

# F16 항공기 엔진모듈 최적교체정책에 대한 연구 (A Study on the Optimal Replacement Policy of the F16 Aircraft Engine Modules)

김충영, 강휘태\*

## Abstract

This paper focuses on the optimal replacement time of engine modules of the F16 aircraft. Generally, the optimal replacement time of those should be determined to minimize the replacement cost due to out of order and opportunistic replacement cost of operation cost of remaining period.

This paper determines the optimal replacement time by using the opportunistic replacement algorithm that is developed by Forbes and Wyatt. Some real data are utilized but a few data is estimated due to limitation of data.

As a result, fan module only reaches to the opportunistic replacement time. The optimal replacement time of the fan module is derived as 1740 cycles. Therefore, the optimal replacement policy of engine modules of the F16 is that fan module should be replaced whenever it is out of order under 1740 cycles and whenever core module is out of order over 1740 cycles.

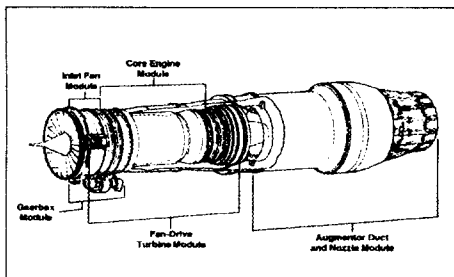
---

\* 국방대학원

# 1. 序 論

현재 공군에서 운영하고 있는 F16 항공기는 타기종 항공기에 장착되어 있는 모두개(assembly)엔진과는 달리 기능적 및 구조적으로 관련된 부품들을 한 단위로 장탈(裝脫)이 가능한 모듈형(modular) F100 엔진을 장착하고 있다.

F100 엔진은 <그림1-1>과 같이 fan모듈, core모듈, fan drive turbine (f.d.t.)모듈, augmentor(aug')모듈 및 gearbox모듈의 5개 모듈로 구성되어 있다. 엔진에 대한 정비활동시, 정비사는 일련의 작업순서를 따르게 된다. 즉, f.d.t.모듈을 장탈하기 위하여 aug'모듈을 먼저 장탈하여야 하며, core모듈을 장탈하여 교체하기 위해서는 fan모듈, f.d.t.모듈, aug'모듈 및 gearbox모듈이 순서에 맞게 먼저 장탈되어야 한다.



<그림1-1> F16 항공기 F100 엔진 구성도

만약 고장 또는 최대작동한계 도달로 core모듈의 교체가 요구될 때 먼저 장탈되어야 하는 fan모듈과 f.d.t.모듈에 이상이 없다면 fan모듈과 f.d.t.모듈은 단지 core모듈의 정비를 위하여 장탈되었다가 재장착하게 된다. 이때 fan모듈과 f.d.t.모듈의 잔여수명이 적을 경우 장탈된 모듈을 재장착하는 것 보다 교체

하는 것이 타당하다면 재장착하는 것과 교체하는 것 중 어느 것이 효과적인지 판단할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 F16 항공기에 장착되어 있는 F100 엔진 모듈들에 대해 기설정되어 있는 창정비주기 내에서 정비비용과 지원수명 손실간의 손익분기점인 최적 기회교체분기점을 찾음으로써 다른 모듈의 정비지원을 위하여 장탈된 모듈의 재장착 또는 교체여부의 판단이 요구될 때 적용할 수 있는 교체정책을 실증적으로 검토해보고자 한다.

# 2. 理論的 背景

정비정책에 관한 기존의 연구에서 잔여수명의 가치와 피할 수 있는 정비비용간 절충을 다룬 정비정책은 기회적(opportunistic) 정비정책으로 알려져 있다. 기회적 정비정책이란 여러 개의 부품으로 구성된 장비에 대하여 각 부품에 대한 최적 정비활동이 장비내 다른 부품의 고장으로 생겨나는 기회를 이용하는 정비정책이다.

Jorgenson, Mccall 및 Radner[7]는 여러 개의 부품으로 이루어진 장비에 대한 기회적 교체정책을 일반화하였다.

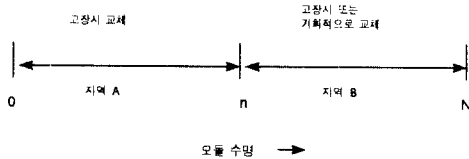
이들이 대상으로 한 체계는  $M+1$  개의 부품들이 직렬로 구성되어 있으며 각각의 고장은 독립으로 보고 정책평가기준은 교체비용과 교체소요 시간을 고려하여 일정고장률을 갖는 부품들의 임계수명값에 대하여 단위작동시간당 평균비용을 최소화하였다.

Forbes 및 Wyatt[6]는 Jorgenson, Mccall 그리고 Radner의 두 개 부품으로 구성된 장비의 기회교체모형을 응용하여 정비지원을 위해 장탈되는 고장나지 않은 모듈의 기회교체정책을 발견하는 알고리즘

을 개발하였다.

대상체계는 일련의 작업순서를 갖는 5 개의 모듈로 구성된 F15 항공기 엔진으로 기회교체를 통하여 발생하는 고장난 모듈과 고장나지 않은 모듈의 교체 활동간 비용의 차이를 고려하여 단위 작동시간당 최소비용을 가져오는 시점을 구하였다.

한 개 모듈의 창정비주기에서 다음 창정비주기까지를 아래 그림과 같이 지역 A 와 지역 B의 두 개 지역으로 구분하였다.



<그림2-1> 모듈 창정비주기

기회교체란 모듈이 아직 작동가능하나 정비접근성을 위하여 장탈되었을시 동시에 교체하는 것으로 n 보다 적은 수명시점에서는 잔여수명가치가 동일 모듈 재장착비용 보다 크기 때문에 고장 발생시 교체를 하고, n 보다 큰 수명시점에서는 잔여수명가치가 동일 모듈 재장착비용 보다 적으므로 고장시 또는 기회적으로 교체하는 것을 말한다. 이때 고려하는 정비비용은 단일 창정비주기에서 고정적으로 발생하는 모듈 포장비용, 모듈 수송비용, 모듈 창정비비용과 기회교체에 의해 변동적으로 발생하는 야전급 교체비용으로서 항공기에서 엔진을 장·탈착하는 비용, 엔진에서 모듈을 장·탈착하는 비용 등이 있다.

항공기 엔진의 교체비용은 모듈 교체를 야기하는 조건에 따라 달라진다. 즉 fan모듈이 고장이면 야전급교체비용은 fan모듈의 고장에 기인한다. 그러나 core모듈의 고장으로 core모듈의 수리를 위하여 고

장나지 않은 fan모듈의 장탈이 필요할 때 이들의 비용은 core모듈의 고장에 기인한다. 이때 fan모듈을 교체하면 엔진이 기장탈 및 모듈별로 분해되어 있으므로 이들 활동에 대한 추가 비용이 발생하지 않는다.

