

원자력발전소 지진감시시스템의 운용프로그램 개발

Development of the Operational Program for Seismic Monitoring System in Nuclear Power Plants

김성택* · 이종림** · 허택영***

Kim, Seong-Taeg, · Lee, Jong-Rim, · Heo, Taek-Young

ABSTRACT

Due to aging of the imported seismic monitoring system of Uljin 1&2 units it is difficult for this system to provide enough functions needed for the security of seismic safety and the evaluation of the earthquake data from the seismic instrumentation. For this reason, it is necessary to replace the seismic monitoring system of Uljin 1&2 units with an upgraded system with corresponding software. With operation of this system which incorporates the man-machine interface technology, the operators in nuclear power plant can rapidly and correctly determine the exceedance of Operating Basis Earthquake.

1. 서론

원자력발전소는 지진발생시 또는 지진발생 이후에도 내진 안전성을 확보·유지하여야 한다. 원자력발전소의 설계 요건에는 부지에서 발생가능한 최대지진을 설계지진으로 결정하고, 이러한 설계지진에 대하여 내진 안전성을 확보하도록 엄격하게 규제하고 있다. 이에 부합하기 위하여는 엄밀하고 복잡한 해석과정을 통하여 신뢰성을 확보하게 된다. 원전은 설계과정 뿐만 아니라 운전중에도 적정한 지진계측설비를 설치하여 지진발생시 즉각 지진기록을 회수하여 내진설계 지진과 비교·평가함으로써, 원전 운전정지 여부의 결정이 가능하도록 하여야 한다. 특히, 운전정지시에 수행되는 후속 정밀평가 및 재가동 여부 결정에 필요한 충분한 지진기록 정보를 확보할 수 있어야 한다. 그러나, 울진원자력 1,2호기에 설치된 지진감시시스템은 설비 노후화로 완전하게 제 기능을 발휘하지 못하고 있어서 새로운 설비로 교체할 필요가 있었다. 본 연구는 지진발생시 원자력발전소의 내진 안전성을 검증하기 위하여 설치되어 있는 지진감시시스템의 노후화에 따른 새로운 장비의 교체 운용시 이에 상응하는 운용프로그램을 개발함으로써 지진발생에 즉각 대응하여 내진 안전성을 향상할 수 있도록 추진되었다.

2. 운전기준지진 초과여부 판단기준

원자력발전소는 운전기준지진(Operating Basis Earthquake : OBE) 수준의 지진발생시 안전에 대한 위해없이 발전소의 계속 운전이 보장되고 응력 및 변위가 허용치 이내에 들도록 설계되어

*한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

**한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 정회원

***한국전력공사 전력연구원 일반연구원, 정회원

있으며, OBE 초과시에는 발전소 운전을 정지하도록 되어 있다. 그러나 OBE 초과여부에 대한 판단 기준이 명확하지 않아 첨부 지반가속도 및 응답스펙트럼가속도와 같은 파라메타들이 지진에 의한 잠재적 손상 가능성을 정량화하는데 사용되어 왔다. 그러나, 미국의 경우 원자력발전소에 OBE를 초과하는 지진이 최근 20년내 5차례 발생한 바 있는데, 예를 들면 1986년 1월 Perry 원자력발전소에 영향을 준 지진은 규모 5.0으로서 10Hz 이상에서 OBE 응답스펙트럼을 초과하고 15Hz 이상에서 SSE 응답스펙트럼을 초과하여 장기간 정지상태를 유지하면서 지진 피해를 조사하였으나 피해가 전무한 것으로 나타났으며, 규모 3.0 이하 지진이 발생한 Virgil C. Summer 발전소에서도 이와 유사한 결과가 나타났다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 OBE 초과개념 정립 및 기준 제정의 필요성이 대두되어 지진손상도를 측정하기 위한 여러 파라메타와 임계 지진손상도와의 상관관계 분석에 관한 연구가 미국 전력연구소(EPRI)에 의해 수행된 바 있다. 연구 결과 첨부지반가속도는 구조물 손상도와의 상관관계가 가장 작은 것으로 나타났으며 누적절대속도(Cumulative Absolute Velocity : CAV)라는 새로운 파라메타가 상관관계가 가장 큰 것으로 나타났다.⁹⁾ 이 연구결과를 반영하여 '97년 3월에 지진감시시스템의 설치 및 운용, 지진발생시 조치사항에 대한 관련 규정이 개정되어 고진동수 영역에 주로 영향을 주는 작은 규모의 지진에 의한 불필요한 원자로 정지를 줄일 수 있도록 하였다.

