수리 가능 시스템의
고장 분포 추정 모듈 보완점 제안

디지털의료융합학과 김민주
융합기계공학과 김민재
산업공학과 김윤희
산업공학과 한종훈
산업공학과 이준희

CONTENT

Part.1

통계적 시각화 제안

1 | 연구 배경 및 목적

2 | 기초 데이터 분석

3 | 제안점

4 | 결론

Part.2

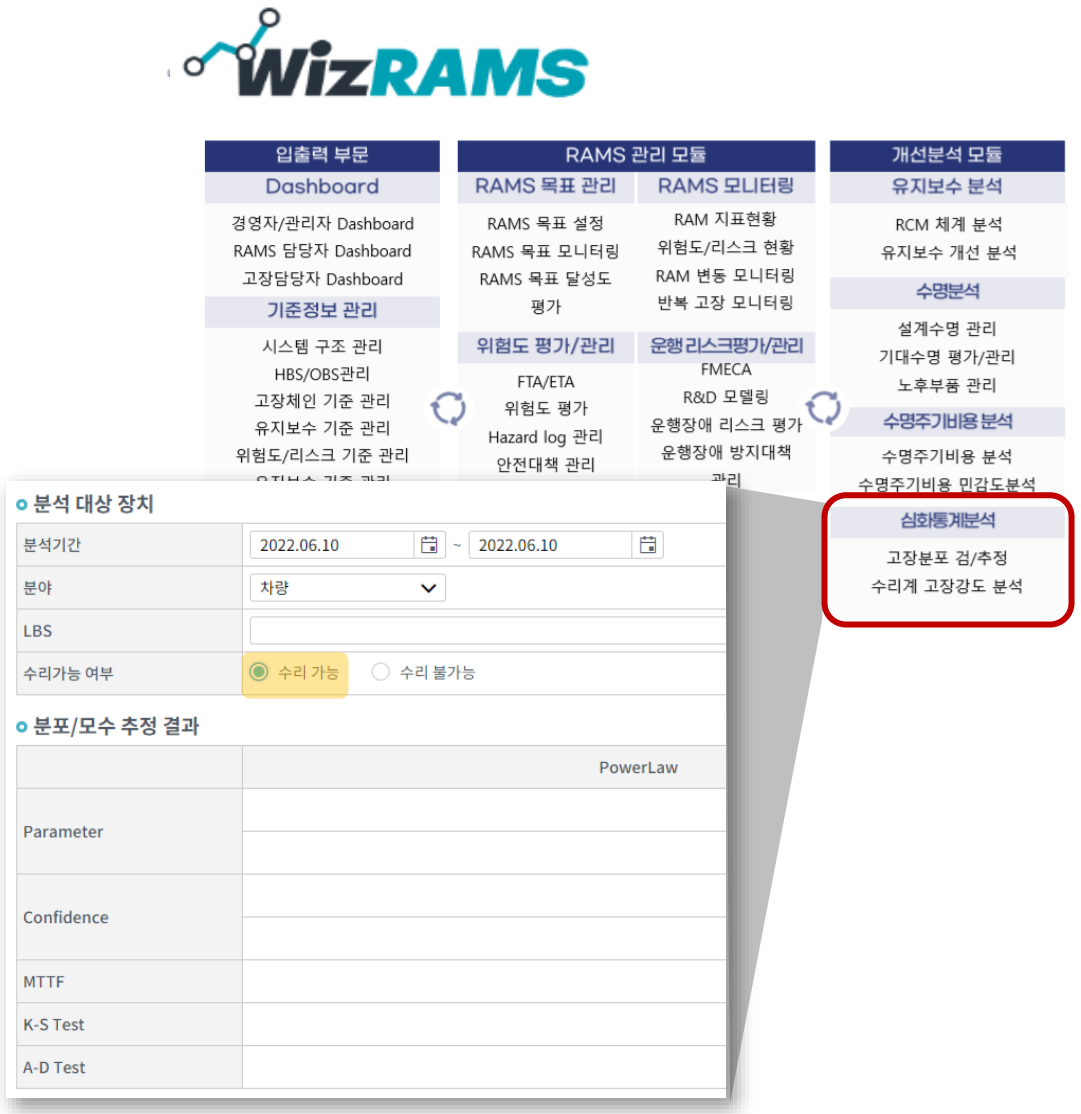
시스템 보완

1 | 보완점 제시

Part.1

통계적 시각화 제안

1 | 연구배경 및 목적



- **NEMOSYS**의 '**WizRAMS**'의 시스템 개선 및 기여 방안 모색
- 시스템의 분포 추정 시스템의 개선 방향으로 선정
- 이 중 **수리 가능 모델과 관련한 추가적인 개선 방향 모색**

1 | 연구배경 및 목적

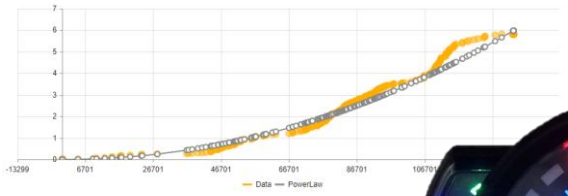
| 수리가능 시스템



1 | 연구배경 및 목적

분석 대상 장치

분석기간	1989.01.01 ~ 2022.03.31
분야	신호
LBS	오도미터(Odometer)
수리가능 여부	◉ 수리 가능 ○ 수리 불가능



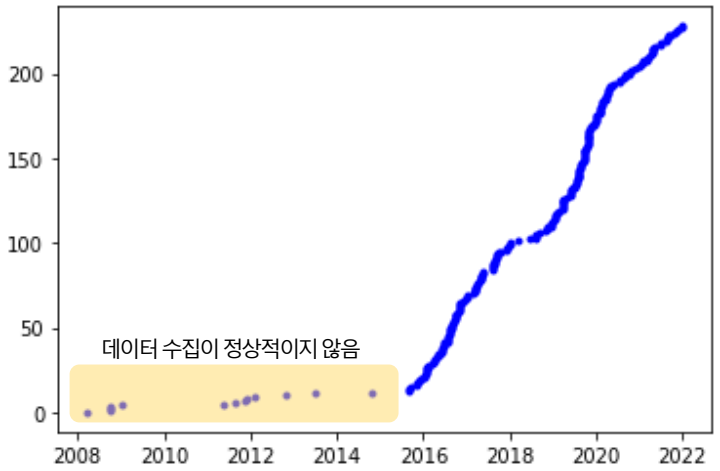


- 분석을 위해 데이터로 장치 **‘오도미터(Odometer)’** 선정
- 적절한 고장 이력 개수(229개)와 고장에 대한 기계적 도메인 지식이 크게 필요하지 않음

