

사출 성형기 Barrel 온도에 관한 퍼지알고리즘 기반의 고장 검출 및 진단

Fault Detection and Diagnosis based on Fuzzy Algorithm in the Injection Molding Machine Barrel Temperature

김 훈 모*
(Hum-Mo Kim)

Abstract : We acquired data of injection molding machine in operation and stored the data in database. We acquired the data of injection molding machine for fault detection and diagnosis (FDD) continuously and estimated the fault results with a fuzzy algorithm. Many of FDD are applied to a huge system, nuclear power plant and a computer numerical control(CNC) machine for processing machinery. But, the research of FDD is rare in injection molding machine compare with computer numerical control machine. We appraise the accuracy of the FDD and the limit of the application to the injection molding machine. We construct the fault detection and diagnosis system based on fuzzy algorithm in the injection molding machine. Data of operating injection molding machine are acquired in order to improve the reliability of detection and diagnosis.

Keywords : artificial intelligence, fuzzy logic, injection molding machine, database

I. 서론

컴퓨터를 이용한 자동화 기술의 발전이 가속화되면서 각종 공업기계에 대한 관심이 높아지고 있지만, 시스템이 대형화, 복잡화되면서 이에 따른 고장발생하의 경제적 손실과 위험성을 증폭시켰을 뿐만 아니라 고장발생과 발생위치 등의 신속한 원인규명이 이루어지지 못하므로 시스템의 안정성과 신뢰성 확보가 문제점이 되고 있다. 따라서 이러한 시스템의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 고장 검출 및 진단 시스템의 필요성이 요구되고 있다.

고장 검출 및 진단 시스템은 전체 시스템의 운전 상황을 감시하고, 고장이 발생된 시스템의 성능 저하를 미리 검출하거나 이상동작의 원인이 되는 고장과 발생위치를 신속히 검출하여 고장의 정도를 분석하여 진단함으로써 운영자에게 적절한 처리 방법에 대한 정보를 제공하는 데 있다. 고장 검출 및 진단기술은 항공, 발전, 화학공정 등의 안전성이 요구되는 분야에서 활발한 연구가 되고 있는 기술이지만, 최근에는 각종 산업공정과 경제성 제고를 위해서 적용이 점차 확대되고 있으며, 적용기술이 매우 다양하므로 도입효과를 극대화하기 위해서는 대상 프로세스의 구성요소, 동특성, 수학적 모델의 유무, 측정 가한 변수와 검출률 등의 고장진단시스템의 성능, 선정된 기법의 실현 경비 등의 매우 많은 요인들을 고려하여 적용되어야 한다.

본 논문에서는 사출 성형기 Barrel의 온도 데이터를 실시간으로 습득, 저장한 후 이를 데이터베이스화하였다. 사출 성형기 Barrel의 지속적인 데이터 저장을 통하여 고장 검출 및 진단에 필요한 데이터를 습득하고, 퍼지알고리즘을 통하

여 고장의 유무를 판단하였다. 퍼지 알고리즘을 사용한 이유는 복잡한 비선형 시스템을 수학적으로 모델링할 경우 고차의 모델을 이용하거나 모델 근사화를 이용하여 낮은 차수로 표현하지만 결과는 만족하지 않다고 알려져 있기 때문에 복잡한 비선형 시스템을 표현하기 위해 퍼지 알고리즘을 사용하였다. 본 논문에서는 퍼지 알고리즘을 이용한 고장진단기법을 실제 운전중인 사출 성형기의 Barrel에 적용하여 고장 검출 및 진단기법의 정확성 및 적용 가능성을 평가하였다[6].

고장 검출 및 진단에 필요한 고장정보는 컨트롤러를 통해 고장신호를 만들어 특정시간 동안 다소 급격한 고장신호를 사출 성형기의 Barrel에 실제 적용하여 수집된 결과를 사용하였다.

