

경험기반추론 전략을 이용한 고장트레인 구축

배 용 환

안동대학교 기계교육학과
(2005. 1. 19. 접수 / 2005. 9. 14. 채택)

Fault Train Construction Based on Shallow Reasoning Strategy

Yong-Hwan Bae

Department of Mechanical Education, Andong National University
(Received January 19, 2005 / Accepted September 14, 2005)

Abstract : There are three reasoning method in fault diagnosis process. The shallow reasoning is based on the experiential knowledge and deep reasoning is based on physical model. Hybrid reasoning is mixing two type reasoning. This study describes about fault train embodiment of screw type air compressor that is used widely in industrial facilities by using various experimental method and shallow reasoning. We investigate macroscopic failure cause of air compressor through naked eye observation and then microscopic failure cause by various experimental method. We composed fault train with fault knowledge based on empirical data and scientific data that is acquired through several experiments. It is possible to analysis system reliability and failure rate with these fault train.

Key Words : FTA, diagnostic method, shallow reasoning, deep reasoning, hybrid reasoning, fault train, reliability analysis

1. 서 론

센서에서 채취된 신호를 여러 분석기법을 이용하여 패턴인식에 의한 사고유형분석에 의존하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 설비상태의 단편적인 상태판단 및 사고 발생전 기계에서 발생하는 신호를 채취하여 기존의 나타난 데이터 베이스내의 신호와 패턴매칭에 의하여 어느 일정한 임계값에 도달되기전 시스템을 정지함으로써 고장을 방지하는 예방조치에 지나지 않고, 신호에 따른 기계상태를 정확히 판단하거나, 새로 도입된 시스템의 경우 어디에서 고장이 일어날 것인지에 대한 예측이 어렵고, 또 센서 설치위치를 정하기가 매우 어렵다. 이러한 경우 대상 시스템의 정확한 고장트레인을 규명하고, 각각의 기계요소의 미세한 변화가 전체시스템에 주는 영향에 대한 진단지식이 필요하다. 일반적으로 설비사고는 시스템을 구성하는 각 기계 요소중에서 한 요소에 어떤 결함이 발생하면 이와 연결된 다른 기계요소에 영향을 미쳐 연쇄적인 결함을 유발시킨다.

따라서 이러한 연쇄적인 결함을 분석하기 위해서는 신호상태 뿐만이 아니라, 환경적인 요소, 기계결함, 기계의 응력상태 등에 대한 종합적인 지식이 요구된다. 사례에 의하면 회전고속기계의 사고는 일반적으로 베어링 자체의 급속적 재질결함과 윤활시스템의 결함, 무리한 기계작동, 정렬불량 등에 의하여 주로 발생한다고 보고되고 있다¹⁾. 이러한 연구들은 기계요소들의 이상 발생에 대한 단편적인 연구이고, 요소결함이 시작된 후 각 요소로의 전파과정과 시스템 전체 파손에 이르기까지에 대한 파손트레인은 규명되지 않았다. 또한 각 요소의 연쇄적 결함분석을 컴퓨터에서 이용하기 위해서는 지적추론방식(intelligent inferencing method)이 필요하다. 이 지적추론방식을 기본으로 하여 상호연관성을 역추론함으로써 사고분석과정을 줄일 수 있는 이점이 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 파손된 에어컴프레서의 요소별 결함분석과 사고의 시발점을 찾기 위하여 육안관찰을 통한 베어링 윤활상태, 표면상태등을 집중 관찰하고, 주사현미경(SEM)을 이용하여 축 파단면의 손상상태와 금속학적 결함을 분석하였고, 관찰된

사실로부터 각 요소 결합의 사건전개 및 시스템과 손 전파추론을 위한 수단의 하나로 에어컴프레서의 파손트레이를 규명한다.

