

## 4차 산업혁명 시대에서의 신뢰성 패러다임의 변화

정해성<sup>†</sup>

서원대학교 멀티미디어학과

---

### Reliability Paradigm-Changes in Industry 4.0

Hai Sung Jeong<sup>†</sup>

Department of Multimedia Engineering, Seowon University

**Purpose:** This paper will focus on the reliability technological innovation following the emergence of industry 4.0 featured by convergence, connection and complexity. In the course of the process, the concept and application of 3R (Robustness, Redundancy, Resilience) are considered along with reliability in industry 4.0.

**Methods:** Reliability paradigm-changes are presented to meet the purpose of keeping the desired function in Industry 4.0. And the introduction of resilience, a concept compromising reliability is to be suggested.

**Results:** The necessity of the 3R (Robustness, Redundancy, Resilience) introduction is emphasized according to reliability paradigm-changes.

**Conclusion:** Reliability, robustness, redundancy and resilience are not mutually exclusive. Ultimately, acquiring the resilience requires robustness, redundancy and fittable maintenance procedures.

**Keywords:** Reliability, Robustness, Redundancy, Resilience, Industry 4.0

#### 1. 서론

인류는 지난 200여 년 동안 여러 차례 혁신의 과정을 겪었다. 첫 번째는 1780년대 영국을 중심으로 시작된 1차 산업혁명으로 증기를 동력으로 기계가 인간의 노동을 대체하기 시작했다는 의미를 갖는다. 두 번째 산업혁명은 1870년대 미국을 중심으로 전기를 이용한 대량생산 체계가 도입된 시기를 일컫는다. 2차 산업혁명의 특징은 컨베이어 벨트를 활용한 기초적인 자동화라고 할 수 있다. 3차 산업혁명은 1970년대에 전자기술과 IT기술이 산업에 접목되면서 프로그램 가능 논리 제어(programmable logic control)를 통해 본격

적으로 자동화 생산을 가능하게 한 시기를 말한다. 이제, 또 한 번의 거대한 산업의 변화, 네 번째 산업혁명이 시작되고 있다. 그것은 센서(Sensor) 기술, 사물인터넷(Internet Of Things; IoT), 클라우드 컴퓨팅(Cloud Computing), 빅데이터(Big Data), 인공지능(Artificial Intelligence; AI) 등이 융합된 ICT(Information Communication Technology)를 동력으로 하는 4차 산업혁명이다. 1~3차 산업혁명이 기계가 인간의 노동 특이 육체노동을 대체하는 과정이었다면 4차 산업혁명은 인공지능이 인간의 두뇌를 대체 다시 말해 정신노동을 대체한다는 측면에서 이전의 산업혁명과 크게 구분된다고 할 수 있다. 4차 산업혁명은 3차 산업혁명의

---

<sup>†</sup> 교신저자 hsjeong@seowon.ac.kr

2017년 8월 4일 접수; 2017년 8월 16일 수정본 접수; 2017년 8월 17일 게재 확정.

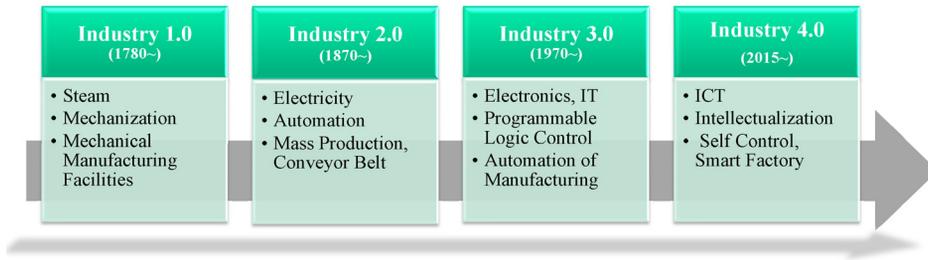


Fig. 1 From industry 1.0 to industry 4.0

단순한 연장선이 아닌 이제까지 겪어보지 못한 획기적인 변화라는 것이다.

