

원전 기기 정착부의 내진검증 기법 사례연구

Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment Anchorage

서 용 표 이 계 회 이 경 진 이 종 립
Suh, Yong-Pyo · Lee, Gye-Hee · Lee, Kyung-Jin · Lee, Jong-Lim

ABSTRACT

In this study, the effect of stiffness ratio between base frame and anchorage is evaluated and the seismic verification of nuclear power plant equipment anchorage is performed for typical equipment. The stiffness ratio between base frame and anchorage is mainly controlled by the effective height of side wall plate. And, the change of that stiffness ratio cause the large shift of overturning axis of equipment base. This shift of overturning axis of equipment base is able to reduce the factor of safety about 10%. Therefore, the adequate method for evaluating of effective height of side wall is required as further study.

1. 서 론

원자력발전소의 내진 안전성 확보를 위해서는 안전관련구조물의 내진설계는 물론 안전 관련 기기의 내진성능 검증이 필수적이다. 그러나 원전 건설 및 운영 초기에는 기기의 내진검증없이 원전이 건설되어 오다가, 1970년대 초에 처음으로 내진검증 기준이 제정되었고 1980년대 말에 이르러서야 비로소 완전한 형태의 규제기준 및 관련 기술이 정립되었다고 할 수 있다.

이에 따라 내진검증에 대한 규준이 엄격하지 않았던 시기에 운영허가를 받은 원자력발전소의 기기에 대한 내진 재검증의 필요성이 제기되어 미국내의 원전운영자를 중심으로 결성된 Seismic Qualification Utility Group(SQUG)에서 가동중인 원전 기기의 내진능력 평가 일반수행절차(GIP)를 수립하였다. 이 GIP는 미국의 원자력규제위원회(NRC)의 승인을 받아 미국내 70개 기기내진

* 한국전력공사 전력연구원, 선임연구원

** 한국전력공사 전력연구원, 수석연구원

재검증 대상원전에 활용되고 있으며 IEEE 344-1987 및 ASME QME의 내진검증 기준으로 사용되고 있다. 한편 국내에서는 1996년 10월에 발효된 국제원자력기구(IAEA)의 원자력 안전협약의 의무사항을 이행하기 위해 수행되고 있는 가동중 원전의 주기적 안전성 평가(Periodic Safety Review:PSR)의 일환으로서 가동연수가 오래된 원전 기기에 대한 내진 재검증의 필요성이 제기되고 있다. 가동중 원전의 기기내진 재검증은 진동대(Shaking Table) 시험에 의한 시험을 수행할 경우 과도한 발전소 정지기간과 방사능 오염기기의 시험실 이동등의 난점이 있기 때문에 거의 수행이 불가능하므로, 기기 내진검증 시험 자료와 지진경험 자료를 이용하여 원전 기기의 정착부 사, 지진에 의한 인접기기의 상호작용, 지진 취약기기에 대한 중점 검토만으로 원전 안전성 관련 기기의 내진성능을 평가할 수 있는 SQUG의 GIP를 활용한다. 이에 본 연구에서는 GIP에 제시하고 있는 내진검증 시험자료 및 지진경험자료를 이용한 가동중인 원전의 기기내진 재검증 과정에서 기기의 내진 적합성 입증에 대해 필수적으로 확인해야 할 기기 정착부의 적합성 평가 방법을 예제 해석을 통해 고찰하고 기기의 전도축(OVERTURNING AXIS)이 정착부 앵커의 안전율에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 기기 정착부의 내진적합성 평가

2.1 기기 내진 적합성 입증 일반 절차

가동중인 원전 기기의 내진적합성 입증은 4가지의 내진성 선별지침에 따라 수행되며 각 선별 지침은 다음과 같다.

1) 내진성능(Seismic Capacity)과 지진요구력(Seismic Demand)의 비교

지진경험자료, 내진검증시험 data, 특정기기에 대한 내진검증 data를 기초로 하여 결정된 기기 내진성능은 안전정지지진(SSE)에 의해 기기에 부과되는 지진요구력보다 커야 한다.

