

재 제조시스템의 가용도 분석모델과 평가척도

Availability Model For The Remanufacturing System and Performance Index

백재원¹, 강해운^{1,✉}, 강창욱², 홍의표²
Jae Won Baik¹, Hae Woon Kang^{1,✉}, Chang Wook Kang² and Eui Pyo Hong²

¹ 한양대학교 산업공학과 (Department of Industrial Engineering, Hanyang Univ.)

² 한양대학교 정보경영공학과 (Department of Information and Industrial Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: kang4040@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-4069

Manuscript received: 2009.7.21 / Accepted: 2009.11.29

The remanufacturing system is a series of industrial process in which worn-out products are restored to like-new condition. The remanufacturing system is differ from the repair system not only process characteristics but also product characteristics. So, it is required to design another model for the remanufacturing system which is distinct from the repair system and also performance index is required for the remanufacturing system. Therefore, in this paper we suggest the availability model for remanufacturing system by using Markov Process. This model represents each of the states of the remanufacturing system. Also performance indexes of remanufacturing system are introduced. Performance indexes are consisting of part reuse frequency and time, part disposal frequency and time. As a result, we can have a choice and control the proper part and offer useful information during the remanufacturing by using these availability model and performance indexes.

Key Words: Remanufacturing System (재 제조시스템), Availability (가용도), Markov Process (마코프 과정)

기호설명

A : Availability

RF: Reuse Frequency

RT: Reuse Time

DF: Disuse Frequency

DT: Disuse Time

PI: Performance Index

Perfection part = {A, B, C, ...}

Abrasion part = {α, β, γ, ...}

Repair part = {a, b, c, ...}

Replacement part = {(a), (b), (c), ...}

λ_{rc} = Abrasion rate of part on abrasion state

λ_r = Failure rate of part on repair state

λ_c = Failure rate of part on replacement state

μ_{rc} = Readjustment rate of part on abrasion state

μ_r = Repair rate of part on repair state

μ_c = Replace rate of part on replacement state

1. 서론

재 제조시스템은 폐기된 제품을 회수하여 새 것과 같은 상태로 회복시키는 일련의 산업과정으로 일반적으로 크게 분해, 세척, 검사, 수리와 교체 및 재조정, 재조립의 다섯 가지 단계를 거치게 된다.⁹

재 제조시스템은 기존의 수리시스템과 비교하여 공정상의 차이점뿐 아니라 제품상의 차이점도 지니고 있다. 따라서 기존에 수리시스템과 차별화

된 재 제조시스템의 가용도 모델과 그 분석이 필수적이며, 그 성능을 평가하기 위한 척도 역시 필수적으로 요구된다.

현재까지 재 제조시스템의 신뢰도에 관한 연구로는 재 제조 시 기존의 부품이 고장률이 다른 부품으로 교체됨으로써 시스템에 수정이 가해지는 신뢰도 모델에 대한 연구와 폐기 부품에 대한 연구, 부품의 재사용성에 관한 연구 등이 이루어져 있는 상태이다.^{1-3,5,6,8,10} 하지만 현재까지 재 제조시스템의 가용도에 대한 연구는 이루어진 것이 없는 실정이다.

본 연구에서는 Markov Process⁷ 를 사용하여 재 제조시스템의 상태를 표현하고 재 제조시스템의 성능을 평가하기 위한 척도로서 부품의 재사용 빈도와 시간, 폐기 빈도와 시간, 부품 평가지수를 제시한다. 이를 통해 재 제조 시 부품에 대한 선별과 집중적인 관리가 가능하도록 하여 재 제조품에 대한 품질을 만족시키는 동시에 유용한 정보를 제공하여 준다.

2. 재 제조시스템의 가용도 모델링

본 논문에서는 이러한 재 제조시스템의 가용도 모델을 나타내기 위해 일반적인 수리시스템의 가용도 모델과는 달리 제품의 상태정의를 사용과 폐기로 재정의한다. 재 제조는 폐기된 상태의 고장난 제품뿐 아니라 일정한 마모상태의 제품도 포함하고 있으며 이러한 제품의 폐기 상태를 통하여 제품 또는 부품이 환경에 미치는 영향까지 고려할 수 있기 때문이다. 또한, 재 제조의 목적인 부품의 재사용성에 대한 판단도 용이하기 때문이다.

