

스크루형 공기압축기의 고장진단

배용환†

(원고접수일 : 2003년 11월 4일, 심사완료일 : 2004년 7월 26일)

Fault Diagnosis of Screw type Air Compressor

Yong-Hwan Bae†

Abstract : This paper describes the application of fault tree technique to analyze of compressor failure. Fault tree analysis technique involves the decomposition of a system into the specific form of fault tree where certain basic events lead to a specified top event which signifies the total failure of the system. In this research, fault trees for failure analysis of screw type air compressor are made. This fault trees are used to obtain minimal cut sets from system failure and system failure rate for the top event occurrence can be calculated. It is possible to estimate air compressor reliability by using constructed fault trees through compressor failure example. It is proved that FTA is efficient to investigate the compressor failure modes and diagnose system.

Key words : FTA(Fault Tree Analysis : 고장트리분석), Diagnostic Method(진단기법), Failure Rate Evaluation(고장률평가), Failure Time Distribution(고장시간분포), Reliability Analysis(신뢰성해석)

1. 서 론

고장전파와 요소간의 상호작용을 도식적이고 계층적으로 표현하여 고장을 진단하려고 하는 연구가 오래 전부터 수행되었으며 이중에서 고장진단을 위한 tree와 graph방법의 예에 관한 연구는 풍부하다⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾. 신뢰성과 안전성 평가를 위하여 주로 사용되는 fault tree method⁽²⁾, 고장의 발생에서 고장의 진행관계를 기술하여 고장원인을 추적하는 fault propagation method⁽⁶⁾, 전기 통신망의 고장비를 고장확율을 계산하기 위하여 사

용되는 signed digraph method⁽⁷⁾와 하나의 시스템내에서 일어나는 시간순으로 진행되는 사건들을 시각적으로 표현하는 event-tree와 복잡한 시스템의 분석과 모델링 고장해석에 주로 사용되는 sensor net method⁽⁸⁾가 연구되었다.

고장트리(Fault Tree, 이하 "FT"라 한다)는 그래프적으로 특정한 사건 사이의 관계와 이와 같은 사건들이 앞에서 서술한 즉 목표사상(top event)으로 알려진 고장사건이 어떤 원인에 의하여 발생하는 지를 묘사한다. Fig. 1은 고장트리의 일례를 나타낸 것이다. 먼저 목표사상은 그

† 책임저자(안동대학교 기계교육과), E-mail : yhbae@andong.ac.kr

하부요소인 AND 게이트중 어느 하나가 만족되면 발생된다. AND 게이트는 각각 두개의 기본사상(basic event) 쌍(A_m, B_m)으로 이루어져 있는데 이 두개의 기본사상이 동시에 발생되어야만 목표사상이 발생한다. 또한 목표사상이 일어나기 위해 필요한 최소한의 기본사상들의 집합을 미니멀 컷 셋(minimal cut sets)이라 하는데 이것은 기본사상 쌍인 (A_m, B_m)이 된다.

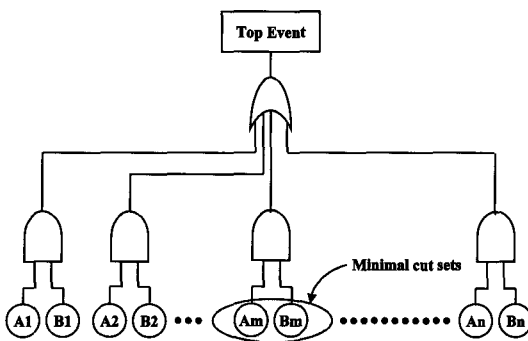


Fig. 1 Fault tree and minimal cut sets

고장트리는 다이어그램의 정상에서 원하지 않는 사건을 가진다. 한번 일어난 사건의 일련 연속은 고장트리의 가지로부터 원하지 않는 사건을 생산한다. 사건들의 각 연속은 발생의 체인을 통하여 논리적으로 후향추론되는 전문가에 의하여 설정된다. 모든 일련의 연속들은 원하지 않는 목표사상으로 시작된다. 플랜트에서 원하지 않는 목표고장사상을 가정하자. 원하지 않는 목표사상의 고장트리를 사용할 때 그 사건의 고장은 가지사상들로 후향 추론함으로써 발견될 수 있다. 정상사상의 정보는 이러한 탐색을 제한하는데 사용된다. FTA(Fault Tree Analysis)는 설계의 일체성, 신뢰성, 양자택일성, 절충결정, 다중고장조합분석, 복잡시스템에서 공통모드고장분석을 결정하는데 유용하다. 국내에서도 산업설비와 건축물에 대한 사고가 날로 증대되고 있는 시점에서 아직 국내에서 FTA에 관한 연구는 활발하지 않다.

