

시스템엔지니어링 방법을 적용한 노심용융방지 초소형 모듈원자로 국내 개발타당성 검토

한기인*

한양대학교

A Study on the Feasibility of Domestic Development of a Melt-down Proof Modular Micro Reactor (MDP-MMR) applying Systems Engineering Method

Ki In Han*

Hanyang University

Abstract : The purpose of this paper is to present the results of the study, applying Systems Engineering(SE) method, on the feasibility of developing a Melt-down Proof Modular Micro Reactor(MDP-MMR) for its future deployment in Korea. The reactor is being developed by NCSU (North Carolina State University) due to its advantage of melt-down proof nature of the reactor core. For this paper, the characteristics of the MDP-MMR has been studied in terms of fuel characteristics, inherent safety features and passive safety system. The NCSU's development process has been reviewed applying the SE method, and further research is recommended for the feasibility study on deploying such a modular micro reactor in Korea.

Key Words : Reactor Core, Modular Reactor, Melt-down Proof, TRISO Fuel, Inherent Safety, Passive Safety

Received: November 12, 2019 / **Revised:** November 28, 2019 / **Accepted:** December 2, 2019

* 교신저자 : Ki In Han, kihan123@hotmail.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

미국의 NCSU(North Carolina State Univ.)에서 기술연구과제로 수행하고 있는 “노심용융방지 초소형 모듈원자로(Melt-down Proof Modular Micro Reactor : MDP-MMR) 개발 및 건설타당성 평가” 결과에 대하여 그 내용을 기술적인 관점에서 검토해보고 MDP-MMR 원자로 특성(핵연료, 본질적으로 안전한 노심 구조 및 피동형 안전계통) 및 안전성에 대하여 평가하였으며 동일 노형의 원자로 국내 개발 타당성에 대하여 검토하였다[1].

이상과 같은 초소형 가스냉각원자로의 개발연구는 본질적으로 안전하고 소형이지만 발전 단가가 저렴한 원자로를 개발하려는 노력의 일환으로 미국을 중심으로 추진되고 있다.

본 논문에서는 시스템엔지니어링(SE: System Engineering) 기법을 적용하여 MDP-MMR 원자로 개발과정과 국내 건설타당성을 원전의 안전성/경제성 향상측면과 전기 생산 이외에 고온에너지의 산업적 활용측면에서 검토하였으며, 끝으로 향후 초소형 모듈원자로의 국내 연구개발 방향을 제시하였다.

2. MDP-MMR 원자로 개발배경 및 특성

2.1 MDP-MMR 원자로 개발배경

원자력발전소(원전)의 건설 및 운영은 운영에 따른 안전성 확보가 전제되어야 하며 이를 위해원자력산업계에서의 원전 안전성 향상을 위한 노력은 꾸준히 진행되어 왔다. 따라서 요즘의 신형원자로 연구개발은 본질적으로(Inherently) 안전하고 경제적인 신 개념의 소형 원자로를 개발하는 방향으로 진행되고 있다. 특히 일본 Fukushima원전사고 이후 이러한 원자로개발에 대한 사회적 요구가 증대하고 있는데 이들 요구사항을 요약하면 다음과 같다 :

- 안전성 확보측면에서 냉각재완전상실사고와 같은 가상사고 상황에서도 핵연료의 용융이 발생하지 않음
- 방사능물질의 원자로 외부로의 누출 차단으로

사고 발생 시에 주민 소개가 불필요함

- 원자로 수명기간동안 핵연료의 추가공급이 필요치 않는 원자로를 개발함; 이로 원전의 핵비확산성(Nuclear Non-Proliferation) 제고
- 사고 발생 시 사고 수습과정에서 운전원의 조치가 불필요함.

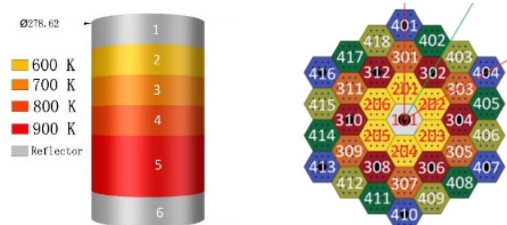
여기서 본질적(또는 고유) 안전성이란 원자로 자체에 내재된 안전기능으로 인하여 특별한 타 안전계통의 지원 없이도 안전성이 확보된다는 의미이다.

