

안전무결성 수준 및 MTTF_d를 활용한 개발단계의 고성능 지상체 신뢰도 예측 방안

Reliability Prediction of High Performance Mooring Platform in Development Stage Using Safety Integrity Level and MTTF_d

이민영¹, 김상부^{2*}, 배인화², 강소연², 곽우영², 이성근³, 오극기³, 최대림³

Min-Young Lee¹, Sang-Boo Kim^{2*}, In-Hwa Bae², So-Yeon Kang²,
Woo-Yeong Kwak², Sung-Gun Lee³, Keuk-Ki Oh³, Dae-Rim Choi³

〈Abstract〉

System reliability prediction in the development stage is increasingly crucial to reliability growth management to satisfy its target reliability, since modern system usually takes a form of complex composition and various complicated functions. In most cases of development stage, however, the information available for system reliability prediction is very limited, making it difficult to predict system reliability more precisely as in the production and operating stages. In this study, a system reliability prediction process is considered when the reliability-related information such as SIL (Safety Integrity Level) and MTTF_d (Mean Time to Dangerous Failure) is available in the development stage. It is suggested that when the SIL or MTTF_d of a system component is known and the field operational data of similar system is given, the reliability prediction could be performed using the scaling factor for the SIL or MTTF_d value of the component based on the similar system's field operational data analysis. Predicting a system reliability is then adjusted with the conversion factor reflecting the temperature condition of the environment in which the system actually operates. Finally, the case of applying the proposed system reliability prediction process to a high performance mooring platform is dealt with.

Keywords : *Reliability Prediction, Safety Integrity Level, MTTF_d, Scaling Factor, Conversion Factor*

1 한국과학기술정보연구원 국방CBMPlus애자일팀

2* 교신저자, 창원대학교 산업시스템공학과, 교수
E-mail: sbkim@cwnu.ac.kr

2 창원대학교 산업시스템공학과

3 ㈜한지아이에스

1 Defense CBM+ Agile Team, Korea Institute of Science and
Technology Information

2* Dept. of Industrial & Systems Engineering, Changwon National
University

2 Dept. of Industrial & Systems Engineering, Changwon National
University

3 HanGIS Co., Ltd.

1. 서론

체계 개발 시 체계의 구조와 기능이 복잡해지고 높은 성능과 품질이 요구됨에 따라 체계의 운용 신뢰도를 만족하기 위하여 개발단계에서부터 신뢰도를 고려한 설계나 신뢰도 성장관리와 같은 다양한 방안을 수행하는 경우가 늘어나고 있다. 그러나 개발단계에서는 체계 신뢰도 예측을 위한 정보가 제한적이므로 실제 운용되는 상황과 같은 수준의 신뢰도 예측이 이루어지기 어렵다. 그럼에도 불구하고 체계 개발단계에서 실제로 체계 신뢰도 예측을 수행해야 하는 경우가 종종 발생한다.

이제까지 개발단계의 체계 신뢰도 예측은 주로 MIL-HDBK-217F, SR-332 등과 같은 규격을 활용하여 수행되었다 [1-3]. 유사 체계 또는 장비의 고장 데이터가 가용할 경우 필드 데이터 분석을 통한 체계 신뢰도 예측이 가능하며 [4-7], 가속수명시험 등의 시험 데이터 확보가 가능한 경우 체계의 물리적 특성과 고장 메커니즘을 기반으로 신뢰도를 예측한다 [8-10]. 최근에는 두 가지 이상의 신뢰도 예측 방법을 혼합한 새로운 신뢰도 예측 절차 또는 빅데이터 분석 기반의 신뢰도 예측 관련 연구 또한 수행되어지고 있다 [11-12].

일반적인 체계 신뢰도 예측의 경우 부품의 고장률 등 관련 신뢰도 정보가 알려지는 경우가 많지만, 이러한 정보를 구하기 어렵거나 일부만 가용한 경우가 존재한다.