본 연구에서는 파손된 스크루형 공기압축기(air compressor)와 이를 구성하는 베어링요소의 결합분석을 위하여 육안관찰에 의한 손상을 평가하고, 사고의 원인을 규명하고, 공기압축기의 단계

적인 고장트레인을 규명하고, 이를 바탕으로 신뢰성 해석과 향후 자동고장진단의 추론을 위하여 FT를 작성하였고, 작성된 FT를 이용하여 목표사상이 일어나기 위한 미니멀 컷 셋을 구하고, 고장을 평가 및 신뢰성 해석을 행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 FT 구축기법

시스템의 고장진단은 그 시스템의 설계지식과 작동환경을 고려한 진단정보를 이용하여 행할 수 있지만, 일반적으로 Malasky가 제안한 Fig. 2의 FTA에 의한 고장진단의 수준이 널리 이용된다^[9]. 먼저 해석하려는 시스템의 작동 메커니즘을 파악한 후 예상되는 재해를 과거 재해사례나 재해통계를 기초로 가급적 폭넓게 조사한다. 그 다음 재해의 위험도를 검토하여 해석한 재해를 결정하고 필요하면 서브시스템 내의 위험요소조사 및 위험요소가 위험상태로 되기 위한 방아쇠(trigger)로 될 요인을 조사하기 위한 예비사고해석(PHA: Preliminary Hazard Analysis)을 실시한다. 예비사고해석과 통계를 통하여 고장율을 계산하고, 재해발생확률의 목표값을 정한다. 다음으로 FT를 작성하고 작성한 FT를 수식화해 부울대수(Boolean Algebra)를 사용해서 간소화 한 다음 각 사상에 대한 발생확률을 FT에 표시한다. 마지막으로 FT를 이용하여 해석하는 재해의 발생확률을 계산하고, 목표값과 비교하여 차이가 있으면 FT를 재검토하여 수정하거나 시스템을 보완한다.

FT 작성시 시스템의 운행에 지장을 초래하는 심각한 증상이나, 파손사고, 운행정지는 시스템 전체 고장을 나타내는 목표사상으로 정해진다. FT는 목표사상에 연결되는 사상들의 일련의 연속과 가능한 조합에 의하여 구축된다^{[10],[11]}. 목표사상에서 출발하여 가능한 기초적인 원인들이 논리 게이트로 연결되어 하부로 연결된다. 트리의 가장 하부는 사건이 일어나기 위한 기본사상이나 기본원인으로 이루어지며, 각각의 요소고장들에 대한 고장확률이 사례를 통하여 수집된 통계적 수치에 의하여 결정된다. 시스템 FT가 작성된 후 정성적

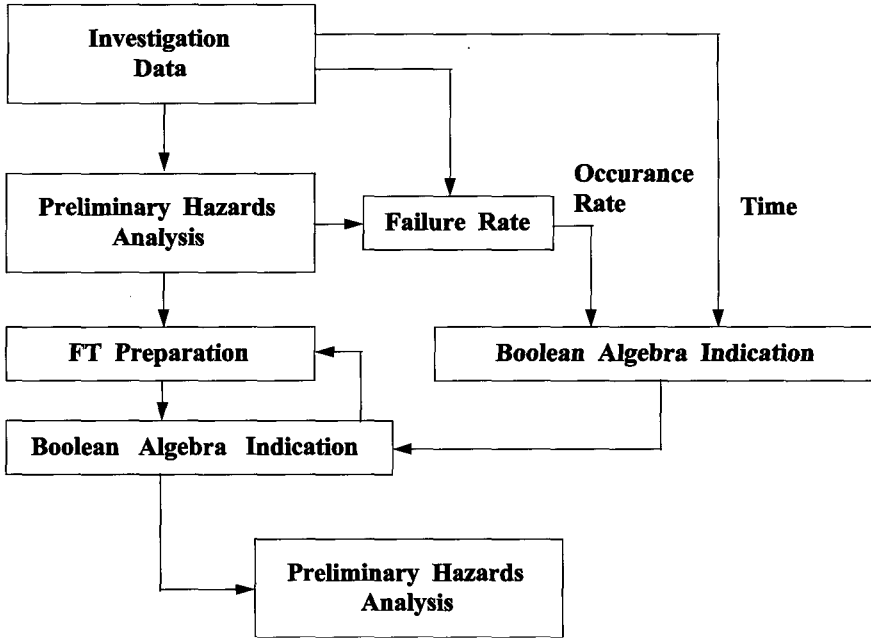


Fig. 2 The procedure of FTA

으로 고장원인이 평가될 수 있다. 예를 들어 미니멀 컷셋이 발견된다. 이러한 과정에서 몇몇의 시스템 취약점을 발견할 수 있다. 또한 FT는 목표사상에 연관된 수치적 정보를 통하여 시스템의 고장과 신뢰성 평가를 위해 필수 불가결한 것으로서 이를 통하여 고장률, 복구률, 고장확률을 결정할 수 있다.