2.2 원자로심 형상 및 특성

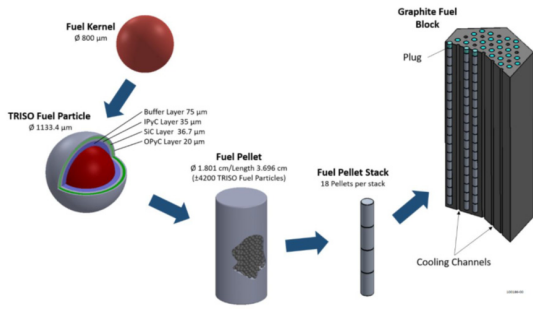
열 출력 40 MWth의 MDP-MMP 원자로는 축 방향으로 4개의 핵연료 층과 2개의 반사체(Reflector) 층의 원주형 원자로이다. 각 층은 육각형의 그라파이트 블록으로 이루어지며 각 블록은 UCO(Uranium Carbide Oxide) TRISO (TRi-structural ISotropic) 입자가 SiC(Silicon Carbide) 콤팩트에 캡슐화 되어 있는 형태이다[2].

그림 1은 MDP-MMR 원자로심의 축 방향 구조 및 반경 방향의 핵연료블록 배열상태를 보여 주고 있다.

우라늄 농축도는 12%로 초기 핵분열원은 노심 63개소에 분산되어 있고, 노심은 폭 30cm의 육각형집합체 37개로 구성되며 제어봉집합체와 핵연료 집합체로 구분된다. 제어봉집합체에는 48개의 연료 핀과 18개의 He 냉각채널이 있고 핵연료집합체에는 54개의 연료핀과 19개의 냉각채널이 있다. 냉각채널의 지름은 1.55cm 이고 연료핀의 지름은 2.17cm, 제어봉의 지름은 8cm이다. 반사체내에 있는 제어봉



[Figure 1] MDP-MMR Reactor Core Axial Direction Structure and Radial Direction Fuel Block Arrangement



[Figure 2] MDP-MMR Reactor Core Fuel Elements (Fuel Kernel, TRISO Fuel Particle, Fuel Pellet, Fuel Pellet Stack, Graphite Fuel Block)

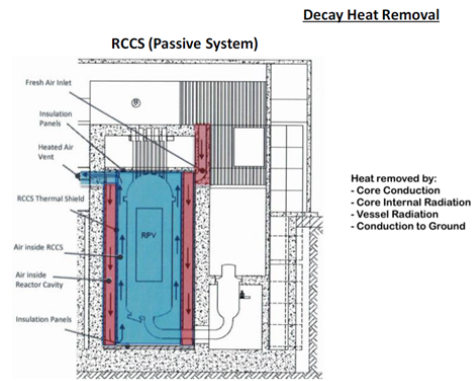
집합체와 핵연료집합체는 핵연료봉의 유무를 제외하고는 연료층의 기하학적 구조와 동일하다. 그림 2는 MDP-MMR 원자로심의 핵연료요소 부품들을 보여준다.

TRISO 입자연료는 우라늄, 탄소, 산소 합성연료 커널(Kernel)과 이를 피복하고 있는 3개 층의 세라믹 재료로 구성되어 있어 핵분열생성물의 누출을 효과적으로 억제할 수 있다. 이들 입자는 매우 작고 (약1mm) 단단하며 원주형의 펠릿 그리고 펠릿 스택(Stack)으로 만들어져서 그라파이트 핵연료블록 안에 들어간다. TRISO 연료는 경수로 핵연료에 비하여 중성자 조사에 잘 견디고 부식, 산화 그리고 고온 환경에 강한 특성을 갖는다. 아울러 각 연료입자는 기능상 원전의 격납용기와 같은 기능을 갖으며 3개의 피복층 때문에 핵분열생성물이 모든 운전/사고조건에서도 외부로 잘 누출되지 않는다.

