

중공 단면을 갖는 취수탑의 내진 안전성 평가

배정주 · 김용곤^{†*} · 이지호^{**} · 한상훈^{***}

시설안전기술공단 · ^{*}한경대학교 안전공학과 · ^{**}동국대학교 토목환경공학과 · ^{***}충북대학교 토목공학과
(2009. 1. 12. 접수 / 2009. 4. 2. 채택)

Seismic Safety Analysis of Intake Tower with Hollow Inside Section

Jungjoo Bae · Yongon Kim^{†*} · Jeeho Lee^{**} · Sang-Hoon Han^{***}

Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

^{*}Department of Safety Engineering, Hankyong National University

^{**}Department of Civil and Environmental Engineering, Dong-guk University

^{***}Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received January 12, 2009 / Accepted April 2, 2009)

Abstract : Seismic Safety Analysis of Intake Tower is very important because failure of intake tower may incur huge chaos on the modern society. Recently, there has been growing much concern about earthquake resistance of existing structures. This research demonstrates the dynamic fluid pressure calculation using added mass simulation. The actual safety evaluation has been conducted through not only the static analysis but also the dynamic analysis. According to the analysis results, the vibration incurred by earthquake may induce considerable damage to the hydraulic structure. Therefore, the appropriate design process out of exact calculation is quite necessary.

Key Words : intake tower, hydraulic structure, seismic analysis, added mass simulation

1. 서론

취수탑은 하류에 용수를 공급하기 위해 저수지 내에 독립적으로 축조된 구조물로서 상단부는 권양시설 및 연결교량 등이 설치되어 있고, 하단부는 복통과 연결되어 있다. 본 취수탑의 안전성 평가는 정적해석과 지진을 고려한 동적해석을 수행하였으며, 하중은 자중, 권양시설, 연락교량 및 정수압등을 고려하였다. 상수도 시설은 수원에서부터 각 가정의 급수장치에 이르기까지 광범위한 지역에 분포되어 있으며 토목구조물, 관로, 전기 및 기계설비, 건축구조물 등 다양한 구조물이나 설비로 구성되어 있다. 상수도 시설을 포함한 국내의 Lifeline은 대부분 관련기준이 미흡하여 내진 준비태세가 열악한 실정이다. 따라서 상수도 시설에 대한 지진영향을 정확히 평가하여 내진설계가 필요한 주요시설물에 대한 합리적인 내진설계 기준을 정립하고 기존의 내진설계 대상시설의 내진성능 향상 대책을 수

립하는 것이 국가적으로 시급한 과제라 하겠다. 본 논문에서는 지진을 고려한 동적해석에서는 권양시설, 동수압 등을 질량(mass)으로 치환하여 적용하였으며, 지진력은건설교통부¹⁾의 “기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령”에 따라 설계응답스펙트럼을 적용하여 안전성평가를 수행하였다.

2. 정적해석

본 취수탑은 높이 26.9m의 원형단면을 갖는 구조로 상단에 권양시설과 연결교량이 연결되어 있으며, 단면은 Fig. 1과 같다.

해석모델은 Solid 요소를 이용한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 해석모델은 탄성범위 내에서 거동한다고 가정하였다. 또한, 프로그램은 범용적이고 다양한 하중조건을 고려한 모델링과 전처리(Pre-Processor) 및 후처리(Post-Processor)가 용이한 MIDAS를 이용하였다. 모델링은 구조물의 기하학적 형상과 응력 집중부위 등을 고려하여 절점(Node) 13,179개, 요소(Solid) 9,041개로 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 취수탑 하부기초의 경계조건은

[†]To whom correspondence should be addressed.
yongon@hknu.ac.kr

고정단으로 가정하였다.