그러므로 고장교체비용과 잔여수명가치의 차이인 변동비용과 고정비용의 합인 총비용을 최소화 하면 된다. 그러나 지역 A에 비해 지역 B가 증가하면, 고정비와 변동비로 구성된 총비용은 감소하지만 지역 B가 커짐에 따라 조기 기회교체할 확률이 증가하면 주기길이 즉 장탈시평균시간(mean time at removal)도 감소한다. 그래서 창정비주기당 총비용의 감소가 이득인지 아닌지 알아보기 위하여 장비 작동시간당 비용을 확인하여야 한다.

총비용 함수를  $f(n)$ , 주기길이 함수를  $g(n)$ , 단위시간당 비용 :  $h(n)$  이라 할 때  $f(n)$  과  $g(n)$  은 구간  $(0, N)$ 에서 단조증가한다고 가정하면,  $n$  의 함수  $h(n)$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(n) = \frac{\text{총 비용}}{\text{주기길이}} = \frac{f(n)}{g(n)} \quad (1)$$

단위작동시간당 최소 총비용 점은

$$\frac{d}{dn} h(n) = \frac{d}{dn} \frac{f(n)}{g(n)} = 0 \quad (2)$$

으로 놓음으로써 찾을 수 있으며, 이 관계를 참으로 만드는  $n$  값에 대해 풀면 된다.

본 연구에서 F16 항공기 엔진에 대한 기회교체모형에 사용되는 변수들을 정의하면 다음과 같다.

N : 최대작동한계 도달 또는 기회교체로 fan 모듈을 교체해야 할 때의 fan 모듈의 수명시점.

n : fan 모듈의 기회교체가 허용되는 fan 모듈의 수명시점(그림2-1에서 지역B의 시작지점).

Q(fc) : 두 모듈이 n 까지 살아있을 때 구간(n, N)

- fan 모듈과 core 모듈을 동시에 교체할 확률.
- $Q(\bar{f}c)$  : 두 모듈이 n 까지 살아 있을 때 구간(n,N)에서 fan 모듈만 교체할 확률.
- $Q(\bar{f}c)$  : 두 모듈이 n 까지 살아있을 때 구간(n, N)에서 core 모듈만 교체할 확률.
- $q(f)$  : 수명 n 이전에 fan을 교체할 확률.
- $q_i(fc)$  : 두 모듈이 n 까지 살아 있을 때 구간(n, N)의 임의의 i 번째 구간에서 fan 모듈과 core 모듈을 동시에 교체할 확률.
- $q_i(\bar{f}c)$  : 두 모듈이 n 까지 살아 있을 때 구간(n, N)의 임의의 i 번째 구간에서 fan 모듈만 교체할 확률.
- $q_i(\bar{f}c)$  : 두 모듈이 n 까지 살아 있을 때 구간(n, N)의 임의의 i 번째 구간에서 core 모듈만 교체할 확률.
- $Q_f(t_k | t_j)$  : fan 모듈이 모듈수명  $t_j$  까지 살아 있을 때 이것이  $t_j$  와  $t_k$  간에서 고장날 확률.
- $Q_c(t_k | t_j)$  : core 모듈이 모듈수명  $t_j$  까지 살아 있을 때 이것이  $t_j$  와  $t_k$  간에서 고장날 확률.
- $f_{fan}(t)$  : fan모듈의 고장확률밀도함수(p.d.f).
- $f_{core}(t)$  : core모듈의 고장확률밀도함수(p.d.f).
- $F_d$  : fan 모듈의 창정비 비용.
- $F_p$  : fan 모듈의 창 반납을 위한 포장과 수령시 해체비용.
- $F_r$  : fan 모듈의 야전급 교체 비용.
- $F_M$  : fan모듈의 최대작동시간(maximum operating cycle).
- $C_M$  : core모듈의 최대작동시간(maximum operating cycle).

<그림2 1>의 지역 A에서 F16 항공기 엔진의 fan 모듈이 창정비를 요하는 고장이면 모듈이 교체되고 창으로 반납된다. 한편 지역 B에서 고장 또는 최대 작동시간에 도달하거나 또는 어떤 이유로 해서 core 모듈이 장탈되면 fan모듈이 교체되고 창으로 반납된다. 구간 (0,n)에서 고장으로 인한 fan모듈의 장탈 확률은 다음과 같다.

$$q(f) = \int_0^n f_{fan}(t) dt \quad (3)$$

구간(n,N)에서 넓이  $\delta t$ 인 구간이 있다고 하고, 여기에서  $\delta t = t_{i+1} - t_i$  이며  $\delta t$ 는  $q_i(fc)$ ,  $q_i(\bar{f}c)$ , 또는  $q_i(\bar{f}c)$  중, 하나만 발생할 수 있을만큼 충분히 작다고 하면, fan과 core 모듈이 동시에 장탈되었고 두 모듈의 수명이 동일하며 두 개 모두 n 까지 살아 있을 때 i 번째 구간에서 fan모듈, core모듈 또는 두 개 모두 장탈될 확률  $q_i(f \cup c | n)$ 는 다음과 같다.

$$q_i(f \cup c | n) = q_i(fc) + q_i(\bar{f}c) + q_i(\bar{f}c) \quad (4)$$

식(4)의 우변 항을 각각 알아보면 다음과 같다. 먼저,  $q_i(fc)$ 는  $t_i$  의 구간에 따라 다음과 같이 계산된다.

구간  $n < t_i \leq N - \delta t$  에서 fan 과 core 모듈을 동시에 교체할 확률  $q_i(fc)$  는 fan과 core 모듈이 고장날 확률의 곱이 된다.

$$q_i(fc) = \frac{[1 - Q_f(t_i | n)] \cdot [1 - Q_c(t_i | n)]}{Q_f(t_{i+1} | t_i) \cdot Q_c(t_{i+1} | t_i)} \quad (5)$$

식(5)에서 우변 식의 조건부 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$q_i(fc) = \frac{(\int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{fan}(t) dt) \cdot (\int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{core}(t) dt)}{(1 - \int_0^{t_i} f_{fan}(t) dt) \cdot (1 - \int_0^{t_i} f_{core}(t) dt)} \quad (6)$$

구간이  $N - \delta t < t_i \leq N$  이면 최대수명 N 에 따라

fan과 core모듈을 동시에 교체할 확률  $q_i(fc)$  는 다음과 같다.

i) 최대수명  $N=C_M$  이면

$$q_i(fc) = \frac{[1 - Q_f(N - \delta t | n)] \cdot Q_f(N | N - \delta t)}{[1 - Q_c(N - \delta t | n)] \cdot Q_c(N | N - \delta t)} \quad (7)$$

식(7)의 우변에서  $Q_c(N | N - \delta t) = 1$  로 core의 장탈이 확실하므로

$$q_i(fc) = \frac{[1 - Q_f(N - \delta t | n)] \cdot Q_f(N | N - \delta t)}{[1 - Q_c(N - \delta t | n)]} \quad (8)$$

ii) 최대수명  $N=F_M$  이면, 식(7)의 우변에서

$Q_f(N | N - \delta t) = 1$  이기 때문에  $q_i(fc)$  는 다음과 같이된다.

