

## 노내계측계통 상부탑재에 의한 중대사고 대처 영향<sup>§</sup>

서 정 수<sup>\*\*</sup> · 김 한 곤<sup>\*</sup>

\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

### Effect of Top-Mounted ICI on Severe-Accident Mitigation

Jungsoo Suh<sup>\*\*</sup> and Han Gon Kim<sup>\*</sup>

\* Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.

(Received January 15, 2015 ; Revised August 4, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

**Key Words:** TM-ICI(상부탑재 노내계측계통), Severe Accident(중대사고), IVR-ERVC(노내 노심용융물 억류 및 원자로 용기 외벽냉각), Core Catcher(노외 노심용융물 냉각설비)

**초록:** 노내계측계통의 설치 위치 및 케이블의 관통위치가 중대사고 대처계통에 미치는 영향을 노내 노심용융물 억류 및 원자로용기 외벽냉각 전략과 노외 노심용융물 냉각계통을 중심으로 조사하였다. 기존에 국내원전에서 주로 사용되었던 노내계측계통의 원자로 용기 하부탑재 및 ICI케이블의 원자로 용기 하부 관통이 중대사고에 미치는 영향을 정리하고, 이러한 단점을 개선하기 위해 노내계측계통의 ICI 케이블이 원자로 용기 상부를 관통하는 상부탑재 노내계측계통의 장점을 기술하였다.

**Abstract:** The effects of the mounting location of ICI cables on severe accident mitigation systems, specially IVR-ERVC (In-Vessel Retention by External Reactor Vessel Cooling) and core catcher (Ex-vessel corium retention and cooling system), are investigated. The effects of bottom-mounted ICI strategy on severe accident mitigation are summarized and advantages of top-mounted ICI to improve severe accident mitigation are also highlighted.

## 1. 서 론

핵분열 에너지를 이용하는 원자력발전소의 원자로는 원자로 출력 정지 시에도 핵분열생성물의 지속적인 붕괴로 열이 발생하므로 원자로 노심의 냉각성 확보가 중요하다. 그러나 만약의 사고 시 노심의 냉각재 상실 또는 냉각 유량 감소로 노심의 냉각이 불충분하게 되면 원자로 노심은 과열되고 용융까지 이르게 된다. 이러한 중대사고가 발생하면 고온의 용융된 노심이 원전의 안전을 위한 다중 방호벽, 즉 원자로용기 및 격납용기의건전성을 위협할 수 있다.

중대사고 발생 시, 원자로 용기와 격납용기의 노심용융물에 의한 파손을 방지하기 위한 주요 중대사고 대처설비로는 다음과 같다.

- 원자로 공동에 냉각수를 충분히 채워 원자로용기 외벽 냉각을 증진시켜 원자로용기의 열적 파손을 막고 노심용융물을 원자로용기 내부에 억제하는 IVR-ERVC(In-Vessel Retention by External Reactor Vessel Cooling)
- 원자로용기 파손 시 노심용융물이 원자로 공동으로 이동되어 콘크리트 바닥을 침식하는 것을 방지하고자 원자로 공동 내에 노심용융물을 받아 담을 수 있는 구조물을 설치하고 냉각수를 주입하여 노심용융물의 장기 냉각을 도모하는 Core Catcher

본 논문에서는 원자로용기 하부로 관통하는 BM-ICI(Bottom-Mounted ICI) 구조가 중대사고 대처 설비 또는 중대사고 관리 전략에 미치는 영향을 정리하고, 이의 단점을 개선하기 위해 ICI 케이블을 원자로용기 상부로 관통하는 TM-ICI (Top-Mounted ICI) 경우 중대사고 측면에서의 개선점 등에 대해 기술하였다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11-14., 김대중컨벤션센터) 발표내용을 토대로 한 논문임.

† Corresponding Author, jungsoosuh@khnp.co.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 2. BM-ICI 중대사고 영향

### 2.1 BM-ICI 관통부 파손

BM-ICI 설계 특성이 중대사고 대처 및 완화전략에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 BM-ICI 관통부 파손 현상은 주로 온도와 압력에 의한 직접적인 파손과 이에 따른 용융물의 관통관 내부로의 흐름, 용접부의 강도 상실에 의한 관통관의 방출에 의한 사고로, 미국 FAI,<sup>(1)</sup> 스위스 CORVIS, 미국 SNL<sup>(2)</sup> 및 한국의 KAERI 실험<sup>(3)</sup> 등의 연구 사례가 있다.