2. 이론적 배경

2.1. 고장진단 추론형태

2.1.1. 경험기반추론전략 (shallow reasoning strategy)²⁾

자동진단시스템에서 사용되는 지식베이스에서 경험기반추론(shallow reasoning)은 주로 인간의 지적 영역인 전문지식에 적용된다. 만약 관찰된 증상이 이제까지 경험한 지식이고, 이것이 지식베이스(KB: Knowledge Base)속에 포함되어 있으면 매우 빠르다. 이와 같은 추론은 주로 선행부와 후행부로 이루어진 production rule을 이용한다. 선행부는 주로 조건부이고, 후행부는 주로 룰(rule)의 작동부이다. 만약 몇몇 증상조건이 맞으면 그것에 알맞는 고장의 형태가 유추된다. 이러한 이유 때문에 이와같은 규칙은 때때로 if-then rule이라 부른다. 일반적으로 경험기반추론은 오직 하나의 요소를 더하고 빼는 것에 따라서 규칙들이 지나치게 변화가 일어날 수 있기 때문에 추론의 유연성이 떨어진다. 결과적으로 규칙들의 수는 진단되어지는 시스템의 기계요소수가 증가할수록 규칙들의 수는 관리하지 못할 정도로 많아져 버리고 또한 이들 요소가 서로 상호간에 영향을 미쳐서 고장증상이 매우 복잡해 지면 고장진단결과의 신뢰성을 기대하기도 어렵고 또한 고장진단 추론의 타당성을 검증하기 힘들어진다. 그리고 만약 다중고장이 동시에 일어난다면, 이와같은 동시추론이 가능해야하고 활성화 되어야 하는 추론엔진의 숫자가 폭발할 것이다.

2.1.2. 사고기반추론전략 (deep reasoning strategy)

경험보다는 물리적 지식이나 수학적 모델에 계산적인 사고지식(deep knowledge)에 기초한 deep reasoning은 추론을 위한 근본개념이 시스템의 모델을 사용하기 때문에 model-based reasoning이라고도 한다. 모델은 시스템이 어떻게 작동하고 또한 시스템이 무엇을 하는지를 나타내기 위한 시스템의 공식이다. 이러한 모델에는 물리모델, 기호모델, 수학모델, 휴리스틱모델 등 다양한 종류의 모델이 있다³⁾. 모델 그 자체는 진단되어지는 시스템의 구조, 동정에 대한 특성정보로부터 구축된다. 따라서 모델은 구조적이고, 동적이고, 기능적으로 구성될 수 있다. 경

험기반추론에 비하여 사고기반추론은 느리기는 하지만 매우 유연하며, 세밀하다. “유연하다”는 의미는 deep-reasoning은 특성영역이 아니라 하나의 기계 요소가 더해지거나 빼더라도 모델의 수정이 쉽다는 것을 의미한다. “세밀하다”는 것은 Sembugamoorthy와 Chandrasekaran 등의⁴⁾ 연구에서 사고기반추론이 경험기반추론에서 추론가능하지 않는 “if-what” 형태의 질문에 대답할 수 있다는 것을 의미한다. 이것이 의미하는 것은 사고기반추론의 고장영역의 범위가 어느 특정한 임계영역에 국한되는 것이 아니라 주어진 여건내에서 추론가능하다는 의미에서 매우 넓어서 없다는 것을 의미한다. “느리다”는 의미는 사고기반추론은 증상의 모든 상세정보를 지식베이스속에 포함하고 있지 않으므로 경험기반추론의 속도보다 느리다는 것을 의미한다.

2.1.3. 혼합추론전략 (hybrid reasoning strategy)

앞에서 언급한 것처럼 경험기반추론은 지식베이스에 저장되지 않는 고장진단에 대하여 매우 취약하지만 추론속도가 빠르고, 사고기반추론은 매우 많은 탐색시간을 요구하기 때문에 몇몇 복잡한 시스템에 대하여 추론속도가 매우 저하되지만 모든 고장에 대한 지식베이스를 따로 구축할 필요가 없어서 새로운 고장진단 추론에 장점을 지닌다. 따라서 두가지 추론방식의 장점을 조합한 복합추론(hybrid reasoning)방법이 시도되었다(Fig. 1). 두가지 가능한 조합은 “ deep first, then shallow(D-S)”, “shallow first, then deep (S-D)”이다. S-D 접근의 예는 Torasso, Console 등⁵⁾에 의한 CHECK(Combining HEuristic and Causal Knowledge)와 Fink와 Lusth 등⁶⁾에 의한 IDM(Integrated Diagnostic Model)이고, D-S접근의 예는 Marsh등에 의한 ISA(Integrated Status Assessment)이다⁷⁾. 진단에 있어서 현재의 추세는 hybrid reasoning으로 가고 있다. 대개의 경우 진단되어지는 시스템이 비교적 적은 경우에는 적용되는 규칙(rule)수가 적기 때문에 S-D 접근방법이 적절할것 같고, 제조플랜트와 같은 대형시스템에서는 주로 D-S 접근방법이 적절할것 같다.

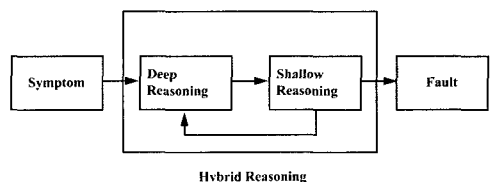


Fig. 1. Hybrid reasoning strategy.