CAV는 식(1)에 의해 정의되는 값으로서 절대가속도로 표현된 시간-이력 곡선의 면적을 의미한다.

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt \quad (1)$$

여기서 $a(t)$ = 가속도 시간이력
 t_{\max} = 기록 지속시간

OBE 초과 여부를 결정하기 위한 평가(Fig.1)에는 자유장 지반운동의 3방향 성분(2개 수평방향, 1개 수직방향)으로 부터 얻어진 데이터를 사용하여 응답스펙트럼 점검, CAV 점검 및 계측장치의 정상동작 여부의 점검이 포함되며, 지진발생 후 4시간 이내에 평가가 이루어져야 한다. 이와 같은 OBE 초과여부 판정기준의 세부적인 내용은 다음과 같다.

2.1 응답스펙트럼 점검

자유장 지반운동을 사용하여 생성한 5% 임계 감쇠 응답스펙트럼의 3방향 성분(2개 수평방향, 1개 수직방향) 중 어느 하나라도 아래에 기술된 값보다 크면 OBE 응답스펙트럼을 초과한 것이다.

- 1) 2~10Hz의 주파수 구간에서 상응하는 설계응답스펙트럼 가속도 [설계에 OBE 스펙트럼을 사용한 경우에는 OBE 스펙트럼 가속도 값, 그 밖의 경우에는 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE) 스펙트럼 가속도의 1/3 값] 또는 0.2g 중 큰 값
- 2) 1~2 Hz의 주파수 구간에서 상응하는 설계응답스펙트럼 속도 [설계에 OBE 스펙트럼을 사용한 경우에는 OBE 스펙트럼 속도 값, 그 밖의 경우에는 SSE 스펙트럼 속도의 1/3 값] 또는 6 inch/sec(15.24 cm/sec)의 스펙트럼 속도 값 중 큰 값

2.2 CAV 점검

자유장 지반운동의 각 성분에 대해 CAV는 다음과 같이 계산한다(Fig. 2).

- 1) 절대가속도 (g단위) 시간이력을 1초 간격으로 분할한다.
- 2) 0.025g를 초과하는 부분이 하나라도 있는 각각의 1초 구간을 시간에 대해 적분한다.
- 3) 적분된 모든 값들을 누적한 CAV값이 0.16g-sec 보다 크면 CAV를 초과한 것이다.

3. 지진감시시스템 Hardware 개발

본 연구를 통하여 개발된 지진감시시스템의 Hardware는 기계시스템과 전기시스템으로 구성되어 있다. 기계시스템은 4개의 철두가속도기록계, 5개의 응답스펙트럼기록계, 1개의 응답스펙트럼 경보기로 구성되어 있으며, 전기시스템은 Visualization & Junction Rack, 전원공급기, 컴퓨터, Analog Input Card, 무정전 전원공급장치(UPS) 로 구성되어 있다.

이 시스템은 올진 1,2호기 지진감시시스템의 기존 기능 구현 및 기능 추가의 개념으로 시스템 설계를 하였다(Fig. 3). 기존 시스템의 아날로그 데이터 처리카드를 Upgrade시킨 Digital Signal Process(DSP)보드를 PC에 내장시켜 지진기록의 Fast Fourier Transform (FFT) 계산 및 각종 중요 연산처리를 DSP 보드레벨에서 INTEL C40 계열 Processor로 처리하도록 하였다. 연산처리 결과는 PC의 CPU로 전달되어 저장되고, 프린터 및 모니터에 표시하여 지진발생시 발전소 운전원이 신속·정확하게 관련 데이터를 분석·판단할 수 있도록 하였다.

