

예방정비 체제하에서의 공정별 고장시간 간격분석

김창현* · 김종한*

Chang-Hyun Kim* and Jong-Han Kim*

Abstract

Many authors derived MTTF/MTBF for an operating system by analyzing its actual life time data. However, it is difficult to derive MTTF/MTBF when few breakdowns occur throughout a year.

In this paper, we address a new approach to solve that problem under a preventive maintenance policy, in which few breakdowns occur, and also introduce a case study using the results obtained.

1. 서 론

신뢰도 공학분야에서의 MTTF(Mean Time To Failure), MTBF(Mean Time Between Failure) 분석은 가동중인 설비의 수명 및 신뢰도의 척도로서 대상설비의 최적 교체정책이나 최적 부품 발주정책을 수립하는 데 활용될 뿐만 아니라 신제품 개발단계에서의 제품설계 특성에 따른 신뢰도 분석 등 여러 방면에서 폭넓게 활용되고 있다[2]. 다만, MTTF와 MTBF의 용어상의 차이는 분석대상 설비가 수리 가능한 것이냐, 그렇지 않은 것이냐에 따라 달리 쓰이고 있다.

일반적으로 이들 MTTF와 MTBF 분석의 대부분은 설비의 가동 이력을 바탕으로 한 실제 가동 수명 Data를 분석대상으로 하는 것으로 다시 말하면, 사후 정비의 실적 Data를 대상으로 하고 있다

[3]. 그러나, 석유화학, 자동차, 철강과 같은 설비의존형 장치산업에서는 대부분의 정비작업들이 예방정비 형태로 사전에 이루어지고 있는데 이러한 예방정비 체제는 가공공정이 연속흐름 라인일수록 그리고, 생산활동의 중단을 초래하는 고장이 발생했을 경우 고장으로 인한 파급손실이 클수록 예방정비의 비율이 높아지게 된다. 또한, 이와같은 예방정비 체제하에서는 고장발생이 공장 전체적으로 1년에 불과 수 건 밖에 되지 않기 때문에 다 부품으로 이루어지는 복합설비에 대한 실제 수명 Data를 수집한다는 것은 사실상 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 대부분의 MTTF, MTBF 분석이 실 가동수명 Data를 중심으로 분석되는 것과는 시각을 달리하여 다른 각도에서 MTBF를 추출한 후 그 결과를 현장 적용하여 본 응용사례를 소개하고자 한다. 본 연구에서는 정비작업 내용을

바탕으로 설비에서 발생될 수 있는 고장유형을 구분하고 이 고장유형에 따른 고장 정의를 이용하여 MTBF 분석을 실시하였다. 그리고, 이 결과로 현재 P사에서 3주에 한번씩 이루어지고 있는 정기적인 수리 주기(정기수리 주기)에 대한 적정성 및 공정별 신뢰도에 대해 살펴보았다.

2. P사의 정비현황

본 연구는 우리나라 대표적인 장치산업인 P사의 W 공장을 대상으로 하였는데 P사의 정비체제는 사후정비가 아닌 예방정비 체제로서 대부분의 정비작업들이 사전 정비작업 형태로 진행되고 있다. 이에 따라 P사 각 공장의 설비들에 대해서는 개개의 설비특성을 고려한 수리주기 및 점검주기가 정하여져 이들 주기에 따라 정비작업이 수행되고 있으며, 이들 수리 및 점검주기는 조업 및 정비활동의 과거 경험으로부터 얻은 결과나 실적을 토대로 하여 결정되어져 왔다.

현재 P사의 정비작업은 작업수행 시점으로 보아 크게 대수리, 정기수리, 소수리, 돌발수리와 기타 4가지 등 총 8개 종류의 작업으로 구분할 수 있는데(용어해설 참조), 이 중 생산활동의 중단을 초래하는 돌발수리는 1.3%에 불과하며(투입공수 기준) 총체적으로 사후정비로 구분되는 것은 7.4% 정도로 예방정비 비율이 아주 높은 편이다.

