

중형냉각재상실사고의 PCT에 대한 ATLAS와 LSTF 장치의 대응 실험 검토

김연식[†] · 강경호

한국원자력연구원 원자로계통안전연구부

(2019년 7월 26일 접수, 2019년 8월 27일 수정, 2019년 8월 30일 채택)

Investigation of PCT Behavior in IBLOCA Counterpart Tests between the ATLAS and LSTF Facilities

Yeon-Sik Kim[†] · Kyoung-Ho Kang

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 26 July 2019, Revised 27 August 2019, Accepted 30 August 2019)

요 약

ATLAS와 LSTF 장치에서 수행된 저온관(CL) 파단 13% 및 17% IBLOCA 대응실험들을 비교하고 특히, 핵심 관심 인자인 노심 침투피복온도(PCT)에 대하여 비교 검토하고 아울러 주요 열수력 현상에 대하여 토론하였다. 비교 검토에서 두 건의 CL 파단 IBLOCA 대응실험들은 PCT 거동에 있어서 꽤 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인하였는데 이는 두 장치의 척도 차이로 인한 왜곡현상을 벗어나는 경향을 보이고 있다는 점에서 두 장치의 원자로냉각재계에 대한 자세한 설계 비교를 수행하였다. 이에 두 장치 사이에 핵연료조정판(FAP) 설계에 있어서 차이가 있다는 점을 확인하였다. 이에 따라 IBLOCA 사고시 Reflux 응축수의 노심 유입에 중요한 역할을 하는 CCFL 관련 무차원직경 값에서도 두 장치에서 매우 다른 차이를 보이고 있다는 점에서 CL 파단 IBLOCA 대응실험에서의 PCT 거동의 현격한 차이를 설명할 수 있는 원인일 수 있는 인자라는 것을 발견하였다. 향후 관련 설계 차이점을 근거로 더 자세한 검토와 분석을 통해 관련 현상을 이해할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 중형파단냉각재상실사고, Reflux 응축수, Loop Seal Clearing, 침투피복온도

Abstract - A comparison of CL 13% and 17% IBLOCA counterpart tests(CPTs) between the ATLAS and LSTF facilities was carried out and the behavior of peak cladding temperatures(PCTs) and related thermal hydraulic phenomena were investigated and discussed. There appeared quite a big difference in PCT behavior between the two CPTs and a further comparison of reactor coolant system design between the two facilities was performed. As a result, there was a difference in fuel alignment plate (FAP) design, e.g., one FAP in ATLAS, a combination of upper core plate and upper end box in LSTF, respectively. The FAP design mainly affects the reflux condensate behavior in IBLOCA tests and any difference in FAP design can be a possible reason for different PCT behavior between the two facilities. It should be a further study to find the reason of different PCT behavior between the two facilities.

Key words : IBLOCA, Reflux Condensate, Loop Seal Clearing, PCT

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 042-868-2868 E-mail : yskim3@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원(KAERI)에서 개발·운영중인 아틀라스(ATLAS)는 국내에서 개발된 가압경수로(PWR)인 APR1400과 OPR1000의 안전성 평가 및 검증 을 위한 종합효과 열수력실험 장치로서 기준원전인 APR1400 대비 1/2 길이/높이, 1/12 직경, 1/288 체적비로 설계되었으며 APR1400에서 일어날 수 있는 모든 사고 시나리오들에 대하여 모의 실험을 수행할 수 있다[1]. 본격 운영되기 시작한 2007년부터는 우선적으로 다양한 설계기준 사고(DBA) 시나리오들에 대한 실험자료들을 생산했다. 수행된 DBA사고와 관련하여 특기할 사항으로서 2018년 9월에 미국 원자력규제위원회(USNRC)로부터 APR 1400에 대한 표준설계인가(SDA)를 받았는데 APR 1400에 대한 핵심 안전성 평가 항목인 양단파단 대형냉각재상실사고(GB LBLOCA)시 재관수 단계에서의 노심 침투피복온도(PCT) 평가를 위한 실증 근거자료로서 ATLAS의 재관수 실험데이터가 활용되었다는 것이다. 2011년에 동일본에서 발생한 지진 및 쓰나미로 후쿠시마 원전의 폭발이 발생한 이후에는 ATLAS 장치는 DBA사고 뿐만 아니라 설계기준 초과 사고(Beyond-DBA) 시나리오들에 실험 들도 수행되었다. 후쿠시마 사고이후 ATLAS는 국제 원자력계로부터 많은 관심을 받게 되었고[2,3] 이에 따라 OECD-ATLAS Project 가 2014.04부터 3년간 수행되었다. 동 프로그램안에서는 후쿠시마 사고와 같은 발전소완전정전(SBO) 관련 시나리오와 완전급수상실(TLOFW)과 같은 Beyond-DBA 시나 리오와 또한 국제적으로 이슈가 되고 있는 중형냉각 재상실사고(IBLOCA)에 대한 실험들이 수행되었다. 그중 IBLOCA 실험 항목은 이미 일본원자력에너지 기구(JAEA)가 수행했던 OECD-ROSA2 Project에서 LSTF장치를 통해 생산된 두 건의 IBLOCA들, 즉 저온관 13% 및 17% 파단에 대한 대응실험들로서 두 장치에서 일어나는 주요 열수력 현상에 대한 비교·검토를 수행하였다.

