

감마선을 이용한 汽泡率測定에 관한 研究

南 平 祐*

< A study on the measurement of void fraction using gamma ray >

Pyong Woo Nam

概 要

파이프의 斷面을 透過한 放射線의 物理的 特性을 利用하여 파이프內를 通過하는 飽和蒸氣와 和水的 混合流에서의 汽泡率 測定을 理論的으로 展開하여 電子計算機로 解를 求하고 이를 模으로서 實驗에 依하여 立證하였다.

Abstract

Using the physical characteristics of nuclear radiation penetrated into the cross section of pipe, the measurement of void fraction in saturated vapor & water passing through the pipe is analyzed theoretically and the solutions are achieved by means of computer simulation.

These theoretical results are also approved through the experiment with the simulators.

序 論

原子爐시스템에서 冷却材와 液體 減速材에서 汽泡가 中性子 增倍와 原子爐 制御 및 安定에 深刻한 影響을 준다는 重要事實로부터 汽泡⁽¹⁾에 對한 研究가 具體化되기 시작했다.

一般的으로 原子爐에서 沸騰爐心冷却材의 密度와 原子爐 動特性, 시스템 流體力學 사이에는 密接한 關係를 갖으며 自然循環하는 二相 시스템에서 流體力學特性은 一次的으로 二相領域에서 進行하는 蒸氣의 體積率에 依해 決定된다.

이러한 分數를 汽泡(가스)率이라 하며 氣體-液體二相흐름인 境遇 파이프채널에 對한 가스相의 比를 定義²⁾된다. 이 값은 壓力損失 計算에서 重要 및 加速成分을 決定하며 吸收相(absorption phase, 물)의 量이 中性子 經濟에 相當한 影響을 주기 때문에 原子爐시스템의 運轉狀能을 評

價하는데 重要하다. 또한 原子爐 內에서의 核計算에도 重要한 要素가 된다. 汽泡率을 測定하는 方法⁶⁾으로는 γ 線減衰, conductance 와 capacitance 測定法, 急激쇄발브를 利用한 直接的인 測定 및 光學法 등이 있는데 이중에서 가장 널리 使用되는 技術이 二相흐름에서의 γ 線의 吸收差異를 測定하는 것이다.

即, γ 線이나 X 線은 密度가 높은 相(phase)에서 吸收率에 높으며 이러한 吸收率은 物質의 두께와 密度에 指數 函數의인 關係를 갖는다.

γ 線을 利用한 測定方法은 流動媒體와 機械的인 相互作用이 없기 때문에 測定上의 誤差나 不確實性의 發生源을 減少시킬 수 있다는 利點을 갖는다.

γ 線을 利用한 汽泡率 測定은 1958年 Hooker Popoer 에 依해 180%의 誤差가 나타났다고 報告가 된 以後 測定の 正確度를 增進시키기 위해 같은해 perick 과 Swanson 은 채널의 全體幅을 Scan 하도록 만들어진 시준된(collimate) 좁은

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

γ 線法를 사용하여 5 ~ 20 %의 正確度를 갖는다고 報告했다.

그後 γ 線의 scan 을 應用하는 技術은 Karian (1964), Statub 와 Walmet (1969) 등에 依해 研究가 됐으며 1970年 Nylund 등은 燃料集合體에서의 汽泡率 測定에 γ 線을 應用하는 研究을 했다. 그러나 그의 精密性은 言及이 없었다.

이 時點에서 本 論文에서는 一次로 computer simulation 을 通해 理論的으로 展開된 汽泡率의 解를 求하였으며 이러한 理論值를 實驗的方法과 比較하여 大端히 正確함을 立證 하였다. 實驗的方法으로는 시준된 γ 線 one-shot 測定方法을 使用했다.

즉 여러 汽泡形能를 파이프로 模型을 만들어 γ 線이 透過할 때 減衰되는 狀能를 幾何的으로 配置된 3곳에서 scintillation 計數管으로 計測하여 그 값에 따라 波高分析器로 分析하므로써 汽泡의 存在와 크기 및 位置 등을 測定可能케 한 것이다. 여기서 使用된 裝備는 4 curie 의 ^{60}Co 線源, Scintillation Conter, Single Channel Analyzer 그리고 Oscilloscope 등이다.

II. 本 論

1. 原 理

放射線源에서 放出되는 γ 線 I_i 는 媒質을 透過하여 指數 函數的으로 減衰되어

$$I_o = I_i e^{-\mu \ell} \dots \dots \dots (1)$$

로 나타낸다.

이때 μ 는 媒質의 性質에 따라 決定되는 線型 吸收係數이며 ℓ 은 線源과 檢出器間의 거리이다.

이 原理에 依해 파이프 內에 飽和蒸氣와 飽和 水의 存在를 찾고자 그림 1 과 같이 幾何學的으로 放射線源과 파이프 그리고 檢出器를 配置하였다. 그림 1 에서 檢出器窓의 線源에 對한 角度는 各 各 θ_1, θ_2 가 되며

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y' d}{x' d} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y'' d}{x'' d} \right)$$

로 計算된다.

그림 2에서 I_i 는 p_i 에 位置한 線源強度이며 ℓ 은 線源과 檢出器間 距離이고 μ 는 線 吸收係數이다. 또 I_o 는 p_o 點에서 檢出되는 線源強度이다. 이때 p_o 에서의 放射線計測값은 式에서 變形 되어

$$I_o = I_i \frac{dA}{4\pi \ell^2} e^{-\int_{p_i}^{p_o} \mu d\ell} \dots \dots \dots (2)$$

와 같이 된다. 여기에서 dA 는 檢出器의 面積素이다. 萬一 線源의 크기가 充分히 적다고 假定하여 點線源으로 생각하면 檢出器의 總出力 E 는 式(2)를 檢出器의 總面積에 대하여 積分하므로써

$$E = K \iint_A dA \frac{e^{-\int \mu d\ell}}{4\pi \ell^2} \dots \dots \dots (3)$$

로 表示된다.

