

지진하중이 터빈-발전기 기초의 설계에 미치는 영향 Impact Analysis of Seismic Load on the Design of Turbine-Generator Foundations

김재석* 조양희** 안대호***
Kim, Jae Suk Joe, Yang Hee Ahn, Dae Ho

ABSTRACT

The purpose of this study is to review and validate the seismic analysis procedures of turbine-generator foundation specified in the Korea Building Code which adopts equivalent static analysis. Typical machines and foundations were chosen and various kinds of parametric studies were performed and the results were compared with the detail dynamic analysis.

The general trend of the study results showed that the most of the computed responses of equivalent static analysis are smaller than those of the dynamic analyses(response spectrum analysis and time history analysis), which implies the existing seismic analysis technique using the existing Building Code may give unconservative design results. The results also showed that the seismic loads are one of the governing design parameters of the turbine-generator foundations.

1. 서론

터빈-발전기 기초는 다양한 동적하중에 의하여 진동이 발생되므로 허용범위 이상의 진동이 발생할 경우에는 기초 자체의 안전성뿐만 아니라 인접구조물 또는 인접 주요기기에 손상을 일으켜 전체적인 발전 시스템에 큰 피해를 줄 수 있으므로 충분한 강성(rigidity)과 강도(strength)를 가지도록 설계되어야 하며, 기계 및 기초의 고유진동수 검토가 필요하다. 터빈-발전기 기초의 설계에 고려되는 하중 중에서 특히 지진하중에 대해서는 터빈-발전기 기초가 그 지역의 특성과 산업적 중요도를 고려하여 충분한 강도를 가질 수 있도록 설계되어야 한다.

1987년 미국토목학회(ASCE) 에너지분과(the Energy Division) 화력발전소 및 원자력발전소의 터빈기초과제위원회(Task Committee on Turbine Foundations of the Fossil Power Committee and the Nuclear Energy Committee)는 “대형 증기 터빈-발전기 기초의 설계”⁽¹⁾라는 보고서를 통하여 대형 터빈-발전기 기초의 해석과 설계에 필요한 모든 기술과 지침을 한 개의 보고서 형태로

* 학생회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과, 박사과정

** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수

*** 학생회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과, 석사과정

통합하였다. 이 보고서에는 구조물이 지진에 저항하기 위한 설계방법으로 UBC(Uniform Building Code)⁽²⁾에서 제시된 방법을 제시하고 있다.

국내 터빈-발전기 기초의 내진설계는 목표 내진성능수준을 결정하여 그 수준을 만족할 수 있도록 수행하고 있다. 원자력발전소의 경우에는 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake : SSE)과 운전기준지진(Operating Basis Earthquake : OBE)으로 구분된 두 가지 지진수준으로 구분하여 설계된다. 이때 설계부재력은 동적해석을 통하여 산출하며, 안전정지지진에 대해서는 구조물이 구조적 파괴를 일으키거나 심한 변형으로 인하여 인접구조물에 영향을 주지 않도록 하고 있으나, 운전기준지진시 기기의 기능성확보를 위한 강성기준은 검토되지 않고 있다. 한편, 화력발전소의 경우에는 일반적으로 건축물 하중기준 및 해설(이하 건축물 설계기준)⁽³⁾의 등가정적해석법을 준용하여 붕괴방지수준만으로 지진하중을 산정하여 부재설계를 수행하고 있다.

터빈-발전기 기초는 일반적으로 대칭적이며 정형화된 형태로서 구조적으로 유리한 형상을 갖도록 하여 다양한 하중들에 충분히 저항할 수 있도록 설계하고 있다. 그러나, 상당한 크기의 기기중량이 존재하고 있으며, 또한 운전시 기기의 성능을 유지할 목적으로 기초 자체의 충분한 강성확보를 위해 부재를 설계하므로 일반 건축물과는 상이한 동적특성을 지니고 있다. 따라서, 터빈-발전기 기초의 내진설계에 건축물 설계기준의 해석방법과 절차에 대한 적용성을 확인해볼 필요가 있다. 또한, 터빈-발전기 기초의 부재설계 시 지진하중의 영향을 분석하여 여타 다른 하중에 대하여 지진하중이 전체적인 터빈-발전기 기초의 설계에 미치는 중요도를 평가하였다.