EPRI가 지원한 FAI 실험은 노심용융물과 압력용기 하부헤드 내의 냉각수 및 구조물과 반응에 대한 정보를 생산하는 목적이었다. 실험 결과, 물은 노심용융이 빙결되는데 효과적인 열 흡수로서 파손된 압력 경계를 재 밀봉하는 효과가 있으며, thimble tube와 외부관 사이의 환형에 물이 채워진 경우 용융물이 통과하여도 열 침식으로부터 thimble tube를 효과적으로 보호하는 것을 관찰하였다.

미국 SNL의 LHF 실험의 목적은 중대사고시 원자로용기 하부헤드가 파손되는 초기의 조건을 정의하고 물에 의한 노내 냉각 및 크립 변형 가능성을 검토하기 위한 것이다. 실험 결과, 압력 용기의 국부적인 가열은 국부적으로 파손이 발생하였고, 가열된 지역의 파손이 컸다. 가열 방법에 관계없이 파손 개시와 최종 파손에 대한 시간은 매우 잘 일치하였다. 관통부가 있는 용기는 용기의 전체적인 변형에 따른 큰 응력 때문에 용접 손상으로 빨리 파손되었고, 압력은 용기 파손에 큰 영향을 주었다.

한국원자력연구원 (KAERI)의 실험 목적은 APR1400 원전의 외벽냉각 시 원자로용기 하부구 건전성을 평가하는 것이다. 실험 결과, 원자로용기 ICI 노즐과 thimble 튜브 사이의 환형관 내부에 냉각수 존재 유무에 따른 용융물의 침투 거리를 MBFM(Modified Bulk Freezing Model)을 사용하여 계산한 결과와 비교한 결과, 실험에서 용융물의 침투 거리가 짧았음을 알 수 있다. 이는 MBFM이 환형관 내부에서 노심 용융물이 모두 고화되었을 때 용융물의 이동이 정지한다는 가정 아래 용융물의 침투 거리를 보수적으로 계산하기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 실험 측정값과 계산 값에 차이는 존재하지만 모델 계산과 실험 결과 모두 환형관 내부에 냉각수가 존재하는 경우에 용융물의 이동 거리가 짧게 나타났으며 이를 통해 환형관 내부에 냉각수의 존재 유무가 용융물의 침투거리를 결정한다는 사실을 확인할 수 있었다.

### 2.2 원자로용기 외벽 냉각 (IVR-ERVC)

노내 노심용융물 역류(IVR)는 노심용융물의 냉각을 통해 원자로용기의 파손을 방지하여 용융물을 원자로용기 하부에 가두어 두는 개념으로, 가동 원전의 중대사고 관리 및 신규 원전의 중대사고 대처 설비로 널리 적용되고 있다. IVR-ERVC 개념은 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

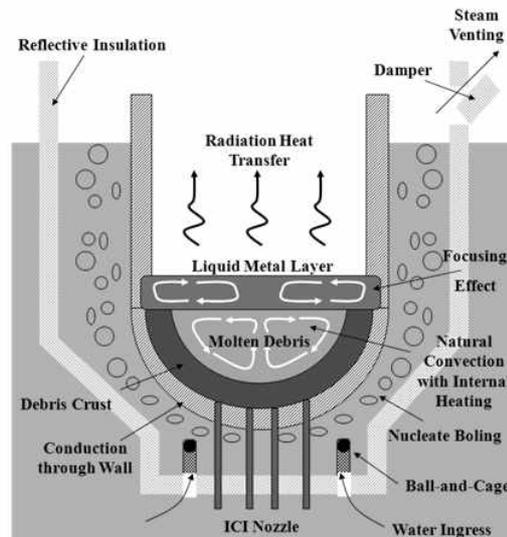


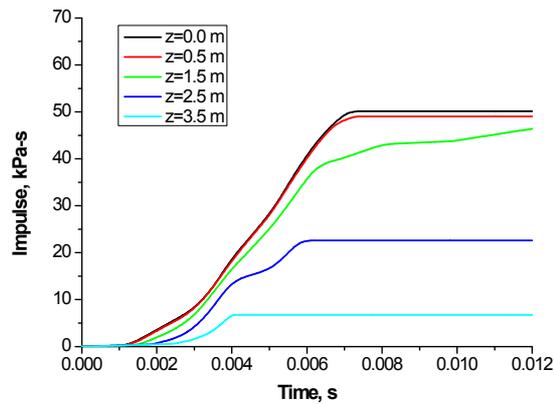
Fig. 1 IVR-ERVC concept

IVR-ERVC 전략을 사용하기 위해서는 (1) 중대사고 시 노심용융물이 원자로용기 하부로 이동하기 전 충분한 시간 여유를 두고 원자로 공동에 냉각수를 원자로용기 중간 높이까지 채워야 하며, (2) 원자로용기 하부 외벽과 단열재 사이에 냉각수가 흐를 수 있는 유로가 형성되어야 하고, (3) 원자로용기 하부 외벽에서 충분한 임계 열유속을 제공할 수 있는 수준의 냉각수 자연 순환 유동이 발생할 수 있어야 한다.

