通信情報保護學會論文誌
第 6 卷 第 4 號, 1996. 12

VDM-SL을 이용한 보안 알고리즘의 형식적 표현과 참조구현 코드 생성

김 영 길*, 김 기 수**, 김 영 화***, 류 재 철**, 장 청 룡*

Formal Description and Reference Implementation Code Generation for a Security Algorithm using VDM-SL

Young-Gil Kim*, Ki-Su Kim**, Young-Wha Kim***,
Jae-Cheol Ryou**, Chung-Ryong Jang*

요 약

VDM-SL은 다양한 표준들의 정확한 기술을 위해 제시되고 있는 형식 규격어의 하나로서 특히 보안표준의 기술에 적합한 형식규격어이다. 이러한 VDM-SL을 사용하여 보안표준의 표현 및 실행코드 생성의 정확성과 편리성을 제공하기 위한 다양한 도구들이 개발되고 있으며 이들 중 IFAD VDM-SL Toolbox는 가장 널리 사용되고 있는 도구이다. 본 논문에서는 IFAD VDM-SL Toolbox를 이용해 MD4 Message Digest Algorithm을 VDM-SL로 기술하고, 이에 대한 C++ 코드를 생성하여 보안 알고리즘에 대한 참조구현 코드 생성 기법을 제시하고자 한다. 또한, 이를 안전한 해쉬코드 생성 알고리즘에 대하여 적용한 결과를 검토하여 최근 보안 시험 방법으로 제시되고 있는 Strict Conformance Test와의 연계성을 제시하고자 한다.

Abstract

VDM-SL(Vienna Development Method-Specification Language) is one of the FSL(Formal Specification Language) which is being presented for the correct description of the security relevant standards. Several tools are being developed for the correctness and the convenience in the description and executable code generation of security relevant standards using VDM-SL. The IFAD VDM-SL Toolbox is one that has many functions : syntax checking, type checking, c++ code generation, test coverage information. This paper describes a formal method for description and implementation of MD4 algorithm using VDM-SL and IFAD VDM-SL Toolbox, and examines the result applied to secure hash algorithm, and proposes the relation to strict conformance test which recently suggested as a security test method.

* 한국통신 연구개발본부
** 충남대학교
*** 한국전자통신연구소

1. 서 론

오늘날 개인이나 회사 그리고 국가의 모든 분야에 걸쳐 컴퓨팅 시스템에 대한 의존도가 날로 증가함에 따라 컴퓨팅 시스템에서 처리되는 각종 정보에 대한 보안(Information Security)은 상대적으로 중요한 의미를 내포하고 있다. 이들 정보가 적법한 사용자가 아닌 제삼자에게 노출되었을 때 해당 개인이나 회사 그리고 국가는 막대한 손해를 받을 수 있다. 이를 위해 컴퓨팅 시스템의 장점을 극대화시키는 연구와 더불어 해당 정보 및 시스템으로 향하는 불법적인 접근이나 이들의 자연 노출로 부터 보호하기 위한 보안 메카니즘의 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 결과로 보안표준이 다양하게 제시되고 있다.

한편, 보안표준 개발과 함께 표준을 정확하게 구현해 활용하는 문제가 보안체계 확립에 있어서 중요한 문제가 되고 있다. 정확한 구현을 위해서는 먼저 표준 자체가 명료하게 기술되어야 하나, 현재 표준 기술에 사용되고 있는 영어와 같은 자연어로는 용이하지 않은 일이다. 표준을 해석하고 이해하는데 있어서 각 개인에 따라 의미 분석이 틀리는 경우가 발생하기 때문이다. 특히, 영어로 기술되는 국제표준인 경우, 영어권이 아닌 국가에서 표준을 명확히 이해하고 구현하는 것이 더욱 어려운 일이다. 이와 같은 의미상의 모호성은 보안체계를 구축하는데 있어 큰 장애요인이 된다. 또한, 자연어로 기술된 표준은 구현제품에 대한 적합성시험(Conformance Test)에 있어서 많은 어려움이 따른다. 표준의 기술이 정형화된 구조로 되어있지 않기 때문에, 구현된 코드가 표준을 제대로 따르고 있는지의 시험 또한 비정형화된 방법을 피할 수 없기 때문이다. 비정형화된 시험은 비용 측면에 있어서 많은 경제적인 부담을 가져오기 때문에 이에 대한 해결의 한 방안으로 무엇보다 정형화된 표준의 기술과 이에 따르는 정형화된 시험 방법의 개발이 중요한 과제라 할 수 있다.

자연어를 이용한 보안표준 작성의 문제를 해결하기 위해 형식규격어(Formal Specification Language)의 사용이 활발하게 연구되고 있다. 형식규격어는 수학적인 방법으로 정의되어 있어, 원하는 의미를 정확하게 표현할 수 있으며, 정형화된 구조를 가지고 있어 구현 및 시험과정에 있어서 자동화 도구(Tool)의 사용이 가능하다. 즉, 표준을 형식 규격어로 작성하고 이에 대한 신텍스 및 시멘틱스 검사와 형식규격어로 작성된 화일을 프로그래밍 언어(C 또는 C++)로 생성하는 일련의 과정들을 자동화 도구(Tool)를 이용하여 수행할 수 있다. 이와 같은 정형화 방법(Formal Method)으로 생성된 코드를 참조구현 코드(Reference Implementation Code)라 하며 실제 사용자가 구현한 코드의 결과와 비교 분석하는 블랙박스 시험(Black Box Testing)에 활용할 수 있다. 이밖에도 형식규격어에 의한 보안 알고리즘의 기술은 현재 초기 연구 단계에 있는 보안적합성시험(Strict Conformance Testing : SCT)에 있어서도 많은 장점들을 가져올 수 있는 것으로 알려지고 있다[1][2].

본 논문에서는 형식규격어에 대한 일반적 개념과 함께 보안표준 기술에 있어서 적합한 형식규격어 및 도구를 소개하며 그러한 형식규격어 및 도구를 통한 MD4 Message Digest Algorithm의 형식적 표현과 참조구현 코드생성에 관한 정형화 방법을 제시하고자 한다. 논문의 제2장에서는 형식규격어에 대한 특성 및 종류에 대해 살펴보고 3장에서는 보안표준 기술에 있어서 적합한 형식규격어 및 관련 도구에 대한 설명을 하며 4장에서는 MD4 알고리즘을 VDM-SL로 기술한다. 5장에서는 형식규격어를 통해 표현된 보안 알고리즘에 대한 참조구현 코드 생성 과정에 대해 기술하고자 한다. 6장에서는 정형화 방법을 이용해 구현된

MD4 알고리즘의 참조구현 코드에 대한 결과 분석을 설명한다. 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

2. 형식규격어 (Formal Specification Language)

