

신경회로망을 이용한 기계적 실의 이상상태 감시

이 완 규, * 임 순 재, * 최 만 용, * 남궁 석, **

Monitoring of Mechanical Seal Failure with Artificial Neural Network

Lee, W.K., * Lim, S.J., * Choi, M.Y., * Namgung, S. **

ABSTRACT

The mechanical seals, which are installed in rotating machines like pump and compressor, are generally used as sealing devices in the many fields of industries. The failure of mechanical seals such as leakage, fast and severe wear, excessive torque, and squeaking results in big problems.

To monitor the failure of mechanical seals and to propose the proper monitoring techniques with artificial neural network, sliding wear experiments were conducted. Torque and temperature of the mechanical seals were measured during experiments. Optical microstructure was observed for the wear processing after every 10 minute sliding at rotation speed of 1750 rpm and scanning electron microscopy was also observed. During the experiment, the variation of torque and temperature that meant an abnormal phenomenon, was observed. That experimental data recorded were applied to the developed monitoring system with artificial neural network.

This study concludes that torque and temperature of mechanical seals will be used to identify and to monitor the condition of sliding motion of mechanical seals. An availability to monitor the mechanical seal failure with artificial neural network was confirmed.

Key Words: mechanical seal, failure, artificial neural network, torque, temperature, monitoring, measurement

1. 서 론

기계적 실(mechanical seal)은 회전축에 장착하는 밀봉장치의 하나로서, 자동차, 화학공장, 제지공장,

반도체 제조공장, 제철공장, 제약공장 등의 산업현장에서 펌프(pump)나 교반기 등에 다량으로 사용되고 있다. 이들 펌프나 교반기의 고장은 곧바로 기계 혹은 생산라인의 정지를 일으켜 막대한 경제적 손실을 가져올

* 한국표준과학연구원

** 충남대학교 기계공학과

뿐만 아니라 인명피해를 초래하기도 한다. 이들 회전기계에서의 고장은 베어링의 파손이나 결합보다도 기계설비의 이상에 기인하는 것이 더 많은 것으로 보고 되고 있다 [1,2].

기계설비의 고장은 주로 실을 구성하는 시트링(seat ring)과 피동링(seal ring)에서 발생한다. 주요한 고장으로는 시트 링과 피동 링에서의 크랙 발생, 링의 조기 마멸 등을 들 수 있으며, 이 현상들이 진전하면 밀봉면의 파괴와 함께 밀봉유체의 누설을 초래하여 치명적인 상태에 이르게 된다. 이의 원인으로는 가공불량, 조립불량, 과대면압, 미끄럼운동면의 이물질의 혼입, 마찰면의 무윤활, 건식운전 등, 품질상의 문제와 운전상의 문제에 기인하는 것으로 보고 되고 있다 [1,3,4,5]. 따라서 안전한 운전을 위해서는 엄격한 품질의 실의 사용과 함께 적합한 운전조건을 설정하는 것과, 우발적인 고장상태를 조기에 발견할 수 있도록 실의 운전상태를 지속적으로 감시하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 가동중인 실의 상태를 모니터링하여 실의 이상여부를 검출할 수 있는 감시 시스템의 개발을 검토하였다. 즉 가동중의 실의 출력신호를 실시간으로 계측하고 이 출력신호들을 분석하여 실의 파괴가 일어나기 직전의 상태를 판단할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

종래 기계설비 실 이상상태의 계측에 관련된 연구로서는 실의 마멸실험을 통한 파괴메카니즘과 재료특성에 관한 연구가 다수 보고 되어 있으며 [5,6,7], 다양한 운용 조건하에서의 온도, 토크, 변위, AE 신호의 변화에 관한 결과가 보고 되고 있다[8,9]. 그러나 이들 연구는 실 자체의 특성분석을 위한 것이 대부분이다.