II. 고장 검출 및 진단 시스템

1. 시스템 구성

그림 1은 사출 성형기와 컨트롤러, 데이터 저장을 위한 Server의 전체 시스템 구성을 보여주고 있다. 컨트롤러는 Bosch사의 PLC BT150을 사용하였고, I/O Module과의 통신은 CANOpen 방식을 사용한다. 그리고 Server와의 통신은 TCP/IP방식을 통하여 시스템의 상태정보를 Server로 전송한다.

그림 2는 사출 성형기의 Barrel 부분이다. Barrel의 내부는 사출에 필요한 수지와 사출 압력을 만드는 스크류로 구성되어 있다. Barrel을 감싸고 있는 원형 물체는 Barrel을 가열할 Heater이다. Heater는 2개가 1조로 구성되며, 본 실험에 사용된 Heater는 총 3개조로 구성되어 있다. 마지막으로 Nozzle 부위의 Heater는 끝 부분에 1개로 구성되어 있다.

그림 3은 Barrel의 온도제어를 위한 컨트롤 모듈이다. 컨트롤 모듈을 통해서 Heater의 I/O를 컨트롤하게된다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 29., 채택확정 : 2003. 8. 21.

김훈모 : 성균관대학교 기계공학부(kimhm@me.skku.ac.kr)

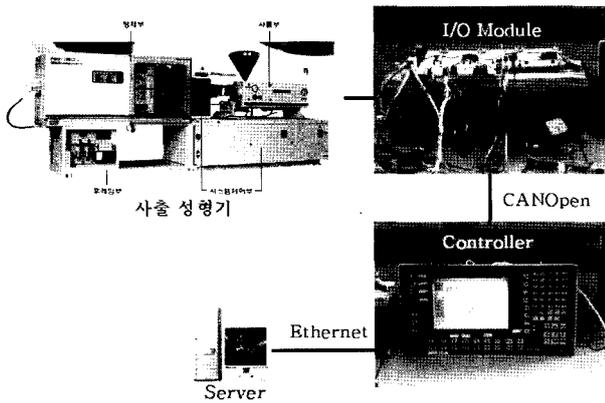


그림 1. 시스템 구성도.
Fig. 1. Structure of System.

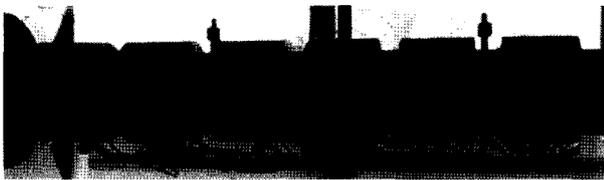


그림 2. 사출 성형기 Barrel.
Fig. 2. Barrel of Injection Molding Machine.

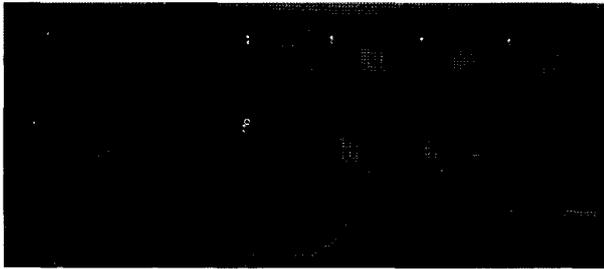


그림 3. 컨트롤 모듈.
Fig. 3. Control Module.

사출 성형기를 컨트롤하기 위한 WinSPS 컨트롤 프로그램과 Server의 O/S는 Window 2000이고, 데이터베이스는 SQL Server 2000으로 구성되어있다. 사출 성형기 컨트롤 프로그램으로부터 전송된 데이터는 SQL Server 2000 데이터베이스에 저장된다.

그림 4는 고장검출 및 진단(Fault Detection and Diagnosis) 시스템의 기본 구성을 보여준다. 관리프로세스의 관측치를 이용하여 고장/무고장 결정을 수행하여, 고장을 검출하고, 고장의 발생 위치, 발생 시점(고장진단) 등을 분석한다. 이러한 고장검출 및 진단 결정은 벡터구조의 결정값으로 수행된다. 고장검출 벡터는 고장의 영향을 결정하고, 진단결정 벡터는 고장의 발생 위치를 결정한다. 고장검출과 진단 하위 시스템은 기본 구성이 동일한 독립된 시스템으로 구성될 수 있다. 일반적으로 모든 하위 시스템들은 각 시스템 별 정보를 교환할 수 있고, 고장검출 및 진단을 할 수 있도록 제어신호를 관리프로세스에 보낼 수 있는 컨트롤러와 정보를 교환할 수 있어야 한다.