2.1 특성

해당 요구사항을 기술하는 언어로는 우리들이 사용하고 있는 자연어를 이용하는 것이 보편적이다. 이는 쉽게 읽을 수 있으며 명확하게 이해될 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 그러나 자연어를 이용한 기술은 문제의 핵심을 벗어나서 장황하게 진행될 수 있으며 컴퓨팅 시스템이 처리할 수 있는 언어가 아니기 때문에 컴퓨터 통신 환경에서 발생하는 다양한 요구사항을 충분히 수용할 수 없는 문제점이 있다[3]. 특히 자연어는 문맥에 따라 다양한 의미를 가질 수 있고 이에따라 서로 다른 해석을 초래할 수도 있다(모호성). 또한 자연어를 사용하여 요구사항들을 기술할 경우 예외상황이나 비정상처리에 대해 정확히 기술하기 어렵기 때문에 개발자로 하여금 불완전한 구현을 초래할 수 있다(불완전성). 이밖에도 자연어로의 표준 기술시 서로 모순되는 요구사항이 존재할 수 있으며 이와같은 모순을 발견하기가 쉽지 않다는 단점이 있다(모순성)[4]. 이러한 자연어 규격상의 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 컴퓨팅 시스템상에서 처리 가능한 언어를 사용하는 것이다. 이 언어는 C, C++와 같은 프로그래밍언어 수준의 하위층 언어를 의미하는 것이 아니라 자연어 규격과 동일한 수준의 표현어를 의미하며 이 언어를 일반적으로 형식 규격어라 한다. 따라서 형식 규격어는 자연어 규격의 모호성, 불완전성 및 모순성을 해결할 수 있는 수학적인 논리와 집합이론의 표현력을 지니고 있으며, 구현 및 시험 과정에서 자동화 도구를 접할 수 있는 컴퓨팅 언어의 개념을 포함하고 있다. 따라서 형식 규격어의 사용으로 얻을 수 있는 장점들을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 해당 표준이 무엇을 하고자 하는지에 대한 상세한 의미 분석이 가능하기 때문에 개발자로 하여금 정확한 구현을 가능하게 한다.

둘째, 형식규격어를 통해 표준 자체의 정확성을 검사할 수 있다는 것이다. 즉, 이 언어의 수학적 기반 때문에 표준에서의 비논리성과 이에 따른 구현에서의 잘못된 결과의 생성을 예측할 수 있다.

셋째, 형식규격어를 이용한 표준의 기술은 구현 코드에 대한 시험을 보다 용이하게 한다. 이는 시험자가 구현 코드의 실제 기능을 자세히 파악할 수 있다는 점과 형식 규격으로 부터 다양한 시험 방식을 개발할 수 있다는 점에 기인한다.

마지막으로, 형식규격어의 정형화된 구조 특성은 기계적인 번역 또는 처리를 가능하게 함에 따라 구현 및 시험 과정의 상당 부분을 자동화할 수 있어 시험비용을 절감시킬 수 있다는 것이다.

2.2 종류

형식규격어의 장점에 대한 인식의 증가로 다양한 종류의 형식규격어가 개발되고 있으며 그들을 살펴보면 다음과 같다.

- Z :
  기본적인 집합이론과 논리 개념을 사용한 모델 근간의 언어이다.
- VDM (Vienna Development Method) : ISO/IEC JTC1/SC22 CD13817-1
  모델 근간의 언어로 이산수학과 집합이론을 사용한다.
- RAISE (Rigorous Approach to Industrial

Software Engineering) :
VDM과 Z에 기반을 두고 있으며 모듈화, 병렬성 등의 기능이 추가되었다.

- SDL (Specification and Description Language) : ITU Rec. Z.100
  유한상태머신(Finite State Machine)에 근거를 두고 있는 반형식(Semi-Formal) 규격 언어로서 통신 시스템에 있어서 주로 이용된다. 문서형 표기법 (SDL/PR)과 그림형 표기법(SDL/GR)의 선택사항이 있다.
- Estelle : ISO/IEC 9074
  분산/병렬 처리 기술에 유용하며, 파스칼 프로그래밍 언어에 기반을 두고있다.
- LOTOS(Language Of Temporal Ordering Specification) : ISO/IEC 8807
  수학적으로 정의된 형식 언어로 SDL을 대체하고 있다.

위와 같은 다양한 형식규격어는 각각의 언어가 가지고 있는 특성에 따라 관련 표준을 기술하는데 사용되고 있다. Estelle과 LOTOS는 OSI의 서비스 및 통신 프로토콜 기술에 적합한 것으로 알려져 있으며, SDL은 ITU에서 관련 프로토콜 기술에 이용되고 있다[3]. 또한, 영국의 NPL(National Physical Laboratory)에서는 형식규격어의 보안표준에 대한 활용성 연구가 계속 진행중이며, 다음과 같은 보안표준을 형식규격어로 작성하여 그 타당성 여부를 검토한 바 있다.

- ISO/IEC DP 9798 Entity Authentication Mechanism
  : Estelle, SDL, LOTOS, VDM
- MD4 Message Digest Algorithm
  : VDM, RAISE
- ISO 8731(part2) Message Authenticator Algorithm
  : Z, VDM, SDL, LOTOS

이러한 연구 결과, 자연어 규격을 구조적 형태 (예: 해쉬함수, 전자서명)와 행위적 형태 (예: 대부분의 통신 프로토콜)로 분류하고, 보안 관련 표준들은 구조적 형태로 포함시켜 Z와 VDM 같은 모델 근간의 언어를 이용하는 것이 적절하다는 결론을 얻었다[1]. 현재 ISO/IEC JTC1 (SC22: Programming Language)에서는 Estelle과 LOTOS를 표준으로 권고하고 있으며, VDM과 Z를 표준으로 채택할 예정이다.

본 논문에서는 이들 언어 중 영국 및 유럽을 중심으로 가장 활발히 연구되고 있는 VDM언어를 통한 보안 알고리즘의 기술에 대해 설명 하고자 한다. 특히 VDM언어의 국제표준 채택을 위한 ISO/IEC JTC1/SC22 CD 13817-1 ISO VDM-SL(Specification Language)에 컴퓨팅 환경에서 조작가능 하도록 실행성 개념을 추가한 덴마크의 IFAD(The Institute of Applied Computer Science) VDM-SL을 중심으로 설명 하고자 한다.

3. 형식 규격어 도구

형식규격어에 대한 연구활동을 통해 보다 합리적이고, 체계적인 언어의 개발과 이들을 편리하게 사용할 수 있는 다양한 도구의 개발이 진행되고 있으며 이들 도구들은 일반적으로 다음과 같은 기능들을 가지고 있다 〈그림 1〉.