본 연구에서는 가동중의 실의 상태를 계측하기 위해서 우선 온도와 토크의 변화를 이용하였다. 그 이유로서는 이에 관한 장치가 비용이 저렴하고, 장기간 사용이 용이하기 때문에 산업현장에서 쉽게 활용될 수 있다는 점과, 실이 파단상태에 이르게 되면 급격한 토크의 증가와 함께 온도의 상승이 수반되기 때문에[8], 이들 만으로도 실의 이상여부를 충분히 검출할 수 있기 때문이다. 이상진단을 위한 방법으로는 통계처리, 신호처리법등이 일반적으로 많이 알려져 있다 [10]. 이들 방법은 상태에 관한 모델의 구축이 비교적 용이하며 출력신호의 인과관계가 명확한 경우에 유효하다. 그러나 기계설비의 경우 종류가 다양하고 가동상태에 따라 온도와 토

크의 출력패턴이 일정하지 않기 때문에, 일반적인 모델의 구축 또는 알고리즘적인 정형화가 어려운 실정이다. 최근 이와같은 문제해결의 구조 또는 모델이 명확히 규정되기 곤란한 문제에 대해서 신경회로망(artificial neural network)을 적용하는 시도가 활발히 이루어지고 있다 [11,12].

본 연구에서는 가동중에 발생하는 온도 및 토크를 검출하고 신경회로망을 이용하여 실의 이상상태를 인식하는 시스템을 개발하였다. 신경회로망은 예측특성을 갖는 다계층 신경회로망으로 구성하였다. 본 논문에서는 먼저 실의 마멸실험을 통하여 정상상태와 이상상태시의 온도와 토크신호의 특성을 분석하였다. 다음 마멸실험에서 얻은 온도와 토크신호를 가지고 본 연구에서 제안한 신경회로망을 이용하여 실의 이상상태를 인식하는 방법을 제안하였다.

2. 기계설비 실의 고장기구

기계설비 실은 Fig. 1에 보이는 것과 같이 크게 고정부와 회전부로 구성되며, 고정부의 중요 부품으로는 시트링이 있고, 회전부에는 피동링이 있다. 시트링의 재질로는 마찰계수가 적은 카본이 많이 이용되고 있으며, 피동링의 재질로는 경도, 강도, 윤활도 등이 양호한 세라믹이 많이 이용되고 있다. 시트링과 피동링은 서로 적당한 압력으로 밀착된 상태에서 미끄럼 운동을 하면서 밀봉면을 형성시키게 된다. 따라서 두개의 링은 마멸이 최소가 되어야 하고, 밀봉하고자 하는 유체의 누설을 방지하고 수명이 길어야 한다.

기계설비 실의 고장은 이 밀봉면의 파괴가 주 원인이다. 밀봉면의 파괴는 결국 밀봉유체의 누설을 초래하기 때문이다. 그 고장의 원인으로는 두 링의 파손, 과대마멸, 편마멸 등을 들 수 있다. 과대마멸이나 편마멸은 기계설비 실의 가공이나 조립불량에 그 원인이 있으며, 이들의 고장은 두개링의 변위를 온라인 계측하므로써 감시할 수 있다. 파손은 예측하기 어려운 고장원인으로 원활한 미끄럼 운동을 막는 인자들에 기인한다. 즉 운동면의 이물질, 건식운전, 운동면의 무윤활, 과대면압, blister의 생성, 크랙등이 두개 링의 원활한 미끄럼 운동을 방해하며, 결국은 링의 파손을 가져와 밀봉유체의 누설을 초래한다. 고장 발생시 두개 링에 작용하는 힘의 차이가 발생하게 되는데, 이때의 토크를 검출하므로써 두개 링의 운동상태를 인식할 수 있다고 생각된다.

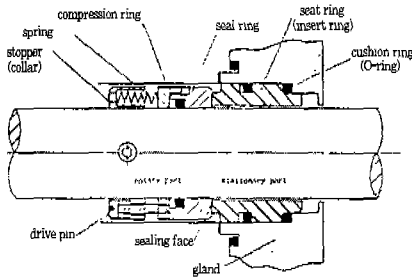


fig. 1 Structure of mechanical seal

또 과대면압이나 접촉압력의 변화는 운동면의 온도변화를 가져오는 물론이다.

