

ESW형 해수여과장치의 구동 기어감속기에 대한 내진해석 Seismic Analysis for Driving Gear Reducer of ESW Traveling Sea Water Screen

김창원* · 이영신† · 김흥태* · 김지원*

Chang Won Kim, Young Shin Lee, Heung Tae Kim and Jee Won Kim

Key Words : Seismic analysis(내진해석), Floor Response Spectrum(FRS; 층응답스펙트럼), Gear Reducer(기어감속기), Traveling Sea Water Screen(해수여과장치)

ABSTRACT

In this study, the safety of the driving gear reducer of ESW traveling sea water screen was evaluated through seismic analysis. Mode analysis of gear reducer was performed for reliability of analysis. Seismic analysis was performed in Operating Basis Earthquake(OBE) and Safe Shutdown Earthquake(SSE), which was applied as design condition using Floor Respnse Spectrum(FRS). The maximum displacement of gear reducer under OBE and SSE were 0.0137 mm and 0.0241 mm, respectively. The maximum stress of gear reducer under OBE and SSE were 2.42 MPa and 4.36 MPa, respectively.

1. 서 론

원자력 구조물은 높은 안전성을 요구하기 때문에 구조물의 설계변경 및 장비의 제작 시 내진해석을 수행하여 안전성을 확보하여야 한다. 원자력 발전소의 경우, 만약의 사고시 방사능 물질의 유출은 막대한 피해를 입히므로 다른 산업 시설에 비하여 엄격하고도 정밀한 내진 설계를 적용하도록 되어있다. ⁽¹⁾

기기검증은 일반적으로 온도, 습도, 압력, 방사선 등의 환경조건에 대한 노화시험 및 해석(aging test/analysis)으로 구성되는 내환경검증과 내진해석 및 시험(seismic analysis/test)으로 구성되는 내진검증으로 구분할 수 있다. ⁽²⁾

기어감속기는 원자력발전소에 공급되는 해수의 불순물을 걸러내는 여과장치의 구동장치로써 지상에

설치되어 있으며, 구동모터가 작동하여 기어감속기를 통해 회전력을 발생시키고 여과망이 설치된 Head Shaft Assembly를 구동시킨다. Head Shaft Assembly는 지상으로부터 해수 밑바닥까지 약 17 m 정도의 높이로 설치되어 여과망을 작동시킨다. 이러한 스크린형 해수여과장치의 기어감속기는 원자력발전소에 공급되는 해수의 불순물을 계속적으로 여과하기위한 구동장치이기때문에 지진의 발생이나 구조물의 충격이 발생하였을 때 안전성을 확보해야 하며, 설계시 내진해석을 수행하여야 한다.

이번 해석은 지상에 설치되는 스크린형 해수여과장치를 구동하는 기어감속기에 대한 내진해석으로써 ANSYS 13.0 워크벤치를 사용하여 모델링 후 동특성 해석을 분석한 뒤, 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE) 하중조건에 대한 구조물의 지진응답해석을 수행하였다.

본 연구는 울진원자력발전소에 설치하게 될 ESW형 해수여과장치의 구동 기어감속기에 대한 내진해석을 수행하였으며, 이에 따른 설계의 타당성 검토 및 구조적 안전성을 평가하는데 목적이 있다.

† 교신저자; 정희원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : leeys@cnu.ac.kr
Tel : (042)821-6644 , Fax : (042)821-8906

* 정희원, 충남대학교 대학원 기계설계공학과

2 해석조건

2.1 물성치

Table 1은 기어감속기 해석 모델의 기계적 물성을 나타낸 것이다. 물성치 정보는 ASTM 규격 재원을 통해 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 데이터는 포아송비(Poisson's ratio), 탄성계수(Modulus of Elasticity)이다.