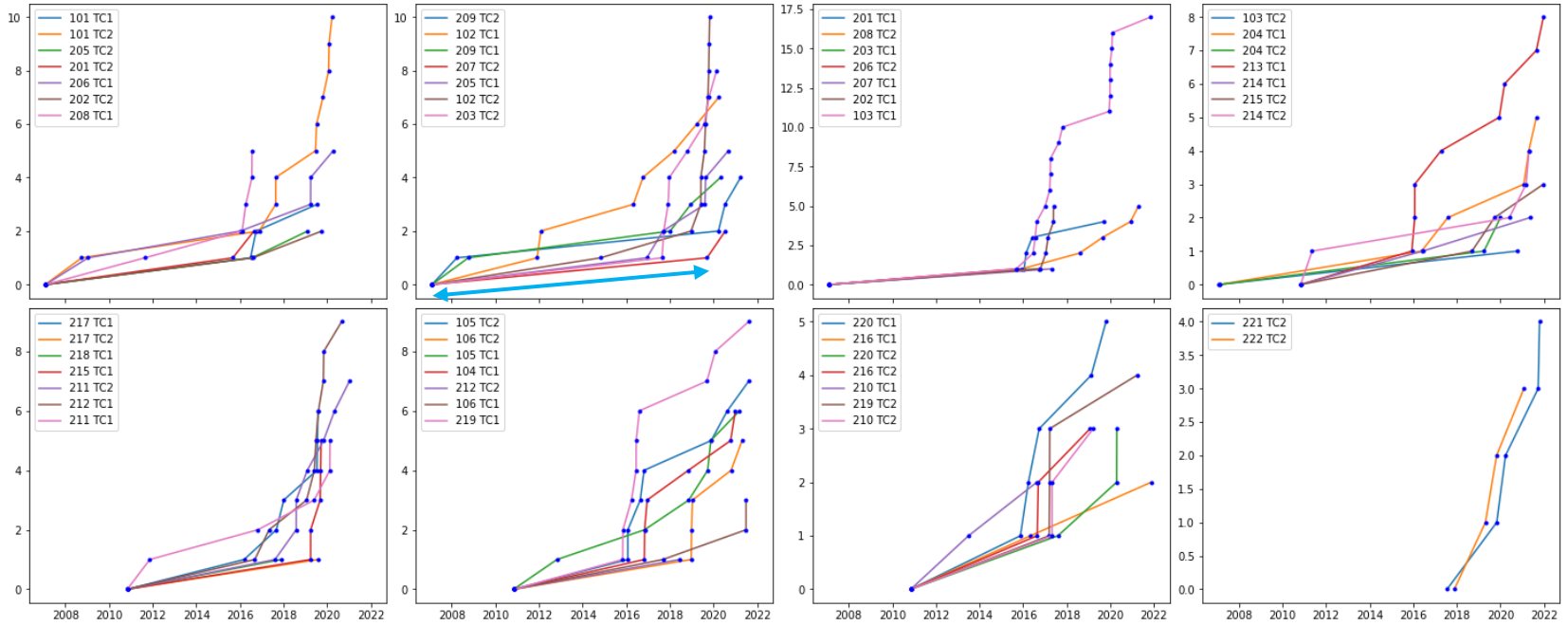
2 | 기초 데이터 분석

| 오도미터(Odometer)

전체 고장 이력



열차별 고장 이력

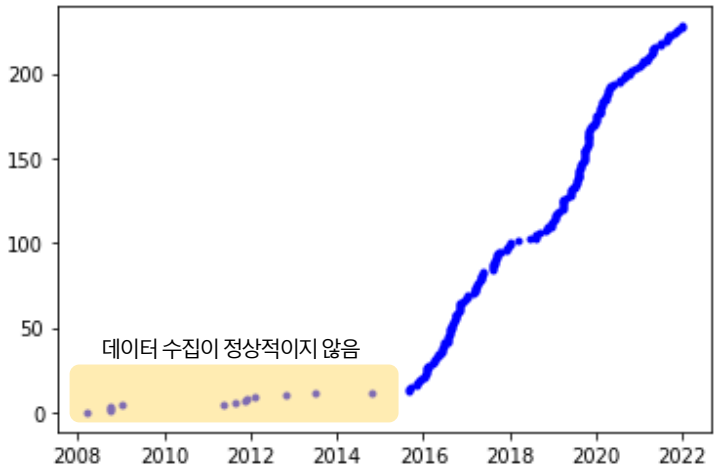


- 전체 고장 이력 기준, **2016년 이전 수집된 데이터의 경우 정상적으로 수집되지 않음**
- 열차별 고장 이력의 경우, **긴 기간 고장이 발생하지 않거나 4개월 이하의 짧은 고장이 발생**하는 등 분포를 확인 가능
- NEMOSYS의 경우 열차별 고장 이력이 아닌 전체 고장 이력을 기준으로 분포 추정 진행

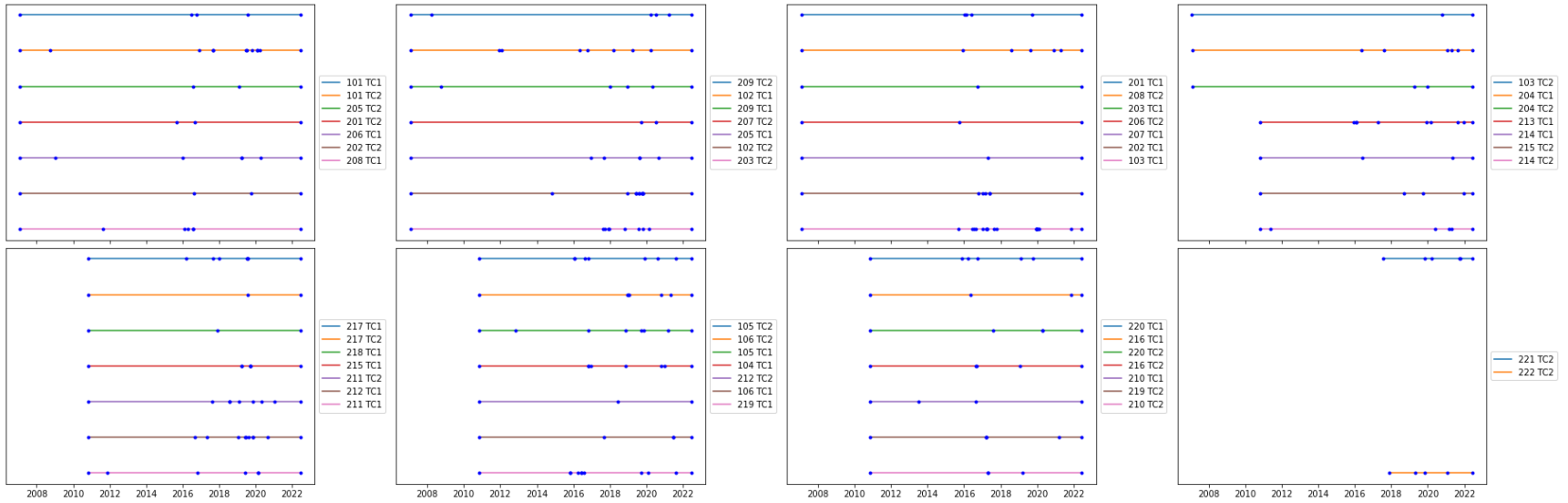
2 | 기초 데이터 분석

| 오도미터(Odometer)

전체 고장 이력



열차별 고장 간격



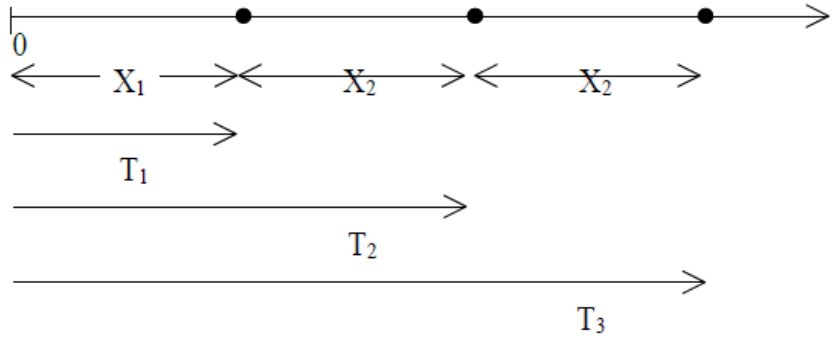
- 전체 고장 이력 기준, **2016년 이전 수집된 데이터의 경우 정상적으로 수집되지 않음**
- 열차별 고장 이력의 경우, **긴 기간 고장이 발생하지 않거나 4개월 이하의 짧은 고장이 발생**하는 등 분포를 확인 가능
- NEMOSYS의 경우 열차별 고장 이력이 아닌 전체 고장 이력을 기준으로 분포 추정 진행

2 | 기초 데이터 분석

| 오도미터(Odometer)

