

체결 부품 고장률 산출 방안에 관한 연구

정다운* · 윤희성 · 권동수 · 이승현

육군 종합정비창 정비기술연구소

A Study on Method of Predicting Failure Rates of Fastening Parts

DaUn Jeong* · Huisung Yun · Dongsoo Kwon · Seunghun Lee

Maintenance Technology Research Center, Consolidated Maintenance Depot, ROK Army

Abstract

In the statement of logistics reliability prediction methodology, all components should be managed as the analysis objectives. However, in some reliability prediction of weapon systems, fastening parts, e.g., screws, bolts and nuts, have been frequently ignored because some organizations related to weapon systems have emphasized that those parts are not significant in their failures rate and functions. In this paper, failure rates, modes, and distributions were presented to prove that fastening parts should be included in reliability prediction objectives. Also, failure rate prediction methods of fastening parts are presented and compared.

Key Words : Fastening Part, Reliability Prediction, NSWC-98/LE1, NPRD

* 교신저자 jeongdauning@gmail.com

논문접수일 : 2011년 08월 11일 논문수정일 : 2011년 09월 05일 게재확정일 : 2011년 09월 17일

1. 서 론

신뢰도는 임무 완수, 안전성, 군수지원, 총수명주기비용 산출 등의 이유로 무기 시스템 연구 개발 분야에서도 매우 중요하게 다루어지고 있는 분야이다.[4] 관련 기관별로 다소 상이할 수 있으나 신뢰도 연구의 시발점인 미군에서는 '어떤 품목(Item)이 주어진 조건하에서 지정된 기간 동안 의도된 기능을 수행할 수 있는 확률' 또는 '어떤 시스템과 시스템 부품이 규정된 조건하에서 고장, 성능 저하, 또는 지원 시스템에 대한 소요 없이 임무를 수행할 수 있는 능력'으로 신뢰도를 정의하고 있다.[1, 2] 신뢰도의 정의를 기준으로 판단해 보면 의도된 기능 발휘를 제한하는 원인이 되거나 고장이 발생하는 부품은 신뢰도 분석에 포함되어야 한다고 할 수 있다. 군수(고유, 기본)신뢰도는 시스템의 신뢰도 분석에 포함되어야 할 대상의 범위를 더욱 명확하게 하고 있는데 고장의 심각성, 상대적인 중요성, 임무에 미치는 영향을 고려하지 않고 시스템을 구성하는 모든 부품을 포함하여 직렬구조로 분석하는 것을 원칙으로 하고 있다.[3, 15] 그러므로 원칙적으로는 어떤 부품에서 고장이 무시할 수 있을 정도의 빈도로 발생하거나 시스템 내에서 중요한 기능을 담당하지 않더라도 군수신뢰도 분석 간에는 분석 대상으로 포함되어야 한다.

하지만 특이하게도 체결 부품은 무기 시스템 신뢰도 분석(정확히 표현하자면 군수신뢰도 분석)간 분석 대상으로부터 제외하여야 한다는 논란이 이어지고 있다. 여기서 체결은 여러 부품을 연결하고 결합하여 하나의 단위체로 만드는 것을 의미한다.[6] 볼트와 너트, 접착, 용접 등 다양한 체결 방법이 있으며, 이 중 볼트와 너트, 나사, 리벳 등과 같이 기계적 체결 방법에 사용되는 부품을 체결 부품이라 한다. 일반적으로 체결 부품은 강도 및 체결력, 재사용성, 형상, 정비 및 수리시 쉬운 해체의 장점을 가지며, 미국에서만 한 해에 2000억 개 가량의 체결 부품이 사용되는 등 산업 전반에서 다양하고 보편적으로 사용되고 있다.[6, 7, 8, 10] 그런데 일부 국내 무기 시스템 관련기관에서는 이러한 체결 부품에서 실제 고장이 발생할 확률은 매우 희박하며 고장이 발생하더라도 시스템에 미치는 영향이 거의 없다는 이유로 심지어 군수신뢰도 예측 간에도 분석 대상에서 아예 제외하고 있는 실정이다.

그러나 현실적으로 장갑차, 전차 등 기동 무기 시스템과 그에 탑재되는 장비, 그리고 휴대용 무전기와 같이 도수 운반되는 장비 등은 운용 간 진동, 충격 등 동적하중에 지속적으로 노출되며 동적하중에 노출된 체결 부품에서는 피로파괴, 풀림 등의 고장이 실제로 발생하고 있다.[7, 8] 이러한 이유로 미군은 체결 부품을 포함한 기계 부품 역시 전자장비의 고장률 예측 모델인 MIL-HDBK-217F와 유사한 수준에서 고장률 예측 모델을 개발하고 필드 데이터를 수집하여 고장모드와 고장률 분석에 활용하고 있다.