여기에서 A 는 檢出器의 面積, K 는 線源強度와 檢出器의 效率를 補正하는 常數이다. 式(3)를 積分하기 위해서는 函數 $-\int \mu d\ell$ 을 決定하여야 한다.

函數 $-\int \mu d\ell$ 은 i 번째 媒質(金屬파이프, 파이프 內의 液體 또는 파이프 內의 가스)의 線型吸收係數를 μ_i 라 할 때 $\mu_i I_i$ 의 形能의 合計로 볼 수 있다. 그림 1 에서 檢出器의 角度 θ_1 과 θ_2 사이의 任意의 角度 θ 를 가진 放射線에 對하여, 放射線이 透過해야 할 金屬파이프의 두께 ℓ_m 은 파이프 中心으로부터 放射線까지 이르는 垂直距離를 S 라 하면

$$\ell_m = 2(\sqrt{R_2^2 - S^2} - \sqrt{R_1^2 - S^2}) \dots \dots \dots (4)$$

으로 나타낸다.

이때의 S 는 다음 關係로부터 計算된다. 즉,

$$S = |R_2 \cos \theta - Xp \sin \theta| \dots \dots \dots (5)$$

이때 取하는 絶對값은 θ 가 2象限에 있을 때 $\cos \theta$ 가 負의 값을 갖게 되어 S 값이 (-) 값이 되기 때문이다.

다음으로 液體와 氣泡를 通過하는 길이는 파이프 內의 汽泡分布와 關聯되어 있으며 이는 그림 2와 3과 같은 形態로 分布된다고 假定 할 수 있다.

一般的으로는 그림 2와 3과 같이 放射線의 通過進路와 汽泡의 位置는 一定하지는 않으며

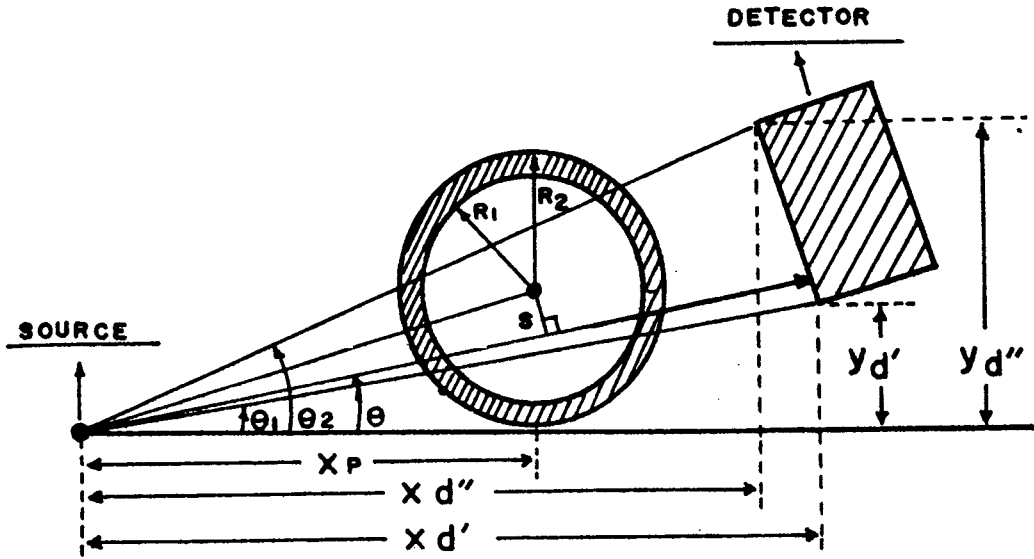


그림 1. 線源, 파이프 그리고 檢出器의 配置

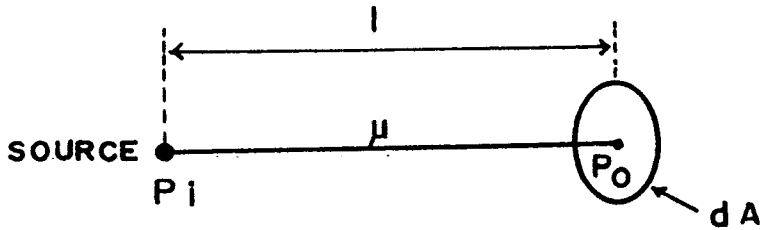


그림 2. 點線源과 檢出器窓斷面積

對的인 位置는 境遇에 따라 다르게 된다.

이러한 點을 考慮하여, 放射線源, 파이프, 汽泡, 檢出器 등의 相對的 位置를 決定 하는데에는 다음 그림 3 과 같이 假定할 수 있다.

즉, 그림 3 에서 볼 수 있는 바와 같이 汽泡는 파이프 中心과 汽泡 中心을 잇는 線의 角度가 β 가 되는 位置에 있다고 본 것이다. 그리고 다른 條件은 前件은 前述한 그림 2 와 3 과 同一하다. 이때 汽泡 中心과 放射線 進路와의 垂直距離 S_1 은 파이프 中心과 基準線과 이루는 角度 θ_p 에 따라 다음과 같이 計算된다. 즉,

$$S_1 = \begin{cases} 1S + da \sin(\beta - \theta) & ; \theta_p \geq \theta \\ 1S - da \sin(\beta - \theta) & ; \theta_p < \theta \end{cases} \quad (6)$$

여기서 da 는 汽泡의 中心과 파이프의 中心間 거리이다. 이때 放射線의 液體透過距離를 ℓ_L 이라 하면

$$\ell_L = Q_4 + Q_5 \quad \dots\dots\dots (7)$$

가 되며 이들 Q_4 와 Q_5 는 다음과 같이 計算된다. 즉,

$$\begin{aligned} Q_4 &= \sqrt{R_2^2 - S^2} - \sqrt{R_3^2 - S_1^2} + da \cos(\beta - \theta) \\ Q_5 &= \sqrt{R_2^2 - S^2} - \sqrt{R_3^2 - S_1^2} - da \cos(\beta - \theta) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

이때 Q_4 나 Q_5 의 값이 負이면 ℓ_L 의 計算에서 除外시켜야 한다. 그 이유는 그림 2 와 3 에서 明白해진다.

