

## 직접냉각방식 및 간접냉각방식 Core Catcher의 성능비교<sup>§</sup>

서정수\*<sup>†</sup>, 이종호\*, 배병환\*

\* 한국수력원자력(주) 한수원 중앙연구원

### Comparison Between Direct- and Indirect-Cooling Core Catchers

Jungsoo Suh\*<sup>†</sup>, Jong Ho Lee\* and Byung Hwan Bae\*

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

(Received January 4, 2012 ; Revised August 6, 2012 ; Accepted August 7, 2012)

**Key Words** : Core Catcher(노외 노심용융물 냉각설비), EU-APR1400, Severe Accident(중대사고)

**초록**: 유럽지역으로의 원전 수출을 위해서는 유럽의 원전 인허가요건을 충족시켜야 하며, 이에 따르면 원전의 중대사고 대처설비로 통상 Core Catcher로 불리는 노외 노심 용융물 냉각설비를 갖출 것을 권장하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 노심 용융물 직접냉각방식과 간접냉각방식에 대해 각각의 개념 안의 장/단점을 비교, 검토하였으며, 그 결과 직접냉각방식은 냉각효율 측면에서, 간접냉각방식은 중대사고 사고관리 측면에서 각각 우위를 보였다.

**Abstract**: The European nuclear design requirements, which should be satisfied by nuclear reactors in Europe, usually recommend a so-called core catcher, which is a molten core ex-vessel cooling facility, to manage a severe accident at a nuclear reactor. Two different types of core catcher concepts are compared to determine their abilities to manage severe accidents and cool core melts. The study reveals that direct cooling is better for cooling capacity and is convenient to construct, while indirect cooling is better for the management of a severe accident.

## 1. 서론

유럽지역 원자력 시장 진출을 위하여 개발되고 있는 EU-APR1400 노형은 EUR 등의 유럽의 인허가요건을 충족시켜야 한다.<sup>(1)</sup> 이에 의하면 중대사고 대처설비는 일반 설계기준 사고 용 안전계통과 분리된 전용계통으로 설계되어야 하며, 피동으로 작동되어야 한다. 또한 노심용융물과 격납건물 압력 유지 구조물 사이에 반응(부식, 가스 발생)이 없도록 통상 Core Catcher로 불리는 노외 용융물 냉각설비를 갖출 것을 요구하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 전 세계에서 제안된 Core Catcher 중 EU-APR1400 노형에 적용성이 확보된 노심용융물 직접냉각방식과 간접냉각방식 Core Catcher에 대해 각각의 개념 안에 대한 장/단점을 비교, 검토하여 Core Catcher의 성능 목표와 중대사고 사고관리 측면에서 보다 유리한 방식을 채택하는 기준을 정립하고자 한다.

## 2. 직접냉각방식 Core Catcher

### 2.1 직접냉각방식 Core Catcher 개념

이 개념은 정상 운전시에는 Core Catcher가 건조한 상태로 유지되며 노심용융물이 Core Catcher에 떨어진 이후에 하부로부터 냉각수를 공급하게 된다. Fig. 1에 직접냉각방식 Core Catcher의 개략적인 개념도를 나타내었다. Core Catcher의 바닥 부분은 두 층으로 나뉘어져 있는데, 첫 번째 층은 노심용융물과 혼합되면서 열 회석을 하는 희생층(콘크리트)이고 두 번째 층은 원자로공동 바닥으로부터 공간을 만들어 냉각수가 제공될 공간을 확보하고자 하는 철판이다. 철판에는 구멍이 뚫려져 있으며, 이러한 구멍은 노심용융물에 의해 쉽게 용융되는 마개에 의해 막혀져 있다. 하부 철판의 밑에는 냉각수 통로가 마련되어 있는데, 냉각수 공급 배관을 통해 IRWST(In-Containment Refueling Water Storage Tank)에서 수두 차에 의해 피동적으로 냉각수를 공급받아 injector를 통해 노심용융물 풀(pool)로 냉각수를 방출하여 노심용융물을 냉각하도록 하는 개념을 갖고 있다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, [jssuh@khnp.co.kr](mailto:jssuh@khnp.co.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