Visualization & Junction Rack의 단자대(Terminal Block)에서는 가속도계와 지진 트리거, 70%·100% OBE 경보입력을 연결하여 DSP 보드 External Terminal, Programmable Logic Controller(PLC) Input Module에 연결시키며 외부 경보 및 PLC Output Module 등에 연결하여 신호를 전송해 준다. DSP 보드에서는 가속도계 및 지진 트리거에서 입력된 신호를 분석하여 0.02g 보다 높을 경우 주 제어실에 경보 신호를 발생시킨다. 만일 지진 트리거가 작동된 경우 PLC 및 DSP 보드에 신호가 입력되고 PLC로부터 주 제어실에 경보 신호를 발생시키며 DSP 보드에 입력되는 작동 신호에 의해 지진발생 전 2초간의 데이터와 지진 발생 종료까지의 데이터를 기록·저장한다. UPS는 기존의 1KVA/800W 220V/50Hz 용량의 것을 3KVA/2400W 220V/60Hz 30분 Back-Up Time으로 용량을 증대시켜 PC, 모니터, 프린터, PLC, DC Power Supply에 전원을 공급하도록 구성하였다. DC 전원공급기는 UPS로부터 전원 220V/60Hz를 받아 이중으로 DC 전원을 공급하도록 하여, 하나가 고장난 경우에도 센서 및 PLC Input/Output Module에 전원이 공급되도록 하였다. PLC는 기존의 Visualization & Junction Rack 및 전원공급기(SMA-3)의 기능을 구현하도록 설계, 원자로 격납건물 기초에 설치된 가속도계(1KIS003MZ)의 세 방향 지진가속도 신호를 입력받아 항상 최대 가속도값을 지시하도록 하였고 가속도계 점검 및 지진트리거 점검 기능을 구현하도록 프로그래밍 하였다.

4. 지진감시시스템 운용프로그램 개발

지진감시시스템 운용프로그램은 데이터 취득 프로그램(Fig.4)과 데이터 분석 프로그램(Fig.5)으로 구성된다. 데이터 취득 프로그램은 지진발생시 가속도계로부터 입력받은 Analog 신호를 Digital화하여 지진기록 파일을 작성해 주며, 데이터 분석 프로그램은 데이터 취득 프로그램에서 작성된 지진기록 파일을 이용하여 OBE 초과여부 판단을 할 수 있도록 분석하는 프로그램이다.

4.1 데이터 취득 프로그램

본 연구에서 개발된 데이터 취득 프로그램에서는 최대값 계산 및 트리거 동작 감시, Gain 변경 기능 및 추가된 On-line Monitoring 기능 등을 DSP Board Level에서 수행하게 된다. 데이터 취득 프로그램에 의한 지진계측 자료는 File로 작성되어 데이터 분석 프로그램에 전달된다. 데이터 취득 프로그램의 주요 기능은 다음과 같다.

- 1) DSP 초기화 : 지진감시시스템에 전원을 처음 공급하거나 시스템을 재기동시킬 경우 DSP를 초기화
- 2) Gain 설정 기능 : DSP Board의 Channel에 대한 Gain을 설정할 수 있도록 구성. 현장 센서의

입력이 변경되는 경우에도 Gain 조정이 가능

- 3) Pre-Trigger Time 설정 기능 : 지진자료 분석시 트리거 동작 이전의 데이터 기록·저장 시간 설정
- 4) 데이터 측정 기능 : DSP Board가 충분한 기억용량을 가지고 있으므로 데이터 측정시 샘플링 속도의 조정이 가능하고, 초기값은 1 초에 200회 샘플링하는 것으로 정하였으며, 측정된 데이터는 Channel 별로 저장
- 5) 트리거 발생 감시 기능 : 지진트리거가 작동되는지 또는 입력되는 가속도계의 신호값이 0.02g 이상되는지를 항상 감시
- 6) 데이터 저장 기능 : 트리거 동작 또는 입력 신호값이 0.02g 이상이면 입력되는 데이터는 Pre-Trigger Buffer와 별도로 저장
- 7) 데이터 저장 중지 기능 : 지진트리거가 해제되거나 가속도계의 입력이 2초 동안 0.015g 이하이면 지진이 종료된 것으로 간주하여 데이터 저장을 중지
- 8) 최대값 계산 기능 : 측정된 데이터는 저장되기 전에 Register에 저장되어 있는 현재의 최대값과 비교를 통해 최대값을 계속 Up-Date시켜 지진발생후 최대값을 확인
- 9) 데이터 전송 기능 : 시간이력 데이터와 DSP Board에서 데이터를 처리한 결과를 컴퓨터의 Hard Disk Drive(HDD)로 전달
- 10) On-line Monitoring 기능 : 발전소 운전원이 수시로 가속도계의 상태 및 Analog Input Card의 Channel 상태를 확인할 수 있도록 On-line Monitoring 기능 추가. On-line Monitoring은 가속도계 마다 1시간의 저장 용량을 할당하였으며 원활한 Memory 관리를 위해서 1시간 이전의 자료는 새로운 자료를 위하여 삭제