2.2 고장률 평가

기본사상(시스템 요소)은 수리될 수 없는 것으로 가정한다. 고장발생시간은 지수적으로 분포한다. FT는 중복이 없고 기본고장발생(요소고장들)은 통계적으로 다른 요소 고장에 영향을 받지 않는 독립사상들이라 가정한다. 신뢰성 $R(t)$ 는 정해진 시간 t 에 대한 시스템이 성공적으로 운행될 확률을 나타낸다. 시간 t 에서 재해 및 고장률(failure rate)은 다음과 같은 신뢰도의 항으로 표시된다.

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (1)$$

직렬시스템에 대한 고장트리는 OR 게이트로 연결되어 있는데 신뢰도 R_s (reliability of a series system)와 고장률 λ_s (failure rate of a series system)는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda_s t} \quad (2)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3)$$

병렬시스템에 대한 고장트리는 AND 게이트로 연결되어 있는데 신뢰도 R_p (reliability of a parallel system)는 다음과 같다.

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (4)$$

(4)를 (1)에 대입하면 고장률 λ_p (failure rate of parallel system)는 다음과 같다.

$$\lambda_p(t) = -\frac{1}{R_p(t)} \cdot \frac{dR_p(t)}{dt} = -\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i (Z_i - 1)}{\prod_{i=1}^n Z_i - 1} \quad (5)$$

여기서 t 는 운행시간이고, Z_i 는 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{1}{(1 - e^{-\lambda_i t})} ; i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

3. 스크루형 공기압축기의 신뢰성

3.1 시스템 개요

본 연구에서는 FTA 적용사례로서 공기압축기의 고장진단에 대하여 적용코자 한다. Fig. 3은 공기압축기의 내부구조 및 작동 메카니즘을 나타낸 것이다. 구동모터의 Main gear(Mg)에서 Pinion(Pg)을 통하여 관심 대상인 공기압축기 M-rotor(Mr)를 구동시키고, 양끝에서 M-timing(Mt) 기어를 통하여 F-timing(Ft)기어로 동력이 전달되어 상부 F-rotor(Fr)를 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 공

기압축기의 사양을 나타내었다. Fig. 4는 공기압축기 고장사례를 나타낸 것이다.

본 사고의 원인분석과 다양한 공기압축기의 현장사고 유형분석 및 기어, 베어링, 축부분의 고장 사례를 분석을 통하여 공기압축기의 FT를 작성하였다. 작성된 FT를 이용하여 본 시스템의 고장률을 계산하고, 시스템의 신뢰도를 계산하여 설계의 기초자료를 제시코자 하였다.

Table 1 The specification of air compressor

Classification		Specification
Compressor type		Screw type
Capacity		100 [m ³ /min]
Pressure		7.0 [kgf/cm ²]
Motor power		900 [kW]
M-timing gear revolution		10202 [rpm]
F-timing gear revolution		6734 [rpm]
Casing gap	Rotor and casing	0.065-0.085[mm]
	Rotor and rotor	0.1 - 0.4 [mm]

