Dae Choi#

(Received 30 September 2011; received in revised form 5 October 2011; accepted 6 October 2011)

ABSTRACT

In this paper, the active monitoring and control system is developed. This system can monitor the status of high the speed spindle in real time during its processing, and can analyze its influence of dimensional accuracy and processing if any, and can control the machining condition to realize the machining system equipped with active monitoring and self-diagnostic features. Machining experiment was performed on 3 materials Al, Brass and S45C in order to derive the relation between active monitoring and control algorithm by the machining load. In addition, we measured surface roughness of processing specimen along with the data change of spindle rotating speed and conveying speed according to variation of machining load. Based on these experiments, we derived relations for each material that can be applied to the control algorithm to allow self control of the rotating speed and conveying speed according to the machining load.

Key Words : Active Monitoring(상태모니터링), Control Algorithm(제어 알고리즘), High Speed Spindle(고속주축), Machining Tool(가공기)

1. 서 론

최근 들어 제조 환경이 급격한 변화를 겪고 있다. 한 가지 가장 중요한 현상 중 하나는 인원 수 감축을 통해 비용을 절감하는 동시에 제품 품질을 높이고 생산 시간을 단축하려는 추세이다. 제조업에서 절삭가공은 여전히 제품생산에 있어 많은 시간과 비용을 차지하고 있으며 이에 따라, 공작기계의 고성능화가 이

루어져 왔다. 더불어 각종 계측장비를 이용한 절삭가공 상태 감시에 대한 요구와 필요성이 증대되고 있다. 특히, 제품의 주기가 짧아지고 다품종 소량 가공물이 증가하는 추세여서 가공시간 단축이 생산성에서 차지하는 비중이 날로 늘어가고 있다^[1]. 따라서 절삭가공기의 상태 모니터링을 위한 센서 시스템의 신뢰성 및 적용성과 관련하여 제조 시스템의 가용성 수준과 더불어 이를 적용하여 가공부품의 고품질을 달성해야 하는 새로운 난관에 직면하고 있다^[2-4].

이러한 요구는 신호 처리 기술과 집적된 고급 센서 적용을 통해 가공공정 상태에 관한 고급 정보를 확보하여 가공공정 최적화 및 자가제어를 실현할 수 있게

* 대구기계부품연구원

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : sdchoi@kumoh.ac.kr

되었다. 이와 동시에 최근 제조 기술 및 기계 공구 설계의 발전과 트렌드로 인해 절삭가공 환경에서 모니터링 시스템에 새로운 요구가 이어지면서 절삭속도 향상에 서부터 가공품의 고품질화까지 팔목할만한 진전이 있었다. Fig. 1과 같이 다양하고 많은 종류의 센서를 머시닝 환경의 모니터링 측면에 사용할 수 있다^[3].

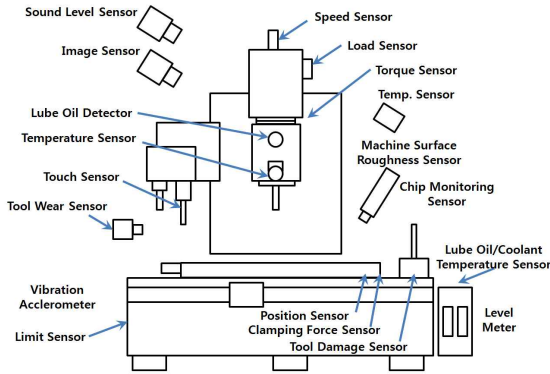


Fig. 1 Sensor type applied to machining center

또한 최근에는 지능형, 자율대응, 전문가형과 같은 개념이 중요시되고 있다. 따라서 절삭조건에 관한 유연성이 내재된 자동화에 따른 절삭상태의 감시 등이 연구되고 있다^[5]. 특히 절삭공구의 상태 감시에 관련된 연구가 활발히 진행^[6] 되고 있으나 오직 공구 상태와 관련된 정보만으로는 절삭가공의 최적인 상태감시가 이루어질 수는 없다. 따라서 절삭공구 상태감시 이외의 장비 자체의 상태를 모니터링하고 제어할 수 있는 시스템을 필요로 하고 있다^[2]. 일반적으로 절삭가공품의 가공조건에 영향을 미치는 절삭조건은 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 순으로 커지게 된다. 또한 이러한 요소들은 가공물의 가공조건 뿐만 아니라 치수정밀도에도 영향을 미치고 있다. 따라서 절삭가공 상태를 적절히 모니터링하여 절삭조건을 제어하여 정도 높은 가공물을 얻는 과 동시에 절삭가공기계의 데미지를 방지할 수 있게 된다^[7,8].