4.2 데이터 분석 프로그램

데이터 분석 프로그램은 DSP Board에서 작성된 데이터 File을 사용하여 Graphic 화면의 Format에 맞도록 Data를 가공하며, 발생지진의 OBE 초과 여부를 판단하여 발전소 가동정지 여부를 결정할 수 있는 정보를 운전원에게 제공한다. 데이터 분석 프로그램의 주요 기능은 다음과 같다.

- 1) 지진트리거 또는 Program Trigger 동작 표시 기능 : 데이터 분석 프로그램에서는 지진트리거 또는 Program Trigger가 발생하면 DSP Board에서 신호를 받아 Graphic 화면에 경보를 표시하여 발전소 운전원에게 알려줌. 화면에 표시되는 경보는 지진트리거 경보인지 Program Alarm 인지 확인될 수 있도록 구별하여 표시
- 2) Event Log 저장 기능 : 지진트리거 동작이나 Operator Test 등 Event의 발생 시간과 내용을 저장
- 3) DSP 계측데이터 재생 기능 : DSP Board에서 Data 측정을 종료하는 경우 DSP Board에서는 계측데이터를 파일로 작성하여 컴퓨터의 HDD에 전달·재생시키며, 재생된 데이터는 화면에 표시되어 운전원이 분석할 수 있고 FDD를 이용하면 데이터를 Back-up할 수 있음
- 4) Disk 공간 점검 기능 : 컴퓨터의 HDD 여유 용량을 항상 점검하여 Data 저장을 위한 여유공간이 있는지 확인. 데이터는 Event 단위로 Back-up 되며 Back-up된 데이터는 HDD 공간 확보를 위해서 삭제
- 5) 데이터 변환 기능 : 울진 1,2호기 지진감시시스템 이외의 설비에서 계측된 데이터도 입력으로 사용하여 분석할 수 있는 기능 추가
- 6) Setup 기능 : 데이터 취득시 필요한 설정값에 대한 기준을 정의하거나 데이터 분석 프로그램에서 사용하는 변수 변경
- 7) 데이터 분석 기능 : 데이터 취득 프로그램에서 작성된 데이터 파일을 가공하여 운전원이 OBE를 초과하였는지를 판단할 수 있도록 정보 제공

- ① 시간이력 : 데이터 취득 프로그램에서 취득한 시간이력을 화면에 표시하여 운전원이 지진의 지속시간, 최대가속도값, 시간이력 등을 쉽게 확인할 수 있도록 구성하였음. 하나의 시간이력 화면에는 수평 2개축, 수직 1개축의 시간이력이 동시에 표시되도록 하여 3방향을 한 번에 볼 수 있도록 하였음
- ② 푸리에스펙트럼 : 데이터 취득 프로그램에서 취득한 시간이력을 주파수이력으로 변환하여 발생지진의 탁월주파수 등 지진파의 특성을 파악할 수 있도록 FFT Routine을 사용하였으며 관심 대상 주파수 범위보다 최소 2배 이상 Sampling하여 푸리에스펙트럼으로 변환시켰음
- ③ 응답스펙트럼 : 시간이력 데이터로부터 응답스펙트럼을 계산하여 주파수-가속도스펙트럼, 주파수-속도스펙트럼, 주파수-변위스펙트럼으로 표시하며 OBE 설계응답 가속도스펙트럼과 비교, 2개 이상의 주파수 대역에서 이 값을 초과하면 경보를 표시
- ④ 파워스펙트럼 : FFT 결과로부터 변환시켜 지진파의 특성을 상세히 분석하도록 하였음
- ⑤ CAV : CAV값은 새로 개정된 규제기준에서 요구된 OBE 초과 여부를 결정하는 중요한 변수로서, 2~10 Hz의 주파수 구간에서 OBE 설계응답스펙트럼 가속도를 초과하였을 경우 CAV값을 계산, 그 값이 0.16g-sec보다 큰 지 여부를 비교하여 OBE 초과 여부를 최종 결정

