

MARS를 이용한 MIDAS DVI 실험 평가해석

Post-test Analysis for the MIDAS DVI Tests Using MARS

배규환, 이영진, 권태순, 이원재, 김희철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

DVI 안전주입계통을 채택하는 APR1400의 LBLOCA시 Downcomer에서 발생하는 주요 열수력 현상을 규명하기 위하여 수정형 선형척도법을 적용한 MIDAS 실험장치에서 다양한 실험이 진행되어 왔다. 기 수행된 여러 가지의 Void height test 및 Direct bypass test 실험 결과를 다차원 최적 분석 코드인 MARS를 이용하여 평가하였다. 이들 실험에 대한 평가 결과, MARS 코드는 Downcomer에서의 증기응축, 횡방향의 고속 증기 유동에 의한 ECC의 직접우회 및 Water sweep-out 현상 등을 모사할 수 있는 능력이 있음을 알 수 있었다. 또한, 실험 결과에 비하여, MARS 코드는 Downcomer에서의 증기응축률을 과소 예측하고 이에 따라 ECC bypass율을 과대 예측하였다. 그러나, 증기 유량이 증가함에 따라 증기응축률이 감소하고 ECC bypass율이 증가하는 경향 및 EM 해석 가정 하의 ECC가 주입되는 조건에서의 ECC bypass율은 전반적으로 실험결과와 잘 일치하였다.

Abstract

Various DVI tests have been performed at MIDAS test facility which is a scaled facility of APR1400 applying a modified linear scale ratio. The evaluation results for the various void height tests and direct bypass tests using a multi-dimensional best-estimate analysis code, MARS, show that: (a) MARS code has an advanced modeling capability of well predicting major multi-dimensional thermal-hydraulic phenomena occurring in the downcomer, (b) MARS code under-predicts the steam condensation rates, which in turn causes to over-predict the ECC bypass rates. However, the trend of decrease in steam condensation rate and increase in ECC bypass rate in accordance with the increase in steam flow rate, and the calculation results of the ECC bypass rates under the EM analysis conditions generally agree with the test data.

1. 서론

현재 국내에서 개발되고 있는 차세대원자로(APR1400)는 노심 출력이 3983 MWt인 개량형경수로 (ALWR)로써 두 개의 고온관과 증기발생기, 네 개의 냉각재 펌프와 저온관으로 구성되어 있다[1]. 차세대 원자로는 개량형 원자로의 중요한 설계개선 사항중의 하나인 원자로용기직접주입 (DVI: Direct Vessel Injection) 방식과 안전주입탱크 (SIT: Safety Injection Tank)에 피동형 유량조절기구 (FD: Fluidic Device)를 장착한 안전주입계통 (SIS: Safety Injection System)을 채택하고 있다. 안전주입계통은 신뢰도를 향상시키기 위하여 기계적으로 독립된 네 트레인의 수력학적 계통으로 구성되어 있고, 전기적으로는 두 개의 계열로 분리되어 있다. 각 트레인에는 한 대의 고압안전주입펌프 (HPSIP: High Pressure Safety Injection Pump)와 한 개의 안전주입탱크가 연결되어 있고 사고시 비상노심냉각수 (ECC: Emergency Core Coolant)는 원자로용기 상부에 설치된 DVI 노즐을 통하여 원자로용기 강수부 (Downcomer)로 직접 주입된다. 이와 더불어 저압안전주입의 기능을 제거하였으며 원통형 격납용기 내부에 설치된 재장전수탱크(IRWST)가 전 사고 기간 동안 지속적으로 HPSIP에 수원을 제공한다.

이와 같이 APR1400에 채택된 DVI 안전주입은 LOCA시 ECC가 원자로용기 Downcomer 상부로 직접 주입되기 때문에 ECC의 혼합 (ECC mixing) 및 파단부로의 우회 방출 (ECC bypass) 등의 열 수력 현상이 기존의 저온관 주입 (CLI)에서와는 매우 다르게 나타날 것으로 예측된다. 따라서 ECC의 실질적인 주입 현상을 파악하고 CLI를 기본으로 개발된 기존 해석코드를 DVI에 적용하기 위해서는 DVI 열 수력 실증실험을 통한 모델 개선 및 검증 작업이 필요하다.

상기의 맥락에서 APR1400의 DVI 주입시 나타나는 열수력 현상을 규명하고 LOCA시 ECCS 성능 평가의 타당성을 입증하기 위해서는 기존의 CLI 모델을 개선하거나 DVI 고유 모델을 개발할 필요가 있고, 모델 검증은 APR1400 DVI 형상을 모사한 적절한 실험을 수행하여 이루어질 수 있다. 그리하여 APR1400 DVI 성능평가를 위한 실험적 연구가 KAERI에서 시작되었다[2]. 그 간 선형 척도비 1/7의 물-공기 예비 실험을 통하여 주요 DVI 현상을 파악하였고[3, 4], 이를 바탕으로 물-증기 실험장치의 척도해석[5]을 수행한 후, APR1400에 체적 척도법, 길이 비로 축척된 선형 척도법 및 KAERI에서 자체적으로 개발한 수정형 선형척도법을 적용하여 실험할 수 있는 MIDAS를 설계 제작하여 실험장치 본체의 간단한 기계적 수정 및 유동조건을 변화시켜가며 다양한 실험을 수행해오고 있다. MIDAS는 제한사고인 대형냉각재상실사고의 Reflood 기간동안 Downcomer에서 일어나는 다차원 열수력 현상의 규명에 초점을 맞춘 개별효과실험장치로 체적척도법의 적용시 Downcomer의 높이는 원형과 같이 하고 유로면적을 1/24.3로 축소하는 것이 되며, 선형 척도법 및 수정형 선형척도법의 적용시 길이 비는 1/4.93로 축소되는 것이다. 이러한 척도법의 적용은 MIDAS 실험장치 본체의 간단한 기계적 수정 및 유동조건 변화에 의해 이루어지도록 한 것이다[6].

