

淺海域에서의 表層溫排水 擴散解析 Dispersion Analysis of Surface Discharged Heat Water in Shallow Coastal Area

徐承源* · 金德鎬**

Seung Won Suh* and Deok Ho Kim***

要 旨 : 천해역으로 표층 방류되는 온배수 특성을 배출구 인근의 수심이 20m 내외로 일정한 대상 입해발전소를 선정하여 다수의 정점에서 계절별로 수심별 수온을 관측함으로써 방류수온의 수평적인 분포와 연직구조를 심도 있게 파악하였다. 서해안 천해역에서 관측된 표층온배수 특성은 전적으로 주변조류속에 의해 지배되며, 유속이 강한 창낙조시에는 자유젯 형태를 저 유속의 계류시는 플룸의 성향을 나타냈다. 다소 주변유속의 강도에 따라 차이는 있으나 초기 젯모멘텀이 지배하는 근역의 경계는 배출구로부터 200~300m 정도인 것으로 파악되었다. 이 구간에서는 수온의 연직적인 구조가 확연하고 배출구로부터 유하거리에 따라 수온이 지수적으로 감소함을 보이나 800m 이후에는 표층방류임에도 불구하고 난류확산으로 연직변화가 거의 나타나지 않았다. 특성길이 혼합모형(CORMIX3)을 이용하여 실측자료와의 비교검토가 이루어졌는데 실제의 제 현상을 대부분 잘 재현하였다. 수평확산의 범위를 포함하여 전반적으로 만족스러운 결과가 유도되었으며 특히 근역 및 중간역을 잘 모의할 수 있었다.

Abstract □ Dispersion characteristics of surface discharge heat water in shallow region are investigated for coastal power plant with nearly constant depth of 20 meters by observing the seasonal depthwise temperature in several stations, which give precise horizontal distribution and vertical structure of heat water. Surface discharged heat water in shallow coast in the Yellow Sea relies mainly on ambient tidal flow, so it behaves as free jet when the ambient flow is strong and shows plumelike behavior during stagnant tide. According to observation the near field region is estimated as 200~300 meters and shows distinct vertical profile and exponentially decreasing pattern from discharge point for this region. But there are no remarkable vertical distortion of temperature beyond 800 meters even though it is discharged from surface. Characteristic length scale model, CORMIX3, is applied and compared with the field data. Overall tendency of CORMIX3 results resemble well with field data especially in near field and intermediate region.

1. 서 론

서해 연안에 위치한 입해발전소는 지형의 특성상 천해역으로 냉각수를 방출하는데 현재까지는 대부분 시공성과 유지관리측면에서 심층방류보다 유리한 표층방류를 택하고 있다. 관념적인 판단으로는 온배수의 부력특성상 표층방류의 희석, 확산보다는 심층 방류한 경우가 유리한 것으로 인식되고 있다. 그러나 서해안의 입해 발전소가 위치한 배출구 주변의 수심이 불과 10~20m 정도인 천해역에서는 이러한 관념적인

해석이 잘못 이해될 수 있다.

본 연구에서는 점차 그 중요도가 증대되는 연안환경 보호 측면에서 표층 방류된 냉각수의 확산거동을 계절별로 심도 있는 실측을 통하여 살펴보고, 이러한 표층 부력젯의 거동을 전문가 해석기법을 응용한 특성길이모형인 CORMIX3(Jones와 Jirka, 1993)를 이용하여 해석한 결과와 비교하고자 한다.

온배수에 대한 해석방법으로 물리적인 모형실험을 이용한 방법과 젯적분방법이나 3차원적인 수치모형을 이용한 방법이 폭넓게 이용되어 왔는데(Jirka 등, 19

*군산대학교 해양공학과 (Department of Ocean Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Chonbuk, Korea)

**한국전력기술(주) 환경기술처 (Department of Environmental Technology, KOPEC, Yongin, Kyungki, Korea)

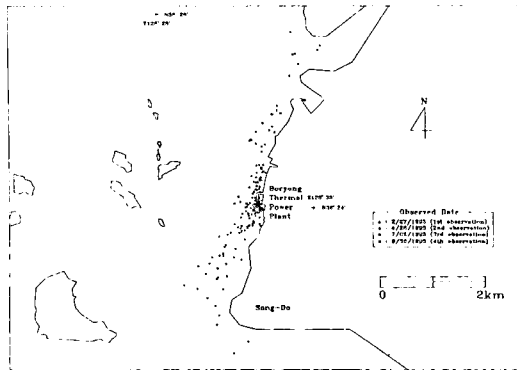


Fig. 1. Map showing the study area, Boryong Power Plant at Chonsu Bay, and sampling stations for temperature dispersion.

