

수조내 증기제트 응축현상 제고찰

김연식 · 송철화 · 박춘경

한국원자력연구소

E-mail : yskim3@kaeri.re.kr

Review of Steam Jet Condensation in a Water Pool

Yeon-Sik Kim, Chul-Hwa Song and Choon-Kyung Park

Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

APR1400과 같은 차세대 원자력발전소에서는 원자로 안전성을 증진시키기 위하여 SDVS와 같은 계통을 도입하고 있다. 완전급수상실사고와 같은 경우는 POSRV가 개방되어 수조내 Sparger를 통하여 증기가 방출·응축되게 된다. 증기가 응축함에 있어서 설계에서 고려해야 될 사항은 하중과 수조 혼합이며 증기 제트 응축의 물리적 현상 이해를 통하여 적절한 대처를 마련할 수 있다. 수조내 Sparger를 통하여 분사되는 증기 응축에 대하여 하중과 수조 혼합 검토에 도움이 될 수 있도록 증기제트 응축의 물리적 현상 이해에 대한 검토와 평가를 수행하였다.

Abstract — In the advanced nuclear power plants including APR1400, the SDVS (Safety Depressurization and Vent System) is adopted to increase the plant safety using the concept of feed-and-bleed operation. In the case of the TLOFW (Total Loss of Feedwater), the POSRV (Power Operated Safety Relief Valve) located at the top of the pressurizer is expected to open due to the pressurization of the reactor coolant system and discharges steam and/or water mixture into the water pool, where the mixture is condensed. During the condensation of the mixture, thermal-hydraulic loads such as pressure and temperature variations are induced to the pool structure. For the pool structure design, such thermal-hydraulic aspects should be considered. Understanding the phenomena of the submerged steam jet condensation in a water pool is helpful for system designers to design proper pool structure, sparger, and supports etc. This paper reviews and evaluates the steam jet condensation in a water pool on the physical phenomena of the steam condensation including condensation regime map, heat transfer coefficient, steam plume, steam jet condensation load, and steam jet induced flow.

1. 서 론

차세대 원전 APR1400에는 완전급수상실사고(TLOFW) 시 안전감압 및 배기계통(SDVS)를 통하여 원자로 냉각재 계통(RCS)의 고온·고압의 냉각재를 방출하여 압력을 낮추어 안전주입수가 RCS로 들어가 노심을 냉각하여 안전정지가 될 수 있도록 하며 궁극적으로는 정지냉각계통(SCS)이 RCS에 연결될 수 있도록 RCS를 감압하게 된다. APR1400의 SDVS는 가압기 상단에 동력작동 안전방출밸브(POSRV) 4개와 12개의 I-형 Sparger(I-Sparger), 그리고 연결 배관들로 이루어져 있다. I-Sparger

는 격납용기내 핵연료 재장전탱크(IRWST)의 물속에 잠겨 있어서 POSRV가 열려 증기가 배관을 통해 방출되면 여러 개의 작은 구멍을 통하여 증기를 물속으로 분사하여 응축이 잘 될 수 있도록 도와주는 역할을 한다. EPRI의 ALWR 프로그램이나 APR1400과 같은 차세대 원자력발전소에서는 원자로 안전성을 증진시키기 위하여 SDVS와 같은 계통을 도입하고 있다.

I-Sparger에는 부하저감링(Load Reduction Ring, LRR) 배출구, 바탕 배출구(φ25 mm), 그리고 144개의 작은 구멍(φ10 mm)이 있어서 배출구나 구멍을 통하여 증기가 분사되게 된다(Fig. 1 참조). 분사된 증기는 IRWST의 수

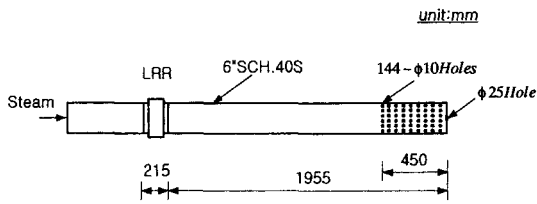


Fig. 1. Configuration of the APR1400 I-Sparger.

조내에서 응축된다. 증기가 응축함에 있어서 APR1400 설계에서 고려해야 될 사항은 크게 증기응축에 의한 하중 영향과 증기응축에 의한 수조 혼합으로 요약할 수 있다. 그사이 증기응축에 관하여 많은 연구가 수행되어 증기응축에 의한 하중영향에 관해서는 현상의 일반적인 경향이 파악되었다. 그러나, 증기응축 자체에 대한 이해는 아직도 물리적 현상에 대한 이해가 부족한 실정이며 이로 인하여 어느 정도가 경향이 파악된 하중영향 부분에 대하여도 근본적인 이해를 어렵게 하고 있는 것이다.

본 논문은 수조내 Sparger를 통하여 분사되는 증기 응축에 대하여 하중과 수조 혼합 검토에 도움이 될 수 있도록 증기제트 응축의 물리적 현상 이해에 대한 현황과 전망에 대하여 검토하였다.

2. 본 론

수조내로 분사된 증기가 응축함에 있어서 열수력적 조건에 따라 나타나는 응축의 현상은 매우 다양하다. 흔히들 지적되는 증기응축이 하중과 수조 혼합에 영향 미치는 것을 찾는 것이란 결국 증기 제트의 응축 현상을 이해하는 것으로 귀착되게 된다. 많은 연구와 노력에도 불구하고 증기 제트 응축 현상은 아직도 불완전하게 이해되고 있으며 그로 인하여 나타나는 현상적 결과를 분석하고 정리하거나 적절한 모형을 가정함으로써 증기제트 응축 현상의 이해를 위한 부단한 노력이 계속되고 있는 것이다. 여기서는 증기 응축에 대한 일반적인 현상적 검토, 하중 관점 검토, 그리고 수조 혼합 관점의 검토를 정리하였다.