2.1 가정

① 폐기된 제품은 고장 또는 마모 상태이며 폐기 즉시 재 제조 되고 재 제조가 완료되는 즉시 사용 상태가 된다.

② 폐기된 제품은 직렬구조이며 계속적인 고장 또는 마모가 없다.

③ 부품들은 서로 독립적이며 동시에 고장 또는 마모가 없다.

④ 교체와 수리, 재조정은 부품을 신제품과 같은 상태로 만든다.

2.2 용어

① 재사용: 재 제조시스템 내에서 부품이 폐기 상태가 되어 교체되기 전까지 수리 혹은 재조정을 통하여 다시 사용하는 과정

② 부품: 해체 시 부품이 훼손되지 않는 상태까지 더 이상 분해할 수 없는 최소단위

③ 완전부품: 분해→세척→검사→재조립의 공정이 이루어지는 부품으로 재사용이 가능한 부품

④ 마모부품: 분해→세척→검사→재조정→재조립의 공정이 이루어지는 부품으로 재사용이 가능한 부품

⑤ 수리부품: 분해→세척→검사→수리→재조립의 공정이 이루어지는 부품으로 수리작업으로 재사용이 가능한 부품

⑥ 교체부품: 분해→세척→검사→교체→재조립의 공정이 이루어지는 부품으로 폐기되는 부품

2.3 단일 부품의 재 제조시스템의 가용도 모델

재 제조상태의 제품은 고장 또는 마모상태의 폐기 상태이고 폐기되자마자 재 제조되며 완료 즉시 사용상태가 된다고 가정하였으므로 시스템이 단일 부품일 경우를 고려하여보면 재 제조 제품의 상태의 정의는 Fig. 1 과 같이 구분하여 볼 수 있다.



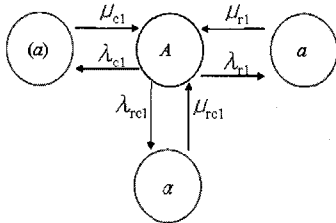
Fig. 1 Availability model for remanufacturing system

Fig. 1 의 제품 폐기상태는 다시 부품의 상태에 따라 마모부품, 수리부품, 교체부품으로 분리하여 표현할 수 있다. 이처럼 제품의 폐기 상태를 다시 부품의 상태에 따라 분류하는 이유는 재 제조의 목적인 부품의 재사용성을 평가하기 위함이다. 재 제조시스템은 일반적인 수리시스템과는 달리 제품의 동작뿐만 아니라 부품의 재사용성에도 관심을 갖는다. 또한 각각의 폐기되는 부품을 파악함으로써 각 부품의 폐기 정도와 환경에 미치는 영향도 평가할 수 있다. 단일 부품 상태 재 제조시스템의 가용도 모델 Markov 상태정의를 Table 1 과 같다.

Table 1 Markov state definition of remanufacturing system for single part

Product State (i)	Part State	Action
Use(i=0)	A	.
Disuse(i=1)	a	Reuse after repairing part A
Disuse(i=2)	(a)	Replacement after disusing part A
Disuse(i=3)	α	Reuse after readjusting part A

단일 부품 상태의 재 제조시스템의 가용도 모델의 전이그림은 Fig. 2 와 같이 나타난다.



- Failure rate of part A on repair state : λ_{r1}
- Failure rate of part A on replacement state : λ_{c1}
- Abrasion rate of part A on abrasion state : λ_{rc1}
- Repair rate of part A on repair state : μ_{r1}
- Replace rate of part A on replacement state : μ_{c1}
- Readjustment rate of part A on abrasion state : μ_{rc1}

Fig. 2 Availability transition diagram of remanufacturing system for single part

위 Fig. 2 의 가용도 전이그림으로부터 식 (1)과 같은 연립미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_0'(t) &= -(\lambda_{r1} + \lambda_{c1} + \lambda_{rc1})P_0(t) + \mu_{r1}P_1(t) \\
 &\quad + \mu_{c1}P_2(t) + \mu_{rc1}P_3(t) \\
 P_1'(t) &= -\mu_{r1}P_1(t) + \lambda_{r1}P_0(t) \\
 P_2'(t) &= -\mu_{c1}P_2(t) + \lambda_{c1}P_0(t) \\
 P_3'(t) &= -\mu_{rc1}P_3(t) + \lambda_{rc1}P_0(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