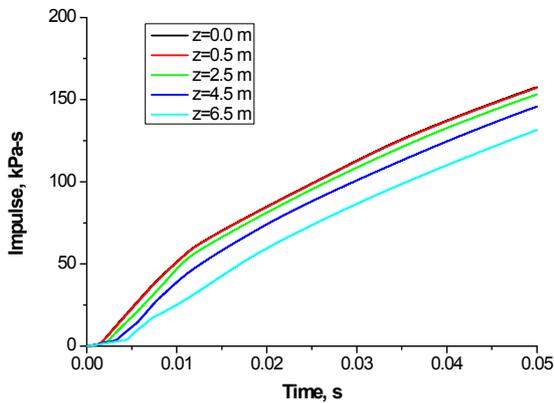
이러한 IVR-ERVC 요구 사항 측면에서 ICI 케이블이 원자로 공동을 통해 연결되는 BM-ICI 경우 ICI 케이블을 설치할 수 있도록 원자로 공동의 크기 또는 높이가 커야하는데 이는 원자로공동에 냉각수 충수량이 많고 또한 충수에 많은 시간이 소요되는 단점을 제공한다. 한편, 한국의 신형 원전 APR1400에서는 원자로 공동 충수용 냉각수가 IRWST에서 공급되는데 외벽냉각에서 요구하는 원자로공동의 수위가 IRWST 수위보다 높아 이를 맞추기 위해서는 충수 펌프의 가동이 필요하여 이 전략이 피동형 대처설비로 분류되지 못하는 문제점도 있다. 충수 깊이가 큰 원자로 공동은 증기폭발 측면에서도 약점을 갖는다. 만약에 외벽 냉각에 의한 원자로용기 건전성 확보가 실패할 경우 노심용융물이 완전히 충수된 원자로 공동으로 분출되므로 냉각수 양이 많고 충수 깊이가 큰 경우 용융물 제트의 분쇄량이 많아 더 큰 강도의 증기폭발이 발생할 수 있다.

Fig. 2는 노심용융물의 원자로공동 분출 시, IVR-ERVC전략을 위해 원자로 외부에 공급한 냉각수의 높이에 따른 충격량을 Tracer II를 이용하여 해석한 결과를 비교한 것으로, BM-ICI를 위해 원자로 공동의 높이가 커지면 충격량도 커지는 것을 볼 수 있다.<sup>(4)</sup>

또한 원자로용기 하부 외벽과 단열재 사이에 충분한 냉각수 유로를 구축하는 단열재 설계에 있어서도 BM-ICI 케이블의 존재는 설계상의 복잡성을 제공하며, 냉각수 자연 순환에 대해서도 케이블 자체가 추가적인 유동저항이 된다.



(a) 4m deep



(b) 7m deep

Fig. 2 Impulse at cavity wall from ex-vessel steam explosion

2.3 Core Catcher

고출력의 원전의 중대사고 대처설비로 유럽원전사용자 요건에서 요구하는 Core Catcher는 원자로 용기 파손 시 분출되는 노심용융물과 원자로 하부 바닥면과의 노심용융물-콘크리트 반응을 방지하고, 노심용융물을 담아 냉각하기 위한 설비로서, (1) 노심용융물 제트의 분출 시 확산 직경보다 크기가 커 모든 노심용융물을 가둘 수 있고 노심용융물의 퍼짐을 용이하게 하여 용융물 층의 두께를 냉각 가능한 수준으로 최소화 할 수 있도록 그 평면적 및 높이가 충분히 커야하며, (2) Core Catcher에 가두어진 노심용융물을 장기 냉각할 수 있도록 Core Catcher의 하부에 냉각수 채널을 두어 이곳을 통한 자연 순환 냉각수 유동이 임계 열유속에 여유를 줄 만큼 충분히 커야 한다.