2-1. 증기제트 응축 현상

2-1-1. 증기제트 응축 영역도(Regime Map)

수조내에 증기가 응축되는 경우 열수력적 조건에 따라 크게 구분할 수 있는 현상은 Chugging(C), Condensation Oscillation(CO), 그리고 Stable Condensation(SC)이다. 물론 현상들 사이의 경계적 현상이나 극단적인 조건에 따른 변형된 현상도 나타나 이것에 대한 구분의 노력^{[1][2]}도 있었으나 모두가 위의 세 가지 현상의 변형적

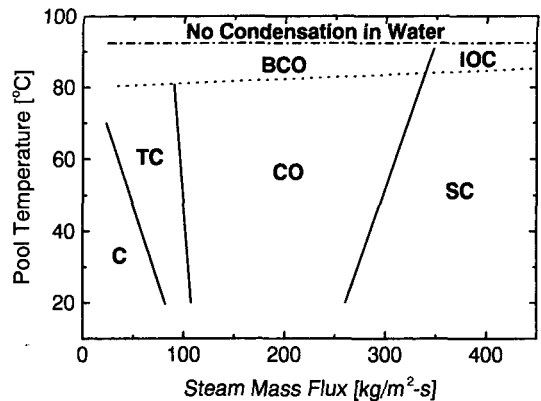


Fig. 2. Steam jet condensation regime map.

인 현상으로 이해할 수 있다. Fig. 2에는 증기제트 응축에 대한 영역도^[2]를 제시하였다.

Chugging 현상은 물의 응축 능력 보다 작은 양의 증기가 공급되는 경우에 발생한다. 일반적으로 Sparger는 크든 작든 물측 열전달 능력에 영향을 주게 되는데 증기 공급이 작은 경우 물속에 분출된 증기는 큰 물측 열전달 능력으로 인하여 경계면에서 순간적으로 증기가 응축되고 증기공간에는 압력이 급격히 떨어져 물측과의 압력차이에 의하여 발생된 유동은 분사 구멍 내부까지 들어오게 된다. 분사 구멍내부에서는 물측은 상대적으로 온도 성층화가 쉽게 일어나고 따라서 감소된 물측 열전달 능력으로 인하여 증기가 증가되어 증기측 압력이 높아져 분사구멍 외부로 다시 증기가 분출되게 된다. Chugging 현상은 이와 같이 물/증기 경계면이 분사 구멍 내·외부를 왕복하면서 주기적 현상을 유지하게 된다. Chugging은 경계면이 분사구멍 내부로 들어갈 때 물속도의 급격한 변화로 인한 압력 Pulse가 발생하여 이름지어진 것이다.

CO 현상은 물의 응축 능력에 상당한 증기가 공급되는 경우에 일시적 평형을 이루므로 발생하는 현상으로 이해된다. Chugging에서 언급된 주기적인 현상이 분사 구멍 외부에서만 일어나는 현상으로 특징지을 수 있다. 응축되지 않은 증기 제트는 어떤 형태까지 성장하였다가 물측 응축능력이 커지게 되면 경계면에서 응축이 일어나 압력이 급격히 떨어져 물측과의 압력차이에 의하여 발생된 유동으로 경계면이 분사 구멍 근처까지 접근하고 온도 성층화로 상대적으로 떨어진 물측 열전달 능력으로 증기가 축적되어 증기측 압력이 높아져 증기제트가 다시 성장하게 된다. CO 현상은 이와 같이 물/증기 경계면이 분사 구멍 외부에서 왕복하면서 주기적 현상을 유지하게 된다. CO인 경우는 Chugging 보다는 작

은 압력 Pulse가 발생된다.

SC 현상은 물의 응축 능력 이상으로 증기가 공급되는 경우 발생하는 현상이다. CO에서는 물/증기 경계면이 주기적으로 왕복하는 경향을 보이지만 SC에서는 경계면의 위치가 비교적 안정적으로 유지되는 현상으로 특징지을 수 있다. SC에서는 경계면의 형태가 비교적 분명하고 위치 또한 일정한 경향을 보이지만 경계면의 요동은 주로 증기 분사에 대하여 수직 방향으로 이루어진다. SC인 경우는 CO 보다는 작은 압력 Pulse가 발생된다.

Block¹³⁾은 원자력 발전소에서 일어날 수 있는 응축과 관련한 여러 가지 현상들에 대하여 적용할 수 있는 Universal 영역도(Fig. 3 참조)를 제시하고 있는데 물유속, 증기유속, 그리고 물-포화증기 온도차에 대하여 영역을 표시하였다. Fig. 3의 영역도는 크게 R_T 인자의 값에 따라 양분된다. R_T 는 Ja 수와 유사한 개념으로서 흐르는 증기(기상)의 에너지 능력(잠열)에 대하여 물(액상)이 수용할 수 있는 에너지 흡수 능력의 비로서 다음과 같이 표시된다.

$$R_T = \frac{c_p(T_s - T_i)G_l}{h_{fg}G_g} \quad (1)$$

$R_T=1$ 에서는 공급된 증기와 응축시킬 수 있는 물이 동일한 크기로서 이상적으로 경계면이 존재한다면 실제적으로는 어렵지만 개념적으로 가장 안정적으로 응축이 일어나는 조건이다. $R_T < 1$ 인 경우는 공급된 증기에 비하여 응축시킬 수 있는 물의 양이 적기 때문에 경계면이 부서지는 현상(Interface Excursion, IE)이 일어나고, 반대로 $R_T > 1$ 에서는 응축이 확실하게 일어난다. 특히, $R_T > 1$ 인 경우 증기 유량이 증가할수록 Large Amplitude Interface Oscillation(OSC)에서 High Frequency Fluctuations(FL)로 변해간다고 지적하고 있다.

증기제트 응축에 대하여 Fig. 2와 Universal 영역도 비

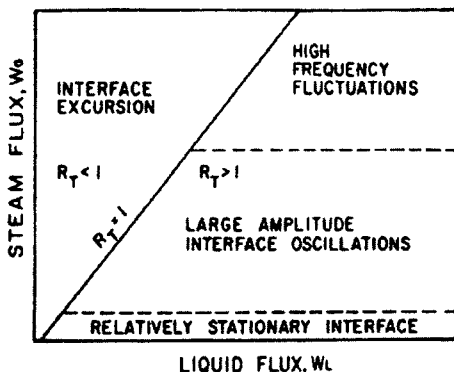


Fig. 3. Steam condensation universal map.