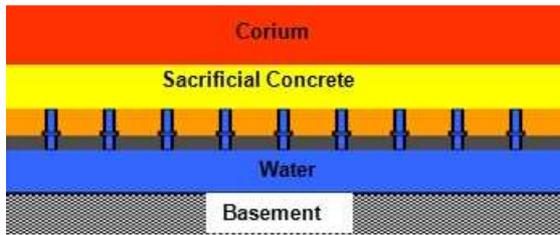


Fig. 1 Schematic of direct cooling core catcher

2.2 냉각방법

노심용융물이 유입되어 직접냉각방식 Core Catcher 상부층인 희생물질층을 침식(ablation) 시켜 냉각채널이 개방되면 바로 냉각수가 노심용융물 풀(pool) 하부에서 주입되게 된다. 노심용융물 풀 하부로 유입된 냉각수는 즉시 증기화되어 노심용융물 풀을 관통하며 노심용융물을 냉각시키고 이에 따라 고화되는 노심용융물을 또한 파쇄시키는 과정을 제공한다. 냉각수와 노심용융물 간의 직접적인 접촉과 기화과정은 노심용융물의 신속한 냉각을 유발하고 고화시킨다. 노심용융물의 고화는 냉각수 injector 주변에서 시작되며 노심용융물 풀 하부에서 상부방향으로 진행된다.

2.3 불순물 영향

요오드 재회발 방지를 위해 삼인산나트륨 (TSP) 이 냉각수에 용해되어 있는데 노심용융물 고화체의 공극에 미치는 영향은 큰 영향이 없을 것으로 판단되나, 페인팅 물질 및 RCS(Reactor Coolant System) 단열재 부수러기에 의한 injector의 직경 5mm throttle 막힘을 방지하기 위한 별도의 필터가 냉각수 공급계통에 추가되어야 한다.

2.4 냉각성능

Fig. 2는 VULCANO실험에 직접냉각방식 Core Catcher를 적용하였을 경우에 대한 실험의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기에는 주입되는 에너지 20KW~30KW보다 제거되는 에너지(약 75KW)가 훨씬 크며 약 15분 정도에는 용융물이 충분히 냉각되어 제거 열 에너지가 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이 실험은 Corium 원형물질이 아닌 상사물질을 사용한 결과로서, 원형물질의 경우는 상사물질의 특성으로부터 유추하면 노심용융물이 고화되는 데는 약 1시간 정도가 소요될 것으로 판단된다.

2.5 Core Catcher 건전성

직접냉각방식 Core Catcher의 건전성 평가는

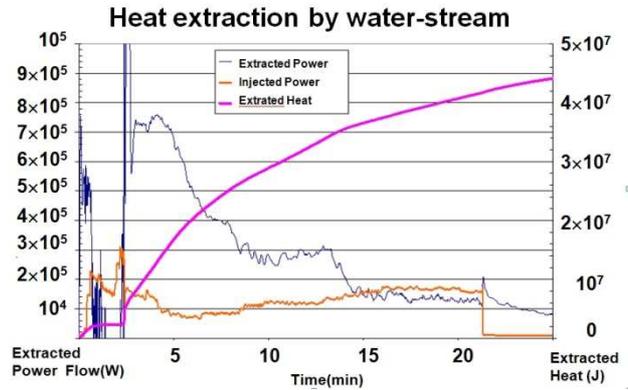


Fig. 2 Comparison between injected power and extracted heat at the VULCANO experiment of direct cooling core catcher<sup>(2)</sup>

