

## T-53엔진의 최적교체시기에 관한 연구

김충영\* · 권 준\*\*

### A Study on the Optimal Replacement Time of T-53 Engine

Chung-Young Kim\* · Jun Goun\*\*

#### ■ Abstract ■

This paper focuses on the determining the optimal replacement interval and the corresponding minimum cost of replacement for the renewal T-53 engine. It is assumed that sample failure data of T-53 engine are drawn from the mixed population, and then parameters of the failure distributions are estimated. On the basis of the above situation, the Multi-step Weibull distributions are estimated and then the optimal replacement time of T-53 engine is determined. This paper shows that if the replacement time is reduced to 2000 hours, the 2,217won of the replacement cost per unit time is not only saved but also reliability of the T-53 engine is increased.

### I. 서 론

최근에 항공기의 新機種과 舊機種이 상존하면서 舊機種의 老朽化가 加速化되고 있고 특히 UH-1H의 엔진(T-53) 중에서 90년 이후에는 新品 엔진은 들어오지 않고 있다. 현재 運用中인 航空機에는 1-8회의 再生 엔진을 사용하는 실정이다. 항공기는 안전을 고려하여 주요 장비 및 부품을 時限性 交換 品H으로 정하여 운용되고 있으

며 그 대표적인 裝備가 엔진이다. UH-1H의 엔진의 수명 시간은 新品과 再生 구별없이 2400[11]시간을 적용하고 있으며, 最大許容運用時間(2400 ± 75시간[11])을 두고 있다. 本 研究는 T-53 再生 엔진의 最適 교체 시기를 결정하는데 手案을 두고, T-53엔진에 적용할 수 있는 모형을 선정하고, T-53 再生 엔진의 고장분포를 추정하고 결과치를 모형에 적용하여 현재의 壽命 交換 週期의 改善 方案을 提示하고자 한다.

\* 국방대학원

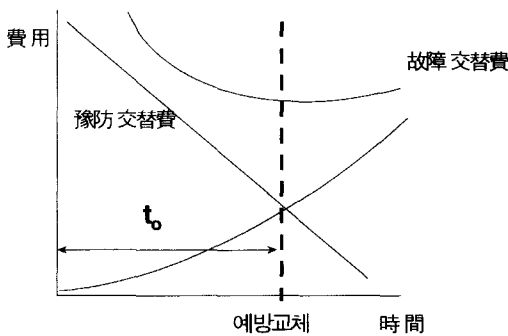
\*\* 육군

## II. 최적 교체 시기 모형

裝備交替週期는 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 하나의 교체주기는 장비를 운용 중 고장, 혹은機能 缺陷이 발생할 때 시행하는 고장교체가 이루어지는 것이고, 다른 하나는 고장이 발생하지 않더라도 고장을 방지하기 위해서 어느 일정한 時點에서 豫防 整備 計劃에 의거 豫防 交替가 이루어진다.

지금까지 장비에 관한 最適 交替 問題에 대해 다양한 研究가 進行되어왔다. 특히 Barlow와 Hunter[1]을 筆頭로 하여 수명 교체 정책이 연구되었고 Barlow 및 Proshan[2]은 체계의 고장 교체 비용과 예방 교체 비용을 고려하여 수명 교체 모형을 구성하고 단위 시간당 발생하는 평균 비용이 최소가 되는 최적 교체 주기  $t_0^*$ 를 구하였다.

T-53엔진은 고장에 의하든 豫防 交替에 의하든 交替가 이루어지면 豫防 交替 週期는 새롭게 樹立된다. 따라서 두 종류의 交替 區間이 存在한다. 하나는 장비의 壽命이  $t_0$ 에 이르러서 豫防 交替가 이루어지는 區間이고, 또 하나는 계획된 교체 시간이 되기 전에 고장에 의해서 교체가 일어나는 區間이다.



<그림 2-1> 裝備交替의 最適 交替 壽命 決定 模型

單位時間當 最小 費用을 구하기 위한 模型은 <그림 2-1>에서 보는 바와 같이 예방 교체 주기의 시간에 따라서 예방교체비와 고장교체비가 달라진다. 예방교체비와 고장교체비가 균형을 이루는 점에서 최소 비용점이 형성하게 된다. 현재 T-53엔진은

130대를 운용중에 있으며, 수명주기를 고려하면 연간 평균 13대의 재생이 이루어져야 하나 현재 삼성에서 연간 20-30대의 엔진을 재생하고 있다. 특히 96년도와 95년도에 예방 교체 엔진을 1대 만을 재생하였다. 따라서 고장교체만 거의 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

本 研究에서 설정한 기본 假定 事項은 다음과 같다.

첫째, 엔진이 故障이 나면 修理할 수 없다.

둘째, 엔진의 交替 時間은 무시될 수 있다.

셋째, 엔진 故障時의 交替 費用은 豫防 交替 費用에 비하여 많다.

