

# 열간압연 가열로 슬라브 이송장치 신뢰도 해석

배 용 환

안동대학교 기계교육학과

(2005. 4. 25. 접수 / 2006. 1. 13. 채택)

## Reliability Analysis of Slab Transfer Equipment in Hot Rolling Furnace

Young-Hwan Bae

Department of Mechanical Education, Andong National University

(Received April 25, 2005 / Accepted January 13, 2006)

**Abstract :** The development of automatic production systems have required intelligent diagnostic and monitoring functions to overcome system failure and reduce production loss by the failure. In order to perform accurate operations of the intelligent system, implication about total system failure and fault analysis due to each mechanical component failures are required. Also solutions for repair and maintenance can be suggested from these analysis results. As an essential component of a mechanical system, a bearing system is investigated to define the failure behavior. The bearing failure is caused by lubricant system failure, metallurgical deficiency, mechanical condition(vibration, overloading, misalignment) and environmental effects. This study described slab transfer equipment fault train due to stress variation and metallurgical deficiency from lubricant failure by using FTA.

**Key Words :** FTA(fault tree analysis), diagnostic method, reliability analysis, lubrication, friction coefficient, stress variation, metallurgical deficiency, fault train

### 1. 서 론

고장전파와 요소간의 상호작용을 도식적이고 계층적으로 표현하여 고장을 진단하려고 하는 연구가 오래 전부터 수행되었으며 이 중에서 고장진단을 위한 tree와 graph방법의 예에 관한 연구는 풍부하다<sup>1-8)</sup>. 신뢰성과 안전성 평가를 위하여 주로 사용되는 fault tree method<sup>2)</sup>, 고장의 발생에서 고장의 진행관계를 기술하여 고장원인을 추적하는 fault propagation method<sup>6)</sup>, 전기 통신망의 고장비율 고장확율을 계산하기 위하여 사용되는 signed digraph method<sup>7)</sup>와 하나의 시스템 내에서 일어나는 시간순으로 진행되는 사건들을 시각적으로 표현하는 event-tree와 복잡한 시스템의 분석과 모델링 고장해석에 주로 사용되는 sensor net method<sup>8)</sup>가 연구되었다.

고장트리(Fault Tree, 이하 "FT"라 한다)는 그래프

적으로 특정한 사건 사이의 관계와 이와 같은 사건들이 앞에서 서술한 즉 목표사상(top event)으로 알려진 고장사건이 어떤 원인에 의하여 발생하는지를 묘사한다. Fig. 1은 고장트리의 일례를 나타낸 것이다. 먼저 목표사상은 그 하부요소인 AND 게이트중 어느 하나가 만족되면 발생된다. AND 게이트는 각각 두개의 기본사상(basic event) 쌍(Am, Bm)으로 이루어져 있는데 이 두개의 기본사상이 동시에 발생되어야만 목표사상이 발생한다. 또한 목표사상이 일어나기 위해 필요한 최소한의 기본사상들의 집합을 미니멀 컷 셀(minimal cut sets)이라 하는데 이것은 기본사상 쌍인 (Am, Bm)이 된다.

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 시작된

## 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<sup>9)</sup>. 먼저 해석하려는 시스템의 작동 메카니즘을 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 간소화한 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<sup>10,11)</sup>. 목표사상에서 출발하여 가능한 기초적인 원인들이 논리 게이트로 연결되어 하부로 연결된다. 트리의 가장 하부는 사건이

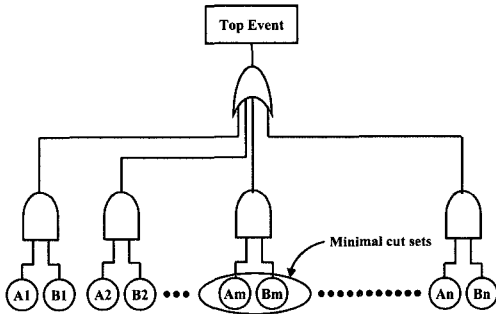


Fig. 1. Fault tree and minimal cut sets.

다. 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 열간압연에 필요한 슬라브를 가열로 내에서 이송시키는 장치의 결합분석을 위하여 육안관찰에 의한 손상을 평가하고, 사고의 원인을 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.

