

765kV 변전소 지진계측시스템 구축과 관측자료 예비분석

765kV Substations Earthquake Monitoring System and Preliminary Data Analysis

박동희* 연관희** 서용표*** 김병철****
Park, Dong Hee Yun, Kwan Hee Suh, Yong Pyo, Kim Byung Chel

ABSTRACT

Facilities of 765kV Substation(S/S) play an important role in electric power supply grids. Various power facilities of 765kV S/S might be damaged enormously if a strong earthquake occurs. In an effort to mitigate possible earthquake disasters, KEPRI (Korea Electric Power Research Institute) set forth plans to verify seismic safety of the facilities of 765kV S/S. To accomplish the task, an earthquake monitoring systems is constructed at four 765kV S/S sites(Shin-AnSung, Shin-TaeBaek, Shin-SeoSan and Shin-GaPyung). Data from these earthquake monitoring stations are being transmitted via satellite communication. Currently, KEPRI is operating an earthquake monitoring system in freefield of Shin-SeoSan S/S (NSS) tentatively. Also, the data from NSS is preliminarily analyzed using the horizontal to vertical (H/V) spectrum ratio method. The method of H/V spectrum ratio has been used to infer site amplification without previous knowledge of near surface geology. The results of data analysis shows good S/N ratio and amplification of 20-25 Hz by site effect. In the near future, the accumulated data is expected to provide a basis for assessing and predicting any damages to integrity of 765kV S/S facilities by earthquakes.

1. 서론

1990년대 후반에 들어서면서, 한반도 주변 국가인 대만, 일본 및 중국 등에서 발생한 대규모 지진으로 인하여 전력설비에 큰 피해가 발생한 바 있으며, 우리나라도 홍성지진(1978, $M_L=5.0$), 백령도지진(1995, $M_L=5.0$), 영월지진(1996, $M_L=4.0$), 경주지진(1997, $M_L=4.2$), 울진지진(2004, $M_L=5.2$)과 같은 중소 규모의 지진활동이 증가 추세에 있어 전력설비와 같이 지진피해 발생시 파

* 정회원 · 한전전력연구원, 일반연구원

** 정회원 · 한전전력연구원, 선임연구원

*** 정회원 · 한전전력연구원, 책임연구원

**** 희송저오텍(주) 기술연구소

급효과가 큰 주요 산업설비에 대한 정부 및 산업계의 체계적인 대책 수립이 요구된다. 특히, 765kV 변전설비는 기존 154kV 및 345kV 변전 설비에 비하여 그 중요성이 매우 큰 설비로서 이들 설비가 지진으로 인한 피해를 입을 경우, 직접적인 경제적 손실의 정도가 심각할 것으로 예상된다. 또한, 변전설비의 가동 정지로 인한 전력의 공급 중단 등이 초래하는 2차적 파장은 경제적인 측면뿐만이 아니라 사회 전반에 걸쳐 더욱 더 증폭될 것으로 예상되므로, 신규 건설되는 변전설비에 대한 내진성능 확보뿐만 아니라 기존 변전설비에 대해서도 체계적인 내진성능 평가를 수행하여, 향후에 발생 가능한 지진에 대비할 필요가 있다. 아울러 765kV 변전소 부지 내에 상시 지진감시시스템을 구축하고 변전소 부지의 지진동을 실시간 감시함으로써 지진발생에 따른 변전소 피해를 최소화할 필요가 있다¹⁾.

이에 한전 전력연구원에서는 지진발생시 765kV 변전소에 대한 신속한 피해평가와 사후 즉시 안전조치 그리고 765kV 변전소 내진안전성 평가/내진설계 등에 필요한 입력지진동 관련 기초자료를 확보하기 위하여 한국전력공사에서 운영중인 신안성, 신태백, 신서산, 신가평 765kV 변전소 내에 2005년 9월부터 지진계측시스템을 구축하기 시작하여 현재 지진계 및 가속도계 설치 및 연결을 제외한 H/W 설치공사가 완료되었으며, 2006년 중 가속도계 및 지진기록계가 도입되는대로 설치를 완료하고 분석서버를 구축할 예정이다. 2006년 1월부터는 신서산 변전소 자유장부지에 지진가속도계를 설치하여 시험운영 중에 있다. 본 논문에서는 전력연구원에서 구축중인 765kV 변전설비의 지진계측시스템 개요에 관하여 설명하고, 시험운영중인 신서산 지진 계측시스템의 관측 자료의 예비분석 결과에 대하여 기술하였다.