일본 JAEA에서 운영해 오고 있는 LSTF는 웨 스팅하우스의 4-루프 가압경수로 대비 1/1 길이/높이와 1/48 체적비로 설계된 종합효과실험 장치로서 주된 목적은 소형파단냉각재사고(SBLOCA)를 모의하는 장치이다[4]. 동 장치의 기준원전은 4-루 프이지만 LSTF에서는 인접한 2개의 루프를 하나로 모의하여 좌우 대칭형 2-루프로 설계되었다. 또한 종합효과실험장치로서는 1/48 체적비의 대형 급에 속하고 또한 길이/높이비도 기준원전과 1:1 비율이어서 SBLOCA 모의에 있어서 기준원전대 비 열수력현상의 왜곡이 작은 장치로 여겨져 국제 적으로 많은 관심과 공동 활용이 있어 왔다.

본 논문에서는 두 장치에서 수행된 저온관 파 단 13% 및 17%인 대응 IBLOCA 실험결과들을 비 교하고 특히, 핵심 관심인자인 노심 침투피복온도 (PCT) 및 관련 열수력 현상 검토와 함께 상이한 실험결과에 대한 원인에 대하여 논의하였다. 두 장치간 및 실험결과에서 확인된 차이점은 향후 관 련 노심 열수력 현상 이해와 모델 개선에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 노심 PCT 영향 주요 열수력현상

IBLOCA 시나리오에서의 안전성 이슈는 PCT이 다. 노심 온도는 결국 노심 수위와 밀접한 관계가 있고 이에 영향 미치는 관련 열수력 현상은 원자 로냉각재펌프(RCP)와 증기발생기(SG) 사이에 있는 U자 배관인 Cross-Over Leg (COL)의 뚫림 현상 즉, Loop Seal Clearing과 SG U-튜브내에서 일차측의 증기가 응축되어 생긴 응축수가 고온관을 통하여 노심으로 역류하여 들어오는 Reflux Condensate 거동이다. 본 장에서는 두 가지 현상에 대한 자세 한 검토와 논의를 기술하였다.

2-1. Loop Seal Clearing 현상

Loop Seal Clearing은 냉각재상실사고 시나리오 에서 매우 중요한 열수력 현상으로서 사고 초기 노심 수위에 직접적인 영향을 미쳐서 PCT가 발생 하는 원인을 제공하는 현상이다. ATLAS 장치를 통해서 수행된 저온관 파단이나 직접안전주입관(DVI) 파단 소형냉각재상실사고(SBLOCA) 실험 결과들에서 파단 크기에 따른 Loop Seal Clearing 발생 시점 과 위치들의 검토에서 Loop Seal Clearing은 노심 수위 거동에 직접적인 영향을 미쳐 결국 노심의 PCT 발생을 유발한 것으로 확인되었다[5]. Fig. 1 에는 ATLAS 장치에서의 COL 또는 Loop Seal 형상 을 보여주고 있다. 그림에서 보여주듯이 Loop Seal 은 SG 일차측 출구와 RCP 사이를 연결하는 U자 배 관으로서 배관을 채우고 있는 물이 동방향(Concurrent) 마노미터 역할을 하여 노심 수위에 영향을 미치게 된다. 사고시 일차계통내 흐르는 유동의 구 동력은 노심에서 발생된 증기로 노심 가압이 일어 나고 상대적으로 낮은 압력을 유지하고 있는 강수 관(Downcomer)사이의 압력차이로 유동이 발생하게 되는데 Loop Seal의 최종단인 RCP쪽 수직배관에 물이 차있을 경우 이것이 물막음 역할을 하여 수직 관내 물막음이 제거되는 순간까지는 노심 상부 압력 이 계속 증가하게 된다. (저온관이나 DVI SBLOCA 사고시 강수관이 노심보다 상대적으로 압력이 낮 은 이유는 냉각재가 격납건물 대기로 빠져나가는 파단 위치가 모두 강수관과 연결된 배관이기 때문

이다. 따라서, Loop Seal Clearing은 강수관과 연결된 배관에서 파단이 발생할 때 발생할 확률이 커지게 되는 것이다.) Loop Seal내 물막음 높이에 해당하는 압력차가 노심과 강수관 사이에 생기기 전까지는 노심 압력이 지속적으로 가압이 된다. 이때 노심은 이상유동 수조 거동을 보이게 되는데 즉, 노심이 가압되면 노심내 수위를 이루고 있는 기포들이 수축되어 노심 수위가 감소하게 되고 이로 말미암아 노심 상부에서 증기로 노출될 가능성이 커지게 되고 이는 노심 PCT 증가로 연결이 되는 것이다. 이와 같이 노심 가압으로 노심 기포가 가장 많이 수축되는 시점은 Loop Seal내 물막음의 소개 직전이며 이때 노심은 최소 수위가 되어 노출된 노심 상부에서는 PCT가 최대로 되는 것이다.

