

철도 분야의 신뢰성

구 병 춘 | 한국철도기술연구원 철도구조연구실, 책임연구원 | e-mail: bcfgoo@krri.re.kr

정 의 진 | 한국철도기술연구원 차세대전동차연구단, 선임연구원 | e-mail: ejjung@krri.re.kr

1899년 서울-인천 간 운행을 시작한 우리나라 철도는 지난 2004년 시속 300km/h 고속철도의 개통으로 전국을 반나절 생활권으로 만들면서 우리 생활에 혁명적인 변화를 일으키고 있다. 고속철도 개통 전에는 서울에서 대구나, 부산으로 1박 2일이 소요되던 출장이 아침에 출발하여 일을 마치고 저녁에 집으로 돌아와 가족과 함께 저녁을 먹을 수 있게 된 것이다. 이렇듯 편리한 철도의 최대 장점은 안전성, 고속성, 정시성이라 할 수 있다. 이러한 철도의 장점을 확보하기 위해서는 신뢰성의 확보가 필수적인 요소다. 이 글에서는 현재 활발하게 진행되고 있는 철도분야의 신뢰성 관련 연구를 소프트웨어 신뢰성, 차량구조재 내구신뢰성 그리고 RAMS 분야로 나누어 소개하고자 한다.

소프트웨어의 신뢰성

과거에는 하드웨어의 신뢰성이 중요시 되었으나 최근에는 소프트웨어의 사용이 증가하고 프로그램의 내용이 복잡해지면서 소프트웨어의 신뢰성 확보가 매우 중요하게 되었다. 소프트웨어로 시스템의 기능을 구현할 경우에는 프로세스 처리를 육안으로 확인할 수 없을 뿐만 아니라 의도하는 프로세스가 정확히 수행된다는 것을 보장할 수가 없기 때문에 소프트웨어로 구현한 기기의 정확한 기능 수행 보장, 품질 및 신뢰성 확보가 무엇보다도 중요하다. 현재 적은 공간에서 빠르게 원하는 기능을 구현할 수 있다는 장점 때문에 안전이 중요한 시스템에서 소프트웨어의 사용이 증대되고 있는데, 이는 아직까지 신뢰성이 확보되었다는 것이 입증되지 않은 상태에서 소프트웨어를 사용한다고 볼 수 있다. 만약의 사태로 소프트웨어의 오작동으로 인하여 사고로 이어질 경우 그 손실은 막대하다고 할 수 있다. 따라서 철도 소프트웨어에 대하여 안전기준을 새로이 제시하는 연구가 진행 중에 있으며, 제시된 안전기준에 따라 철도 소프트웨어가 제대로 개발되었는지 검증하는 체계에 대한 연구가 중에 있다. 현재 경량전철, 도시철도시스템 등에서 무선을 이용한 열차제어시스템 등에 대한 연구가 많은 부분 진행되고 있으며, 그 핵심 기술은 소

프트웨어로 구현되고 있는 것이 사실이다. 소프트웨어의 신뢰성에 대한 연구는 현재 여러 방법으로 진행되고 있는데 이 글에서는 소프트웨어의 신뢰성을 향상시키기 위해 소프트웨어 개발단계에서 적용되고 있는 절차적 방법들에 대해 주로 소개하고자 한다.

소프트웨어의 품질

흔히 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)라는 용어로 품질을 표현하곤 한다. 이는 시스템에 있어서 품질을 측정하기 위한 지표로 RAMS라는 품질 특성을 제시했다고 볼 수 있다. 즉, 시스템에 있어서 신뢰성, 가용성, 유지보수성 및 안전성을 품질을 측정하기 위한 잣대로 놓았다고 생각할 수 있다. 비록 RAMS가 시스템의 품질 특성을 나타낸다고 하지만 하드웨어의 품질 특성을 대변하는 측면이 많고, 소프트웨어에 적용하기에는 적절하지 않다는 의견에 따라 여러 소프트웨어 전문가들은 소프트웨어 측면의 품질을 정확히 대변할 특성을 제시하게 되었다. ISO/IEC 9126에서는 소프트웨어 품질 특성을 표 1에 나타낸 6가지 특성으로 제시하고 있다.