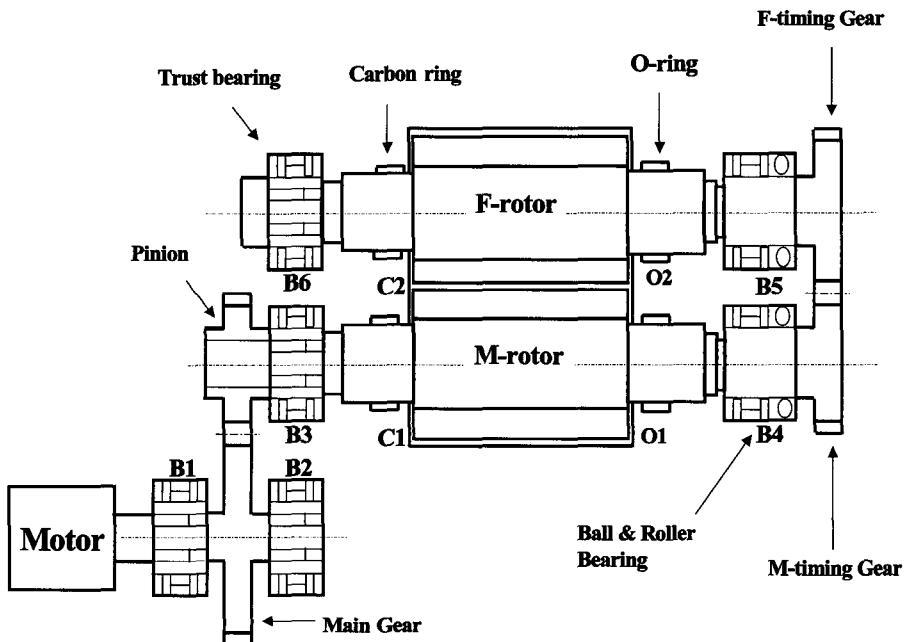


Fig. 3 The mechanical structure of air compressor

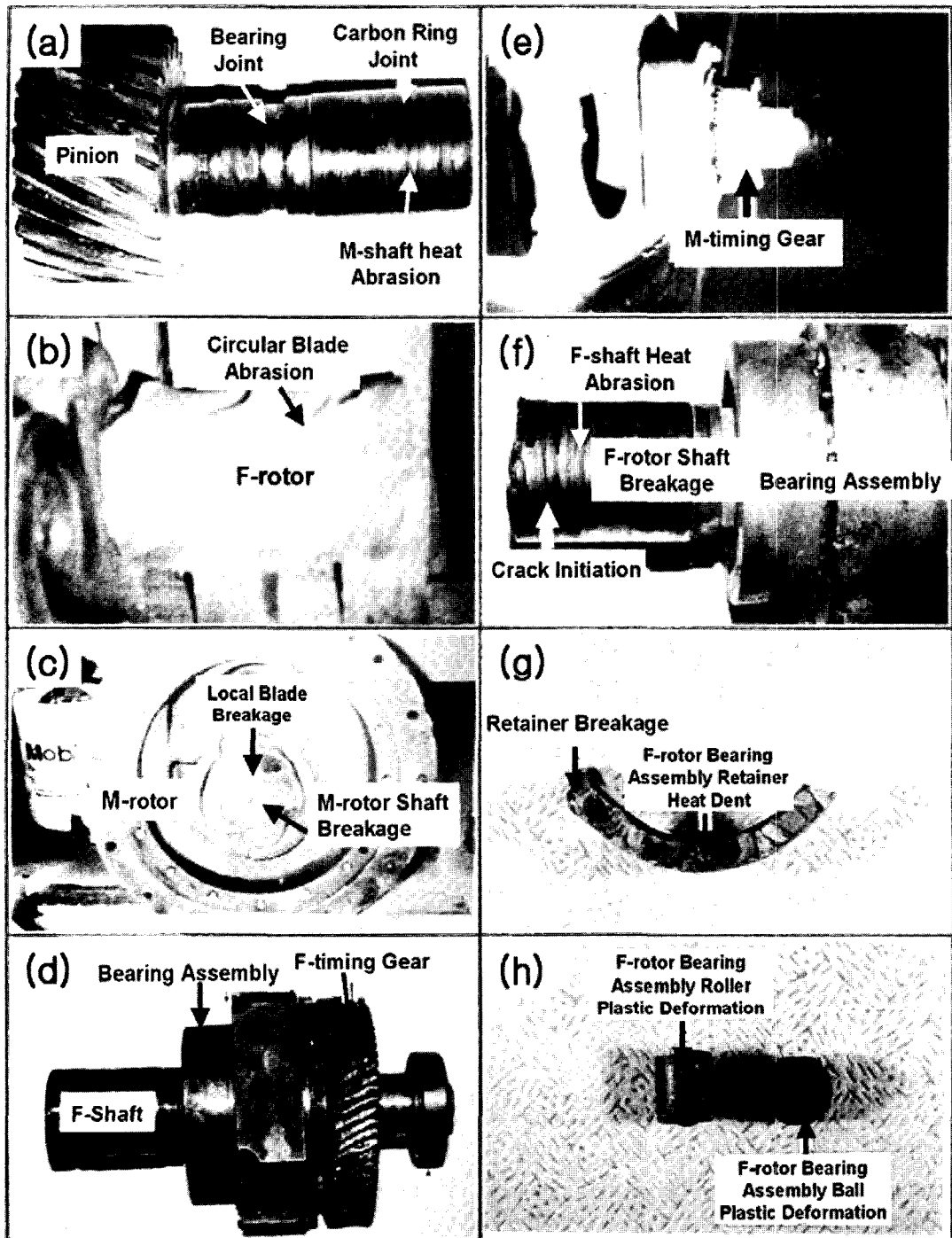
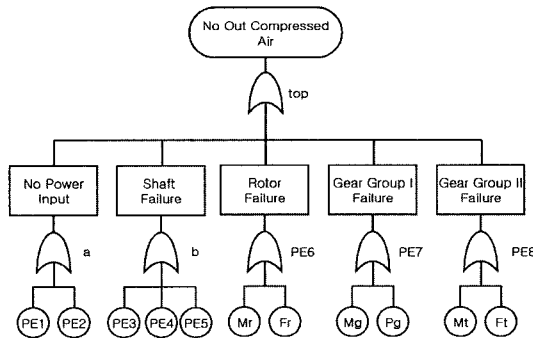