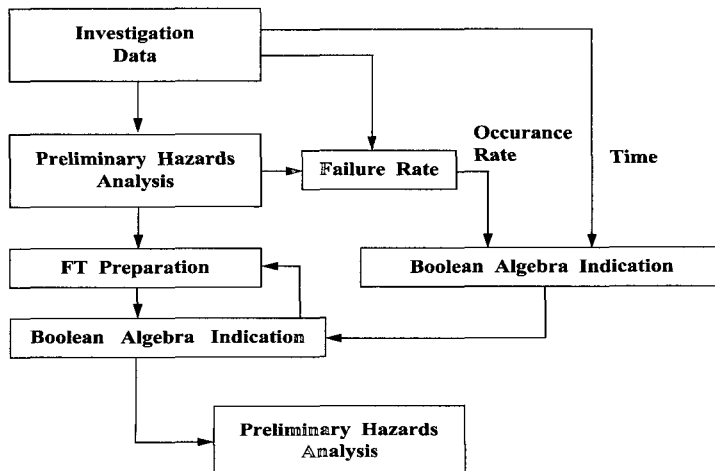


Fig. 2. The procedure of FTA.

일어나기 위한 기본사상이나 기본원인으로 이루어지며, 각각의 요소고장들에 대한 고장확률이 사례를 통하여 수집된 통계적 수치에 의하여 결정된다. 시스템 FT가 작성된 후 정성적으로 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 향으로 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  $\lambda_s$ (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  $\lambda_p$ (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. 슬라브 이송장치의 신뢰성

### 3.1. 시스템 개요

본 연구의 신뢰도해석 적용사례로서 금속 슬라브 이송장치를 지지하는 워킹빔베어링(Walking Beam Bearing)의 고장진단에 대하여 적용코자 한다. Fig. 3은 베어링의 내부구조 및 작동메카니즘을 나타낸 것이다. 베어링 구동모타에서 구동사프트와 구동기어를 통하여 관심 대상인 복렬로울러 워킹빔 베어링의 내부 캠축을 구동시킴으로 슬라브의 하중이 베어링에 작용한다. 적용된 베어링은 사용한지 3년 반만에 파손을 일으켰으며, 베어링은 단일 중앙공급 윤활방식에 의하여 동일한 여러 개의 베어링에 윤활유가 공급되는데 이중 하나의 베어링이 파손을 일으켰다. 일반적으로 윤활유 이상에 의한 고장은 여러 개의 베어링 파손을 유발할 것으로 생각되나 적용사례에서는 오직 하나의 베어링에서 파손이 진행된 것은 윤활 이외의 다른 요인에 의하여 파손이 진행된 것으로 볼 수 있다. Table 1에 본 워킹빔 베어링 사양을 나타내었다. Fig. 4는 슬라브 이송장치의 워킹빔 베어링의 고장사례를 나타낸 것이다.

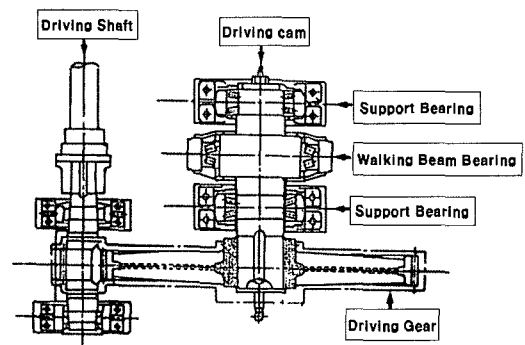


Fig. 3. Mechanical structure of Walking Beam roller bearing.

