에너지공학, 제14권 제1호(2005)
Journal of Energy Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 62~71 (2005)

수조내 I-Sparger의 증기제트 응축에 의한 열혼합 실험

김연식† · 전형길 · 송철화
한국원자력연구소
(2004년 11월 12일 접수, 2005년 1월 5일 채택)

An Experimental Study of Thermal Mixing of Steam Jet Condensation through an I-Sparger in a Quench Tank

Yeon-Sik Kim†, Hyeong-Gil Jun and Chul-Hwa Song
Korea Atomic Energy Research Institute
(Received 12 November 2004, Accepted 5 January 2005)

요 약

B&C(Blowdown and Condensation) 장치를 이용하여 APR1400 실규모 I-Sparger의 증기제트 응축에 의한 수조내 열혼합 현상에 대한 실험이 수행되었다. 한정된 가압기 용량으로 인하여 과도상태 실험이 수행되었으며, 실험을 통해 수조내에 배치된 열전대를 사용하여 열혼합 자료를 얻었다. 측정된 열혼합 자료를 바탕으로 지역별 온도 변화의 경향과 수조 수직-단면상의 온도 윤곽도를 작성하였으며 이를 바탕으로 I-Sparger의 열혼합 특성을 파악하였다. 실험결과에서 I-Sparger에 의한 열혼합 특성은 I-Sparger 설계 특성이 나타나는 열혼합 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

주요어: 응축, 열혼합, 수조, APR1400, I-스파저

Abstract An experimental study on thermal mixing of steam jet condensation through the I-Sparger of APR1400 design using B&C (Blowdown and Condensation) test facility. Due to the limit of the steam supply capability of the pressurizer, transient thermal mixing experiments were conducted. Temperature distributions in the quench tank were measured using thermocouples located at various positions. From the experimental data, local temperature variations for various locations and vertically cross-sectional temperature distributions for several times were depicted and presented. The result shows the characteristics of thermal mixing of the I-Sparger depending on the design features of the I-Sparger.

Key words: Condensation, Thermal mixing, Pool, Quench tank, APR1400, I-Sparger

1. 서 론

차세대 원전인 APR1400[1]은 안전성 증진과 중대사고 대처 능력을 향상시키기 위하여 격납용기내 핵연료재장전수조인 IRWST(Incontainment Refueling Water Storage Tank)를 채택하였다. IRWST는 정상운전 정지시 핵연료 재장전을 위한 수원의 역할을 담당하고 정상운전 중 LOCA(Loss Of Coolant Accident)와 같은 사고가 발생할 경우는 비상노심냉각(ECC, Emergency Core Cooling) 수원의 역할을 감당하게 된다. 원자로냉각계통(RCS, Reactor Coolant System)이 이상이 생겨서 과압이 될 경우는 가압기(PZR, Pressurizer) 상단에 설치된 동력작동안전방출밸브(POSRV, Power Operated Safety Relief Valve)가 작동하여 고온·고압의 증기가 방출되며, 방출된 증기는 Sparger를 통하여 IRWST내에서 응축/냉각된다. RCS가 과압 및 과열이 되는 중대사고시 고온·고압의 증기/개스를 Sparger를 통하여 IRWST에 방출시켜 RCS의 온도·압력을 떨어뜨릴 수 있게 하기도 하는데

†To whom correspondence should be addressed.
Korea Atomic Energy Research Institute
Tel: 042-868-2868
E-mail: yskim3@kaeri.re.kr

이 경우 IRWST는 열침원(Heat Sink) 및 방출된 방사능 입자들을 포집(Scrubbing)하는 기능까지 수행한다.

B&C(Blowdown and Condensation)장치는 APR1400 설계 특성인 I-Sparger에 대한 Air Clearing 하중과 응축하중, 그리고 열혼합 성능을 모의할 수 있는 실험장치로서 실험 목적에 따라 일부 장치나 실험 절차를 보완·변경하여 사용할 수 있도록 설계되었다. 예를 들면, Air Clearing 실험에서는 실제 원전의 배관에 있는 개스의 체적 효과를 모의하기 위하여 공기 축압기와 제어밸브의 적절한 조합을 사용하였었으나, 열혼합 성능 실험에서는 그 영향을 고려할 필요가 없어서 비교적 단순한 절차에 의하여 실험이 수행되었다.

본 실험에서 사용된 수조는 실제 APR1400 IRWST[1]에서의 I-Sparger가 배치된 것과는 형상과 크기에 있어서 많은 차이를 가지고 있다. 실제 설계를 보면 환형수조에 크게 원주방향으로 90도 간격으로 두 군데 각 6개씩의 I-Sparger들이 집중적으로 배치되어 있으며, 집중된 곳은 약 5.73 m 폭의 챈널에 가로 세로로 약 1.5 m 정도씩 간격으로 배치되어 있어서 각각의 I-Sparger에 대한 단순 등가체적을 산정하면 직경 3 m의 수조에 해당함을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 제시한 열혼합 결과는 실제의 IRWST 수조 형상의 영향보다는 IRWST 내 단일 스파져에 대한 등가 수조내의 열혼합 현상에 대한 관점에 그 초점이 있다.

본 논문에는 수행된 열혼합 성능 실험에 초점을 맞추어 결과를 정리하였다. 정리된 실험결과는 별도로 수행한 다차원 열수력 해석용 상용 코드인 CFX와 비교 분석의 해석 모형 설정[2]에 활용되었다.

2. B&C 실험 장치

B&C 실험 장치는 APR1400 설계의 실규모 I-Sparger에 대한 Air Clearing, 응축하중, 그리고 열혼합 실험을 위한 실험 장치로서 본 논문에서는 I-Sparger의 열혼합 성능에 관한 내용을 중심으로 내용을 정리하였다. 본 절에서는 B&C에 대한 주요 계통, 주요 측정 설비, 그리고 실험 데이터 취득, 그리고 실험절차에 관한 내용을 간략히 정리하였다. Fig. 1에는 B&C Loop의 주요 부