이 연구에서 다루고자 하는 체계인 고성능 지상체와 같은 체계의 경우, 체계를 구성하는 일부 구성품의 고장률 정보 확보가 가능하여 신뢰도 예측 규격인 MIL-HDBK-217F(N2) [13]의 부품 부하 분석(PSA, Part Stress Analysis)을 활용하여 신뢰도 예측을 수행할 수 있으나, 일부 구성품의 경우 안전무결성 수준(SIL, Safety Integrity Level)과 평균 위험고장시간 (MTTF_d, Mean Time to Dangerous

Failure)만이 주어진다. 따라서 고성능 지상체의 경우처럼 MIL-HDBK-217F (N2)를 이용한 PSA 결과와, 유사체계 야전운용지원 분석과 SIL 및 MTTF_d로부터 계산된 변환계수 및 체계가 운용되는 환경 조건(온도)에 대한 보정계수를 적용하여 체계의 신뢰도를 예측하는 프로세스를 제안하였다.

2. 신뢰도 예측 대상 및 신뢰도 예측에 활용 가능한 자료

2.1 신뢰도 예측 대상 및 신뢰도 구조

계류형 비행체 (Aerostat) 체계는 비행체와 지상체로 구성되는 초경량 무인항공기이며 목적에 따라 유인 낙하산 강하 훈련용 기구 체계와 무인 전술 비행선 체계로 사용된다. 현재 체계 전체의 국산화를 위해 육군 특수전 학교와 해병대 교육훈련단에서 운용 중인 30m급 비행체에 대응하는 고성능 지상체(18kN급)의 개발이 진행 중에 있으며, 이 가운데 고성능 지상체가 신뢰도 예측 대상이다.

고성능 지상체는 Safety PLC(Programmable Logic Controller), EMS(Emergency Stop), 자가 진단 Embedded System, 디젤엔진, 유압시스템을 포함하는 윈치 시스템 전체를 통합 및 제어하는 시스템으로 시스템 구성도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1의 고성능 지상체의 신뢰도 예측을 위해 고려해야 하는 구성품은 붉은색 박스로 표시되어 있는 핵심 부품들이며 이 구성품들 간의 신뢰도 구조는 직렬구조이다.

2.2 안전무결성 수준 (SIL) 및 평균위험고장시간 (MTTF_d)

개발 중인 고성능 지상체의 경우 모든 구성품 및

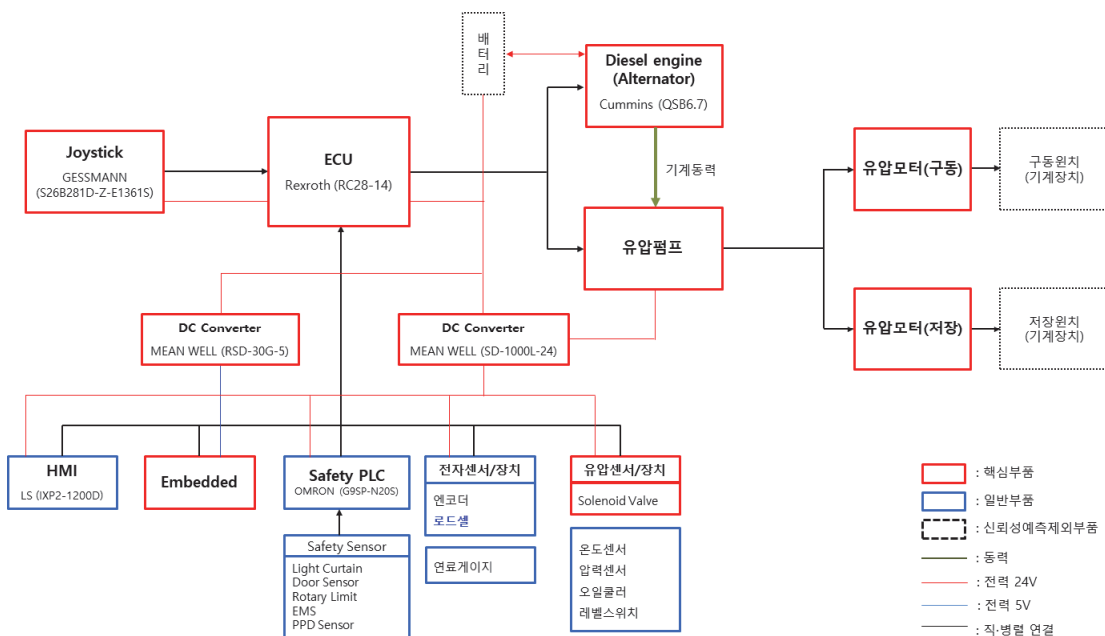


Fig. 1 Configuration diagram of high performance mooring platform

부품에 대한 자세한 수명 정보가 주어지지 않으며 일부 구성품 및 부품의 경우 SIL 또는 MTTF_d의 정보만 가용하다 [14-15].