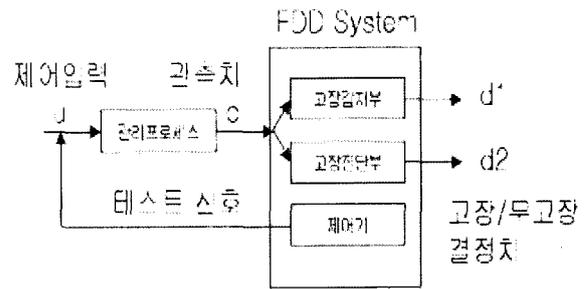


그림 4. 고장검출 및 진단시스템.
Fig. 4. Fault Detection and Diagnosis System.

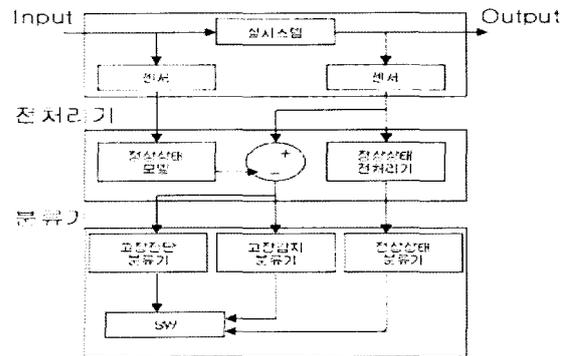


그림 5. 적용기법.
Fig. 5. Application Techniques.

2. 적용기법

고장 검출 진단 처리기법은 검출, 진단, 판단 및 처리의 순서로 구성되어 있다. 첫 번째 단계인 고장 검출은 감시되는 시스템의 실제 성능과 예측된 성능이 차이가 있을 때 고장을 지시하는 과정이다. 두 번째 과정인 진단은 고장의 원인이나 위치를 지정하는 과정이다. 그림 5는 고장검출 및 진단적용기법의 흐름도를 보여준다. 고장 검출 및 진단의 적용은 다음의 단계를 통해서 이루어진다.

- 1) 잔차발생(Residual Generation)
- 2) 고장 검출 논리
- 3) 고장 진단 정보(특정값)의 추출 알고리즘
- 4) 고장진단논리와 추론 알고리즘

III. 고장 검출 및 진단 결과

1. 고장검출

1.1 검출방법

윈도우 2000 환경의 진단프로그램과 SQL 2000 Server를 이용하여 고장 발생 시 시스템의 구성장치의 동작 특성을 분석한 결과를 토대로 시스템의 상태변수의 잔차와 통계적인 방법[7]에 의한 3σ 허용 값을 사용하여 고장을 검출하였다. 시스템 상태변수를 이용한 고장검출방법은 고장발생 시 정상상태에서 예측되는 값과 실제 고장상태에서의 측정된 값의 변화, 즉 잔차의 변화를 이용하여 시스템에서 발생하는 고장을 검출할 수 있다. 고장검출을 위한 시스템의 상태변수의 잔차는 다음 식으로 정의하여 이용하였다.