초기 상태확률은 $P_0(t)=1$ 로 두고 $P_1(t)=P_2(t)=P_3(t)=0$ 으로 한다. 라플라스변환(Laplace transformation)을 이용하여 연립미분방정식을 계산한다. 따라서, 부품상태의 재 제조시스템의 가용도 $A(t)$ 는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 A(t) = P_0(t) &= \frac{e^{-at}(a - \mu_{r1})(a - \mu_{c1})(a - \mu_{rc1})}{a(a-b)(a-c)} \\
 &+ \frac{e^{-bt}(b - \mu_{r1})(b - \mu_{c1})(b - \mu_{rc1})}{b(b-a)(b-c)} \\
 &+ \frac{e^{-ct}(c - \mu_{r1})(c - \mu_{c1})(c - \mu_{rc1})}{c(c-a)(c-b)} \\
 &+ \frac{\mu_{r1}\mu_{c1}\mu_{rc1}}{abc}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

일반적으로 시스템이 안정 상태에 도달하였을 때의 시스템의 가용도 $A(\infty)$ 는 식 (3)과 같다.

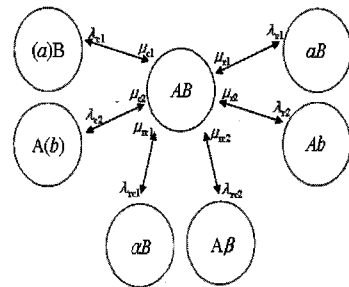
$$A(\infty) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_{r1} + \lambda_{c1} + \lambda_{rc1}}{\mu_{r1} \mu_{c1} \mu_{rc1}}\right)}
 \tag{3}$$

재 제조시스템의 가용도는 제품이 폐기되는 평균 폐기시간이 1 일 경우 부품의 마모와 수리, 교체에 의한 평균 재 제조 시간으로 표현된다.

2.4 2 개 부품의 재 제조시스템 가용도 모델

2 개 부품 상태의 재 제조시스템의 가용도 모델은 단일상태의 부품과 마찬가지로 재 제조상태의 제품은 고장 또는 마모의 폐기 상태이고 폐기되자마자 재 제조되며 완료 즉시 사용상태가 된다. 그리고 각각의 부품들은 동시에 고장이나 마모가 일어나지 않는다고 가정하였으므로 2 개 부품 상태의 재 제조시스템의 가용도 모델의 Markov 상태 정의는 Table 2 와 같이 총 1 가지의 사용 상태와 6 가지의 폐기상태로 나타나게 된다.

2 개 부품 상태의 재 제조시스템의 가용도 모델의 전이그림은 Fig. 3 과 같이 나타난다.



- Failure rate of part A, B on repair state : $\lambda_{r1}, \lambda_{r2}$
- Failure rate of part A, B on replacement state : $\lambda_{c1}, \lambda_{c2}$
- Abrasion rate of part A, B on abrasion state : $\lambda_{rc1}, \lambda_{rc2}$
- Repair rate of part A, B on repair state : μ_{r1}, μ_{r2}
- Replace rate of part A, B on replacement state : μ_{c1}, μ_{c2}
- Readjustment rate of part A, B on abrasion state : μ_{rc1}, μ_{rc2}

Fig. 3 Availability transition diagram of remanufacturing system for two parts

Table 2 Markov state definition of remanufacturing system for two parts

Product State (<i>i</i>)	Part State	Action
Use(<i>i</i> =0)	AB	.
Disuse(<i>i</i> =1)	aB	Reuse after repairing part A
Disuse(<i>i</i> =2)	Ab	Reuse after repairing part B
Disuse(<i>i</i> =3)	(a)B	Replacement after disusing part A
Disuse(<i>i</i> =4)	A(b)	Replacement after disusing part A
Disuse(<i>i</i> =5)	aB	Reuse after readjusting part A
Disuse(<i>i</i> =6)	Aβ	Reuse after readjusting part A