$$q_i(fc) = \frac{[1 - Q_f(N - \delta t | n)]}{[1 - Q_c(N - \delta t | n)]} \cdot Q_c(N | N - \delta t) \quad (9)$$

fan 만 교체할 확률  $q_i(\bar{fc})$ 와 core 만 교체할 확률  $q_i(\bar{c})$ 는 구간  $n < t_i < N$  의  $i$  번째 구간에서  $q_i(fc)$  와 유사한 방법으로 구할 수 있다. 그러면, 구간  $(n, N)$  사이를  $M = \frac{(N-n)}{\delta t}$  인  $M$  개의 정수구간으로 나누면 구간  $n < t_i \leq N$  에서 fan모듈을 교체할 확률  $(Q(\bar{fc}))$ , core모듈을 교체할 확률  $(Q(\bar{c}))$  또는 두 개 모두를 교체할 확률  $(Q(fc))$ 는  $i$  번째 구간에서 각각의 교체할 확률들의 합이 된다. 즉

$$Q(fc) = \sum_{i=1}^M q_i(fc) \quad (10)$$

$$Q(\bar{c}) = \sum_{i=1}^M q_i(\bar{c}) \quad (11)$$

$$Q(\bar{fc}) = \sum_{i=1}^M q_i(\bar{fc}) \quad (12)$$

모듈 포장비용  $F_p$  및 모듈 창정비비용  $F_d$  는 1회 창정비주기 중 고정적으로 발생한다. 그러나 야전급 장탈비용  $F_r$  는 구간  $(0, n)$  에서 fan모듈 고장 또는 구간  $(n, N)$  에서 core모듈 이전에 fan모듈이 장탈될

경우에만 발생한다. 구간  $(n, N)$  에서 fan모듈 이전에 core모듈이 고장나면 발생하지 않게 된다. 그러므로 구간  $(0, N)$  에서 기대비용  $E(C)$ 는 다음과 같다.

$$E(C) = F_p + F_d + F_r \cdot \{q(f) + [1 - q(f)] \cdot [(Q(fc) + Q(\bar{c}))]\} \quad (13)$$

구간  $(0, n)$  에서 fan 모듈의 교체확률  $q(f)$  는 다음과 같다 :

$$q(f) = \int_0^n f_{fan}(t) dt \quad (14)$$

구간  $(n, N)$ 에서 fan 모듈의 교체확률은 다음과 같다.

$$p[\text{구간}(n, N)\text{에서 fan 교체}] = \frac{[1 - q(f)]}{\sum_{i=1}^M [q_i(fc) + q_i(\bar{c}) + q_i(\bar{fc})]} \quad (15)$$

식(14)와 (15)에서 fan모듈의 기대교체길이  $E(T)$  은 다음과 같이 된다.

$$E(T) = \int_0^n t \cdot f_{fan}(t) dt + [1 - q(f)] \cdot \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{t_i + t_{i+1}}{2} [q_i(fc) + q_i(\bar{c}) + q_i(\bar{fc})] + N \cdot [1 - q(f)] \cdot [1 - Q_c(N | 0)] \right\} \quad (16)$$

식(16)에서 교체는 구간  $(t_i, t_{i+1})$ 의 중간에서 발생하는 것으로 가정하였으며  $[1 - q(f)] \cdot [1 - Q_c(N | 0)]$  는 fan모듈과 core모듈이  $N$  까지 살아있을 확률이다.

식(16)에서 최대작동한계의 도달 또는 기회교체로 fan모듈을 교체해야 할 때의 수명시점  $N$  은 core모듈의 수명과 각 모듈의 최대작동시간( $F_M$  또는  $C_M$ )의 차이에 따라 달라지므로 core모듈 수명과 fan모듈 및 core모듈의 최대작동시간 간의 차이를 다음과 같은 방법으로 고려하여 최대작동한계의 도달 또는

기회교체로 fan모듈을 교체해야 할 때의 수명시점  $N$ 을 구한다. 먼저 관련시간변수를 정의하면 다음과 같다.

$F_{time}$  : fan 모듈의 수명

$C_{time}$  : core 모듈의 수명

$\Delta time$  :  $F_{time} - C_{time}$

$\Delta mot$  :  $F_M - C_M$

$F_M$  : fan모듈의 최대작동시간

$C_M$  : core모듈의 최대작동시간

여기서  $C_{time}$  과  $C_M$  을 다음과 같이  $F_{time}$  과  $F_M$  으로 나타낼 수 있다.

$$C_{time} = F_{time} - \Delta time \quad (17)$$

$$C_M = F_M - \Delta mot \quad (18)$$

만약  $F_M - F_{time} < C_M - C_{time}$  이면  $F_M$  가 먼저 최대작동시간에 도달하며 식(17)와 (18)에 의해  $F_M - F_{time} < F_M - \Delta mot - (F_{time} - \Delta time)$  로서  $\Delta time > \Delta mot$  와 같이 된다. 그러므로  $\Delta time > \Delta mot$  이면 fan 모듈의 최대작동한계  $N$  은

$$N = F_M \quad (19)$$

가 되고  $\Delta time = \Delta mot$  이면 fan 모듈의 최대작동한계  $N$  은

$$N = F_M - C_M \quad (20)$$

가 된다. 그러나  $\Delta time < \Delta mot$  이면 fan모듈의 최대작동한계  $N$  은 아래와 같이 된다.

$$N = F_M - \Delta mot + \Delta time \quad (21)$$

식(13)의 주기당 기대비용  $E(C)$ 를 식(16)의 기대교체길이  $E(T)$ 으로 나누면 단위시간당 기대비용을 얻는다. 단위시간당 기대비용을  $E(V)$  라 하면  $E(V)$  는 다음과 같다.

$$\text{Min } E(V) = \frac{E(C)}{E(T)} \quad (22)$$

식(22)에서 단위시간당 기대비용  $E(V)$  를 최소화 하는  $n$  값을 구하며 그 절차는 다음과 같다.

(1) fan 모듈의 임계수명  $n$  값을 0부터 최대작동시간까지 20 단위로 증가시킨  $n$  값에 대하여 단위시간당 기대비용을 계산한다.

(2) 이 과정을 0부터 최대작동시간까지 20 단위씩 증가시킨 core 모듈의 수명에도 반복한다.

(3) 주어진 core 모듈의 수명 각 값에 대하여 단위시간당 최소기대비용을 가져오는  $n$  값이 최적 기회교체분기점이 된다. 이 기법을 수치적기법이라 한다.

