

베어링 생산수율 향상을 위한 센서기반 품질 체크 모니터링 장치

Quality Check Monitoring System for Advancing the Yield Rate based on Sensor

조 상*, 윤 달 환*

Zhao Xiang*, Dal-Hwan Yoon*

Abstract

This paper presents the monitoring method of machining error and quality check to improve the productivity of boring manufacturing process. Machining error usually appears as the offset of spatial location of actual cutting path compared to ideal cutting path. In order to monitor an error of workpiece, multiple factors affecting quality of boring, such as distortion of workpiece, clamping error, radial rotation error of the spindle and motion error of machine tools, were taken into account. To verify the productive quality, we propose the quality check system. The system based on IT convergence analyzes the process error rate and saves the analyzed data in memory. Also, these play important roles in detecting an inferior production goods and can decrease the production cost and loss of bearing.

요 약

본 연구는 차량용 보링 생산 공정에서 기계적인 에러를 체크하기 위한 품질 체크용 모니터링 시스템을 개발한다. 기계적인 에러는 이상적인 절단경로와 비교하여 실제 절단경로의 공간위치 차이에서 나타난다. 제조공정 제품의 오차를 모니터링하기 위해 제품의 인지왜곡, 죄임 에러, 기계공구의 회전과 운동에러의 반경회전과 같이 보링 품질에 영향을 미치는 다수 요소들을 설명한다. 생산품질을 입증하기 위해 IT 융합에 기반한 공정 에러율을 분석하고 분석 데이터를 메모리에 저장하는 품질체크 방법을 제안한다. 따라서 불량 생산 제품을 감지함으로써, 생산 코스트와 베어링의 손실을 줄일 수 있다.

Key words : machining error model, tool cutting path, quality check, boring process, yield rate

1. 서론

자동차 보링의 제품 정밀도 및 신뢰성을 위해 제조 장비의 지능화(Intelligent)가 요구되고 있다. 특히 제조현장은 무인 자동화 및 지능화를 갖춘 시스템으로 급속히 변화하고 있다[1]. 자동화를 위한 요소

로는 PLC, 서보모터, 클램핑 장치 등이 있고, 각 부품의 스펙에 따라 성능은 매우 다양하다.

IT 융합형 자동화시스템은 가공공정에서 소재 검사를 지능화하여 생산관리 및 품질 모니터링을 통하여 전사적 자원관리 및 품질 체크가 가능하다[2]. 보링(boring)은 홀을 확대하는 공동적인 동작으

* Dept. of Electronics Engineering, Semyung University

★ Corresponding author

E-mail : yoonhdh@semyung.ac.kr, Tel : +82-43-649-1308

※ Acknowledgment

Manuscript received Feb. 7, 2019; revised Feb. 15, 2019; accepted Feb. 21, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 대부분의 연구가 보링이나 진동흡수기의 동적인 관절운동을 증대시키는데 집중되었다[1, 2].

Kuster[3]는 보링에 있어 진동을 예측하는 모델을 연구하였고, Lazoglu[4]는 공정에 있어 시간영역 해석에 대한 수학적 모델과 계산알고리즘을 발표했다. Jialin Zhou[5]는 인공뉴럴망에 기초한 치수 예측 모델을 제안했고 치수 오차 예측과 보상에 사용하였다. 이 방법은 예측 전에 많은 시험이 필요하다. Guibo Cui[6]은 깊은 홀보링 실시간 검출에 초저주파를 사용했으나 검출 구현에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 베어링의 보링 생산성 향상을 위하여 검사 공정을 신속하고 표준화된 방법으로 진행할 수 있는 모니터링 시스템을 개발한다. IT 기반의 모니터링이 가능하게 됨으로써 조기에 불량 제품을 체크하고, 수율 개선 및 생산성 향상을 기할 수 있다.

II. 에러 분석 이론

일반적으로 베어링의 에러(error)는 공구의 실제 절단경로의 공간위치차이로 나타난다.