하나의 예로서 Fig. 2에는 ATLAS에서 수행된 100% DVI파단 SBLOCA에서의 노심 PCT를 Loop Seal Clearing 발생 시점과 종점을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 노심 PCT는 Loop Seal Clearing이 일어나는 중간에 발생하며 이는 Loop Seal Clearing 현상이 노심 수위와 PCT에 매우 중요한 영향을 미치는 인자라는 것을 보여주고 있다. 특기할 사항은 노심 온도는 Loop Seal Clearing 이후에는 계통의 포화온도가 되는데 이는 강수관에 수위를 유지하고 있던 물이 Loop Seal Clearing 이후 노심으로 유입되므로 말미암아 노심 수위가 회복되기 때문이다. SBLOCA 사고에서 발생

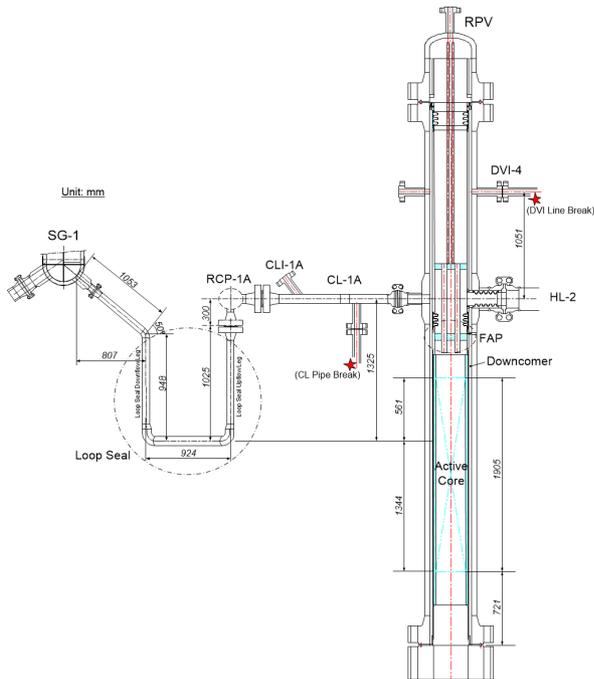


Fig. 1. Schematic arrangement of loop seal in ATLAS facility

하는 Loop Seal Clearing 현상에 영향 미치는 이전의 인자분석 연구에서 Loop Seal Clearing 발생 시점과 노심에 영향 미치는 핵심 인자는 노심 출구에 있는 핵연료조정판(FAP)과 고온관(HL), SG 입구 플레넘, SG U-튜브, 그리고 Loop Seal 배관에서의 역방향유동제한(CCFL)이라는 것을 확인하였다[6]. (여기서, FAP는 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 노심위에 위치한 판이다.) 동 연구에서 확인된 것으로서 FAP, HL, SG 입구 플레넘 그리고 Loop Seal 배관에서는 Kutateladze 모델이, 그리고 SG U-튜브에서는 Wallis 모델이 타당함을 보였다.

2-2. Reflux Condensate 거동

Reflux Condensation은 SBLOCA 사고시 파단을 통한 냉각재 유출로 원자로냉각재계통(RCS)이 감압되는데 RCS 압력이 증기발생기(SG) 이차측 보다 높은 경우 U-튜브내에서 증기나 이상의 냉각재가 식어 응축이 되는 열전달 현상을 말한다. ATLAS의 SBLOCA 실험들에서 확인된 Reflux Condensation 현상은 대부분 Loop Seal Clearing 종료 시점 부근까지 일어나는 것으로 확인되었다[7]. 그림 3에서 보이는 바와 같이 SBLOCA 사고 발생후 Loop Seal Clearing 종료 시점까지는 SG U-튜브내에서 일차측 냉각재가 식어서 수직방향인 U-튜브를 거슬러 아래쪽으로 응축수(Condensate)가 내려오고 먼저 SG 입구 플레넘(Inlet Plenum)에 쌓이다가 넘치나 는 물은 고온관(HL)으로 역류하여 최종적으로 노심 상부의 FAP를 통하여 노심으로 유입된다. ATLAS 장치에서 Loop Seal Clearing 종료 시점까지 일어나는 Reflux Condensate의 노심으로의 유입을 확인할 수 있는 곳은 SG 입구 플레넘과 HL에서의 수위 변화로 알 수 있다. 즉, SG 입구 플레넘의 수위 변화는 SG U-튜브에서 떨어지는 응축수가

