

新製品設計段階에 있어서 「시스템」의 信賴度 豫測에 관한 研究

金 光 燮

漢陽大學校 大學院 工業經營學科

(1975. 10 受理)

A Study of the System Reliability Prediction in the New-Product Design Stage

Abstract

The higher develops the industrial techniques, the more reliability of machinery, equipments and systems want the consumers. So, it is a key to succeed in the new-product development that the consumers can put reliance on the product to be made in the product design stage.

This study intends to help the product designer and the system manager by presenting them better reliability prediction techniques.

For this purpose, the author built some fundamental reliability system models. And then predict the system reliability by estimating the elemental component's failure rate λ_i , and proposed an evaluation model.

And also, a system is wrong according to the component's characteristics' degradation, we must estimate the degradation failure rate (average and standard deviation). For this, the "Moment method" is used.

I. 序 論

1. 信賴度 豫測(Reliability Prediction)의 定義

「시스템」(System)에 포함하는 部品, 機能, 操作環境 및 그들의 相互관계의 知識을 바탕으로 그 system의 將來性を 내다보는 技術이다.

2. 信賴度 豫測 研究의 必要性

技術革新(Innovation)이 急速한 現代일수록 製品에 대한 消費者로 부터의 信賴性的 要求는 높아져만 가고 있으며, 이러한 高度의 信賴성을 위하여는 新製品의 設計段階에서 부터 合理的으로 그 信賴도를 豫測하는 技術을 開發하므로써 이에 대한 對策을 세워야 한다.

3. 研究의 目的

System의 設計段階에서 부터 設計者가 設劃한대로의 信賴性이 있는지를 確認하며 또 다른 設計方案이 있는지의 如否를 檢討하고, 나아가서는 信賴도와 保全도를 높이기 위한 改善案의 適出에 도움을 주도록 새로운 方法을 導出하려는데 目的이 있다.

II. 研究內容 및 考察

1. 信賴度 System의 基本 Model

信賴度 system은 이를 構成하는 「컴포넌트」(Component)의 連結方法에 따라 여러가지가 있겠으나, 몇개의 component를 그 機能別로 全體 system에 대한「서

브시스템」(Subsystem)을 形成하므로써 「等價直列 Model」로 再構成할 수 있다.

信賴度 (R_s)는,

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_s(t) dt}$$

$$\lambda_s(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t)$$

$\lambda_s(t) = \lambda_s$ 即, 時間에 따른 고장률이 一定하다면,

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t}$$

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

우리가 豫測하고자 하는 故障率은 初期故障에는 「디버깅」(debugging)으로 除去되고 또 摩耗性的 故障은 豫防保全으로 交換되기 때문에 故障率이 安定되어 있는 偶發故障期를 對象으로 하고 있다.

「시스템」의 故障率 λ_s 는,

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

가 된다.

여기서 만약 각 subsystem에 대하여 같은 部品 혹은 部分이 N_i 개 만큼 사용되었다고 하면,

$$\lambda_s = N_1\lambda_1 + N_2\lambda_2 + N_3\lambda_3 + \dots + N_n\lambda_n = \sum_{i=1}^n N_i\lambda_i$$

가 된다.

全體故障率 λ_s 를 이루고 있는 component의 故障率 λ_i 는 同部品에 대한 過去의 經驗에 의하여 략연히 算定하기도 하지만, 보다 合理的인 豫測을 위하여는 客觀的인 評價基準을 定立하여야 된다.

部品の 故障은 만들어진 製品의 強度가 規定된 「스트레스」(stress)와 틀릴 때에 誘發된다고 할 수 있다.

따라서 어떤 基準條件以外的 使用을 目的으로 設計한 機器나 system의 故障率의 豫測에는 이를 調整하는 係數를 곱해 주어야만 한다. 이러한 係數를 stress 係數라 하고 만약 部品 그 自體의 基準狀態에서의 故障率 λ_i 와 stress 係數 K_i 가 주어졌다면,

$$\lambda_s = N_1K_1\lambda_1 + N_2K_2\lambda_2 + N_3K_3\lambda_3 + \dots + N_nK_n\lambda_n$$

$$= \sum_{i=1}^n N_iK_i\lambda_i$$

이며, 혹은 部品 그 自體의 基準狀態에서의 故障率 λ_i 와 全體로서의 stress 係數 K 가 주어질 경우에는,

$$\lambda_s = K(N_1\lambda_1 + N_2\lambda_2 + N_3\lambda_3 + \dots + N_n\lambda_n)$$

$$= K \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i$$

로서 全體의 故障率을 計算할 수 있다.

