IE Interfaces
Vol. 16, No. 1, pp. 27-33, March 2003.

다수의 고장유형을 갖는 제철설비의 최적 정비주기 산출

송홍준[1] · 전치혁[2†]

[1]광양제철소 설비기술부 정비기획팀/[2]포항공과대학교 산업공학과

Determining the Optimum Maintenance Period of the Steel Making Equipment Having Multiple Failure Types

Hong-Jun Song[1] · Chi-Hyuck Jun[2]

[1]Maintenance Planning Team, Kwangyang Works, POSCO, Kwangyang, 545-711
[2]Department of Industrial Engineering, POSTECH, Pohang, 790-784

The maintenance cost in K Steelworks has been continuously increased in proportion to the production cost. However, there seems to be a possibility of reducing cost through the optimization of maintenance actions. The failure types of the equipment in steelworks are various with different failure cost. Thus the failure rate and cost of each type of failures should be considered simultaneously when the optimum maintenance period is to be determined. It is considered that the equipment undergoes periodic replacement and a specified number of incomplete preventive maintenance actions are performed during a replacement period. Assuming that the time to failure follows a Weibull distribution, the parameters of the failure rate are estimated using the maximum likelihood estimation. The optimal replacement period is determined to minimize the average cost per unit time. As the result of analysis it is suggested that the existing maintenance period for a hot-rolling equipment can be extended significantly.

Keywords: minimal repair, incomplete preventive maintenance, Weibull distribution

1. 서 론

제철산업은 대단위 장치산업으로서 무수히 많은 종류의 설비로 이루어져 있으며 설비의 최적상태 유지가 생산성이나 품질 등 최고의 경쟁력을 확보하는 바탕이 되기 때문에 설비관리업무의 중요성은 점점 더 강조되고 있다. 제철소의 설비는 생산에 미치는 영향에 따라 생산직결설비와 생산과 무관한 기타설비로 구분할 수 있으며 생산직결설비의 경우는 공장별로 설정되어 있는 계획수리일정(planned maintenance schedule)에 맞추어 정기적인 예방정비(preventive maintenance)작업이 이루어지고 이는 고장을 방지하기 위한 정비활동으로 많은 비용이 투입되고 있다. 또한 생산직결설비의 고장은 발생내용에 따라 경고장(minor failure)과 중고장(major failure) 유형으로 구분되며 중고장의 경우 매일 아침 경영층까지 설비속보로 보고가 될 정도로 중요하게 관리되고 있어 고장에 따른 기회손실비용이 상당히 크다. 또한 경고장의 경우는 기회손실비용은 작으나 발생빈도가 중고장에 비해 크기 때문에 정비비용의 관점에서 두 가지 고장유형에 대한 고장손실비용을 고려하여야 한다.

현재와 같은 고비용 저성장의 국내 경영환경과 날로 치열해져 가는 대외 경쟁관계에서 경쟁력을 지속적으로 유지하기 위해서는 최소의 비용으로 최고의 가동률을 유지할 수 있도록 설비에 대한 가치를 최대로 높여 가는 것이 경쟁력의 관건이라 할 수 있다. 특히 K제철소의 경우 최근 몇 년간 정비비 실적과 제조원가에서 정비비가 차지하는 원가요소 점유율이 계속

본 연구는 서울대학교 복잡계통계연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 의하여 수행되었음.
†연락저자 : 전치혁 교수, 790-784 경북 포항시 남구 효자동 산 31 포항공과대학교 산업공학과, Fax : 054-279-2197,
e-mail : chjun@postech.ac.kr
2002년 4월 접수, 3회 수정 후 2002년 10월 게재 확정.

상승하고 있어 과잉 정비활동이라는 우려의 목소리가 나오고 있는 실정이며 정비비용을 절감할 수 있는 계획수리주기(정비주기)에 대한 검토의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 정비주기의 설정에는 제철소의 정비활동에 적합한 정비정책을 적용하여 두 가지 고장유형의 고장실적을 분석하고 각각의 고장발생까지의 고장발생분포를 고려하여 정비비용을 최소로 하는 최적 정비주기를 도출한다. 본 연구에서는 정비주기를 결정할 수 있는 방안을 K제철소 열연공장의 생산직결설비에 대하여 적용한 사례를 소개한다.

