

변전설비 내진설계를 위한 유사공진법의 적용성 검증

Validation of Practical Applicability of Pseudo-resonance Method for Seismic Design of Substation Equipment

조양희* 조성국** 박형기* 권경일***
Joe, Yang Hee Cho, Sung Gook Park, Hyung Ghee Kwon, Kyong-il

ABSTRACT

Lately, a guideline for seismic design of electric substation facilities has been newly prepared and issued. The guideline adopts a new simplified dynamic analysis technique called "pseudo-resonance method" from the design code of Japan. The method can effectively consider resonance effect of structural system during earthquake motion. However, reliability and practical applicability of the method have not been fully guaranteed under the different seismic and engineering situations in Korea. This paper presents a validation study of the pseudo-resonance method for practical seismic analysis. For this purpose, various parametric studies have been performed using recorded earthquake motions and idealized substation equipment models. The results showed that the pseudo-resonance method can be effectively used for the practical seismic design of substation facilities in Korea.

1. 서론

1995년 일본의 효고현남부지진을 비롯한 일련의 대형 지진 발생 및 그 피해를 계기로 하여 국내에서도 최근 주요 산업설비에 대한 내진설계기준의 제정이 이루어지고 있다. 변전설비에 대해서도 이미 지난 2001년 향후 건설되는 설비를 위한 내진설계기준⁽¹⁾이 확정 시행되고 있으며, 이어서 기존 설비에 대한 내진성능평가를 위한 기준의 제정작업⁽²⁾이 현재 진행 중에 있다.

기 제정된 국내의 변전설비 내진설계기준에서는 대표적인 변전설비라 할 수 있는 애자형기기 및 변압기부상의 지진응답해석방법으로 "유사공진법"이라는 새로운 해석방법을 채택하고 있다. 이 방법은 일본의 관련기준⁽³⁾에서 채택하고 있는 방법이지만, 국내외의 여타 기준에서는 전혀 사용된 적이 없는 새로운 지진해석방법이다. 이 방법은 지금까지 일본에서 변전설비의 내진설계시 사용해오던 등가정적해석방법의 단점을 개선한 방법으로서, 등가정적해석법과 유사한 정도로 간편하면서도 대상시설물의 동적인 특성을 고려한 해석이 가능하다는 장점이 있는 것으로 평가된다.

* 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사수료, 학생회원

*** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, 학생회원

이 방법은 지진발생시 공진가능성이 높은 변전설비인 애자형기기와 변압기부싱에 한해서 사용하도록 권장하고 있다. 물론 일본의 관련기준 제정시 이 방법의 적용성에 대한 검토가 이루어진 바 있다. 그러나 국내의 변전설비 및 지진의 특성이 일본과 다를 수 있기 때문에 유사공진법의 국내적용을 위한 별도의 확인과정이 필요하다.

이 연구에서는 새로이 채택된 유사공진법의 적용배경 및 방법과 이 방법을 국내설비에 적용하는 과정 및 절차에 대한 내용을 소개하였다. 또한, 대표적인 두 가지 변전설비와 다수의 이상화된 변전기기 모델에 대하여 유사공진법에 의한 해석 결과와 실측지진기록을 입력으로 하는 시간이력 해석 결과로부터 구해진 응답비를 상호 비교, 검토함으로써 그 실용적 적용성과 신뢰성 여부를 검증하였다.

2. 유사공진법

2.1 배경

지금까지 변전설비에 대해서는 내진설계가 수행되지 않았거나 혹은 등가정적해석방법을 통한 약식내진설계가 이루어져 왔다. 등가정적해석에서 고려하는 설계정적수평가속도는 설계지반수평가속도에 일정 값의 증폭률을 곱하여 사용하였다. 그러나, 현재까지의 실무에서는 이와 같은 증폭률을 대상기기와 지반의 동적특성에 무관하게 적용하였기 때문에 애자형기기 및 변압기부싱 등과 같이 지진시 공진가능성이 있는 특정기기에 대해서는 비안전측의 설계결과를 줄 수도 있다. 이와 같은 사실은 변전설비에 대한 지금까지의 지진피해사례 분석결과에서도 잘 나타나고 있다. 등가정적해석법의 이러한 단점을 개선하기 위하여 해석방법이 복잡하지 않으면서도 설계지진과 대상설비의 동적특성에 따른 공진효과를 동역학적인 방법을 이용하여 고려할 수 있는 새로운 방법으로서 소위 “유사공진법”을 채택하게 되었다.