81) 나뉠대로의 진전된 결과가 발표되고 있다. 근자에는 수치적인 방법이 경제적으로 유리하고 비교적 정확히 예측할 수 있다는 장점 때문에 각광을 받고 있다. 환경적인 측면에서 점차 온배수의 거동이 중요하게 인식되고 있어 이에 관하여 국내외에서 활발히 연구하고 있는 추세이다.

선진 외국에서의 심도 있는 연구를 거론하지 않더라도 국내에서도 근래에 온배수 확산에 관한 여러 편의 논문이 발표되고 있는데 최근자에는 정(1994), 이 등(1995)의 연구는 근역의 특성을 파악하기 위한 3차원적인 수치실험 결과를 발표하고 있다.

본 연구는 궁극적으로 상세한 해석이 절실히 요구되는 원자력발전소등의 3차원적인 온배수 확산거동을 해석하는 것이나 이에 앞서 근역과 중간역 그리고 원역에 있어서의 표층방류 특성을 대상 임해발전소를 선정하여 다수의 정점에서 수심별 수온을 관측함으로써 방류수온의 수평적인 분포의 이해뿐만 아니라 연직구조를 파악하는데 중점을 두었고, 특성길이 혼합모형과 2차원 수심적분모형을 이용하여 경제적으로

해석하는데 주안점을 두고 실시되었다. 근역에서의 특성길이모형, 원역에서의 수심적분모형을 결합한 혼합모형에 의해 전역에 대한 온배수 확산을 해석하고 이어서 3차원적인 연구를 추진하는 일련의 연구중 본고에서는 실측자료분석의 결과를 특성길이 혼합모형과 비교하는 내용이 중점적으로 다루어졌다.

2. 표층 방류된 온배수거동

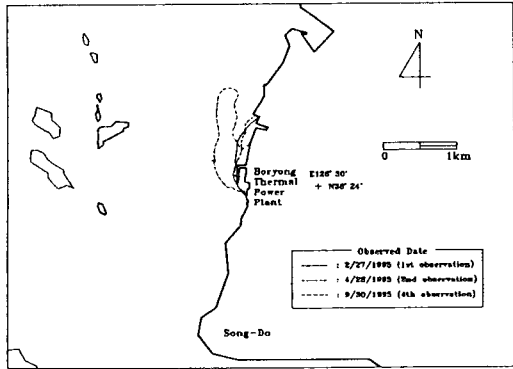
2.1 조사지역 및 방법

천해역에 방류되는 온배수의 확산특성을 관측하기 위하여 해석의 대상으로 선정한 발전소는 배출구 인근의 수심이 20m 내외로 거의 일정하고 발전소가 위치한 연안이 비교적 직선으로 CORMIX3를 이용하여 비교하기가 용이한 보령 화력발전소를 택하였다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 보령화력발전소는 천수만 내에 위치하고 있는데, 천수만은 폐쇄된 지형적인 특성상 만내의 순환을 지배하는 인자가 조류이며, 특히 좁은 폭의 입구에서 발생되는 강한 조류가 보령화력발전소의 온배수 확산에 직접적으로 영향을 끼치게 된다.