2. 제철소 정비체제

K제철소의 경우 대형화, 자동화, 연속 집약화된 일관제철소의 특성상 고장에 따른 손실이 매우 크기 때문에 설비별로 점검 및 수리주기를 두어 일정한 주기별로 설비관리활동을 실시하는 예방정비정책을 따르고 있다. 특히 생산직결설비의 경우 공장별로 수리주기를 설정하여 공장을 정지한 후 수리작업을 실시하는 계획수리를 하고 있으며 일관라인의 특성상 수시로 공장을 정지시킬 수 없는 것이 가장 큰 이유이다(<표 1> 참조). 생산과 무관한 설비의 경우에는 생산에 아무런 영향을 주지 않기 때문에 소수리 작업이라 하여 공장의 계획수리일정과 무관하게 자체 수리주기에 의하여 수리작업이 행해진다.

제철소의 정비작업은 수리작업의 성격에 의하여 구분되며 아래와 같이 크게 대수리, 중수리, 정기수리, 계획휴지, 소수리, 돌발수리로 대별할 수 있다.

(1) 대, 중수리 : 연차 생산계획 및 수리계획에 의거하여 설비의 열화복구 및 성능보전을 위하여 공장 또는 공정단위로 연 1～2회 주기적으로 실시하는 수리작업으로 한번에 약 3～7일이 소요됨.
(2) 정기수리 : 약 4주에 한번 주기로 공장 또는 공정단위로 사전계획에 의하여 실시하는 비교적 규모가 작은 수리작업.
(3) 계획휴지 : 회사의 경영정책상 수반되는 합리화공사, 수주전망, 판매시황 및 전후 공정간의 소재흐름 조정 등과 정기수리 주기사이에 스크린 교체, 출선구 보수, 롤갭 측정 등을 위하여 수리계획에 의거하여 휴지한 시간에 실시하는 수리작업으로 약 1주에 한번 주기로 실행함.
(4) 소수리 : 생산에 영향을 미치지 않는 설비부위에 대하여 간단히 실시하는 수리작업.
(5) 돌발수리 : 가동 중 일어난 돌발고장을 복구하기 위해 실시하는 수리작업.

소수리, 돌발수리를 제외한 본 연구에서 대상으로 하는 수리작업은 공장별, 공정별로 연간, 반기별, 분기별, 월간 수리일정계획이 수립되고 생산계획 부서와 사전협의에 의하여 월간 단위 수리계획이 확정되면 이 일정에 따라 자재준비, 정비인력의 작업배치를 실시하고 정해진 일자에 수리작업이 이루어진다.

<표 2>는 K제철소의 한 열연공장의 생산직결설비에 대하여 1995년부터 2000년 사이에 실시한 계획수리시간과 고장수리시간을 나타낸 것이다. 2000년도 정비작업 유형에 따른 작업내용을 보면 대수리 1회, 정기수리 12회, 계획휴지 38회로 총 51회의 계획수리가 실시되어 수리작업이 평균 1주단위로 실시되었으며, 작업시간으로 볼 때 계획휴지나 정기수리는 8-16시간, 대수리는 약 7일이 소요되었다.

생산직결설비의 가동중에 고장이 발생할 경우 생산중단으로 인한 기회손실비용이 막대하기 때문에 최소한의 수리작업으로 설비가 재가동되도록 한다. 물론 최소한의 수리를 실시한다 하더라도 제철설비의 특성상 대형설비인 경우가 많아 수

표 1. 설비성격에 따른 수리 가능 여부

구 분	공장가동중	고장발생	계획수리	비 고
생산직결설비	×	O	O	생, 감산휴지
기타설비	O	O	O	설비휴지*

* 설비휴지의 경우는 생산과 전혀 관계없는 휴지로 수리비용만 들어감.

표 2. 1995-2000년간 열연공장의 고장시간 및 계획수리 작업시간 (단위 : Hours)

연도	고장시간	계획수리시간					비고 (고장시간/계획수리)
		계획휴지	정기수리	중수리	대수리	소계	
'95년	28	255	247	186		688	4%
'96년	26	259	237	181		677	4%
'97년	26	298	237		398	933	3%
'98년	34	346	173	185		704	5%
'99년	26	305	163	183		651	4%
'00년	29	336	173		163	672	4%
합계	169	1799	1230	735	561	4325	4%

