Delay-Time 모형을 적용한 신뢰성 기반 정비 시뮬레이션 시스템 개발

윤원영[1], 정일한[1], 고용석[2], 류기열[2]

Abstract

Delay-Time 모형은 고장의 발생 전에 먼저 결점이 일어나게 되고 결점이 일어난 이후 얼마간의 시간(delay-time)이 지나고 나서 고장이 발생하게 되는 모형이다. 이러한 과정에서 delay-time내에 검사를 하여 결점을 찾아내면 고장을 예방할 수 있다. 직·병렬과 우선순위를 고려한 대기구조를 갖는 시스템에서 정비정책을 지원하기 위한 시뮬레이션 시스템을 개발한다. 이러한 시뮬레이션 시스템은 신뢰성 기반 정비를 지원하고 Delay-Time모형을 적용하여 효과적인 검사 정책 수립과 예방정비, 정비원, 예비품등을 고려하여 다양한 환경에서 시스템을 평가하는데 적용할 수 있게 하였다.

1. 서론

현재의 시스템은 과거 20년 전의 시스템과 달리 시스템을 구성하고 있는 부품의 수와 장비의 수가 급격하게 증가하여 정비 활동에도 많은 변화가 왔다. 최근에 이러한 변화는 제품이 고장 났을 경우 단지 수리를 하는 정비 활동뿐만 아니라 정비 활동에서 공정의 안정화와 장비의 수명 증가, 더욱 좋은 품질의 제품, 더욱 낮은 정비 비용을 요구하고 있다.

신뢰도 기반 정비는 운용 조건에서 시스템의 신뢰성을 중심으로 각 장비들에 요구되는 기능을 유지할 수 있도록 예방정비계획을 세우는 과정으로 고 수준의 시스템 신뢰도, 공장 가용성, 그리고 안전을 유지하거나 향상시키는 것과 부품의 기능을 정비함으로 설비 가동률을 향상시키는 것을 목표로 한다. 그리고 현재의 예방 정비와 검사업무를 최적화, 정비 자원 사용을 최적화, 여분 부품과 정비원의 최적화를 목표로 하고 있으며, 비용 측면에서 보다 효과적인 예방정비를 제공하고 새로운 예방 정비 개발을 돕는다. 신뢰도 기반 정비는 설비생애 중 정비계획중심으로 부품에 대한 여러 가지 중요 고장모드별로 정비 방식을 결정하는 것으로 항공기, 원자력발전소, 선박 등 대형 시스템에 적용된다.

최근에는 RCM방법론을 적용한 시스템과 사례 연구가 많이 발표되고 있다. Philips[6]은 신뢰도 기반 정비을 적용하는데 있어서 비용을 감소시키기 위한 방법을 제시하였고, Pujadas등[7]은 신뢰도 기반 정비와 FMEA(failure mode and effective analysis)의 장점을 통합하기 위해 모듈화(system decomposition, system evaluation, failure analysis, logic tree analysis)된 접근을 하는 정비 결정 지원 시스템을 개발하여 실제 데이터를 이용한 예를 보여주고 있다. Abdul-nour등[3]은 각 기계의 신뢰성 데이터와 시스템 고장 결과, 수리시간, 부품의 치명도에 대한 데이터를 이용해서 중요 기계를 선택하고 최적 정비정책을 결정하는 방법론을 개발하였고, 알루미늄 공장에 적용한 예를 보여주었다. Righini등[8]은 시스템의 가용도, 신뢰도를 최대화하고 총 비용을 최소화하기 위한 정비 정책을 지원하