Fig. 4 The examples of air compressor failure

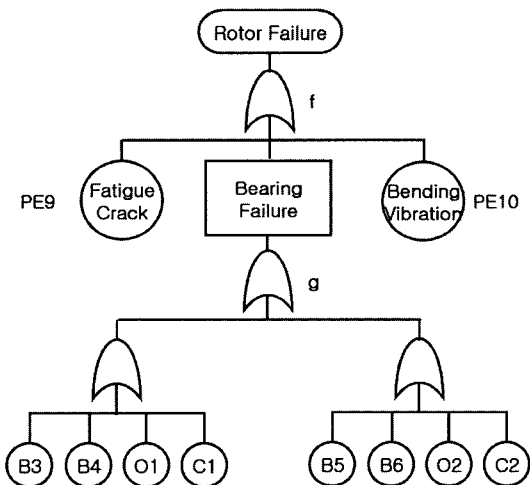
3.2 시스템 신뢰성 해석

본 스크루형 공기압축기는 사건 전개상 오차가 포함될 수 있지만 시스템 자체가 매우 고속이고, 또한 사고과정을 시뮬레이션 하는 것은 거의 불가능하다. 비록 고장 트리 자체에 약간의 오차가 포함되었지만 좀더 일반화된 고장트리를 작성하여 고장률과 신뢰도를 계산했다.

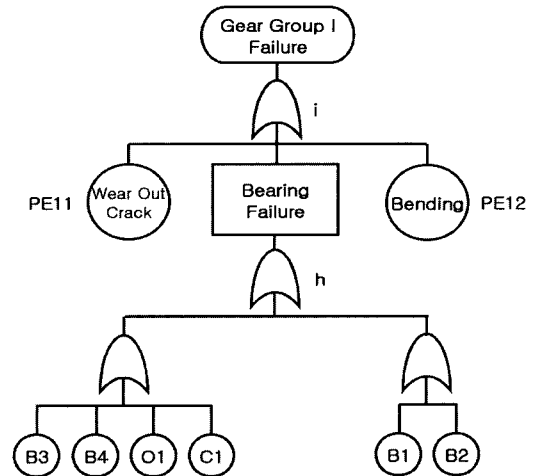
위의 고장사례 연구에서 얻어진 데이터를 근거로 공기압축기의 일반적인 F'T를 작성하면 Fig. 5 (a),(b),(c),(d)와 같다. 본 연구의 경우 특별한 환경하에서 작동되는 공기압축기의 고장을 좀더 일반화된 공기압축기 고장사례까지도 적용될 수 있도록 하기 위하여 고장범위를 확대시켜서 F'T



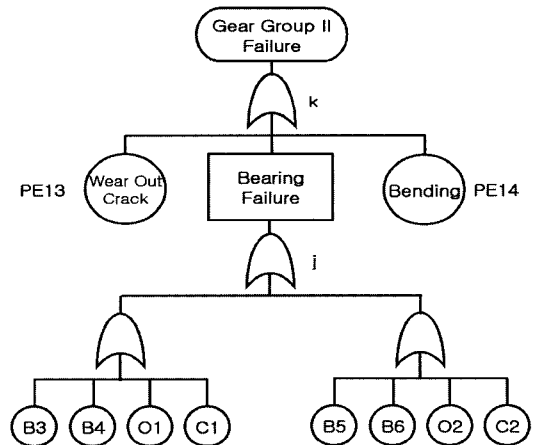
(a) The total fault tree of air compressor



(b) The fault tree of compressor rotor failure



(c) The fault tree of compressor main gear and pinion failure



(d) The fault tree of compressor timing gear failure

Fig. 5 The fault tree of air compressor

를 작성 했으며, 이와 같이 확대시킨 근거는 본 압축기 고장사례와 기타 기어 및 베어링 고장사례를 통하여 진단정보를 얻었다^{[12]~[14]}. 여기서 목표사상은 “압축공기 공급중단”으로 하고, 기본사상은 다음과 같이 규정될 수 있다.

