열차제어 S/W 검증을 위한 테스트 커버리지 측정 및 평가기준에 대한 연구

조현정*, 황종규*, 오석문*, 신승권*
*한국철도기술연구원 열차제어통신연구실
e-mail:hjjo@krri.re.kr

Study on Test Coverage Analysis & Assessment Standard for Train Control Software Verification

Hyun-Jeong Jo*, Jong-Gyu Hwang*, Suk-Mun Oh*, Seung-Kwon Shin*
*Dept. of Train Control & Communication Research,
Korea Railroad Research Institute

요 약

최근 컴퓨터시스템으로 전환되고 있는 열차제어시스템에서 소프트웨어에의 의존성이 급격히 증가함에 따라 임베디드화된 열차제어 소프트웨어 신뢰성과 안전성의 검증이 중요한 문제로 대두되기 시작했다. 이에 따라 열차제어 소프트웨어 관련 국제표준에서도 각종 소프트웨어 테스트 및 검증활동을 요구하고 있으며, 이에 대응하여 본 논문에서는 열차제어시스템 소프트웨어 테스트 커버리지 자동화 도구 및 기준 분석과 개발 결과에 대해 제시하고 있다. 본 논문에서는 열차제어 소프트웨어 안전성 검증을 위한 정량적인 항목으로 매우 중요한 테스트 커버리지를 자동으로 측정할 수 있는 제어흐름 분석도구를 개발하였으며, 본 도구의 결과를 실제 철도 산업 현장에서 활용하기 위해 타분야 제시 기준 등을 분석하여 철도 소프트웨어 안전무결성레벨(SWSIL)에 따른 판단 기준을 제시하였다.

1. 서론

열차제어시스템은 최근 기존의 기계적 장치로부터 컴퓨터시스템으로 전환되고 있으며, 소프트웨어에의 의존성이 급격하게 증가하고 있다. 컴퓨터 기술의 발달에 따라 지능화 및 자동화를 위해 소프트웨어가 더욱 복잡해지게 되면서, 열차제어시스템에서 소프트웨어가 차지하는 비중이 더욱 증대되고 있다. 열차제어시스템 소프트웨어의 크기와 복잡도는 하드웨어의 발달 속도보다는 느리지만, 점차적으로 규모가 커지며 복잡도도 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 임베디드화된 열차제어 소프트웨어의 신뢰성과 안전성을 검증하는 것이 중요한 문제로 대두되기 시작했다.

열차제어시스템 소프트웨어 안전성 요구사항들이 최근 들어 IEC 61508과 IEC 62279에 의해 국제표준화 되었고[1][2], 또한 국내에서도 철도안전법이 제정되어 이러한 열차제어시스템 관련 국제표준에서 요구하는 각종 소프트웨어 테스트 및 검증활동을 요구하는 분위기가 조성되고 있다[3]. 하지만 아직까지 소프트웨어 검증은 개발과정에 대한 문서에 주로 의존하고 있으며, 극히 일부만 테스트에 의한 정량적인 분석이 이루어지고 있다[4][5]. 또한, 국내에서의 국제표준에 따른 철도시스템 소프트웨어 테스트 및 검증을 위한 기준이나 이에 부합하는 기술에 대한 연구는 이제 막 시작하는 초기단계에 불과한 실정이다[6].

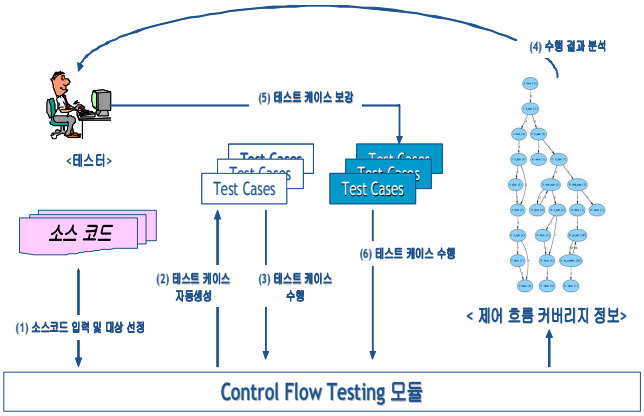
열차제어 소프트웨어의 제어흐름 분석(control flow analysis)을 통한 결과들은 코드 기반의 테스트 커버리지(test coverage)로 활용이 가능하며, 항공, 원전 등의 Safety-Critical한 타분야에서도 소프트웨어 안전성 등급에 따르는 소프트웨어 검증을 위해 적용하고 있는 코드 커버리지를 측정할 수 있게 해주는 매우 중요한 항목임을 알 수 있다[7-9]. 인명과 직결되는 바이탈한 열차제어시스템은 소프트웨어 규모가 큰 임베디드 시스템으로서 반드시 안전성 확보를 해야만 하며, 이를 위해 철도 소프트웨어 검증을 위한 이와 같은 코드 커버리지 적용이 불가피하다. 이와 더불어 소프트웨어의 복잡도 증가에 따라 점차 난해한 부분인 소프트웨어의 확인 및 검증에 대한 판단 기준 확립을 위해 코드 커버리지 결과를 소프트웨어 SIL등급에 맞춰 측정할 수 있는 기준 수립도 요구된다.

