

취수문비의 안정성에 관한 연구

곽영균* · 고성호** · 강민구***

A Study on the Stability of Intake gate in a Dam

Youngkyun Kwack*, Sungho Ko**, Minkoo Kang***

Key Words : Stability of intake gate(취수문비의 안정성), Natural frequency(고유진동수), Resonance frequency(공진), Free surface-intake water(표면취수), Selection of intake water(선택취수), Muddy water layer(탁수층).

ABSTRACT

A stability analysis has been made for a newly designed gate of intake tower of reservoir. The analysis is composed of finding the natural frequency of the gate and the frequency induced by water flowing over and through the gate. ANSYS is employed to calculate the natural frequency of the gate and SC/Tetra is utilized for calculating flow field around the gate, which in turn gives the frequency of pressure force fluctuation on the gate. In addition to the safety analysis, the present study presents how the gate selectively intakes a muddy water layer located in the middle depth of reservoir.

1. 서론

매년 7~8 월의 집중강우(최고 69 mm/hr)로 인해 상류에서 다량의 탁수가 유입되게 된다. 유입된 탁수는 Fig. 1(용담댐 05년 8월 자료, 한국수자원공사)과 같은 탁수분포를 이루게 되는데 탁수층을 취수하기 위해 탁수층 아래 수위까지 개도(개도범위: 225.6 m~260 m)를 해야 하는 어려움이 있다. 이렇게 형성된 탁수는 동계 전도(혼합)현상과 더불어 탁수 장기화현상을 초래하고 있다.

이로 인해 댐 하류 일부 구간의 주민들의 어업 보상과 퇴적물 제거 등 많은 민원을 야기하고 있어 집중강우 기간에 발생하는 탁수를 제거할 방안이 필요한

실정이다. 한국수자원공사에서는 이를 해결하기 위해 탁수층이 분포하는 수위에서의 문비를 분리하여 탁수층을 효율적으로 취수하는 표면취수설비 개량사업⁽¹⁾을 시행중에 있다.

탁수층을 효율적으로 취수할 수 있도록 중간 수위의 문비를 분할하는 방식인 선택취수를 할 경우 구조적인 안정성 평가가 필요하다. 국내에서는 취수탑과 취수설비에 대한 구조적 안정성에 대하여 연구가 있었으며 2004년 허춘근⁽²⁾ 등은 용수로 댐 취수탑에 대한

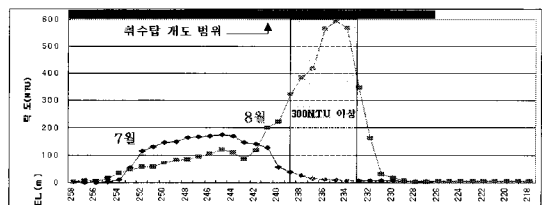


Fig. 1 Muddy water distribution according to water level

* 충남대학교 대학원(BK21메카사업단)
** 충남대학교 기계설계공학과(BK21메카사업단)
*** 충남대학교 대학원(BK21메카사업단)
E-mail : camsu95@cnu.ac.kr, sunghoko@cnu.ac.kr

안정성평가를 하였고 2006년 이갑수⁽³⁾ 등은 임하댐에서의 취수설비에 대한 유동 및 진동해석을 하였다.

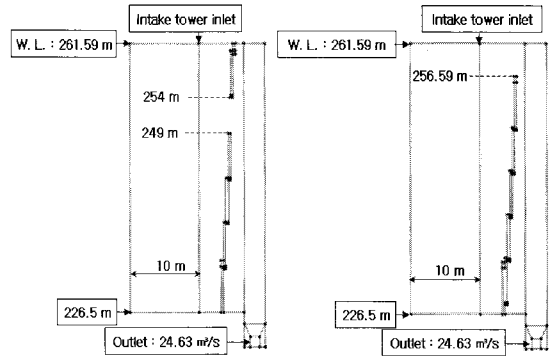
본 연구에서는 용담댐을 모델로 하여 표면취수 방식을 선택취수 방식으로 개선하였을 경우에 대해 유동 해석을 하였고 이를 토대로 진동해석과 정적구조해석을 하여 공진 또는 응력집중에 의한 위험성은 없는지 살펴보려고 한다.

