

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.781

## 항공기 정비계획을 위한 J79 엔진 Transfer Gearbox의 고장데이터 분석

최재만\*† · 양승효\*\* · 황영하\*\* · 손익상\*\* · 온용섭\*\*\* · 김영진\*\*\*\*

\* 군용항공기 감항인증센터, \*\* 공군 군수사령부, \*\*\* 충남대학교 항공우주공학과, \*\*\*\* 국방기술품질원

### Failure Data Analysis of J79 Engine Transfer Gearbox for Aircraft Maintenance Planning

Jae Man Choi\*†, Seung Hyo Yang\*\*, Young Ha Hwang\*\*, Ik Sang Son\*\*, Yong Sub On\*\*\*  
and Young Jin Kim\*\*\*\*

\* Military Airworthiness Certification Center,

\*\* Air Force Logistics Command,

\*\*\* Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

\*\*\*\* Defense Agency for Technology and Quality

(Received July 30, 2009 ; Revised April 21, 2010 ; Accepted April 21, 2010)

**Key Words:** Bathtub Curve(욕조곡선), Failure Data(고장 데이터), Failure Mode(고장모드), Lognormal Distribution(대수정규분포), Maintenance Planning(정비계획), Median Rank(중위수 순위법), MTBF(평균 고장간격시간), Normal Distribution(정규분포), Optimal Replacement Interval(최적 교체간격), Reliability Analysis(신뢰성 분석), Weibull Distribution(와이블분포)

**초록:** 고장의 특성을 예상하는 것은 미래의 고장을 예견하고 최적의 교체간격을 결정할 수 있도록 해주기 때문에 정비 계획에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 신뢰도 해석에서 가장 전통적인 방법 중의 하나인 확률지에 도시하는 기법을 이용하여 J79 엔진 Transfer Gearbox의 고장 분포를 검토하였다. 고장 데이터에 대한 적절한 분포를 찾기 위해서 다양한 확률분포가 이용되었으며, 얻어진 상관계수는 고장데이터가 대수정규분포에 가장 근접함을 나타내었다. 예상되는 비계획 정비행위의 횟수와 다양한 비용 비율에 대해서 최적의 교체간격을 구하였다.

**Abstract:** Forecasting possible failure characteristics is very important in maintenance planning because it helps in predicting any future failures and determining the optimum replacement interval. This paper examines the time-to-failure distribution of the transfer gearbox of a J79 engine by using a probability plotting technique which is one of the most convenient techniques for reliability analysis. Various probability distributions are evaluated for determining the suitable probability distribution of the failure data of the transfer gearbox, and the resulting correlation coefficient indicates that failure data have a lognormal distribution. The expected number of unscheduled maintenance actions and the optimum replacement interval for various values of cost ratios are determined.

### 1. 서 론

최근 기술의 발전과 함께 제품의 구조 및 기능이 복잡·다양해지면서 제품의 신뢰성에 대한 사회 전반의 인식이 점점 높아지고 있다. 특히 첨단기술의 집약체인 항공기를 운영하는 공군에서는 고도의 신

뢰도가 요구되어, 항공기에 대한 신뢰성을 분석하기 위해 운영 중 발생하는 고장 데이터의 수집 및 분석체계를 구축하여 계획정비의 효율성 향상과 경제적인 군수지원을 도모하기 위한 노력을 하고 있다. 본 연구에서는 F-4 항공기에 장착되어 가혹한 조건에서 사용되는 J79 Engine Transfer Gearbox에 대한 고장데이터를 수집하여 분석하였다. 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function), 누적분포함수

† Corresponding Author, zanychoi@gmail.com

(CDF, Cumulative Distribution Function), 고장률 함수 (Failure Rate Function) 등과 같은 주요 신뢰성 척도를 결정하고, 얻어진 신뢰성 척도를 이용하여 예상 비계획정비 회수와 다양한 비용비율에서 최적 교체 간격을 결정하고자 한다.