리시간이 어느 정도 걸린다고 볼 수 있지만 <표 2>에서 볼 수 있듯이 계획수리시간에 비하면 고장수리시간은 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 생산직결설비의 고장시 수리작업은 최소수리(minimal repair)라 볼 수 있다. 최소수리란 고장수리 후에도 고장률이 변하지 않으며, 고장수리에 소요되는 시간을 무시할 만하다는 것이다(Tilquin and Cleroux, 1975). 그리고, 계획휴지나 정기수리는 설비의 부품교환이나 간단한 수리를 실시하는 불완전 예방정비(incomplete preventive maintenance)로 간주할 수 있으며 중, 대수리는 over-haul 개념의 수리작업으로 완전 교체로 간주할 수 있다. 물론, 엄밀하게는 중, 대수리를 완전 교체로 간주하는 데 다소의 무리가 있을 수 있으나 현실적인 면에서는 중, 대수리가 다른 수리에 비해 상대적으로 설비를 원상으로 복구시키고 있기 때문에 이와 같은 가정이 적용될 수 있다. 여기서 교체시점은 모든 것이 새로 시작하는 재생시점(renewal point)으로 간주할 수 있으나, 불완전 예방정비는 그렇지 않다. 하나의 교체주기 내에는 다수의 불완전 예방정비가 발생할 수 있는데 통상 예방정비의 횟수가 증가함에 따라 고장률이 증가하는 경향이 있다(전치혁 외, 1998)). 이에 대한 보다 자세한 사항은 3절에서 언급한다.

3. 교체주기 설정

3.1 기본 가정사항

제철소의 정비활동에 적합한 정비정책을 적용하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

[가정 1] 가동중인 설비의 열화상태는 시간이 증가함에 따라 증가하며 고장유형별 고장률로 대표된다. 고장까지 시간의 확률분포함수는 Weibull 분포함수로 가정한다.

[가정 2] 고장이 발생하면 최소수리를 실행하며, 최소수리 후 설비의 열화상태는 수리 직전의 열화상태를 그대로 유지한다.

[가정 3] 하루에 점검활동에 투입되는 인원과 비용은 동일하다. 따라서 점검활동비용은 공장가동시간에 대해 선형적으로 증가한다.

[가정 4] 설비의 고장유형별 고장은 독립적으로 발생한다.

[가정 5] 한번의 교체주기 사이에 다수의 불완전 예방정비가 수행된다. 교체 및 불완전 예방정비에서 고장률은 0으로 복귀되나, 불완전 예방정비의 경우 그 횟수가 증가함에 따라 동일한 시간경과에 따른 고장률은 증가한다.

다음의 <그림 1>은 최소수리, 불완전 예방정비(*PM*으로 표기), 교체가 있는 수리정책에서 한 유형의 시간에 따른 고장률을 그림으로 나타낸 것이다. 여기에서 [가정 2]와 [가정 5]의 현상을 볼 수 있다. 즉, 최소수리 후 고장률은 원점에서 다시 증가하는 것이 아니고 이전의 추세가 지속되며, *PM* 이후 동일한 t 시간 경과 후의 고장률이 *PM* 횟수가 증가함에 따라 같이 증가함을 볼 수 있다.

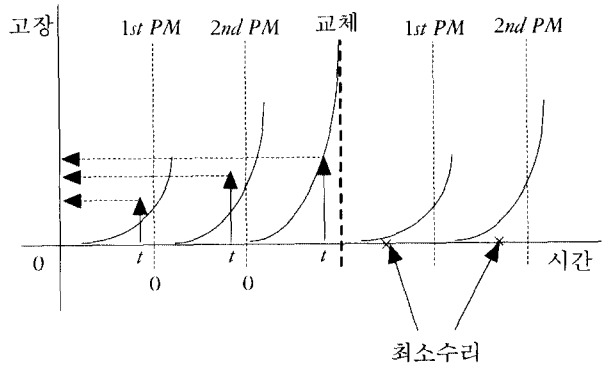

그림 1. 불완전 예방정비가 있는 교체정책에서의 설비 고장률.

3.2 불완전 예방정비가 있는 교체정책에서의 교체주기 산정

<그림 2>와 같이 하나의 교체주기 내에 N번의 불완전 예방정비 (*PM*)가 있다고 하자. 보다 엄밀하게는 $(N-1)$번의 *PM*이 있으며 N번째 *PM*은 교체가 된다. 각 *PM*의 주기는 T로 일정하며, 한 *PM* 주기 내에서 고장이 발생할 경우에는 최소수리를 시행한다. 따라서 하나의 교체주기는 NT가 되며 최적 정비주기 산정의 문제는 총비용을 최소화하는 N과 T값을 구하는 문제로 귀결된다.

k개 유형의 고장이 서로 독립적으로 발생된다고 하고 p번째 *PM* 주기에서 j번째 고장유형 고장까지의 시간 누적분포함수는 $F_{jp}(.)$라 하고 이의 확률밀도함수를 $f_{jp}(.)$라 하면 유형 j의 시간 t에서의 고장률은 다음과 같다(박경수, 1978)).