$$d_{Nozzle} = T_{Nozzle} - T_{Ref} \tag{1}$$

$$d_{Heater 1} = T_{Heater 1} - T_{Ref} \tag{2}$$

$$d_{Heater 2} = T_{Heater 2} - T_{Ref} \tag{3}$$

$$d_{Heater 3} = T_{Heater 3} - T_{Ref} \tag{4}$$

여기서 T_{Nozzle} 은 Nozzle의 온도이고, T_{Ref} 는 Nozzle의 설정 온도이다. 그리고, $d_{Heater 1}$ 은 Barrel 첫 번째 Heater를 나타낸다. 하첨자 1,2,3은 각 Heater를 나타낸다. T_{Ref} 는 역시 각 Heater의 설정 온도를 나타낸다. 고장이 발생할 경우 상태 변수값의 변화가 일어난다. 이러한 물리적 상태변수의 잔차를 이용하여 미리 설정된 허용 범위를 벗어날 경우, 고장으로 간주된다. 고장을 검출하기 위해서는 적합한 허용 범위의 결정이 중요하다. 허용범위는 통계적 방법 중 표준 정규 분포를 사용하였다. 표준 정규 분포는 평균과 표준편차가 각각 0,1인 정규분포 $N(0,1)$ 을 따른다.

본 연구에서 측정값이 정규 분포를 따른다고 가정하고, 측정된 값의 확률 $P(x)$ 가 99.73% 이내의 값이 정상상태 값이라 가정했다.

본 연구에서 Barrel의 Nozzle과 Heater1, 2, 3의 데이터의 저장을 위하여 Database를 표 1과 같이 구성하였다. SQL-2000 Server에 Temp 데이터베이스[4,5]를 구성하고, 그 하위에 Barrel Table을 구성하였다.

표 1. 바렐의 데이터베이스 테이블.

Table 1. Table of barrel in database.

	데이터형식	크기
B_index	Bigint	8
B_nozzle	Decimal	5(6,3)
B_heater1	Decimal	5(6,3)
B_heater2	Decimal	5(6,3)
B_heater3	Decimal	5(6,3)

고장신호를 감지하기 위해서 일단 고장신호 검출을 위한 선택된 데이터의 모 평균 및 모 표준편차를 구할 필요가 있다. 그래서, 본 연구에서는 SQL-2000 Server에 쿼리 질의를 전송하여 Barrel에서의 Nozzle, Heater1, Heater2, Heater3의 평균과 표준 편차를 구하였다. 평균과 표준 편차에 대한 쿼리 질의는 다음과 같다[2,3].

```

declare @avgheater3 decimal(6,3)
declare @sigmaheater3 decimal(6,3)
declare @sigmaheater3_1 decimal(6,3)
set @avgheater3=(select avg(B_heater3) from Barrel)
set @sigmaheater3=(select STDEV(B_heater3)from Barrel)
set @sigmaheater3_1=@sigmaheater3*2.78
    
```

1.2 감지결과

그림 6, 7, 8, 9는 Nozzle 과 Heater 1, 2, 3 에러를 보여 주고 있다. 사출기 Barrel 컨트롤러의 레퍼런스 입력은 170℃ 이고 실제 정상 운전 시 온도데이터의 평균은 170.54℃ 이고, 표준 편차는 0.271℃로계산 되었다. 그러므로, 고장 신호의 상, 하한 경계는 171.28℃와 169.78℃이다.

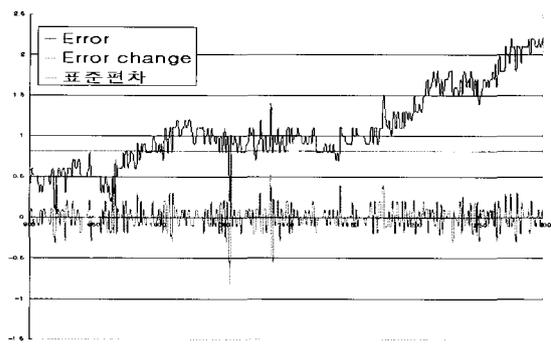


그림 6. 노즐의 고장검출 결과.
Fig. 6. Fault Detection Result of Nozzle.

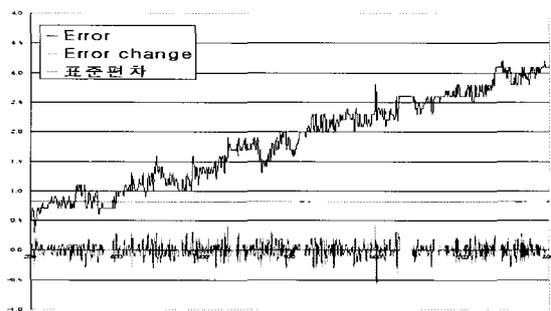


그림 7. 히터1의 고장검출 결과.
Fig. 7. Fault Detection Result of Heater1.