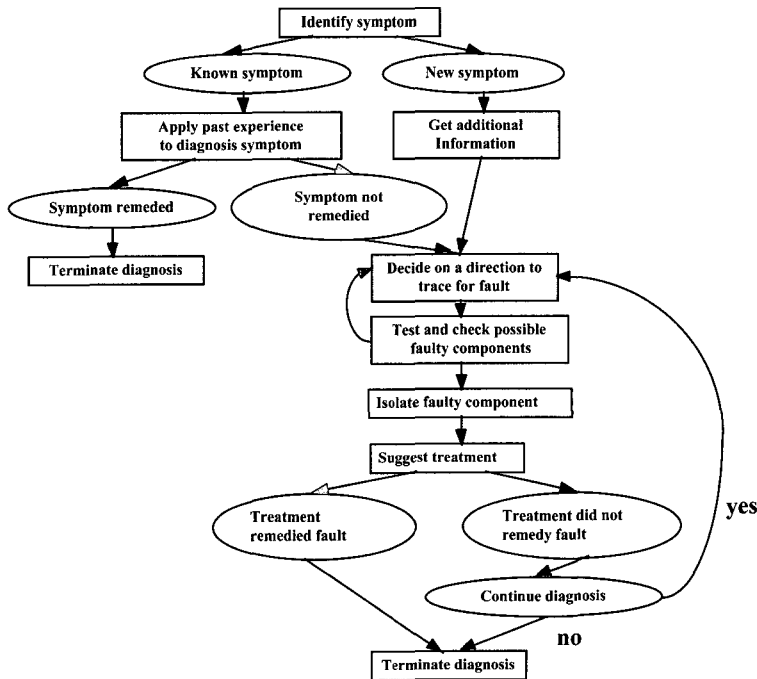


Fig. 2. Basic steps in the human diagnostic reasoning process.

2.2. 인간진단추론모델링 (modeling human diagnosis reasoning)

인간전문가는 하나의 메카니즘속에서 고장난 요소를 탐색하는 진단을 통하여 효율적인 추론방식을 채용한다. 몇몇 인간전문가의 진단추론과정은 오랜 세월동안에 자기가 경험한 분야의 지식을 기반으로 분석되고, Fig. 2는 인간추론과정의 일련의 단계를 나타낸 것이다. 단계는 주로 두가지 부분으로 위에서 언급한 두가지 전략으로 나누어 진다. 먼저 적용되는 것이 경험기반추론 진단과정으로 이 단계는 알려진 증상을 진단하는데 있어서 과거의 경험을 사용하는 인간능력을 모방한다⁸⁾. 인간 전문가는 먼저 과거에 경험한 적이 있는 비슷한 문제와 당면한 고장을 비교함으로써 고장난 시스템에 대하여 진단을 시도하고, 전에 성공한 적이 있는 간단한 휴리스틱을 적용한다. 경험기반추론 단계는 실제 진단되어지는 시스템 메카니즘의 작동구조를 세밀하게 분해하는 것을 포함한다. 이 과정에 포함된 실제 추론과정은 고장요소에 대한 초기 가정(증상인식과정에 의하여 제공되는) 이 올바르다면 인간전문가의 검증단계를 거친다. 즉 사용자는 증상인식과정에 의하여 제시된 고장요소를 시험하고, 그리고 그들의 셸업과 캘리브레이션 상태를 체크하도록 요구되어 진다. 만약 테스트와 셸업체크에 의하여 그 요소가 고장이라는 것이 증명되면 수리과정이 제기된다. 일반화된 shallow reasoning 전략은 deep reasoning 과정의 초기 단계로 공식화된다. 시스템을 사용하는 동안에 사용자는 shallow reasoning으로 부터 deep reasoning으로 흐름을 명백히 인식하지 못하지만, 만약 고장난 요소가 shallow reasoning 전략을 사용하여 인식되지 않는다면 deep reasoning 전략이 초기화 된다. Deep reasoning 전략은 고장난 요소를 구별하기 위하여 메카니즘속에서 그들의 인과패스와 다양하게 상호 연결된 요소들을 통하여 추적하는데 있어서 인간추론과정을 모방하는 근본적으로 효과적인 탐색전략이다. Deep reasoning 전략으로서 이 인간추론과정을 모델링하는 것은 진단을 통하여 전문가에 의하여 수행되는 작업들을 식별하고 모델화하는 것을 요구한다.