故障을 誘發시키는 stress는 大別하여 ① 그 製品을

作動시키고 機能을 다 하는데 必要하며 또한 별도로 加하여 지는 機能的 stress (예를 들면 「엔진」에 加해지는 機械的 stress, 電球에 加해지는 電壓 또는 機械的 荷重 등)와 ② 外部的으로 加해지는 環境 stress (예를 들어 溫度, 濕度, 振動 등)를 손꼽을 수 있다.

그러면 이와 같은 stress 係數는 어떻게 求할 수 있겠는가? stress의 變化와 故障率은 根本的으로는 特定 部品이 다른 製品에 適用이 되었을 때의 經驗을 土臺로 하여 規定되기 때문에 統一된 數值를 얻기는 어렵다. 그러므로 stress 係數에 관하여는 MIL-STD를 비롯하여 Houghes Co., Westinghouse Co., Boeing Co. 등의 會社規格 그리고 D.R.Earles氏의 調整係數表 등이 發表되어 各者가 조금씩 다른 係數를 使用하고 있는 實情이다.

위의 方法들은 新製品의 設計構想期에 있어서의 豫想 使用環境條件(使用場所別)에 따른 大體的인 信賴度를 豫測하고자 할 때에 매우 有效하게 使用할 수 있으나 特定の 機器에 대하여 精密한 stress 係數를 附與하기 위한 값으로는 不合理하며, 또 場所의 環境條件 以外에 溫度, 電壓 등의 條件을 包含시켜야만 할 경우에는 利用할 수 없도록 되어 있다.

그러므로 製品의 故障을 일으키는 原因(機能的 stress와 環境 stress)이 여러 個가 있을 경우, 예를 들어 溫度, 壓力, 振動, 電壓 등의 因子가 故障을 誘發시킨다고 假定할 때에 stress 係數 K 를 合理的으로 求하는 方法에 관하여 筆者는 다음과 같은 새로운 評價 Mode을 提案한다(Table 1. 參照).

Table 1. A new evaluation model for predict the stress coefficient "K".

Type of system	Environmental factors				
	B_1	B_2	B_i	
A_1 ($P_1\%$)	A_{11} A_{12} A_{13}	a_{11} a_{12} a_{13}	b_{11} b_{12} b_{13}	X_{11} X_{12} X_{13}
A_2 ($P_2\%$)	A_{21} A_{22} A_{23} A_{24}	a_{21} a_{22} a_{23} a_{24}	b_{21} b_{22} b_{23} b_{24}	X_{21} X_{22} X_{23} X_{24}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_n ($P_n\%$)	A_{n1} A_{n2} ⋮ A_{nj}	a_{n1} a_{n2} ⋮ a_{nj}	b_{n1} b_{n2} ⋮ b_{nj}	X_{n1} X_{n2} ⋮ X_{nj}

* Notes: $\sum P_n = 100\%$

어떤 부품의 故障率 λ_i 에 影響을 주는 環境條件을 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 라 하고 各 條件의 全體故障發生에 대한 比重을 그 重要도에 따라 $P_1\%, P_2\%, P_3\% \dots P_n\%$ 로 配分한다. 또 이러한 部品으로서 構成되는 機器 및 system의 類型을 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_i$ 로 分類한다.

다음에는 條件 A_n 의 水準을 j 層으로 層別하고 標準이 되는 水準을 基準(1.0)으로 他水準에 대한 故障率 加速係數를 故障率에 대한 重要도에 의하여 system의 類型別로 定한다.