[1] 부산대학교 산업공학과
[2] 국방 과학 연구소

는 몬테칼로를 이용한 신뢰도기반정비 소프트웨어를 개발하였고, 소프트웨어의 개발에 필요한 정보를 분류하고 데이터베이스를 설계하였다. 또한 Beehler[4]은 전력운송 시스템에서 요구되는 고객에게 안전하고 신뢰성 있는 전력 운송과 시스템의 고장과 정비비용을 개선시키기 위해서 신뢰도 기반 정비을 적용하였고 Bowler등[5]은 신뢰도 기반 정비 적용시 발생하는 비용과 이익을 정의하고 전력운송 시스템에서의 사례를 나타내었다. 윤원영등[1,2]은 시스템의 구조가 계층적 구조를 갖는 직·병렬 시스템에 대해서 이산사건 시뮬레이션을 이용해서 분석을 하였고 더욱 확장된 모형으로 정비원과 예비품등 다양한 정비 정책을 고려한 시스템을 개발 하였다.
본 연구에서는 신뢰도 기반 정비를 지원하는 시뮬레이션의 로직과 시스템을 개발한다. 시뮬레이션 시스템에는 시스템의 수명에 의존하여 결점과 고장이 발생하는 Delay-Time 모형을 적용하여 시스템의 결점을 검사할 수 있는 검사 모듈이 포함하고 있으며 다양한 시스템의 구조를 표현하기 위해서 직·병렬, 우선순위를 갖는 대기구조를 고려한다. 검사가 수행되어 질 때 결점의 발견은 임의의 확률을 가지고 발견이 가능하고 Delay-Time모형의 적용은 적절한 검사 주기를 선정함으로써 시스템이 고장 나기 전에 수리를 행함으로써 시스템의 고장을 예방하고자 한다.

2. 대상 시스템과 Delay-Time 모형 시뮬레이션의 가정

분석하고자 하는 시스템은 계층 구조로 표현이 가능하고 시스템의 계층 구조는 상위 부품과 하위 부품 간의 논리적 계층 관계를 표현한다. 시스템의 구조는 시스템-블록-부품-기능-기능고장-고장모드의 순서로 분석을 하고 시스템의 구조와 설계를 현실 상황에 가깝고 시스템 분석을 용이하게 하기 위해서 블록과 부품의 단계는 여러 단계로 구성 할 수 있으며 블록과 부품 단계에서는 직렬, 병렬, 우선순위를 고려한 대기 구조를 가질 수 있다
시뮬레이션 시스템에서 필요한 전체 시뮬레이션을 구성하는 정비정책에 대한 기본이 되는 가정은 아래와 같다.

가정
1. 전체 시스템의 구조는 직·병렬, 대기구조로서 표현이 가능하다.
2. 부품의 defect 발생은 와이블 분포를 따르며, 분포의 모수는 알려져 있다.
3. 부품의 delay-time은 와이블 분포를 따르며, 분포의 모수는 알려져 있다.
4. 고장이 발생하면 즉시 발견 가능하며, 정비원이 가용시 즉시 수리가 가능하다.
5. 고장모드에 대하여 일정한 주기로 예방정비가 시행된다.
6. 고장모드의 수리 및 예방정비 후 부품의 수명감소는 수명감소인자의 비율에 의존한다.
7. 고장모드의 예방정비 동안에 부품은 고장상태가 된다.
8. 수리중인 부품에 도착하는 예방정비가 하나 이상일 경우에는 수명감소인자가 가장 큰 예방정비만 실시하며, 수리완료시점에서 예방정비가 시작된다.
9. 예방정비중인 부품에 다른 고장모드의 예방정비가 도착하더라도 실시하지 않는다.
10. 부품이 유휴한 동안에 부품수명은 그대로 유지된다.
11. 수리와 예방정비사건이 일어났을 때 정비원이 가용하지 못하면 해당 사건은 지연된

다.
12. 지연된 사건은 정비원이 가용할 때 다시 발생된다.
13. 정비원의 수는 한정되어져 있다.
14. 각 고장 모드는 수리나 예방 정비를 위한 정비원과 예비품이 정의되어져 있다.
15. 예비품의 수는 무한하며 예비품의 소요량과 비용을 예측하기 위해서 사용된다.
16. 검사 중 결점의 발견은 Detect Rate에 따라서 발견이 가능하다.
17. 검사 기간 동안 부품의 수명은 증가하지 않는다.
18. 검사 시점에 정비원이 가용하지 않을 경우 다음 검사 시점에 검사를 한다.