4차 산업혁명은<Fig. 2>의 기술들을 융합한 포괄적인 개념(umbrella term)이다. 그런데 이 기술 간에도 국가별로 추구하는 분야가 다르고 프로젝트도 집중되어 있다. 독일은 제조업 강화 정책에 따라 스마트 공장(Smart Factory) 중심으로, 일본은 초저출산, 초고령화 상황에서 혼자 생활하는 생활패턴에 대한 관심으로 로봇(Robots)에 대한 관심이 집중되어 있고, 미국은 데이터 중심으로 클라우드 컴퓨팅(Cloud Computing)에 집중하고 있다. 이에 우리나라도 4차 산업혁명을 선도할 분야에 대한 적극적인 고민이 필요한 시점이다

본 연구에서는 4차 산업혁명 등장에 따른 신뢰성(reliability) 기술 변화를 증점적으로 다루고자 한다. 이 과정에서 4차 산업혁명 시대에 신뢰성과 더불어 관심 가져야 할 3R(Robustness, Redundancy, Resilience)의 개념과 적용에 관해 논하고자 한다.

## 2. 신뢰성 패러다임의 변화

4차 산업혁명의 기술들을 토대로 사람과 사람 사

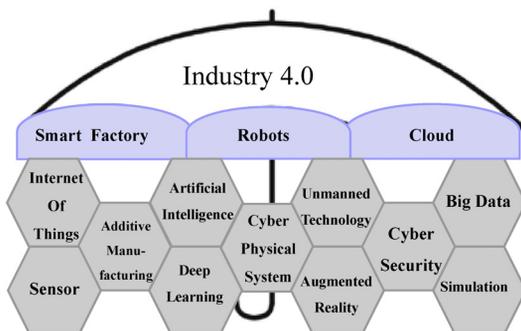


Fig. 2 Related technology in industry 4.0

람과 사물 뿐 만 아니라 사물과 사물이 망(network)으로 연결되고, 이를 통해 발생하는 막대한 데이터가 활용됨으로써 개발, 설계, 제조, 유통 등 생산과정에서의 생산성, 품질 뿐만 아니라 사용 과정에서의 신뢰성 등 고객만족도를 획기적으로 향상시킬 수 있게 되었다. 이에 따라 고객의 다양하고, 복잡한 요구가 바로 설계에 반영되고, 자동화 생산 시스템 도입을 통해 무결점·초고속 생산 공정이 실현되고, 사용 중에도 신뢰성 문제를 제어할 수 있게 되는 등 산업 전반에 걸친 획기적인 변화가 예상된다. 융합, 연결, 복잡의 특징을 지닌 4차 산업혁명 등장에 따른 산업 변화의 내용은 다음과 같이 정리될 수 있다.

개발, 설계, 유통 측면에서 개별 소비자의 요구를 충족(personalized service)시키는 추세에 부응하여 고객이 원하는 제품을 정확히 생산하고 제공할 수 있어야 한다. 이를 위해 다음의 변화를 인식해야 한다.

첫째, 스펙은 엔지니어가 아니라 고객이 준다. 이때, 고객의 요구를 설문 등 조사해서 반영하는 것은 늦다. 고객의 요구를 실시간으로 반영할 수 있어야 한다.

둘째, 제조 과정에서 ICT가 적용되어 연결된 생산 시스템을 통해 생산 품목, 생산 시기, 생산량이 자체적으로 조절되어야 한다. 이를 위해 진단기술의 획기적인 변화가 필요하다. 생산 과정에서 관리도 같은 전통적인 품질관리 기법은 늦다. 다시 말해, 컨베이어가 조금 지날 때, 감지하고 조치를 취해야 한다는 것이다. 또한 제조 공정에서 무결점, 초고신뢰성 확보, 신속대응으로 개념이 바뀌어야 한다.

셋째, 사용 중에도 초고신뢰성을 유지하기 위한 대응책을 적극적으로 마련해야 한다. 초연결, 초복잡계에서 신뢰성이 문제로 되는 범위와 깊이를 예단하기 어렵다. 따라서 4차 산업혁명 시대에서는 전보다 빠른 속도로 신뢰성 문제에 대응해야 한다.

넷째, 4차 산업혁명시대에서는 제품 라이프사이클

Reliability is the property that	
a product or service	→ scope of the object
will operate properly without failure	→ desired function
for a specified period of time	→ specification of the time
under the design operating conditions	→ specification of the operating conditions

Fig. 3 Definition of the reliability

전 과정에서 HW와 SW사이에 많은 데이터와 정보가 존재한다. 따라서 데이터가 새로운 부하로써 작용하게 될 것이다. 이에 대한 신뢰성 기준이 필요하다 또한 AI 기반의 자율기능(autonomous functioning) 기기 또는 로봇(Robot)의 경우 신뢰성 시험을 어떻게 할 것인가? 스스로 학습(self learning)하여 대처하는 경우 어떻게 신뢰성을 정의하고 평가할 것인가? 등이 신뢰성 전문가의 과제로 대두되었다.