실험장치의 구성은 환형 Downcomer, 노심 모의기, 과열증기 발생장치인 외장형 보일러, 세 개의 건전 저온관, ECCS 탱크와 주입펌프, 네 개의 DVI 배관, 파단 저온관, Separator 및 Containment simulator로 이루어져 있다[7]. Test vessel은 그림 1에서 보는 바와 같이 APR1400의 Downcomer와 노심 내부 구조물을 모의한 외장형 Downcomer와 Core barrel simulator로 구성되어 있다. DVI ECC 주입시 주요 다차원 열수력 현상이 일어나는 상부 및 중앙 부분의 Downcomer는 환형이고 하부 Downcomer는 Annulus와 Core barrel simulator를 단순히 연결시켜주는 파이프로 모의되었다. Annulus의 외벽에는 네 개의 DVI 노즐과 저온관 노즐이 설치되어 있다. 또한, Annulus gap을 지나는 두 개의 고온관 부분을 Blunt body로 모사하여 증기 및 ECC 유동 분포에 영향을 미치는 Blockage 영향을 고려하였다. Core barrel simulator는 노심의 열원을 직접 모의하지 않고 Dummy internal structure를 장착하여 Core barrel의 냉각재 체적 분포만을 모의하는 단순한 탱크이다. Core barrel simulator의 바닥에는 Test vessel의 수위 조절을 위하여 Drain line이 설치되어 있다.

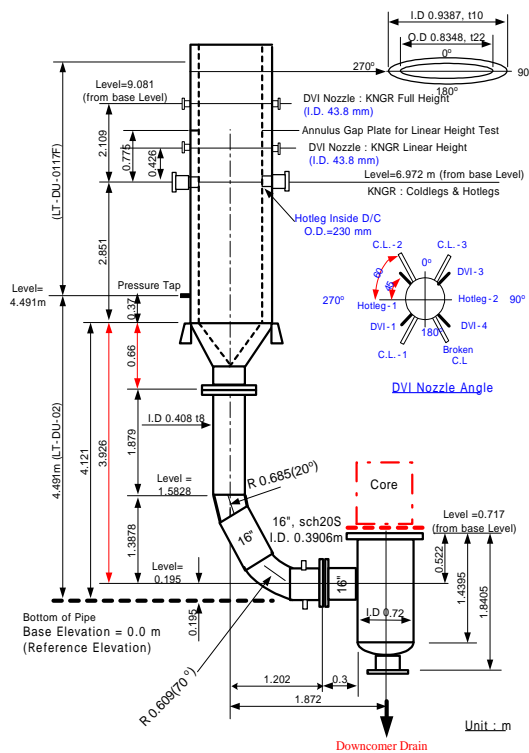


그림 1. MIDAS Test Vessel 설계도

APR1400에 체적 척도법을 적용한 Full height 실험장치는 냉각수의 체적, 유로 면적과 ECCS 유량을 1/24.3로 축소하고 Downcomer, DVI 노즐, 저온관, 고온관의 직경들은

$(1/24.3)^{1/2}$ 로 축소한 것이다. 반면에 Test vessel의 높이와 여러 노즐들의 연결 위치 및 상대적인 배열 각도 등은 원형인 APR1400과 같다. 수정형 선형척도법은 표준 선형척도법과 같이 길이를 선형척도비(1/4.93)로 축소되고, 안전주입수 및 증기의 주입속도는 선형척도비의 0.5승에 비례하여 축소된다. 따라서, 선형 척도법 및 수정형 선형척도법을 적용한 실험을 위하여 저온관 중앙에서 77.5 cm 위에 Annulus gap plate를 막고 42.6 cm 위에 DVI 노즐이 설치된다.

저온관 양단과단 LBLOCA 시 후기 Reflood 기간 동안 Downcomer 영역에서 발생하는 주요 열수력 현상을 규명하기 위하여 국내 유관기관들의 요구에 따라 다양한 실험 Matrix가 선정되었다[8, 9]. 수정형 선형척도법을 적용한 MIDAS 실험장치에서 현재까지 수행된 실험 항목은 크게 Void height test와 Direct bypass test로 나뉘어진다. 실험의 주요 관찰 변수는 비상노심냉각수의 우회율(ECC bypass fraction), 증기응축률(Steam condensation fraction), 및 Downcomer 내 ECC의 온도분포 등이다.

참고문헌[10]에 기술된 바와 같이 Void height test는 저온관 노즐 하부 근처에 축적되어 있는 액주 형태의 ECC가 건전 저온관에서 유입되는 고속의 횡방향 증기 유동에 의하여 파단 저온관으로 끌려나가는 Water sweep-out 현상을 관측하고자 수행된 실험이다. 이는 Downcomer 내 수위가 저온관 노즐 하부 근처에 유지되는 상황에서 수행되는 실험으로, 노심 하부에서 외부로 배출되는 Drain flow rate를 조절하여 정상상태를 모의한다.

Direct Bypass Test는 Downcomer의 수위를 충분히 낮게 유지시켜 Sweep-out에 의한 ECC bypass 현상을 배제시키고 Downcomer 상단에서 주입된 ECC가 액적 및 액막 형태로 하강하면서 횡 방향의 고속 증기 유동과 접촉하여 파단 저온관으로 직접 우회하는 현상만을 모의하고자 수행된 실험이다.

Void height test에서는 Water sweep-out 뿐만 아니라 Downcomer 상부에서의 Direct bypass도 동시에 일어나기 때문에 상기 두 항목의 실험을 통하여 ECC의 총 우회율에 기여하는 정도를 정량적으로 파악할 수 있다.

수정형 선형 척도법을 적용하여 현재 진행이 완료된 실험은 6개의 Void height test(Test No.: MIDAS-KM-201, 202, 204, 205, 206, 208)와 17개의 Direct bypass test(Test No.: MIDAS-KM-203, 207, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114)이다.

실험 수행시 ECC는 인허가 모델 (EM : Evaluation Model) 분석 방법론 관점에서 단일고장을 고려하여 파단 저온관에서 제일 가까운 노즐(DVI-4)과 파단 저온관에서 제일 먼 노즐(DVI-2)에서 주입되도록 하였다. 그러나, Direct bypass test중 MIDAS-KM-109, 110, 111, 112, 113, 114는 ECC 주입 위치에 따른 ECC bypass 민감도를 보기 위한 실험으로서, MIDAS-KM-109는 파단 저온관에서 제일 먼 노즐(DVI-2)에서만 ECC가 주입이 되고, MIDAS-KM-110, 111, 112, 113, 114는 파단 저온관에서 제일 가까운 노즐(DVI-4)에서만 ECC가 주입되는 경우이다.

