

균열발생시기 결정을 위한 항공기 엔진 구성품의 비파괴검사 결과에 대한 통계적 분석

최재만[†] · 권영한* · 최환서* · 양승효* · 이상욱* · 조순미* · 이승주**
(2009년 8월 27일 접수, 2009년 10월 5일 수정, 2009년 10월 17일 심사완료)

Statistical Analysis for NDI Results of Aircraft Engine Component for Determining Crack Initiation Period

Jaeman Choi, Younghan Kwon, Hwanseo Choi, Seunghyo Yang, Sangwook Woo, Soonmi Cho and Seungjoo Lee

Key Words: Quantal Response Data(계수반응자료), Maximum Likelihood Estimation(최우추정법), Bathtub Curve(욕조곡선), Preventive Maintenance(예방정비), Corrective Maintenance(사후정비)

Abstract

In this study statistical analysis was performed for NDI(Non-Destructive Inspection) results of F100 engine front seal support assembly. NDI results can be statistically considered as Quantal Response Data. It is found that the suitable probability distribution to the failure data is normal distribution through MLE(Maximum Likelihood Estimation) of the Quantal Response Data. Moreover, Cumulative Distribution Function, failure rate function and B-Life are calculated on the supposed distribution.

1. 서 론

최근 개발된 항공기의 경우에는 파손-안전설계(Fail-Safe Design)개념을 발전시킨 손상허용설계(Damage Tolerant Design)개념이 적용되고 있다.^(1,2)

손상허용설계개념에서는 구조물에 처음부터 결함(Defect)이나 균열(Crack)의 존재를 가정하고, 이러한 결함이나 균열이 성장하여도 주기적인 검사 간격 기간 내에서는 구조물 전체가 위험할 수준까지는 진전하지 않도록 하는 방법이다.⁽³⁾

손상허용설계를 적용하기 위해서는 초기 균열

크기(Initial Crack Size), 균열진전속도평가, 불안정 파괴를 일으키는 균열길이, 검사기간(Inspection Period) 등이 주요 변수가 된다.

공군은 이와 같이 설계된 항공기 구조물의 건전성을 유지하기 위해 구조물에 존재하는 미세한 균열 또는 결함을 다양한 비파괴검사(NDI, Non-Destructive Inspection)를 통해 탐지하여 항공기와 조종사를 위협하는 중요부위 파괴의 발생을 방지하고 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 단순히 균열 또는 결함의 존재 여부 확인에만 활용되는 비파괴검사 결과에 대해서, 통계적 분석을 수행하여 균열 또는 결함 발생이 시작된 시간분포를 추정하고, 이를 바탕으로 정기적인 점검시점에서의 균열발생 확률을 계산하고자 한다.

2. 비파괴검사

2.1 비파괴검사의 개요

비파괴검사는 구조물을 손상시키거나 파괴하

[†] 책임저자, 회원, 공군 군용항공기 감항인증센터

E-mail : zanychoi@gmail.com

TEL : (055)850-4792

* 공군 항공기술연구소

** 공군 군수사령부 군수관리단

Table 1 Types of NDI

구 분	검사 원리
육안검사 (Visual Inspection)	인간의 시각작용
침투검사 (Penetrant Inspection)	침투 작용
와전류검사 (Eddy current Inspection)	전자유도 작용
자분탐상검사 (Magnetic Particle Inspection)	자기 작용
초음파검사 (Ultrasonic Inspection)	펄스반사 작용
방사선투과검사 (Radiographic Inspection)	투과성

지 않고 재료의 물리적 성질을 이용하여 균열 또는 결함의 존재여부, 내부의 상태를 검사하는 방법으로, 생산품의 품질관리 및 부품의 치수 등을 파악하는데 널리 사용되고 있다.