2.2 허용 응력

구조물의 재질은 A276TP316 (ASTM 규격)이며, 허용응력은 $\sigma_y = 205 \text{ MPa}$ 이다. 일반적으로 지진하중을 받는 구조물의 부재 응력검토에 적용되는 허용응력은 설계지진 준위에 따라 다르다. 운전기준지진(OBE) 하중은 참고문헌⁽³⁾⁽⁴⁾을 통하여 Service Level A Limit의 허용응력을 적용하였고, 안전정지지진(SSE) 하중이 포함된 하중조합의 경우는 Service Level D Limit의 허용응력을 적용하였다. 그리고 운전기준지진(OBE) 하중 하에서 구조물의 부재들은 항복이 일어나지 않아야 하며, 안전정지지진(SSE) 하중 하에서는 구조물의 부재가 파손되지 않아야 한다.

일반적으로 지지하중을 받는 구조물의 부재 응력 검토에 적용하는 허용응력은 설계지진 준위에 따라 다르다. 운전기준지진 하중(OBE)이 포함된 하중조합의 경우 Level A Service Limit의 허용응력을 적용하며, 안전정지지진 하중(SSE)이 포함된 하중조합의 경우는 Level D Service Limit 허용응력을 적용한다.

Table 1 Properties of the drive unit assembly and head shaft assembly

재 질 명	A276 TP316
밀도	7850 kg/m ³
프이송비	0.3
탄성계수	210 GPa
항복강도	205 MPa

상기와 같은 기준에 따라 계산된 허용응력은 다음과 같다.

허용 축 인장응력(σ_t) :

$$0.6\sigma_y = 0.6 \times 205 \text{ MPa} = 123 \text{ MPa}$$

허용 굽힘응력(σ_b) :

$$0.6\sigma_y = 0.6 \times 205 = 123 \text{ MPa}$$

허용 전단응력(σ_v) :

$$0.4\sigma_y = 0.4 \times 205 = 82 \text{ MPa}$$

2) 안전정지지진 (SSE) 허용응력

허용 축 인장응력(σ_t) :

$$1.5 \times 0.6\sigma_y = 1.5 \times 0.6 \times 205 \text{ MPa} \\ = 184.5 \text{ MPa}$$

허용 굽힘응력(σ_b) :

$$1.5 \times 0.6\sigma_y = 1.5 \times 0.6 \times 205 \\ = 184.5 \text{ MPa}$$

허용 전단응력(σ_v) :

$$1.5 \times 0.4\sigma_y = 1.5 \times 0.4 \times 205 = 123 \text{ MPa}$$

여기서, σ_y 는 항복응력을 의미하며, 첨자 t, b, v는 각각 인장, 굽힘, 전단응력을 의미한다.

2.2 응답 스펙트럼

Table 2는 구조물이나 복합재료의 OBE, SSE 하중조건하에서 적용할 수 있는 감소율을 나타내고 있다. 해석하고자 하는 Essential Service Water (ESW)는 외부 프레임과 기어 및 모터로 구성되어 있다. 따라서 Table 2의 "Motor, Fan, and Compressor Housings"에 적용하는 댐핑값을 사용하였다. Motor, Fan, and Compressor Housings의 댐핑값은 OBE 하중조건하에서 2%, SSE 하중조건하에서는 3%를 사용하도록 US NRC Regulatory Guide 1.61에 규정되어 있다.⁽⁵⁾

Fig.1은 해석에 사용된 층응답스펙트럼 중 하나를 예로 나타내었다. 층 응답스펙트럼은 북-남, 동-서 수직방향에서 고유진동수에 대한 응답 가속도로 나타낸다.

