

노심 용융물 제트 충돌에 의한 희생물질의 침식예측

서정수[†] · 김한곤

한수원 중앙연구원

(2014년 3월 12일 접수, 2014년 9월 15일 수정, 2014년 9월 17일 채택)

Prediction of sacrificial material ablation rate by corium jet impingement

Jungsoo Suh[†] and Hangan Kim

Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Co.

(Received 12 March 2014, Revised 5 September 2014, Accepted 17 September 2014)

요약

유럽 원전 시장 개척을 위해 개발 중인 EU-APR1400은 중대사고 대처설비로 노외 노심용융물 보유 및 냉각을 위한 소위 Core catcher라 불리는 노외 노심용융물 냉각설비를 개발 중이며, Core catcher body를 노심용융물로부터 보호하기 위하여 노심용융물의 물성 및 상태를 변화시켜 냉각 및 보유에 유리하게 하는 희생물질을 설치한다. 중대사고 시 원자로 압력용기의 틈으로부터 노심용융물이 분출되어 희생물질에 충돌 시 열 전달량이 매우 증가하게 되므로, 이 때 노심용융물 제트의 충돌에 의한 희생물질의 침식율을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 이 논문에서는 경계층 이론을 기반으로 한 희생물질 침식 모형을 제안하고 KAERI에서 수행한 실험결과와 비교하였다.

주요어 : EU-APR1400, 중대사고, 노외 노심용융물 냉각설비, 희생물질, 액상연소

Abstract - EU-APR1400, the Korean nuclear reactor design for European market adopts a so-called core catcher for ex-vessel molten corium retention and cooling as a severe-accident mitigation system. Sacrificial material, which controls melt properties and modifies melt conditions favorable for corium cooling and retention, is usually employed to protect core catcher body from molten corium. Since molten corium can be ejected through a breach of a reactor pressure vessel and impinged on the sacrificial material with enhanced heat transfer at a severe accident, it is very important to predict ablation rate of sacrificial material due to corium jet impingement accurately for core catcher design. In this paper, sacrificial-material ablation model based on boundary layer theory is suggested and compared with the experimental results by KAERI.

Key words : EU-APR1400, Severe Accident, Core Catcher, Sacrificial Material, Liquid Phase Burning

1. 서 론

유럽시장 진출을 위해 개발되고 있는 EU-APR1400은 유럽 원자력 사용자 요건에 따라 중

대사고 대처를 위한 중대사고 대처설비를 기존의 공학적 안전계통에 추가적으로 설치하여야 하며, 이를 위하여 소위 core catcher라 불리는 노외 노심용융물 냉각장치를 개발 중이다. 중대사고 시, 발생된 노심용융물을 보유하면서 냉각시키는 노외 노심용융물 냉각설비의 구조건전성 및 안전성을 향상시키기 위하여 노심용융물과 결합하여 열부하 및 수소 생성량을 줄이고 재임계를 방지하는 희생물질의 설치를 준비 중

[†]To whom corresponding should be addressed.
Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD
Tel : 042-870-5722 E-mail : jssuh@khnp.co.kr

이다.

중대사고 시, 원자로 용기가 파손되거나 ICI cable 이 원자로 내부와의 연결이 끊어져 cable입구가 개방 될 경우 원자로 하반구로부터 노심 용융물이 jet형태 로 낙하되면 기존 문헌의 stagnation point flow의 예 와 같이 열전달이 증진되어 희생물질의 침식이 매우 빨라질 수 있으므로 용융물 jet 충돌에 의한 희생물질 의 침식량의 정확한 예측은 노의 노심용융물 냉각설 비의 설계에서 매우 중요하다. 이 논문에서는 기존의 경계층 이론을 바탕으로 노심용융물 jet에 의한 희생 물질의 침식모형을 제안하고 KAERI에서 수행한 실험결과와 비교하였으며, 설계 parameter의 변화가 희 생물질의 침식에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 희생물질 침식 모델

2-1 물리적 모델

노심 용융물 jet가 희생물질에 충돌하면서 발생하 는 축대칭 stagnation point flow의 형태는 crust의 생 성여부에 따라 (a)와 (b)의 2가지 형태로 나타나게 되 며, 그 형태는 Fig. 1과 같다. 두 경우 모두 희생물질 에서 발생하는 수증기가 노심 용융물 jet와 용융된 희 생물질 사이에서 층을 유지한다는 가정을 바탕으로 한다.

2-2 Governing equations

2-2-1 용융물 crust가 생성되지 않을 경우

노심 용융물 jet와 용융된 희생물질 사이에 위치하

는 수증기층의 속도 및 온도장은 다음의 층류 축대칭 방정식을 만족한다.