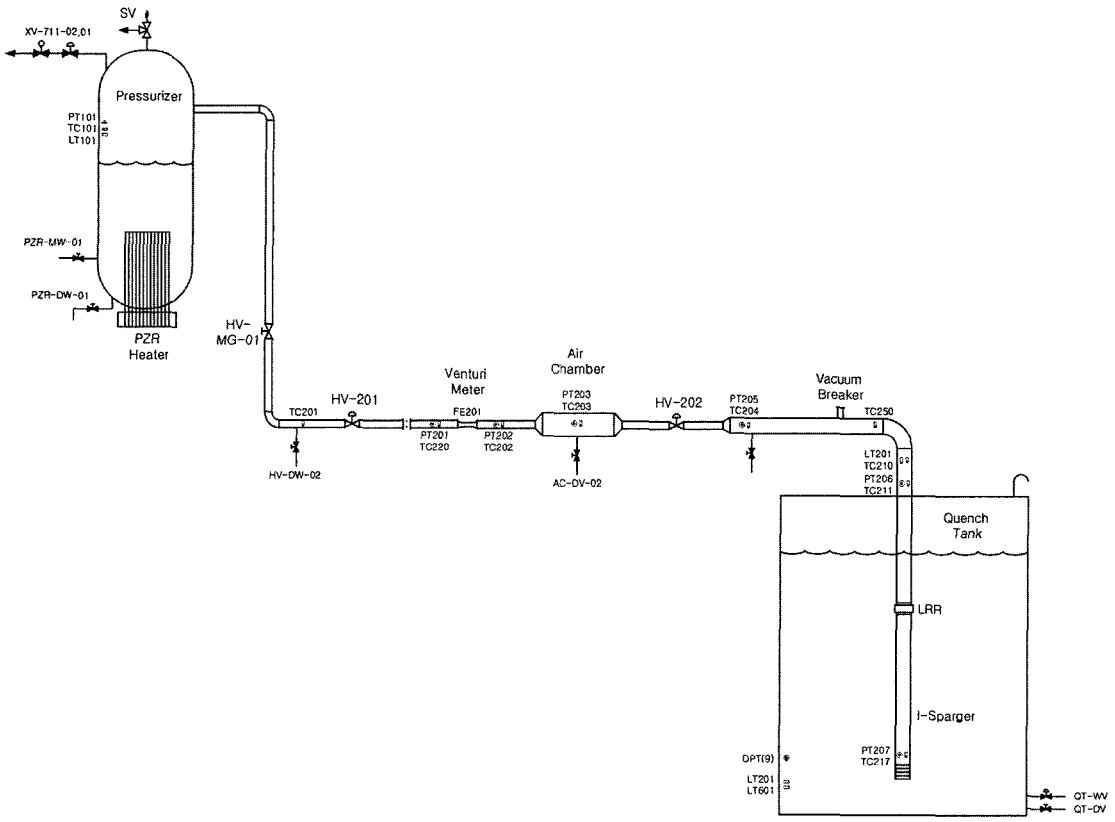


Fig. 1. Arrangement of major components and instruments of the B&C loop.

품 및 계측기들의 배치를 제시하였다.

2-1. B&C 주요 계통

B&C는 차세대원자로의 I-Sparger를 장착한 Unit Cell 실험장치로서 증기공급원인 가압기, IRWST를 모의하는 수조(Quench Tank), 가압기와 IRWST를 연결하고 방출 기능을 수행하는 배관 및 밸브, 진공분쇄기(Vacuum Breaker), 그리고 원형 증기분사기와 각종 계측장비로 구성된다.

가압기 계통은 가압기 본체, 내부 Heater, 계측용 열전대 지지대, 가압기 상부의 안전밸브 및 배기밸브, 그리고 하부의 배수밸브 등으로 구성된다. 이 계통은 가압기 내부의 물을 내부 Heater를 사용하여 원하는 온도, 압력으로 가열 및 유지 시키며, 포화증기를 증기계통과 증기분사기를 거쳐 수조로 방출시킨다. 가압기는 내부 지름이 60 cm, 내부 높이가 300 cm인 Cylinder 형태의 고압탱크로서 재질은 Stainless Steel로 제작되었다. 하부에는 Heater 장착을 위한 Flange가 설치되어 있다. 가압기의 설계 압력은 17.8 MPa이며, 설계 온도는 370°C이고, Shell 및 Cover Flange 재질은 각각 A240-304 및 A182-F304로 제작되었고 Heater, 증기 계통, 그리고 보조설비와 연결되는 각종 Flange가 장착되어있고, 2in. 배관을 통한 최대 16.0 MPa(160 bar)의 증기/물의 방출 하중을 견딜 수 있도록 설계/제작되었고, 겉 표면은 단열재로 외부 대기와 단열되어 있다. 가압기 상부에는 운전중 발생한 증기를 배기하거나 초기 저온의 물을 지정된 수위로 주입할 경우 용이하도록 직렬로 연결된 두 개의 배기밸브(XV-Vent-01, 02)를 설치하여 제어반에서 제어할 수 있도록 하였다.

수조 계통은 가압기에서 방출된 증기 또는 포화수를 냉각시키기 위한 설비로서, 수조와 각종 계측장치 지지대, Sump Pump 및 증기공급계통과 연결되어 수조 가열용 증기 분사장치로 구성되어 있다. 수조의 중앙에는 가압기로부터 증기계통을 거친 고압의 증기를 분사시키기 위한 원형(Prototype) Sparger가 설치되어 있으며, 그 주변에는 증기의 응축현상을 관측하기 위한 관찰창과 계측기를 부착하기 위한 지지대가 설치되어 있다. 계측기를 위한 지지대는 열전대를 지지하기 위한 것과 방출시 수조내 압력하중을 측정하기 위한 동압계측기용 지지대로 구분된다. 수조는 내경이 3 m, 높이가 4 m의 실린더형 저압/대기 개방형 탱크로서 윗부분에는 네 개의 뚜껑을 여닫을 수 있도록 설계되었다. 또한 수조의 벽에는 4개의 투시구(View Port)가 장착되어 있어, 증기가 응축되는 현상을 관찰 또는 촬영할 수 있다. 수조의 상부에는 보온을 위하여 간단한 구조로 된 덮개(Cover)가 설치되어 있다. 수조의 냉각수 온도는 증기발생기의 증기를 수조 하부에 설치된 링 형태의 증기 Spray를 통하여 수조내로 분사시켜 증기와 기존의 물이 혼합되어 일정 온도로 유지되며, 이를 위하여 증기공급계통과 연결된 증기 Spray 장치가 수조 하부에 설치되어 있다. 수조 벽은 단열재로 외부와 단열되었다. 수조 중앙에는 가압기에 연결된 배관 끝에 원형(Prototype) 증기분사기인 I-Sparger가 장착되었다.