$$h_{jp}(t)=\frac{f_{jp}(t)}{1-F_{jp}(t)} \quad (j=1,2,\cdots k\ ;\ p=1,2,\cdots N) \qquad (1)$$

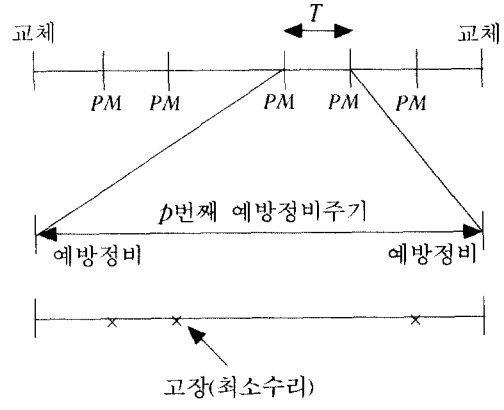

그림 2. 불완전 예방정비주기와 교체주기.

이 때 [가정 5]에 의하여 다음 관계가 성립한다.

$$h_{jp}(t) < h_{j,p+1}(t), \qquad p=1,2,\cdots \tag{2}$$

본 연구에서는 식(2)의 관계를 유지시키기 위하여 *PM* 횟수에 따른 고장률을 아래와 같이 가정한다.

$$h_{jp}(t)=\alpha_j\lambda_j r_j^{p-1}t^{\alpha_j-1} \qquad (r_j>1) \tag{3}$$

즉, 이에 대응되는 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{jp}(t)=\alpha_j\lambda_j r_j^{p-1}t^{\alpha_j-1}\exp(-\lambda_i r_j^{p-1}t^{\alpha_j}) \tag{4}$$

참고로 고장데이터를 바탕으로 다음과 같은 가설검정을 통하여 귀무가설이 기각되지 않는다면 불완전 *PM*을 고려할 필요가 없을 것이다.

$$\begin{aligned} H_0 &: r_j=0 \\ H_1 &: r_j\neq 0 \end{aligned} \tag{5}$$

최적 예방정비 주기를 결정하기 위해 재생이론을 이용할 수 있는데 한 사이클의 비용으로 아래와 같은 항목을 고려한다 (Barlow *et al.*, 1965).

한 사이클 평균비용 = 최소수리비용 + 불완전 교체비용 + 교체비용 + 점검활동비용

여기서 점검활동비용은 [가정 3]에 따라 주기 산정에 영향을 주지 않으므로 편의상 생략한다. 따라서 $K_{jp}(T)$를 정비주기가 T인 p번째 예방정비주기에서의 j번째 고장유형의 고장횟수, C_j를 j번째 고장유형의 최소수리비용(고장손실비용), C_{ir}를 불완전 예방정비비용, C_r을 교체비용이라 하면 교체주기 NT가 재생사이클이 되므로 단위시간당 평균비용은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{av}(NT) &= \frac{\sum_{j=1}^{k}\sum_{p=1}^{N} C_j E[K_{jp}(T)] + (N-1)C_{ir} + C_r}{NT} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{k}\sum_{p=1}^{N} C_j \int_0^T h_{jp}(t)\,dt + (N-1)C_{ir} + C_r}{NT} \end{aligned} \tag{6}$$

위의 식에서 고장횟수의 기대치는 비균질 포아송 과정의 결과에 의하여 도출된 것이다(Nakagawa, 1986). 그리고 분자의 적분식은 다음과 같이 계산된다.

$$\int_0^T h_{jp}(t)dt=\lambda_j r_j^{p-1}T^{\alpha_j}$$

여기서 우리가 구하고자 하는 것은 식 (6)의 평균비용을 최소로 하는 교체주기의 산출이므로 T가 정해질 때

$$\begin{aligned} &C_{av}((N+1)T) \geq C_{av}(NT), \\ &C_{av}(NT) < C_{av}((N-1)T) \end{aligned}$$

을 만족하는 N값이 최적이 된다. 다음과 같은 새로운 변수를 정의하면

$$A(T,N,j)=N\int_0^T h_{j(N+1)}(t)\,dt - \sum_{p=1}^{N}\int_0^T h_{jp}(t)\,dt \qquad \text{for } N=1,2\cdots$$

$$A(T,N,j)=0 \qquad \text{for } N=0$$

위 두 개의 부등식은 다음과 같은 두 개의 부등식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{k} C_j A(T,N,j) \geq C_r - C_{ir}, \\ &\sum_{j=1}^{k} C_j A(T,N-1,j) < C_r - C_{ir} \end{aligned} \tag{7}$$

