2005 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회
2005 년 5 월 13 일~14 일, 충북대학교

확률효과회귀모형을 이용한 공군 전투기 모듈의 동적 예방정비 주기 예측

손소영, 윤경복

연세대학교 정보 산업 공학과

전화 : +82-2-2123-4014, 팩스 : +82-2-364-7807

E-mail : sohns@yonsei.ac.kr, ykb@yonsei.ac.kr

요 약

전투기를 적절히 정비하는 활동은 공군력을 유지하는데 중요하다. 일반적인 정비정책은 정해진 일정으로 주요 모듈의 정비를 수행한다. 그러나, 이러한 정비활동은 시간에 따라 변하는 모듈의 특성을 반영할 수 없다. 이에 본 연구는 변동되는 평균 고장간 시간(MTBF) 과 평균 수리 시간 (MTTR)을 산출할 수 있는 확률효과회귀모형을 이용하여 시간에 따라 변동되는 모듈의 특성을 반영한 동적 예방정비 주기를 예측하고자 한다. 본 연구의 결과는 대한민국 공군의 전투 준비 태세 향상에 이바지 할 것으로 기대된다.

핵심어 : 예방정비, 전투기, 확률효과 Weibull-Inverse gamma 모형, 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간

1. 서 론

국방력의 핵심인 전투기를 구성하는 주요 모듈의 고장은 전투기 가동률의 저하와 국방비의 낭비 또는 능력있는 조종사의 희생과 같은 중대한 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제를 사전에 예방하고 전투기의 제 기능을 효과적으로 발휘 시키기 위해서는 적절한 정치정책이 필요 하다. 이에, 대한민국 공군은 일정한 주기로 전투기의 주요 모듈에 대한 예방정비를 수행하고 있다(공군 참모총장, 2000).

그러나 전투기내 주요모듈의 일정한 정비주기는 변동되는 모듈의 특성을 반영하지 못한다. 이에 전투기의 주요 모듈에 동적인 예방정비 주기를 적용할 필요성이 있다.

예방 정비문제는 다양한 방법으로 다루어지고 있다. 본 논문에서는 수명자료분석의 관점에서 이 문제를 다루고자 한다. 예방 정비 문제는 일반 수명자료 회귀모형 또는 수명 분포 의 모수중 하나를 변수로써 고려하는 확률효과 회귀모형으로 다루어 지고 있다. Fleming and Assis (1999)는 EMB-120 항공기 타이어의 고장시간을 Weibull 분포로 가정하여 비용을 최소화 하는 예방 정비 주기를 산출하였다. 그리고, Gertsbakh and Kordonsky (1997)는 단일 정비 및 교환 주기 동안 운영되는 장비의 최적 정비 주기를 예측하기 위해서 피해 누적 모델을 제안하였다. Grigoriev 외 2 명(2005)은 정수계획법을 이용하여 정수 비용계수 및 장비 운영과 총 서비스 비용을 최소화 하는 정비주기를 제안하였다. 확률 효과 모형으로 Sheu 외 3 명 (1999)은 시스템의 고장시간이 Weibull 분포를 따른다고 가정하고 최적의 교체정책을 결정하기 위하여 베이시언 기법하에 계획, 비계획 정비 및 수리비용을 통합한 모형을 제안하였다. 그러나 이러한 기존모형은 각 대상의 특성 및 운영환경을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다.

최근, Sohn 외 2 명(2005)은 모듈의 특성 및 운영환경을 반영하여 전투기의 동적인 평균 고장간 시간(MTBF) 과 평균 수리 시간(MTTR)을 예측할 수 있는 확률효과 Weibull 회귀모형을 제안하였다. 이러한 확률 효과 모형을 이용함으로써 각 모듈의 특성 및 운영환경을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 특성변수들로 설명할 수 없는 오차를 반영할 수 있다.

본 논문은 전투기에 장착된 모듈의 효과적인 동적 예방정비 주기를 예측하기 위하여 Sohn 외 2 명(2005)의 모형을 사용하였다.