끝으로 汽泡를 通過하는 길이 ℓ_G 는

$$\ell_G = 2 \sqrt{R_2^2 - S^2} - \ell_L \quad \dots\dots\dots (9)$$

로 計算이 可能하다.

以上과 같이 放射線이 透過하는 媒質의 長이를 알면 $-\mu d\ell$ 의 값은

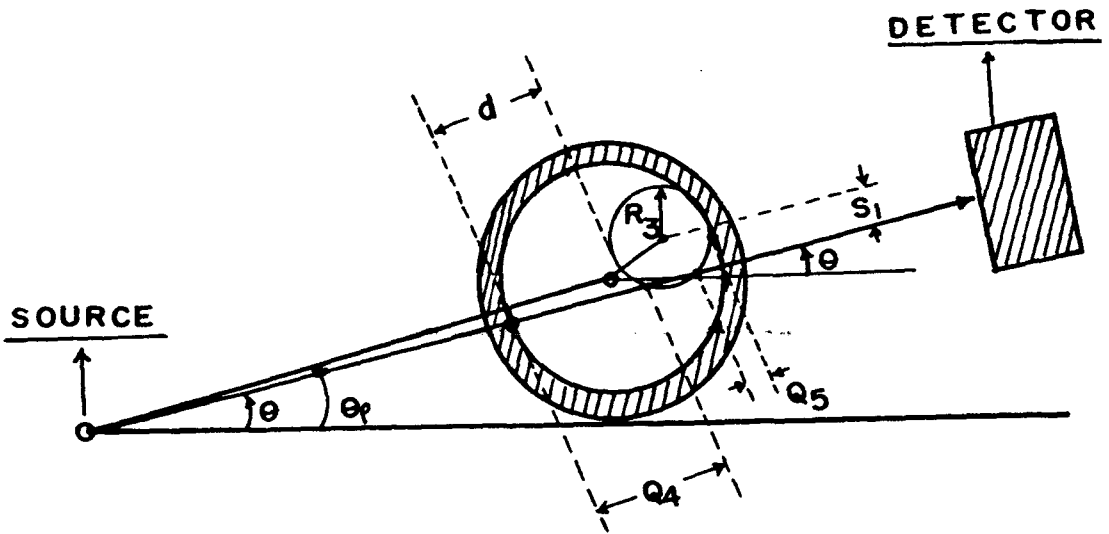


그림 3. 파이프內的 汽泡測定用幾何的 構成

$$- \int \mu dl = \sum \mu_i l_i \dots\dots\dots (10)$$

에 따라 即時 計算된다.

實驗的으로는 放射線源과 檢出器까지의 距離에서 總媒質透過 長이를 除外하면 空氣透過 長이가 얻어지므로 式 10을 計算할 때 利用하고 있다.

이상과 같이 $-\int \mu dl$ 이 定해지면 式(3)을 數值積分을 할 수 있다.

가 되며 여기서 X는

$$X = R_{GM} - l_{GM} (\theta - \theta_1) \dots\dots\dots (12)$$

이다. 따라서 式 11로부터 式 13은 다음과 같아 된다.

即,

$$E = K \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{e^{-\sum \mu_i l_i}}{2\pi l_{GM}} d\theta \dots\dots\dots (13)$$

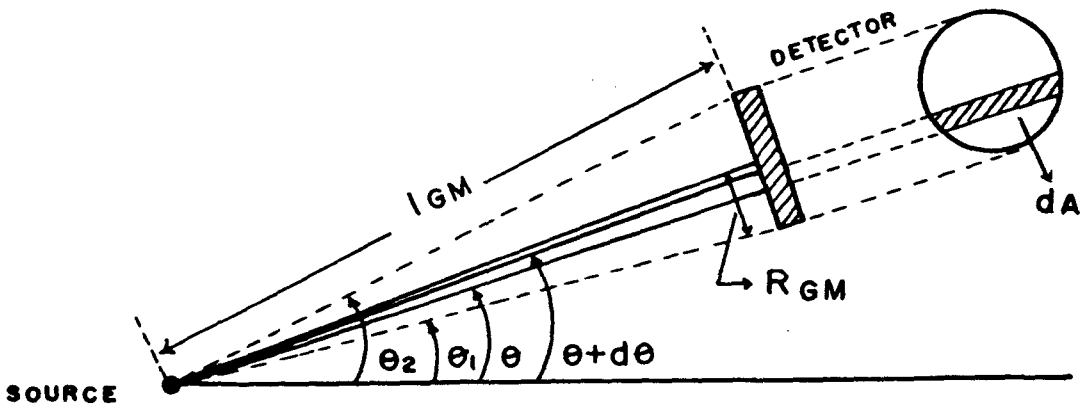


그림 4. 檢出器窓의 斷面積

그림 4에서 面積要素 d_A 는

$$d_A = 2 l_{GM} \sqrt{R_{GM}^2 - X^2} d\theta \dots\dots\dots (11)$$

式 13은 一般的인 數值積分法으로 計算이

能하다. 內 E는 檢出器의 出力을 rate met

測定했을 때는 起電圧을, 計數器를 이용했을
計數量으로서 換算된다.