증기 계통은 가압기에서 발생한 증기를 수조계통으로 보내주는 통로 역할을 하는 설비로서, 2개의 Gate 형 ON/OFF Control Valve(방출밸브, HV-201, 202), 유량계(Venturi-Meter, FE-201), Gate 형 수동 Valve(수동격리밸브, HV-MG-01), Vacuum Breaker 및 배관과 계측기기로 구성되어 있다. 배관의 온도는 Heat Tracing으로 제어하며 제어판에서 제어할 수 있도록 설계되었다. 계통의 외벽은 단열재로 외부와 단열되어 있다. 이 계통의 운전압력 및 온도는 각각 16.0 MPa, 370°C이다. 증기방출을 급작히 중단하면 수조의 물이 배관안으로 급격히 밀려 들어와 수격현상이 발생할 위험이 있는데 이를 방지하기 위하여 증기방출 배관의 HV-202 후단에 진공분쇄기(Vacuum Breaker)를 설치하였다. 이 밸브의 직경은 2.5in. 이며 작동압력은 63 mbar이다. 이 밸브는 Non-Return Valve 형식으로 독일 GESTRA사 제품이다. 2개의 방출밸브(HV-201, 202)의 열림속도는 0.6~1.9초 사이에서 조절할 수 있으며, 밸브를 통한 압력강하를 최소화하고 충분한 증기유량을 확보하기 위하여 정밀제작된 Parallel Slide Type의 2in. 밸브를 사용하였다. 두 개의 방출밸브사이에는 Air Clearing 실험용 Air Chamber (8in. Sch160s, 길이~1.5 m)가 설치되었다. 본 실험에서는 Air Clearing 효과는 고려대상에서 제외하였다.

2-2. 주요 측정 설비

측정설비는 계측 및 제어계통으로 이루어져 있으며, 본 장치의 운전조건의 조작, 조작상태의 감시, 그리고 실험 및 그 결과의 해석에 쓰이는 Data를 생산할 수 있도록 설계, 제작되었다. 측정 현장에서의 각종 Sensor 및 계측기로부터의 신호는 제어반(Control Panel)으로 보내지는 신호와 DAS(Data Acquisition System)으로 보내지는 신호로서 구분할 수 있다. 제어반으로 보내지는 신호에는 장치의 운전 조작, 조작상태의 감시에 필요한 Controller 입력, Indicator 입력, Alarm 입력 신호등을 배치하였고, DAS로 보내지는 신호는 Multi-Connection Box를 거쳐 2개의 Scanning A/D변환기(HP E1413B)로 입력된다.

계측 계통은 측정기기와 자료획득장치(DAS)로 구성된다. 사용되는 측정기기는 측정변수에 따라 온도계, 압력계, 차압계, 수위계, 유량계, 동압계 등으로 분류된다. 온도계로 사용되는 Thermocouple (T/C)은 냉점보상기를

거쳐 Multi-Connection Box와 Control Box로 연결하였고, T/C 전용선을 사용하여 시공함으로써 접점부의 전위차로 인한 오측정의 가능성을 낮추었다. 또한 압력계(PT-101, PT-211), 차압계(DP-201) 및 수위계(LT-101, LT-201, LT-601)는 Smart형 기기를 사용하였으며, 발생되는 4~20 mA의 신호는 자료획득장치의 입력단 직전에 설치된 신호분배기에서 1~5 V의 전압신호로 변환되어 자료획득장치 및 제어반으로 입력된다. 또한 배관 및 증기분사기에 장착된 압력계(PT-201, PT-202, PT-203, PT-205, PT-206, PT-207)는 Signal Delay를 방지하고 빠른 반응속도를 보장하기 위하여 DRUCK 사의 Strain Gage 형 압력계측기를 사용하였다.

증기라인(Steam Line)에는 벤튜리 튜브(FE-201)를 설치하였다. 동압계(Dynamic Pressure Sensor)는 KISTLER 사의 모델 7061B를 사용하였으며, 이는 수조벽면 및 내부에 총 9개를 장착하였다. 동압계는 별도의 Signal Conditioner를 사용하였으며, 이로 부터의 신호(0~10 V)는 현장에 별도로 설치된 동압계측용 자료취득장치로 입력된다. 동압계용 자료취득장치는 고속측정용 DSP 보드를 내장한 A/D Converter를 사용하였다. 수조내부에는 총 24개의 열전대가 설치되어 있어 방출시 온도분포를 알 수 있도록 하였다. DAS의 입력 채널수는 총 68 채널이며, 그 항목은 온도 : 42 Channels; 압력 : 8 Channels; 차압(유량) : 1 Channel; 동압 : 9 Channels; 수위 : 3 Channels; 위치 : 1 Channel; Limit S/W : 4 Channels로 구성된다.

T/C의 신호를 제외한 각 측정기로부터의 출력신호는 0~5VDC 또는 0~10VDC의 전압신호로 통일되어 자료취득장치로 입력되고, T/C 신호는 냉점보상기를 거쳐 0~40 mV 신호로 입력된다. 각종 계측기의 위치를 Table 1과 Figs. 1, 2에 제시하였다.

제어 계통은 지시/제어계, 지시계, 현장지시계 그리고 경고계통 등으로 나뉘어 진다. 지시/제어계는 제어반에 설치되는데, 이는 실험장치의 각 계통내 압력, 온도, 수위등을 지시한다. 또한 지시/제어계의 신호는 가압기 전열기(Heater) 전력 제어기, 각종 자동밸브, 경고계통 등과 연동되어 있어서, 실험 장치의 고온 가압시 급격한 가압으로 인한 실험장치의 손상 및 사고를 막을 수 있도록 하였다. 경고계통(Alarm)은 제어반에 설치되어 가압기 내의 압력 및 수위 이상시 경고를 발하게 된다.

실험장치의 Interlock은 다음과 같이 구성하였다.

○ 가압기의 과압 또는 압력상승 이상시 가압기 압력계의 Hi-Hi 신호시에는 가압기 Heater의 전원공급이 차단되고, Hi-신호시에는 Alarm이 작동되도록 하였다. 또한 가압기 Heater의 재가동 및 증기 Bypass Line의 Close 작동은 Hi-신호 설정치보다 10% 낮은 값에서 이루어 지도록 하였으며, Hi-Hi 및 Hi-신호 설정치는 실험조건에 따라 달리 설정 가능하도록 하였다. 가압기 Heater 전력은 전력제어기에 의해서도 조절이 가능하도

Table 1. Instrument lists.