M =(C2-G2)*24

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	분야	분석여부	고장발생일시	LBS	고장범주	설비명	가동일		
2	신호	Y	2007.02.04	오도미터(Odometer)	기능고장	103 TC1	2007.02.04	*24	-
3	신호	Y	2021.11.08 11:43:00	오도미터(Odometer)	기능고장	103 TC1	2007.02.04	129,396	129,396
4	신호	Y	2010.11.03	오도미터(Odometer)	기능고장	105 TC2	2010.11.03	-	-
5	신호	Y	2021.08.13 20:07:00	오도미터(Odometer)	경미고장	105 TC2	2010.11.03	94,484	94,484
6	신호	Y	2010.11.03	오도미터(Odometer)	기능고장	106 TC1	2010.11.03	-	-
7	신호	Y	2021.06.29 07:02:00	오도미터(Odometer)	기능고장	106 TC1	2010.11.03	93,391	93,391
8	신호	Y	2021.06.29 07:02:00	오도미터(Odometer)	기능고장	106 TC1	2010.11.03	93,391	93,391
9	신호	Y	2007.02.08	오도미터(Odometer)	기능고장	204 TC1	2007.02.08	-	-

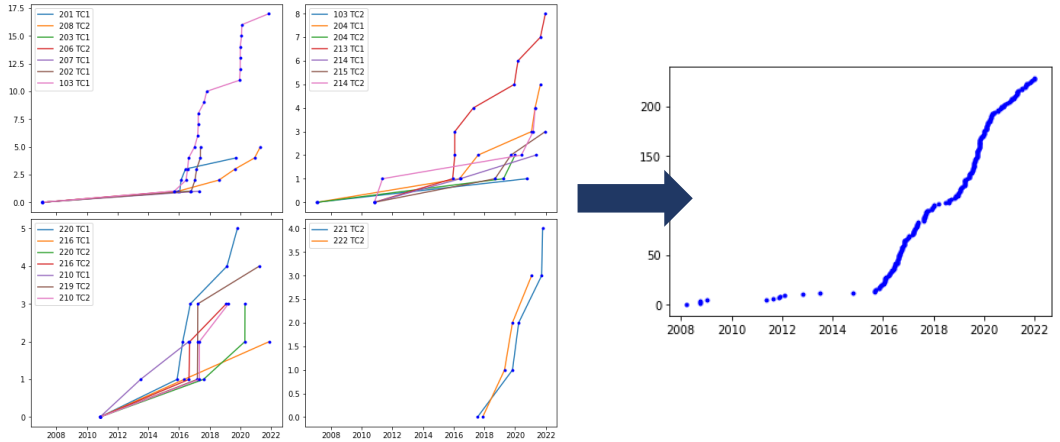


고장발생시간 T_i와 고장간격시간 X_i의 도시

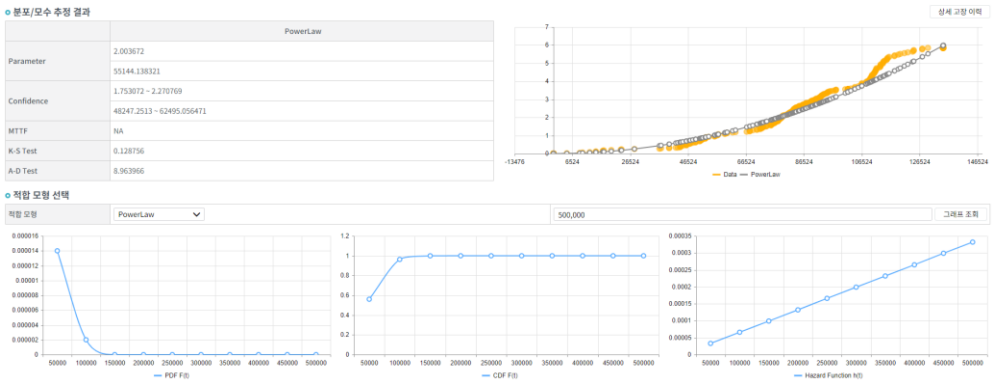
- 시간 간격을 알기 위해 기존 NEMOSYS의 분석 방법을 참고로 **Fail Log의 시간 간격 전처리 진행**
- NEMOSYS의 경우 각 수리 발생 시간 간의 간격이 아닌 "**가동일" 기준의 계산**을 통해 전체 시스템의 운영 기준으로 분석 진행

3 | 제안점

(1) 길이, 간격이 각기 다른 열차를 하나 시스템으로 취급



(2) 기존의 누적 고장분포만으로는 충분한 분포 설명 부족



“ 추가적인 검정법 및 분포 시각화 필요성 확인 ”

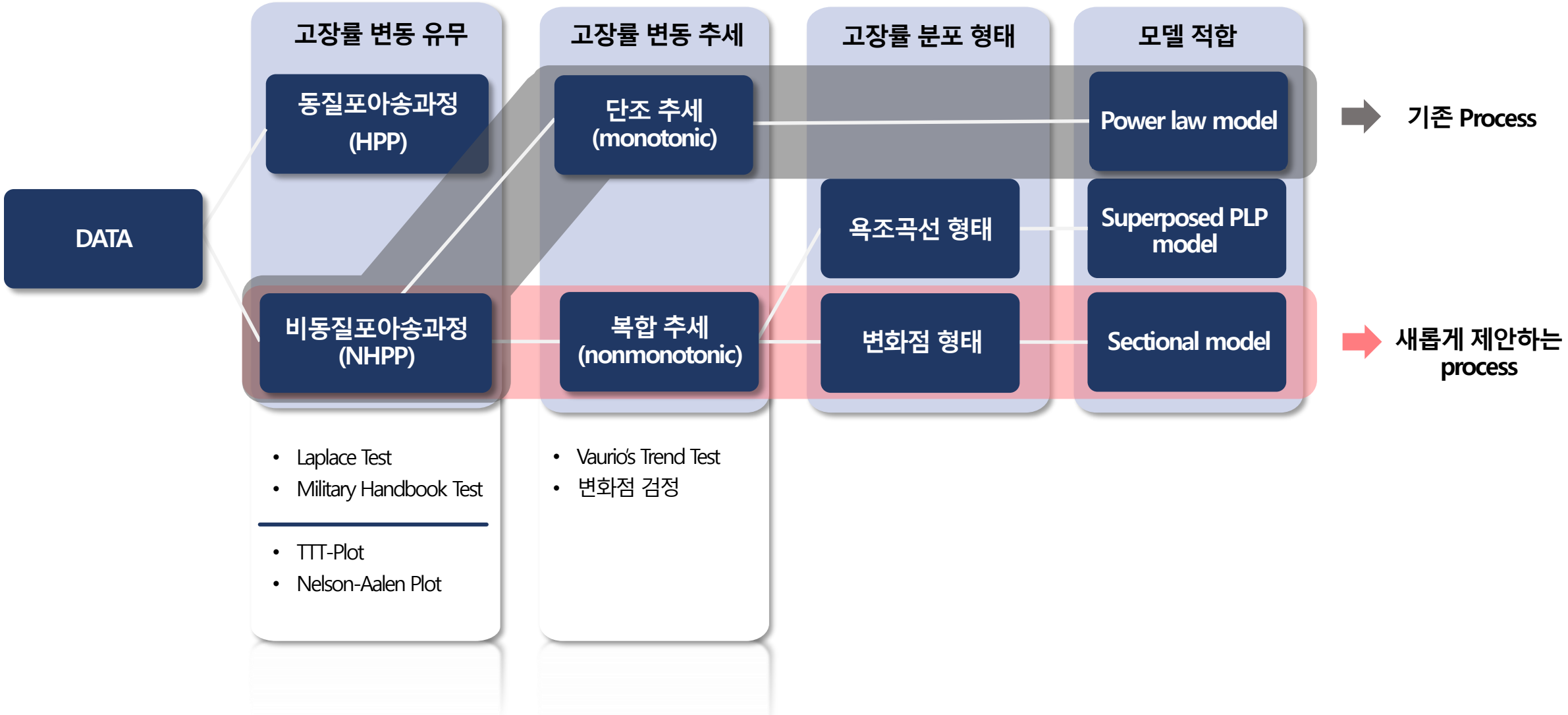
3 | 제안점

| 수리가능 시스템



3 | 제안점

| 수리가능 시스템



3 | 제안점

(1) 검정법 - 고장률 변동 유무

| Laplace test

- HPP를 귀무가설, NHPP를 대립가설로 하여 HPP 여부를 검정하는 방법
- 추세 없음과 NHPP 지수 모형 사이에서 선택하는 경우, 데이터가 지수 법칙을 따르는 시스템에서 나온 경우에 유의성을 찾는 면에서 좋은 결과를 도출해 낼 수 있음