Fig. 3 의 가용도 전이그림으로부터 식 (4)와 같은 연립미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_0'(t) &= -(\lambda_{r1} + \lambda_{c1} + \lambda_{rc1} + \lambda_{r2} + \lambda_{c2} + \lambda_{rc2})P_0(t) \\
 &\quad + \mu_{r1}P_1(t) + \mu_{c2}P_2(t) + \mu_{c3}P_3(t) \\
 &\quad + \mu_{c2}P_4(t) + \mu_{rc1}P_5(t) + \mu_{rc2}P_6(t) \\
 P_1'(t) &= -\mu_{r1}P_1(t) + \lambda_{r1}P_0(t) \\
 P_2'(t) &= -\mu_{r2}P_2(t) + \lambda_{r2}P_0(t) \\
 P_3'(t) &= -\mu_{c1}P_3(t) + \lambda_{c1}P_0(t) \\
 P_4'(t) &= -\mu_{c2}P_4(t) + \lambda_{c2}P_0(t) \\
 P_5'(t) &= -\mu_{rc1}P_5(t) + \lambda_{rc1}P_0(t) \\
 P_6'(t) &= -\mu_{rc2}P_6(t) + \lambda_{rc2}P_0(t)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

초기 상태확률은 $P_0(t)=1$ 로 두고 $P_1(t)=P_2(t)=P_3(t)=P_4(t)=P_5(t)=P_6(t)=0$ 으로 한다. Laplace transformation 을 이용하여 연립미분방정식을 계산한다. 따라서 가용도 $A(\infty)$ 는 식 (5)와 같다.

$$A(\infty) = \frac{\mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc1}\mu_{rc2}}{(\lambda_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc1}\mu_{rc2} + \lambda_{r2}\mu_{r1}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc1}\mu_{rc2} + \lambda_{c1}\mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c2}\mu_{rc1}\mu_{rc2} + \lambda_{c2}\mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{rc1}\mu_{rc2} + \lambda_{rc1}\mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc2} + \lambda_{rc2}\mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc1} + \mu_{r1}\mu_{r2}\mu_{c1}\mu_{c2}\mu_{rc1}\mu_{rc2})}
 \tag{5}$$

2.5 n 개 부품의 재 제조시스템 가용도 모델

재 제조시스템의 가용도 모델이 부품의 수가 증가 할수록 일정한 규칙을 나타내게 됨을 알 수 있다. 결과적으로 부품의 수를 3, 4, ..., n 개로 확장 함으로써 n 개 부품 상태의 재 제조시스템의 가용도 모델 역시 살펴 볼 수 있다. 따라서 재 제조

시스템의 부품이 n 개로 이루어져 있으며, 수리부품의 고장률이 $\lambda_{r1}, \lambda_{r2}, \lambda_{r3}, \dots, \lambda_{rm}$ 교체부품의 고장률이 $\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \lambda_{c3}, \dots, \lambda_{cn}$ 마모부품의 마모율이 $\lambda_{rc1}, \lambda_{rc2}, \lambda_{rc3}, \dots, \lambda_{rcn}$ 이며 수리부품의 수리율이 $\mu_{r1}, \mu_{r2}, \mu_{r3}, \dots, \mu_{rm}$ 교체부품의 교체율이 $\mu_{c1}, \mu_{c2}, \mu_{c3}, \dots, \mu_{cn}$ 마모부품의 재 조정율이 $\mu_{rc1}, \mu_{rc2}, \mu_{rc3}, \dots, \mu_{rcn}$ 일 때 재 제조시스템의 가용도는 식 (6)과 같다.

$$A(\infty) = \frac{\prod_{h=1}^n \mu_{rh} \prod_{i=1}^n \mu_{ci} \prod_{j=1}^n \mu_{rcj}}{\left(\begin{aligned} &\prod_{i=1}^n \mu_{ci} \prod_{j=1}^n \mu_{rcj} \sum_{k \in N, k \neq h} \mu_{r1} \dots \mu_{rk} \lambda_{rh} \\ &+ \prod_{h=1}^n \mu_{rh} \prod_{j=1}^n \mu_{rcj} \sum_{k \in N, k \neq i} \mu_{c1} \dots \mu_{ck} \lambda_{ci} \\ &+ \prod_{h=1}^n \mu_{rh} \prod_{i=1}^n \mu_{ci} \sum_{k \in N, k \neq j} \mu_{rc1} \dots \mu_{rcck} \lambda_{rci} \\ &+ \prod_{h=1}^n \mu_{rh} \prod_{i=1}^n \mu_{ci} \prod_{j=1}^n \mu_{rci} \end{aligned} \right)}
 \tag{6}$$

3. 재 제조시스템의 가용도 모델평가 척도

3.1 부품 재사용 빈도

재 제조는 폐기된 제품을 분해하여 부품을 재 사용함으로써 부품의 폐기로 인한 환경오염의 방지와 더불어 경제적인 효과도 얻을 수 있다. 이러한 재 제조시스템의 목적은 부품의 재사용이다.