Array No	Sensor ID.	Location	Description
1	PT-101	Pressurizer (PZR)	PZR pressure
2	PT-211	Between valves	Line pressure
3	PT-201	Discharge line	Fluid temperature
4	PT-202	"	"
5	PT-203	"	"
6	PT-205	"	"
7	PT-206	"	"
8	PT-207	"	"
9	DP-201	Venturi flow meter	Differential pressure
10	TC-101	PZR steam	PZR steam temperature
11	TC-102	PZR water	PZR water temperature
12	TC-201	Discharge line	Fluid temperature
13	TC-202	"	"
14	TC-203	"	"
15	TC-204	Sparger header	Fluid temperature
16	TC-210	"	"
17	TC-211	"	"
18	TC-212	"	"
19	TC-213	Sparger	Fluid temperature
20	TC-214	"	"
21	TC-215	"	"
22	TC-216	"	"
23	TC-217	"	"
24	TC-631	Quench tank	Column 1
25	TC-632	"	"
26	TC-633	"	"
27	TC-634	"	"
28	TC-635	"	"
29	TC-636	"	"
30	TC-637	"	"
31	TC-638	"	"
32	TC-639	"	Column 2
33	TC-640	"	"
34	TC-641	"	"
35	TC-642	"	"
36	TC-643	"	"
37	TC-644	"	"
38	TC-645	"	"
39	TC-646	"	"
40	TC-647	"	Column 3
41	TC-648	"	"
42	TC-649	"	"
43	TC-650	"	"
44	TC-651	"	"
45	TC-652	"	"
46	TC-653	"	"
47	TC-654	"	"

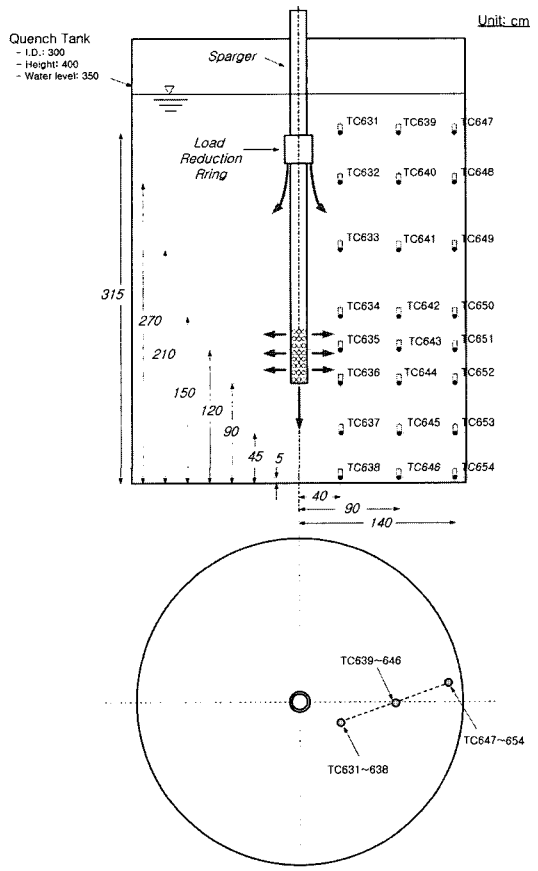


Fig. 2. Location of thermocouples in the quench tank.

록 하였다.

○ 가압기 저수위시 수위계의 Lo-Lo 신호에 따라 가압기 Heater가 차단되고, 배관상의 자동밸브가 닫혀 증기라인이 차단되도록 하였다.

2-3. 자료처리 계통

본 실험을 위한 자료취득장치(DAS)는 HP-VXI 콘트롤러에 의해 HP-UX 환경하에서 운영된다. 자료취득장치는 Scanning A/D 변환기, Workstation 등으로 구성되며, 자료취득 프로그램은 HP-VEE 3.0 W/S[3]를 사용하였다.

본 실험장치는 고온,고압의 증기를 순간적으로 분출시킬 때 발생하는 유동현상을 모의하는 장치로서, 실험 성격상 여러 종류의 센서 즉, 온도, 압력, 차압, 동압, 진동, 응력 등의 센서로 부터 다양한 형태의 신호가 발생되고, 총 68개의 센서로 부터 신호가 발생된다. 또한 실험시 발생되는 유동현상들이 매우 급격히 일어나기 때문에 이에 연결되어 사용되는 자료처리장치는 센서로 부터 발생되는 여러 가지 형태의 신호를 고속으로 처리/분석하는 능력을 갖추도록 구성되어 있다. Main DAS 장비는 VXI system을 채택하여 실험자료를 고속으로 처리하고, 하나의 콘트롤러를 사용하여 다양한 종류의 신호를 일괄 처리할 수 있다. 각종 측정기로 부터의 신호는 VXI Bus를 통해 컨트롤러에 입력되고, 이 입력된 신호는 H/W와 S/W를 연결해주는 입/출력 프로그램인 SICL(Standard Instrument Control Library)에 의해 S/W에 연결되고, 주어진 Data는 계기언어(Instrument Language)인 SCPI(Standard Commands for Programmable Instruments)에 의해 수집 및 해석되어, HP VEE 프로그램에 의해 화면에 출력된다. 특히, 수조내부의 동압측정용 동압계로부터의 신호는 별도의 동압측정용 자료취득장치(Sub-DAS)로 입력되어 저장되록 하였다. 동압측정용 자료취득장치의 Sampling Rate는 약 8532 Hz로 고정되어 있으며, Main DAS로부터 Trigger Signal을 받으면 작동되며 일정시간 후(약 10초)에 자동적으로 정지되도록 설계하였다.

자료처리 프로그램은 기본적으로 HP-VEE를 사용하여 작성되었으며, 성능을 높이고 VXI와의 인터페이스를 원활히 하기위하여 각종 계산 모듈을 포함한 Source 프로그램을 ANSI-C로 작성하여 사용하였다. 프로그램의 동작중 반복되는 주요 기능들은 Subroutine화 또는 Function화하여 각 프로그램에서 공유할 수 있도록 하였다. 각종 자료 획득/처리 프로그램은 HP VEE상의 시작버튼(START)을 누름으로서 구동되며, 이때 HP VEE는 자료획득/처리에 필요한 모든 작업을 수행한다. 즉, VEE는 C-언어로 구성된 각종 Source 프로그램을 사용하여 Scanning A/D 변환기의 초기화 및 구동을 제어하고, Scanner로부터 획득된 자료를 원하는 물리단위로 변환하여 각종 물리량(유량, 수위, 밀도) 계산에 필요한 Subroutine의 입력 및 계산 결과의 출력과 저장등을 담당한다. 프로그램 제어자는 실험조건에 따라서 원하는 조건에 도달한 후 Scanner에 Trigger 신호를 주면 자료획득을 시작하게 된다. 일단 자료획득 단계가 시작되면 Scanner는 VEE에서의 조작에 따라서 언제라도 종료가 가능하도록 하였다.