본 논문에는 수정형 선형척도법을 적용한 MIDAS 실험장치에서 현재까지 수행된 여러

가지의 Void height test 및 Direct bypass test 실험 자료들에 대한 평가 결과가 기술되어 있다.

2. 해석 모델 및 초기/경계 조건

가. 해석 모델

본 해석에 사용된 MARS 코드는 한국원자력연구소에서 1차원 최적 열수력계통분석코드인 RELAP5[11]와 다차원 원자로압력용기 해석코드인 COBRA-TF[12]를 모듈화하여 통합/재구성한 최적분석 코드이다. 이들 두 코드를 통합, 개발하면서 코드의 모사능력을 확장하고 사용자의 편의를 도모하기 위하여 Windows Graphics 기능 등 많은 개선 사항들이 반영되어 왔다.

RELAP5 코드는 이상유동을 일차원, 2-유체, 6개의 방정식으로 모델하고, COBRA-TF 코드는 이상유동을 다차원, 2-유체, 3-유동장, 14개의 방정식으로 모델하고 있다. 따라서, 다차원적 열수력 현상의 모의가 중요한 DVI 성능 평가에 MARS 코드는 충분한 모델링 능력을 보유하고 있는 것으로 평가된다. 특히, MARS 코드는 DVI시 ECC bypass에 많은 영향을 미치는 Downcomer에서의 액적 거동과 관련하여 액적의 질량 및 운동량 방정식과 액적 계면면적밀도 수송방정식을 직접 풀어줌으로써, 액적 및 계면면적밀도의 동적인 거동을 직접 모의할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 그간 KAERI에서 UPTF DVI 실험 결과와 KAERI Air-water 실험결과에 대한 평가 계산[13, 14]을 수행하면서 DVI 열수력 현상 모델을 개선/개발하여 왔다. 예를 들어, Inverted pool 유동 영역에 대한 계면 항력 상관식과 계면 응축 열전달 상관식을 수정하고 벽면 마찰계수를 MARS 1D 모듈의 모델로 대체하였으며, 1D/3D 경계 면에서의 액적 모델을 개선하였다. 또한, 열 적 비평형 이상유동에 대한 해석능력 및 Robustness 향상을 위하여, MARS 3D 모듈의 상변화에 의한 질량 및 에너지 전달 항을 개선하였다.

그림 2는 MIDAS 실험장치의 실험 결과 평가에 사용된 MARS 2.1코드의 노드 다이어그램이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실험장치중 다차원 현상이 지배적인 Downcomer annulus 영역은 MARS 3D 모듈을 사용하고 그 외의 영역은 MARS 1D 모듈을 사용하여 모델하였다. 그리고 1D 노드와 연결되는 3D cell은 SDBVOL로 모델하였다. Downcomer의 Annular section은 축방향으로 3개의 섹션으로 나누고 상부 Downcomer annulus 영역(섹션3)은 Downcomer에 연결된 노즐들의 위치를 고려하여 원주방향으로 20°씩 분할하여 18개의 Column으로 모델하였다. 각 Column은 온도계 및 압력계의 배치를 고려하여 축 방향으로 15개의 노드로 세분하였다. Annulus cone 영역(섹션2) 및 하부 파이프 영역(섹션1)은 원주방향으로 각각 3개 및 1개의 Column으로 나누었다.

건전 저온관 CL-1, CL-2 및 CL-3는 각각, 상부 Downcomer annulus 영역의 15, 21, 6번 Column의 13번 Node에 연결되고, 과단저온관 CL-4는 12번 Column의 13번 Node에 연결되도록 하였다. DVI 배관 DVI-1, DVI-2, DVI-3 및 DVI-4는 각 저온관 바로 옆

Column인 16, 20, 7번 및 11번 Column의 15번 Node에 연결되도록 하였다. Blunt body의 고온관 HL-1 및 HL-2는 18번 및 9번 Column의 15번 Node를 중심으로 통과하도록 하였으며, 통과되는 Cell들에 대해서는 유로 면적, Perimeter, Gap width, K-factor 등의 Geometry variation data를 적용하여 실제 형상에서와 유사한 열수력 현상을 예측하도록 모델하였다. 또한, DVI 노즐이 연결되는 Downcomer cell의 횡 방향 Gap width를 조절하여 하강하는 안전주입수의 액막 폭을 실제 실험에서 관찰된 결과[15]와 같아지도록 모사하였다. 또한, 노심 배럴 모사기는 Lower plenum만 모사하고 바닥에 연결된 Drain line은 Time dependent junction으로 모사하였다. 정상상태의 개별효과 실험에 대한 본 해석에서는 ECC 및 증기 유량은 일정하게 유지하고 Drain 유량은 Downcomer의 수위가 일정하게 유지되도록 조절하였다.