SIL은 안전 관련 시스템 안전 기능의 안전무결성 요구사항을 규정하기 위한 불연속적인 수준으로 1부터 4까지의 수준으로 정의된다. SIL별 작동 모드의 요구사항에 따른 안전 기능에 대한 목표 기준 정의를 신뢰도 예측 자료로 활용하며 이는 Table 1과 같다. PFH (Probability of Failure per Hour)는 안전기능의 위험측 고장빈도로 수행

시간 동안 안전 기능에 대해 필요한 고장 확률을 결정하고 이것을 수행 시간으로 나눈 값(시간당 위험한 고장 확률)로 정의된다 [16].

고성능 지상체를 구성하는 구성품 중 Joystick과 ECU(Electric Control Unit)의 경우 구성품에 대한 자세한 수명 정보가 주어지지 않으며 안전 무결성 수준에 대한 정보만이 사용 가능하다.

MTTF_d는 제어시스템의 안전 관련 부품을 위험한 상태나 기능 장애 상태로 만들 수 있는 가능성이 존재하는 위험한 고장의 평균 고장 시간을 의미하며 ISO 13849-1 규격에 따라 유압 부품의 MTTF_d 값은 150년으로 추정된다 [17]. 고성능 지상체를 구성하는 유압모터와 펌프, Solenoid Valve 구성품의 데이터북 확인 결과 유압 구성품 모두 MTTF_d 150년으로 설정됨을 명기하고 있다. 일반적으로 모든 고장 모드가 위험한 고장을 유발하지 않는 것으로 가정되며 부품의 MTTF_d를 결정하는 정확한 방법은 FMEA(Failure Mode and Effect

Table 1. Probability of failure per hour

SIL	PFH
4	$\geq 10^{-9}$ 에서 $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8}$ 에서 $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7}$ 에서 $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6}$ 에서 $< 10^{-5}$

Analysis) 수행을 통해 전체 고장 모드 중 위험한 고장 모드의 비율을 찾는 것이지만 비율 추정이 어려운 경우 50%의 위험한 고장을 가정한다. 모든 고장 모드의 50%를 위험한 고장 모드로 가정할 경우 $MTTF_d$ 값은 고장분포가 지수분포라는 가정 하에 MTTF의 2배가 되는 값을 가진다 [17].

2.3 고성능 지상체 신뢰도 예측에 활용 가능한 자료

SIL 및 $MTTF_d$ 를 포함한 고성능 지상체 신뢰도 예측 대상 구성품의 가용한 수명 예측 자료는 Table 2와 같다. Joystick과 ECU는 안전무결성 수준의 정보가 주어져 있으며 DC Converter(5V, 24), Diesel Engine은 제조사에서 제공하는 구성품의 MTBF 값을 활용할 수 있다. Solenoid Valve, 유압펌프, 유압모터(구동/저장)이 포함된 유압 구성품의 경우 $MTTF_d$ 값이 사용 가능하며 Embedded System의 경우 부품 수명 정보를 활용한 Part Stress Analysis 추정 결과를 활용한다.

현재 가용한 자료를 바탕으로 체계 신뢰도 예측 시 SIL에서 사용하는 고장률의 범위가 매우 넓고 $MTTF_d$ 의 경우 전체 고장 모드 중 위험한 고장에 대한 고장 모드만을 고려하기 때문에 신뢰도 예측에 활용하기에는 어려움이 있다.

Table 2. Component life data format

Data Format	Component
SIL	Joystick, ECU
$MTTF_d$	Solenoid Valve, Hydraulic Pump, Hydraulic Motor(Storage), Hydraulic Motor(Drive)
MTBF	DC Converter(5V), DC Converter(24V), Diesel Engine
MTBF (PSA Result)	Embedded System

이 연구에서는 이를 극복하기 위한 방안으로 SIL, $MTTF_d$ 의 정보만 주어진 구성품을 대상으로 유사체계의 야전운용제원으로부터 산출된 운용신뢰도 추정값을 이용하여 산출한 보정계수를 활용하는 방식을 적용한다.