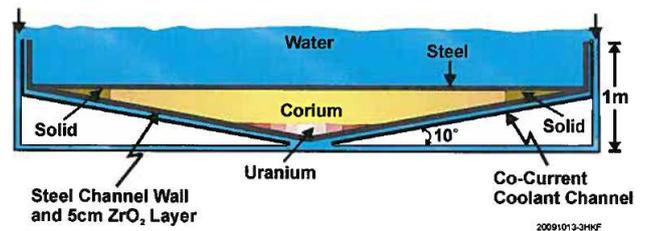


Fig. 3 Schematic of indirect cooling core catcher

크게 2가지 측면에서 검토가 필요하다. 이는 노심용융물의 jet 방출에 따른 냉각설비의 건전성 유지 문제와 원자로하부헤드 낙하에 따른 건전성 문제이다.

원자로용기 하부헤드 파손 사고를 직경 0.45m의 파손을 기준으로 냉각설비의 희생 콘크리트 두께를 결정하였다. 이 경우 사용된 최대 희생 콘크리트의 침식율(19.5 mm/s)과 원자로용기에서 노심용융물의 방출 시간(4.15초)을 가정하여 계산한 침식 두께와 희생 콘크리트 설계치를 비교한 결과, 건전성을 유지하는 것으로 평가하였다. 그렇지만 원자로 용기파손 메커니즘의 다양성을 고려한다면 보다 다양한 사고 시나리오에 의한 검토가 필요할 것이다. 즉, 희생 콘크리트의 두께가 초기 설계치보다 커질수 있으며 이에 따른 수소 발생량등도 증가할 수 있고 다중분출의 경우에는 노심용융물의 균질분포 가정도 사용할 수 없기 때문이다. 두 번째로 원자로 용기 하부 헤드 낙하 사고 시 기초 철판과 I-빔이 하부 헤드 충격을 견딜 수 있도록 검토하였으나, 4.0m<sup>2</sup>의 낙하충격 지역 내부에 있는 냉각수 injector의 건전성에 대하여는 검토를 수행하지 않아 노심 용융물 냉각에 필요한 냉각수 주입이 원활이 이루어질지 여부에 대한 판단은 현재 어려운 상태이다.<sup>(3)</sup>

### 3. 간접냉각방식 Core Catcher

#### 3.1 간접냉각방식 Core Catcher 개념

간접냉각방식의 Core Catcher 개념은 정상 운전 시에는 Core Catcher가 건조한 상태로 유지되며 노심 용융물이 Core Catcher에 떨어진 이후에 하부로 부터 냉각수를 공급하게 된다. 간접냉각방식 Core Catcher의 개략적인 개념도는 Fig. 3에 나타나 있다.

본 간접냉각방식 Core Catcher는 V자 형태로 Core Catcher가 원자로공동지역 길이방향으로 길게 구유(trough)형태를 갖는 철판 용기이다. 원자로용기 파손에 따라 방출된 노심 용융물이 Core Catcher로 유입되면 냉각수가 Core Catcher의 외벽을 통해 노심 용융물을 냉각시키고 흘러 넘친 냉각수는 Core Catcher 상부로 유입되어 노심 용융물과 직접적인 접촉에 의해 추가적인 냉각과정을 제공하게 된다.

Core Catcher 외벽을 흐르는 냉각수는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 경사된 냉각유로를 따라 흐르고 있는데, SULTAN<sup>(4)</sup> 등의 실험결과에 의하면 경사각이 임계열유속 (CHF)을 증가시켜 노심용융물의 냉각성을 증가시키고 열전달 과정 중 발생한 기포의 제거를 용이하게 할 수 있기 때문이다.

또한 IRWST와 Core Catcher가 설치된 원자로공동지역 간의 수위가 평형이 이룬 이후 노심 용융물 상부에서 상대적으로 차가운 냉각수는 다운코머를 통해 Core Catcher 하부로 유입되어 Core Catcher 외벽을 따라 흐르며 노심 용융물로부터 열전달에 의해 온도가 상승하게 되는 등 노심 용융물 냉각과정에서 발생한 밀도 차에 의해 자연대류가 활발히 일어날 수 있도록 되어 있다.