교에서 Chugging은 OSC, CO는 FL, 그리고 SC는 IE로 볼 수 있다. 실제로 CO는 물측의 응축 능력이 공급된 증기량보다 커서 기액 경계면이 Plume 방향으로 전후로 왕복하면서 생기는 현상이며 SC는 상당 부분 기액 경계면이 안정적으로 유지되기 때문이다. 여기에서 한 가지 판단을 내릴 수 있는 것은 SC에서 구할 수 있는 실험결과와 CO의 한계치로 볼 수 있다는 사실이다. 예를 들어, 순전히 물/증기 경계면에서 일어나는 응축현상에 대한 열전달 계수의 최대치는 SC에서 구한 열전달 계수를 넘지 않는다고 간주할 수 있다. 실제적으로 CO 현상에 대한 열전달 계수를 구하는 것은 어려운 것을 감안하고 또한 CO와 SC의 물리적 현상의 연속성을 고려할 때 CO의 현실적인 열전달 계수는 SC의 열전달 계수가 기준되는 크기라고 판단된다.

2-1-2. 증기제트 응축 열전달 계수

분사된 증기 제트가 수조내 물속에서 응축함에 있어서 경계면이 형성되고 경계면을 통하여 질량/열 전달이 일어난다. 경계면 양측을 형성하는 증기측 공간과 물측 유동의 특성은 경계면에서의 전달현상을 지배하게 되는 것이다. 증기에 비응축성 개스가 혼합되어 있지 않다면 비교적 큰 증기측 열전달 능력이 존재한다. 증기제트 응축에 있어서 기액경계면을 향하여 증기의 순속도(net velocity)가 큰 경우 응축량이 증가하는 경향을 나타낸다. 물속에서의 증기제트 응축에서는 기액경계면 방향으로 증기의 순속도가 매우 큰 경우로 간주할 수 있으므로 분자운동 이론에 근거한 증기측 경계면에서의 최대 응축량은 다음과 같이 정리할 수 있다¹⁴⁾.

$$j = \sigma \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(2a\sqrt{\pi} \frac{P_g}{\sqrt{T_g}} - \frac{P_f}{\sqrt{T_f}} \right) \quad (2)$$

where, $a = \frac{u}{\sqrt{2RTM}}$

식(2)의 응축계수, σ 에 대하여 많은 실험과 연구가 있었으나 Mills & Seban¹⁵⁾은 물을 사용한 실험결과에서 σ 의 값이 0.45~1.0 범위에 있음을 확인한 바 있다.

제시된 증기 응축량을 열전달 계수로 나타내기 위하여 먼저 열전달 계수 h_l 를

$$h_l = \frac{j h_{fg}}{T_g - T_f} \quad (3)$$

와 같이 정의하고 식(2)를 식(3)에 대입하면

$$h_l = \frac{\sigma h_{fg}}{T_g - T_f} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(2a\sqrt{\pi} \frac{P_g}{\sqrt{T_g}} - \frac{P_f}{\sqrt{T_f}} \right) \quad (4)$$

로 된다. Figs. 4, 5는 참고문헌 1의 실험 조건에 가까

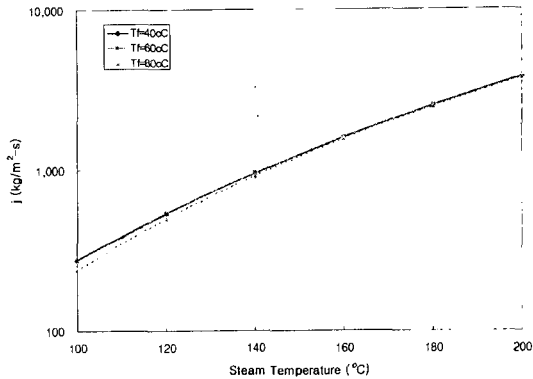


Fig. 4. Condensation mass flux variations wrt various water temperatures.

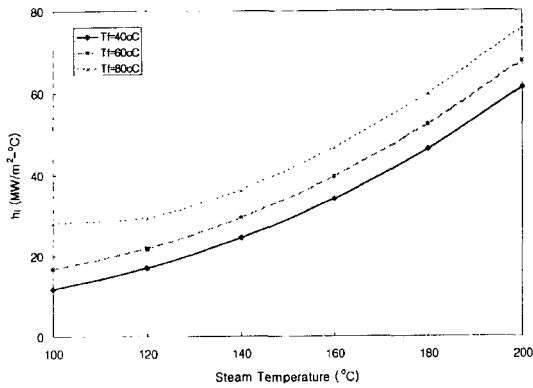


Fig. 5. Overall condensation h_i variations wrt various water temperatures.

운 경우에서의 응축 Flux, j 와 열전달 계수, h_i 를 세 가지 물 온도에 대하여 계산한 결과를 나타낸 것으로서 응축계수, σ 는 1.0으로 가정된 것이다. Fig. 4에서 보듯이 응축 Flux, j 는 증기 온도의 영향을 크게 받으며 증기 온도가 증가할수록 j 가 증가한다. 또한 같은 증기 온도인 경우 증기 온도가 높을수록 물 온도에 상관없이 j 가 비슷한 크기를 가지며 증기 온도가 낮을수록 물 온도에 반비례하여 커짐을 알 수 있다. h_i 도 Fig. 5에서 보듯이 j

와 같은 경향을 보이지만 동일 증기 온도에 있어서 물 온도가 높을수록 h_i 가 커짐을 알 수 있다. 이는 j 는 증기 온도의 영향에 비하여 물 온도의 영향이 상대적으로 미미한 반면, h_i 는 식(4)에서와 같이 증기-물 온도차, $(T_g - T_l)$ 에 영향을 크게 받기 때문인 것으로 판단된다.

위에서 제시한 열전달 계수는 기액 경계면을 단순화하여 구한 것이지만 현실적으로 기액 경계면의 온도는 $T_l \sim T_g$ 사이에 존재할 것으로 예상되어 이것에 대한 이해의 정도에 따라 의미있는 열전달 계수를 얻을 수 있을 것이다. 경계면의 온도를 현실화 할 수 있다면 응축량과 열전달 계수 예측의 정도가 높아질 것이며 특히, 열전달 계수의 크기에 대한 실제적인 의미를 가질 수 있을 것으로 판단된다. Mills & Seban⁵⁾은 기액 경계면의 온도를 Condensate Surface Temperature, T_c 로 정의하여 포화상태 물과 증기 물성치의 유용한 관계인 Clapeyron 관계식을 적용한 것을 참고할 필요가 있다.

