2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

회전망 여과장치의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Thru-Flow Type TWS

황석환, 최재승
두산중공업 기술연구원
경남 창원시 귀곡동 555

요 약

원자력 발전용 회전 여과망 장치의 동적 내진 검증을 유한요소 해석에 의해서 실시한다. 장치는 범용 유한 요소 해석 프로그램을 사용해서 수학적 모델링을 완성하고, 자중, 최대 수압하중, 구동장치의 토크 하중, 지진 관성 하중, Pipe Nozzle Loads등을 해석에 포함 시킨다. 모드 해석 결과에 따라서 동적 내진 검증을 수행하고 SRSS 방법이 적용된다.

Abstract

The dynamic qualification of the structure of the traveling water screen for nuclear power plant will be accomplished by analysis using finite element model of the equipment. The equipment will be mathematically modeled by finite elements using ANSYS, version 5.5. All operating loads on the equipment to be qualified which could be present during the seismic event will be included in the analysis. These loads will include dead weight, maximum traveling screen load, torque load of the drive unit, seismic inertia load and pipe nozzle loads. Depending on the results of modal analysis, the dynamic qualification will proceed. Three components of earthquake motion are combined by taking the square root of the sum of the squares(SRSS).

1. 서 론

취수설비란 발전소, 석유화학, 제철, 담수 및 각종 산업 플랜트의 주기기인 콘덴서 및 열 교환기 등에 필요한 냉각수를 얻기 위하여 해수 및 담수로부터 이물질이나 수중 생물들을 걸러주는 기기들로 이루어진 설비를 말한다. 특히 Traveling Water Screen (TWS)는 주요 취수설비 중의 하나로 비교적 큰 찌꺼기를 제거하는 1차

여과망(Trash Rack)을 통과한 10mm 이상의 작은 찌꺼기를 거르는 회전형 스크린 장치이다.

20세기에 들어와서 세계적으로 지진활동이 다시 활발해지고 있으며 그에 따른 피해 또한 크게 발생하고 있다. 지진에 대하여 구조물 및 국가기반 시설물들이 안전하도록 하기 위해서는 내진설계 기술이 절대적으로 필요하다. 특히 원자력 발전소의 안전관련 기기들은 만약의 사고시 그 피해가 엄청나므로 내진설계 규정이 보다 엄격하다고 할 수 있다. 그러므로 원자력 발전소 적용 품목 중 품질 등급 Q-Class에 해당되는 TWS는 구조 설계 시 안정성을 검증하기 위하여 통상 내진해석을 수행한다. 1), 2)

본 연구에서는 원자력 발전용 TWS 설비 전체 구조물의 내진해석을 수행하여 구조물의 안전성 여부를 판단하고자 한다. 본 연구에서 수행한 TWS는 Thru-Flow Type으로서 Center-Flow Type과는 그 기본 구조가 다르며, 해석 방법에 있어서도 차이가 있다. Center-Flow Type TWS는 전체 프레임 구조가 따로 없기 때문에 각 부품 별로 해석을 수행하여 구조물의 안전성 여부를 판단하는데 반해 Thru-Flow Type TWS는 통상적으로 전체 프레임을 한 번에 모델링하여 내진해석을 수행하고 안전성 여부를 판단한다. Thru-Flow Type TWS를 **Fig.1**에 나타내었다.

2. 내진해석 절차

2.1 내진해석의 정의

최근 세계의 여러 지역에서 지진에 의한 막대한 인명 및 재산상의 피해가 발생하고 있으며, 이로 인하여 원자력 발전소를 포함한 중요 산업 시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심의 초점이 되고 있다. 현재 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 중요 안전 관련 시설물에 대해 내진 설계 규정을 제정하여 시설물의 설계 및 시공 시 이를 적용하고 있다. 특히 원자력 발전소의 경우 만약의 사고 발생시 방사능 물질의 유출로 인해 인명 및 재산상의 피해는 물론 환경에 막대한 피해를 입힐 수 있으므로 다른 산업 시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 내진해석 및 설계 요건을 적용하고 있다. 3)