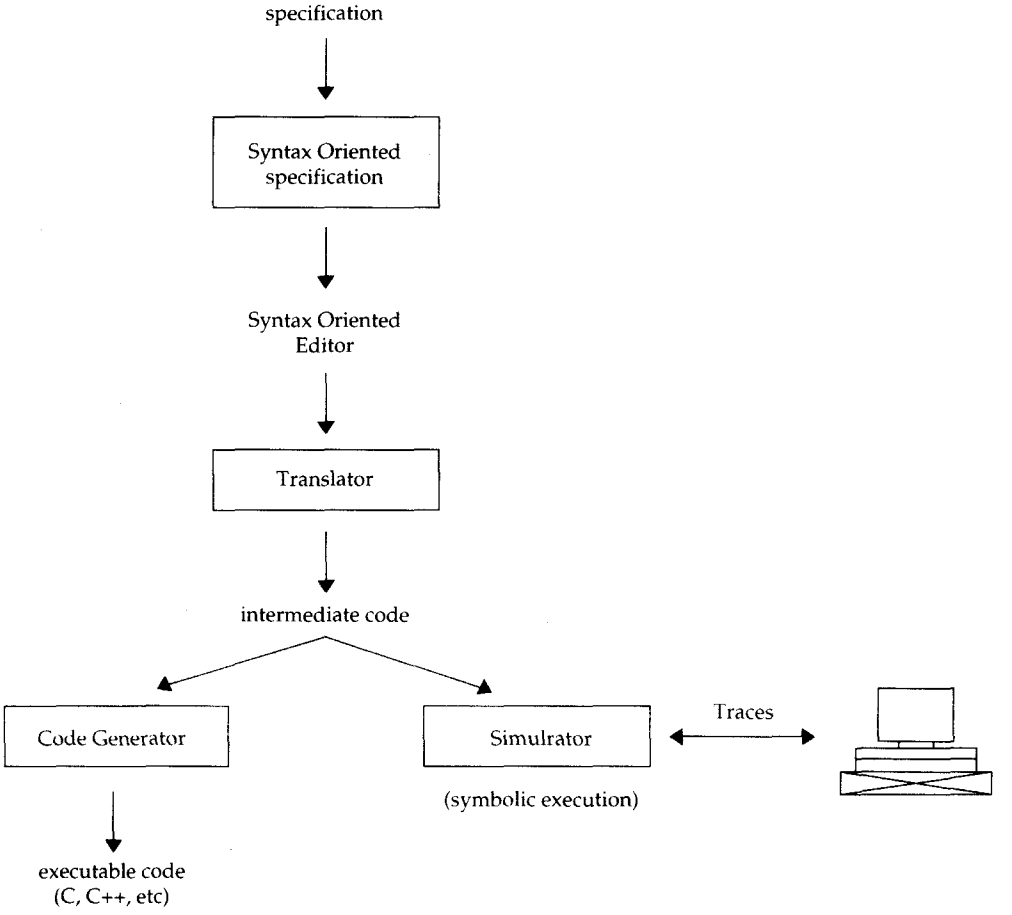
(1) 편집기 (Editor)
: 형식규격어의 신텍스에 따른 규격 작성

(2) 번역기 (Translator)
: 작성된 규격의 신텍스와 시멘틱스를 검사하여 중간코드를 생성

(3) 코드 생성기 (Code Generator)
: 중간코드로 부터 고급 프로그래밍 언어 (예: C, C++) 코드 생성

(4) 시뮬레이터 (Simulator)
: 중간코드를 가지고 symbolic execution 수행

위에서 제시되고 있는 기능외에 실행 오류를 검사하기 위한 디버거(debugger), 시험 데이타를 생성하는 테스트 생성기 등이 있으며, 이들을 통합하여 하나의 정형화된 도구를 개발하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 현재 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 Estelle 규격으로 부터 C++ 코드를 생성하는 NIST Toolset을 개발하여 통신 프로토콜 기술에 사용하고 있으며[5] 덴마크의 IFAD(The Institute of Applied Computer Science)에서는 VDM 규격으로 부터 C++ 코드를 생성하는 VDM-SL Toolbox를 개발하였다[6]. 이밖에도 보안표준의 기술에 적절한 것으로 평가되고 있는 VDM 도구로 SpecBox, Mural System, VDM Parser, Centaur



〈그림 1〉 형식 규격어를 이용한 자동화 도구

VDM environment등이 있다. 그러나 도구들을 통해 생성되는 실행코드들은 결과의 정확성은 보장되고 있지만, 코드 자체에 불필요한 코드가 많이 삽입되어 실행 속도가 현저히 늦는 등의 문제점이 있다. 이에 따라 실제로 사용되지는 않고, 다만 참조구현(Reference Implementation)으로 시험에 활용되고 있는 단계이다.

4. MD4 Message Digest Algorithm 에 대한 VDM -SL 표현

MD4 알고리즘은 임의의 길이의 메시지를 입력으로 받아 128 bits의 message digest 값을 생성하는 알고리즘으로 전자 서명(Digital Signature)기법에 사용되는 해쉬 알고리즘(Hash Algorithm)중의 하나이다[8]. 즉, MD4 알고리즘에 의해 생성된 최종 128 bits으로 해당 메시지에 대한 변경 및 조작사실을 판단할 수 있게 된다. MD4의 주 알고리즘은 다음과 같이 5 단계로 나눌 수 있다[9].

1 단계 : Append Padding Bits

2 단계 : Append Length
입력된 메시지의 길이가 512 bit의 정수배의 형태가 되도록 하기 위하여 메시지 패딩을 한다

3 단계 : Initialize MD Buffer
main 해쉬 함수에서 사용될 128 bits의 상수값을 초기화 한다.

4 단계 : process Message in 512-Bit(16-word) Blocks
패딩된 메시지를 512 bits 단위의 메시지 블럭으로 나누고 첫 번째 블럭 부터 마지막 블럭 까지 MD_Buffer값과 함께 main 해쉬 함수를 수행 한다.

5 단계 : Output
message digest된 최종 128 bit의 결과값을 얻는다.

다음은 MD4 알고리즘의 자연어 규격을 IFAD VDM-SL을 이용해 재작성 하는 과정을 나타낸다 (부록 참조).

A word is a 32 bit quantity and a byte is an 8 bit quantity.

A Sequence of bits can be interpreted in a natural manner as a sequence of bytes.

위의 자연어 문장에 따라 다음과 같이 상수 Word_length와 Byte_length 값을 IFAD VDM 언어로 정의 할 수 있다.

```
Word_length = 32
Byte_length = 8
```

이와 함께, byte와 word가 가질 수 있는 최대값에 대한 정의 또한 다음과 같이 기술될 수 있다.

```
Maximum_byte_value = 2 ** Byte_length - 1
Maximum_word_value = 2 ** Word_length - 1
```

위와 같은 방법으로 상수 정의가 끝나면 다음으로 필요한 데이타 타입들의 정의가 다음과 같이 이루어 진다.

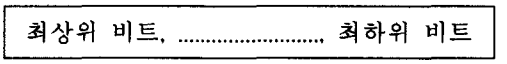
```
Bit = nat
inv Bit == Bit in set {0,1}

Word = seq of Bit
inv Word == len Word = Word_length
```

다음은 byte에 대해 기술하고 있는 자연어 문장이다.

... each consecutive group of 8 bits is interpreted as a byte with the high-order(most significant) bit of each byte listed first.

위의 문장에 의해 다음의 그림과 같은 형태로 byte의 표현이 이루어짐을 알 수 있으며, 이에 따라 이러한 byte들에 적용될 함수들에 대한 정의 또한 다음과 같이 가능해진다.



〈byte의 표현〉

```
Convert_number_to_byte : nat -> seq of Bit
Convert_number_to_byte(Nm) ==
  let B = Decimal_to_binary(Nm) in
      Zero_padding(Byte_length - len B) ^ B
  pre Nm <= Maximum_byte_value
Decimal_to_binary : nat -> seq of Bit
Decimal_to_binary(Nm) ==
  let Divisor = Nm div 2,
      Remainder = Nm mod 2 in
  if Divisor <> 0
  then Decimal_to_binary(Divisor)^ [Remainder]
  else [Remainder]

Binary_to_decimal : seq of Bit -> nat
Binary_to_decimal(Nm) ==
  let length = len Nm in
  if length = 1
  then hd Nm
  else hd Nm ×2**(length-1) + Binary_to
  _decimal(tl Nm)
```

위에서 볼 수 있듯이 Convert__number__to__byte는 또 다른 함수로서 0의 시퀀스를 만드는 Zero__padding이 요구되어지며 이것은 다음과 같이 정의될 수 있다.