3. 수조 열혼합 실험

이미 기술된 바와 같이 B&C 실험 장치에서의 열혼합 실험은 단일 I-Sparger에 대한 실규모 실험 장치이지만, 어느 정도의 지속시간을 유지해야 하는 열혼합 실험 특성상 B&C 장치의 한계(특히, 가압기 크기)로 인하여 과도상태 열혼합 실험을 수행하였다. 과도상태 열

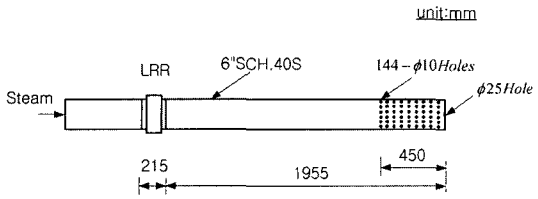


Fig. 3. Configuration of the APR1400 I-Sparger.

혼합 실험은 가압기 방출밸브를 최대한 개방하여 시간에 따라 가압기 압력 변화에 따른 방출 유량변화가 일어나는 상태에서 탱크내의 열혼합 거동을 측정하는 방법이다.

3-1. APR1400 I-Sparger 설계 특성

B&C 장치의 수조는 APR1400 실제 설계의 한 I-Sparger에 대한 등가적인 효과를 가지도록 형상과 체적이 설계되었다. B&C I-Sparger는 APR1400의 I-Sparger와 동일한 것으로서 Fig. 3에 주요 제원을 포함하여 형상을 나타내었다[4].

Fig. 3에서 보듯이 I-Sparger에는 공기나 증기 분사가 세 곳 즉, 부하저감링(Load Reduction Ring), 수평방향 구멍들, 그리고 수직하향 구멍에서 이루어진다. I-Sparger는 POSRV 작동시 초기에 배관내 비응축성개스 분출에 의한 부하 즉, Air Clearing 부하를 최소화하기 위하여 설계된 장치이다. 증기제트 응축에 의한 응축하중을 최소화하기 위하여 비교적 작은 구멍으로 설계되었다.

부하저감링은 특히, Air Clearing 부하를 최소화하기 위하여 설치된 것으로서 분출방향은 수직하향이며 총 8조(1조당 2개 사각구멍; 1조당 등가직경 21.63 mm)가 원주방향 등간격으로 설치되어 있다. 증기분사가 주로 이루어지는 수평방향 구멍들은 총 144개(1열당 원주방향 16개 원형구멍으로 총 9열 배열; 원형구멍 직경=10 mm)로 구성되어 있으며 수평 원주방향으로 증기가 분사되게 되어 있다. 또한 I-Sparger 바닥에는 직경 25 mm인 구멍 한 개가 있어서 수직하향 방향으로 증기가 분사되게 되어 있다. Fig. 2에는 I-Sparger로부터 분사되는 증기제트의 분출 방향도 포함하여 나타내었다. 이와 같은 I-Sparger의 설계 특성은 수조내 열혼합 성능에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3-2. 과도상태 열혼합 측정부위별 온도변화 분석

열혼합 실험은 초기 가압기를 APR1400 조건에 가까운 약 160기압을 유지하고 수조 온도가 일정하게 유지되면 제어밸브를 개방하여 증기를 분사하여 실험이 진행된다. 열혼합 실험에 있어서 관심이 있는 것은 수조에서의 온도분포이므로 실험 매트릭스는 초기 압기 조건은 동일하게 유지하고 수조온도를 크게 20°C 간격으로 증가시켜 실험을 40초간 수행하였다(Table 2 참조). 수조 온도를 증가시켜 초기 조건을 얻기 위하여 별도의 증기보일러(300 kW)를 사용하였다.

실험 매트릭스에 의하여 총 15회의 실험을 수행하였다. 실험 결과의 유사성을 인하여 본 논문에서는 20°C인 경우를 중심으로 결과를 기술하였다. Fig. 4에는 B&C 장치의 가압기 및 I-Sparger 사이에 연결된 배관 주요 지점에서의 압력 변화를 나타내었다. 초기 가압기 압력이

Table 2. Test matrix for thermal mixing with I-Sparger.

Test ID	PZR pressure (MPa)	Pool water temp. (°C)	Steam flux range (kg/m^2-s)	Remark
TR-1	6.0	20	70~250	Prototype I-Sparger; with Vacuum Breaker
TR-2	10.0	20	100~450	
TR-3		40		
TR-4		60		
TR-5	15.0	70	100~700	
TR-6		80		
TR-7		90		
TR-8	15.8	95	100~750	
TR-9	15.0	70	100~700	Prototype I-Sparger; without Vacuum Breaker
TR-10	15.8	20	100~750	
TR-11		40		
TR-12		60		
TR-13		80		
TR-14		90		
TR-15		95		

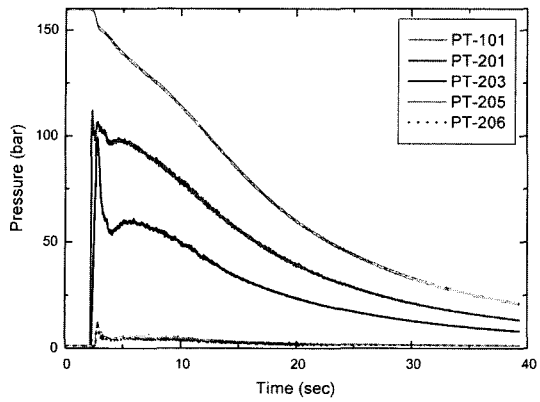


Fig. 4. Pressure variations with respect to time.

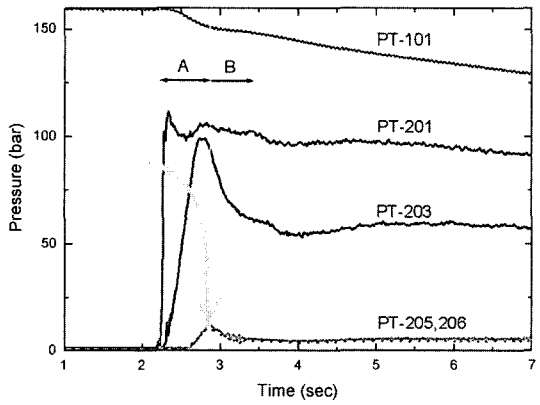


Fig. 5. Compression wave movement with respect to time.