본 연구의 결과는 대한민국 공군의 군수관리 및 전투기의 가동률을 개선하는데 이바지 할 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 먼저 확률 효과 Weibull 회귀 모형을 요약하고 전투기에 장착된 모듈의 가장 효과적인 동적 예방정비 주기를 산출 하기

위한 모형을 소개하였으며 3 장에서는 자료분석 결과를 정리하였다. 마지막으로 4 장에서는 본 연구의 결과 및 향후 연구 분야를 제시 하였다.

2. 모 형

2 장에서는 확률 효과 Weibull 회귀 모형을 이용하여 시간에 따라 변동되는 모듈 특성이 반영된 동적 예방정비 주기를 예측할 수 있는 모형을 제시하고자 한다.

먼저 확률 효과 Weibull 회귀 모형을 요약하겠다 (Sohn 외 2 명, 2005).

2-1. 확률 효과 Weibull 회귀 모형

본 연구는 전투기 수리부속의 고장시간 간격 및 수리시간이 Weibull 분포를 따른다고 가정하였다. Weibull 분포는 고장시간 테이터를 적용 하기에 유연한 모델이다 (Elsayed, 1996).

우리가 제안하는 확률 효과 Weibull 회귀 모형은 다음과 같다.

전투기 수리부속을 i 라 하고 수리 부속의 고장 난 시점을 j 라 하면, 수리부속 i 의 j-1 번째 고장에서 j 번째까지의 고장 간격 시간을 T_{ij} 라 하자. 이때 j 번째 고장시 수리시간을 R_{ij} 라 하자. 모수 θ_{ij} 와 β 가 주어진 상태에서 고장시간이 아래와 같은 Weibull 분포를 따른다고 하자.

$$T_{ij} \mid \theta_{ij}, \beta \sim Weibull(\theta_{ij}, \beta) \qquad (1)$$

이때 조건부 확률 분포는 다음과 같다.

$$f(T_{ij} \mid \theta_{ij}, \beta) = T_{ij}^{\beta-1} \beta \frac{1}{\theta_{ij}} \exp\left[-\left(\frac{T_{ij}^{\beta}}{\theta_{ij}}\right)\right]$$
$$,(i, j = 1, \Lambda\ , n). \qquad (2)$$

따라서 수리부속 i 의 j 번째 고장이 발생할 때까지 걸린 시간의 평균과 분산은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E(T_{ij} \mid \theta_{ij}, \beta) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\theta_{ij} ,$$
$$V(T_{ij} \mid \theta_{ij}, \beta) = \left\{\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)^2\right\}\theta_{ij}^{\,2}. \qquad (3)$$

본 연구에서 β 는 수리부속 i 와 고장시점 j 마다 동일하다고 가정하고, θ_{ij} 는 수리부속의 특성에 따라 다를 수 있다고 본다. 이 때에 동일한 특성변수 하에서도 θ_{ij} 가 다를 수 있는 상황을 고려하기 위해 θ_{ij} 가 다음과 같은 Inverse gamma 분포를 따른다고 하자.

$$\theta_{ij} \sim IG\lfloor \alpha + 1, \alpha \exp(X_{ij}B) \rfloor \qquad (4)$$

이 때의 θ_{ij} 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(\theta_{ij}) = \frac{\lfloor \alpha \exp(X_{ij}B) \rfloor^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha+1)\theta_{ij}^{\alpha+2}} \exp\left\{-\left[\frac{\alpha \exp(X_{ij}B)}{\theta_{ij}}\right]\right\}. (5)$$

여기서 X_{ij} 는 수리부속 i 의 내생 변수와 j 시점의 고장횟수를 나타내며 θ_{ij} 의 평균 및 분산이 X_{ij} 의 함수가 되도록 설정해 주었다.

$$E(\theta_{ij}) = \exp(X_{ij}B), V(\theta_{ij}) = \frac{\lfloor \alpha \exp(X_{ij}B) \rfloor^2}{\alpha^2(\alpha-1)}. (6)$$