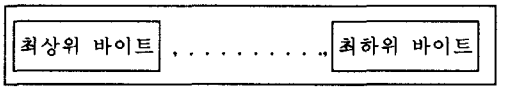
```
Zero_bit = Bit
inv Zero_bit == Zero_bit = 0

Zero_padding(Num_zeroes : nat) ZP : seq of
  Zero_bit
post len ZP = Num_zeroes
```

다음은 word에 대한 자연어 문장의 기술이다.

A sequence of bytes can be interpreted as a sequence of 32-bit words, where each consecutive group of 4 bytes is interpreted as a word with the low-order(least significant) byte given first.

byte와 마찬가지로 위의 문장에 따라 다음에 나오는 그림과 같은 형태로 word가 표현됨을 알 수 있으며, word에 적용될 함수들의 정의 또한 다음과 같이 가능해 진다.



〈word의 표현〉

```
Convert_word_to_number : Word -> Number
Convert_word_to_number(W) ==
    let B0 = Binary_to_decimal(W(1, ..., 8)),
        B1 = Binary_to_decimal(W(9, ..., 16)),
        B2 = Binary_to_decimal(W(17, ..., 24)),
        B3 = Binary_to_decimal(W(25, ..., 32)) in
    B0×2**0 + B1×2**8 + B2×2**16 + B3*2**24

Convert_number_to_word : Number -> Word
Convert_number_to_word(Nm) ==
    let lsbyte = Nm mod 2**8,
        byte2 = (Nm div 2**8) mod 2**8,
        byte3 = (Nm div 2**16) mod 2**8,
        msbyte = Nm div 2**24 in
```

```
Convert_number_to_byte(lsbyte)^Conv-
ert_number_to_byte(byte2)^
Convert_number_to_byte(byte3)^Convert_
number_to_byte(msbyte)
```

다음은 MD4 알고리즘에서 요구되는 기본적인 산술 및 논리 함수들에 대한 문장이다.

Let the symbol "+" denote addition of words (i.e.modulo 2**32 addition)

위의 자연어 문장은 Word 타입의 두 값에 대한 더하기 연산을 기술하고 있으며 다음과 같이 VDM 언어로 기술된다.

```
ADD : Word * Word -> Word
ADD(X,Y) ==
  let N1 = Convert_word_to_number(X) in
    let N2 = Convert_word_to_number(Y) in
        Convert_number_to_word((N1+N2)
        mod Maximum_number_size_plus_1)
```

Let X<<<s denote the 32 bit value obtained by circularly shifting(rotating) X left by s bit

위의 문장은 Word 타입의 변수에 대해 s 비트 만큼의 비트 포지션을 원형 쉬프트 레프트(Circular Shift-Left)하는 함수로서 이에 대한 VDM 기술은 다음과 같다.

```
ROTATE_LEFT : Word * nat -> Word
ROTATE_LEFT (W,s) ==
  let Shift_value = Convert_word_to
    _number(W)*2**(s mod Word_length) in
  let X = Shift_value mod Maximum_
    number_size_plus_one,
    Y = Shift_value div Maximum__
      number__size__plus__one in
  Convert_number_to_word(X+Y)
```

이밖에도 기본적으로 필요한 함수들은 다음과 같으며 이 함수들도 지금까지 정의된 함수들과 같은 방법을 기본으로 하여 정의된다.

- (워드 타입의 값에 대한 보수 표현(bit-wise complement)
- (워드 타입의 두 값에 대한 논리합(bit-wise OR)
- (워드 타입의 두 값에 대한 배타 논리합(bit-wise XOR)
- (워드 타입의 두 값에 대한 논리곱(bit-wise AND)

지금까지 MD4 알고리즘에서 필요한 기본적인 데이타 타입들과 상수값 및 함수들에 대한 IFAD VDM-SL 표기를 제시하였다.

5. VDM-SL Toolbox를 이용한 MD4 알고리즘의 C++ 코드 생성

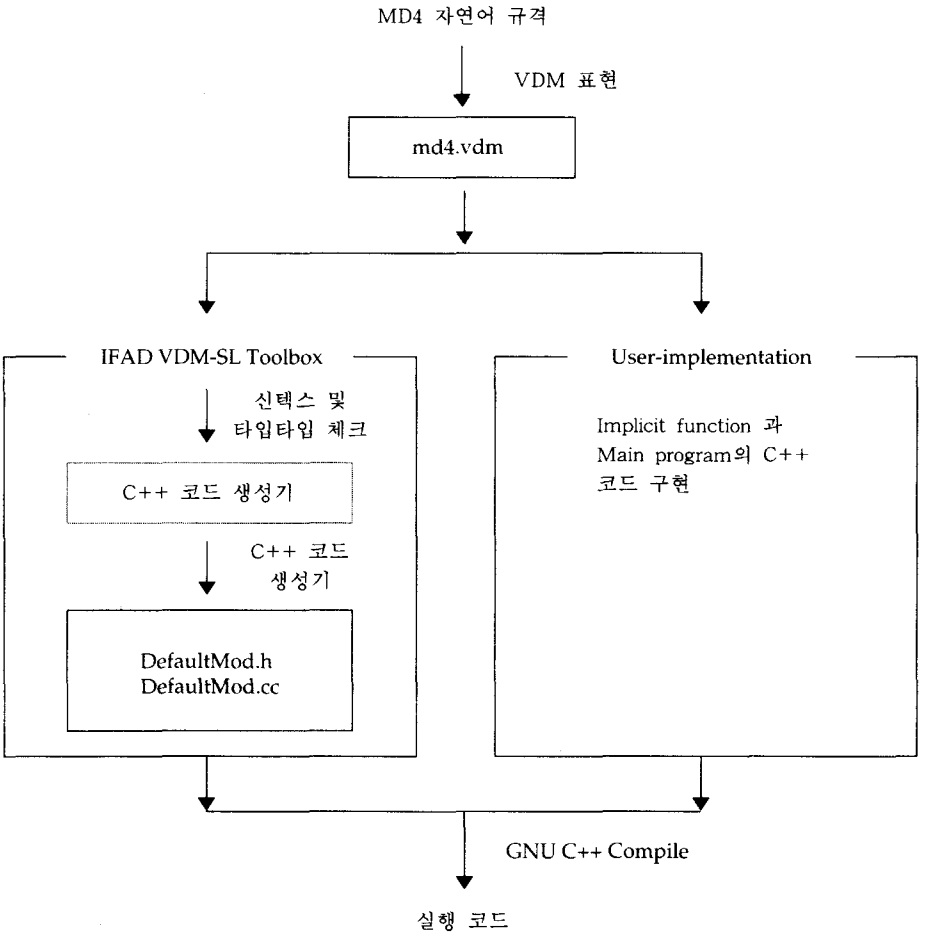
IFAD VDM-SL과 Toolbox의 기능들을 이용하여 MD4 알고리즘에 대한 C++ 코드를 생성하는 과정은 다음과 같다〈그림 2〉.