약 160기압에서 DAS 작동후 약 2.2초 후에 제어밸브 HV-201이 개방되면 배관을 따라 점차적으로 압력이 전파하는 것을 확인할 수 있다. PT-201와 같이 배관 압력 거동을 보면 초기 압력 Peak 발생 후 압력 Undershoot에 이은 Overshoot는 제어밸브가 비교적 신속히 열리므로 발생되는 Compression Wave 전파와 반사(Reflection)에 의한 역방향 Compression Wave 전달현상으로 이해된다. Fig. 5에는 이를 보여주기 위하여 밸브 개방후 주요 지점에서의 짧은 시간내 압력 변화를 나타낸 것이다. 밸브 개방후 초기 Compression Wave가 PT-201에서부터 출발하여 PT-203과 PT-205,206에 순차적으로 전파되는 것을 확인할 수 있다. 또한 PT-201인 경우 Air-Chamber에서 일부 반사된 압축파에 의해 두 번째 Peak를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 보아 영역 'A'에서는 Compression Wave의 진행을 보이고 있으며 특히, PT-201에서 2.5초부터는 Venturi Meter에서 반

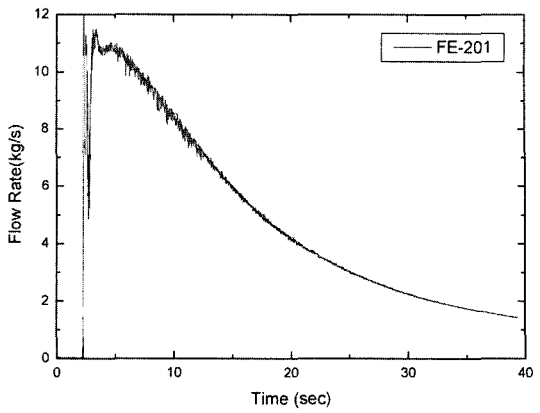


Fig. 6. Discharge flow rate variation with respect to time.

사된 것으로 추정되는 역방향 Compression Wave에 의한 재가압의 경향을 보이고 있다. 영역 'B'에서는 가압기 및 배관조건에 의한 유동 평형을 만족하는 과도현상을 보임을 알 수 있다. Fig. 6에는 방출되는 유량의 변화를 나타내었다. 방출유량은 Venturi Tube 유량계 전·후단 사이의 정압차 및 증기 물성치를 사용하여 계산된다.

수조내 주요 지점에 대한 온도 변화는 수조 중심으로부터 각각 40 cm, 90 cm, 그리고 140 cm 떨어진 곳에서 수직방향으로 설치된 열전대에 의하여 측정되었다. Fig. 7은 R=40 cm에서의 수직방향에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. 특이한 사항은 TC-637에서 초반기인 20초 부근까지 높은 온도를 보이고 있다는 것이다. Fig. 2에서 보듯이 TC-637은 수조 바닥으로부터 45 cm 떨어진 곳으로서 수평방향 분사구멍들이 모여 있는 스파져 본체로부터 수직 아래로 45 cm나 되는 지점이며, 또한 스파져 바닥에 있는 25 mm 구멍의 증기제트 유동에서도 영향을 받지 않는 곳(반경 이격거리 40 cm)으로 여겨지는 지점이다. 이것에서 볼 때 TC-637에 영향을 주는 것은 TC-637 부근의 증기제트 구멍들로부터의 영향보다는 다른 곳 예를들면, 부하저감령에 의한 영향으로 생긴 유동의 영향으로 TC-637 부근의 증기응축에 의한 온도 영향을 크게 받는 것이 아닌가 판단된다. 그 외의 위치에서는 비교적 물리적으로 타당한 경향의 온도 변화를 보이고 있는데 시간이 지날수록 수면 부근의 TC-631의 온도가 가장 높아지는 것으로 보아 온도 성층화의 경향을 보이고 있는 것으로 판단된다. 시간에 따른 증기 유량을 나타낸 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 시간의 흐름에 따라 분사 증기량은 줄어들어 분사증기에 의한 유동의 세기가 실험 후반부에서는 매우 약화된다는 것을 감안하면 실험 후반부의 수조내 온도 성층화는 타당한

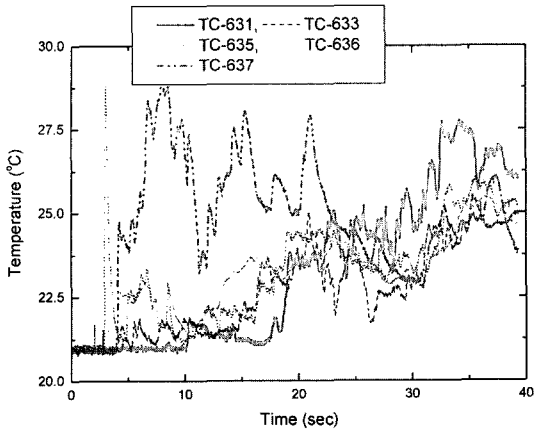


Fig. 7. Temperature variations at R=40 cm.

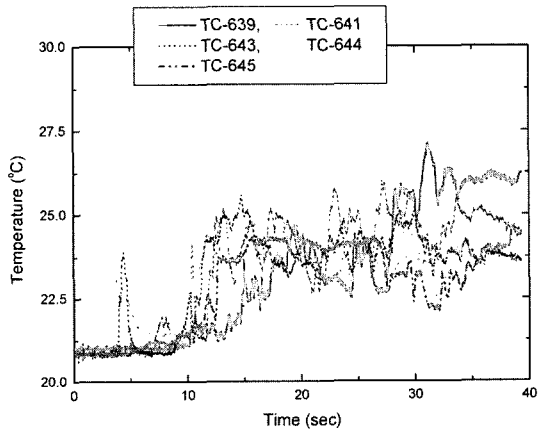


Fig. 8. Temperature variations at R=90 cm.

경향임을 알 수 있다.