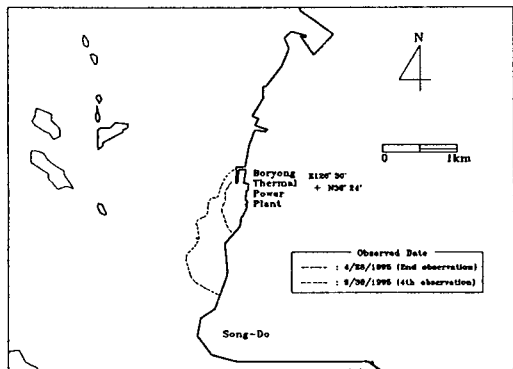
본 연구에서는 계절별로 달라질 수 있는 확산의 특성을 살펴보기 위하여 4계절에 걸쳐 영국 Valeport사의 600 MKII를 이용하여 각 정점에서의 수심별 수온의 변화를 조사하였다. Fig. 1에 관측점의 위치가 도시되고 있는데 매회 관측에서 배출구를 중심으로 20여 정점에서 수심별로 수온의 확산범위를 관측하였다. 이때 관측정점의 측위는 오차한계 20m 이내의 Garmin GPS 수신기를 이용하였다. 4회의 조사중 1, 2차는 조류속이 강한 대조시에 3, 4차는 소조시에 가까운 시점에서 이루어졌다. 온배수의 영향을 받지 않는 배경수온을 파악하기 위하여 관측초기에 유향에 따라 창조시는 배출구 이남, 낙조시는 배출구 이북의

Table 1. Field observation of thermal discharge

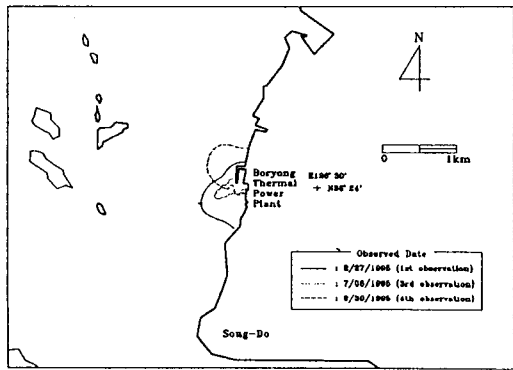
Observation	Date	Moon's age (day)	Thermal Discharge Q (m ³ /s)	Ambient Temperature T _a (°C)	Maximum Temperature T _{max} (°C)	Excess Temperature ΔT (°C)
1st	2/27/1995	27.2	73	4.9	11.6	6.7
2nd	4/28/1995	28.0	65	10.5	20.7	10.2
3rd	7/ 6/1995	8.1	156	20.5	25.0	4.5
4th	9/30/1995	5.4	130	21.0	26.6	5.6



(a)



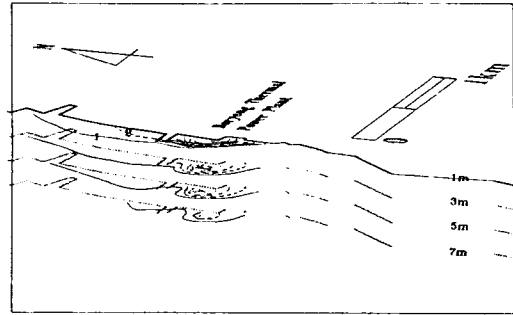
(b)



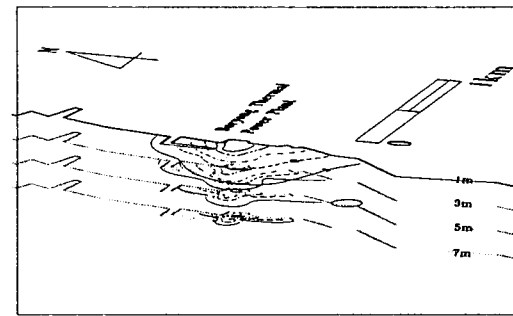
(c)

Fig. 2. Excessive thermal isolines (Δt 1°C) at 1m below the surface observed (a) during flooding tide, northward free jet and shore attached jets (b) during ebbing tide, southward shore attached jets (c) during slack tide, outward plumes.