### 3. 模型의 適用

본 연구의 대상장비인 F16 항공기 엔진은 Forbes 및 Wyatt의 모형에서 대상으로 한 F15 항공기 엔진과 동일한 구조로 일련의 작업순서에 의해 core 모듈의 정비접근성을 위하여 나머지 모듈들이 장탈된다. 그러므로 본 연구에서는 Forbes 및 Wyatt의 기회교체모형을 이용하여 F16 항공기 엔진모듈에 대해 기 설정되어 있는 최대작동한계내에서 작동시간당 최소비용을 가져오는 기회교체시점  $n$  값을 찾아 보기로 한다.

모형에 적용을 위한 기대비용함수  $E(C)$  와 기대교체길이함수  $E(T)$ 의 결정을 위해서는 각 모듈의 고장분포모수와 비용자료를 추정하여야 한다.

#### 3.1 故障分布의 推定

고장분포를 추정하기 위하여 다음 사항을 가정한 다.

첫째, 모듈들의 수명은 운용부서에서 사용하기 시작한 시점 즉, 0 cycle 부터 시작한다.

둘째, 각 모듈의 최대작동한계는 <표3-1>과 같다.

<표3-1> 최대작동한계 (maximum operating limit)

| 모 들  | fan   | core  | f.d.t | gearbox |
|------|-------|-------|-------|---------|
| 운영한계 | 1,800 | 4,000 | 3,500 | 2,740   |

셋째, 고장이란 구성품이 기 설정되어 있는 작동한계치 이내에서 의도한 기능을 수행하지 못하거나 원래 형태를 유지하지 못하는 사용 수명상의 시점 (cycle)으로 창급정비를 필요로 하는 고장이다.

고장자료는 '86. 6 - '97. 6 까지 운영기지의 엔진 모듈 장·탈착 이력 중 고장에 의한 교체시 cycles 기록을 칼취한 것으로 고장교체한 모듈과 고장 없이 작동한계까지 도달한 모듈을 대상으로 하여 표본수를 결정한다. 모듈별 표본수는 <표3-2>와 같으며 모듈별 고장교체시 cycle 자료는 <표3-3>과 같다.

<표3-2> 각 모듈별 표본수 및 고장수

| 모 들   | fan | core | f.d.t | gearbox |
|-------|-----|------|-------|---------|
| 고장 수  | 7   | 28   | 17    | 6       |
| 비고장 수 | 77  | 11   | 33    | 27      |
| 표본 수  | 84  | 39   | 50    | 33      |

수집한 자료의 형태는, 대상모듈이 시한성교환 품목(time change item)으로 최대작동 cycle에 도달하면 의무적으로 창정비(overhaul)를 수행하며 창정비주기에 도달할 때까지 엔진 자체의 별도 주기검사가 없으므로 최대작동 cycle을 정시중단 수명시점으로 볼 수 있다. 즉 고장발생시점을  $t_i$ 라 할 때, 고장교체시 cycle을 고장발생 순서별로

<표3-3> 모듈별 고장시 cycle

| 순번  | fan     | core    | f.d.t   | gearbox |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| 1   | 460.00  | 318.75  | 4.75    | 8.50    |
| 2   | 820.00  | 870.75  | 211.25  | 358.00  |
| 3   | 945.25  | 1087.00 | 219.25  | 712.25  |
| 4   | 1383.50 | 1342.50 | 493.75  | 949.25  |
| 5   | 1393.50 | 1443.00 | 630.75  | 2009.00 |
| 6   | 1565.00 | 1597.75 | 699.75  | 2349.75 |
| 7   | 1603.75 | 1784.50 | 1097.25 |         |
| 8   |         | 2219.50 | 1784.50 |         |
| 9   |         | 2249.75 | 1858.25 |         |
| 10  |         | 2344.25 | 2219.25 |         |
| 11  |         | 2379.50 | 2219.50 |         |
| 12  |         | 2476.75 | 2344.25 |         |
| 13  |         | 2503.25 | 2356.00 |         |
| 14  |         | 2652.25 | 2671.50 |         |
| 15  |         | 2663.50 | 3022.50 |         |
| 16  |         | 2683.50 | 3289.75 |         |
| 17  |         | 2704.50 | 3311.75 |         |
| 18  |         | 2773.50 | 3395.25 |         |
| 19  |         | 2844.50 |         |         |
| 20  |         | 3295.25 |         |         |
| 21  |         | 3311.75 |         |         |
| 22  |         | 3320.00 |         |         |
| 23  |         | 3351.25 |         |         |
| 24  |         | 3358.75 |         |         |
| 25  |         | 3395.25 |         |         |
| 26  |         | 3596.00 |         |         |
| 27  |         | 3609.75 |         |         |
| 28  |         | 3759.00 |         |         |
| 표본수 | 84      | 39      | 50      | 33      |
| 고장수 | 7       | 28      | 17      | 6       |

나열하면 수집한 자료의 형태는  $t_1 \leq t_2 \leq t_3, \dots, \leq t_r \leq t_{r-1} = t_{r-2} = \dots = t_n$  인 중도절단자료의 형태이다.

본 연구에서는 fan모듈을 포함한 나머지 모듈들이 core 모듈의 정비지원을 위하여 장탈되므로 fan 모듈을 중심으로 하여 분석한다. 나머지 모듈에 대한 방법은 fan 모듈에 대한 방법과 동일하다.

Shooman[11]은 고장률을 시간의 함수로 보았으나 본 연구에서는 cycle의 함수로 고장률을 도식하여 어떤 고장률 모형을 선택해야 하는가를 판단한다. 고장률은 다음 식을 적용하여 구한다.

$$h(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i - \Delta t_i)] / n(t_i)}{\Delta t_i}, \quad (23)$$

여기에서,  $h(t)$  : 순간고장률 (hazard rate)

$n(t)$  : 구간 초기에 고장나지 않은 수

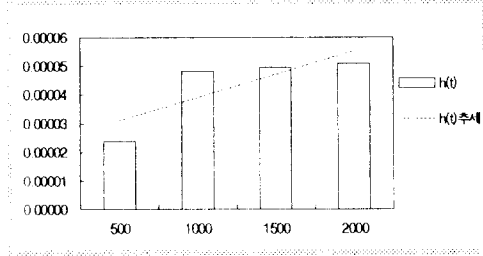
$\Delta t_i$  : 고장구간 ( $t_i < t < t_i + \Delta t$ )

$\Delta t_i = 500$ cycles로 하여 고장률을 구한 결과는 <표 3-4>와 같으며 그래프로 도식한 것은 <그림3-1>과 같다.

<표3-4> fan 모듈 고장률

| $\Delta t_i$ | 고장수 | $n(t)$ | $h(t)$    |
|--------------|-----|--------|-----------|
| 0~500        | 1   | 84     | 0.0000238 |
| 500~1000     | 2   | 83     | 0.0000482 |
| 1000~1500    | 2   | 81     | 0.0000494 |
| 1500~2000    | 2   | 79     | 0.0000506 |

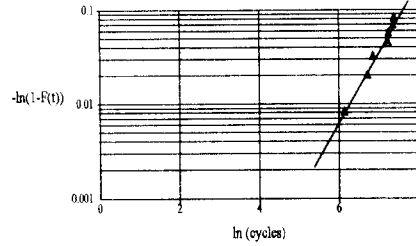
<그림3-1>에서 고장률을 증가고장률 추세로 판단하여 고장확률밀도함수를 와이불분포로 가정한다.