A. 공구의 절단 경로 모델

보링용 NC 선반에서 공구 고정기에 보링바가 유지되고, 공정소재(workpiece)는 회전축(spindle)에 부착 되어 있다. X-좌표축은 슬라이드(slide)와 나란하고 Z-좌표축은 스핀들 축과 나란하다. 그림 1은 NC 선반의 구조를 나타낸다.

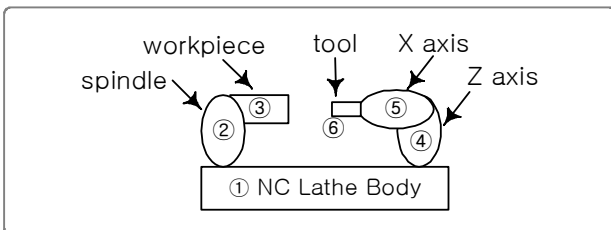


Fig. 1. Phase and construction of NC machine.
그림 1. NC 선반의 위상 구조

모델을 간단히 하기 위해, 몸체 좌표 초기가 기계도구의 0점(zero point)으로 되돌아 왔던 도구모서리에 위치한다. 축좌표 초기와 소재좌표 초기는 같은 지점에 있고, 도구의 좌표 초기는 도구끝에 위치

한다. 이때 좌표변환 행렬은 식(1)로 주어진다[6].

$$[A_{36}] = [A_{13}]^{-1}[A_{16}] = [[A_{12}]_s]^{-1}[A_{16}]_s \quad (1)$$

소재의 기계적인 왜곡(distortion)의 영향, 클램핑 에러(clamping error), 축들의 반지름 회전 오차 및 길고 얇은 실린더 성분들의 기계화 오차에 대한 기계도구들의 운동 오차 등이 모델에서 연구되고 고려되었다.

보링 공정에서 도구(tool)만 Z-축을 따라 움직이고 X-방향으로 정지되어 있다. 도구는 절단 힘, 기계도구의 강도, 축의 동적 특성, 제어의 정확성 및 기타 요소들에 의해 영향을 받아 이론적인 위치에서 벗어날 것이다. 공급에 장착된 센서들과 스핀들 장치는 기계도구들의 실제 운동 정보를 제공할 것이다. NC 선반 몸체에 관련된 도구의 운동좌표 변환 행렬은 식(2)와 (3)으로 주어진다[5, 6].

식(2)에서 $x(t)$ 와 $z(t)$ 는 기계도구의 변위 센서들에서 만들어져 얻어진 실제 위치들이다. 식(3)에서 실축회전각 $\theta(t)$ 역시 주축의 회전 부호화기에서 나온다. 소재가 척(chuck)에 심어지면 클램핑 에러(clamping error)가 존재하며, 일반적인 에러는 주축의 회전축에 대해 소재의 기하학적인 축의 경사도로 나타난다.

$$[A_{16}]_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x(t) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[A_{12}]_s = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & -\sin\theta(t) & 0 & 0 \\ \sin\theta(t) & \cos\theta(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

소재 원 좌표에서 회전센터의 위치가 (x_c, y_c) 라면, 기계오차에 대한 클램핑 에러의 역할은 식(4)처럼 위치 좌표변형으로 고려된다.

$$[A_{23}]_{pc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_c & -\sin\alpha_c & 0 \\ 0 & \sin\alpha_c & \cos\alpha_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\beta_c & \sin\beta_c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta_c & \cos\beta_c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\alpha_c = \text{atan}^{-1}(y_c/l), \quad \beta_c = \text{atan}^{-1}(x_c/\sqrt{y_c^2+l^2})$$

여기서 l 은 클램프 끝에서 교차점까지 거리이다. 이때 주축의 반지름 회전 오차는 물체에 대해 식(5)처럼 주축 좌표계의 변환으로 간주된다.