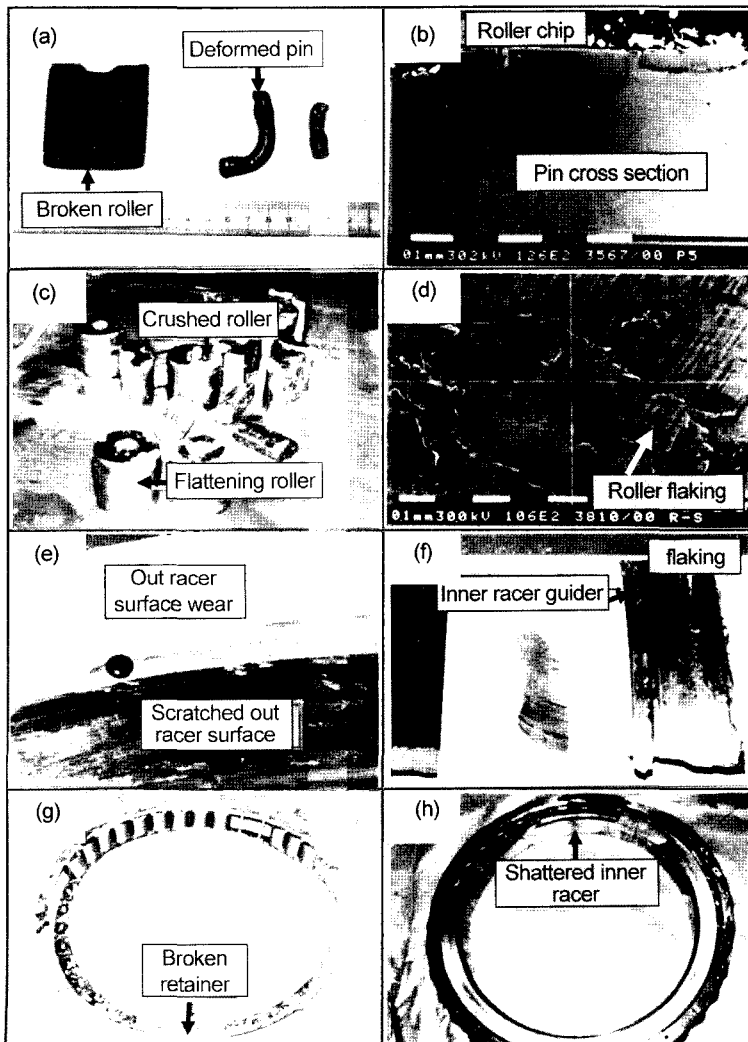
**Table 1.** The specification and working condition of walking beam bearing<sup>14)</sup>

Classification	Specification
Bearing size	Inner radius : 500 (mm) Outer radius : 720 (mm) Width : 167 (mm)
Load Condition	Radial load : 182 (ton) Basic dynamic load : 253 (ton) Basic static load : 380 (ton)
Internal clearance	Radial : 0.19-0.24 (mm) Axial : 0.73-0.93 (mm)
Revolution	2 (rpm)
Eccentricity	100 (mm)
Stroke	Upper & down : 200 (mm) Forward & backward : 500 (mm)

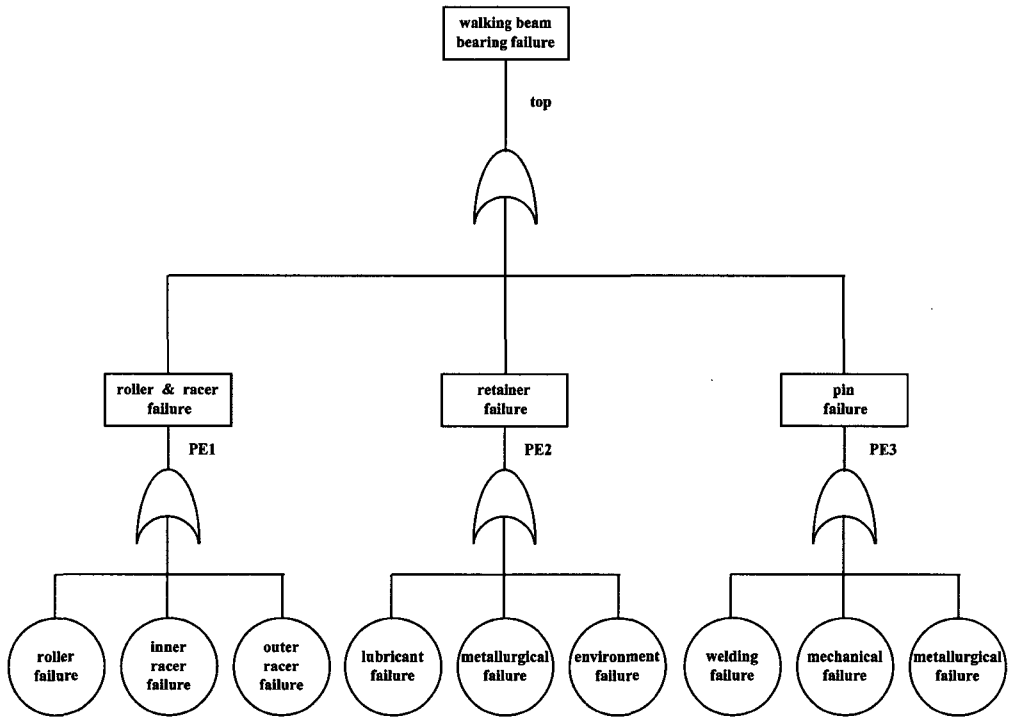
본 사고의 원인분석과 다양한 슬라브 이송장치의 현장사고 유형분석 및 기어, 베어링, 축부분의 고장사례를 분석을 통하여 이송장치의 FT를 작성하였다. 작성된 FT를 이용하여 본 시스템의 고장률을 계산하고, 시스템의 신뢰도를 계산하여 설계의 기초자료를 제시코자 하였다.