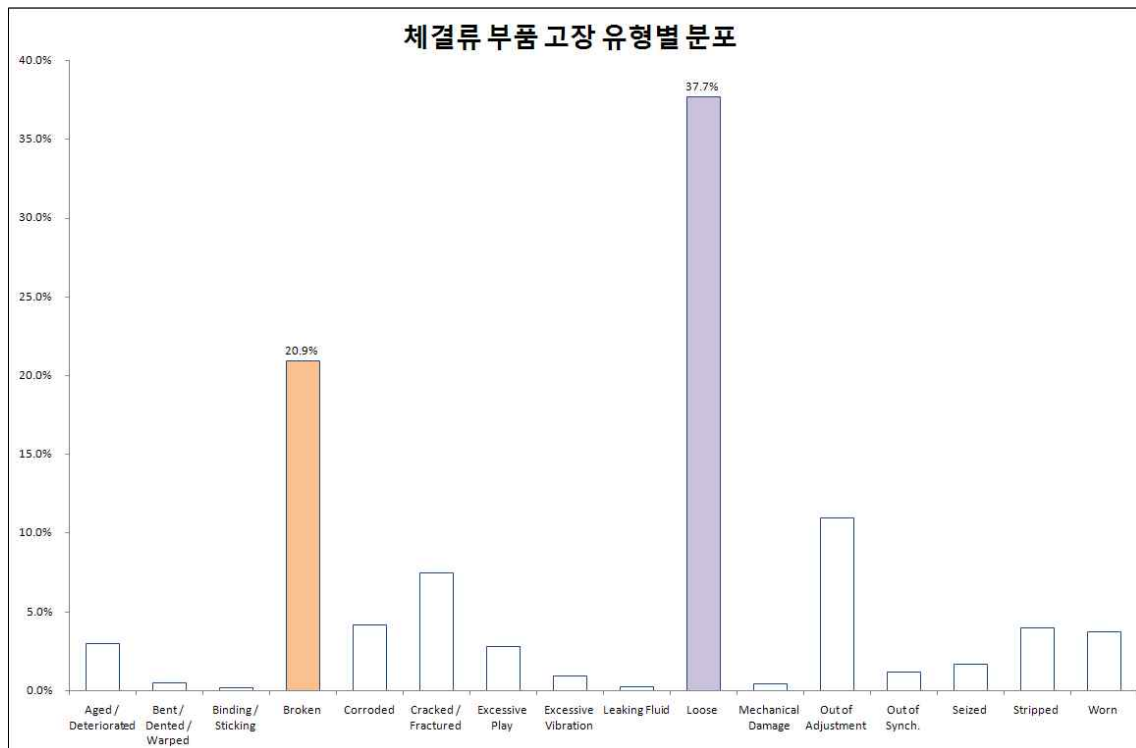
본 연구는 우선 체결 부품에 의한 고장이 일부 국내 무기 시스템 관련기관에서 언급하는 바와 같이 신뢰도 분석간 무시할 수 있을 정도의 빈도로 발생하는가를 검토하였다. 그리고 체결 부품의 일반적인 고장 원인을 분석하였다. 마지막으로 고장 발생 빈도가 무시할 수 있는 수준이 아니어서 신뢰도 분석에 반드시 포함되어야 하는 분석 대상이라면 신뢰도 예측간 어떠한 방식으로 접근해야 할 것인가를 실제 부품의 사례를 통해 연구하였다.

2. 체결 부품의 고장 유형 및 발생 빈도

2.1 체결 부품의 고장 유형과 분포

일반적으로 기계부품에서는 크게 변형, 피로 및 파단, 마모, 침식에 의해 다양한 형태의 고장이 나타난다.[5] 현재 무기 시스템 신뢰도 예측에서는 체결 부품의 고장을 무시할 수 있을 정도로 적게 발생한다고 판단하는 경향이 있으나, 실제 필드에서 장비 운용 간 획득한 고장 데이터에 의하면 체결 부품의 고장 역시 앞서 언급한 네 가지 메커니즘과 연관되어 빈번하게 발생하는 것으로 나타난다. 본 연구에서는 체결 부품 고장 유형의 필드 데이터로 FMD-91(Failure Mode/Mechanism Distribution 1991)를 참고하였다. FMD-91는 부품 및 조립체의 고장 유형과 분포를 수록하고 있는 데이터 핸드북으로 다양한 기계 및 전기전자부품의 고장 유형과 분포를 다루고 있어 FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) 등 고장해석에 유용하게 사용되고 있다.[11]

<표 1>로부터 체결 부품의 고장 유형과 분포는 부품별로 다소 차이는 있으나 노화, 휨, 부러짐, 부식 등 총 16가지의 고장 유형이 있음을 확인했으며 <그림 1>에 나타낸 것과 같이 풀림이 37.7%, 부러짐이 20.9%로 16가지 고장 유형 중 가장 빈번하게 발생하는 고장 유형임을 확인할 수 있었다.



