



부품·소재 산업의 글로벌 경쟁력 확보를 위한 유럽 신뢰성 기술 선진 사례 연수

신뢰성과 책임연구관 송주영
02) 509-7303, songjy@ats.go.kr

1. 서론

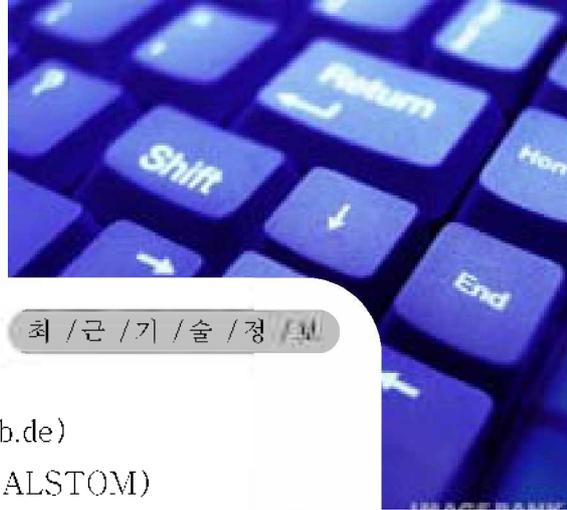
EU(유럽연합)에 속한 선진 기술 보유국인 독일, 프랑스 등의 자동차 및 수송기기의 신뢰성 확보 및 분석 기법 연수를 위하여, 2003년 4월 6일부터 14일 까지 9일간 독일의 뮌헨과 프랑스의 파리에서 기관방문 및 기술 세미나에 참가하였다. 독일의 생산기술분야의 대표적 연구소인 Fraunhofer 산하 신뢰성 연구기관인 IZM 연구소와 산학연 협동연구를 진행 중인 뮌헨 기술대학의 IWB 연구소, 프랑스의 알스톰사 등 신뢰성 연구 및 시험기관을 방문하였다. BMW, Audi, Wolks Wagen 등 독일의 선진 자동차 업계의 기술컨설팅을 담당하는 Refa International의 품질책임자, 독일 Hagen 대학의 교수, 프랑스의 신뢰성 및 품질 경영 전문 컨설팅 그룹인 Cetop의 산, 학, 연 관련 전문가들이 신뢰성공학(Reliability Engineering), 신뢰성실험(Reliability Tests) 및 품질경영(Quality Management) 등에 대하여 4일에 걸쳐 기술 세미나를 실시하였다. 본 연수기간 동안 방문한 신뢰성 관련 기관 및 기술 세미나에서 습득한 내용을 정리하여 소개한다.

2. 기관소개

2.1. Fraunhofer-IZM(Institute of Reliability and Microintegration)

독일 생산기술 분야의 선두주자인 프라운호퍼 연구소 산하의 54개 연구소 중 하나로 베를린에 본부를 두고 있으며 6개 지역에 연구센터가 있고, 뮌헨의 연구소는 6개 지사 중 하나로 주요 연구분야는 다음과 같으며, 신뢰성 관련 분야에서는 고장분석을 위한 신뢰성 시험을 주로 하고 있다.

- Mounting and Connection Technology for microelectronic and microsystem components at chip and circuit-board level
- Polymer Materials
- Multi-chip modules
- Environmental Engineering
- FMEA and Reliability Testing



<그림 1> IZM 연구소의 고장분석 Poster

(<http://www.izm.fhg.de>)

2.2. IWB 연구소(Institute for Machine Tools and Industrial Management)

뮌헨 공과대학 산하 IWB 연구소는 산·학·연을 연계하는 연구소로 산업계 프로젝트가 40%를 차지하고 있으며, 신뢰성 관련 연구는 생산공정(Manufacturing Process)에 있어서의 신뢰성 및 안전성 있는 자동화 공정개발과 품질경영기법을 도입한 부품 및 어셈블리의 신뢰성 및 품질관리에 중점을 두고 있다. 주요 연구 분야는 다음과 같다.