#### 3.2 냉각성능

Core Catcher 내부에 노심 용융물을 가둔 상태에서 외벽 냉각을 통해 노심 용융물을 냉각시킬 경우, APR1400을 기준으로 32MW로 노심 용융물의 붕괴열을 가정하고 Core Catcher 하부 및 상부로 동일한 열유속을 갖는다는 보수적 가정을 하면 약 100m<sup>2</sup>의 열전달 면적의 Core Catcher 하부로 평균 열유속(160KW/m<sup>2</sup>)이 계산되며, Core Catcher 자체를 보호하기 위해 zirconia (ZrO<sub>2</sub>) 보호층을 사용한 경우에는 이 층을 통과하는 열 전도에 의해 이보다 다소 낮은 열유속을 구할 수 있다.

이러한 방식으로 구한 냉각수 채널로 전달되는 열유속과 경사각이 같은 냉각채널을 사용한 임계열유속(CHF) 실험결과인 Fig. 4에서 살펴보면, 본 간접냉각방식 Core Catcher가 냉각채널의 경사

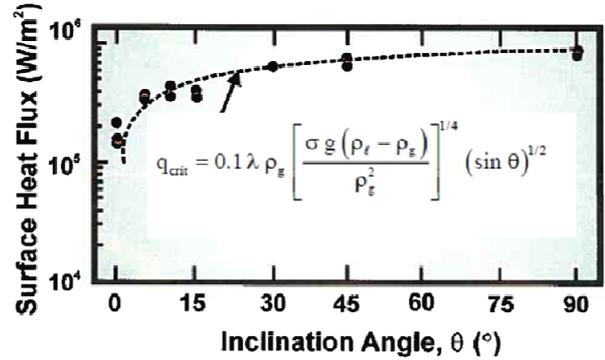


Fig. 4 Critical heat flux of cooling channel according to inclination angle<sup>(5)</sup>

각에 해당되는 임계열유속(약 400KW/m<sup>2</sup>)과 비교하여 적절한 냉각성능을 확보했다고 판단할 수 있다.

향류 유동특성을 갖는 Core Catcher에서 열 제거 능력의 제한은 증기속도에 따라 결정된다. 다음 식 (1)은 증기속도가 임계유속( $u_c$ )에 근접했을 때를 기준으로 최대 열 제거능력을 평가하기 위해 사용한다. 만약 증기유속이 임계유속 이상이 되면 액체 냉각수가 냉각채널로 유입되지 않아 dryout 현상이 발생할 수 있다.

$$u_c = K_g \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (1)$$

식 (1)에서  $K_g$ 는 Kutateladze 무차원 임계증기속도로 1.4를 사용하였다. 이를 이용하여 평가된 최대 열제거 능력은 식 (2)와 같다.

$$Q = 1.4 \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \rho_g h_{fg} A \quad (2)$$

식 (1), (2)에서  $\sigma, g, \rho_l, \rho_g, h_{fg}, A$ 는 각각 표면장력 계수, 중력 가속도, 액체 밀도, 기체 밀도, 증발 잠열, 단면적을 나타낸다. 식 (2)를 이용한 평가결과, 최대 열제거 능력은 약 30MW정도로 계산된다. 이 값은 총 붕괴열이 상부 및 하부로 균일하게 열전달한다는 보수적 가정에 근거한 하부 열하중 (16MW)에 비해 약 2배 정도의 충분한 안전마진을 가지고 있다고 판단된다.