현재 실제 주축부하를 바탕으로 NC프로그램의 이송속도를 실시간 제어하고, 공구 마모/파손 등 절삭공구 상태를 지속적인 감시로 한계값에 이르렀을 때 알람 발생 및 긴급정지 시키는 시스템은 국외에서는 개발을 진행하고 있으며 2010 동경국제공작기계전시회에서 국외 S사는 상용 주축유닛을 위해 3축 진동센서(속도센

서), 파손감지 센서(Crash Sensor), 온도센서 등을 내장한 주축 파손감지 시스템(Crash Detection System for Spindle)을 소개를 하고 있다^[9].

가공시스템의 절삭부하와 진동 등은 공구동력계와 가속도계로 직접 측정이 가능하다. 그러나 거친 기계적 환경에서 견딜 수 있는 측정장치는 가격이 워낙 비싸고 측정장치의 직접 설치하는 강성의 감소로 떨림현상과 치수오차가 발생하여 가공품질의 저하를 초래한다. 따라서 측정장치를 이용하는 것이 항상 가능한 것은 아니다. 본 논문에서는 최적인 조건에서 장비의 상태를 측정할 수 있도록 Fig. 2와 같이 시스템을 구성하였으며 우선적으로 주축에 일체형으로 장착된 부하센서링에서 주축의 상태를 모니터링하여 절삭조건을 최적화할 수 있는 제어시스템 설계하였다.

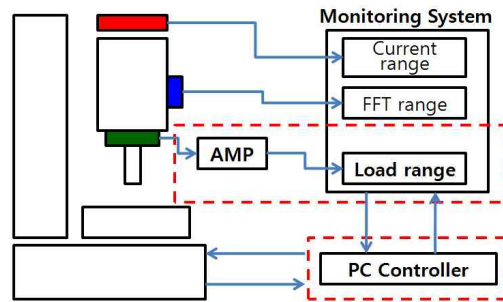


Fig. 2 The structure of active monitoring systems

Fig. 3은 상태 모니터링 및 제어시스템의 절삭가공 흐름을 보여준다. 절삭가공 중 주축의 절삭부하를 실시간 검출하여 한계치 이상이 되면 주축의 회전속도 또는 이송속도를 실시간 제어할 수 있도록 구성하였다. 이를 위하여 제어시스템의 알고리즘 관계식을 도출하기 위하여 가공 테스트 베드를 구축하고 절삭실험을 수행하였다.

2. 절삭실험

절삭부하 검출을 위한 실제 절삭실험은 본 연구 대상인 5축 절삭가공기에 적용 예정인 40,000rpm급 고속 주축시스템을 장착하여 절삭가공이 가능할 수 있도록 수직형 머시닝센터를 개조하여 Fig. 4과 같이 테스트 베드를 구성하였다.