넷째, 교체 시기가 되면 고장전에 교체한다.

다섯째, 2300시간 이상인 엔진은 예방 교체로 간주한다.

추가적으로 본 연구의 제한사항은 다음과 같다.

헬기와 같은 장비에 대해 고장으로 인한 인명 손실을 고려한다면 비용과 관계없이 특정 신뢰도로 결정하는 것이 바람직하다. 그러나 이 경우 고장이 나기 전에 재생하는 신뢰도를 책정해야 하므로 실제 교체정책을 결정하는데 어려움이 있다. 그래서 본 연구는 고장교체비용과 예방교체비용만을 고려하였다.

본 연구에서 사용되는 變數들을 定義하면 다음과 같다.

$t_0$  : 엔진의 壽命

$t_0^*$  : 엔진의 最適 交替 週期

$R(t)$  : 任務 t時間 동안 모든 故障 形態를 모면할 確率

$F(t)$  : 裝備 故障의 確率分布函數 (c.d.f)

$f(t)$  : 裝備 故障의 確率密度函數 (p.d.f)

MR : 중앙순위

$\beta$  : 形態母數(shape parameter : 장비의 均一성을 나타내는 縮圖)

$\eta$  : 規模母數(scale parameter : 분포의 平均値와 관련된 母數)

MCf : 平均故障 交替費用

MCp : 平均豫防 交替費用

### 2.1 단위시간당 교체비용 모형

여기서 Barlow와 Proschan이 제시한 예방 교체와 고장 교체를 고려한 단위 시간당 교체 비용 모형[3]은 다음과 같다.

$$C(t_0) = \frac{\text{週期當 總 期待 交替 費用}}{\text{期待 週期}} \quad (1)$$

그리고 주기당 총 기대교체비용은 다음과 같다.

$$MC_p R(t_0) + MC_f [1 - R(t_0)]$$

단, R(T)는 t<sub>0</sub> 시간까지 고장 없이 예방 교체할 확률

1-R(T)는 t<sub>0</sub> 시간 이전에 고장이 발생할 확률

式(1)의 期待週期(expected cycle length)는 다음과 같이 된다.

$$\int_0^{t_0} x f(x) dx + \int_{t_0}^{\infty} t_0 f(x) dx$$

$$= \int_0^{t_0} x f(x) dx t_0 \times R(t_0)$$

결과적으로 C(t<sub>0</sub>)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(t_0) = \frac{MC_p \times R(t_0) + MC_f \times [1 - R(t_0)]}{t_0 \times R(t_0) + \int_0^{t_0} t f(t) dt} \quad (2)$$

式(2)는 단위 시간당 교체비용을 나타내며 수명 주기를 구할 수 있다.

C(t<sub>0</sub>)의 최소값을 구하기 위하여 다양한 t<sub>0</sub> 값에 대하여 C(t<sub>0</sub>) 값에 代入하여 최소값을 구한다.

式(2)를 이용하여 T-53엔진의 최적 교체 주기를 산출하기 위하여 T-53엔진의 고장분포에 대한

신뢰도R(t<sub>0</sub>)와 누적분포함수F(t<sub>0</sub>), 확률밀도함수 f(t), C<sub>p</sub>, C<sub>f</sub>,  $\int_0^{t_0} t f(t) dt$ 를 정량화하여야 한다.

### 2.2 신뢰도 산출

모집단 N내에 m개의 부분모집단으로 구성되어

있고 각 부분모집단의 사상수가 N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, ..., N<sub>m</sub>개가 존재한다. i=1, 2, ..., m일 때 i번째 부분모집단에서 A사상이 발생하였다면, 이 사상의 나타날 확률은 p(A∩N<sub>i</sub>)로써 교집합(Intersection)으로 나타낼 수 있으며, 각각 이 부분집합들에서 A사건이 발생할 확률은 p(A∩N<sub>1</sub>), p(A∩N<sub>2</sub>), ..., p(A∩N<sub>m</sub>)이며, 이들이 상호배반(Mutually Exclusive)이라면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(A) = p(A \cap N_1) + p(A \cap N_2) + \dots + p(A \cap N_m)$$

$$= p(N_1)p(A | N_1) + p(N_2)p(A | N_2) + \dots + p(N_m)p(A | N_m)$$

위의 베イズ 정리를 이용하여 m개의 고장 부분 모집단으로 구성된 혼합 모집단으로부터 임의로 택한 한 구성품의 신뢰도는 각각의 고장 부분 모집단 1, 2, ..., m에서 채택될 경우는 각각의 신뢰도의 합으로 나타난다.

$$\frac{N_1}{N} R_1 + \frac{N_2}{N} R_2 + \dots + \frac{N_m}{N} R_m$$

여기서  $\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N} = 1$ 이며, 이상에서 다음과 같은 수식을 쓸 수 있다.

$$R_{1,2,\dots,m}(T) = \frac{N_1}{N} R_1(T) + \frac{N_2}{N} R_2(T) + \dots + \frac{N_m}{N} R_m(T)$$