2.3 MDP-MMR 원자로의 안전개념

MDP-MMR 원자로는 고유안전성(Inherent Safety)을 보유하도록 원자로심이 구성되어 있으며 만약 원자로에 사고가 발생할 경우에는 능동계통의 작동 없이 피동계통에 의해 노심의 열이 안전하게 제거되고 핵연료 건전성이 유지 될 수 있도록 아래와 같이 설계 된다:

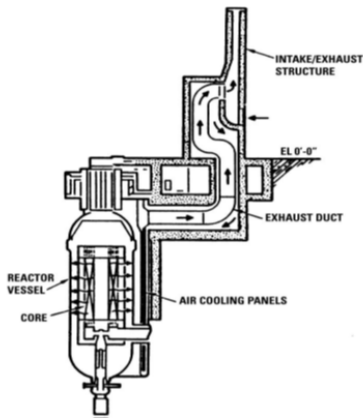
- 세라믹 미립피복(FCM ; Fully Ceramic Micro-encapsulated) 핵연료를 사용함
- 그라파이트를 감속재/구조물로 사용함으로 노심이 높은 열용량(Heat Capacity)과 넓은 표면



[Figure 3] MDP-MMR Passive and Inherent Safety Decay Heat Removal System

열전달단면적 (Surface Heat Transfer Area)을 보유하도록 함

- 원자로 출력밀도가 낮음(5.9 watts/cm^3 대비 경수로의 100 watts/cm^3)
 - 불활성의 He 가스냉각재를 사용하여 방사능 물질의 냉각재내 함유량과 표면 석출량을 최소화시킴
 - 원자로심이 음의 온도반응도계수(Negative Temperature Coefficient of Reactivity)를 갖도록 해 사고 발생 시 원자로가 자동정지(Self Shutdown)되고 아 임계(Subcritical) 상태를 유지함
 - 핵연료 손상 시 방사성물질이 외부로 누출 되지 않도록 다중방벽(Multi-Barrier)을 갖도록 함
 - 사고가 발생하고 전원공급이 불가능할 경우 원자로의 고유안전성과 피동 원자로캐비티 냉각계통(RCCS: Reactor Cavity Cooling System)에 의해 자연순환 냉각이 이루어짐
 - 만약 원자로 캐비티냉각기능이 상실되어도 지표면으로의 복사 열전달에 의하여 핵연료 용융이 방지되어 원자로의 안전성을 확보할 수 있음
- 그림 3은 MDP-MMR 원자로의 붕괴열 제거를 위해 고유안전성을 보유한 원자로와 피동안전계통을 보여주며, 그림 4는 MDP-MMR 원자로 캐비티 냉각계통의 개략도를 보여준다. RCCS(원자로 캐비티냉각계통)는 대기중의 찬 공기를 외부로부터 받아들여서 원자로심에서 RCCS로 전달되는 열을 대류작용에 의하여 제거한다.



[Figure 4] MDP-MMR RCCS (Reactor Cavity Cooling System) Schematic Drawing

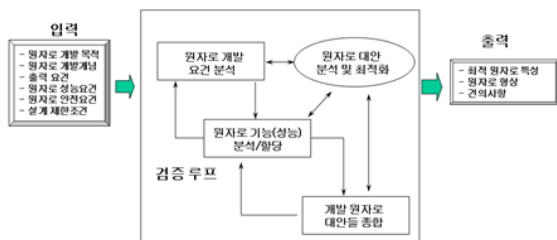
3. SE방법을 적용한 MDP-MMR 개발 과정 평가

3.1 계통 개발 SE 프로세스

그림 5는 MIL-STD-499B와 과거 원자로 관련 연구에 적용했던 아키텍처 개발 방법론에 기초한 MDP-MMR 원자로의 개발프로세스를 보여주고 있다[3],[4]. MIL-STD-499 표준은 가장 오래된 표준이지만 계통의 구조적 분석 및 설계에 필수적이고 논리적인 방법론을 제시하며, 특히 계통의 상위 설계 즉 계통아키텍처 개발에 효과적인 것으로 판단된다.