이러한 P사의 예방정비 활동을 정비방식에 따라 구분할 경우 상태기준에 의한 방식과 시간기준에 의한 방식 등 크게 2가지로 나눌 수 있다. 상태기준에 의한 방식은 설비상태를 항상 Monitoring 하다가 설비상태가 어느 임계점에 도달했을 때 정비작업을 하는 방식이며, 시간기준에 의한 방식은 일정 주기마다 공장의 가동을 멈춘 후에 일정시간 동안 정비작업을 하는 방식이다. 여기서 시간기준에 의한 일정 주기를 정기수리 주기라고 하는데 P사에서는 이 정기수리 주기를 '86년도 상반기에 2주에서 3주로 연장한 적이 있으며 현재는 대부분의

공장이 3주마다 한번씩 주기적으로 정비작업을 수행하고 있다.

이러한 배경하에서 본 연구는 현행 3주의 정기수리 주기에 대한 적정성 및 연장 가능성에 대한 타당성 검토를 주 내용으로 전개하게 되었다.

3. 분석 절차

3-1. 분석대상

P사 W 공장에서 과거 1년 동안 발행된 정비작업표 중 기종이 기계 및 전기에 해당되는 것만 대상으로 기계 876매, 전기 969매 등 총 1,845매를 양식 그대로 복사하여 다음에 언급할 고장 발생유형에 따라 고장 발생유형을 직접 복사된 정비작업 표상에 표기할 수 있도록 하였다.

3-2. 고장 발생유형의 구분

P사의 정비작업은 거의 대부분이 사전정비 작업 형태인 예방정비로 이루어지고 있다. 이에 따라 설비가동 중에 발생될 수 있는 고장의 유형을 유추하기 위해서 해당 설비에 대해 행해지는 정비작업의 성격을 파악해 보았다. 본 연구에서는 이들 정비작업의 성격을 크게 두가지로 나누어 하나는 정비작업 대상 설비에 대한 수리 및 교체성 작업으로, 다른 하나는 기기 가동상태를 확인하는 점검성 작업으로 구분하였다. 또한, 수리 및 교체성 작업도 좀 더 세분화하여 사후정비가 아닌 사전정비 차원에서 "해당 작업이 만약 작업을 수행한 시점에서 수행되지 않았다고 가정해 볼 때" 그 시점에서의 설비운영 상태라든가 수행된 정비작업의 내용 및 결과로 보아 표 1과 같이 구분하였다. 여기에서 고장이라 함은 현행 설비관리 코드체계인 부품-공장-공정-기계장치-기종-단위장치-기기 하에서 정비작업의 대상이 되는 설비의 기계장치나 단위장치 또는 기기가 제 기능을 상실한 경우로 정의하였다.

표 1. 고장발생 유형 구분

수리 및 교체성 작업으로서 당 정비작업이 수행 되지 않았을 경우	다음 계획수리 때까지 고장이 나지 않을 것임	기기상태 양호 예상	품질 무관	A1	
			품질불량 예상	A2	
		기기상태 불량 예상	품질 무관	B1	
			품질불량 예상	B2	
	다음 계획수리 전에 고장예상	해당 공정의 생산휴지 초래			C
		해당 공정의 감산휴지 초래			D
해당 공정의 생산(감산) 휴지와는 무관			E		
점검성 작업	일반 주기적 검사로써 기기상태 확인 차원			F	
	정밀 검사작업			G	

이때, 정비대상 설비가 고장으로 분류될 경우 고장난 기계(단위) 장치가 속하는 공정이 생산활동을 할 수 있느냐 없느냐에 따라 해당 공정의 고장발생 유·무를 가름하였다. 본 연구에서는 해당 공정의 생산휴지나 감산휴지를 초래하는 고장유형 'C'와 'D'를 공정의 고장으로 정의하였다.

위와 같이 구분된 고장발생 유형에 따라 앞서 준비된 1,845대의 정비작업표를 10년이상의 근무 경력을 지닌 현장 정비작업원들과 일일이 검토하여 고장발생 유형에 따라 분류하였다.

3-3. 기본 가정 및 분석내용

본 분석에서의 기본 가정은 다음과 같다.

- 기본 가정 : 예방정비 작업이 수행된 시점과 실제 고장이 발생된 시점간에 존재하는 Time Lag는 일정하다.

