

〈論 文〉

表面温排水 數值模型 : 제트積分모델의 比較評價

Numerical Models for the Surface Discharge of Heated Water:
Comparative Evaluation of Jet Integral Models

崔 興 植* 李 吉 成**
Choi, Hung Sik Lee, Kil Seong

Abstract

The qualitative and quantitative prediction for the dispersion of thermal discharge from nuclear / fossil power plant, steel works etc. has significant roles for the cooling system design and environmental management.

In this study, the several important physical properties for the behavior of a thermal discharge with strong turbulent and buoyant effects are described. The comparative evaluation between MIT and PDS models is carried out, which have the different model structures.

In general, MIT and PDS models are commonly used to calculate the thermal discharge behavior with considering the ambient current and the angle of jet in an unstratified water body. The simulated results by these models have great discrepancies due to the different assumptions in modeling.

요 약

原子力·火力, 製鐵所 등의 臨海工業施設로부터 温水 放出의 擴散에 대한 定性, 定量的 豫測은 環境管理 및 冷却水 取·排水口 設計에 매우 중요하다. 본 연구는 亂流 및 浮力效果가 강한 温排水의 주요 物理的 特性을 규명하고 실무에 많이 사용되고 있는 MIT 및 PDS 積分모델의 比較評價를 실시하였다.

일반적으로 MIT 및 PDS 모델은 成層化되지 않은 水域에서 周圍水 및 제트 放出角度를 고려하여 温排水 舉動을 산정하는 모델이다. 解析結果는 그 構成의 相異性에 의해 매우 다름이 규명되어, 温排水의 正確한 算定을 위해서는 亂流모델을 이용한 數值모델의 開發 및 이의 適用이 要求된다.

* 農漁村振興公社 農漁村研究院(Ph.D.)

** 서울大學校 工科大學 副教授(Ph.D.)

1. 序 論

原子力·火力發電所, 製鐵所 등 각종의 臨海工業施設로부터 溫水의 放出은 海岸 또는 灣內의 전반적인 水中溫度의 上昇과 稼動中斷시 水温下降으로 海洋生態界에 많은 피해를 주게된다. 또한 溫排水 再循環은 發電 效率 및 機械稼動率을 저하시킨다(한진, 1984). 이러한 측면에서 온배수 擴散에 대한 定量, 定性的인 豫測은 環境影響 評價, 取·排水口의 設計 등에 매우 중요한 문제라 하겠다.

溫水의 放出과 環境問題는 1960년대에서 1970년 전반에 이르기까지는 ‘熱汚染’(Thermal Pollution)이란 측면에서 엄격한 環境管理基準이 마련되고 광범위한 연구가 수행되었다. 이러한 연구결과 熱汚染이 1970년대 후반부터 ‘熱影響’(Thermal Effect)의 概念으로 바뀌면서 미국 및 일본 등에서는 온배수에 대한 利用方案까지 강구하게 되었다(한진 등, 1981).

우리나라에서도 1980년대 初般부터 溫水放出이 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되기 시작하여 數值모델 研究와 더불어 水理模型實驗研究 및 生態界의 調查 등이 부분적으로 시도되고 있으며(포철, 1983; 정, 1984; 해양연구소, 1984; 강등, 1986; 윤 등, 1988), 또한 온배수를 이용한 養殖業이 進行되고 있는 실정이다(東亞日報, '89.2). 따라서 本 研究는 실무에 가장 많이 사용하고 있는 제트積分모델인 MIT모델(Stolzenbach 등, 1972) 및 PDS모델(Shirazi 등, 1974)의 構造的 特性과 그에 따른 모델의 特性을 分析코져 함이다.

2. 溫排水의 特性

2.1 溫排水의 影響

溫水放出에 따른 海水의 水温變化는 海水의 密度, 粘性, 蒸氣壓, 表面張力 및 氣體溶解度 등 海水의 物理的 特性을 變化시킨다. 間接적인 影響

으로는 水温의 增加에 따른 化學的 溶解度와 生化學的 反應率의 增加로 인하여 生態界에 影響을 주게된다.

원자력 및 火力발전소 등에서 熱效率은 30~40%밖에 되지 못하므로 熱損失量의 대부분이 冷却水에 함유되어 배출된다. 철강업, 원자력 및 火力발전소에서 나오는 冷却水는 상당히 많으며 원자력발전소의 경우 電力 100만 KW 당 70~80톤/초 정도로 이는 中小 河川流量과 같은 排水量이며, 周圍環境의 海水溫度보다 약 4~10℃ 정도나 높은 溫排水이다. 이같은 溫水의 放出이 環境에 나쁜 影響을 미쳤을 경우 熱汚染이라 하고, 만약 플러스효과를 가져왔을 때는 Thermal Enrichment, 그 影響이 명백치 않음시는 熱影響이라 부른다(해양경찰대, 1987).

2.2 溫水 放出方式 및 區域別 分類

온수 방출방식의 분류는 冷却水 供給方式別로 냉각수 1회 通過方式(Once-Through Cooling System)과 냉각수 再循環方式(Closed-Cycle Cooling System)으로 區分된다. 排出構造別 分類는 水表面 放出方式(Surface Discharge Type)과 水中放出方式(Submerged Discharge Type)으로 구분되고, 1次 擴散效果는 浮力(Buoyant Effect)과 제트運動量으로 구분되어 진다.