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu_g \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_g \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

희생물질 표면(z=0) 및 수증기와 노심 용융물이 접 하는 부분(z=δ)에서의 경계조건과 축에서의 대칭조건 은 다음과 같다.

$$at \ z = 0 : \ u = 0, \ w = j_g, \ T = T_{mp,sm} \quad (4)$$

$$at \ z = \delta : \ u = 0, \ w = 0, \ T = T_i \quad (5)$$

$$at \ r = 0 : \ u = 0 \quad (6)$$

$$at \ r = 0, \ z = \delta : \ P = P_j = P_0 \quad (7)$$

$$k_g \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} + \epsilon \sigma (T_i^4 - T_{mp,sm}^4) = [h_{fs,sm} + c_{sm}(T_{mp,sm} - T_0)] \rho_{sm} v_m \quad (8)$$

$$h_j (T_j - T_i) = k_g \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\delta} + \epsilon \sigma (T_i^4 - T_{mp,sm}^4) \quad (9)$$

이 조건들에 추가적으로 적용 가능한 조건으로 희생물질 표면에서의 수증기의 속도와 potential flow를 이용한 jet impingement zone에서의 압력조

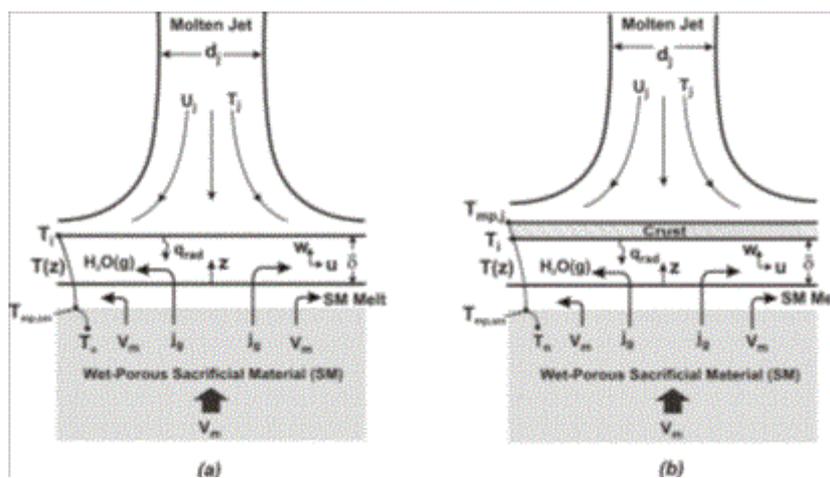


Fig. 1. Schematic diagram of molten oxidic jet impingement on melting sacrificial material (a) no jet material crust formation and (b) jet material crust formation

건은 다음과 같다.

$$j_g \rho_g = \rho_{sm} Y_g v_m \quad (10)$$

$$P_j = P_0 - \frac{1}{2} \rho_j a_j^2 r^2 \quad (11)$$

$$u_j = a_j r \quad (12)$$

여기서 a_j 는 impingement point velocity gradient 로 다음과 같이 주어진다.

$$a_j = \frac{U_j}{d_j} \quad (13)$$

위 방정식은 다음과 같이 변수변환을 통하여 편미 분방정식에서 상미분방정식으로 간략화 될 수 있다.

$$\eta = \left(\frac{2a_g}{v_g} \right)^{1/2} z, u = a_g r f'(\eta), \quad (14)$$

$$w = -(2a_g v_g)^{1/2} f(\eta) \quad (14)$$

$$P = P_0 - \frac{1}{2} \rho_g a_g^2 \left[r^2 + \frac{v_g}{a_g} F(\eta) \right] \quad (15)$$

$$\theta = \frac{T(\eta) - T_{mp,sm}}{T_i - T_{mp,sm}} \quad (16)$$

위에 정의된 변수들을 이용하여 governing equations (1)-(3)을 정리하면 다음과 같다.

$$f''' + \frac{1}{2}(1 - f'^2) + f f'' = 0 \quad (17)$$

$$\theta'' + \text{Pr}_g f \theta' = 0 \quad (18)$$

또한 경계조건은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\text{at } \eta = 0: f' = 0, f = -\frac{j_g}{(2a_g v_g)^{1/2}}, \theta = 0 \quad (19)$$

$$\text{at } \eta = \eta_\delta: f' = 0, f = 0, \theta = 1.0 \quad (20)$$

$$\theta_i \frac{d\theta}{d\eta}(0) + B_{rad} [(\phi_j \theta_i + 1.0)^4 - 1.0] = -B_m f(0) \quad (21)$$

$$B_j (1 - \theta_i) = \theta_i \frac{d\theta}{d\eta}(\eta_\delta) + B_{rad} [(\phi_j \theta_i + 1.0)^4 - 1.0] \quad (22)$$