$$L = \frac{\sum_{k=1}^{n} T_j - \frac{1}{2}n(b-a)}{\sqrt{(\frac{1}{12}n(b-a)^2)}}$$

| Military HandBook test

- 시스템이 HPP이라는 귀무가설과 시스템이 단조추세를 가지는 NHPP라는 대립가설을 검정하는 방법

$$M = 2\sum_{j=1}^{n} \ln \frac{b-a}{T_j - a}$$

3 | 제안점

(1) 검정법 - 고장률 변동 추세

| Vaurio's Test

- Non-monotonic trends test (such as bathtub-type behaviour)

$$V_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} |T_i - T_n/2| - nT_n/4}{T_n\sqrt{n/48}} \sim N(0,1)$$

$$V_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} |T_i - T_n/2|^2 - n{T_n}^2/12}{{T_n}^2\sqrt{n/180}} \sim N(0,1)$$

$$V_3 = 2\sum_{i=1}^{n} \log\left(\hat{T}/|2T_i - T_n|\right) \sim \chi^2(2n)$$

Indicators of the hazard rate $h(u)$

$V_1 > 0$	$V_2 > 0$	$V_3 < 2n - 0.66$	Bathtub
$V_1 < 0$	$V_2 < 0$	$V_3 > 2n - 0.66$	Inverse bathtub

[a] Median of $\chi^2(2n)$ distribution (approximately).

Vaurio, J. K. "Identification of process and distribution characteristics by testing monotonic and non-monotonic trends in failure intensities and hazard rates." *Reliability Engineering & System Safety* 64.3 (1999): 345-357.

3 | 제안점

(1) 검정법 - 고장률 변동 추세

| 변화점 검정

- 귀무가설은 변화점이 없고 고장발생률이 일정하지 않은 비동질 포아송 프로세스를 가정
- 대립가설은 변화점이 R개 있고, (R+1)개의 구간은 각각 고장발생률이 일정하지 않은 비동질 포아송 프로세스를 가정
- $k_1, \cdots, k_R$ 변화점은 R을 고정시키고 SIC가 최소화되는 그 때의 값을 미지의 변화점에 대한 추정치로 결정

$$H_0: \lambda_1(t) = \cdots = \lambda_{R+1}(t)$$
$$H_1: \lambda_1(t) \neq \cdots \neq \lambda_{R+1}(t)$$

$$SIC_k(R) = -2M(R) + (2R+1)\ln n$$

*Step*1. 변화점의 개수(R)를 가정.

*Step*2. $SIC_k(R) = \underset{i}{\arg min}\,(SIC_i(R))$

*Step*3. $\min\{SIC_k(R),\ SIC(R=0)\}$

$$\Lambda_1(t) = \left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\beta_1},\quad 0 < t \le t_k$$

$$\Lambda_2(t) = \left(\frac{t_k}{\theta_1}\right)^{\beta_1} + \left[\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^{\beta_2} - \left(\frac{t_k}{\theta_2}\right)^{\beta_2}\right],\quad t_k < t \le t_m$$

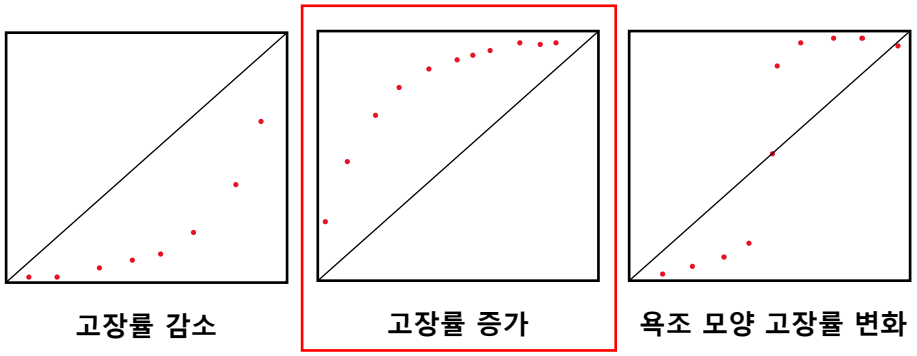
$$\Lambda_3(t) = \left(\frac{t_k}{\theta_1}\right)^{\beta_1} + \left[\left(\frac{t_m}{\theta_2}\right)^{\beta_2} - \left(\frac{t_k}{\theta_2}\right)^{\beta_2}\right] + \left[\left(\frac{t}{\theta_3}\right)^{\beta_3} - \left(\frac{t_m}{\theta_3}\right)^{\beta_3}\right],\quad t_m < t \le t_n$$

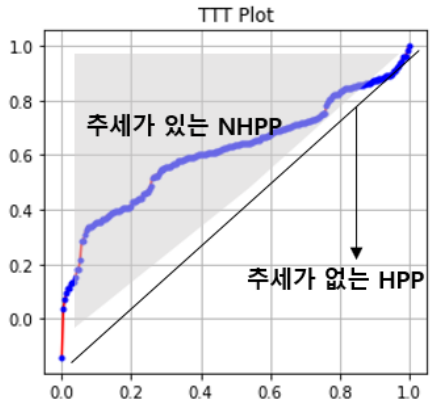
$$\ell = \sum_{i=k+1}^{n} \ln\left[\frac{\beta_j}{\theta_j}\left(\frac{t_i}{\theta_j}\right)^{\beta_j - 1}\right] - \left[\left(\frac{t_n}{\theta_j}\right)^{\beta_j} - \left(\frac{t_k}{\theta_j}\right)^{\beta_j}\right],\quad j = 1,\ 2,\ 3$$

(2) 시각화 - 고장률 변동 유무

| TTT Plot(total time on test plot)

- 수리가능시스템에서의 TTT Plot 은 NHPP를 기초로 하여 누적고장개수와 누적고장시간을 도시한 그림



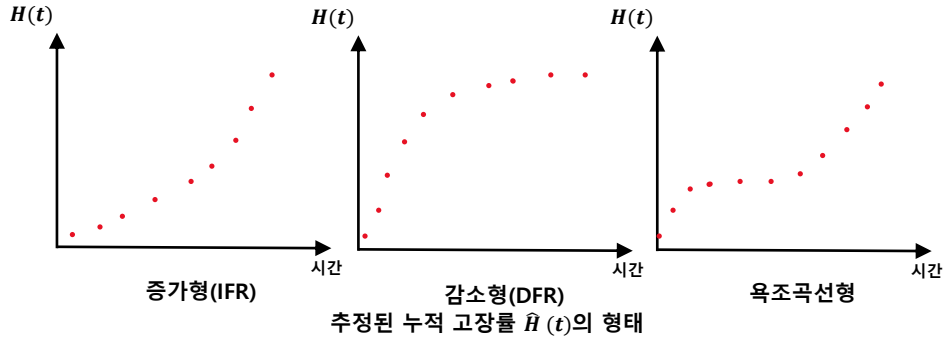


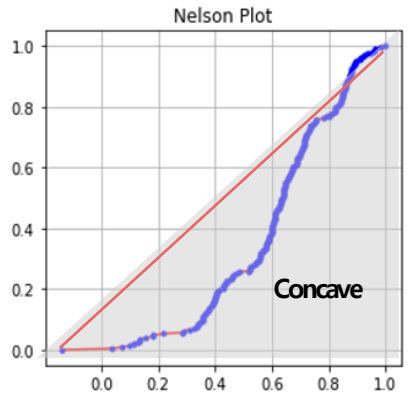
$$TTT_i = \sum_{j=1}^{i} (N - j + 1)(X_j - X_{j-1})$$

$$TTT_i^* = \frac{TTT_i}{TTT_n}$$

| Nelson-Aalen Plot

- 수리가능시스템에서 관찰시간 t와 비모수 추정치 $\hat{\Lambda}(t)$를 도시
- TTT plot과 마찬가지로, 직선과 가까이 위치하면 시스템의 추세가 없음을 나타냄