MDP-MMR 원자로계통 개발과정의 검토에 사용한 SE 프로세스는 다음과 같다:

- 계통 설계목적 확인
- 계통 요건 분석



[Figure 5] MDP-MMR Reactor System Requirements and Architecture Definition Process

- 기능요건/성능요건/안전요건/설계제한치
- 계통 기능 분석/할당, 조합 및 최적안 도출
 - 기능 정의 및 기능에 성능 부여
 - 기능 아키텍처 개발
 - 기능 아키텍처를 물리 아키텍처로 전환
 - 대안들(Alternatives) 조합(Synthesis)
 - 대안 트레이드 분석 및 최적 안 도출

3.2 MDP-MMR 원자로 개발목적 확인

MDP-MMR 원자로의 개발목적은 원전에서 가장 심각한 사고 중 하나인 냉각재상실사고가 발생하고 동시에 원자로가 정지되지 않는 상황이 발생할 때에도 핵연료의 용융이 발생하지 않는 초소형 원자로를 개발하는데 있다.

3.3 MDP-MMR 원자로 설계요건 정의

MDP-MMR 원자로의 설계요건은 다음과 같다:

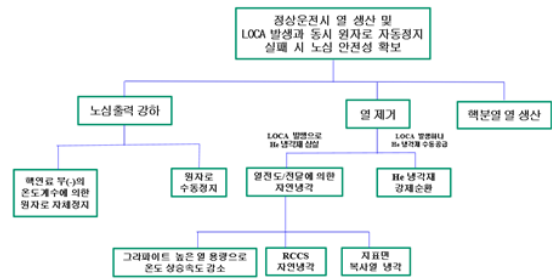
- 본질적으로(Inherently) 안전한 신개념의 초소형 원자로를 개발함 :
 - 고유안전성(Inherent Safety)을 보유하고 있어 사고가 발생하고 원자로가 정지되지 않아도 원자로가 자동으로 정지되어(Self-Shutdown) 원자로 아 임계상태가 유지됨
- 냉각재완전상실과 같은 극한의 사고가 발생하고 원자로 자동정지가 이루어지지 않는 상태에서도 노심 용융이 발생치 않음
 - 피동설비 RCCS(Reactor Cavity Cooling System)의 자연순환에 의하여 핵연료의 용융을 방지함
- 극한 사고 발생 시에도 방사성물질이 원자로 외부로 방출되지 않아 주민소개 불필요함
- 원자로 수명기간(20년)동안 핵연료 재장전이 불필요함(핵 비확산성에 유리)

3.4 MDP-MMR 원자로 기능 정의

MDP-MMR 원자로의 기능은 다음과 같다:

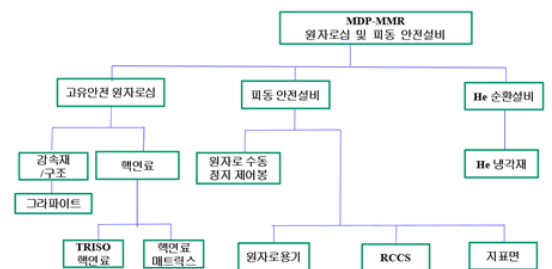
- 열 생산
 - 노심에서 핵분열로 인해 열에너지 생산

- 열 제거
 - 정상상태 및 사고 시 노심 가스냉각재에 의하여 열 제거
 - 사고시 피동계통의 자연순환에 의하여 노심 열 제거
 - RCCS 의 상실시 저온의 지표면을 통해 열 (복사열) 제거
- 핵반응도 제어
 - 고유안전기능: 핵연료 부의 온도반응도 계수에 의하여 원자로의 자동정지 유도
 - 피동안전계통: 제어봉 자유낙하를 통해 원자로 정지
- 원자로심 온도상승 제어
 - 고유안전기능: 감속재며 /노심 구조재인 그라파이트의 높은 열 용량으로 인하여 사고시 온도상승률 감소