따라서, 만약 어떤 部品이 B_i 類型的 機器나 裝置에 서, A_1 條件의 A_{1j} 水準으로 A_2 條件은 A_{2j} 水準으로, 그

리고 A_n 條件은 A_{nj} 水準으로 使用될 豫定이라 하자. 그 리고 選擇된 各 水準에 있어서의 故障率加速係數가 X_{1j}, X_{2j} 이며, 各 條件의 故障率에 대한 比重이 $P_1\%, P_2\%, \dots, P_n\%$ ($\sum P_n = 100\%$)라면 이터의 stress係數 는 어떻게 되겠는가? 이것은,

$$K = P_1 \cdot X_{1j} + P_2 \cdot X_{2j} + \dots + P_n X_{nj}$$

$$= \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_{ij}$$

2. 故障率의 豫測에 의한 信賴度 豫測

Fig. 1과 같은 等價直列信賴度 system이 있다.

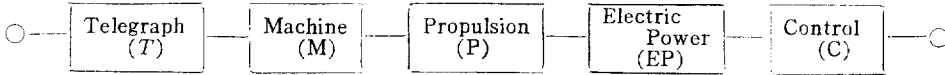


Fig. 1 A Series Reliability System

各 subsystem의 故障에 影響을 주는 要因들과 그 豫測 한 結果, Table. 2와 같은 資料를 얻었다. 度 그리고 使用環境條件에서의 故障率加速係數를 調査

Table. 2 Table of failure acceleration coefficient of system A

Telegraph (T)	Temperature (°C) $\langle P_1=0.295 \rangle$		Humidity (%) $\langle P_2=0.130 \rangle$		Radiant ray (RdS) $\langle P_3=0.165 \rangle$		Acceleration (m/sec ²) $\langle P_4=0.190 \rangle$		Noise (db) $\langle P_5=0.220 \rangle$	
	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.
	-30~75	6	more than 60	5	10 ⁶ ~10 ⁷	1	more than 50	10	190~250	8
	10~25	1	20~60	1	10 ⁶ ~10 ⁷	1	10~50	1	120~150	1
Machine (M)	Temperature (°C) $\langle P_1=0.30 \rangle$		Pressure (mmHg) $\langle P_2=0.10 \rangle$		Humidity (%) $\langle P_3=0.15 \rangle$		Radiant ray (RdS) $\langle P_4=0.15 \rangle$		Acceleration (m/sec ²) $\langle P_5=0.30 \rangle$	
	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.
	-30 ~75	8	585~795	1	more than 60	9	10 ⁶ ~10 ⁷	1	more than 50	10
	10 ~25	1	585~795	1	20~60	1	10 ⁶ ~10 ⁷	1	10~50	1
Propulsion (P)	Collision (g) $\langle P_1=0.40 \rangle$		Noise (db) $\langle P_2=0.20 \rangle$		Acceleration (m/sec ²) $\langle P_3=0.40 \rangle$					
	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.
	1000	15	190~250	8	more than 50	10				
	50~500	1	120~150	1	10~50	1				
Electric Power (EP)	Pressure (mmHg) $\langle P_1=0.45 \rangle$		Radiant ray (Rds) $\langle P_2=0.05 \rangle$		Noise (db) $\langle P_3=0.30 \rangle$		Temperature (°C) $\langle P_4=0.20 \rangle$			
	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.		
	585~795	1	10 ⁶ ~10 ⁷	1	190~250	8	-30~75	6		
	585~795	1	10 ⁶ ~10 ⁷	1	120~150	1	10~25	1		
Control (C)	Noise (db) $\langle P_1=0.30 \rangle$		Humidity (%) $\langle P_2=0.30 \rangle$		Acceleration (m/sec ²) $\langle P_3=0.30 \rangle$		Collision (g) $\langle P_4=0.10 \rangle$			
	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.	Level	Coeff.		
	190~250	8	more than 60	5	more than 50	10	1000	15		
	120~150	1	20~60	1	10~50	1	50~500	1		

$$K_1 = 0.295 \times 6 + 0.130 \times 5 + 0.165 \times 1 + 0.190 \times 10 + 0.220 \times 8 = 4.475$$

$$K_2 = 0.30 \times 8 + 0.10 \times 1 + 0.15 \times 9 + 0.15 \times 1 + 0.30 \times 10 = 7.0$$

$$K_3 = 0.40 \times 15 + 0.20 \times 8 + 0.40 \times 10 = 11.6$$

$$K_4 = 0.45 \times 1 + 0.05 \times 1 + 0.30 \times 8 + 0.20 \times 6 = 4.1$$

$$K_5 = 0.30 \times 8 + 0.30 \times 5 + 0.30 \times 10 + 0.10 \times 15 = 8.4$$

그리고 標準狀態에서의 故障率은 各各,

$$\lambda_1 = 0.0003, \lambda_2 = 0.0002, \lambda_3 = 0.004, \lambda_4 = 0.007, \lambda_5 = 0.005$$