2) 기기 유사성 확인

지진경험자료에 의한 한계스펙트럼(Bounding Spectrum)이나 내진검증시험 data, 포괄·기기내진력 스펙트럼(Generic Equipment Ruggedness Spectrum)에 의해 정의된 내진성능을 적용하기 위해서는 해당 기기가 지진경험자료의 기기분류나 포괄 내진검증시험 data의 기기분류의 기기와 유사하여야 하며 해당 기기 분류에 대한 특정 제한사항의 의도에 부합해야 한다. 특정기기에 대한 내진검증시험 data를 사용하는 경우라면 그 내진검증시험 data에 대한 특정 제한사항이 적용된다.

3) 기기 정착부의 적합성 확인

기기 정착부의 정착능력, 설치상태, 강성이 안전정지지진(SSE)에 의해 기기가 설치된 위치에 작용하게 되는 내진요구력을 견딜 수 있어야 한다.

4) 기기 상호작용 검토

해당 기기와 인접한 기기, 계통 및 구조물과 공간적 상호작용이 발생할 수 있는 경우 이러한 영향으로 인해 해당 기기가 의도된 안전정지 기능을 수행하지 못하게 되어서는 안 된다.

이러한 4가지 선별지침에 따른 기기의 내진성 평가는 walk-down 평가, 계산 및 입증 data를 기초로 하여 이루어져야 한다.

2.2 기기 정착부 내진 적합성 평가 절차

기계 및 전기기기의 내진 적합성 평가에 가장 중요한 절차는 기기 정착부의 적합성을 평가하는 것이다. 기기 정착부의 내진 적합성 입증은 정착부의 검사, 해석 및 공학적 판단의 조합으로 이루어진다. 정착부 검사는 기기 및 정착부의 측정과 육안평가로 이루어지며 보완 자료로 발전소의 문서 및 도면을 이용한다. 해석은 정착부에 부과된 지진하중에 대하여 정착부의 정착능력을 비교하기 위해 이루어진다. 이 해석은 참고문헌[3]의 screening table과 EBAC⁽⁵⁾, ANCHOR⁽⁹⁾ 등의 컴퓨터 프로그램을 사용하여 평가를 수행할 수 있다. 기기 정착부의 내진적합성 입증에 사용될 수 있는 정착부 조사, 해석 및 공학적 판단의 조합 방법에는 여러 가지가 있다. 내진성능 평가기술자는 활용 가능한 정보에 기초하여 각 정착부 설치요소의 적절한 조합을 선정하여야 한다. 예를 들어 소수의 매우 튼튼한 정착볼트가 대칭형으로 배치된 펌프에 대해서는 단순한 수계산으로 충분한 반면, 정착볼트가 대칭형으로 배치되어 있지 않은 기기에 작용하는 지진하중을 결정하기 위해서는 상기의 정착부 평가 프로그램 중 하나를 사용하는 것이 바람직하다. 또는 수행되는 검사의 수준과 앵커볼트에 대한 안전계수 사이에는 적절하게 조절하여 이루어 질 수 있다. 기기 정착부의 내진적합성 평가의 단계는 다음과 같은 4가지 주요한 단계로 이루어진다. 각 단계별 주요 내용은 다음과 같다.

1) 정착부 설치검사

정착부 내진적합성 평가의 첫 번째 주요 단계는 정착부 설치상태 및 정착부와 기기 저부와의 연결상태를 점검하는 것이다. 이 조사는 육안점검 및 측정으로 구성되며 필요한 경우에는 발전소 문서 및 도면을 검토하게 된다. 접근 가능한 모든 정착부에 대하여 육안점검해야 하며 해당 기기의 고정에 영향을 미치지 않는 접근 불가능한 정착부는 점검할 필요가 없다. 기기의 고정에 영향을 미치나 접근이 불가능한 정착부는 기기 해체나 제거 등에 의존하지 않고 점검 가능한데 까지 최대한 점검하되 점검하지 않은 부위에 대한 공학적 판단의 근거를 문서화해야 한다.