원자력 발전소의 안전 관련 기기 중 안전등급에 해당되는 기기들은 정상적으로 운전될 때의 환경뿐만 아니라 운전 중 예상되는 극한 상황 및 발전소의 설계기준 사고로 인하여 발생될 수 있는 환경 하에서도 정상적으로 운전 가능하도록 설계되어야 하며 이러한 일련의 입증 과정을 내진검증(Seismic Qualification)이라고 한다. 4)

내진검증은 크게 내진해석과 내진실험으로 구분된다. 내진검증에서 가장 이상적인 것은 대상 구조물 전체를 내진실험하는 것이지만, 이 경우 완제품을 미리 만들어야

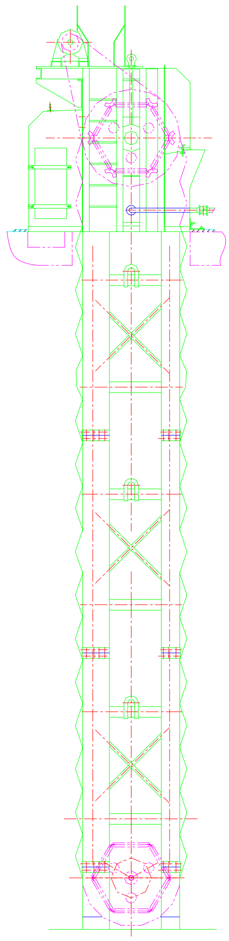

Fig.1 Thru-Flow Type TWS

한다는 점과 제품의 설계변경이 어렵다는 점 때문에 제약조건이 따른다. 그러므로 내진해석을 통해 전체 구조물의 지진력에 대한 안전성을 파악하고 내진해석이 어려운 일부 부품 및 시스템을 내진실험을 통해 안전성을 파악하는 것이 일반적인 방법이다.

내진해석의 방법에는 해석 대상이 강체기기인가 유연체기기인가에 따라 정적해석과 동적해석으로 구분되며, 또 동적해석은 보수적 해석 적용의 유무에 따라 단순동적해석과 상세동적해석으로 나뉘어진다. 내진해석을 위하여 먼저 구조물의 유한요소 모델을 생성하고 자유진동해석(Modal Analysis)을 수행하여 고유진동수를 구한다. 여기서 구한 구조물의 기본 고유진동수(Fundamental Natural Frequency)에 따라 다음의 세 가지 해석 방법이 있다.

1) 정적해석(Static Analysis)

구조물의 기본 고유진동수가 50 Hz 보다 큰 경우로써 구조물을 강체(Rigid) 운동으로 간주할 수 있다. 전체 질량에 작용하는 동적 지진 가속도 레벨(Dynamic Seismic Acceleration Level)은 ZPA(Zero Period Acceleration)에 해당한다.

2) 단순동적해석(Simplified Dynamic Analysis)

이 방법은 구조물의 기본 고유진동수가 50 Hz 보다 작은 경우에 적용되며, 구조물이 강체가 아니라 유연체(Flexible)인 것만 제외하고 정적해석과 동일하다. 전체 질량에 작용하는 동적 지진 가속도 레벨은 구조물의 기본 고유진동수에 해당하는 최대 가속도 값이고, 고차 모드 질량 기여율을 고려하여 응답 가속도(Response Acceleration)에 1.5의 Factor를 사용한다.

3) 상세동적해석(Detailed Dynamic Analysis)

이 방법은 구조물의 고유진동수와 진동 형상을 구하기 위해 자유진동해석을 수행하고, 고유진동수가 0부터 50 Hz 사이에 해당하는 응답 가속도를 구하기 위해 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum, FRS)을 사용한다. 구조물의 응력과 변형은 각 고유진동수에서의 자유진동해석 결과를 근거로 계산되어진다. 이 경우 식 (1)의 SRSS(Square Root of Sum of Square)법에 따라 50 Hz 미만의 각 모드에 해당되는 응답의 제곱의 합에 대한 제곱근의 값으로 조합된다.

$$R = \left(\sum_{k=1}^{N} R_k^{\ 2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

여기서, R_k는 k번째 모드(Mode)의 응답이고, N은 고려되어진 모드의 수이다. 5), 6) 본 연구에서는 일반적으로 원자력 안전성 관련 기기 검증이 보수적으로 수행되는 점을 고려하여 보수적이면서 신속한 해석 방법인 단순동적해석 방법을 적용하였다.