이었다. 이 system의 故障率 λ_s 는

$$\lambda_s = 4.475 \times 0.0003 + 7 \times 0.0002 + 11.6 \times 0.004 + 4.1 \times 0.007 + 8.4 \times 0.005 = 0.1198425$$

이 된다.

따라서 새로 만들려고 하는 本 system의 信賴度 R_s 는

$$R_s = e^{-0.1198425(t)}$$

가 될것으로 豫測이 된다.

따라서, 만약 이값이 目標로 하고 있는 信賴도에 未達될 때에는 故障率이 큰 部分(推進部)에 대한 對替의 設計案을 마련 한다음지 혹은 故障率減少에 가장 費用이 적게드는 部門을 찾아서 이를 重點的으로 研究하여 改善案을 發見토록 해야만 할 것이다.

위의 實例에 대한 考察에서 보는 바와 같이 이 評價 Model은 各 subsystem에 관하여 過去의 經驗이나 信賴性試驗에 의한 故障率 λ_i 와 加速係數 X_{ij} 가 準備되어 있지 않으면 適用이 不可能하며, 또 간단한 subsystem으로의 分解가 어려워 그 數가 增加하게 되면 計算過程이 複雜할 뿐 아니라 stress 數係 K_i 를 求하기 힘들지는 弱點이 있다.

이와 같은 경우의 信賴度豫測方法에 대하여는 앞으로 더욱 進歩된 豫測方法이 研究되어져야 할 것으로 생각된다.

3. 特性值變動의 豫測

System의 故障은 component의 特性值的 變化에도 誘發된다. 따라서 system의 設計時에는 component의 特性值的 組合과 이에 대한 system의 特性值的 變化程度(平均值, 標準偏差)를 豫測할 必要가 있다.

各 component의 特性值是 各各 平均值 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 및 標準偏差 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 을 가지고 서로 獨立이며 Y 가 $X_1 = \mu_1, X_2 = \mu_2, \dots, X_n = \mu_n$ 의 近處에서 連續이던 system의 出力特性值도 平均值 μ_Y , 標準偏差 σ_Y 를 갖는 確率變數가 되고, 이것은 Taylor의 展開에 의하여 다음의 近似式이 成立된다.

$$\begin{aligned} \mu_Y &= f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \\ \sigma_Y &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \sigma^2 X_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \times \rho_{ij} \sigma X_i \sigma X_j \\ \text{但, } \rho_{ij} &= \frac{\Sigma(X_i - \bar{x}_{ij})(X_j - \bar{x}_j)}{[\Sigma(X_i - \bar{x}_i)^2 \Sigma(X_j - \bar{x}_j)^2]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

Fig. 2와 같은 電源回路가 있다.

$$E_0 = \frac{E_s R_2 R_L}{(R_2 + R_L)(R_3 + R_1) + R_2 R_L}$$

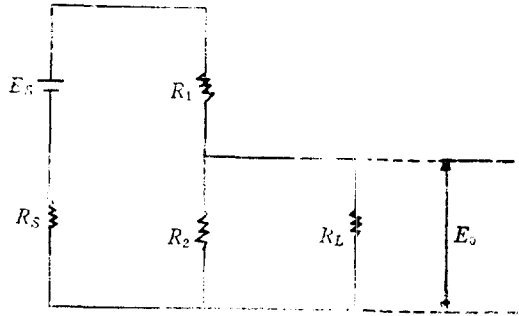


Fig. 2 The electric circuit of system B

$E_s = 10V, R_s = 0.1\Omega, R_1 = 20\Omega, R_2 = 50\Omega, R_L = 500\Omega$ 로 出力電壓 E_0 의 값은 $7 \pm 0.75V$ 로 規定하고 있으며 R_1, R_2 의 許容公差를 $\pm 10\%$ 로, E_s, R_s 는 $\pm 5\%$ 로 設計하여 E_0 의 要求를 滿足할 수 있도록 中心値와 許容値를 決定하려고 한다.