2. 터빈-발전기 기초의 내진설계

2.1 국내설계기준

국내 화력발전소의 터빈-발전기 기초 내진설계는 일반적으로 건축물 설계기준을 준용하고 있다. 건축물 설계기준의 내진설계를 위한 지진해석방법은 등가정적해석법과 동적해석법으로 구분할 수 있는데, 일반적으로 터빈-발전기 기초의 내진설계에는 등가정적해석법을 준용하고 있다. 건축물 설계기준을 포함한 대부분의 내진설계기준들이 과거의 지진피해에 의한 경험과 판단으로 작성된 것이며 주로 국제건축물협회(International Conference of Building Officials : ICBO)에서 제정한 UBC-97⁽²⁾을 바탕으로 하고 있다. 대표적인 기기제작자인 제네럴일렉트릭사(General Electric Co.) 역시 화력발전소의 경우에 UBC에 바탕을 둔 지진하중 산정법을 제시하고 있다.

한편, 원자력발전소는 미연방기준에 따른 동적해석법을 수행하고 있으며, 발전소의 위치별 지진수준을 결정한 후, 이에 따른 입력운동을 작성하여 설계에 적용한다.

(1) 등가정적해석법

등가정적해석법은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후에 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법이다.

터빈-발전기 기초의 설계를 위하여 기기제작자가 제공하는 기기배치도면(mechanical outline drawing) 및 지침⁽⁴⁾에 의하여 구조물의 최소치수가 결정된다. 결정된 예비단면에 대한 지진하중을

산정하기 위하여 건축물설계기준⁽³⁾의 지역계수, 중요도계수, 동적계수, 지반계수, 응답수정계수를 참조하여 구조시스템이 지면과 직접 접하는 밀면에 작용하는 설계용 총 전단력인 밀면전단력을 산정하게 된다.

총지진하중 및 총전단력을 산정한 후 기기제작자가 제시한 터빈-발전기 기초의 받침판 및 앵커 지점에서의 기기 지진하중과 정상하중 및 비정상하중을 기기제작자가 제시한 하중조합에 의하여 정적구조해석을 수행한 뒤 최종 부재력을 산출하게 된다. 등가정적해석법에 의한 내진설계 절차를 요약하면 다음 그림 1과 같다.

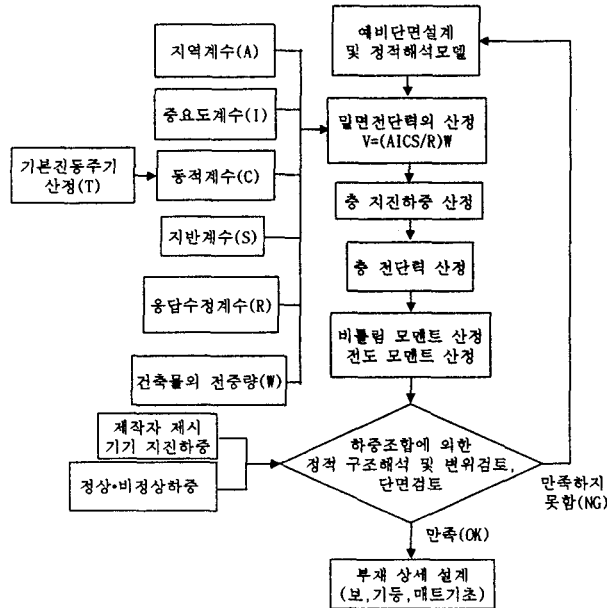


그림 1. 등가정적해석법에 의한 터빈-발전기 기초의 내진설계 절차

(2) 동적해석법

일반적으로 내진설계시 사용되고 있는 동적해석법은 크게 응답스펙트럼해석법, 시간이력해석법 등이 있으며 건축물 설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼은 지반운동이 50년에 발생할 가능성이 10%이상인 것을 사용하도록 하고 있다. 해석모델은 구조물의 동특성을 산출하기에 알맞도록 구조물의 질량과 강성의 3차원적 분포를 나타낼 수 있어야 한다. 또한, SRSS(square root of the sum of the squares)조합, CQC(complete quadratic combining)조합 등 잘 알려진 방법에 의하여 인접 모드의 영향을 고려하여 조합하도록 하고 있다.

2.2 지진하중에 대한 하중조합

일반적으로 기기제작자가 제시하는 하중조합은 크게 3가지의 조건으로 구분할 수 있다. 기초의 공진검토(resonance check)를 위한 하중조합, 베어링의 변위를 검토하기 위한 강성요구조건(rigidity requirement)에 대한 하중조합, 구조물의 강도요구조건(strength requirement)을 위한 하

중조합으로 구분할 수 있으며 지진하중은 강도요구조건 하중조합에 해당된다. 즉, 기기제작자는 지진하중에 대하여 특별한 강성요구조건은 제시하지 않고, 강도요구조건을 위한 하중조합만 제시하며, 이 하중조합에 의하여 설계단면력이 결정된다.