2) 정착부의 내진력

정착부가 보유하게 되는 정착부의 내진력은 공칭 허용내력에 정착부의 설치 적합성 평가시 확인

된 평창 앵커형태, 관입길이 부족, 앵커간격 및 edge 거리 부족, 콘크리트의 강도 및 균열, 계전기 릴레이(Relay)의 유무 등을 고려한 능력감소계수(Capacity Reduction Factor)를 곱하여 산정한다.

기기 정착 앵커의 허용 인발내력(P_{all})은 다음 식과 같다.

$$P_{all} = P_{nom} RT_p RL_p RS_p RE_p RF_p RC_p RR_p \quad (1)$$

여기서, P_{nom} : 기기 정착앵커의 허용인발력(kip)

$RT_p \sim RR_p$: 능력감소계수

기기 정착 앵커의 허용 전단내력(V_{all})은 다음식과 같다.

$$V_{all} = V_{nom} RT_s RL_s RS_s RE_s RF_s RR_s \quad (2)$$

여기서, V_{nom} : 기기 정착앵커의 허용전단력(kip)

$RT_s \sim RR_s$: 능력감소계수

3) 지진요구력 결정

기기 정착부의 지지요구력은 지진가속도 결정, 지진으로 인한 기기의 관성하중 산정, 정착부에 작용하는 지진 관성하중 산정, 3방향 하중 조합, 총 정착부 하중 산정의 단계로 이루어진다. 각 anchor에 대한 지진요구력은 기기의 무게중심에 등가정적 하중이 작용하는 것으로 가정하여 산정될 수 있다. 이때 등가 정적하중은 입력지진가속도에 기기 질량을 곱한 것을 의미한다.