국내외의 원전의 중대사고 대처를 위해 Core Catcher가 적용된 사례로는 해외의 EPR, VVER, ESBWER 과 국내의 APR1400노형의 유럽시장 개척을 위해 개발 중인 EU-APR1400<sup>(5)</sup> 등이 있으며, 각각의 설계 개념은 다음과 같다.

출력 1600 MWe 이상의 유럽신형원전(EPR)를 개발한 AREVA는 원자로 공동에서 떨어진 부분에 별도의 노심용융물 냉각설비를 설치하였다(Fig. 3). 이 설계의 배경 아이디어는 용융물을 냉각수 층에 의해 냉각이 될 수 있을 정도로 퍼지게 하는데 있다.

1단계로 Pre-catcher에서 노심 용융물을 안정화시킨 후, 원자로 공동에서 떨어진 넓은 공간으로 이송하여 냉각하는 2단계 방식을 채택하고 있다. IRWST에서 공급된 냉각수는 노심용융물 냉각설비에 축적된 노심용융물 하부에 설치된 냉각채널을 흐르면서 노심용융물 하부를 냉각하고 다시 노심용융물 냉각설비 내부로 공급되어 노심용융물 상부를 냉각한다.

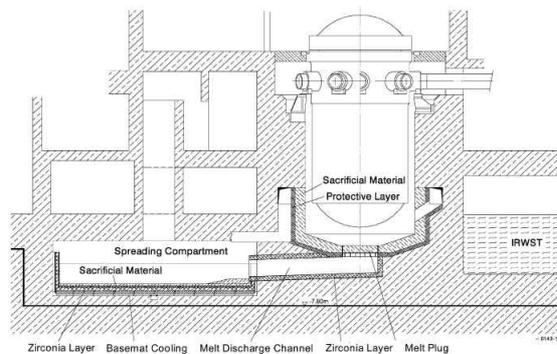


Fig. 3 EPR core catcher

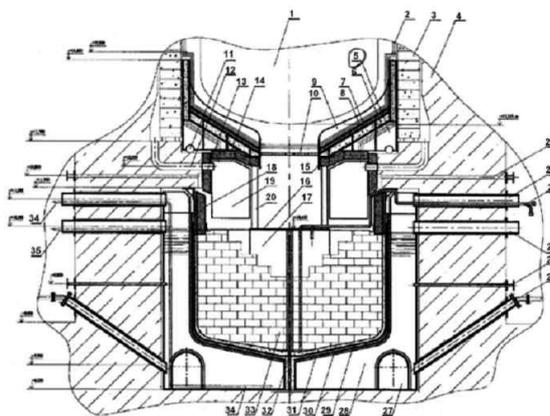


Fig. 4 VVER-1000 core catcher

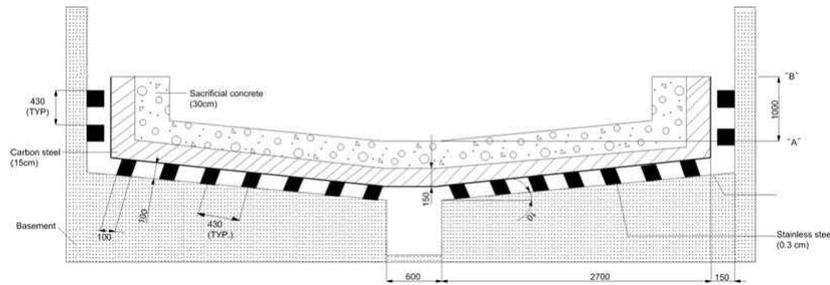


Fig. 5 EU-APR1400 core catcher

노심 용융물을 냉각하는 1단계로 원자로용기 파손 시 노심 용융물을 초기에 보유하는 역할을 수행하는 Pre-catcher는 원자로용기 파손 시 노심 용융물에 의한 Jet Impingement와 노심 용융물 상부에서 측면으로 발생하는 복사열전달로 이 구조물이 파손되는 것을 방지하고, 퍼짐 성능 향상 등 노심용융물의 물성을 냉각에 유리하도록 조정하는 역할도 동시에 수행한다.

2단계인 퍼짐 공간에는 IRWST에서 공급된 냉각수가 하부 수평 냉각유로로 공급되어, 노심 용융물 하부를 냉각하고 Core Catcher 내부로도 공급되어 노심 용융물 상부에 top flooding되어 노심 용융물 상부를 냉각시킨다.