3. 경험기반 고장사례

3.1. 에어컴프레서 고장원인해석

본 연구에서는 파손된 에어컴프레서로 부터 다양한 전문가의 경험에 의한 고장트레인을 규명코자 한다. Fig. 3은 에어컴프레서의 내부구조 및 작동메카니즘을 나타낸 것이다. 구동모터에서 피니언을 통

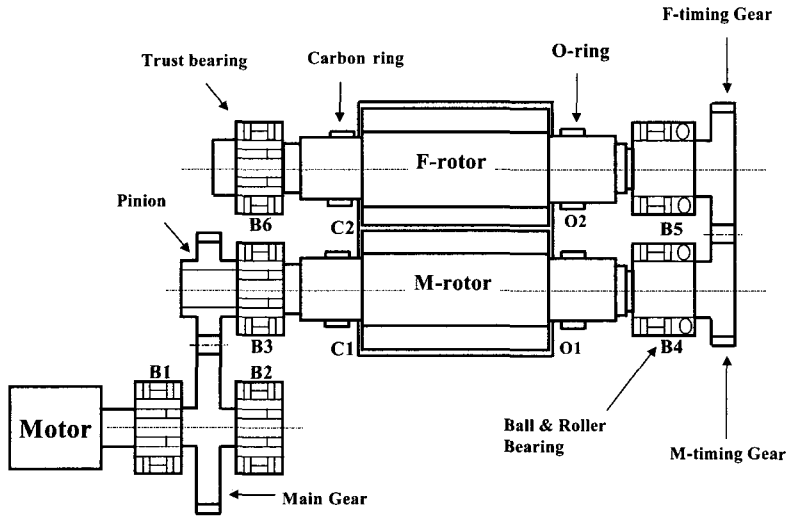


Fig. 3. The mechanical structure of air compressor.

Table 1. The specification of air compressor

Classification		Specification
Compressor type		Screw type
Capacity		100 (m ³ /min)
Pressure		687 (kPa)
Motor power		900 (KW)
M-timing gear revolution		10202 (rpm)
F-timing gear revolution		6734 (rpm)
Casing cap	Rotor and casing	0.065 - 0.085 (mm)
	Rotor and rotor	0.1 - 0.4 (mm)

하여 관심대상인 에어컴프레서 M-rotor를 구동시키고, 양끝에서 M-timing 기어를 통하여 F-timing 기어로 동력이 전달되어 상부 F-rotor를 구동시키므로써 하우징 내부의 공기를 압축시킨다. 각 로터(rotor)축은 오링(O-ring) 과 카본링(carbon-ring)에 의하여 지지되고, 기어와 축은 트러스트 베어링(thrust bearing) 과 로울러와 볼로 구성된 복열베어링에 의하여 지지된다. Table 1에 에어컴프레서의 사양을 나타내었다.

먼저 파손된 에어컴프레서를 진단하기 위하여는 고장을 일으킨 시스템의 육안관찰을 통하여 많은 진단정보를 얻을 수 있으므로, 기어의 파손상태, 베어링 마모 및 파손상태, 하우징 파손상태, 링 파손상태, 축 파면 및 표면손상 상태를 중점적으로 관찰을 통하여 사고의 개략적인 고장트레인을 설정하여, 이중 고속회전 전동체 사고의 빈번한 초기 사고발생 원인이 되고 있는 베어링 부위의 윤활상태 및 베어링의 열적 손상상태를 관찰하기 위하여 손상된 베어링의

단면을 Micro vickers 경도시험기(Matsuzawa사: Model DHI-2)를 이용하여 경도를 관찰하였고, 조직현미경을 이용하여 조직변화를 조사하였다.

그리고 SEM(Philip사: Model 525)을 이용하여 축의 파단면의 금속적 결합과 손상상태를 조사하였고, EDAX와 면분석을 통하여 축내의 이물질 성분분석을 실시하였고, 여러 가지 정밀실험을 통하여 고장트레인을 규명하였다.

3.2. 결과 및 고찰

먼저 고장 트레인을 규명하기 위하여 파손된 컴프레서를 Fig. 4에 나타내었고 손상상태를 관찰하였다.