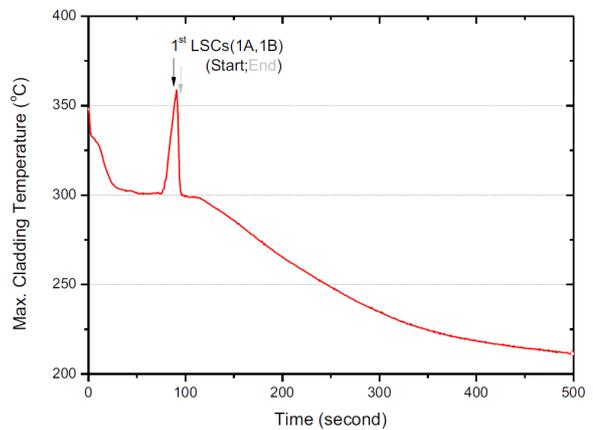


Fig. 2. Core maximum temperature in a 100% DVI line SBLOCA

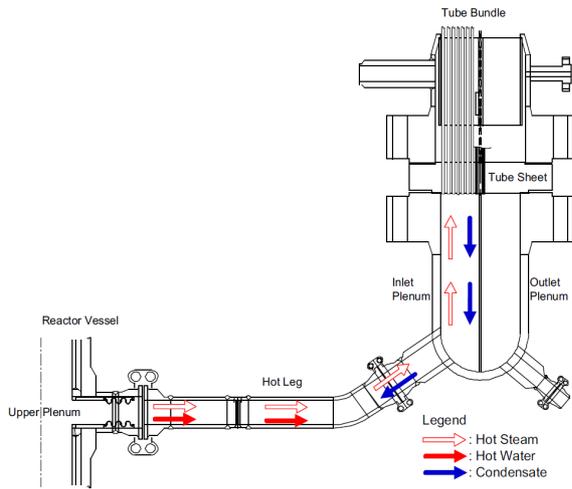


Fig. 3. Arrangement of the ATLAS facility related to reflux condensation

먼저 모이는 것을 반영하며 HL에서의 수위 변화는 SG 입구 플레넘에서 HL로 역류해 들어오는 응축수 거동을 보여주기 때문이다. 선행된 관련 연구 [7]에서 확인된 바와 같이 HL에서의 수위 거동으로 응축수의 역류를 알아내는 것은 매우 한정적이라 점에서 ATLAS 장치에서는 SG 입구 플레넘에서의 수위 변화가 Reflux Condensate의 거동을 가장 잘 나타내는 것으로 판단된다.

SG U-튜브내에 생긴 응축수가 노심에 유입되기 위해서는 수직방향의 U-튜브를 거슬러 내려오고 또한 SG 입구 플레넘을 넘어온 후 HL을 역류하여 내려와야 하며, HL에서 노심 상부 플레넘(Upper Plenum, 그림 3 참고)으로 넘어온 물은 상부 플레넘 아래에 위치한 FAP를 지난 후 노심 상부를 통해 노심으로 유입된다. 응축수가 노심에 도달하는 모든 과정은 CCFL이 지배하는 유동으로서 각 부분에서의 적절한 CCFL 모델이 적용되어야만 해석적 모의가 가능하게 된다. 앞 절에서 언급하였다시피 FAP, HL, 그리고 SG 입구 플레넘에서는 Kutateladze 모델이, 그리고 SG U-튜브에서는 Wallis 모델이 적용된다. 일반적으로 CCFL 모델 적용에 있어서 Kutateladze 모델과 Wallis 모델의 적용 기준은 다음의 식 (1)에 나타난 바와 같이 무차원직경(D^*)이 기준이 된다.

$$D^* = D \sqrt{\frac{g(\rho_G - \rho_L)}{\sigma}} \quad (1)$$

여기서, D 는 배관의 직경(m), g 는 중력 가속도 (m/sec^2), ρ_G 는 기상의 밀도(kg/m^3), ρ_L 는 액상의 밀도(kg/m^3), 그리고 σ 는 표면장력(N/m)이다. 일반적으로 무차원직경(D^*)이 40 미만에서는 Wallis

모델이 그리고 40 이상에서는 Kutateladze 모델이 적용되는데 이는 기수행된 분석연구[7]에서도 확인된 바 있다.

2-3. Reflux Condensate 거동과 Loop Seal Clearing 관계

일반적으로 Reflux Condensation은 Loop Seal Clearing이 종료되는 시점 부근까지 일어나는 것으로 알려져 있다[7]. 이에 대한 근거는 Loop Seal Clearing이 발생하면 일차계통의 압력은 이차계통 압력보다 낮아지게 되므로 이때부터는 이차계통에서 일차계통으로 열이 전달되는 역열전달(Reverse Heat Transfer)이 되기 때문이다. 하지만 ATLAS에서 수행되었던 CL파단과 DVI 파단 SBLOCA 실험 결과를 보면 Reflux Condensation과는 별개로 응축수의 거동은 다름을 보여주고 있다. 그림 4에는 2", 4", 6", 그리고 8.5" CL파단 SBLOCA 사고들에 대해서 SG 입구 플레넘의 수위변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입구 플레넘 수위가 갑자기 줄어든 후 다시 수위가 회복되는 경우는 응축수로 인한 수위 회복으로 간주되는데 파단 크기가 클수록 응축수로 인한 수위 회복이 빨라지는 것을 알 수 있다. (그림에서 가장 작은 파단인 2" SBLOCA의 경우 Loop Seal Clearing 현상 자체가 발생하지 않았다.) 그림에서 화살표는 해당 파단 사고의 입구 플레넘 수위 변화에 상응하는 사고에서의 Loop Seal Clearing 시점을 나타낸 것으로서 4"와 6" SBLOCA 경우에는 Loop Seal Clearing 이전부터 상당한 시간동안 응축수 유입으로 인한 수위 회복이 발생함을 알 수 있다. 이는 Loop Seal Clearing 이전까지 응축된 응축수들이 SG U-튜브 수직부분에서 CCFL 현상에 의해 내려오는 응축수 양이 제한을 되고 동일한 경향이 Loop Seal Clearing 이후까지도 이어지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 입구 플레넘 수위 회복의 기울기를 보면 Loop Seal Clearing 전후의 변화가 크지 않음에서 확인된다. 동일한 경향은 DVI 파단 SBLOCA 실험에서도 확인된다. 그림 5에는 5%, 25%, 50%, 그리고 100% DVI 파단 SBLOCA 사고들에 대한 SG 입구 플레넘의 수위 변화를 나타낸 것이다. (여기서 5%, 25%, 50%, 그리고 100% DVI 파단의 파단 크기는 각각 2", 4", 6", 그리고 8.5" 파단크기에 상응한다.) DVI 25%, 50%, 그리고 100% SBLOCA에서도 Loop Seal Clearing 이전부터 Loop Seal Clearing 이후 상당한 시간동안 응축수 유입으로 인한 수위 회복이 발생함을 알 수 있다. 여기서, CL파단과 DVI 파단 SBLOCA 실험 결과들에서 특기할 사항은 응축수 유입으로 SG 입구 플레넘에서의 수위 회

복은 파단이 클수록 빨리 일어난다는 것이다.