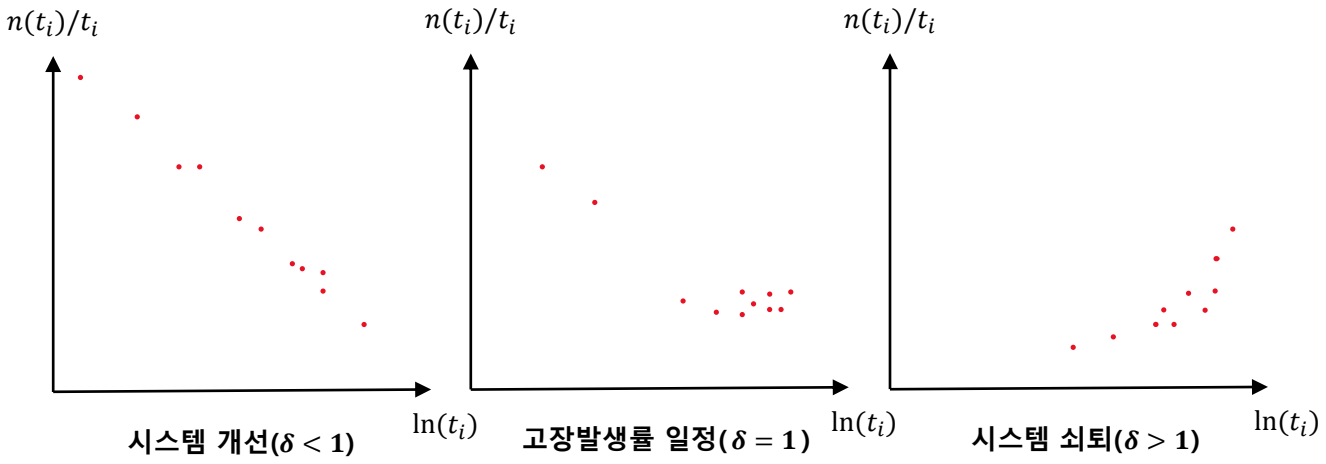
$$\hat{\Lambda}(t) = \sum_{T_i \le t} \frac{1}{N(T_i)}$$

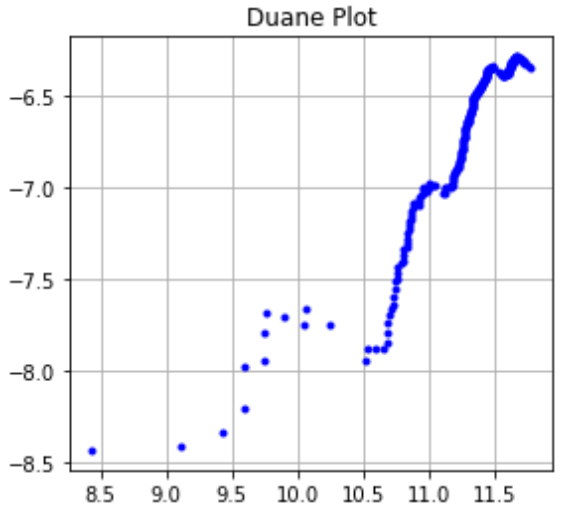
* $N(T_i)$는 T_i 이전까지 관찰된 고장의 수

(2) 시각화 - 고장률 변동 유무

| Duane Plot

- Duane plot은 수리가능 시스템에서 해당 데이터의 HPP 여부 판단
- 해당 그래프는 고장시간 t_i와 $n(t_i)/t_i$를 대수로 변환한 도표에 타점한 것
- Plot이 일차함수 형태를 나타낸다면 본 데이터가 NHPP이며, power-law process가 fitting에 적합함을 나타냄

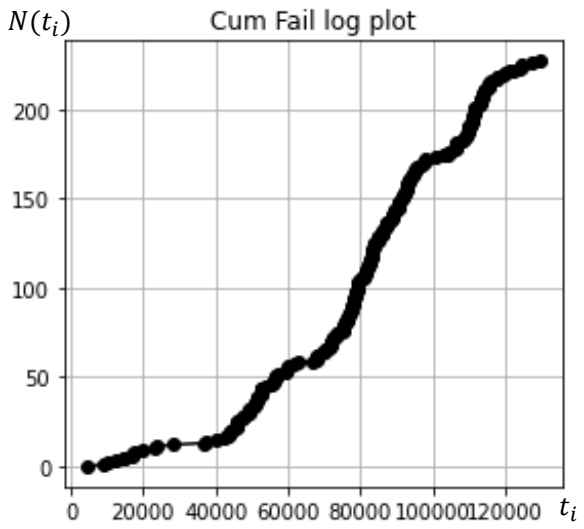


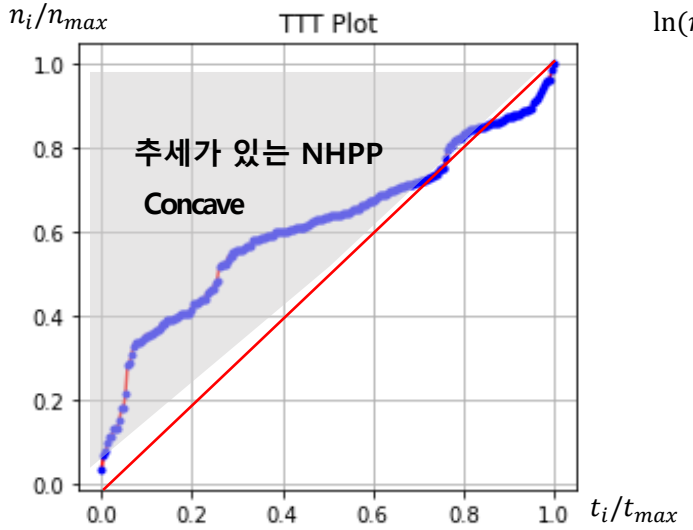


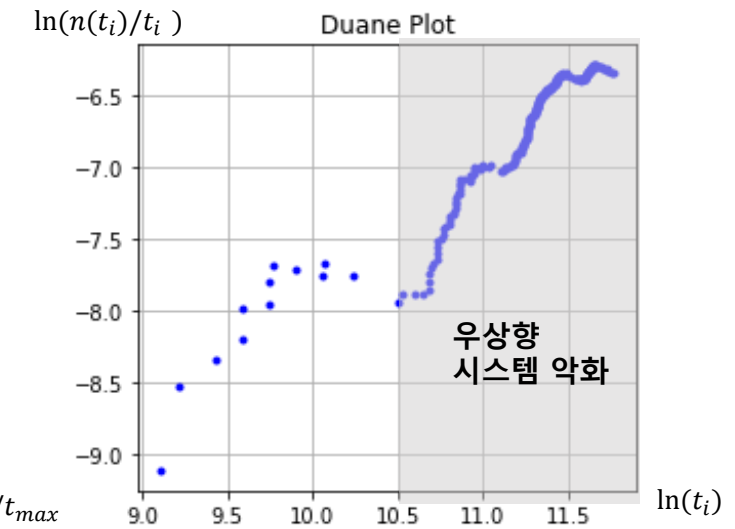
3 | 제안점

| 오도미터(Odometer)

- 전처리된 데이터를 기반으로 분포 형태를 파악하기 위해 Plot 및 검정 진행
- Laplace test = 6.1111 고장률이 시간에 따라 변화하는 NHPP이며, 고장률이 증가함
- Military Handbook test F값이 261.0888로 NHPP
- Vaurio's Test의 V값이 -4.87로 Inverse Bathtub 형태임을 추정할 수 있음







추세가 있는 NHPP 형태의 데이터 임을 확인 가능

3 | 제안점

| 오도미터(Odometer)