<그림 1> 체결 부품 고장 유형별 분포

<표 1> 부품별 고장 빈도 / 고장 유형 분포[11, 12]

Part Type	Failurerate	Failure mode	Normalized Distribution	Part Type	Failurerate	Failure mode	Normalized Distribution		
Bolt	2.7835	Broken	79.1%	Screw, Cap, socket, head	0.0389 (M)	Broken	66.7%		
		Aged/Deteriorated	11.6%			Loose	33.3%		
		Worn	4.7%	Screw, Collimator	-	Out of Adjustment	100.0%		
		Stripped	2.3%	Screw, Front Wedge	-	Fractured	100.0%		
		Binding/Sticking	2.3%	Screw, Insert, Thread	-	Stripped	100.0%		
Fastener, Lock	-	Broken	75.0%	Screw, Machine	4.5455	Broken	31.6%		
		Aged/Deteriorated	25.0%			Loose	21.1%		
Fastener, Retaining Ring	4.7858	Worn	50.0%			Worn	15.8%		
		Out of Adjustment	50.0%			Stripped	10.5%		
Nut	2.2727	Loose	100.0%			Out of Adjustment	10.5%		
Nut, Locking	0.4165 (M)	Corroded	50.0%			Screw, Self Locking	1.4605 (M)	Out of Synch.	10.5%
		Seized	50.0%					Corroded	75.0%
Nut, Micrometer	-	Out of Adjustment	100.0%			Broken	25.0%		
Nut, Plain	0.0427 (M)	Loose	100.0%			Screw, Self Tapping	-	Broken	100.0%
Nut, Plain, Hexagon	0.0931 (M)	Loose	100.0%			Screw, Set	0.0874 (M)	Out of Adjustment	36.5%
Nut, Plain, Round	-	Loose	58.3%	Loose	30.8%				
		Excessive Play	25.0%	Out of Synch.	25.0%				
		Out of Adjustment	8.3%	Broken	7.7%				
		Worn	8.3%	Screw, Shoulder	0.4326 (M)	Loose	46.7%		
Nut, Slotted	-	Loose	100.0%			Aged/Deteriorated	20.0%		
Nut, Special	-	Loose	80.0%			Broken	13.3%		
		Excessive Play	20.0%			Mechanical Damage	13.3%		
Nut, Wheel	-	Loose	100.0%	Stripped	6.7%				
Rivet, Solid	0.2174 (M)	Loose	100.0%	Screw, Thumb	0.2243 (M)	Broken	33.3%		
Screw	42.8977	Loose	66.7%			Loose	33.3%		
		Worn	33.3%			Aged/Deteriorated	33.3%		
Screw, Cap	0.0801 (M)	Loose	46.4%	Stud, Nut, Hex	-	Cracked/Fractured	100.0%		
		Broken	35.7%	Stud, Plain	0.0085 (M)	Broken	85.7%		
		Leaking Fluid	7.1%			Bent/Dented/Warped	14.3%		
		Out of Adjustment	3.6%	Washer, Key	0.0992 (M)	Loose	40.0%		
		Binding/Sticking	3.6%			Excessive Play	40.0%		
		Excessive Vibration	3.6%			Out of Adjustment	20.0%		
Screw, Cap, Socket	-	Broken	50.0%	Washer, Lock	0.8303	Loose	50.0%		
		Loose	25.0%			Cracked/Fractured	25.0%		
		Excessive Vibration	25.0%			Broken	25.0%		

2.2 체결 부품의 고장 발생 빈도

<표 1>에서 제시된 체결 부품의 고장률은 NPRD-95(Non-electronic parts Reliability Data-1995)의 필드 고장률 데이터에서 인용하였다. NPRD-95는 필드 운용 데이터를 기반으로 산출된 비전자 부품 약 13,188 품목에 대한 고장률 데이터를 수록하고 있으며 무기체계 신뢰도 예측에도 자주 사용 활용중인 고장률 데이터 핸드북이다. '(M)'이 표시된 고장률은 [고장/100만 Mile] 단위로 산출된 거리단위 고장률이며 나머지 고장률은 [고장/100만 시간] 단위로 산출된 시간단위 고장률이다.

<표 1>에서 제시된 바와 같이 볼트 고장률(2.7835), 너트 고장률(2.2727) 등 체결 부품의 고장률이 과연 무시할 수 있는 수준의 발생 빈도인지 이들 고장률의 상대적인 크기를 판단하기 위하여 일반적으로 신뢰도 예측간 분석 대상으로 삼고 있는 전기전자 부품의 일반 고장률을 아래의 <표 2>에 정리하였다. <표 2>는 미군 무기 시스템에서 사용되고 있는 전기전자 부품중 97%를 점하고 있는 커패시터 등 상위 6개 부품의 일반 고장률이다. 제시된 고장률은 217Plus 부품수량분석법(PCM)에서 활용하고 있는 [고장/100만 시간] 단위 값으로 지상기동 환경을 기반으로 하고 있으며 *표시는 동종 부품 중 가장 높은 빈도로 고장이 발생하는 타입을 표시하고 있다.