소프트웨어의 신뢰성 측정

본래 불확실성이 존재하는 소프트웨어를 철도시스템과

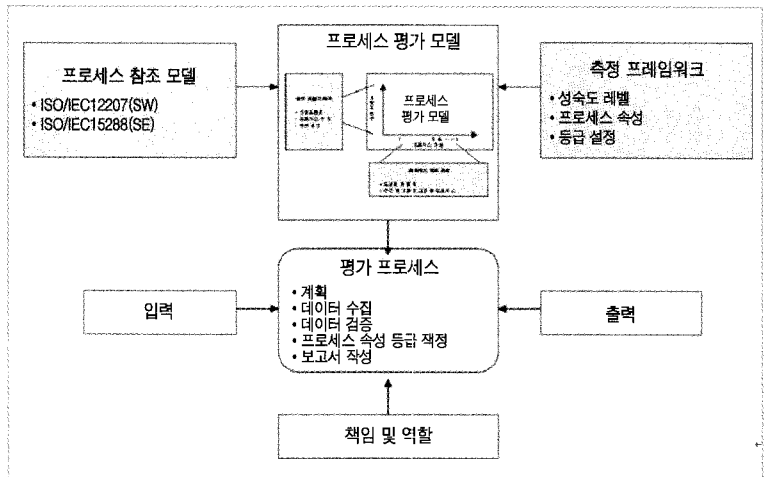
표 1 ISO/IEC 9126 소프트웨어 품질 특성

품질 특성	설명
기능성(Functionality)	소프트웨어가 특정 조건에서 사용될 때 명시된 요구와 내재된 요구를 만족하는 기능을 제공하는 소프트웨어 제품을 능력을 말한다. 성숙성, 결함허용성, 회복성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.
신뢰성(Reliability)	명시된 조건에서 사용될 때, 성능 수준을 유지할 수 있는 소프트웨어 제품의 능력을 말한다. 성숙성, 결함허용성, 회복성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.
사용성(Usability)	명시된 조건에서 사용될 경우 사용자에 의해 이해되고, 학습되고, 사용되고, 선호될 수 있는 소프트웨어 제품의 능력을 말한다. 이해성, 학습성, 운용성, 친밀성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.
효율성(Efficiency)	명시된 조건에서 사용되는 자원의 양에 따라 요구되는 성능을 제공하는 소프트웨어 제품의 능력을 말한다. 시간반응성, 자원효율성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.
이식성(Portability)	한 환경에서 다른 환경으로 전이될 수 있는 소프트웨어 제품의 능력을 말한다. 적응성, 설치성, 공존성, 대체성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.
유지보수성(Maintainability)	소프트웨어 제품이 변경되는 능력, 변경에서 환경과 요구사항 및 기능적 명세에 따른 소프트웨어의 수정, 개선 혹은 개작 등이 포함된다. 분석성, 변경성, 안정성, 시험성, 준수성 등이 부가적 특성으로 존재한다.

같이 안전성이 중요한 시스템에 적용하기 위해서는 철저한 신뢰성 검증이 필요하다. 이는 원자력, 항공, 국방 분야의 경우에서도 각기 시스템에 맞추어 품질보증 체계를 구축하고 있음을 보아도 알 수 있다. 철도 소프트웨어의 경우 안전성을 확보하고 품질 좋은 소프트웨어를 개발하기 위해서 프로세스 관점 및 제품 관점의 접근이 필요하다. 프로세스 성숙도 향상 관점에서는 개발하고자 하는 소프트웨어의 품질을 확보하고자 CMMI(Capability Maturity Model Integration)나 ISO IEC 15504(SPICE; Software Process Improvement Capability Determination)에서 제시하는 여러 절차 및 프로세스를 따르도록 함으로써 소프트웨어 개발조직의 성숙도를 향상시키고자 하고 있으며, 제품관점의 접근법으로는 정형기법에 의한 개발 및 검증이나, 개발 초기부터 제시한 시험방법에 따라 시험을 수행하여 소프트웨어의 품질 및 신뢰성을 향상시키는 방법을 적용하고 있다.