- 변화점 검정을 통해, R=2일 때 SIC가 최소가 됨을 확인
- 이를 기준으로 Sectional model에 적용

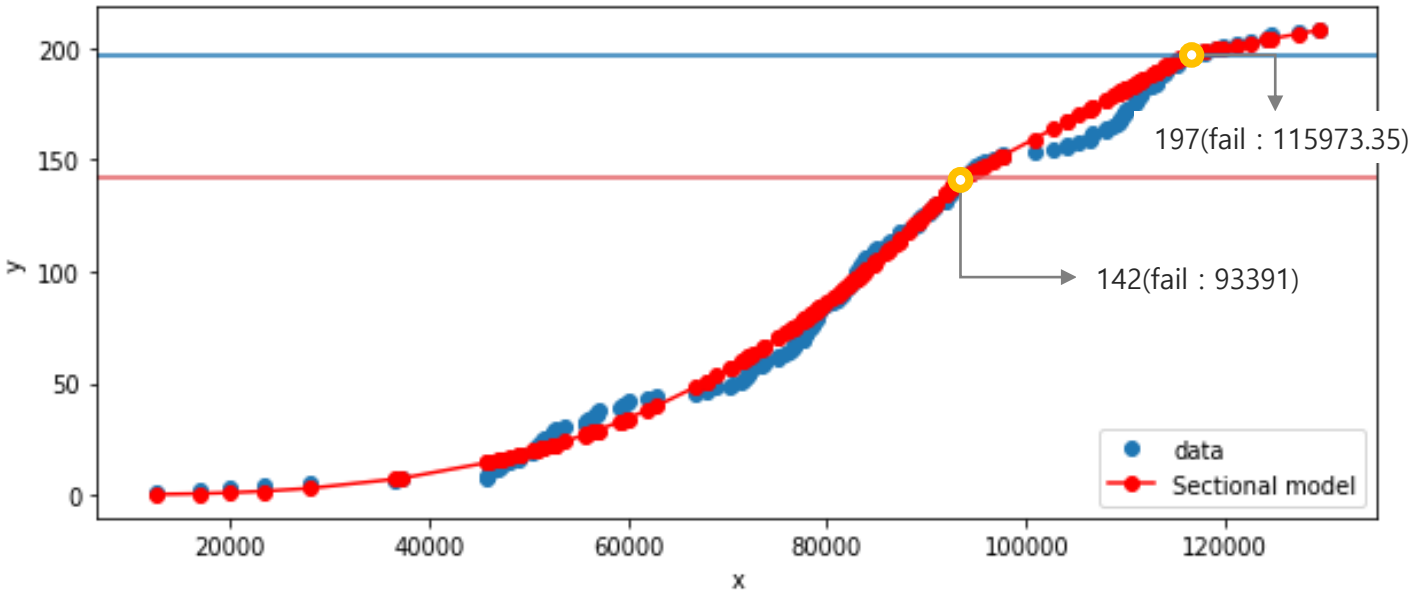
R	SIC	k,m
0	3011.8675	0
1	2970.3559	k=147
2	2966.2844	k=142, m=197

$$\Lambda_1(t) = \left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\beta_1}, \quad 0 < t \le t_k$$

$$\Lambda_2(t) = \left(\frac{t_k}{\theta_1}\right)^{\beta_1} + \left[\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^{\beta_2} - \left(\frac{t_k}{\theta_2}\right)^{\beta_2}\right], \quad t_k < t \le t_m$$

$$\Lambda_3(t) = \left(\frac{t_k}{\theta_1}\right)^{\beta_1} + \left[\left(\frac{t_m}{\theta_2}\right)^{\beta_2} - \left(\frac{t_k}{\theta_2}\right)^{\beta_2}\right] + \left[\left(\frac{t}{\theta_3}\right)^{\beta_3} - \left(\frac{t_m}{\theta_3}\right)^{\beta_3}\right], \quad t_m < t \le t_n$$

* β_1, θ_1 : 3.2134, 19978.3690
** β_2, θ_2 : 1.5688, 4078.4362
*** β_3, θ_3 : 0.4960, 2.7442



3 | 제안점

고장분포 추정

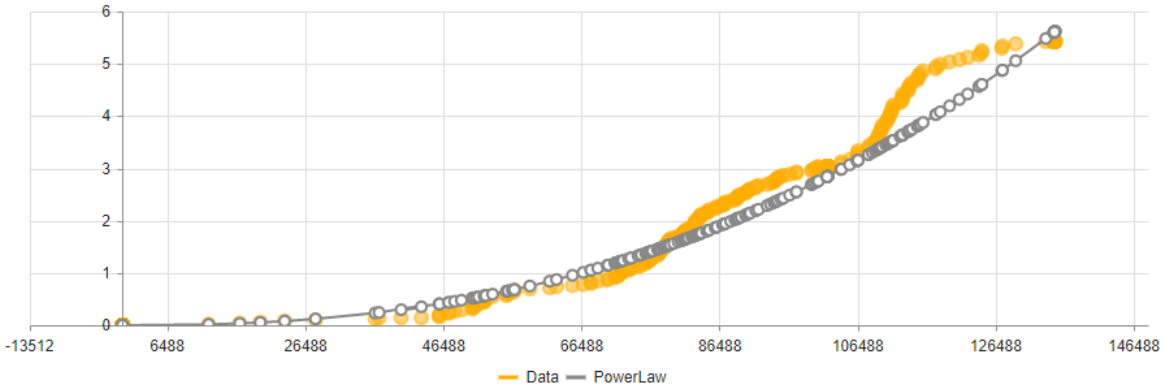
분석 대상 장치

분석기간	2000.01.01 ~ 2022.06.28		
분야	신호		
LBS	오도미터 장치	시스템	차상 ATC장치(ATP/ATO) >> 차상ATC 하부장치 >> 오도미터 장치
수리가능 여부	◉ 수리 가능 ○ 수리 불가능	신뢰 수준 (%)	95

분포/모수 추정 결과

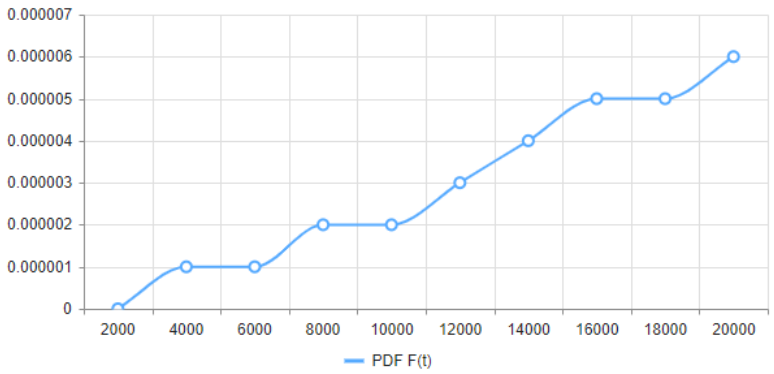
	PowerLaw
Parameter	2.431505
	66418.776442
Confidence	2.104601 ~ 2.781663
	57489.100321 ~ 75983.663211
MTTF	NA
K-S Test	0.147299
A-D Test	9.568982