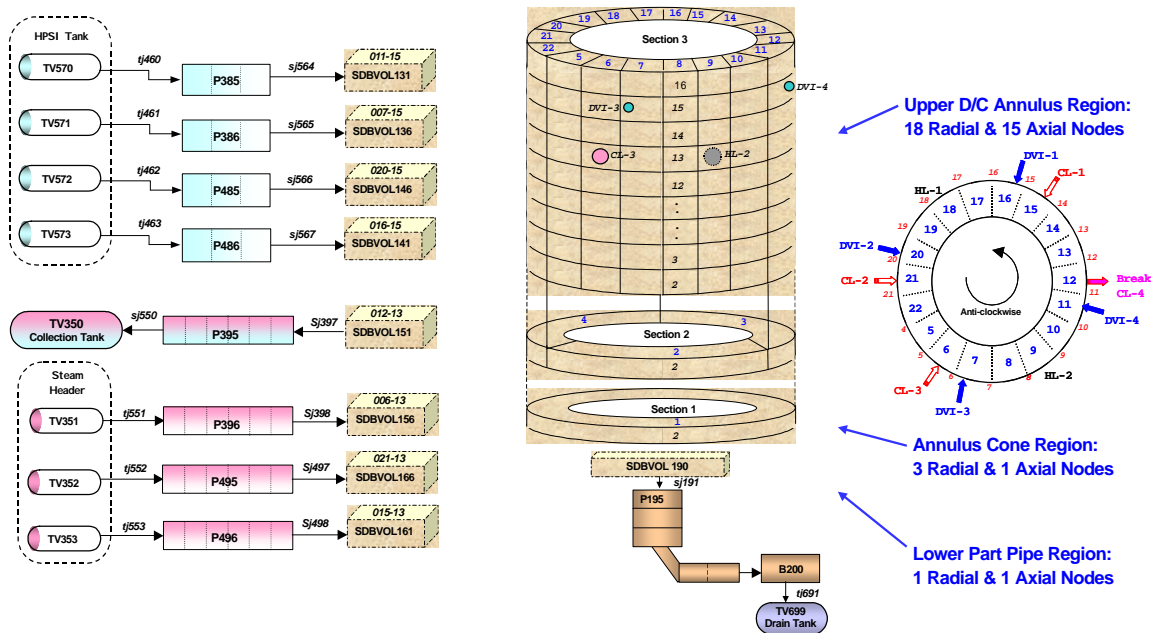


그림 2. MIDAS 실험장치에 대한 MARS 2.1 Nodalization

나. 해석 초기/경계 조건

해석은 서론에 제시된 실험 항목 중 5개의 Void height test 및 15개의 Direct bypass test case에 대하여 수행하였다. 표 1은 해석이 수행된 Test case들의 건전 저온관을 통한 증기 유량, DVI 노즐을 통한 ECC 유량 및 Downcomer의 압력 값들을 요약한 것으로, 각 정상상태 실험과정 동안 측정된 변수 값들의 평균치를 나타낸 것이다.

표 1. 해석 Case 및 주요 초기/경계 조건

Test Type	Test No.	C.L. Steam						ECC				D/C Pressure [kPa]
		Flow rate [kg/sec]			Temperature [K]			Flow rate [kg/sec]		Temperature [K]		
		CL-1	CL-2	CL-3	CL-1	CL-2	CL-3	DVI-2	DVI-4	DVI-2	DVI-4	
Void Height Test	MIDAS-KM-201	0.2665	0.2718	0.2695	470.75	470.75	470.95	1.3711	1.3593	322.75	322.75	180.0
	MIDAS-KM-204	0.2526	0.2589	0.2576	473.87	474.55	472.55	1.3668	1.3517	322.45	322.45	172.6
	MIDAS-KM-205	0.1942	0.1896	0.1887	468.48	468.07	466.36	1.3703	1.3630	322.35	322.75	172.59
	MIDAS-KM-206	0.1936	0.2008	0.2009	470.78	470.2	468.32	1.3678	1.3603	322.37	322.37	171.80
	MIDAS-KM-208	0.1938	0.1963	0.1960	473.87	473.51	472.59	1.3659	1.3539	322.34	322.34	172.60
Direct Bypass Test	MIDAS-KM-100	0.5980	0.5967	0.5976	476.73	476.75	474.48	1.3805	1.3586	322.5	322.65	169.63
	MIDAS-KM-101	0.5387	0.5372	0.5388	477.52	478.11	476.35	1.3714	1.3616	322.26	322.58	169.20
	MIDAS-KM-102	0.4587	0.4579	0.4588	474.46	475.01	473.95	1.3730	1.3615	322.25	322.48	169.19
	MIDAS-KM-103	0.3918	0.3893	0.3900	473.75	473.98	472.88	1.3630	1.3522	322.3	322.54	169.96
	MIDAS-KM-104	0.3491	0.3496	0.3506	472.77	473.28	472.05	1.3672	1.3614	322.29	322.56	171.12
	MIDAS-KM-105	0.3134	0.3123	0.3122	470.78	471.07	470.26	1.3724	1.3617	322.26	322.48	170.21
	MIDAS-KM-106	0.2881	0.2861	0.2849	480.99	480.33	478.97	1.3752	1.3657	322.32	322.52	169.79
	MIDAS-KM-107	0.2719	0.2695	0.2682	481.48	481.51	479.84	1.3703	1.3631	322.32	322.54	169.58
	MIDAS-KM-108	0.2529	0.2510	0.2501	472.88	472.58	471.44	1.3748	1.3639	322.37	322.53	172.01
	MIDAS-KM-109	0.6030	0.6017	0.6039	482.76	483.53	482.72	1.3599	0	321.98	-	170.19
	MIDAS-KM-110	0.3513	0.3516	0.3526	473.11	473.55	472.36	0	1.3658	-	322.34	169.62
	MIDAS-KM-111	0.3000	0.2996	0.2997	472.2	472.38	471.38	0	1.3752	-	322.26	168.76
	MIDAS-KM-112	0.2671	0.2660	0.2660	473.03	473.3	471.95	0	1.3760	-	322.33	167.91
	MIDAS-KM-113	0.2463	0.2449	0.2449	471.19	472.2	470.33	0	1.3700	-	322.27	169.58
MIDAS-KM-114	0.2290	0.2291	0.2297	470.97	471.98	469.85	0	1.3663	-	322.21	170.15	

참고문헌[16~18]에 기술된 바와 같이 상기의 실험들은 원형인 APR1400의 저온관 양단 순시파단 사고시 후기 Reflood 시점 (사고발생 후 약 200초)에서의 과도 상태 계산 결과[19]를 기준으로 수정형 선형 척도비를 적용하여 도출한 실험조건에서 수행한 것이다. 따라서 건전 저온관을 통한 증기 유량 및 DVI 노즐을 통한 ECC 주입유량 조건은 선형 척도비(1/4.93)의 2.5승에 비례하여 축소(1/53.95)된 값이고, 그 외 계통의 열수력 조건 즉, 압력, 온도 및 증기 과열도, 안전주입수 과냉각도 등은 원형의 해석 결과와 같은 값이다. 해석시 이들 변수들에 대한 입력 값들은 초기/경계조건으로 일정하게 유지되도록 하였다.

3. 해석 결과

가. Void height test 결과 평가

전술한 바와 같이 Void height test는 Downcomer 상단에서 주입된 ECC가 액적 및 액막 형태로 하강하면서 횡 방향의 고속 증기 유동과 접촉하여 파단 저온관으로 직접 우회하는 현상뿐만 아니라 저온관 노즐 하부 근처에 축적되어 있는 액주 형태의 ECC가 고속의 증기 유동에 의하여 파단 저온관으로 끌려나가는 Water sweep-out 현상을 관측하고자 수행된 실험이다. 이는 Downcomer 내 수위가 저온관 노즐 바닥 근처에서 일정하게

유지되는 상황에서 수행되는 실험이다.