2.2 내진해석의 운전조건

원자력 발전소의 설계를 위해서는 그 크기가 다른 두 가지 입력지진, 즉 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE)과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)을 정하여 설계입력으로 사용하고 있다. 운전기준지진은 발전소 수명 기간 중 1~2회 정도 발생할 가능성이 있는 상대적으로 작은 크기의

지진으로서, 이 지진 시에도 발전소의 안전 관련 시설물들은 계속적으로 정상적인 운전이 가능하도록 설계되어야 한다. 이에 반하여 안전정지지진이란 발전소 부지에서 발생 가능한 최대 잠재 지진으로서, 그 발생 확률이 1,000년 ~ 10,000년에 한 번 정도로 발생 확률이 지극히 낮은 지진이다. 이 때, 발전소의 안전 관련 시설물들은 안전정지지진의 발생 시에도 원자로의 안전한 가동 정지를 위하여 구조 및 기능적인 건전성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.

내진해석에 사용되는 운전조건은 일반적으로 Normal Condition, Upset Condition, Faulted Condition으로 구분된다. Normal Condition은 일반운전조건하의 해석을 말하며, Upset Condition은 OBE 지진력을 바탕으로 한 가진력의 조합이며, Faulted Condition은 SSE 지진력을 바탕으로 한 가진력의 조합이다.7)

해석에 사용되는 지진가속도는 해당 지역의 층응답스펙트럼을 이용하여 구한다. 이 때 사용된 댐핑(Damping) 조건은 OBE의 경우 2%, SSE의 경우 3%를 사용하였다. 지진가속도 외에 TWS 자중과 운전 토크에 의한 외력도 함께 고려하였으며, 각 방향 지진가속도에 의한 응력의 조합은 SRSS 방법을 적용하였다.

3. TWS 의 유한요소 모델링

3.1 유한요소 모델

해석 대상인 원자력 발전용 Traveling Water Screen은 Thru-Flow Type으로서 구조물 모델링은 I-DEAS를 사용하였으며, 전체 유한요소 모델을 **Fig.2**에 나타내었다. 유한요소 모델의 좌표계는 물이 흐르는 방향을 X방향, 중력이 작용하는 방향을 –Y방향, 그 나머지를 Z방향으로 정의하였다. 유한요소 모델링은 대부분 Beam과 Shell Element로 구성하였으며, Motor/Reducer, Driving Unit Assembly, Driven Sprocket Assembly, Head Sprocket, Foot Sprocket, Spray Pipe Assembly, Capstan Assembly, Basket & Carrier Chain Assembly 등은 Mass Element를 사용하여 그 무게가 자중의 형태로 구조물에 작용할 수 있도록 하였다. 그리고 Head Section Frame과 Front/Rear Post Frame은 Shell Element를 사용하였다. 유한요소 모델의 총 요소 수는 11,102개이고, 총 절점 수는 11,600개이다.

모델링에 사용된 재질은 Austenitic Stainless Steel Type 316과 316L의 두 종류를 사용하였다. 316이 316L보다 더 강한 재질로서 Head Shaft와 Foot Shaft에 적용되었고, 나머지 모든 Beam과 Shell Element는 316L을 사용하였다. 두 재료의 물성치를 **Table 1**에 정리하였다.