일본에서는 “의공진법(擬共振法)”으로 불리는 이 방법은 대상설비의 주진동수를 갖는 정현파를 일정주기동안 작용시켜 그 응답을 설계지진력으로 사용하는 방법으로서 다음과 같은 이론적 합리성 및 장점을 가지고 있다.

- 설비가 설치되는 지반의 고유한 특성을 반영할 수 있다.
- 현재 생산되는 대부분의 애자형기기 및 변압기부싱의 주진동수는 0.5~10Hz로서 지진파의 진동수 특성과 유사하여 공진의 가능성이 크다.
- 대상이 되는 애자형기기, 변압기부싱 등은 취성재료로서 입력지진의 지속시간이나 진동수특성 보다는 최대응답값에 따라 파괴 여부가 결정되기 때문에 복잡한 설계지진과 대신에 유사한 최대응답치를 줄 수 있는 정현파를 입력으로 사용할 수 있다.

2.2 주요내용

현재 국내 설계기준에서 채택하고 있는 유사공진법의 요건은 일본의 관련기준⁽³⁾ 내용과 대동소이하며 그 주요내용은 다음과 같다.

- (1) 입력운동으로서 대상설비의 주진동수와 동일한 진동수를 갖는 정현파를 사용하며, 지속시간은 고유주기의 2배(공진정현2파) 혹은 3배(공진정현3파)로 한다.
- (2) 전단파속도(V_s)가 150m/sec이상 혹은 N치가 5이상인 지반상에 설치되는 애자형기기 및 변압

기부상에 한하여 적용한다.

- (3) 입력운동으로 사용하는 정현파의 크기는 표 1에 보인 바와 같다.
- (4) 변압기부상에 대한 유사공진법의 적용 과정은 그림 1에 보인 바와 같다.

표 1 애자형기기 및 변압기부상의 설계지진력

	애자형기기	변압기부상
지표면 입력용 기본설계 지진력 (A) ¹⁾	공진정현 2파 $A=IC_a$	좌동
기초 등의 증폭률 (B)	1.2	2.0
연직가속도, 접속도체 등에 의한 불확정요인 (C)	1.1	1.1
보정계수 (D=B×C)	1.3	2.2
기기의 설계지진력 결정방법 ²⁾	<ul style="list-style-type: none"> • 기기설치대 하단에 입력 • 설계지진운동 - 크기 $A \times B$의 공진정현2파 혹은 - 크기 $A \times B$의 공진정현3파⁽²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • 부상 하단에 입력 • 설계지진운동 - 크기 $A \times B$의 공진정현2파 혹은 - 크기 $A \times B$의 공진정현3파
기기의 설계지진력 ³⁾	<ul style="list-style-type: none"> • 작용점 : 기기의 설치대 하단 • 크기 : $(A \times D)/1.3$의 공진정현3파 	<ul style="list-style-type: none"> • 작용점 : 부상 하단 • 크기 : $(A \times D)/1.3$의 공진정현3파

- 주 : 1) 건교부의 상위레벨 내진설계기준 참조
 2) 변압기부상은 $f_1, f_1/f_0, f_1/f_a, N$ 값에 따라 필요한 경우 상세설계 수행
 3) 공진정현 3파의 가속도 응답배율 = 1.3
 공진정현 2파의 가속도 응답배율