2. 열차제어 소프트웨어 코드기반 테스트 커버리지 자동화 도구

테스트 커버리지를 측정할 수 있도록 개발한 제어흐름 분석모듈에서는 소스코드의 영역 및 분기, 조건문 등의 실행 여부에 따라 커버리지를 측정하여 보고하도록 하였다. 커버리지는 타산업분야에서도 정량적으로 소프트웨어를 검증할 수 있는 대표적인 척도로써 사용되고 있으며, 나아가 소프트웨어 품질까지도 가늠하게 해준다. 일반적으로 소프트웨어 테스트 분야에서는 여러 종류의 커버리지를 제시하고 있는데, 본 논문에서 개발한 열차제어용 소프트웨어 제어흐름 분석모듈은 그 중에 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지를 제공한다. IEEE Std. 1008-1997 규격에 따르면 단위시험 단계에서 모든 소프트웨어는 테스트케이스(Test Case)에 의해 검증되어야 하며, 테스트케이스에 의해 모든 소프트웨어 코드의 문장 및 분기 커버리지를 만족해야 한다고 언급되어 있다[7]. 이러한 단위시험 수행의 테스트 커버리지를 측정하기 위해 본 규격에서는 자동화된 수단을 권고하고 있다. 이 외에도 IEC Std. 60880- 2006 규격에서도 소프트웨어 구현단계 검증을 위해서는 문장 및 분기 커버리지 등의 방법들을 사용하도록 권고하고 있고[8], 실제 산업분야에서도 이미 문장 및 분기 커버리지가 널리 활용되고 있다.

또한, 항공산업 표준규격인 RTCA/DO-178B에서는 시스템 안전성 평가를 통해 확인된 사고종류에 따라 소프트웨어 등급을 중요도에 따라 구분해 놓았으며, 코드 커버리지 요건은 그 등급에 따라 정의해 놓았다[9]. [9]에 따르면 안전성이 요구되는 중요도가 높은 등급일수록 변경조건/결정 커버리지를 반드시 만족하도록 규정하고 있고, 적용성을 입증하는 사례들 또한 제시되고 있다[10]. 따라서 SIL 등급이 3 또는 4로 분류되는 전자연동장치와 같은 바이탈한 철도시스템 소프트웨어에서도 변경조건/결정 커버리지를 만족해야 할 것이며, 이에 따라 본 논문에서 개발한 철도용 소프트웨어 테스트 커버리지 자동화 도구를 구성하고 있는 제어흐름 분석모듈에서는 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지를 모두 제공하도록 구현하였다.

제어흐름 분석모듈은 소스코드를 분석하여 제어흐름 그래프를 생성, 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지를 만족할 수 있는 테스트 케이스를 생성, 수행하여 오류의 존재를 찾는 모듈이다. 제어흐름 분석모듈은 프로그램 분석, 테스트 케이스 생성, 테스트 케이스 수행, 테스트 수행 결과 보고와 테스트 시나리오를 가지며, 프로그램 분석 정보와 테스트 결과 정보를 나타내는 자료구조 및 저장소를 가진다. 제어흐름 분석모듈은 제어 흐름 그래프 생성, 테스트 데이터 자동 생성, 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지 측정과 같은 주요 기능을 갖는다. 다음 표 1은 주요 기능에 대한 설명을 정리한 것이다. 이러한 기능을 지니는 제어흐름 분석모듈의 동작 시나리오는 크게 테스트 케이스 준비, 수행, 결과 보고로 진행된다. 제어흐름 분석모듈은 전 과정을 자동으로 수행하되, 자동으로 테스트가 되지 않는 부분에 대해서는 테스터가 개입하여 점진적으로 테스트를 보강하는 것이 주요 사용 시나리오이다. 다음 그림 1은 제어흐름 분석모듈의 동작 시나리오이다.