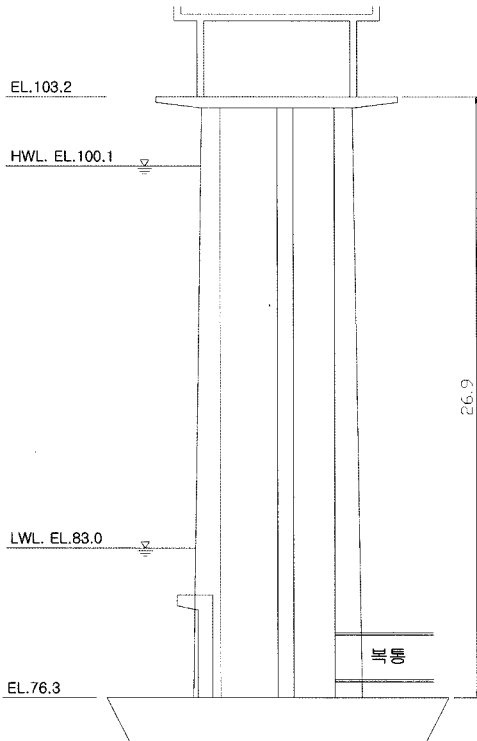


Fig. 1. Intake tower schematic diagram,

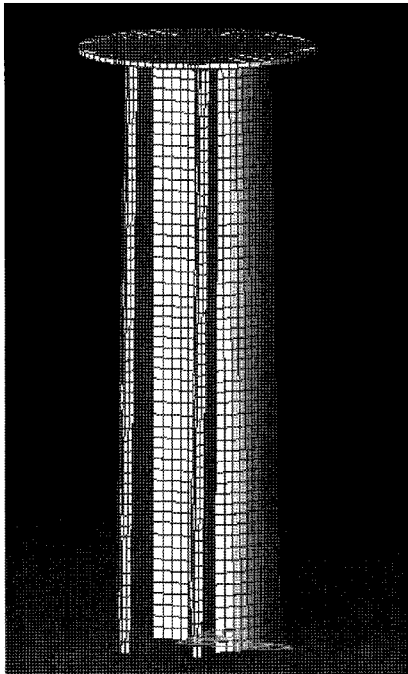


Fig. 2. Analysis model.

Table 1. Material property of concrete

	Compressive strength (MPa)	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio
Concrete	17.7	22.54	1.89 x 10 ⁴	0.17

Table 2. Load applied (unit : kN)

Type of load	Load
Pulling weight	173
Bridge connected	108
Room for pulling weight	364

해석을 수행하기 위한 입력 물성치는 Table 1과 같이 콘크리트의 단위중량, 탄성계수 및 포와송비 등으로 금회 코어채취를 통하여 얻은 결과를 분석하여 적용 하였다.

또한, 취수탑에 작용하는 하중은 취수탑의 자중, 연결교량, 권양시설, 정수압 등으로 하중조건은 수위변화에 따라 달라지므로 상시만수위(EL.100.1m)와 사수위(EL.83.0m)로 구분하여 적용하였다. 기타 하중은 문헌, 도면 등을 통하여 Table 2와 같이 산정하였다.

콘크리트 허용응력은 한국콘크리트학회²⁾의 “콘크리트 구조설계기준”과 건설교통부³⁾의 “댐 설계기준”에 의해 Table 3과 같이 산정하였다.

정적해석 결과는 Table 4와 Fig. 3에 나타내었으며 콘크리트에 발생하는 응력은 상부 권양시설 및 기타 하중에 의해서 상부 슬래브 및 취수구 유입부에서 최대 및 최소 주응력이 발생 하나 모두 허용범위 이내 이므로 구조물의 안전성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

Table 3. Allowable strength of concrete (unit : MPa)

	Compressive strength (f_{ck})	Allowable compressive strength (f_{ca})	Allowable tensile strength (f_{ta})	Modulus of rupture (f_{cr})
Concrete	17.7	7.08	0.56	2.66

Table 4. Static analysis results (unit : MPa)

	Tensile strength			Compressive strength		
	Max. st.	Allow. st.	portion	Min. st.	Allow. st.	portion
Case-1 (HWL)	0.39	0.56	Upper slab	0.66	7.08	Inside wall
Case-2 (LWL)	0.39	0.56	Upper slab	0.63	7.08	Intake entrance