1. MD4 알고리즘의 VDM-SL 규격 작성
2. MD4 VDM-SL 규격에 대한 신텍스 및 시멘틱스 검사
3. IFAD VDM-SL Toolbox의 C++ 코드생성기를 통해 C++ 코드생성
   규격에 대한 C++ 코드 생성
4. MD4 VDM-SL 규격에 정의된 Implicit 함수들에 대한 C++ 코드 작성
5. 메인프로그램 작성
6. GNU C++ 2.5.8 또는 2.6.x를 통한 C++ 컴파일

5.1. 코드 생성기에 의해 생성된 화일들

현재 사용되고 있는 IFAD VDM-SL Toolbox Version 2.3에서의 C++ 코드 생성기는 모든 IFAD VDM 문장에 대해 약 95% 정도 까지 C++ 코드 생성이 가능하다. 하나의 IFAD VDM 화일에 대해 C++ 코드 생성기에 의해 생성되는 화일은 DefaultMod.h와 DefaultMod.cc란 이름을 가진 2개의 화일이다. DefaultMod.h는 해당 VDM 규격에서 정의하고 있는 변수 및 함수들에 대한 선언부 이며, DefaultMod.cc는 그러한 변수 및 함수들에 대한 실제 구현코드가 생성되는 화일이다. 아울러 DefaultMod.cc에는 init_DefaultMod()라는 함수가 생성되는데, 이 함수는 규격에 정의되어 있는 변수들 및 상수 값들에 대한 초기화를 수행하는 함수이다. 따라서 이 함수는 사용자가 메인 프로그램을 작성할 때 main()의 도입부에서 호출해야 한다. 또한 DefaultMod.cc에는 IFAD VDM 규격에 정의되어 있는 implicit 함수들에 대한 "#include"를 다음과 같이 생성한다.

#include "vdm_DefaultMod_implicit.cc"



〈그림 2〉 IFAD VDM-SL Toolbox를 이용한 참조구현 코드 생성과정

따라서 사용자는 vdm__DefaultMod__implicit.cc라는 화일에 implicit 함수들을 직접 구현해야 한다.

5.2. Implicit 함수와 메인 프로그램

IFAD VDM-SL Toolbox의 C++ 코드 생성기에서는 implicit function들에 대한 C++ 코드 생성을 지원해 주지 않기 때문에 사용자가 직접 구현해 주어야 한다. 또한 일반적으로 VDM 규격에서는 사용자 인터페이스를 기술하지 않고 있기 때문에 이러한 부분 또한 사용자가 main()으로 작성 해야만 한다. 즉, implicit 함수의 경우 그 함수에서 제시하고 있는 post condition에 의거해 C++ 코드를 작성하며, 이때 작성되는 코드는 코드생성기가 가지고 있는 VDM C++ 라이브러리에 근거하여 작성되어야 한다. VDM C++ 라이브러리에는 모든 VDM 타입들을 각각 C++ 클래스로 정의하고 있어서 코드생성기에 의해 생성되는 화일들은 이런 클래스들과 그 클래스들에 대한 멤버 함수들을 이용하는 방식으로 구성되어 있다. 따라서 implicit 함수의 경우도 사용자는 단지 이러한 클래스들이 가지고 있는 멤버 함수들을 이용해 작성하면 된다. 즉, 이렇게 함으로서 코드 생성기에 의해 생성된 헤더화일인 DefaultMod.h에서 선언된 implicit 함수들에 대한 C++ 프로토타입과 제대로 매칭될 수 있게 된다. 그리고 메인 프로그램의 경우에서도 마찬가지로 VDM C++ 라이브러리를 이용하여 구현하며, 메인 프로그램에서 구현될 주요내용은 DefaultMod.cc에 생성된 함수들 중에서 메인 함수를 호출하는 부분이며, 이에 앞서 main()의 시작 부분에서는 반드시 init__DefaultMod() 함수를 호출해야 한다. 다음은 메인 프로그램의 구현 방법을 소개한 내용이다.

```
#include <fstream.h>
#include "metaiv.h"
#include "DefaultMod.h"
main()
{
 Sequence l, r;
  :
  init_DefaultMod() ;  / *변수 및 상수들에
  대한 초기화 */
  :
  :
 r = vdm_DefaultMod_Main(l) ;  /* 메인 함
  수 호출 */
  :
}
```

5.3. C++ 컴파일

Toolbox의 코드 생성기에 의해 생성된 DefaultMod.h와 DefaultMod.cc 그리고 implicit 함수들에 대한 C++ 코드 vdm__DefaultMod__implicit.cc와 main() 함수를 가지고 있는 md4__ex.cc의 4개의 화일을 GNU C++ 2.5.8 또는 2.6.x의 컴파일러를 이용해 컴파일 하며 이때 VDM C++ 라이브러리를 include 해야 한다. 다음은 이러한 C++ 컴파일을 위한 Makefile의 한 예이다.

```
CC = g++
INCLUDE = -Ivdmhome/include
LIB = -Lvdmhome/lib -lvdm -lCG -
liostream -lm
md4_ex : md4.o md4_ex.o
${CC} -o md4_ex md4_ex.o md4.o ${LIB}
md4_ex.o : md4_ex.cc
${CC} -c -o md4_ex.o md4_ex.cc ${INCLUDE}
md4.o : DefaultMod.h DefaultMod.cc
${CC} -c -o md4.o DefaultMod.cc $
{INCLUDE}
```

5.4 구현시 고려사항

일반적으로 MD4 알고리즘에서 사용되는 모든 상수값 및 자료들은 unsigned long 형태의 정밀도(precision)를 기본으로 하고있다. 본 논문에서 설명되고 있는 IFAD VDM-SL Toolbox의 경우 VDM 규격에서는 이러한 unsigned long 형태의 데이타 유형 선언방법이 없으며, 자연수 및 정수형으로 선언된 값은 생성된 코드에는 "Int" 유형의 클래스로 선언된다. 따라서 MD4 알고리즘에서 주로 처리되는 값들이 두배 정밀도(double precision)를 요하기 때문에 VDM 규격에서 이들은 자연수 및 정수형으로 선언할 경우 최종 실행 결과값에 오류가 발생한다. 현재 IFAD VDM-SL 에서의 real 타입이 코드생성기에 의해 Real 타입으로 전환이 되며 이 Real 타입은 두배 정밀도를 가진다. 따라서 다음과 같은 방법으로 상수 및 함수들의 정의를 VDM 규격에서 작성해야만 정확한 결과 값을 얻을 수 있다.

```
Maximum_word_value : real = (2.0**Word
  _length) - 1
A : real = 103.0 * (2**24) + 69.0*(2**16) +
  35.0*(2**8) + 1.0

Binary_to_decimal : seq of Bit --> real
    :
    :
Convert_word_to_number : Word --> real
    :
    :
```

6. 결과분석

다음 〈표 1〉은 정형화 방법을 이용해 구현된 MD4 알고리즘의 수행 결과를 RSA에서 C 언어로 구현한 코드의 결과와의 비교분석을 보여주고 있다.