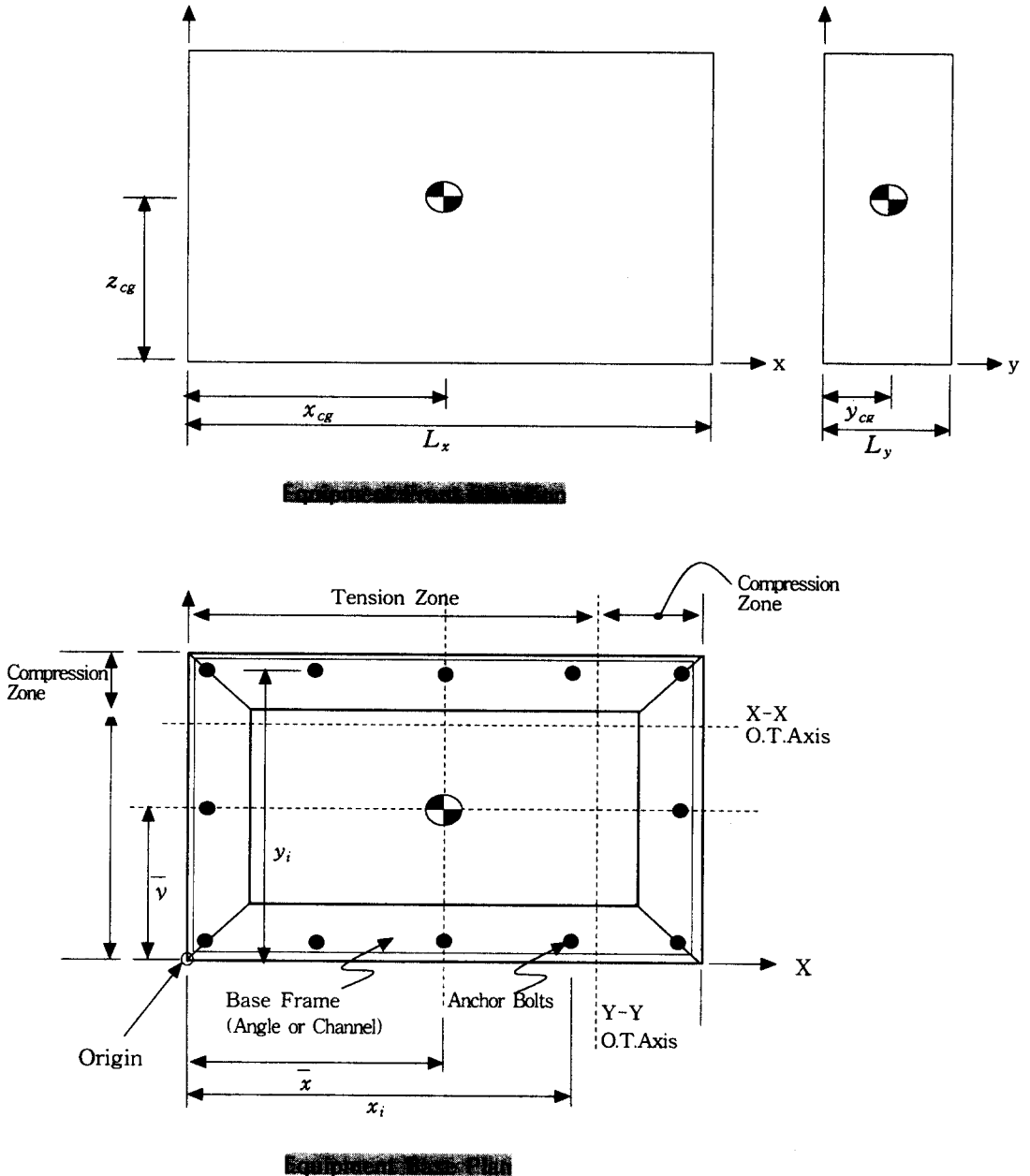
4) 정착부의 내진력과 지진요구력의 비교

정착부의 내진력과 지진요구력을 비교함으로써 정착부의 내진적합성을 확인한다. 상세한 내용은 정착부의 내진적합성 평가 예제에서 기술하기로 한다.

3. 기기의 전도축(Overtuning Axis) 산정

지진력에 의해 기기 정착부의 앵커볼트에 유발되는 지진요구력을 결정하기 위한 첫 번째 단계로서 전도모멘트에 의해 기기가 회전하게 되는 회전중심, 즉 전도축을 산정하여야 한다. 일반적으로 전기 캐비닛과 같이 기기 저부의 frame이 유연한 기기는 전도축이 기기 저부의 중심선에 있다고 가정하며 기기저부 frame의 강성이 매우 강한 경우에는 전도축이 바깥쪽 단부 또는 최외곽 앵커볼트의 중심선에 있다고 가정하여 평가를 진행한다. 그러나 실제로 전도축은 <그림 1>과 같이 기기 저부의 중심선과 바깥쪽 단부의 중간에 위치하게 되며 기기 저부 frame과 앵커볼트의 상대 강성의 함수로 나타나게 된다. 또한 기기 저부 frame의 강성은 캐비닛 외벽판의 영향을 고려해야 하며 강성 산정에 포함되는 높이는 캐비닛 외벽판의 두께와 폭, 높이 등의 영향을 고려하여 결정해

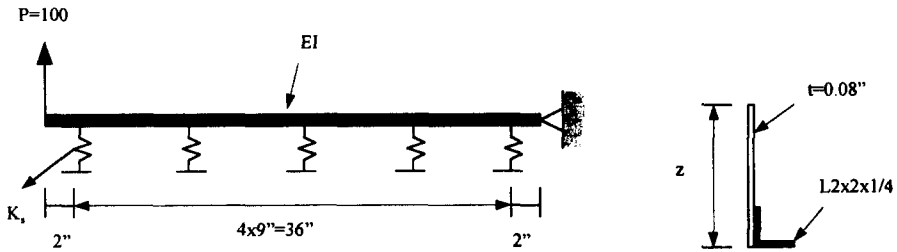
야 한다. 따라서 본 연구에서는 기기 저부 frame의 강성 산정에 포함시키는 외벽판의 높이와 앵커 볼트의 강성의 변화에 따른 전도축의 이동을 민감도 분석을 통해 규명하고자 하였다.