- (1) 과부하에 의한 퓨즈 절손으로 인한 동력 중단(PE 1)
- (2) 전기 파워 스위치의 기계적 고장 (PE 2)

- (3) M-rotor shaft 절손 (PE 3)
- (4) F-rotor shaft 절손 (PE 4)
- (5) Main motor shaft 절손 (PE 5)
- (6) Rotor 고장 (PE 6)
 - 재질결함 및 로터의 피로크랙손상(PE 9)
 - 편심 및 재질변형에 의한 손상 (PE 10)
 - 로터 트러스트 베어링 손상 (PE Bm)
 - 로터 카본링 손상 (PE Ci)
 - 로터 O-ring 손상 (PE Oi)
- (7) Gear group I 이상 즉 Main gear 나 Pinion 손상(PE 7)
 - 메인 사프트 트러스트 베어링 손상(PE Bt)
 - 로터 트러스트 베어링 손상 (PE Bm)
 - 로터 카본링 손상 (PE Ci)
 - 로터 O-ring 손상 (PE Oi)
 - 마모손상(PE 11)
 - 벤딩 및 과도하중(PE 12)
- (8) Gear group II 이상 즉 M-timing gear, F-timing gear 손상 (PE8)
 - 로터 트러스트 베어링 손상 (PE Bm)
 - 로터 카본링 손상 (PE Ci)
 - 로터 O-ring 손상 (PE Oi)
 - 마모손상(PE 13)
 - 벤딩 및 과도하중(PE 14)

작성된 FT에서 고장률과 신뢰도를 평가하기 위하여는 각 부품요소(tribo-element)의 고장시간 및 신뢰도에 대한 데이터가 제시되어야 한다. Table 2의 고장률은 제작업체에서 일정기간 판매된 공기압축기의 고장원인 분석에 의한 평균고장률과 각종 고장 기계요소 부품의 통계 데이터를 기초로 작성된 것으로 수집된 데이터는 사용환경이 각각 다른 곳에서 얻어졌으므로 고장률 자체에 약간의 오차가 포함되어 있다. 일반적으로 실험실에서는 장시간에 걸쳐 일어나는 고장률을 검사할 수 있는 방법이 없으므로 사용조건을 가혹하게 하고 시간을 짧게 하여 고장률을 체크하고 문제가 발생하는 부품에 대하여 실 운전시험을 실시함으로써 이 부분에 대하여도 오차를 포함한다. 그러나 이러한 오차는 고장부품수가 많을수록 일정한 경향을 나타내기 때문에 무시될 수 있다. 신뢰도 R 과 고장

률 λ 는 (2)와 같은 관계가 있다. 그러나 이 식은 시스템 고장시 나타나는 고장결과만을 고려한 것이다. 여기서 사용한 신뢰도는 운행시 발생한 고장률과 제조과정에서 일어날수 있는 품질자체에 내포된 결함이 검사를 통하여 발견되지 않을 검사오차를 고려한 것이다^{[14],[18]}. 이것을 근거로 하여 본 공기압축기의 목표사상과 기본사상 사이 중간사상들에 대한 고장률은 다음과 같이 계산되어 질 수 있다.

Table 2 Failure rate and reliability of air compressor components

Component(event)	Failure rate (λ)	Reliability (R)
PE 1	10^{-3}	0.9992
PE 2	2×10^{-4}	0.9999
PE 3	2×10^{-6}	0.99995
PE 4	2×10^{-6}	0.99995
PE 5	2×10^{-6}	0.99995
PE Bt (B1 and B2)	2×10^{-7}	0.999997
PE Oi (O1 and O2)	0.5×10^{-6}	0.999993
PE Ci (C1 and C2)	1×10^{-6}	0.99997
PE Bm(B3,B4,B5,B6)	7×10^{-6}	0.99995
PE 9	2×10^{-6}	0.99995
PE 10	0.867×10^{-6}	0.999995
PE 11	1×10^{-6}	0.999999
PE 12	1×10^{-6}	0.99997
PE 13	4×10^{-6}	0.99993
PE 14	1×10^{-6}	0.99997