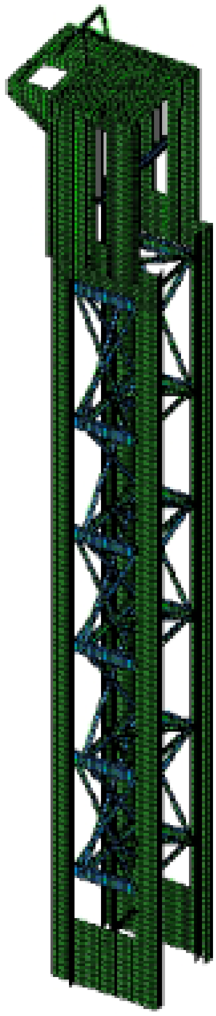

Fig. 2 Finite Element Model of TWS

Table 1 Material Properties

Property	316L	316
Ultimate Strength (MPa)	485	520
Yield Strength (MPa)	170	205
Modulus of Elastisity (MPa)	193	205
Weight Density (kg/m^3)	7,917	7,917
Poisson’s Ratio	0.27	0.27

3.2 경계조건

해석에 사용된 TWS는 Thru-Flow Type으로서 전체 길이가 11,948mm이며, 위 쪽의 2,118mm 부분이 지상에 나와 있고 그 나머지 부분은 지면 아래에 있다. 구조물은 Front Post Frame과 Rear Post Frame의 제일 아래쪽 네 곳은 Y방향으로만 구속되어 있고, 지면 아래 부분의 양 쪽의 Front Post Frame은 모두 X방향으로 구속되어 있어서 수압에 의한 하중을 지탱하고 있으며 한 쪽의 Front Post Frame은 Z방향으로도 구속되어 있다.

4. 해석 결과

4.1 자유진동해석

TWS의 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 구조물의 자유진동해석(Modal Analysis)을 수행한 결과 1차 모드에서는 구조물의 Local Mode가 나타났으며, 질량기여율(Mass Participation Factor)도 상대적으로 낮게 나왔다. 그러므로 질량기여율이 상대적으로 높으며 전체 구조물의 거동에 비교적 큰 영향을 미치는 기본 고유진동수(Global Fundamental Natural Frequency)를 6.672 Hz로 선정하고, 그 모드 형상을 **Fig.3**에 나타내었다. 해석 대상인 TWS 구조물의 지면 아래 부분은 Y방향을 따라서 X방향과 Z방향으로 구속되어 있으므로 전체적인 변형이 없으며, 지상으로 나와 있는 부분 중에서 Z방향으로의 전체적인 변화 양상을 보이는 첫번째 모드가 2차 모드이다.

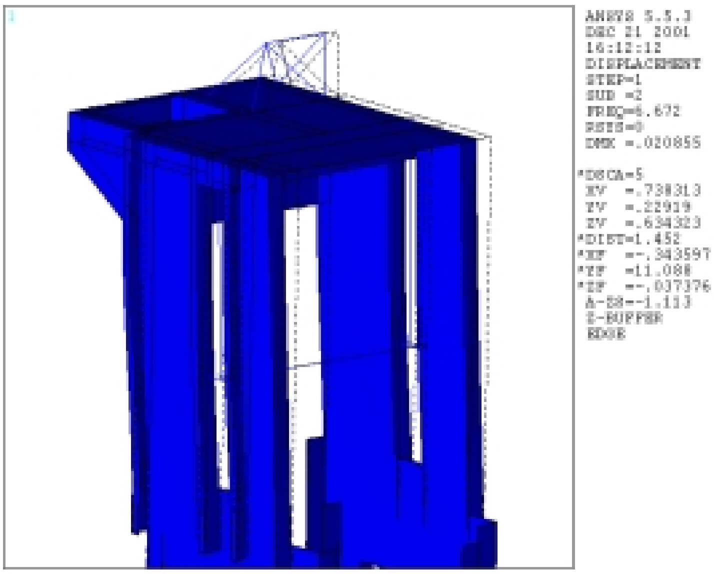

Fig.3 2nd Mode Shape of TWS

4.2 단순동적해석

TWS 구조물의 Normal Condition에 대해서는 자중과 모든 Operating Load를 적용하여 유한요소 해석을 수행하였으며, Operating Load에 사용된 수압은 1.5 m 수두일 때의 하중을 적용하였다. Upset Condition과 Faulted Condition은 Normal Condition에 단순동적해석에 의한 Seismic Loading을 추가하였다. 각 운전조건에 대한 하중 조합을 **Table 2**에 나타내었다.