공군의 경우에는 민간의 건축물이나 다른 수송 기기검사에 비해 엄격한 기준을 항공기 비파괴검사에 적용하고 있으며, 일반적으로 사용되는 비파괴 검사의 종류는 Table 1과 같다.⁽⁵⁾

다양한 검사방법 중에서 본 연구에서는 침투검사방법을 통해서 얻어진 검사결과를 이용하였다. 침투검사방법은 표면에 있는 균열 또는 결함부위에 형광물질 또는 적색염료를 함유하고 있는 침투액을 도포하여 침투액을 충분히 결함내부에 침투시킨 후, 검사체 표면에 있는 침투액을 제거하여 결함을 검출하는 방법이다. Fig. 1은 침투검사의 한 예이며 그림과 같이 균열 또는 결함부위를 나타내도록 하는 방법으로, 거의 모든 재료에 적용이 가능하고 현장에서 신속히 균열 또는 결함을 발견할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽⁶⁾

2.2 Front Seal Support Assembly의 기능 및 형태

Front Seal Support Assembly는 Fig. 2(a)와 같은 형태로 F100 엔진에 장착된 베어링을 고정하는 역할을 담당하며, Fig. 2(b)에 있는 용접부위에 대

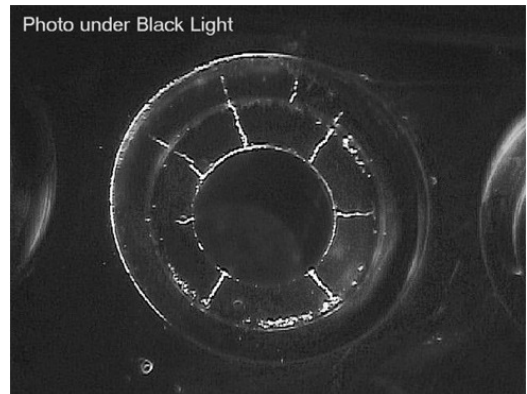
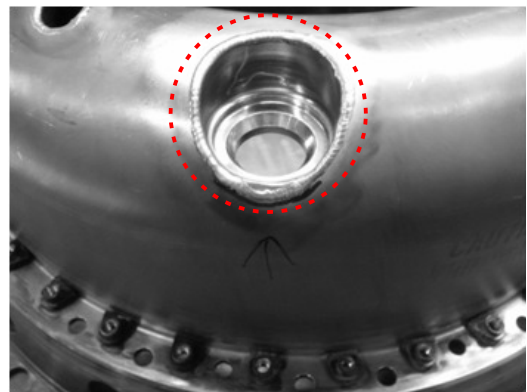


Fig. 1 Example of Penetrant Inspection



(a) Front Seal Support Assembly



(b) NDI Location

Fig. 2 F100 Engine Front Seal Support Assembly

해서 침투검사를 수행하여 균열 또는 결함 존재 여부를 확인하고 있다.⁽⁷⁾

2.3 비파괴검사 결과

정비를 위해 입고된 42개의 Front Seal Support Assembly에 대해서 1회 침투검사 시 얻어진 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 NDI Results

구 분		단 위 : TAC	
4277.00-	4277.42-	4270.65-	4256.95-
4024.48-	4057.90-	4286.75-	4595.67+
4608.90-	4217.45-	4053.05-	4203.05-
4094.90-	4051.85-	4534.98-	4629.90+
4147.30-	4260.67-	4639.85+	4263.40-
4632.85+	4626.65+	4294.02-	4636.60-
4623.02+	4617.52-	4215.05-	4275.15-
4524.95+	4598.63-	4627.10-	4268.58-
4249.58-	4616.00-	4290.20-	4247.10-
4633.25-	3996.35-	3911.18-	4284.93-
4233.92-	4289.33-		

여기서 “+”는 검사 시 균열이 없는 것, “-”는 검사 시 균열이 발견된 것을 나타내며, 단위로 사용된 TAC은 Total Accumulated Cycle로 총 누적 사이클 수를 나타낸다.

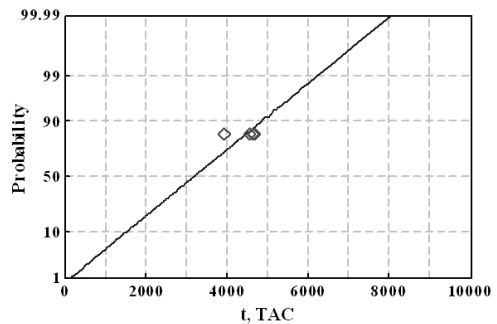
3. 비파괴검사 결과의 통계적 분석

3.1 통계적 분석방법

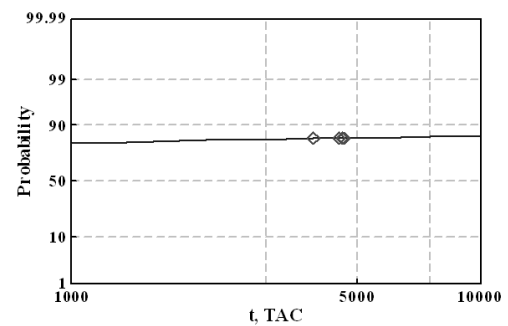
수집된 비파괴검사 결과는 특정시점에 대해서 검사를 수행하였으며, 비파괴검사 결과는 검사 당시에 Front Seal Support Assembly의 용접부에 균열 존재여부만을 나타내는 형태의 자료이다. 이와 같은 자료의 형태를 계수반응자료(Quantal Response Data)라고 한다.⁽⁸⁾