일반적으로 水表面 放出方式은 제트運動量 利用方式을 檢하게 되며, 水中放出方式은 浮力效果 利用方式을 檢하게 된다. 가장 최근의 방식인 水中複數放出(Multiport Submerged Discharge)方式은 가장 稀釋效果가 좋고 幻影影響이 적은 것으로 평가되고 있으나 工事費가 많이드는 단점이 있다.

冷法 溫排水의 領域은 運動形態를 지배하는 주된 物理的 要因에 의해 近海域(Near Field), 遷移海域(Transitional Field) 및 遠海域(Far Field)으로 구분되며 천이해역은 구역화의 모호성 때문에 따로 구분하지 않는 것이 보통이다.

2.3 温排水 擴散의 物理的 特性

表面 温排水의 擴散特性은 排水口에서의 運動量 및 浮力 프릭스의 상대적 強度에 의해서 결정된다. 운동량 프릭스는 온배수의 주요 非安定化 메카니즘(Destabilizing Mechanism)으로 이는 주위수와의 강한 剪斷力 및 亂流混合을 야기한다 반면에 부력 프릭스는 온배수의 安定化 役割을 하는 것으로 沿直 亂流混合을 억제하고 橫方向의 擴張을 야기한다. 따라서 運動量 프릭스가 큰 온배수를 제트(Jet)라 하고 浮力效果가 우세하고 상대적으로 운동량 프릭스가 작은 경우를 Plume이라 한다(Chu 등, 1987).

수표면 온수 방출의 擴散 및 冷却은 주로 다음3 가지 현상 또는 이들의 복합현상으로 이루어진다. 즉 温水放出 自體에 의한 移送(Advection), 海水와의 混合에 의한 消滅(Dissipation) 및 大氣中으로 放射(Radiation)이다. 온배수의 확산은 주로 혼합과정은 온배수와 주위수와의 境界에서의 제트 捕獲連行, 亂流擴散 및 潮

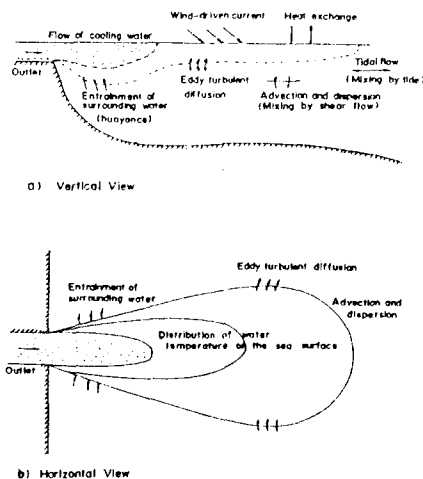


Fig.1 Process of Decrease in the Temperature of Surface Discharged Warm Water

流, 海流에 의한 混合이다(그림1 참조). 그외에 해안 地形形象, 潮汐, 바람에 의한 波 및 沿岸流 등에 의해서 지배된다.

3. 温排水 모델의 研究背景

3.1 近海域 모델

近海域 모델은 解析特性에 따라 物理的 實驗 모델, 제트 積分 모델 및 數值 모델로 구분할 수 있다.

物理的 實驗 모델은 模型을 통해서 온배수의 物理的 特性을 관찰하는 것으로 模型의 製作에 따른 經濟性 및 模型形態에 의해 實驗範圍의 制限을 받으나, 비교적 정확히 온배수 特性을 규명할 수 있다. 또한 模型 實驗結果는 數值 모델 개발에 필요한 模型檢證 資料提供으로서의 가치가 있다. 그 연구는 주로 温排水 特性을 支配하는 主要因子 및 그 特性을 分析하였다. 아울러 周圍水域의 條件에 따른 온배수 特性研究, 速度 및 溫度의 類似 分布函數의 考察, 渦粘性 概念에 대한 考察 등이 주요 연구 대상이다.

제트 적분 모델은 温排水 數值 모델 중 初期段階에 속하는 것으로 境界層亂流理論에 착안하여 제트 중심축을 따르는 流速 및 溫度의 類似 分布函數(Similarity Distribution Functions)를 選定하여 제트축에 鉛直한 方向으로 積分하여 亂流 및 浮力特性을 추가한 非線形 聯立 常微分方程式을 구성하여 해석하는 방법이다. 그 연구는 주로 積分 모델의 開發이다(표1 참조).

특히 개발된 모델의 적용결과를 통하여 捕獲連行 및 索引係數 등의 温排水의 物理的 特性을 分析하고 간단한 流速 및 溫度의 變化, 擴張範圍에 대한 理論式을 정립하였다. 제트의 混合特性과 幾何學的 領域, 波 및 成層化된 水域으로 放出時 温排水의 影響을 分析하였다.

數值 모델은 質量保存 및 運動量方程式과 熱에너지 保存方程式을 직접 有限差分法 또는 有限要素法을 이용하여 해석하는 방법이다. 時間積分에 따른 Reynolds 應力項 및 亂流 熱프릭스 傳達項의 解析을 위한 별도의 亂流 모델 도입이 필요하다. 모델 개발시 亂流項의 처리에는 Prandtl 混

Table 1 Summary of Previous Investigations for Jet Integration Method(Choi, 1990)
(Factors affecting temperature distribution)

Investi- gators	Dim. (Year)	Initial Mixing	Buoy- ance	Discharge Channel Geometry	Bottom Inter- action	Surface Heat Loss	Ambient Conditions			
							Cross Flow	Turbu- lence	Strati- fied	Rever- sing
Koh	2D (71)	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No	No
Hirst	3D (72)	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	No	No
Motz et al.	2D (72)	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No	No	No
Stolzenbach et al.(MIT)	3D (72)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Engelund et al.	3D (73)	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No	No
Engelund	2D (76)	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	No
Shirazi et al.(PDS)	3D (74)	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	No
Wolanski et al.	3D (78)	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Jirka et al.	3D (81)	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No
Chin	2D (88)	Yes	Yes	No	No	No	Yes	No	No	No
Gu et al.	3D (88)	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	No

台距離理論과 $k - \epsilon$ 난류모델 技法 주로 택하고, 有限差分析에는 Patankar 및 Spalding (1972)의 部分的인 拋物方程式의 解析技法을 주로 사용하고 있다.

