다중스레드 모델의 스레드 코드를 안전한 자바 바이트코드로 변환하기 위한 번역기 설계

(Design of Translator for generating Secure Java Bytecode from Thread code of Multithreaded Models)

김 기 태* 유 원 희*

(Ki-Tae Kim) (Weon-Hee Yoo)

요 약 다중스레드 모델은 데이터플로우 모델의 내부적인 병렬성, 비동기적 자료 가용성과 폰 노이만 모델의 실행 지역성을 결합하여 병렬처리 시스템의 성능을 향상시켰다. 이 모델은 프로그램의 실행을 위하여 컴파일러에 의해 생성된 스레드를 수행하며, 스레드의 생성 방법에 따라 자원 활용 빈도나 동기화 빈도와 같은 스레드의 질이 결정되는 특징이 있다. 하지만 다중스레드 모델은 실행 모델이 특정 플랫폼에 제한되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 자바는 플랫폼에 독립적인 특징을 가지고 있어 다중스레드 모델의 스레드 코드를 실행 단위인 자바 언어로 변환하면 다중스레드 모델의 특징을 여러 플랫폼에서 수정 없이 사용할 수 있게 된다.

자바는 원시 언어를 중간 언어 형태의 바이트코드로 변환하여 각 아키텍처에 맞게 설계된 자바 가상 머신이 설치된 시스템에서 자바 언어를 수행한다. 이러한 자바 언어의 바이트코드는 번역기의 중간 언어와 같은 역할을 수행하고, 이때 자바 가상 머신은 번역기의 후위부와 같은 역할을 한다.

스레드 코드에서 번역된 자바 바이트코드는 다양한 플랫폼에서 실행될 수 있다는 장점은 있지만 신뢰할 수 없다는 단점이 있다. 또한 자바 언어 자체의 문제에 의해 안전하지 못한 코드가 생성 될 수도 있다.

본 논문은 다중스레드 코드가 플랫폼에 독립적인 특성을 갖출 수 있도록 다중스레드 코드를 자바 가상 머신에서 실행 가능하도록 한다. 또한 번역시에 자바에서 발생할 수 있는 문제들을 고려하여 안전한 바이트코드를 생성한다. 즉, 다중스레드 모델의 스레드 코드를 플랫폼에 독립적이고 외부 공격으로부터 안전한 자바 바이트코드로 변환하는 번역기를 설계, 구현한다.

Abstract Multithreaded models improve the efficiency of parallel systems by combining inner parallelism, asynchronous data availability and the locality of von Neumann model. This model executes thread code which is generated by compiler and of which quality is given by the method of generation. But multithreaded models have the demerit that execution model is restricted to a specific platform. On the contrary, Java has the platform independency, so if we can translate from threads code to Java bytecode, we can use the advantages of multithreaded models in many platforms.

Java executes Java bytecode which is intermediate language format for Java virtual machine. Java bytecode plays a role of an intermediate language in translator and Java virtual machine work as back-end in translator. But, Java bytecode which is translated from multithreaded models have the demerit that it is not secure.

This paper, multhithread code whose feature of platform independent can execute in java virtual machine. We design and implement translator which translate from thread code of multithreaded code to Java bytecode and which check secure problems from Java bytecode.

1. 서 론

다중스레드 모델은 폰 노이만(von Neumann) 모델의 실행 지역성과 데이터플로우 모델의 비동기적 자료 가용성, 내재적 병렬성을 혼합한 모델로 확장형 병렬 기계(scalable parallel machine)를 구성하는데 적당한 실행 모델이다. 다중스레드 모델에서 계산 단위는 논리적으로 연관된 순차 명령으로 구성되는 스레드이다. 다중스레드 모델은 수행에 필요한 모든 값이 사용할 수 있을 때 동적으로 스케줄링 되는 데이터플로우 모델의 스케줄링 정책에 따라 스케줄링 되며, 스레드가 스케줄링 되면 스레드를 구성하는 모든 명령어들은 폰 노이만 모델의 수행 방식에 따라 스레드의 마지막 명령까지 중단 없이 수행된다. 하지만 이러한 특징을 가진 다중스레드 모델은 이 모델이 실행되는 플랫폼에 따라 다른 실행 모델을 가져야 한다. 그 이유는 레지스터의 개수나

* 인하대학교 전자계산공학과

명령어의 구조 등이 머신마다 모두 다르기 때문이다. 하지만 적절한 실행 모델을 머신마다 개발하기에는 많은 비용과 어려움이 따른다. 따라서 현대의 많은 컴파일러 개발자나 시스템 프로그래머, 프로그래밍 언어 개발자에게는 효과적인 중간 언어를 개발하는 것과 여러 아키텍처에 맞는 머신을 개발하는 것이 중요하다[16].