<그림 1> 예제해석용 캐비닛의 형상 및 전도축의 위치

1) 기기 저부 frame의 해석 모델링

기기의 외벽판을 포함하는 기기 저부의 frame와 앵커를 그림 2와 같이 모델링하였다. 여기서 앵커는 스프링으로 모델링되며 자유단부에 작용하는 하중은 전도모멘트를 나타낸다. 이 모델은 선형 시스템을 가정하기 때문에 하중의 절대값에는 물리적 의미가 없으며 기기 저부의 frame과 앵커의 상대적인 강성에 의해 결정되는 앵커의 반력분포를 이용하여 전도축을 산정하였다.



a) frame의 이상화

b) 측벽부의 높이

<그림 2> 기기 저부 frame의 해석 모델링

[표 1] 예제 해석시 고려된 인자

Set	Anchor Bolt Size (in)	Stiffness k_s (kips/in)	Case	z (in)	I_2 (in ⁴)
Set A	3/8	159	Case1	12	23.8
Set B	1/2	530	Case2	13	30.0
Set C	5/8	645	Case3	14	37.1
Set D	3/4	1,098	Case4	18	75.6
Set E	1.0	1,942	Case5	24	168.8

나) 전도축(OVERTURNING AXIS) 산정

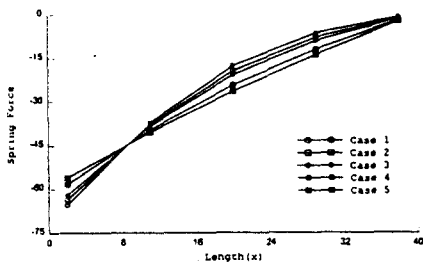
전도축은 앵커볼트의 강성과 캐비닛 외벽판의 강성을 변수로 하여 <그림 2>와 같이 기기 저부 frame이 전도모멘트에 의한 상향하중 P에 의해 각 앵커볼트 위치에서 유발되는 반력을 <그림 3>과 같이 구하였다. 이 반력곡선을 식(1)의 4차 다항식 곡선에 fitting하여 각 계수를 구하고 이 다항식이 0이 되는 점을 전도축(OVERTURNING AXIS)으로 가정하였다. 단, x는 상향 하중 가력점으로부터 전도축까지의 거리를 나타낸다.

$$a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 = 0 \tag{1}$$

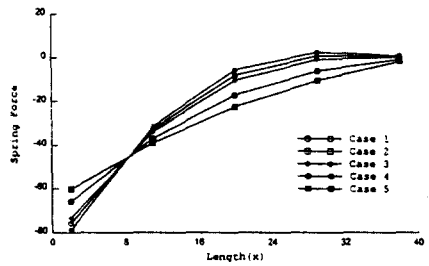
각 Set 별, Case별 전도축의 산정 결과를 정리하면 [표 2]와 같다.