RSA MD4 정형화 방법을

〈표 1〉 RSA의 MD4 코드와 정형화 방법(Formal Method)을 적용한 MD4 코드의 비교 분석

	RSA MD4	적용한 MD4
결과값	MD4 테스트벡터와 동일	MD4 테스트벡터와 동일
화일크기	279 라인	2855 라인
실행속도*	1 sec이내/ 1 block(512 bits)	20sec / 1 block(512 bits)

* 실행환경 : SunSparc 10, SunOs 4.13

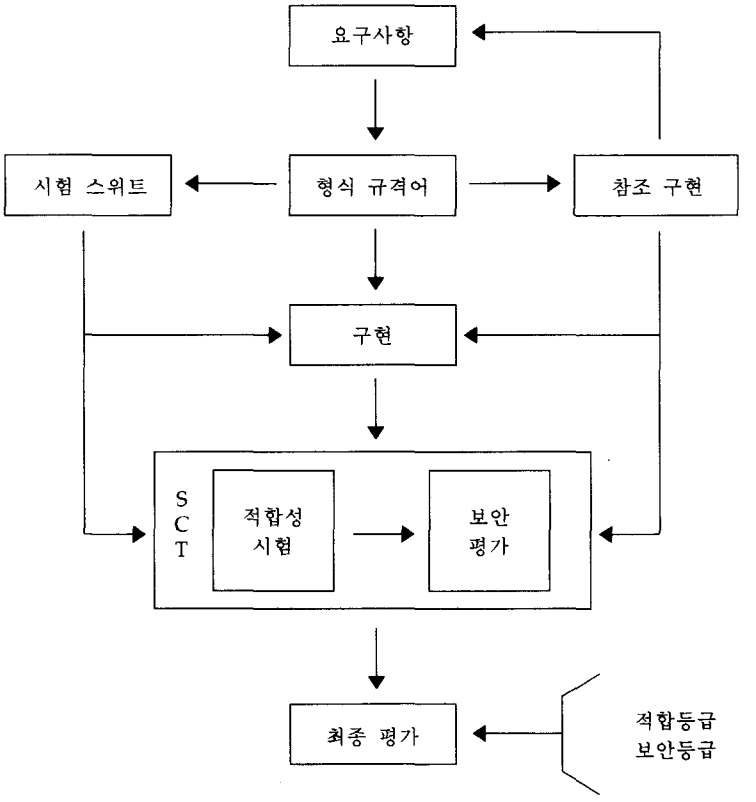
〈표 1〉에서 볼 수 있듯이 정형화 방법을 이용해 생성된 MD4 구현코드의 경우 정확한 결과값을 생성하고는 있지만 몇가지 문제점들을 가지고 있다. 첫째로는 화일의 크기가 아주 크다는 것이다. 이것은 IFAD VDM-SL Toolbox에 의해 생성된 코드에는 해당코드의 실행에는 직접적인 영향을 끼치지는 않지만 코드의 실행시 발생하는 오류의 위치가 VDM-SL 규격의 특정 위치와 매칭되게 하기위한 부가적인 코드들이 만들어지기 때문이다. 둘째로는, VDM-SL을 이용한 규격작성시 규격의 간결성을 강조하기 위해 많은 함수들이 자기호출(recursion)방법으로 표현되고 있기 때문에 코드 생성기에 의해 생성된 함수들 또한 자기호출의 형태로 구현되어 실행시 많은 메모리를 사용하고 이에 따라 전체 알고리즘의 수행속도 또한 현저히 저하되는 것으로 나타났다(입력 화일의 크기가 커질수록 기하급수적으로 수행

속도 저하). 이처럼 정형화 방법을 이용한 보안 알고리즘 구현의 경우 현재 단계로선 고려해야 할 문제점들이 많이 있어, 실제 사용하기보다는 블랙박스 시험(black box testing)과 같은 시험분야에서 결과 비교를 위해, 즉 참조구현으로 활용하는 사례가 대부분이다.

위와 같은 분석결과를 토대로 제안할 수 있는 사항으로는 첫째, 위에서 나타난 결과에서도 볼 수 있듯이 정형화 방법을 이용하여 생성된 실행코드가 정확한 결과값을 산출하고 있기 때문에 해당 VDM규격을 표준의 기술(description)에 있어서 자연어 규격과 함께 사용하거나 더 나아가 단독적으로 사용될 경우에도 기존의 자연어만을 이용한 표준기술의 경우보다 정확한 보안표준 구현을 가능하게 할 수 있다는 것이다. 즉, 보안표준들을 VDM 언어로 기술하고 이에 대한 C++코드를 생성시킨 후에, 구현자 스스로가 구현물의 결과와 비교하면서 그 정확성을 시험할 수 있다.

둘째로는 위에서 제시했던 형식규격어 및 도구의 문제점들은 활발한 연구를 토대로 충분히 개선될 수 있으며 아울러 계속 가속화되고 있는 하드웨어의 연구개발 또한 구현코드의 실행속도에 있어서 커다란 향상을 가져올 것으로 여겨진다. 따라서 IFAD VDM-SL Toolbox가 가지고 있는 컴파일러 및 GNU C++ 컴파일러에 보안상의 문제점이 없으면, 이들로 부터 생성된 코드가 블랙박스시험의 참조구현코드로 활용될 수 있을 것으로 본다.

이에 따라 보안 표준화 작업에 있어서 〈그림 3〉과 같이 형식규격어를 사용할 것을 예상할 수 있다.



〈그림 3〉 보안표준과 형식규격어

표준의 요구사항을 정의하고 이를 형식규격어로 기술하여 표준을 제정한다. 이때 형식 규격어로 부터 보안상의 위협(Threat)과 취약성(Vulnerability)을 추출하여 시험스위트(Test Suite)를 작성하고, 도구를 이용하여 참조구현을 생성한다. 표준화된 시험스위트의 사용은 개발과정에서 부터 문제점을 파악할 수 있고, 평가과정이 정확하고 신속하게 이루어질 수 있게 된다. 또한, 시험스위트와 참조구현은 공인된 평가기관 뿐만 아니라, 기존의 적합성 시험기관, 구현 개발자 등에 의해 사용된다. 현재 NPL에서는 보안 표준에 대한 시험스위트를 생성하여 변경이 어려운 ROM, CD등에 수록하여 배포할 것을 고려하고 있는 등 보안표준에 있어 형식규격어가 중요한 연구 대상이 되고 있다. 보안 표준에 대한 구현물 평가에서는 표준을 정확히 따르고 있는 지에 대한 검사와 더불어 구현물에 보안상의 문제점이 없는 지를 검사하는 보안 적합성 시험 (Strict Conformance Test : SCT)이 수행될 것으로 예상된다. SCT는 보안 구현물에 대한 평가가 보다 신속하고 정확하게 이루어 질 수 있도록 적합성 시험과 보안평가를 같이 수행하자는 것으로 영국에서 이를 제기하고 있다.

7. 결 론

지금까지 보안표준의 기술에 있어서 형식규격어의 이용에 대한 필요성에 대한 설명과 함께 보안표준의 하나인 MD4 Message Digest Algorithm을 VDM-SL로 기술하고 이에 대한 C++ 코드를 정형화 방법을 통해 생성하였다.