본 논문에는 수정형 선형 척도법을 적용하여 수행된 Void height test 중 5개의 Test case(Test No.: MIDAS-KM-201, 204, 205, 206, 208) 결과에 대한 평가 해석이 기술되어 있다. 표 1에서 보는 바와 같이, 과열증기는 건전저온관 CL-1, CL-2 및 CL-3를 통하여 주입되고, ECC는 인허가 모델 (EM : Evaluation Model) 분석 방법론 관점에서 원주 방향으로 90°간격을 두고 설치된 네 곳의 DVI 노즐 중 두 곳을 통하여 주입된다. 하나는 파단 저온관에서 제일 가까운 DVI 노즐(DVI-4)을 통하여, 다른 하나는 파단 저온관의 반대편에 위치한 DVI 노즐(DVI-2)을 통하여 주입된다. 외부 보일러에서 건전 저온관으로 공급되는 증기의 과열도 및 펌프를 통하여 DVI 노즐로 주입되는 ECC의 과냉각도는 각각 대략 80 K 및 70 K 정도이고, Downcomer의 초기 압력은 0.18 ~ 0.171 MPa이다.

각 정상상태 실험결과 평가를 위한 해석 절차는 다음과 같다:

- (1) Downcomer는 각 실험의 초기 압력에 해당하는 포화증기로 채워져 있음
- (2) 3개의 건전 저온관(CL-1, CL-2, CL-3) 및 2개의 DVI 노즐(DVI-2, DVI-4)을 통하여 각각 과열증기 및 과냉액체가 일정 유량/온도 조건으로 Downcomer로 지속주입되고, 파단 저온관(CL-4)을 통하여 파단유량 발생
- (3) 각 실험의 초기 압력에 해당하는 포화상태의 물을 Downcomer 하부에서 주입하기 시작하여 Downcomer의 수위가 Downcomer 하부의 바닥 압력 탭으로부터 상부 쪽으로 2.3 m 이상 도달할 때까지 채움
- (4) 실험에서 측정된 일정 유량으로 노심 하부를 통하여 Drain

해석 시 건전 저온관을 통한 증기유량, DVI 노즐을 통한 ECC 유량 및 Lower plenum을 통한 Drain 유량은 실험에서 측정된 값들을 초기 및 경계 조건으로 사용하였다. 이러한 초기 및 경계 조건 하에서 실험과 MARS 코드 해석의 정상상태에서 얻은 주요 변수들 중 증기응축률 및 파단 저온관을 통한 ECC bypass율을 그림 3에 비교하였다.

이 그림에서 보는 바와 같이, EM 해석 가정 하의 ECC가 주입되는 상황에서 수행된 Void height test들에 대한 주요 실험 결과와 MARS 코드의 해석 결과는 정량적으로 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, MARS 코드는 Downcomer의 수위가 저온관 바닥 근처에서 유지되는 Reflood 기간 중 Downcomer 상부에서의 증기응축, 횡방향의 고속 증기 유동에 의한 ECC의 직접우회 및 Water sweep-out 현상을 잘 모사할 수 있는 능력이 있음을 보여주고 있다.

그림 4 및 5는 MIDAS-KM-205 test에 대한 MARS 해석 결과 중 환상형 상부 Downcomer의 Liquid volume fraction 및 액체 온도 분포를 원주 방향으로 펼쳐 보인 것이다. 이 Case는 직접 우회와 Water sweep-out 현상 둘 다 ECC bypass에 영향을 미치는 대표적 Case이다. 그림 4에서 보는 바와 같이, DVI-2 및 DVI-4 노즐을 통해 상부 Downcomer로 주입된 ECC는 저온관 노즐 위치에 도달할 때까지 처연-난류(Churn-turbulent) 혹은 환상 분무(Annular mist) 유동을 형성하며 하강하게 되고, 해당 Downcomer 채널의 액체 분율은 0.2 이하에서 유지되고 있음을 알 수 있다. 이러한 ECC

가 상부 Downcomer 영역을 하강하는 동안 건전 저온관에서 파단 저온관 쪽으로 진행하는 고속의 증기 유동과 접촉하게 된다. 이에 따라 파단 저온관 근처에서 주입되는 대부분의 ECC는 파단부로 견인되어 직접 우회되고, 파단 저온관 반대쪽에서 주입되는 ECC는 횡 방향의 증기 유동에 다소 영향을 받으나 파단부와 많이 떨어져 있고 Blunt body의 고온관 HL-1에 제지를 받아 거의 대부분 Downcomer 하부로 침투되고 있음을 보여주고 있다. 또한, 횡 방향으로 진행하는 고속의 증기는 저온관 노즐 하부 근처에 존재하는 냉각수를 파단부로 Sweep-out시킴으로써 Downcomer의 수위가 감소되는 것을 볼 수 있다. Downcomer의 액체 온도 분포를 그린 그림 5에서 보는 바와 같이, DVI 노즐을 통해 주입되는 과냉의 ECC는 Downcomer 과열증기와 접촉하여 증기를 응축시키고 상부 Downcomer 영역을 하강하여 저온관 노즐 근처에 도달하게되면 과냉각도를 거의 잃게됨을 알 수 있다.

나. Direct bypass test 결과 평가

전술한 바와 같이 Direct bypass test는 Sweep-out에 의한 ECC bypass 현상을 배제시키기 위하여 Downcomer의 수위를 충분히 낮게 유지시킨 상태에서 건전 저온관을 통한 증기 유량 변화에 따라 ECC가 파단 저온관으로 직접 우회하는 정도를 모의하고자 수행된 실험이다.

이 절에는 수정형 선형 척도법을 적용하여 수행된 Direct bypass test중 15개의 Test case(Test No.: MIDAS-KM-100~114) 결과에 대한 평가 해석이 기술되어 있다. 표 1에서 보는 바와 같이, 모든 Case에서 과열증기는 건전저온관 CL-1, CL-2 및 CL-3를 통하여 주입되고, Test case중 MIDAS-KM-100에서 108까지는 DVI-2 및 DVI-4로 ECC가 주입되고, MIDAS-KM-109는 파단 저온관에서 제일 먼 노즐(DVI-2)에서만, 그리고, MIDAS-KM-110에서 114까지는 파단 저온관에서 제일 가까운 노즐(DVI-4)에서만 ECC가 주입되는 경우이다. 외부 보일러에서 건전 저온관으로 공급되는 증기의 과열도 및 펌프를 통하여 DVI 노즐로 주입되는 ECC의 과냉각도는 각각 대략 80 K 및 70 K 정도이고, Downcomer의 초기 압력은 0.17 MPa 근처에서 유지된다.