끝으로 汽泡率 ($\alpha = \frac{\text{氣體體積}}{\text{液體體積}}$)은 아래와

이 stratified flow 境遇와 annular flow 境遇
對해 各各 求해질 수 있다.

으로 정의되어지며

斜線值面積(S_A)은 그림 5-B에서 다음과 같이
求하여진다.

$$S_{A1} = 2 \left(\pi R_2^2 \cdot \frac{p_2}{2\pi} - \frac{1}{2} r_2 \sqrt{R_2^2 - r_2^2} \right)$$

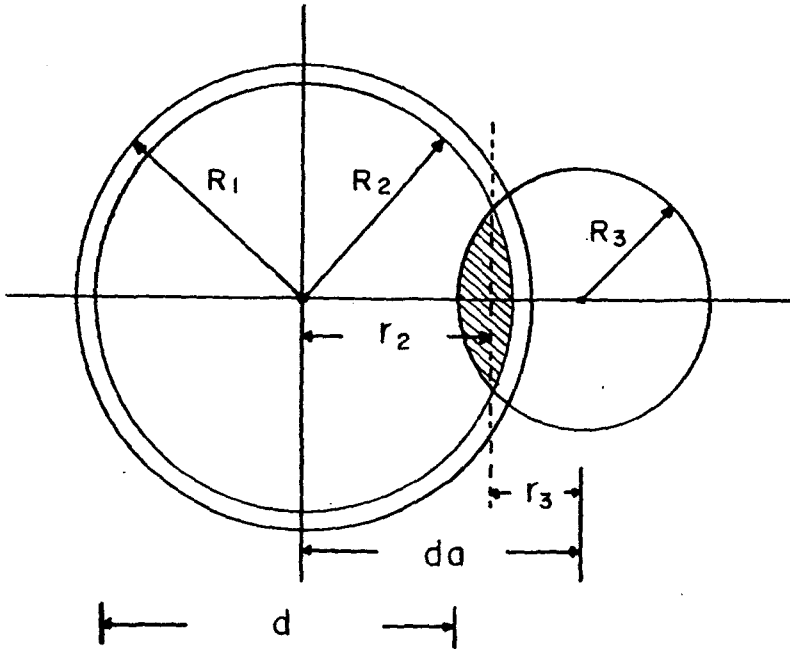
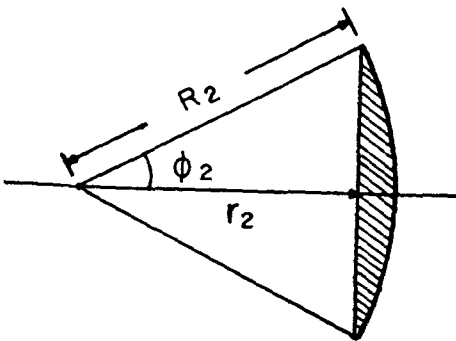


그림 5-A 파이프內的 汽泡面積

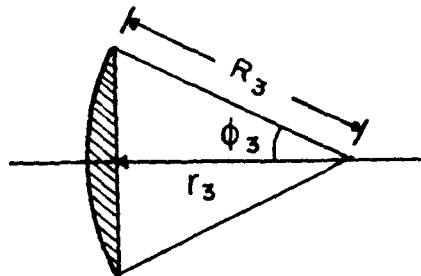
이 境遇의 汽泡率을 α 라 할때

$$\alpha = \frac{\text{斜線值面積}}{\pi R_2^2}$$

$$= R_2^2 \cos^{-1} \frac{r_2}{R_2} - r_2 R_2 \sqrt{r \left(\frac{r_2}{R_2} \right)^2}$$



(a) 面積 S_{A1} 의 경우



(b) 面積 S_{A2} 의 경우

그림 5-B 파이프內的 汽泡面積

$$S_{A2} = 2(\pi R_3^2 \cdot \frac{\rho_3}{2\pi} - \frac{1}{2} r_2 \sqrt{R_3^2 - r_2^2})$$

$$= R_3^2 \cos^{-1} \frac{r_2}{R_3} - r_2 R_3 \sqrt{1 - (\frac{r_2}{R_3})^2}$$

故로 $\alpha = \frac{1}{\pi} [\cos^{-1}(\frac{r_2}{R_2}) - \frac{r_2}{R_2} \sqrt{1 - (\frac{r_2}{R_2})^2}]$
 $+ \frac{R_3^2}{\pi R_2^2} [\cos^{-1}(\frac{r_3}{R_3}) - \frac{r_3}{R_3} \sqrt{1 - (\frac{r_3}{R_3})^2}]$
 (14 - a)

윗 式에서

$$d_a = d + R_3 - R_2$$

$$r_3 = d_a - r_2$$

$$r_2 = \frac{R_2^2 - R_3^2 + d_a^2}{2d_a}$$

② simple annular flow 혹은 offset annular flow 인 境遇

윗 境遇의 汽泡率은 아래와 같이 쉽게 求해
 다. 即,

$$\alpha = \frac{\pi R_3^2}{\pi R_2^2} = \frac{R_3^2}{R_2^2} \dots\dots\dots (14 - b)$$

이 된다.

따라서 汽泡가 있을 때 파이프 内の 平均密度는

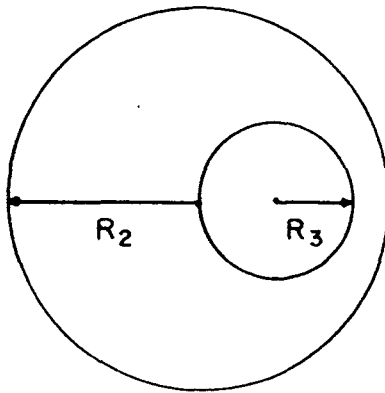
$$\rho = \alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_l \dots\dots\dots (15)$$

로서 計算된다.