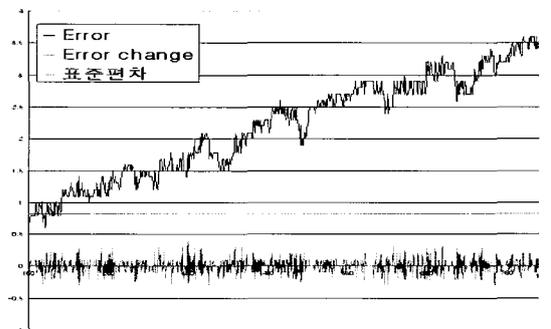


그림 8. 히터2의 고장검출 결과.
Fig. 8. Fault Detection Result of Heater2.

. 그림 6에서 알 수 있듯이 Nozzle은 정상상태 도달 후 970sec 부근에서 고장신호가 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 7, 8에서 알 수 있듯이 Heater 1, 2번은 레퍼런스 입력치 170에 도달한 후 감소하지 못하고 160sec부근에서 서부터는 고장 신호를 발생하는 것을 볼 수 있다.

Heater3은 모든 데이터들이 고장 신호 상, 하한 경계 내에 있음을 그림 9를 통해 알 수 있다. 고장 발생시 시스템의 각 구성장치의 운전 특성과 변화를 분석한 결과, 고장 발생 시 상태변수의 잔차 변화의 패턴이 서로 다른 것을 알 수 있다. 이것은 고장 진단을 위한 중요한 정보로 이용할 수 있으며, 이러한 서로 다른 패턴에 대한 인식 방법이 적용될 경우 고장검출은 물론 진단을 수행할 수 있을 것이다.

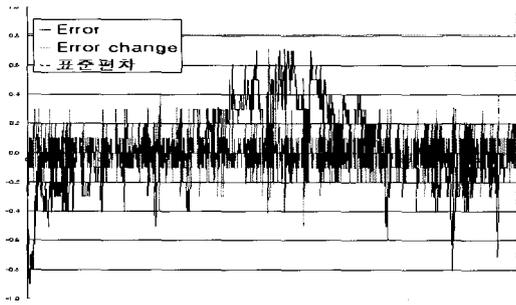


그림 9. 히터3의 고장검출 결과.
Fig. 9. Fault Detection Result of Heater3.

2. 고장진단

Barrel 부분의 고장 유형은 크게 2가지로 볼 수 있다. 우선 Barrel의 Nozzle과 Heater의 온도를 제어하는 컨트롤러의 고장이다. 컨트롤러의 이상 작동으로 인하여 각 부분의 온도제어가 제대로 수행이 되지 않는 경우이다. 두 번째로, Barrel의 온도를 측정하는 써모커플의 단선으로 인하여 발생하는 고장이다. 써모커플의 단선에서 발생하는 고장패턴은 아주 큰 출력치를 내보내는 것이 일반적인 현상이다. 본 연구에서 사용된 써모커플은 K-Type 형식으로 1000℃ 이상의 온도를 측정할 수 있으므로, 써모커플의 단선 시 출력 온도는 1000℃ 이상의 출력을 나타낸다.

2.1 진단방법

고장 진단 알고리즘으로는 퍼지 알고리즘[1,4]을 사용하였다. 퍼지 입력으로는 설정온도와 실제 계측된 온도와의 차이값인 에러와 에러의 변화율을 사용하고 표 2에 나타난 것과 같이 13단계의 양자화를 수행하였다.

3개의 Heater와 Nozzle 부위의 Heater로부터 고장을 예측하기 위해서 다음과 같은 룰 베이스를 구성하였다. 에러와 에러 변화율에 따른 듀티비를 출력하는 방식으로, 실험을 통해 규칙을 수정하여 표 3의 룰 베이스를 얻었다.