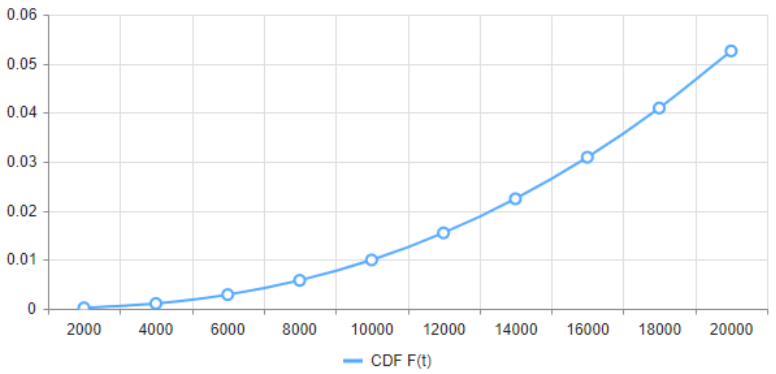
상세 고장 이력

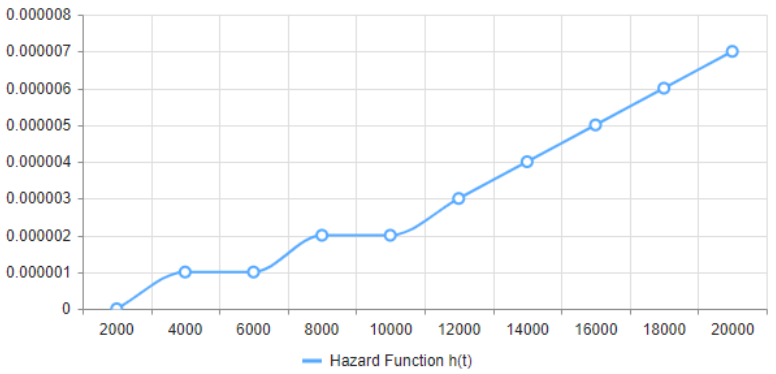


적합 모형 선택

적합 모형	PowerLaw	20,000	그래프 조회







3 | 제안점

고장분포 추정

분석 대상 장치

분석기간	2000.01.01 ~ 2022.06.28		
분야	신호		
LBS	오도미터 장치	시스템	차상 ATC장치(ATP/ATO) >> 차상ATC 하부장치 >> 오도미터 장치
수리가능 여부	수리 가능 / 수리 불가능	신뢰 수준 (%)	95

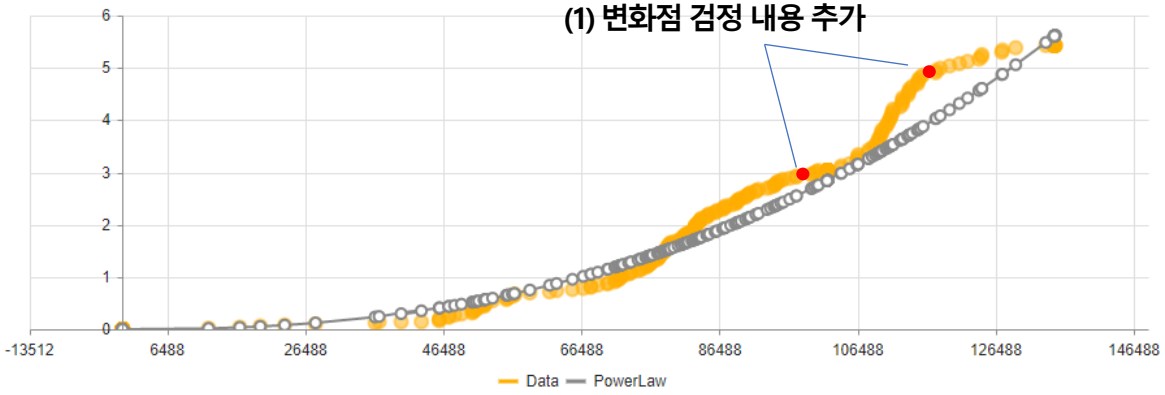
분포/모수 추정 결과

(2) Sectional Model 추가

	PowerLaw	Sectional Model		
Parameter	2.431505	β_1 :3.2134	β_2 :1.5688	β_3 :0.4960
	66418.776442	θ_1 :19978.3690	θ_2 :4078.4362	θ_3 :2.7442
Confidence	2.104601 ~ 2.781663			
	57489.100321 ~ 75983.663211			
MTTF	NA	(3) Laplace Test 보완		
K-S Test	0.147299			
A-D Test	9.568982			

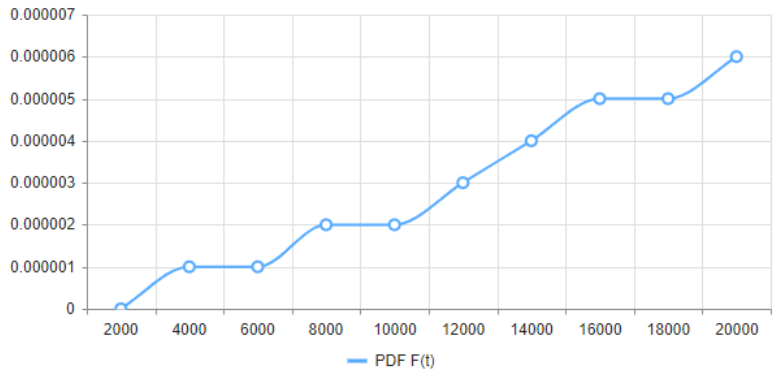
상세 고장 이력

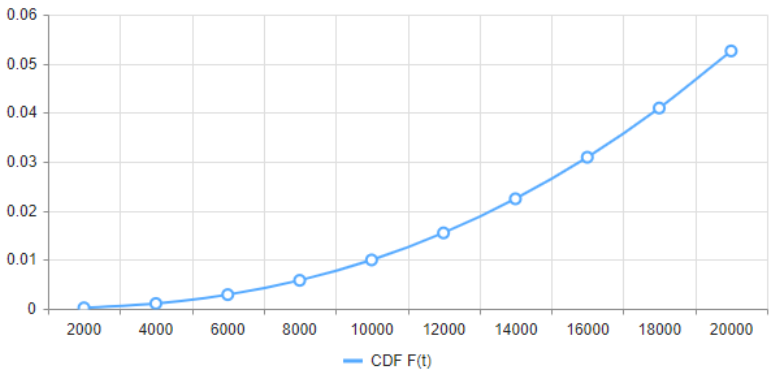
(1) 변화점 검정 내용 추가

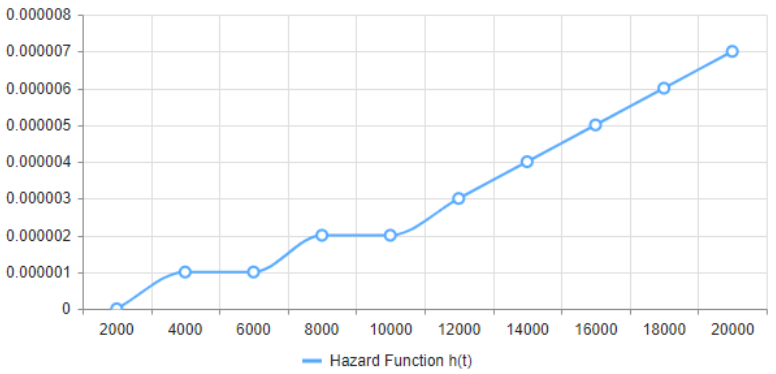


적합 모형 선택

적합 모형	PowerLaw	20,000	그래프 조회







4 | 결론

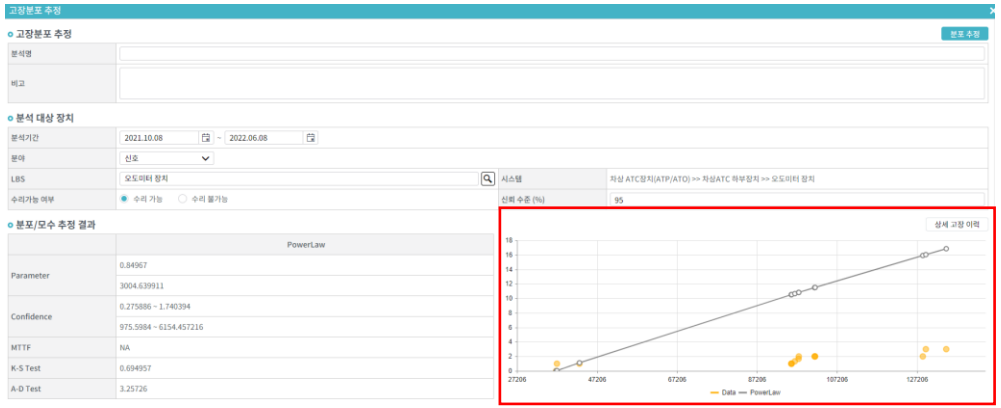
- 철도 시스템의 경우 비교적 수리 가능한 부품이 많기 때문에 수리 가능한 시스템에서 사용중인 process를 보완하는 process 제안
- 수리 가능한 시스템의 경우 고장이 발생했을 때, 고장이 난 부분을 수리나 교체를 통하여 운용하기 때문에 고장률이 **단조 추세보다 복합 추세를 갖는 경우가 많음**
- 실제 데이터의 특성을 파악할 수 있는 검정법 및 시각화 제안 (TTT-Plot, Duane Plot, Laplace Test …)
- 앞서 제시한 시각화의 경우 다른 모듈에서도 비교적 구현이 쉬우며, **데이터가 HPP 또는 NHPP인지 판별**할 수 있고 **추세가 바뀌는 구간**을 어느정도 파악할 수 있다. (추가로 검정법을 통하여 통계적 검정 가능)
- 변화점 검정을 통해 SIC 기반 변화점의 개수 및 구체적인 시점을 제안
- 고장률 분포가 변화점 형태의 경우(Sectional model) 논문에서 사용한 데이터를 통해 파이썬으로 검정법과 모델 적합 및 모수 추정을 검증하였으며, 네모시스 오도미터 데이터의 적용