3. 미케니컬 실의 마멸실험

3.1 실험방법

본 실험에서는 일반으로 많이 사용되고 있는 카본시트링, 알루미늄 세라믹재료의 피동링의 실을 사용하였다. 실험에 사용된 실의 두 링의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다. 두 재료는 마멸실험 전에 먼저 아세톤을 넣은 초음파 세척기를 이용하여 세척하여 링표면의 불순물을 제거한 후 광학현미경으로 표면검사를 하였다. 다음 알루미늄 밀봉면에 비커스경도계를 이용하여 대각선 길이 76 μm 의 다이아몬드 압흔자국(indentation) 즉 표면결함을 만들어 넣었다. 압흔자국을 낸 이유는 마멸실험에서 밀봉면의 결함이 토크에 미치는 영향을 조사하기 위함이다. 실험장치는 상용의 마멸전용시험기를 사용하였다. 이 장치는 분동에 의해 밀봉면의 접촉압력을 조정할 수 있고 링의 회전수도 가변시킬 수 있다.

실험조건은 실의 마멸상태의 추이를 관찰하기 위하여 실제의 조건보다 가혹한 상황을 설정하여 인위적으로

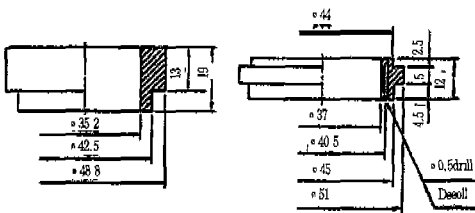


fig. 2 Dimensions of alumina ring (left) & carbon ring (right)

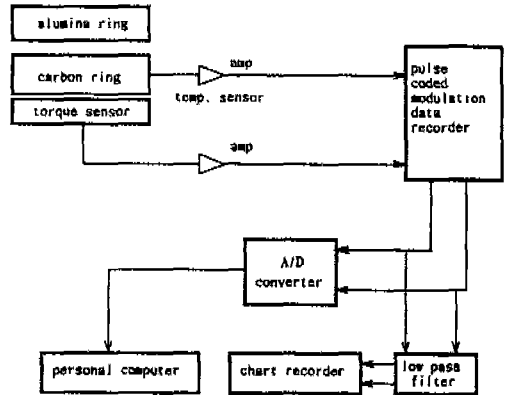


Fig. 3. Block diagram of measuring system

실의 고장상태를 발생시킬 수 있도록 하였다. 피동링의 회전수는 통상의 경우와 같이 1750 rpm 으로 고정하였으나, 피동링과 시트링의 접촉압력은 실제 사용되는 2-3 kg_f/cm^2 보다 훨씬 높은 7 kg_f/cm^2 , 10 kg_f/cm^2 , 13 kg_f/cm^2 의 세가지로 설정하였다. 또한 알루미늄 피동링에는 표면결함의 존재를 가상하여 다이아몬드 압흔자국을 1개, 2개, 4개를 만들어 넣었다. 2개와 4개의 압흔자국은 밀봉면의 중심선을 대칭으로 하였다. 마멸 실험시간은 10분 간격으로 60분간 시행하였고 10분마다 밀봉면과 압흔자국의 변화상태를 광학현미경으로 관찰하였다. 마멸실험과 함께 토크의 측정은 마멸시험기에 내장된 토크센서를 이용하여 측정하였다.

또한 마멸과 온도와의 관계를 조사하기 위하여 시트링의 온도를 측정하였다. 측정을 위하여 카본시트링의 밀봉면 반대측으로부터 직경 0.5mm의 구멍을 밀봉면 1mm 아래까지 뚫고 열전대를 부착하였다. 열전대는 직경 0.15mm의 K형인 chromel-alumel 열전대를 사용하였다. 열전대로부터 발생하는 기전력의 증폭을 위하여 상용의 진용증폭기 AD595 IC chip을 사용하였다. 실험을 위하여 사용한 장치의 구성도를 Fig. 3에 나타낸다.