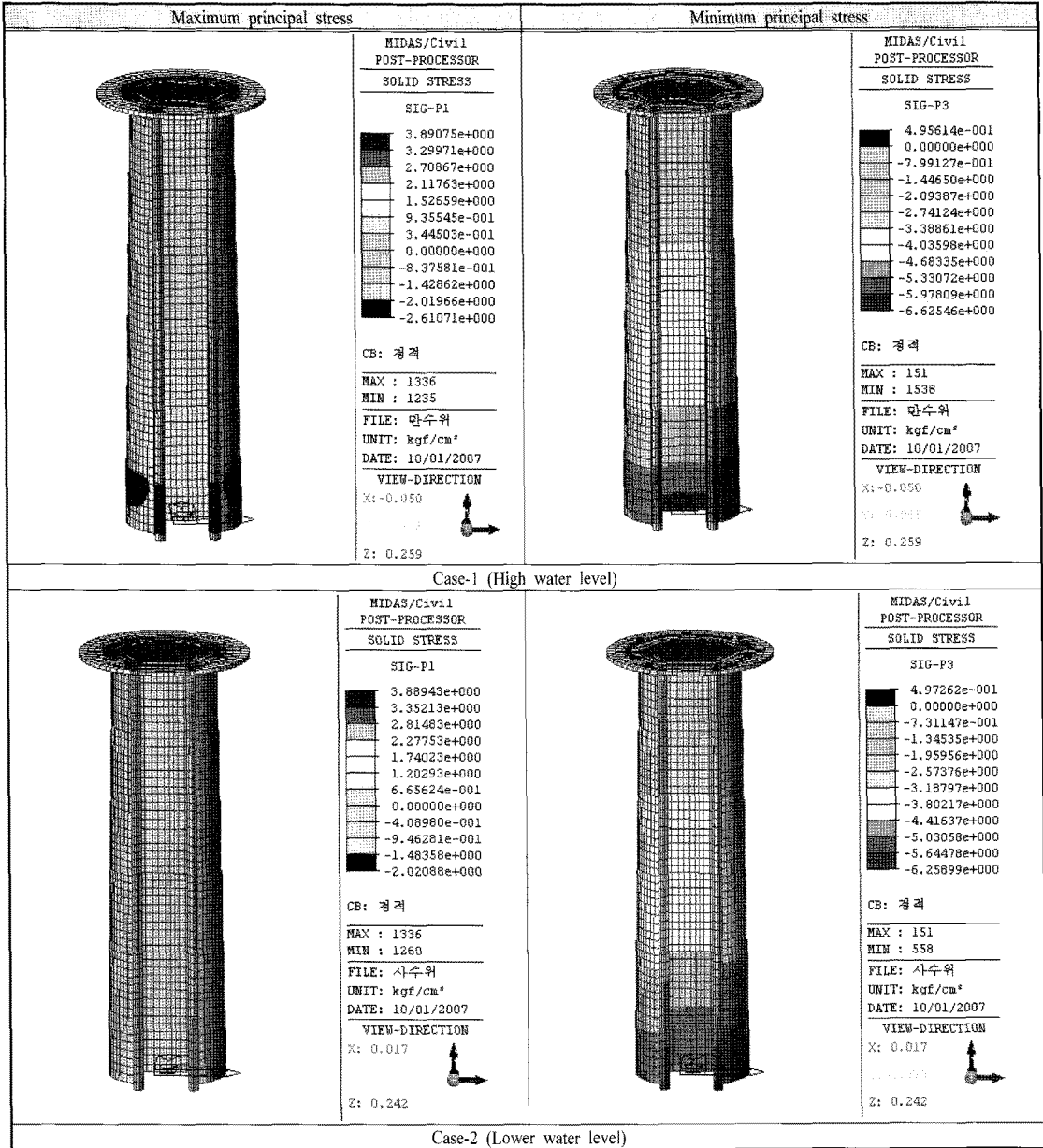


Fig. 3. Static analysis results.