3. SIL 및 $MTTF_d$ 를 활용한 신뢰도 예측 절차

이 연구에서 제안하는 SIL 및 $MTTF_d$ 를 활용한 신뢰도 예측 절차는 Fig. 2와 같다.

먼저 신뢰도 예측 대상 아이টে를 선정하고 신뢰도 구조에 따라 RBD(Reliability Block Diagram)를 작성한다. RBD와 BOM(Bill of Material)을 바탕으로 체계를 구성하는 부품 목록을 작성하며 신뢰도 예측 모델을 설정한다. 그 후 활용이 가능한

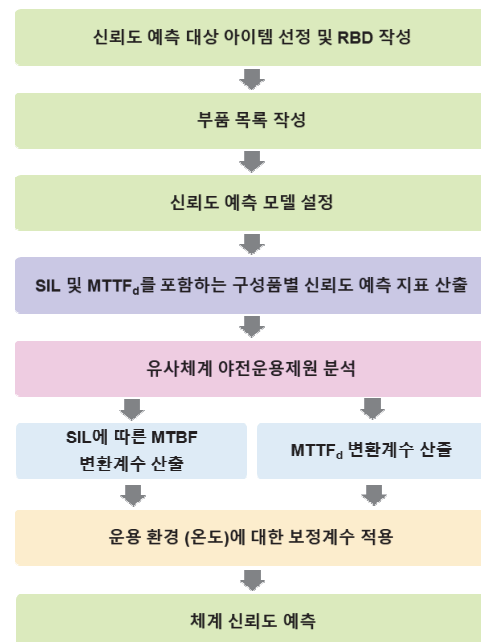


Fig. 2 Reliability prediction process with SIL and $MTTF_d$

수명 관련 자료 (제조사 제공 MTBF, PSA 결과로부터 구한 MTBF, SIL, MTTF_d)를 사용하여 구성품별 신뢰도 예측 지표를 산출한다. 체계의 유사체계 야전운용제원 분석을 수행하고 분석 결과를 활용하여 SIL로부터 정의된 고장률에 대한 변환계수 및 MTTF_d 변환계수를 산출 및 적용한다. 다음 단계에서 체계가 실제로 운용되는 환경의 조건을 반영하기 위해 온도에 대한 보정계수를 적용하여 최종적으로 체계의 신뢰도를 예측한다.

3.1 SIL 및 MTTF_d에 대한 변환계수 산출

신뢰도 예측 대상의 유사체계 야전운용제원 분석을 통해 유사 구성품별로 MTTF를 추정하고 이를 기준으로 SIL 및 MTTF_d에 대한 변환계수를 산출한다. SIL 및 MTTF_d에 대한 변환계수는 각각 식 (1)과 식 (2)로 계산된다.

$$\text{변환계수}(SIL) = \frac{\text{유사 구성품의 } MTTF}{(1/PFH)} \quad (1)$$

$$\text{변환계수}(MTTF'_d) = \frac{\text{유사 구성품의 } MTTF}{MTTF_d} \quad (2)$$

SIL 또는 MTTF_d 값이 알려진 구성품의 경우 해당 값에 유사체계 야전운용제원 분석을 바탕으로 산출된 변환계수를 곱하여 MTTF 변환값을 구하고 이를 체계 신뢰도 예측에 활용한다.

3.2 운용 환경 조건에 따른 보정계수 적용

체계의 신뢰도 예측 시 체계가 실제로 운용되는 환경의 조건을 반영하여 신뢰도 예측을 수행하는 것이 필요하다. 체계가 실제 운용되는 환경의 조건은 예측의 기준이 되는 온도 조건보다 가혹할 수 있으므로 이를 반영한 신뢰도 예측을 수행해야 한다.

이 연구에서는 Quanterion의 온도 보정계수를 사용하며, 예측 기준 온도와 운용 환경 온도에 따라 적용이 가능한 Quanterion의 온도 보정계수 표는 Table 3과 같다 [18].

Table 3에서 세로축은 기준 온도를 의미하며 가로축은 실제 운용 환경의 온도이다. 예측 기준 온도의 보정이 필요한 경우 해당 온도에 대한 보정계수를 사용하여 MTTF를 보정하고 이를 체계 신뢰도 예측에 활용한다.