윗 식을 미분하면 확률밀도함수를 구할 수 있다.

$$f_{1,2,\dots,m}(T) = -\frac{d}{dT} [R_{1,2,\dots,m}(T)]$$

$$= \frac{N_1}{N} f_1(T) + \frac{N_2}{N} f_2(T) + \dots + \frac{N_m}{N} f_m(T)$$

3개의 부분모집단의 와이블 분포의 신뢰도, 확률밀도함수가 존재하며, 각 부분모집단에 대한 고장시간이 Weibull 분포로 나타낼 수 있다면 다음과 같다.

$$R_{1,2,3}(t_0) = \frac{N_1}{N} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_1}{\theta_1 - \gamma_1}\right)^{\beta_1}} + \frac{N_2}{N} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_2}{\theta_2 - \gamma_2}\right)^{\beta_2}}$$

$$+ \frac{N_3}{N} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_3}{\theta_3 - \gamma_3}\right)^{\beta_3}} \quad (3)$$

$$f_{1,2,3}(t_0) = \frac{N_1}{N} \frac{\beta_1(t_0 - \gamma_1)^{\beta_1 - 1}}{(\eta_1 - \gamma_1)^{\beta_1}} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_1}{\eta_1 - \gamma_1}\right)^{\beta_1}} + \frac{N_2}{N} \frac{\beta_2(t_0 - \gamma_2)^{\beta_2 - 1}}{(\eta_2 - \gamma_2)^{\beta_2}} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_2}{\eta_2 - \gamma_2}\right)^{\beta_2}} + 1 + \frac{N_3}{N} \frac{\beta_3(t_0 - \gamma_3)^{\beta_3 - 1}}{(\eta_3 - \gamma_3)^{\beta_3}} e^{-\left(\frac{t_0 - \gamma_3}{\eta_3 - \gamma_3}\right)^{\beta_3}} \quad (4)$$

### Ⅲ. 자료수집 및 분석

T-53엔진은 삼성항공에서 재생이 되고 있으며, T-53엔진에 관한 이력부를 보유하고 있다. 따라서 삼성항공과 실무 부대에서 1990년에서 1996년에 이르는 표본 자료를 구하였다. 획득한 자료중에서 再生을 1회만 실시한 엔진은 제외시켰으며, 再生 2회이상의 재생 엔진만을 표본으로 하고 人的 過失에 의한 엔진 고장, 즉 조종사의 誤操作, 동력 초과 사용, 다른 구성품에 의한 사고로 인한 엔진 고장은 제외시켰다. 엔진의 최대 허용 시간을 고려하여 2300시간 이하에 고장난 것과 2300시간 이상 운용하다가 시간이 도달되어 豫防 交替된 엔진 중에서 제3정비장에서 분해하여 삼성항공으로 재생 의뢰한 엔진만을 선정하였다. 그러므로 최종적으로 故障 交替된 엔진 100개와 豫防 交替된 엔진 12개를 標本으로 선정하였다.

7년간의 자료를 통하여 장비의 고장구간은 0에서 2450시간이었으며 이를 100시간을 한 구간으로 하여 고장수를 파악하고 장비의 故障 特性을 파악하기 위해 度數分布表를 작성한 결과는 <表 3-1>에 기록되어있다. <表 3-1>은 T-53엔진의 구간별 중앙값과 구간별 고장수, 누적 고장수, 중앙순위를 이용한 누적 고장 분포 및 신뢰도를 나타낸다.

<表 3-1>에서 중앙순위는 다음과 같다.

$$MR = \frac{j+0.3}{N+0.4}, \quad j = C_{i-1} + \frac{x_i}{2} \quad (5)$$

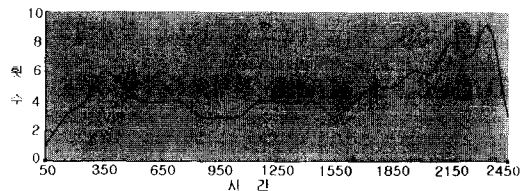
$C_{i-1}$  = i-1 구간 누적 고장수( $i=1 \sim 25$ )

N = 표본으로 사용된 엔진의 총수

<表 3-1>의 결과를 시간과 고장횟수에 대해 그림을 그리면 <그림 3-1>과 같다. <그림 3-1>에서 보는 바와 같이 시간대 별로 고장형태가 다양하기 때문에 기존의 단일분포로는 고장분포를 추정하기 곤란하다.