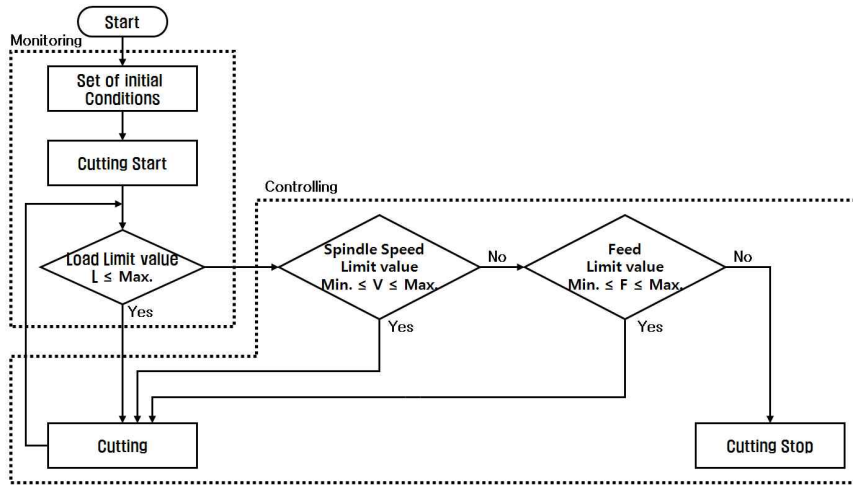


Fig. 3 Active monitoring system block diagram



Fig. 4 Cutting test bed

Table 1 Cutting conditions

work piece	Cutting dep. (mm)	Cutting leg. (mm)	Cutting speed (rpm)	Feed (mm/s)
Al	2	100		
Brass	2	100	15,000, 20,000	5, 20, 40
S45C	1	100	25,000, 30,000	60, 80, 100

가공물은 Al, Brass, S45C 3가지 소재를 선정하였으며 Al, Brass는 비철금속전용 10mm 3날 평엔드밀을 S45C는 10mm 2날 초경 엔드밀의 공구를 사용하였다. 가공조건은 Table 1과 같이 각각의 절삭속도에서 이송속도를 변경하면서 실험하였다. 또한 Fig. 5와 같이 가공 직후 가공표면을 표면조도기로 절삭조건별 표면조도를 측정하여 절삭속도와 이송속도에 따른 절삭력 및 표면조도의 상관관계를 도출하고자 하였다^[2,10,11].

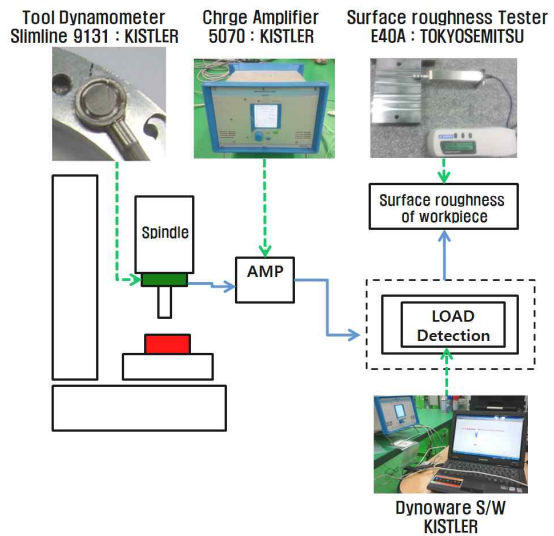


Fig. 5 Composition of test equipment to measure cutting load

절삭부하를 측정한 결과 Al, Brass, S45C 모두 이송속도가 증가함에 따라 절삭부하가 증가하는 경향이 있었다. Fig. 6과 Fig. 7, Fig. 8은 15,000rpm의 주축 회전속도에서 이송속도의 변화에 따른 소재별 절삭부하를 나타내고 있다. 또한 절삭가공 직후 시편의 표면조도를 각각 측정하였다. Fig. 9부터 Fig. 11은 각 주축 회전속도별 이송속도의 변화에 따른 표면조도값 관계를 폴리피팅한 데이터를 나타낸다.

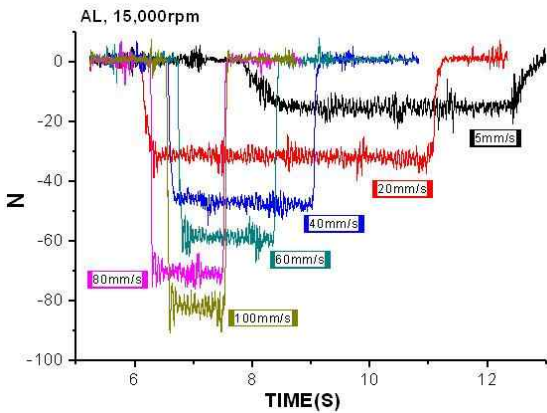


Fig. 6 AL cutting load(15,000rpm, 5-100mm/s)