이상에서와 같이 융합, 연결, 복잡의 특징을 지닌 4차 산업혁명 등장에 따른 신뢰성 패러다임의 변화를 신뢰성 정의로부터 풀어가 보자. 이를 통해 4차 산업혁명 시대에 신뢰성 분야 전문가들이 신뢰성 관점에서 어디에 관심을 가져야 할 것인가를 같이 고민해 볼 수 있다. <Fig. 3>에서와 같이 신뢰성은 ‘제품이나 서비스가 주어진 조건하에서 의도하는 기간 동안 요구되는 기능을 수행할(고장을 일으키지 않을) 성질’로 정의된다. 따라서 신뢰성이 제대로 정의되기 위해서는 신뢰성을 문제로 하는 ‘1) 대상의 범위 2) 규정된 사용 환경 3) 시간의 규정 4) 요구되는 기능 또는 고장의 정의 및 고장 판단 기준의 규정을 명확히 설정해야 한다. 이를 4차 산업혁명 환경 측면에서 다음과 같이 풀어볼 수 있다.

**2.1 신뢰성을 문제로 하는 대상의 범위(Scope of the Object)**

3차 산업혁명 시대까지는 신뢰성 문제의 대상이 되는 제품 및 서비스 자체 뿐 만 아니라 이를 사용하는 인간의 결정, 행동 등 인간 요소(human factor)와의 상호 작용도 신뢰성을 문제로 하는 대상의 범위에 넣어야 할 것인가를 시작으로 소프트웨어를 포함할 것인가가 논의의 범주에 있었다. 4차 산업혁명 시대에서는 데이터에 의해 활동이 상호 제어되고 능동적으로 작동하는 시스템 환경에서 데이터 처리과정 즉, 입

력 · 처리 · 출력 과정에서의 오류, 과부하, 혼신 등 데이터 관련 문제를 대상에 포함시킬 것인가를 규정해야 한다. 이에 관련하여 데이터 신뢰성을 포함한 데이터 품질에 관한 연구가 진행 중이다[1, 2].

**2.2 규정된 사용 환경(Specification of the operating conditions)**

4차 산업혁명 산출물들의 사용 환경은 초복잡계 초연결계라고 할 수 있다. 무선통신, 센서(sensor) 기술, 사물인터넷(Internet Of Things; IoT), 클라우드 컴퓨팅(Cloud Computing), 빅데이터(Big Data), 인공지능(Artificial Intelligence; AI), 시뮬레이션, 무인기술(Unmanned Tech.) 사이버보안(Cyber Security) 등 기술이 융합된 초복잡계, 초연결계에서는 사용 환경을 규정할 변수가 많다. 4차 산업혁명 시대에서 신뢰성을 정의하기 위한 사용 환경 변수의 선택과 범위는 신뢰성 연구자들에게 새롭게 주어진 과제라고 할 수 있다. 참고로 초복잡계, 초연결계에서는 망(network)상의 한 요소가 미치는 영향의 범위 및 크기를 예측하기 어렵다. 즉, 망(network)상의 한 요소가 제대로 작동하지 않을(malfunction) 때, 그 영향을 예측하기 어렵다. 이런 점이 관심 있는 사용 환경을 규정하기 어렵게 하는 요소이다.

**2.3 시간의 규정(Specification of the Time)**

4차 산업혁명 시대에서는 전보다 빠른 속도로 신뢰성 문제에 대응해야 한다. 따라서 규정의 시간 관점에서 더 이상 평균수명, B<sub>10</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>1</sub>이 관심이 아니다. B<sub>0.01</sub>, 그 이하를 보증, 관리해야 한다. 또한 이제까지 적합된 분포들은 평균 근방에서는 대충 맞지만, 꼬리 부분은 차이가 많이 난다. 따라서 꼬리 부분을 정확히 추정할 수 있는 분포 사용이 요구된다