3. 내진 해석

지진해석은 현재까지 지진의 영향을 증가의 정적 하중으로 환산한 유사정적해석법이 일반적이다. 이 방법은 지진력 산정의 편리성, 해석의 간편성, 시간 및 경제성 등에서 유리한 반면, 구조물 및 지진의 동적특성을 고려할 수 없고 해석방법의 단순화로 부정확성을 포함하고 있기 때문에 해석결과의 신뢰도가 떨어진다고 알려져 있다. 특히, 취수탑은 기하

학적 형상에 의해 지진 발생시 관성력이 크게 작용하여 안전성이 취약할 것으로 예상된다. 따라서, 지진에 대한 안전성 평가를 건설교통부⁴⁾의 “댐설계기준”과 “기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령” 등의 문헌에 따라 응답스펙트럼 해석방법을 적용하여 수행하였다.

시설물의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라 내진 특등급, 내진 I등급, 내진 II등급의 3가지 등급

Table 5. Earthquake coefficient (I)

Recurring period (Year)	50	100	200	500	1000
Coefficient, I	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4

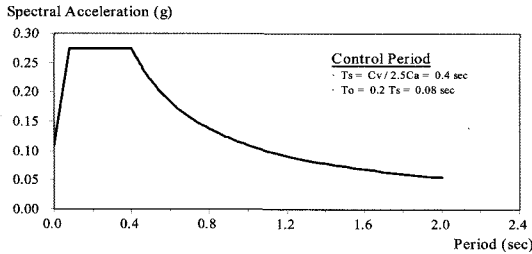


Fig. 4. Standard response spectrum.

으로 분류되며, 본 취수탑은 붕괴방지 수준의 내진 I등급으로 선정하여 500년 빈도의 재현주기를 적용하였다. 설계지반 운동은 지진 I구역이므로 구역계수 0.11을 적용 하였다. 평균재현주기에 따른 지진의 최대유효지반가속도는 Table 5와 같이 위험도 계수로 나타내며, 본 취수탑은 500년 빈도의 재현주기를 적용하였다.

설계지반운동의 특성은 기본적으로 표준설계 응답스펙트럼으로 표현할 수 있으며, 5% 감쇠비에 대한 표준설계 응답스펙트럼은 Fig. 4와 같다.

취수탑에 작용하는 하중은 취수탑 자중, 연결교량, 정수압, 권양시설, 동수압 등이 있으며, 하중조건은 만수위와 사수위를 적용하였다. 동수압과 권양시설물은 질량으로 치환하여 관성력에 영향을 받도록 모델링 하였으며, 특히 동수압은 지진발생시 유체가 취수탑에 부가되어 취수탑과 일체로 거동하는 것처럼 나타나므로 취수탑에 가해주는 부가질량으로 근사화하여 적용하였으며, 근거는 김용곤⁹⁾의 “동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가”와 환경부⁶⁾에서 발간한 “상수도 시설 내진설계기준마련을 위한 연구”를 준용하였다. 또한, 지진하중은 대상구조물에 임의의 방향으로 작용하게 되지만 해석의 편의를 위하여 설계응답스펙트럼은 세 개의 직교방향 성분으로 각각 독립된 입력 운동에 대한 응답을 구한 다음, 이들 세 성분에 의한 응답을 조합하여 방향성을 고려하고 있다. 따라서, 지반운동의 방향성을 X, Y, Z 방향 중에 한 방향을 기준으로, 나머지 두 방향은 30%를 적용하여 다음과 같은 3가지 경우로 분류하였다.