번역기는 중간 언어를 기준으로 전위부와 후위부로 구분할 수 있는데, 전위부는 에러를 조작하기 위해 사용되고, 특별한 머신 구조에 맞게 코드를 생성하기 위해서는 후위부를 사용한다. 따라서 전위부에서 개발된 중간 언어는 후위부가 개발된 어떠한 머신에서도 동작할 수 있다[3, 8, 12, 13, 15]. 이러한 특성으로 인해 전위부에서 개발된 중간 언어는 후위부가 개발된 머신에서 머신 독립적으로 존재할 수 있고 컴파일러가 새로운 구조에 맞게 이식하는 과정을 쉽게 한다. 따라서 언어 개발자와 컴파일러 개발자는 올바른 중간 언어를 결정하는 것이 중요한 과제이다[8]. 이와 같은 구조를 갖는 언어에는 P-code와 선 마이크로시스템(Sun Microsystems. Inc.)에서 개발한 자바 언어(Java language) 또는 자바 바이트코드(Java Bytecode) 등이 있다[5, 6, 14]. 자바는 원시 언어를 중간 언어 형태의 바이트코드로 변환하여 각 아키텍처에 맞게 설계된 자바 가상 머신(Java Virtual Machine)이 설치된 시스템에서 자바 언어를 수행할 수 있도록 한다[5, 14]. 이러한 자바 언어의 바이트코드는 번역기에 있는 중간 언어와 같은 역할을 수행하고, 자바 가상 머신은 번역기의 후위부와 같은 역할을 수행한다.

스레드 코드의 실행을 자바 바이트코드로 변환할 수 있다면 다양한 플랫폼에서 추가적인 비용 없이 처리할 수 있다. 그래서 스레드 코드를 자바 바이트코드로 변환하는 번역기를 구현 하는 방법은 매우 중요하다.

자바 가상 머신의 명령어는 로컬 컴퓨터 시스템 자체와 직접적인 상호작용은 상당히 힘들다[1, 7]. 파일을 읽거나 소켓에 접속하거나 하는 명령어는 없으며, 메모리나 CPU외의 다른 시스템 자원에 대한 접근하는 명령어 또한 존재하지 않는다. 이런 것은 자바 프로그램에서 프린트하거나 네트워크의 정보를 얻어내는 등의 작업을 할 때는 매우 안전한 방식이다. 자바 가상 머신은 바이트코드가 아니라 네이티브 언어로 쓰여진 네이티브 메소드를 씀으로써 확장될 수 있다. 네이티브 코드로 구현되기 때문에 컴퓨터 상에서 어떠한 일도 할 수 있다. 그러므로 네이티브 메소드에 대한 접근은 제어되며 이러한 접근 제어는 거치지 않을 수 없도록 되어있다. 검증 과정은 수행되는 코드의 안정성에 대해서 보증할 수 있도록 도와준다[2, 4, 5, 11]. 하지만 본 논문은 컴파일러를 사용하지 않고 직접 Oolong을 사용하였기 때문에 잠재적인 위험이 발생할 수 있다[5, 9, 10]. 발생 가능한 잠재적인 위험을 살펴보고 안전한 바이트코드를 생성할 수 있도록 한다.

2. 다중스레드 코드와 자바

2.1 다중스레드 코드

다중스레드 모델(multithreaded model)은 데이타플로우 모델의 단점을 해결하기 위한 방안으로 프로그램에 내재한 병렬성을 최대한 활용하는 데이타플로우 모델과 지역성을 이용하여 순차 코드를 효율적으로 수행할 수 있는 폰 노이만 모델의 혼합형 계산 모델이다. 다중스레드 모델은 순차적으로 수행되는 명령들을 스레드 단위로 묶어 폰 노이만 방식으로 수행하고, 스레드의 스케줄링으로 데이타플로우 모델의 스케줄링 방식을 사용하는 모델이다. 계산의 입자 크기를 증가시킴으로써 지역성의 장점을 얻고, 동기화가 스레드의 수행이 시작될 때만 발생하게 하여 동기화 비용을 감소시키는 등 순차 수행의 이점을 얻을 수 있으며 스레드 간의 병렬성을 활용할 수 있다[16]. 다양한 프로그래밍 언어에 대하여 다중스레드 모델로 변환할 수 있는데 특히, 다중스레드 모델을 위하여 함수 언어를 번역할 때 중요한 것은 순차적으로 수행될 수 있는 명령의 집합을 찾아내어 스레드로 분할하고, 동적 스케줄링은 이들 스레드 사이에서만 발생하도록 하는 것이다. 다중스레드 명령어의 구문구조는 [표 1]과 같다.