## 2. 고장데이터의 신뢰성 분석절차

### 2.1 신뢰성 분석절차 개요

현장에서 얻어진 고장데이터를 가지고 신뢰성 분석을 수행하기 위해서는 분석목적에 파악하여, 적절한 데이터 수집방법과 분석절차를 설계해야 한다. 일반적으로 신뢰성 분석을 위해서는 확률지나 고장률 용지를 사용하여 분포를 확인하고 모수를 추정하는 확률지 이용 방법이 있으며, 다른 방법으로는 수명분포의 확률특성을 이용하는 방법이 있다. 수명분포의 특성을 이용하는 방법은 확률지를 이용한 방법보다 정확한 통계적 특성을 알 수 있으나 분석절차가 복잡한 단점이 있어, 본 연구에서는 확률지를 이용하여 간단하게 분포를 확인하고 모수에 대한 추정을 실시할 수 있는 방법을 이용하였다.<sup>(1,2)</sup>

확률지를 이용하여 신뢰성을 분석하는 일반적인 절차를 살펴보면, 데이터의 분포 형태를 파악하기 위하여 히스토그램을 작성하고, 히스토그램의 형태에 따라 몇 개의 예상 분포를 결정한다.

확률분포에 수집된 수명데이터를 크기로 순서화하여, 데이터를 확률지에 타점하고 선형 회귀 분석(Linear Regression Analysis)을 실시하여 상관 계수(Correlation coefficient)가 가장 큰 분포를 데이터에 적합한 분포로 가정한다.

그리고 가정된 분포에 대한 적합성을 검토하기 위해 Kolmogorov-Smirnov 검정<sup>(3)</sup>을 수행하여 채택되는 경우에 신뢰성 척도를 계산한다. 앞에서 설명한 절차를 나타내면 Fig. 1과 같다.

### 2.2 J79 엔진 Transfer Gearbox 신뢰성 분석

#### 2.2.1 Transfer Gearbox의 기능 및 형태

Transfer Gearbox는 Fig. 2와 같이 J79 엔진하부에 장착되어 엔진 시동 및 장착된 각종 보기류(Accessory)의 펌프를 구동시킨다.<sup>(4)</sup>

#### 2.2.2 고장데이터 현황 및 고장모드

Transfer Gearbox의 고장데이터는 최근 발생된

고장을 3개 비행단으로부터 수집하였으며, 데이터의 현황은 1시간에 해당하는 비행회수를 단위로 하여 Table 1과 같다.

또한 수집된 고장데이터에 대해서 고장모드(Failure Mode)를 분류해 보면, Fig. 3과 같이 마모가 Transfer Gearbox의 주요한 고장모드가 되고 있다.

## 3. 신뢰성 분석결과

### 3.1 신뢰성 분석절차 적용

앞에서 언급한 신뢰성 분석절차를 수집된 모든 고장데이터에 적용하였다. 먼저 고장데이터의 분포 유형을 파악하기 위해 히스토그램을 작성한 결과 Fig. 4와 같은 비대칭형의 분포를 나타내었다.

이와 같은 비대칭형의 분포에 대해서는 2-모수 와이블분포, 3-모수 와이블분포 또는 대수정규분포를 확률분포로 선정하고 신뢰성 분석을 실시하나, 본 연구에서는 대칭형의 분포인 정규분포도 포함하여 2-모수 와이블분포, 3-모수 와이블분포, 대수정규분포를 이용하여 신뢰성을 분석하였다.

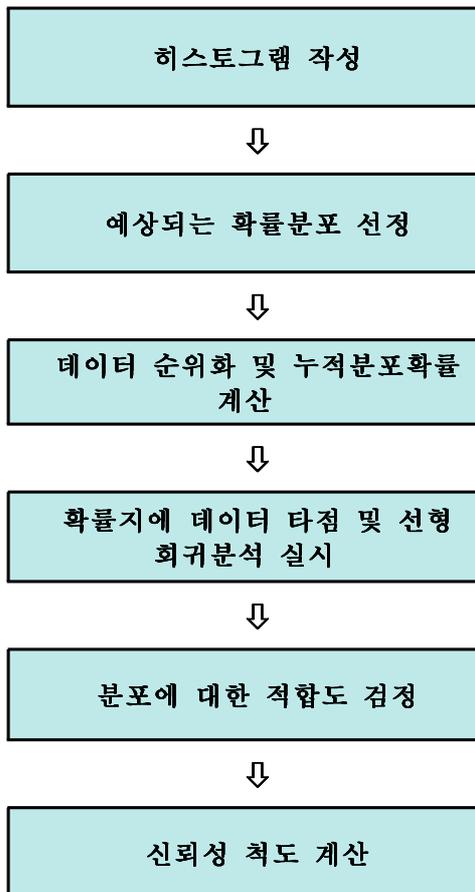
다음은 고장데이터를 고장시간을 작은 것부터 큰 것으로 정렬한 순서통계량에 대해 비대칭형의 분포에 적합한 중위수 순위법(Median Rank)을 이용하여 Table 2와 같이 누적분포확률을 계산하였다.