3.2 遠海域 모델

支配方程式을 流速 및 溫度의 類似分布函數의 假定없이 일반적인 數值技法을 이용하여 積分하는 것으로 보통 時間變化가 고려되며 地形條件 및 水深등을 포함한다. 그러나 계산시간 및 數值技法上的 문제로 排出構造 近域의 충분한 고려는 거의 불가능하다.

4. 제트 積分모델의 記述

4.1 MIT 모델

4.1.1 基本 方程式

1) 支配 方程式 및 基本假定

受容流體의 溫度 T_a , 密度 ρ_a 인 水表面으로 깊이 h_0 , 폭 $2b_0$ 인 直四角形出口를 통해서 θ_0 인 각도를 가지고 流量 Q_0 , 溫度 T_0 , 密度 ρ_0 , 流速 u_0 인 溫水가 放出된다. 이때 表面제트의 垂直方向의 발달은 受容流體의 바닥형상에 의해서 영향을 받지 않는다고 가정하고 周圍水의 유속 V 를 海岸線에 平行한 不均一速度 $V(x)$ 로 가정한다(그림2 참조). 또한 제트로부터 멀리 멀어질수록 水面變位 η 는 均일하게 $z=0$ 이 된다 강한 浮力效果와 周圍水의 흐름을 고려한 제트解析을 위한 支配方程式은 다음과 같다(Stolzenbach 등, 1972).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1a)$$

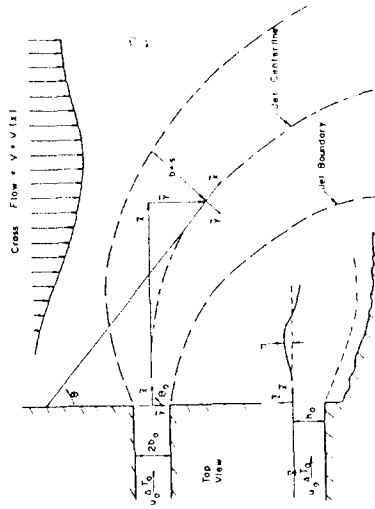


Fig.2 Coordinate Definitions(Stolzenbach et al., 1972)

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial uv'}{\partial y} + \frac{\partial uw'}{\partial z} = \beta g \int_z^{-\infty} \frac{\partial T}{\partial x} dz - \frac{\partial u'v'}{\partial y} - \frac{\partial u'w'}{\partial z} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial uv'}{\partial x} + \frac{\partial v'v'}{\partial y} + \frac{\partial v'w'}{\partial z} = \beta g \int_z^{-\infty} \frac{\partial T}{\partial y} dz + u' \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1d)$$

$$\frac{\partial u'T'}{\partial x} + \frac{\partial v'T'}{\partial y} + \frac{\partial w'T'}{\partial z} = - \frac{\partial v'w'T'}{\partial y} - \frac{\partial w'w'T'}{\partial z} \quad (1d)$$

여기서 x, y, z 는 제트 중심축을 따르는 좌표계이고 u, v, w 는 시간 평균流速, u', v', w' 는 亂流 流動速度, T 는 시간 평균溫度, T' 는 亂流 流動溫度, θ 는 제트 중심축의 進行角度, g 는 重力 加速度, $\beta = 1/\rho$, $\partial \rho / \partial T$, ρ 는 물의 密度이다.

2) 제트의 構造 및 境界條件

제트의 流速 및 溫度 類似分布函數와 境界條件을 이용해서 제트중심선의 溫度 및 流速만을 未知數로 남기고 이 식을 제트의 중심선에 직교하는 $y-z$ 평면에 대한 積分을 하여 亂流 傳達項을 제거시키고 1차의 職立 常微分 方程式을 구성하여 풀게된다.

가정된 제트의 構造 및 形象은 그림3에서와 같

이 剪斷을 받지않는 Core 地域(#1), 鉛直剪斷 地域(#2), 水平剪斷 地域(#3) 및 水平, 鉛直剪斷 地域(#4)의 4개로 구분한다. 따라서 각 지역의 速度 및 溫度는 제트중심선의 流速 u_c , 溫度差 $\Delta T_c = T_c - T_a$ 및 水面變位 η 와 類似分布函數에 의해서 特征지워진다. 이때의 類似分布函數는 1963년 Abramovich 에 의해 제안된 것으로 다음과 같다.

$$f(\xi) = (1 - \xi^{10})^2 \quad (2a)$$

$$t(\xi) = 1 - \xi^{10} \quad (2b)$$

또한, 각 境界를 따라서 積分을 가능하게 하기 위해서 각 지역에 대한 境界에서 流速, 熱 및 運動量的 亂流 傳達이 표시되어야 한다(Stolzenbach 등, 1972).