Seismic Loading을 적용하기 위하여 사용된 지진가속도는 해당 원자력 발전소의 Floor Response Spectrum을 사용하였으며, **Fig.4**는 OBE와 SSE에 대한 각 방향의 Floor Response Spectrum중 한 예를 나타내었다. 이 때 사용된 댐핑(Damping) 조건은 기술사양서에 따라 OBE의 경우 2%, SSE의 경우 3%를 사용하였다. 해석에 사용된 OBE와 SSE에 대한 Fundamental Natural Frequency인 6.672 Hz에 해당하는 각 방향의 지진가속도를 **Table 3**에 정리하였다. 그리고 단순동적해석이므로 이 가속도 값에 1.5의 Factor를 곱해서 사용하였다. 각 방향 지진가속도에 의한 응력의 조합은 SRSS 방법을 적용하였다.

Table 2 Load Combination for Operating Condition

Operating Condition	Load Combination
Normal	W + L_O(1.5m)
Upset	W + L_O(1.5m) + OBE
Faulted	W + L_O(1.5m) + SSE

Table 3 Response Acceleration

Condition	Damping Ratio	Direction	Acceleration (×g)
OBE	2 %	X	0.45
		Y	0.45
		Z	0.45
SSE	3 %	X	0.75
		Y	0.8
		Z	0.75