2. 지진계측 시스템의 구축 목적

지진발생 후 신속한 안전조치를 수행하기 위해서는 대상 부지에 지진계측시스템을 구축하고 실시간으로 지진동을 상시 감시할 필요가 있다. 아울러 지진발생에 따라 변전소의 계속 운전에 지장이 있는 지를 파악하기 위해서는 765kV 변전설비에 대한 운영기준지진(Operating Basis Earthquake)의 설정이 필요하다. 그림 1은 향후 운영기준지진이 어떻게 설정될 수 있는 지를 개념적으로 도시한 그림이다. 그림 1에서 최대지반가속도(PGA)=0.3g는 가상적으로 설정된 765kV 변전설비에 대한 내진안전성 수준 즉 내진력(seismic capacity)이다.

765kV 변전설비에 대해서는 일반적으로 내진설계를 수행함으로써 내진설계 시 사용된 표준응답스펙트럼이 있고, 따라서 응답스펙트럼 영역에서 구조물 고유진동수별로 변전설비의 내진력이 결정될 수 있다. 한편 운영기준지진은 PGA 값으로 설정되어져 실시간으로 계측되는 지진동과 비교됨으로서 초과여부가 신속히 결정되어야 한다.

따라서 응답스펙트럼 영역의 내진력 초과여부에 대한 실시간 평가가 불가능하기 때문에 그림 1과 같이 지진계측 자료를 통해 부지고유응답스펙트럼을 평가하고 이에 부합하는 운영기준지진 PGA를 환산하는 과정이 필요하다. 이상에서 언급한 765kV 변전설비의 내진력 및 부지고유응답스펙트럼 평가 등은 차후 지진계측 시스템을 계속 운영함으로써 최종적으로 산정할 예정이다.

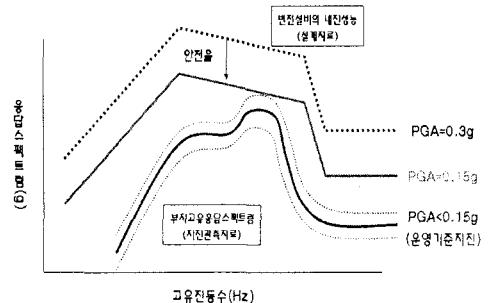


그림 1. 운영기준지진(OBS) 설정

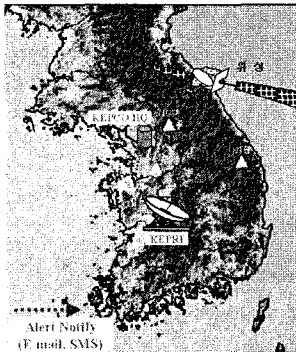
3. 지진 계측시스템의 구성

한전 전력연구원에서 구축중인 765kV 변전소 지진계측 시스템은 현재 전력연구원에서 운영중인 원자력/수, 화력 발전소의 지진관측망의 구성도를 참조하였다.

한국전력공사에서는 전력 송전의 효율을 높이기 위하여, 기존의 154kV, 345kV로 송전하는 방법에서 765kV로 송전하는 기술을 개발하고 765kV로 전송하기 위한 전력의 승압 및 강압을 위하여 신안성, 신서산, 신태백, 신가평으로 명명된 4개소의 765kV 변전소를 운영 중에 있다. 이들 변전소의 위치는 표 1 및 그림 2와 같으며, 4개의 변전소에 설치한 지진계측 시스템에 기록된 지진동 자료는 한국전력공사 위성통신망을 사용하여 전력연구원내에 위치한 위성센터까지 실시간으로 전송된다. 그림 3은 지진계측 시스템의 구성기기 및 기능을 나타낸 것으로 기존의 전력연구원의 지진관측망에서 사용중인 계측장비와 동일하게 구성하여 수신기로는 Kinematics사의 Epi Sensor, 기록계로는 Quanterra사의 Q4120를 설치하게 된다. 기존의 전력연구원 지진관측시스템 및 기타 지진관측소를 운영하는 기관과의 차별점으로는 위성통신을 이용하여 실시간으로 지진자료를 전송받고 있다는 점이다.