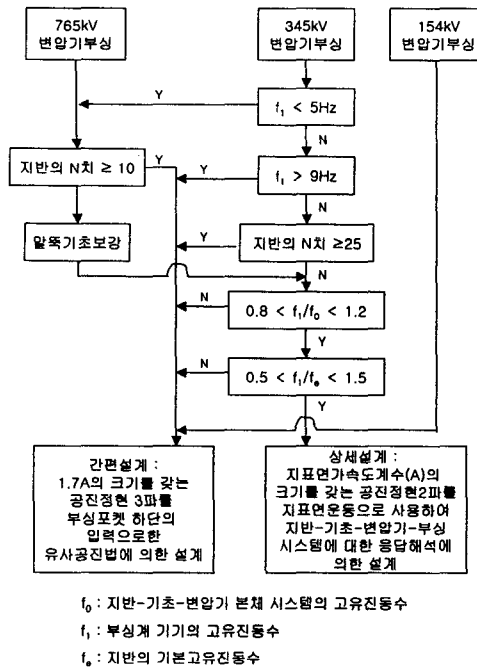


그림 1 유사공진법에 의한 옥외변압기부상의 간편 설계절차

3. 검증이 필요한 내용

상기 2항에서 기술한 바와 같이 국내기준에서 채택하고 있는 유사공진법은 그 적용과정에서 각 단계별로 다음과 같은 경험적 혹은 통계적 사실들을 전제로 하고 있다(표 1 참조).

- (1) 설계지진파에 의한 대상 기기의 최대응답은 일정 크기를 갖는 등가의 공진정현파에 의한 최대 응답보다 작다.
- (2) 공진정현3파에 의한 대상 기기의 응답과 공진정현2파에 의한 응답의 비는 1.3 정도이다.
- (3) 애자형기기의 기초 등의 존재에 의한 지표면 운동에 대한 기기설치대하단(기초부상단)운동의 증폭률은 1.2이다.
- (4) 변압기부상의 경우, 지반-기초-변압기-부상 시스템의 다음 조건 중 하나를 만족할 경우 기초 및 변압기 본체의 존재에 의한 지표면 운동에 대한 부상하단 운동의 증폭률은 2.0이다.
 - $f_1 > 9Hz$
 - $N치 > 25$
 - $f_1/f_0 < 0.8$ 혹은 $f_1/f_0 > 1.2$
 - $f_1/f_e < 0.5$ 혹은 $f_1/f_e > 1.5$

*) 부호설명은 그림 1 참조

이상과 같은 가정 혹은 전제는 일본에서 축적된 경험자료에 근거한 것이다. 따라서, 이들 값들을 국내설비에 적용하기 위해서는 별도의 검증과정이 필요하다.

4. 예제분석을 통한 적용성 검증

이 연구에서는 상기 3항에서 제시한 내용들을 검증하기 위하여 다양한 예제 해석을 수행하였다. 예제 해석에 사용된 대상설비 및 입력운동의 종류 및 특성은 다음과 같다.

(1) 대상설비 및 지반조건

- 대상설비 : 애자형기기(차단기), 변압기부상, 이상화시킨 변전기기
- 주요 변전기기의 고유진동수 범위 : 0.5~10 Hz
- 변압기 본체의 고유진동수 범위 : 15.0 Hz이상
- 지반조건 : $V_s = 150, 200, 250, 350m/sec$ (지반의 밀도=2.0, 포아송비=0.3)

(2) 입력지진파

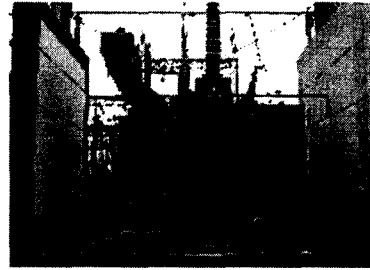
공진정현파 응답을 실제지진파응답과 비교하기 위하여 국내외에서 각각 10개씩 전부 20개의 실제지진파를 선택 사용하였다. 선택된 해외 실제지진파는 El Centro 지진을 비롯하여 여러 관측소에서 계측된 평균 규모가 8.5정도인 지진을 대상으로 하였다. 반면에 국내에서 계측된 지진은 1996년에 한반도에서 계측된 지진가운데 규모가 4.2 이상인 지진을 대상으로 암반상에서 계측된 기록으로서 최대지반가속도가 0.04g 미만인 중약진 지진기록이다.

