

## 수치모형(RMA-2)에 의한 울진원전 도수로 흐름 모의

# Numerical Modeling(RMA-2) Analysis of Intake Channel Flow in Ulchin Nuclear Power Plant

김진원, 이대수, 권기주

한국전력공사

### 요 약

울진원자력발전소에서는 현재 1~4호기 취수조가 가동중에 있고, 추가로 5, 6호기 취수조를 건설중에 있다. 따라서, 냉각수 공급을 위한 도수로는 5, 6 호기 취수조 앞 부분까지 연장될 예정이고, 기존 1~4호기 도수로의 통수면적은 변하지 않아, 5, 6호기 취수조 운영에 의한 도수로의 흐름변화가 예상된다. 본 연구에서는 2차원 흐름 수치모형인 RMA-2 모형을 이용하여 기존 1~4호기 가동시와 5, 6호기 추가 가동시에 대하여 도수로 전체에 대한 유속 및 유황변화를 모의하였다.

### Abstract

Ulchin Nuclear Power Plant' station Units 1 to 4 are already in operation and KEPCO plans to construct additional Units 5 and 6. For this purpose, the intake canal plans to extend to in front of intake Units 5 and 6 to withdraw cooling water. However, Since conveyance area of intake canal in front of intake Units 1 to 4 would not be changed, the variation of flow pattern is predicted. In this study, RMA-2 numerical model is used to analyze the flow velocity and direction of intake canal about the present and the future operating condition including intake Units of 5 and 6.

### 1. 서 론

울진원전은 1~4호기가 가동중에 있으며, 5, 6호기를 추가로 건설중에 있다. 5, 6호기에 추가로 냉각수를 공급하기 위하여 기존 도수로를 5, 6호기 취수조 앞부분까지 연장하고 있으나, 1~4호기 취수조 앞의 도수로 폭은 고정되어 있는 상태로 5, 6 호기 추가 가동에 따라 도수로 전체의 유량이 증가할 것이다. 이에따라 1~4호기 앞 도수로를 통과하는 흐름의 유속도 증가할 것으로 예상된다. 울진원전 도수로에서는 종종 다량의 이물질 및 해양생물이 유입됨에 따라 취수조 스크린에서 막힘현상이 발생하여 발전정지 및 출력 감발 사례가 있

다. 이에 따라 1997년에는 1, 2호기 앞 도수로에 그물망을 설치하여 이물질 및 해양생물의 유입을 많이 줄였으나, 그 이후에도 해양생물 유입에 의한 출력감발이 여러번 발생한 바 있다 (표 1). 이물질 및 해양생물이 도수로로 유입되는데는 해양생물의 자체적인 유영능력뿐 아니라 도수로에서 끌어들이는 유입유속과도 어느 정도 관련이 있을 것이므로 5, 6호기가 추가가동시 도수로에서의 유속 및 유황의 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 RMA-2 모형을 이용하여 도수로 흐름 전체를 모의하였다. 모의 방법으로는 1~4호기만을 포함한 도수로 흐름과 여기에 5, 6호기 도수로 구간을 추가로 포함하여 이를 비교, 분석하였다.

표 1 울진원전 취수조 이물질에 의한 발전정지 및 출력감발 사례<sup>1)</sup>

| 순번 | 일시       | 유입물 | 결과   | 비고     |
|----|----------|-----|------|--------|
| 1  | 96. 9.14 | 해파리 | 출력감발 |        |
| 2  | 96. 9.14 | 해파리 | 발전정지 |        |
| 3  | 97. 2. 1 | 새우  | 발전정지 |        |
| 4  | 97. 4.24 | 새우  | 발전정지 |        |
| 5  | 97. 7.10 | 멸치  | 출력감발 |        |
| 6  | 97.12.28 | 새우  | 발전정지 |        |
| 7  | 97.12.29 |     |      | 그물망 설치 |
| 8  | 98. 8. 1 | 해파리 | 출력감발 |        |
| 9  | 99. 4.30 | 새우  | 출력감발 |        |
| 10 | 99. 5. 7 | 새우  | 출력감발 |        |
| 11 | 99. 5.18 | 멸치  | 출력감발 |        |
| 12 | 99. 5.20 | 멸치  | 출력감발 |        |