식 (2)와 (5)로 부터 T_{ij} 의 marginal 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(T_{ij}) = T_{ij}^{\beta-1}\beta(\alpha+1)\left[\frac{\alpha \exp(X_{ij}B)}{T_{ij}^{\beta} + \alpha\exp(X_{ij}B)}\right]^{\alpha+1}\left[\frac{1}{T_{ij}^{\beta} + \alpha\exp(X_{ij}B)}\right].$$
(7)

식 (7)로부터 marginal 분포의 평균과 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E(T_{ij}) = E\lfloor E(T_{ij} \mid \theta_{ij}) \rfloor = \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\exp(X_{ij}B), \qquad (8)$$

$$V(T_{ij}) = E\left[V(T_{ij} \mid \theta_{ij})\right] + V\left[E(T_{ij} \mid \theta_{ij})\right]$$
$$= \left\{\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)^2\right\} \frac{\alpha\left[\exp(X_{ij}B)\right]^2}{\alpha - 1}$$
$$+ \left\{\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right\}^2 \frac{\left[\exp(X_{ij}B)\right]^2}{\alpha - 1}$$
$$= \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)^2\right]\left[\exp(X_{ij}B)\right]^2 . \quad (9)$$
$$+ \frac{1}{\alpha-1}\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)\left[\exp(X_{ij}B)\right]^2, (\alpha > 1)$$

누적 고장 함수, $F(T_{ij})$, 신뢰성 함수, $R(T_{ij})$, 위험함수, $h(T_{ij})$는 다음과 같다.

$$F(T_{ij}) = 1 - \left[\frac{\alpha \exp(X_{ij}B)}{T_{ij}^{\ \beta} + \alpha \exp(X_{ij}B)}\right]^{\alpha+1}; \quad (10)$$

$$R(T_{ij}) = \left[\frac{\alpha \exp(X_{ij}B)}{T_{ij}^{\ \beta} + \alpha \exp(X_{ij}B)}\right]^{\alpha+1}; \quad (11)$$

$$h(T_{ij}) = T_{ij}^{\ \beta-1}\beta(\alpha+1)\left[\frac{1}{T_{ij}^{\ \beta} + \alpha \exp(X_{ij}B)}\right]. \quad (12)$$

우리는 식 (7)를 이용하여 고장시간 모형에서 미지의 모수 α, β, B 를 추정하기 위해 로그 우도 함수를 다음과 같이 유도 하였다.

$$L(\beta_{0,} \Lambda, \beta_n \mid T_{ij}, X_{ij}) = \ln p(T_{i1}, \Lambda, T_{iJ})$$

$$= \sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{n-m} \ln\left(T_{ij}^{\ \beta-1}\beta(\alpha+1)\frac{\left(\alpha \exp(X_{ij}B)\right)^{\alpha+1}}{\left(T_{ij}^{\ \beta} + \alpha \exp(X_{ij}B)\right)^{\alpha+2}}\right)\right.$$
$$\left. + \sum_{i=n-m+1}^{n} \ln\left(\left(\frac{\alpha \exp(X_{ij}B)}{\alpha \exp(X_{ij}B) + T_{ij}^{\ \beta}}\right)^{\alpha+1}\right)\right].$$

(13)

여기서 관측시간 T_o 를 기준으로 전투기 부속 n 개 중 지속적으로 작동 되고 있는 부속 m 개를 절단된 데이터로 고려 하였다.

2-2. 동적 예방 정비 주기

이 장에서는 동적 예방 정비주기를 산출하기 위해 확률 효과 Weibull 회귀 모형을 사용하였다.