위 내용은 분석대상의 설비가 언제 고장이 날 것이냐 하는 관점에서 본다면 예방정비 작업이 수행된 시점과 실제 고장이 발생된 시점간에 Time Lag가 존재한다. 그러나, 실제 상황에서는 이 Time Lag가 랜덤하게 발생되었지만 그 변화 폭이 적으

리라 가정하면 Time Lag가 일정하다고 생각할 수 있다. 이 경우 실제 고장난 시점은 예방정비 작업이 수행된 시점에서 일정시간 만큼 Shift된 상태이므로 위 기본 가정하에서는 예방정비 작업이 수행된 시점을 기준으로 MTBF 분석을 하여도 실제 고장이 발생된 시점을 기준으로 한 것과 동일하게 된다.

분석내용은 기본 가정하에서 앞서 분류된 고장 발생 유형중 공정의 생산휴지 및 감산휴지를 초래하는 고장 유형 'C'와 'D'만을 대상으로 하여 기종별(기계, 전기), 공정별(9개 공정), 수리시기별(소수리, 대수리 및 정기수리)로 작업개시 일자를 기준으로 날짜순으로 나열한 후 고장이 발생하는 시간간격을 파악하였다.

그리고, 기종에 따라 몇개 공정에 대해 소수리 발생시간 간격 Pattern을 조사하였으며 대수리 및 정기수리를 동일성격으로 보고 이들 대수리 및 정기수리의 시간간격 Pattern을 조사하여 각 공정의 평균 고장시간 간격과 P사 W 공장 전체의 평균 고장시간 간격을 구하였다. 또한, 각 공정의 소수리 발생시간 간격 Pattern으로 해당 공정의 주기를 늘릴 수 있는 가능성을 정비이론(Reliability Theory)에서 말하는 신뢰도로 제시하였다.

4. 분석결과

4-1. 정비작업표 통계

표 2는 기종별, 고장발생 유형별 정비작업 건수를 보여주고 있는데 전체적으로 고장유형 구분에 따른 정비작업표 발행건수는 기계, 전기별로 거의 비슷하게 발생되고 있고, 현행 예방정비 체제에서 제때에 정비작업을 하지 않았을 경우 총 작업건수 중 약 17%가 돌발고장으로 인해 공정이 멈출 가능성이 있는 작업임을 나타내고 있다.

4-2. 공정별 고장시간 간격 분석

표 3은 기본 가정하에서 W 공장 공정 3의 정기수리 또는 대수리 작업 개시일자를 기준으로 하여

이들의 고장시간 간격을 도출한 뒤 평균 고장시간 간격을 산출한 예인데 이 예에서의 평균 고장시간 간격은 74일로 나타났다.

그리고, 정기(대)수리 직후의 소수리 고장시간 간격을 살펴보기 위해 그림 1과 같이 구분하여 이들의 고장시간 간격의 Pattern에 대해서 살펴보았다.

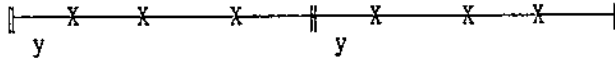
이상의 방법에 의한 공정별, 정기(대)수리의 평균 고장시간 간격 분석결과는 표 4에 제시되었는데 대수리·정기수리 평균 고장시간 간격일을 보면 전기부문은 평균 고장시간 간격이 대체로 5주 이상이 되어 정기수리 주기의 연장 가능성이 엿보이나 기계부문은 공정 2와 공정 5가 현행 주기와 비슷하게 도출되었다. 이와 병행하여 정기(대)수리 직후의 소수리 발생 간격 Pattern을 조사한 결과 기계부문의 공정 5가 Shape parameter 1.374, Scale

표 2. 기종별, 고장발생 유형별 정비작업 건수

고장유형 구분	기 계	비 율 (%)	전 기	비 율 (%)	계	비 율 (%)
A1, A2	2	0.2	53	5.5	55	3.0
B1, B2	151	17.2	142	14.7	293	15.9
C, D	155	17.7	162	16.7	317	17.2
E	507	57.9	512	52.8	1,019	55.2
F, G	61	7.0	100	10.3	161	8.7
계	876	100.0	969	100.0	1,845	100.0

표 3. W 공장 공정 3의 정기수리 및 대수리 실적

년도	작업번호	작업개시일자	시간간격	고장발생유형
87	81	871117	-	C
88	59	880121	65	C
88	181	880209	19	C
88	375	880322	42	C
88	998	880908	170	C