Fig. 8은 R=90cm에서의 수직방향에 따른 온도 변화를 나타내고 있으며 전반적으로 Fig. 7과 비교하여 특이한 사항은 나타나지 않으나 시간이 지날수록 수면 부근의 온도(TC-639)의 온도가 가장 높아지는 것으로 보아 온도 성층화의 경향이 여기서도 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9에는 R=140 cm에서의 온도 변화를 나타낸 것으로 수조 벽면으로부터 거리가 10 cm 정도여서 벽면 영향으로 인하여 대부분의 위치에서 심한 온도 요동이 일어나는 것을 볼 때 왕성한 열혼합의 경향을 보이고 있는 것으로 판단된다. 다만, 수면 부근의 온도(TC-647)에서는 이전 경우들과 같이 시간에 따라 온도가 꾸준히 증가하지만 그 값이 수직방향 다른 곳의 값과 비슷한 크기여서 온도 성층화의 경향은 보이지 않는다고 판단된다.

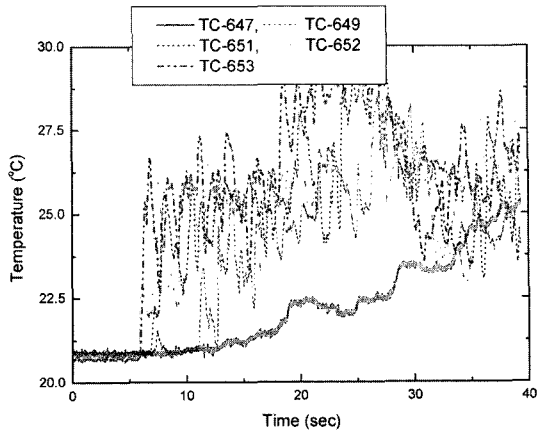


Fig. 9. Temperature variations at R=140 cm.

3-3. 과도상태 열혼합 Contour 분석

앞절에서 기술된 바와 같이 수조에 설치된 주요 위치에서의 시간에 따른 온도 변화의 경향은 특정 위치나 전반적인 경향을 파악하는데 도움이 되지만 수조 수직방향 단면 전체에서의 열혼합 경향을 파악하는데는 한계가 있는 것으로 보인다. 본 실험에서 측정된 데이터를 임의의 시각에서 수조의 수직 단면에서의 온도 경향(Contour)을 보는 것도 열혼합 성능을 파악하는데 주요한 근거를 제시할 것으로 판단하여 측정된 데이터를 적당한 보간법을 사용하여 Contour 작성을 위한 입력 자료를 생산하였다. CFX[5]에서 계산된 임의의 제트유동에 대하여 Spline Fitting과 선형보간(Linear Interpolation)에 의하여 작성된 Contour 비교결과 후자인 선형보간에서 더 타당한 경향을 보임을 확인하였으며 (부록 참조), 본 논문에서는 측정된 온도값에 대한 선형보간을 적용하여 Contour 작성용 입력값을 계산하였다.

Fig. 10에는 측정된 온도 값을 기준으로 하여 수조의 수직단면에서의 온도 Contour를 시간에 따라 정리한 것이다. t=0.02 sec에서의 온도 분포를 보면 수조의 초기 조건을 나타내는 것으로서 1°C 이내에서 비교적 균일하게 온도가 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 증기분사가 시작된 후 0.8초 후인 t=3 sec에서는 수평방향 분사구멍들이 모여 있는 위치에서 주된 온도 상승이 많이 일어나며, 온도 분포도 수평방향 분사구멍에 의한 영향이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 10초 이후의 Contour들에서 보듯이 온도 분포는 수평방향 분사구멍에 의한 영향이 거의 나타나지 않고 수조의 수직단면 전체를 통한 커다란 재순환 유동에 의한 온도 분포의 경향이 나타나게 됨을 알 수 있다. I-Sparger에서 분출되는 증기가 대부분 수평방향 분사구멍으로 분출된다면 주

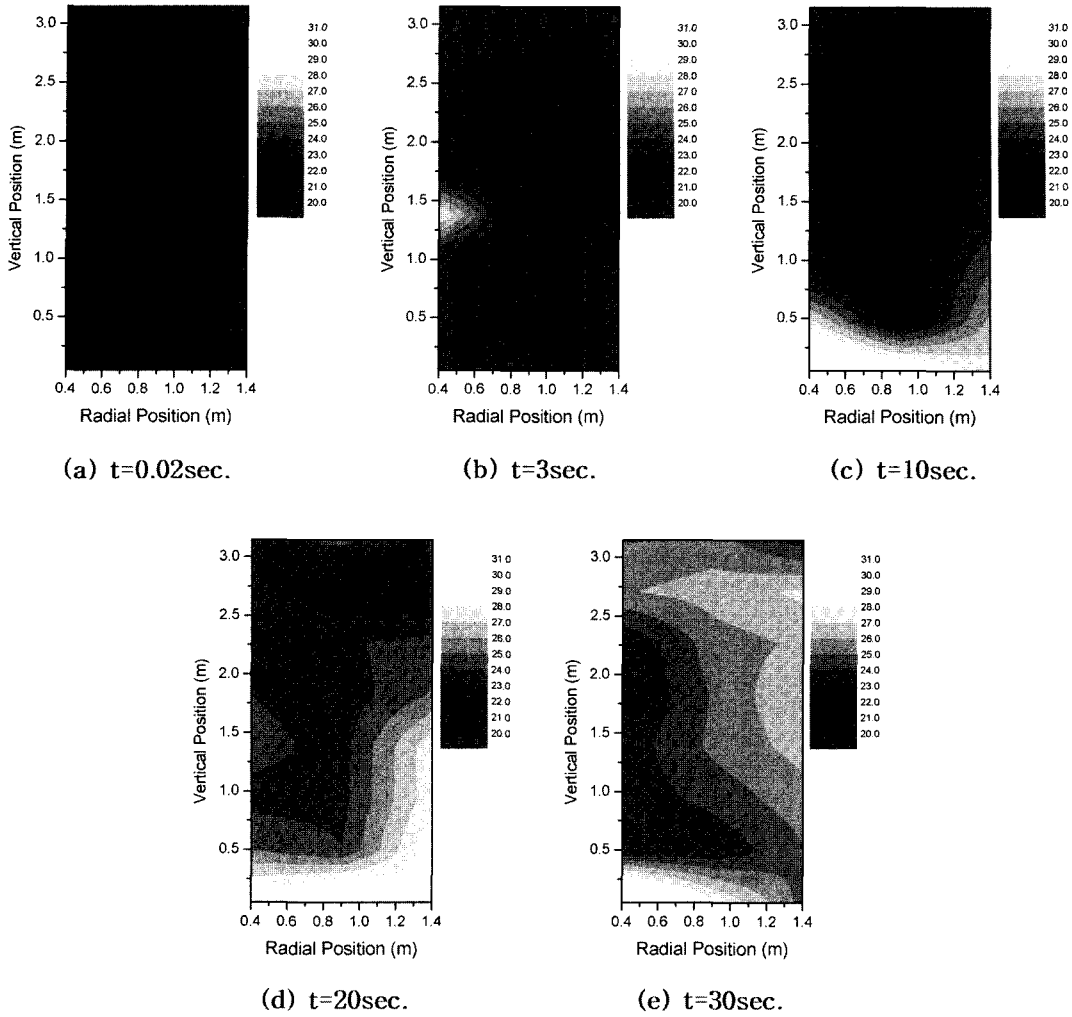


Fig. 10. Temperature contour variations.