2. 취수현상에 대한 유동해석

2.1 해석대상 및 해석방법

Fig. 2는 50년 빈도강우일 경우의 선택취수 방식과 표면취수 방식에 따른 문비의 위치를 나타내는 개략도이다. 현재 운용되고 있는 방식이 좌측의 표면취수 방식이다. 그리고 우측의 선택취수 방식은 고탁수의 효율적인 방류를 위해 고안된 방안이다. 맨 위의 문을 1번으로 했을 때 선택취수의 경우 탁류가 형성되는 2번과 3번 문비를 단절하여 운용하는 방식이다. 본 해석에서는 이 두 가지 취수 방식을 수위에 따라 총 6개의 경우에 따른 계산을 수행하였다. 유동 해석이 수행된 6개의 경우에 대한 설정은 Table 1과 같다. 공통적으로 6개 경우에 대해 120초 동안의 유동변화를 비정상해석을 수행하였으며, 각 경우의 계산은 12시간이 소요되었다. 수위 표면은 자유 표면(Free surface)으로 설정하였다. 또한 출·입구 길이를 10m 연장하여 유동의 완전 발달되는 영역을 확보하였다.

해석프로그램으로 상용프로그램인 SC/Tetra를 사용하였으며 이 프로그램은 유동의 지배방정식으로 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을



(a) Free surface-intake (b) Selection of intake
Fig. 2 Schematic diagram of the Intake tower according to intake method (Rainfall of 50 years frequency)

사용하고 난류모델로는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 유동의 지배방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 차분화되었으며 비정렬 격자를 사용하여 계산 영역을 이산화하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - u_i u_k) \tag{2}$$

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + C_k + C_b - \epsilon \tag{3}$$

$$U_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 (G_k + G_b) - C_2) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \tag{5}$$

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \tag{6}$$

RANS 방정식은 식 (1)과 (2)와 같이 질량과 운동량의 보존법칙을 적용하여 각각 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 나누어진다. 난류모델로는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 이때의 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소멸율 ϵ 에 대한 전달방정식은 식 (3), (4)와 같다. 식 (5)는 이러한 지배방정식과 난류방정식을 하나의 통합된 형태로 표시한 일반 형태이다. 식 (5)의 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며, S_ϕ 는 생성항이다. $\phi = 1$ 인 경우는 연속 방정식을 나타내고, $\phi = U_i$ 인 경우는 운동량 방정식, $\phi = k$ 와 ϵ 인 경우는 난류 방정식을 나타낸다. 생성항 S_ϕ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다. 이를

Table 1 Computational analysis conditions

	Rainfall of 50 years frequency	Rainfall of 100 years frequency	Normal water level
Water level(m)	261.59	259.25	263.5
Flow rate(m ³ /s)	24.63	24.13	25.07
Analysis program	SC/Tetra		
Analysis conditions	Water surface : Free surface		
	Inlet : Total pressure		
Calculated time	6000 step(120s), unsteady, 12 hours		
Governing equation	RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) equations		
Turbulence model	$k-\epsilon$ model		

유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식에 대한 차분방정식을 구하면 식 (6)과 같다.

2.2 취수탑 유동특성해석

취수탑 외부의 유동이 수심에 따라 문비를 통과하는 분포를 알아보는 것은 탁수의 효율적인 해결을 위해 필수적으로 필요한 요소이다. 이에 따라 다음과 같이 입자 추적(Particle tracking)을 통해 유속이 적용된 수류의 분포를 해석하였다.

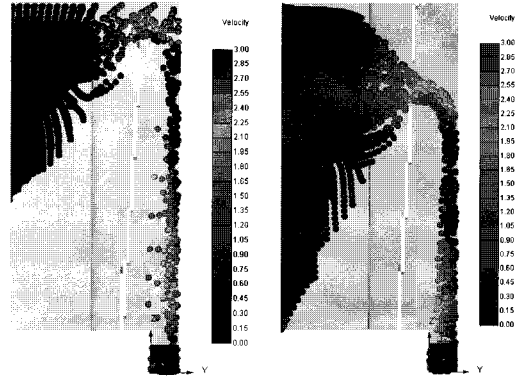
Fig. 3은 50년 빈도강우일 때 수위 261.59m에서의 수류 분포이다. 선택취수의 경우가 표면취수에 비해 확연하게 탁수가 분포하는 영역의 유동이 많이 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이로써 선택취수의 경우가 표면취수 보다 탁수층의 유동을 방출하는 데 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 그리고 같은 선택취수의 경우에도 탁수층의 위치에 따른 적절한 문비의 배치가 그 방류 효율을 높이기 위해 고려되어야 할 사항으로 사료된다.