여기서 추가로 사용된 변수들은 다음과 같다.

$$B_{rad} = \left(\frac{v_g}{2a_g} \right)^{1/2} \frac{\epsilon \sigma T_{mp,sm}^4}{k_g (T_j - T_{mp,sm})} \quad (23)$$

$$B_m = \frac{\text{Pr}_g}{Y_g} \left[\frac{h_{fs,sm} + c_{sm} (T_{mp,sm} - T_0)}{c_g (T_g - T_{mp,sm})} \right] \quad (24)$$

$$B_j = \left(\frac{v_g}{2a_g} \right)^{1/2} \frac{h_j}{k_g} \quad (25)$$

$$\phi_j = \frac{T_j}{T_{mp,sm}} - 1.0 \quad (26)$$

$$\theta_i = \frac{T_i - T_{mp,sm}}{T_j - T_{mp,sm}} \quad (27)$$

식(1)과 식(3)의 inertia 항과 convection 항은 수증기 층의 두께가 얇다는 가정을 이용하면 무시할 수 있으므로 이를 적용하면 식(17)-(18)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$f''' = -\frac{1}{2} \quad (28)$$

$$\theta'' = 0 \quad (29)$$

이를 적분하면,

$$f = -\frac{1}{12} \eta^3 + \frac{1}{8} \eta_\delta \eta^2 - \frac{1}{24} \eta_\delta^3 \quad (30)$$

$$\theta = \frac{\eta}{\eta_\delta} \quad (31)$$

위 식을 이용, 경계조건을 정리하면 다음을 얻는다.

$$\eta_\delta = \left(\frac{24B_j}{B_m} \right)^{1/3} (1 - \theta_i)^{1/3} \quad (33)$$

$$\left(\frac{B_m}{24B_j} \right)^{1/3} \frac{\theta_i}{(1 - \theta_i)^{1/3}} + B_{rad} [(\phi_j \theta_i + 1.0)^4 - 1.0] = B_j (1 - \theta_i)$$

그러므로, 식(33)을 주어진 노심용융물 jet 충돌조건에 따라 수치적으로 풀면 다음과 같이 수증기 속도와 희생물질 침식속도를 구할 수 있다.

$$j_g = \frac{(2a_g v_g)^{1/2}}{24} \eta_\delta^3 \quad (34)$$

$$v_m = \frac{\rho_g j_g}{\rho_{sm} Y_g} = \frac{\rho_g (2a_g v_g)^{1/2}}{24 \rho_{sm} Y_g} \eta_\delta^3 \quad (35)$$

2-2-2 노심 용융물 crust가 생성될 경우

노심용융물 crust가 생성될 경우, 온도 경계 조건은 다음과 같이 변경된다.

$$h_j(T_j - T_{mp,j}) = k_g \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\delta} + \epsilon \sigma (T_i^4 - T_{mp,sm}^4) \quad (36)$$

추가적으로 고려하여야할 조건은 생성된 crust가 안정적으로 위치하기 위하여 crust의 위아래에 작용하는 힘의 평형이다.

$$\int_0^{d_j} P_j(r) 2\pi r dr = \int_0^{d_j} P(r, \delta) 2\pi r dr \quad (37)$$

이 경우는 수치해석의 필요 없이 다음과 같은 해를 구할 수 있다.

$$\eta_\delta^3 = \frac{24B_j(1.0 - \theta_{mp,j})}{B_m} \quad (38)$$

$$v_m = \frac{\rho_g B_j (2a_g \nu_g)^{1/2} (1.0 - \theta_{mp,j})}{\rho_w Y_g B_m} \quad (39)$$

이 결과를 실제 물리량을 나타내는 변수를 이용, 나타내면 다음과 같다.

$$v_m = \frac{h_j(T_j^4 - T_{mp,j}^4)}{\rho_{sm} [h_{fs,sm} + c_{sm}(T_{mp,sm} - T_0)]} \quad (40)$$

$$h_j = \frac{f_0}{2} \rho_j c_j U_j \quad (41)$$

즉, 이 경우 희생물질의 침식률은 노심용융물 jet의 과열도에 의한 열전달량에 의해 정해지며, 주어진 시스템에서의 최대 침식률에 해당된다. 이 때 열전달 계수 h_j 는 Saito(1)와 같이 Reynolds analogy를 이용하여 정해진다. 한편, 주어진 시스템에서 최소 침식률은 다음과 같이 희생물질과 노심용융물 사이에 생성된 수증기막에서의 열전달이 복사열전달로 한정될 경우이며, 일반적으로 crust가 생성되지 않을 경우의 침식률은 주어진 시스템의 최대값과 최소값 사이에 분포하게 된다.