표 1. 765kV 변전소 지진계측시스템의 설치위치

| 관측소 ID | 설치위치 | 행정구역 |
|--------|---------|-------------|
| NAS | 신안성 변전소 | 경기도 안성시 고삼면 |
| NSS | 신서산 변전소 | 충남 서산시 운산면 |
| NGP | 신가평 변전소 | 경기도 가평군 설악면 |
| NTB | 신태백 변전소 | 강원도 태백시 원동 |



NGP: 신가평, NAS: 신안성, NSS: 신서산, NTB: 신태백

그림 2. 지진계측시스템 모식도

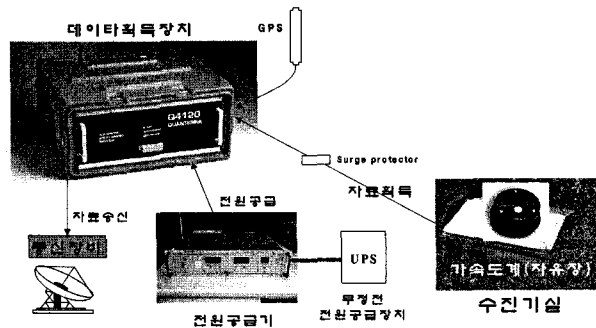


그림 3. 지진계측시스템 구성기기 및 기능

각 변전소 부지에 대한 765kV 변전소 지진계측시스템 구축 시 운영목적 달성을 위해 개념설계가 먼저 되었으며, 개념설계 시에는 변전소의 일반적인 지반특성과 지진응답특성이 고려되었다. 일반적으로 765 kV 변전소의 경우 고도가 높은 산의 중턱 일부를 절개한 후 보다 넓은 부지 확보를 위해 부지의 1/2 정도를 성토한다. 성토한 지역에 대해서는 기초파일을 설치하고 지표에 변전설비기기 기초공사를 한다. 이러한 변전소의 일반적인 지반특성을 고려하여, 그림 4과 같이 성토된 지역의 연약한 지반(soft soil) 상에 위치한 중요구조물 기초에 가속도계를 하나 배치하고, 절개된 부분에 노출된 단단한 기반암(rock foundation) 상에 또 하나의 가속도계를 배치하였다.

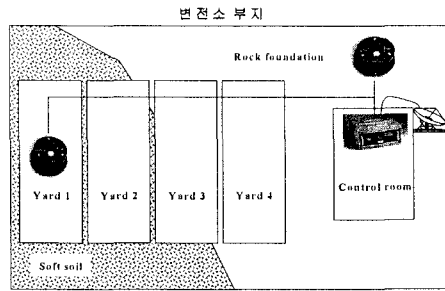


그림 4. 765kV 변전소 내 지진계측시스템 구성기기 배치안

그림 4와 같이 부지 내에 두개의 가속도계를 배치한 이유는 일반적으로 연약지반 상에서는 지진파의 증폭이 예상되고, 절개된 단단한 기반암에서는 증폭이 없고 잡음이 심하지 않기 때문에 지진계측시스템을 통한 상시 지진동감시의 기준신호로 활용할 수 있기 때문이다. 의도적으로 증폭이 심한 연약지반 상에 가속도계를 설치한 이유는 향후 운영기준지진 설정 시 보수적으로 변전소를 운영하기 위해서이다. 특히 연약지반 상에 설치하게 되는 가속도계는 주요 변전설비가 집중된 구조물 기초에 직접 설치하여 구조물 기기에 입력되는 지진동을 계측하기 위해서이다. 한편 단단한 암반에 설치하는 가속도계는 정밀하게 지진을 계측함으로써 오동작의 발생을 최소화하고, 연약지반 지반응답특성과의 비교를 통해 연약지반에 의한 증폭특성을 평가하고 향후 765kV 변전소 건설시 내진설계 및 본 연구의 내진안전성 평가 결과 등에 활용하기 위해서이다.

4. 지진계측시스템 H/W 현장 설치 개요

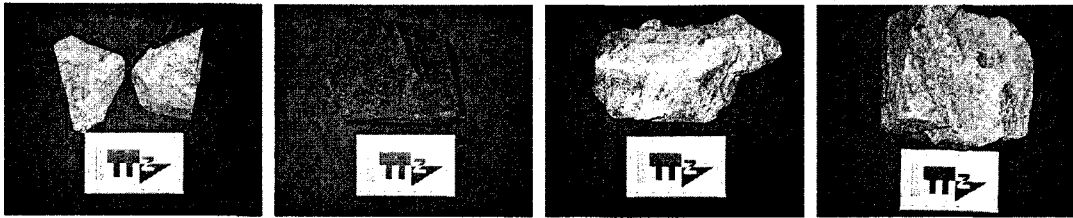
변전소별 지진계측시스템 H/W 현장설치를 위해서 다음의 절차로 수행하게 된다.