또한 예방정비주기 T는 식(6)를 T에 대하여 미분하여 0으로 놓고 이 식을 풀어서 구할 수 있다. 즉, 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\sum_{j=1}^{k}\sum_{p=1}^{N} C_j[Th_{jp}(T) - \int_0^T h_{jp}(t)\,dt] = (N-1)C_{ir} + C_r \tag{8}$$

j번째 고장유형의 고장률함수 $h_{jp}(t)$ $(p=1,2,\cdots,N)$가 t에 대해 미분가능하며 단조증가함수라면, 이 가정에 의해 식 (7)의 좌변은 또한 단조증가함수임을 증명할 수 있다. 그러므로 임의의 N에 대해서 식 (7)을 만족시키는 최적이고 유일한 T가 존재하게 된다. 결국 식 (7) 과 (8)을 만족하는 T와 N이 식 (6)의 평균비용을 최소화하는 값이 되며 이는 적절한 수치해석방법을 사용하여 산출이 가능하다.

4. 고장분포함수 추정

식 (3)으로 주어진 고장률함수에서 추정하여야 할 파라미터는 각 고장유형별로 세 가지씩이다. 유형별 고장은 서로 독립적이므로 이하의 분석에서는 편의상 고장유형을 나타내는 첨자 j는 생략한다. 각 고장유형의 고장률함수의 파라미터를 추정하기 위하여 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 사용하고자 한다. 과거의 고장기록 및 정비실적으로부터 다음과 같은 데이터를 수집한다고 하자. 즉, 총 m번의 교체실적이 있고 i번째 교체주기 동안 N_i번의 *PM*이 있으며 p번째 *PM* 주기인 T_{ip} 동안 n_{ip}번의 고장이 기록되어 고장발생까지의 데이터 $x_{ip1}, x_{ip2}, \cdots, x_{ipn_{ip}}$ 가 수집된다고 하자. 이를 그림으로 나타내면 <그림 3>과 같다.

식 (4)의 확률밀도함수(고장유형 첨자 j 생략)와 중단데이터를 활용하여 우선 i번째 교체주기 내의 p번째 *PM* 주기에 대한 우도함수(likelihood function)를 구성하면 다음과 같다(Bunday

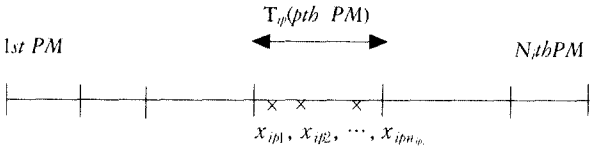

그림 3. i번째 교체주기의 구성 및 고장데이터.

(1991), 전치혁 외(1998)).

$$L_{ip}(\alpha,\lambda,r)=\alpha^{n_{ip}}(\lambda r^{p-1})^{n_{ip}}\prod_{q=1}^{n_{ip}}x_{ipq}^{\alpha-1}\exp(-\lambda r^{p-1}T_{ip}^{\alpha}) \quad (9)$$

i번째 교체주기에 대한 우도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}L^{(i)}(\alpha,\lambda,r)&=L_{i1}(\alpha,\lambda,r)L_{i2}(\alpha,\lambda,r)\cdots L_{iN_i}(\alpha,\lambda,r)\\&=\alpha^{\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}}\prod_{p=1}^{N_i}(\lambda r^{p-1})^{n_{ip}}\prod_{p=1}^{N_i}\prod_{q=1}^{n_{ip}}x_{ipq}^{\alpha-1}\\&\quad\exp(-\sum_{p=1}^{N_i}\lambda r^{p-1}T_{ip}^{\alpha})\end{aligned} \quad (10)$$

따라서 m번의 교체에 대한 전체의 우도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&L(\alpha,\lambda,r)\\&=\alpha^{\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}}\prod_{i=1}^{m}\prod_{p=1}^{N_i}(\lambda r^{p-1})^{n_{ip}}\exp(-\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}(\lambda r^{p-1})\\&\quad T_{ip}^{\alpha})\prod_{i=1}^{m}\prod_{p=1}^{N_i}\prod_{q=1}^{n_{ip}}x_{ipq}^{\alpha-1}\end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에 자연로그를 취하면 다음 식을 얻으며,

$$\begin{aligned}\log L(\alpha,\lambda,r)=&\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}\log\alpha+\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}\log(\lambda r^{p-1})\\&-\lambda\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}r^{p-1}T_{ip}^{\alpha}\\&+(\alpha-1)\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}\sum_{q=1}^{n_{ip}}\log x_{ipq}\end{aligned} \quad (12)$$