4.1 해석대상설비 및 해석모델

이 연구에서는 대표적인 해석대상 설비로서 345kV 옥외 접지탱크형 가스차단기와 변압기를 선택하였다. 또, 설비의 진동수별 혹은 지반-기기 시스템별 응답특성의 분포를 확인하기 위해서 다양한 진동수를 갖는 변전설비로서 단자유도계와 2자유도계로 이상화한 모델을 인위적으로 작성하여 사용하였다. 해석대상으로 사용된 차단기와 변압기의 형태 및 해석모델은 각각 그림 2 및 그림 3에 보인 바와 같다.

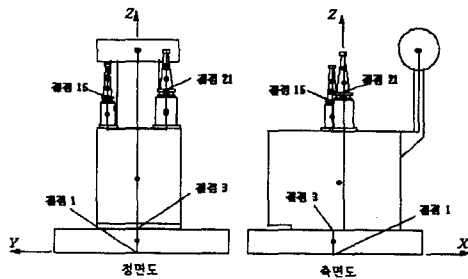


(a) 차단기



(b) 변압기

그림 2 해석에 사용된 대표적인 변전기기



(a) 차단기

(b) 변압기

그림 3 선택된 변전기기의 해석모델

4.2 지반의 모델링

기초 및 지반의 존재에 따른 영향을 평가하기 위하여 적용된 기초-지반시스템의 모델링방법은 다음과 같다.

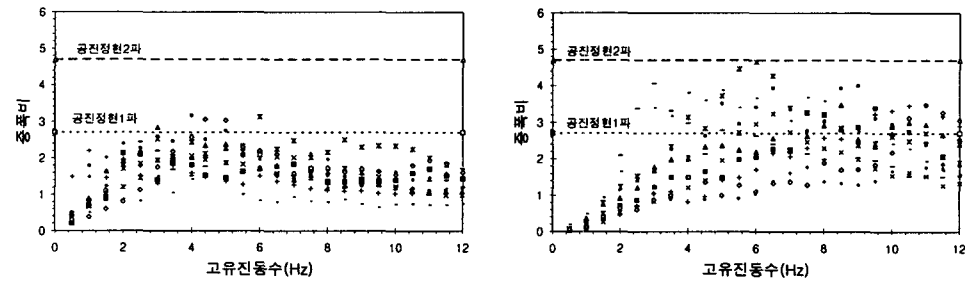
- 기초는 3개의 병진운동 성분과 3개의 회전운동 성분으로 구성된 총 6개의 자유도를 갖고, 매입깊이가 기초 폭의 5배 이하인 경우는 각 자유도의 간섭효과는 고려하지 않는다.
- 사각형 기초의 강성은 반무한체 표면에 구속된 등가의 원형단면으로 치환하여 기초의 강성 및 감쇠비를 산정하게 된다.
- 진동기초로부터 전달되는 하중에 대한 기초지반의 거동을 질량과 스프링상수 및 감쇠상수

를 포함하는 집중계수 근사식으로 표현할 수 있다.

- 깊은기초의 경우에는 주어지는 하중의 형태(연직, 수평, 수평축회전, 비틀림 등)에 따라 적합한 설계를 해야하고, 군말뚝인 경우에는 별도의 군말뚝 효과를 고려한다.

4.3 실제지진파와 공진정현파의 응답비교

실제지진파 응답과 공진정현파 응답을 비교하기 위해서는 설비를 단자유도로 또 지반을 강제로 각각 이상화한 단순모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 그림 4는 공진정현파와 실제지진파 입력 운동에 대한 0~12Hz의 고유진동수를 갖는 단자유도시스템(5% 감쇠)의 응답을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 실제지진파에 의한 구조응답의 증폭비가 공진정현2파의 증폭비에 비하여 대부분 적게 계산됨을 알 수 있다. 이로부터 변전설비용 지진해석법으로 공진정현2파를 이용할 경우에도 비교적 안전측의 설계를 유도할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 해외 지진기록