3. 저온관(CL) IBLOCA 대응실험에서의 PCT 비교

두 개의 CL 파단 IBLOCA들 즉, 13% 파단과 17% 파단에 대해서 LSTF와 ATLAS에서 각각 실험이 수행되었다. 척도비가 큰 LSTF 실험을 기준으로 척도비가 작은 ATLAS에서의 척도 왜곡을 최소화하기 위하여 척도분석을 시행하여 초기 및 경계조건들을 설정하여 실험을 수행하였다. 척도 분석결과 LSTF기준 ATLAS의 길이 척도비는 0.52 그리고 직경 척도비는 0.62로 나타났으며 이를 바탕으로 시행된 대응 실험 결과 온도.압력은 1:1로 예측되었다.

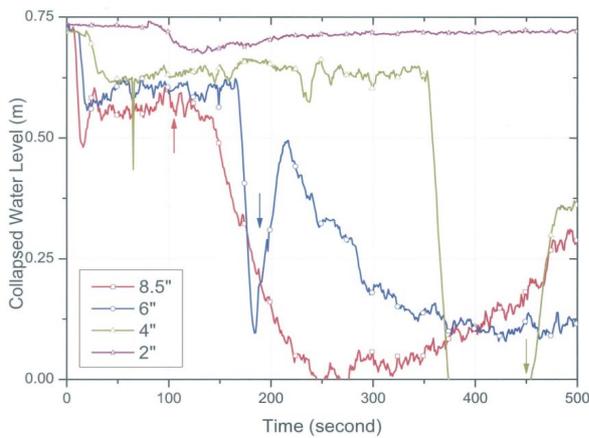


Fig. 4. Collapsed water level in SG inlet plenum for CL SBLOCAs of ATLAS

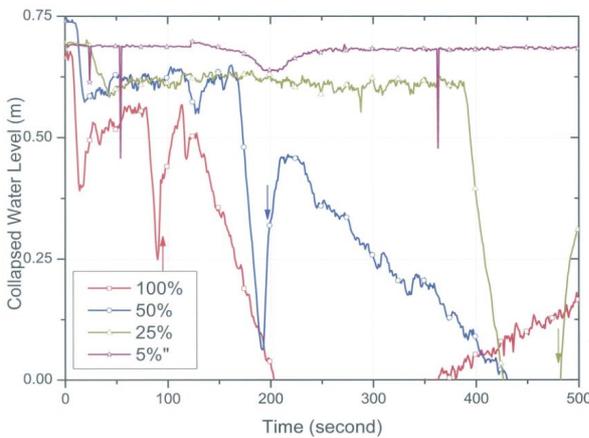


Fig. 5. Collapsed water level in SG inlet plenum for DVI SBLOCAs of ATLAS

3-1. 저온관 13% 파단 IBLOCA PCT 비교

ATLAS에서 수행된 CL 13% 파단 IBLOCA 대응실험은 기준실험인 LSTF의 13% 파단 초기조건과 경계조건을 척도분석 요건에 따라 맞추어 수행되었다[8]. 그림 6에는 ATLAS와 LSTF 실험의 PCT 결과를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 LSTF에서는 두 번의 PCT가 발생하였는데 ATLAS에서는 한번의 PCT가 일어났다. 언뜻보기에 ATLAS 결과가 LSTF 결과를 모두 포함한 것처럼 보이지만 자세히 살펴보면 LSTF의 첫 번째 PCT 발생 시점은 ATLAS 경우와 비교하여 일찍 일어나고 있는 것을 보여 주고 있다. 두 실험간의 PCT 비교의 초점은 PCT가 일어나는 시점과 크기인데 두 장치간의 PCT 비교에서 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 다만, ATLAS의 경우 PCT 크기는 LSTF에 비교해서 매우 큰 값을 보였다는 사실이다.