## 2.4 요구되는 기능(Desired function)의 규정

복잡성과 변동성이 증가함에 따라 고장 및 고장 징후를 예단하기 어렵다. 이제까지는 고장이 사전에 정의되고 이 기준에 따라 진단 및 조치를 취했는데 초복잡계, 초연결계에서는 의도되지 않고(unintended) 예상하지 못한(unexpected) 고장 및 이로 인한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 사건이 발생했을 때 요구되는 성질로서 신뢰성을 절충할 수 있는 개념이 요구된다. 즉, 고장이 나지 않아야 하지만 고장이 나더라도 영향이 최소화되어야 하며 빨리 회복하고 과거 고장 경험으로부터 학습하고 적응할 수 있어야 한다는 것이다. 스스로 또는 적극적으로 고장을 정의해 가며 관리해야 한다는 것이다. 예를 들어, AI 기반의 자율기능(autonomous functioning) 기기 또는 로봇(Robot)의 경우, 스스로 학습하고 적응(learning and adaptation)해 가면서 판단하게 된다. 이 과정에서 작동, 고장이라는 이분법적 판단에서 연속값으로서의 상태로 확장되어 고장의 상태가 정의되어야 한다. 다시 말해, 부분 작동, 미흡한 작동 상태도 고장의 분류에 포함될 수 있다는 것이다.

4차 산업혁명시대에서는 'HW와 SW사이에 많은 데이터와 정보가 존재하고 데이터가 새로운 부하로써 작용하게 될 것이다.'라고 전술한 바 있다. 이에 공학적 측면에서의 데이터 신뢰성에 대한 논의 및 연구가 필요하다. 데이터 신뢰성은 다음과 같이 정의될 수 있다[3]. 데이터 신뢰성은 데이터가 사용 목적과 사정에 맞게 완결성과 무결점성을 갖는 상태를 말한다(Data reliability is a state that exists when data is sufficiently complete and error free to be convincing for its purpose and context). 위의 정의는 회계감사 분야에서 정의된 내용이다. 공학적 측면에서 데이터가 사용 목적과 환경에 맞게 완결성과 무결점성을 갖기 위해서는 다음 성질을 만족해야 한다.

첫째, 적합성(relevancy), 데이터가 사용 목적에 적합하게 제공되어야 한다.

둘째, 품질(quality), 데이터의 항목, 내용, 레코드의 수 및 질이 확보되어야 한다.

셋째, 지속가능성(sustainability), 데이터가 시간의 흐름에 따라 원래의 성질이 유지되어야 한다. 이는 유지 기간 업데이트 정도 등이 포함된다.

넷째, 가용성(availability), 데이터가 필요할 때 적시

에 제공되어야 한다.

## 3. 4차 산업혁명시대에서의 3R

광의의 신뢰성 차원에서 가용성(availability)은 '어떤 기기나 시스템이 시점t에서 정상 가동하고 있을 확률'로 정의된다[4]. 4차 산업혁명 시대에서는 최고 수준의 가용성이 요구된다. 이미 99.98%, 99.996%를 요구하고 있으며[5], 쉽 없이 이루어지는 데이터 송수신에 의해 작동되는 환경을 고려하면 9-nines 또는 그 이상이 요구될 것으로 판단된다. 이 때 최고 수준의 가용성을 확보하기 위해서는 극대 신뢰성(extreme high reliability)이 요구된다. 그러나 4차 산업혁명 시대의 초복잡계, 초연결계에서는 작동환경, 스트레스, 고장 원인 등의 파악이 어렵다. 또한 시간적, 비용적 제약으로 극소 고장률을 입증하기 어렵다. 즉, 극대 신뢰성 확보 및 입증에 어려움이 있다. 물론 수리시간 감축, 최상의 재고 정책, 운영 중 교체(hot swap replacement) 등 보전성 증대로 가용성 확보가 가능하지만 이것만으로 극대 신뢰성을 확보하기에는 불충분하다. 이를 극복하기 위해 4차 산업혁명 시대의 초복잡계, 초연결계 상황에서의 3R(Robustness, Redundancy, Resilience)에 대하여 논의하고자 한다.

### 3.1 강건성(Robustness)

강건성(robustness)은 신뢰성(reliability)을 포함하는 개념으로서, 불확실한 상황에서도 안정을 유지함으로써 외부의 충격을 견뎌내고 생존하는 능력(ability to withstand or survive external shocks; to be stable in spite of uncertainty)을 나타낸다[6-8]. 즉, 사고(accident) 및 위기(crisis)를 흡수하고 견디는 능력을 나타내는 척도이다. 다시 말해, 고장이 나도 사고나 재해로 연결되지 않게 하는 능력이라고 말할 수 있다. 항공기의 경우, 바퀴가 고장이 나도 안전하게 착륙할 수 있는 성질이 강건성에 해당한다. 강건성의 하위 요소로 적응성(adaptability), 모듈화(modularity), 단일 장애지점 제거(elimination of single point of failure)가 있다.