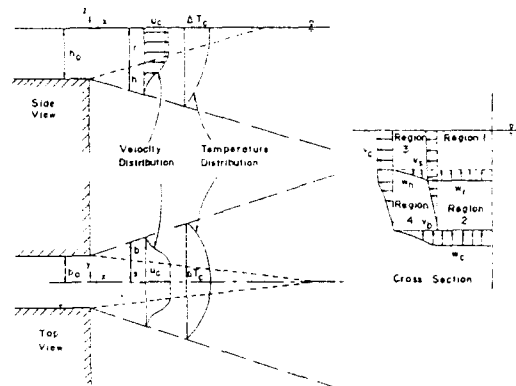


Fig.3 Discharge Structure(Stolzenbach et al., 1972)

3) 支配方程式의 積分

境界條件과 速度 및 溫度分布를 이용하여 支配方程式을 $y-z$ 단면에 대하여 積分한다. x -方向 運動量 및 質量 保存方程式은 앞서 언급한 4개의 구역에 대해서 積分하여 8개의 常微分方程式을 얻는다. y 方向 運動量 및 熱 保存方程式을 제트단면의 반쪽에 대하여 積分하면 2개의 常微分方程式을 얻는다. 또다른 방정식은 제트 중심축을 따라서 전 단면에 대해 y 방향 운동량 방정식을 적분하여 얻는다.

4.1.2 모델의 解析 및 構成

未知數 $u_c, \Delta T_c, h, b, r, s, \theta$ 제트의

形象을 따르는 座標界 \bar{x} , \bar{y} 및 각 지역에서의 內部流速 v_s , v_b , w_r , w_h 에 대한 13개의 常微分方程式으로 구성된다. 따라서 13개 방정식의 從屬變數를 特性變數 u_c , $\Delta T_o = T_o - T_a$, $\sqrt{b_o h_o}$ 에 의한 無次元變數로 만든 후 다음의 無次元變數에 의해 해석된다.

$$Fo = \frac{u_c}{\sqrt{\beta g \Delta T_o h_o}} :$$

初期 流入密度 Froude 數 (3)

$A = h_o / b_o$: 形象比 (Aspect Ratio)

k / u_c : 熱 損失 係數

V / u_c : 周圍數 係數

入力資料로서는 Fo , A , k / u_c , 初期 排出 角度 θ_o , x 方向으로의 計算範圍 x_i 및 周圍水의 流速이다. 그에 따른 出力資料로는 u / u_c , $\Delta T_o / \Delta T_o$, $h / \sqrt{b_o h_o}$, $b / \sqrt{b_o h_o}$, $r / \sqrt{b_o h_o}$, $s / \sqrt{b_o h_o}$, θ , $\bar{x} / \sqrt{b_o h_o}$, $\bar{y} / \sqrt{b_o h_o}$ 등이다. 부력이 작용하는 제트에서 鉛直 捕獲運行은 局地密度 Froude數 $F_L = u_c / \sqrt{\beta g \Delta T_c h}$ 의 函數로서 計算되고 총 제트 흐름은 任意 距離 x 에서의 속도 u 를 제트 단면에 대해 積分 함으로서 얻어지고 초기흐름에 대한 비를 제트稀釋 (Jet Dilution) D 라 한다. 유사하게 水表面에 서의 熱損失 效果가 HT 로 계산되고 제트중심을 따라 임의의 지점 x 까지 도달하는 無次元時間 TM 이 計算된다 (Stolzenbach 등, 1972).

4.2 PDS 모델

4.2.1 基本 方程式

PDS 모델에서 사용되는 溫度 Tr 및 流速 Ur 의 類似分布는 제트의 中心에 대해서 연직한 方向으로 Gaussian 分布라 假定한다.

$$Tr = T \exp(-n^2/B^2) \exp(-z^2/H^2) \tag{4a}$$

$$Ur = U \exp(-n^2/B^2) \exp(-z^2/H^2) + V \cos \theta \tag{4b}$$

여기서 T 및 U 는 제트의 중심선에서의 온도

및 유속이고 V 는 周圍水의 유속, θ 는 제트중심선의 進行角度, n 과 z 는 제트 중심선에서 水平 및 鉛直方向으로 任意地點까지의 距離이다. H 는 제트 중심선에서 연직방향의 제트 깊이, B 는 水平方向의 제트 幅이다 (그림4 참조). 이와 같이 가정한 Tr , Ur 을 온배수 제트가 퍼져나가는 중심선에 따른 폭 B 및 깊이 H 에 대해 적분함으로써 體積프럭스 (Volume Flux) Q , 勢프럭스 (Heat Flux) J 및 運動量 프럭스 (Momentum Flux) M 을 다음과 같이 계산할 수 있다 (Shirazi 등, 1974).