- ㉓ 부지선정, ㉔ 자유장 가속도센서 수진실 설치 공사, ㉕ 가속도센서 설치, ㉖ 기록계-센서 연결 Cable 포설 공사, ㉗ 지진기록계 설치공사, ㉘ 사내 위성통신 연결

그림 4에서 작성된 개념설계에 부합하고자 변전소 부지 내에서 최적의 자유장 지진계 요건을 가진 설치 지점을 결정하기 위한 현장 답사 및 지반조사를 실시하고 관련 지반조사 보고서 등을 검토하였다. 자유장 지진계측기를 설치할 지점의 요건은 변전소 부지에서 가장 전형적인 지반진동을 보이는 기반암으로서 이러한 조건에 맞는 지점을 선정하기 위하여 4개 변전소 부지에 대하여 지반 및 지질조사를 실시하였다. 이외에도 765kV 변전소 부지내의 자유장 지진계 설치지점을 선정할 때 고려한 점은 기반암 노출 위치, 심도, 풍화도, 부지 내에서의 향후 부지활용 계획, 미관, 홍보, 전원확보, 통신케이블의 길이와 기존 관로 사용의 용이성, 위성 안테나와의 거리 등이다. 이러한 여러 가지 조건을 종합적으로 검토하여 최종적으로 지점을 선정하여 골작을 하여 기반암을 확인하고 자유장 지진계 수진기실 설치작업을 하였다. 표 2는 자유장 지진가속도계 설치 지점에 대한 지반조사 결과를 요약한 표로 인근 지질을 대표하며 공학적으로 인근 구조물의 영향을 받지 않는 지점으로 선정하였다. 그림 5는 선정된 지점의 기반암 샘플이며 그림 6은 선정된 자유장 지진 가속도계의 설치 위치를 나타낸 것이다. 구조물 지진계측기 설치 지점은 변전소 구조물 상에서 지진에 의한 진동이 증폭되어 전형적인 구조물의 반응을 보일 것으로 추정되는 지점으로 선정되었으며, 이를 위해 구조물 배치 등을 검토하여 각 변전소의 현장제어동 지하에 가속도계를 설치하는 것으로 구성하였다. 표 3은 구성기기별 설치 지점을 나타낸 것이다.

표 2. 765 kV 변전소 자유장 지진계 기반암 특성 요약

| 변전소 \ 기반특성 | 신안성 | 신서산 | 신가평 | 신태백 |
|---------------|--------|--------|----------|---------|
| 기반암종류 | 호상편마암 | 편암 | 화강암질 편마암 | 적색사암 |
| 풍화도 | 약한 풍화 | 중간 풍화 | 신선 | 중간 풍화 |
| 기반암 심도 | 지표면 | 1.5 m | 1.5 m | 1.5 m |
| 지질시대 | 선캠브리아기 | 선캠브리아기 | 선캠브리아기 | 고생대 석탄기 |