먼저, 단일 부품의 경우를 생각하여 보자. 단일 부품 A 가 재사용되기 위해서는 우선 A 부품이 분해가 되어야 하므로 제품이 폐기상태가 되어야 한다. 그리고 A 라는 부품은 교체가 되지 않고 수리나 재조정의 과정을 거쳐서 다시 제조됨으로써 제품이 사용상태가 되는 과정을 거치면 A 라는 부품은 재사용 되었다고 할 수 있다. 따라서, 이러한 A 부품의 재사용 빈도 RF_A 는 식 (7)과 같다.

$$RF_A = \sum_{i \in D} R_{Ai} \sum_{j \in S} P_{Aji}
 \tag{7}$$

D: 제품의 폐기상태집합

S: 제품의 사용상태집합

R_{Ai} : A 부품이 재사용될 수 있는 상태 i 의 확률

P_{Aji} : 상태 i 에서 A 부품이 재사용된 j 로의 빈도

단일 부품의 경우를 안정 상태의 수리확률과 수리 빈도의 곱과 안정상태의 제조정확률과 제조 정 빈도의 곱의 합들로 정리하면 식 (8)과 같다.

$$RF_A(t) = (\lambda_{r1} + \lambda_{rc1}) A(\infty) \quad (8)$$

부품 A 가 재사용되는 빈도는 수리부품의 고장률과 마모부품의 마모율 합을 재 제조시스템 가용도와 곱한 결과로 표현된다. 그리고 A 부품의 재사용 시간은 재 제조시스템의 가용도를 부품 A 의 재사용 빈도로 나눔으로써 쉽게 구할 수 있다. 결과적으로 A 부품의 재사용 시간은 식 (9)와 같다.

$$RT_A = \frac{A(\infty)}{RF_A} = \frac{1}{(\lambda_{r1} + \lambda_{rc1})} \quad (9)$$

이러한 A 부품의 재사용시간은 A 부품의 수리 고장시간과 마모시간의 합의 역수와 같아진다.

따라서, 재 제조 시 재사용 빈도가 높을수록 좋은 부품이며 반면 재사용 빈도가 낮은 수록 그 부품을 집중적으로 관리해야 하는 필요성을 알 수 있다. 그리고 재사용 빈도가 높은 부품은 결과적으로 제품 내에서 부품의 재사용시간이 짧아지므로 결국 재사용 빈도는 높고 부품의 이용시간이 짧을수록 재 제조 시 쉽게 부품을 재사용 할 수 있는 부품이라고 볼 수 있다. 이러한 재 제조시스템의 부품 재사용빈도와 시간을 n 개의 부품으로 일반화하여 보면 각각 식 (10), (11)같이 표현할 수 있다.

$$RF_{i^{th} part} = A(\infty) \left(\sum_{k=1}^n \lambda_{rk} + \sum_{k=1}^n \lambda_{rc k} + \sum_{k \neq i, k \forall} \lambda_{ck} \right) \quad (10)$$

$$RT_{i^{th} part} = 1 / \left(\sum_{k=1}^n \lambda_{rk} + \sum_{k=1}^n \lambda_{rc k} + \sum_{k \neq i, k \forall} \lambda_{ck} \right) \quad (11)$$

3.2 부품 폐기빈도

부품의 폐기 빈도는 부품의 재사용 빈도만큼 그 의미가 크다할 수 있다. 왜냐하면 각각의 부품의 폐기되는 빈도를 살펴 봄으로써 재 제조 시 부품의 폐기에 따라 필요한 교체부품을 쉽게 파악할

수 있고 각각의 부품의 폐기됨으로써 폐기되는 비용과 환경에 미치는 영향까지 고려하여 볼 수 있기 때문이다.