3. 사건 및 상태 정의

Delay-Time 모형에서는 검사와 관련된 사건과 결점의 발생과 수리와 관련된 사건이 추가되어 고장 모드의 상태는 사건과 관련해서 변화하게 된다. 검사 시작 사건은 고장 모드의 검사 주기에 의존해서 발생하게 되며 검사 시작이 도착한 경우 먼저 검사를 하는 정비원이 가용여부를 체크하고 정비원이 가용하지 않을 경우 현재 도착한 검사는 취소하게 된다. 정비원이 가용한 경우 고장 모드의 상태는 검사중이 되며 상위 단계의 상태는 고장 상태로 둔다. 검사 완료 사건은 검사 시작 사건이 도착한 후 일정한 시간이 흐른 후에 도착하며 고장 모드의 상태는 검사중에서 작동 상태로 변경되고 상위 단계의 상태도 변경되게 된다. 검사 기간중에 결점을 찾았을 경우 고장 모드의 상태는 검사 중에서 결점 수리 상태로 변경된다.

고장 모드의 상태
1. 고장 : 고장 사건이 발생했을 경우 고장 모드는 고장 상태가 된다.
2. 유휴 : 상위 단계가 고장 상태가 되어서 하위 단계인 고장 모드가 작동하지 못할 때 유휴상태가 되고 유휴상태에서는 수명이 증가하지 않는다.
3. 작동 : 상위 단계가 작동하고 있고 정상적인 상태이거나 고장모드의 수리완료나 예방정비 완료 사건이 발생했을 경우 작동 상태가 된다.
4. 예방 정비 : 고장 모드에 주기적으로 예방 정비가 행해지고 예방정비 사건이 도착 했을 때 고장 모드는 예방 정비 상태가 된다.
5. 수리 대기 : 고장 사건이 발생했을 때 수리를 행할 정비원이 적정수 만큼 없을 때 고장 모드는 수리를 대기 하게 된다.
6. 예방 정비 대기 : 예방 정비 사건이 발생 했을 때 예방 정비를 행할 정비원이 적정수 만큼 없을 때 고장 모드는 예방 정비를 대기 하게 된다.
7. 대기 : 상위 부품의 상태가 시스템의 구조(대기구조)에 따라서 대기 상태에 있게 된다. 이때 대기 구조는 같은 단계에 있는 부품간에 우선 순위가 주어지고 우선 순위가 낮은 부품은 대기 상태에 있게 된다. 또한, 대기 구조를 가진 부품이 작동중이다가 고장이 발생했을 경우 대기 부품 중 우선순위가 가장 높은 부품이 작동으로 전환되게 된다.
8. 검사 중 : 고장 모드에 주기적으로 발생하는 검사가 도착하여 검사가 가용한 경우 고장 모드의 상태는 검사중
9. 결점 수리 : 검사 중 상태에서 고장모드의 결점을 발견한 경우 고장모드의 상태는 결점 수리 상태

10. 결점 수리 대기 : 고장 모드의 결점을 수리를 하는 정비원이 가용하지 못한 경우 고장 모드는 결점 수리 대기

고장모드 상위 단계의 상태

1. 고장 : 하위 단계가 고장 났을 경우와 고장모드에서 예방 정비를 하고 있을 때 구조에 따라서(직렬인 경우는 한 개가 고장나면 고장, 병렬인 경우 모두 고장이면 고장, 대기인 경우 대기 부품이 없으면 고장) 고장 상태가 된다.
2. 유휴 : 상위 단계가 고장 상태가 되어서 하위 단계가 작동하지 못할 때 유휴상태가 된다.
3. 작동 : 해당 단계의 블록, 부품, 기능등이 정상적으로 작동하고 있을 때 작동 상태에 있게되고 고장모드에서 수리완료나 예방정비 완료가 발생했을 경우 구조적으로 작동상태가 된다.
4. 대기 : 상위 부품의 상태가 시스템의 구조(대기구조)에 따라서 대기 상태에 있게 된다.