- || : 정기수리 및 대수리 작업 시점
- X : 소수리 작업 시점
- y : 정기수리 및 대수리 직후의 소수리 작업시간 간격

그림 1. 정기수리 직후의 소수리 고장시간 간격

표 4. 공정별 정기(대)수리의 평균 고장시간 간격

(단위: 일)

공정	1	2	3	4	5	7	9
기계	98	22.1	74	43	24	81	35
전기	-	36.8	-	68.5	49.6	-	-

parameter 0.202, 평균이 6.80일인 Gamma 분포를 하고 있고, 전기부문 공정 2의 경우 소수리 발생 Pattern이 Shape parameter 1.776, Scale parameter 0.291, 평균 6.10인 Gamma 분포를 하고 있어서 이들 두 공정의 소수리 발생 Pattern이 고장을 증가형으로 나타냈다. 그런데, 가동중인 설비의 열화상태가 시간이 지남에 따라 증가하는 고장을 증가형의 설비는 설비휴지를 수반하는 정기적인 수리를 할 경우 이에 의해 설비 열화상태가 0 Level로 복귀하며, 이 사이 시행되는 수리는 “Minimal repair”로 불리는 정비작업으로서 이 작업이 끝난 후의 설비 열화상태는 정비작업 직전의 설비 열화상태 그대로를 유지하는 것으로 알려져 있다.

P사의 정기(대)수리 및 소수리 작업들간의 관계를 살펴보면 이와 동일하다고 간주할 수 있으므로 다음과 같은 가정하에서 Barlow & Proschan[1], Nakagawa & Kowada[4]의 연구결과를 적용하면 소수리 작업들의 발생 Process와 특정 시간까지 소수리 작업이 발생하지 않을 신뢰도를 구할 수 있다.

- 가정 1 : 가동중인 설비의 열화상태는 시간 T의 함수로서 시간이 지남에 따라 증가한다.

- 가정 2 : 가정 1에서의 조업활동으로 증가된 설비 열화상태가 다시 0 Level로 복귀하기 위해서는 반드시 설비휴지를 수반하는 정기수리나 대수리 과정을 거쳐야만 이루어질 수 있다.
- 가정 3 : 소수리 작업은 정기(대)수리 작업기간 이외에 평상시 수행하는 정비작업으로서 이 작업이 끝난 후의 설비 열화상태는 소수리 작업 직전의 설비 열화상태 그대로 유지한다.

가정 1의 내용은 앞에서 살펴본 바와 같이 소수리간 고장발생 Pattern이 시간이 지남에 따라 고장발생 가능성이 높아지는 고장을 증가형임을 나타내는 내용으로서 설비 열화상태를 시간에 따른 증가함수로 보았다. 가정 2는 정기수리가 끝난 후의 기계 열화상태는 0 Level에서 시작하여 시간이 지남에 따라 증가하다가 다음번 정기수리 때 다시 0 Level로 떨어진다라는 내용이며, 가정 3은 소수리 작업의 특성상 정기(대)수리 작업시기 사이에서 수행되는 정비작업은 정비작업 결과 설비의 열화상태나 설비의 고장에 하등의 영향을 미치지 못하는 것을 반영한 것이다.

위의 내용을 종합하여 나타낸 것이 그림 2에 나타나 있는데 이는 설비의 물리적 열화도가 시간

(T)에 비례하여 증가하다가 정기수리 과정을 통해 그 전 상태를 유지한다는 것으로 이렇게 되면 매 정기수리 시점은 이러한 Cycle이 반복되는 Regenerative point가 된다. 그리고, 매 Cycle마다 정기(대)수리 직후에 처음 발생하는 소수리들은 그 발생 Pattern이 서로 독립적으로 발생하며, 매 Cycle내에서 발생하는 소수리는 시간이 지남에 따라 설비 열화도에 비례하여 소수리 발생 갯수가 많아지게 된다.