SC 현상의 전체 응축 열전달 계수를 실험적으로 구한 결과¹¹⁾에서 h_i 는 동일한 증기 노즐에 대하여 물 온도에 상관없이 거의 일정한 분포를 나타내었으며 노즐 직경에 대하여는 반비례하는 경향을 보였다. 측정된 h_i 의 범위는 1~4 MW/m²·°C로 나타났다.

물측 경계면에서의 열전달 능력 평가의 한 방법으로 증기제트 응축에 대하여 Turbulent Intensity, Surface Renewal, 그리고 Shear Stress 개념에 의한 기액경계면 전달 모형에의 적용 결과¹⁶⁾에서 SC 현상에 속하는 증기 유속 300 kg/m²·sec, 수조 온도 50°C 조건에서의 증기제트 응축에 대하여 계산된 h_i 의 범위는 1.1~7.3 MW/m²·°C였다(Table 1 참조). 세가지 모형 모두가 물 온도에 대하여는 둔한 변화를 보였으며 Turbulent Intensity 모형이 실험치에 가장 가까운 값을 제시하고 있음을 확인하였다.

증기제트 응축 열전달 계수에 대하여 검토한 결과 분자운동이론에 의하여 제시된 h_i 는 이론적으로 가능한 상한치를 나타내고 있다고 볼 수 있다. 참고문헌 1에서 구한 h_i 는 SC 영역에서의 증기제트 응축에 대하여 기액 경계면에서의 복잡한(또한 밝혀지지 않은) 전달현상을 측정할 수 있는 단순한 Plume Contour로 가정함으로써 얻

Table 1. Comparison of overall h_i wrt an experiment result and interfacial transport mechanisms.

Experimental result ¹¹⁾	Interfacial transport mechanisms ¹⁶⁾		
	Turbulence intensity	Surface renewal	Shear stress
$h_i = 1.3583 c_p G_m B^{0.0405} \left(\frac{G_o}{G_m}\right)^{0.3714}$	$h_i = St_t \left(\frac{1}{2n}\right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{2/3} c_p G_o$	$h_i = 0.1409 \left(\frac{k_l c_p}{v_l \rho_g} \frac{1}{4-2\eta}\right)^{0.5} B^{0.33} G_m^{0.1722} G_o^{0.8278}$	$h_i = 0.1819 \left(\frac{k_l c_p}{v_l \rho_g} \frac{1}{4-2\eta}\right)^{0.5} B^{0.33} G_m^{0.1722} G_o^{0.8278}$
1.0~3.5 MW/m ² ·°C	~1.1 MW/m ² ·°C	~7.3 MW/m ² ·°C	~6.7 MW/m ² ·°C

을 수 있었다. 그러한 가정을 토대로 구한 h_s 는 비록 정량적으로 정확한 의미를 가질 수는 없으나 정성적으로는 물리적 현상을 이해하는데 도움을 주고 있다고 판단된다. 이는 측정된 h_s 값이 분자운동이론에 의한 예측치에 비하여 값은 작지만 같은 정도의 크기(Order)를 가지고 있음에서 알 수 있다. 세 가지의 기액 경계면에서의 전달 모형을 증기제트 응축에 적용한 결과 분자운동이론에 의한 값보다는 작지만 같은 정도의 크기를 가지며 그것이 실험치에는 더 가까운 경향을 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다.

2-1-3. 증기제트 Plume 특성

증기제트 응축에 있어서 Plume 특성에 대한 많은 연구가 있었으나 아직도 그것에 대한 이해와 이론적 접근이 정립되어 있지 않다. Plume의 특성을 위해서는 먼저 실험에서 외관상으로 나타난 Plume 형태에 대한 검토와 그리고 그에 따른 Plume 내부의 특성을 이해할 수 있을 것으로 판단된다. 여기서는 SC 현상에 관련된 증기 Plume에 대하여 검토한다.

Chugging에 대한 실험적 연구¹⁷⁾에서 증기가 물속에 분출되는 것을 등엔트로피 과정으로 간주하였다. 포화증기나 비교적 작은 과열도의 증기가 노즐을 통하여 물속에 분출될 때 등엔트로피 과정에 의한 압력 크기가 증기 포화압력보다는 크게 변화하므로 물속의 증기는 과포화 상태가 되어 증기응축 특성에 이의 영향을 고려해야 한다고 지적하였다. 참고문헌 5에서는 물과 R-113에 대한 등엔트로피 과정의 압력거동과 증기압의 차이로 인한 응축 현상에서 증기의 경우는 등엔트로피 과정에 의한 과포화가 그리고 수증기와는 반대로 포화압력이 더 크게 나타나는 R-113에서는 기액 경계면에서의 열전달이 응축을 지배한다고 지적하고 있다. 증기제트의 응축에 있어서 Weimer *et al.*¹⁸⁾은 큰 증기 유속의 증기제트는 초기에 등엔트로피 과정을 가정한 External Expansion이 존재한다고 지적한 바 있으며 Kim *et al.*¹⁹⁾의 연구에서는 External Expansion과 Transition Point가 존재함을 실험으로 확인한 바 있다.

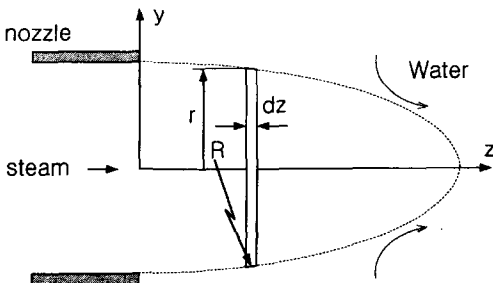


Fig. 6. Configuration of the steam jet plume.

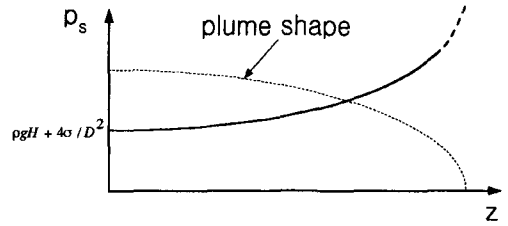


Fig. 7. p_s variation within the conical shape plume.

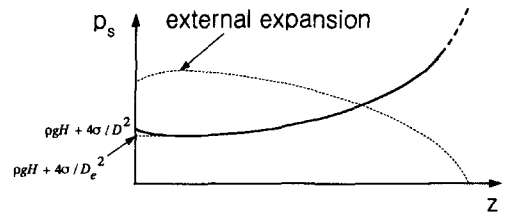


Fig. 8. p_s variation within the ellipsoidal shape plume.