위의 룰 베이스를 바탕으로 빠른 프로세스를 위하여 미리 계산하여 그림 10과 같은 룰업테이블을 작성하였다.

표 2. 양자화 Table.
Table 2. Quantization Table.

level	range
-6	$x \leq -3.2$
-5	$-3.2 < x \leq -1.6$
-4	$-1.6 < x \leq -0.8$
-3	$-0.8 < x \leq -0.4$
-2	$-0.4 < x \leq -0.2$
-1	$-0.2 < x \leq -0.1$
0	$-0.1 < x \leq 0.1$
1	$0.1 < x \leq 0.2$
2	$0.2 < x \leq 0.4$
3	$0.4 < x \leq 0.8$
4	$0.8 < x \leq 1.6$
5	$1.6 < x \leq 3.2$
6	$3.2 < x$

표 3. 룰베이스.
Table 3. Rule-Base.

	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
PM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
PS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
NS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
NM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
NB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB

-5.35-5.24-5.35-5.24-4.69-4.52-3.91-3.65-2.71-2.43-1.31-0.43 0.00
 -5.24-5.24-5.24-5.24-4.52-4.26-3.65-3.27-2.43-2.00-1.00 0.00 0.43
 -5.35-5.24-4.69-4.52-3.91-3.65-2.71-2.43-1.31-1.00 0.00 1.00 1.31
 -5.24-5.24-4.52-4.26-3.65-3.27-2.43-2.00-1.00 0.00 1.00 2.00 2.43
 -4.69-4.52-3.91-3.65-2.71-2.43-1.31-1.00 0.00 1.00 1.31 2.43 2.71
 -4.52-4.26-3.65-3.27-2.43-2.00-1.00 0.00 1.00 2.00 2.43 3.27 3.65
 -3.91-3.65-2.71-2.43-1.31-1.00 0.00 1.00 1.31 2.43 2.71 3.65 3.91
 -3.65-3.27-2.43-2.00-1.00 0.00 1.00 2.00 2.43 3.27 3.65 4.26 4.52
 -2.71-2.43-1.31-1.00 0.00 1.00 1.31 2.43 2.71 3.65 3.91 4.52 4.69
 -2.43-2.00-1.00 0.00 1.00 2.00 2.43 3.27 3.65 4.26 4.52 5.24 5.24
 -1.31-1.00 0.00 1.00 1.31 2.43 2.71 3.65 3.91 4.52 4.69 5.24 5.35
 -0.43 0.00 1.00 2.00 2.43 3.27 3.65 4.26 4.52 5.24 5.24 5.24 5.24
 0.00 0.43 1.31 2.43 2.71 3.65 3.91 4.52 4.69 5.24 5.35 5.24 5.35

그림 10. 룰업 테이블.
Fig. 10. Look-up Table.

추론은 Min-Max 방식을 사용하였으며, 비퍼지화 방법은 무게중심법을 사용하였다.

2.2 진단결과

실험에 사용된 데이터의 표본수는 1300개의 온도데이터를 사용하였고, Heater 1,2번의 고장은 급격한 고장을 나타내도록 하였고, Nozzle은 정상상태를 유지하면서 점진적으로 고장을 발생하도록 하였다. 그림 11은 실험결과 그래프를 보여주고 있다.

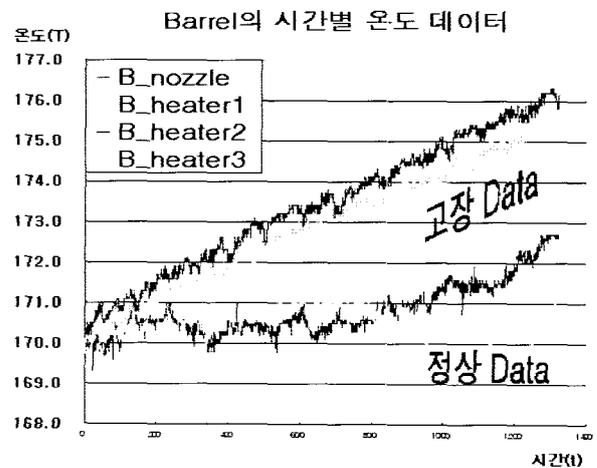


그림 11. 고장 발생 데이터.
Fig. 11. Fault occurring data.