적응성(adaptability)은 오류가 있더라도 이를 커버해주는 방어수단(fail safes)이 작동하는 능력을 말한다. 도요타 급발진 사고의 원인으로 운전 조작 미숙

차체 결합, 자동차 매트 영향, SW 오류 등이 제기되었다[9]. 그러나 2007년 오콜라호마 주에서 일어난 캡티 승용차의 급발진 사건과 관련해 2013년 10월 배심원단이 “피해자들에게 300만 달러(31억 8천만 원)를 배상하라”는 평결을 내리고 ‘징벌적 손해배상금’을 산정하려 하자 곧바로 피해자들과 합의한 북아웃(Bookout) 소송에서 바그룹(BARR group)에 의해 급발진 원인이 비트플립(bit-flip)에 의해 일어난 SW 오류라고 밝혀졌다[10]. 비트플립은 랜덤 액세스 메모리 또는 다른 매체에 저장된 비트의 메모리 오류 또는 SW 오류로서 0에서 1로 또는 그 반대로 의도하지 않은 상태로 전환되는 오류를 말한다. 즉, 방사선 등에 의해 반도체 오류를 일으켜 메모리의 변수가 변경될 수 있으며, 메인 OS의 프로세스를 관리하는 중요 변수가 바뀌므로써 사용자 의도와는 상관없이 스로틀(throttle) 기능이 잘못 작동될 수 있다는 것이다 이로써 이제까지 논란이었던 급발진 사고의 원인이 엔진 전자 스로틀 제어 시스템(ETCS; Electronic Throttle Control System)의 전자제어 장치(ECU; Electronic Control Unit)내의 SW 오류임이 밝혀진 것이다 자세히 말하면, ETCS 내 메모리 영역에서 정보를 주고받을 때 특정 메모리 영역을 공유하는데, 이 공유 지점에서 간섭 현상이 일어나 ETCS에 잘못된 지시가 내려졌고 이것이 급발진으로 이어진 것이다 이는 도요다의 소스코드(source code)가 결함이 있고 이로 인한 버그(bugs)가 의도치 않은 가속을 일으킨 것으로 전술한 데이터가 부하로 작용해 고장을 일으킨 예이다 더 나아가 강건성(robustness) 측면에서는 SW 상의 오류가 있더라도 이를 커버해주는 방어수단(fail safes)이 작동하지 않은 즉, 적응성 부재가 고장이 사고로 이어지게 한 것이라고 할 수 있다. 모듈화(modularity)는 시스템 내 한 부분의 예상치 못한 충격이 시스템의 다른 부분으로 전파되는 것을 막음으로써 그 영향을 국소화하는 것을 말한다. 방화벽(firewall)의 설치를 예로 들 수 있다. 단일 장애지점(single point of failure)은 해당 지점이 고장 나면 전체 시스템이 동작하지 않는 부분을 일컫는 말로서 일종의 급소에 해당한다. 단일 장애지점이 없는 시스템은 강건하다고 할 수 있다

### 3.2 리던던시(Redundancy)

고장률이 0.0001%/시간인 부품 7,000개로 구성된

시스템의 고장률은 0.7%/시간으로 커진다. 즉, 많은 부품으로 구성된 시스템의 고장률을 적절하게 유지하기 위해서는 부품단위의 고장률이 극소이어야 한다. 리던던시(redundancy)는 과용량(excess capacity) 및 보완 시스템(back-up system)을 갖는 것을 의미한다. 리던던시는 극소 고장률 및 강건성 확보의 방안이 될 수 있다. 고장률  $\lambda_0$  인 지수분포를 따르는 동일 아이템 2개의 리던던시 구조의 고장률은  $\lambda(t) = \lambda_0^2 t / (1 + \lambda_0 t)$ 이다[4]. 따라서 고장률이 0.1%/시간인 아이템에 대하여 2개의 리던던시 구조의 고장률은 대략  $0.001 \times 0.001 \approx 0.0001\%$ 이며, 3개의 리던던시 구조의 고장률은 대략  $0.001 \times 0.001 \times 0.001 \approx 0.000001\%$ 으로 극소고장률이 확보될 수 있다. 참고로 보잉 777의 경우 치명적 부품에 대해 3+3 리던던시 구조를 채택하고 있다[11]. 여기서 3+3 리던던시는 3개의 작동 부품에 대해 여분의 3개가 리던던트(redundant)한 구조로 이루어져 있다는 것이다.