Table 3. Temperature Conversion Factor

Temp.	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
10		0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
20	1.1		1.0	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2
25	1.1	1.0		0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
30	1.2	1.1	1.0		1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2
40	1.3	1.2	1.1	1.0		0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2
50	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2		0.8	0.7	0.5	0.3	0.2
60	1.9	1.7	1.7	1.6	1.5	1.2		0.8	0.6	0.4	0.3
70	2.4	2.2	2.1	1.9	1.8	1.5	1.2		0.7	0.5	0.3
80	3.3	3.0	2.8	2.7	2.6	2.1	1.7	1.4		0.7	0.4
90	4.9	4.5	4.2	4.0	3.8	3.2	2.5	2.0	1.5		0.6
100	7.7	7.0	6.7	6.3	6.0	5.0	4.0	3.2	2.3	1.6	

4. 고성능 지상체 신뢰도 예측 사례

제안한 신뢰도 예측 절차를 적용하여 개발 단계에 있는 고성능 지상체의 신뢰도를 예측한 프로세스와 결과는 다음과 같다.

4.1 고성능 지상체 RBD 및 부품 목록 작성

고성능 지상체의 신뢰도 구조는 직렬 구조를 이루고 있으므로 체계 RBD는 Fig. 3과 같다.

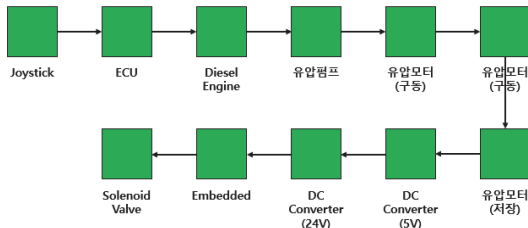


Fig. 3 Reliability block diagram of high performance mooring platform

작성한 RBD와 BOM을 바탕으로 고성능 지상체의 신뢰도 예측에 고려하는 구성품 목록을 작성한다. Table 4에 고성능 지상체의 구성품 목록 일부를 표기하였다.

Table 4. Part list of high performance mooring platform

No.	Part Name (Part No.)	Qty	Manufacturer
1	Joystick	1	GESSMANN
2	ECU	1	Bosch Rexroth
3	Diesel engine	1	Cummins
	⋮		
17	Solenoid Valve	1	Bosch Rexroth

4.2 신뢰도 예측 모델 설정

체계의 구성품 가운데 부품 수명 정보를 이용하여 신뢰도 예측을 하는 경우 신뢰도 예측 모델을 설정한다. 고성능 지상체의 구성품 신뢰도 예측의 경우 MIL-HDBK-217F (N2)를 이용하여 분석하는 것을 기준으로 한다 [13].

4.3 SIL 및 MTTFd를 포함하는 구성품별 신뢰도 예측 지표 산출

고성능 지상체를 구성하는 신뢰도 예측 대상 구

성품의 가용한 수명 예측 자료는 Table 5와 같다. Joystick과 ECU는 SIL 2의 정보가 주어져 있으므로 Table 1의 PFH에 따라 보다 가혹한 조건을 적용하여 10^{-6} 의 고장률을 사용한다. DC Converter(5V, 24V)와 Diesel Engine은 제조사에서 제공하는 구성품의 MTBF 값을 활용하며 Solenoid Valve, 유압펌프, 유압모터(구동, 저장)이 포함된 유압 구성품은 MTTFd 150년을 시간 단위로 변환한 (1년 8,760시간 기준) 값이다. Embedded System의 경우 부품 정보로부터 산출된 PSA 추정 결과를 활용한다.

Table 5. Component Life Data

Component	Data(hrs)	Component	Data(hrs)
Joystick	1,000,000	Solenoid Valve	1,314,000
ECU		Hydraulic Pump	
DC Converter (5V)	396,900	Hydraulic Motor (Drive)	
DC Converter (24V)	898,200	Hydraulic Motor (Storage)	
Diesel Engine	22,727.27	Embedded System	1,552,340

4.4 유사체계 야전운용제원 분석

고성능 지상체 구성품의 SIL 및 MTTFd로부터 도출된 신뢰도 예측 지표에 변환계수를 적용하기 위해 유사체계 운용 실적 및 정비 실적을 사용한 야전운용제원 분석을 수행한다. 분석에 사용한 유사체계의 운용 실적 기록 기간은 2014년 1월부터 2023년 10월이고 정비 실적 기록 기간은 2016년 1월부터 2023년 8월이다. 운용 실적에는 장비 운용 전 예열 시간인 예비 시동 시간부터 강하 훈련 시작 및 종료 시간, 예비 시동부터 강하 종료까지

의 시간을 의미하는 장비 운용 시간, 상승 횟수, 강하 인원 등의 내용이 기록되어 있으며 정비 실적에는 정비 일시, 세부 정비 내용, 정비 구분의 내용이 기록되어 있다.