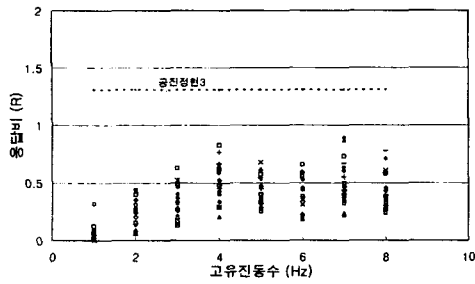
(b) 국내지진

그림 4 실제지진파와 공진정현파 입력운동에 대한 단자유도 모델의 응답증폭비 비교

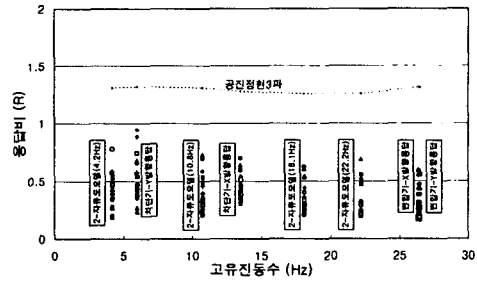
4.4 공진정현2파와 공진정현3파의 응답비교

표 1과 그림 1에서 보는 바와 같이, 동적특성을 보다 효과적으로 고려하기 위해서 공진정현2파 대신에 공진정현3파를 사용할 수 있으며, 이 경우에는 감소된 진폭을 갖는 공진정현파를 사용하게 된다. 이때, 공진정현2파와 공진정현3파에 의한 응답비를 1.3으로 가정하고 있다. 이와 같은 내용을 확인하기 위하여 다양한 진동수를 갖는 단자유도계 모델 및 대표적 설비인 차단기와 변압기는 물론 기기-기초 시스템을 2자유도계로 모델링한 대표 시스템에 대한 비교해석을 수행하였다. 그림 5는 해석 결과 얻어진 공진정현2파 응답에 대한 공진정현3파와 실제지진파 응답의 응답비를 서로 비교한 그림이다.

그림 5에서 보듯이, 모든 모델에 대해서 예외없이 공진정현2파와 공진정현3파의 응답비가 대략 1.3정도이며, 특히 실제 지진기록에 대한 응답들이 공진정현2파의 응답에 비하여 작게 나타나고 있다. 이로부터, 변전기기의 내진설계를 위하여 공진정현2파를 입력운동으로 적용하여도 보수적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 공진정현2파를 대신하여 공진정현3파를 입력운동으로 사용할 경우에는 그 진폭의 크기를 1/1.3배 정도로 줄여서 사용할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 단자유도모델



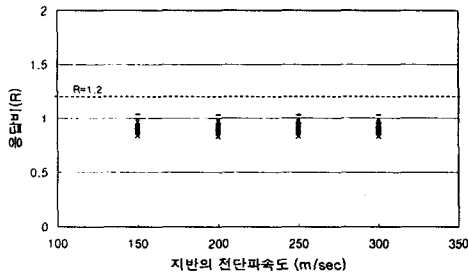
(b) 변전기기 모델

$$\text{응답비} = \frac{\text{공진정현3과 혹은 실제 지진파에 대한 응답}}{\text{공진정현2과에 대한 응답}}$$

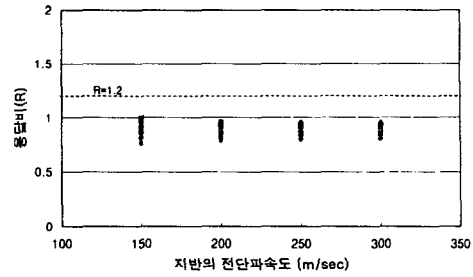
그림 5 입력운동의 종류에 따른 최상층 가속도 응답 비교

4.5 기초의 존재에 의한 증폭률

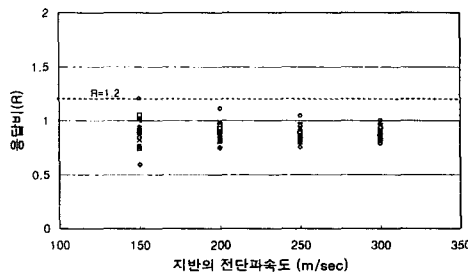
앞서의 설계기준에서는 유연지반상 기초에 설치되는 애자형기기의 지진응답에서 지반상 기초의 존재에 의한 응답증폭률을 1.2로 가정하고 있다. 여기서는 다양한 지반특성에 대하여 기초의 존재 즉 기기-기초시스템에 의한 응답의 증폭률을 검토하기 위하여 고정지반상 기기의 응답에 대한 유연지반상 기기의 응답비를 검토하였다.