소프트웨어 프로세스 관점의 신뢰성 향상

소프트웨어 개발에 있어서 프로세스란, 소프트웨어 개발 조직의 목표달성을 위해 조직 내에서 사용하는 자원(사람, 장비, 기술, 방법론)과 활동, 방법, 실무지침을 말하며, 프로세스 심사란, 개발 조직이 사용하고 있는 프로세스가



소프트웨어 프로세스 심사 대상 및 평가모델

해당 목표를 달성하고 있는지 평가하는 것을 말한다. 프로세스 심사를 통하여 얻을 수 있는 것은 해당 조직의 개발 능력(capability) 결정뿐만 아니라 자체 프로세스 개선에도 중요한 지표를 제공받을 수 있다. 이와 같은 프로세스 심사 방법으로 가장 대표적인 것으로 CMMI와 ISO/IEC 15504(SPICE)를 들 수 있다. 다음은 ISO/IEC 15504(SPICE)의 예를 든 그림이다.

소프트웨어 제품 관점의 신뢰성 향상

소프트웨어 제품이라는 것은 소프트웨어를 개발하는 과정 중에 도출된 산출물이라고 볼 수 있다. 여기서 소프트웨어 개발의 산출물이라는 것은 최종 소스코드만을 의미

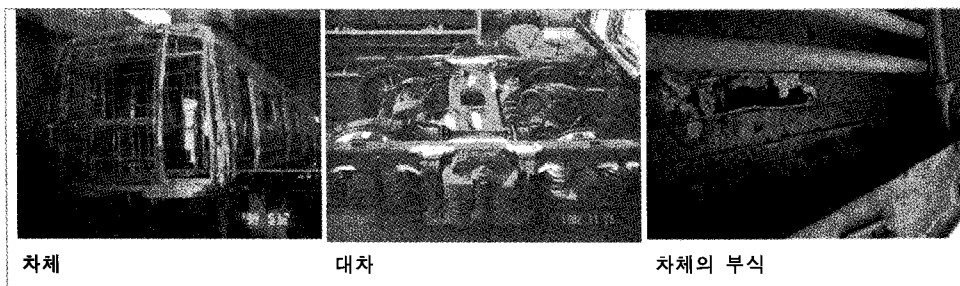
하지는 않으며, 수명주기 각 단계마다 근거가 되는 문서가 산출물이 된다. 이렇게 작성된 문서는 검증 및 평가 시에 소프트웨어의 품질이 보증되었음을 확인하는 근거가 되며, 이렇게 검증 및 평가하는 활동을 제품관점의 품질 향상 작업이라고 볼 수 있다. 즉 산출물에 대하여 무엇을 측정할 것인지, 어떻게 측정할 것인지, 어느 정도가 합격했다고 볼 수 있는지를 정하여 수행하는 활동이며, 소프트웨어 시험은 제품의 품질을 측정하기 위한 중요한 방법이라고 할 수 있다. 소프트웨어 공학의 지침서인 “Guide to the Software Engineering. Body of Knowledge”에서는 소프트웨어 테스트를 Based on tester’s intuition and experience(직관 및 경험기반), Specification-based(명세서기반), Code-based(코드 기반), Fault-based(결함 기반), Usage-based(사용 기반), Based on Nature of Application(응용 기반) 등으로 분류하고 각 분류마다 세부 테스트 기법들을 다루고 있다.