Case-1 : X축(취수구방향)방향으로의 지진영향의 100%, Y축(취수구직각방향)방향으로의 지진영향의 30%, Z축(연직)방향 지진영

향의 30%를 조합

Case-2 : X축방향으로의 지진영향의 30%, Y축방향으로의 지진영향의 100%, Z축방향 지진영향의 30%를 조합

Case-3 : X축방향으로의 지진영향의 30%, Y축방향으로의 지진영향의 30%, Z축방향 지진영향의 100%를 조합

본 해석은 자유도가 2개 이상인 다자유도 시스템으로 계산하였으며, 이에 대한 모드별 해석결과와 조합(Modal Combination)은 모드간 확률적인 상관도를 고려할 수 있도록 고안된 CQC(Complete Quadratic Combination)방법을 이용하였다. 한편, 지진력은 3개의 직교축으로 동시에 발생하는 지반운동으로 적용하였으며, 이 중 연직방향의 지반운동은 수평방향의 지반운동에 비해 구조물에 미치는 영향이 크지 않으므로 수평방향의 1/2를 적용하였다.

지진시는 콘크리트의 변형률 속도가 매우 커서 허용응력이 증가하게 되며, “뎀설계기준”에서는 정적해석의 경우보다 30% 증가하도록 제시하고 있다. 이에 따라 콘크리트의 허용응력을 Table 6과 같이 산정하였다.

고유치는 구조물이 가지고 있는 고유한 특성으로 강성과 질량의 함수로 표현되며, 설계응답스펙트럼 해석시 선형 다자유도 진동계의 지진응답은 각 진동모드를 중첩하여 계산한다. 다중모드 스펙트럼 해석결과는 해석모형에 대한 고유 진동모드의 개수에 따라 달라지므로 해석모형의 정확도를 확보하기 위하여 적정 수준의 질량 참여도 여부를 90% 이상 확인하여야 한다. 이에 따른 모드형상은 총 70개이며 그중 60개를 Table 7에 나타내었다.

또한, 고유치 해석결과 X방향의 기본주기(Fundamental Period)는 0.24초에서 58.00%로 나타났고, Y방향은 0.225초에서 57.43%, Z방향은 0.036초에서 74.87%로 나타났다.

만수위 조건에서의 지진해석결과를 Table 8과 Fig. 5에 나타내었으며, 지진 방향성에 대한 응력은 연직방향에 비하여 두 수평방향 지진시 크게 나타났으며, 특히 취수구 방향의 지진 방향성에 큰 응력을 나타내었다. 압축응력은 모두 허용응력 범위 이내

Table 6. Allowable dynamic concrete strength (unit : MPa)

	Compressive strength (f_{ck})	Allowable compressive strength (f_{cd})	Allowable tensile strength (f_{td})	Modulus of rupture (f_{cr})
Concrete	17.7	9.204	0.726	2.661

Table 7. Resonant frequency of intake tower

Mode No	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	Tran-X		Tran-Y		Tran-Z	
			Mass(%)	Sum(%)	Mass(%)	Sum(%)	Mass(%)	Sum(%)
1	4.175	0.240	58.00	58.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	4.437	0.225	0.00	58.00	57.43	57.43	0.00	0.00
3	11.045	0.091	0.09	58.09	0.00	57.43	0.00	0.00
4	15.649	0.064	18.73	76.82	0.00	57.43	0.00	0.00
5	18.202	0.055	0.00	76.82	14.84	72.27	0.01	0.02
6	21.717	0.046	0.00	76.82	7.64	79.91	0.03	0.05
7	24.581	0.041	0.13	76.95	0.00	79.91	0.00	0.05
8	24.991	0.040	3.14	80.09	0.00	79.91	0.00	0.05
9	25.134	0.040	0.03	80.12	0.45	80.36	0.13	0.18
10	27.943	0.036	0.00	80.12	0.00	80.36	74.87	75.05
11	32.493	0.031	3.68	83.80	0.00	80.36	0.00	75.05
12	33.548	0.030	0.00	83.80	0.29	80.65	0.05	75.10
13	34.675	0.029	0.03	83.83	0.00	80.65	0.00	75.10
14	40.316	0.025	2.77	86.60	0.11	80.76	0.01	75.11
15	40.549	0.025	0.07	86.68	4.96	85.72	0.17	75.27
:	:	:	:	:	:	:	:	:
50	92.819	0.011	0.20	93.22	0.00	93.30	0.00	88.37
51	94.314	0.011	0.00	93.22	0.06	93.37	0.30	88.67
52	97.733	0.010	0.64	93.86	0.00	93.37	0.00	88.67
53	98.045	0.010	0.00	93.86	0.00	93.37	0.01	88.68
54	100.718	0.010	0.04	93.91	0.00	93.37	0.00	88.68
55	101.686	0.010	0.00	93.91	0.29	93.66	0.12	88.80
56	103.904	0.010	0.05	93.96	0.00	93.66	0.00	88.80
57	104.972	0.010	0.00	93.96	0.01	93.67	0.03	88.83
58	105.478	0.009	0.00	93.96	0.35	94.03	0.02	88.84
59	106.250	0.009	0.27	94.23	0.00	94.03	0.00	88.84
60	107.510	0.009	0.01	94.24	0.04	94.07	0.00	88.85