SC 현상의 증기제트 응축 Plume 형태는 Cone이나 Ellipsoid 형태를 나타낸다¹¹⁾. Fig. 6에서 응축 Plume의 축방향으로 미소 간격 dz 의 띠를 가정한 단순한 형상을 생각할 수 있고, Plume 형태의 z-y 평면상 곡률반경은 매우 크다($R \gg r$)고 가정하면 힘의 평형으로부터

$$p_s = \rho g H + \frac{\sigma}{r} \tag{5}$$

관계식을 얻을 수 있다. 여기서, H는 증기제트가 물속에 잠긴 깊이이다. 정성적인 비교·평가를 위하여 SC 현상의 두가지 전형적인 Plume 형태인 Cone과 Ellipsoid 모양에 대하여 Plume 내부의 p_s 변화를 살펴보면 Figs. 7, 8과 같이 나타낼 수 있다. $z=0$ 에서의 p_s 는 두 경우 모두 $\rho g H + 4\sigma / D^2$ 이며 Ellipsoid 형태인 경우 External Expansion에서의 p_s 는 최소값인 $\rho g H + 4\sigma / D_e^2$ 를 갖는다. z의 최대인 Plume 끝 부근에서는 실험적으로 정확한 모양을 관찰할 수 없는 이상유동을 나타내는 것으로 판단되므로 p_s 변화를 점선으로 나타내 그 경향을 표시하였다. Plume 내부의 p_s 의 변화는 같은 경향의 온도 변화로 나타난다. Tin *et al.*¹⁹⁾은 증기제트 Plume 내부의 압력 및 온도변화를 측정할 바 있는데 실험 데이터의 경향이 위에서 제시한 단순한 모형과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

단순한 모형에 의한 압력 거동과 실험에서 측정된 압력과 온도 변화의 추이를 고려할 때 SC 현상의 증기제트 응축 Plume 내부는 Nozzle 출구에서부터 External Expansion까지는 등엔트로피 팽창과정으로 그리고 External Expansion에서 Plume 끝 부분까지는 기액 경계면의 영향을 무시한다면 외부와는 열전달이 없는 단열

압축과정으로 이해할 수 있다.

SC 현상의 증기제트 응축 Plume의 관찰에서 대부분 External Expansion까지는 기액 경계면이 선명하게 나타나지만 그 이후 영역에는 선명한 경계면이 서서히 사라져 이상유동의 경향을 보인다. Nozzle 출구부터 External Expansion까지는 등엔트로피 팽창에 의하여 증기제트는 팽창하는 경향 즉, 상대적으로 큰 반경방향의 속도를 가지므로 기액 경계면에 반경방향의 증기응축 효과가 작용되어 Plume 형상을 비교적 선명하게 되는 것으로 판단된다. External Expansion 이후부터는 물과 증기가 거의 평행한 유동을 하면 상대적인 속도차가 매우 커 물이 증기로 Entrainment가 커지며 또한 증기 속도 및 응축에 의한 기액 경계면의 요동이 심하여 관찰하기 어려운 이상유동의 형태를 가지는 것으로 보인다.

2.2. 증기제트 응축 하중

증기제트가 응축하면서 안정적인 기액 경계면을 유지하지 않기 때문에 Chugging, CO, 그리고 SC 현상에서 모두 응축하중이 존재하게 된다. 증기응축에 의하여 발생하는 하중은 크기와 주파수를 갖는다. 응축하중의 크기와 주파수는 별개의 관계가 아니라 서로 매우 밀접한 관계를 가지고 있다고 보여진다.

응축하중은 기액 경계면이 어떻게 변화하느냐에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다. 기액 경계면의 (왕복)움직임이 비교적 큰 Chugging에서는 큰 압력 하중이 발생하고 상대적으로 안정된 기액 경계면을 유지하는 SC 현상에서는 작은 경향을 나타낸다. 일반적인 경향으로서 하중의 크기와 반대로 하중의 주파수가 변화하는 것을 알 수 있다. 응축하중은 물 응축으로 발생된 빠른 유동이 매우 짧은 시간 동안 정지하면서 발생하는 압력에 의한 하중으로서 수격하중과 같은 개념 즉,

$$\Delta F = \rho A \Delta v \quad (6)$$

이 적용될 수 있다. 여기서 물이 움직이는 단면적 A는 Nozzle 직경에 따라 변한다고 볼 수 있으므로 응축하중은 물 속도(변화)와 Nozzle 단면적에 비례하는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 물 속도는 기액 경계면에서 응축이 얼마나 빨리 일어나 얼마나 많이 물이 가속되느냐에 달라지므로 물 속도에 영향 미치는 인자는 응축 속도에 영향을 미치는 경계면 열전달 계수 h 와 물운동 가속 시간에 영향을 미치는 증기 유속이라고 할 수 있다. Hong^[10]의 실험결과에 의하면 동일한 Nozzle 직경에서 응축하중은 증기유속에 반비례하고 $(T_s - T_1)$ 에는 비례한다.

수조에 잠긴 Nozzle에서 분사되는 증기의 응축 주파수에 대해서는 실험적 연구들^{[10][11]}을 참고할 수 있다. 동일한 Nozzle 직경에서 실험을 수행한 Hong^[10]의 경우에