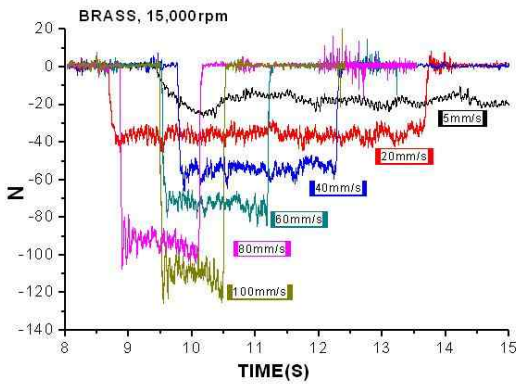


Fig. 7 Brass cutting load(15,000rpm, 5-100mm/s)

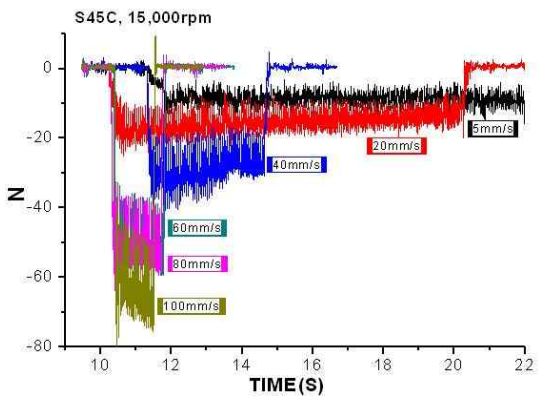


Fig. 8 S45C cutting load(15,000rpm, 5-100mm/s)

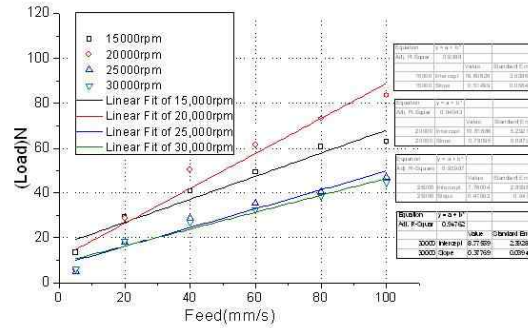


Fig. 9 Polyfitting linear function of cutting process result data(AL)

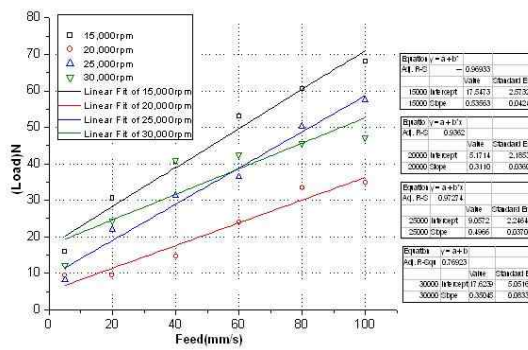


Fig. 10 Polyfitting linear function of cutting process result data(Brass)

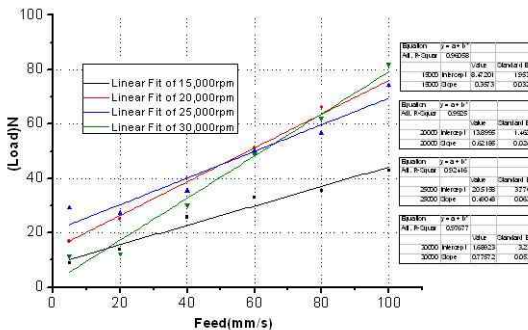


Fig. 11 Polyfitting linear function of cutting process result data(S45C)

각 질삭조건별 가공 직후 표면조도를 측정하여 비교 분석한 결과 각 소재에 따라 다소 차이가 있으나 이송속도가 증가할수록 질삭부하와 표면조도값이 선형적으로 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 이송속도에 따라

절삭부하가 많은 영향을 받고 있으며 그에 따라 가공물의 표면조도에도 큰 영향을 미치고 있다는 것을 판단할 수 있었다. 하지만 주축 회전속도에 따른 절삭부하와 표면조도는 소재별로 다른 경향을 보였다. AI는 회전속도가 20,000rpm일 때 절삭부하가 가장 크게 증가 하였으나 Brass는 15,000rpm에서 S45C는 30,000rpm의 회전속도로 가공할 때가 절삭부하가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과로 절삭부하에 따른 제어 알고리즘에 적용해야 할 관계식은 각각의 소재별로 도출하기로 하였다.