$$[A_{12}]_{pre} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & er_x(t) \\ 0 & 1 & 0 & er_y(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $er_x(t)$ 와 $er_y(t)$ 는 시간 t 에서 X 와 Y 좌표 방향으로 이상적인 회전중심에 대한 실제 회전중심간의 차이(Offset)이다. 소재의 기계적인 왜곡(distortion)은 절단 위치로 변하거나 시간변환이다. 어떤 절단 위치에서는 식(6)처럼 소재와 도구 좌표계의 변환으로 생각될 수 있다.

$$[A_{12}]_{pfc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ef_{wx}(t) \\ 0 & 1 & 0 & ef_{wy}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $ef_{wx}(t)$ 와 $ef_{wy}(t)$ 는 소재의 기계적인 왜곡들이다. 소재좌표계에서 도구 절단 경로는 다음 식(7)로 표현된다.

$$[A_{36}] = [[A_{12}]_p [A_{12}]_{pfc} [A_{12}]_s [A_{23}]_p [A_{23}]_{pe}]^{-1} [A_{16}]_s \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} r_{t-w}^x \\ 1 \end{bmatrix} = [A_{36}] \begin{bmatrix} r_{t-t}^x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 r_{t-w}^x 는 소재 좌표계에서 도구선단(tool nose) 절단위치이고, r_{t-t}^x 는 도구 좌표계에서 도구 선단 위치이다.

B. 모델변수 인증방식

도구 절단 경로 모델의 변수들이 보링 공정에서 입증될 필요가 있다. 기계도구에 장착된 센서들의 변위 정보와 오비 센서들은 모두 모델의 변수들을 계산하는데 사용된다. 소재와 척에 수직으로 두 개의 변위 센서들이 각각 존재한다. 기계적인 도구의 실제적인 운동 위치는 모터 구동기로부터 얻어진다.

1) 기계적인 도구의 운동오차

CNC 장치의 직립 위치나 귀환속도 성분처럼, 도구의 격자변위 변환기(grating displacement transducer)에 장착된 센서들이나 회전 인코더는 주축의 장치의 동적 운동정보를 제공한다. 운동정보는 모

터 구동기 모듈의 변위 귀한 모듈에서 얻어진다. 이 방식의 장점은 온라인 수집정보이고 보링공정에 방해는 받지 않는다.

2) 주축의 반경 회전 오차

소재나 척의 변위 변화의 측정은 주축의 반경 회전 오차를 추정하는데 사용된다. 두 개의 비접촉 센서들을 볼 위에 설치하여, 주축 반경 변위가 회전으로 측정된다. 측정된 데이터는 주축의 반경 회전 오차, 편심 오차(eccentric error) 및 측정하는 물체의 기하학적오차의 조합이다. 이러한 출력 신호들을 $S_x(\theta)$ 와 $S_y(\theta)$ 라 놓으면, 다음 식(9)의 기하학적인 관계에 의해 얻어진다.

$$\begin{cases} S_x(\theta) = e_c \cos(\theta + \lambda) + er_x(\theta) + r_x(\theta) \\ S_y(\theta) = e_c \sin(\theta + \lambda) + er_y(\theta) + r_y(\theta) \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $er(\theta)$ 는 주축의 반지름 회전 오차, e_c 와 $r(\theta)$ 는 각각 측정 물체의 편심오차의 진폭과 측정 물체의 기하학적인 오차이다. 기하학적인 오차는 다른 속도에서도 똑같이 때문에 벡터들의 뺄셈방식은 보링 공정에서 주축의 반경 회전 오차를 얻는데 사용된다. 다음 스텝처럼 : 첫째, 저속에서 얻어진 데이터의 잔동 정보를 빼는 것, 둘째, 보링 공정에서 얻어진 데이터의 잔동 정보를 빼는 것, 셋째, 위 주파수 벡터들의 빼기를 계산, 마지막으로 벡터 차한 신호를 구성한다.