우리는 Balow & Proschan(1965) 의 기법과 Rezg 외 2 명 (2004)의 모형을 적용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$h\ (T_{Pij})\int_0^{T_{Pij}} R\ (T_{ij})dT + h\ (T_{Pij})\frac{M_{Pij}C_{Cij} - M_{Cij}C_{Pij}}{C_{Cij} - C_{Pij}} - F\ (T_{Pij})$$
$$= \frac{C_{Pij}}{C_{Cij} - C_{Pij}}$$
. (14)

여기서, T_{Pij} 는 j 번째 고장후 모듈 i 의 동적 예방 정비 주기이고, M_{Pij} 는 예방 정비에 소요되는 평균시간, M_{Cij} 는 사후 정비에 소요되는 평균시간, C_{Cij} 는 사후정비 비용, 그리고 C_{Pij} 는 모듈 i 가 j 번째 고장시 예방 정비 비용이다.

식 (14)는 다음과 같은 가정하에 유도되었다.

- 고장시간 및 사후 정비 시간의 확률 밀도 함수는 Weibull inverse gamma 분포를 따른다.
- 사후 및 예방정비시 소용되는 사후 정비비용, C_{Cij} , 예방정비비용, C_{Pij} 은 알고 있으며 일정하다. 또한, C_{Cij} 가 C_{Pij} 보다 상당히 크다.
- 모듈 i의 수명이 T_{Pij} 에 도달하자 마자 j+1번째 예방정비가 수행된다.
- 고장은 즉시 발견되고 정비는 철저 하게 수행된다.
- 정비작업에 필요한 자원은 충분하다.
- 위험함수는 점차적으로 증가한다.

식(10), (11), (12)를 (14)에 대입 하면

모듈 i의 j번째 고장후 동적 예방정비 주기 T_{Pij} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T_{Pij}^{\beta-1}\beta(\alpha+1)}{T_{Pij}^{\beta}+\alpha\exp(X_{ij}B)}\int_0^{T_{Pij}}\left[\frac{\alpha\exp(X_{ij}B)}{T_{ij}^{\beta}+\alpha\exp(X_{ij}B)}\right]^{\alpha+1}dT$$
$$+\frac{T_{Pij}^{\beta-1}\beta(\alpha+1)}{T_{Pij}^{\beta}+\alpha\exp(X_{ij}B)}\frac{M_{Pij}C_{Cij}-M_{Cij}C_{Pij}}{C_{Cij}-C_{Pij}}$$
$$-\left\{1-\left[\frac{\alpha\exp(X_{ij}B)}{T_{ij}^{\beta}+\alpha\exp(X_{ij}B)}\right]^{\alpha+1}\right\}=\frac{C_{Pij}}{C_{Cij}-C_{Pij}}.$$

(15)

여기서, M_{Cij} 는 식 (8)에서 고장 시간 T_{ij} 를 사후정비의 수리시간 R_{ij} 로 대체 함으로써 구할 수 있는 평균 수리 시간을 통해 얻을수 있고, M_{Pij} 는 M_{Cij} 보다 아주 작다는 점에서 c x 평균 수리시간 ($0<c<1$)으로 구할 수 있다.

T_{Pij} 를 수식적인 닫힌형태로 표현할 수는 없지만, Mathematica 5.1 (Wolfram Research Inc, 2004)을 사용 하여 T_{Pij} 를 계산해 낼 수 있다.

3. 자료분석

3 장에서는 전투기에 장착된 브레이크 모듈의 동적 예방정비 주기를 예측하는데 제안된 모형을 적용하였다. 우리는 Sohn 외 2 명(2005)의 분석결과(표 1,2,3,4)를 사용 하였다. 그들이 사용한 데이터는 공군 비행 부대에서 운영되는 전투기 3 개 기종에 장착된 랜딩 기어의 브레이크 시스템에 대한 기지급 수리자료로서 2002 년 에서 2003 년 까지의 수리실적 데이터 172 개를 사용하였다.