## 2. RMA-2 모형의 적용

RMA-2 모형은 미 육군공병단의 King 등이 개발한 2차원 유한요소모형으로 섬을 포함한 하천수로 구간의 흐름분포, 교각부근의 흐름, 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 등 하천, 저수지, 하구 등의 일반적인 흐름양상을 계산할 수 있는 모형이다. RMA-2 모형은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수심방향으로 적분한 수심평균식을 지배방정식으로 사용하게 되며, 이는 식 (1), (2), (3)과 같다<sup>3)</sup>.

$$f_u = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (1)$$

$$f_v = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (2)$$

$$f_c = \frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3)$$

여기서  $u, v$  = 직교좌표계상의  $x$ 와  $y$  방향의 유속

$x, y, t$  = 직교좌표계의 좌표 및 시간

$\rho$  = 유체의 밀도

$g$  = 중력가속도

$a$  = 바닥표고

$h$  = 수심

$\tau_x, \tau_y$  = 바닥마찰, 풍속, coriolis 영향을 포함한 외력

외력항인  $\tau_x, \tau_y$  는 다음식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_x = \frac{ngu}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \frac{\eta}{h} V_a^2 \cos \phi - 2\omega v \sin \phi \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{ngv}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \frac{\eta}{h} V_a^2 \sin \phi + 2\omega v \sin \phi \quad (5)$$

여기서  $n$  = Manning의 조도계수

$\eta$  = 바람에 의한 전단계수

$V_a$  = 풍속

$\phi$  = 풍향

$\omega$  = 자전율

$\phi$  = 위도

위의 지배방정식에  $h$ 를 곱하고, 형상함수를 가중함수로 취하는 Galerkin의 가중잔차법을 적용하여 유한요소방정식을 구성하면 다음 식 (6), (7), (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \int N^T f_u dA = \int_A \left\{ N^T \left[ h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \frac{\partial a}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gu}{C^2} \sqrt{(u^2 + v^2)} \right. \right. \\ \left. \left. - \eta V_a^2 \cos \phi - 2h\omega v \sin \phi + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right. \\ \left. N_x^T \left[ \epsilon_{xx} \frac{h}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{gh^2}{2} \right] + N_y^T \left[ \epsilon_{xy} \frac{h}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right\} dA - \int_{\Delta x} N^T h \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} dy \\ - \int_{\Delta y} N^T h \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} dx + \int_{\Delta x} N^T gh^2 dx + \int_{\Delta y} N^T gh^2 dy \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \int N^T f_v dA = \int_A \left\{ N^T \left[ h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \frac{\partial a}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{gv}{C^2} \sqrt{(u^2 + v^2)} \right. \right. \\ \left. \left. - \eta V_a^2 \sin \phi - 2h\omega v \sin \phi + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} \right] \right. \\ \left. N_x^T \left[ \epsilon_{yx} \frac{h}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} \right] + N_y^T \left[ \epsilon_{yy} \frac{h}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} \right] \right\} dA - \int_{\Delta x} N^T h \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} dy \\ - \int_{\Delta y} N^T h \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} dx + \int_{\Delta x} N^T gh^2 dx + \int_{\Delta y} N^T gh^2 dy \end{aligned} \quad (7)$$

$$\int M^T f_c dA = \int_A \left\{ M^T \left[ \frac{h(\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right] \right\} dA \quad (8)$$

여기서  $N$  = 유속을 표현하는 형상함수

$M$  = 수위를 표현하는 형상함수

위의 지배방정식중 시간과 관련된 비정상항은 시간증분에 따라 변화하므로 음해법을 이용하여 그 해를 구하게 된다. 시간 도함수 항을 비선형 유한차분 근사식으로 표현하면 다음 식 (9)와 같다.

$$f(t) = f(0) + at + bt^c \quad t_0 < t < t_1 \quad (9)$$

식 (9)에서 계수  $a, b$ 는 계산으로 구해지고, Norton과 King에 의하면  $c$ 는 1.5를 취한다.

### 3. 모형의 구성

RMA-2 모형은 선형 2차요소, 삼각형 2차요소, 사각형 2차요소를 사용할 수 있으며, 본 해석에서는 대부분 사각형 2차요소와 일부 삼각형 2차요소를 혼합한 Network를 구성하였다. 기본 입력자료 즉, 각 격자점의 바닥고와 좌표는 설계도면 자료를 활용하였으며, 경계조건으로 현재 가동중인 취수조에 대해서는 흡입유량을, 가동예정인 5, 6 호기에 대해서는 설계 유량을 입력하였고(표 2), 도수로 입구부 수위에 대해서는 동해 울진 부지의 조위를 참조하여, Lowest Low Water Level(L.L.W.L.)를 중심으로 모의하였다<sup>2)</sup>. 한편 L.L.W.L.의 수면고는 인천항 평균해수면 기준에서 -0.328m 이다.