(1) 기어 및 체결부 손상 관찰

Fig. 4(a)는 모터 주축과 연결된 피니언 기어의 손상부로서, 기어부분은 비교적 손상을 입지 않았고, 트러스트 베어링 체결부와 오링 체결부에 열에 의한 마찰손상으로 인하여 표면이 크게 손상되었고, Fig. 4(b)~(c)는 로터부 손상을 나타낸 것으로 상부 F-rotor(Fig. 4(b))는 브레이드 (blade)부가 동심원을 그리면서 변형되었으며, 타이밍 기어쪽 오링(O₂)과 로터가 접한 노치부분에서 절손되었다. 하부 M-rotor(Fig. 4(c))는 피니언 쪽의 카본링(C1)과 로터가 접한 노치부분에서 절손되었고, 절단부 일부분의 브레이드가 파손되었다. Fig. 4(d)~(e)는 타이밍 기어의 손상형태를 나타낸 것으로 기어잇빨 부분에서 동력전달이 제대로 되지 않을 정도로 심하게 손상되었다.

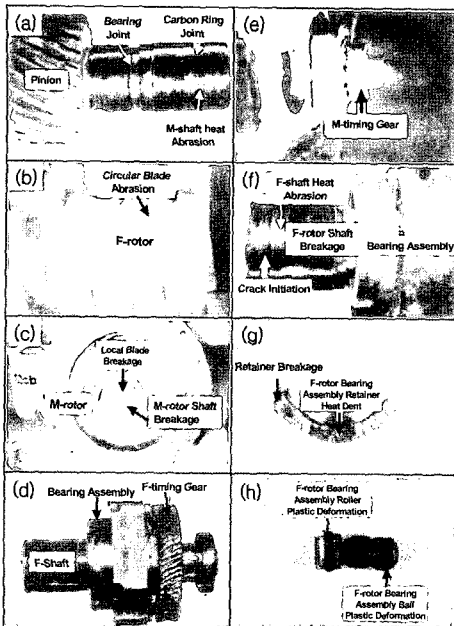


Fig. 4. The example of air compressor failure.

(2) 베어링 손상 관찰

Fig. 4(f)~(g)는 축 지지베어링과 파손베어링 리테이너의 형태를 나타낸 것으로 축(Fig. 4(f)) 절선부 가까이에 동심원상의 크랙이 존재한다. 리테이너(Fig. 4(g))는 열에 의한 로울러 베어링 압흔이 존재한다. Fig. 4(h)는 궤도를 이탈한 편심 변형된 베어링 엘리먼트를 나타낸 것이다.

(3) 로터축 파단면 손상 육안관찰

Fig. 5(a)~(d)는 축 파단면을 나타낸 것으로 M-rotor축 파단면(Fig. 5(a))은 피로파괴의 전형적인 현상인 물결무늬(beach mark)가 관찰되지만, F-rotor축 파단면(Fig. 5(b))은 미약한 가는 물줄기 형태(striation)가 존재한다. Fig. 5(c)는 M-rotor축 파단면을 Fig. 5(d)는 F-rotor 축파단면을 SEM관찰한 것이다. 위와 같은 육안관찰을 토대로 하여 추정해 볼때 고장트레인은 Fig. 9와 같이 추정되며, 이 추정의 정확도는 시험을 통하여 증명되었다.

(4) 윤활 공급이상 추정

먼저 파손의 시작점을 찾기 위하여 컴프레서의 사양(Table 1)을 참고할 때, 본 시스템은 매우 고속으로 회전하는 기계이다. 따라서 베어링 파손형태로 보아 윤활상의 문제(윤활라인 불량, 점도저하)등에 의하여 베어링이 가열되었을 가능성이 크다.

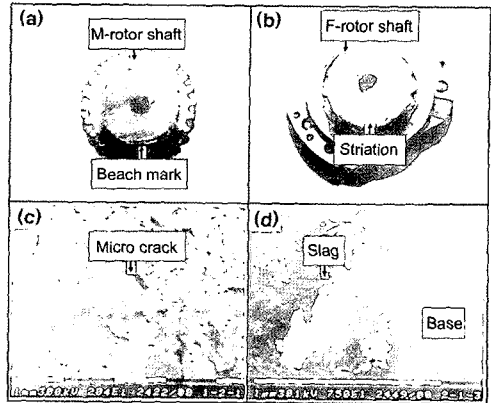


Fig. 5. Picture of rotor shaft failure.

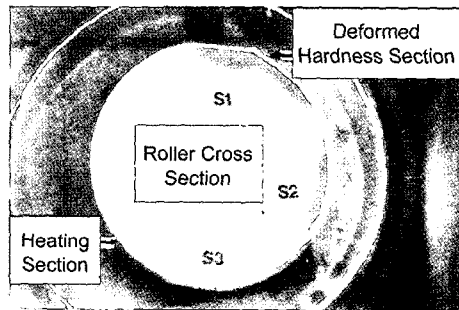


Fig. 6. The cross section of bearing roller by heat effect.