4. 사건에 따른 다른 사건 도착의 변화

Delay-Time 모형에서는 윤원영외[1,2]에서 다룬 일반 모형과 달리 고장이 발생하기 전에 먼저 결점이 발생하게 된다. 따라서 모든 사건은 결점의 발생과 관련해서 다루어진다.

검사 도착 관련 변경 사항

검사가 도착하면 먼저 정비원의 가용여부를 체크하고 다음 검사 도착 시간을 선정하게 된다. 정비원이 가용한 경우 검사가 시작 되고 해당 고장 모드의 상태를 검사중으로 변경한다. 해당 고장 모드의 상태 변경은 상위 단계의 상태 변경과 전체 시스템의 상태 변경으로 대기 상태로 변경된 부품의 사건은 모두 무한대로 설정한다. 검사의 시작 시점에서는 검사 완료 도착 사건 시점을 발생 시킨다. 검사 기간 동안에 도착하는 사건들은 다음과 같이 변경된다.

1. 결점 발생 : 검사 기간 동안에 도착하는 결점 발생 사건은 해당 고장 모드의 작동이 멈추어 있으므로 발생 예정 시점에서 검사 기간을 더한 시점에 결점을 발생 시킨다.
2. 예방 정비 발생 : 검사 기간 동안은 해당 고장 모드의 작동이 멈추어 있고 검사 기간 동안에는 예방 정비가 발생할 수 없다. 따라서 예방 정비 도착 시점은 도착 예정 시점에서 검사 기간을 더한 시점에 발생 시킨다.
3. 다음 검사 시점 : 다음 검사 시점이 검사 완료 시점보다 작다면 검사 완료 시점에서 검사 주기를 더한 시점에 발생 시킨다.
4. 결점 수리 완료 : 검사 기간중에 아래의 결점 존재 조건을 만족하면 일정한 확률(P)로 결점을 발견하여 결점을 발견을 한 경우 결점 수리 완료 시점은 검사 시작 시점에서 결점 수리 기간을 더한 시점에 발생된다.

◆검사 기간 동안에 결점 존재 조건

검사 완료 시점 > 고장 도착 시점 and 고장 발생 시점 > 현재 시점

또는 결점 발생 시점 < 현재 시점

5. 고장 도착 : (1-P)의 확률로 결점을 발견하지 못했을 경우 검사 기간 동안에는 수명의 증감이 없으므로 고장 시점은 고장 도착 시점에 검사 기간을 더한 시점에 고장이 도착하게 된다.

검사 완료 관련 사항
검사와 관련되어서 도착하는 사건들은 대부분이 검사 도착 사건에서 다루고 검사 완료 시점에서는 다음 검사 완료 시점과 예방 정비 완료 시점을 무한대로 설정하고, 검사가 완료됨으로써 해당 고장 모드의 상태는 작동 상태로 변경되고 상위 단계의 상태도 변경된다. 상위 단계의 상태의 변경으로 인한 대기 상태로 변경된 고장 모드의 사건은 무한대로 설정한다.

검사기간 중 결점을 찾은 경우 관련 사항
검사 기간 중 결점을 찾은 경우에는 결점의 수리가 도착 되어 진다. 이때 예방 정비가 대기 중이고 결점 수리의 수명 감소 인자가 예방 정비의 수명 감소 인자 보다 클 때에는 결점의 수리가 시작 되어지고 예방 정비의 수명 감소인자가 큰 경우에는 결점 수리는 취소되어 진다. 결점의 수리가 시작 되면 결점 수리 완료 시점을 설정하고 결점의 수리 기간동안에 도착하는 고장 도착 사건 시점은 무한대로 설정한다. 또한, 결점 수리 기간 중에 도착하는 예방 정비는 검사 기간동안은 해당 고장모드의 작동이 멈추어 있으므로 예방 정비 발생예정시점에서 검사기간을 더한 시점에 예방정비 시점을 발생시킨다.