3.2 결과 및 고찰

Fig. 4는 위로부터 접촉압력이 각각 7 kg_f/cm^2 , 10 kg_f/cm^2 , 13 kg_f/cm^2 때의 토크와 온도 특성을 나타내는 것으로써, 7 kg_f/cm^2 에서는 정상적인 토크, 온도 및 미끄럼 운동을 관찰할 수 있었던 반면에 10 kg_f/cm^2 와 13 kg_f/cm^2 의 경우에 있어서는 초기상

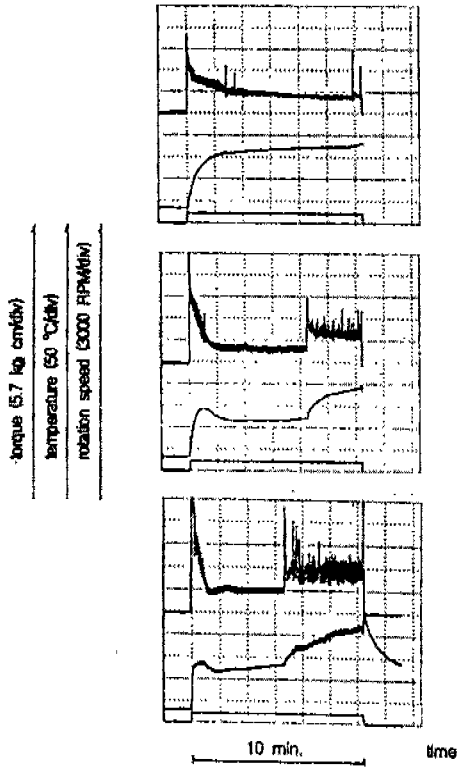


Fig. 4 Torque and temperature vs. wear time at $7\text{kg}_f/\text{cm}^2$ respectively(from top)

태를 지나 안정한 상태를 보이다가 갑작스런 토크의 증대와 함께 온도도 정상상태 이상으로 증가함을 보이고 있다. 토크의 변화가 심할 때에 두 링의 미끄럼 운동을 살펴보면 육안으로도 피동링의 slip 현상을 관찰할 수 있었다.

광학현미경으로 관찰한 결과 마멸실험 10분 또는 20분 후부터 알루미늄 링 밀봉면에서 pit들이 발생하였으며 카본링 밀봉면에서는 응착층의 생성과 탈락이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 이 응착층의 생성과 탈락은 시간이 지날수록 활발히 일어났다. 알코올로 밀봉면을 닦고 나서 관찰한 결과 카본링 밀봉면에서 심한 마멸이 일어난 부분과 새로운 기저부를 노출시키는 것으로 판단되며, 새로 나타난 기저부는 알루미늄 링 밀봉면과의 마찰로 응착층을 새롭게 생성시키는 것으로 해석된다.

결국 카본 응착층의 지나친 생성은 피동링의 slip을 야기시키고, slip 후 카본링과의 급격스런 마찰은 과대

토크(그래프상의 피크펄스를 나타냄)를 유발하고 이러한 이상상태의 계속은 마찰열을 증가시켜 온도의 증가현상이 관찰되는 것으로 해석된다. 마멸실험을 전속운전으로 했기 때문에 실제 운용상태에서 조작자의 실수로 미케니컬 실에 냉각수를 공급하지 않은 채 건식운전을 하다 때늦은 냉각수의 공급은 실에 열충격을 주어 실에 크랙이나 파손을 야기하는 결과를 가져올 것으로 생각된다.

이상의 결과로 미케니컬 실의 미끄럼운동에서 토크와 온도의 동시 증가는 실의 비정상적인 운전상태를 나타내는 것으로 생각되며 이 계속인자로 미케니컬 실의 실시간 감시가 가능하리라 생각된다. 이 비정상적인 운전이 계속된다면 연속적으로 실의 과대마멸, 밀봉유체의 누설, 피동링이나 시트링의 파괴를 초래할 것으로 판단된다.