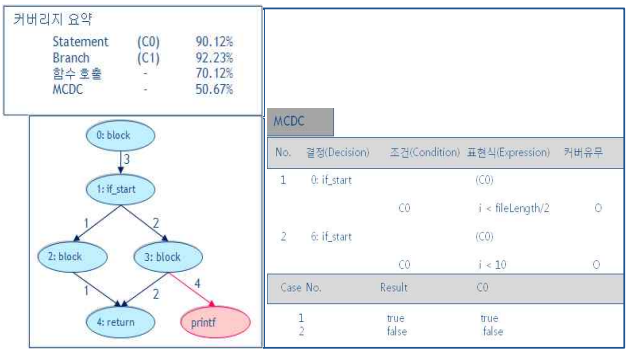
[그림 1] 제어흐름 분석모듈의 동작 시나리오

[표 1] 제어흐름 분석모듈 기능 리스트

기능	설명
프로그램 분석 및 CFG생성	프로그램에 구현되어 있는 함수와 최상위 API 함수의 리스트를 추출한다. 함수별 제어흐름 그래프는 테스트의 기반 모델이 되며, 테스트 과정은 최대한 많은 제어 흐름 그래프의 최대한 많은 부분을 수행하는 것을 목적으로 한다. 각 함수 간의 호출그래프(Call Graph)를 생성하여 테스트 스크립트, 테스트 데이터를 생성하는데 활용한다. 분석 된 내용 및 CFG를 저장소에 저장한다.
Test Cases 생성	Statement, Branch, MC/DC 커버리지를 위한 테스트 케이스 생성한다. 생성된 테스트 케이스를 저장소에 저장한다.
테스트 수행	실제 테스트 대상 소스와 테스트를 위하여 생성된 소스코드 등을 통합해서 컴파일 하여 생성된 프로그램을 테스트케이스별로 수행하여 그 수행 결과를 저장소에 저장한다.
제어흐름 분석수행 결과보고	Statement, Branch, MC/DC 커버리지를 보고한다.

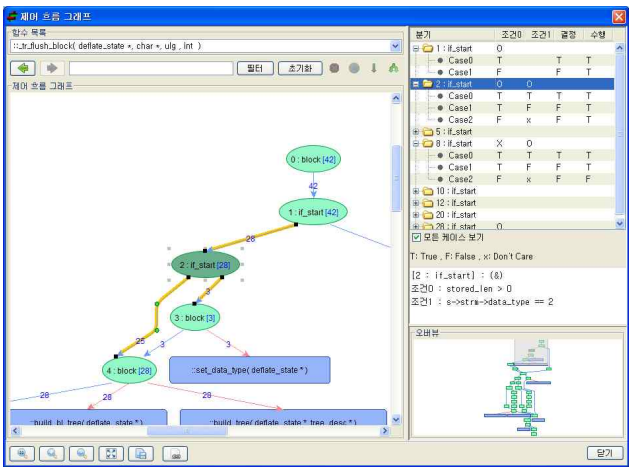
테스트 준비단계는 크게 테스트 대상 선정 및 테스트 케이스 작성으로 구성된다. 우선 테스터는 컴파일이 가능한 C/C++ 소스코드를 준비해야 한다. 제어흐름 분석모듈은 소스 파일을 입력으로 받아 어떤 함수와 타입들이 정의되어 있는지를 분석을 한 다음, 테스트 대상이 될 함수의 목록을 테스터에게 제공한다. 이를 바탕으로 테스터는 제어흐름 분석을 적용할 함수를 선정한다. 테스터는 테스트 대상으로 선정한 함수를 제어흐름 분석모듈의 테스트 데이터 자동생성 기능을 이용하여 해당 함수에 적합한 테스트 케이스를 자동으로 추출한다.