<그림3-1> fan 모듈 고장률 및 고장밀도히스토그램

Weibull 분포의 모수추정방법은 먼저 모든 고장이 와이불 수명분포를 따르는가 점검을 위하여 Weibull plot를 해보고 불확실성의 평가능력과 불편추정 및 정확성에서 더 우수한 최우추정법을 사용한다.

신뢰도분석 소프트웨어 relest(1.0)를 이용한 Weibull plot에 육안으로 적합선을 그려본 결과는 <그림3-2>와 같으며 직선상에 적합된다고 볼 수 있으므로 Weibull 분포로 가정할 수 있다.



<그림3-2> fan모듈 Weibull plot

Weibull 분포의 모수  $\nu, \theta$  추정을 위한 최우추정법은, 중도절단 자료에 대해 다음과 같은 최우추정식이 된다.

$$L = f(t_1) \cdot \dots \cdot f(t_r) \cdot [1-F(t_{r+1})] \cdot \dots \cdot [1-F(t_n)]$$

$$= C \prod_{i=1}^r f(t_i) \cdot [1-F(t_0)]^{n-r} \quad (24)$$

단,  $C$  : 상수

$f(t_i)$  :  $r$  개 고장의 고장시점  $t_i$  에서 밀도함수

$1-F(t_0)$  : 중도절단 시점  $t_0$  에서  $n-r$  개 자료의 생존함수

식(24)를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$L = C \prod_{i=1}^r \frac{\nu}{\theta} t_i^{\nu-1} \exp \left[ -\left( \frac{t_i}{\theta} \right)^\nu \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -\left( \frac{t_0}{\theta} \right)^\nu \right] \right\}^{n-r} \quad (25)$$

여기서  $L$  을 최대화하는  $\nu, \theta$  를 찾으면 된다. 그러기 위해서는 식(25)에 자연대수를 취하여  $\gamma$  와  $\theta$  에 대해 편미분하여  $\frac{\partial \ln L}{\partial \nu} = 0$  와  $\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = 0$  을 만족하는  $\hat{\nu}, \hat{\theta}$  를 구하면 다음결과를 얻는다.

$$\hat{\theta} = \left( \frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\nu}} + (n-r) t_0^{\hat{\nu}}}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{\nu}}} \quad (26)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\nu}} \ln t_i + (n-r) t_0^{\hat{\nu}} \ln t_0}{\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{\nu}} + (n-r) t_0^{\hat{\nu}}} - \frac{1}{\hat{\nu}} = 0 \quad (27)$$



식(27)로부터 Newton Raphson method를 이용하여  $\hat{v}$  를 추정할 수 있으며  $\hat{v}$  을 식(26)에 대입하면  $\hat{\theta}$  를 추정할 수 있다.

신뢰도분석 소프트웨어 relest(1.0)를 이용하여 모수추정 결과 최우추정량은  $\hat{v}=2.0075$ ,  $\text{Var}(\hat{v})=0.38961$ ,  $\hat{\theta}=6068.089$ ,  $\text{Var}(\hat{\theta})=5.4857E+6$  이며, 불편추정량은  $\hat{v}=1.9751$ ,  $\hat{\theta}=6191.481$  이고 90 % 신뢰구간은  $\hat{v}=(0.84217 : 2.66486)$ ,  $\hat{\theta}=(5350.465 : 11710.75)$ 이다. 그러므로 적용할 이론분포의 확률밀도함수는 아래와 같다.

$$f_{fan}(t) = \frac{v}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{v-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^v\right] \\ = 0.000319 \left(\frac{t}{6191.481}\right)^{0.9751} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{6191.481}\right)^{1.9751}\right] \quad (28)$$

적합도검정은 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정절차를 사용하였다. K-S 검정은 고장시간자료에 의해 구한 관측값의 누적고장확률  $F_o(t_i)$ 와 이론분포의 누적분포함수  $F_e(t_i)$ 와의 차의 절대치를 구하여 이중가장 큰 값을 검정통계량 D로 놓고 적합도 허용치  $d(n, \alpha)$  와 비교하여  $D < d(n, \alpha)$ 이면 가정한 이론분포를 채택한다.

관측누적고장분포는 중앙순위법으로 중도절단 자료에 대한 누적고장분포는 식(29)에 의해 구하였으며, 이론누적값은 식(30)에 의해 구하였다. 그 결과는 <표3-5>와 같다.

$$M R_i(\%) = 100 \times \left(\frac{i-0.3}{N+0.4}\right) = F_o(t_i) \quad (29)$$

여기에서 N : 표본 수 (84 개)

i : 고장발생 순번

$$F_e(t_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^v\right] \quad (30)$$

<표3-5>에서  $D = \max |F_e(t_i) - F_o(t_i)|$  는  $D=0.0123474$  이다. K-S표에서 적합도허용치는  $d(n, \alpha) = d(84, 0.1) = 0.13311$ 이다. 그러므로  $D < d(n, \alpha)$  되어 유의수준 0.1에서 고장자료가 Weibull 분포에 적합하다고 할 수 있다.

<표3-5> 관측누적고장확률과 이론누적분포값

| 순번   | cycles  | $F_o(t_i)$ | $F_e(t_i)$ | D       |
|------|---------|------------|------------|---------|
| 1    | 460.00  | 0.0083     | 0.005872   | 0.00242 |
| 2    | 820.00  | 0.0201     | 0.018277   | 0.00186 |
| 3    | 945.25  | 0.0320     | 0.024129   | 0.00786 |
| 4    | 1383.50 | 0.0438     | 0.050509   | 0.00667 |
| 5    | 1393.50 | 0.0557     | 0.051214   | 0.00447 |
| 6    | 1565.00 | 0.0675     | 0.063978   | 0.00355 |
| 7    | 1603.75 | 0.0794     | 0.067037   | 0.01234 |
| Dmax |         |            |            | 0.01234 |

각 모듈의 고장자료 분석 결과 fan 과 core모듈은 중가고장률을 보인 반면 f.d.t 와 gearbox모듈은 일정고장률을 나타냈다.

일정고장률을 갖는 f.d.t모듈과 gearbox모듈에 대해서는 어떠한 교체 정책이든 효과가 없으므로 본 연구에서는 core모듈에 대한 fan모듈의 기회교체정책에 대해서만 분석하기로 한다.

각 모듈에 대한 분포 및 모수추정 결과는 <표3-6>과 같다.