$$v_m = \frac{\epsilon \sigma (T_j^4 - T_{mp,j}^4)}{\rho_{sm} [h_{fs,sm} + c_{sm}(T_{mp,sm} - T_0)]} \quad (42)$$

3. 결과 및 분석

3-1 용융물 jet에 의한 희생물질 침식실험

최근 KAERI에서는 ZrO₂용융물을 이용, 중대사고 시 고온의 용융물 jet에 의한 희생물질 침식 실험을 수행하고 침식률을 측정하였다. 실험에 사용된 희생물질과 용융물 및 희생물질에 포함된 수증기의 물성치는 Table 1~3과 같고, 희생물질 침식률의 측정치와 본 논문에서 제시한 수치모델계산 결과는 Table 4와 같다. 실제 실험에서는 침식률을 측정하는 것이 아니라 침식된 길이를 용융물 낙하시간으로 나눈 값이로, 실제 침식률과는 차이가 있으나, 모델로 계산된 값과는 15~25%의 오차범위 내에서 일치하는 결과를 보였다.

이 결과를 바탕으로 실제 원자로 size에서의 노심 용융물 jet에 의한 침식현상을 고려하면, 중대사고 시

Table 1. Material properties of sacrificial material

Parameters	실험1	실험2	real size
c_{sm} (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1015.26	1015.26	1015
$h_{fs,sm}$ (J kg ⁻¹)	7.55×10^5	7.55×10^5	7.55×10^5
$T_{mp,sm}$ (K)	1883.15	1883.15	1880
T_0 (K)	284.15	291.15	290
Y_g	0.025	0.025	0.025
ρ_{sm} (kgm ⁻³)	2800	2800	2800

Table 2. Material properties of molten corium jet

Parameters	실험1	실험2	real size
c_j (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	818	818	591
d_j (m)	2.57×10^{-2}	2.46×10^{-2}	0.5
f_0	0.005	0.005	0.005
$T_{mp,j}$ (K)	2963.15	2963.15	2500
T_j (k)	3074.46	3048.15	2800
U_j (ms ⁻¹)	6.91	6.91	12.5
ϵ	1.0	1.0	1.0
ρ_j (kgm ⁻³)	4700	4700	6960

Table 3. Material properties of steam vapor

Parameters	Value
c_g (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	2200
k_g (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.175
M_g kg(kgmole) ⁻¹	18.0
Pr_g	0.92
μ_g (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	7.32×10^{-5}

Table 4. Sacrificial material ablation results

침식률(mms^{-1})	실험1	실험2	real size
측정치	0.752	0.989	-
계산치	0.931	0.850	0.513
오차 (%)	23.8	14.1	-
Crust 생성	○	○	×

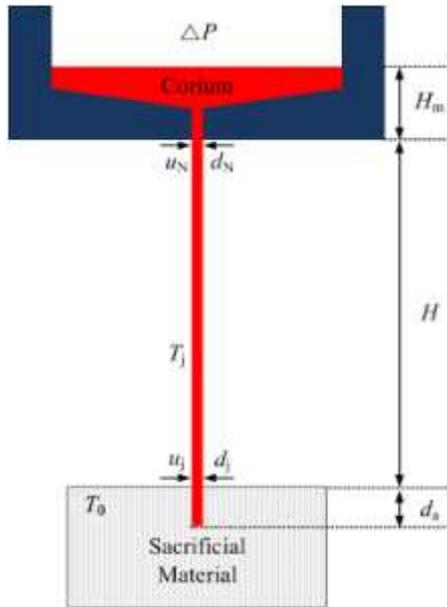


Fig. 2. Schematic diagram of corium jet impingement experiment

노심용융물이 분출되는 원자로 용기의 틈이나 구멍은 분출과정에서 확장되어 노심용융물 jet의 직경이 커지면서 충돌에 의한 침식현상은 점차 약화된다. 또한, 노의 노심용융물 냉각설비 바닥에 노의 노심용융물이 채워지면 노심용융물 jet의 충돌에 의한 침식현상은 유지되지 않으므로 노심용융물 jet의 충돌에 의한 침식은 30sec 정도만 고려하면 충분하다. 따라서 본 결과적용 시, 노심용융물 jet의 충돌에 의한 희생물질의 침식은 1.5~2cm 정도에 그칠 것으로 예상된다.