[표 1] 다중스레드 명령어의 구문구조

<multithreaded code> ::= <opcode><operand>
<opcode>
::=<basicop>|<memory-registerop>|<value-argumentop>|<synchronizationop>
<basicop> ::= <arithmeticop>|<relationop>|<booleanop>|<bitstringop>
<arithmeticop> ::= <add>|<sub>|<inc>|<dec>|<mul>| |<neg>
<relationop> ::= <gt>|<lt>|<ge>|<le>|<et>
<boolean> ::= <and>|<or>|<nor>
<bitstring> ::= <shtl>|<shtr>|<rotr>|<rotl>
<memory-registerop> ::= <store>|<load>
<value-argumentop> ::= <receive>
<synchronizationop> ::= <initsc>|<incsc>|<decsc>
<operand> ::= <regn>|<Fm>|<thrdN>
<regn> ::= reg[reg]

기본연산에는 사칙연산과, 관계연산, 블린연산, 비트 연산에 관한 명령이 포함된다. 또 기본 연산의 오퍼랜드 부분에서는 2개 또는 3개의 레지스터를 사

용한다. 메모리와 레지스터, 값과 인자, 동기화 연산에 대한 명령은 오퍼랜드 부분에서 레지스터와 프레임 메모리 그리고 스레드를 위한 동기화 카운터를 사용한다[9]. 이러한 다중스레드 모델에서 수행되는 스레드 코드는 [그림 1]과 같다.

```
# sum

thrd0:  receive   arg0
        stop
thrd1:  receive   arg1
        stop
thrd2:  load      arg0      R0
        load      arg1      R1
        add       R0        R1        R0
        store     R0        l_var0
        send      l_var0    pfp
        endf
```

[그림 1] 다중스레드 코드

[그림 1]의 스레드 코드는 함수언어로 작성한 두 수의 합을 구하는 프로그램을 스레드 코드로 변환한 것이다. [그림 1]은 세 개의 스레드로 구성된다. thrd0와 thrd1은 인자를 받아들이는 부분이고, thrd2는 앞의 두 개의 스레드에서 받아들인 인자를 이용해서 계산을 하는 스레드 코드이다.

2.2 자바와 자바 바이트코드

자바 개발 환경에서는 컴파일 과정 후에 생성된 목적 코드가 모든 플랫폼에 적용될 수 있도록 코드를 생성하는데 이를 바이트코드라 한다. 바이트코드의 형태를 보면 다음과 같다.

No	opcode	operand

예를 들면 20 if_icomple 12 이다. 20번째 위치에 있는 바이트코드는 정수형의 숫자를 비교해서 같으면 12바이트 뒤에 있는 위치로 분기하는 것이다. 이 형태는 앞에서 설명한 다중스레드 코드와 비슷한 형태이다. 자바는 원시 언어를 중간 언어 형태인 바이트코드로 변환하여 자바 가상 머신에서 수행할 수 있도록 한다.

여러 가지 특징 중에 특히 바이트코드의 번역, 다중스레드 지원, 플랫폼에 독립적으로 사용할 수 있는 특징이 다중스레드 모델의 스레드 코드를 자바 바이트코드로 변환하는 동기가 된다. 하지만 위의 다중스레드 코드를 자바 가상 머신에서 수행하려면 동기화를 위한 클래스와 객체를 생성하는 클래스를 부가적으로 추가해주어야 한다.