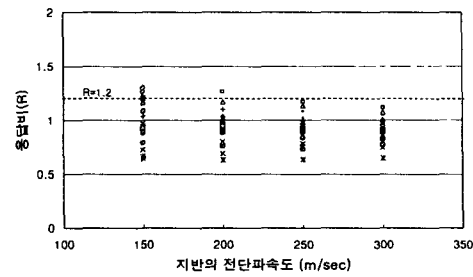
(a) 상부구조 고유진동수=1.5Hz



(b) 상부구조 고유진동수=2.5Hz



(c) 상부구조 고유진동수=5.0Hz



(d) 상부구조 고유진동수=7.5Hz

$$\text{응답비} = \frac{\text{유연지반상 기기 상단의 최대응답가속도}}{\text{고정지반상 기기 상단의 최대응답가속도}}$$

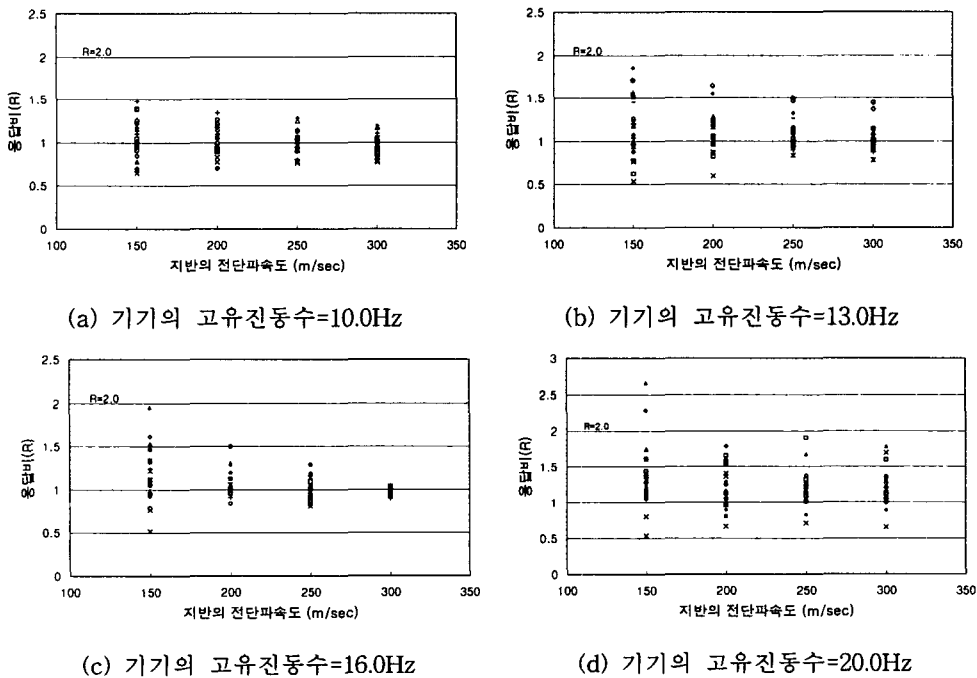
그림 6 애자형기기의 2자유도 모델의 고정지반상 응답에 대한 유연지반상 응답의 증폭비율 비교

해석을 위하여 기기-기초시스템은 등가의 2자유도계로 단순화하였다. 해석모델은 상부구조의 강성과 지반의 강성을 변화시켜 가면서 다양한 진동수를 갖는 시스템으로 이상화하였다. 이때, 상부구조모델의 감쇠비는 5%인 경우를 대상으로 하고, 지반을 포함한 기기-기초시스템의 전체 감쇠비는 관련 문헌⁽⁴⁾을 참고하여 시스템 감쇠비를 7%로 가정하였다.