마찬가지로, 단일 부품의 경우를 먼저 생각해 보자. 우선 부품 A 가 폐기상태가 되고 새로운 A 부품으로 교체가 된 후 다시 제조됨되어 제품이 사용상태가 되는 과정을 거친다. 따라서, 이러한 A 부품의 재사용 빈도 DF_A 는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$DF_A = \sum_{i \in S} D_{Ai} \sum_{j \in D} P_{Aji} \quad (12)$$

D: 제품의 폐기상태집합

S: 제품의 사용상태집합

R_{Ai} : A 부품이 재사용될 수 있는 상태 i 의 확률

P_{Aji} : 상태 i 에서 A 부품이 폐기 상태 j 로의 빈도

결과적으로 단일 부품 A 의 폐기 빈도 DF_A 는 A 부품이 제품의 사용상태가 되는 상태에서 교체 상태가 되는 상태로 전이되어야 한다. 즉, 부품이 교체가 될 수 있는 제품의 사용상태의 확률과 교체고장 빈도의 곱으로 표현되어 정리하면 식 (13)과 같다.

$$DF_A(t) = \lambda_{c1} A(\infty) \quad (13)$$

부품 A 가 폐기되는 빈도는 가용도와 교체부품의 고장률의 곱으로 표현되게 된다. 그리고 A 부품의 폐기시간은 재 제조시스템의 가용도를 부품 A 의 폐기빈도로 나눔으로써 쉽게 구할 수 있다. A 부품의 폐기시간은 식 (14)와 같다.

$$RT_A = \frac{A(\infty)}{DF_A} = \frac{1}{\lambda_{c1}} \quad (14)$$

이러한 A 부품의 폐기시간은 A 부품이 가지는 폐기고장시간의 역수와 같다. 따라서, 폐기 빈도는 낮을수록 좋은 부품이며 빈도가 높을수록 그 부품은 집중적으로 관리해야 한다. 재 제조시스템의 부품 폐기빈도와 시간을 n 개의 부품으로 일반화하면 각각 식 (15), (16) 같이 표현된다.

$$DF_{i^{th} part} = \lambda_{ci} A(\infty) \quad (15)$$

$$DT_{i^{th} part} = 1/\lambda_{ci} \quad (16)$$

3.3 부품 평가지수

부품 재사용 빈도와 부품 폐기빈도의 2 가지 척도를 바탕으로 재 제조시스템에서 제품들을 구성하고 있는 부품들의 성능을 상대적으로 평가할 수 있는 지수를 구할 수 있다. 이 부품 평가지수는 수리와 교체, 재조정이 요구되는 다양한 여러 가지 부품의 상태를 상대적으로 비교하기 위한 것이다. 결과적으로, 이 지수는 부품 재사용빈도를 부품 폐기빈도로 나누어서 구할 수 있고 아래 식 (17)과 같다.

$$PI_{i^{th} part} = \left(\sum_{k=1}^n \lambda_{rk} + \sum_{k=1}^n \lambda_{rck} + \sum_{k \neq 1, k \forall}^n \lambda_{ck} \right) / \lambda_{ci} \quad (17)$$

부품 평가지수는 각각의 부품의 단위 폐기빈도 당 재사용빈도를 나타낸 것이다. 폐기빈도는 낮을수록 재사용빈도는 높을수록 좋은 부품이기 때문에 이 부품평가지수가 높을수록 좋은 부품이라고 할 수 있으며 이러한 부품의 평가지수를 이용하여 각각의 부품들에 대한 상대적인 비교 또한 가능하다.

4. 적용 예제

4.1 자동차 엔진 재 제조시스템 가용도 모델

본 논문에서 제시한 재 제조시스템의 가용도 모델에 대한 적용 예제로 자동차 엔진의 재 제조시스템을 예를 들어 살펴보도록 한다. Lam⁴의 연구에서 폐기된 자동차 엔진은 완전 분해 후 세척, 검사의 과정을 거쳐 수리 혹은 교체 후 다시 재조립되게 된다. 이러한 자동차 엔진은 분해과정에서 크게 Block, Cylinder Head, Crankshaft, Camshaft, Connecting Rod, Oil Pan/Valve Cover, Cylinder Sleeve 으로 7 가지 부품으로 해체된다.

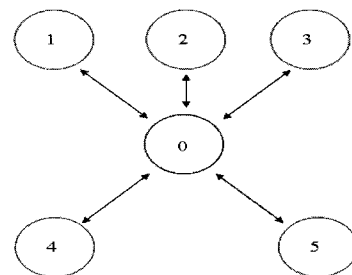
자동차 엔진의 재 제조는 일반적으로 고장 또는 마모가 발생한 부품에 대하여 낮은 수리와 재조정율을 가지고 있다. 따라서, 자동차 엔진의 경우 주로 Cylinder Head 와 Oil Pan/Valve Cover 만이 수리 되고 나머지 부품은 재 제조 시 모두 교체된

다.⁴ 결과적으로 해체된 각각의 7 가지의 부품을 A, B, C, D, E, F, G 라고 한다면 각각의 부품은 Table 3 과 같은 상태를 이루게 된다.