정형화 방법에 의해 최종 생성된 MD4 알고리즘의 실행코드의 수행 결과는 MD4의 테스트 벡터에서 규정하고 있는 결과 값과는 일치하여 구현이 올바로 되었음을 알 수 있었다. 그러나 IFAD VDM-SL Toolbox에 의해 생성된 코드는 부가적인 많은 정보들이 포함되어 있기 때문에 실제 화일의 크기가 아주 크며 실행속도 또한 늦다. 따라서 아직 이러한 도구를 이용하여 생성된 코드를 실제로 사용하기에는 여러 문제점들이 있다. 하지만 VDM 규격을 정확히 작성한다면 아주 빠른 시간내에 해당 알고리즘을 구현할 수 있기 때문에 사용자들이 직접 프로그래밍 언어로 구현한 코드의 정확성 판단을 위한 블랙박스 시험(Black Box Testing)에 사용될 참조구현 코드로서 중요한 역할을 수행할 수 있을 것이다. 또한 본 논문에서 보여 준 자연어 규격의 VDM-SL 표기에서 알 수 있듯이 보안표준들을 VDM-SL로 기술함으로써 해당 알고리즘을 분석, 이해하는데 있어서 지금까지 사용되고 있는 자연어 규격에 비해 많은 장점들을 가지고 있기 때문에 개발자들로 하여금 보다 정확한 보안 알고리즘 구현을 가능하게 할 수 있다.

최근 영국의 NPL에서는 보안표준 작성시 형식규격어의 사용을 적극 권장하고 있다. 그러나 전 세계적으로는 아직까지 보안표준에서 그 사용이 미비한 실정인데, 그 원인으로는 새로운 언어를 습득해야 한다는 부담감, 교육 및 사용경험의 부족, 사용자에게 편리성을 제공할 수 있는 도구의 부족, 형식규격어 및 해당 알고리즘을 알고있는 사람만이 표준을 제대로 이해할 수 있다는 점 등을 들 수 있다. 이와 같은 문제점에도 불구하고 영국에서는 형식규격어의 사용이 보편화되고 있으며, 네덜란드도 이에 적극 동참하는 등, 유럽은 전반적으로 형식규격어의 필요성을 공감하고 있고 실제로 다양한 대형 프로젝트에서 사용하고 있는 추세이다. 앞으로는 모든 보안 관련 표준을 형식규격어로 작성할 것을 염두에 두고 그 전단계로 자연어로 작성된 표준에 부록으로 형식규격어로 기술된 규격을 첨가하고 있다. 그 예로 ISO/IEC JTC1 SC27에서 수행하고 있는 ISO/IEC 10118-3과 4의 해쉬함수에서는 영어로 작성된 표준의 부록에 Z로 작성된 규격이

첨가되고 있으며, ISO 8731-2 MAA에서는 VDM 규격이 첨가되었다.

소프트웨어 프로젝트의 90% 이상이 부정확한 요구사항으로 다시 프로그래밍해야 하는 현실을 볼 때, 정확한 구현을 위해서는 요구사항이 명확하게 기술되는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서 본 논문에서 소개한 정형화 방법을 이용한 보안표준의 기술 및 참조코드 생성은 앞으로 대기수요가 급증할 것으로 보이는 다양한 보안표준에 대한 구현 활용에 있어서 중요한 역할을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 류재철, 장청룡, "보안표준화에 있어 형식규격어의 이용", 제5회 전산망 기술 및 표준화 심포지움, 1995.

[2] 김기수, 김영화, 류재철, "형식규격어를 이용한 보안표준 기술과 Strict Conformance Testing에 관한 연구", 충남과학연구지 제22권 제1호, 1995.

[3] NPL Data Security Group, "Standards and conformance testing in data security: Results of initial programme of investigation", NPL Report DITC 218/93, March 1993.

[4] Andrew Harry, "The use of formal method in data security standards", NPL Report DITC 205/92, August 1992.

[5] Andrew Harry, "State of art techniques in automatic generation of reference implementations & test code from formal specifications", NPL Report DITC 207/92, 1992.

[6] VDM-SL Tool Group, "Users Manual for the IFAD VDM-SL tools, July 1995.

[7] VDM-SL Tool Group, "The IFAD VDM-SL Language", September 1994.

[8] A.Harry, "VDM specification of the MD4 message digest algorithm", NPL Report DITC 204/92, August 1992.

[9] William Stallings, "Network and Internetwork Security", Prentice-Hall International Editions, 1995

부 록

1. IFAD VDM-SL Toolbox

IFAD VDM-SL Toolbox는 VDM 언어의 사용을 지원하는 도구로서 IFAD VDM-SL 규격에 대한 신텍스 및 시멘틱스 검사, C++ 코드 생성 등의 기능을 가지고 있는 도구이다. 현재 2.3 버전이 나와 사용되고 있으며 SunOS 4.1.x 또는 Solaria 2.3의 모든 Sun Spark model과 HP-UX 9.0.x의 HP 9000/7000에서 동작하고 있다. 또한 본 도구를 사용하기 위한 기본 사양으로는 최소 8MB의 메모리와 10Mb 디스크, 그리고 GNU C++ 2.5.8 또는 2.6.x의 컴파일러가 필요하며, 선택사양으로 GNU Emacs가 요구된다. 이 도구가 가지고 있는 기능을 살펴보면 다음과 같다.

1.1 Syntax checking

: IFAD VDM-SL로 작성된 규격을 입력으로 받아 그 규격에 대한 신텍스 에러를 찾아주는 기능이다.

1.2 Semantic checking(type checking)

: 신텍스 에러 체크가 끝난 규격에 대해 시멘틱스 에러를 찾아주는 기능이다.

1.3 Execution & Debugging

: VDM 규격을 인터프리터를 통해 실행시키는 기능으로서 해당 VDM 규격에 정의되어 있는 각각의 함수들을 인터프리터를 통해 규격 수준에서 실행시켜 봄으로써 함수들의 정확한 기술 여부를 판단할 수 있다. 이러한 실행 기능은 또한 Debugging 기능과 함께 쓰여 각각의 함수들에 대한 수행과정을 순차적으로 참조해 볼 수 있다.

1.4 Test coverage information

: 인터프리터를 통한 규격의 실행시 입력이 되는 테스트 데이타들이 해당 규격을 얼마나 잘 커버하는지에 관한 정보(coverage information)를 시험 스위트(test suite) 화일에 적재시켜 사용자로 하여금 이를 참조할 수 있게 해주는 기능이다.

사용자는 이 시험 스위트 화일의 참조를 통해 규격에 정의되어 있는 각 함수들에 대한 참조 횟수를 알 수 있어 규격에서 필요없이 정의된 함수의 존재 여부등을 판가름 할 수 있다.

1.5 C++ code Generator

: 주어진 VDM 규격에 대해 자동적으로 C++ 코드를 생성해 주는 기능으로서 코드 생성을 위해선 해당 VDM 규격에 대해 신텍스 및 시멘틱스 체크가 이루어져야 한다.

1.6 Latex pretty printing

: 주어진 VDM 규격에 대해 LATEX 화일을 생성해 주는 기능.