표 2. 수치모형에 입력된 경계조건(출구부)

| 취수조 출구부 유량 (m <sup>3</sup> /s)           |        |
|--|--------|
| 1, 2 호기 (CW, T.B.O.C.W, E.S.W)           | 120.04 |
| 3호기 (CW, T.B.O.C.W), 4호기 (CW, T.B.O.C.W) | 51.16  |
| 3호기 (E.S.W), 4호기 (E.S.W)                 | 3.28   |
| 5호기 (C.W), 6호기 (C.W)                     | 50.34  |
| 5호기 (E.S.W), 6호기 (E.S.W)                 | 3.28   |

바람에 의한 마찰함은 큰 유량에 대해서는 다른 계수에 비해 큰 영향을 주지 않는 것으로 가정하여 무시하였다. 본 도수로에서의 조도계수로는 Manning 계수를 이용하였으며, 도수로 바닥에 풀이 없는 콘크리트 구조물로 간주하였는데, 본 모형에서의 바닥 마찰 T는 식 (10)에 의해 구해진다. 또한 이를 수심 및 양방향에 대하여 정리하면 식 (11), (12)과 같다.

$$T = \rho g \left( \frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{V^2}{R^{1/3}} \quad (10)$$

$$T_x = \rho g \left( \frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (11)$$

$$T_y = \rho g \left( \frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (12)$$

여기서,  $\rho$  = 물의 비중

$g$  = 중력

$n$  = Manning 계수

$V$  = 유속

$R$  = 동수반경

$u$  = x 방향 유속

$v$  = y 방향 유속

$h$  = 수심

본 모의에서의 Eddy Viscosity는 특히 저수지와 같은 유속이 크지 않은 흐름에서 지배적인 인자가 되는 것으로, 본 실험 대상구간 및 흐름상태에서는 도수로 최하단부에서는 유속이 느리고, 취수조 입구부에서는 유량의 변화가 발생하여 어느 정도 Eddy Viscosity의 영향이 있을 것으로 판단되었다. 따라서 본 모의에서의 Eddy Viscosity는 모형의 해를 수렴시키고, 안정한 해를 얻기 위해 이용된바, 20 lb-sec/ft<sup>2</sup>의 값을 사용하였다.

#### 4. 도수로 흐름 모의

울진원전 도수로의 흐름은 크게 조위간만차, 취수펌프의 유량, 지형조건 등에 의해 지배적인 영향을 받을 수 있다. 조위 간만차는 실제 시간에 따라 변화하나, 본 모의에서는 수위를 L.L.W.L로 입력하고, 정상류 상태로 해석하여 대표적인 흐름특성을 나타내었다. 취수조 유량의 경우, 1, 2호기에서는 동일 취수조내에 순환수펌프(Circulating Water Pump, 이하 C.W.P.), 비상냉각수펌프(Essential Service Water Pump, 이하 E.S.W.P.), 터빈냉각수펌프(Turbine Plant Open Cooling Water Pump, 이하 T.P.O.C.W.P.)가 동시에 존재하므로 펌프 유량을 합하여 취수조 유량으로 입력하였고, 3, 4 호기에서는 C.W. 취수조내에 C.W.P.와 T.P.O.C.W.P.가 동시에 존재하므로 이들 펌프의 합으로 나타내었다. 5, 6 호기의 경우 T.P.O.C.W.P.는 존재하지 않으므로 C.W.P.유량만을 취수조 유량으로 입력하였다. C.W. 취수조에는 Screen Wash Pump(이하 S.W.P.) 또는 Chlorination Seawater Supply Pump(이하 CL S.S.P.)가 있고, E.S.W. 취수조에도 S.W.P. 가 있으나 상시 가동하지 않고 그 유량이 매우 미약하여 도수로 흐름에 영향을 미치지 않는 것이므로 제외하였다. 지형조건은 기존상태에 대해서는 1, 2, 3, 4 호기 도수로 및 취수조를 포함한 Coffe Dam까지를 적용하였고, 향후 가동상태에 대해서는 1호기부터 6호기까지의 전체 도수로 및 취수조에 대하여 삼각형 2차 요소와 일부 삼각형 2차 요소를 혼합한 Network로 그림 1, 2와 같이 구성하였다. 본 도수로의 바닥고는 일정하지 않은 사다리꼴 형태이고, CW 취수조 앞 취수로 에서는 -8.0m 정도로 낮고, ESW 취수조 앞 도수로에서는 -6.5m 정도로 높았다.