Table 1 Failure data of transfer gearbox

구 분	고장데이터(Sortie)
A 비행단	416, 1041, 569, 445, 435, 724, 790, 805, 898, 369, 806, 792, 843, 1297, 524, 842, 524, 305, 841, 823, 523, 515, 522, 519, 524, 1538, 520, 524, 516, 1535, 777, 524, 524, 671, 523, 523, 524, 1450, 523, 812, 948, 517, 524, 972, 544, 925, 440, 855, 515
B 비행단	557, 316, 467, 575, 473, 475, 699, 467, 895, 948
C 비행단	312, 474, 366, 474, 474, 743, 475, 959

**Table 2** Median ranking for probability plotting

<i>i</i>	고장시간 (Sortie)	누적고장확률
		$F(t) = \frac{(i - 0.3)}{(N + 0.4)} \times 100$
1	305	1.04
2	312	2.52
3	316	4.01
⋮	⋮	⋮
64	1297	94.51
65	1450	95.99
66	1535	97.48
67	1538	98.96



**Fig. 1** Process of reliability analysis



(a) J79 Engine



(b) Front view of transfer gearbox



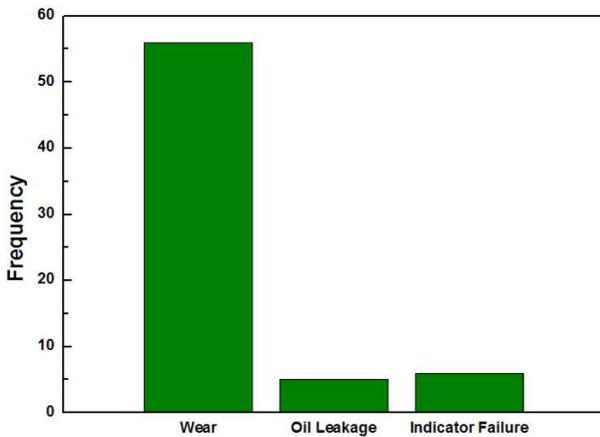
(c) Rear view of transfer gearbox

**Fig. 2** J79 Engine transfer gearbox configuration

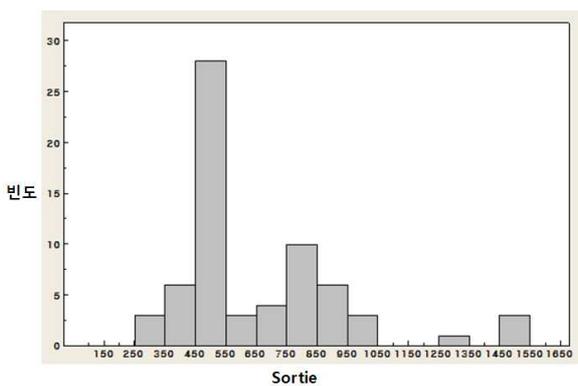
고장데이터의 시간  $t$ 와 누적분포확률  $F(t)$ 를 각각의 확률지에 타점하고 이에 대해서 선형 회귀분석을 실시한 결과는 Fig. 5와 같으며, 대수정규분포의 상관계수가 가장 커서 수집된 고장데이터에 대해서 적합한 분포로 판단되었다. Table 3은 각각의 분포에 대해서 선형 회귀분석에 대한 상관계수를 나타내었다.