(5) 베어링부 가열 및 열화원인

베어링 체결부와 접촉하는 축표면의 마찰손상이 가열에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 베어링 리테이너 및 엘리먼트가 변형되었는데 베어링 표면은 경화처리가 되어있고, 정도는 통상 800~1000(Hv) 정도로, 상온상태에서 표면층이 소성변형을 일으키기란 매우 어려울 것으로 추정된다. 또한 베어링의 가열형태를 조사하기 위하여 변형된 베어링 로울러 단면을 경도측정과 조직현미경에 의하여 관찰하였는데, Fig. 6에서 알 수 있듯이 검은 부위(S1, S2)와 다른 표면부위(S3)에 흰색 링 대역(white ring band)이 존재함을 알 수 있는데, 이것의 발생원인을 조사하기 위하여 Fig. 7(a)와 같이 각 부위별 경도를 측정하였다. 경도측정결과 검은 부위(S1,S2)의 경도는 800~900(Hv) 정도이고, 링대역에서는 290(Hv) 정도이고, 베어링 기지조직은 400(Hv) 정도이다.(Fig. 7(b)) 따라서 이러한 결과로 미루어 보아 Fig. 6의 베어링 표면에서 일정깊이의 환상밴드의 생성원인은 윤활계통 이상에 의하여 고속회전에 의한 가열속도가 일정하게 되어 경화처리된 베어링 표면이 환상형태의 풀림현상(annealing)으로 인하여 발생되었다.

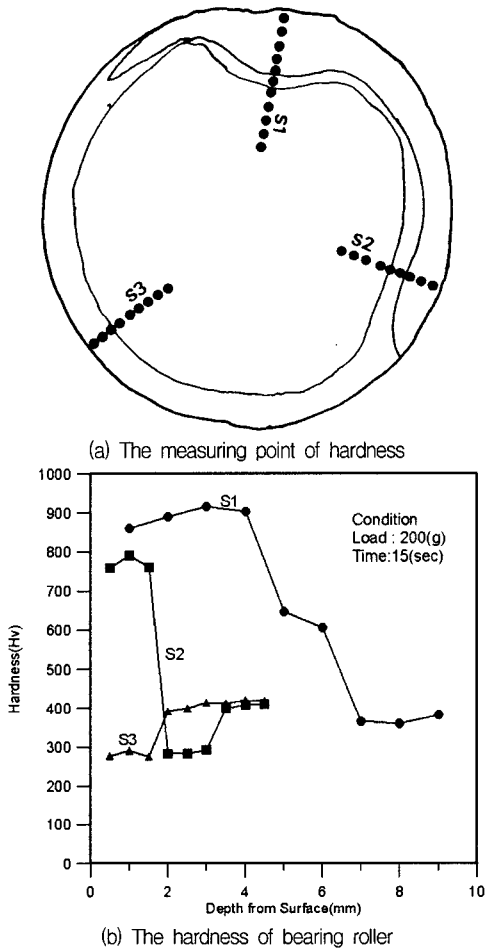


Fig. 7. The hardness measuring point and hardness of bearing roller cross section.

(6) 진동 발생원인 규명

이러한 상태에서 원심력에 의한 편심효과로 인하여 베어링면이 축(shaft)부분에 압축되면서 편심이 커져서, 심하게 진동을 일으키면서 Fig. 7과 같이 가공경화 되었다. 이러한 효과에 의하여 카본링 및 오링은 고속회전되는 축과의 마찰에 의하여 열손상을 받아 타블음에 따라서 기어의 축 진동은 더욱 심하게 되고, 축회전에 많은 토크가 작용하면서 축 자체에 피로가 가중되게 된다.

(7) 로터축 파손원인 규명

타이밍 기어축은 어느 정도의 피로한계에 도달되면 파손을 일으키는데 본 고장사례에서 고장트레인을 규명하기 위하여 M, F 로터축 중에서 어느 부분이 먼저 파손되었는지를 밝히는 것이 중요하다. 일

단 베어링 파손에 의하여 축 자체에는 굽힘모멘트와 토크가 동시에 작용하여 매우 큰 조합응력을 발생시키므로 축 피로는 기준설계치를 넘어서 빠르게 진행된다. 이러한 진행상태는 Fig. 5(a)의 striation은 초기 표면에 크랙생성이 이물질의 영향으로 빠르게 파단된것이고, 물결 형태의 파단면은 재질이 균일하여 피로가 회전에 의하여 원주방향으로 동시.진전되었음을 보여준다.