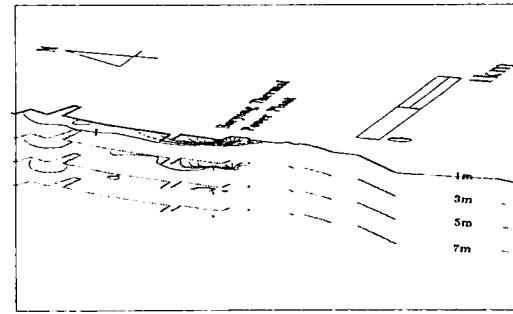
2, 3개 측정에서 수심별 수온을 측정하여 일정한 배경수온을 관측한 후 배출구 인근의 200m 이내에서는 매우 조밀하게 관측하고, 이를 제외하고는 조사선을 이동시키면서 수표면하 1m의 표층수온을 연속 관측



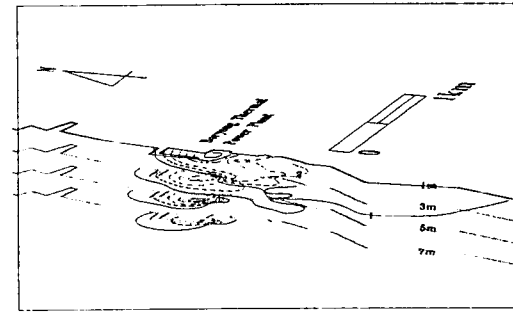
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. 3-Dimensional temperature distribution near discharging point (a) for 1st observation, flooding tide (b) for 1st observation, ebbing tide (c) for 2nd observation, flooding tide (d) for 2nd observation, ebbing tide.

하여 배성수온과의 차이(ΔT)가 해석상의 기준인 0.5°C 보다 작으면 온배수의 확산이 영향을 미치지 않는 것으로 간주하여 그보다 외역의 관측은 하지 않고, 내부 역에서만 조사를 하였다. 대회 관측에서 측정간 측정시간의 차이가 있어 동시간에 전체 정점에서 관측한 수온과는 다소 다른 분포를 보일 수도 있을 것이나 주변유속의 영향을 고려하여 1.5~2시간 이내에 걸쳐 수온을 관측하였기 때문에 그 영향은 미미할 것으로 판단된다. 배출구 인근에서는 한 정점에서 수심별로 12~14개의 위치에서, 이를 제외한 외역에서는 한 정점에서 6~8개의 수심에서 수온을 측정하였다.

2.2 조사결과 및 분석

현재 500MW 시설용량의 발전기 6기가 가동되고 있는 보령화력발전소는 각 발전기별 냉각수 방출량이 계절별로 운영단계에서 다소의 차이가 있다. 4회에 걸친 관측시기와 방출량 및 초과수온자료가 Table 1에 수록되었다.

대조시인 1차 측정의 1995/2/27 겨울철과 2차로 측정된 1995/4/28의 봄철에는 창조시 방출구로부터 5 km 북측상류인 오천만 입구까지 수심별 관측이 실시되었고, 주변유속이 상대적으로 작아지는 전류될 때의 확산도 아울러 관측하였다. 소조시인 3차의 여름철 조사로는 1995/07/06 낙조시에 조사가 이루어졌고, 4차는 1995/9/30 가을철에 조사가 실시되었다.

각 조사시의 관측성과를 도식화하여 수평적인 1°C 초과수온분포를 Fig. 2(a) ~ (c)에 수록하였고, 수온의 연직구조를 파악하기 위하여 주변 조류속이 강한 1, 2차 관측시 수면하 1m, 3m, 5m 그리고 7m 수심에서의 수온을 역시 초과수온으로 환산하여 Fig. 3(a)~(d)에 수록하였다.

이들 그림을 살펴보면 1차에는 배성 수온이 4.9°C 정도이며 방출구를 기점으로 표층 수온분포의 확산 범위가 넓게 퍼져 있었다. 그러나 방출구 인근의 근역과 중간역의 범위인 300m 정도를 벗어나면, 표층 방류에도 불구하고 전 수심에 걸쳐 수온의 연직구조가 일정하게 나타났다.

2차 조사결과를 보면 오천의 창조시에 온배수방류의 영향을 받지 않는 배성 수온은 10.5°C였는데 배출구 인근에서는 20.7°C까지 관측되었다. 그러나 이러한 수온 구조는 배출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 지

수적으로 급격히 감소되었다. 배출구로부터 500m 정도 하류에서는 12°C까지 급격히 수온이 떨어지고 이 이후에는 전수심에 균등하게 혼합되어 3 km까지는 약 11°C 정도로 서서히 감소된다.