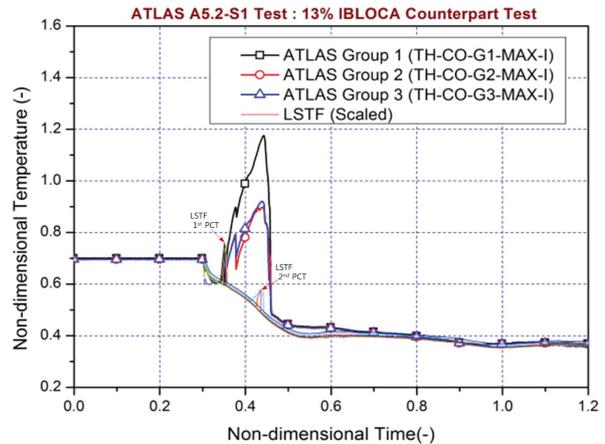


Fig. 6. Comparison of PCTs in CL 13% IBLOCA tests between the ATLAS and LSTF

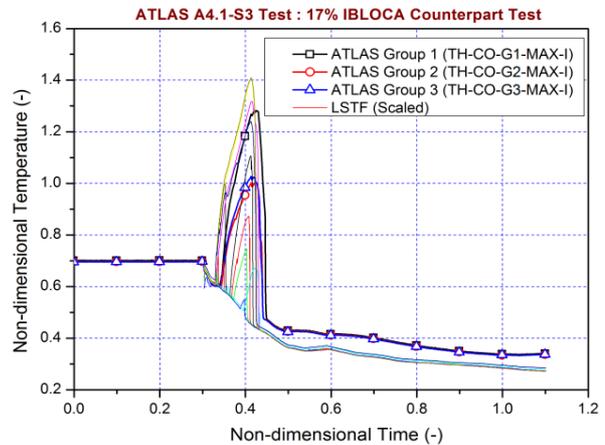


Fig. 7. Comparison of PCTs in CL 17% IBLOCA tests between the ATLAS and LSTF

3-2. 저온관 17% 파단 IBLOCA PCT 비교

ATLAS에서 수행된 CL 17% 파단 IBLOCA 대응실험도 기준실험인 LSTF의 17% 파단 초기조건과 경계조건을 척도분석 요건에 따라 맞추어 수행되었다[9]. 그림 7에는 ATLAS와 LSTF 실험의 PCT 결과를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 LSTF와 ATLAS 실험에서 유사한 PCT 거동이 발생하였다는 것을 알 수 있다. 즉, 한번의 PCT에서 그 발생 시점과 크기의 경향도 매우 유사한 경향을 보이는 것으로 봐서 CL 17%의 PCT 거동은 대응 실험의 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 하지만 두 실험간 실험조건에서 차이점이 있는데 LSTF에서는 예비 실험을 통해서 정상적인 붕괴열로는 PCT가 매우 높게 나왔기에 노심 히터의 과열을 방지하기 위하여 노심 온도에 따라 붕괴열을 미리 조정하여 수행되었다는 점이다. 즉, 노심 온도에 따라 정격 붕괴열에 대한 비율을 685 °C=70%, 688 °C=35%, 693 °C=13%, 704 °C=5%, 그리고 730 °C=0% 로 설정되어 수행되었다. 그러나, ATLAS에서는 실험 결과 붕괴열 조절이 필요없어 정격 붕괴열에 따라 실험이 수행되었다. 그림 8에는 ATLAS와 LSTF 실험의 붕괴열 변화를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 LSTF에서는 PCT 크기가 미리 설정된 온도들을 모두 초과하는 일이 발생하였음을 알 수 있다. 사실 LSTF 17% 파단 IBLOCA는 OECD/NEA ROSA-2 Project[10]로 수행되었는데 17% 파단에서의 PCT 폭등(Excursion) 경향은 13% 파단대비 이해할 수 없는 현상으로 인식되어 이것을 절벽효과(Cliff Effect)라 불렀다. 즉, 13% 파단과 17% 파단 사이에는 PCT에 영향 미치는 뭔가 다른 열수력 현상이 개입하고 있다는 의미인데 이에 대하여 원인을 찾기 위한 노력이 그사이 있었지만 아직도 명확한 이유를 밝혀내지 못하고 있다.

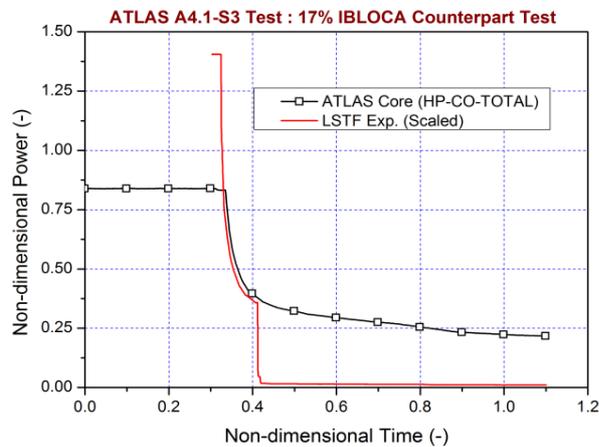


Fig. 8. Comparison of decay power in CL 17% IBLOCA tests between the ATLAS and LSTF

3-3. ATLAS와 LSTF의 FAP 설계 차이점 발견

두 건의 CL파단 IBLOCA 대응실험들에서 PCT 거동은 두 장치사이에 꽤 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인하였다. 두 장치의 척도 차이로 인한 왜