여기서 사건 전후를 밝히기 위하여 절손된 축을 SEM에 의하여 관찰하였다. Fig. 5(c) M-rotor 축 파단면에서 부분마다 미세크랙이 존재하는데 재질결함을 발견되지 않았고, 이러한 미세크랙은 재료의 허용응력을 초과한 동적 과부하에 의하여 생긴 것임을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(d)에 F-rotor 축의 파단면을 나타낸 것으로 파단면에 흰 이물질이 다량 존재함을 알 수 있다. Fig. 8은 이물질의 성분을 SEM/EDAX 분석의 면분석 결과이고, 금속결합의 주성분은 Si, Al, Ca등으로 이것은 축 재질의 용해시 생성된 이물질(slag)인 것으로 생각된다.

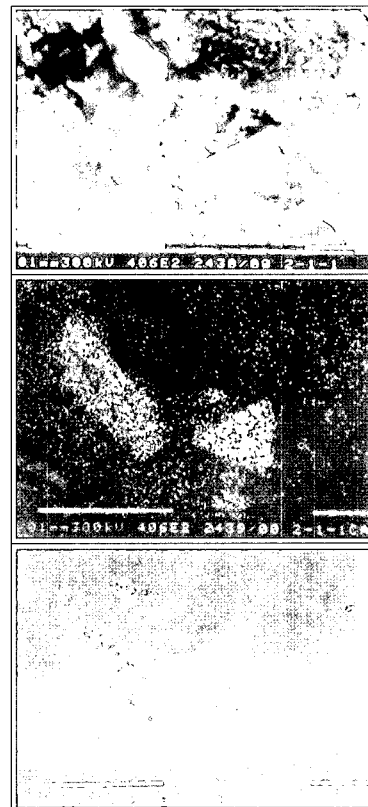


Fig. 8. The ingredient analysis of slag in F-rotor shaft.

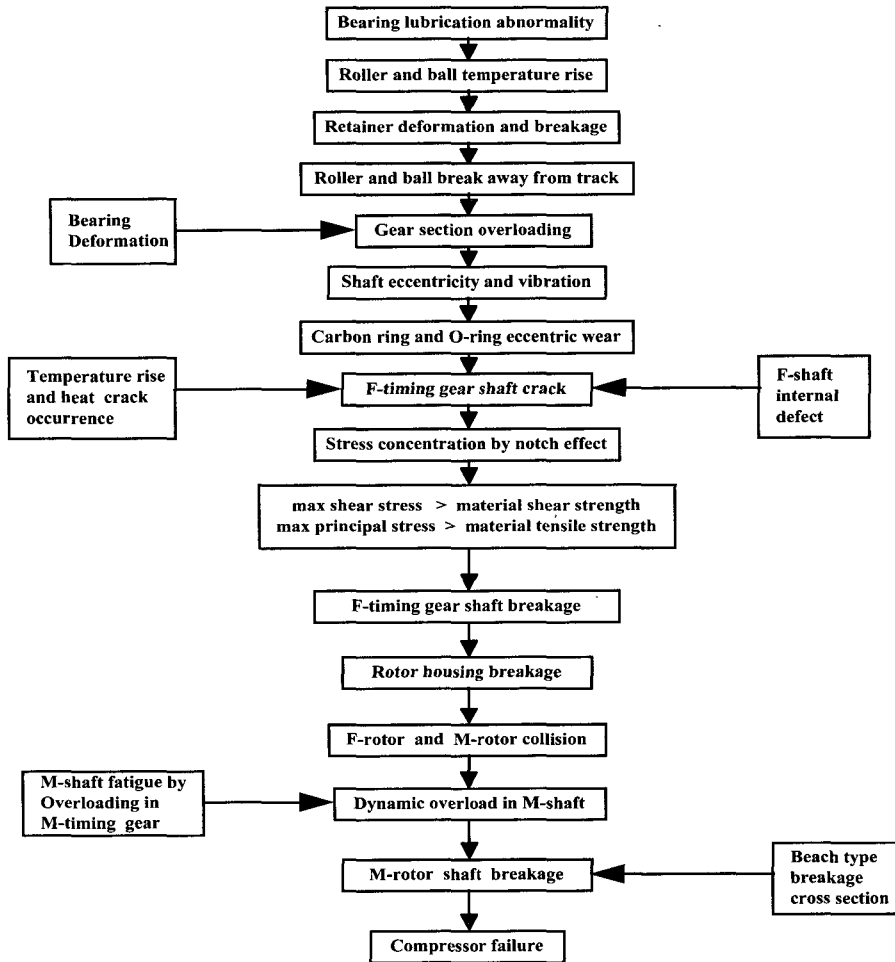


Fig. 9. The fault train of air compressor.