3차 관측한 결과는 1, 2차 보다는 주변 유속의 영향이 작아 온수의 확산범위가 다소 작게 나타났는데 주변의 수온이 20.5°C인 경우에서 초과상승온도 1°C의 확산범위는 외해로 약 400m, 남측연안으로는 300m 정도에 그치고 있는 것으로 나타났으며, 둔화된 주변유속에 기인되어 켈형태보다는 플룸의 성격을 띠고 방출구 인근에 비교적 넓게 퍼져 분포되고 있다. 즉, 시간과 공간적으로 자유젤과 플룸이 교대로 나타나고 있으며, 특히 근역에 있어서는 수심별 변화가 매우 심하게 나타남을 알 수 있다.

4차의 측정 결과도 주변 조류속에 직접적인 영향을 받아 낙조 및 창조시는 흐름방향으로 500m~1 km까지 1°C의 상승된 수온이 나타나나, 저조시의 계류시는 3차 측정시와 같이 플룸의 형상을 나타내고 있다.

이렇게 4차에 걸친 온배수의 확산특성을 관측한 결과를 분석하면 주변의 조류변화와 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 판단되며, 주변유속이 강할 때는 자유젤 혹은 연안부착젤의 형태를 띠고 유속이 느려지면 플룸형태로 나타난다.

3. 특성길이모형에 의한 확산해석

특성길이 모형은 표층 혹은 저층방류된 흐름을 초기모멘텀영역, 부력유출영역 그리고 주변수 흐름영역 등의 특징적인 영역으로 구분한 후, 각 영역 내에서는 특성치만을 고려하여 유도한 간단한 근사적인 관계로써 확산거동의 주요한 부분을 규정 짓는다. 이외의 미소한 부분의 영향은 여기에 추가하여 구함으로써 전반적인 확산을 해석하는 방법이며 이렇게 영역을 구분할 때 특성길이를 이용하여 근사해를 구하게 된다 (Jones와 Jirka, 1994).

3.1 모형의 원리

CORMIX3에서 취한 Characteristic Length Scale은 초기유출량, 운동량유출량, 부력유출량 및 주변유속 등의 상대적 중요도를 나타내는 특성치로서, 표층 부력젤에서는 다음과 같은 4가지의 특성길이를 이용한다.

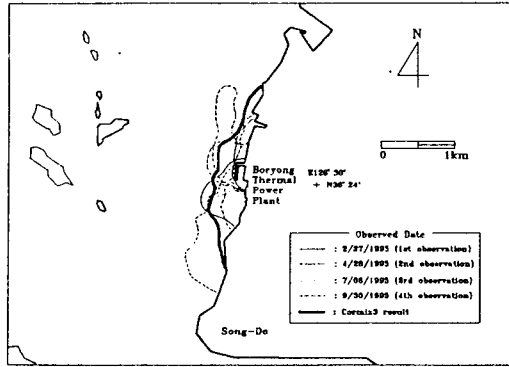


Fig. 4. Predicted isoslines using CORMIX3 model.

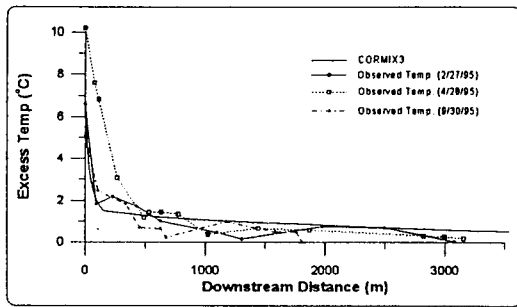


Fig. 5. Observed and computed excessive temperature variations along the downstream distance from the discharge points.

유량 특성길이(Discharge Length Scale)는 $L_Q = Q_o/M_o^{1/2}$ 으로서 운동량 유출에 대한 초기 유출의 상대적 비를 표시한다. 여기서 $Q_o = u_o a_o$ 는 온배수 방출 유량을 의미하고 u_o 및 a_o 는 각각 방출유속 및 단면적을 의미하며, $M_o = u_o Q_o$ 로서 운동량 유출을 나타낸다.