2.3 문비에 작용하는 압력해석

각 문비에 작용하는 압력을 시간에 따라 해석하여 문비에 작용하는 진동에 대해 계산하였다. 유동은 취수탑 내부에서 문비에 의한 반사, 유속의 변화 등에 의해 와류 등의 복잡한 유동이 형성되고 이에 따라 문비에 작용하는 수압이 시간에 따라 변하게 된다. 만약 이러한 진동수가 문비의 고유진동수와 일치할 경우 파괴의 가능성이 있다.

이에 따라 유동해석에 의한 진동을 해석하여 고체 해석을 통한 문비의 고유진동수와 비교하였다. Table 2는 각 문비에 작용하는 압력의 변화를 해석하기 위해 설정한 계산 지점이다. 유동에 의한 진동이 크게 나타날 것으로 예상되는 지점을 선택하였다. 선택취수의 경우 2번과 3번 문비의 전면과 후면의 총 8개 지점을 설정하였으며, 표면취수의 경우 1번 문비의 전면과 후면에 총 4개의 지점을 선택하여 계산하였다. 여기서 F는 취수탑 입구 쪽의 전면을 의미하며, B는 출구 쪽의 후면을 의미한다.

50년/100년 빈도강우시, 상시만수위의 각각 압력 진동 해석의 결과 같은 번호 지점의 전면이 후면보다 압력이 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) Free surface-intake (b) Selection of intake
Fig. 3 Comparison of flow distribution around intake gates (Rainfall of 50 years frequency)

Table 2 Analysis points of pressure acting on the gate

Free surface-intake water	Selection of intake water

이는 유동의 흐름 방향 및 와류의 발생에 인한 현상이다. 그리고 이에 따라 전면이 후면보다 그 진동의 뚜렷하게 나타났으며, 전체적으로 유동에 의한 진동은 1 Hz이내의 주기를 갖는 것을 볼 수 있었다.

2.4 취수탑 외부의 원거리 유동장 해석

용담댐에 존재하는 탁수는 취수탑 주위의 원거리 유동장까지 넓게 분포되어 형성된다. 따라서 취수탑 주위의 수심에 따른 수류의 변화 해석은 탁수를 효율적으로 제거하기 위한 문비의 위치를 설정하는 데 필요한 요소이다. 이러한 해석을 위해 취수탑의 문비 사이의 통로를 출구로 단순화 시킨 후 수심에 따라 변화하는 유동장을 해석하였다.