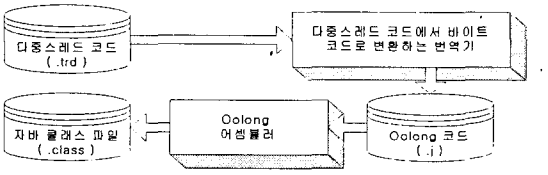
2.3 Oolong

Oolong은 자바 가상 머신을 위한 어셈블리어이고, 이 어셈블리어는 존 메이어(Jon Meyer)의 자스민(Jasmin) 언어를 기반으로 만들어진 언어이다[14]. Oolong 언어는 바이트코드를 일일이 분석할 필요 없이 바이트코드 수준에서 프로그래밍을 할 수 있도록 디자인 되어있다.

자바의 가상 프로세서는 스택을 기반으로 실행하고 실행 결과를 저장하기 위해 지역변수를 사용한다. 반면 다중스레드 코드는 레지스터를 기반으로 스레드 코드를 생성한다. 그래서 이 레지스터들은 자바 가상 머신에서 지역 변수로 대체 해야 하고, 이러한 과정을 통해서 .class 파일을 생성하는데 특별한 문제는 없다.

3. 스레드 코드를 자바 바이트 코드로 변환하는 번역기 설계

다중스레드 모델의 스레드 파일을 모든 플랫폼에 독립적으로 실행시키기 위해서는 스레드 코드를 바이트코드로 변환해야 한다. 스레드 코드를 바이트코드로 변환하는 단계는 다음과 같다. 우선, 생성된 스레드 코드를 읽어들여서 Oolong 코드로 변환한다. 그 후에, 생성된 Oolong 코드를 Oolong 컴파일러를 이용해서 자바 바이트코드의 표현 형식인 .class 파일을 생성한다. [그림 2]는 다중 스레드 파일을 최종적으로 자바 클래스 파일로 변환되는 전체적인 과정도 이다.



[그림 2] 번역기 수행 단계

스레드 코드를 자바 바이트코드로 변환하기 위해서는 스레드 코드에 대응되는 자바 바이트코드를 우선 정의하여야 한다. 대부분의 코드들이 비슷한 구문과 의미를 갖고 있지만 스레드 코드와 바이트코드의 구문상의 차이로 몇 가지의 명령어는 새롭게 정의해주어야 한다. 스레드 코드를 바이트코드로 변환하는 번역기의 알고리즘은 [알고리즘1]과 같다.

[알고리즘 1] 다중스레드 코드를 Oolong 코드로 변환하는 알고리즘

Input : Multi-threaded code
Output : Oolong code
Temporary : Symbol table

Procedure
1. Repeat
2. *Read a token from Multi-threaded code*
3. *Store Symbol table with token*
4. if synchronization count = 0 then
5. if token = **thread number** then
6. *MyConsumer Oolong code initialization*
7. *MyProducer Oolong code initialization*
8. elseif token = **'receive'** then
9. *Make **synchronized** MyProducer thread*
10. elseif token = **'stop'** then
11. synchronization count = -1
12. elseif token = **'load'** then
13. *Make **synchronized** MyConsumer thread*
14. elseif token = **op-code** then
15. *Translate op-code to Oolong code*
16. elseif token = **'endf'** then
17. *stop*
18. Until end of input is reached

End-Procedure

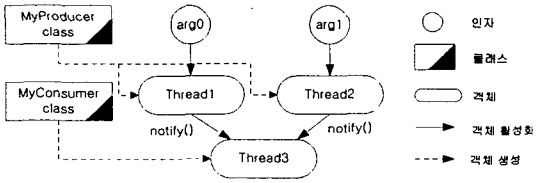
[알고리즘 1]에서 synchronization count는 각 스레드의 동기화 계수이고, 각 스레드는 동기화 계수가 0일 경우 실행된다. 0이 아닐 경우는 계속 대기한다. MyConsumer와 MyProducer 스레드는 ***synchronized***로 동기화를 갖게 하였다. [그림 1]에서 생성된 스레드 코드인 .thd를 Oolong파일인 .j로 만들어주고, 이것을 Oolong 어셈블러를 이용하여 .class 파일로 변환한다. 이렇게 해서 얻어낸 .class 파일은 일반적인 .class 파일과 동일한 형식으로 구성된다.

[알고리즘1]을 이용해서 구현한 본 논문의 번역기에서는 Oolong 어셈블러어 코드를 사용하였다. 읽어드린 스레드 코드를 이진수인 클래스 코드로 직접 변환할 수도 있으나 저급 수준의 최적화, 부가적인 작업환경 등을 고려할 수 있도록 Oolong 어셈블리어로 변환하는 단계를 거치도록 하였다. 그래서 자바 가상 머신 어셈블러인 Oolong을 사용하여 바이트 코드 수준에서 변환을 수행하도록 하였다.