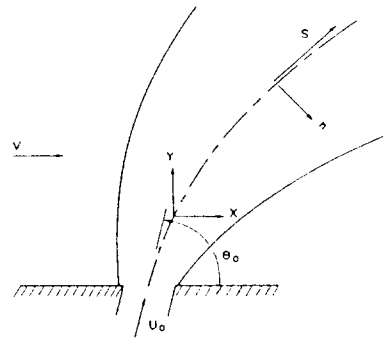


Fig.4 Schematics of a Surface Plume showing the Coordinate System (Shirazi et al. 1974)

$$Q = \int_A Ur \, dn \, dz = \pi BH (U/2 + V \cos \theta) \tag{5 a}$$

$$J = \int_A Ur \, Tr \, dn \, dz = QT/2 \tag{5 b}$$

$$M = \int_A Ur^2 \, dn \, dz = Q^2 / (\pi BH) \tag{5 c}$$

1) 質量保存式

溫排水 제트의 進行方向 s 에 따른 제트 捕獲運行과 周圍水와의 亂流混合을 고려한 體積 프럭스의 變化量 dQ / ds 는 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{dQ}{ds} \Big|_{j,h} + \frac{dQ}{ds} \Big|_{j,v} + \frac{dQ}{ds} \Big|_{a,h} + \frac{dQ}{ds} \Big|_{a,v} \tag{6}$$

위의 식에서 첨자 j 는 제트 捕獲運行, a 는 周圍水와의 亂流混合에 의한 프럭스의 變化량을 의미하며 첨자 h 및 v 는 水平 및 鉛直方向成分을

의미한다.

2) 運動量保存式

제트 進行方向 s 에 따라 運動量 保存式을 적용한 후 x, y 성분으로 나눈다. 여기서 제트에 가해지는 순수힘은 운동량프럭스의 변화에 의해 均衡을 이룬다고 본다. 이 힘은 a) 浮力에 基因된 内部壓力(Pressure Force) P, b) 周圍水 흐름에 의한 形狀抗力(Form Drag) F_D, c) 境界面에서의 剪斷力(Shear Force) SF 의 3개로 대별할 수 있다. 운동량 프럭스의 변화는 周圍水 捕獲 連行에 의한 x 방향의 운동량 V dQ/ds 역시 포함해야하므로 운동량 보존식의 x, y 성분은 각각 다음과 같다.

$$\frac{d}{ds}(M + P) \cos \theta = SF_x + F_D \sin \theta + V \frac{dQ}{ds} \quad (7a)$$

$$\frac{d}{ds}(M + P) \sin \theta = SF_y - F_D \cos \theta \quad (7b)$$

이로부터 제트 進行方向에 대한 體積프럭스의 dQ/ds, 제트 깊이의 변화 dH/ds 를 구할 수 있다.

橫方向의 運動量은 橫方向 제트폭의 擴張으로 표시되는데 이를 浮力을 받지 않는(첨자 nb) 水 平제트의 混合과 浮力에 의한(첨자 b) 水 平擴張으로 區分하면 다음과 같다.

$$dB/ds = (dB/ds)_{nb} + (dB/ds)_b \quad (8)$$

3) 에너지保存式

제트를 따른 大氣와의 熱交換에 의한 熱프럭스의 變化量은 다음과 같다.

$$dJ/ds = -2 \int_0^{\sqrt{\pi}} K Tr dn = -\sqrt{\pi} K T B \quad (9)$$

여기서 K 는 無次元 熱交換係數이다. 따라서 熱의 變化量은 다음과 같다.

$$dT/ds = -T/Q (2 \sqrt{\pi} K B + dQ/ds) \quad (10)$$

4.2.2 모델의 解析 및 構成

앞서 유도된 常微分方程式을 제트를 따라서 단계적으로 積分한다. 제트의 지역적 조건에 따라 dQ/ds 가 계산되고 이에 따라 dT/ds, dθ/ds 및 dB/ds 가 계산된다. 또한 이에 의하여 dH/ds 가 계산된다. 이러한 미분항의 제트레직에 따른 단계적인 積分은 任意 支點에서의 X, Y, T, H, B, θ 및 Q의 값을 결정해 준다(Shirazi 등, 1974).

5. 모델의 適用 및 考察

5.1 MIT 모델

MIT 모델은 主 프로그램과 5개의 副 프로그램은 構成되어 있고 常微分方程式은 4차의 R-K (Runge - Kutta) 方法으로 解析한다. 入出力變數는 無次元화된 값으로 구성되어진다. MIT 모델의 分析을 위한 적용대상 자료는 Pande 및 Rajaratnam (1977)의 實驗으로 幅 4.91cm, 깊이 4.62cm의 矩形斷面으로 부터 溫度 27.5℃, 流速 9.82cm/sec 인 溫排水가 13.5℃인 水槽로 放出되는 實驗條件 1과 폭 15.2cm, 깊이 4.82cm의 구형 단면으로부터 온도 30.27℃, 유속 5.24cm/sec 인 온배수가 16.25℃인 수조로 放出되는 實驗條件 3으로 實驗 1은 初期 密度 Froude 數가 2.56이고 實驗 3은 1.32이다.

5.1.1 中心線을 따른 溫排水 제트의 構造

그림5에서와 같이 제트 中心線의 流速比(Uc/Uo), 超過 溫度上昇比(ΔTc/ΔTo), 稀釋比(D), 局地 密度 Froude 數(F_L) 및 水表面 熱損失比(HT)를 고려하여 다음의 4가지 領域으로 구분이 가능하다.

a) 코아領域(Core Region): 제트 중심선의 流速比는 1에 가깝고 超過 溫度上昇比는 서서히 감소된다. 稀釋比와 局地 密度 Froude 數는 서서히 變化한다. 亂流코아 領域에서의 擴張 깊이(h)는 零의 값으로 계산되므로 F_L의 값은 初期 密度