◆ LOCA : 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident)

[Figure 6] SMDP-MMR Reactor Core Functional Tree



◆ RCCS : Reactor Cavity Cooling System

[Figure 7] MDP-MMR Reactor Core Physical Tree

3.5 MDP-MMR 원자로 기능 아키텍처 정의

앞 절에서 정의된 원자로심 기능들의 연관관계를 보여주는 MDP-MMR 원자로심의 기능 아키텍처를 구성하기 위하여 먼저 기능 계층구조(Hierarchy)를 상위기능을 하위기능으로 분리하여 기능수목도를 작성하고 이 기능을 할당할 수 있도록 기기/부품의 물리수목도를 직성하였다. 그림 6은 원자로심 기능의 계층구조를 보여주는 기능수목도이고 그림 7은 기기/부품 물리수목도이다.

표 1은 원자로심의 기능을 기기/부품에 할당 (Mapping)하기 위한 시스템 기능/기기매트릭스이다. 그림에서는 각 기기/부품에 하나 이상의 기능이 할당된 것을 확인할 수 있다.

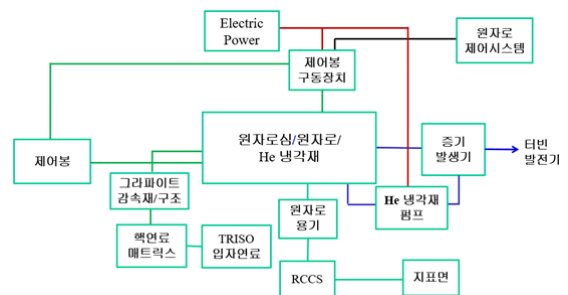
<Table 1> Reactor System Function/ Component Matrix

	핵분열 열 생산	온도 상승 감소	자연냉각	복사열 냉각	냉각재 강제순환	핵연료 부의 온도계수로 원자로 정지	원자로 자동정지
TRISO 핵연료	x					x	
핵연료 매트릭스		x					
그라파이트		x					
제어봉							x
RCCS			x				
원자로용기			x				
지표면				x			
He 냉각재					x		

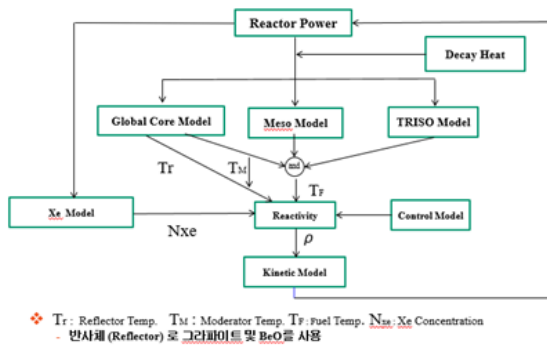
3.6 MDP-MMR 원자로심 물리 아키텍처 정의

그림 8은 MDP-MMR 원자로 및 피동안전계통의 물리아키텍처를 보여준다. 아래의 물리아키텍처는 계통의 요건을 만족시키는 많은 대안 중에서 채택한 하나의 대안이다.

핵연료는 TRISO 핵연료를 냉각재로는 He 가스를, 감속재/구조물로는 그라파이트를 선택했으며 2중



[Figure 8] MDP-MMR Reactor and Passive Safety System Physical Architecture



[Figure 9] MDP-MMR Reactor Core Analysis Model

의 제어봉도 안전성 제고를 위하여 고려하였고 He 가스냉각재의 강제순환에 의한 열 제거의 가능성도 열어 놓았다.