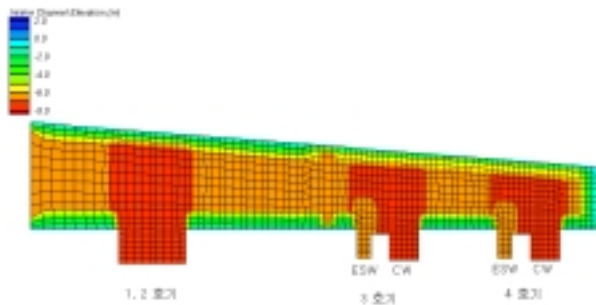


그림 1 도수로(1~4호기) Network 구성

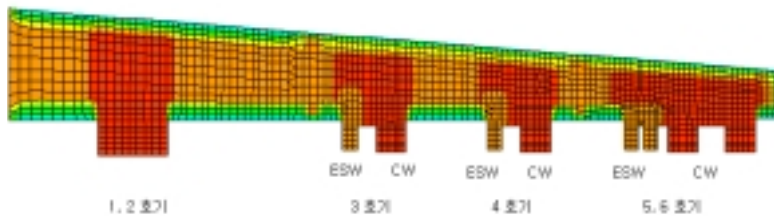


그림 2 도수로(1~6호기) Network 구성

#### 4.1 1호기~4호기 가동시 흐름 분석

도수로 흐름은 일반 하천과는 달리 바닥경사에 의해 흐름 상태가 좌우되기 보다 취수유량에 의해 흐름상태가 좌우되므로 수면경사의 변화는 발생하지 않았다.

L.L.W.L.(-0.328m)에서 유속분포는 1, 2호기 취수조 이전 도수로에서 평균 0.3m/s 정도로 나타났으며, 1, 2호기 취수조 입구부에서는 평균 0.17m/s, 3, 4 호기 CW 취수조 입구부에서는 평균 0.16m/s 로 나타났다. 한편 3, 4 호기 ESW 취수조 입구부에서는 평균 0.04m/s 정도로 느린 유속을 나타냈으며, Cofferdam 근처에서는 흐름이 거의 발생하지 않는 정체지역이 존재할 것으로 나타났다. 취수조 유입으로 인한 도수로 유황 변화는 취수조 입구부 근처에서 많이 발생하였다(그림 3).

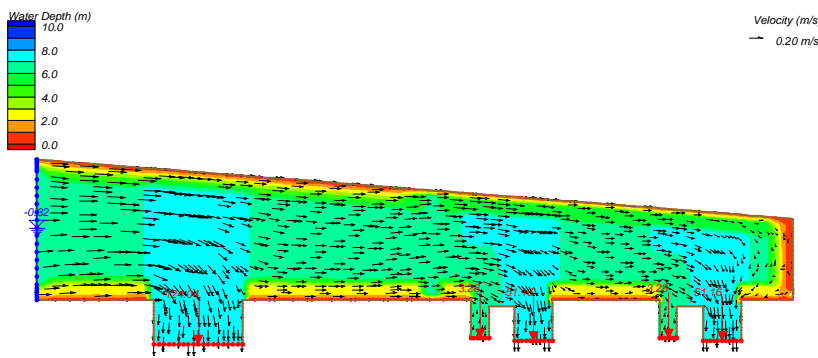


그림 3 취수로 흐름(1~4호기 가동시, L.L.W.L)