[표 2] 앵커볼트와 기기저부의 강성 변화에 따른 전도축의 위치 변화 (단위:inch)

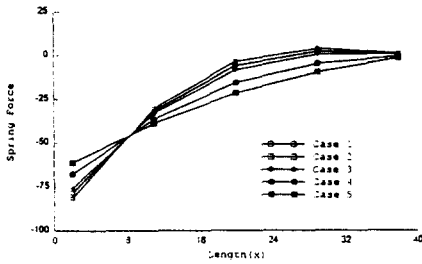
SET	Set A	Set B	Set C	Set D	Set E
CASE	앵커볼트(3/8")	앵커볼트(1/2")	앵커볼트(5/8")	앵커볼트(3/4")	앵커볼트(1.0")
Case 1 (z=12")	39.75	24.33	22.45	18.98	16.45
Case 2 (z=13")	39.83	27.44	24.71	20.28	17.40
Case 3 (z=14")	39.88	32.81	27.71	21.73	18.35
Case 4 (z=18")	39.96	39.72	39.57	32.16	22.91
Case 5 (z=24")	39.98	39.93	39.9	39.76	38.87



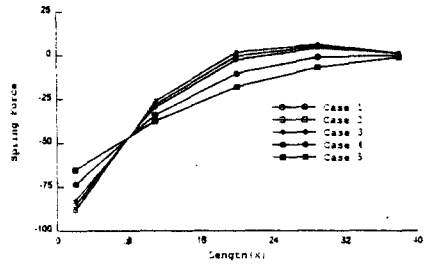
a) Set A



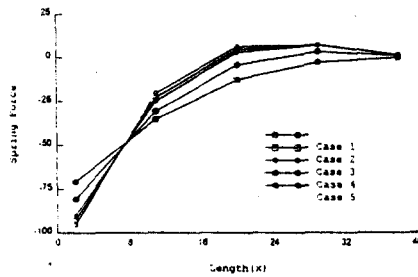
b) Set B



c) Set C



d) Set D



e) Set E

<그림 3> 앵커만력분포

[표 2]에서 기기 저부 frame의 강성이 앵커볼트의 강성에 비해 상대적으로 큰 Set A의 경우에는 전도축이 거의 캐비닛의 바깥쪽 단부($x=40''$) 가까이 위치하므로 기기 저부 frame은 강체에 가깝게 저동하며 캐비닛 외부판의 강성이 전도축의 위치에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 기기 저부의 강성이 앵커볼트의 강성에 비해 상대적으로 적은 Set B ~Set E의 경우 캐비닛 외벽판 높이의 변화에 따라 전도축의 위치가 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. Set D, Set E에서 보이는 바와 같이 전도축의 위치가 기기 저부의 중심($z=20''$)보다 적게 산정되는 경우는 앵커의 강성이 저부 frame비해 충분히 커서 하중작용점에 인접한 앵커가 하중을 대부분 지지하는 현상을 나타낸다. 이는 본 연구에서 가정한 모델의 적용범위를 초과하는 비선형 거동이므로 이 경우 전도축의 위치가 기기 저부의 중심에 있는 것으로 간주하는 것이 타당하다고 판단된다. 따라서 지진에 의해 기기 정착부 앵커에 유발되는 지진요구력을 결정하는데 중요한 인자인 전도축의 위치는 기기 저부의 강성이 앵커볼트의 강성에 비해 상대적으로 약한 경우에는 기기저부의 강성산정에 포함시키는 캐비닛 외벽판의 범위(높이)를 신중하게 결정되어야 함을 알 수 있다.

4. 기기 앵커의 지진요구력 산정 예제해석

4.1 앵커의 지진요구력 산정 방법

지진에 의해 각 앵커에 유발되는 지진요구력은 다음 과정을 통해 결정되었다.

- 1) 등가 정적해석방법을 이용하여 x, y, z 3방향의 지진관성력 계산
- 2) 각 앵커에 지진관성력 배분
- 3) 전도모멘트 하중의 배분
- 4) 각 앵커에 유발된 전단력과 인발력의 조합(SRSS)
- 5) 허용 지지력의 산정 및 안전율 계산