Table 3 State of automobile engine parts for remanufacturing

Part	Part state on remanufacturing	Action
Block	Replacement Part	(a)
Cylinder Head	Replacement Part, Repair Part	(b), b
Crankshaft	Replacement Part	(c)
Camshaft	Replacement Part	(d)
Connecting Rod	Replacement Part	(e)
Oil Pan/Valve Cover	Replacement Part, Repair Part	(f), f
Cylinder Sleeve	Replacement Part	(g)

Table 3 을 바탕으로 자동차 엔진의 재 제조시스템 가용도 모델의 상태는 {A, C, D, E, G}의 부품은 재 제조 시 언제나 함께 교체가 이루어지므로 교체고장시간은 {A, C, D, E, G}의 부품 중 가장 작은 고장시간을 갖는 부품을 따르게 된다. 결과적으로 {{A, C, D, E, G}, B, F}의 부품은 3 개의 부품으로 이루어진 재 제조시스템으로 고려해 볼 수 있다. 각각의 상태에 대한 전이그림은 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있으며 각각의 전이율은 Table 4 와 같이 나타낼 수 있다.



- 0 : ABCDEFG
- 1 : (a)B(c)(d)(e)F (g)
- 2 : (a)b(c)(d)(e)F (g)
- 3 : (a)B(c)(d)(e)f(g)
- 4 : (a)(b)(c)(d)(e)F(g)
- 5 : (a)B(c)(d)(e)(f)(g)

Fig. 4 Availability transition diagram of remanufacturing system for automobile engine parts

Table 4 Transition rate of remanufacturing system for automobile engine parts

Transition Rate	Sign	Value
Failure rate of parts {A, C, D, E, G} on replacement state	λ_c	0.0001
Replacement rate of parts {A, C, D, E, G} on replacement state	μ_c	0.5
Failure rate of part B on repair state	λ_{Br}	0.001
Failure rate of part B on replacement state	λ_{Bc}	0.0001
Repair rate of part B on repair state	μ_{Br}	0.5
Replacement rate of parts B on replacement state	μ_{Bc}	1
Failure rate of part F on repair state	λ_{Fr}	0.00001
Failure rate of part F on replacement state	λ_{Fc}	0.00000 1
Repair rate of part F on repair state	μ_{Fr}	0.1
Replacement rate of parts F on replacement state	μ_{Fc}	2

자동차 엔진의 재 제조시스템 가용도는 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned}
 A(\infty) &= P_0(\infty) \\
 &= \frac{\{\mu_c(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)(\mu_{Bc} + \mu_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)\}}{[\{\lambda_c(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)\} \\
 &\quad + \{\mu_c(\lambda_{Bc} + \lambda_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)\} \\
 &\quad + \{\mu_c(\mu_{Bc} + \mu_c)(\lambda_{Fc} + \lambda_c)(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)\} \\
 &\quad + \{\mu_c(\mu_{Bc} + \mu_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)(\lambda_{Br} + \lambda_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)\} \\
 &\quad + \{\mu_c(\mu_{Bc} + \mu_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)(\mu_{Br} + \mu_c)(\lambda_{Fr} + \lambda_c)\} \\
 &\quad + \{\mu_c(\mu_{Bc} + \mu_c)(\mu_{Fc} + \mu_c)(\mu_{Br} + \mu_c)(\mu_{Fr} + \mu_c)\}] \quad (18)
 \end{aligned}$$

따라서 본 논문에서 적용예제로 사용한 폐기된 자동차 엔진의 재 제조시스템 가용도 $A(\infty)$ 는 0.9963 이다.

4.2 자동차 엔진 재 제조시스템의 평가척도

자동차 엔진 재 제조시스템의 평가척도인 부품 재사용빈도와 시간, 부품 폐기빈도와 시간, 부품 평가지수는 Table 5 와 같다.