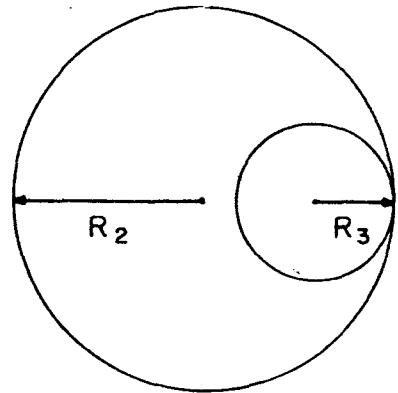
여기서 ρ_G 는 汽泡의 平均密度이며 ρ_l 은 液體의 平均密度이다.

지금까지는 汽泡中의 狀態를 理想的인 均一한 空氣로 보았다. 그러나 實際에 있어서는 微小한 汽泡들이 모여서 큰 汽泡가 發生되므로 出力電壓의 計算値는 實際의 測定電壓과 달라지게 되므로 이를 보완하여야 한다. 이러한 關係로 汽泡率의 α_f 를 도입하였다.

여기서 α_f 는 다음과 같이 正義할 수 있다.



(a) simple annular flow 의 경우



(b) offset annular flow 의 경우

그림 5-C 파이프內的 汽泡面積

$$\alpha_f = \frac{\text{汽泡內의 微小한 } \gamma\text{泡의 크기} \times \text{微小}\gamma\text{泡의 數}}{\text{汽泡의 크기}}$$

1) 1포가 完全히 비어있을 境遇는 $\alpha_f = 1$ 과 같

2. 計算方法

以上에서 檢討된 바와 같이 放射線源, 파이프 檢出器의 相對的 位置가 決定되고 각 媒質의 物理的 性質과 汽泡의 크기와 相對的 位置가 決定되었다면 式 13은 다음과 같이 計算된다.

1) 式 4로부터 파이프 金屬의 透過길이가 計算된다.

2) R_3 , α_f 및 d 의 값이 주어진 範圍內에서 求되며, 式 4, 式 6, 式 8 및 式 9로부터 l_L 과가 計算된다. 또한 空氣透過길이 l_{air} 는

$$l_{air} = l_{cm} - (l_m + l_L + l_G) \dots \dots \dots (16)$$

依하여 計算된다.

3) 適切한 各 媒質의 減衰常數를 利用하므로서 $-\mu d l$ 이 式 10에 依하여 計算된다. 汽泡 透過係數는 주어진 汽泡率 α_f 에 依하여 $\mu_f = \mu_{air} + (1 - \alpha_f) \mu_l$ 와 같이 計算되며 이 값 汽泡透過係數로 利用한다. 단 α_f 가 1인 경우 μ_f 는 μ_{air} 와 같이 취급된다.

4) 檢出器의 起電用은 式 13에 依하여 積分하는데 이때의 값은 파이프가 비어있을 때의 起電으로 正規化시키게 된다.

5) 그림 6에서와 같이 實際檢出器는 實驗에 3개 利用되므로 주어진 資料에 對하여 V_1, V_2, V_3 를 計算하게 된다. 여기에서 V_1, V_2, V_3 各 檢出器의 起電壓을 正規化시킨 것으로 實際 實驗에서 計數器를 利用하므로 計數量과 相應하는 값으로 볼 수 있다. 프로그램은 以上의 (1)로부터 (5)에 이르는 計算을 R_3, α_f 및 d 가 이르는 各各의 값에 對하여 計算하도록 되어있다. 式 14에 依하여 計算된 α 와 式 15로써 計算된 ρ 값 및 V_1, V_2, V_3 를 各各의 α_f, R_3 및 d 에 따라 計算한 값으로 形成된다.

3. 實 驗

1980年 3月

前項에서 記述한 原理와 計算方法에 따라 scintillation 檢出器를 시준시킨 것과 Co^{60} γ 선 4 curis 되는 線源을 시준시킨 것과 그리고 출력기에 Single channel analyzer를 사용한 實驗裝置를 그림 6과 같이 構成하였다. 즉 γ 선 energy의 基準을 定하기 위하여 ^{60}Co 에 의한 에너지 spectrum을 그림 7과 같이 求하고 photoelectric effect에 나타나는 energy 1.17 Mev에 該當하는 channel의 값을 설정하였다.

實際 파이프 內에 흐르는 流體가 氣體와 液體의 흐름인 境遇 파이프 內을 通過하는 飽和蒸氣를 空氣로 假想하고 飽和水를 lucite로 假想하였다. 便利上 이때 使用되는 파이프는 그림 8-a와 같이 3" schedule 80 파이프로서 外徑이 89.1 mm 內徑이 73.9 mm이다.

그림 8-b는 파이프內에 全部 飽和水로 차있을 경우를 나타낸 것이다. 그림 8-c는 파이프 內에 흐르는 流體가 한쪽에 半径 1.5 cm의 飽和蒸氣가 발생하였을 경우이다. 또한 그림 8-d는 半径 1.8 cm의 飽和蒸氣가 파이프벽에 반월형태로 結着있을 境遇이다.