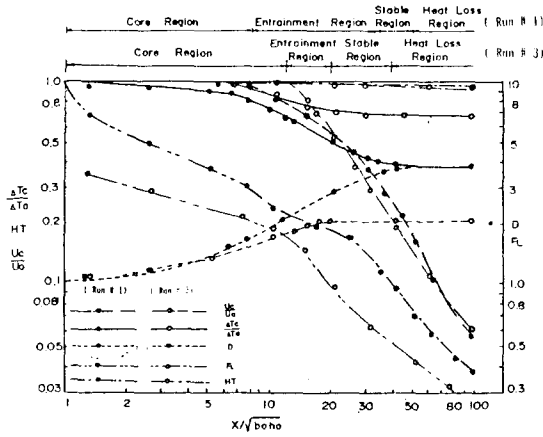


Fig.5 Calculated Surface Discharge by MIT Model

Froude 數보다 상당히 커지고 이 領域에서의 현저한 水表面 熱交換은 없다.

b) 捕獲連行 領域 (Entrainment Region) : 제트 중심선의 流速比 및 超過 溫度上昇比가 현저하게 저하된다. 제트가 亂流 捕獲連行 現象에 의해서 鉛直方向으로 顯著하게 擴張되나 浮力에 의한 減殺效果로 인해서 鉛直擴張 ($h + r$)은 重力에 의한 橫方向 擴張 ($s + b$)보다는 작게 나타난다 이때 연직방향으로 最大깊이에 도달된다(그림b 참조). 이 영역에서의 F_L 은 급격히 減少하고, D 는 捕獲連行에 의해서 급격히 증가하며, 水表面 熱損失은 거의 없다.

c) 安定 領域 (Stable Region) : 鉛直方向의 安定을 나타내는 F_L 이 1.0 또는 그 이하로 捕獲連行이 일어나지 않는다. 제트의 連직깊이는 중력에 의한 橫方向 擴張에 의해서 감소된다. 이 領域에서의 稀釋率 및 超過 溫度上昇比는 거의 일정하다. 반면에 유속은 횡방향의 확장에 의해서 급격히 감소된다.

d) 熱損失 領域 (Heat Loss Region) : 이 영역에서 유속은 급격히 감소하여 제트로서 성질은 없고 水表面의 熱交換에 의해서 溫度가 급격히 떨어진다. 이 영역에서의 溫度分布는 浮力 Plume에 作用하는 受動的인 擴散에 의해서 지배된다.

일반적으로 初期에 超過 溫度上昇比의 감쇄는

유속비의 감쇄보다 크게 일어나며 捕獲連行 領域을 지나면서 流速比의 減殺가 超過 溫度上昇比의 減殺率보다 커진다. 또한 작은 密度 Froude 數를 가진 제트 (Run No. 3)에서의 超過 溫度上昇비의 감쇄율은 큰 밀도 Froude 數를 가진 제트 (Run No. 1)보다 작게 나타나고 유속비의 감쇄율은 거의 비슷함을 보여준다.

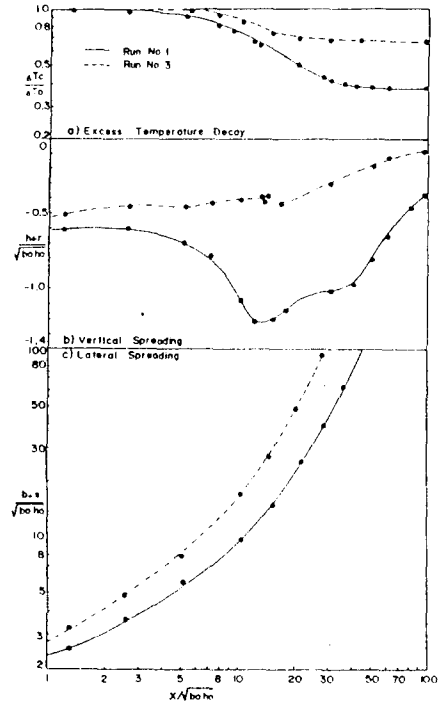


Fig.6 Calculated Results of Excess Temperature Decay Rate, Vertical and Lateral Spreading by MIT Model

5.1.2 橫 및 鉛直方向의 擴張

그림7에서 보는 바와 같이 橫方向의 擴張은 捕獲連行 領域을 지난 安定 領域에서 급격히 擴張함을 보여주고 있다. 密度 Froude 數가 작을수록 橫方向의 擴張은 크게 나타나고 鉛直方向의 擴張은 最大깊이에 도달함이 없이 서서히 감소하나 이는 작은 값의 形象比에 기인한다(그림6 참조). 밀도 Froude 數가 다소 큰 경우의 連직방향의 最大깊이는 捕獲連行 領域에서 가장 크게 나타나며, 그 크기는 간단한 理論式에 의해서 다음과 같이 표

시된다(Stolzenbach 및 Harleman, 1971).

$$\frac{(h+r)\max}{(b_0 h_0)^{1/2}} = 0.42 Fo', Fo' > 3$$

여기서 $Fo = Fo' A^{1/2}$ 이다. 이와 같은 이론식에 의한 최대값은 약 2.5정도이나 실제의 계산값은 1.22이다(그림6 참조). 이는 Fo 의 값이 3이하에서는 완전히 발달된 표면제트이기 보다는 혼합境界層의 形成(Chu 등, 1987)에 기인된다. 따라서 MIT 모델은 Fo 의 값이 어느 정도 큰 제트에 적합하다.