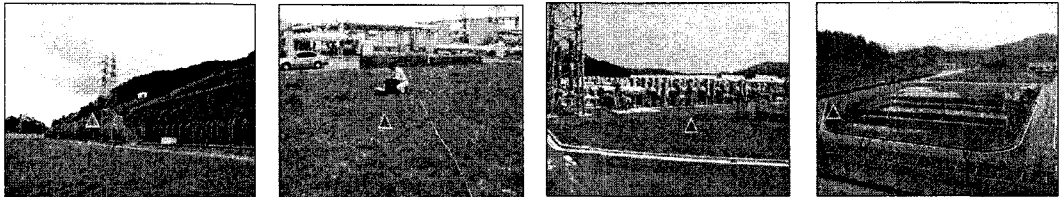
(a) 신안성

(b) 신서산

(c) 신가평

(d) 신태백

그림 5. 765kV 변전소 자유장 지진RP 설치지점 기반암 압편



신안성

신서산

신태백

신가평

그림 6. 부지조사를 통하여 선정된 자유장 지진계 수진기실 위치

표 3. 지진계측시스템 구성기기별 설치 지점

| 765kV 변전소 \ 구성기기 | 신안성 | 신서산 | 신가평 | 신태백 |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 기록계 (UPS, Power Supply) | 현장제어동 실내 (23kV #3) | 현장제어동 실내 (345kV #3) | 현장제어동 실내 (765kV #2) | 현장제어동 실내 (765kV #3) |
| GPS 위성안테나 | 현장제어동 옥상 | 현장제어동 옥상 | 현장제어동 옥상 | 현장제어동 옥상 |
| 자유장센서 | 전망대 암반 사면 | 정문옆 잔디밭 | 테니스장옆 잔디밭 | 테니스장옆 잔디밭 |
| 구조물/기기 기초센서 | 현장제어동 지하 (765kV #4) | 현장제어동 지하 (345kV #2) | 현장제어동 지하 (345kV #1) | 현장제어동 지하 (765kV #3) |

그림 7은 표 3에 정리된 위치에 있는 각 구성기기의 설치 전경의 한 예로서 765kV 신서산 변전소에 대한 실물 사진이다.

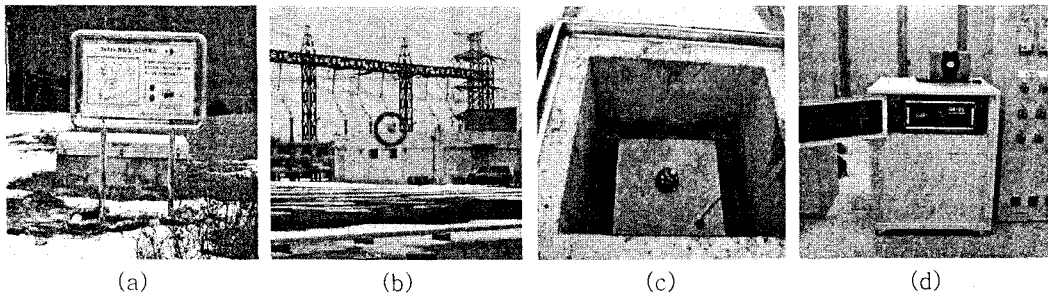


그림 7. 765kV 신서산 변전소에 대한 지진계측시스템 구성기기 설치 전경 (a) 자유장 지진계 수신실 전경 (b) 현장제어동 옥상 위성통신 설치전경 (c) 자유장 지진계 수신실 내 가속도 센서 설치 전경 (d) 현장제어동 실내 기록시스템 설치 전경

5. 지진자료 송수신을 위한 네트워크 구성 - 위성통신 설치

지진에 의한 피해를 신속히 대처하기 위해서는 안정적인 고속의 통신망이 각 관측소에 구성되어 있어야 한다. 기존에 설치된 원전부지 지진관측망의 경우 56 kbps급 디지털 전용회선을 이용하였으나, 이번 765kV 변전소의 지진관측망의 경우 국내 최초로 위성통신망을 사용하여 신안성, 신서산, 신가평, 신태백 765kV 변전소 지진계측 시스템과 전력연구원내 위치하고 있는 위성센터와 연결하여서 보다 안정적인 네트워크를 구성하였다. 위성통신은 어느 통신보다도 품질의 균일성과, 내재해성이 보장되므로, 통신장애 없이 통신을 할 수 있다는 장점을 가진다.

그림 8은 765kV 변전소 지진계측 시스템의 통신위성 모식도를 나타낸 것이다. Q4120 지진계는 TCP/IP 방식을 지원하기 때문에 지진기록계와 연결된 위성통신 모듈과 안테나로 구성된 765kV 변전소 지진계측시스템 단말 기지국(4개 변전소)과 중심국(전력연구원내 위성센터)과 위성을 통하여 지진기록계에 기록되는 자료를 실시간으로 송, 수신 하게 된다.

실제 Q4128 지진기록계가 위성통신 방식을 이용하여 지진자료 송, 수신이 가능한지 전력연구원내 위성센터에서 사전 시험한 결과(그림 9) 안정적인 송수신이 가능하였으며, 이 경험을 바탕으로 실제 4개 765kV 변전소 부지에 위성통신망을 구성한 후 중심국과 기지국과의 통신이상 유무 확인도 완료한 상태이며, 시험 운영중인 신서산 관측소와 위성통신을 이용하여 지진기록계로의 원격접근 및 지진발생시 지진자료를 획득, 분석하고 있다.