- ① Mechanical Production System
- ② Changeability in Production
- ③ Rapid Manufacturing
- ④ Virtual Production
- ⑤ Joining System Technologies
- ⑥ Microassembly

(<http://www.iwb.de>)

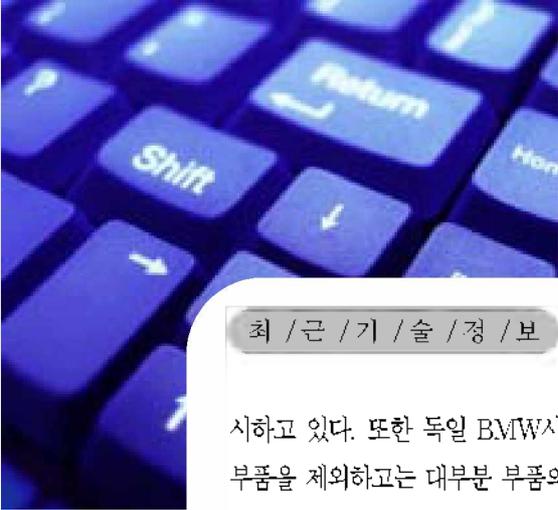
2.3. 알스톰사(ALSTOM)

세계적인 고속전철 생산업체인 프랑스의 알스톰사를 방문하여 고속전철에서부터 경전철, 지하철, commuting 전차에 이르기까지 광범위한 분야의 품질 경영 시스템을 접할 수 있었다. 또한 생산단계에서부터 30년 수명을 보장하는 신뢰성이 확보된 고속전철의 생산을 위한 부품의 고장분석 및 전차 모의 선로 시험을 통하여 여러 가지 선로상황에서의 주행안전을 시험하는 과정을 견학하였다. 고속전철 생산의 100년 경험을 짧은 시간에 다 습득할 수는 없었지만, 실제적인 신뢰성 확보 시험과 contour area의 주행시험, speed 시험, comfort testing을 수행할 수 있는 선로를 포함한 알스톰사의 모의 선로(총 2752 m 길이)는 매우 인상적이었다.



<그림 2> IZM 연구소의 고장분석 Poster

프랑스 알스톰사 전철의 경우, 알스톰사에서 요구하는 수명을 만족할 수 있도록 각 부품제조업체에서 신뢰성 확보 후 납품하는 것을 원칙으로 하며, 따라서 조립·완성차 업체에서는 performance 테스트만을 실



시하고 있다. 또한 독일 BMW사에서도 엔진 등 핵심 부품을 제외하고는 대부분 부품의 경우 동일한 방법으로 완성차를 제작하고 있다. 이는 부품업체의 기술력이 완제품의 신뢰성을 나타낼 수 있음을 의미하는 것으로, 현재 국내에서 추진되는 부품·소재 신뢰성 평가·인증사업의 중요성을 다시 한번 일깨우는 내용이었다.

3. 기술 세미나

유럽의 신뢰성 개념은 품질에 포함되는 개념으로, 철저한 3P(people, process, product) 계획 및 관리를 통한 개발 단계에서의 신뢰성 확보와 지속적인 공정 개선(continuous process improvement)을 통한 신뢰성 향상을 의미한다. 즉, 신뢰성을 품질 경영 시스템(Quality Management System)의 한 분야(Category)로 다루고 있다. 그러므로 신뢰성 시험 및 분석은 품질과 따로 연구되어 지지 않고, 품질 경영 및 관리와 같이 연구되어진다.

3.1. 독일 자동차의 신뢰성 및 안전성 설계 기술 및 사례

독일의 자동차 업계의 기술 컨설팅 전문 회사인 Refa International 의 신뢰성 설계 기술은 zero-defect를 목표로 하는 자동차 개발단계의 품질계획(product development strategy)을 통한 제품의 기능과 성능, 품질 및 신뢰성 확보 전략과 3P(people, product, process)를 중심으로 한 공정모델(process model) 개발, 개발단계/제조단계에서의 고 신뢰성 확보를 위한 시험 분석 등을 다룬다. 독일의 자동차 생산