그림 8-a 3" schedule 80 파이프

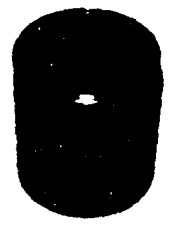


그림 8-b 파이프內에 全部 飽和水(lucite)로 차있을 境遇

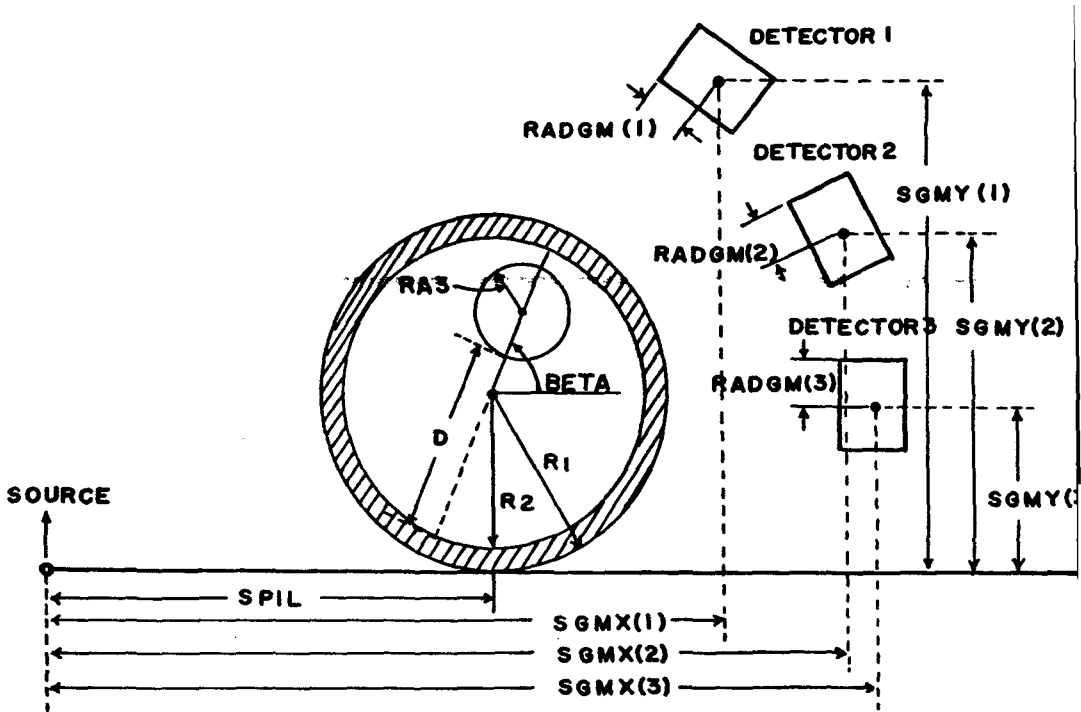


그림 6. 파이프管内汽泡率測定을 爲한 檢出器의 配置

파이프内に 흐르는 流體속에 飽和蒸氣와 飽和水의 區分을 위하여 그림 9 과 같이 實驗施設을 設置하였다. 이때 使用한 γ 線源은 4 curie 의 ^{60}Co 이다. 이것을 完全히 遮蔽시켜놓고 線源으로부터 2.2 cm 만큼 시준시켜 놓고 한쪽 方向으로 放射되도록 窓을 만들어 놓았다. 이 窓으로부터 4.2 cm 되는 位置에다 測定하고자 하는 파이프 管을 놓고 그 管 바로 옆에 scintillation 檢出器를 놓았다.

勿論 檢出器는 3 가지 位置인 SGM Y (1), SGM Y (2), SGM Y (3) 으로 移動시킬 수 있게 하였다.

먼저 汽泡를 檢出하기 前에 檢出器 位置를 SGM Y (1), SGM Y (2), SGM Y (3), 중 SGM Y (2) 의 자리로 놓고 파이프 管이 비어있을 境遇 (그림 8-a 參照) 에 나타난 計數值를 測定하였다. 이때 平均計數值는 35,533 cpm 이다. 다음과 같은 位置에서 完全히 차있을 境遇 (그림 8-b 參

照) 을 測定하였다. 이때 平均計數值는 245 cpm 이다. 파이프 管内에 飽和水 속 한쪽에 飽和蒸氣가 發生했을 境遇 (그림 8-c 參照) 의 測定 平均計數值는 ① 27,702 cpm ② 27,276 cpm 26,384 cpm 이며 또 汽泡가 B 模型으로 되어 다고 할 때 즉, 파이프 管内에 飽和水 속 한쪽 飽和蒸氣의 一部가 發生했을 境遇 (그림 8-d 參照) 의 測定值는 平均計數值가 ① 27,617 cpm 26,620 cpm ③ 27,225 cpm 으로 나타났다.

이와같이 얻은 값들을 正規化시키면 표 같다.

以上에서 얻은 實驗값을 立證하기 위하여 衰係數³⁾를 空氣의 境遇 :