얻어진 계수반응자료에 가장 적합한 분포를 선택하기 위해서 Fig. 3과 같이 정규분포, 대수정규분포, 지수분포, 2-모수 와이블분포를 대상으로 대수 우도함수(Log-Likelihood)를 최소화 하는 최우추정법(MLE, Maximum Likelihood Estimation)을 이용하여 A-D(Anderson-Darling) 통계량을 기준으로 가장 적합한 분포를 선택하였다.⁽⁹⁾

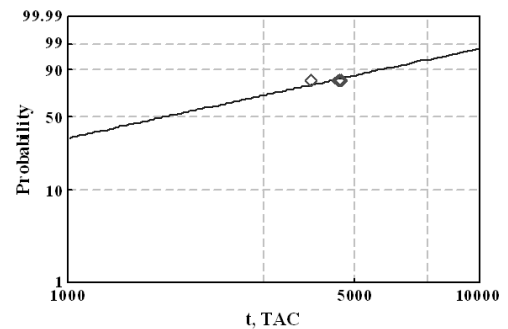
A-D 통계량은 확률지에 도시된 점과 이들을 적합한 직선의 대응점 또는 경험적 누적분포함수와 이론적 분포함수와 차이를 측정하는 값으로, 꼬리 부분에 큰 가중치를 부여하여 적합된 직선과 도시된 점과의 가장된 제공거리를 구한 값이다.



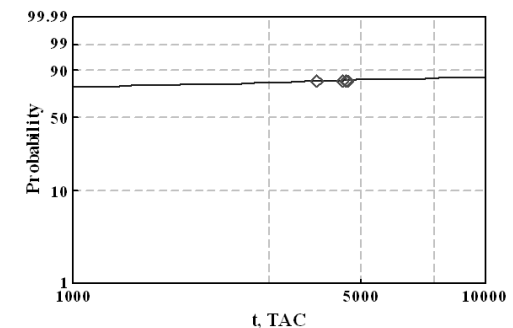
(a) Normal Distribution



(b) Lognormal Distribution



(c) Exponential Distribution



(d) 2-Parameter Weibull Distribution

Fig. 3 Probability Plotting for Failure Data

Table 3 A-D(Anderson-Darling) Statistics

구 분	A-D 통계량
정규분포 (Normal Distribution)	5.625
대수정규분포 (Lognormal Distribution)	7.886
지수분포 (Exponential Distribution)	6.987
2-모수 와이블분포 (2-Parameter Weibull Distribution)	7.818

Table 4 Reliability Statistics

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

4개의 분포에 대해서 적합한 분포를 확인하기 위해서 Table 3과 같은 A-D 통계량 값을 얻었으며, 적합된 직선과 도시된 점과의 가중된 제곱거리를 구한 값이 가장 작은 A-D 통계량 값을 가진 정규분포가 데이터에 가장 적합한 것으로 추정되었다.

3.2 주요 신뢰성 척도

Front Seal Support Assembly의 용접부의 비파괴 검사결과가 정규분포를 추정되므로 Table 4와 같이 다양한 신뢰성 척도를 결정할 수 있다.⁽¹⁰⁾

정규분포로 가정한 Front Seal Support Assembly의 균열발생 시점에 대한 확률밀도함수(PDF)는 Fig. 4와 같은 좌우대칭형태이며, 평균(μ)과 표준편차(σ)는 각각 3108.21, 1257.46으로 추정되었다.