<表 3-1> T- 53엔진의 度數 分布表(1990-1996.4)

區 間	중앙값	故障數	累積故障	중앙순위 (MR)	(1-MR)
0-100	50	1	1	0.00628	0.99372
100-200	150	3	4	0.01957	0.98043
200-300	250	4	8	0.05071	0.94929
300-400	350	6	14	0.09520	0.90480
400-500	450	5	19	0.14413	0.85587
500-600	550	4	23	0.18416	0.81584
600-700	650	4	27	0.21975	0.78025
700-800	750	4	31	0.25534	0.74466
800-900	850	3	34	0.28648	0.71352
900-1000	950	3	37	0.31317	0.68683
1000-1100	1050	3	40	0.33986	0.66014
1100-1200	1150	4	44	0.37100	0.62900
1200-1300	1250	4	48	0.40658	0.59342
1300-1400	1350	4	52	0.44217	0.55783
1400-1500	1450	4	56	0.47776	0.52224
1500-1600	1550	3	59	0.50890	0.49110
1600-1700	1650	4	63	0.54004	0.45996
1700-1800	1750	5	68	0.58007	0.41993
1800-1900	1850	5	73	0.62456	0.37544
1900-2000	1950	6	79	0.67349	0.32651
2000-2100	2050	6	85	0.72687	0.27313
2100-2200	2150	8	93	0.78915	0.21085
2200-2300	2250	7	100	0.85587	0.14413
2300-2400	2350	9	109	0.92705	0.07295
2400이상		3	112		



<그림 3-1> T-53엔진의 시간에 대한 고장횟수

### IV. 고장 분포 함수 추정

확률용지를 사용하여 엔진의 고장분포를 추정하기로 한다. 먼저 중앙순위 백분율(MR%)를 구하고 부분표본집단으로 분리하여 다양한 고장분포함수를 추정하기 위해서 시간대 별로 개별적인 고장분포함수를 구하는 절차를 나열하면 다음과 같다.

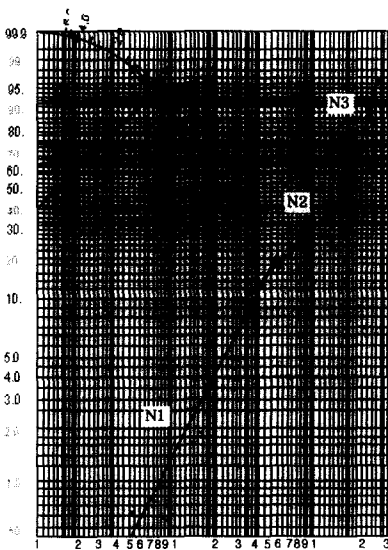
$$MR(\%) = MR \times 100 = \frac{j-0.3}{N+0.4} \times 100 \quad (6)$$

N = 標本の總 엔진數

1) 중앙순위들을 <그림 3-2>와 같이 Weibull 확률용지에 각 부분집단의 중앙순위에 대응되게 찍는다. 이것은 단지 <表 3-1>의 자료를 부분표본집단으로 나누기 위한 것이므로 Weibull 분포의 모수가 결정되는 것은 아니다.

2) 중앙순위(MR(%))를 이용하여 점들을 찍어보면 그룹으로 나눌 수 있는지를 결정할 수 있고, 각 그룹에 속하게 되는 점들을 확인한 후에 부분표본집단으로 나눈다.

3) <表 3-1>과 <그림 3-2>에서 보면 점1부터



<그림 3-2> 3개의 部分標本集團의 그래프

점5; 部分標本集團1에, 점6부터 점15는 部分標本集團2에 그리고 점15이후의 점들은 部分標本集團3에 포함된다. 각 부분표본집단을 대표하는 최적 직선을 그리고 각 부분 표본 집단의 고장수 N1, N2 그리고 N3를 구하면 <그림 3-2>와 같이 나타낼 수 있다.

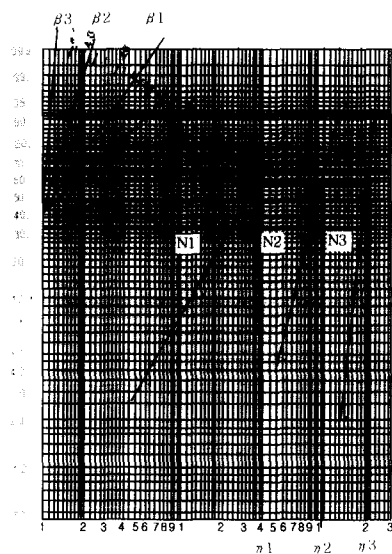
4) 3개의 부분표본집단을 알아낸 다음 각 부분표본집단을 분리하여 Weibull 用紙에 그려 분포의 모수를 결정한다. 이 때에 分離된 標本の 크기 N1, N2, N3를 考慮하여 部分標本集團1,2,3의 새로운 中央順位를 式(7)로부터 계산한다.

$$MR_i(\%) = \frac{j-0.3}{N_i+0.4} \times 100 \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

단, N<sub>i</sub> = 각 部分標本集團의 엔진의 數

5) <表 3-2>에서 각 부분표본집단의 중앙순위를 용지에 표시하고, 이 표시한 점들을 통과하는 최적 직선을 긋고, Weibull 확률용지의 사용 절차에 따라 각각의 직선에서 部分標本集團의 母數들을 추정할 수 있다. 그 결과는 <그림 3-3>과 같다.