### 3.2. 시스템 고장률 및 신뢰성 해석

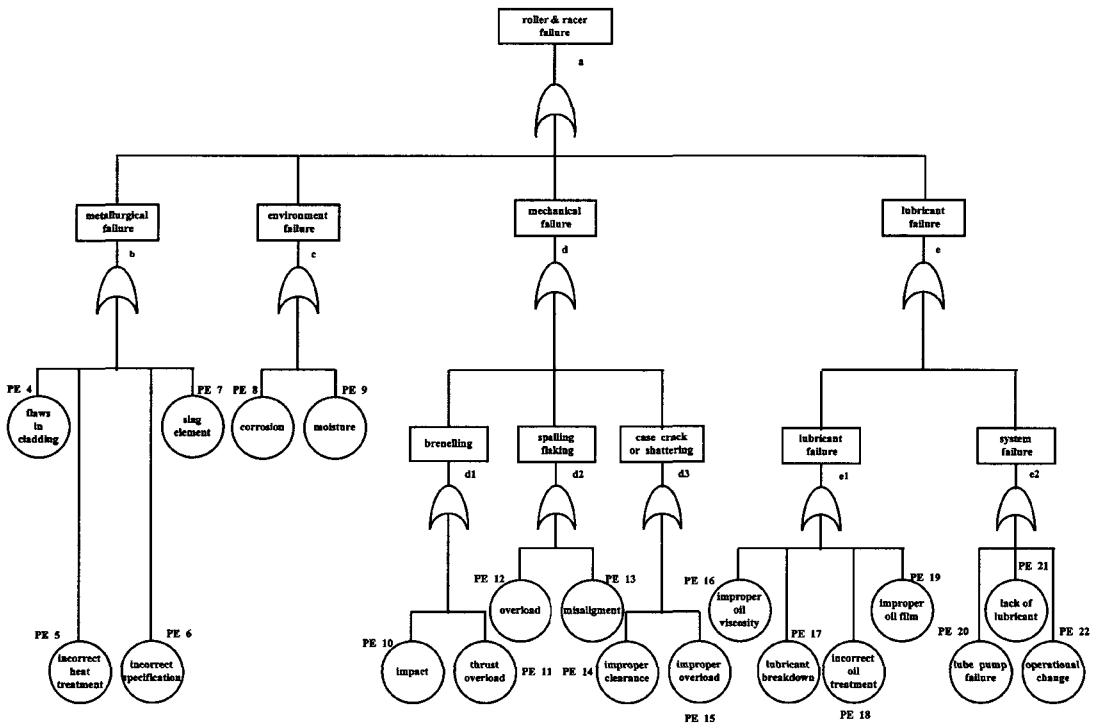
위의 연구결과에서 얻어진 파손트레인을 기초로 워킹빔 베어링의 일반적인 FT를 작성하면 Fig. 5 (a),(b),(c),(d)와 같다. 이것은 특정 시스템의 사고에 의한 것이므로, 본 시스템을 좀더 일반화된 워킹빔