劣化故障을 確率的으로 評價하기 위하여 部品の 平均値와 標準偏差 및 相關係數를 다음 Table 3과 같이 求한다.

그리고 各 特性值的 $\sigma_{E_0}^2$ 에 대한 寄與率은 Table 4와 같다.

Table. 3 The value of $E(X_i), \sigma_{X_i}, \rho_{ij}$ and $\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)$

$E(X_i)$	σ_{X_i}	ρ_{ij}	$\frac{\partial f}{\partial X_i}$
E_s 9.93V	0.1965	-0.4474	+6.94
R_s 0.111 Ω	0.0213		-0.01057
R_1 19.9 Ω	0.829		-2.114
R_2 50.16 Ω	2.59		+1.93
R_L 48.5 Ω	38.8		+0.1945

$$\therefore E_0 = 6.893V \quad \sigma_{E_0} = 0.1918V$$

Table 4. The proportion of contribution to $\sigma_{E_0}^2$ 의 特性值이므로 두가지를 함께 考慮했을 때의 寄與度는 51.76%가 된다.

Factors	proportion of contribution
E_s	0.5138
R_s	0.0001
R_1	0.2099
R_2	0.2718
R_L	0.0007
$\sigma_{E_s R_s}$	0.0037

또 故障의 確率(不信賴度)은 規格上限 7.75V와 下限 6.25V가 中心보다 各各 4.47V 및 3.35V 떨어져 있으므로 正規分布表에 의하여 $0.0000039 + 0.000401 = 0.0004048$ 이 된다. 即, 信賴度는 0.999592가 된다. 만약 E_0 의 規格中心値가 6.893V가 아니고 7.00V라면 같은 方法에 의하여 信賴도가 0.9999476로 改善된다.

Ⅲ. 結 論

System의 設計가 끝나 使用段階에 있어서 制限된 限界內의 小幅의인 改善은 信賴度의 큰 向上을 期待할 수 없기 때문에 設計의 初期段階에서 부터 製作하려는 system이 達成할 수 있는 信賴度를 合理的으로 豫測하여 이를 土臺로 設計를 改善하므로써 高信賴度를 維持하는 system을 이루도록 해야 한다.

信賴度 system은 여러 形態로 分類할 수 있으나 本研究에서는 system을 構成하는 몇개의 component를 그 機能別로 結合하여 全體 system에 대한 subsystem을 形成하므로써 하나의 等價直列 信賴度 Model로 再構成할 수 있었다.

그리고 信賴度의 尺度가 되는 component의 故障率을 豫測하기 위하여 信賴도와 關係되는 因子를 그 重要도에 따라 配分하여 評價 Model을 定立하므로써 stress係數 K 를 求할 수 있었으며 앞에서 論한 바와 같이 그 適合성이 立證되었다.

以上에서 論議한 system의 信賴度 豫測方法은 모두

그 有効性에 있어서 使用豫定인 部品이나 component에 관한 正確한 故障「데이터」가 活用될 수 있어야만 한다는 前提가 必要하다. 이를 위하여는 基本部品이나 subsystem들에 대하여 組織的(systematic)이며 繼續的인 信賴性試驗이 이루어져야 하며, 또 消費市場으로부터 얻어지는 「필드·데이터」(field-data)의 分析을일 상적으로 꾸준히 행하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. Blanton H.E. & R.M. Jacobs: Trans IRE RQC, 1961.
2. 鹽見 弘: 信賴性工學入門, 丸善株式會社, 1967.
3. Ireson W.G.: Reliability Handbook, McGraw Hill Co., 1966.
4. AGREE: Reliability of Military Electric Equipment, AGREE, 1957.
5. Enrick N.L: Quality Control and Reliability, Industrial Press Inc., 1972.
6. 富士通信機株式會社(編): 信賴性の理論と實際, オーム社, 1976.