5. 결론

본 연구에서는 최근 변경된 지진감시시스템 규제기준에 부응할 수 있도록 OBE 초과여부 판단기준을 반영하고 원전 구조물 및 기기계통에 손상 가능성이 없는 지진발생시 불필요한 운전정지 가능성을 배제할 수 있도록 운용프로그램을 개발하였다. Hardware는 기존 설비의 기능 구현 및 개선을 위하여 최신의 설비로 Upgrade하였으며 Software는 취득 데이터 및 OBE 초과여부 판단을 위한 처리과정을 PC 화면상에서 확인함으로써 발전소 운전원에 의한 신속·정확한 분석이 가능하도록 Man-Machine Interface 개념을 도입하였다. 이와 같은 원자력발전소 지진감시시스템의 개발로 지진발생시 지진특성 분석 및 원전의 내진안전성 평가에 소요되는 시간을 대폭 단축시킬 수 있게 되었다. 또한 불필요한 운전중지 가능성을 배제할 수 있게 되었으며, 발전소 운전원에 의한 인적 실수 가능성을 원천적으로 배제함에 따라 원전의 내진 안전성 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다. 또한, 현재 국내에서 운용되고 있는 다양한 지진감시시스템을 표준화함으로써 지진감시시스템의 운용 개선과 내진 안전성 향상을 이룩할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. US NRC, SRP 3.7.4, Seismic Instrumentation, Rev.1
2. US NRC, Reg. Guide 1.12, Instrumentation for Earthquakes, Rev.2, 1997
3. US NRC, Reg. Guide 1.166, Pre-Earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Post-Earthquake Action, 1997
4. Reg. Guide 1.167, Restart of Nuclear Power Plant Shut Down by Seismic Event, 1997
5. ANSI/ANS-2.2, Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants, 1988
6. ANSI/ANS-2.10, Guideline for Retrieval, Review, Processing and Evaluation of Records Obtained from Seismic Instrumentation, 1979
7. Jacobson, J.P., et al, OBE Exceedance and Plant Response to Earthquake Instrumentation and CAV, Proc. of 3rd Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping, Orlando, Fl., Dec. 1990
8. EPRI, TR-100082-T1 & T2, Standardization of Cumulative Absolute Velocity, 1991

9. EPRI, NP-5930, A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, July. 1988
10. EPRI, NP-6695, Guidelines for Nuclear Rspnse to an Earthquake, Dec. 1989
11. EPRI, TR-104239, Seismic Instrumentation in Nuclear Power Plant for Response to OBE Exceedance : Guideline for Implementation, June 1994
12. 한국전력공사, 97전력연-단441, 울진 1,2호기 지진감시설비 운용프로그램 개발, 1997