위의 결과로부터 추정해 볼 때 베어링 파손에 의하여 축에는 굽힘응력과 토크에 의한 조합응력이 걸리면서 축표면에 피로가 진행되었는데 F-rotor의 축 결함에 의하여 먼저 크랙이 생성되고(Fig. 4(f)) 진전되어 절손되었고, 절손에 의하여 회전하는 상부 하우징과 접촉에 의하여 브레이드(Fig. 4(b))가 동심원을 그리면서 손상되었고, 회전력을 일으키면서 아래로 낙하하여 회전하는 M-rotor 브레이드에 부딪히면서 순간 동적 과부하에 의하여 축에 과도한 응력이 걸리면서 절손되었다. 이것은 Fig. 3의 동력유입구인 피니언쪽 카본링(CI)과 M-rotor사이 노치부분에서 파손된 것으로 보아 명백히 알 수 있다.

Fig. 9는 본 연구의 에어 콤프레셔의 고장트레인을 나타낸 것이다. 본 고장트레인은 위와 같은 여러 가지 시험 및 사고 후 시스템 관찰을 통하여 그 고

장전개 과정이 입증될 수 있지만, 이러한 과정에서 고장사건 전개과정에서 약간의 오차가 포함될 수 있다. 하지만 본 연구의 대상시스템인 에어콤프레셔 자체가 매우 고속이고, 또한 사고과정을 연속적으로 시뮬레이션 하여 증명한다는 것은 거의 불가능하며, 어느 정도 인간 고장진단 전문가의 경험적 추정으로 이루어 질 수 밖에 없는 것이 본 연구의 한계이다. 비록 고장 트레인 자체에 약간의 오차가 포함되었지만 좀더 일반화된 고장트리를 작성하는 것이 가능하리라 생각되어 진다.

4. 결론

본 연구에서는 생산설비 중에서 가장 널리 쓰이는 에어콤프레셔에서 발생된 고장을 기반으로 전

문가의 고장지식과 여러가지 경험적 실험을 통하여 산업설비의 고장원인을 추정하였다. 이러한 결과를 이용하여 산업설비에서 가장 많이 쓰이는 스크류타입 에어컴프레서의 고장트레인을 작성하였다. 이러한 고장트레인은 고장의 전파 경로를 가장 잘 나타내고, 이러한 고장트레인을 이용함으로써 정확한 제조업체와 사용자의 설비진단 데이터를 기반으로 고장트리를 작성하는 것이 가능하리라 생각되며 또한 고장트리를 기반으로 시스템의 신뢰도해석과 고장율을 계산해 낼 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 고장트레인을 참고하므로써 시스템 취약점을 개선시킬 수 있다. 취약지점을 여러가지 센서장치를 이용하여 감시하므로써 향후에 자동감시시스템 구축을 위하여 매우 중요한 자료로 사용될 수 있다.

참고문헌

- 1) W.J. Bartz, "The influence of lubricants on failures of bearings and gears", *Tribology International*, Vol. 9, No. 5, pp. 172~176, 1976.
- 2) W.Y. Lee, S.M. Alexander and J.H. Graham, "A Diagnostic Expert System Prototype for CIM", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 337~352, 1992.
- 3) U. Rembold, B.O. Nnaji and A. Storr, "Computer Integrated Manufacturing and Engineering", Addison-Wesley, pp. 119~121, 1993.
- 4) B. Chandrasekaran and V. Sembugamoorthy, "Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem solving systems", In *Experience, Memory, and Reasoning*, pp. 47~73, 1986.
- 5) P. Torasso and L. Console, "Diagnostics Problem Solving : Combining Heuristic, Approximate and Causal Reasoning", Van Nostrand Reinhold, NY, 1989.
- 6) P.K. Fink and J.C. Luth, "Expert Systems and Diagnostics Expertise in the Mechanical and Electrical Domains", *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 17, No. 3, pp. 340~349, 1987.
- 7) C.A. Marsh, "The ISA expert system : a prototype system for failure diagnosis on the space station", *Proceeding First Int. Conf. on Industrial and Engineering Applications of AI and Expert Systems '88*", Vol. 1, No. 1, pp. 60~74, 1988.
- 8) K. Murali and T.P. Don, "An Expert System Framework for Machine Fault Diagnosis", *Computers Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 67~84, 1992.