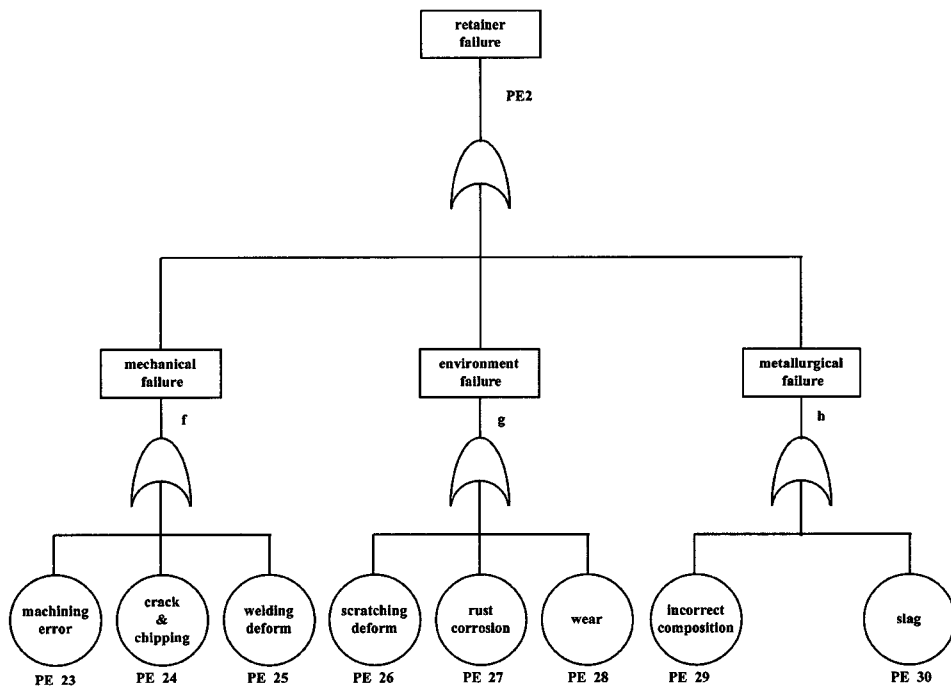
**Fig. 4.** The examples of walking beam bearing failure.



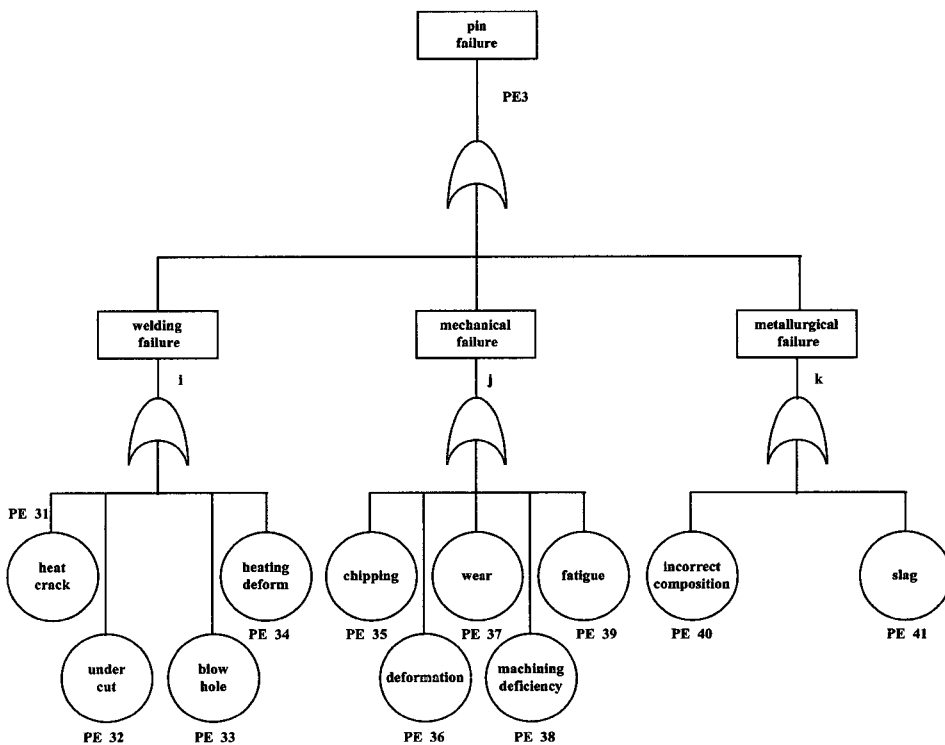
(a) The total fault tree of walking beam roller bearing failure