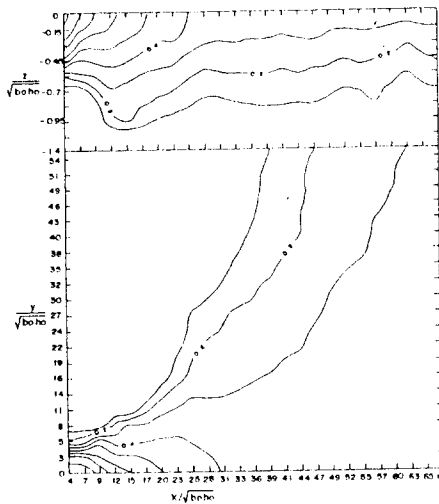


Fig.7 Contour of Excess Temperature Ratio by MIT Model(Run # 1)

5.2 PDS 모델

PDS 모델은 主 프로그램과 5개의 副 프로그램으로 構成되어 있고 常微分方程式의 解析은 R-K 방법을 겸한 P-C (Predictor - Corrector) 방법을 사용하며 入出力變數는 無次元化되어 있지 않다. PDS 모델의 적용은 Pande 및 Rajaratnam (1977)의 實驗條件으로 MIT 모델에 적용한 것과 같다.

5.2.1 中心線을 따른 溫排水 제트의 構成

그림8의 큰 $Fo (=2.56)$ 를 가진 제트의 경우 初期에의 流速比 및 超過 溫度上昇比의 값은 일정

하다가 제트의 無次元 進行距離가 4를 지나서 일정한 비율로 감소되어 無次元 距離 20-30인 領域(捕獲 連行領域-安定領域)을 지나 代數的으로 감소된다. 이때의 局支 密度 Froude 數는 1 또는 그 이하의 값으로 된다. 이때의 국지 밀도 Froude 수는 부차원 거리가 10을 지나면서 1이하로 변하며, 流速比 및 超過 溫度上昇比는 완만하게 변화한다. MIT 모델에서와는 달리 작은 密度 Froude 數를 가진 제트의 경우 流速比 및 超過 溫度上昇比의 減殺率은 큰 密度 Froude 數를 가진 제트보다 완만하게 감소된다. 일반적으로 초과 온도상승비는 MIT 모델과 거의 비슷하게 推定하나, 유속비는 포획연행영역(작은 Fo 의 경우) 또

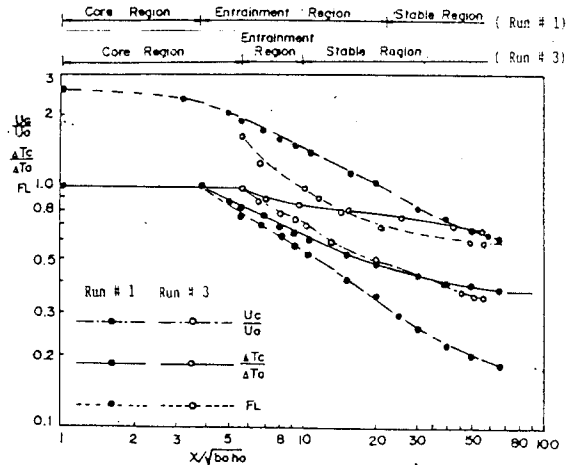


Fig.8 Calculated Surface Discharge by PDS Model

는 安定領域(큰 Fo 의 경우)까지는 PDS 모델이 작게 推定하고 그 이후부터는 크게 추정한다. 이러한 傾向은 국지 밀도 Froude 數의 추정값과도 일치한다. 따라서 流速比 및 超過 溫度上昇比의 값이 1인 領域을 코어領域, 局地 密度 Froude 數의 값이 1인 지점까지를 捕獲連行領域, 그 이하를 安定領域으로 하는 區分이 可能하다.

5.2.2 橫 및 鉛直方向의 擴張

그림9는 橫 및 鉛直方向의 超過 溫度上昇比가 中心線 값의 1/2되는 지점에 대한 폭 $b^{1/2}$ 및 z

이 $h/2$ 에 관한 것으로 橫方向의 擴張은 제트의 進行方向에 대해서 $1/2$ 의 傾斜로 擴張된다. 큰 F_0 를 가진 제트(Run No. 1)에서의 최대깊이는 縱方向의 無次元距離가 30되는 地點($F_L=0.82$)에서 나타난후 重力에 의한 횡방향의 확장에 의해서 서서히 감소한다. 작은 F_0 를 가진 제트(Run No. 3)에서의 最大깊이는 縱方向의 無次元距離 10인 지점($F_L=1$)에서 나타났고 그후로 서서히 감소된다. 그림10은 횡 및 鉛직방향의 초과 온도상