마지막 단계는 현재까지 수행한 테스트 결과를 분석하여, 테스트가 충분한지를 평가하는 작업이다. 제어흐름 분석모듈에서는 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지 수치를 기반으로 테스트가 충분한지를 평가한다. 테스터는 테스트 수행 결과 목표 수치에 도달하지 않을 경우 테스트를 더 해야 하며, 목표 수치에 도달하도록 테스트 케이스를 보강해야 한다. 제어흐름 분석모듈은 수행 결과로 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지 수치와 입력 값에 따른 실제 수행된 코드 정보를 제공한다. 테스터는 제어흐름 분석모듈에서 제공되는 정보를 기반으로 실제 수행되지 않을 문장 및 분기를 확인한 다음, 그 부분을 테스트하기 위한 테스트 케이스를 보강할 수 있다.



[그림 2] 테스트 수행 및 커버리지 결과확인

이와 같은 과정을 거쳐 테스트 수행이 이루어지고 나서 확인은 그림 2와 같이 커버리지 결과로 가능하다. 테스트 커버리지 결과는 크게 수치 정보와 코드의 수행 여부를 제공한다. 코드의 수행 여부는 CFG를 기반으로 노드와 에지에 수행 횟수를 기록하여 제공한다. 0으로 기술된 부분은 수행되지 않은 부분이므로 테스터는 이 정보를 바탕으로 테스트 케이스를 보강할 수 있다. 또한 변경조건/결정 커버리지의 경우 수행되어야 하는 케이스와 현재 수행된 케이스에 대해서 표 형태로 제공한다. 이와 같은 설계 개발과정을 바탕으로 실제 제작 완료한 철도시스템 소프트웨어 테스트 커버리지 자동화 도구의 실행 결과 화면은 그림 3과 같다.



[그림 3] 실제 제작한 철도시스템 소프트웨어 커버리지 자동화 도구의 테스트 실행화면

3. 열차제어 소프트웨어 적용을 위한 테스트 커버리지 평가기준 제시

본 논문의 2장에서 언급한 바와 같이 항공, 원전 분야뿐만 아니라 철도 분야와 같이 Safety-Critical 한 산업제어시스템의 소프트웨어가 복잡해지면서 소프트웨어의 안전성 확보를 위한 확인 및 검증이 어려워지고 있다. 이러한 어려움을 해결하고자 타분야에서는 이미 소프트웨어 검증을 위해 점차 테스트 커버리지를 적용하기 시작했으며, 각종 관련 국제 기준에서는 정략적 기준을 제시할 수 있는 코드 기반의 테스트 커버리지를 자동으로 측정해주는 도구들을 사용할 것을 권고하고 있다. 본 논문에서는 2장에서와 같이 열차제어 소프트웨어 전용으로 활용 가능한 테스트 커버리지 자동화 도구를 구현하였다.

하지만 개발한 본 도구를 실제 철도 산업현장에서 바로 사용하기 위해서는 테스트 커버리지 수행 결과를 소프트웨어 안전성 중요도를 나타내는 소프트웨어 안전무결성레벨(SWSIL) 등급에 따라 할당하기 위한 정량적 평가기준을 제시해 주어야만 실제 활용도를 높일 수 있을 것이다. 이에 따라 정량적인 기준을 구체적으로 제시하고자 타분야의 테스트 커버리지 적용 현황 조사 및 관련 국제 표준들을 분석하였

고, 이를 근거로 철도 분야의 소프트웨어 검증을 위해 산업현장에서 활용할 수 있는 판단 기준을 제시하기 위해 기술지침(안) 형태를 작성 중에 있다. 이와 같이 개발한 도구의 실용화를 높이기 위해서 본 논문에서는 다음과 같은 철도시스템 소프트웨어 테스트 커버리지의 정량적 기준을 제시하고자 하며, 기술지침(안)에 포함시켜 운영기관 및 관련 산업체에서도 유용하게 활용될 수 있도록 추진할 계획이다.