3) 클램핑 오차(Clamping error)

기하학적인 중심의 편심이 최대인 소재의 돌출부 끝에서 기하학적 측정사와 주축의 회전좌표로 표현된다. 그러므로 소재의 끝에서 측정된 데이터는 클램핑 오차 변수를 계산하는데 사용된다. 편심 오차는 매 회전 당 주기적으로 나타나며, FFT 알고리즘을 이용하여 얻어질 수 있다. 편심 오차를 포함한 측정 데이터의 제1 고조파 성분과 기본 주파수 진동은 식(10)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} S_{x1}(\theta) = A \cos(\theta - \alpha) \\ \quad = e_c \cos(\theta - \lambda) + \Delta r \cos(\theta - \theta_m) \cos \varphi \\ S_{y1}(\theta) = B \cos(\theta - \beta) \\ \quad = e_c \sin(\theta - \lambda) + \Delta r \cos(\theta - \theta_m) \sin \varphi \end{cases} \quad (10)$$

여기서 Δr 은 기본 주파수의 진동크기(vibration amplitude), 편심 오차 e_c 의 진폭과 위상각 λ 가 계

산될 수 있고, 이때 $[A_{23}]_{pe}$ 에서 x_c 와 y_c 를 얻을 수 있다.

4) 기계왜곡(Machine distortion)

절단 힘의 영향에 따라 길고 얇은 실린더의 끝이 원 위치에서 이탈할 수 있고, 똑같은 편차(Offset)가 소재 끝에 설치된 변위 센서 데이터에서 나타난다. 절단 전과 절단 후 공정 데이터를 비교하여 기계적인 오차가 결정된다. 소재 구조는 주축의 척에 고정된 탄력적인 회전 샤프트처럼 모델링될 수 있다. 절단점의 기계오차는 캔틸레버(cantilever) 빔 모델로 계산된다.

C. 베어링 에러 체크

그림 2는 베어링 가공 및 생산 공정에서 에러 체크 모습을 나타낸다.

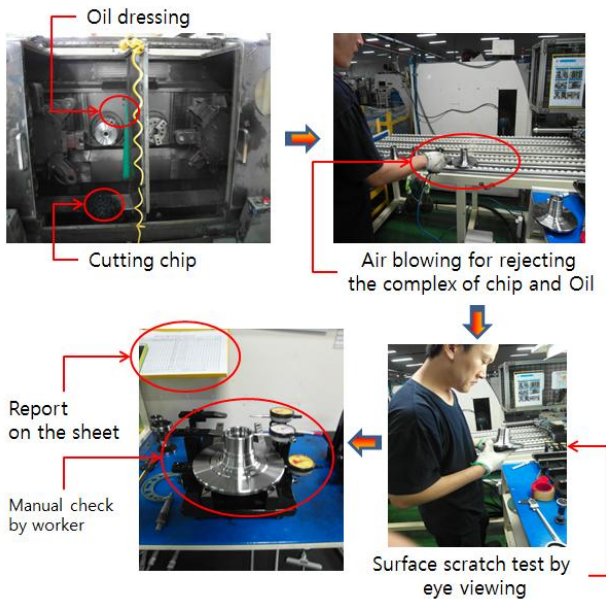


Fig. 2. Manufacture and error check process.
그림 2. 베어링 생산 및 에러체크 과정

NC 장치의 공정에서 생기는 칩(chip)을 제거하기 위해 오일로 드레싱(dressing)하고 이에 공기로 쏘아 추가 제거한다. 그후 베어링의 면의 스크래치, 길이, 폭 및 내부 호 깊이 등을 측정하여 에러를 찾은 후 정상 제품을 판정한다.

III. 에러 체크 시스템 개발

그림 3은 시스템 구성을 나타낸다. PC에서 시스

템을 부팅(Booting) 후 바탕화면 실행 아이콘을 클릭하면, S/W가 실행된다.