3. 제어 알고리즘

주축 회전속도와 이송속도의 변화에 따른 절삭부하의 증감량에 대한 회귀분석을 위하여 1차 및 다차함수로 피팅하여 관계식을 도출하였다. 피팅은 MATLAB R2009b Tool을 사용하였으며 피팅의 방법은 폴리피트 방식을 적용하였는데 이는 회귀분석(Regression analysis)을 위한 matlab함수 중에서 최소자승법에 근거를 두고 있다^[10,12,13].

3.1 AI

Fig. 12는 AI 소재의 실 절삭가공의 결과 데이터를 바탕으로 절삭부하와 주축 회전속도, 이송속도 관계를 1차 함수로 피팅한 결과를 보여주고 있다. 1차 함수로 피팅하여 얻어진 방정식의 RMSE 오차가 8.5로 다소 높아 RMSE 오차가 최소가 되도록 Fig. 13과 같이 이송속도는 3차 함수로 주축 회전속도는 2차 함수로 피팅한 결과 RMSE 오차가 50% 이상 감소하였다.

식 (1)과 식 (2)는 Fig. 12와 Fig. 13에서 1차 함수와 다차원 함수로 피팅하여 얻어진 회전속도와 이송속도에 따른 절삭부하 계산 관계식이다.

$$f(x_p, y_l) = a_{AL} + b_{AL}x + c_{AL}y \quad (1)$$

$$(a=40.62, b=-0.001317, c=0.5234, RMSE:8.54)$$

$$f(x_p, y_l) = a_{AL} + b_{AL}x + c_{AL}y + d_{AL}x^2 + e_{AL}xy + f_{AL}y^2 + g_{AL}x^3 + h_{AL}x^2y + i_{AL}xy^2 \quad (2)$$

$$(a=631.1, b=0.09334, c=0.1636, d=4.379e-006, e=0.0001076, f=0.007248, g=6.589e-011, h=3.082e-009, i=1.498e-007, RMSE:4.23)$$

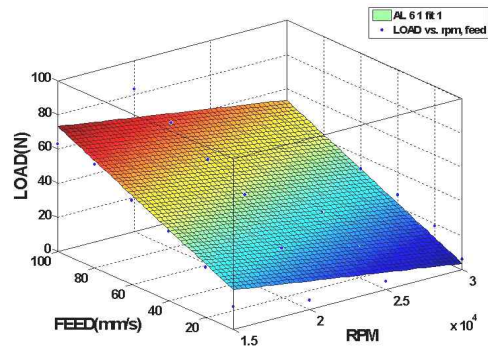


Fig. 12 Fitting linear plane function of Al cutting process result data

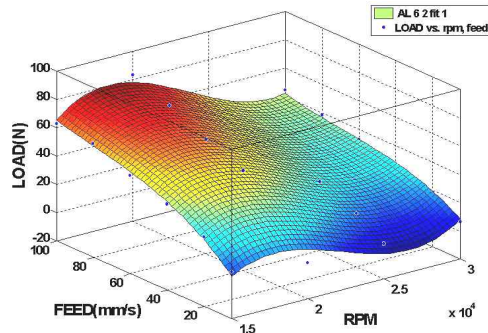


Fig. 13 Fitting multi-dimensional plane function of Al cutting process result data

3.2 Brass, S45C

Brass와 S45C 소재 또한 실 절삭가공의 결과 데이터를 바탕으로 절삭부하와 주축 회전속도, 이송속도 관계를 피팅하여 식 (3)~식 (6)과 같이 관계식을 도출하였다.