Part.2

시스템 보완점 제시

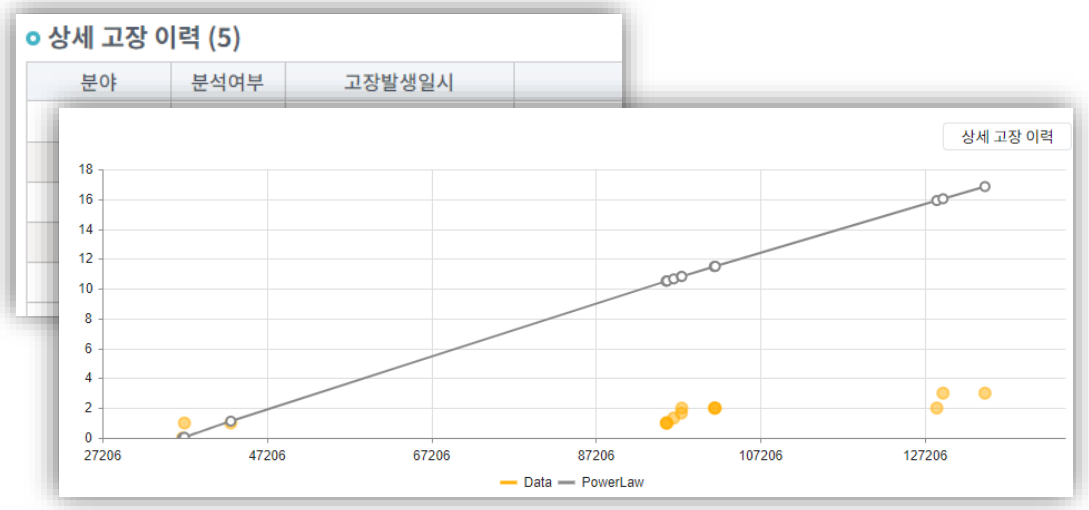
1 | 시스템 보완점

1. 시스템 상의 라벨 미표기



➡ X축 : 고장시간(hour)
Y축 : 누적 고장 개수

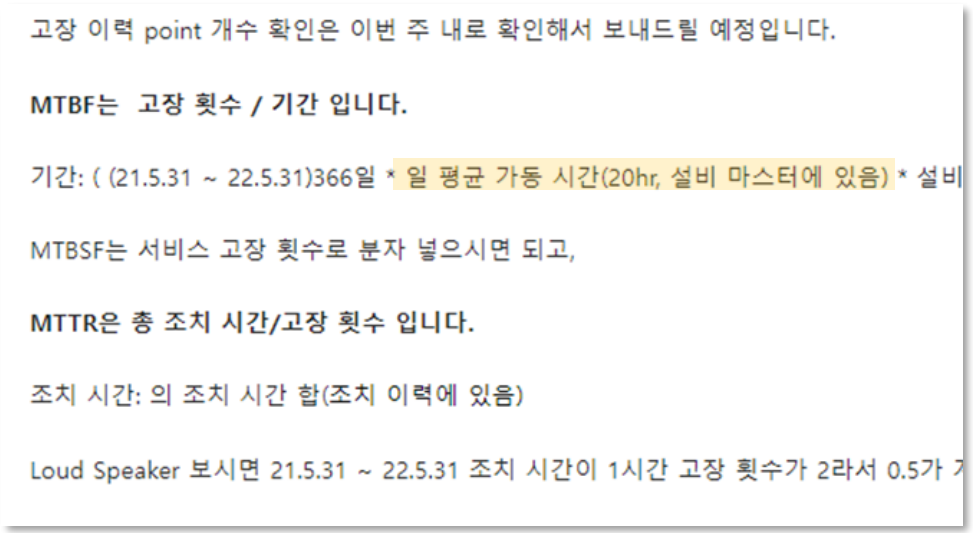
2. 데이터 개수 불일치



➡ 일반 고장데이터 뿐만 아니라
Left, Right Censored 데이터도 포함

3. MTBF 및 분포 추정 시 기준 시간이 다름

- 메일에서 확인 가능한 것 처럼, MTBF는 **20hr**을 기준으로 계산.
- 그러나 실제 엑셀 공식에서는 **24hr**를 곱하였음.



고장 이력 point 개수 확인은 이번 주 내로 확인해서 보내드릴 예정입니다.

MTBF는 고장 횟수 / 기간 입니다.

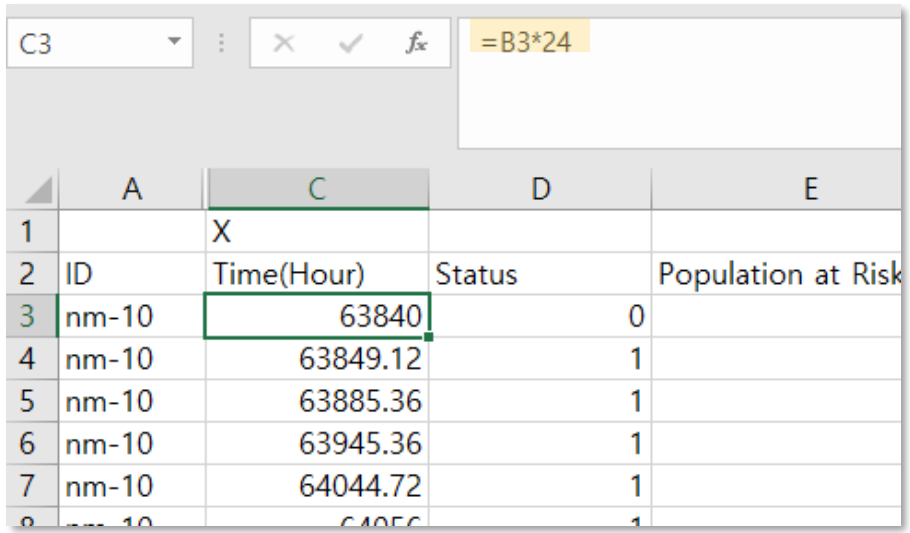
기간: ((21.5.31 ~ 22.5.31)366일 * 일 평균 가동 시간(20hr, 설비 마스터에 있음) * 설비

MTBSF는 서비스 고장 횟수로 분자 넣으시면 되고,

MTTR은 총 조치 시간/고장 횟수 입니다.

조치 시간: 의 조치 시간 합(조치 이력에 있음)

Loud Speaker 보시면 21.5.31 ~ 22.5.31 조치 시간이 1시간 고장 횟수가 2라서 0.5가



C3 =B3*24

	A	C	D	E
1		X		
2	ID	Time(Hour)	Status	Population at Risk
3	nm-10	63840	0	
4	nm-10	63849.12	1	
5	nm-10	63885.36	1	
6	nm-10	63945.36	1	
7	nm-10	64044.72	1	

감사합니다