**Table 3** Linear regression analysis results

구 분	상관계수(R)
정규분포	0.9174
대수정규분포	0.969
2-모수 와이블분포	0.919
3-모수 와이블분포	0.967



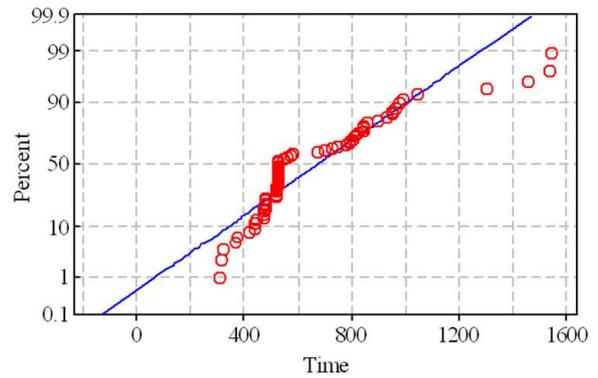
**Fig. 3** Failure modes



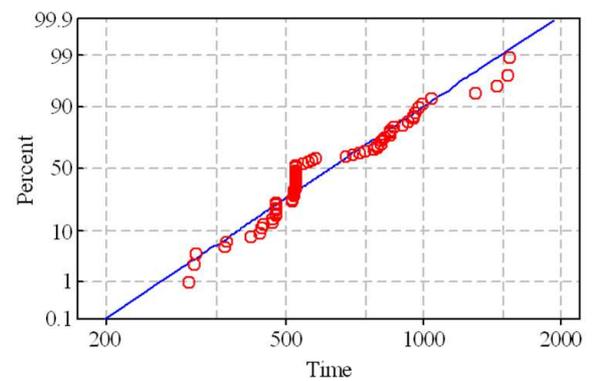
**Fig. 4** Histogram

다음은 Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정(K-S test)을 이용하여 고장데이터에 적합한 분포로 추정된 대수정규분포에 대해서 검정을 실시하였다.

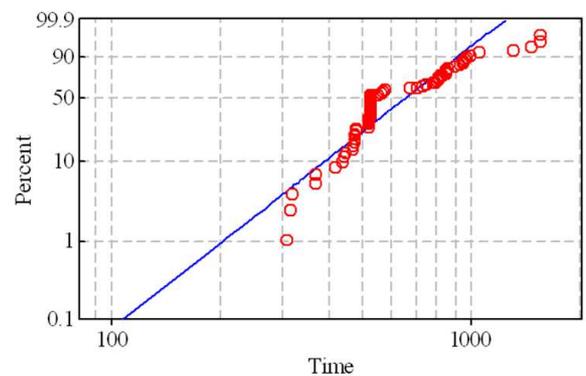
K-S 검정은 누적분포함수  $F(t)$ 에 대해 유의수준(Significance Level)에 의해서 결정되는 D값만큼 떨어진 두 개의 곡선을 그려 데이터가 두 개의 곡선으로 이루어진 영역에 포함되면 가정된 분포를 채택하는 방법이다. 본 연구에서는 95% 유