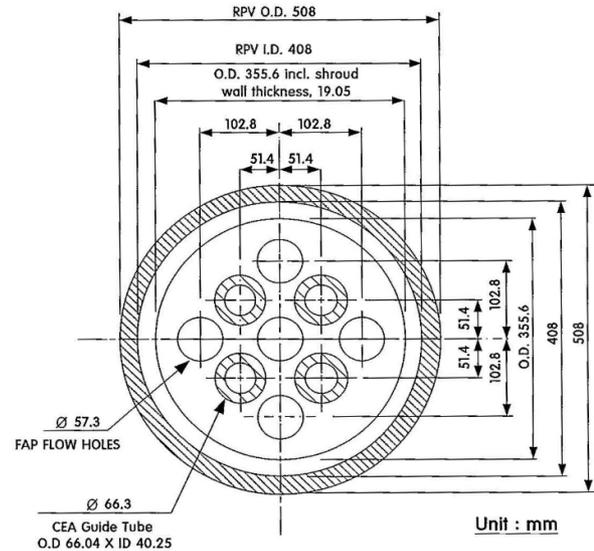


Fig. 9. Configuration of FAP in ATLAS facility

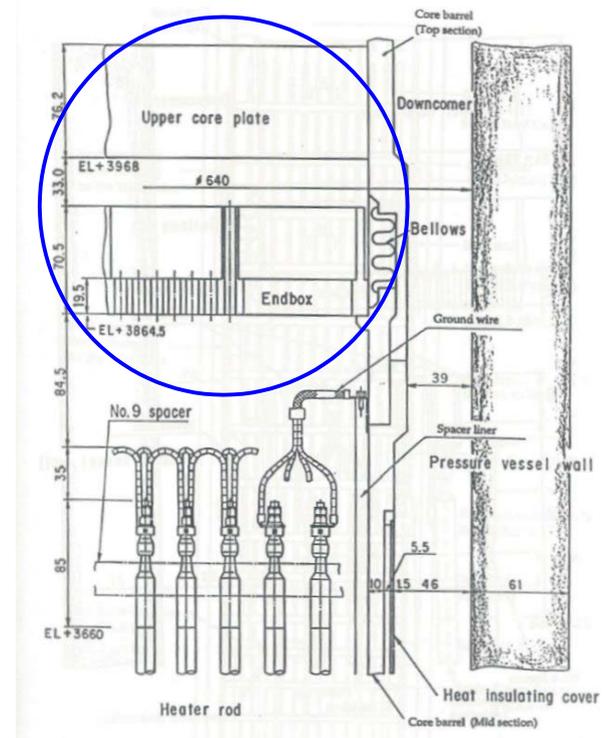


Fig. 10. Configuration of FAP in LSTF facility

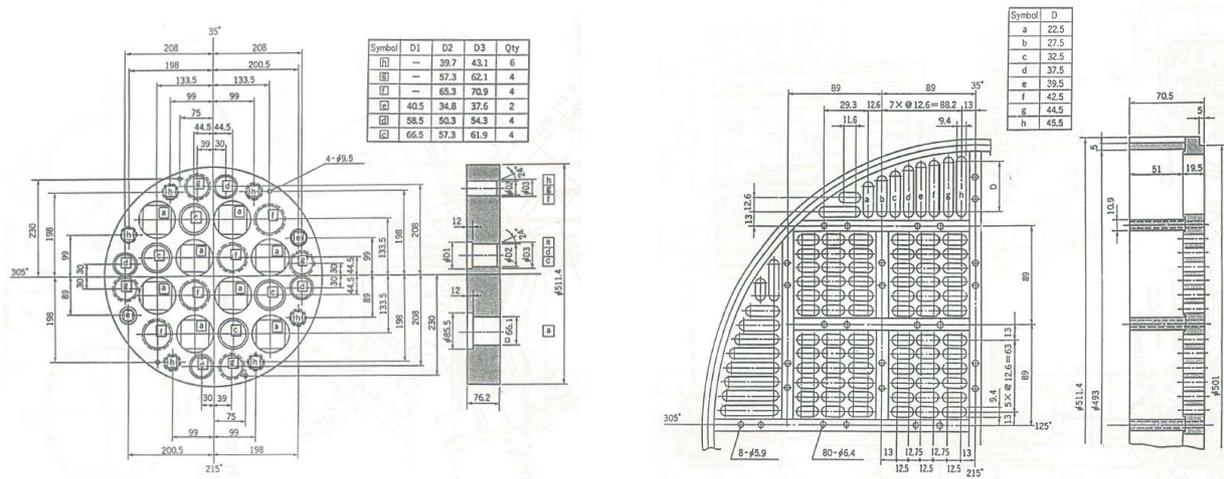


Fig. 11. Configuration of Upper Core Plate(Left) and Upper End Box(Right)

곡현상을 고려하더라도 나타난 PCT 거동에는 척도 왜곡과는 다른 무엇인가가 있다는 것을 의미한다. 이에 두 장치의 원자로냉각재계에 대한 자세한 비교를 수행한 결과 핵연료조정판(FAP) 설계에서 두 장치 간에 상이한 점이 발견되었다. 여기서, FAP라는 것은 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 노심상부와에 상부 플레넘 사이에 위치한 판이다. 이 판은 HL을 역류하여 들어온 Reflux 응축수가 노심으로 유입되기 위해 거쳐야 하는 최후의 부품이기도 하여 이에 대한 설계 차이는 Loop Seal Clearing 전 응축수가 노심으로 유입되는 응축수 양에 영향을 미치게 되어 결국 노심 PCT 발생 시점 및 크기도 영향을 미치게 된다. 그림 9에는 ATLAS 장치에 설계된 FAP를 보여 주고 있는데 둥근판에 55mm 크기의 구멍이 다섯 개가 뚫려있다[11]. 이 판에서 일어나는 CCFL 현상에 중요한 역할을 하는 무차원직경(D^*)은 Loop Seal Clearing 부근 조건 즉, 8.0 MPa 포화조건에서 약 40으로 확인되었다.