3.7 원자로심 온도변화 및 동특성 분석모델

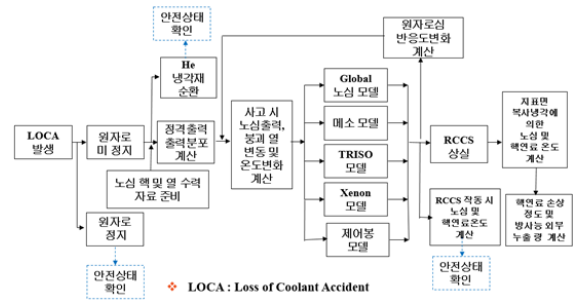
원자로에 사고가 발생할 경우 안전성을 분석 하기 위하여는 시간에 따른 원자로심의 온도 변화와 노심 출력변화를 예측해야 한다. 이를 위해 원자로심 온도변화 및 동특성 분석모델이 개발되었다. 그림 9는 MDP-MMR 원자로심 온도변화 및 동특성 분석모델을 보여준다.

위의 모델은 다음과 같은 원자로심 변수의 시간에 따른 변화를 예측하는데 사용되었다

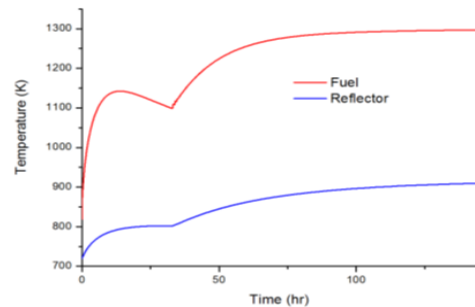
- 노심 출력 변화
- 노심 핵연료 및 감속재구조물 온도 변화
- 구조물 온도변화로 인한 반응도 피드백 효과 및 반응도 변화
- Global 노심모델 + Meso 모델 + TRISO모델 계산을 통한 노심 및 핵연료 온도변화

위에서 구해진 핵연료 온도는 반응도 피드백 계산에 사용될 뿐 아니라 핵연료의 용융이 발생하는지를 확인하는 변수가 된다.

그림 10은 MDP-MMR 원자로심의 출력, 온도 변화 및 핵연료거동 분석논리도를 보여준다. 냉각재 상실사고가 발생하고 제어봉이 삽입되지 않는 상태에서 원자로심 부의 온도반응도 피드백에 의하여 원자로가 자동정지(Self Shutdown)되는 것을 확인할 수 있다. 또한 피동안전계통인 RCCS(원자로캐



[Figure 10] MDP-MMR Reactor Core Power & Temperature Variation and Fuel Performance Analysis Logics



[Figure 11] Fuel and Reflector Temperature Transient during LOCA without Scram

비티냉각계통)에 의한 냉각으로 핵연료에 용융이 발생하지 않는 다는 것도 확인할 수 있다.

3.8 MDP-MMR 원자로 안전해석 결과

그림 11은 원자로에 냉각재 완전상실사고(LOCA; Loss of Coolant Accident)가 발생하고 동시에 원자로가 정지되지 않는 사고가 발생할 경우 핵연료 및 반사체블록에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다.

경수로와 달리 가스냉각로에서는 그라파이트 감속재블록에서의 열전도와 원자로용기 외곽 표면에서의 복사열전달이 냉각재상실사고 발생시 원자로의 잔열(붕괴열)을 제거함으로써 사고결과를 크게 완화시킨다. TRISO 연료가 온도 2000K까지 견전하고 기존 핵연료 설계제한치가 1620K(1350C)인 것을 감안한다면 MDP-MMR 설계는 안전성을 만족시키는 것으로 평가된다. 즉, 원자로 운전 중 이상상태가 발생하고 실령 원자로 정지가 이루어지지 않더라도 원자로는 핵연료에서의 도플러효과에 의

한 음의 반응도 삽입으로 자동정지상태로 전환되며 핵연료의 최고온도도 제한치를 초과하지 않는 것으로 평가되었다.