Table 8. Dynamic analysis results of high water level

	Principal stress		Allowable stress		Modulus of rupture
	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	
Case-1	2.295	3.493	0.726	9.204	2.661
Case-2	2.865	3.638			
Case-3	2.202	3.349			

에 있는 것으로 나타났으나, 인장응력은 취수구(Y 축방향-Case-2)하단부에서 균열응력을 초과하며, 응력이 크게 발생하는 부위는 취수탑과 기초지반이 접하는 부분이다. 이 부분은 취수탑의 자중과 동수압에 의한 관성력으로 큰 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다.

사수위 조건에서의 지진해석 결과는 Table 9와 Fig. 6에 나타내었으며, 지진 방향성에 대한 응력은 만수위 조건과 마찬가지로 연직방향에 비하여 두 수평방향 지진이 크게 나타났다. 압축응력은 모두 허용응력 범위 이내에 있는 것으로 나타났으며, 인장응력은 허용응력을 초과하나 균열응력 이내로 지진 발생시 균열은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

Table 9. Dynamic analysis results of low water level

	Principal stress		Allowable stress		Modulus of rupture
	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	
Case-1	1.503	2.791	0.73	7.20	2.67
Case-2	2.128	2.326			
Case-3	0.447	1.376			

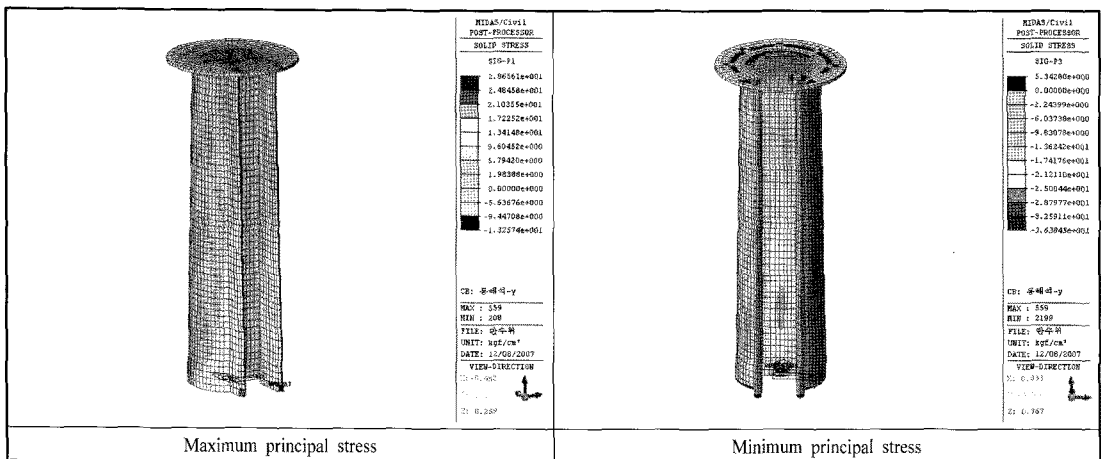


Fig. 5. Case-2 (High Water Level).