6) <그림 3-3>에서 形態母數 β는 Weibull 確率



<그림 3-3> 個別 Weibull 分布 母數決定을 위한 그래프

用紙 縱軸의 40%수준에서 各 部分標本集團의 點들을 대표하는 直線에 平行하게 그어 “weibull 기울기”라 새겨진 눈금과 만나게 된다. 規模母數  $\eta$ 는 縱軸의 63.2% 水準에서 直線에 水平線을 그어 만나는 점으로부터 垂線을 내려 橫軸과 만나는 점이다.

<表 3-2> 3개의 部分標本集團의 壽命資料

부분표본집단1 (N1=19)				
구간	중앙값	고장수	누적 고장수	중앙순위 (MR <sub>i</sub> %)
0-100	50	1	1	3.60825
100-200	150	3	4	11.34021
200-300	250	4	8	29.38144
300-400	350	6	14	55.15464
400-500	450	5	19	83.50515
부분표본집단2 (N2=37)				
구간	중앙값	고장수	누적 고장수	중앙순위 (MR <sub>i</sub> %)
500-600	550	4	4	4.54545
600-700	650	4	8	15.24064
700-800	750	4	12	25.93583
800-900	850	3	15	35.29412
900-1000	950	3	18	43.31551
1000-1100	1050	3	21	51.33689
1100-1200	1150	4	25	60.69519
1200-1300	1250	4	29	71.39037
1300-1400	1350	4	33	82.08556
1400-1500	1450	4	37	92.78075
부분표본집단3 (N3=56)				
구간	중앙값	고장수	누적 고장수	중앙순위 (MR <sub>i</sub> %)
1500-1600	1550	3	3	2.21277
1600-1700	1650	4	7	8.33333
1700-1800	1750	5	12	16.31206
1800-1900	1850	5	17	25.17731
1900-2000	1950	6	23	34.92908
2000-2100	2050	6	29	45.56738
2100-2200	2150	8	37	57.97872
2200-2300	2250	7	44	71.27660
2300-2400	2350	9	53	85.46099
2400이상	2450	3	56	96.09929

7) 最小自乘法에 의한 故障分布推定

위와같은 그래프 이용법은 그래프를 이용하여 분포를 평가하고 母數를 推定하는 方法으로서 간단하게 活用할 수 있으나, 그래프상의 점들을 선으로 연결하여 直線으로 決定하는 過程에서 分析者의 主觀的 判斷에 影響을 받을 수 있으므로 客觀性이 缺如될 수 있다.

따라서 精確한 母數 推定을 위하여 最小 自乘法(LSE : least square estimation)으로 回歸 分析(regression)을 하여 直線을 맞추어 母數를 推定하고 分布를 評價할 수 있다.

Weibull 分布의 累積確率分布를 나타내는 직선을 만들기 위해서

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{8}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

이고, 위 함수에 逆를 취하면

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{9}$$

이며, 自然 代數를 두 번 계속 취하면

$$\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta, \tag{10}$$

$$\ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right] = \beta \ln \frac{1}{\eta} + \beta \ln t \tag{11}$$

이 된다. 여기서 式(11)의 각 항을

$$Y = \ln\left[\frac{1}{1 - F(t)}\right]$$

$X = \ln t$ ,  $A = \beta \ln \frac{1}{\eta}$ 로 각각 두면  $Y = A + \beta X$ 라는 直線 方程式이 된다.

蒐集한 資料를 정리한 결과는 <表 3-3>과 같다. <表 3-3>를 이용한 最小自乘法의 計算方法은 다음과 같다.

$$\beta_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} = 1.7227$$

$$\bar{\beta}_0 = \bar{Y} - \bar{\beta}_1 \bar{X} = -10.3216$$

$$\frac{1}{\eta_1} = e^{\frac{\bar{\beta}_0}{\bar{\beta}_1}} = e^{\frac{-10.3216}{-1.7227}}, \quad \eta_1 = \frac{1}{e^{-5.7991}} = 400$$

윗 식에 <表 3-3>의 값을 代入하면 故障分布函數를 구할 수 있다. <表 3-4>의 母數들과 部分標本集團의 크기를 式(3)에 代入하면 Weibull 신뢰도 함수를 얻는다.