초기 설정을 위한 기본조건 설정은 샘플링시간(Sampling time)은 1초에 5회 샘플링을 시도한다. 이때 ViewCount는 데이터의 개수를 그래프로 표시하고, ViewScale은 공차크기의 ViewScale 만큼 관리도 그래프의 Y-축 레벨을 조정한다. Cutoff는 자동측정용으로 제품투입 판단 기준으로 MasterSet 값에서 변위만큼 제품이 빠진 상태를 인식한다.

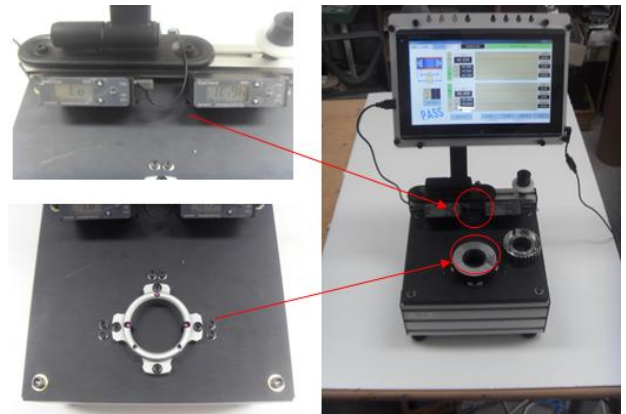


Fig. 3. System configuration.
그림 3. 시스템 구성

그림 4는 초기 측정화면으로 부팅 전원, 마스터 셋의 영점 조정, 베어링측정 작업, 에러 검사 후 통과(Pass) 및 손실 발생 논패스(Nonpass)로 화면에 표시된다. 이때 데이터 저장 및 열기를 수행할 수 있다.



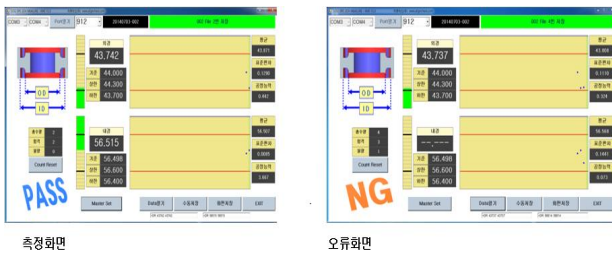
Fig. 4. Initial display for working.
그림 4. 작업 초기 화면

그림 5는 마스터셋의 영점 조절을 나타낸다. 디스플레이 전원을 동작(On)시킨 후 측정용 마스터 베어링의 영점조정을 실행한다. 마스터에 베어링을

올리면 규격 조전에 따라 Pass 및 Nonpass를 결정한다.



(a) Master와 Jig.
(a) 마스터와 지그



(b) Display for Pass/NG in bearing spec.
(b) 베어링 규격에 따른 Pass/NG 표시

Fig. 5. Master jig and decision display.
그림 5. 마스터 지그와 판정화면

그림 6은 저장된 데이터를 활용할 경우, 데이터를 불러내는 장면이다.

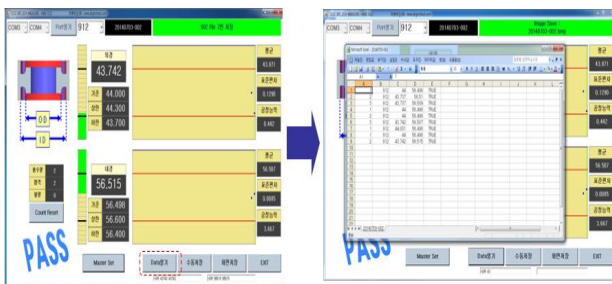


Fig. 6. Working for data open and reuse.
그림 6. 데이터 열기와 재사용 작업

IV. 실험결과

표 1은 기존 검사공정과 시스템 사용 후 비교 분석한 결과이다. 8시간 작업 결과 생산수량 976개 중 7~10개가 불량으로 나타난다. 홀(1 공정), 선삭(2, 3 공정), 검사(4 공정)에 대해, 하루 19시간 작업 기준으로 평균 생산량은 860개이고, 24시간 기준시 1085개로 효율이 증가한다.