4. 신경회로망을 이용한 이상상태의 인식

4.1 인식방법

본 실험에서는 토크의 출력신호 특성에 따라 Fig. 5와 같이 3단계로 분류하였다. 제 1단계는 작동초기에 시스템이 가동되어 어느 일정한 상태에 도달하는 초기 안정화 단계, 즉 실의 온도 및 토크가 안정된 상태에 달하는 과정이며, 제 2단계는 안정화 된 단계로부터 이상상태가 일어나기 직전까지의 정상상태를 나타내는 과정이며, 3단계는 이상상태가 시작되는 단계를 나타낸다.

본 연구에서는 이상상태모델링을 위해서 안정화상태의 모델링을 먼저 수행하고, 이러한 안정화모델의 특성과 다른 특성을 가진 신호열이 나타나는 경우 이를 이상상태로 가정하였다. 따라서, 본 연구에서는 위에서 구분한 3단계중에서 2단계인 안정화상태의 데이터를 이

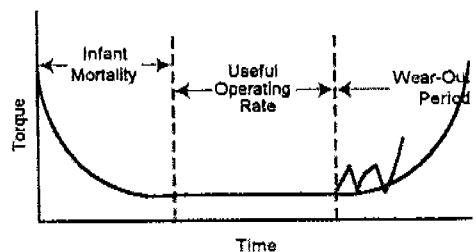


Fig. 5 characteristic curve of torque

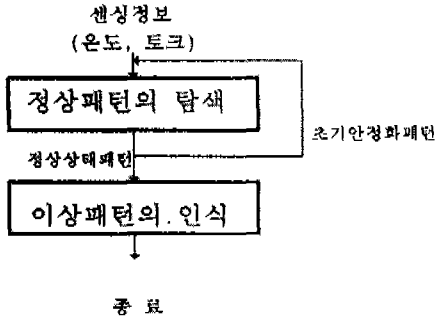


fig. 6 Recognition process of mechanical seal failure

용하여 신경회로망을 이용한 정상상태모델을 구성하였다.

모델링한 이상상태 인식의 프로세스는 Fig. 6과 같다. 먼저 입력되는 온도와 토크의 출력신호가 안정화단계 즉 정상상태에 달하였는지를 판별한다. 판별방법은 온도와 토크의 각각에 대해서 인접시점(t-1, t)에서의 상대적인 오차를 구하고, 이들 값이 모두 미리 설정한 임계치 이하가 되는 시점을 안정화 구간 즉 정상상태의 시작으로 하였다. 인접시점의 상대오차를 구할 때, 초기에는 온도와 토크값이 크게 변동하기 때문에 시간적으로 초기 100 포인트의 값에 대한 평균값을 구해 놓고 이로부터 인접시점의 상대오차를 구하였다. 임계치는 실험에 의한 값으로 여기서는 10^{-2} 으로 설정하였다. 이와같이 해서 일단 온도와 토크의 출력이 정상상태의 패턴으로 판정되면, 신경회로망이 가동되고 신경회로망에서는 이들 출력신호와 미리 학습되어 있는 정상상태의 패턴과의 유사성을 비교하여 이상상태의 패턴이 출현하는지를 감시한다. 여기서는 이상상태의 패턴인식에 있어 정상상태의 패턴이 아닌 모든 패턴은 이상상태의 패턴으로 인식하고 있다. 이것은 이상상태의 패턴을 기술하기가 매우 어렵고, 한편 이와같은 문제에서는 정상인지 이상인지 만을 판별하면 되기 때문이다. 본 시스템에서는 국부적으로 온도나 토크가 변동이 생겨도 2개의 정보가 서로 보완적인 역할을 하도록 모델링 하였기 때문에 인식오류를 최소화 할 수 있도록 하였다.

다음으로, 온도와 토크의 정상상태모델링을 위해서 사용한 예측신경회로망(predictive neural network)에 대해서 설명하고자 한다. 온도나 토크와 같이 시간적인 변화특성을 갖는 데이터의 정상상태를 모델링하기 위해서는 기존의 정적패턴들의 분류나 인식을 위해서

사용하는 정적구조(static structure) 신경회로망으로는 시간적인 변화패턴을 효과적으로 모델링하기 어렵다. 따라서, 이러한 변화특성을 모델링하기 위해서 예측특성(predictive characteristics)을 갖는 다계층구조 신경회로망을 구성하였고, 학습을 위해서는 정상상태패턴 전체에 대해서, 현시점을 기준으로 다음 시점에서의 출력패턴과 오차가 최소화 되도록 하는 학습식을 사용하였다. 사용된 신경회로망의 구조는 Fig. 7과 같다.