그림 10에는 ATLAS의 FAP 설계에 상응하는 LSTF 장치의 FAP를 나타낸 것인데, 그림에서 보이는 바와 같이 LSTF의 FAP는 두 개의 부품으로 이루어 졌음을 알 수 있다[4]. 즉, 아래쪽은 상부 끝판(Upper End Box)과 위쪽에는 상부 노심판(Upper Core Plate)으로 구성되어 있다. 따라서, LSTF 장치에서는 CL IBLOCA 시나리오에서 Loop Seal Clearing 전 Reflux 응축수가 HL을 역류하여 들어온 후 노심으로 유입되기 위해서는 바로 이 상부 노심판과 상부 끝판을 거쳐야 한다. 두 개의 판이 가진 각각의 CCFL 요건이 Reflux 응축수의 노심 유입에 결정적인 영향을 미칠 수 있다는 것은 짐작할 수 있다. 그림 11에는 두 개의 판에 대한 자세한 모양을 나타내었는데 이들을 근거로 상부 노

심판과 상부 끝판들의 CCFL 관련 무차원직경(D^*)은 Loop Seal Clearing 부근 조건 즉, 8.0 MPa 포화 조건에서 대략 각각 43과 13이었다.

따라서, 두 장치에서의 상이한 FAP 설계에 따라서 CL IBLOCA 사고시 Reflux Condensate가 노심으로 유입되는 양에 영향을 미칠 수 있고 이는 노심 PCT 결과에도 깊은 영향이 있다는 의미에서 두 장치의 대응 IBLOCA 실험들에 대한 재검토와 분석이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 ATLAS와 LSTF 장치에서 수행된 저온관 파단 13% 및 17% IBLOCA 대응실험들을 비교하고 특히, 핵심 관심 인자인 노심 PCT에 대하여 비교,검토하고 관련 주요 열수력 현상에 대하여 토론하였다. 비교,검토에서 두 건의 CL 파단 IBLOCA 대응실험들은 PCT 거동에 있어서 꽤 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인하였는데 이는 두 장치의 척도 차이로 인한 왜곡현상을 벗어나는 경향을 보이고 있다는 점에서 두 장치의 원자로냉각재계에 대한 자세한 설계 비교를 수행하였다. 이에 두 장치 사이에 핵연료조정판(FAP) 설계에 있어서 차이가 있다는 점을 확인하였다. 또한 Reflux 응축수의 노심 유입에 중요한 역할을 하는 CCFL 관련 무차원직경 값에서도 매우 다른 차이를 보이고 있다는 점에서 두 장치간 CL 파단 IBLOCA 대응실험에서의 PCT의 현격한 차이를 설명할 수 있는 원인일 수 있는 인자라는 것을 발견하였다. 향후 관련 설계 차이점을 근거로 더 자세한 검토와 분석을 통해 관련 현상을 이해할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Kim, Y.-S., et al., 2008. Commissioning of the ATLAS Thermal-Hydraulic Integral Test Facility, *Annals of Nuclear Energy*, 35, pp. 1791-1799
2. Choi, K.-Y., et al., 2012. Major Achievements and Prospect of the ATLAS Integral Effect Tests, *Science and Technology of Nuclear Installation*, 2012(Jan.), pp. 1-18
3. Song, C.-H., et al., 2015, TLAS program for advanced thermal-hydraulic safety research, *Nuclear Engineering and Design*, 294, pp. 242-261
4. Suzuki, M., et al., 2003. ROSA-V Large Scale Test Facility (LSTF) System Description for the Third and Fourth Simulated Fuel Assemblies, *JAERI-Tech 2003-037*, pp. 1-5; 120-212
5. Kim, Y.-S. and Cho, S., 2014. An Experimental Investigation of Loop Seal Clearings in SBLOCA Tests, *Annals of Nuclear Energy*, 63, pp. 721-730
6. Kim, Y.-S. and Choi, K.-Y., 2014. An Analytical Investigation of Loop Seal Clearings in SBLOCA Tests, *Annals of Nuclear Energy*, 68, pp. 12-18.
7. Kim, Y.-S., et al., 2017. Reflux Condensation Behavior in SBLOCA Tests of ATLAS Facility, *Annals of Nuclear Energy*, 99, pp. 227-239
8. Bae, B.-U., et al., 2017. Counterpart Test on IBLOCA of 13% Cold Leg Break in ATLAS Facility, *ANS Annual Meeting*, Jun 11-15, 2017 San Francisco, CA, pp. 1405-1407
9. Bae, B.-U., et al., 2017. Integral Effect Test on 17% Cold Leg IBLOCA for Investigation of Scaling Effect, *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 18-19, 2017
10. Takeda, T. and Ohtsu, I., 2017. RELAP5 Uncertainty Evaluation Using ROSA/LSTF Test Data on PWR 17% Cold Leg Intermediate-Break LOCA with Single-Failure ECCS, *Annals of Nuclear Energy*, 109, pp. 9-21
11. Kang, K.-H., et al., 2015. Revised Description Report of ATLAS Facility and Instrumentation, *KAERI/TR-5974/2015*, pp. 43-50