Table 2 Damping values for Mechanical and Electrical Component⁽⁵⁾

Structure or Component	Operating basis earthquake or 1/2 safe shutdown earthquake	Safe shutdown earthquake
Motor, Fan, and Compressor Housings (protection, structural support)	2 %	3 %
Pressure Vessels, Heat Exchangers, and Pump and Valve Bodies (pressure boundary)	2 %	3 %
Welded Instrument Racks (structural support)	2 %	3 %
Electrical Cabinets, Panels, and Motor Control Centers (MCCs) (protection, structural support)	2 %	3 %
Metal Atmospheric Storage Tanks (containment, protection) — Impulsive Mode — Sloshing Mode	2 % 0.5 %	3 % 0.5 %

3 유한요소해석

3.1 해석 모델

본 연구에서는 상용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 13.0을 사용하여 해석을 위한 유한요소모델을 수행하였으며, 모델에 대한 3차원 모델링은 CATIA V5를 통해 모델을 구현하였고 Fig 2에 나타내었다. 해석모델은 유한요소의 특성 및 하중의 작용조건에 따라 단순화 될 수 있다. 모델의 평기어와 헬리컬베벨기어의 경우, 기어잇은 생략되어 모델링되었다. 이는 유한요소 모델링에서 기어잇을 고려하였을 경우 해석시간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 또한 굽힘 응력 해석시 필렛부분을 고려한 모델링을 생성하고 이를 고려한 요소분할이 이루어져야 하는데 이때 요소의 크기도 매우 작아져 특이해가 발생할 수 있다. 또한 평기어 및 헬리컬베벨기어의 경우 유한요소모델 생성시 매우 정확한 인벌류트 곡선을 따라가지 못할 경우 접촉해석의 결과는 매우 상이하게 나오며, 본 모델의 경우 정확한 인벌류트 곡선에 대한 정보가 존재하지 않아 정확한 해석결과를 얻을 수 없게 된다. 이러한 경우, 모델의 단순화를 통해 전체구조의 응력분포를 파악하는 것이 유한요소해석 결과의 신뢰성을 높이는데 매우 유리하며 이론식을 이용한 계산값에 의존하는 것이 신뢰성 측면에서 매우 유리하다.⁽⁶⁾ 해석모델인 기어감속기는 5개의 기어와 1개의 구동모터가 존재하여 각각의 기어들은 서로 접촉하고 있다. 유한요소모델의 신뢰성을 높이기 위해 기존의 문헌에 기록된 ESW형 기어감속기의 고유진동수와 비교분석하였다. 본 내진해석의 대상이 되는 ESW형 기어감속기의 고유진동수는 84 Hz이며, 유한요소모델링을 통해 단순화시킨 기어감속기의 고유진동수는 82.7 Hz로써 해석모델의 신뢰성을 확보하였다.

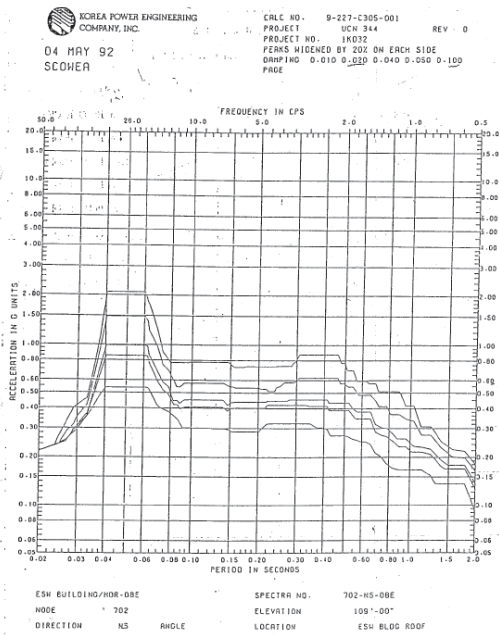


Fig.1 Floor response spectra interior structure operating Level, EL. 109', OBE, North-South

3.2 경계조건 및 하중조건

해석모델에서 X축은 남-북 방향이고, Y축은 동-서 방향이며, Z축은 수직방향으로 정의하였다. 해석모델은 도면을 바탕으로 Fig. 2와 같이 생성하였으면 총 요소 수는 약 15000 이다. 경계조건은 기어감속기의