2. IFAD VDM-SL(Specification Language)

IFAD VDM-SL Toolbox에서 지원되는 언어로서 ISO VDM-SL에 실행성 및 모듈화등과 같은 약간의 새로운 개념들로 확장된 VDM언어이다. IFAD VDM-SL은 기본적으로 데이타 타입을 정의하는 부분(Data Type Definition)과, 변수들에 대한 초기값을 정의하는 부분(Value Definition), 그리고 해당 규격의 전체적인 알고리즘을 정의하는 부분(Function Definition)으로 구성되어 있다.

```
\begin{vdm_al}
    types
        데이타 타입들의 정의
    values
        상수값 또는 변수들의 초기화
    functions
        함수들의 정의
\end{vdm_al}
```

2.1 데이타 타입 정의(Data Type Definition)

데이타 타입 정의는 VDM 규격에서 사용되는 변수들에 대한 타입을 정의하는 부분으로 타입 정의시 해당 변수에 대한 값의 범위를 제한 설정하기 위해 Invariant가 쓰여지기도 한다. IFAD VDM-SL에서 사용되는 데이타 타입으로는 기본 타입으로 Boolean Type과 Numeric Type이 있으며, 동일한 타입의 원소들이 비 정렬된 형태의 집합(unordered colle-

ction)을 이루는 Set 타입과, 정렬된 형태의 집합(ordered collection)을 이루는 Sequence 타입 그리고 파스칼 언어의 "enumerated type"과 유사한 타입으로 문자 스트링을 하나의 타입으로 선언하는 Quote 타입, C 언어에서의 record와 같은 composite 타입등이 있다. 다음은 IFAD VDM-SL에서 데이타 타입을 정의하는 하나의 예이다.

```
types
Number = nat
inv Number == Number <= Maximum
_word_value;

Bit = nat
inv Bit == Bit in set {0,1};

Word = seq of Bit
inv Word == len Word = Word_length;

MD_Buffer = compose MD_Buffer of
        A : Word
        B : Word
    end
```

즉, Number는 nat 타입의 변수로서 Number가 가지는 값은 Maximum__word __value보다 작거나 같아야 하며, Bit도 nat 타입의 변수로서 Bit은 0 또는 1 만의 값을 가진다. 그리고 Word는 Bit 타입의 sequence로 구성되어 있으며 Word의 길이는 Word__length와 같아야 함을 기술하고 있다. 마지막으로 MD__Buffer는 Composite 타입으로 두개의 필드 A,B로 구성되어 있으며 각 필드의 값은 Word 타입으로 선언된 예이다.

2.2 Value 정의(Value Definition)

규격에서 사용되는 변수들에 대한 초기값을 주는 부분으로서 다음의 예와 같다.

```
values

Word_length = 32;
Maximum_word_value = 2**Word_length - 1;
Constant_A = Number_to_word(254);
```

즉, Word__length를 32로, Maximum__word __value는 2**32 - 1 그리고 Constant__A는 자연수를 Word 타입의 비트 sequence로 바꿔 주는 함수 Number__to__word(254)의 결과 값으로 초기화 된다.

2.3 함수 정의(Function Definition)

규격 전체의 알고리즘을 정의하는 부분으로 explicit 함수정의와 implicit 함수정의의 2가지 방법이 있다. explicit 함수정의는 해당 함수가 어떤 값들을 생성하며 또한 그러한 결과를 생성하기 위해 어떠한 연산들이 수행 되어야 하는 지를 모두 기술하는 함수 정의 방법이고, implicit 함수정의는 해당 함수가 단지 어떤 결과값들을 생성하는 지만 기술하고 그러한 결과들을 생성하기 위해 거쳐야 할 과정에 대한 기술은 하지 않는 함수 정의 방법이다. 이러한 implicit 함수정의는 표준을 기술할 때 해당 함수에 대한 구체적인 언급은 없지만 표준의 정확한 기술을 위해 부가적인 함수 정의가 필요할 때 사용되며 이 implicit 함수의 경우 IFAD VDM-SL Toolbox를 통한 C++ 코드 생성시 코드 생성이 되지 않기 때문에 사용자가 직접 구현해야 하는 함수 이다. 즉 표준에 명시되어 있는 함수가 아니기 때문에 사용자의 편리에 따라 사용자 나름대로 구현해 사용하는 함수이다. 함수 정의의 기본 구조는 다음과 같다.

- explicit 함수 정의

  함수이름 : 입력 타입 -> 출력 타입
  함수이름 (입력 인자) = =
  :
  body
  :
  [pre condition]
  [post condition]

- implicit 함수 정의

  함수이름 (입력 인자 : 타입) 출력 인자 : 타입
  [pre condition]
  post condition

여기서 precondition은 해당함수의 입력 변수가 가져야 할 값의 제한 범위를 기술하는 부분을 말하며, post condition은 함수의 결과값이 가져야 할 값의 제한 범위를 명시하는 부분을 의미한다. implicit function정의 경우 post condition은 반드시 명시 되어야 한다. 이것은 post condition을 통해 해당 함수의 결과를 추측할 수 있기 때문이다. 다음은 함수를 정의하는 한 예이다.

Functions

Div1 : nat × nat -> real
Div1(p,q) ==
  p/q
pre q <> 0
post p = RESULT × q

Div2(p,q : nat) r : real
pre q <> 0
post p = r × q

즉, Div1은 입력으로 두개의 nat 타입 값을 받아 이들에 대한 "/" 연산을 수행한 결과 값을 real 타입으로 출력하며, 입력 값에 대한 pre condition q 〈〉 0과 출력값에 대한 post condition p = RESULT × q가 주어진 explicit 함수의 정의이고 Div2는 Div1에 대한 implicit 함수 정의를 나타내고 있다.

□ 著者紹介

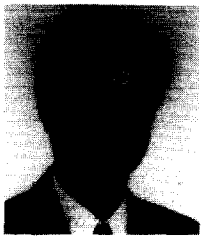
김 영 길

1990년 한양대학교 전자계산학과 졸업 (학사)
1992년 숭실대학교 대학원 전자계산학과 졸업 (석사)
1992년 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 연구원

류 재 철

1985년 2월 한양대학교 산업공학 학사
1988년 5월 Iowa State Univ. 전산학 석사
1990년 12월 Northwestern Univ. 전산학 박사
1991년 2월 - 현재 충남대학교 컴퓨터과학과 조교수

※ 관심분야 : 컴퓨터 및 통신 보안체제, 네트워크 관리, 분산처리



장 청 룡

1957년생
1980년 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1986년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1995년 성균관대학교 대학원 정보공학과 졸업(공학박사)
1979년 ~ 1983년 한국전기통신연구소 연구원
1984년 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 선임연구원

※ 관심 분야 : 정보보호, 시험평가

김 기 수(金基洙)

1994년 충남대학교 전산학과 학사
1996년 충남대학교 전산학과 석사
1996년 ~ 현재 한국전산원 연구원

※ 주관심분야 : 컴퓨터/네트워크 보안, 보안평가

김 영 화

1987.2 : 전남대학교 계산통계학과 졸업(이학사)
1997.2 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사과정중
1988.2 ~ 현재 : 한국전자통신연구소 광대역프로토콜연구실 선임연구원

※ 주관심분야 : FSAN, IN, Security, Network Management 등