된 재순환 유동은 수평유동이 벽에 부딪히면서 상·하 방향으로 변화되어 위쪽에는 커다란 재순환 유동이 그리고, 아래쪽에는 작은 재순환 유동이 생길 것으로 예상이 되지만 실험 결과에서 보듯이 재순환 유동은 수조의 수직단면 전체를 통하여 하나의 커다란 재순환 유동이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이에 대한 근거는 앞에서 살펴본 I-Sparger의 설계 특성에서 찾을 수 있다. 즉, Air Clearing 부하를 완화하기 위하여 설치된 부하저감링과 스파져 바닥의 구멍에 의하여 생긴 수직 하향 유로의 영향이 수평방향 분사 유동에 비교하여 무시할 수 없을 정도로 영향이 크다는 것을 보여주는 것이다. 따라서, 증기 분사후 얼마동안은 수평방향 분사구멍에 의한 영향이 주도적으로 나타났다가 시간이 지나면서 부하저감링과 수직방향 분사구멍에 의한 영향이 나타나 수조 수직단면상에 커다란 하나의 재순환 유동에 의하여 열혼합이 일어나는 것을 알 수 있다. 시간이 지나면서 분사되는 증기의 양이 줄어들어 수조 수직방향으로 온도 성층화의 경향이 나타나는 것을 t=30 sec Contour에서 확인할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구

B&C 장치를 이용하여 APR1400 실규모 I-Sparger의 증기제트 응축에 의한 수조내 열혼합 현상에 대한 실험이 수행되었다. 한정된 가압기 용량으로 인하여 과도상태 실험이 수행되었으며, 실험을 통해 수조내에 배치된

열전대를 사용하여 열혼합 자료를 얻었다. 측정된 열혼합 자료를 바탕으로 지역별 온도 변화의 경향과 수조 수직-단면상의 온도 윤곽도를 작성하였으며 이를 바탕으로 I-Sparger의 열혼합 특성을 파악하였다. 실험결과에서 I-Sparger에 의한 열혼합 특성은 I-Sparger 설계 특성이 나타나는 열혼합 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

본 논문에서 수행된 열혼합 성능 실험은 과도상태에 관련된 혼합 실험으로서 방출유량이 시간에 따라 크게 변하는 경우를 모의한 것이다. 수조 열혼합에서 추가로 고려할 수 있는 것은 방출유량이 일정하게 유지되는 정상상태의 열혼합 성능과의 비교가 필요한 것으로 판단되었으며 이에 관한 추가 실험을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

사용기호

R : radius from the center of the I-Sparger [m]
t : time from the actuation of DAS [sec]

참고문헌

1. KHNP. "신고리 3, 4호기 예비안전성분석보고서", 2003.
2. Kang, H.S. *et al.* Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Yongpyong Korea, 2004, 311.
3. Helsel, R. "Cutting Your Test Development Time with HP Vee: A Iconic Programming Language", PTR Prentice Hall, 1994.
4. 김연식 외. 수조재 증기제트 응축현상 제고찰, Energy Eng. J., 2003, 12(2), 74.
5. AEA Technology. "CFX4.4 User's Manual", 2001.

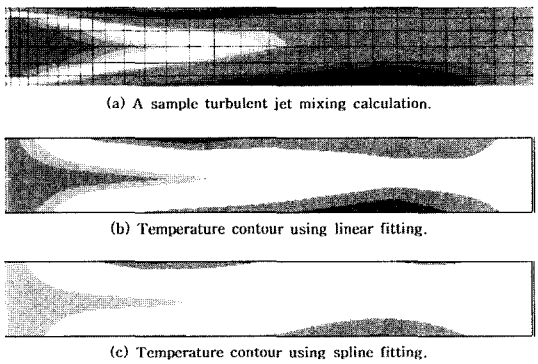
부 록

본 부록에서는 수조내 증기응축 제트유동에 의하여 열혼합이 일어나는 경우에 있어서 측정된 온도 결과들을 온도 분포로 정리할 경우 사용할 보간법을 비교한 결과를 정리하였다.

수조내 증기응축 제트유동에 의하여 열혼합이 일어날 경우 증기구멍이 하나이든 여러 개이든 하나의 커다란 난류 제트유동에 의한 열혼합으로 가정할 수 있음을 확인한 바 있다[4]. 이를 근거로 임의의 난류 제트유동에 의한 열혼합 현상을 상용코드인 CFX를 사용하여 계산하고 그 온도 분포 결과를 선형 및 Spline 보간법에 의한 온도 Contour들을 비교하였다.

먼저 일정한 온도로 유지되고 있는 양쪽에 입출구가 있는 비교적 단순한 채널의 입구쪽에 온도가 높은 물이 난류제트와 같이 유입될 때를 계산하고 거기에서 나온 결과(Fig. 11(a))에 본 논문의 실험에서 측정한 개념(Fig. 2 참조)인 8X3의 격자를 만들어 온도데이터를 읽어낸 다음 그것들의 사이를 수평방향과 수직방향으로 선형보간과 Spline 보간을 적용한 결과를 Fig. 11의 (b), (c)에 각각 나타내었다. Fig. 11(a)에 나타난 선들은 CFX 계산을 위해 모델링된 Grid를 의미하고 열혼합을 위해 사용된 난류모델은 표준형 모델이다. Fig. 11(b), (c)의 결과를 보듯이 Spline 보간인 경우 보간법 특성상 경계에서의 왜곡이 비교적 심하게 나타나는 까닭에 경계의 Contour가 상대적으로 많이 왜곡이 생기는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 두가지 보간법 중 비교적 타당한 결과를 보인 선형보간법에 의한 온도 Contour를 작성하였다.



(a) A sample turbulent jet mixing calculation.

(b) Temperature contour using linear fitting.

(c) Temperature contour using spline fitting.

Fig. 11. Comparison of temperature contours for a sample CFX result to linear and spline fittings.