(b) Fault tree of roller and racer failure



(c) Fault tree of bearing pin failure



(d) Fault tree of retainer failure

Fig. 5. The fault tree of Walking Beam roller bearing failure.

베어링 고장사래에 적용시키기 위하여 간략화시켰으며, 이와 같이 간략화 시킨 근거는 위의 파손사래를 통하여 충분히 근거가 제시될 수 있다고 생각했다. 여기서 목표사상은 “워킹빔베어링 고장”으로 하고, 기본사상(basic event)은 다음과 같이 3가지로 크게 대별된다<sup>12)</sup>.

- (1) 전동체,궤도를 고장(PE 1)
  - 베어링표면 도금파괴 불량(PE 4)
  - 열처리 결함(PE 5)
  - 재질 성분 부적합(PE 6)
  - 슬래그 혼입(PE 7)
  - 부식(corrosion)(PE 8)
  - 부적절한 보전과 습기로 인한 녹발생(PE 9)
  - 충격발생에 의한 브리넬링(PE 10)
  - 과도한 비틀림 하중에 의한 브리넬링(PE 11)
  - 동,정적 과부하에 의한 스폴링(PE 12)
  - 미스얼라이언먼트로 인한 피로에 기인한 플래킹(PE 13)
  - 부적절한 클리어런스에 의한 케이스 크래킹(PE 14)
  - 과부하에 의한 세터링(PE 15)
  - 부적절한 윤활유 점도(PE 16)
  - 윤활막 파괴(PE 17)
  - 부적절한 주유법(PE 18)
  - 부적절한 윤활막(PE 19)
  - 윤활순환기 고장(PE 20)
  - 윤활유 부족(PE 21)
  - 작동환경 변화(PE 22)
- (2) 리테이너 고장(PE 2)
  - 가공오차의 부적절로 인한 회전운동 간섭(PE 23)
  - 가공크랙, chipping(PE 24)
  - 용접부 열변형(PE 25)
  - 클리어런스 부적절에 의한 열변형(PE 26)
  - 녹에 의한 부식(PE 27)
  - 마모(PE 28)
  - 부적절한 성분(PE 29)
  - 슬래그 유입(PE 30)
- (3) 로울러 핀 고장 (PE 3)
  - 용접균열(PE 31)
  - 과열용접에 의한 언더컷 발생(PE 32)
  - 브로우 홀(blow hole)(PE 33)
  - 열변형(PE 34)
  - chipping(PE 35)
  - 운전중 편심 부하에 의한 변형(PE 36)

- 마모(PE 37)
- 가공결함(PE 38)
- 피로손상(PE 39)
- 재질성분의 부적절(PE 40)
- 슬래그 유입(PE 41)

위에서 작성된 FT에서 고장률과 신뢰도를 평가하기 위하여는 각 부품요소의 고장시간 및 신뢰도에 대한 데이터가 제시되어야 한다. 본 시스템의 부품별 고장률 및 신뢰도를 참고문헌과 제조현장의 통계데이터를 기초<sup>12~14)</sup>로 Table 2와 같이 작성하여, 이것을 근거로 하여 본 시스템의 워킹빔 베어링 고장에 대한 중간사상들에 대한 고장률이 다음과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$\lambda_1 = OR(\lambda_{a1}, \lambda_{a2}, \lambda_{a3}) = 22.94 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_a = OR(\lambda_b, \lambda_c, \lambda_d, \lambda_e) = 7.647 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_b = OR(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7) = 0.577 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_c = OR(\lambda_8, \lambda_9) = 0.055 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_d = OR(\lambda_{d1}, \lambda_{d2}, \lambda_{d3}) = 0.405 \times 10^{-6}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \lambda_{d1} = OR(\lambda_{10}, \lambda_{11}) = 0.125 \times 10^{-6} \\ \lambda_{d2} = OR(\lambda_{12}, \lambda_{13}) = 0.145 \times 10^{-6} \\ \lambda_{d3} = OR(\lambda_{14}, \lambda_{15}) = 0.135 \times 10^{-6} \\ \lambda_e = OR(\lambda_{e1}, \lambda_{e2}) = 6.61 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{l} \lambda_{e1} = OR(\lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}) = 5.95 \times 10^{-6} \\ \lambda_{e2} = OR(\lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}) = 0.66 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