Table 5 Performance Index of remanufacturing system for automobile engine parts

	ACDEG	B	F
Reuse frequency	0	0.1409	0.001508
Reuse Time		709.8916	663.34
Disuse Frequency	0.0001	0.0002	0.0001
Disuse Time	10016.57	5008.28	9917.39
Performance Index	0	7.05	14.95

ACDEG 부품은 재 제조 시 모두 교체가 됨으로 재사용빈도는 0 으로 나타나게 된다. 그리고 F 부품의 재사용빈도가 B 부품에 비하여 높으며 결과적으로 제품 내에서 재사용시간이 낮아지므로 B 부품에 비하여 좋은 부품이라고 할 수 있다. 부품의 폐기빈도는 F 부품이 B 부품에 비하여 낮으며 부품의 폐기까지의 시간이 길게 나타남으로 F 부품이 더 좋은 부품이라고 할 수 있다. 결과적으로 ACDEG 와 B, F 부품의 부품 평가지수를 살펴보면 ACDEG 는 0, B 부품은 7.05, F 부품은 14.95 로 B 부품이 F 부품에 비하여 재 제조 시 약 2 배 정도의 높은 성능을 나타내는 부품이라고 판단할 수 있다. 따라서 재 제조 시 ACDEG, B, F 부품의 순으로 교체부품을 관리하여야 하며 F, B, ACDEG 의 순으로 재사용부품을 관리하여야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 마코프 과정(Markov Proces)을 이용한 재 제조시스템의 가용도 분석 모델에 관한 연구로서 먼저, 단일 부품의 가용도를 구하는 방법을 제시하였고 다음으로 제시된 단일 부품의 가용도를 바탕으로 n 개의 부품으로 확장하여 일반화하였다. 또한 재 제조시스템의 성능을 평가하기 위한 척도로써 부품의 재사용 빈도와 재사용 시간, 폐기 빈도와 폐기 시간, 부품 평가지수를 계산하였다. 그 이유로는 재 제조의 주목적은 부품의 재사용이기 때문에 제품의 가용도뿐 아니라 재 제조 시 부품의 재사용 정도에 따라 재 제조시스템의 성능이 평가되기 때문이다. 그리고 이러한 척도를 이용하여 재 제조시스템의 평가뿐 아니라 재 제조 시 부품에 대한 선별과 집중적인 관리가 가능하다. 이는 앞으로 활성화 될 재 제조 산업에서 있어 재 제조품에 대한 품질을 만족시키는 동시에 재 제조 시 유용한 정보를 제공하여 줄 것이다.

참고문헌

pp. 416-425, 2007.

1. Anityasari, M. and Kaebnick, H., "A Concept of Reliability Evaluation for reuse and remanufacturing," *International Journal of Sustainable Manufacturing*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-17, 2008.
2. Inderfurth, K., "Impact of Uncertainties on Recovery Behavior in a Remanufacturing Environment," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 35, No. 5, pp. 318-336, 2005.
3. Jiang, Z., Shu, L. and Benhabib, B., "Steady-State Reliability Analysis of Repairable Systems Subject to System Modifications," *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 121, No. 4, pp. 614-621, 1999.
4. Lam, A., Sherwood, M. and Shu, L., "FMEA-based Design for Remanufacture using Automotive Remanufacturer Data," *SAE 2001 World Congress Design for the Environment Technical Session*, pp. 308-318, 2001.
5. Lund, R. T., "Remanufacturing: the experience of the United States and implications for developing countries," *World Bank Technical Paper*, pp. 30-35, 1984.
6. Pellerin, R., Sadr, J., Gharbi, A. and Malhame, R., "A production rate control policy for stochastic repair and remanufacturing systems," *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, No. 1, pp. 39-48, 2009.
7. Yates, R. and Goodman, D., "Probability and Stochastic Processes 7th Edition," *Wiley International Edition*, pp. 473-479, 2003.
8. Shu, L. H. and Flowers, W. C., "Reliability Modeling in Design for Remanufacture," *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 4, pp. 620-627, 1998.
9. Steinhilper, R., "Remanufacturing: the Ultimate Form of Recycling," *Fraunhofer IRB Verlag*, pp. 40-58, 1998.
10. Takahashi, K., Morikawawa, K., Myreshka, Takeda, D. and Mizuno, A., "Inventory Control for a MARKOVIAN Remanufacturing System with Stochastic Decomposition Process," *International Journal of Production Economics*, Vol. 108, No. 1-2,