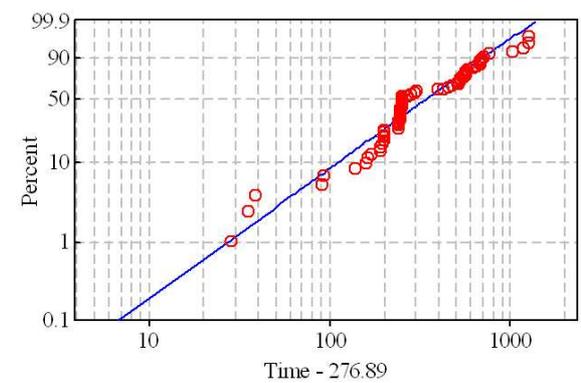
(a) Normal distribution



(b) Lognormal distribution



(c) 2-parameter Weibull distribution

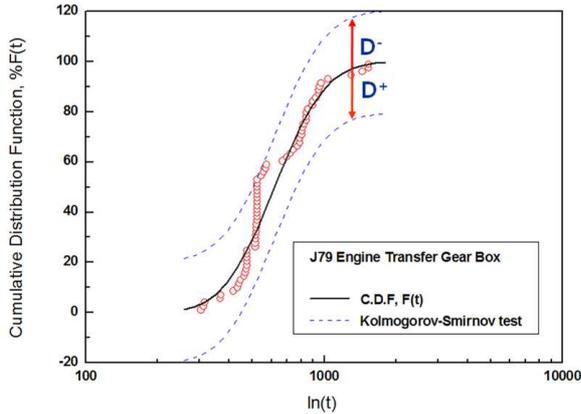


(d) 3-parameter Weibull distribution

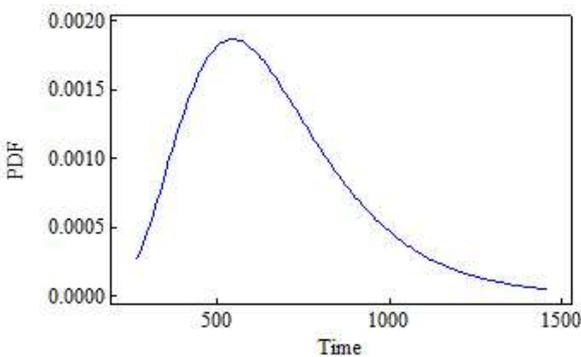
**Fig. 5** Probability plotting for failure data

**Table 4** Reliability statistics

구분	관계식
확률밀도함수 $f(t)$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$
누적분포함수 $F(t)$	$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx$
신뢰도함수 $R(t)$	$R(t) = 1 - F(t)$
고장률함수 $h(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$



**Fig. 6** Kolmogorov-Smirnov test

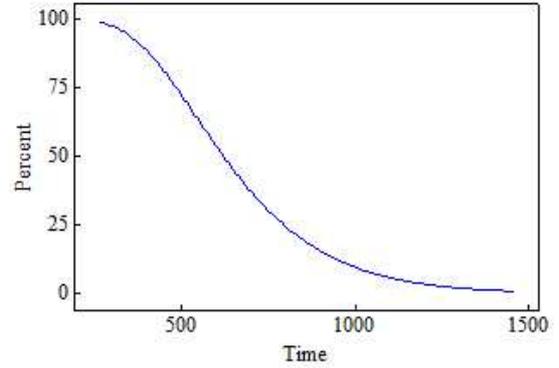


**Fig. 7** Probability density function

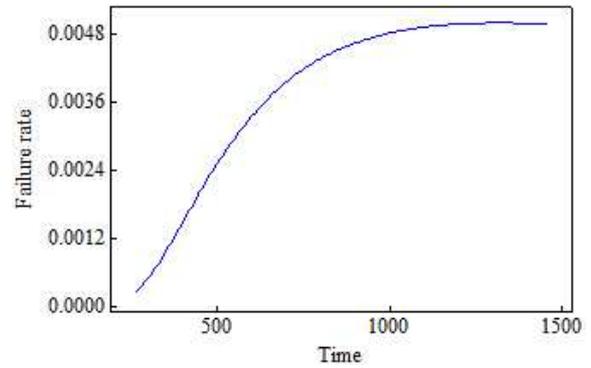
의 수준에서  $D=0.17$ 을 적용하여 검정을 실시한 결과 Fig. 6과 같이 채택되었다.

3.2 주요 신뢰성 척도

신뢰성 분석절차를 통해 Transfer Gearbox의 고장데이터는 대수정규분포를 따르는 것으로 판단

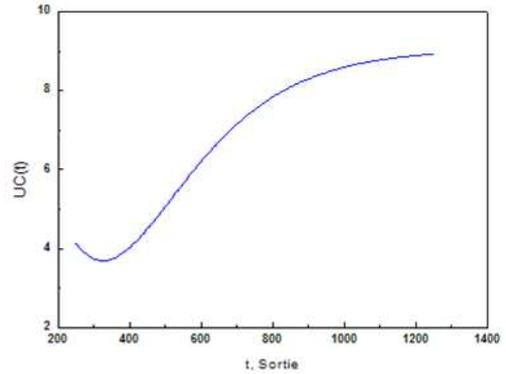


(a) Reliability function



(b) Failure rate function

**Fig. 8** Reliability function and failure rate function



**Fig. 9** Variation of total cost over time for  $C_u/C_p=4$

되었다. 대수정규분포에 대해서 Table 4와 같이 다양한 신뢰성 척도를 결정할 수 있다.