입력층(input layer)은 온도, 토크의 2개의 노드(node)로 구성되어 있고 은닉층(hidden layer)은 10개의 노드를 가지며, 출력층(output alyer)도 입력층과 같이 2개의 노드로 구성된다. 신경 회로망의 학습방법으로는 오차역전파 알고리즘을 사용하여 t - 1시점에서 입력된 신호의 출력패턴과 t 시점의 센싱신호와의 오차가 최소가 되도록 각 노드의 가중치를 오류방향의 반대방향으로 감소하거나 증가하도록 하는 방법이다. 즉, 정상상태구간의 모델링을 위해서 인접 패턴들 간의 유사성을 학습하도록 하였다. 각 노드의 동작함수는 시그모이드함수를 사용하였고 오차제산식은 다음과 같다.

$$E_t = \sum_k^K (O_k^{(t)} - I_k^{(t)})^2, \text{ where } K = 2 \quad (1)$$

여기서, I_t 는 시점 t에서의 오류로써, 시점 (t-1)에서 입력된 토크와 온도로 이루어진 입력벡터에 대한 시

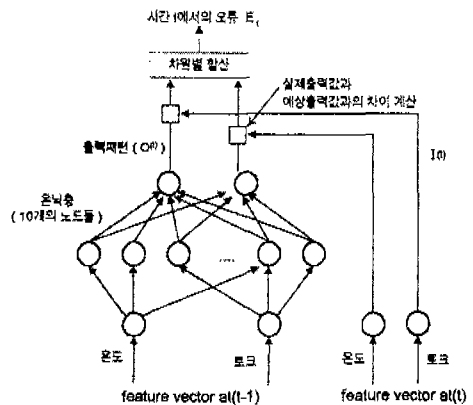


Fig. 7 Neural network architecture for the recognition of mechanical seal failure

점 t 에서의 예상출력값($O_k^{(t)}$)과 t 에서의 실제입력($I_k^{(t)}$)간의 차이의 제곱의 합을 의미한다. 여기서, K 는 입력벡터의 차원수로, 입력패턴이 온도와 토크로 이루어졌으므로 2의 값을 가지게 된다.

이상상태의 인식은 입력패턴에 대한 출력패턴간의 유사성을 비교하여 그 차이가 임계값 보다 크고 그 차이가 큰 상태의 지속시간이 미리 설정한 시간보다 크면 이상상태로 인식한다. 즉 신경회로망에는 정상상태의 시계열 온도와 토크의 데이터가 순차적으로 입력된다. 이 때 신경회로망에서는 임의의 시각 ($t-1$)의 데이터(온도, 토크)로부터 시각 t 의 온도와 토크의 예상치를 출력한다. 신경회로망에서는 이러한 예측된 온도 및 토크와 t 시점의 실제의 데이터를 비교하여 유사성여부를 판정하여 이상상태여부를 인식하게 된다. 본 실험에서는 시간지연을 1로 하여 전후의 패턴의 유사성을 비교하였다.

4.2 실험 및 고찰

상기의 신경회로망을 이용하여 온도와 토크신호로부터 실의 이상상태 인식실험을 행하였다. 신경회로망에의 입력은 앞의 마멸실험에서 얻은 온도와 토크의 데이터를 이용하였다. 즉 회전수 1750rpm, 접촉압력 $7\text{kg}_f/\text{cm}^2$, $10\text{kg}_f/\text{cm}^2$, $13\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 3가지 경우에 대해서 온도와 토크의 시계열데이터를 신경회로망에 입력하고 앞의 실험에서 나타난 이상상태를 인식하도록 하였다. 정상상태를 모델링한 예측기능 신경회로망의 학습을 위해서 여러번의 수행과정을 거쳐서 학습율은 0.65, 안정화계수 즉 모멘텀은 0.1로 하여 신경회로망