<표 1>과 <표 2>에서 제시된 고장률 비교시 체결 부품은 M/H 변환계수를 분석 도구의 기본값인 1로 적용하더라도 체결 부품이 전기전자 부품에 비해 월등히 높은 빈도로 고장이 발생함을 확인 할 수 있다. 게다가 무기 시스템의 운용 특성을 반영하여 산출한 M/H 변환계수를 적용하면 그 고장빈도는 더욱 높아질 것으로 판단할 수 있다. 이러한 높은 고장 발생 빈도 결과는 체결 부품이 전기전자 부품과 마찬가지로 신뢰도 분석에 반드시 포함되어야 될 대상임을 의미한다고 할 수 있다.

<표 2> 전기전자 부품의 부품별 일반 고장률[14]

부품	타입	고장률	부품	타입	고장률
커패시터	Aluminum	0.01804	집적회로	Hermetic, Digital, Hermetic	0.009522
	Ceramic	0.002491		Hermetic, Linear, Hermetic	0.013919
	General	0.001709		Nonhermetic, Digital, Plastic	0.008978
	Mica/Glass	0.005549		NonHermetic, Linear, Plastic*	0.015041
	Paper	0.004296	다이오드	Current Regulator	0.003168
	Variable, General*	0.015013		High Frequency, Microwave/RF, Mixer/Detector*	0.028884
저항	Fixed, Carbon Composition	0.003748	트랜지스터	Lpw Frequency	0.001555
	Fixed, Wirewound	0.00679		Lpw Frequency, General	0.001854
	Variable*	0.051267		Bipolar, Germanium	0.040189
	Variable, Nonwirewound	0.046567	Bipolar, High Frequency, Microwave	0.013613	
인덕터	choke*	0.001069	트랜지스터	Bipolar, Low Frequency,	0.019407
	General	1.06E-05		Field Effect, Microwave* High Frequency	0.05591

3. 체결 부품의 고장 원인

기 확인한 바와 같이 체결 부품의 고장은 총 16가지의 유형으로 분류되며 전기전자 부품의 고장 발생 빈도를 상회한다. 이러한 체결 부품의 고장에 대하여 미 해군의 기계부품 고장률 모델인 NSWC-98/LE 1에서는 ①수소 취화, ②피로, ③온도, ④하중과 토크, ⑤볼트와 너트의 적합성, ⑥진동을 그 원인으로 분석하고 있다.[9]

3.1 수소 취화

체결 부품에서 수소 취화는 아연/카드뮴 도금의 고강도 강 부품과 관련이 깊다. 수소 취화는 도금 과정동안 수소원자가 도금되는 면이나 그 아래에 갇히게 되어 발생한다. 또한 알칼리/산성 세척과정이 원인이 되기도 한다. 자유 수소가 제거되지 않을 경우, 체결 부품이 하중을 받게 되면 수소 원자가 금속 입자로 침식하게 되고 그 결과 급속한 균열 성장과 파괴 고장이 나타난다. 수소 취화는 압연 가공된 체결 부품보다 기계절삭 가공된 체결 부품에서 더욱 빈번하게 나타난다.

3.2 피로

체결 부품이 동적 하중을 지속적으로 받게 되면 체결 부품의 정적 강도보다 낮은 하중에서도 고장이 발생하는데, 이러한 경우를 피로 고장이라 한다. 피로 고장이 발생하면 부품의 파괴가 동반되며, 아무런 예고 없이 불시에 고장이 나타나기 때문에 피로 강도 특성은 매우 중요한 의미를 갖는다. 피로 고장은 전단 피로와 인장 피로로 나누어진다.

3.3 온도

체결 부품은 핵시설, 항공, 전자, 발전 시설 등 다양한 분야에 고온 및 저온의 넓은 온도 범위에서 사용된다. 저온에서는 재료의 인장강도가 높아지지만, 연성이 감소하여 파손되기 쉬워진다. 반대로 고온에서는 재료의 인장강도가 감소하며, 한계 온도를 넘어서면 급격하게 인장강도가 감소한다.

3.4 하중과 토크

모든 체결 시스템에서 이상적인 체결력을 달성하기 위한 최적의 토크가 존재하며, 이를 토크-인장 관계라 한다. 초기 토크가 과하면 볼트의 항복이 발생하여 이후 소성변형에 의한 응력 완화가 발생할 수 있다. 반대로 초기 토크가 부족하면 진동으로 인한 잠재적인 피로와 풀림이 발생할 수 있다. 토크-인장 관계에는 다양한 조건이 영향을 미치는데, 윤활이 가장 큰 영향을 미친다.