정비 실적에 기록된 정비 세부 내용을 바탕으로 유사체계의 고장을 구분하였으며 유사체계 구성품을 기준으로 구분된 정비 현황은 Table 6과 같다.

유사체계 야전운용제원을 살펴본 결과 유사체계를 구성하는 구성품 중 PLC, Diesel Engine, Solenoid Valve, Digital Amplifier, 유압모터(저장)의 고장이 확인되었다. PLC와 Digital Amplifier의 경우 개발단계의 고성능 지상체를 구성하는 ECU와 동일한 역할을 수행하므로 유사체계 야전운용제원의

PLC와 Digital Amplifier 고장 자료를 통합하여 신뢰도 분석을 수행한다.

유사체계 정비 실적에 작성된 정비 일시를 기준으로 운용 실적을 사용하여 고장 시점까지의 누적 운용 시간을 계산하며 현재 고장까지의 누적 운용 시간과 이전 고장까지의 누적 운용 시간의 차이를 계산하여 고장 간의 운용 시간을 산출한다. 유사체계 마지막 운용 시점까지의 누적 운용 시간인 870.45시간을 기준으로 마지막 고장 발생 시점에서의 누적 운용 시간 간의 차이를 계산한 값을 관측 중단 시간(Censoring Time)으로 설정하여 분석을 진행한다.

PLC와 Digital Amplifier는 다수의 전자 부품으로 구성된 조립체로 수명이 지수분포를 따른다고 가정한다. Solenoid Valve와 유압모터(저장)의 경우에는 고장 데이터를 바탕으로 Anderson-Darling 통계량을 이용한 수명 분포 적합 결과 Loglogistic 분포가 적합한 것으로 나타났지만, 이 경우에 실제로 지수분포와 가까운 형태를 가지므로 지수분포를 가정하였다.

각 구성품의 수명 분포가 지수분포를 따른다고 가정하여 유사체계 야전운용제원의 고장 모드별 신뢰도 분석을 수행한 결과는 Table 7과 같다.

Solenoid Valve와 유압모터(저장)의 예측값이 동일한 이유는 두 경우 모두 2회의 고장이 발생하고 동일한 관측 중단 시점을 가지기 때문이다. 그리고 Table 7의 유사체계 야전운용제원 분석 결과를 활용하여 구성품의 SIL, MTTF_d에 대한 변환계수를 산출한다.

Table 6. List of Failed Components of Similar System

Failure Number	Failed Component
1	PLC
2	PLC
3	Solenoid Valve
4	Solenoid Valve
5	PLC
6	Digital Amplifier & PLC
7	PLC
8	Diesel Engine
9	Hydraulic Motor(Storage)
10	Diesel Engine
11	Diesel Engine
12	Diesel Engine
13	Hydraulic Motor(Storage)
14	PLC
15	PLC
16	Digital Amplifier & PLC
17	PLC
18	PLC
19	PLC

Table 7. Result of MTTF Estimation for Similar System Components

Similar System Component	MTTF(hrs)
PLC + Digital Amplifier	106.42
Solenoid Valve	435.23
Hydraulic Motor(Storage)	435.23

4.5 SIL 및 MTTFd에 대한 변환계수 산출

유사체계 야전운용제원 분석 결과를 바탕으로 추정된 PLC+Digital Amplifier, Solenoid Valve, 유압모터(저장)의 MTTFd 값과 각 구성품의 SIL 또는 MTTFd 값으로부터 변환계수를 산출하여 고성능 지상체 신뢰도 예측에 반영한다. 변환계수는 식 (1)과 식 (2)를 사용하며 추정하며, 그 결과는 Table 8과 같다.

개발 중인 고성능 지상체의 ECU, Solenoid Valve, 유압모터(저장)의 SIL 또는 MTTFd 값에 대해 유사체계 야전운용제원 분석 결과를 바탕으로 산출된 변환계수를 곱하여 MTTFd 변환값을 계산한다. 구성품별 MTTFd 변환값은 Table 9와 같다.