[그림 3]의 코드는 [그림 1]의 다중스레드 코드를 [알고리즘 1]에 적용하여 변환한 Oolong 코드이다. 프로그램 처음부분에 정의되어있는 .class와 .super는 Oolong 프로그램을 정의하는 부분이고, method<init>는 코드를 초기화하는 부분이다. .method<main>부분이 실제 프로그램이 작성되는 부분이다. MyObject 클래스는 객체 생성을 위해 만들어졌고, MyProducer와 MyConsumer 클래스는 Synchronized로 동기화된 계산을 처리하는 부분이다. 이렇게 생성된 코드를 Oolong 어셈블러를 이용해서 클래스 파일을 생성하면 [그림 1]의 코드와 같은 역할을 하는 .class 파일을 얻을 수 있다. 이렇게 생성된 .class 파일은 자바 언어의 특성을 가지며 플랫폼에 독립적인 특징을 가진다.

```
.class super MyObject                    //MyObject 클래스
.super java/lang/Object

.method public <init> ()V
...
.end method

.method public synchronized setValue (I)V
...
.end method

.method public synchronized getA ()I
...
.end method

.method public synchronized getB ()I
...
.end method

.method public synchronized setC (I)V
...
.end method

.class super MyProducer                  //MyProducer 클래스
.super java/lang/Thread

.method public <init> (LMyObject;I)V
...
.end method

.method public run ()V
...
.end method

    .class super MyConsumer              //MyConsumer 클래스
.super java/lang/Thread

.method public <init> (LMyObject;)V
...
.end method

.method public run ()V
...
.end method

.class public super TAdd      // 메인 클래스를 생성하는 부분
.super java/lang/Object

.method public <init> ()V
...
.end method

.method public static main ([Ljava/lang/String;)V
.limit stack 4
.limit locals 5

    new MyObject
    ...
    new MyProducer
    ...
    invokespecial MyProducer/<init> (LMyObject;I)V
    ...
    new MyProducer
    ...
    invokespecial MyProducer/<init> (LMyObject;I)V
    ...
    new MyConsumer
    ...
    invokespecial MyConsumer/<init> (LMyObject;)V
    ...
    invokevirtual java/lang/Thread/start ()V
    ...
    invokevirtual java/lang/Thread/start ()V
    ...
    invokevirtual java/lang/Thread/start ()V
    ...
.end method
```

[그림 3] [그림1]의 다중스레드코드를 번역기를 통해 변환한 Oolong 코드



[그림 4] 번역된 클래스 파일의 실행 과정

[그림 4]는 생성된 클래스 파일이 실행되는 과정이다. 실제 여러 플랫폼에서 동작할 때 [그림 4]와 같이 세 개의 스레드가 생성되며 이것은 [그림 1]과 같은 결과를 산출한다.

4. 안전한 자바 바이트코드

우리가 생성한 Oolong 코드는 바이트코드의 형식을 갖추고는 있지만 임의로 만들어진 코드이기 때문에 잠재적인 위험성을 가지고 있다. 안전한 바이트코드를 만들기 위해서는 코드를 수행하기 전에 생성된 Oolong 코드에 몇 가지 고려해야 될 부분이 있다.

4.1 자바 가상 머신에서의 보안 보증

자바 바이트코드가 안전하게 수행되기 위해서는 몇 가지의 원칙을 지켜야 한다. 예를 들어 자바 가상 머신에서는 모든 객체가 사용되기 전에 우선 생성되어야 한다는 검증 알고리즘을 통해서 수행되는 프로그램의 안정성을 보장해 줄 수 있다. 이를 위해서는 다음과 같은 원칙을 지켜야 한다. 첫째, 모든 객체는 정확히 한 클래스의 객체이며, 이것은 객체가 생성되는 시점부터 소멸하는 시점까지 바뀔 수 없다. 둘째, 만약 어떤 필드나 메소드가 private이라면 해당 코드에 접근할 수 있는 코드는 클래스 자체에 있는 코드들 뿐 이다. 셋째, protected로 선언된 필드나 메소드는 클래스의 구현에 참여하고 있는 코드들만 접근할 수 있다. 넷째, 모든 지역 변수는 사용되기 전에 초기화되어야 한다. 다섯째, 모든 필드는 사용되기 전에 초기화되어야 한다. 여섯째, 스택에 언더플로 또는 오버플로는 발생할 수 없다. 일곱째, 배열의 끝을 넘어서는 부분 혹은 배열의 시작부분 앞쪽에 대해 접근할 수 없다. 여덟째, 일단 배열이 생성되면 배열의 크기를 바꾸는 일은 불가능하다. 아홉째, final로 선언된 메소드는 오버라이드 할 수 없으며, final로 선언된 클래스는 상속될 수 없다. 열째, 메소드의 호출을 받는 목적 객체로 null 참조를 사용하는 경우 NullPointerException이 발생하게 된다.