<표3-6> 분포 및 모수추정결과

| 구분                         | fan     | core    | f.d.t   | g/b     |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 적용분포                       | weibull | weibull | exp'    | exp'    |
| $\hat{v}$                  | 1.97    | 2.296   | -       | -       |
| $\hat{\theta}$             | 6191.4  | 3646.7  | -       | -       |
| $\text{Var}(\hat{v})$      | 0.38961 | 0.15784 | -       | -       |
| $\text{Var}(\hat{\theta})$ | 5.4E+8  | 84746.1 | -       | -       |
| $\hat{\lambda}$            | -       | -       | 1.17E-4 | 7.4E-5  |
| $\hat{\mu}$                | 5488.4  | 3230.6  | 8535.8  | 13394.4 |

<표3-6>으로부터 fan모듈과 core모듈의 고장확률 밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{fan}(t) = 0.000319 \left( \frac{t}{6191.481} \right)^{0.9751} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{t}{6191.481} \right)^{1.9751} \right] \quad (31)$$

$$f_{core}(t) = 0.000629 \left( \frac{t}{3646.703} \right)^{1.29607} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{t}{3646.703} \right)^{2.29607} \right] \quad (32)$$

그러므로 위의 고장확률밀도함수를 식(16)에 대입하면 기대교체길이 E(T)를 얻는다.

$$E(T) = \int_0^n t \cdot f_{fan}(t) dt + [1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt] \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{398} \frac{2n+(2i+1)\Delta t}{2} (q_1(f_c)) + A \right) + \left( \sum_{i=0}^{398} \frac{2n+(2i+1)\Delta t}{2} (q_1(\bar{f}_c)) + B \right) + \left( \sum_{i=0}^{398} \frac{2n+(2i+1)\Delta t}{2} (q_1(\bar{k})) + C \right) \right] + N \cdot [1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt] \cdot [1 - \int_0^N f_{core}(t) dt]$$

여기에서,  $\Delta t = \frac{N-n}{400}$  이며 이는 구간 (n,N)을 400개의 구간으로 나눈 값이고

$$q_1(f_c) = \left[ \frac{\int_{n-\Delta t}^{n+(i+1)\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{n-\Delta t}^{n+(i+1)\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

$$q_1(\bar{f}_c) = \left[ \frac{1 - \int_0^{n+(i+1)\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{n-\Delta t}^{n+(i+1)\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

$$q_1(\bar{f}_c) = \left[ \frac{1 - \int_0^{n+(i+1)\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{n-\Delta t}^{n+(i+1)\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

이며 A, B, C는 최대작동한계 N 에 따라  $N=C_M$  이면

$$A = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{N-\Delta t}^N f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

B=0

$$C = \left[ \frac{1 - \int_0^N f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_0^N f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

이 되고  $N=F_M$  이면

$$A = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{N-\Delta t}^N f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

$$B = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{1 - \int_0^N f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

C=0 이 된다.

### 3.2 費用資料의 分析

비용요소는 한 주기내에서 고정비로 볼 수 있는 창정비비용 및 모듈 포장·해체 비용, 기지와 창간 수송비용과 변동비로 볼 수 있는 모듈 장·탈착 인력비용, 모듈 장·탈착 자재비용, 엔진 장·탈착 비용의 야전급 교체비용으로 구분할 수 있다.

창정비 비용은 <표3-7>의 '96 국방조달계획에 의한 정산 금액으로 하며 기지와 창간 수송비용이 포함된다.

<표3-7> 모듈 창정비비용

| 모 들     | 창정비단가 (원)   |
|---------|-------------|
| fan     | 81,929,647  |
| core    | 346,176,497 |
| f.d.t   | 56,363,011  |
| gearbox | 12,054,733  |

정비활동에 소요되는 작업별 구성인원 비용을 계산하기 위한 모듈 장·탈착 작업별 구성 소요인원에 대한 임금률은 구성원들의 요구 기술수준 호봉에 대해 '96 제급여지급기준표에 의거 월평균 급여액을 월간 근무 176 시간으로 나누어 시간당 임금률을 계산하며 그 결과는 <표3-8>과 같다.

<표3-8> 정비작업 구성원별 임금률

| 구성   | fan   | core  | f.d.t | g/b   | 포장해체  |       | 엔진장탈착 |       | 임금률<br>(원) |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
|      |       |       |       |       | 포장    | 해체    | 장탈착   | 조질    |            |
| 준위   | 1     | 1     | 1     | -     | -     | -     | -     | -     | 9095       |
| 상사   | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 7401       |
| 중사   | 1     | 1     | 1     | 1     | -     | -     | 1     | -     | 5034       |
| 하사   | 1     | 2     | 2     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2     | 3531       |
| 병    | 1     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2     | 2     | -     | 72         |
| 군무원  | 1     | 1     | 1     | -     | -     | -     | -     | -     | 6491       |
| 계(명) | 6     | 7     | 7     | 4     | 4     | 4     | 6     | 3     |            |
| 임금률  | 31626 | 35157 | 35157 | 16039 | 11077 | 11077 | 19643 | 14464 |            |

모듈을 창으로 입고하기 위한 포장과 창으로부터 모듈 수령시 포장·해체 작업에 대한 비용은 <표3-9>와 같으며 소요자재는 없다.

<표3-9> 모듈 포장·해체 인력비용

| 모듈    | 포 장 |     |       | 해 체 |     |       | 총비용<br>(원) |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|------------|
|       | 인원  | 시간  | 비용    | 인원  | 시간  | 비용    |            |
| fan   | 4   | 1.5 | 16616 | 4   | 1.5 | 16616 | 33232      |
| core  | 4   | 2.0 | 22154 | 4   | 2.0 | 22154 | 44309      |
| f.d.t | 4   | 1.0 | 11077 | 4   | 1.0 | 11077 | 22154      |
| g/b   | 2   | 1.0 | 3603  | 2   | 1.0 | 3603  | 7207       |

야전급 교체비용의 소요인원, 소요시간은 일선 야전정비부대 감독관의 경험적 판단에 의하였다. 모듈 장·탈착 작업의 소요 인력비용은 <표3-10>과 같다.

<표3-10> 모듈 장·탈착 인력비용

| 모듈    | 장 탈 |      |         | 장 착 |       |         | 총비용<br>(원) |
|-------|-----|------|---------|-----|-------|---------|------------|
|       | 인원  | 시간   | 비용(원)   | 인원  | 시간    | 비용(원)   |            |
| fan   | 6   | 40.0 | 1265064 | 6   | 50.0  | 1581330 | 2,846,394  |
| core  | 7   | 80.0 | 2812636 | 7   | 100.0 | 3515796 | 6,328,432  |
| f.d.t | 7   | 60.0 | 2109477 | 7   | 65.0  | 2285267 | 4,394,745  |
| g/b   | 4   | 8.0  | 128315  | 4   | 10.0  | 160394  | 288,710    |

모듈 장·탈착 작업의 소요자재 비용은 <표3-11>과 같다.