<表 3-3> 最小 自乘計算表

部分 標本 集團 1 (i= 1-5)				
고장순서	X=Inti	Y=lnln[1/(1-F(ti))]	X2	XY
1	3.9120	-3.3036	15.3039	-12.9239
2	5.0106	-2.1172	25.1065	-10.6090
3	5.5215	-1.0559	30.4865	-5.8301
4	5.8579	-0.2207	34.3154	-1.2929
5	6.1092	0.5890	37.3229	3.5981
평균	5.2823	-1.2217	28.5070	-5.4115
部分 標本 集團 2 (i= 1-10)				
고장순서	X=Inti	Y=lnln[1/(1-F(ti))]	X2	XY
1	6.3099	-3.0679	39.8151	-19.3580
2	6.4770	-1.7997	41.9512	-11.6560
3	6.6201	-1.2032	43.8254	-7.9651
4	6.7452	-0.8317	45.4982	-5.6099
5	6.8565	-0.5662	47.0111	-3.8822
6	6.9565	-0.3282	48.3935	-2.2828
7	7.0475	0.0685	49.6675	-0.4825
8	7.1309	0.2243	50.8497	1.5994
9	7.2079	0.5421	51.9532	3.9072
10	7.2793	0.9664	52.9885	7.0346
평균	6.8631	-0.6133	47.9534	-3.8696
部分 標本 集團 3 (i= 1-10)				
고장순서	X=Inti	Y=lnln[1/(1-F(ti))]	X2	XY
1	7.3460	-3.8394	53.9639	-28.2040
2	7.4085	-2.4417	54.8863	-18.0900
3	7.4674	-1.7255	55.7616	-12.8850
4	7.5229	-1.2377	56.5946	-9.3112
5	7.5756	-0.8447	57.3895	-6.3990
6	7.6256	-0.4972	58.1497	-3.7918
7	7.6732	-0.1427	58.8784	-1.0951
8	7.7187	0.2211	59.5781	1.7067
9	7.7622	0.6566	60.2513	5.0970
10	7.8038	1.1768	60.9000	9.1836
평균	7.5904	-0.8675	57.6350	-6.379

$$R_{1,2,3}(t) =$$

$$\frac{19}{112} e^{-\left(\frac{t}{400}\right)^{1.7227}} + \frac{37}{112} e^{-\left(\frac{t}{1132}\right)^{2.6291}} + \frac{56}{112} e^{-\left(\frac{t}{2165}\right)^{8.6722}} \quad (12)$$

여기서 세 weibull 분포는 상호배반(mutually exclusive)라고 가정할 수 있어야 한다.

式(12)는 곧, 裝備의 豫測 信賴度Rc(t)가 되므로 裝備의 豫測 累積故障分布는 式(13)과 같다.

$$F_c(t) = 1 - R_c(t) \quad (13)$$

또한 <表 3-4>에 나타난 표본의 統計量들을 式(4)에 代入하면 豫測된 確率密度函數를 얻는다.

$$f_{1,2,3}(t) = \frac{19}{112} \frac{1.7227}{400} \left(\frac{t}{400}\right)^{0.7227} e^{-\left(\frac{t}{400}\right)^{1.7227}} + \frac{37}{112} \frac{3.6291}{1132} \left(\frac{t}{1132}\right)^{2.6291} e^{-\left(\frac{t}{1132}\right)^{2.6291}} + \frac{56}{112} \frac{9.6722}{2165} \left(\frac{t}{2165}\right)^{8.6722} e^{-\left(\frac{t}{2165}\right)^{8.6722}} \quad (14)$$

<表 3-4> 部分標本集團의 統計量

集團區分 / 母數區分	部分 標本 集團1 (N1=19)	部分 標本 集團2 (N2=37)	部分 標本 集團3 (N3=56)
形態母數	β1 = 1.7227	β2 = 3.6291	β3 = 9.6722
規模母數	η1 = 400	η2 = 1132	η3 = 2165

표본의 統計量과 式(12) 그리고 式(14)가 <表 3-1>에 주어진 資料의 信賴度 및 累積故障分布의 特性을 충분히 나타내고 있는가를 알아보기 위해서 Kolmogorov-Smirnov 適合度 檢定을 하였다. 이 검정은 式(13)의 豫測 累積故障分布 Fc(T)와 式(15)의 觀測 累積故障分布 Fo(T)를 比較하는 것이다.

이들의 값은 <表 3-5>에 이미 계산되어 있고, D의 값은 다음 式으로부터 얻어진 것이다.

$$D = |F_c(t) - F_o(t)| \quad (15)$$

이렇게 하여 얻어진 D의 최대값을 D의 許容值 Dc와 比較하여 보았다. 이때 주어진 有意水準(significance level)에서 Dmax < Dc 일 때 檢定結果에

대해 만족하게 되는 것이다.

<表 3-5>와 Kolmogorov-Smirnov 適合度 檢定 도표에서 표본수 36이상일 때 有意水準 5%는  $\frac{1.36}{\sqrt{112}}$  이다. 따라서 최대값과 허용치의 비교는 다음과 같다.

$$D_{max}=0.0582 < D = \frac{1.36}{\sqrt{112}} = 0.1285$$

그러므로, 제기된 方法은 T-53엔진의 故障分布를 豫測함에 있어 95%의 만족할 만한 結果를 提示하고 있다.