각 정상상태 실험 결과 평가를 위한 해석 절차는 다음과 같다:

- (1) Downcomer는 각 실험의 초기 압력에 해당하는 포화증기로 채워져 있음
- (2) 3개의 건전 저온관(CL-1, CL-2, CL-3) 및 2개의 DVI 노즐(DVI-2/DVI-4) 혹은 1개의 DVI 노즐(DVI-2 or DVI-4)을 통하여 각각 과열증기 및 과냉액체가 일정 유량/온도 조건으로 Downcomer로 지속주입되고, 파단 저온관(CL-4)을 통하여 파단유량 발생
- (3) 각 실험의 초기 압력에 해당하는 포화상태의 물을 Downcomer 하부에서 주입하기 시작하여 Downcomer의 수위가 Downcomer 하부의 바닥 압력 탭으로부터 상부 쪽으로 0.4 m 근방에 도달할 때까지 채움
- (4) Downcomer의 수위가 0.4 m 위치에 유지되도록 노심하부를 통한 Drain flow 조절 해석 시 건전 저온관을 통한 증기유량 및 DVI 노즐을 통한 ECC 유량은 실험에서 계

측된 값들을 초기/경계 조건으로 사용하였다.

그림 6 및 7은 증기 유량 변화에 따른 실험과 MARS 코드 해석의 증기응축률 및 파단 저온관을 통한 ECC bypass율을 비교하여 그린 것이다. 이들 그림에서 보는 바와 같이, ECC 주입 유량이 비슷한 조건 하에서 실험과 해석에서 구한 증기응축률 및 ECC bypass율은 증기유량 조건에 따라 많이 변화함을 알 수 있다. 건전 저온관을 통한 증기 유량이 적어질수록 즉, 증기 주입속도가 낮아질수록 증기응축률은 증가하고, ECC bypass율은 감소하고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 모든 Case에 대하여 MARS 코드는 실험결과에 비해 증기응축률을 과소 예측하는 것으로 나타났다. 이로 말미암아 원주 방향으로 진행되는 증기 유동에 영향을 적게 미쳐 ECC bypass가 더 많이 일어나도록 한다. 그림 7의 ECC bypass율 비교 그림에서 보는 바와 같이 파단 저온관에서 제일 가까운 노즐(DVI-4) 한 곳에서만 ECC가 주입되는 경우, 실험과 해석 모두 증기 유량이 증가하면 ECC bypass율이 증가함을 보이고 있다. 또한, MARS 코드는 실험 결과에 비해 ECC bypass를 과다 예측하고 증기 유량이 0.25 kg/s~0.35 kg/s의 경우에는 90% 이상이 Bypass되는 것으로 나타났다. 이에 반해, 파단 저온관에서 제일 먼 노즐(DVI-2) 한 곳에서만 ECC가 주입되는 경우, MARS 코드의 해석 결과는 ECC bypass가 거의 일어나지 않는 것으로 나타났고, 실험에서는 약 10%의 ECC가 파단저온관으로 Bypass되는 것으로 예측되었다. EM 해석 가정 하의 ECC가 주입되는 경우(DVI-2 & DVI-4)에서는 실험과 MARS 코드의 ECC bypass율은 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나, 증기 유량이 0.29 kg/s~0.35 kg/s의 경우에는 MARS 코드의 예측 결과가 다소 높는데, 이는 MARS 코드가 이러한 증기 유량 조건에서 DVI-4를 통하여 주입되는 ECC를 과다 Bypass시키기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이와 같이, 양쪽 DVI 노즐에서 ECC가 주입될 때는 이들 DVI 주입이 각기 되었을 때의 ECC bypass율을 산술 평균한 결과와 아주 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 양쪽 DVI 노즐에서 ECC가 동시에 주입될 때는 ECC의 상호 작용으로 증기 응축이 증가하여 횡 방향의 증기 속도를 감소시킴으로써 ECC bypass율은 다소 줄어드는 결과를 보여주고 있다.

이와 같이, MIDAS 실험장치에서의 Direct bypass test들을 2.가절에 언급한 모델링 방법을 사용하여 해석한 결과, MARS 코드는 Downcomer 상부에서의 증기응축율을 과소 예측하고, 횡방향의 고속 증기 유동에 의한 ECC의 직접우회율을 실험에 비해 보수적으로 예측하고 있음을 보여주고 있다.