Fig. 4와 같이 해석에 사용된 수위는 263.5m(상시

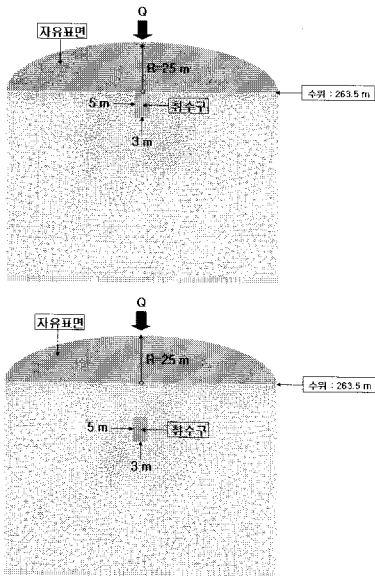


Fig. 4 The grids for analysis of far way-flow field

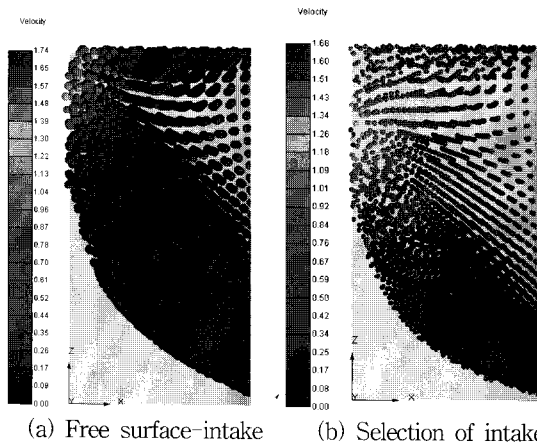


Fig. 5 Velocity distribution of far way-flow field

만수위일 경우)이며 원거리 유동장은 반경 25m의 영역, 수면은 자유표면으로 설정하였다. 출구의 경우 문비의 크기와 유사한 3m × 5m로 적용하였다. 선택취수 방식에서는 수위로부터 6.5m 떨어진 영역에 출구를 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5에서 (a)는 표면취수의 방식이 적용된 취수탑 주위의 수심에 따른 유속 분포를 나타낸 그림이다. 출구 쪽으로 일정한 등고선을 그리며 유속이 변화하는 것을 볼 수 있다. 수면 쪽의 수류가 확연하게 많이 출

구 쪽으로 통과하는 것을 볼 수 있다. 이는 표면 취수의 방법은 중층에 존재하는 탁수를 제거하기에는 비효율적이라는 것을 잘 나타내고 있다.

Fig. 5의 (b)는 수류의 변화를 수심에 따라 입자 추적적을 통해 해석한 그림이다. 탁수가 존재하는 중층의 수류가 출구로 확연하게 많이 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 따라서 탁수가 존재하는 층을 선행하여 조사한 후 이를 토대로 문비의 위치를 조절한다면 표면취수에 비해 보다 효과적으로 탁수를 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 취수조절문비의 구조해석

3.1 고유진동수 해석

3.1.1 수문 3차원 모델링 및 격자생성

수문의 고유진동수를 구하기 위해 3차원 모델링 프로그램을 이용하여 Fig. 6과 같이 모델링을 하였다. 수문의 폭은 1~6번 문비가 2960mm로 모두 같고 수문의 높이는 1번 문비가 6068mm, 2~5번 문비는 5785.5mm, 6번 문비는 6007.5mm이다. 그리고 Fig. 7과 같이 요소를 이용하여 간략화 하였으며, 요소에 단면속성정보(Flange, Web의 길이 및 두께, 전체높이)를 입력하고 앞면 판은 3차원 Shell 모델을 이용하여 요소 분할하였다. 고유진동수를 해석하기 위해서는 세 가지 물성치(밀도, 포아송비, 탄성계수)가 필요한데 밀도에 7850 kg/m³, 포아송비 0.30, 탄성계수 206 GPa를 사용하였다.

고유진동수를 구하기 위해 표면취수일 경우에는 1번과 6번 문비에서는 Sheave에 Y방향, Side roller에 X방향, Main roller에 Z방향, 수문의 아래 빔에 모든 자유도를 구속한 후 해석을 하였고 2번~5번 문비에서는 위아래 수평 빔에 모든 자유도구속 조건을 주었다. 그리고 선택취수일 경우에는 2번 문비와 3번 문비 사이가 벌어져 유동이 지나가므로 1, 4, 5, 6번 문비에는 표면취수일 경우와 같은 구속조건을 주고 2번 문비는 맨 아래 수평 빔에, 그리고 3번 문비에는 맨 위 수평 빔에 구속조건을 주지 않았다.