평균	표준편차	표준편차*2.78
170.540	.271	.753

	B_index	error	errorch	FEV	FECV	result
1	214	.760	.100	3	0	1.57
2	221	.760	.100	3	0	1.57
3	222	.760	.000	3	0	1.57
4	223	.760	.000	3	0	1.57
5	224	.760	.000	3	0	1.57
6	225	.860	.100	4	0	2.00
7	226	.760	-.100	3	-1	1.00
8	227	.760	.000	3	0	1.57
9	228	.860	.100	4	0	2.00
10	229	.860	.000	4	0	2.00
11	230	.860	.000	4	0	2.00
12	231	.760	-.100	3	-1	1.00
13	233	.760	.100	3	0	1.57
14	234	.760	.000	3	0	1.57
15	237	.760	.100	3	0	1.57
16	238	.860	.100	4	0	2.00
17	239	.760	-.100	3	-1	1.00
18	240	.760	.000	3	0	1.57
19	242	.760	.100	3	0	1.57

□ 표 형태 □ 메시지

그림 12. 고장 진단 결과.
Fig. 12. Result of diagnosis.

그림 12는 실험에 따른 Barrel의 Heater와 Nozzle의 고장 진단 결과를 나타내고 있다. Nozzle은 1026sec부터 점진적인 고장이 발생함을 알 수 있었다. Heater1, 2는 126sec부터 점진적인 고장이 발생하여, 900sec에서는 Critical한 고장으로 진단됨을 추론할 수 있었다.

IV. 결론 및 향후 과제

기존의 사출기 고장진단 시스템은 고장이 이미 발생한 상태에서의 적은 데이터를 가지고 단순 알람식으로 고장을 진단하나 본 연구에서는 Database를 사용하여 실제 운전중

인 사출성형기의 지속적인 데이터 수집을 통하여 실제 시스템의 이력데이터를 분석하여 고장의 진행 정도를 파악할 수 있다. 그리고 고장 발생 이력 데이터를 이용한 고장진단을 통해 제안하는 시스템은 기존의 시스템과 비교해 볼 때 좀 더 지능화된 고장 진단을 통해서 시스템의 신뢰성을 높였다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 Barrel의 고장 유형을 2가지로 예측하고 알고리즘을 구성하였지만 추후 연구를 통하여 세밀한 고장 패턴 및 Barrel의 센서의 수명 예측을 위한 고장진단 알고리즘을 추가해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] H. L. Tsoukalas, R. E. Uhrig, "Fuzzy and neural approaches in engineering." *A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, inc.*
- [2] Silberschatz, Korth and Sudarshan. "Database system concepts." *Mcgraw-Hill International Editions.*
- [3] J. Han, M. Kamber, "Data mining: concepts and techniques." *Morgan Kaufmann Publishers.*
- [4] T. I. Liu, J. H. Singonahalli and N. R. Iyer, "Detection of roller bearing defects using expert system and fuzzy logic." *Mechanical Systems and Signal Processing*(1996) 10(5), 595-614.
- [5] 윤형식, 이평기, 전기준, "데이터 베이스를 이용한 자기 구성 퍼지 제어기", 91한국자동제어학술대회논문집.
- [6] 변중남 외 7인, "고급 분산 제어 시스템을 위한 고장 진단 퍼지 전문가 시스템의 개발", 93한국 자동제어학술회의 논문집.
- [7] 소정훈, 유승선, 경남호, 신기식, "공조 설비용 고장진단 시스템의 실시간 진단실험", 설비공학 논문집 제 13 권 제 8호 pp. 787-795.



김 훈 모

1984년 성균관대 기계공학과 졸업. Univ. of Michigan 항공우주공학과 석사(1990), Univ. of Alabama 기계 공학과 박사(1993). 1995년~현재 성균관대학교 기계공학과 교수.