원자력발전소의 경우에는 안전정지지진 발생시에 구조물 자체의 기능상실여부는 설계시에 고려하지 않아도 되지만 구조적인 파괴 또는 심한 변형이 인접 내진범주 I 등급 주요 구조물에 악영향을 미치지 않도록 설계하고 있으며, 화력발전소의 경우에도 역시 지진하중 작용상태에서의 강도요구조건을 제시하고 있다.

3. 수치예제 분석

3.1 해석모델

이 연구의 대상이 되는 기초는 철근콘크리트 골조구조로서 국내에 현재 설계 및 시공되어 있는 800MW급 터빈-발전기 기초를 모델로 선정하였다. 이 기초는 발전기 1대, 저압터빈 2대, 중압터빈 1대, 고압터빈 1대로 구성되어 있으며, 저압터빈 2대 사이에는 기기의 간격에 의하여 기둥배치가 불리하므로 기둥대신 벽체를 배치하였다. 각 터빈 및 발전기 위치에는 개구부(opening)가 설치되어 있으며, 그 기초의 형상은 그림 2와 같다. 수치해석을 위하여 작성된 3차원 유한요소모델은 상용 구조해석프로그램 GT-STRUDL V26⁽⁵⁾을 사용하였으며, 그림 3에 나타내었다. 이때 동적해석을 위한 기기의 질량은 각 받침판 하중 작용절점에 집중질량으로 고려하였다.

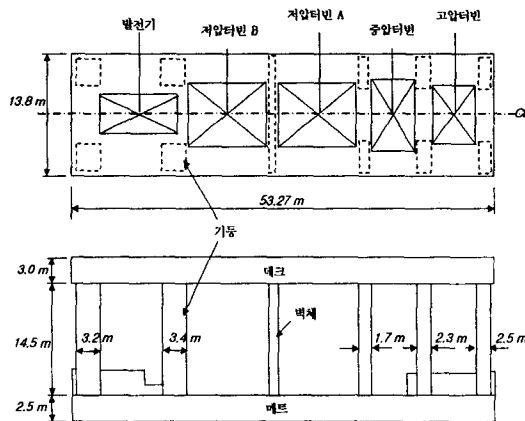


그림 2. 상부 평면도 및 단면도

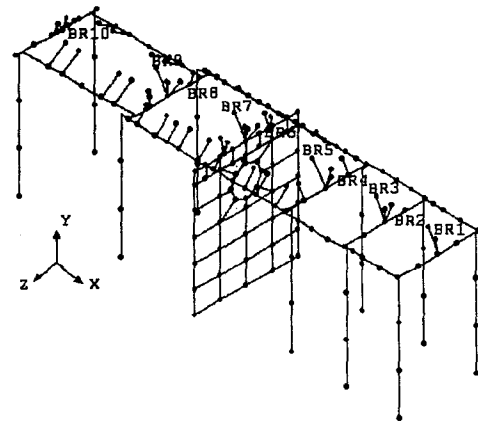


그림 3. 수치해석모델

3.2 입력운동

동적해석에 사용된 입력운동은 건축물 하중기준 및 건설교통부 내진설계기준연구(II)⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 지역계수와 중요도계수를 참조하여 동일한 설계응답스펙트럼을 작성하였으며, 전산프로그램 SIMQKE를 이용하여 이에 해당하는 인공가속도시간이력을 작성하였다. 이러한 입력운동

중에서 0.132g에 해당하는 설계응답스펙트럼과 인공가속도시간이력을 다음 그림 4, 그림 5에 각각 나타내었으며 수직방향 입력운동은 수평방향의 2/3에 해당하는 설계응답스펙트럼을 작성하여 사용하였다.