< 표 1 > 평균 고장간 시간 분석에 사용된 변수(Sohn 외 2 명, 2005)

변 수	내 용	부호/ 단위
고장횟수	누적 고장 횟수 (구간 변수)	1~3/횟수
운영계절	전투기의 운영계절 (계급 변수)	1-봄(3-5 월), 2-여름(6-8 월), 3-가을(9-11 월), 4-겨울(12-2 월)
전투기 중량	전투기 총중량 (구간 변수.)	4,853~25/톤
one	지표	1-절단된 데이터. 0-절단 안된 데이터

< 표 2 > 평균 수리 시간 분석에 사용된 변수(Sohn 외 2 명, 2005)

변 수	내 용	부호/ 단위
수리횟수	누적 수리 횟수 (구간 변수)	1~3/횟수
운영계절	전투기의 운영계절 (계급 변수)	1-봄(3-5 월), 2-여름(6-8 월), 3-가을(9-11 월), 4-겨울(12-2 월)
수리될 내부 부속의 수량	브레이크 모듈에서 교환이 필요한 내부 부속의 수량 (구간 변수)	2~210/개

<표 3> 고장시간모형의 모수 추정값 (Sohn 외 2 명, 2005)

모수	추정값	근사 표준 오차	t-값
(α)	15.087815	1.547569	9.749366
형태모수 (β)	2.336984	0.023509	99.407153
절편	9.488220	0.880686	10.773675
고장횟수	-1.195658	0.028126	-42.511031
봄	.	.	.
여름	0.335227	0.039014	8.592414
가을	-0.626416	0.037719	-16.607454
겨울	-0.607197	0.048047	-12.637566
중량	-0.008677	0.002700	-3.214124

<표 3> 수리시간모형의 모수 추정값 (Sohn 외 2 명, 2005)

모수	추정값	근사 표준 오차	t-값
(α)	1.944327	0.463628	4.193723
형태 모수 (β)	2.983057	0.065841	45.306674
절편	1.089820	0.150561	7.238370
고장횟수	0.955557	0.069671	13.715381
봄	0.501554	0.078546	6.385484
여름	.	.	.
가을	0.653357	0.084968	7.689437
겨울	0.485319	0.057667	8.415831
수리된 내부 부속의 수량	0.034688	0.001616	21.464161

우리는 전투기의 운영환경 및 브레이크 모듈의 특성에 따라 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간 및 동적 예방정비 주기를 예측할 수 있도록 표 5 와 같이 시나리오를 구성하였다. 이때, 비용모수로써 C_{ic} = \$1000, C_{ip} = \$456, c = 0.7 을 사용하였다.

<표 5> 시나리오

시나리오	내 용
1	총 중량이 4.853 톤인 전투기에 이미 한번의 고장이 있었던 브레이크 모듈이 장착되어 가을(9~11 월)동안 운영되던 중 두번째 고장이 발생하여 5 개의 내부부속이 교체될 예정이다.
2	총 중량이 4.853 톤인 전투기에 이미 두번의 고장이 있었던 브레이크 모듈이 장착되어 가을(9~11 월)동안 운영되던 중 세번째 고장이 발생하여 5 개의 내부부속이 교체될 예정이다.
3	총 중량이 4.853 톤인 전투기에 이미 두번의 고장이 있었던 브레이크 모듈이 장착되어 겨울(12~2 월)동안 운영되던 중 세번째 고장이 발생하여 5 개의 내부부속이 교체될 예정이다.
4	총 중량이 14.330 톤인 전투기에 이미 두번의 고장이 있었던 브레이크 모듈이 장착되어 겨울(12~2 월)동안 운영되던 중 세번째 고장이 발생하여 15 개의 내부부속이 교체될 예정이다.

우리는 Mathematica 5.1 (Wolfram Research Inc, 2004)을 사용하여 시나리오에 따라 동적 예방정비 주기를 예측하였다.

<표 6>은 시나리오에 따라 예측된 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간 및 이에 따른 동적 예방정비 주기를 나타낸다.