4.2 잠재적인 공격 가능성

일반적인 자바 컴파일러에서는 private 변수에 대해서 클래스 외부에서 읽으려 한다든지 특정 객체를 유효하지 않은 타입으로 캐스팅 하려는 등의 일련의 공격 가능성에 대해 차단해 준다. 하지만 본 논문에서 생성한 바이트코드는 사용자가 임의로 생성한 코드이기 때문에 발생할 수 있는 잠재적인 공격과 그에 대한 방어를 고려해야 한다. 우선 발생할 수 있는 공격 가능성을 살펴보면 배열 처리, 생성되지 않은 객체에 대한 사용, 유효하지 않은 캐스팅 발생, 클래스에 대한 참조 바꾸기, 예외처리, 숨겨진 코드 등이다.

· 배열 처리

메모리에 대해 공격하는 다른 방법으로는 배열이 끝나는 부분 이후에 대해서 읽는 방법이 있을 수 있다. 만약 애플릿에서 배열의 끝을 넘어서는 곳에 접근하려고 한다면 암호가 들어 날 수도 있을 것이다. 객체의 크기와 객체의 원소에 대한 접근은 명령어의 인자에 의해서가 아니라 피연산자 스택에 있는 피연산자에 의해서 결정된다. 즉, 가상 머신에서 프로그램을 실행시켜 보기 전에는 이 값이 어떻게 될지 알 수 없다. 따라서 이러한 종류의 공격은 검증 알고리즘을 통해 막을 수 없다.

```
bipush 10
newarray byte
bipush 10
baload
```

[그림 5]

[그림 5]에서는 baload 명령어 자체를 이용해서 이러한 공격을 못하게 해야 한다. 명령어가 실행될 때마다 접근하려는 원소가 배열 경계 안에 들어있는지 판단함으로써 공격을 차단할 수 있는데, 만약 배열 경계를 넘어 접근을 하려고 한다면 ArrayIndexOutOfBounds Exception이 발생하게 된다. 경계를 체크하는 부분은 baload 명령어의 일부이며 다른 종류의 배열을 읽어들이는 명령어에서도 이는 마찬가지다. 가상 머신에서는 배열의 원소에 접근하기 전에 배열의 경계를 체크하는 것을 프로그램에 의존하지 않음으로써 프로그래머가 책임져야 하는 부분을 없앴다.

· 생성되지 않은 객체에 대한 사용

코드가 [그림 6]과 같이 작성되어 검증 알고리즘을 속이려는 경우가 있다.

```
.method public <init>()V
goto end
aload_0
invokespecial java/lang/SecurityManager/<init> ()V
end:
return
.end method
```

[그림 6]

[그림 6]에서는 goto를 사용하여 수퍼클래스의 생성자를 건너뛰기 위해 시도한다. 이런 경우 검증 알고리즘에서는 수퍼 클래스의 <init> 메소드가 호출되지 않은 것을 알아내고 이 클래스를 거부하게 된다. 다른 공격방법으로 if 명령어 뒤에 호출을 숨기는 경우도 있다.

```
.method public <init>(I)V
.limit locals 2
iload_1
ifeq end
aload_0
invokespecial java/lang/SecurityManager/<init> ()V
end:
return
.end method
```

[그림 7]

[그림 7]에서 인자가 0이 아니라면 위의 코드의 생성자에서는 수퍼 클래스의 생성자를 호출할 것이다. 그렇지 않은 경우라면 수퍼클래스의 생성자를 호출하는 부분은 건너뛰게 된다. 그러나 어떠한 경로로든 수퍼클래스의 생성자는 호출되어야만 한다. 그렇지 않은 경우라면 검증 알고리즘에서 이 코드를 거부하게 된다.