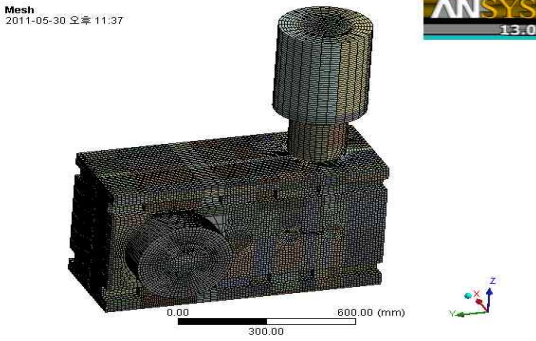


Fig. 2 FE model of gear reducer

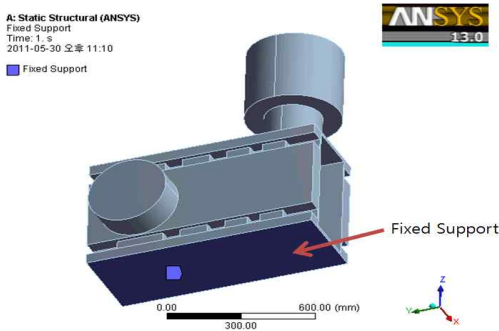


Fig. 3 Boundary condition of gear reducer

바닥에서는 X, Y, Z방향과 회전의 모든 자유도에 대해서 구속하기 위해 Fig. 3과 같이 완전구속 경계조건을 주었다. 하중조건은 -Z방향으로 9.81 m/s²의 중력 가속도를 적용하여 기어감속기의 사하중을 고려하였다.

3.3 고유치 해석 결과

기어감속기에 대한 내진해석을 수행하기 전에 고유치 해석을 수행하였다. 여기서 얻어진 결과들과 응답스펙트럼 해석을 통해서 얻어지는 가속도 값을 입력값으로 하여 스펙트럼 해석을 한다.

스펙트럼 해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 모드 수를 고려하게 되는데, 이렇게 함으로써 스펙트럼 해석을 할 때 수 계산에 의하지 않고 모드 계수가 기준 값 이상이 되는 모드들에 대해서 모드 조합이 이루어지도록 할 수 있게 된다. 그런데 복잡

한 구조물에 대한 고유치 해석 결과들은 구조물의 국부모드까지 포함하고, 이들 국부모드의 모드 계수는 기준 값 이하가 되는 경우 즉, 모드 기여 계수가 낮은 경우가 많으므로 국부모드들은 모드 조합에서 제외된다. 따라서, 조합되는 모드들의 수가 작을 경우에는 조합된 모드들의 전체 모드 기여 계수가 크지 않게 되므로 스펙트럼 해석을 통하여 얻어진 부재 응력이나 변위와 같은 해석 결과들의 정확성을 확보할 수 없게 된다. 따라서, 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드 계수가 기준 값 이상이 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 모드 조합에 대해서 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려할 필요가 있다. 여기서, 모드계수(mode coefficient)는 고유치 해석을 통하여 얻어진 모드들 중 최대 모드 기여 계수로 각 모드들의 모드 기여 계수를 나눈 값을 의미한다.

Table 3은 기어 감속기의 고유진동수를 1차부터 4차까지 본 결과이고, 모드 1에 대한 그림은 Fig. 4에 나타나 있다.

Table 3 Natural frequency of gear reducer

Mode sequence number	Frequency (Hz)
1	82.85
2	102.45
3	263.64
4	354.56

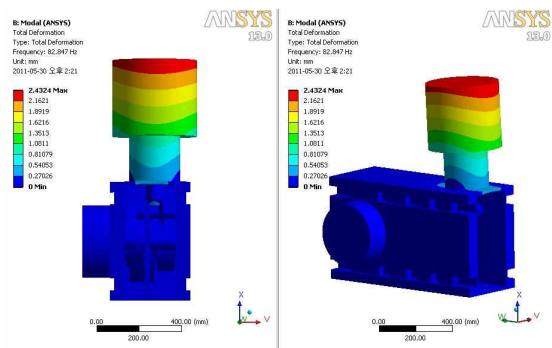


Fig. 4 First mode shape of gear reducer

4. 내진 해석 결과

4.1 변위 해석 결과

내진 해석을 통해서 기어 감속기의 최대 변위를 산출하였다. Fig. 5과 Fig. 6는 각각 운전기준지진(OBE) 하중과 안전정지지진(SSE) 하중 하에서 변위