$$0.0577 \times 0.0014 \frac{\mu_r}{\text{cm}} (\text{밀도}) = 0.0008 (\mu_r)$$

$$\text{철의 경우} = 0.0542 \times 7.87 \frac{\mu_r}{\text{cm}} (\text{밀도})$$

$$= 0.427 (\mu_{Fe})$$

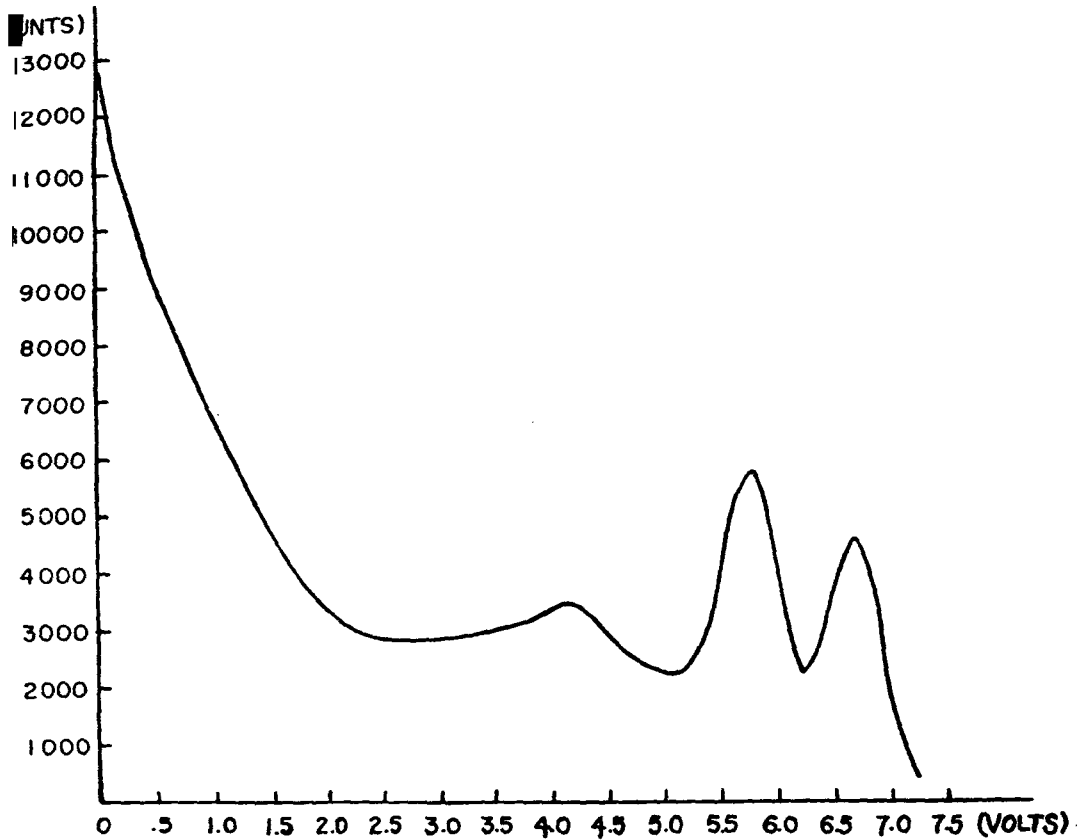


그림 7. Co⁶⁰ γ 선의 Energy Spectrum

表 1. 正規化한 計算值 및 實驗值의 比較

模型	角度BETA	檢出器	計 算 值			實 驗 值		
A	15°	D ₁	V ₁	0.670	1.00	V ₁	0.769	1.00
		D ₂	V ₂	0.678	1.01	V ₂	0.781	1.02
		D ₃	V ₃	0.662	0.99	V ₃	0.744	0.97
B	20°	D ₁	V ₁	0.656	1.00	V ₁	0.751	1.00
		D ₂	V ₂	0.661	1.01	V ₂	0.778	1.04
		D ₃	V ₃	0.657	1.00	V ₃	0.768	1.02

Lucite 의 경우 = $0.0624 \times 1 \frac{gr}{cm^2}$ (밀도)
 = $0.0624 (\mu_1 \text{ quad})$

여 實驗한 A 模型과 B 模型의 條件을 減衰係數와 함께 電子計算機 入力資料로 取하여 計算하여 보았다. 이때 나타난 값이 表 1 과 같다. 이 값도 比較하였을때 거의 一致하였다. 따라서 實驗로 取하고 理論的으로 풀이한 값을 프로그램 하