3.5 볼트와 너트의 적합성

고강도이 볼트가 사용될 경우, 너트의 선택에 주의해야한다. 만약 고강도 볼트와 함께 저강도의 너트가 사용된다면 강한 인장하중에서 너트의 마멸을 초래할 것이며, 충분한 체결력을 발휘할 수도 없다.

3.6 진동

기계 시스템은 다양한 범위의 진동하중을 받는데 특히 치명적인 진동수, 하중, 진폭의 조합으로 인해 공진현상이 발생하기도 한다. 대부분의 시스템에서 진동은 시스템의 공진 조건에 맞지 않더라도 충분히 큰 영향을 미친다. 반복적이거나 증가하는 진동에 의해 너트가 돌아가거나 풀리는 현상이 발생하여 너트의 풀림과 볼트의 이탈로 이어지기 때문이다.

4. 체결 부품 고장률 예측

본 장에서는 기계 부품의 고장률 예측 방안을 상호 비교하여 체결 부품의 고장률 예측 방안을 선정하고 해 방법에 의한 고장률을 예측, 그 결과를 NPRD에서 제시하고 있는 필드 데이터와 비교하였다.

4.1 고장률 예측 방법의 선택

기계 부품의 신뢰도 예측 방법에는 ① 신뢰도 시험결과 분석, ② 신뢰도 관계식, ③ 하중/강도 간섭 분석, ④ 대체 데이터의 네 가지 방법이 있다.[5] 각 방법의 특징과 적용 우선순위는 <표 3>과 같다.

<표 3> 기계부품의 신뢰도 예측 방법의 특징과 적용 우선순위[5]

순위	예측방법	장 점	단 점
1	신뢰도 시험결과 분석	실제 하중 조건에 대응, 설계 결함/개선사항 식별	분석 가능한 데이터 획득의 제한, 소요 비용이 많음
2	신뢰도 관계식	다양한 조건에서 분석이 가능	제한된 부품 종에만 사용 가능
3	하중/강도 간섭 분석	부품 강도와 하중에 대해 설명가능	결과가 고장률이 아닌 확률로 표현됨
4	대체 데이터	적용 방법이 빠르고 소요 비용이 적음	예측의 불확실성이 높음, 설계 개선을 연관되지 못함

‘대체 데이터’는 다양한 범위의 적용 사례로부터 얻은 일반적인 고장률 데이터로 NPRD 등이 포함되며 저렴한 비용과 손쉬운 사용이라는 장점 때문에 자주 사용되는 방법이다. 하지만 ‘대체 데이터’를 통한 신뢰도 예측은 상대적으로 예측의 불확실성이 높으며, 신뢰도 예측을 통한 설계 변경을 기대하기 힘들다는 단점이 있다. ‘신뢰도 시험결과 분석’은 실제 고장과 가장 유사하며 시간에 따른 고장률이 분석될 수 있다는 장점에도 불구하고, 분석 가능한 데이터 수집이 곤란하며 고비용이 소요된다는 점 때문에 신뢰도 예측간 크게 활용되지 못하고 있다. 또한 ‘하중/강도 간섭 분석’은 하중 분포와 강도 분포로부터 고장 발생을 예측하는 기법으로 분석 결과가 고장률이 아닌 고장 발생 영역과 확률로 나타나기 때문에 시스템 신뢰도 예측에서의 사용이 제한된다. ‘신뢰도 관계식’, 즉 고장률 예측 모델은 실험과 분석을 통해 정립한 관계식을 이용하는 방법으로 부품 고장률에 영향을 미치는 다양한 요소를 고려하여 신뢰도 산출이 가능하여 비교적 불확실성이 낮으면서, 저비용으로도 고장률 예측이 가능하다. 기계부품에 대한 고장률 예측 모델로는 미 해군에서 발간한 NSWC-98/LE1 있다. NSWC-98/LE1에서는 체결 부품을 포함한 17종의 주요 기계부품에 대한 고장률 예측 모델을 제시하고 있다.

4.2 NSWC-98/LE1의 체결 부품 고장률 예측 모델

NSWC-98/LE1에서 제시하고 있는 고장률 모델은 기본적으로 MIL-HDBK-217F와 유사하게 곱셈모델이며, 체결 부품의 고장률 예측 모델식은 다음과 같다.[9]

$$\lambda_F = \lambda_{F,B} C_{SZ} C_L C_T C_I C_{SC} C_K. \quad (1)$$

이때, λ_F 는 예측된 고장률, $\lambda_{F,B}$ 는 기본 고장률, C_{SZ} 는 크기 인자, C_L 은 하중 인자, C_T 는 온도 인자, C_I 는 충격 인자, C_{SC} 는 표면 코팅 인자, C_K 는 나사교정 인자이다.