확률밀도함수(PDF)는 Fig. 7과 같은 형태이며 대수정규분포의 위치모수( $\mu$ )와 척도모수( $\sigma$ )는 각각  $\mu=6.4288$ ,  $\sigma=0.3657$ 로 추정되었다.

Transfer Gearbox에 대한 신뢰도함수(Reliability Function)와 누적분포함수의 관계는 Fig. 8(a)와 같으며, 시간  $t$ 가 경과함에 따라 신뢰도는 점점 감소하며, 고장발생 확률은 점점 증가되는 것을 알 수 있다.

Table 5 B-life

구분	100P <sub>th</sub> 백분위수 (Sortie)	95% 신뢰구간 (하한)	95% 신뢰구간 (상한)
B1	262.1	218.9	313.9
B5	337.2	292.0	389.4
B10	385.6	340.0	437.7

고장률함수(Failure Rate Function)는 신뢰도함수와 일대일 대응관계가 성립되어, 신뢰도함수로부터 고장률함수를 구할 수 있다. Transfer Gearbox에 대한 고장률함수의 형태는 일반적으로 욕조곡선(Bathtub Curve)상에서 나타나는 고장률 형태와 달리 Fig. 8(b)와 같이 처음 일정기간 동안 증가하다가 나중에는 감소하는 형태(Upside down bathtub failure rate)를 나타내고 있다. 이러한 경향변동의 특성으로 인해 대수정규분포가 수리시간 등을 나타내는 분포 등에 적절한 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

3.3 신뢰성 추정

Transfer Gearbox는 고장이 발생하기 전에 계획적으로 주어진 시간마다 교체 및 조정을 실시하는 예방정비(Preventive Maintenance) 개념을 적용하고 있어, 평균 고장간격시간(MTBF, Mean Time Between Failure), 백분위 수명(B-life), 예상되는 비계획정비 회수, 최적 교체간격 등에 대한 정보가 요구되어 이에 대한 분석을 실시하였다.

3.3.1 평균 고장간격시간(MTBF)

평균 고장간격시간(MTBF)은 고장이 발생하면 부품을 수리하여 다시 사용할 경우의 평균고장간격을 의미한다. Transfer Gearbox의 경우에도 이에 해당되며 대수정규분포를 따르는 경우에 MTBF는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며, 666.5 Sortie로 계산되었다.

$$MTBF = \frac{T(t)}{r} \quad (1)$$

여기서  $T(t)$ 는 총 사용시간,  $r$ 은 고장의 수이다.

3.3.2 백분위 수명(B-life)

제품의 품질보증에 관련해서는 앞에서 구한 평균 고장간격시간(MTBF)보다 백분위 수명이 보편적으로 이용된다.<sup>(6)</sup> 1% 백분위수(B1), 5% 백분위

Table 6 Optimal replacement interval for various cost ratios

구분	비용 비율( $C_u/C_p$ )				
	2	4	6	8	10
최적 교체간격 (Sortie)	516	364	324	303	289

수(B5), 10% 백분위수(B10)를 구한 결과는 Table 5와 같으며, 전체 Transfer Gearbox의 10%가 고장되는 B10 수명은 식 (2)와 같이 계산되며 B10 수명은 385.6Sortie로 계산되었다.

$$\int_0^{B_{10}} f(t)dt = 0.1 \quad (2)$$

3.3.3 예상 비계획정비 회수

연간 발생 예상되는 비계획정비 회수(Expected number of unscheduled maintenance actions)  $m(t)$ 를 구하기 위해서 식 (3)을 이용하였다.<sup>(7)</sup>

$$m(t) = \frac{T}{MTBF} \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 연간 비행회수(160Sortie), MTBF는 666.5Sortie이다. Transfer Gearbox에 대해서 식 (3)을 적용해 보면  $m(160) = 0.24$ 로 고장으로 인해 연간 1회 이하의 비계획 정비행위가 요구됨을 알 수가 있다.