3.1.2 해석결과

고유진동수 해석결과를 개도위치에 따른 2가지 조건에 따라 Table 3과 4에 나타내었다. 표면취수일 때

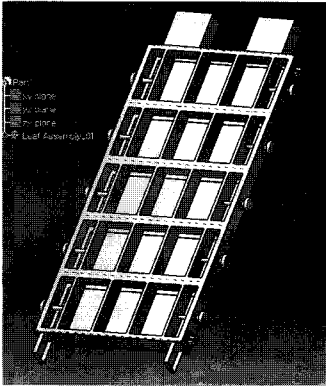


Fig. 6 3D modeling of the gate

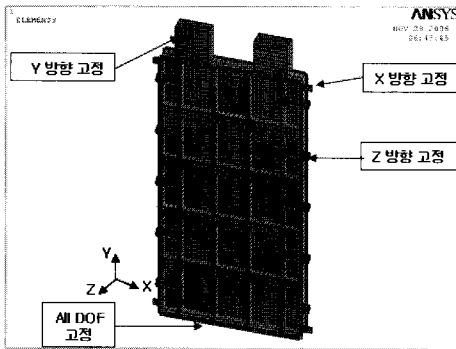


Fig. 7 Elements and boundary conditions

1번 문비의 경우 36.0 Hz, 2~5번 문비에서 70.6 Hz, 6번 문비에서 68.0 Hz의 1차 고유진동수를 갖는다.

선택취수일 때는 1번 문비와 4~5번 문비의 경우 표면취수와 같은 고유진동수를 갖고 2~3번 문비의 경우 53.0 Hz의 1차 고유진동수를 나타냈다. 고유진동수는 물체의 고유특성이므로 구속조건이 같다면 똑같은 값을 갖는데 표면취수와 선택취수일 때 2번 문비와 3번 문비의 구속조건이 틀리므로 표에서와 같이 다르게 나타났다. 또한 표에서 보는바와 같이 모든 문비에서 유동해석을 통해 구한 수문의 공진주파수가 1 Hz 이하였던 결과와 큰 차이를 보이고 있다. 이로써 공진으로 인한 파괴로부터 안전한 것으로 판단된다.

3.2 정적구조해석

3.2.1 경계조건

취수조절문비에 대하여 표면취수일 경우와 선택취

수일 경우에 대하여 각각 정적해석을 하였다. 정적해석에 사용된 문비 앞뒷면의 압력 값은 유동해석을 통해 구한 값을 사용하였다. 4~6번 문비에서는 표면취수와 선택취수일 때 문비에 작용하는 압력차가 거의 없기 때문에 1~3번 문비에 대하여 안정성을 평가하였다. Table 5는 각 문비에 작용하는 최대압력 값이며 구조적 안정성을 평가하기위해 문비에 작용하는 최대압력을 이용하여 정적해석을 하였다. 그리고 구속조건은 앞의 고유진동수 해석과 같은 조건을 주었다. 또한 선택취수일 경우 1번 문비는 수면위로 5m 드러나기 때문에 풍하중에 의한 영향을 고려하였다. 풍하중은 다음 식을 이용하였다.

$$F=3 \text{ kN/m}^2 \times \text{수면 위 게이트면적} \times 1.2(\text{형상계수}) \quad (7)$$

3.2.2 해석결과

취수조절문비의 개도위치에 따른 2가지 해석조건에 대하여 1~3번 문비에서의 정적해석을 하였으며 Fig. 8은 표면취수일 경우 1번 문비의 해석 결과를 보여준다. 응력 값은 상당응력(Von-Mises Stress)분포로 나타내었으며 그림에서 보는바와 같이 대체로 15 MPa이하의 응력이 발생하였고 수평 빔의 중간 부분과 Main roller와 수직 빔이 만나는 부분에 비교적 높은 응력이 발생하였다. 최대응력은 Main roller와 Main roller의 중간지점에서 25.4 MPa의 응력이 발생하였다. 이는 수문의 항복응력 245 MPa에 비해 훨씬 작은 값이기 때문에 구조적으로 안전하다고 판단된다.

Table 6은 각 문비에서의 최대변형과 최대응력값을 2가지 조건에 대하여 정리한 것이다. 표면취수일 경우 1번 문비에서 최대변형길이와 최대응력값이 다른 문비에 비해 크다. 그 이유는 유동이 1번 문비의 윗부분을 지남에 따라 1번 문비의 앞뒤 면의 차압이 제일 크기 때문이다. 선택취수일 경우에는 2번 문비와 3번 문비

Table 3 Natural frequency of the intake gate(Selection)

Mode	Natural frequency(Hz)		
	1th	2th-5th	6th
1 mode	36.0	70.6	68.0
2 mode	42.4	85.2	81.7
3 mode	49.2	85.3	82.2
4 mode	56.0	85.7	82.4
5 mode	65.6	85.7	82.7

사이로 유동이 지나가는데 유동해석 결과를 보면 2~3번 문비사이의 아래 부분이 유동속도가 크고 또한 차압도 크다. 그 결과로 정적해석에서도 3번 문비에서 최대변형과 최대응력이 발생하였다. 그러나 최대 변형길이가 0.483mm로 거의 변형이 없으며 최대응력값 또한 항복응력 값보다 훨씬 작기 때문에 구조적으로 안전한 판단된다.