공정은 고객의 주문으로부터 생산까지 Marketing, Development, Planning, Purchasing, Production, Sales, Recycling에 이르는 자동차 생산의 공정모델을 통하여, 사전에 품질과 신뢰성을 확보하는데 필요한 제품과 공정을 설계하고, 개발하여 고객의 요구에 대응하는 품질과 신뢰성 목표를 완성하는 과정이다. 제품의 특성과 그 제품특성에 영향을 미치는 공정특성을 검증하며, 검증된 특성에 대하여 바람직한 기준을 정하고, 제조단계에서 공정 능력을 확보하기 위한 관리 계획을 세우거나 요구조건을 만족하는 부품을 구매하여 생산한다. 또한, 제품의 수명이 다한 후 수거하여 재활용하는 환경 친화적인 총체적 품질경영(Total Quality Management)의 과정이다. 이러한 공정 모델의 필요성은 제품의 기능과 성능, 품질 및 신뢰성에 대한 대응책은 대부분 개발 단계(development & planning)에 기인한 것이기 때문이다. 공정모델은 제품 설계단계에서 발생할 수 있는 문제점을 예측하고, 사전에 준비하고, 품질 및 신뢰성을 시험하여 예방하는 “예측대응형”으로 zero-defect를 추구한다. 이 과정에서 고 신뢰성을 확보하기 위해서는 단계별로 실제 사용환경에 맞는 시험, 분석을 실시하여 부품을 시험, 분석하며, 제조단계의 조립성에서 발생할 수 있는 문제를 확인하기 위한 assembly의 품질 및 신뢰성을 함께 평가해야 한다. 그러므로 신뢰성 시험은 개발 단계에 수행하는 경우와 제조 또는 양산단계에 수행하는 시험으로 나뉘어진다. 이러한 시험의 계획과 적절한 횟수는 신뢰성과 생산가격과의 관계를 통하여 결정되어야 한다. 제품개발 공정에서의 신뢰성 확보를 위한 시험은 시제품시험, 일반부품시험, 전체 차체시험, 실제 생산단계에서의 시험 등으로 구분할 수 있으며, 각

각의 시험들은 실제시험(actual test)과 가상시험(virtual test)으로 나눌 수 있다.

현재 국내의 신뢰성평가·인증 사업에서 주로 사용되고 있는 주 고장모드 판정 및 가속시험을 통한 수명 예측 과 독일의 신뢰성 개념을 접목시킨다면, field data가 부족한 국내 실정에서 신뢰성 향상 및 설계에 교두보가 될 것이다. 즉, 수명 평가/예측으로부터 얻어진 데이터를 제품개발 및 개선단계에서 품질 및 신뢰성을 확보하는데 피드백 하고, 동시에 2차, 3차 고장모드의 개선을 통한 zero-defect 개념의 철저한 3P 관리를 병행할 때, 국내 부품 및 소재의 신뢰성을 단시간 내에 선진국 수준으로 향상시킬 수 있는 것으로 생각된다.

3.2. Fault Tree Method(FT)를 이용한 신뢰성 및 안전성 평가 기술

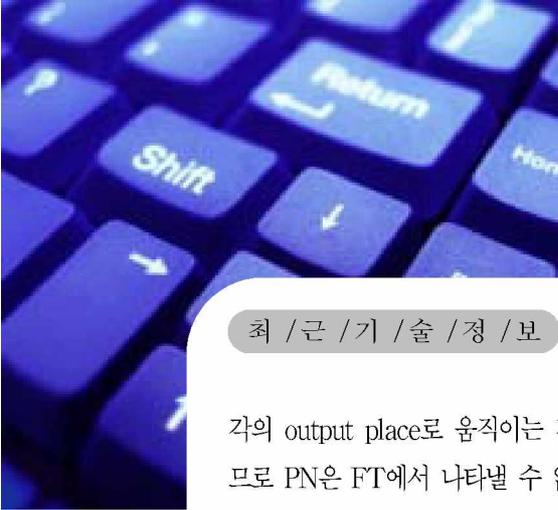
Fault Tree Method(FT)[1] 는 신뢰성 및 안전성 분야에서 가장 중요한 고장 분석 및 평가 방법 중에 하나이다. FT는 시스템에 고장(정상사상)을 발생시키는 원인을 각각의 component(하위사상)의 고장으로, Boolean 함수를 사용하여 AND 와 OR로 하위사상들을 연결시켜놓은 것을 도식화하여 보여준다. 시스템의 신뢰성은 각각의 부품의 MTTF(Mean Time to Failure), MTTR(Mean Time to Repair) 로 부터 유도되어진 고장률을 이용하여 AND 또는 OR로 연결된 고장확률 계산방식에 의하여 최상위에 있는 시스템(정상사상)의 고장률로 구한다. 그러므로 FT는 논리적 결합 경로를 체계적으로 파악하고, Boolean operator를 활용하여 비교적 쉽게 최소 논리 모델을 만들 수