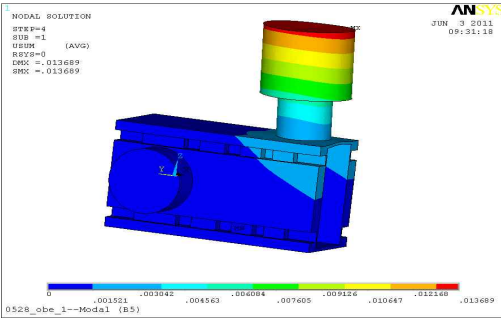


Fig. 5 Displacement of gear reducer under OBE condition

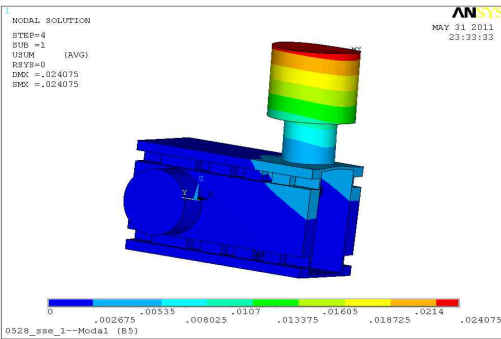


Fig. 6 Displacement of gear reducer under SSE condition

Table 4 Maximum displacement of gear reducer under seismic condition

Seismic load	Maximum displacement (mm)			
	x-direction	y-direction	z-direction	Total
OBE	0.0080	0.0105	0.0038	0.0137
SSE	0.0131	0.0191	0.0068	0.0241

분포와 최대 변위를 나타내고 있다. 최대 변위는 운전기준지진(OBE) 하중과 안전정지지진(SSE) 두 하중 모두 기어를 구동하는 모터 상부에서 발생하였다. Table 4는 기어감속기의 x, y, z, 방향에 따른 최대 변위를 표로 나타내었다. 운전기준지진(OBE) 하중 하에서의 최대 변위는 x, y, z 방향에서 각각 0.0105 mm, 0.0080 mm, 0.0080 mm 이고, 안전정지지진(SSE) 하중 하에서의 x, y, z 방향에서 각각 0.0131 mm, 0.0191 mm, 0.0068 mm이다. Total 최대 변위 OBE, SSE 하중 하에서 각각 0.0137 mm, 0.0241 mm로 매우 작은 값을 보인다. 따라서 내부 기어부에도 무리가 없는 것으로 판단된다.

4.2 응력 해석 결과

운전기준지진(OBE) 하중과 안전정지지진(SSE) 하중하에서 최대응력은 모터와 기어감속기 연결부에서 공통적으로 발생하였다. Fig. 10은 운전기준지진(OBE) 하중 하에서의 응력분포를 보여주고 있고, Fig. 11는 안전정지지진(SSE) 하중 하에서의 응력분포를 나타낸 것이다. Table 5은 OBE하중과 SSE하중하에서의 최대응력값과 허용응력 값을 나타낸 것이다. 운전기준지진 허용응력값 중 최소치인 허용전단응력이 운전기준지진(OBE) 하중하에서는 82 MPa 이고, 안전정지지진(SSE) 하중하에서는 147 MPa이다. 따라서 기어 감속기는 지진이 발생한 상황에서도 안전하다.