3.3.4 최적 교체간격

최적의 엔진 Transfer Gearbox 교체시간을 추정하기 위해서 작동 기간당 총 예상비용을 최소화 하는 지점을 최적 교체간격(Optimum replacement interval)로 결정하였다. 예방정비 활동비용  $C_p$ 는 고장이 발생하기 전에 정비활동을 수행하여 소요되는 비용, 사후정비 활동비용  $C_u$ 는 고장이 발생된 후 이를 정비하기 위해 소요되는 비용을 의미한다. 따라서 총 예상비용은 예방정비 활동비용과 사후정비 활동비용의 합으로 식 (4)과 같다.

$$C_t = C_p \cdot R(t) + C_u \cdot F(t) \quad (4)$$

또한 작동 기간당 총 예상비용은 식 (4)와 같이 나타내며, 최적 교체간격은 식 (5)를  $t$ 에 관해 식 (6)과 같이 미분하여 최소 비용이 되는 지점을 결정한다.<sup>(8,9)</sup>

$$UC(t) = \frac{C_t}{\int_0^t R(s)ds} \quad (5)$$

$$\frac{d[UC(t)]}{dt} = 0 \quad (6)$$

본 연구에서는 다양한 비용비율(Cost Ratio)  $C_u/C_p$ 에 대해서 Transfer Gearbox의 최소 비용의 최적 교체간격을 계산하였으며 얻어진 결과는 Table 6과 같다. 비용비율( $C_u/C_p$ )가 4인 경우를 살펴보면, 시간에 따른 총비용의 변화는 Fig. 9와 같고 최적 교체간격은 364Sortie로 결정되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 J79 엔진 Transfer Gearbox에 대한 고장데이터를 이용하여 신뢰성 분석을 수행하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) Transfer Gearbox의 고장데이터에 적합한 분포는 위치모수( $\mu$ ) 6.4288과 척도모수( $\sigma$ ) 0.3657인 대수정규분포로 추정되었다.

(2) 결정된 신뢰성 척도를 이용하여 얻어진 평균 고장 간격시간은 666.5Sortie, B10은 385.6Sortie, 연간 비계획정비 회수는 0.24로 계산되었다.

(3) 최적의 Transfer Gearbox 교체간격을 추정하기 위해 다양한 비용비율에 대해서 최소 비용의 최적 교체간격을 결정하였다.

#### 후 기

본 연구는 공군 항공기술연구소의 적극적인 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Choi, J.M., Kwon, Y.H., Choi, H.S., Yang, S.H., Woo, S.W., Cho, S.M. and Lee, S.J., 2009, "Statistical Analysis for NDI Results of Aircraft Engine Component for Determining Crack Initiation Period," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 12, pp. 1482~1487.
- (2) Song, J.H. and Park, J.H., 2007, *An Introduction to Reliability Engineering in Mechanical Design*, Intervision, Seoul, pp. 189~208.
- (3) Leemis, Lawrence M, 1995, *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*, Prentice-Hall, New York, pp. 273~300.
- (4) Technical manual T.O. 2J-J79-86-5, *Cleaning, Inspection and Repair*.
- (5) Jeong, H.S., Kwon, Y.I., and Park, D.H., 2007, *Reliability Test Analysis and Evaluation*, Youngchi Publication.
- (6) Kamins, M. and McCall, J.J., 1961, "Rules for Planned Replacement of Aircraft and Missile Parts," *Memorandum RM-2810-PR*, Rand Corporation.
- (7) Wolstenholme, L.C., 1999, *Reliability Modelling: A Statistical Approach*, Chapman & Hall/CRC, New York
- (8) Park, K.S., 1993, *Reliability Engineering*, Heejung Publication, Seoul, pp. 427~443.
- (9) Kang, Y.S., Kim, T.G. and Hwang, Y.H., 2007, *Reliability Engineering and Application*, Donghwa Publication, Seoul, pp. 265~277.