Table 8. Scaling factors for three components

Component	Scaling Factor
PLC + Digital Amplifier	0.001064
Solenoid Valve	0.000331
Hydraulic Motor(Storage)	0.000331

Table 9. MTTFd estimated using scaling factor

Component	SIL or MTTFd (hrs)	Scaling Factor	Scaled MTTFd (hrs)
ECU	1,000,000	0.001064	1,064.200
Solenoid Valve	1,314,000	0.000331	435.230
Hydraulic Motor (Storage)	1,314,000	0.000331	435.230

4.6 운용 환경(온도)에 대한 보정계수 적용

체계가 실제 운용되는 환경의 조건을 반영하여 신뢰도 예측을 수행하기 위해 운용 환경인 온도에

대한 보정계수를 적용한다.

개발 중인 고성능 지상체 구성품의 기준 온도를 확인하고 고성능 지상체가 실제 운용되는 환경의 최고 온도인 60°C를 고려하여 선정된 보정계수를 확인한 결과는 Table 10과 같다. Table 3의 보정계수를 사용하였으며 기준 온도를 확인할 수 있는 DC Converter (24V, 5V)와 Embedded System 외의 구성품은 온도가 수명에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하여 운용 환경 조건에 대한 보정계수를 적용하지 않는다.

Table 10. MTTFd Estimated Using Temperature Conversion Factor

Component	MTTF (hrs)	Conversion Factor	Converted MTTFd (hrs)
DC Converter (5V)	396,900	0.6 (25°C→60°C)	238,140
DC Converter (24V)	898,200	0.6 (25°C→60°C)	538,920
Embedded System	1,552,340	0.7 (30°C→60°C)	1,086,638

4.7 고성능 지상체 신뢰도 예측

고성능 지상체 구성품의 SIL 및 MTTFd에 대한 변환계수, 온도에 따른 보정계수를 모두 적용한 고성능 지상체의 구성품별 최종 신뢰도 예측 지표는 Table 11과 같다.

유사체계 야전운용제원 분석 결과를 활용하여 SIL 및 MTTFd에 대한 변환계수 계산 시 Joystick과 유압펌프, 유압모터(구동)의 경우 정비 기록에 고장이 발생하지 않아 변환계수 산출이 어렵다. 따라서, Joystick의 경우 SIL 2에 따른 PFH를 고장률로 사용하고 유압펌프와 유압모터(구동)의 경우 MTTFd 150년의 50%인 75년을 MTTFd로 전환하여 사용한다.

Table 11. MTTF Estimated Using Scaling and Conversion Factors

Component	MTTF (hrs)	Component	MTTF (hrs)
Joystick	1,000,000.00	Diesel Engine	22,727.27
ECU	1,064.20	Hydraulic Pump	657,000.00
DC Converter (5V)	238,140.00	Hydraulic Motor (Drive)	657,000.00
DC Converter (24V)	538,920.00	Hydraulic Motor (Storage)	435.23
Embedded System	1,086,638.00	Solenoid Valve	435.23

모든 구성품의 MTTF 추정값을 사용하여 신뢰도 구조가 직렬 구조인 고성능 지상체 체계 전체의 신뢰도 예측을 수행한 결과 최종 MTTF 예측값은 178.84시간이다. 이 MTTF 예측값은 유사체계 대비 약 3배 정도의 높은 값을 확인하였으며, 실제로 해당 MTTF 값이 실현되는 경우 충분한 실효성을 가질 것으로 예측된다.

5. 결론

이 연구에서는 체계 신뢰도 예측 시 모든 구성품에 대한 고장률과 같은 신뢰도 정보가 주어지지 않고, SIL 및 MTTF_d와 같은 수명 정보만이 주어질 때 신뢰도 예측을 수행하는 방안을 고려하였다. SIL의 경우 선택 가능한 고장률의 범위가 매우 넓고 MTTF_d는 전체 고장 모드 중 위험 고장에 대한 고장 모드만을 고려하기 때문에 그대로 체계 신뢰도 예측에 활용하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하는 방안으로 SIL 및 MTTF_d의 정보만이 주어진 구성품을 대상으로 유사체계 야전운용 제원으로부터 산출된 운용 신뢰도 추정값을 이용하

여 계산한 변환계수를 활용하는 방안을 제시하였다. 제조사에서 구성품에 대한 수명 정보를 제공하고 있는 경우에는 제공된 MTBF를 활용하거나 PSA를 통해 추정된 MTBF 값을 사용하였다.