차량 부품의 내구신뢰성

철도차량은 짧게는 25년 길게는 40년 이상 사용하므로 안전을 확보하기 위해서는 우선 차량 구조물의 내구신뢰성이 확보되어야 한다. 구조 측면에서 철도차량은 승객이 탑승하는 차체와 차체 아래에서 차체를 지지하고 바퀴가 달린 대차로 구분할 수 있다.

대차의 경우 차륜, 차축, 베어링, 스프링 등 많은 부품이 대차 프레임에 결합되어 있다. 바퀴가 레일 위를 굴러갈 때 상당한 크기의 진동이 전달되므로 대차는 상당한 크기의 피로하중을 받는다. 대차 프레임은 주로 용접으로 제작되어 용접부에서 균열이 발생하기가 쉽다. 그리고 여러 부

품을 취부하기 위해 대차 프레임에 용접된 브라켓과 대차 프레임의 용접부에서도 피로균열이 발생하여 구조신뢰성을 저하시킬 수 있다. 용접에 의해 발생하는 잔류응력을 완화시키기 위해 용접후열처리를 하게 된다. 차체의 구조 강도를 평가하기 위해서는 유한요소법을 사용하여 다양한 하중 조건에 대해 해석을 수행하고, 실물 차체에 스트레인 게이지를 취부하고 규정된 하중을 가하여 시험도 수행하여 구조 강도를 평가한다. 대차의 경우도 유한요소 해석, 정하중 시험을 수행하고 더 하여 실제 차량이 운행할 때 받는 하중보다도 더 가혹한 하중조건에서 피로시험까지 수행하여 내구 신뢰성을 만족하는지 철저한 검증을 한다. 해석적 방법으로는 대차의 취약부에 존재하는 가상 균열에 대해 응력확대계수를 구하고, 균열진전거동을 해석하여 균열의 크기가 얼마 정도까지 안전한지 등을 해석한다. 차륜의 경우는 차륜과 레일 사이의 구름접촉으로 과도한 하중을 받는다. 차륜의 미끄럼에 의해 과도한 열이 발생하여 조직이 변형되기도 하고 열에 의한 잔류응력이 생성되기도 하여 차륜의 손상이 발생한다. 화물열차와 같이 담면 제동을 사용하는 경우는 제동 마찰열에 의해 차륜에는 높은 열이 발생하여 잔류응력을 발생시키므로 담면 제동장치를 잘 설계하여 과도한 열이 발생하지 않도록 하고 있다. 과도한 잔류응력은 차륜의 급작스런 파손을 일으킬 수 있으므로 외국에서는 검수 시 잔류응력을 측정하여 일정 크기 이상의 잔류응력을 갖는 차축은 폐기하고 있다. 철도 차량 부품 중 차축 베어링도 상대적으로 고장이 잦은 부품 중의 하나이다. 차축베어링의 소착은 열차의 탈선에 이를 수 있는 중대사고로 이어질 수 있으므로 베어링의 온도 감지를 위해 선로에 적외선 온도감지 장치를 설치하거나, 진동이나 음파를 이용한 감지장치를 설치하여 결함을 사전에 감지하여 안전을 확보하고 있다. 철도차량의 구조용 강재는 오랜 기간 사용되므로 부식이 발생할 수 있어 부식에 따른 재료의 특성변화를 파악할 필요가 있다. 차량에 사용되는 강



차체

대차

차체의 부식

재 시편을 대기부식 시험대에 올려놓고 자연조건에서 부식을 시키면서 일정 기간 별로 인장 및 피로시험을 실시하여 부식에 따른 재료의 열화 데이터를 얻고 이



증기기관차 견인열차



디젤기관차 견인열차



전기기관차 견인열차

를 부식된 차량 구조재의 수명평가에 활용한다. 최근에는 확률론적 구조 건전성 평가법을 적용하여 차량의 구조 건전성을 평가하기도 한다.