식(12)을 최대로 하는 파라미터의 추정치를 얻기 위하여

$$\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial\alpha}=0,\quad\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial\lambda}=0,\quad\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial r}=0$$

으로 놓으면 다음과 같은 세 개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial\alpha}=&\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}}{\alpha}-\lambda\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}r^{p-1}T_{ip}^{\alpha}\log T_{ip}\\&+\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}\sum_{q=1}^{n_{ip}}\log x_{ipq}=0\end{aligned} \quad (13a)$$

$$\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial\lambda}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}n_{ip}}{\lambda}-\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}r^{p-1}T_{ip}^{\alpha}=0 \quad (13b)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial\log L(\alpha,\lambda,r)}{\partial r}=&\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}(p-1)n_{ip}}{r}\\&-\lambda\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{N_i}(p-1)r^{p-2}T_{ip}^{\alpha}=0\end{aligned} \quad (13c)$$

결국 식(13)의 세 비선형 방정식으로부터 세 파라미터의 추정치를 산출할 수 있다. 비선형 방정식을 푸는 방법으로는 상용 소프트웨어를 사용할 수도 있으며, 전치혁 외(1998)의 grid 검색법을 이용할 수 있는데 본 논문에서는 후자의 방법을 사용한다.

5. 두 가지 고장유형을 갖는 제철설비의 대한 최적 정비주기 산출

5.1 고장유형 분류기준

제철소의 설비는 무수히 많은 종류로 구성되어 있으며 고장 발생 부위에 따라 고장유형도 다양하다. K제철소의 경우 고장 발생 유형에 따라 수리하는 시간에 차이가 나며 고장시간 및 피해액의 정도에 따라 경고장(minor failure)과 중고장(major failure)으로 구분되며 분류기준은 <표 3>과 같다.

특히 중고장의 경우 매일 아침 경영층까지 설비속보로 보고가 될 정도로 중요하게 관리되고 있으며 경고장에 비하여 고장손실비용은 상당히 크나 전체 고장 발생 건수 중에서 경고장이 차지하는 비율이 상대적으로 상당히 높다. 그러므로 고장 건당 고장손실비용은 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 따라서 전체적인 정비비용 고려시 고장의 두 가지 발생유형에 따른 설비의 수명특성과 고장손실비용이 별도로 고려되어야 한다.

표 3. 고장유형 분류기준

고장유형	분 류 기 준	비 고
중고장	1) 생산휴지 1시간 이상인 고장 또는 2) 감산휴지 1시간 이상인 고장 또는 3) 고장으로 인한 총 손실액이 1억원 이상인 고장	
경고장	1) 생, 감산휴지 1시간 미만이면서 2) 고장으로 인한 총 손실액이 1억원 미만인 고장	

5.2 정비실적 데이터 수집

본 논문에서 대상으로 하는 K제철소의 열연공장 생산직결 설비는 어느 한 곳에서 고장이 발생하면 조업이 중단되므로 전체를 하나의 생산설비로 간주한다. 먼저 고장실적 데이터는 5분 이상 정지한 설비고장 중 생산설비에 대하여 직접적으로 영향을 미치는 생산휴지와 감산휴지를 분석대상으로 고려한다. 본 열연공장의 경우 준공월인 '92년 7월 이후의 데이터 중 초창기 고장을 제외한 설비가 안정화된 이후의 고장실적을 대상으로 하여 '95년도 이후의 6년간의 고장실적을 선정하였다. 여기서 운전자 과실에 의한 고장과 계획수리 직후 2일 이내에 발생된 고장은 수리불량에 따른 경우가 많거나, 신품교체에 의한 초기고장일 경우가 많으므로 분석에서 제외한다. 2절에서 언급한 바와 같이 중, 대수리를 설비의 교체시점으로 간주하여 고장데이터를 집계하였다.

다음은 계획수리 실적데이터로 열연공장의 경우 생산설비와 기타설비의 수리작업을 위하여 수리공정을 관리하고 있으며 수리공정은 압연공정과 정정공정으로 구분된다. 정정라인과 같은 기타설비의 경우에는 생산과 무관하므로 압연공정의 수리일정과 무관하게 계획수리를 실시한다. 따라서 생산설비의 수리공정인 압연공정의 계획수리 실적만을 고려한다.