결점 수리 완료
결점이 수리가 완료되면 고장 모드의 상태를 작동으로, 전체 시스템의 상태를 변경하게 된다. 전체 시스템의 상태 변경으로 인한 대기 상태로 설정된 고장 모드의 사건 도착은 모두 무한대로 설정된다. 결점이 수리 완료가 되면 다음 결점 시점 설정하고 예방 정비 완료 시간을 무한대로 설정한다.

예방정비 시작과 완료
예방정비 기간 동안에는 수명의 증감이 없으며, 시스템이 멈춰 있는 상태가 된다. 따라서 결점이 발생할 수 없으며 예방 정비 기간 동안에 도착하는 결점은 예장 정비가 완료되는 시점에서 다시 발생 시킨다.

수리 완료
고장 모드에 고장이 도착한 이후에 수리가 완료 되면 다음 결점 도착 시점을 발생 시키고 다음 고장 시점은 결점이 도착한 이후에 도착하므로 무한대로 둔다. 또한 고장이 도착하면 수리 기간 동안에 도착하는 검사는 취소가 되므로 다음 검사 시점을 발생시키게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 대규모 시스템의 신뢰도/가용도 분석을 위해 기능을 중심으로 하여 시스템의 구조를 분류하고 시스템의 고장을 일으키는 고장원인을 규명하여 이에 대한 수리 및 예방정비를 실시함으로써 해결이 가능하도록 하는 정비 절차인 신뢰도 기반 정비(Reliability Centered Maintenance)를 지원하는 시스템을 개발하였다.

Delay-Time 모형을 적용하여 개발한 시뮬레이션 시스템은 현실에 적용이 가능하게 하기 위해서 시스템의 구조를 직렬, 병렬, 우선순위를 고려한 대기구조를 고려하였고 시스템 설계 변경을 위해서 중복 설계를 지원하며, 정비 정책 평가를 위해서 그룹 예방정비, 예방 정비, 정비원, 예비품, 검사 정책 등을 평가할 수 있게 하였다.

참고 문헌

1. 윤원영, 손성민, 김종운, 신뢰성 기반 정비를 위한 시뮬레이션 시스템 개발, IE Interfaces, Vol. 13, No. 3, pp.521-527, September 2000.
2. 윤원영, 정일한, 김종운, 신뢰성 기반 정비를 지원하는 시뮬레이션 시스템 구축에 관한 연구, 한국설비보전공학회지, Vol. 5, No. 1, 2000
3. Adul-nour, G., Beaudoin,. H, Ouellet, .P, Rochette,. R., Lambert, S., 'A Reliability Based Maintenance Policy; A CASE STUDY', *Computers and industrial Engineering* Vol.35, No. 3-4, pp.591-594, 1998
4. Beehler, M.E., 'Reliability Centered Maintenance for Transmission Systems', *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, April 1997
5. Bowler D.J., Primrose P.L. and Leonard R., 'Economic evaluation of reliability-centered maintenance(RCM): an electricity transmission industry perspective' *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, Vol. 142, No.1, January 1995
6. Phillips, L.B., 'Reliability-centered maintenance : benefit identification and cost reduction', Proceedings of the international power generation conference, Atlanta, GA, USA, *The American Society of Mechanical Engineers*, New York, Vol. NE-10, pp. 1-6, 1992
7. Pujadas, W., and Frank Chen, F., 'A Reliability Centered Maintenance Strategy for a discrete part manufacturing facility', *Computers and industrial Engineering* Vol.31, No. 1/2, pp.241-244, 1996
8. Righini, R, Bottazzi, A., Fichera, C., Papastathi, M., Perasso, L., 'A Database for Reliability Centered Maintenance Management', *Proceedings of the 4th international conference on probabilistic safety Assessment and management*, Vol 3, pp2151-2158