#### 3.3 불순물 영향

요오드 재취발 방지를 위해 삼인산나트륨(TSP)이 냉각수에 용해되어 있는데 간접냉각 Core Catcher는 외벽냉각 기준으로 노심용융물의 냉각성을 평가하고 노심용융물과 직접 접촉이 없는 관

계로 그 영향은 없을 것으로 판단되며, 페인팅 물질 및 RCS 단열재 부스러기에 의한 Core Catcher 냉각채널의 막힘 역시 간극(gap)의 크기(최소 6cm)를 고려하면 문제가 없을 것으로 파악된다.

### 3.4 Core Catcher 건전성

간접냉각 Core Catcher의 건전성 평가도 노심용융물의 jet 방출에 따른 간접냉각 냉각설비의 건전성 유지와 원자로 하부헤드 낙하에 따른 건전성을 고려하여야 한다.

철판 Core Catcher만으로는 노심 용융물 jet에 의한 침식이 심각하여 zirconia 등을 보호층으로 사용할 경우 침식 깊이 (2~3cm)가 보호물질 두께 이하로 평가되었다. 또한 다음과 같은 인자를 고려하여 발생할 수 있는 가능한 시나리오를 모두 고려하여 건전성을 확보할 수 있도록 Core Catcher 철판두께 및 지지대를 설계하였음을 확인하였다.

- 자중
- 노심용융물과 철 무게: 300t
- 원자로용기 하부헤드 무게: 300t
- 증기폭발 하중: 50psid

## 4. Core Catcher 타당성 평가

### 4.1 직접냉각방식 Core Catcher 장점

- 냉각능력 : 노심 용융물 풀 하부에서 냉각수 공급 injector를 통한 직접주입을 함으로서 냉각수와 노심 용융물 간의 직접 열전달을 통한 신속한 냉각능력이 강점으로 평가된다.
- 소요면적 : 강력한 냉각능력을 바탕으로 Core Catcher 설비의 설치에 필요한 면적이 현재의 APR1400 원자로공동 면적을 유지하여도 약 200ton의 노심 용융물을 냉각할 수 있어 구조적 재설계를 배제할 수 있다.
- 설비구성 : 원자로 공동지역에 냉각수 공급채널을 기초 철탑으로 분리 후 기초 철탑에 구멍을 뚫고 injector를 설치 후 보호층( $Al_2O_3$  grout)과 희생 콘크리트 층을 타설 방법으로 시공이 가능하여 단순성 및 시공성이 좋은 것으로 평가된다.

### 4.2 직접냉각방식 Core Catcher 단점

- 원자로건물 가압 : 노심 용융물 풀 하부로 냉각수를 injector를 통하여 직접 주입하여 200t 정도의 노심용융물을 냉각하는 관계로

단기적으로는 원자로 공동지역에서 냉각 초기에 급격한 압력 증가가 발생할 수 있다.

- 불순물 영향 : 노심 용융물에 냉각수를 주입하는 데 있어 주입량을 직경 5mm의 throttle을 이용하여 제어하고 있다. 중대사고 시에는 원자로건물의 대기 환경이 설계기준사고 환경과 유사하거나 보다 심각한 조건을 가질 수 있기 때문에 많은 페인팅 물질 또는 단열재 부스러기들이 IRWST 내부로 유입이 가능하다.
- 증기폭발 : 냉각수 공급 injector를 이용한 냉각수 공급은 노심용융물과 냉각수 간의 직접 접촉을 유발하는 관계로 증기폭발의 개연성이 있다. 증기폭발에 의해 개별 injector 부근에서 급격한 압력증가가 발생할 경우 주변 다른 injector를 통한 냉각수 공급율이 순간적으로 증가하여 심각한 압력하중이 국부적/다발적으로 발생하는 등 Core Catcher의 건전성에 영향을 줄 수 있다.
- 구조 건전성 : 원자로하부헤드 낙하 시 영향 받는 지역에 설치된 냉각수 공급 injector가 형상에 영향을 받지 않아야 하나, 이를 대비한 방호개념이 제시되어 있지 않다.