4.2.1 $\lambda_{F,B}$ (기본 고장률)

기본 고장률은 S-N 시험 시편의 내구한도의 역수로 결정된다.

$$\lambda_{F,B} = 1/\sigma_{e,S-N}$$

<표 4>의 내구한도가 알려진 재료의 경우 이 값을 바로 사용하여 기본 고장률을 산출할 수 있다. 이 외의 부품은 동일 재료 시편의 S-N 시험에서 얻은 내구한도를 사용하거나, 다음과 같은 추정식을 따른다.

$\sigma_{e,S-N} \leq 200\text{ksi}$ 인 강의 경우에는

$$\sigma_{e,S-N} = 0.5\sigma_{T,ult}, \quad (2)$$

$\sigma_{e,S-N} < 200\text{ksi}$ 인 강 의 경우에는

$$\sigma_{e,S-N} = 100\text{ksi}, \quad (3)$$

알루미늄 합금(단조)의 경우에는

$$\sigma_{e,S-N} = 0.4\sigma_{T,ult}, \quad (4)$$

알루미늄 합금(주조)의 경우에는

$$\sigma_{e,S-N} = 0.3\sigma_{T,ult}. \quad (5)$$

이때, 알루미늄 합금의 수명한계는 10^8 cycle에서 획득하고, $\sigma_{e,S-N}$ 는 내구한도, $\sigma_{T,ult}$ 는 극한인장 강도를 의미한다.

<표 4> 체결 부품 재료별 내구한도 특성

재료	크기	피로수명 (106 cycle)
SAE 5	1/4 - 1 in	18.6 ksi
	1 1/8 - 1 1/2 in	16.3 ksi
SAE 7	1/4 - 1 1/2 in	20.6 ksi
SAE 8	1/4 - 1 1/2 in	23.2 ksi
ISO 8.8	M16 - M36	129 MPa
ISO 9.8	M1.6 - M16	140 MPa
ISO 10.9	M5 - M36	162 Mpa
ISO 12.9	M1.6 - M36	190 MPa
Metric M16, CL 8.8	M16	10.2 ksi
M14 × 1.5	M14 × 1.5	7.1 - 11.4 ksi
SAE J429, GR 8	-	18 ksi
Metric CL 10.9	M12 × 1.25	8 ksi
M 10, grade 12.9	-	6.9 - 10.7 ksi

4.2.2 C_{SZ} (크기 인자)

표면적이 넓을수록 다수의 잠재결함을 가지고 있을 수 있으므로, 크기가 큰 부품일수록 고장확률이 높아진다. 이를 고려하여 굽힘 및 비틀림, 축 방향 하중조건에서 크기 인자는

축 방향 하중의 경우에는

$$C_{SZ} = 1.0, \quad (6)$$

굽힘 및 비틀림 하중의 경우에는

$$C_{SZ} = \left(\frac{0.370d}{0.3} \right)^{-0.1133} \quad (7)$$

과 같이 계산되며, d 는 체결 부품 지름의 최대값으로 범위는 2 inch 이하이다.

4.2.3 C_L (하중 인자)

체결 부품에는 축 방향, 전단방향, 굽힘, 비틀림 등 다양한 종류의 하중이 가해질 수 있다. 이때, 가해지는 하중의 종류를 고려한 하중 인자는 다음 <표 5>와 같다.

<표 5> 하중 조건별 하중 인자값

하중 조건	C_L
축 방향 ($\sigma_{T,ult} \leq 220$ kpsi)	0.923
축 방향 ($\sigma_{T,ult} > 220$ kpsi)	1.0
굽힘	1.0
비틀림, 전단	0.577

4.2.4 C_T (온도 인자)

일반적으로 내구성 시험 데이터는 상온에서 획득된다. 하지만 실제 체결 부품이 사용되는 온도는 시험조건 이상인 경우도 있다. 고온의 환경에서는 정적·동적 강도의 감소, 변형, 열 팽창이 발생하므로, 고장률 산출시 이를 고려하여 보정이 필요하다. 온도 인자는 다음과 같이 계산된다.

사용 온도가 160°F(71.11°C)를 넘는 경우에는

$$C_T = \frac{620}{460 + T_{oper}}, \quad (8)$$

사용 온도가 160°F(71.11°C)이하인 경우에는

$$C_T = 1.0. \quad (9)$$

이때, T_{oper} 는 체결 부품의 사용 온도(°F)를 의미한다.

4.2.5 C_I (충격 인자)

충격하중은 주기적인 하중에 비해 부품에 치명적으로 작용하므로, 충격하중이 존재할 경우 <표 6>과 같은 충격 인자가 반드시 고려되어야 한다.