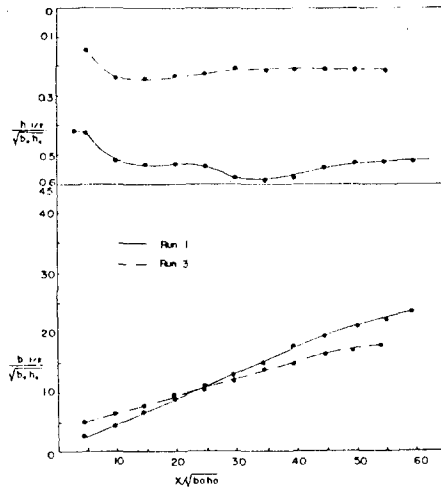


Fig.9 Development of Half Width($b/2$) and Depth($h/2$) by PDS Model

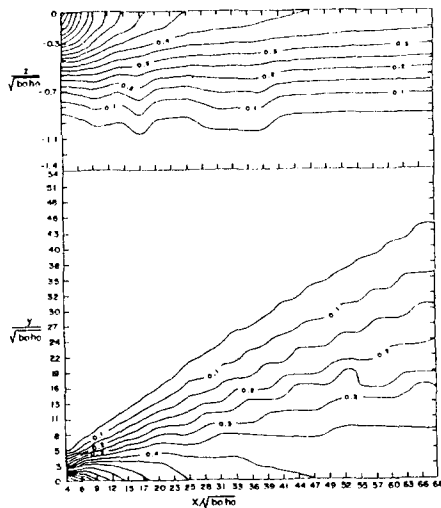


Fig.10 Contour of Excess Temperature Ratio by PDS Model(Run # 1)

승비 분포도이다.

6. 結 論

이상과 같은 MIT 및 PDS 모델의 適用結果는 각 모델의 構成에서의 상이한 假定에 따라 그 解析結果 역시 다름을 볼 수 있다. 각 모델의 解析에 의한 差異點을 要約하면 다음과 같다.

1) 일반적으로 MIT 및 PDS 모델은 成層化되어 있지 않은 水域에서 周圍水의 흐름, 제트의 放出角度 등을 고려하여 溫排水 제트의 構造를 算定할 수 있는 모델이다.

2) MIT 모델은 제트의 區域別 分類에 따른 類似分布函數의 假定에 의한 것으로 제트의 進行方向에 따른 構造를 4개의 領域으로 쉽게 파악할 수 있다. 반면에 PDS 모델은 流速比 및 超過 溫度 上昇比와 局地 密度 Froude 數의 變化에 의해 3개의 領域으로 파악이 가능하다.

3) 超過 溫度 上昇比의 推定에 있어서 두 모델이 거의 비슷한 값을 보여주나, 유속비 및 局地 密度 Froude 數의 變化는 初期에 MIT 모델이 크게 推定하고 捕獲 또는 安定領域을 지나서는 PDS 모델이 크게 推定한다.

4) 橫 및 鉛直方向의 溫度分布는 일반적으로 MIT 모델이 PDS 모델보다 다소 크게 推定한다.

5) 初期 流入 密度 Froude 數가 작은 경우 MIT 모델에 의한 橫方向 擴張(그림7)은 PDS 모델에 의한 推定(그림10)보다 外海側에서 버섯 모양으로 급격히 擴張되어 過大 評價된다. 이는 MIT 모델의 問題點으로 Stolzenbach 등(1972)에 의해 指摘된 바와 같다.

6) 따라서 亂流모델을 이용한 溫排水 數值模型의 開發 및 이의 使用이 必要하다.

참 고 문 헌

1. 강석구, 이상용, 정경태, 염기대(1986), "적분모델

- 에 의한 온배수 제트 연구”, *Ocean Research*, 8 (2), pp.29-39.
2. 동아일보(1989.2.27), 11면, 좌상단.
 3. 윤계섭, 이길성(1988.5.7), “발전소 냉각수의 온배수 확산”, 광양 공업단지 조성에 관한 토목공학 심포지움, 대한토목학회, 포항 종합제철주식회사, pp.349-356.
 4. 정경태(1984), “온배수 수치모델기법의 검토”, 대한토목학회지, 제32권, 제3호, pp.68-76.
 5. 최홍식(1990), 표면 온배수 수치모델의 비교평가 서울대학교 공학박사 학위논문.
 6. 포항 종합제철 주식회사(1983.5), 광양제철소 해수 취배수와 열확산.
 7. 한국전력주식회사(1984), 원자력발전소 냉각수순환계통의 설계, KOPEC/85 T0004.
 8. 한국전력주식회사, 한국과학기술원, 해양연구소(1981.9), 발전소 온배수에 의한 수산자원어의 영향 및 대책에 관한 연구, BSPI 00025-49-3.
 9. 해양경찰대(1987.12), 해양 오염방제.
 10. 해양연구소(1984.3), 온배수 확산모델 개발 및 적용연구, BSPE.00049-78-2.
 11. Chu, V.H. and G.H. Iirka(1987), “*Surface Buoyant Jet and Plumes*”, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol.6, Complex Flow Phenomena and Modeling, Ed by N.P. Chermisinoff, Gulf Pub. Co., Houston, pp.1053-1084.
 12. Pande, B.B. Lal and N. Rajaratnam(1977), “*An Experimental Study of Bluff Buoyant Turbulent Surface Jets*” *J. of Hydraulic Research*, Vol. 15, No.3 pp.261-275.
 13. Patankar, S.V. and D.B. Spalding(1972), “*A Calculation Procedure for Heat, Mass, and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows*”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp.1787-1806.
 14. Shirazi, M.A. and L.R. Davis(1974), *Workbook of Thermal Plume Prediction*, Vol.2, Surface Discharge, EPA.
 15. Stolzenbach, K.D., E.E. Adams, and D.R.F. Harleman(1972), *A User's Manual for Three-Dimensional Heated Surface Discharge Computations*, Dept. of Civil Eng., MIT.
 16. Stolzenbach, K.D. and D.R.F. Harleman(1971), *An Analytical and Experimental Investigation of Surface Discharge of Heated Water*, Technical Report No.135, R.M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Div. of Civil Eng., MIT, Cambridge Mass.