Table 1. Input information.

표 1. 공정 입력정보

No	Process consumption	men		time(sec)	
		M1	M2	M1	M2
1	material	-	-	-	-
2	4-7D hole	1	0	30	30
3	1th cutting	0	0	80	78
4	Shuttle & Turnover	0	0	10	10
5	cleaning & Air Blow	0	0	10	10
6	2nd cutting	0	0	90	79
7	hole test	0	0	30	30
8	stamp	1	1	20	20
9	caving	2	2	10	10
sum		4	3	280	267

표 2는 전반적인 지표들에 대한 시뮬레이션 분석 결과를 나타낸다. 이때 자동으로 생성되는 작업지시 번호에 품명, 계획수량, 시작시간, 종료시간 등을 입력하여 생산수율에 대한 여러 가지 지표들을 비교한다.

Table 2. Comparison of simulation results.

표 2. 현재 상태, 반자동 및 자동화 결과

	present process	partly automation	fully automation
Production(ea)	14640	18814	21700
error(ea)	104	101	68
working time(h)	380	480	480
UPH(ea/h)	38.5	39.2	45.2
time(s)	93.4	91.8	79.6
error rate(%)	0.71	0.54	0.31
men	7	4	3

그림 7은 불량 수량을 분석하는 디스플레이 화면이다. 모니터링 화면에서 작업장 별로 실적이 업데이트되고 조건에 따라 조회할 수 있는 기능으로, 작업장 별로 작업 실적을 관리하고, 특정 작업장에 대해서는 시간대별로 계획대비 실적, 달성률을 분석하여 제공할 수 있도록 한다. 생산품목 별로 실

적이 업데이트되고 조건에 따라 조회할 수 있는 기능으로, 생산품목 별로 작업실적을 관리하고 특정 품목에 대해서는 품목코드, 품목명과 시간대별로 계획대비 실적, 달성률을 분석하여 제공할 수 있다.

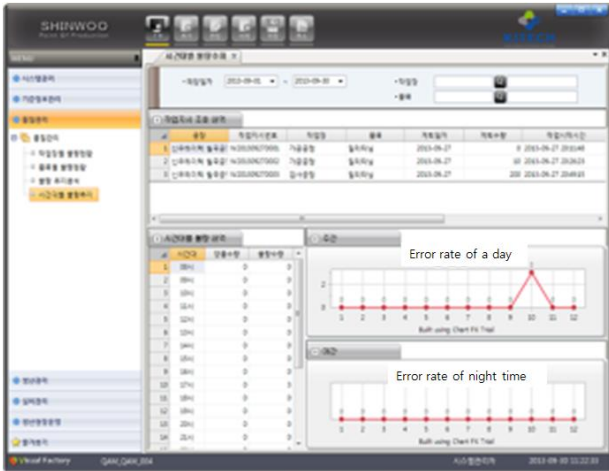


Fig. 7. Analysis of error quantity.
그림 7. 불량수량 분석

V. 결론

베어링 제조 공정에서 불량제품 체크, 수율 개선 및 생산성 향상을 위하여 IT 기반의 모니터링 시스템을 개발한다.

제품 불량은 공구 모니터링을 통하여 공구 교환 시기 알림으로써 제품의 불량을 감소시킨다. 불량 수량을 분석하는 모니터링 화면에서 작업장 별로 실적이 업데이트되고 조건에 따라 조회할 수 있는 기능으로, 작업장 별로 작업 실적을 관리하고, 특정 작업장에 대해서는 시간대별로 계획대비 실적, 달성률을 분석하여 제공할 수 있도록 한다. 생산품목 별로 실적이 업데이트되고 조건에 따라 조회할 수 있는 기능으로, 생산품목 별로 작업실적을 관리하고 특정 품목에 대해서는 품목코드, 품목명과 시간대별로 계획대비 실적, 달성률을 분석하여 제공할 수 있다.