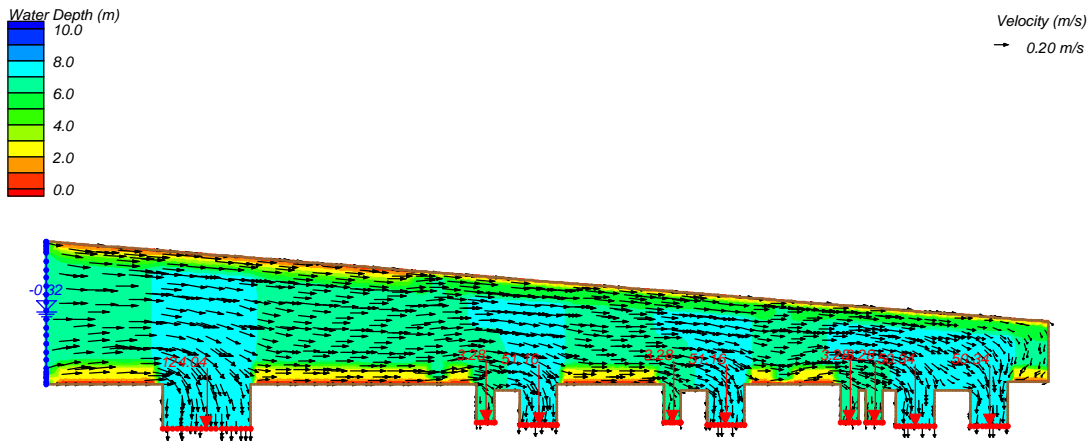


그림 4 취수로 흐름(1~6호기 가동시, L.L.W.L)

#### 4.2 1호기~6호기 가동시 흐름 분석

향후 1호기~6호기 가동시 도수로에서의 흐름을 예측하기 위하여 현재 4호기 취수조 이후에 설치되어 있는 Cofferdam을 제거하고 5, 6호기 도수로까지 설치 되어있는 울진 원자력 발전소 취수조 및 도수로 전구간에 대해서 수치모형실험을 수행하였다.

L.L.W.L.(-0.328m)일때 1, 2호기 취수조 이전 도수로에서 평균 0.45m/s정도로 1~4호기만

가동시 보다는 빠르게 나타났으며, 1, 2 호기 취수조 입구부에서는 평균 0.18m/s, 3, 4 호기 CW 취수조 입구부에서는 평균 0.16m/s로 나타났다. 한편 3, 4 호기 ESW 취수조 입구부에서는 평균 0.08m/s 정도로 1~4호기만 가동시 보다는 다소 빠른 유속을 나타냈으며, 5호기 ESW 취수조 입구부에서는 평균 0.05m/s, 6호기 ESW 취수조 입구부에서는 평균 0.07m/s, 5, 6호기 CW 취수조 입구부에서는 평균 0.15m/s 정도의 유속을 나타내었다(그림 4).

#### 4.3 취수로 흐름 비교 · 분석

1~4호기 또는 1~6호기 가동시 수위변화에 따른 흐름변화는 거의 없었으나 1~4호기 가동시와 1~6호기 가동시의 흐름양상은 상당한 변화가 나타났다. 특히 1, 2호기 취수조 근처의 도수로 유속은 1~6호기 가동시 1~4호기 가동시보다 0.15m/s 이상 커질 것으로 나타났으며 3, 4호기 근처의 유속도 1~6호기 가동시 1~4호기 가동시보다 0.05m/s 정도 크게 나타났다. 각 취수조 입구부의 유속 및 유황은 가동조건 변화에 대하여 크게 민감하지 않은 것으로 나타났다(그림 5, 6).

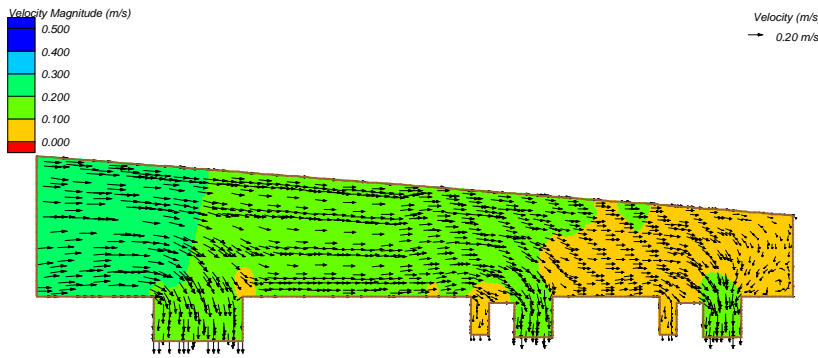


그림 5 1~4호기 가동시 취수로 유속분포(L.L.W.L)