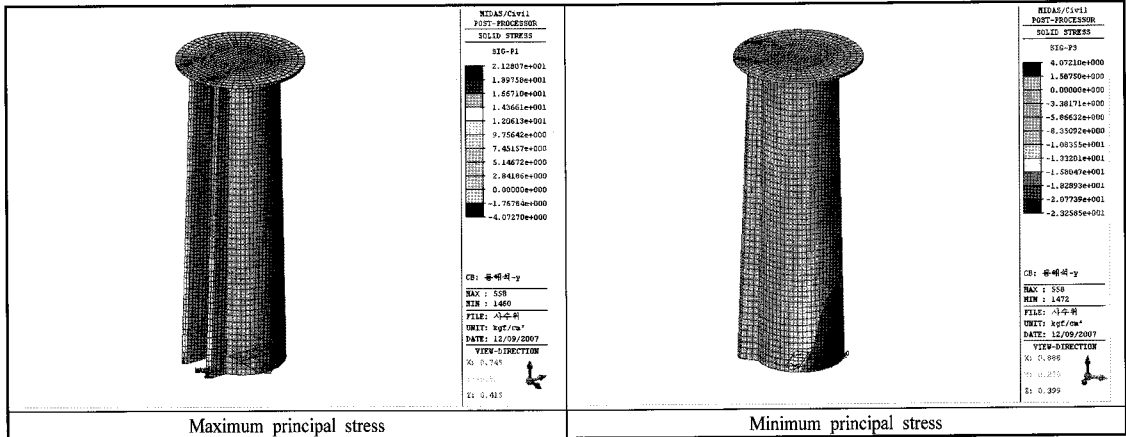


Fig. 6. Case-2 (Low water level).

단면검토는 MIDAS/Set 을 이용하여 최대응력부의 단면형상 및 철근을 모델링하여 단면 2차 모멘트 및 설계모멘트, 설계축력 등을 산출하고, MIDAS/Civil의 결과 응력을 모멘트로 환산하여 Fig. 7, 8과 같이 비교한 결과 X-방향 지진시 취수탑저면 응력이 최대 발생부 단면에 대한 P-M 상관분석한 결과 단면력 비가 0.653으로 1 이하로 나타나 안전한 것으로 평가 되었다. 또한, 응력검토결과 균열응력을

초과하는 Y-방향 지진시의 단면력을 비교한 결과 단면력 비가 0.701로 안전한 것으로 나타났다.

4. 결론

이상과 같이 취수탑에 작용하는 하중들을 고려하여 정적 및 동적해석을 통한 안전성 평가를 실시 하였다. 동수압의 영향을 고려해주기 위해 유사정

Check Axial and Moment Capacity

Rotation Angle and Depth to the Neutral Axis $\theta = -71.76^\circ$, $c = 72.01$ cm