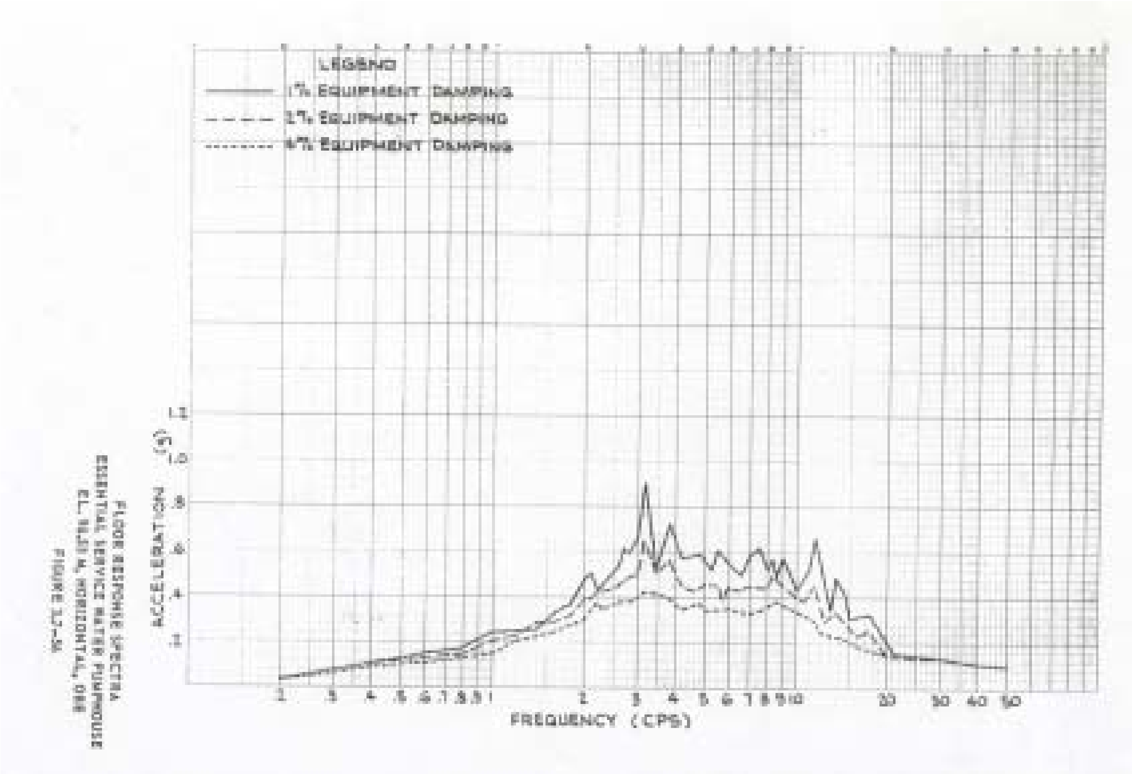

Fig.4 Floor Response Spectrum Curve

Normal Condition에 대해서 유한요소 해석을 수행하고, Upset Condition과 Faulted Condition의 경우에 대한 단순동적해석을 수행하여 그 결과 중의 하나를 **Fig.5**에 나타내고, 허용응력(Allowable Stress)과 비교하여 구조물의 안전성 여부를 판단하였다.

허용응력은 AISC에서 정의하고 있는 기준에 따라 다음과 같다. 사용된 재료의 항복응력(Yield Strength)이 170 MPa이고, 각 조건에서의 허용응력은 Normal Condition의 경우 항복응력의 60%를 사용하기 때문에 102 MPa이며, Upset Condition의 경우는 Normal Condition의 1.33배인 136 MPa이며, Faulted Condition의 경우 Normal Condition의 1.6배이지만 항복응력의 95%를 초과할 수 없기 때문에 162 MPa이 된다.8)

해석 결과는 Normal Condition의 경우 최대응력(Maximum Stress)이 71.3 MPa로서 그 위치는 Motor/Reducer가 있는 Front Post Frame의 중간 부분에서 발생하였다. 허용응력은 102 MPa로서 최대응력을 허용응력과 비교하면 설계안전계수(Design Safety Factor)는 1.43이므로 Normal Condition 하에서 TWS 구조물은 안전하다고 판단할 수 있다.