$$f(x_p, y_l) = a_B + b_Bx + c_By \quad (3)$$

$$(a=19.48, b=-0.0003071, c=0.4159, RMSE:9.24)$$

$$f(x_p, y_l) = a_B + b_Bx + c_By + d_Bx^2 + e_Bxy + f_By^2 + g_Bx^3 + h_Bx^2y + i_Bxy^2 \quad (4)$$

$$(a=-755.6, b=-0.1019, c=0.8375, d=4.457e-006, e=-3.301e-005, f=0.002626, g=-6.306e-011, h=1.085e-009, i=-2.283e-007, RMSE : 4.12)$$

$$f(x_p, y_l) = a_S + b_Sx + c_Sy \quad (5)$$

$$(a=-8.441, b=0.0008646, c=0.5631, RMSE:7.62)$$

$$f(x_p, y_l) = a_S + b_Sx + c_Sy + d_Sx^2 + e_Sxy + f_Sy^2 + g_Sx^3 + h_Sx^2y + i_Sxy^2 \quad (6)$$

$$(a=-313.8, b=0.04065, c=0.04065, d=-1.603e-006, e=-1.99e-005, f=-0.006999, g=2.023e-011, h=1.368e-010, i=3.485e-007, RMSE:3.34)$$

3.3 제어 알고리즘 프로우 차트

Fig. 14는 Al, Brass, S45C 소재별 절삭가공 실험을 바탕으로 도출한 관계식을 적용한 부하 모니터링 및 제어시스템의 최종 제어 알고리즘으로 절삭부하에 따른 주축 회전속도와 이송속도의 상하 임계치는 가공부품에 따라 요구되는 표면조도값에 따라 설정하면 된다. 통상적으로 Fig. 13와 같이 가공품의 표면조도가 $4\mu\text{m}$ 이내라고 가정하면 절삭부하 값을 40N 이하가 되도록 회전속도 및 이송속도를 제어하면 요구되는 표면조도를 얻을 수 있다.

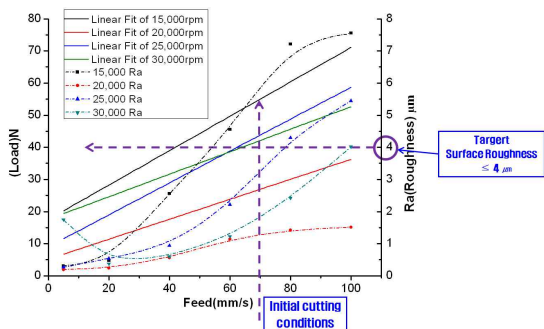


Fig. 13 Setting the target surface roughness

4. 결론

본 연구에서는 상태 모니터링 및 자가진단 기능을 갖춘 절삭가공시스템을 실현하기 위해 고속 주축의 절삭부하 상태를 가공공정 중 실시간으로 모니터링하고 치수 정밀도 및 가공조도에 영향이 미칠 경우 사전에 분석하고 절삭조건을 제어할 수 있는 제어 알고리즘을 설계하고자 하였다. 가공 절삭부하에 의한 상태모니터링 및 제어 알고리즘의 관계식을 도출하기 위해 Al, Brass, S45C 3가지 소재에 대하여 절삭실험을 수행하였으며 절삭부하값의 증감에 따른 주축 회전속도와 이송속도의 변화 데이터값을 확인하면서 가공시편의 표면조도를 측정하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 절삭부하에 따른 회전속도와 이송속도를 자가제어할 수 있는 제어 알고리즘에 적용할 관계식을 각 소재별로 도출하였다. 향후 제어시스템을 적용한 가공 테스트 베드를 구축하여 그 실효성을 검증하여 제어 알고리즘에 대한 신뢰성을 확보할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역전략기획기술개발사업