### 3.3 회복탄력성(Resilience)

최근 신뢰성을 보완하는 개념으로 회복탄력성(resilience)에 관한 연구가 활발하다[12-14]. 회복탄력성은 시스템이 회복되고 경우에 따라서는 역경으로부터 더 나은 상태로 바뀌 놓을 수 있는 능력을 말한다[15]. 미국 국가기간시설 자문회의(The National Infrastructure Advisory Council)는 회복탄력성(resilience)을 다음과 같이 구체적으로 정의하고 있다[16].

“지장을 주는 사고의 크기 및 시간을 줄이는 성질이며, 지장을 야기 시킬 수 있는 잠재적 사고를 예측하고, 받아들이고, 적응하며 또한 빠르게 복원시키는 능력에 의존된다.”

회복탄력성 있는 시스템은 <Fig. 4>와 같이 도해할 수 있다.

회복탄력성 있는 시스템은 충격 발생시, 충격의 영향이 작아야 한다. 시스템의 일부분이 녹아웃(knockout)되던가 완전히 다운(down)이 아니라 좀 덜 만족스러운 상태, 예를 들면 갈색상태(brown outs)로 되는 것이 이에 해당한다. 또한 원래의 전 기능을 빠르게 회복해야 한다. 이러한 아이디어는 이제까지의 융통성 없는 이분법적인 시스템 상태(system status)의 분류로 작동, 고장을 넘어 연속적인 값을 갖는 시스템 상태로 확장되어야 함을 시사하고 있다. 이런 아이디어

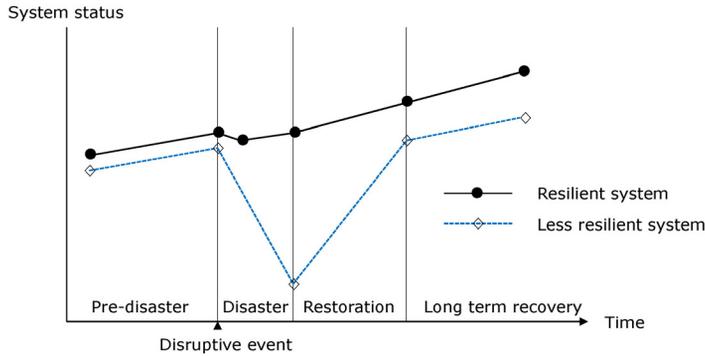


Fig. 4 A resilient versus less resilient system(modified from[17])

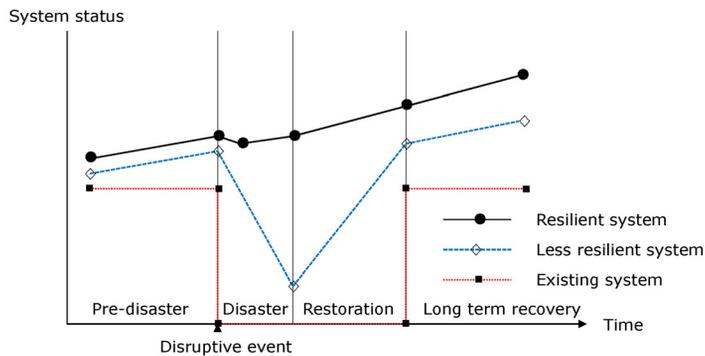


Fig. 5 A flexible continuum between functional and failed

어는 <Fig. 5>와 같이 도해할 수 있다

#### 4. 결론

이제까지 살펴본 신뢰성(reliability), 강건성(robustness), 리던던시(redundancy), 회복탄력성(resilience)은 서로 배타적인(exclusive) 개념이 아니다. 강건성은 신뢰성(reliability)을 포함하는 개념이며, 리던던시는 신뢰성 및 강건성 확보의 방안이 될 수 있다. 회복탄력성과 신뢰성은 관련성이 깊은 개념이다. 신뢰성은 고장을 일으키지 않을 성질에 초점을 맞춰 의도한 기능을 유지하려는 목적을 달성하고자 하는 개념이라고 할 수 있다. 회복탄력성은 의도한 기능을 유지하려는 목적을 달성하고자 함은 같으나 예상하지 못한 환경 변화나 간섭 등 사건이 발생했을 때 요구되는 성질로서 신뢰성을 절충할 수 있는 개념이다. 결국 초복잡계, 초연결계에서 의도된 기능을 유지하기 위해서는 극대 신뢰성 뿐 만아니라 회복탄력성이 확보되어야 한다. 즉, 고장이 나지 않아야 하지