러시아 VVER-1000에서는 IVR 개념을 확장한 Core Catcher를 채택하였다(Fig.4). VVER-1000의 원자로용기 하부에는 거대한 철제 용기(Crucible; 도가니)가 설치되어 있으며, 이 내부에는 희생 콘크리트라고 불리는 특별한 형태의 콘크리트 블록으로 채워져 있다. 원자로용기 외부로 분출된 노심용융물은 도가니 내부에서 희생콘크리트와 혼합되면서 단위체적당 열 출력이 감소하게 되며, 도가니 외부에는 냉각수가 흐르면서 위 노심+콘크리트 용융물을 냉각한다.

한국이 유럽 수출용으로 개발한 EU-APR1400 원전에서도 Core Catcher를 채택하였다 (Fig.5). 원자로 공동 바닥에 놓여지는 V자 모양의 Core Catcher는 폭 6 m, 길이 16 m의 대형 철제 구조물로 원자로 공동 바닥에 여러 개의 받침대 (Stud) 위에 놓여 Core Catcher 하부에 냉각수 채널을 조성한다. 초기 노심용융물 분출 시 Core Catcher를 보호하고 노심용융물을 희석하여 붕괴열 밀도를 낮추기 위한 희생물질<sup>(6)</sup> 층이 Core Catcher 내부에 설치된다.

Core Catcher의 냉각수 공급은 IRWST로부터 냉각수를 공급하는 배관과 Core Catcher 구조물 하부에 위치한 분배관 (waterbox), Core Catcher 하부면 및 측면과 접촉하고 있는 경사 냉각유로, 그리고 원자로 공동 측벽에 매립되는 강하관(down-comer pipe) 등으로 이루어져 있다. 이 냉각유로를 경사로 설치한 이유는 비등 열 제거의 상한인 임계열속(Critical Heat Flux: CHF)을 증가시켜 열적 여유도를 확보하고 경사부에서 발생한 기포들이 원활히 원자로 공동 상부냉각수 층으로 잘 배출되도록 하기 위함이다. 또한 강하관은 원자로 공동 상부의 냉각수를 Core Catcher 하부의 비등 발생지점까지 공급함으로써 냉각수의 자연순환을 형성하여 노심 용융물의 붕괴열을 안정적으로 제거하기 위함이다.

EU-APR1400 Core Catcher내부에 설치되는 희생물질은 산화철과 콘크리트의 혼합물로 이루어졌으며, 노심 용융물과 혼합되어 단위체적 당 발열량 감소, 노심 용융물의 퍼짐 성능 향상, 수소생성량 감소 및 재임계 방지 등의 역할을 수행한다.

국내외에서 개발된 Core Catcher의 개념을 살펴보면 원자로 공동에 위치하는 BM-ICI 케이블은 공간을 많이 차지하여 Core Catcher 설치에 필요한 공간에 제약을 줄 수 있어 EPR에서 적용한 pre-catcher를 이용한 2단계 냉각방식이나 VVER의 대형 철제 도가니를 이용한 방식의 적용이 매우 어렵게 된다. 만약 BM-ICI 케이블과 Core Catcher를 모두 적절하게 배치할 수 있는 원자로 공동을 설계한다면 공동의 높이가 과도하게 높아 원전 건설의 경제성에도 단점이 된다.

#### 2.4 TM-ICI 중대사고 영향

한국의 가압경수로 원전인 OPR1000 및 APR1400 원전은 ICI 관통부가 원자로용기 하부에 설치되어

중대사고 발생 시 노심용융물이 원자로용기 안에서 원자로 공동으로 이동하는 경로 상에 위치하여 원자로용기 외벽 냉각 및 Core Catcher와 같은 중대사고 대처설비 또는 사고관리 전략을 채택하는데 불리한 특징들을 살펴보았다. 따라서 ICI 관통부를 원자로용기 상부에 설치하는 TM-ICI 설계는 중대사고 대처설비 또는 사고관리 전략에 있어 다음과 같은 개선점을 들 수 있다.