4. 결론

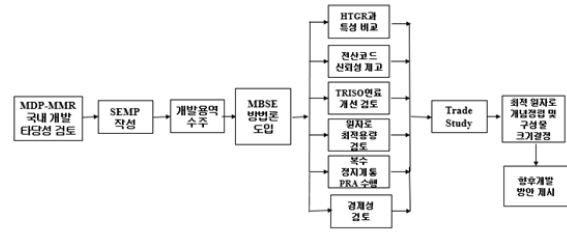
미국 NCSU(North Carolina State Univ.)가 개발하고 있는 원자로는 본질적으로 안전한 신개념의 초소형 원자로로써 다음과 같은 고유 안전성과 피동냉각능력을 보유한 것으로 평가된다:

- 노심 온도에 대한 음의 반응도계수로 사고 발생시 제어봉 삽입 없이도 원자로를 자동 정지(Self Shutdown) 시킴
- 노심 출력밀도(5.9 watts/cm³)가 낮아 자연 순환에 의한 열 제거가 용이하고 RCCS의 자연 순환에 의하여 노심이 냉각되어 핵연료 용융을 방지할 수 있음.

이상과 같이 MDP-MMR 원자로는 원자로심 자체가 보유한 고유안전성으로 인해 안전성이 확보되고 기존 경수로에서와 같은 안전 설비의 추가적인 확충이 불필요하므로 안전성 제고에 소요되는 비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상되는바 경수로에 적용했던 규모의 경제가 적용되지 않아 소형 원자로의 발전단가를 크게 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

향후 연구방향으로는 국내에서도 MDP-MMR 원자로와 같은 노심용융방지 초소형 가스냉각로를 개발하는 것이 필요할 것이라 사료되며 다음과 같은 연구 추진방향을 제안한다.

- 현재 한국원자력연구원(KAERI)에서 수행 중에 있는 HTGR(High Temperature Gas-cooled Reactor) 대비 초소형 가스냉각 원자로의 장 단점을 비교하고 개발을 위한 타당성 검토를 추진하도록 함[5].
- 초소형 혁신 원자로(고유안전성을 갖는 초소형의 원자로) 개발로 가격경쟁력이 있는 신개념 원자로의 국내 개발을 조기 실시함.
- NCSU에서 평가에 사용했던 모델 및 전산 도



[Figure 12] A Recommended Korean Type MDP-MMR Reactor System Development Strategy

구 그리고 분석데이터의 신뢰도를 점검하고 신뢰할 수 있는 전산도구를 포함 분석 방법론을 개발함

- MDP-MMR의 성능 및 안전성을 제고시킬 수 있는 방안을 다음과 같이 검토하도록 함:
 - 소형 가스냉각원자로의 용량에 대한 민감도 분석을 추진(기술성/안전성/경제성)
 - TRISO 핵연료의 성능개선 가능성 검토
 - Dual 제어봉트레인 적용으로 인한 안전성 제고 대비 비용효과 분석(PSA 수행에 의한 안전성 평가 및 경제성 검토)
 - 핵연료 농축도 변경에 따른 안전성 민감도 분석
- 경수로 대비 가스냉각로 규모의 경제에 대한 예비분석과제를 추진함
- 국내에서 추진할 연구과제 개발을 위하여 SEMP (Systems Engineering Management Plan)를 적용하고 MBSE(Model Based Systems Engineering) 기법을 사용함.

그림 12는 향후 한국형 MDP-MMR 원자로의 국내 연구방향을 과제 흐름도 형식으로 제시한다.

References

1. Ayman Hawari, Development and Deployment of a A Melt-down Proof Modular Micro Reactor (MDP-MMR), NCSU Project No. 14-6782, April 2, 2018.
- 2 J.D. Hales, R.L. Williamson, S.R. Novascone,

D.M. Perez, B.W. Spencer, G. Pastore, Multi-dimensional Multiphysics Simulation of TRISO Particle Fuel, Journal of Nuclear Materials, Vol. 443, Issues 1-3, Nov. 20130.

3. MIL-STD-499B Military Standard - Systems Engineering - Draft, Wash. D.C. U. S. Department of Defense, 1994.

4. M.W. Choi, K.W. Kim, K.I.Han, Systems Engineering Approach to Reengineering of YGN 3&4 Safety Depressurization System Retrofit Design, Journal of the KOSSE Vol. 11, No. 1, June 2015.

5. J. Kinsey, Proceeding of the IAEA Technical Meeting of the Safety of HTGRs in Light of Fukushima Daiichi Accident 2014.