있고, 그 논리 모델을 확률적으로 변환시키기가 용이하다. 그러나 분석을 깊이 할 경우 규모가 방대해 질 수 있고, 어느 한 사상의 상태들간의 전이 경로를 나타낼 수 없다. 각 정상사상 등에 대해 별도의 FT를 작성해야하고, 특정 정상 사상을 유발하는 주요 원인이 다른 사상에 미치는 영향을 알 수 없으므로 수리/정비 정책이나 가용도 분석에는 유용하지 않다. 다음에 소개할 Petri Net를 이용하면 FT의 단점을 극복할 수 있다.

3.3. Petri Nets를 이용한 신뢰성 모델링 (Petri Nets for Reliability Modeling)

Petri Nets(PN)[2]은 place, transition, token의 3개의 component로 구성되고, switching rule에 의한 token의 전환을 통하여 시스템의 고장을 분석할 수 있는 도식화된 방법이다. Place는 원형으로, transition은 사각형으로 각각 표시되며, place는 token(bold dot)을 포함하고, transition은 switching을 시키는데 필요한 delaying time, D,를 포함한다. 그러므로 D=0인 경우는 즉시 전이를 나타낸다. 그리고 place가 token을 포함하는 것은 여러 가지를 의미한다. PN을 이용한 FT 분석을 하는 경우 place 내의 token은 bad state를 의미하고, Markov process의 state grape에서의 token은 state가 활성화 된 것을 의미한다.

Switching rule을 간단하게 설명하면, 각각의 input place에 한 개 이상의 token을 포함하면, transition은 작동 가능하게(enable) 되었다고 하고, 그 token은 D 시간 뒤에 output place로 전이된다. 즉, 전이는 input place에서 하나씩의 token이 transition을 통하여 각



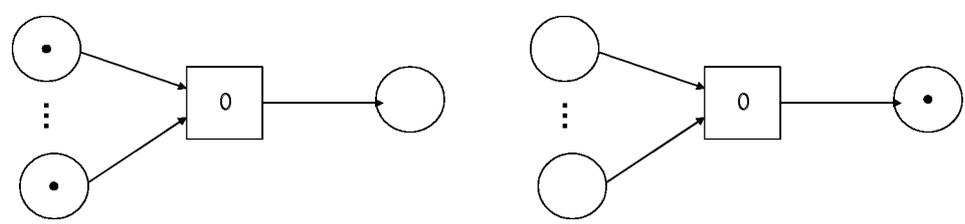
각의 output place로 움직이는 것을 의미한다. 그러므로 PN은 FT에서 나타낼 수 없었던 상태들간의 전이경로를 표현할 수 있다.

이해를 돕기 위하여, PN을 이용하여 FT분석을 시행하면, FT의 AND/OR gate는 다음과 같이 표현될 수 있다. 그림 3의 a), b) 모두 token이 output으로 가기 직전의 상태와 즉시 token이 switching 된 후의 상태를 보여준다. a)의 경우 PN의 switching rule에 의해 두 개의 place에 token이 다 존재할 경우 transition이 작동 가능하게(enable) 되어 output place로 token이 움직이고, b)의 경우 두 개의 place 중 하나만 token이 있어도 transition이 활성화가 되어 token이 output place로 움직인다. 실질적 의미

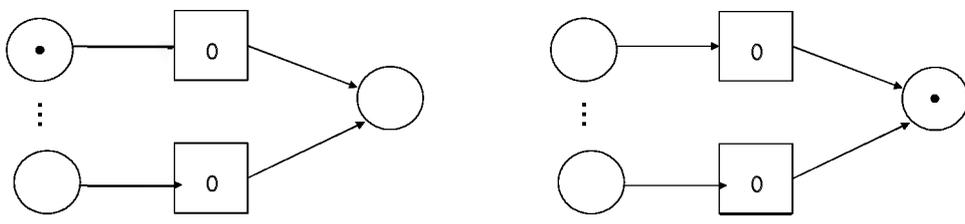
는 a)의 경우 두 개의 place가 모두 bad state일 경우 시스템이 고장이 발생하고, b)의 경우 둘 중 하나의 place가 bad state에 있을 경우 시스템에 고장이 발생된다는 것을 의미한다. 그러므로 FT의 Boolean operator인 AND 나 OR gate를 이용하여 표현할 수 있다.