정비비 실적은 일반적으로 정비작업에 투입되는 직영인원의 인건비와 협력업체의 인원 및 자재사용에 대한 비용으로서 수선비, 그리고 정비작업에 투입된 직영자재비용인 재료비로 구성이 된다. 본 열연공장에서 생산설비에 투입된 계획수리비용의 경우 공장전체 수리비용의 81%를 차지하며 인건비가 15%, 수선비가 23%, 재료비가 43% 정도를 차지하고 있다. 계획수리비용에 속하는 회당 *PM* 비용 및 교체비용은 다음과 같이 산정되었다.

$$PM \text{ 비용 } (C_p) = 194{,}574\text{천원/회}$$
$$\text{교체비용 } (C_r) = 1{,}302{,}478\text{천원/회}$$

그리고 최소수리비용은 고장손실비용이라 할 수 있는데 고장유형별 내역은 <표 4>와 같으며 회당 비용은 결국 아래와 같이 산출된다.

$$\text{경고장 최소수리비용 } (C_1) = 46{,}114\text{천원/회}$$
$$\text{중고장 최소수리비용 } (C_2) = 151{,}835\text{천원/회}$$

5.3 유형별 고장률 추정 및 최적 교체주기 산출

4절에 제시된 방법으로 K제철소 열연공장의 생산설비 전체를 대상으로 경고장 및 중고장에 대하여 고장률의 관련 파라미터는 다음과 같이 추정되었다.

$$\text{경고장 : } \alpha_1 = 2.20468,\ \lambda_1 = 0.00165,\ r_1 = 1.0262$$
$$\text{중고장 : } \alpha_2 = 1.67998,\ \lambda_2 = 0.00477,\ r_2 = 1.001$$

참고로, 식 (5)의 검정을 위하여 최우추정량을 바탕으로 한 r_1 및 r_2에 대한 2시그마 신뢰구간을 구하면 각각 다음과 같다.

$$\text{경고장 : } 1.022 \le r_1 \le 1.031$$
$$\text{중고장 : } 1.000 \le r_2 \le 1.003$$

따라서 식 (5)의 귀무가설은 유의수준 약 5%에서 기각할 수 있으며 식 (3)의 고장률함수가 의미를 갖는다고 할 수 있겠다.

교체주기를 산출하기 위하여 식 (6) 과 (7)에 고장률 파라미터값과 비용데이터를 대입한 후 수치해석방법을 이용하여 *PM* 주기와 *PM* 횟수를 다음과 같이 산출하였다.

$$PM \text{ 주기 } (T) = 23.7\text{일}$$
$$PM \text{ 횟수 } (N) = 25\text{회}$$

따라서 적정 교체주기는 약 593일로 산정된다.

<그림 4>는 최적 PM 주기 및 PM 횟수를 중심으로 전후의 값(N=20, 25, 30; T=7, 8, ..., 35)에 대하여 평균비용의 변화를 나타낸 것이다. 이로부터 최적비용(21,173천원)의 105% 이내 (최대

표 4. 고장유형별 최소수리비용 (단위 : 천원)

고장유형	고장손실비용			계
	기회손실비용	평균제품손실	평균수리비용	
경고장	38,553	5,250	2,311	46,114
중고장	127,684	5,250	18,901	151,835

표 5. PM 주기별 정비비용 (단위 : 천원)

PM 주기	1주	2주	3주	4주
평균비용	37,981	24,011	21,321	21,445
연간비용	13,863,065	8,764,015	7,782,165	7,827,425

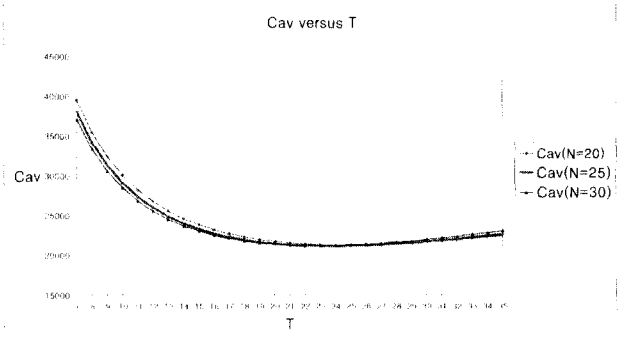

그림 4. N과 T값에 따른 평균비용의 변화.

5% 초과)에 속하는 PM 주기를 구해보면 N=20일 때 T=19 - 33, N=25일 때 T=18 - 32, N=30일 때에는 T=17 - 31이 되는데, N과 T값에 따라 크게 민감하지는 않다는 것을 알 수 있다.