· 유효하지 않은 캐스팅 발생

만약 공격자가 특정 가상 머신에서 유효하지 않은 캐스트, 특히 참조 유형에 대한 유효하지 않은 캐스트가 허용된다는 것을 안다면, 공격자는 참조가 내부적으로 메모리에 대한 포인터라는 것을 알고 있기 때문에 객체가 어떻게 저장될지를 예상해 볼 수 있을 것이다. 만약 어떤 시스템 상의 프로그램에서 어떤 객체를 원래의 클래스와 다르게 속일 수 있다면, 원래는 거부되어야 하는 해당 객체의 특정 필드를 읽거나 쓸 수 있게 될 수 있다.

· 예외 처리

공격자는 시스템에 대한 유해한 작업을 할 때 발생하는 예외를 처리할지도 모른다. 이를 통해서 예외를 무시할지도 모른다. 검증 알고리즘이 생성자를 추적할 때 검사하는 것 중 하나로 모든 반환은 수퍼 클래스의 생성자에 대한 호출을 거쳐야만 하도록 하는 것이 있다. begin부터 end까지 모든 코드에서 발생하는 보안 예외는 예외 처리 루틴에 의해서 처리된다. 이는 즉, 수퍼 클래스의 생성자를 호출하지 않을 수 있는 경로가 있다는 것을 의미한다. 검증 알고리즘에서는 이러한 생성자는 유효하지 않다고 판단하며, 그럴 경우 클래스 전체가 유효하지 않게 간주되게 된다. 클래스가 거부됨으로써 시스템은 안전하게 보호될 수 있게 된다.

· 숨겨진 코드

또 다른 방법으로 공격자는 다른 바이트코드 안에 바이트코드를 숨길 수 있다. 잠재적으로 공격을 할 수 있는 코드를 숨기고 있다. 자바 가상 머신에서는 어떤 코드가 명령어의 중간으로 분기하려 한다면 그것을 찾아내서 클래스를 거부하게 된다.

```
sipush -19712
ineg
```

[그림 8]

[그림 8]의 코드는 잠재적으로는 공격을 할 수 있는 바이트코드를 숨기고 있다. 위의 코드는 [그림 9]와 같은 바이트코드를 생성해 낸다.

위치	값	의미	
0050	11	sipush	
0051	b3		0xb300=-19712
0052	00		
0053	74	ineg	

[그림 9]

공격자는 앞의 부분 이후 바이트가 [그림 10]과 같은 클래스 파일을 생성해 낼 수 있다.

위치	값	의미	
0054	a7	goto	
0055	ff		0xfffd=-3
0056	fd		

[그림 10]

goto에서는 sipush 명령어의 중간인 51을 가리키고 있다. Oolong 어셈블러에서는 명령어 사이에만 레이블을 허용하기 때문에 이러한 코드를 Oolong으로 쓰는 것은 불가능하다. 공격자는 코드가 54인 위치의 명령어까지 실행되면 3바이트만큼 이전인 51 위치에 있는 곳으로 되돌아가려 할 것이다. 만약 51 위치의 바이트를 바이트코드로 해석한 다면 다음과 같게 된다.

위치	값	의미	
0051	b3	putstatic	
0052	200		0x0074=116
0054	74		

[그림 11]

[그림 11]을 보면 상수 115에 있는 필드에 접근하려 하는 것을 알 수 있다. 공격자는 시스템 보안 관리자를 없앨 목적으로 상수 116을 java.lang.System의 private 필드인 security에 대한 Fieldref로 만들 수도 있다. 공격자는 자바 가상 머신이 이러한 방식을 사용한 공격에 대한 검증을 시도하지 않기를 바랄 것이다. 또한 시스템이 코드를 정적으로 체크하기 때문에 필드가 private인지는 실행시점에 체크하지 않을 것이라고 생각할 것이다. 이러한 공격자의 생각은 51부터 53까지는 잘못된 것이 없다. 그러나 명령어의 중간으로 분기하는 명령어를 담고 있는 54의 코드에서 문제가 발생하게 된다. 자바 가상 머신은 어떤 코드가 명령어의 중간으로 분기하려 한다면 그것을 찾아내서 클래스를 거부하게 된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문은 프로그램에 내재한 병렬성을 최대한 활용하는 데이터플로우 모델과 지역성을 이용하여 순차 코드를 효율적으로 수행할 수 있는 폰 노이만 모델의 혼합형 계산 모델인 다중스레드 모델의 스레드 코드를 여러 플랫폼에 독립적인 자바 바이트코드로 변환하는 번역기를 설계, 구현하였다. 자바 언어의 바이트코드는 번역기에 있는 중간 언어와 같은 역할을 수행하고, 자바 가상 머신은 번역기의 후위부와 같은 역할을 수행하였다. 스레드 코드를 자바 바이트코드로 변환할 경우 효율적인 코드 생성을 위해 Oolong 자바 가상 머신 어셈블러를 사용하였다. 이렇게 해서 생성된 .class 파일은 자바 가상 머신인 설치된 어떤 플랫폼에서도 실행가능 하였다.