### V. 고장교체비용 및 예방교체비용

$C_p$ (豫防交替費用)은 수명 주기에 도달하여 예방 교체후 제거된 엔진(표본12대)재생시 대당 재료비와 인건비를 포함한 비용이다. 再生時 費用을 年度別로 경제 통계에 따른 실제 금리를 기준으로 연 이자율을 10%를 적용하여 산출하였는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum C_p &= 99080(1+0.1) + \frac{153753(1+0.1)^2}{2} \\ &+ \frac{181057(1+0.1)^3}{3} + \frac{102266(1+0.1)^4}{2} \\ &+ \frac{88023(1+0.1)^5}{2} + \frac{78763(1+0.1)^6}{2} \\ &= 497850.1 \\ MC_{D_2} &= \frac{497850.1}{6} = 82975.02(\text{단위:1000원}) \end{aligned}$$

$C_f$ (故障交替費用)은 엔진고장이 발생하여 고장 교체후 제거된 엔진(표본100대) 재생시 대당 재료 비용과 인건비를 포함한 비용이다. 이 비용에 대한 연도별 합계를 산출하였는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum C_f &= \frac{524046}{5} + \frac{2271003(1+0.1)}{18} \\ &+ \frac{1721562(1+0.1)^2}{18} + \frac{1540431(1+0.1)^3}{17} \end{aligned}$$

<表 3-5> 3개의 部分標本集團의 累積故障分布의 豫測值와 觀測值

區 間	중앙값	累積 故障數	觀測故 障分布	豫測故 障分布	$D= F_n(T)-F_0(T) $
0-100	50	1	0.0089	0.0047	0.0042
100-200	150	4	0.0357	0.0288	0.0069
200-300	250	8	0.0714	0.0623	0.0091
300-400	350	14	0.1250	0.0976	0.0274
400-500	450	19	0.1696	0.1312	0.0384
<b>500-600</b>	<b>550</b>	<b>23</b>	<b>0.2054</b>	<b>0.1472</b>	<b>0.0582</b>
600-700	650	27	0.2411	0.1940	0.0471
700-800	750	31	0.2768	0.2272	0.0496
800-900	850	34	0.3036	0.2636	0.0400
900-1000	950	37	0.3304	0.3035	0.0269
1000-1100	1050	40	0.3571	0.3451	0.0120
1100-1200	1150	44	0.3929	0.3860	0.0069
1200-1300	1250	48	0.4286	0.4234	0.0052
1300-1400	1350	52	0.4643	0.4553	0.0090
1400-1500	1450	56	0.5	0.4818	0.0182
1500-1600	1550	59	0.5268	0.4936	0.0332
1600-1700	1650	63	0.5625	0.5283	0.0342
1700-1800	1750	68	0.6071	0.5574	0.0497
1800-1900	1850	73	0.6518	0.5974	0.0544
1900-2000	1950	79	0.7053	0.6523	0.0531
2000-2100	2050	85	0.7589	0.7229	0.0360
2100-2200	2150	93	0.8304	0.8039	0.0265
2200-2300	2250	100	0.8928	0.8830	0.0988
2300-2400	2350	109	0.98214	0.9453	0.0369
2400이상	2450	112	1	0.9818	0.0182

$$\begin{aligned} &+ \frac{1384967(1+0.1)^4}{16} + \frac{949230(1+0.1)^5}{13} \\ &+ \frac{662573(1+0.1)^6}{13} = 814845 \end{aligned}$$

$$MC_f = \frac{814845}{7} = 116406.429$$

단, 단위는 1000원

### VI. T-53엔진의 수명 주기 도출

T-53엔진의 표본을 사용하여 추정된 고장분포 함수의 모수를 式(3), (4)에 대입하면 다음 결과를 얻는다.



$$R(T) = \frac{19}{112} e^{-\frac{t}{112}} + \frac{37}{112} e^{-\frac{t}{112} \cdot 0.7227} + \frac{56}{112} e^{-\frac{t}{112} \cdot 0.6291} \quad (16)$$

$$\int_0^t t f(t) dt = \int_0^t 0.00073 t \left(\frac{t}{400}\right)^{0.7227} e^{-\frac{t}{112} \cdot 0.7227} dt + \int_0^t 0.00106 t \left(\frac{t}{1132}\right)^{2.6291} e^{-\frac{t}{112} \cdot 0.6291} dt + \int_0^t 0.002273 \left(\frac{t}{2165}\right)^{8.6722} e^{-\frac{t}{112} \cdot 0.6291} dt \quad (17)$$

여기서 세 Weibull 분포는 주어진 자료 범위내에서 한 분포가 다른 분포에 주는 영향은 극히 미미하여 무시할 정도로 작으므로 상호배반이라고 간주할 수 있다.