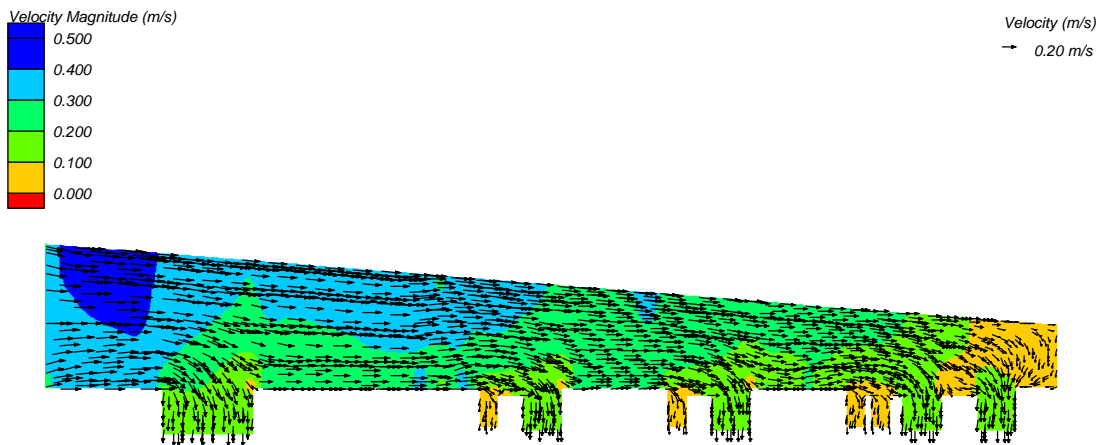


그림 6 1~6호기 가동시 취수로 유속분포(L.L.W.L)

## 5. 결론 및 향후 연구방안

### 5.1 결론

울진원전에서 이용되는 냉각수는 바다에서 도수로를 거쳐 취수조에 이르게 된다. 도수로의 유속 및 유황은 취수펌프 가동 조건에 따른 취수유량, 해수위, 취수조의 위치, 도수로의 지형조건에 따라 좌우되는데, 울진원자력과 같이 취수조가 동일 도수로에 추가로 건설될 경우 도수로의 흐름 형태가 달라질 수 있다.

울진원전에서는 이물질 및 해양생물이 도수로를 지나 취수조에 유입되어 여러번 발전소 정지 및 감발운전을 경험한 바 있으며, 해양생물의 경우는 자체적인 유영능력 이외에 도수로 유속에 의해 취수조로 유입될 수 있다고 판단된다. 그러므로, 취수조 추가 가동에 따른 도수로 유속 및 유황변화에 유의하여야 한다.

본 연구에서의 수치모형 실험 결과, 1, 2호기 취수조 앞 도수로의 유속은 1~4호기만 가동 시 평균 0.3m/s의 유속을 나타내었으나, 여기에 5, 6호기가 추가로 가동시 같은지점의 평균 유속이 0.45m/s로 빨라졌다. 일반적으로 발전소 도수로의 설계유속은 0.6m/s이하로 5, 6호기 취수조 추가 가동시에도 설계기준은 만족하나, 유속증가에 따라 이물질 및 해양생물 유입량이 증가할 가능성이 있으므로 이에 대한 대책이 필요할 것이다.

### 5.2 향후 연구방안

1. 본 연구에서 이용된 수치모형은 2차원 모형으로 3차원적인 펌프의 위치, 상세한 취수조 형태 등은 고려하지 못하였으므로, 더욱 정확한 유속 및 유황 분포를 파악하기 위해서는 향후 컴퓨터의 용량, 계산시간을 고려한 3차원 해석 또는 수치모형실험이 필요하다.

2. 주로 유입되는 해양생물에 대한 유영능력을 파악하고, 유속과의 상관관계를 분석하여 향후 유속이 증가되었을 때 유입되는 이물질 및 해양생물이 어느 정도 증가될 것인지 분석할 필요가 있다.

## 6. 참고문헌

1. 울진원자력본부 제1발전소 기계부, 1999. 7 “울진 1,2 호기 Rake Screen 설비개선 중간 검토 보고서”
2. Brigham Young University, 1998. 10 “Surface Water Modeling System Tutorials”
3. US Army Corps of Engineers, 1997. 5 “Users Guide to RMA2 WES Version 4.3”