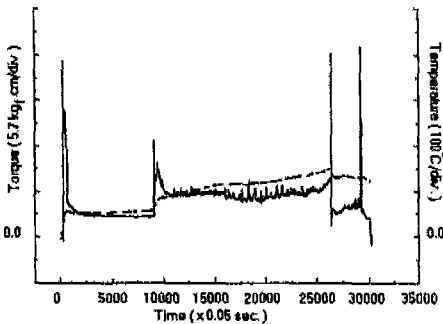


Fig. 8 The variation of torque and temperature at contact pressure $10\text{Kg}_f/\text{cm}^2$

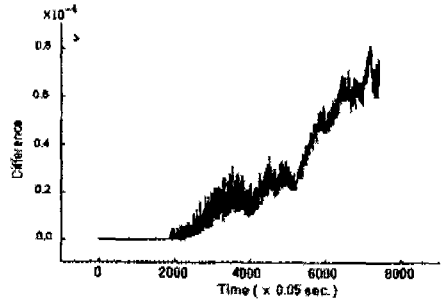


Fig. 9 The difference of $O_k^{(t)}$ and $I_k^{(t)}$ after training on 1/3-period of normal state

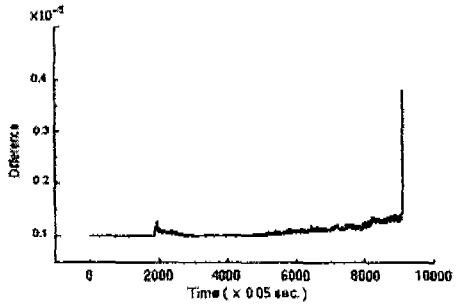


Fig. 10 The difference of $O_k^{(t)}$ and $I_k^{(t)}$ after training on 1/2-period of normal state

을 학습하였다. 학습데이터는 여러가지 조건의 데이터를 학습시키기 위해 $7\text{kg}_f/\text{cm}^2$, $10\text{kg}_f/\text{cm}^2$, $13\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 에 대한 마멸실험에서 얻은 3개의 정상상태의 데이터를 선택하였다.

본 실험에서는 이들 3개의 정상상태구간의 데이터중에서 초기의 약 1/3만을 학습한 경우와 1/2을 학습데이터로 사용한 2가지 모델을 구성하였다. 이것은 학습량에 의한 결과를 관찰하기 위함이다. 이와같이 학습한 회로망에 대해서 인식실험을 행하였다. 예로서 Fig. 8은 실제 마멸실험과 신경회로망에 의한 인식실험결과를 비교한 것이다. Fig. 8은 1750rpm, $10\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 시의 마멸실험에 의한 온도와 토크의 실제 출력신호를 A/D 변환해서 얻은 데이터를 플롯팅한 것이다. 종축은 온도와 토크의 실제 출력치이고 횡축은 시간을 포인트로 나

타낸것이다. 여기서 1포인트는 실제 시간으로 약 1/20 sec 이다. Fig. 8에서 정상상태의 시작은 1700 포인트 부근이고, 9000 포인트부근에서 이상상태가 발생하고 있다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 1750rpm, $7\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 시의 마멸실험에서 얻은 정상상태의 학습데이터의 1/3 및 1/2구간의 데이터를 가지고 회로망을 각각 학습시킨후, Fig. 8과 같은 조건의 1750 rpm, 접촉압력 $10\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 경우에 대한 인식실험 결과이다. 이들의 종축은 신경회로망에 의한 예상값($t-1$) 시점의 온도 및 토크를 입력한 신경회로망의 t 시점의 예상 출력값) 과 t 시점에서 실제 검출된 온도와 토크의 출력값과의 오차를 나타낸다. Fig. 9에서 보는 것과 같이 1/3만 학습한 모델의 경우, 7424 포인트에서 식(1)로 설정한 오차범위를 넘게 되어 이상상태의 발생으로 인식하고 있는데, 이것은 마멸실험결과와 일치하지 않으며 오인 식된 것이다. Fig. 10의 1/2을 학습한 경우에는, 9057 포인트에서 이상상태의 발생으로 인식하고 있고, 이것은 실제 실험에 의한 결과와 잘 일치 하고 있다. 따라서 본 인식결과에서 알 수 있는 바와 같이 학습데이터가 충분하면 정상상태의 패턴만으로 이상상태를 잘 인식하고 있음을 알 수 있었다. 또한 온도나 토크의 국부적인 변동에도 충분히 대처함을 알 수 있었다.