측정된 시간에 대한 동적 압력변화를 FFT(fast fourier transform)로 변환하여 분석한 결과 Dominant Frequency는 CO와 SC의 경계에서 최대치를 가지는 것을 알 수 있다. 압력 분포에 있어서는 CO인 경우 Dominant Frequency를 중심으로 옆으로 퍼진 형태를 가지지만 SC에서는 좁고 뾰족한 압력 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 압력분포 경향의 차이는 CO와 SC의 진동원의 모양이나 거동이 다르다는 것을 의미한다. CO에 대한 사진관독 결과^[11]를 보면 진동을 유발하는 응축의 형태는 Plume 전체 길이에서 일어난다는 것이다. 즉, 물속에서 형성된 Plume은 어느 정도 성장하다가 1~2군데에서 국부적으로 잘룩하게 되면서 Plume 사라지는 것을 보이고 있다. 그러나, SC에 대한 사진^[11]은 Nozzle에서부터 External Expansion까지는 비교적 안정적인 기액 경계면을 유지하고 그 이후부터는 이상유동적인 성격이 강한 경계면을 형성하는 것으로 미루어 볼 때 SC에서의 진동에는 이상유동적인 성격이 강한 경계면에서 반경 방향으로 진동하는 영향이 강하게 나타난다는 것을 알 수 있다. Fukuda^[11]는 CO의 응축 형태에 대하여 두 가지 즉, C_1 과 C_2 형태의 CO가 있으며 각각은 증기유속이 작고 클 때 일어나며, 그 차이를 시간에 대한 압력변화의 경향에서 연속적인 산모양인 C_1 (한군데에서 국부적으로 잘룩하게 된 경우에 해당)에 비하여 C_2 는 간헐적인 산모양 또는 연속적인 작은 산모양을 배경으로 한 간헐적인 산모양(한군데에서 국부적으로 잘룩하게 된 경우에 해당)으로 설명하고 있다. 특히, Fukuda는 C_1 형태에 대한 주파수에 대한 실험식을

$$f_{C_1} = \frac{60.0 \Delta T}{D} \quad (7)$$

로 제시하고 있어서 C_1 형태의 CO 진동 주파수는 $(T_s - T_1)$ 에는 비례하고 Nozzle 크기에는 반비례하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 Arinobu^[12]도 CO의 진동 주파수 상관식을

$$f = 0.8 \frac{v}{D} \left(\frac{c_p \Delta T}{h_{fg}} \right)^{1.4} \quad (8)$$

와 같이 제시한데서 확인할 수 있으며, 이는 Rayleigh 방정식으로부터 유도된 특성 주파수

$$f = \frac{2}{D} \sqrt{3k \frac{p_c}{\rho}} \quad (9)$$

와 유사한 형태임을 알 수 있다. 위 식의 Root안에 상수 3을 제외하면 Root항은 증기의 음속을 의미하게 되어 Arinobu 상관식의 단순 형태가 됨을 알 수 있다.

증기제트 응축진동의 Dominant Frequency를 Strouhal

Table 2. Comparison of St number for previous researches.

Research Parameters	Simpson & Chan ^[13]	Damasio <i>et al.</i> ^[14]	Cho <i>et al.</i> ^[15]	Remark
D [cm]	0.635~2.22 (single)	0.6~1.2 (single)	0.5 (multiple)	
G [kg/m ² -sec]	147~333	30~250	70~215	
St Correlation	St=k ₀ (Ja) ^{a₀} (Re) ^{b₀} k ₀ =0.011; a ₀ =0.72; b ₀ =0.25;	C: St=k ₁ (Ja) ^{a₁} (Re) ^{b₁} k ₁ =0.32428×10 ⁻³ ; a ₁ =0.55149; b ₁ =0.75380; CO: St=k ₂ (Ja) ^{a₂} (Re) ^{b₂} (We) ^{c₂} k ₂ =0.11904×10 ⁻² ; a ₂ =1.0849; b ₂ =0.93892; c ₂ =-0.76700	St=k ₃ (Ja) ^{a₃} (Re) ^{b₃} (We) ^{c₃} (I ₀) ^{d₃} k ₃ =0.174×10 ⁻² ; a ₃ =1.093; b ₃ =0.891; c ₃ =-0.827; d ₃ =0.298	not related to condensation regime map

수에 대한 실험 상관식을 구한 연구들^{[13][14][15]}에서 관련된 물리적 인자들의 효과를 반영하려고 노력하였다. Table 2에는 각 연구결과들은 실험조건에 따라 비교하였다.

제시된 실험 조건들에도 불구하고 Fig. 2와 같은 응축 영역도와의 명시적인 연관성을 언급하고 있지 않아서 상관식의 적용에 있어서는 주의가 필요할 것으로 판단된다. 이에 대한 근거로서 위 세가지 연구들의 실험 조건이 C, CO, 그리고 SC를 포함하는 조건임에도 이에 대한 연관성을 명시하지 않거나 영역에 대한 정의가 다르게 사용되고 있는 것으로 판단되며 또한 Hong^[10]의 연구결과에 의하면 CO와 SC 사이에는 분명하게 진동수의 증가 방향이 반대인 것을 예로 들 수 있다. 이런 경향은 Damasio *et al.*^[14]의 연구에서도 두 가지 영역에서 다른 특성이 나타나고 있음을 보여주고 있다.

2-3. 증기제트 수조 혼합 현상

증기제트에 의한 응축은 운동량 및 에너지를 수조의 물에 전달하게 된다. 증기제트가 가지고 있는 속도는 물의 속도에 영향을 주고 응축 잠열은 물의 온도 분포에 기여를 하게 된다. APR1400에서와 같이 Sparger에서 분사되는 증기제트 군에 의하여 형성되는 유동 및 열전달을 해석 도구를 사용하여 실제와 같이 모의하기 위하여 먼저 단일 증기제트의 특성을 파악하고 증기제트 상호간의 간섭효과 등을 검토하고 이해할 필요가 있다.

SC 현상의 증기제트의 응축에 대한 Plume 사진^[11]에서 Plume은 Figs. 6, 7과 같은 Cone이나 Ellipsoid 형태라는 것을 확인한 바 있다. 증기제트의 Plume 형태를 이상적인 Cone 형태로 가정하면 증기제트 응축에 의한 수조내 제트유동은 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. Initial Region은 증기제트의 응축으로 물과 함께 유동이 형성되는 영역이며 Main Region은 순전히 물만의 Fully-Developed, Self-Similar 유동의 영역이다. Fig. 9에서 a는 제트유동의 가상 출발점(Pole)과 Nozzle 출구와의 거리이며 x=에서 증기 Plume이 끝난다.

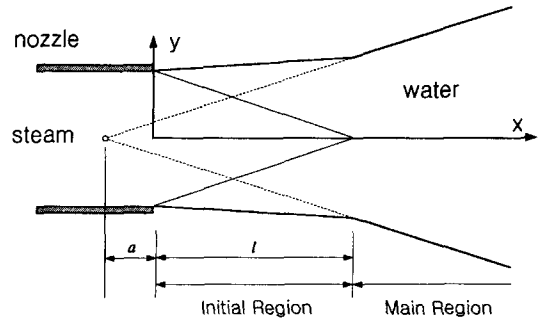


Fig. 9. Flow pattern of the steam jet flow.