$$\lambda_2 = OR(\lambda_f, \lambda_g, \lambda_h) = 1.915 \times 10^{-6}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \lambda_f = OR(\lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}) = 0.0695 \times 10^{-6} \\ \lambda_g = OR(\lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}) = 1.785 \times 10^{-6} \\ \lambda_h = OR(\lambda_{29}, \lambda_{30}) = 0.057 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

$$\lambda_3 = OR(\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k) = 4.2855 \times 10^{-6}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \lambda_i = OR(\lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}) = 1.2735 \times 10^{-6} \\ \lambda_j = OR(\lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}) = 2.505 \times 10^{-6} \\ \lambda_k = OR(\lambda_{40}, \lambda_{41}) = 0.507 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

따라서 위의 각 사상들을 기초로 워킹빔 베어링의 전체고장률을 계산하면 다음과 같다.

$$\lambda_T = OR(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 0.029138 \times 10^{-6}$$

각 요소의 신뢰도가 주어지면 전체시스템의 신뢰성 해석이 가능하며, Table 4의 요소별 신뢰도를 근거로 하여 작성된 FT에 따라 전체시스템의 신뢰도  $R_T$ 와 전체시스템 불량률  $R_{f, system}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_1 &= (R_a)^3 \\ &= (R_b R_c R_d R_e)^3 \\ &= (R_4 R_5 R_6 R_7)^3 (R_8 R_9)^3 (R_{10} R_{11})^3 (R_{12} R_{13})^3 \\ &\quad (R_{14} R_{15})^3 (R_{16} R_{17} R_{18} R_{19})^3 (R_{20} R_{21} R_{22})^3 \\ &= 0.99476 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_2 &= R_f R_g R_h \\ &= (R_{23} R_{24} R_{25}) (R_{26} R_{27} R_{28}) (R_{29} R_{30}) \\ &= 0.99998 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3 &= R_i R_j R_k \\ &= (R_{31} R_{32} R_{33} R_{34}) (R_{35} R_{36} R_{37} R_{38} R_{39}) (R_{40} R_{41}) \\ &= 0.99987 \end{aligned}$$

$$R_T = R_1 R_2 R_3 = 0.9946$$

$$R_{f, system} = 1 - R_T = 0.0054$$

따라서 시스템의 전체고장은 주로 윤활적인 결합에 기인한 roller와 racer의 결합이 주된 고장을 차지한다. 이송용 로울러 베어링 시스템 고장율은  $0.029138 \times 10^{-3} (Hr^{-1})$ 로 평균 34,319시간당 1건 정도로 하루 평균 24시간 가동되므로 3.9년당 1회 정도의 기계적 고장이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 본 시스템의 미니멀 컷셀은 모든 사상들이 OR게이트로 연결되어 있기 때문에 결국 최하부에 존재하는 기본사상의 각 요소가 미니멀 컷셀이 된다. 본 연구대상 시스템은 매우 저속으로 회전하지만 과부하 하중이 늘 작용하고 있다. 따라서 윤활상의 문제는 기계요소의 피로를 야기시켜 전체시스템 고장으로 연결된다. 따라

Table 2. The failure rate and reliability of walking beam bearing components<sup>13,14)</sup>