우리는 시나리오 1 과 2 에서 누적 고장 및 수리 횟수의 차이를 분석하였고 시나리오 2 와 3 은 계절에 따른 차이를 비교하였으며, 마지막으로 시나리오 3 과 4 는 전투기 총 중량과 수리 시 소요되는 내부부속의 수량을 비교하여 이에 따른 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간 및 동적 예방정비 주기를 예측하였다.

<표 6> 예측된 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간 및 동적 예방정비주기(단위:시간)

시나리오	평균고장간 시간	평균 수리 시간	동적 예방정비 주기
1	1135.57	6.85	525.8
2	305.22	11.69	268.2
3	166.05	10.04	159.4
4	152.94	7.10	142.5

상기표의 결과, 동일한 브레이크 모듈 이라 할지라도 각각 모듈의 특성 및 운영 환경에 따라 평균 고장간 시간, 평균 수리 시간 및 이에 따른 동적 예방정비 주기의 차이가 발생하는 사실을 알 수 있다. 따라서 비용을 감소시키기 위해서는 동적 예방정비 주기의 도입이 필요하며 이는 전투기 예방 정비시 모든 브레이크 모듈에 동일한 정책을 적용하는 것보다 더욱 효과적이다.

4. 결 론

가동중인 전투기의 고장은 수리시 많은 비용이 소요 될 뿐 아니라 국방력의 약화를 가져올 수 있으므로 비용을 최소화하는 예방 정비의 수행은 무엇보다도 중요하다. 또한, 예방 정비에 있어서 가장 중요한 점은 수행 시기 이다. 본 연구는 시간에 따라 변동되는 모듈의 특성 및 운영환경을 반영할 수 있는 확률효과 Weibull 회귀모형을 이용하여 동적 예방 정비 주기를 예측할 수 있는 모형을 제안하였다. 제안된 동적 예방정비 주기는 일정한 예방정비 정책과 비교하여 많은 장점을 가지고 있으므로 대한민국 공군이 보유한 노후 전투기에 적용되면 좋을 것 이다. 우리는 전투기 정비의 관점에서 모형을 제안 하였으나 시간에 따라 변하는 특성을 가진 다양한 품목에 본 모형을 적용할 수 있으리라 판단된다. 또한, 본 연구와 관련하여 최적의 동적 재고수준(Hill, 1997)을 예측하는 모형의 구축을 향후 연구과제로 제시하고자 한다.

참고문헌

Barlow, R.E. and Proschan, F., 1965, Mathematical Theory of Reliability. Wiley, New York.

Elsayed, E.A., 1996, Reliability Engineering. Addison Wesley Longman, Taipei.

Fleming, P.V. and Assis, E.M., 1999, A reliability analysis of Brasilis EMB-120 aircraft tire replacement policy. Safety and Reliability, 1041-1044.

Gertsbakh, I. And Kordonsky, Kh.B., 1997, Choice of the best time s cale for preventive maintenance in heterogeneous environments. European Journal of Operational Research, 98, 64-74.

Grigoriev, A., Klundert, J. V. D., and Spieksma, F.C.R, 2005, Modeling and solving the periodic maintenance problem. Accepted to European Journal of Operational Research.

Hill, R.M., 1997, Applying Bayesian methodology with a uniform prior to the single period inventory model. European Journal of Operational Research, 98, 555-562.

Mathematica 5.1, 2004, Wolfram Research Inc, USA.

Rezg, N., Xie X., and Mati, Y., 2004, Joint optimization of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation. International Journal of Production Research, 42, 2029-2046.

Chief of Staff ROK Air Force, 2000, The basic policy of aircraft maintenance (ROKAF pub 6-108). ROKAF Headquarters.

Sheu, S.H., Yeh, R.H., Lin, Y.B., and Juang, M.G., 1999, A Bayesian perspective on age replacement with minimal repair. Reliability Engineering and System Safety, 65, 55-64.

Sohn, S.Y., Yoon, K. B., Jang, I. S., 2005, Random Effects model for the reliability management of modelus of a fighter aircraft. Accepted to Reliability Engineering and System Safety.