<표 6> 충격 조건별 충격 인자값

충격 조건	C_I
Light(rotating machinery - motors, turbine, centrifugal pumps)	1.0
Medium(rotary & reciprocating motion machine - compressors, pumps)	0.8
Heavy(presses for tools & dies, shears)	0.6
Very heavy(hammers, rolling mills, crushers)	0.4

4.2.6 C_{SC} (표면코팅 인자)

표면처리는 내구한도를 증가시키는 역할을 한다. 이러한 표면처리가 사용될 경우, 아래 <표 7>에 따라 표면코팅 인자를 적용한다.

<표 7> 표면처리 종류별 표면코팅 인자값

표면처리	C_{SC}
Electroplating(chromium, nickel, cadmium)	0.65
Electroplating(zinc)	1.00
Metal spraying	0.86

4.2.7 C_K (나사교정 인자)

체결 부품의 고장에서 15%는 머리 부분 필렛에 의한 응력상승 때문에 발생한다. 나머지 85%는 나사산 부분에서 응력 상승으로 인해 발생한다. 따라서 <표 8>와 같이 나사산 부분에서의 응력 상승을 고려한 나사교정 인자를 고려하여야 한다.

<표 8> 나사 등급 및 가공법별 나사교정 인자값

SAE Grade bolt	Rolled Threadeds	Machine Threaded
	C_K	C_K
0 - 2	2.2	2.8
4 - 8	3.0	3.8

4.3 고장률 예측 모델을 이용한 체결 부품 고장률 예측

MS35751-42(Bolt, Square neck)을 대상으로 운용 온도는 지상 기동장비 일반적 신뢰도 예측 기준인 43℃, 충격은 분석 도구의 기본값인 Light Impact 조건으로 부여하였다. 이러한 조건하 축방향, 굽힘, 전단하중에 대해 고장률을 예측하였다. 예측 결과는 <표 9>와 같다.

<표 9> 하중 조건에 따른 고장률 예측 결과

제 원 (MS35751-42)			
재질	Carbon Steel		
$\sigma_{T,ult}$	60 ksi		
$\sigma_{e,S-N}$	$0.5\sigma_{T,ult} = 27.5$ ksi		
d	0.324 inch		
표면 코팅	Electroplating(zinc)		
나사 등급	0-2(Machine threaded)		
조 건			
T_{oper}	109.4°F(43°C)		
충격 조건	Light(rotating machinery - motor, turbine, centrifugal pumps)		
기본 고장률 및 각 인자값			
$\lambda_{F,B}$	0.033		
C_{SZ}	축 방향 1.00	굽힘 1.11	전단 1.00
C_L	축 방향 0.923	굽힘 1.00	전단 0.577
C_T	1.0		
C_I	1.0		
C_{SC}	1.0		
C_K	2.8		
예측 결과			
λ_F (100만 시간당)	축 방향 0.086	굽힘 0.104	전단 0.054

고장률 예측 모델을 이용하여 체결 부품의 고장률을 산출한 결과, 축 방향, 굽힘, 전단 하중에서 각각 100만 시간 당 0.086회, 0.104회, 0.054회의 고장이 예측된다는 결과를 얻어, 동일 부품이 하중 조건에 따라 상이한 고장률을 갖는 것을 확인하였다.

4.4 고장률 예측값과 필드 데이터의 비교

<표 10>에서는 <표 9>의 예측결과와 NPRD-2011에 수록된 MS35751-42의 필드 데이터를 비교하였다.

<표 10> NPRD-2011 고장률 데이터와 고장률 예측 모델을 이용한 고장률 예측값 비교

구분	NPRD-2011	NSWC-98/LE1 예측모델			
		축 방향 하중	굽힘 하중	전단 하중	평균
고장률 (100만 시간당)	0.084	0.086	0.104	0.054	0.081

<표 10>의 2월부터 5월까지 NPRD-2011 제시한 고장률, 이후 NSWC-98/LE1 예측모델에 의한 축 방향, 굽힘, 전단 하중에서의 고장률 예측 값을 정리하였다. 6월에는 축 방향, 굽힘, 전단 하중이 임의의 비율로 복합적으로 가해진다고 가정하고 산술평균을 구하였다. 그 결과 NPRD-2011의 고장률과 하중 조건별 고장률 예측 값의 산술평균간의 오차는 3.57%로 NPRD 데이터도 모델에 의한 예측 결과값 못지않게 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 순수하게 체결 부품의 신뢰도 예측 결과만을 고려한다면 NPRD 데이터 역시 NSWC-98/LE1와 동일하게 효과적으로 활용될 수 있다.