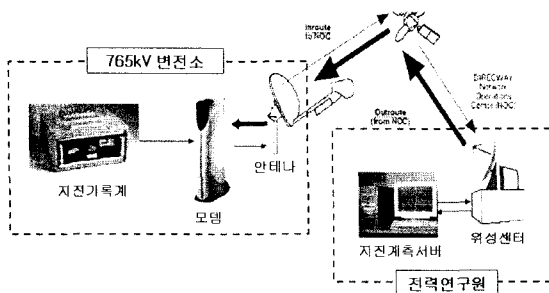


그림 8. 765kV 지진계측시스템 위성통신 모식도

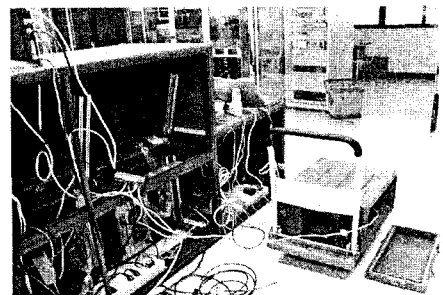


그림 9. 사전 위성통신 가능 시험



(a) 위성중심국 (b)신안성 (c)신서산 (d)신가평 (e)신태백

그림 10. 전력연구원내 위치한 위성 중심국과 4개 변전소의 위성안테나 설치 전경

6. 예비자료 분석(신서산 자유장 관측소)

2006년 1월부터 시험적으로 자유장 가속도 관측소를 운영중인 신서산 자유장 가속도계 기록된 지진동 자료의 질을 평가하기 위하여 예비적으로 배경잡음 분석과 지진자료의 분석을 실시하였다.

지진기록을 이용한 부지효과를 평가하기 위해서 배경잡음을 이용한 Nakamura(1989)⁽²⁾의 방법을 이용하였다. 일반적으로 지진파의 수평성분은 수직성분보다 변형이 크고 soft한 매질을 통과하여 전파될 때에 지각의 속도 및 밀도의 임피던스 차에 의한 지반의 증폭효과를 나타낸다. 그러나 수직성분은 증폭효과는 무시될 수 있다. 따라서 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비(H/V 비)를 이용하면 부지증폭효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다. Nakamura의 방법은 Lermo *et al.*(1993)⁽³⁾ 및 다수의 논문에서 부지효과를 구하는데 성공적으로 적용되었으며 Seed (1998)⁽⁴⁾ 등은 Nakamura 방법을 S파 기록을 이용하여 부지증폭 효과를 구하는데 적용될 수 있음을 증명하였다.

본 연구에서는 하루동안 매 시간대별로 5분씩의 배경잡음을 선정하여 H/V비를 구하여 신서산 자유장 관측소(NSS)의 기본적인 부지증폭 효과를 알아보았다. 그림 11에서와 같이 신서산 자유장 지진관측소는 20-25 Hz 부근에 부지증폭 효과가 보임을 알 수 있다.

한편, 그림 12는 인근인 서산지역에 기상청에서 운영하고 있는 서산(SES) 관측소와의 부지증폭 효과를 비교하기 위하여, NSS 관측소 및 SES 관측소에서 기록된 배경잡음 및 지진기록 중 S파에 대한 H/V비를 비교하여 도시한 것이다. 이때 이용된 지진자료는 2006년 1월 19일 영월지진 ($M_L=3.2$), 2006년 1월 19일 정선지진($M_L=3.0$), 2006년 1월 21일 대전지진($M_L=2.1$)이다. 그림 12에서와 같이 NSS 관측소에서는 배경잡음 및 S파의 H/V비를 도시한 결과 20-25Hz 대역에서의 증폭이 보이고 있으며, SES 관측소에서는 10-20Hz 부근에 약한 증폭이 보이고 있다.