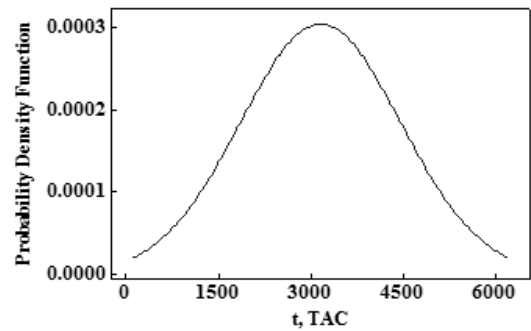


Fig. 4 Probability Density Function

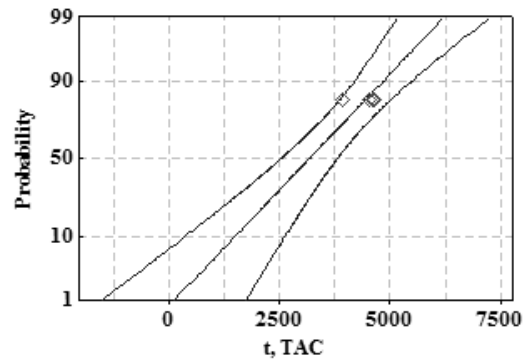
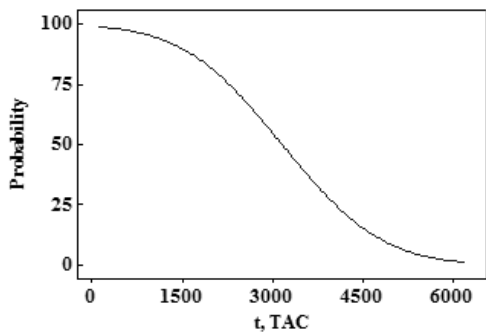


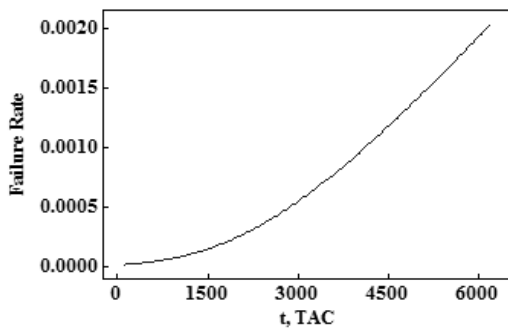
Fig. 5 Cumulative Distribution Function

표본에서 얻어진 정보를 이용하여 모수의 참값이 속할 것으로 판단되는 범위를 신뢰구간(Confidence Interval)이라고 하며, Front Seal Support Assembly의 비파괴검사 결과에 대한 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)에 대해 95% 신뢰수준을 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5를 보면 신뢰구간이 상당히 넓게 추정되고 있으며, 이는 데이터의 수가 적고 균열여부에 대한 제한적 정보에 기인한 것으로, 추가적인 데이터의 확보가 요구됨을 알 수 있다.

고장률함수(Failure Rate Function) h(t)는 신뢰도함수 R(t)와 일대일 대응관계가 성립되어, 신뢰도함수로부터 고장률함수를 구할 수 있다. 신뢰도함수는 Fig. 6(a)와 같이 시간이 경과함에 따라 신뢰도가 서서히 감소되는 경향을 보이며, 고장률함수의 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 고장률이 점점 증가하는 형태(IFR, Increasing Failure Rate)를 나타내어, Front Seal Support Assembly는 사용시간이 경과함에 따라 균열발생이 증가되는 부품임을 알 수 있다.



(a) Reliability Function



(b) Failure Rate Function

Fig. 6 Reliability Function and Failure Rate Function

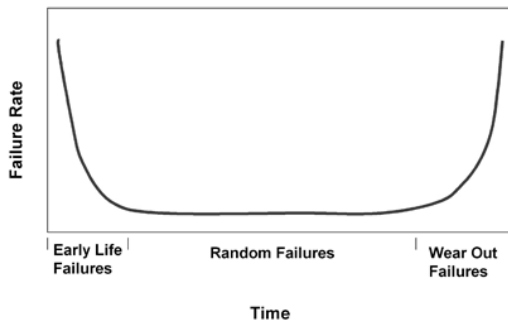


Fig. 7 Bathtub Curve

이와 같이 고장률이 증가하는 경우에는 Fig. 7과 같은 욱조곡선(Bathtub Curve)에서 마모고장(Wear Out Failure)에 해당되어, 정기적인 수리 및 부품 교체를 통하여 고장을 방지하는 예방정비(Preventive Maintenance) 또는 고장이 발생된 후 부품을 교환 또는 정비하는 사후정비(Corrective Maintenance)로 상승하는 고장률을 감소시킬 수 있다.⁽¹¹⁾