### 4.3 간접냉각방식 Core Catcher 장점

- 원자로건물 가압 : 간접냉각 Core Catcher는 Core Catcher 내부에 노심 용융물을 가두어 놓고 Core Catcher의 외벽 냉각과 노심 용융물 풀 상부를 침수시켜 냉각하는 방법이어서 상대적으로 증기 발생률이 낮아 중대사고 사고환경을 완화된 조건으로 유지하는 데 용이하다.
- 불순물 영향 : 냉각채널 간극 크기를 고려할 경우 직접냉각방식에 비하면 냉각수 막힘 방지를 위한 고려사항이 상대적으로 용이하다 판단된다.
- 증기폭발 : 간접냉각 Core Catcher에서 냉각수와 노심 용융물 간의 접촉이 발생하는 경우는 냉각수가 흘러 넘쳐 노심 용융물 풀 상부지역을 침수시키는 경우이다. 이와 같은 경우에 증기폭발이 발생하지 않음은 그동안 많은 실험을 통해 증명되어 급격한 metal-water interaction은 발생하지 않는다고 판단된다.
- 구조 건전성 : 간접냉각 Core Catcher는 설비 자체에 대해 발생 가능한 모든 조건을 고려하여 건전성 평가를 수행하였고, 원자

로하부헤드 낙하와 같은 경우에도 직접냉각 방식의 냉각수 공급 injector와 같은 기기가 없기 때문에 냉각성능 입증 및 구조적 건전성 보장 측면에서 유리하다.<sup>(6)</sup>

## 5. 결 론

유럽진출을 위하여 개발된 EU-APR1400은 유럽의 인허가 요건을 만족시키기 위한 중대사고 대처설비로 Core Catcher의 개발이 필요하며, 이에 따라 직접냉각방식 Core Catcher와 간접냉각방식 Core Catcher에 대해 상호 비교하였다. 직접냉각방식은 냉각능력의 실험결과 및 시공의 상대적 용이성 측면에서 비교 우위를 보인 반면, 간접냉각 방식은 설비 운용의 용이성과 중대사고 사고관리 측면에서 우위를 보였다.

노심 용융물 방출을 동반한 중대사고 시나리오에서는 무엇보다 적절한 사고관리를 통해 원자로 건물의 건전성 향상이 가장 중요한 목표이므로 노심 용융물 냉각이라는 본연의 목적과 부가적 악영향이 상대적으로 적은 간접냉각방식 Core Catcher가 성공적인 사고관리에 유리할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 원자력 융합원천 기술 개발사업으로 지원받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, Y. S. and Lee, J. H., 2010, "European Nuclear Design Requirements and EU-APR1400 Design Characteristics," *Proceedings of The KSME 2010 Fall Annual Meeting*, Jeju, Korea, 2-5 Nov.
- (2) Journeau, C. and Alsmeyer, H., 2006, "Validation of the COMET Bottom-Flooding Core Catcher with Prototypic Corium," *Proceedings of the ICAPP'06*, Reno, NV, USA, 4-8 Jun.
- (3) Alsmeyer, H., Adelheim, C., Benz, H., Cron, T., Dillmann, G., Tromm, W., Schmidt-Stiefel, S., Schneider, H., Schumacher, G., Wenz, T. and Ferderer, F., 1999, "Corium Cooling by Bottom Flooding Results of the COMET Investigations," *Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability*, Karlsruhe, Germany, 15-18 Nov.
- (4) Rouge, S. 1997, "SULTAN Test Facility for Large-Scale Vessel Coolability in Natural Convection at Low Pressure," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 169, pp. 185~195.
- (5) Guo, Z. and El-Genk, M. S., 1992, "An Experimental Study of Saturated Pool Boiling from Downward Facing and Inclined Surfaces," *Internal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.35, No.9, pp. 2109~2117.
- (6) FAI (Fauske & Associates, LLC), 2010, "APR1400 Feasibility Study for In-direct Cooling Device."