좀더 복잡한(complex) 시스템을 사용하여 설명하면, 그림 4와 같다. 4개의 Component 중 3개인 1, 2, 4가 bad state인 경우 PN에서는 input place 1, 2, 4에 token이 있고 FT의 경우 $X1 = X2 = X4 = 1$ 로 표시된다. 그림 2를 이용하여 a)를 설명하면 place 1, 2는 T1에 AND gate로 연결되어 있고, place (1, 2)와 3는 각각 T1 과 T2 에 OR gate로 연결되어 있다.

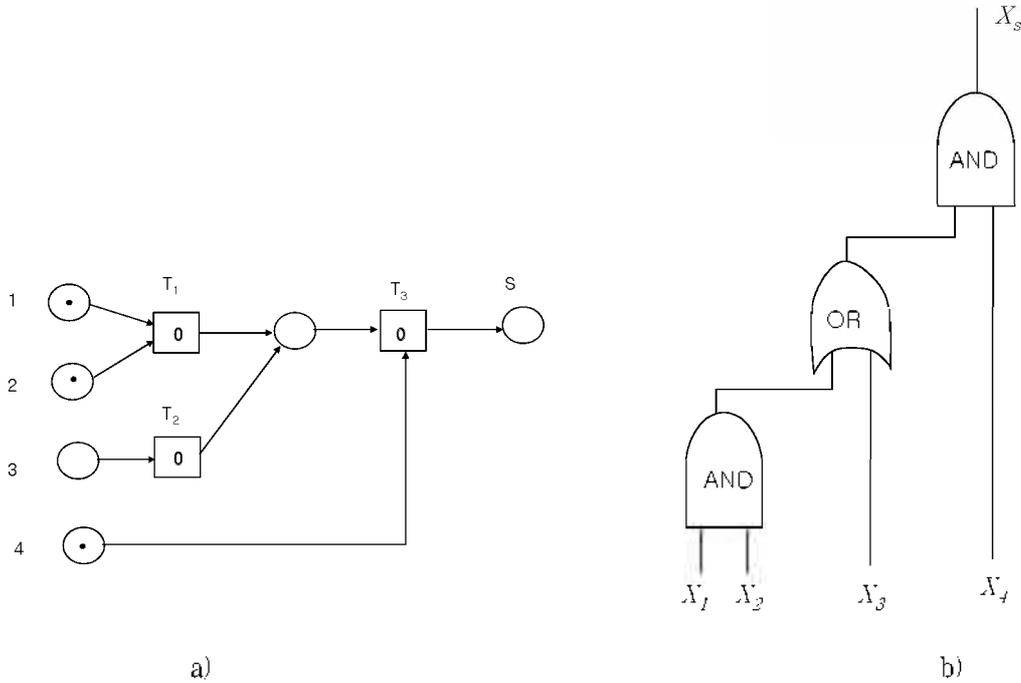
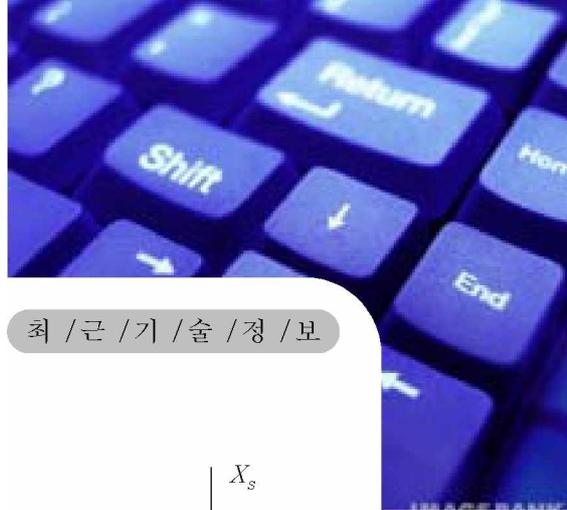
a) AND gate