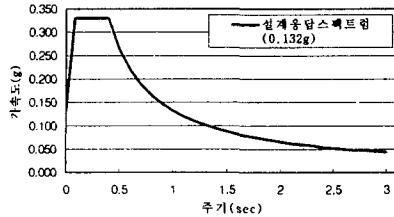


그림 4. 설계응답스펙트럼(0.132g)

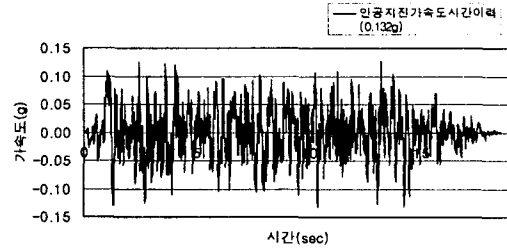


그림 5. X방향 인공가속도 시간이력(0.132g)

3.3 해석방법

해석방법에 따른 영향을 분석하기 위하여 건축물 설계기준에서 제시하고 있는 등가정적해석법, 응답스펙트럼해석법, 시간이력해석법을 사용하였다. 등가정적해석법은 지진하중을 산정하기 위하여 밀면전단력을 산정하고 해석모델의 절점별 층지진하중의 비율을 구한 다음 부재별 지진하중을 구하여 적용하였다. 이때 기계고정하중은 기기제작자가 제시하는 기기 지진하중을 사용하여 조합하였다. 지진하중의 중요도를 평가에서는 지진하중이 고려되지 않은 경우와 지진하중이 고려된 경우의 하중조합에 의하여 각 부재별 최대 단면력을 비교 및 지진하중의 크기별 응답을 비교하였다. 또한, 응답스펙트럼해석법을 사용하여 지진하중만 고려하였을 경우의 단면력, 지진하중 작용 시 하중조합, 정상운전상태의 하중조합에 의한 설계단면력을 비교하였다. 이때 지진하중 이외의 다른 하중들은 기기제작자가 제시한 값으로 정적해석을 수행하였고, 지진하중 작용 시의 하중조합에 의하여 응답스펙트럼해석에 의한 결과와 조합하였다. 또한, 지진하중의 크기별로 응답스펙트럼해석을 수행한 후 설계단면력을 결정하는 하중조합을 조사하여 지진하중이 설계단면력에 미치는 영향을 분석하였다.

3.4 해석결과 및 분석

(1) 해석방법에 따른 영향

각 해석방법에 따라 최대 변위응답과 최대 부재력 응답을 비교해 본 결과 거의 모든 부재에 대하여 동적해석인 응답스펙트럼해석법과 시간이력해석법에 의한 변위응답이 등가정적해석법에 의한 변위응답에 비하여 큰 값을 나타내었다. 이것은 밀면전단력 산출을 위한 동적계수 산정 시 동적해석에 의한 고유주기와 건축물 설계기준의 주기산정식에 의한 값의 차이로 인하여 등가정적해석법에 의한 응답이 낮게 산정될 가능성이 있으므로 따라서, 설계 시 정확한 해석을 위해서 동적해석에 의한 검증절차가 요구된다. 3가지 해석방법에 따라 거더, 보, 기둥의 주요부재와 베어링 위치의 최대 변위응답의 대표적인 값을 주요 부재력별로 그림 6, 그림 7에 각각 나타내었다.