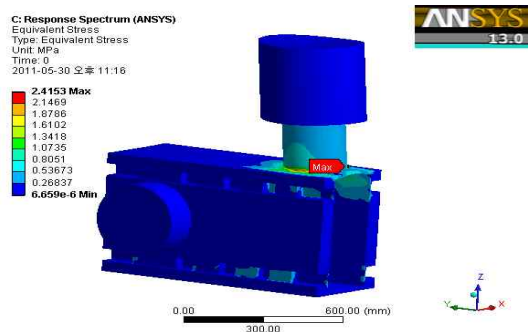


Fig. 7 Stress contour of gear reducer under OBE condition

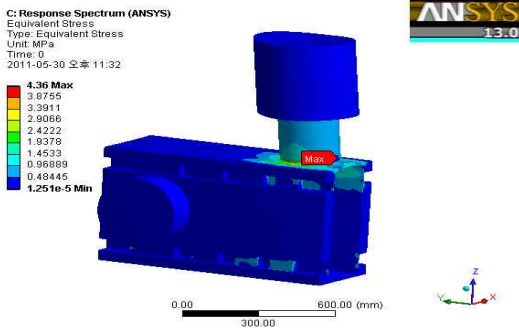


Fig. 8 Stress contour of gear reducer under SSE condition

Table 5 Maximum stress and allowable stress of gear reducer

Seismic load	Maximum stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
OBE	2.42	82
SSE	4.36	147

5. 결론

본 연구에서는 울진원자력발전소에 설치하게 될 ESW형 해수여과장치의 구동 기어감속기에 대한 내진해석을 수행하였으며, 이에 따른 설계의 타당성 검토 및 구조적 안전성을 평가하였다.

미국 원자력 규제위원회의 규제지침에 의해 원자력 구조물에 대한 운전기준지진(OBE) 및 안전정지지진(SSE) 발생 시 구조물을 구성하고 있는 부재나 부품의 응력에 대하여 ASME Section III, Division 1, Subsection NF 규정에 따라 내진해석 및 구조해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)을 사용하여 내진에 대한 조건을 부여하였으며, 해석결과 운전기준지진(OBE) 하중에서의 최대 변위는 0.0137 mm 이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서의 최대 변위는 0.0241 mm가 발생하였다.

(2) 내진해석 결과 최대응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서 2.42 MPa이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서는 4.36 MPa이다. 최대응력은 두 하중조건 모두 모터와 기어감속기 연결부에서 발생하였다. 기어와 베어링부의 응력은 OBE 하중 하에서는 약 0.2 MPa에서 0.5 MPa사이의 값을 보이고, SSE 하중 하에서는 약 0.3 MPa에서 0.8 MPa의 값을 보인다. 허용응력은 ASME SEC III Subsection NF 기준으로 운전기준지진 하중에서 82 MPa 이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서 147.6 MPa 이므로, 기어감속기에 대한 안전성을 확보한 것으로 평가하였다.

(3) 구조물의 변위는 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE)에서 최대변위가 일어나는 기어감속기의 길이에 대한 변위의 비가 1/1000 미만이므로 변위에 대한 영향이 거의 일어나지 않으며, 발생하는 최대응력은 모두 허용응력이내로서 구조물의 안전성을 확인되었다.

참고 문헌

- (1) Kim Heung Tae, Lee Young Shin, Park Young Moon, "Seismic Analysis of Traveling Sea Water Screen", COSEIK, Vol. 24, No.3, pp289-294, 2011
- (2) Bteon Hoon Seok, Lee Joon Keun, "Seismic Qualification of the Main Control Board for Nuclear Power Plant", KSNVE, Vol. 12, No. 3, pp.856-863, 2002
- (3) ASME, "Component Supports", ASME Section III Division 1 Subsection NF, 1995.
- (4) ASME, "Rules for Evaluation of service Loadings with Level D Service Limits", ASME Section III Division 1 Appendix F, 1995.
- (5) US NRC Regulatory Guide 1.61, "Damping values for Seismic Design of Nuclear Power Plants", October, 1973.
- (6) Cho Do Hyun, Park Chan Il, "Dynamic Analysis of the Gear System by Finite Element Method", KSAE, 2003 Spring Conference, No.2, pp.533-538