해석결과 얻어진 고정지반에 대한 유연지반의 응답비를 그림 6에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 대부분의 애자형기기의 지진응답에서 지반상 기초의 존재에 의한 응답증폭률이 1.2이하로서 설계지침의 추천 증폭비가 보수적임을 알 수 있다. 그러나, 상부구조의 강성이 크고(약 7.5Hz 이상) 지반이 유연한 경우($V_s=150\text{m/sec}$)는 일부 지진에 대한 응답의 증폭률이 1.2를 약간 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서, 상대적으로 유연한 지반상의 강성이 큰 기기에 대한 지진응답 계산 시에는 지반의 증폭효과를 보다 정밀한 방법으로 고려할 필요성이 있으며, 이에 대한 추가 연구가 요망된다.

4.6 변압기의 증폭률

앞서의 설계기준에서는 변압기부싱의 경우 변압기와 그 하부의 기초 및 지반 등에 의하여 증폭되는 지진응답의 비를 2.0으로 가정하고 있다. 이 항에서는 다양한 지반 및 변압기 특성을 대상으로 응답의 증폭률을 검토하였다.



$$\text{응답비} = \frac{\text{유연지반상 기기 상단의 최대응답가속도}}{\text{고정지반상 기기 상단의 최대응답가속도}}$$

그림 7 변압기 모델의 기초를 포함한 기기 증폭비 비교

해석을 위하여 변압기-기초시스템은 등가의 2자유도계로 모델링하였으며, 부싱은 별도 모델링하지 않고 그 질량을 변압기에 포함시켰다. 이때, 변압기의 고유진동수는 10Hz, 13Hz, 16Hz와 20Hz인 경우로 가정하였다. 입력운동의 특성과 지반의 특성 및 시스템감쇠비는 위 4.5항과 같다.

그림 7에서 변압기 모델의 경우에 기초를 포함한 기기의 증폭비가 대부분 2.0이하로서 설계지침에서 제시된 기준값 이하임을 확인할 수 있다. 이 경우에도 역시 지반이 상대적으로 유연한 경우(전단파속도 150m/sec 이하)에는 지진기록에 대한 증폭비가 2.0을 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서, 그림 1의 설계절차에서 제시하였듯이 이와 같은 경우에는 지반의 영향을 별도로 고려한 정밀해석을 수행하여야 함을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 최근 변전소설비의 내진설계를 위하여 동적해석방법으로 채택된 유사공진법에 대한 개념을 설명하고, 그 적용결과에 대한 신뢰성 및 실용적 타당성 여부를 검증하였다. 검증을 위해서 국내에 설치된 실제 및 이상화된 기기를 대상으로 국내외에서 계측된 실제지진기록을 적용시키는 다양한 매개변수해석을 수행하였다.

연구결과, 새로이 채택된 유사공진법은 지금까지 사용되어온 등가정적하중법에 비해 그 적용과정이 단순하면서도 시스템 및 입력운동의 동적특성을 효과적으로 고려할 수 있는 실용적인 방법임을 확인하였다.

감사의 글

이 연구의 일부는 정부의 산업자원부와 한전전력연구원(KEPRI)의 연구비지원에 의하여 수행되었으며, 저자 일동은 이에 감사드립니다. 또한, 이 논문의 기초자료에 대하여 많은 의견을 교환하여 주신 한국원자력연구소의 최인길 박사님께도 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 송변전설비 내진설계 실무 지침서(안), 2003. 3
2. 산업자원부, 내진설계기준 설정에 따른 송변전설비의 안전도 평가, 중간보고서 및 차년도사업계획서, 2003. 8
3. 日本電氣協會, 変電所等における 電氣設備の耐震設計指針, 電氣技術指針 發変電篇, JEAG 5003-1999, 1999. 2
4. 박형기, 조양희, 이용일, “지반에 대한 구조물의 상대강도가 지반-구조물 상호작용에 미치는 영향”, 대한토목학회논문집, 제5권, 제1집, 1985. 3, pp.123-132.