$$\lambda_a = \lambda_1 + \lambda_2 = 1.2 \times 10^{-3}$$

$$\lambda_b = \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 6 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_6 = OR(\lambda_{f1}, \lambda_{f2}) = 73.752 \times 10^{-6}$$

$$\left[\begin{aligned} \lambda_g &= OR(B3, B4, B5, B6, O1, O2, C1, C2) = 31 \times 10^{-6} \\ \lambda_j &= OR(\lambda_g, \lambda_9, \lambda_{10}) = 36.876 \times 10^{-6} \end{aligned} \right]$$

$$\lambda_7 = OR(\lambda_{a1}, \lambda_{a2}) = 34.0 \times 10^{-6}$$

$$\left[\begin{aligned} \lambda_h &= OR(B1, B2, B3, B4, O1, C1) = 15.9 \times 10^{-6} \\ \lambda_i &= OR(\lambda_h, \lambda_{11}, \lambda_{12}) = 17.0 \times 10^{-6} \end{aligned} \right]$$

$$\lambda_8 = OR(\lambda_{k1}, \lambda_{k2}) = 72.0 \times 10^{-6}$$

$$\left[\begin{aligned} \lambda_j &= \lambda_g = 31.0 \times 10^{-6} \\ \lambda_k &= OR(\lambda_j, \lambda_{13}, \lambda_{14}) = 36.0 \times 10^{-6} \end{aligned} \right]$$

따라서 위의 각 사상들을 기초로 본 공기압축기의 전체 고장률을 계산하면 다음과 같다.

$$\lambda_T = OR(\lambda_a, \lambda_b, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8) = 1.3857 \times 10^{-3} (Hr^{-1})$$

각 요소의 신뢰도가 주어지면 전체시스템의 신뢰성 해석이 가능하며, Table 2의 요소별 신뢰도를 근거로 하여 작성된 FT에 따라 전체시스템의 신뢰도 R_T 와 시스템 불량률 $R_{f\ system}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$R_T = R_a R_b R_6 R_7 R_8 = 0.997$$

$$R_a = R_1 R_2 = 0.9991$$

$$R_b = R_3 R_4 R_5 = 0.99985$$

$$R_6 = (R_g R_9 R_{10})^2 \\ = (R_{Bm})^8 (R_{ci})^4 (R_{oi})^4 (R_9 R_{10})^2 = 0.9993$$

$$R_7 = (R_i R_{11} R_{12})^2 \\ = (R_{Bi})^4 (R_{Bm})^4 (R_{oi})^2 (R_{ci})^2 (R_{11} R_{12})^2 = 0.9996$$

$$R_8 = (R_j R_{13} R_{14})^2 \\ = (R_{Bm})^8 (R_{oi})^4 (R_{ci})^4 (R_{13} R_{14})^2 = 0.9992$$

$$R_{f\ system} = 0.003$$

따라서 본 공기압축기의 전체고장은 주로 전기적인 고장에 기인하지만, 전기적인 고장은 주로 시스템 복구에 지장을 주지 않지만 기계적인 고장은 시스템을 못쓰게 하고, 복구비용이 매우 많이 소요되므로 본 연구에서 관심의 대상은 주로 기계적인 고장이다. 기계적 고장률만을 고려할 때 시스템 고장율은 전체시스템 고장률인 λ_T 에서 전기계통 고장률 λ_a 를 빼면 사용시간 1시간에 대한 고장율은 $0.1857 \times 10^{-3} (Hr^{-1})$ 으로 평균 5385시간 당 1건 정도로 하루 평균 8시간 가동한다고 볼 때 1.8년당 1회 정도의 기계적 고장이 발생될 수 있음을 알 수 있다.

그리고 본 시스템의 미니멀 컷셀은 모든 사상들이 OR게이트로 연결되어 있기 때문에 결국 최하부에 존재하는 기본사상의 각 요소가 미니멀 컷셀이 된다. 본 공기압축기는 매우 고속으로 회전하

므로 기계고장중 베어링 결함이 가장 빈번하고, 베어링고장은 주로 윤활문제에 기인되며, 또한 전체시스템 고장으로 연결된다. 따라서 고장을 미연에 방지하기 위해서는 각 베어링의 온도를 실시간 감시하여, 급격한 온도상승이 나타나면 시스템을 정지시키는 차단장치가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서 공기압축기 고장사례를 이용하여 일반화된 압축기 FT를 작성한 후 시스템의 고장률 및 신뢰도를 평가하였다. 이 결과치는 향후 시스템 보완 및 설계자료로 제시 될 수 있다. 미니멀 컷 셀을 구한 결과 공기압축기의 가장 문제가 되는 기본사상은 주로 링(ring)과 베어링계통으로 이 부분은 매우 고속으로 회전하기 때문에 윤활계통의 결함은 시스템에 치명적인 고장을 일으킨다.