플룸에 대한 켈의 특성길이(Jet-to-Plume Length Scale)는 초기 운동량과 부력의 상대적 중요도를 나타내는 지표로 $L_M = M_o^{3/4}/J_o^{1/2}$ 으로 표현되며 $J_o = g'Q_o$ 로 온배수의 부력 유출량을 의미하고 $g' = g(\rho_a - \rho_o)/\rho_a$ 인데 ρ_a 는 주변수의 밀도, ρ_o 는 방출수의 밀도를 나타낸다. 자유젯에서 배출구로부터 외해방향으로의 위치를 y 로 취했을 때, $y \ll L_M$ 이면 운동량이 지배적이 되어 켈혼합이 강하게 일어나고, $y \gg L_M$ 이면 부력이 강하게 작용하여 횡방향의 확산이 강하게 일어난다. 따라서 이 특성길이는 켈혼합이 어디에서 종료되는가와 부력에 의한 횡방향이 혼합이 어디에서 일어나는지를 알 수 있는 중요한 지표이다.

주변유동에 대한 켈의 특성길이(Jet-to-Crossflow Length Scale)는 초기 운동량과 주변 유동의 상대적 중요도를 나타내며, $L_m = M_o^{1/2}/U_a$ 로 표현된다. 여기서 U_a 는 주변유속을 의미한다.

주변 유동에 대한 플룸의 특성길이(Plume-to-Crossflow Length Scale)는 주변 유동에 대한 초기 부력 유출의 상대적 비를 나타내며, $L_b = J_o/U_a^3$ 으로 표현된다.

모형에서는 주변유동장의 자료와 방출량 자료로부터 각각의 특성길이를 산출한 후 전문가 기법에 의하여 하나의 시스템 내에서 여러 가지 환경인자와 변수들을 이용하여 최적 상태에 알맞은 형태로 온배수 확산을 예측하게 된다(Jones와 Jirka, 1994).

3.2 CORMIX3 모형에 의한 수평확산

보령화력발전소의 온배수방류 영향을 관측한 기존 자료와 CORMIX3 모형을 이용하여 재현한 온배수 방류 패턴과 방출구로부터 연안을 따라 관측한 해수의 온도를 비교 함으로써 특성길이모형에 의한 천해역의 혼합확산 해석을 도모하였다. 해석에는 주변조류속이 강한 1, 2차 관측 때의 방출량자료가 모형의 입력으로 이용되었다.

CORMIX3에 의한 온배수의 확산 분포장을 평면적으로 비교하여 도시한 것이 Fig. 4에 수록되었다. 이 그림을 1995년 2월과 4월 관측한 Fig. 2 및 3에서의 표층수온과 비교하면 1°C 상승역이 대체로 잘 일치하나, 배출구 인근에서는 관측치의 온도가 다소 높게 표현되었고, 관측치는 다소 외해로 수십 m 퍼져있는 것으로 나타났다. 그 이유는 관측 값은 표층(수면하 1m)수온이며, 계산결과는 켈 중심에서의 온도이므로 방류 초기에 부력에 의해 표층으로 퍼지는 효과를 반영하지 못한 것으로 인식된다.

3.3 유하 거리별 수온변화

다른 비교로써 온배수가 방류된 배출구로부터 하류 방향으로의 거리별 관측수온과 켈 중심선을 따른 비교를 하였다.

온배수가 배출구로부터 방류되어 주변 유동장과의 혼합 확산에 의하여 변화되는 과정을 살펴보기 위해 4회 관측한 상이한 현장수온을 초과수온으로 환산하여 유하 거리별로 도시한 Fig. 5를 참조하면 1차의 결과는 창조시에 표층에서 100m 정도를 지나 11.5°C

에서 6.5C로 급격히 감소되고, 이후에는 지수적인 감소를 보이며 약 3 km까지 6C에서 5C 사이로 서서히 감소함을 알 수 있다. 중층에서는 배출구 인근에서 온배수의 부력에 기인되어 주변해수 온도와 동일한 값을 보이며, 1 km 하류에서는 수심방향의 난류혼합에 기인되어 표층, 중층의 구분 없이 전 수심에서 거의 동일한 수온분포를 나타내고 있다.