강제 난류제트에 대한 Gamble *et al.*^[16]의 적용을 활용하면 Initial 영역인 $x \leq l (=l, r_0)$ 에서는

$$u_{center} = u_0 \tag{10}$$

이고

$$\frac{dr_{1/2}}{dx} = 0.013 \tag{11}$$

이다. Main 영역인 $x > l (=l, r_0)$ 에서는

$$\frac{dr_{1/2}}{dx} = 0.0848 \tag{12}$$

이다. 먼저 Initial 영역에 대하여 $r_{1/2}(x)$ 를 구하면

$$\frac{r_{1/2}(x)}{r_0} = 1 + 0.013 \frac{x}{r_0} \tag{13}$$

이 되고 $r_{1/2}(l)$ 은 Main 영역의 입구 조건이므로 이것을 활용하여 Main 영역에서의 $r_{1/2}(x)$ 를 구하면

$$\frac{r_{1/2}(x)}{r_0} = 0.0848 \left(11.792 - 0.8467l + \frac{x}{r_0} \right) \tag{14}$$

가 된다. 이와 같은 결과를 활용하여 증기제트 유동에

대하여 임의의 점에서의 속도를 나타내면

$$\frac{u(x,y)}{u_0} = \frac{C'}{(a+x)/r_0} \cdot \frac{1}{(1+\eta^2/4)^2} \quad (15)$$

where, $C=0.9996(11.792+0.1533l_r)$

$$a=(11.792-0.8467l_r)r_0$$

$$\eta=15.174\frac{y}{x}$$

이다. Turbulent 제트유동의 형태를 알면 온도 분포를 알 수 있는데 그 관계는

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_m} = \sqrt{\frac{u}{u_m}} \quad (16)$$

이다^[17]. 위 관계식들을 적용함에 있어서 Plume 끝나는 점인 $x=$ 에서의 유속 u_0 와 T_0 를 아는 것이 필요하다. 이와 관련하여 Kudo *et al.*^[18]의 해석적인 방법을 참고할 수 있다. Kudo *et al.*은 실험과 아울러 경계층 방정식을 기액경계면에 적용하여 해석적인 관계식을 도출하였다. 해석적인 관계식을 사용하여 증기속도에 대한 기액경계면에서의 유속과 온도를 계산하였으며 Nozzle 중심축 방향의 온도를 측정하여 예측치와 비교하였다. Kudo *et al.*이 구한 기액경계면의 속도의 크기를 보면 증기속도 500 m/sec인 경우 대략 30 m/sec로 예측하고 있다. Young *et al.*^[19]은 Reynold Flux 개념을 사용하여 기액경계면의 속도를 모형화하였으며 이를 열전달계수 상관식에 적용한 바 있다.

APR1400의 I-Sparger는 측면으로 내경 10 mm 구멍 144개가 9줄로 배열되는데(Fig. 1 참조) 대략적인 유동 경향을 파악하기 위하여 4줄의 구멍에서 증기가 분사되는 경우에 대하여 평가를 수행하였다. Fig. 10에는 I-

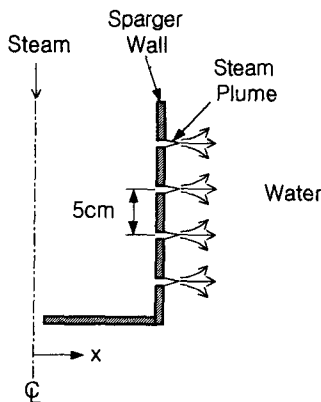


Fig. 10. Steam plume and jet flow configuration of the I-Sparger.

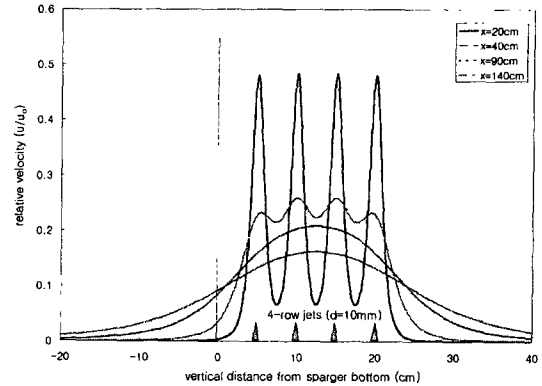


Fig. 11. Dimensionless velocity distribution of the steam jet flow in a pool.

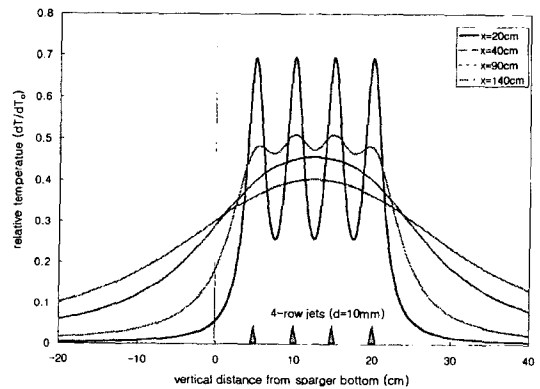


Fig. 12. Dimensionless temperature distribution of the steam jet flow in a pool.

Sparger 바닥으로부터 측면 구멍 4줄에 대한 배열을 나타낸 것으로서 각 구멍들로부터 분사된 증기 제트에 의해 형성된 Plume 모양과 제트 유동 형태를 개념적으로 나타내었다. Fig. 10과 같은 구멍 배치에 있어서 증기 제트에 의하여 형성되는 난류 제트 유동장을 식 (15)와 (16)을 사용하여 나타낼 수 있다. Figs. 11, 12에는 각 증기 제트에 의한 유동의 효과를 종합한 무차원 속도 및 온도 분포 결과를 나타내었다. Figs. 11, 12에서 보듯이 I-Sparger의 수평방향 Hole에 의한 유동은 거리 40 cm 이후에는 개별효과가 사라지고 하나의 큰 유동형태로 바뀐다는 것을 알 수 있다. 그리고 온도 분포는 관계식에서 알 수 있듯이 속도 분포보다 완만하게 변하고 있다.