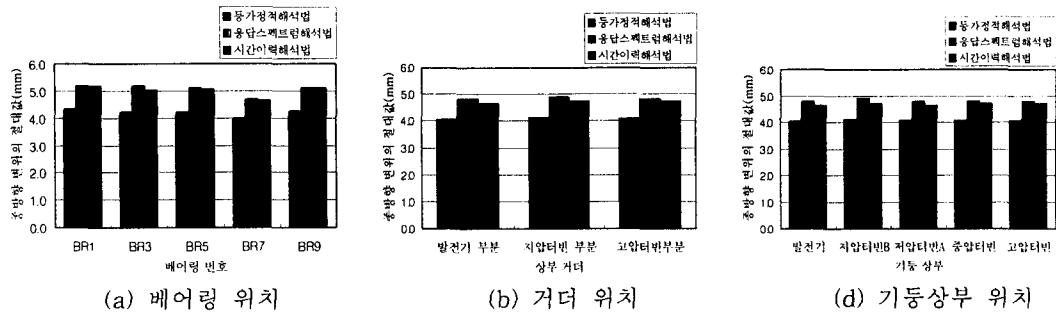


그림 6. 해석방법별 발전기 부분 주요부재의 최대 변위 비교

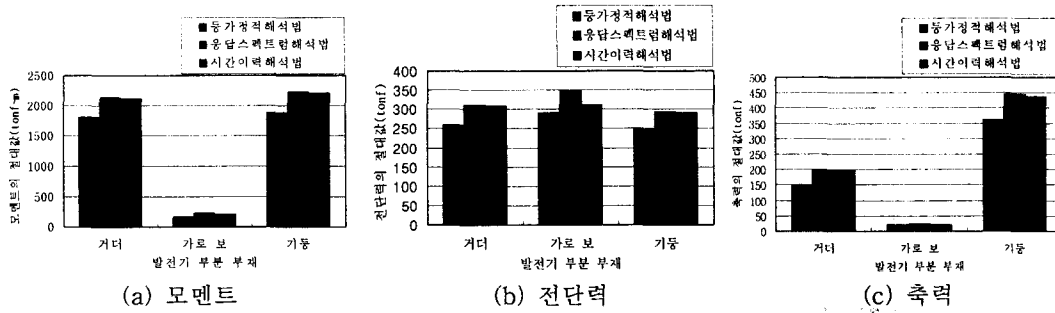


그림 7. 해석방법별 발전기 부분 주요부재의 단면력 비교

(2) 지진하중의 중요도 평가

가) 지진하중의 고려 여부에 의한 설계단면력 비교

해석결과 거더, 가로보, 기동등 대부분의 부재는 전단력과 모멘트의 경우에 지진하중에 의하여 설계단면력이 결정되는 경향을 보이는데 이는 터빈-발전기 기초의 설계에 있어서 지진하중의 고려에 의한 단면력의 변화가 상대적으로 매우 커서 지진하중에 의한 영향이 크다는 사실을 알 수 있었다. 그림 8은 상기 주요부재에 대한 하중조합별 설계 모멘트 및 전단력을 나타낸 것으로 지진하중이 포함된 조합은 지진하중 고려시오, 지진하중이 포함되지 않은 하중조합 즉 정상하중 또는 비정상하중에 대한 조합은 지진하중 비고려시오 나타내었다. 관련 그림에 나타난 바와 같이 거의 모든 부재가 지진하중이 지배적인 설계인자 됨을 보여주고 있다.

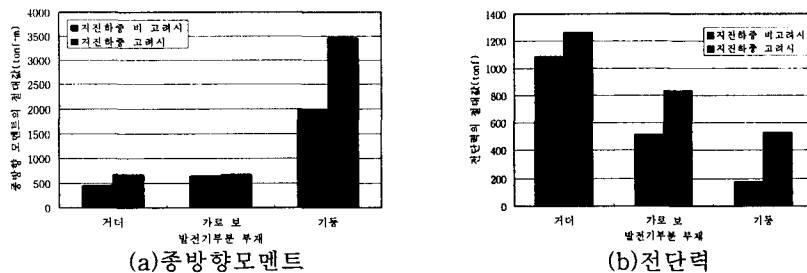
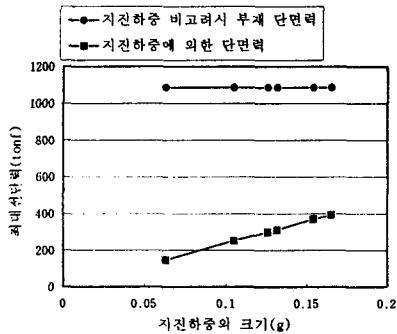


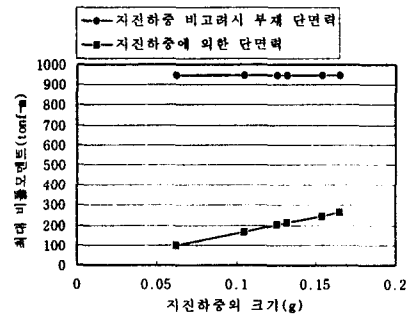
그림 8. 하중조합별 설계 모멘트 및 전단력

나) 지진하중 크기에 따라 설계단면력에 미치는 영향

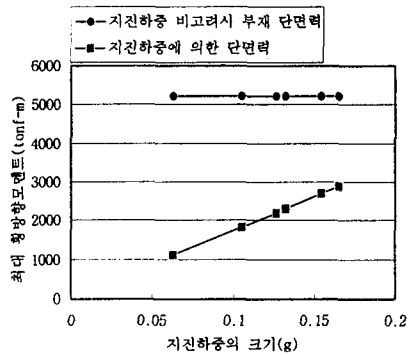
지진하중의 크기에 따른 기초 주요 부재의 설계단면력을 대표적인 부재에 대하여 그림 9에 나타내었다. 해석결과, 거의 대부분의 부재에 있어서 모멘트의 경우 지진하중이 고려되는 경우에 부재의 최종 설계단면력이 결정되고 있는 것을 알 수 있었다. 거더에서의 비틀림모멘트의 경우에는 지진하중의 영향이 낮기 때문에 지진하중의 크기가 증가하더라도 지진하중이 아닌 다른 비정상하중(abnormal condition)에 의하여 설계단면력이 결정되는 경향을 나타내었다. 부재의 단면을 결정하는데 있어서 지배적인 역할을 하는 전단력과 모멘트의 결과로 지진하중은 부재의 설계에 있어서 설계단면력의 결정에 큰 영향을 줄 수 있다는 사실을 알 수가 있었으며, 또한, 작은 설계지진 수준 하에서도 지진하중의 하중조합에 의하여 설계단면력이 결정될 가능성이 있음을 알 수가 있었다.