b) OR gate



<그림 3> PN의 a) AND gate, b) OR gate



<그림 4> X1 = X2 = X4 = 1 의 시스템이 down 상태인 경우 a) 시스템 S의 PN b) 시스템 Xs의 FT

place(1, 2, 3) 와 4는 T3에 AND gate로 연결되어 있다. 그러므로 a)의 PN 과 b)의 FT는 시스템의 고장을 분석하는데 동일한 의미를 갖는다. 이와 같이 PN 분석 방법은 어느 한 component의 상태들간의 전이 경로를 잘 표현해 주고, 특정 시스템에 고장을 유발하는 주요 원인이 다른 component에 미치는 영향을 파악할 수 있으므로, 복잡한 시스템도 도식화하여 쉽게 표현할 수 있다. 그리고 Dealying Time, D를 사용하면, repairable 한 unit를 가진 시스템을 모델링 하는데도 유용하다. 그러므로 PN 모델링은 여러 분야에 광범위하게 응용될 수 있고, 신뢰성뿐만 아니라, 보전성(maintenability), 가용성(availability) 등을 모델링

하는데도 효과적으로 사용될 수 있다.

3.4. Markov Process를 이용한 신뢰성 분석(Reliability by Markov Technique)

Markov이론[3~5]은 component의 고장률, 확률 분포, 신뢰도를 조사하여 Markov Chain Rule을 이용하여 시스템의 신뢰성을 모델링 한다. 그리고 모델링으로 부터 신뢰도, 유지보수, MTTF, MTTR를 산출하는 수치적인 기술로서 여러개의 부품으로 조합된 시스템해석에 특히 유용하다.

일반적으로 n을 상태수로 하여 상태 i에서 상태 j로

전이확률 pij 를

$$P(i, j) := P(X_{n+1} = j | X_0, \dots, X_n) = P(X_{n-1} = j | X_n = i),$$

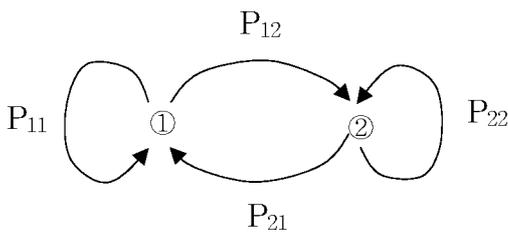
n-step 전이확률을

$$P^n(i, j) := P(X_n = j | X_0 = i),$$

옮겨가는 전이확률을 pij라 하면 정방행 행렬이 전이 확률에 따라 형성된다. 이 행렬을 전이확률행렬 (transition probability matrix), 또는 P행렬이라고 한다. 전이확률행렬의 원소 pij는 상태 i에 있는 것을 전제로 어느 입력조건에 따라 상태 j로 옮기는 것이므로 조건부확률(conditional probability)이다.

즉, 앞에서 설명한 FT 나 PN으로 도식화된 시스템의 고장을 또는 수명을 부품별 또는 단계별로 정상상태와 고장상태간의 전이(transition)되는 확률을 Markov chain을 이용하여 행렬로 나타냄으로써 전체시스템의 신뢰성을 계산해내는데 이용한다.

정상상태(up: ①)와 고장상태(down: ②)의 2단계 (state)로 이루어진 시스템을 가정하면 아래 그림과 같이 나타낼 수 있다.



①의 상태에서 ②의 상태로 전이될 확률이 P12, ②의 상태에서 ①의 상태로 전이될 확률이 P21 이라

하면,

State: E=U+D, U: 정상상태, D: 고장상태.

$$\text{전이행렬은 } P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}, \quad 0 \leq p, q \leq 1,$$

초기분포는 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$.