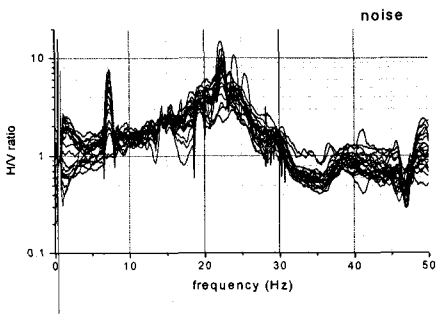


그림 11. 신서산(NSS) 관측소의 배경잡음의 H/V분석을 통한 부지증폭 효과

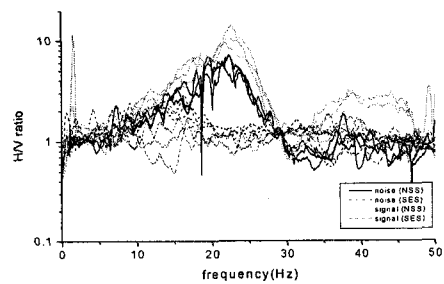
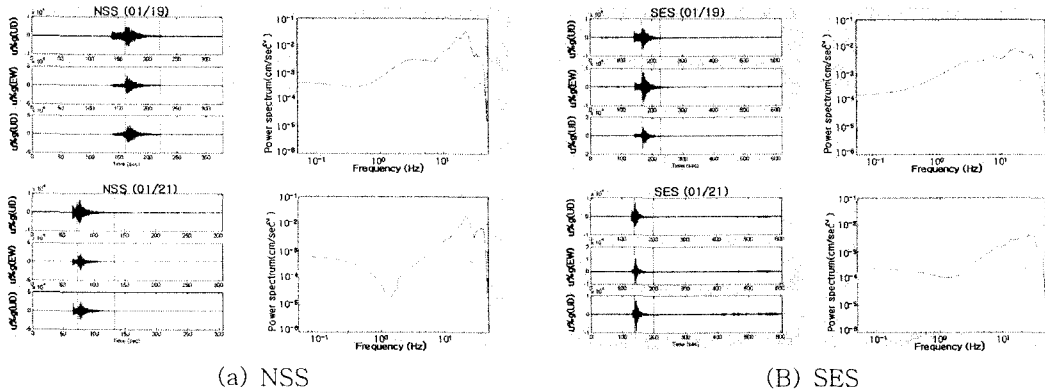


그림 12. NSS 및 SES 관측소에서 기록된 배경잡음과 S파를 이용한 H/V 비

그림 13은 NSS 관측소와 SES 관측소에 기록된 지진파형과 S파형 및 배경잡음의 파워 스펙트럼을 비교한 것이다. 파워스펙트럼의 비교를 통해서 지진동의 절대적인 에너지 준위를 확인할 수 있는데, NSS의 관측소와 SES 관측소의 배경잡음 수준은 비슷한 것으로 보이며, 다만 앞서 언급한바와 같이 NSS관측소에서는 20-25Hz 부근의 부지증폭이 보임을 알 수 있다. 차후 구조물 내의 가속도계가 설치되면 이 기록과의 비교를 통하여 NSS관측소에서 보이는 증폭효과의 원인을 보다 정량적으로 구명할 수 있을 것이다.



(a) NSS

(b) SES

그림 13. NSS 관측소와 SES관측소의 지진기록(2006/1/19, $M_L=3.2$, 2006/1/21, $M_L=2.1$) 및 배경잡음과 S파에 대한 파워스펙트럼 비교 도식

7. 이후계획 및 기대효과

2006년 3월 현재 765kV 변전소 내 지진계측시스템 구축을 위한 H/W 공사와 위성통신 연결은 모두 완료한 상태이나 지진계, 가속도계의 설치 및 서버구축은 2006년 9월에 완료하는 것을 목적으로 하고 있다. 이 지진계측 시스템이 완료되면 국내 주간선 전력계통망의 핵심역할을 수행하는 765kV 변전소의 지진으로 인한 신속한 피해평가와 사후 안전조치 등의 지진 안전성 평가에 주요 역할을 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 "지진발생 시 765kV 변전설비의 내진 성능평가 및 안전조치 기술개발"과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서용표, 장정범, 이경진, 함경원, 황경민, 장천중, 최원학, 연관희, 박동희, "지진발생시 765kV 변설설비의 내진성능평가 및 안전조치 기술 개발-1차년도 중간보고서", 산업자원부, 2006
2. Nakamura, Y., "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micortremor on the ground surface.", *QRTRTL*, 30, 1989.
3. Lermo J. Francisco J. C., "site effect evaluation using spectral ratios with only one stations." *Bull. seism. Soc. Am.*, 83, 1993, pp. 1574-1594.
4. Seed, H. B., Romom, M. P., Sun, J. I., Jaime, J. A., and Lysmer, J., "Relationships between soil conditions and earthquake ground motions." *Earthquak Spectra* 4, 1998, pp. 687-729.