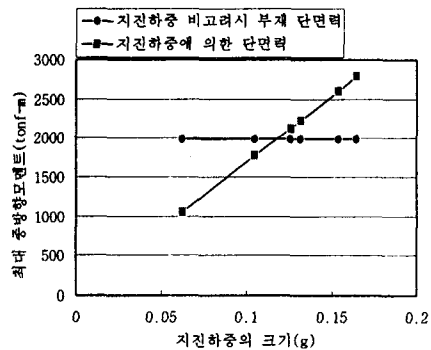
(a) 거더의 최대 전단력



(b) 거더의 최대 비틀림모멘트



(c) 가로보의 최대 횡방향모멘트



(d) 기둥의 최대 종방향모멘트

그림 9. 발전기 부분 주요부재의 단면력

4. 결론 및 추후연구과제

이 연구는 현행 터빈-발전기 기초의 내진설계에 대한 설계개념상의 문제점을 제시하였으며, 해석방법상의 문제점과 여타 하중들에 대한 지진하중의 상대적인 중요성을 바탕으로 지진하중이 터빈-발전기 기초의 설계에 미치는 영향을 평가하기 위하여 크게 해석방법별 영향과, 지진하중 중요

도를 검토하였다.

터빈-발전기 기초의 내진설계시 건축물 내진설계에 적용되고 있는 등가정적해석법을 사용할 경우 기초의 동적특성의 차이로 인하여 등가정적해석법에 의한 해석결과가 오히려 비안전측의 결과를 줄 가능성이 있으므로 터빈-발전기 기초의 동적특성을 정확하게 반영할 수 있는 동적해석을 이용한 검토가 요구된다.

터빈-발전기 기초는 지진하중이 설계결과에 미치는 영향은 매우 크며 낮은 수준의 지진하중에서도 지진 시 하중조합이 부재의 설계단면력을 결정할 가능성이 높다. 특히, 기둥의 경우는 지진하중에 의하여 설계모멘트가 결정될 가능성이 가장 높으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

현재의 설계기준에는 운전기준지진 발생시 구조물의 강성요구조건에 대한 기준이 없으므로 베어링의 변위 등 기기의 계속사용여부 판단을 위한 국내 실정에 맞는 내진성능기준 수립이 필요하며, 이를 위하여 터빈-발전기 기초의 구조적, 기능적 특성을 고려한 성능평가방법에 대한 연구가 요구된다. 또한, 발전소 건설부지에 따라 말뚝기초가 적용되고 있으나, 이때 동적해석은 말뚝기초의 영향을 무시한 고정지반으로 설계를 수행하고 있으므로, 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 정확한 해석을 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 (주)삼성물산의 연구비 지원에 의해 수행된 "Turbine Generator Foundation의 구조해석 및 설계기준에 대한 연구"의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. J. Small et. al., "Design of Large Steam Turbine-Generator Foundations", ASCE, 1987.
2. International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code", Vol. 2, 1997.
3. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설", 2000.
4. GE Power Systems, "Foundation Design and Construction Recommendations (Steam Turbine)", Report No. GEK19331, 1988.
5. GTSTRUDL V26, GTSTRUDL User's Manual, Georgia Institute of Technology, Vol. 1, 1993.
6. 건설교통부, "내진설계기준연구(II)", 1997.
7. Hadjian, A. H., "Design Criteria for Turbine-Generator foundations, Journal of the power division", ASCE, Vol. 96, pp. 1-22, 1970.
8. Suarez, L. E., Singh, M. P., Rohanimanesh, S., "Seismic Response of Rotating Machines", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 21-36, 1984.
9. Liu, W., Novak, M., "Dynamics Behavior of Turbine-generator Foundation Systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 339-360, 1995.
10. Sargent & Lundy, "Structural Standard Document", Report No. SDS-E8 revision 2, 1986.
11. Structural Engineers Association of California, "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary", 1999.