2차의 창조류시에 관측된 결과는 주변의 강한 조류속에 영향을 받아 표층 방출된 열이 편향된 결과를 보여준다. 그러나 전류시에 관측된 1차 낙조시에 관측한 오후 시간대의 그림 역시 배출구로부터의 거리에 따라 표층에서는 수온이 급격히 감소되고, 방류조기에 21C의 수온이 500m를 유하하면 12C로 급격히 감소되고 이후 3 km 하류까지 거의 0.5C 정도내의 변화만을 보이고 있다. 약 800m를 유하한 후부터는 수심에 따른 변화가 보이지 않는다.

3, 4차에도 역시 앞서 조사한 1, 2차의 결과와 같이 배출구 인근 200m 이내에서 급격한 수온의 변화를 보이고, 이후에는 큰 변동 없이 분포됨을 알 수 있다. 4차 측정에서는 계류상태인 저조시의 플룸형태에서 외해방향으로 수온의 감소가 뚜렷이 나타나는데 배출구로부터 150m 유하되면서 26.5C의 온수가 22.5C로 급감한다.

이렇게 관측된 유하거리별 자료를 초과수온으로 변환하여 도시한 그림에서 1, 2차 방출시의 자료를 토대로 모의한 CORMIX3에 의한 결과와 비교하면 실제 관측치와 대체로 잘 일치되고 있으나, 500m 이하 하류에서는 CORMIX3에 의한 결과가 다소 높게 나타남을 알 수 있다.

그 이유로는 CORMIX3의 결과가 플랏트 된 것은 셀 중심선을 따라서 나타남 결과인 것으로 판단된다.

이상의 평면적 비교 및 종적인 수온의 변화를 비교한 결과 CORMIX3 모형이 근역에서는 실측치와 잘 일치되며 전반적으로 비교적 만족스럽게 표층 방류된 온배수 확산을 모의하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

심도 있는 실측을 통하여 수심 20m 이내의 서해안 천해역에서 관측된 표층온배수 특성은 전적으로 주변조류속에 의해 지배되며, 유속이 강한 창낙조시에는

자유셀형태, 고저조시와 같은 계류시는 플룸의 성향을 나타낸다. 다소 주변유속의 강도에 따라 차이는 있으나 초기 모멘텀이 지배하는 근역의 경계는 배출구로부터 200~300m 정도이며 이 구간에서는 수온의 연직적인 구조가 확연히 나타나나, 800m 유하된 이후에는 난류확산으로 연직변화가 거의 나타나지 않는다. 특성길이모형인 CORMIX3를 이용하여 실측자료와 비교한 결과 비교적 만족스러운 결과가 유도되었으며 특히 근역 및 중간역을 잘 재현할 수 있는 것으로 판단되었다.

따라서 우리가 관심 있게 해석하려는 영역이 배출구 인근 500~800m 정도의 근역 혹은 중간역에 국한되는 것이 아니라면, 향후의 연구는 본 연구에서 얻어진 근역모형과 2차원의 전역모형과의 결합을 통한 전역에 대한 온배수 확산모형의 수립이 가능함을 시사한다. 그림으로써 수심 20~30m 정도인 서해연안에 위치한 임해발전소의 온배수 확산을 근역 및 중간역을 상세히 묘사하기 어려운 3차원의 모형을 이용하지 않더라도 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 말

본 연구는 제 1저자가 한국과학재단의 지원으로 수행중인 핵심전문과제(951-1201-011-2)의 일부 중간 결과이며, 한국전력기술(주)로부터 현장관측등 일부를 지원 받아 수행한 것으로 이에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

이남주, 최홍식, 이재영, 1995. 가로흐름 수역으로 발출되는 3차원 온배수 난류모형, 한국해양·해양공학회지, 7(2), pp. 148-155.
 성태성, 1994. 연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형, 서울대학교 박사학위논문.
 Jones, G.R. and Jirka, G.H., 1993. CORMIX3: An Expert System for The Analysis and Prediction of Buoyant Surface Discharges. *Technical Report*. DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University.
 Jirka, G.H., Adams, E.E. and Stolzenbach, K.D., 1981. Buoyant surface jets. *J. of Hydraulic Division*, ASCE, 107(HY11), pp. 1467-1487.