Table 4의 Crust 생성여부는 실험 과정이 밀폐된 용기 내부에서 진행되므로 관찰하기 어려우며, 수치모델에서 계산된 사항이다. Table 4에 나타난 것 같이 용융물 jet의 크기가 실제 원자로에 근접할 경우는 crust가 생성되지 않고 실험실 규모의 작은 size의 용융물 jet에서만 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 crust가 발생하는 임계상태의 노심 용융물의 조건은 식(33)에 $\theta_i = \theta_{mp,j}$ 또는 $T_i = T_{mp,j}$ 를 대입하면 알 수 있다.

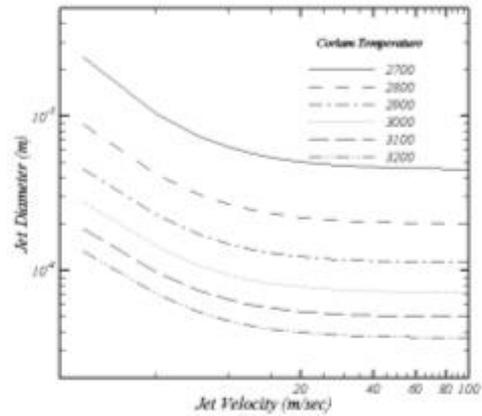


Fig. 3. Jet diameter-jet velocity curves below which corium jet material crust formation occurs

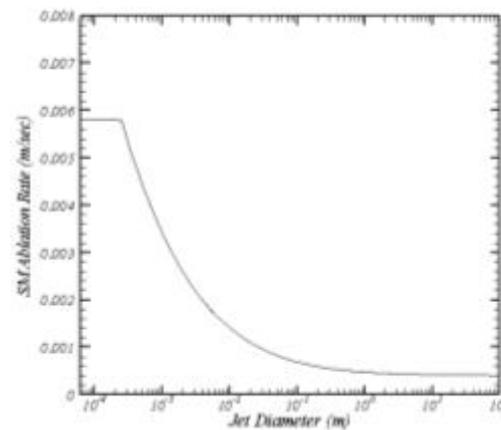


Fig. 4. SM ablation rate versus corium jet diameter: $U_j=12.5$ m/s, $T_j=2800$ K, $T_{mp,j}=2500$ K

Fig. 3은 실제 크기의 원자로에서 중대사고 발생 시, Crust가 생성되는 노심용융물 jet의 직경과 속도를 나타낸 것으로, 각 graph의 아래쪽 해당되는 노심용융물 jet에서는 crust가 발생하여 희생물질의 침식률이 최대값에 이르게 된다. Fig. 4는 희생물질의 침식률을 온도 2800K의 노심용융물 jet 반경의 함수로 나타낸 것으로, Fig. 3에 나타난 임계값 이하의 jet 직경에서는 최대 침식률을 유지하다가 직경이 증가함에 따라 지수 함수적으로 줄어드는 경향을 보인다.

4. 결론

중대사고 시 원자로 용기가 파손되어 그 틈으로 나오는 노심용융물 jet 충돌에 의한 희생물질의 침식률

을 경계층 이론을 바탕으로 하여 수치적 모델을 구성하고 최근 수행된 실험결과와 비교하였다. 모델 개발 결과, 실험실 규모의 작은 노심용융물 jet에서는 crust가 발생하여 노심용융물 조건에서 최대의 침식률을 나타내었으나 실제 원자로 크기의 노심용융물 jet에서는 crust가 발생하지 않고 이론적인 최대값보다 작은 침식률을 나타내었다. 본 모델을 실제 원자로에 적용할 경우 jet충돌에 의한 희생물질의 침식현상이 지속되는 시간은 약 30초 내외이므로 약 1.5~2cm 정도의 희생물질이 침식될 것으로 예상되어 추가적인 보호물질의 설치는 불필요한 것으로 판단된다.

Acknowledgements

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

References

1. Saito, N. *et al.*, "Melting Attack of Solid Plates by High Temperature Liquid Jets - Effect of Crust Formation", ANS Proc. Nat'l Heat Transfer Conference, Philadelphia, PA, 1989, (August 6-9), pp. 277-289
2. Epstein, M. and Zhou, Q., "Sacrificial Material Ablation Model (Revision 1)", Fauske & Associates, LLC Memo, 2013, June 26
3. Martin, H., "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", Advances in Heat Transfer 13, Academic Press, New York, 1977
4. Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1979
5. Epstein, M. "Proposed Jet Impingement Heat Transfer Experiment", Fauske & Associates, LLC Memo (May 27) in "Final Report: Technical Consulting for EU-APR1400 Core Catcher Development", 2011