위와 같이 최적의 *PM* 주기는 3주를 다소 넘는데, 이는 현행 사용하는 예방정비주기인 1주와는 상당한 차이를 보인다. 다음의 <표 5>에서는 *PM* 주기를 주 단위로 변경시키면서 평균정비비용 및 연간정비비용을 산출하였다. 현행 1주인 정비주기를 1주 연장하게 되면 연간 약 51억원의 비용이 절감되며 2주 연장시 61억원의 비용절감 효과가 나타난다.

현재의 계획수리 주기가 너무 짧게 나타난 것에 대해서는 다음과 같은 요인 또한 있을 것으로 판단된다. 첫째, 고장실적이 제대로 등록되지 않았을 가능성이다. 예를 들어 고장발생시 고장수리를 위한 계획수리실시로 고장실적은 존재하지 않으며 계획수리 실적만 일정이 변경되어 처리되는 경우, 또는 조업장애시간으로의 데이터 변경의 가능성을 들 수 있다. 둘째, 현재의 계획수리 주기에 가장 영향을 미치는 요인은 품질에 대한 영향을 들 수 있으며 특히 롤교체작업은 품질에 중대한 영향을 미치는 요인으로 계획휴지기간에 이루어지며 롤교체 주기에 따라 계획수리 주기도 영향을 받을 수밖에 없다.

6. 결 론

이상의 연구결과를 종합해 보면 고장유형을 고장손실비용에 따라 분류할 수 있다면 좀더 정확한 정비주기의 산출이 이루어질 수 있다. 물론 하나의 생산설비에 대하여 고장유형을 휴지시간 및 피해내용에 따라 분류하고 별도의 고장률을 산정하는 것이 다소 문제의 소지가 없지 않으나 고장유형에 따라 고장손실비용의 차이가 많기 때문에 정확한 정비주기의 산출을 위해서는 고장률을 구분하여 산정하는 것이 합리적이라 판단된다.

또한 적용대상이 된 열연공장 생산설비의 경우 현재의 계획수리 주기가 너무 짧게 선정되어 있어 주기의 연장이 필요하다 할 수 있다. 첫째, 현재의 계획수리 주기인 1주 이내에 고장발생 예상건수가 경고장 및 중고장을 합쳐도 1건이 되지 않는 상태이며 정비비용이 과다하게 지출되는 것으로 보아 고장방지를 위한 과잉정비의 소지가 많은 것으로 판단된다. 둘째, 이 열연공장의 경우 열연공장 중에서 마지막으로 준공된 공장으로 다른 열연공장에서 경험한 정비경험이나 많은 지식들을 토대로 정비품질이 많이 향상되었다고 보여지므로 계획수리 주기의 연장은 가능하다고 판단된다. 실제로 과거 실시한 계획수리작업의 주기를 보면 전체의 15% 정도가 8일 이상의 주기에서 실시한 적이 있기 때문에 당장 주 단위의 연장은 어렵더라도 일자별로 연장할 수가 있으리라 판단된다.

본 연구에서는 대상으로 하는 제철설비의 수명이 비교적 긴 편이나 상대적으로 짧은 수명을 갖는 설비의 경우 유한기간 모형의 고려도 흥미 있는 추후 주제라 하겠다.

참고문헌

박경수 (1978), *신뢰도공학 및 정비이론*, 탑출판사.

전치혁, 박광수, 황욱연, 주민보 (1998), "최소수리를 갖는 정기 정비정책 하에서의 고장률 추정 및 정비주기 산정 : K제철소 사례", *대한설비관리학회지*, 3(1), pp.217-228.

Barlow, R. E., F. Proschan and L. C. Hunter (1965), *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley & Sons.

Bunday, B, D. (1991), *Statistical Methods in Reliability Theory and Practice*, Ellis Horwood.

Nakagawa, T. (1986), "Periodic and Sequential Preventive Maintenance Policies", *Journal of Applied Probability*, 23, 536-542.

Nakagawa, T. and M. Kowada (1983), "Analysis of a System with Minimal Repair and Its Application to Replacement Policy", *European Journal of Operational Research*, 12, 176-182.

Tilquin, C. and R. Cleroux (1975), Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure and Adjustment Costs, *Naval Research Logistics Quarterly*, 22, 243-254.

송홍준
동국대학교 전자공학과 학사
포항공과대학교 철강대학원 석사
현재: POSCO 광양제철소 설비기술부
관심분야: 설비관리시스템 개발 및 운영

전치혁
서울대학교 자원공학과 학사
KAIST 산업공학과 석사
미국 캘리포니아 대학(버클리) 산업공학과 박사
현재: 포항공과대학교 산업공학과 교수
관심분야: 신뢰도, 확률/통계모형, 데이터마이닝기법