3.3 백분위 수명(B-Life)

제품의 품질보증에 관련해서는 평균고장시간(MTTF)보다 백분위 수명(B-Life)이 보편적으로 이용된다.⁽¹²⁾ Front Seal Support Assembly에 대해서

Table 5 B-Life

구 분	100P _{th} 백분위수	95% 신뢰구간 (하한)	95% 신뢰구간 (상한)
B10	1496.71	335.12	2658.29
B50	3108.21	2449.40	3767.02
B82.8	4300	3745.53	4899.79
B90	4719.71	4092.24	5347.18
B95	5176.55	4440.70	5912.39
B99	6033.55	5029.37	7037.63

백분위 수명을 구한 결과는 Table 5와 같으며, 전체 Front Seal Support Assembly의 10%가 용접부에서 균열이 발생하는 시점(B10)은 1496.71 TAC이며, 정기적인 비파괴검사가 수행되는 약 4300 TAC에서의 균열발생확률은 82.8%임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Front Seal Support Assembly의 용접부에 균열 존재여부만을 나타내는 계수반응자료(Quantal Response Data)인 비파괴검사결과를 이용하여 균열발생시기를 결정하기 위해서 통계적 분석을 수행하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) Front Seal Support Assembly에 대한 1회 검사 데이터에 적합한 확률분포는 평균(μ) 3108.21 TAC과 표준편차(σ) 1257.46 TAC인 정규분포(Normal Distribution)로 추정되었다. 데이터의 수가 적어 95% 신뢰구간(Confidence interval)이 상당히 넓게 추정되어 추가적인 데이터의 확보가 요구되나, 비파괴검사 결과와 같은 계수반응자료를 이용하여 부품의 수명을 제한적이지만 예측할 수 있었다.

(2) 고장률의 형태는 시간이 경과함에 따라 점점 증가하는 형태로 욱조곡선(Bathtub Curve)상에서 마모고장(Wear Out Failure)에 해당되어, Front Seal Support Assembly는 사용시간이 경과함에 따라

균열발생이 증가되는 부품임을 알 수 있다. 이와 같이 고장률이 증가하는 부품의 경우에는 정기적인 수리 및 부품 교체를 통하여 고장을 방지하는 예방정비 또는 고장이 발생된 후 부품을 교환 또는 정비하는 사후정비로 상승하는 고장률을 감소시킬 수 있다.

(3) 또한 전체 Front Seal Support Assembly의 10%가 용접부에서 균열이 발생하는 시점인 B10 수명은 1496.71 TAC이며, 실제로 정비부서에서 정기적인 비파괴검사가 수행되는 약 4300 TAC 시점에서 균열발생 확률은 82.8%로 계산되었다.

후 기

본 연구는 공군 항공기술연구소 부품개발평가실의 적극적인 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Alten F. Grandt Jr., 2004, *Fundamentals of Structural Integrity: Damage Tolerant Design and Nondestructive Evaluation*, John Wiley & Sons, pp. 18~23.
 (2) Ralph I. Stephens, 1980, *Metal Fatigue in*

Engineering, John Wiley & Sons, pp. 23~25.
 (3) ASM International, 1996, *ASM Handbook Vol. 19*, pp. 373~380.
 (4) Technical Manual T.O. 3B-1-1, *Nondestructive Inspection Methods*.
 (5) ASM International, 1995, *Nondestructive Testing*, pp. 1~13.
 (6) Park, E.S., Park, E.K., and Song, S.J., 2001, *NDE Engineering*, Hakyawn Publication.
 (7) Technical manual T.O. 2J-F100-53-7, *Core Module*.
 (8) Nelson, W., 1982, *Applied Life Data Analysis*, John Wiley & Sons, pp. 405~410.
 (9) Leemis, Lawrence M, 1995, *Reliability: Probabilistic models and Statistical methods*, Prentice-Hall, New York, pp. 273~300.
 (10) Jeong, H.S., Kwon, Y.I., and Park, D.H., 2007, *Reliability Test Analysis and Evaluation*, Youngchi Publication.
 (11) Lee, S.Y., 2003, *Reliability Engineering*, Hyungseul Publication, pp. 31~36.
 (12) Patrick, D.T. O'Corner, 2002, *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 229~235.