Component	Event	Failure rate in $hr^{-1}(\lambda)$	Reliability (R)	
roller & racer	Metallurgical Failure	PE4	$3 \times 10^{-7}$	0.9999995
		PE5	$4 \times 10^{-7}$	0.9999993
		PE6	$7 \times 10^{-8}$	0.99999995
		PE7	$5 \times 10^{-8}$	0.9999993
	Environment Failure	PE8	$3 \times 10^{-8}$	0.9999995
		PE9	$2.5 \times 10^{-8}$	0.9999992
	Mechanical Failure	PE10	$5.5 \times 10^{-8}$	0.999992
		PE11	$7 \times 10^{-8}$	0.9999981
		PE12	$6.5 \times 10^{-8}$	0.9999985
		PE13	$8 \times 10^{-8}$	0.9999975
		PE14	$4.5 \times 10^{-8}$	0.9999993
		PE15	$9 \times 10^{-8}$	0.9999971
	Lubricant Failure	PE16	$9.5 \times 10^{-8}$	0.999983
		PE17	$7.5 \times 10^{-7}$	0.999988
		PE18	$7.5 \times 10^{-7}$	0.999988
PE19		$3.5 \times 10^{-6}$	0.99991	
PE20		$5.5 \times 10^{-8}$	0.999992	
PE21		$5.5 \times 10^{-8}$	0.999992	
PE22		$5.5 \times 10^{-7}$	0.9999993	
Retainer		PE23	$8 \times 10^{-9}$	0.99999991
	PE24	$6.5 \times 10^{-9}$	0.99999993	
	PE25	$5.5 \times 10^{-8}$	0.9999991	
	PE26	$7.5 \times 10^{-7}$	0.999988	
	PE27	$8.5 \times 10^{-8}$	0.999997	
	PE28	$9.5 \times 10^{-7}$	0.999997	
	PE29	$7 \times 10^{-9}$	0.99999995	
	PE30	$5 \times 10^{-8}$	0.9999987	
	Roller Pin	PE31	$3.5 \times 10^{-7}$	0.999996
		PE32	$8.5 \times 10^{-7}$	0.999895
PE33		$6.5 \times 10^{-8}$	0.999999	
PE34		$8.5 \times 10^{-9}$	0.9999999	
PE35		$5.5 \times 10^{-7}$	0.9999993	
PE36		$3.5 \times 10^{-7}$	0.999996	
PE37		$7.5 \times 10^{-8}$	0.9999985	
PE38		$7.5 \times 10^{-7}$	0.999988	
PE39		$7.8 \times 10^{-7}$	0.999987	
PE40		$7 \times 10^{-9}$	0.99999995	
PE41		$5 \times 10^{-7}$	0.9999991	

서 고장을 방지하기 위해서는 베어링의 순환급유 윤활시스템의 적정점도유지 및 이물질 혼입방지등에 유의해야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서 열간압연가열로 슬라브 이송장치의 고장사례를 이용하여 일반화된 이송장치 고장 FT를 작성한 후 시스템의 고장률 및 신뢰도를 평가하였다. 이 결과는 향후 시스템 보완 및 설계자료로 제시될 수 있다. 미니멀 컷 셀을 구한 결과 운반시스템의 가장 문제가 되는 기본사상은 주로 베어링계통으로 이 부분은 매우 속으로 회전하기 때문에 윤활계통의



결함은 시스템에 치명적인 고장을 일으킨다.

따라서 이러한 고장을 방지하기 위해서는 시스템 유효상태 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 기계요소들의 개체 고장발생이 다른 요소로 어떻게 전달되는지 전과과정을 통하여 이들 상호관계를 규명하였다. 또한 본 연구를 바탕으로 각각의 고장원인 별(fault cause) 징후(symptom)관계를 정립하여 지식 베이스화 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, FTA 안전공학, 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) 한국 GMB 베어링 주식회사, 기술카타로그, pp. 100~112, 1992.
- 13) 日本精工株式會社, "F1 감속기 베어링 파손보고서", 1990.
- 14) McNiff, B. P., Errichello, R. L., "New guidelines promise reliable wind-turbine gearboxes", *Power Transmission Design*, Vol. 39, No. 3, pp. 21~24, 1997.
- 15) 日本潤滑學會, 潤滑故障例とその對策, 養賢堂, pp. 23~46, 1978.
- 16) Mayo, P. A., "Designing reliability into industrial gear drive", *Gear Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 8, 1998.
- 17) 한국GMB 베어링, "기술카타로그", Korea GMB Industry Co., LTD. Bearing Division, pp. 15~19, 1993.