5. 결 론

운전중의 기계적 실의 이상상태를 감시하는 방법에 대해 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기계적 실의 이상상태감시를 위한 계측인자로 운전중의 온도와 토크신호의 출력변화를 설정하고, 실의 마멸실험을 통하여 온도와 토크의 이상상태시의 특징 및 상호 관계를 규명하였다.

(2) 신경회로망을 이용하여 온도와 토크신호의 센싱값으로 부터 실의 이상상태를 인식하는 방법을 제안하였다. 여기서는 온도와 토크신호의 정상상태의 데이터를 취하여 네트워크를 학습하였고 이로부터 이상상태를 인식하도록 하였다. 인식실험 결과 이상상태가 발생하는 초기단계를 정확하게 인식하였다.

(3) 실의 이상상태의 감시를 위한 계측인자로서 온도와 토크신호의 유용성과, 본 논문에서 제안한 신경회로망에 의한 감시방법의 유용성을 확인하였다. 또한 본 연구에서 제안한 이상상태인식 방법은 학습데이터로서

정상상태의 패턴을 이용하고 있기 때문에 모델링이 용이하고 실제 사용상에 있어 신뢰성이 매우 높은 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 최만용 외, "Mechanical Seal의 이상상태 계측 시스템 개발(1차년도)", 과학기술처(한국표준과학연구원), KRISS-93-092-IR(1993)
2. Dennis J. K & Sagoo K. S. , "Wear Behavior of Engineering Coatings and Surface Treatments". Metal Finishing, Vol. 89, No. 6, pp. 111-122(1991)
3. B.Z. Movahed, "An Investigation into the Performance of Mechanical Face Seals". Lubrication Engineering, Vol. 47, No. 3, pp. 189-190(1991)
4. I. Green, "Seperation Speed of Undamped Metal Bellows Contacting Mechanical Face Seals". Tribology Transactions, Vol. 33, No. 2, pp. 171-178(1990)
5. Takao Shimomura, Takashi Yanagisawa, Keiichi Chiba, Hiroshi Hirabayashi, & Toshikatsu Nakajima, "Analysis of Cracking Phenomena on Carbon-Rings of Mechanical Seals for an Automotive Air Conditioning Compressor". SAE Technical Paper Series, pp. 27-33(1991)
6. 山崎 弘郎, "異狀と檢出の豫知", 工業調査會, 1988
7. Keiichi Chiba, Makoto Komiya, Takashi Yanagisawa & Hiroshi Hirabayashi, "FEM Analysis of Mechanical Seals for Water Pumps of Automotive Engines", Automotive Sealing SAE Special Pubs. , No. 921, pp. 105-110(1992)
8. 임순재 외, "Mechanical seal의 이상상태 감시에 관한 연구", 한국정밀공학회 1993년도 추계 학술대회 초록집, pp. 166-171(1993)
9. S. Lim, et al. "The condition monitoring of Mechanical seals - relation between AE

- and torque", Proceeding of 12th Int'l AE symposium(Sapporo, Japan), pp. 589-594(1994)
10. 小宮 誠 外, "メカニカル シールにおけるセラミックしゅう動リングの熱衝撃破壊", 日本機械學會論文集(C編), 58卷 548號, pp. 203-208(1992)
11. Miyoshi Yukihiro, "Detection of Abnormal Cutting Condition Using an Adaptive Filter and a Network", JSPE Vol. 57, No. 10, pp. 1774-1119, 1991
12. Gregory S Broten & H C Wood, "A neural Network Approach to Analysing Multi-component Mixture", Meas. Sci. Technol., 4, pp. 1096-1105, 1993