[표 3] 테스트 커버리지의 정량적 평가기준 제시

<table>
<tr><td rowspan="2">문장 커버리지
(Statement Coverage)</td><td colspan="5">SWSIL</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td></td><td>NIL</td><td>분기 커버리지 100% 만족 권고</td><td colspan="3">분기 커버리지 100% 만족 필수</td></tr>
<tr><td rowspan="2">분기 커버리지
(Branch Coverage)</td><td colspan="5">SWSIL</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td></td><td>NIL</td><td>분기 커버리지 100% 만족 권고</td><td colspan="3">분기 커버리지 100% 만족 필수</td></tr>
<tr><td rowspan="2">변경조건/
결정 커버리지
(MC/DC: Modified Condition/ Decision Coverage)</td><td colspan="5">SWSIL</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td></td><td>NIL</td><td colspan="3">변경 조건/결정 커버리지 100% 만족 권고</td><td>변경 조건/결정 커버리지 100% 만족 필수</td></tr>
</table>

4. 결론

최근 들어 컴퓨터 기술의 발달에 따라 열차제어시스템들이 컴퓨터 소프트웨어에의 의존성이 급격하게 증가하고 있으며, 이러한 기술발전에 따라 바이탈한 철도 소프트웨어에 높은 신뢰성과 안전성이 요구되고 있다. 이에 따라 철도시스템 소프트웨어관련 국제표준에서 소프트웨어의 테스트 및 검증을 의무사항으로 요구하고 있고, 이러한 국제표준에서 요구하고 있는 소프트웨어 검증 항목 중 정량적인 테스트 커버리지 결과를 도출할 수 있는 제어흐름 분석에 대한 정확한 분석을 위해 본 논문에서 개발한 자동화 도구를 제시하였다. 이러한 제어흐름 분석은 코드 기반의 테스트 커버리지인 문장 커버리지, 분기 커버리지, 변경조건/결정 커버리지 등의 결과를 도출해주며, Safety-Critical한 항공 및 원전분야 등에서는 이미 이러한 테스트 커버리지를 소프트웨어 안전성 등급에 따르는 소프트웨어 검증을 위해 적용하고 있는 매우 중요한 검증 항목이다. 먼저 개발한 열차제어시스템 전용 소프트웨어 제어흐름 분석 도구의 기능 설계에 대해 설명하였고, 그 구현 결과를 구체적으로 보여주었다.

이와 같은 본 논문에서 개발한 열차제어용 소프트웨어 검증을 위한 테스트 커버리지 측정을 자동으로 수행해주는 도구인 제어흐름 분석모듈은 소스코드의 문장, 분기, 변경조건/결정 커버리지에 대한 분석 결과를 사용자 입장에서 파악하기 쉽도록 제어흐름 그래프와 함수호출 그래프로 표현하였다. 또한, 각각의 측정결과를 최종 수치상으로도 보여줌으로써, 비교분석도 쉽게 파악 가능하도록 제작하였다. 물론 최종적으로 코드기반 테스트 커버리지 측정 결과가 사용자가 원하는 소프트웨어 안전무결성레벨(SWSIL) 등급에 맞춰질 수 있는 판단 기준을 제시해야만 비로써 실제 철도분야 산업현장에서의 효율성을 최대화시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 실제 철도 산업현장에서 활용 가능하도록 커버리지 측정 결과에 대한 가각의 평가기준을 제시하였다. 본 도구를 소프트웨어 검증 및 개발 단계에서 널리 이용한다면, 이를 통해 바이탈한 열차제어시스템 소프트웨어의 오류를 미연에 방지하여 안전성과 신뢰성을 확보하는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] IEC 61508, "Railway Applications - The specification and demonstration of RAMS", 1998.

[2] IEC 62279, "Railway Applications - Software for railway control and protection systems", 2002.

[3] 철도안전법[법률 8852호], 일부개정 2008. 02.

[4] M. Fewstar, D. Graham, “Software Testing Automation: Effective use of test execution tools”, ACM Press, Addison Wesley, 1999.

[5] J.D. Lawrence, "Software qualification in safety applications", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 70, No. 2., pp. 167-184, 2000.

[6] 황종규, 조현정, 김형신, “열차제어시스템 소프트웨어 안전성 평가도구의 설계”, 한국철도학회 논문집, 제11권 제2호, pp. 139-144, 2008. 4.

[7] IEEE Std. 1008-1997, "Software Unit Testing", 1997.

[8] IEC std. 60880-2006, "Software aspects for computer-based systems performing category A functions", 2006.
[9] RTCA/DO-178B, "Software considerations in airborne systems and equipment certification", 1992.
[10] Arnaud Dupuy and Nancy Leveson, "An Empirical Evaluation of the MC/DC Coverage Criterion on the HETE-2 Satellite Software", Proceedings of DASC (Digital Aviation Systems Conference), Phildelphia, 2000. 10.