그림 2. 정기수리 수행에 따른 기계 열화도

위와 같은 가정하에서 소수리 작업들의 발생은 식(1)과 같이 Mean value function $R(t)$ 를 갖는 Nonhomogeneous Poisson process인 것으로 알려져 있다[4]. 이에 따라 현행 정기수리 주기가 3주에서 4주로 1주일 연장되었을 경우 1주일 이내에 이러한 type C, D의 소수리가 발생하지 않을 신뢰도는 확률 $\Pr\{N(4주) - N(3주) = 0\}$ 이 되는데 식(2)와 같이 주어지게 된다[5].

$$\Pr\{N(t) = n\} = \frac{[R(t)]^n}{n!} \text{Exp}[-R(t)] \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

where $N(t) : (0, t]$ 에서의 Minimal Repair 갯수

$$R(t) = \int_0^t r(u) du$$

$r(.)$: hazard function

$$\Pr\{[N(4주) - N(3주)] = 0\} = \text{Exp}[R(3주) - R(4주)] \quad (2)$$

이들을 구한 결과 공정 5(기계)의 1주일 이내에

이러한 type C, D의 소수리가 발생하지 않을 신뢰도가 0.26, 공정 2(전기)가 0.16인 것으로 나타났다. 그런데 이처럼 신뢰도가 낮게 나타났지만 실제 돌발사고로 이어질 가능성은 실적자료를 이용하여 공정 2 및 공정 5의 기계, 전기부문 모두 고려하였을 때 돌발확률이 10% 미만인 것으로 나타났다.

4-3. 정기수리 주기 연장시의 경제성 분석

본 절에서는 앞에서의 통계적인 분석결과를 바탕으로 하여 정기수리 주기가 연장되었을 경우의 이익과 손실을 다음의 요소에 의해 1988년도 정비 작업 실적자료를 이용하여 손익계산을 하여 보았다.

• 비용절감 요소

- 정기수리 횟수의 감소에 따른 정기수리 비용절감
- 정기수리 횟수의 감소에 따른 공장 가동률 증가

• 비용발생 요소

- 돌발사고의 증가로 인한 생산손실액의 부담가중
- 소수리 작업의 발생증가로 인한 정비비용 증가

이 가운데 비용 절감액은 요소별로 P사의 추정치를 이용하였다. 그리고, 비용 발생부분의 예상 돌발사고 추정은 type C, D 소수리의 발생횟수를 먼저 추정후 실적자료를 이용하여 실제 돌발사고 횟수를 추정하였다.

1) Type C, D 소수리 발생 예상 횟수

정기수리 주기를 현재보다 늘리게 되면 연장되는 기간이 길면 길어질수록 정기수리 주기 변경전 보다는 돌발사고가 발생될 확률이 높아질 뿐만 아니라 돌발사고로 인한 생산(감산)휴지 횟수도 그에 따라

표 5. 공정 5의 주기연장에 따른 type C, D의 소수리 발생 평균 갯수

기 종	기 계 (공정 5)			전 기 (공정 2)		
E(21)	3.52개			4.51개		
연장기간	1주	2주	3주	1주	2주	3주
기대갯수	1.34	2.73	4.39	1.84	3.77	6.42

표 6. 정기수리 주기 연장시의 비용 증감요소

항 목	1주 연장시	2주 연장시	3주 연장시
1. 절감요소			
1) 공장가동율 증가	4회 40시간	6.6회 66시간	8.3회 83시간
2) 정기수리 절감횟수	4회	6.6회	8.3회
2. 비용증가요소			
1) 소수리 증가	119건	267건	450건
2) 돌발사고 예상건수	8건	26건	59건

많아지게 된다.

앞의 기본 가정과 가정 1, 2, 3하에서 소수리 발생이 그와 같은 Mechanism을 따를 때 type C, D 소수리 발생 갯수는 소수리 발생 시간간격에 대한 확률밀도 함수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[T] = \int_0^T r(t) dt$$

$$= -\ln F(T)$$

E[T]: T시간까지의 소수리 발생갯수

r(.) : 소수리 발생 고장율 함수

F(.) : 소수리 발생의 분포함수(Distribution function)

f(.) : 소수리 발생 시간간격의 확률밀도 함수

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (F(t) = 1 - F(t))$$

$$r(t) = f(t) / F(t)$$

위 식을 이용하면 정기수리 주기가 4주 이상으로

연장되었을 때 연장된 기간 동안 발생하는 type C, D의 소수리 발생 갯수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta E = E[t+s] - E[t]$$

▲E: (t+s)와 t시간 사이의 소수리 발생갯수

예를들면, 정기수리가 4주일 경우 연장된 1주동안 발생될 type C, D의 소수리 갯수는

$$E(28) - E(21) \text{이 된다.}$$

이렇게 하여 공정 5의 기계부문과 공정 2의 전기부문에서 정기수리 주기가 1, 2, 3주 더 연장되었을 경우에 type C, D의 소수리가 발생될 평균 갯수는 표 5와 같다.