3. 결 론

증기제트 응축 현상에 대하여 응축 영역도, 응축 열 전달 계수, 그리고 Plume의 특성에 대하여 검토하였으

며 응축하중과 수조 혼합 현상에 관련된 증기제트의 특성에 대하여 검토하였다. 증기제트 응축 영역도에 대한 일반적인 특성, 응축 열전달 계수에 영향을 미치는 주요 인자 검토, 분자운동이론에 의한 열전달 계수의 한계치와 물질전달 모형에 의한 열전달 계수 비교 평가, 그리고 Plume 내부 증기 거동의 열역학적 특성을 제시하였다. 응축하중에 관련하여는 하중 특성과 진동 주파수 특성에 대하여 검토하였다. 그리고 수조 혼합에 대하여는 단일 증기제트에 의한 제트 유동 특성을 검토하고 이를 증기제트의 단순 배열에 대하여 유동 및 온도 분포를 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

사용기호

- a : the ratio of the overall speed (u) to a characteristic molecular velocity or distance from jet virtual origin to end of nozzle (see Fig. 9)
- B : driving potential for condensation, $\frac{c_p(T_s - T_\infty)}{h_{fg}}$
- D : nozzle diameter
- D_e : plume diameter at external expansion
- G : steam mass flux [kg/m²-sec]
- H : nozzle submergence
- h_i : interfacial heat transfer coefficient [W/m²-°C]
- h_{fg} : latent heat of evaporation [J/kg]
- I₀ : shape factor for sparger (P/D)
- j : condensation mass flux [kg/m²-sec]
- Ja : Jacob number, $\frac{\rho_c c_p \Delta T}{\rho_s h_{fg}}$
- k : specific heat ratio
- l_r : dimensionless plume length
- M : molecular weight
- P : pitch of sparger hole
- p : absolute pressure
- p_c : characteristic pressure
- p_s : saturation pressure in steam plume
- r : plume radius at z
- R : universal gas constant or radius of curvature of the steam plume in z-y plane
- r₀ : radius of nozzle
- r_{1/2} : location of y where u=u_m/2

Re : Reynolds number, $\frac{\rho_s v d}{\mu}$

St : Stanton number, $\frac{h}{\rho_c u}$, or Strouhal number, $\frac{f D p_l}{\rho_s v}$

T : absolute temperature

T₀ : temperature at x=l, y=0

T_s : condensate surface temperature

ΔT : T-T_∞

ΔT_m : T(x, 0)-T_∞ for x>l

u : overall velocity (≡j/ρ_g) [m/sec]

u₀ : u(l, 0)

u_m : u(x, 0) for x>l

v : steam velocity

We : Weber number, $\frac{\rho_s v^2 D}{\sigma}$

x : radial distance from the nozzle or the center of the I-Sparger

η : plume shape factor

ρ_g : density of vapor [kg/m³]

σ : condensation coefficient or surface tension [N/m]

참고문헌

- Kim, Y.S. *et al.*: An Experimental Investigation of Direct Condensation of Steam Jet in Subcooled Water, J. of the Korean Nuclear Society, 29(1), 45-57 (1997).
- Cho, S. *et al.*: Experimental Study on Dynamic Pressure Pulse in Direct Contact Condensation of Steam Discharging into Subcooled Water, 1st Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, NTHAS98, Pusan, Korea (1998).
- Block, J.A.: Condensation-Driven Fluid Motions, Int. J. Multiphase Flow, 6, 113-129 (1980).
- Collier, J.G. and Thome, J.R.: "Convective Boiling and Condensation", Clarendon Press, Oxford (1994).
- Mills, A.F. and Seban, R.A.: The Condensation Coefficient of Water, Int. J. Heat Mass Transfer, 10, 1815-1827 (1967).
- Kim, Y.S. and Park, J.W.: Determination of the Steam-Water Direct Contact Condensation Heat Transfer Coefficients Using Interfacial Transport Models, National Heat Transfer Conf., Baltimore, Maryland U.S.A., HTC-Vol. 10, 110-117 (1997).
- Fukuda, S. and Saitoh, S.: Pressure Variation due to Vapor Condensation in Liquid, (I) Classification of Phenomena and Study on Chugging, Journal of Japanese Nuclear Society, (in Japanese), 25(5), 372-

- 380 (1982).
8. Weimer, J.C. *et al.*: Penetration of Vapor Jets Submerged in Subcooled Liquids, *AIChE Journal*, 19(3), 552-558 (1973).
 9. Tin, G.D. *et al.*: Experimental Study on Steam Jet Condensation in Subcooled Water Pool, *Proc. of the 3rd Multi-phase Flow and Heat Transfer Symposium-Workshop*, Miami Beach, FL, U.S.A (1983).
 10. Hong, S.J.: "Dynamic Characteristics of Steam Jet Condensation in Sparger", Seoul National University Ph.D Thesis (2001).
 11. Fukuda, S.: Pressure Variation due to Vapor Condensation in Liquid, (II) Phenomena at Large Vapor Mass Flow Flux, *Journal of Japanese Nuclear Society*, (in Japanese), 24(6), 466-474 (1982).
 12. Arinobu, M.: Studies on the Dynamic Phenomena Caused by Steam Condensation in Water, *Proc. ANS-ASME-NRC Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Saratoga Springs, New York, Vol. 1, 293-302 (1980).
 13. Simpson, M.E. and Chan, C.K.: Hydraulics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid, *ASME J. of Heat Transfer*, 104, 271-278 (1982).
 14. Damasio, C. *et al.*: Experimental Study on the Unstable Direct Contact Condensation Regimes, *Proc. of 3rd Int. Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics*, Newport, RI, U.S.A., 6.C-1-6.C-8 (1985).
 15. Cho, S. *et al.*: Multiple-Hole Effect on the Performance on a Sparger during Direct Contact Condensation of Steam, *KSME Int. Journal*, 15(4), 482-491 (2001).
 16. Gamble, R.E. *et al.*: Pressure Suppression Pool Mixing in Passive Advanced BWR Plants, *Nuclear Engineering and Design*, 204, 321-336 (2001).
 17. Abramovich, G.N.: "The Theory of Turbulent Jets", The MIT Press, MA (1963).
 18. Kudo, A. *et al.*: Basic Study on Vapor Suppression, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, Tokyo, Vol. 3 (1974).
 19. Young, R.J. *et al.*: Vapor-Liquid Interaction in a High Velocity Vapor Jet Condensation in a Coaxial Water Flow, *Proc. of 5th International Heat Transfer Conf.*, Tokyo, Vol. 3 (1974).