Strength Reduction Factor $\phi = 0.8404$

Maximum Axial Load $\phi P_{n(max)} = 22320.38$ tf

Design Axial Load Strength $\phi P_n = 1337.03$ tf

Design Moment Strength $\phi M_{ax} = 9088.65$ tf-m

$\phi M_{ny} = 3084.66$ tf-m

Strength Ratio : Applied/Design = 0.653 < 1.000 O.K

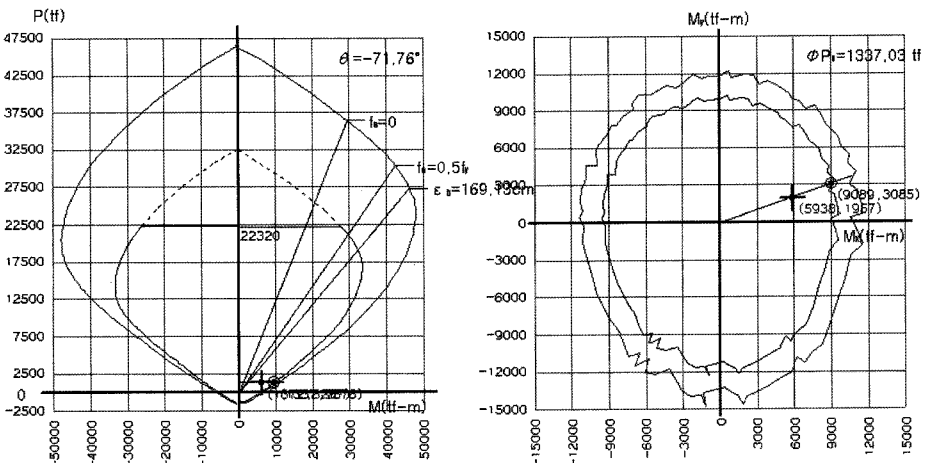


Fig. 7. P-M Diagram (high water level_X-direction).

Check Axial and Moment Capacity

Rotation Angle and Depth to the Neutral Axis $\theta = -11.98^\circ$, $c = 75.18$ cm

Strength Reduction Factor $\phi = 0.8436$

Maximum Axial Load $\phi P_{n(max)} = 22320.38$ tf

Design Axial Load Strength $\phi P_n = 1265.91$ tf

Design Moment Strength $\phi M_{nx} = 1972.98$ tf-m

$\phi M_{ny} = 9630.19$ tf-m

Strength Ratio : Applied/Design = 0.701 < 1.000 O.K

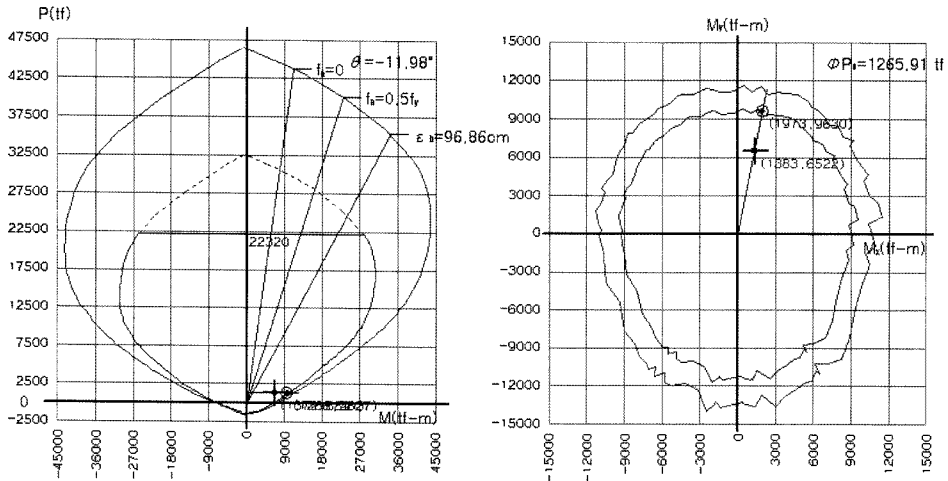


Fig. 8. P-M Diagram (high water level_Y-direction).

적해석이 아닌 부가질량법을 이용한 동력학적 해석이 성공적으로 수행되었으며 만수위 및 사수위시 지진에 의해 발생하는 가장 큰 인장응력은 만수위시 취수구 방향 지진에 대해 취수구 입구 부분에서 발생하며 균열응력을 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 검토한 모델링은 철근을 고려한 해석이 아니므로 만수위시 Y방향 지진이 발생하는 경우에 대하여 최대 응력부 단면에 대한 단면검토를 실시하였으며 P-M 상관도를 작성하여 단면력을 검토한 결과 최종적인 안전에 대한 결론을 내릴 수 있게 되었다.

참고문헌

- 1) 건설교통부, 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령, 2004.
- 2) 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 2007.
- 3) 건설교통부, 댐 설계기준, 2005.
- 4) 건설교통부, 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령, 2004.
- 5) 김용곤, “동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가”, 한국안전학회지, 제21권, 제1호, pp. 120~132, 2006.
- 6) 환경부, 상수도 시설 내진설계기준마련을 위한 연구, 1999.