만, 고장이 나더라도 영향이 최소화되어야 하며 빨리 회복하고 과거 고장 경험으로부터 학습하고 적응할 수 있어야 한다는 것이다. 실제로 회복탄력성을 갖추기 위한 요소로 강건성과 리던던시 그리고 적합한 보전 절차(maintenance procedures)를 들 수 있다. 적합한 보전 절차는 이제까지의 TBM(Time Based Maintenance), UBM(Usage Based Maintenance)에서 벗어나 CBM(Condition Based Maintenance), PHM(Prognostics and Health Management), 딥러닝(Deep Learning) 등의 채용을 말한다. 본 연구에서는 4차 산업혁명 시대에 의도한 기능을 유지하려는 목적을 달성하기 위한 신뢰성 패러다임의 변화와 신뢰성과 더불어 관심 가져야 할 3R(Robustness, Redundancy, Resilience)의 개념을 제안하고 논하였다.

#### References

[1] Wang, R. Y. and Strong, D. M. (1996). "Beyond Accuracy: What

- Data Quality Means to Data Consumers". *Journal of Management Information Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 5-33.
- [2] Vinayagasundaram, B. and Srivasta, S. K. (2007). "Software Quality in Artificial Intelligence System". *Information Technology Journal*, Vol. 6, No. 6, pp. 835-842.
- [3] Morgan, S. L. and Waring, C. G. (2004). "Guidance on Testing Data Reliability". Office of the City Auditor Austin, Texas.
- [4] Jeong, H. S., Kwon, Y. I., and Park, D. H. (2005). "Test, analysis and evaluation of reliability". Youngji publishers.
- [5] Marshall, G. and Chapman, D. (2002). "Power Quality Application Guide". Copper Development Association.
- [6] Lempert, R. J., Popper, S., and Bankes, S. (2002). "Confronting Surprise". *Social Science Computing Review*, Vol. 20, No. 4, pp. 420-440.
- [7] Lempert, R. J., Groves, D. G., Popper, S. W., and Bankes, S. C. (2006). "General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios". *Management Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 514-528.
- [8] Lempert, R. J. and Groves, D. G. (2010). "Identifying and Evaluating Robust Adaptive Policy Responses to Climate Change for Water Management Agencies in the American West". *Technological Forecasting and Social Change*.
- [9] Chin, H. S. and Park, T. H. (2016). "Software safety issue and challenges in automobile industry". *SPRi (Software Policy & Research Institute) Issue Report*, Vol. 16, pp. 1-38.
- [10] Michael, B. (2013). "Bookout V. Toyota 2005 Camry L4 Software Analysis". BARR group.
- [11] Ryu, D. S. (2012). "Improving Reliability and Quality for Product Success". CRC Press.
- [12] Dwight, W. R. (2005). "Some Observations on Resilience and Robustness in Human Systems". *Cybernetics and Systems*, Vol. 36, No. 8, pp. 773-802.
- [13] BAE Systems (2010). "Robustness, Adaptivity, and Resiliency Analysis". *Complex Adaptive Systems -Resilience, Robustness, and Evolvability: Papers from the AAAI Fall Symposium (FS-10-03)*.
- [14] Aaron, C. G. (2016). "What's the Difference between Reliability and Resilience?". *ICSJWG Quarterly Newsletter*, March 2016.
- [15] Alexander, D. (2013). "Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey". *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion*, Vol. 1, pp. 1257-1284.
- [16] National Infrastructure Advisory Council (2009). "Critical Infrastructure Resilience Final Report and Recommendations".
- [17] Mayunga, J. S. (2007). "Understanding and Applying the concept of community disaster resilience: a capital-based approach". *Summer academy for social vulnerability and resilience building*, pp. 1-16.