또한 작업자 정서적 안전은 생산성 향상과 직결되며, 공구 모니터링은 공구 마모 및 파손교환 시기를 알림으로써 불량률을 최소화하여 제품 품질을 향상시키고, 생산 체계를 효과적으로 관리한다.

References

- [1] S. G. Tewani, E. Rouch, B. L. Walcott, "Cutting Process stability of a boring bar with active dynamic absorber, vibration analysis," *Analytical and Computational ASME*, pp. 205-213, 1991. DOI: 10.1016/0890-6955(95)80009-3
- [2] P. N. Rao, U. R. K. Rao, J. S. Rao, "Towards improved design of boring bars Part 1 : Dynamic cutting force model with continuous system analysis for the boring bar performance," *Int. J. March. Tools Manufacture*, pp. 33-44, 1988. DOI: 10.1016/0890-6955(88)90005-3
- [3] F. Kuster, "Cutting dynamics and stability of boring bars," *Annals of CIRP*, pp. 361-366, 1990. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61073-7
- [4] I. Lazoglu, F. Atabey, Y. Altintas, "Dynamics of boring processes : Part III-time domain modeling," *Int. J. March. Tools Manufacture*, pp. 1567- 1576, 2002. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00067-6
- [5] J. L. Zhou, "Research and Implementation on Demension Error Prediction and Compension System for Boring," *Ph. D Thesis, Huazhong University of Science and Technology*, CN, 2005.
- [6] G. B. Cui, F. J. Wu, X. Chang, "Research of the Real-time Detection for Processing Deep Holes," *Mechanical Engineer*, pp. 66-67, 2008.
- [7] Yao Wang, Stephan Wegner, "Error resilience video coding techniques, Real-time video communication over unreliable networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 17, pp. 61-82, 2000. DOI: 10.1109/79.855913
- [8] J. S. Yoon, K. H. Park etc, "Smart monitoring systems for automated machining process," *Conference of KSPE*, pp. 1335-1338, 2013.
- [9] S. C. Yun, W. H. Han, D. H. Yoon, "Automation of Fuel Filter Manufacturing Process via IT Convergence," *Journal of IKEEE*, Vol .1, No .1, 15, 2015. DOI: 10.7471/ikeee.2015.19.1.064

BIOGRAPHY

Zhao Xiang (Member)

2009.09~2013.08 : BS degree in
Electrical Engineering, Semyung
University.

2013.9~2015.08 : MS degree in
Electrical and Electronic Engineering,
Semyung University.

2015. 09~current : Ph. D course of Electrical and
Electronic Engineering, Semyung University.

2014. 04~2016.03 : AnyWood Co. Ltd. Research &
Development Institute, Researcher.

Main : Communication and Signal Processing, Low
Temperature Fluidity Monitoring system for Fuel Heater
& Test System in Cars.

Yoon Dal-Hwan (Member)

1984 : BS degree in Electronic
Engineering, Hanyang University.

1986 : MS degree in Electronic
Engineering, Hanyang University.

1994 : PhD degree in Electronic
Engineering, Hanyang University.

1987. 7~1994. 6 : Professor in
Electronic Engineering, Korea.

Military Academy. 2005. 7~2009. 2 : President of
HIWIN Co. Ltd. 1995. 3~Professor in Electronic
Engineering, SeMyung University.

2018.10.01.~Management and Technical Adviser of
Korea Heavy Machine Co., Ltd.

Main : Communication and Signal Processing, Medical
Signal Processing, Management System for LED&IT
Convergence, Low Temperature Fluidity Test System
for Fuel Heater Test in Cars, Plants. Others.