2) 소수리 작업의 발생증가로 인한 부담 비용
 정기수리 주기가 연장되면 연장된 만큼 설비의 열화가 진행되어 설비의 순간 고장율도 높아지게 된다. 이에 따라 정기수리 기간이 연장이 되면 설비의 열화가 더 이상 진행되지 않도록 하거나 진

행이 되더라도 최소한으로 줄이도록 하는 노력이 필요한데 이러한 차원에서 정기수리 주기 연장에 따른 소수리 작업이 증가할 것으로 예상된다. 예상 소수리 작업건수는 type C, D 소수리가 돌발로 이어질 가능성에 비례하여 증가한다고 보아 다음과 같이 추정하였다.

예상 소수리 작업건수 = 연간 발생된 일반 소수리 건수 × (연장시 돌발 발생율 - 3주 때의 돌발 발생율)

표 6은 정기수리 주기 연장시의 비용증감 요소를 나타낸 것으로서 돌발사고 예상건수는 1)에서 구한 type C, D의 소수리들이 정기수리 주기가 연장됨에 따라 돌발사고로 이어질 돌발사고 가능성을 현행 3주 체제에서의 과거 실적을 이용하여 구하였다. 그리고, 이들 결과에 의해 손익분석을 하여 금액으로 환산한 결과 정기수리 1주 연장시에는 W 공장 총 정비비의 3.53%에 해당하는 연간 기대이익이 예상되며, 2주 연장시에는 0.92%에 해당하는 연간 기대이익이 예상된다.

5. 결 론

이상의 결과를 종합해 보면 크게 다음의 2가지 측면에서 P사 W 공장의 현행 정기수리 주기를 연장시킬 수 있다고 판단된다.

첫째, 현행 예방정지 체제하에서 각 공정별 정기수리 및 대수리의 평균 고장시간 간격이 2개 공정을 제외하고는 대체로 3주 이상으로 나타났으며, 이들 최단 평균 고장시간 간격을 가진 공정에 대해 소수리 발생 Pattern을 조사하여 실제 공정의 생산(감산) 휴지를 초래할 돌발사고가 1주일 이내에 발생될 확률을 추정한 결과 크게 잡아도 10% 미만으로 돌발사고 발생이 비교적 적을 것으로 예상된다.

둘째, 경제적인 측면에서도 공장 가동율의 증가에 따른 제품생산의 기대이익이 돌발고장으로 인한

기대손실보다 더 크기 때문에 정기수리 주기연장에 대한 가능성은 충분히 있다고 생각된다.

용 어 해 설

1. 대수리: 연차 생산계획 및 가동계획에 의거 설비의 열화복구 및 성능보전을 위해 공장별로 1년에 1번 정도 15-30일간 실시되는 수리작업
2. 정기수리: 일정한 주기를 두어 공장 또는 설비단위로 계획적인 휴지하에 실시되는 수리작업
3. 소수리: 설비가동 중에 수리가 가능한 작업으로서 예방정비의 성격을 띠고 있음
4. 돌발수리: 가동중 또는 사용중에 돌발적으로 일어난 고장에 대해 실시하는 수리작업으로서 생산활동의 중지를 초래한다.

참고문헌

- [1] R.E. Barlow & F. Proschan, "Mathematical Theory of Reliability," Wiley, 1965.
- [2] C.V. Flores & R.M. Feldman, "A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems," Naval Research Logistics, Vol. 36, 1989, pp. 419-446.
- [3] J.F. Lawless, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data," John Wiley & Sons, 1982.
- [4] T. Nakagawa & M. Kowada, "Analysis of a System with Minimal Repair and Its Application to Replacement Policy," European Journal of Operational Research, Vol. 12, 1983, pp. 176-182.
- [5] S.M. Ross, "Introduction to Probability Models," Academic Press, 1980.