또한 체계가 실제로 운용되는 환경의 온도 조건을 반영하기 위해 구성품의 사용 기준 온도와 실제 운용 온도의 최대값을 고려하여 온도에 대한 보정계수를 적용하였으며, 이 연구에서 제안한 신뢰도 예측 프로세스를 개발단계에 있는 고성능 지상체에 적용한 결과 최종 MTTF 예측값은 178.84 시간으로 산출되었다.

이 연구에서 제안한 개발단계의 체계 신뢰도 예측 프로세스는 가용한 신뢰도 정보의 부족으로 신뢰도 예측이 어렵거나 예측의 정확성이 떨어지는 한계점을 극복할 수 있게 함으로 고객의 신뢰도 요구 조건을 만족하는 체계 개발에 도움이 되리라 기대한다.

감사의 글

이 연구는 대한민국 정부 (산업통상자원부, 방위사업청 및 과학기술정보통신부) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력(R&D) 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : 22-SN-GU-12, 과제고유번호 : 9991008691)

참고문헌

[1] K. Lee, W. Kim, Y. Chang, C. Chang and Y. Kim, "Reliability prediction of auxiliary power unit for 8200 series electric locomotive using SR-332," Proc. of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 143-144, (2017).

- [2] G. Lee, S. Kim, W. Park and K. Oh, "Reliability prediction of touch-machine control panel using MIL-HDBK-217F and Telcordia SR-332 : case study," *Journal of the Korean Society of Systems Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 9-18, (2016).
- [3] Y. Park, "Case study of reliability prediction using FIDES," *Proc. of the Korean Reliability Society*, pp. 52-58, (2016).
- [4] Y. Seo, G. Lee, Y. Lee and J. Kim, "Reliability prediction based on field failure data of guided missile," *Journal of Applied Reliability*, vol. 18, no. 3, pp. 250-259, (2018).
- [5] C. Kim, J. Kim, G. Lee, Y. Lee, M. Kim, S. Jeong and M. Han, "Estimating the reliability prediction correction factor through field big data analysis of a one-shot device," *Journal of Applied Reliability*, vol. 21, no. 3, pp. 246-254, (2021).
- [6] Y. Lee and W. Park, "Reliability projection using simulation on fix effectiveness factor : a case study of launcher system," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 9, pp. 391-398, (2021).
- [7] Y. Cheng, H. Zhu, K. Hu, J. Wu, X. Shao and Y. Wang, "Reliability prediction of machinery with multiple degradation characteristics using double-Wiener process and Monte Carlo algorithm," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 134, (2019).
- [8] A. Regattieri and A. Casto, F. Piana, M. Faccio and E. Ferrari, "Reliability prediction of a mechanical component through accelerated life testing," 24th International Conference on Production Research, (2017).
- [9] D. Lee, S. Jung, B. Lee, G. Jeong, B. Park, D. Ahn and J. Jang, "Case study on reliability prediction of barrier type pulse separation device using stress-strength analysis," *Journal of Applied Reliability*, vol. 15, no. 2, pp. 124-130, (2015).
- [10] S. Kim, Y. Seo, S. Lee and J. Kim, "Study on the improvement of reliability prediction model," *Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 10, pp. 447-456, (2021).
- [11] S. Peyghami, Z. Whang and F. Blaabjerg, "A guideline for reliability prediction in power electronic converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10958-10968, (2020).
- [12] Y. Kim, "A study of reliability prediction using machine learning model," *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 21-30, (2021).
- [13] Department of Defense, "Military hand book : reliability prediction of electronic equipment, MIL-HDBK-217F Notice 2" (1995).
- [14] GESSMANN, "Single-axis controller (S26) databook," (2021).
- [15] Bosch Rexroth Oil Control, "Solenoid operated valves pilot operated poppet type 2-way normally open common cavity, size 08 data book," (2021).
- [16] IEC 61508, "Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems," (2015).
- [17] ISO 13849-1, "Safety of machinery safety-related parts of control systems, part 1 : general principles for design," (2015).
- [18] Quanterion, "System reliability toolkit- V : new approaches and practical applications," (2015).