<표3-11> 모듈 장·탈착 자재비용(1\$=900원)

| 모듈            | 수량        | 합가(\$) | 총 비용                    |
|---------------|-----------|--------|-------------------------|
| fan<br>모듈     | 12 종 15 개 | 7.67   | 23.74 \$<br>(21366 원)   |
|               | 7 종 18 개  | 13.89  |                         |
|               | 2 종 3 개   | 2.18   |                         |
| core<br>모듈    | 2 종 6 개   | 5.79   | 152.45 \$<br>(137205 원) |
|               | 1 종 3 개   | 2.25   |                         |
|               | 3 종 3 개   | 26.07  |                         |
|               | 2 종 2 개   | 10.58  |                         |
|               | 8 종 31 개  | 26.92  |                         |
|               | 1 종 2 개   | 38.26  |                         |
|               | 1 종 1 개   | 19.13  |                         |
|               | 3 종 4 개   | 10.24  |                         |
| f.d.t<br>모듈   | 12 종 23 개 | 13.32  | 37.28 \$<br>(33552 원)   |
|               | 11 종 40 개 | 22.82  |                         |
|               | 1 종 1 개   | 0.88   |                         |
|               | 1 종 2 개   | 0.26   |                         |
| gearbox<br>모듈 | 21 종 29 개 | 23.39  | 35.87 \$<br>(32283 원)   |
|               | 2 종 4 개   | 3.12   |                         |
|               | 6 종 21 개  | 9.36   |                         |

항공기에 엔진을 장·탈착시 비용은 <표3-12>와 같다. 엔진 장·탈착 작업시 소요자재는 없다.

<표3-12> 엔진 장·탈착 비용

| 구분 | 인원 | 시간  | 비용      | 총비용(원) |
|----|----|-----|---------|--------|
| 장탈 | 6  | 1.8 | 35357.4 |        |
| 장착 | 6  | 2.6 | 51071.8 |        |
| 조질 | 3  | 1.1 | 15910.9 |        |

fan 모듈의 경우 야전급 교체비용 계산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{야전 교체비용} &= \text{모듈 장·탈착 인력비용} \\
 &+ \text{장·탈착 자재비용} + \text{엔진 장·탈착 비용} \\
 &= 2,846,394 + 21,366 + 102,340.117 \\
 &= 2,970,100.117(\text{원})
 \end{aligned}$$

모듈 창정비의 한 주기에서 발생하는 비용요소를 종합하면 <표3-13>과 같다.

<표3-13> 비용요소 종합 (단위 : 원(W))

| 모 들     | F <sub>p</sub> | F <sub>d</sub> | F <sub>r</sub> |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| fan     | 33232.17       | 81929647       | 2970100.117    |
| core    | 44309.56       | 346176497      | 6567977.917    |
| f.d.t   | 22154.78       | 56363011       | 4530637.117    |
| gearbox | 7207.04        | 12054733       | 423333.937     |

<표3-13>의 추정 비용을 식(13)에 대입하면 다음과 같이 기대비용 E(C)를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 E(C) &= 33232.17 + 81929647 + 2970100.117 \\
 &\quad \cdot \{q(f) + [1-q(f)] \cdot [(Q(fc) + Q(f_c))] \} \quad (34) \\
 &= 33232.17 + 81929647 + 2970100.117 \\
 &\quad \cdot \left\{ \int_0^n f_{fan}(t) dt + [1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt] \right. \\
 &\quad \cdot \left[ \left( \sum_{i=0}^{398} \frac{\int_0^{n-(i+1)\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} - \frac{\int_0^{n-(i+1)\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right) + A \right] \\
 &\quad \left. + \left( \sum_{i=0}^{398} \frac{1 - \int_0^{n-(i+1)\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} - \frac{\int_0^{n-(i+1)\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right) + B \right\}
 \end{aligned}$$

여기에서,  $\Delta t = \frac{N-n}{400}$  이며, A, B는 최대작동한계 N

에 따라  $N - C_M$  이면

$$A = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{N-\Delta t}^N f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

B = 0

이 되고  $N = F_M$  이면

$$A = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_{N-\Delta t}^N f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

$$B = \left[ \frac{1 - \int_0^{N-\Delta t} f_{fan}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{fan}(t) dt} \right] \cdot \left[ \frac{\int_0^{N-\Delta t} f_{core}(t) dt}{1 - \int_0^n f_{core}(t) dt} \right]$$

이 된다.

### 3.3 最適 機會交替時點의 導出

식(34)의 기대비용을 식(33)의 기대교체 길이로 나누면 단위cycle 당 기대비용을 얻는다. 그러므로 이 함수를 최소화한다면 단위cycle 당 기대비용을 최소화할 수 있으며 최소기대비용을 나타내는 시점이 최적 기회교체시점이 된다. 따라서 단위cycle 당 기대비용을 E(V) 라 한다면 최적 기회교체시점을 도출하기 위한 목적함수는 다음과 같다.

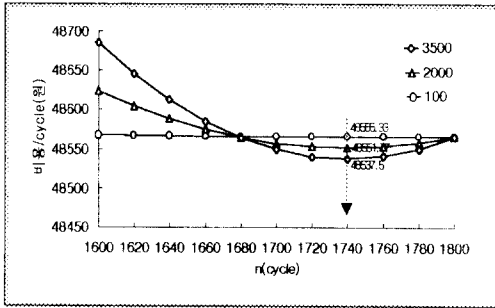
$$\text{Min } E(V) = \frac{E(C)}{E(T)} \quad (35)$$

위 목적함수에서 최적 n 값을 구하면 곧 최적 기회교체시점이다. 이 n 값을 구하기 위하여 수치적 기법을 사용한다. 그 결과는 <표3-14>과 같다. 아래 표에서는 core모들의 수명이 100, 2000, 3500cycle 일 때의 출력결과만 예로 나타낸 것이다.

<표3-14> 단위cycle 당 최소기대비용시점 n

| core수명     | 기회시점(n)    | cycle당 비용   | 기대교체길이    |
|------------|------------|-------------|-----------|
| 100, 0000  | .0000      | 51622.5900  | 1634.2580 |
| 100, 0000  | 20, 0000   | 51510.5100  | 1638.0550 |
| ~          |            |             |           |
| 100, 0000  | 1720, 0000 | 48565.3400  | 1748.7990 |
| 100, 0000  | 1740, 0000 | 48565.3300  | 1748.8120 |
| 100, 0000  | 1760, 0000 | 48565.3800  | 1748.8220 |
| 100, 0000  | 1780, 0000 | 48565.4600  | 1748.8280 |
| 100, 0000  | 1800, 0000 | 48565.5700  | 1748.8310 |
| ~          |            |             |           |
| 2000, 0000 | .0000      | 66404.6300  | 1254.1950 |
| 2000, 0000 | 20, 0000   | 65837.9400  | 1265.2500 |
| ~          |            |             |           |
| 2000, 0000 | 1720, 0000 | 48553.0200  | 1747.9650 |
| 2000, 0000 | 1740, 0000 | 48551.7700  | 1748.3440 |
| 2000, 0000 | 1760, 0000 | 48553.4600  | 1748.6140 |
| 2000, 0000 | 1780, 0000 | 48558.0700  | 1748.7760 |
| 2000, 0000 | 1800, 0000 | 48565.5700  | 1748.8310 |
| ~          |            |             |           |
| 3500, 0000 | .0000      | 191697.2000 | 427.6515  |
| 3500, 0000 | 20, 0000   | 183182.7000 | 447.5367  |
| ~          |            |             |           |
| 3500, 0000 | 1720, 0000 | 48540.3200  | 1747.0780 |
| 3500, 0000 | 1740, 0000 | 48537.5000  | 1747.8420 |
| 3500, 0000 | 1760, 0000 | 48540.7600  | 1748.3900 |
| 3500, 0000 | 1780, 0000 | 48550.1100  | 1748.7190 |
| 3500, 0000 | 1800, 0000 | 48565.5700  | 1748.8310 |