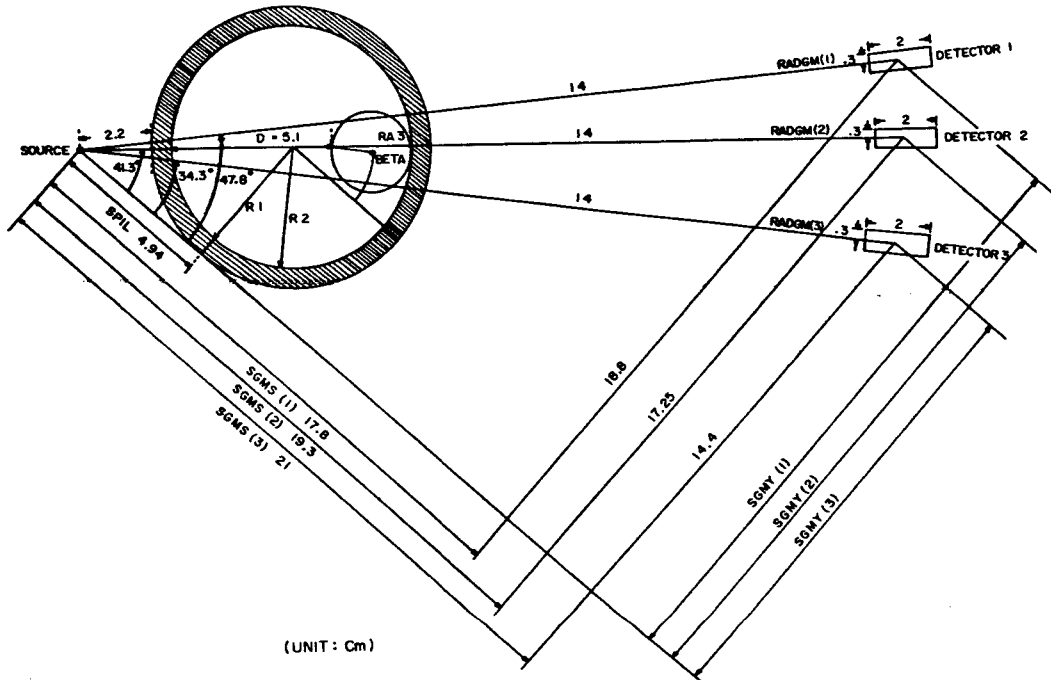


그림 8 - c 파이프내에 1.5 cm 飽和蒸氣가 發生한 境過

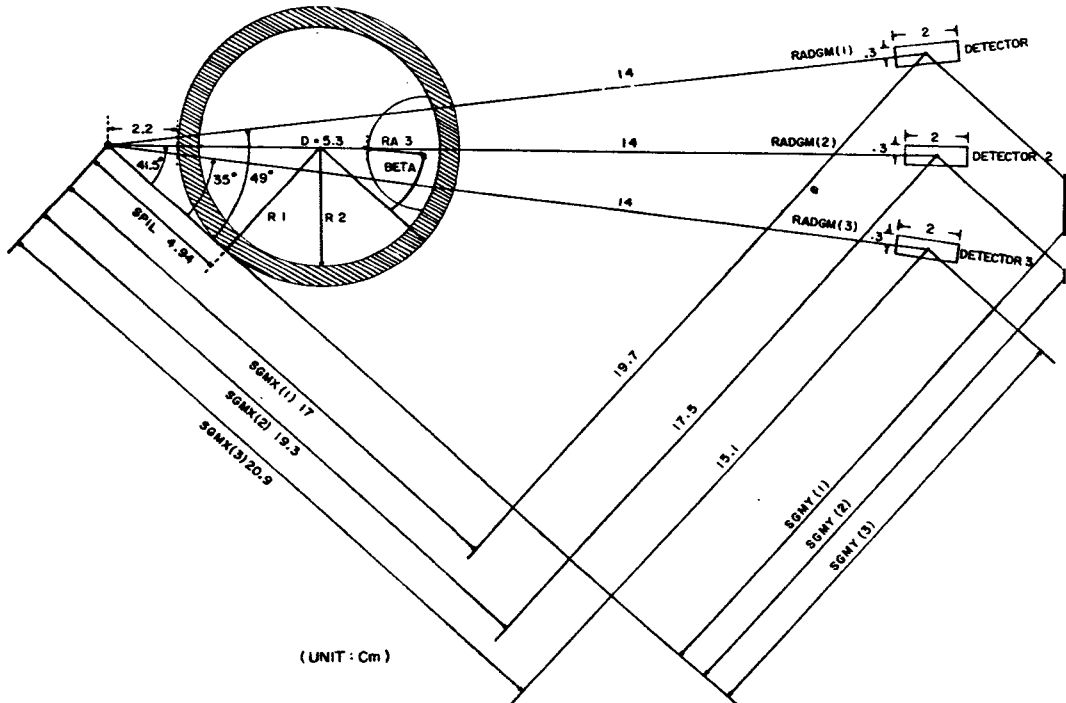


그림 8 - d 파이프내에 1.8 cm 飽和蒸氣가 發生한 境過

값을 알게되면 逆으로 電子計算機의 프로그램에 依해 計算한 후 氣泡의 크기 그리고 氣泡의 位置등을 찾아낼 수 있는 것이다.

Ⅲ. 結 論

原子爐内の 核計算에 重要な 要素가 되는 一次 loop 의 二相流體存在率을 在來式 γ 과 다른 放射線同位元素인 γ 線을 使用하여 求하는 方法을 計算 및 實驗을 通하여 立證하였다. 飽和蒸氣를 空氣로 假想하고 飽和水를 lucite 로 하였을 때의 二相混合流의 模型에 依한 實驗에서 汽泡率을 求하기 爲해 Point source 인 γ 線源과 파이프 및 檢出器를 幾何學的으로 配置하고 이를 理論에 依해 實驗의 값 즉 檢出電圧 E를 誘導한 後 Single channel analyzer의 係數率값

으로 代置하여 汽泡率, 氣泡의 크기 그리고 氣泡의 位置등을 求하였다. 이때 實驗值가 檢出器 位置에 따라 A 模型인 境遇 ① 1.00 ② 1.02 ③ 0.97 의 比로 나타났다. 電子計算機의 값인 計算值는 ① 1.00 ② 1.01 ③ 0.99 이므로 汽泡率 $\alpha = 1.0$ 크기 $R_3 = 1.2$ cm이고 位置 $D = 5.0$ cm 決定에 滿足을 주었으며 또 β 模型의 境遇 實驗值 ① 1.00 ② 1.04 ③ 1.02 일때 計算值가 ① 1.00 ② 1.01 ③ 1.00 로서 滿足, 이때에 汽泡率 $\alpha = 1.0$ 크기 $R_3 = 1.8$ cm 그리고 位置 $D = 5.3$ cm 決定에 滿足을 주었다.

따라서 이 方法으로 파이프內에 二相流體存在率에 依存하는 蒸氣의 檢出率을 決定하는 汽泡率은 이 實驗에서 實際 利用할 수 있는 正確한 測定 可能함을 立證시켰다.

參 考 文 獻

- (1) 고병준, 김창효역 原子爐의 動特性과 制御 1974. 光文社, p. 141
- (2) L.S. Tong, Joel Weisman, American Nuclear Society p.125 Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors
- (3) "Radiological Health Hand Book" 1970 U.S. Department of Education and Welfare Public Health Service
- (4) William J. Price "Nuclear Radiation Detection" McGraw Hill, N. Y., 1958. pp. 21
- (5) Rockwell, T., "Reactor Shielding Design Manual" Van Nostrand. N. Y. 1956.
- (6) G. F. Hewitt, P. C. Lovegrove, "Experimental Methods in the Two-phase Flow Studies" EPRT NP-118. 1976
- (7) Jean J. Ginoux, "Two phase flows and Heat transfer" 1978. pp. 334.