우리가 생성한 Oolong 코드는 바이트코드의 형식을 갖추고는 있지만 임의로 만들어진 코드이기 때문에 잠재적인 위험성을 가지고 있다. 안전한 바이트코드를 만들기 위해서는 코드를 수행하기 전에 생성된 Oolong 코드에 대해 잠재적인 공격과 그에 대한 방어를 고려해야 한다. 발생할 수 있는 공격 가능성으로는 영번째, 생성되지 않은 객체에 대한 사용, 첫째, 유효하지 않은 캐스팅 발생, 둘째, 클래스에 대한 참조 바꾸기, 셋째, 초기화되지 않은 필드에 대한 접근, 넷째, 배열 처리, 다섯째, 예외 처리, 여섯째, 숨겨진 코드 등 이였고 이에 대한 방어책을 고려하였다.

본 논문에서 제안된 번역기는 다중스레드 코드를 자바 바이트코드로 변환하는 부분과 안전한 자바 바이트코드를 생성하는 부분에 중점을 두었다. 하지만, 속도 향상을 위한 자바 바이트코드 내에서의 최적화 부분에 대해서는 취급하지 못하였다. 이 부분은 향후 연구에서 개선되어야 한다.

참고문헌

[1] Andrew W. Appel, Dan Wallach, Edward W. Felten "Safkasi: A security mechanism for language-based system." ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, to appear, 2000.

[2] Andrew W. Appel, Daniel C. Wang, "JVM TCB : Measurements of the Trusted Computing Base of Java Virtual Machines" Princeton University, April 12, 2002.

[3] Nick Benton, Andrew Kennedy, George Russell, "Compiling Standard ML to Java Bytecodes," Persimmon IT, Inc. Cambridge, U.K, 1998

[4] Leendert van Doorn, "A Secure Java Virtual Machine." Proceeding of the 9th USENIX Security Symposium, Denver, Colorado, USA, August, 2000

[5] Joshua Engel , Program for the Java Virtual Machine, O'REILLY, 1997

[6] James Gosling, "Java Intermediate Bytecodes," ACM SIGPLAN Workshop on Intermediate Representations, 1995.

[7] Li Gong, "JDK 1.2 Security Architecture." Sun Microsystems, Inc., March 1998.

[8] Jonathan C. Hardwick and Jay Sipelstein, "Java as an Intermediate Language," School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, 1996

[9] Han B. Lee, BIT:Bytecode Instrumenting

Tool. MS thesis, University of Colorado, Boulder, CO, July 1997

[10] Han Bok Lee, Menjamin G. Zorn, "BIT : A Tool for Instrumenting Java Bytecodes." In Proceedings of the 1997 USENIX Symposium on Internet Technologies and System, 73-82, December 1997.

[11] Tim Lindholm, Frank Yellin "The Java Virtual Machine Specification," Addison-Wesley, 1997.

[12] Gary Meehan, "Compiling Functional Programs to Java Byte-code," Department of Computer Science, University of Warwick, 1997

[13] Gray Meehan, Mike Joy, "Compiling Lazy Functional Programs to Java Bytecode," Department of Computer Science, University of Warwick, 1999

[14] Jon Meyer and Troy Downing, Java Virtual Machine, O'REILLY, 1997

[15] Jack Pien "C Compiler Targeting the Java Virtual Machine," Computer Science Technical Report PCS-TR98-334, 1998

[16] 유원희, 양창모, 주형석, 이갑래, "다중스레드 모델을 위한 비평가인자 함수 언어 번역기 설계 및 구현", 정보통신부 최종 결과 보고서, 1999