신뢰성:

$$R(n) := P(\forall k \in [0, n], X_k \in U), \quad n \geq 0 \\ = \alpha_1 P^n_{11} \mathbf{1}_r,$$

$$\text{가용성: } A(n) := P(X_n \in U), \quad n \geq 0, \\ = \alpha P^n \mathbf{1}_{s,r}.$$

보전성:

$$M(n) := 1 - P(\forall k \in [0, n], X_k \in D), \quad n \geq 0, \\ = 1 - \alpha_2 P^n_{22} \mathbf{1}_{s-r}.$$

여기서 $\mathbf{1}_r = (1, \dots, 1)^T$, 그리고 $\mathbf{1}_{s,r} = (1, \dots, 1, 0, \dots, 0)$ 이다.

$$\text{또한 } MTTF = \alpha_1 (I - P_{11})^{-1} \mathbf{1}_m,$$

$$MTTR = \alpha_2 (I - P_{22})^{-1} \mathbf{1}_{N-m}$$

$$MUT = \frac{\pi_1 \mathbf{1}_m}{\pi_1 P_{21} \mathbf{1}_m},$$

$$MDT = \frac{\pi_2 \mathbf{1}_{N-m}}{\pi_2 P_{12} \mathbf{1}_m},$$

MTBF = MUT + MDT 등의 신뢰성 척도를 계산할 수 있다.

그러나 Markov chain의 경우 component의 수(n)가 커지면, state의 수가 $2n$ 만큼 커지게 되므로 실제 적용하는데 큰 어려움이 있다. 그러므로 component의 수가 큰 경우에는 asymptotic한 방법인 semi-Markov chain[3~5]을 이용하면 신뢰성 척도를 구하는데 효과적이다.

4. 결 론

유럽 선진국에서의 신뢰성은 제품의 수명 예측뿐만 아니라 제품 개발단계에서의 신뢰성 설계, 소재나 부품에 대한 철저한 품질 및 신뢰성 관리 등 총체적 품질경영(Total quality management)의 개념을 포함하고 있다. 이는 제품개발 후 신뢰성 평가, 관리 및 보수보다는, 개발 단계에서의 철저한 신뢰성 설계 및 관리가 전체적인 품질관리의 측면에서뿐만 아니라 비용적인 면에서도 훨씬 경제적이고 효과적이기 때문이다.

이를 위해 개발단계의 품질계획(product development strategy)을 통한 제품의 기능과 성능, 품질 및 신뢰성 확보 전략과 3P(people, product, process)를 중심으로 한 공정모델(process model) 개발, 개발단계/제조 단계에서의 고 신뢰성 확보를 위한 시험분석 등을 연구하고 있고, 좀더 체계적이면서 이론적인 신뢰성 분석을 위하여 FMEA, FTA 등 기본적인 이론은 물론 Petri Nets, Markov(Semi-Markov) modeling 등 새로운 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 신뢰성 확보 · 향상 분야에 이론과 실재를 겸비한 우수한 인력자원이 중요시 되어가고 있는 추세이다.

그러나 현재 우리는 신뢰성 평가, 인증 및 향상 사업을 시작한지 4년에 접어들고 있다. 신뢰성 시험, 분

석 및 인증 분야에는 지난 3년간의 기술이 발전되고 있지만, 이를 기반으로한 신뢰성 설계 및 공정개발에는 아직까지 큰 성과를 기대하기 어려운 현실이다. 그러므로 앞에 기술된 선진국가의 신뢰성 기법들을 연구하여, 벤치마킹 한다면, 단기간 내에 부품, 소재 분야의 신뢰성 향상에 큰 발전이 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

- 1) Wingfrid G. Schneeweiss ;
The Fault Tree Method, ISBN 3-934447-01-5 LiLove-Verlag CmbH (Pub. Co. Ltd.), Hagen, Germany, 1999.
- 2) Wingfrid G. Schneeweiss ;
Petri Nets for Reliability Modeling, ISBN 3-934447-00-7 LiLove-Verlag CmbH (Pub. Co. Ltd.), Hagen, Germany, 1999.
- 3) N. Limnios and G. Oprisan ;
Semi-Makov Processes and Reliability, Birkhauser, Boston, 2001.
- 4) V. Girardin and N. Limnios ;
PROBABILITES EN VUE DES APPLICATIONS, Vuibert, Paris, 2001.
- 5) A. Sadek and N. Limnios ; "Asymptotic properties of the maximum likelihood estimators of reliability and failure rates of Markov chains," Communication in Statistics-Theory and Methods, 31(10), pp 1837-1861, 2002.