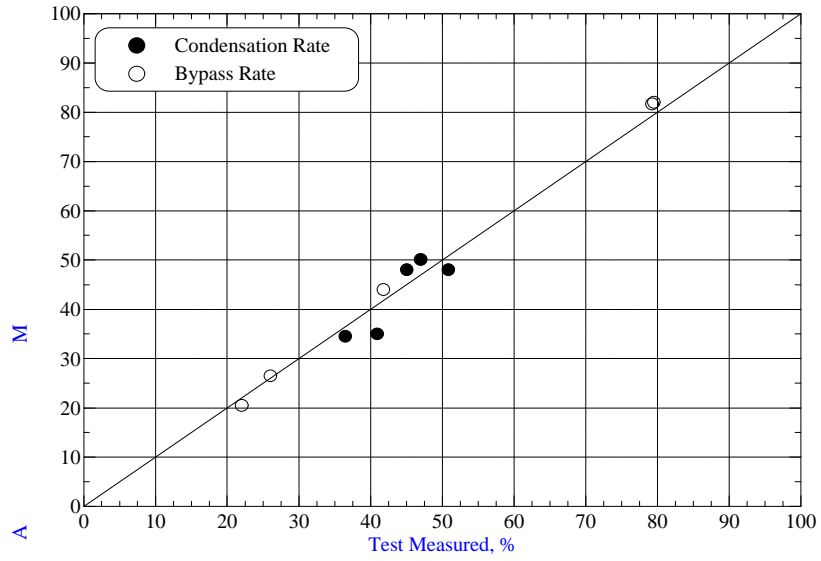


그림 3. Void height test에 대한 실험과 해석 결과 비교

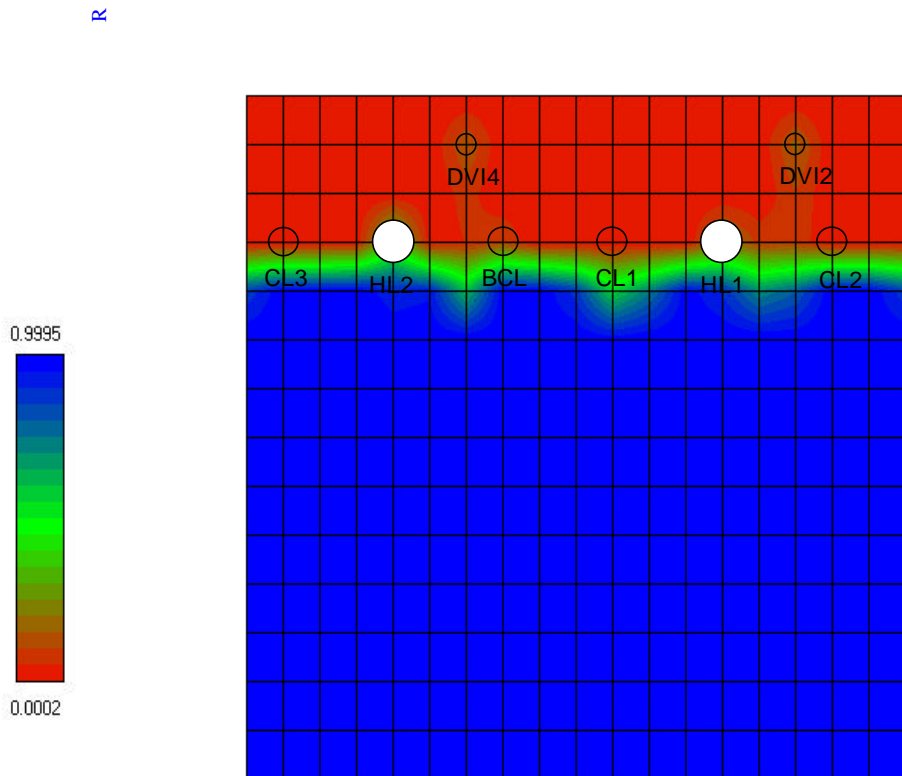


그림 4. Downcomer liquid volume fraction (MIDAS-KM-205)

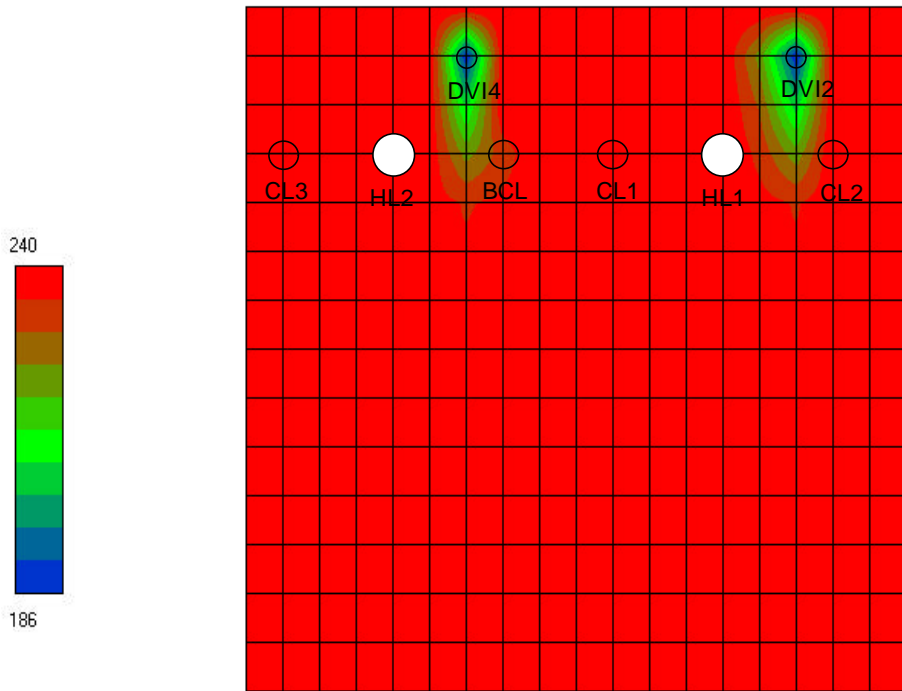


그림 5. Downcomer liquid temperature distribution (MIDAS-KM-205)