철도 RAMS

국방, 항공 등 타 산업분야에서 활발히 연구되고 있는 RAMS가 최근 철도 분야에서도 예외가 아니다. 철도 분야의 RAMS 연구는 유럽이 선도하고 있다고 보인다. 1999년에 CENELEC (유럽전기기술표준화위원회)은 철도 RAMS에 대한 유럽규격인 EN50126을 발간하였다. EN50126은 2002년 9월에 IEC62278로 제정되어 현재 RAMS 연구에 많이 인용되고 있다. IEC 62278에서는 철도가 신뢰할 수 있기 위해서 안전성 및 가용성 요구사항이 서로 상충하는 관계를 잘 이해하여야 하고, 안전성 및 가용성 목표를 만족하기 위해서는 모든 신뢰성 및 유지보수성 요구사항을 만족하며, 운영 및 유지보수 활동을 관리해야 한다고 기술하고 있다. CENELEC는 2006년 5월에 EN50126을 철도차량 RAMS에 적용하기 위한 가이드라인으로 기술보고서 CLC/TR 50126-3을 발표하였고, 2007년 2월에는 안전에 적용하기 위한 가이드라인으로 기술보고서 CLC/TR 50126-2를 발표하였다.

국내의 경우 철도분야에서의 RAMS는 경부고속철도 차량의 도입과 함께 소개되었다고 할 수 있다. 경부고속철도 KTX 차량에 적용된 신뢰성 지표로는 서비스 고장 사이의 평균 주행거리 MKBSF(Mean Kilometer Between Service Failure)를 사용하는 데 기준값은 12만 1,000 km이다.

KTX MKBSF의 평가에 사용되는 고장의 정의는 다음과 같다.

- 차량의 고장으로 계획된 운행시간에 대해 종착역에

10분 이상 지연되어 도착한 경우

- 유지보수를 위해서나 특별한 사유로 인한 것을 제외하고 차량의 고장에 의해 계획된 차량이 운행에 투입되지 못한 경우
- 차량의 고장에 의해 운행 중 편성을 교체한 경우

이러한 지표는 정시성과 안전성을 증시하는 철도에서 매우 중요하다. 과거 증기기관차가 끌던 철도차량에 비해 오늘날의 철도차량은 신뢰성의 지속적인 향상으로 높아지는 승객의 기대치를 만족시키기 위해 달려가고 있다.

유지보수와 관련하여 최근에는 신뢰성에 기반을 둔 RCM(Reliability-Centered Maintenance)이 실제 철도 차량 개발에 적용되고 있다. RCM 기법의 장점은 수행 프로세스가 입증되고 실행이 용이하다는 점이다. RCM은 철도 외 산업에서 그 효용이 입증되었으며 다수의 국제적 표준으로 제정되는 등 이미 많은 연구를 통해 정착화되었다. 그러나 현재까지의 RCM 기법은 프로세스 수행에 그 초점이 맞추어 있어 프로세스 수행의 목표가 명확하지 않다는 단점이 있다. 물론 RCM 프로세스는 신뢰성과 안전성 향상이라는 목적에 맞는 프로세스가 정의되어 있지만 신뢰성 및 안전성에 대한 정량화된 목표를 가지고 있지는 않다. 이 때문에 RCM 기법은 의사결정 프로세스에서 유지보수 업무 및 주기의 효율성 평가와 같은 의사결정에 대해서는 개념 수준의 방법론만을 제시하고 있을 뿐 정형화된 기법을 제시하지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 하는 시도 중의 하나가 리스크 기반 유지보수(Risk-based maintenance)의 도입이다. 리스크 기반 유지보수는 안전성과 유지보수를 통합하여 리스크를 평가하고 평가된 리스크를 기반으로 유지보수를 계획하는 방법이다. 철도분야에서도 최근 들어 유지보수의 개념으로 리스크 기반 유지보수가 등장하여 RCM을 보완하면서 활발히 연구되고 있다.