- 고온의 노심용융물에 의한 원자로용기 하부 헤드 파손에서 가장 취약하다고 볼 수 있는 ICI 관통부가 없어지므로 중대사고 시 원자로용기 파손 확률이 낮아짐.
- 원자로 공동에서 ICI 케이블이 사라지므로 원자로 공동의 크기를 작게 할 수 있어 원자로용기 외벽 냉각을 통한 노심용융물 노내 역류 전략 (IVR-ERVC)을 위한 원자로 공동 충수량이 작아져 충수 시간이 단축되고 또한 원자로용기 설치 위치를 낮추어 저온관의 위치를 IRWST 수위와 맞출 수 있다면 IVR-ERVC를 피동형 중대사고 대처설비로 볼 수 있음.
- IVR-ERVC 전략을 위한 원자로용기 하부 단열재 설계에서 ICI 케이블 관통을 고려하지 않아도 되도록 설계가 더 단순해지고 또한 원자로용기 외벽과 단열재가 이루는 냉각수 유로가 더 단순해지고 케이블에 의한 유동 저항도 없어져 자연 순환 냉각수 유량을 증진시킬 수 있음.
- 노심용융물-콘크리트 반응을 방지하기 위한 Core Catcher 전략을 채택할 경우 원자로 공동에서 케이블 방해 없이 Core Catcher의 크기 및 위치를 결정할 수 있는 장점이 있음. 또한 원자로 공동 내 냉각수 수위를 낮출 수 있어 냉각수가 충수된 후 원자로용기에서 지연되어 방출되는 노심용융물에 의한 증기폭발 위험을 줄일 수 있음.

한편, ICI 관통부를 원자로용기 상부에 설치하는 TM-ICI 설계의 경우 ICI 관통부 및 ICI 케이블이 노심용융물 이동 경로 상에 없으므로 중대사고 대처설비 또는 사고관리 전략에 미칠 수 있는 특별한 단점은 없다고 볼 수 있다.

### 3. 결 론

원전의 중대사고 발생 시 이에 대처하고 그 위험을 완화할 수 있는 중대사고 대처설비 및 중대사고 관리 전략은 지금까지 발생한 외국의 중대사고 들이 주는 교훈으로 그 중요성이 증대되어 있다. 그러나 한국의 가압경수로 원전인 OPR1000 및 APR1400 원전에서는 ICI 관통부가 원자로용기 하부에 설치되어 있어 중대사고 발생 시 노심용융물이 원자로용기 안에서 원자로 공동으로 이동하는 경로 상에 위치하여 원자로용기 외벽 냉각 또는 Core Catcher와 같은 중대사고 대처설비 또는 사고관리 전략을 채택하는데 있어 원자로 공동의 높이가 커 냉각수 충수량이 많고 충수시간이 긴 단점과 또한 Core Catcher의 경우도 원자로 공동에서 ICI 케이블과 Core Catcher가 차지하는 공간에 제약이 따르는 문제점을 가지고 있다.

ICI 관통부를 원자로용기 상부에 설치하게 되면 이러한 중대사고 대처 및 완화 관련 문제점들이 개선된다. 원자로용기 하부헤드 파손에서 취약한 ICI 관통부가 하부헤드에서 없어지고 또한 원자로 공동의 높이를 낮출 수 있어 IVR-ERVC를 위한 냉각수 충수에 유리하고 Core Catcher의 방식 및 크기를 결정하는데 있어 ICI 케이블에 대한 제한 사항이 없어지는 장점이 있다. 한편 TM-ICI 경우 ICI 관통부 및 ICI 케이블이 노심용융물 이동 경로 상에 없으므로 중대사고 대처설비 또는 사고관리 전략에 미칠 수 있는 특별한 단점은 없다고 볼 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2014년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (과제번호: 20131510101680)

### 참고문헌 (References)

- (1) Rempe, J.L., Chavez, S.A., Thinnes, G.L., et. al., 1993, "Light Water Reactor Lower Head Failure

Analysis," *NUREG/CR-5642*.

- (2) Chu, T.Y., Pilch, M., Rashid, Y.R. and Behbahani, A., 1998, "Experimental Investigation of Creep Behavior of Reactor Vessel Lower Heads," *SAND-98-0580C or Conf-980341*.
- (3) Lee, K. Y., 2002, "Development of Design Verification for KNGR System Design," *KAERI/RR-2230/2001*.
- (4) Bang, K. H., Kumar, R. and Kim, H. T., 2014, "Modeling Corium Jet Breakup in Water Pool and Application to Ex-Vessel Fuel-Coolant Interaction Analyses," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 276, pp. 153~161.
- (5) Kim, Y. S. and Lee, J. H., 2010, "European Nuclear Design Requirements and EU-APR1400 Design Characteristics," *Processdings of The KSME 2010 Fall Annual Meeting*, Jeju, Korea, 2-5 Nov.
- (6) Suh, J. and Kim, H., 2013, "Prediction of Sacrificial Material Ablation Rate by Corium Jet Impingement," *Processdings of The KSME 2013 Fall Annual Meeting*, Jeongseon, Korea, 18-20 Dec.