4.2 앵커의 지진요구력의 산정

상기 지진요구력 결정 절차에 따라 기기 정착부 앵커의 내진적합성 평가프로그램인 EBAC⁽⁵⁾에 의해 해석을 수행하였다. 해석 예제는 <그림 1>의 기기 캐비닛을 대상으로 [표 2]에서 Set C의 경우를 선택하여, 전도축의 변동에 따라 입력 지진하중에 대한 앵커의 안전율의 변화 경향을 분석하였다. 해석시 지진가속도는 단위값(1.0g)을 입력하였고 각 정착부 앵커의 허용 인발내력 및 허용 전단내력은 임의값으로 하였다. 해석 결과를 정리하면 다음[표 3]과 같다. 해석 결과에서 λ 는 입력 지진가속도 값에 대해 가장 불리한 조건의 앵커가 견딜 수 있는 허용률로 볼 수 있다. 본 해석 예제의 결과에 있어서 [표 3]에서 보이는 바와 같이 전도축이 기기의 중심선에 위치한 Case 0 경우, 전도축이 외측연단에 위치한 Case 5 경우에 비해 λ 값의 비율이 0.9로 나타나고 있다. 이로써 전도축의 위치변화에 의한 안전율의 변화는 최대 10% 정도 이다.

[표 3] 전도축의 위치변화에 따른 앵커의 안전율 변화

SET CASE	Set C		λ 비율
	전도축의 위치	λ값	
Case 0	20.00 inch	1.48	0.90
Case 1 (z=12")	22.45 inch	1.52	0.93
Case 2 (z=13")	24.71 inch	1.54	0.94
Case 3 (z=14")	27.71 inch	1.57	0.95
Case 4 (z=18")	39.57 inch	1.64	1.0
Case 5 (z=24")	39.90 inch	1.64	1.0

5. 결 론

본 연구에서는 원전기기 정착부의 내진검증의 방법을 제시하고 기기 저부의 frame과 외벽판의 강성이 지진하중 작용시 앵커볼트의 안전율에 미치는 영향을 검토하였다. 검토결과 기초 저부 frame의 강성에 기여하는 기기 외벽판의 높이는 기초의 전도축의 위치에 큰 영향을 미치고 결과적으로는 앵커의 안전율을 변화시키는 것으로 나타났다. 전형적인 기기에 대해서 해석을 수행한 결과 앵커의 안전율 변화는 약 10% 정도로 나타났다. 이는 기기 저부의 강성이 상대적으로 큰 기기의 경우에는 전도축의 위치가 외연단에 위치한다는 가정에 무리가 없으나 기기 저부의 강성이 작은 경우 전도축의 위치를 기기의 외연단에 있다고 가정하는 일반적인 해석방법이 비보수적인 결과를 초래할 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 기기 저부 frame의 강성이 앵커볼트의 강성에 비해 상대적으로 약한 경우에는 기초의 강성에 기여하는 외벽의 높이 산정과 기기의 전도축 산정하기 위한 적절한 계산법의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 한전 전력연구원(1999), "시험 및 경험자료에 의한 안전관련 설비의 내진성 평가기술 개발"
2. EPRI Seismic Qualification Utility Group (1992), "Generic Implementation Procedure (GIP) of Nuclear Power Plant Equipment(Rev.2)"
3. EPRI NP-5228-SL(1991), "Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment Anchorage (Volume 1 : Development of Anchorage Guidelines)"
4. EPRI NP-5228-SL(1991), "Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment Anchorage (Volume 2 : Anchorage Inspection Workbook)"
5. EPRI NP-5228-SL(1991), "Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment Anchorage (Volume 3 : EPRI/Blume Anchorage Computer Program)"

6. EPRI NP-5228-SL(1991), "Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment Anchorage (Volume 4 : Guidelines on Tanks and Heat Exchangers)"
7. EPRI TR-103960(1994), "Recommended Approaches for Resolving Anchorage Outliers"
8. Wisconsin Public Service Corporation(1995), "Kewaunee Nuclear Power Plant USI A-46 Seismic Evaluation Report"
9. Stevenson & Associates(1990), " ANCHOR 3.0 (Rev. 0) User's Guide"
10. CSI(1992), "SAP 90 User's Manual"