따라서 이러한 고장을 방지하기 위해서는 시스템 윤활상태 및 베어링 각 부분에 온도센서를 이용하여 온도상승을 인지하여 시스템을 자동정지시키는 장치가 필수적이다. 또한 이와 같은 사실은 여러 형태의 베어링 고장을 통한 정밀진단사례를 통해서도 증명되었다. 이러한 연구를 통하여 시스템 각 부분 기계요소의 개체 고장발생이 다른 요소로 어떻게 전달되는지 전파과정을 통하여 이들 상호관계를 규명하였다. 또한 본 연구를 바탕으로 각각의 고장원인별(fault cause) 징후(symptom) 관계를 정립하여 지식베이스화 하고, FTA기법을 이용하여 이러한 지식들을 이용함으로써 진단의 정확도를 높일 수 있다. 향후 컴퓨터에 의한 설비 진단시스템 구축시 각 기계요소별 고장트레인에 기초한 지식베이스를 이용함으로써 추론알고리즘을 효율적으로 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Bhushan, M., Rengaswamy, R., "Design of sensor network based on the signed directed graph of the process for efficient fault diagnosis", Industrial

- and Engineering Chemistry Research, Vol. 39, No. 4, pp.999-1019, 2000.
- [2] Lou, S. J., Budman, H., Duever, T. A., "Comparison of fault detection technique", Journal of Process Control, Vol. 13, No. 5, pp.451-464, 2003.
- [3] Scattoloni, R., "Fault identification: An approach based on propagation digraph", International Journal of Systems Science, Vol. 31, No. 11, pp. 1489-1496, 2000.
- [4] Bhushan, M., Rengaswamy, R., "Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria", Computers and Chemical Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 735-741, 2000.
- [5] Basseville, M., Benveniste, A., "Diagnosing hybrid dynamical systems: Fault graphs, statistical residuals and Viterbi algorithm", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 4, pp. 3757-3762, 1998.
- [6] Sehgal, R., Gandhi, O. P., Angra, S., "Fault location of tribo-mechanical systems graph theory and matrix approach", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 70, No. 1, pp.1-14, 2000.
- [7] Mo, K. J., Oh, Y. S., Yoon, E. S., "Development of operation-aided system for chemical processes", Expert Systems with Applications, Vol. 12, No. 4, pp. 455-464, 1997.
- [8] Yang, S. K., Liu, T. S., "Failure analysis for an airbag inflator by Petri net", Quality and Reliability Engineering International, Vol. 13, No. 3, pp. 139-151, 1997.
- [9] 이근철, FTA안전공학, 기전연구사, pp.39-67, 1990.
- [10] Baron, J. H., Nunez, J. E., Rivera, S. S., "Risk-oriented safety evaluation of the CAREM-25 prototype reactor", Nuclear Technology, Vol. 134, No. 2, pp.97-109, 2001.
- [11] Fussell, J. B., "Reliability of sequential systems using the cause-consequence diagram method", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 215, No. 3, pp.207-220, 2001.
- [12] McNiff, B. P., Errichello, R. L., "New guidelines promise reliable wind-turbine gearboxes", Power Transmission Design, Vol. 39, No. 3, pp. 21-24, 1997.
- [13] 日本潤滑學會, 潤滑故障例とその対策, 養賢堂, pp.23-46, 1978.
- [14] Mayo, P. A., "Designing reliability into industrial gear drive", Gear Technology, Vol. 15, No. 5, pp.8, 1998.
- [15] 한국GMB 베어링, "기술카타로그", Korea GMB Industry Co., LTD. Bearing Division, pp.15-19, 1993.
- [16] Bae, Y. H., Lee, H. K., Lee, S. H. and Lee, S. J., "Fault Diagnosis of Walking Beam Roller Bearing by FTA", Journal of KSPE, Vol.11, No.5, pp.110-123, 1994.

저 자 소 개



배용환 (裵龍煥)

1962년 1월생, 1984년 부산대학교 기계설계학과 졸업(공학사), 1989년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 1990년 산업과학기술연구소(RIST)연구원, 1996년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(박사), 1997년-현재 안동대학교 기계교육학과 부교수
관심분야 : 고장진단 및 수명예측, 가공 및 생산자동화.