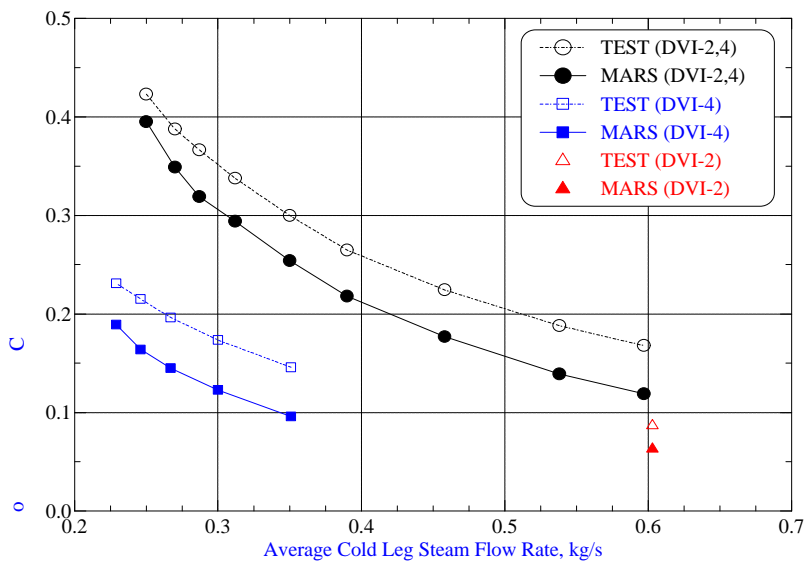


그림 6. Direct bypass test에 대한 증기응축률 비교

n

p

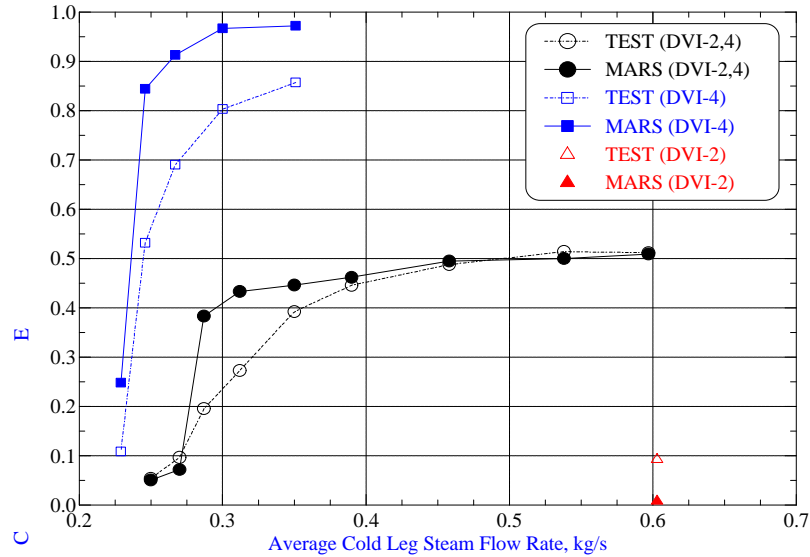


그림 7. Direct bypass test에 대한 ECC bypass율 비교

5. 결론

DVI 안전주입계통을 채택하는 APR1400의 LBLOCA시 후기 Reflood 기간동안 Downcomer 영역에서 발생하는 주요 열수력 현상을 규명하기 위하여 APR1400에 수정형 선형 척도법을 적용한 MIDAS 실험장치에서 실험이 진행되어 왔다. 이 실험장치에서 수행된 5개의 Void height test 및 15개의 Direct bypass test 실험 결과를 다차원 최적 분석 코드인 MARS 코드를 이용하여 평가하였다. 이들 실험에 대한 평가 결과, MARS 코드는 Downcomer 상부에서의 증기응축, 횡방향의 고속 증기 유동에 의한 ECC의 직접우회 및 Water sweep-out 현상 등을 잘 모사할 수 있는 능력이 있음을 알 수 있었다. 또한, ECC bypass율, 증기응축률 및 Downcomer에서의 온도 분포 등 각 실험에서 관측된 주요 열수력 변수들을 비교 평가한 결과, MARS 코드는 Downcomer에서의 증기응축률을 과소 예측하고 이에 따라 ECC bypass율을 과대 예측하고 있다. 그러나, 증기 유량이 증가함에 따라 증기응축률이 감소하고 ECC bypass율이 증가하는 경향 및 EM 해석 가정 하의 ECC가 주입되는 조건에서의 ECC bypass율은 전반적으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

1. "차세대원자로 표준 안전성 분석 보고서", 한국전력공사, 1999.
2. Song, C. H. et. al., "Thermal Hydraulic Test Program for Evaluating or Verifying the Performance of New Design Features in KNGR", 2000 KNS Autumn Mtg, 2000.
3. Yun, B. J. et. al., "Experimental Observation on the Hydraulic Phenomena in the KNGR Downcomer during LBLOCA Reflood Phase", 2000 KNS Spring Mtg, 2000.
4. Yun, B. J. et. al., "Air/Water Test on DVI ECC Direct Bypass during LBLOCA Reflood Phase: UPTF Test 21-D Counterpart Test", 2000 KNS Autumn Mtg, 2000.
5. 윤병조 외, "차세대원자로 대형냉각재상실사고 모의를 위한 열수력 실험장치의 척도해석 (Scaling Analysis of the Thermal-Hydraulic Test Facility for the Large Break LOCA of KNGR)", KAERI/TR-1878/2001, 한국원자력연구소, 2001.
6. "Direct Vessel Injection Test Using the MIDAS Test Facility", Direct ECC Bypass Test, Test No.: MIDAS-KM-100~MIDAS-KM-114, MIDAS-QLR-009, KAERI, 2001.
7. 권태순, "DVI 성능실험장치 설계개념", 53381-DVI-MainDesign-99001, Rev. 00, Design Status 2, 열수력안전연구팀, 한국원자력연구소, 1999.
8. 정영종 외, "차세대원자로 DVI 안전주입 성능 실험 요건서", SA-DVI-99008, 동력로기술개발팀, 한국원자력연구소, 1999.
9. "KNGR DVI 성능 검증 Test Matrix 송부", NKD/RD-01199M, 신형원전개발센터, 한국전력연구원, 2001. 5.
10. "Direct Vessel Injection Test Using the MIDAS Test Facility", ECC Bypass Test, Test No.: MIDAS-KM-201, MIDAS-QLR-001, KAERI, 2001.
11. "RELAP5/MOD3.2.1 Code Manual", NUREG/CR-5535, INEL, 1998.
12. Thurgood, M. J. et al., "COBRA/TRAC: A Thermal-hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems", NUREC/CR-3046, USNRC, 1983.
13. 하귀석외, "UPTF DVI 실험결과를 이용한 MARS 코드의 비상노심 냉각수

- 우회현상 모의능력 평가”, 2001 춘계학술발표회, 한국원자력학회, 2001. 9.
14. 이원재, “KAERI Air-water 실험결과에 대한 평가 계산”, 2001.
 15. Yun, B. J. et. al., “Experimental Study on the Film Spreading Width of ECC Water in the Downcomer with DVI under Late Reflood Phase of LBLOCA”, 2001 KNS Autumn Mtg, 2001.
 16. “Direct Vessel Injection Test Using the MIDAS Test Facility”, ECC Bypass Test, Test No.: MIDAS-KM-201, MIDAS-QLR-001, KAERI, 2001.
 17. “Direct Vessel Injection Test Using the MIDAS Test Facility”, ECC Bypass Test, Test No.: MIDAS-KM-203, MIDAS-QLR-003, KAERI, 2001.
 18. “Direct Vessel Injection Test Using the MIDAS Test Facility”, Direct ECC Bypass Test, Test No.: MIDAS-KM-100~MIDAS-KM-114, MIDAS-QLR-009, KAERI, 2001.
 19. 김한곤, “신형경수로 안전주입 성능평가를 위한 실험조건”, 한국전력연구원, 2001.