그러나 무기 시스템 개발간 신뢰도 예측의 목적중의 하나인 설계 개선과 이를 통한 신뢰도 성장까지 고려한다면, NPRD 데이터의 효용성은 반감된다. NPRD는 발간된 보고서와 논문, 군 장비와 상용 장비의 정비기록에서 획득한 데이터로 고장률에 영향을 미치는 요소를 분리하여 활용할 수 없으며, 운용조건, 형상정보가 일치하는 부품의 데이터가 존재하지 않을 경우에는 유사 부품의 고장률 데이터를 선택하여 활용하여야 하기 때문에 고장률 예측의 불확실성이 높을 수밖에 없다. 이에 반해 고장률 예측 모델은 고장률 예측 모델식인 식(1)에서 확인할 수 있듯이 하중조건, 재료, 운용온도, 표면처리, 나사 등급 등을 고려한 보정 인자가 포함되어 있기 때문에 다양한 형상과 운용조건을 가진 부품의 고장률 예측이 가능하며, 나아가 NPRD 등 대체 데이터를 이용한 고장률 예측의 한계점이었던 설계와 신뢰도 예측의 비교분석을 통한 설계 개선을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 우선 체결 부품에서 어떠한 고장이 발생하는지 분석해보았다. FMD-91로부터 노화, 휨, 부식 등 총 16가지의 고장 유형이 있고, 이중 풀림과 부러짐이 가장 자주 나타나는 고장 유형임을 확인하였다. 그 다음 체결 부품의 고장 빈도에 대해 확인해보았다. 체결 부품의 고장빈도는 필드 데이터인 NPRD-95로부터 획득하였고, 이를 217Plus에서 부품수량분석법(PCM)의 기초자료로 제시하는 전자전기 부품의 일반 고장률과 비교함으로써 체결 부품의 고장이 전자전기 부품에 비해 상당히 빈번하게 발생한다는 것을 확인하였다. 이는 체결 부품의 고장발생 빈도가 결코 무시할 수 없는 정도로 발생하고 있으며, 군수 신뢰도 더 나아가 신뢰도 예측에서 반드시 포함되어야 한다는 것을 의미한다.

마지막으로 체결 부품의 고장률 예측하기 위한 방안으로 NSWC-98/LE1의 예측 모델을 제시하였다. NSWC-98/LE1의 예측 모델을 통한 신뢰도 예측과 기존의 NPRD를 통한 예측은 서로 유사한 결과값을 보였다. 하지만 예측의 불확실성을 줄일 수 있다는 점과 단순히 신뢰도 예측값만을 제공하는 것이 아니라 설계개선과 연관될 수 있다는 점은 신뢰도 예측에서 NSWC-98/LE1의 효용성을 뒷받침하는 근거가 된다.

하지만 모델을 이용한 체결 부품 고장률 예측을 위해서는 재료의 강도, 형상 등 설계 제원과 온도, 하중 등의 운용 조건에 대한 구체적인 데이터가 요구된다. 따라서 신뢰도 예측시 부품에 관련된 구체적인 데이터를 수집하여 NSWC-98/LE1의 모델을 우선 적용하되, 데이터 수집이 불가능할 경우에는 NPRD를 보완적으로 적용한다면 보다 의미있는 신뢰도 예측값을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] Defense Acquisition University(2009), Glossary of Defense Acquisition Acronyms & Terms, Defense Acquisition University, Fort Belvoir, Virginia
- [2] Department of Defense(1981), MIL-STD-721C, Definitions of Terms for Reliability and Maintainability.
- [3] Department of Defense(1981), MIL-STD-756B, Reliability Modeling and Prediction
- [4] Department of Defense(2005), DoD Guide For Achieving Reliability, Availability, And maintainability System Engineering for Mission Success
- [5] Dudley Bruce et al. al(1994), Reliability Toolkit: Commercial Practices Edition, Reliability Analysis Center
- [6] Jaroslav Mackerle(2003), Finite element analysis of fastening and joining : A bibliography, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 80, 253-271.
- [7] N.G.Pai, D.P.Hess(2002), Experimental study of loosening of threaded fastener due to dynamic shear loads. Journal of Sound and Vibration, 253 (3), 585-602.
- [8] N.G.Pai, D.P.Hess(2002), Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load. Engineering Failure Analysis, 9, 383-402.
- [9] Naval Surface Warfare Center Carderock Division(1998), Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Naval Surface Warfare Center Carderock Division, West Bethesda, Maryland
- [10] Paul R. Franco(1992), Are Your Fastener Really Reliable? Machine Design, 66-70
- [11] Reliability Analysis Center(1991), FMD-91, Failure Mode/Mechanism Distributions-1991, Reliability Analysis Center.
- [12] Reliability Analysis Center(1995), NPRD-95, Non-Electronic Parts Reliability Data, Reliability Analysis Center.
- [13] Reliability Information Analysis Center(2011), NPRD-2011, Non-Electronic Parts Reliability Data-2011, Reliability Information Analysis Center.
- [14] Reliability Information Analysis Center(2006). RiAC-HDBK-217Plus, Handbook of 217Plus, Reliability Prediction Models, Reliability Information Analysis Center.
- [15] Rome Laboratory(1993). Rome Laboratory Reliability Engineer's Toolkit, System Reliability Division, Rome Laboratory, Air Force Materiel Command.