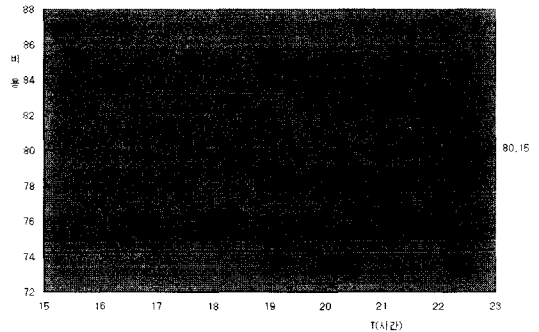
위에서 산출된 式(16), (17)과 平均豫防交替費用(MC<sub>p</sub>) 및 平均故障交替費用(MC<sub>f</sub>)을 式(2)에 代入시켜 t<sub>0</sub>시간을 100시간 단위로 변화시켜 C(t<sub>0</sub>)값을 계산할 수 있다. 최종 C(t<sub>0</sub>)값을 구한 결과는 <表 3-6>과 같으며, 단위시간당 비용이 적은 시간대 부분을 그림으로 나타내면 <그림 3-4>와 같다.

<表 3-6>과 <그림 3-4>에서 재생엔진은 현재의 수명주기보다 적은 2000시간에서 최소 비용점임을 알 수 있고, 신뢰도가 31.4%로써 현재보다

<表 3-6> 單位 時間當 最小費

T時間推定	平均壽命(MTTF)	故障交替確率	豫防交替確率	單位時間當費用
100	99	0.0149	0.9851	839464
200	196	0.0450	0.9550	429847
300	290	0.0800	0.9200	295048
1500	1036	0.4936	0.5064	87028
1600	1091	0.5162	0.4838	84034
1700	1143	0.5418	0.4582	81539
1800	1192	0.5757	0.4243	79615
1900	1239	0.6228	0.3772	78380
2000	1358	0.6858	0.3142	77933
2100	1386	0.7627	0.2373	78221
2200	1406	0.8446	0.1554	79064
2300이상	1417	0.9171	0.0829	80150

30%가량 증가함을 알 수 있다. 따라서 단위 시간당 최저 비용과 신뢰도를 증가 할 수 있는 2000시간을 교환주기로 재설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.



<그림 3-4> <表 3-6>에 의한 C(t)의 한 형태

## VII. 결 론

本 研究에서는 현 陸軍의 主力 機動 헬기인 UH-1H의 엔진을 對象으로 사고 위험성과 교체 비용을 절감할 수 있는 最適 交替 模型을 구성하고, 最適 壽命 時間을 구하는데 주안을 두었다.

T-53 엔진의 故障에 관한 표본을 분석한 결과, 分布를 算出時 기존의 單一 分布로는 故障의 分布를 推定하기 곤란하였다. 따라서 엔진의 故障 分布를 混合 分布 集團으로 분류방법을 적용하여 확률 용지와 최소 자승법에 의하여 Weibull 분포의 다수의 모수를 추정하였다.

예측된 T-53엔진의 고장분포를 통하여 수명구간내 최소점을 산출한 결과, 연간 항공기 가동시간 240시간[10]을 고려한다면 현재 2400시간(10년)을 엔진의 교환주기로 하고 있으나 2000시간(8년)으로 하향 조정하는 것이 단위 시간당 교체 비용을 최소화할 수 있으며, 장비의 신뢰도를 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다.

本 研究에서 壽命 週期를 延長하는 것이 費用을 최소화하지 않는다는 것과 信賴度를 더욱 떨어뜨린다는 것을 발견할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Balow, R. E., & L. C. Hunter, "Optimal Preventive Maintenance Policies," *Operations Research*, Vol.8(1960), pp.90-100.
- [2] Balow, R. E. and Proschan F., *Mathematical Theory of Reliability*, Wiley & Sons, New York(1965).
- [3] Balow, R. E. and Prochan F., *Statistical Theory of Reliability and Life Testing Probability Models*, Holt, Rinehart and Winston Inc, New York(1975).
- [4] Gerald, J. Glasser., "Planned Replacement Some Theory and Its Application," *Journal of Quality Technology*, Vol.1(Apr., 1969), pp. 110-119.
- [5] Lawrence, M. Leemis., *Reliability Probabilistic Models and Statistical Methods*, Hall International Inc, New York(1995).
- [6] Robert, L. Launer., "Graphical Techniques for Analyzing Failure Data with the Percentile Residual-Life Function," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol.42(1993), pp.71-75.
- [7] 권 준, 「T-53 엔진의 최적교체시기에 관한 연구」, 국방대학원 석사논문, 1996.
- [8] 金成鎬, 「시스템 信賴度 工學」, 國防科學研究所, 1982.
- [9] 朴景洙, 「信賴度 工學 및 整備 理論」, 희중당, 1989.
- [10] 陸軍本部, 「陸軍規定 441-3」, 1988.
- [11] 陸軍本部, 「陸軍規定 360-3」, 1988.
- [12] 陸軍本部, 「UH-1H헬기 엔진 기술 회보(sb0001)」, 1992.
- [13] 陸軍本部, 「航空安全」, 通卷 92호, 1995.