Table 4 Natural frequency of the intake gate(Free surface)

Mode	Natural frequency(Hz)			
	1th	2th-3th	4th-5th	6th
1 mode	36.0	53.0	70.6	68.0
2 mode	42.4	62.5	85.2	81.7
3 mode	49.2	69.9	85.3	82.2
4 mode	56.0	84.9	85.7	82.4
5 mode	65.6	85.2	85.7	82.7

Table 5 Max. pressure at each gate

Case	Front(kPa)	Back(kPa)	$\Delta P(kPa)$	Remark
1th Gate	99.1	91.0	8.2	Case 1
	26.0	24.7	1.3	Case 2
2th Gate	155.7	148.8	6.9	Case 1
	83.0	80.7	2.3	Case 2
3th Gate	212.7	206.6	6.1	Case 1
	188.0	181.7	6.4	Case 2

* Case 1 : Free Surface, Case 2 : Selection

Table 6 Max. deformation length and max. stress

Case	DMX(mm)	SMX(MPa)	Remark
1th Gate	0.495	25.4	Case 1
	0.217	11.2	Case 2
2th Gate	0.372	20.7	Case 1
	0.173	8.7	Case 2
3th Gate	0.329	18.3	Case 1
	0.483	24.1	Case 2

* Case 1 : Free-Surface, Case 2 : Selection

4. 결 론

탁수층의 효율적인 취수를 위해 표면취수를 선택취수로 전환하여 취수탑 내의 문비를 2조로 분할하는 방식에 대한 이론적인 최적 설계의 검증은 수행하였다. 이를 위해 수류의 특성에 따른 유동 해석을 수행하고 여기서 구한 결과를 토대로 각 문비에 작용하는 압력을 계산하여 정적 구조해석을 수행하였으며 각 문비에 대한 고유진동수도 계산하였다. 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선택취수의 경우가 표면취수 보다 탁수층의 유동을 방출하는 데 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 그리고 같은 선택취수의 경우에도 탁수층의 위치에 따른 적절한 문비의 배치가 그 방류 효율을 높이기 위해 고려되어야 할 사항으로 사료된다.
- 2) 유동해석을 통한 유체의 가진주파수가 1Hz 이내 인데 반하여 수문의 고유진동수는 수 십 Hz 이므로 공진으로 인한 파괴로부터 안전한 것으로 판단된다.
- 3) 표면취수나 선택취수일 경우 수압에 의해 발생되는 문비의 최대 응력은 문비의 허용응력의 약 10% 정도 밖에 되지 않으므로 구조적으로 안전하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) 한국수자원공사, 2005, “용담댐 표면취수설비 개량 사업 실시설계 추진계획 보고서”.
- (2) 허춘근, 권혁기, 김종호, 2004, “용수로 댐 취수탑의 안정성 평가에 관한 연구,” 한국구조물진단학회 학술발표대회 논문집, pp. 285~291.
- (3) 이갑수, 김진태, 이상현, 강민구, 고성호, 2006, “수력 댐 표면취수설비의 유동 및 진동해석에 대한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 515~519.

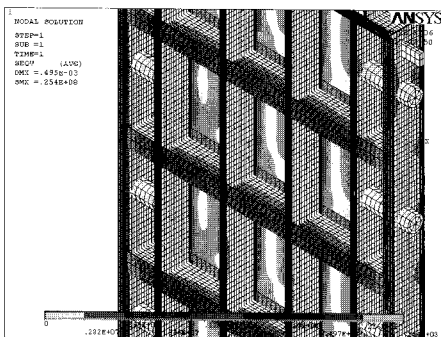


Fig. 8 Von-mises stress distribution of 1th gate