산출 결과 단위cycle 당 최소비용점이 존재하였으며 <그림3-3>은 fan모듈 수명에 대한 단위cycle 당 비용의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. <그림3-3>에서 core 모듈수명이 각 100, 2000, 3500cycle 일 때 fan 모듈의 단위cycle 당 최소비용 기회교체시점은 1740cycle 로 나타났다.



<그림3-3> fan모듈의 n 과 단위cycle 당 비용

<그림3-3>에서 보인 바와 같이 최적 기회교체시점은 현재 운영부대에서 운영하고 있는 정비정책하의 최대작동한계인 1800cycle 내에서 1740cycle 일 때 단위cycle 당 최소비용은 평균 48554원을 갖는다. 그러므로 정비작업 지원을 위하여 fan 모듈이 고장나지 않은 상태로 장탈되었을 경우 fan모듈의 수명이 1740cycle 이상이라면 잔여수명 60cycle의 사용을 위해 재장착하여 운영하는 것보다는 교체하는 것이 효과적이다. 그러나 본 연구에서는 창정비 비용자료의 제한으로 고장 및 계획 창정비 비용을 동일하다고 가정하여 단일 비용을 적용하였으므로 감도분석을 통하여 최적 기회교체시점에 미치는 변동비와 창정비비용의 범위를 알아본다. 분석 방법은 본 장에서 추정된 고장모수에 대해 변동비와 창정비비용을 하나씩 증·감시켜서 분석하였으며 분석결과는 <표 3-15>에 요약하였다.

<표3-15> 변동비와 창정비비용의 감도분석

| 구 분   | 최적해(n) | cycle/비용 | 기대주기 |
|-------|--------|----------|------|
| 연구 사례 | 1740   | -        | -    |
| 변동비   | 20% 감  | 1760     | 적어짐  |
|       | 15% 감  | 1740     | 적어짐  |
|       | 10% 증  | 1740     | 커짐   |
|       | 15% 증  | 1720     | 커짐   |
| 창정비비용 | 15% 감  | 1720     | 적어짐  |
|       | 10% 감  | 1740     | 적어짐  |
|       | 15% 증  | 1740     | 커짐   |
|       | 20% 증  | 1740     | 커짐   |
|       | 25% 증  | 1760     | 커짐   |

<표3-9>에서와 같이 본 연구에서 추정된 비용에 대하여 변동비용을 증감시켜본 결과 -15%~+10% 범위 내에서 기존 최적해를 유지하며, 창정비비용은 -10%~+20%의 증감범위 내에서 최적해를 유지한다. 추정비용이 위의 범위 내에서 변화한다면 본 연구에서 구한 1740cycle 이 최적 기회교체시점이 된다.

## 4. 結 論

본 연구는 5개의 모듈로 구성된 F16 항공기 엔진에 대하여 다른 모듈의 정비지원을 위하여 장탈된 고장나지 않은 모듈의 재장착 또는 교체여부의 판단이 요구될 때 결심을 용이하게 하는 기회교체 분기점을 찾는 것이다.

본 연구에서는 최대작동한계 내에서 단위시간당 최소비용점을 최적 기회교체시점으로 결정한 Forbes 및 Wyatt의 기회교체모형을 적용하여 엔진모듈의

최적 기회교체시점을 구하였다. 각 모듈별 고장자료를 수집하여 고장률을 검사한 결과 core모듈과 fan 모듈만이 증가고장률을 갖는 것으로 추정되어 fan모듈에 대해서만 모형에 적용하여 기회교체시점을 구하였다. 연구결과 fan모듈은 최대작동한계인 1800cycle 내에서 1740cycle을 기준으로 고장교체구간과 기회교체구간으로 나눌 수 있었다. 즉 창정비 이후 다음 창정비까지의 구간에서 fan모듈의 수명이 1740cycle까지는 고장시 교체하며 1740cycle 이후에는 고장시 교체 또는 core모듈의 상태에 따라 기회교체를 하고 1800cycle에 도달하면 창정비를 수행하는 (1740, 1800) 구조의 정비정책을 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단되었다.

그러나 본 연구에서 제시한 (1740, 1800) 구조 정비정책은 현존 자료에 의한 분석 결과이므로 앞으로 보다 많은 신뢰성 있는 자료를 획득하여 본 연구에서 제시한 방법으로 분석한다면 더욱 현실성 있는 정비정책을 수립할 수 있을 것이다.

## 參 考 文 獻

- [1] 강성진, 장비의 최적교체시기 판단에 관한 연구, 연구보고서, 국방대학원, 1991.
- [2] 공군본부, F100-PW-220 기관일반, 1991.
- [3] 미국공군, 기술지시 2J-F100-24 : Time Replacement Schedule, 1996.
- [4] 박경수, 신뢰도공학 및 정비이론, 회중당, 1993.
- [5] Elsayed, E. A., *Reliability Engineering*, Massachusetts : Addison Wesley Longman, Inc., 1996.
- [6] Forbes, J. A., and Wyatt, P.P., "Optimal Replacement Policy for the F-15 Aircraft Engine Modules," *National Technical Information Service*, AD-A016266, 1975.
- [7] Jorgenson, D.W., McCall, J.J., and Radner, R., *Optimal Replacement Policy*, Amsterdam : North-Holland Co., 1967.
- [8] Kapur, K. C., and Lamberson, L. R., *Reliability in Engineering Design*, New York : John Wiley & Sons., 1977.
- [9] Radner, R., and Jorgenson, D. W., "Opportunistic Replacement of a Single Part in the Presence of Several Monitored Parts," *Management Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 70 - 84, 1963.
- [10] Republic of Korea Air Force Workshop, *Weibull Analysis, Safety Risk Analysis and Monte Carlo Simulation*, United Technologies Pratt & Whitney, 1994.
- [11] Shooman, Martin L., *Probabilistic Reliability : An Engineering Approach*, New York : McGraw-Hill Book Company., 1968.