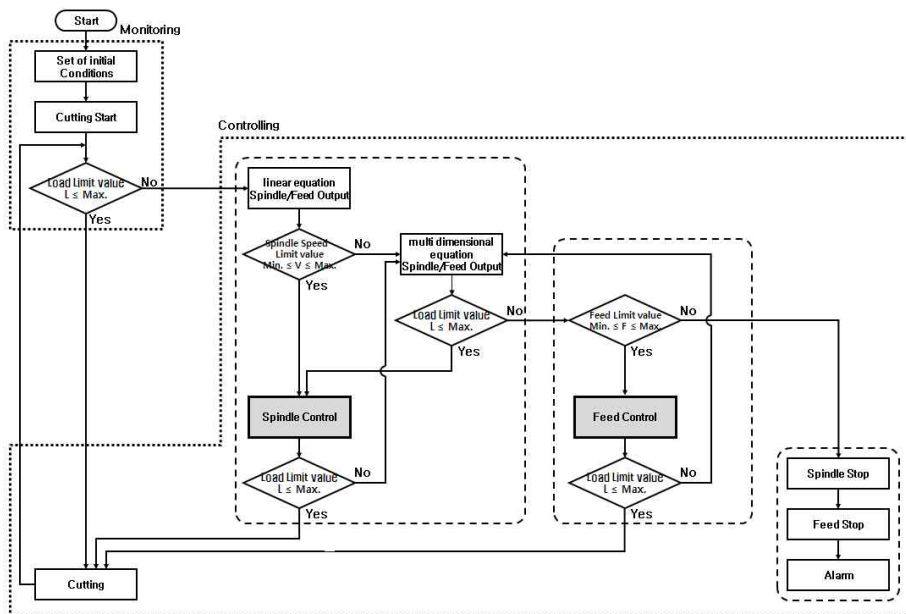


Fig. 14 Flow-chart control algorithm obtained through cutting load analysis

의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. I.H. Kim, D.Y. Jang and D.C. Han, "A Study on Cutting Force Measurement Using a Cylindrical Capacitive Spindle Sensor", Transactions of the KSPE, Vol. 11, No. 2, pp. 17-23, 2002.
2. Y.H. Lee, "Development of Autonomus Manufacturing System", Final Report, Kimm, pp. 76-186, 1996.
3. D.C. Han, "Development of the in-process spindle and tool monitoring system during hard-turning", Final Report, Seoul National University, 2000.
4. M.S. Hong, J.M. Kim, "A Study on the Cutting Force Simulation for Ball-end Milling Operation", Transactions of the KSMTE, Vol. 12, No. 6, pp. 84-91, 2003.
5. I.H. Kim, D.Y. Jang and D.C. Han, "A Study on Cutting Force Measurement Using a Cylindrical Capacitive Spindle Sensor", Transactions of the KSPE, Vol. 11, No. 2, pp. 17-23, 2002.
6. G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Konig and R. Teti, "Tool Condition Monitoring (TCM)-The Status of Research and Industrial Application", Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 541-567, 1995.
7. F. Klocke, R. Schmitz, Dr. A. Kirchheim and J. Stimimann, "Advanced Machining Process Analysis", Industrial Tooling Conference, KISTLER, pp. 1-16, 2003.
8. H.G. Kim, H.S. Yang and G.B. Lee, "Cutting Process Monitoring Using Tool Dynamometer in End-Milling Process", KSMTE Fall Conference, pp. 14-18, 2001.
9. 지식경제부 생산시스템 전략기술지원단, "IT 부품가공용 유연성 머시닝센터", 전략기술 생산시스템 연구기획 최종보고서, pp. 37-48, 2008.
10. 원시태, 허장희, 이영주, "볼 엔드밀 가공에서 고경도 강재의 절삭특성에 관한 연구", 한국소성가공학회 금형가공 심포지엄, pp. 11-19, 2002.
11. W.S. Yang, S.H. Lee, "A Study on a New Cutting Force Model Including Unbalance", Transactions of the KSMTE, Vol. 10, No. 1, pp. 59-64, 2001.
12. "About MATLAB7.9.0(R2009b) User's Guide", 2009.
13. M.C. Kang, J.S. Kim, D.W. Lee, K.Y. Lee and J.H. Kim, "Development of 3 - Component Tool Dynamometer for Evaluation of Machinability in High Speed Machining", Transactions of the KSPE, Vol. 16, No. 5, pp. 11-18, 1999.
14. D.C. Han, "Development of the in-process spindle and tool monitoring system during hard-turning", Final Report, Seoul National University, 2000.
15. M.S. Hong, J.M. Kim, "A Study on the Cutting Force Simulation for Ball-end Milling Operation", Transactions of the KSMTE, Vol. 12, No. 6, pp. 84-91, 2003.
16. I.H. Kim, D.Y. Jang and D.C. Han, "A Study on Cutting Force Measurement Using a Cylindrical Capacitive Spindle Sensor", Transactions of the KSPE, Vol. 11, No. 2, pp. 17-23, 2002.