Upset Condition의 경우 최대응력이 발생하는 위치는 Motor/Reducer가 있는 앞 쪽의

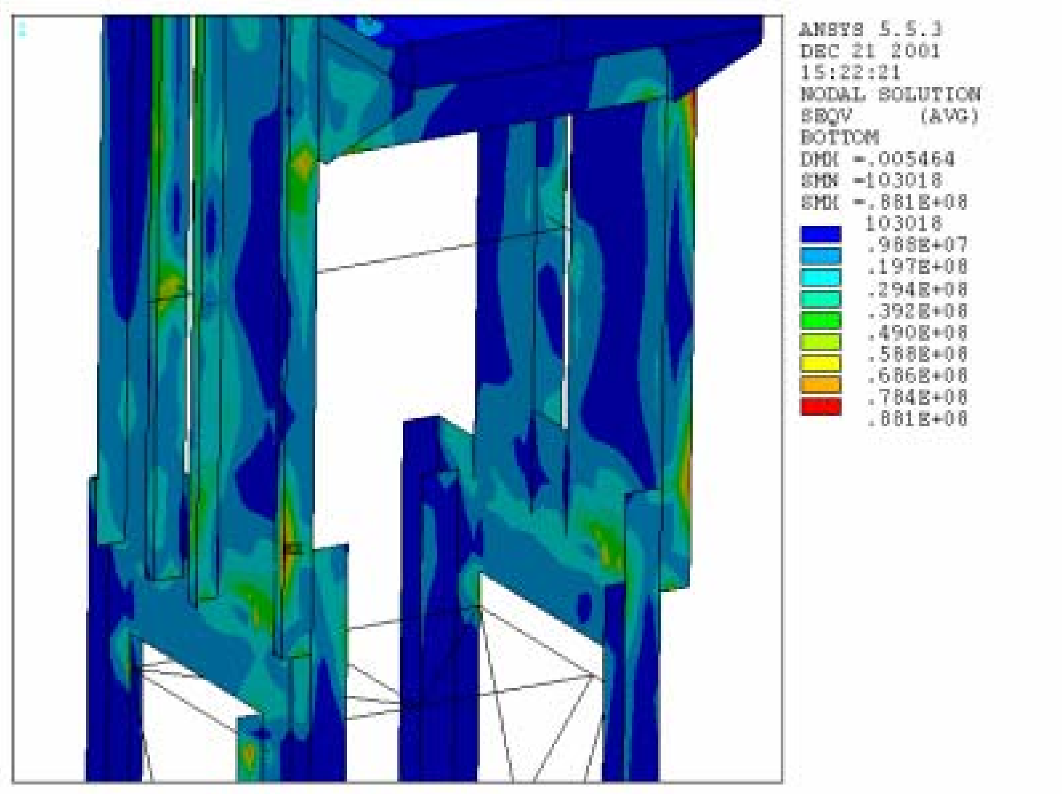

Fig.5 The Result of Analysis (Upset Condition_Detailed)

Table 4 Maximum Stress for TWS

Operating Cond.	Allow. Stress (MPa)	Max. Stress (MPa)	Design S. F.
Normal	102	71.3	1.43
Upset	136	88.1	1.54
Faulted	162	144	1.12

Head Section Frame의 아래 부분이며, 그 값은 88.1 MPa이고 136 MPa인 허용응력과 비교하면 설계안전계수는 1.54로서 역시 안전하다고 볼 수 있다.

Faulted Condition의 경우 최대응력의 발생 위치는 Motor/Reducer가 있는 반대 편의 앞 쪽의 Head Section Frame의 윗 부분이며, 그 값은 144 MPa이고, 162 MPa인 허용응력과 비교하면 설계안전계수는 1.12로서 역시 안전하다고 볼 수 있다.

TWS 구조물의 내진해석 결과를 **Table 4**에 정리하였다. Normal Condition, Upset Condition, Faulted Condition의 세 경우 모두 구조물에 작용하는 최대응력이 허용응력보다 작으므로 입력조건으로 제시된 지진하중의 작용하에서도 TWS

구조물은 안전한 것으로 판단된다.

5. 결론

지진에 의해 예상되는 막대한 피해를 최소화하기 위하여 원자력 발전소를 포함한 중요 산업 시설의 지진에 대한 안전성 여부가 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 원자력 발전소 안전 관련 시설물에 대한 내진 설계 규정에 따른 내진해석 절차를 정립하고, 원자력 발전용 TWS 구조물의 내진해석 수행을 통한 안전성 여부를 판단하였다.

해석 대상인 TWS 구조물의 유한요소 모델을 생성하여 Normal Condition에 대해서 유한요소 해석을 수행하고, Upset Condition과 Faulted Condition에 대해서는 내진해석 방법 중의 하나인 단순동적해석을 수행하였다. Upset Condition과 Faulted Condition은 Normal Condition의 하중조건에 Seismic Loading을 추가하기 위하여 자유진동해석을 먼저 수행하여 고유진동수와 모드 형상을 구하였다.

참고문헌

(1) 이준근, 김진영, 정필중, 2001, “울진 원자력발전소 5,6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증”, 대한기계학회 논문집 B, pp.404-409.

(2) 고우식, 김진, 허익구, 최병원, 2000, “원자력발전소 안전등급 대형유도전동기의 기기검증”, 대한기계학회 논문집 A, pp.498-503.

(3) 이용일, 1995, “원전구조물의 내진해석 및 설계”, 전산구조공학회 논문집, 제 8 권, 제 1 호, pp.19-25.

(4) 정길호, 박병철, 최진유, 강영종, 1998, “국내 내진설계 제도 및 기준에 대한 고찰”, 전산구조공학회 논문집, 제 11 권, 제 1 호, pp.7-16.

(5) IEEE Std. 323-1974, Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

(6) IEEE Std. 344-1987, Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

(7) U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC Regulatory Guide 1.100, Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants.

(8) AISC Manual of Steel Construction Allowable Stress Design, ninth edition.