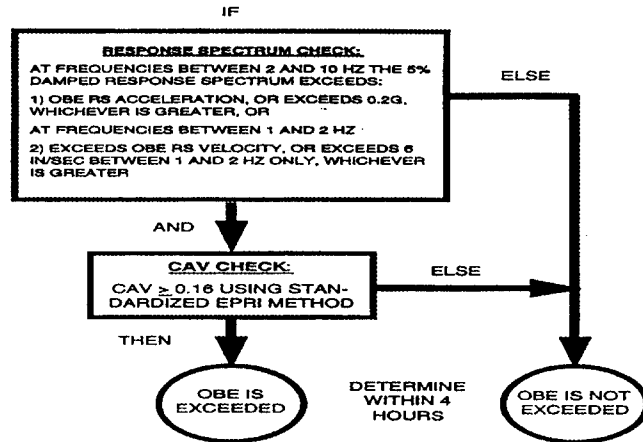


Fig. 1 OBE 초과여부 판정기준

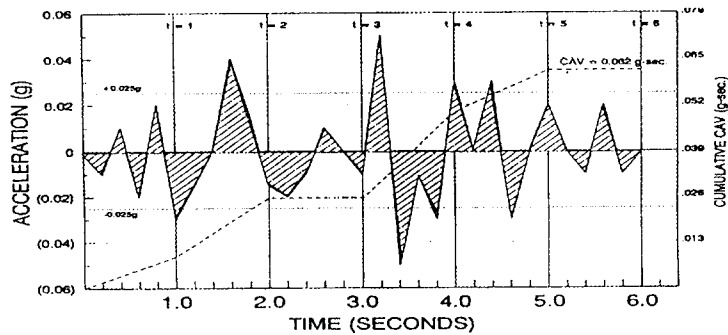


Fig. 2 누적절대속도(CAV) 계산

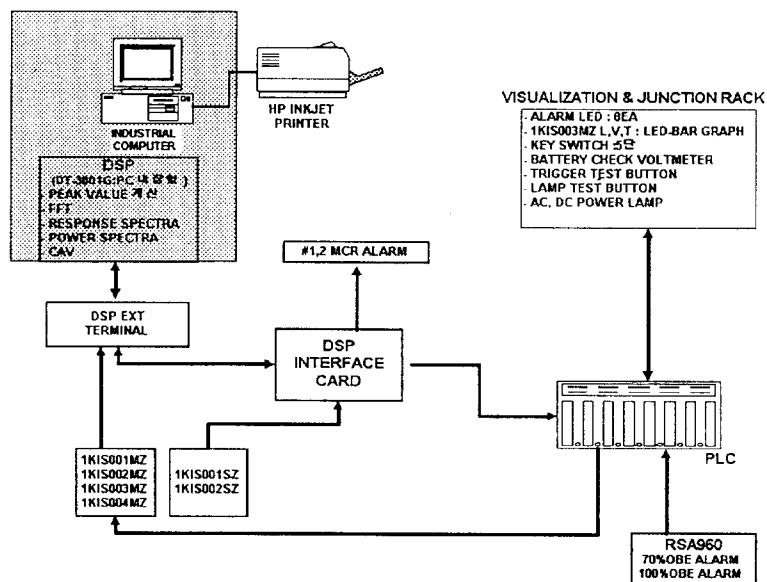


Fig. 3 울진 1,2호기 지진감시설비 Hardware 구성

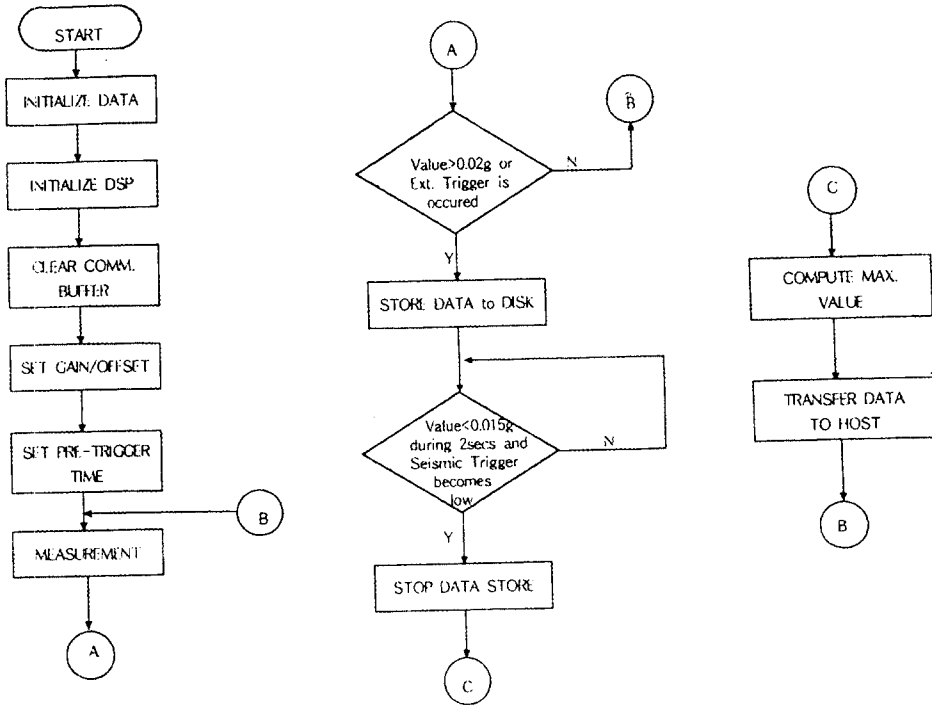


Fig. 4 데이터 취득 프로그램 flow chart

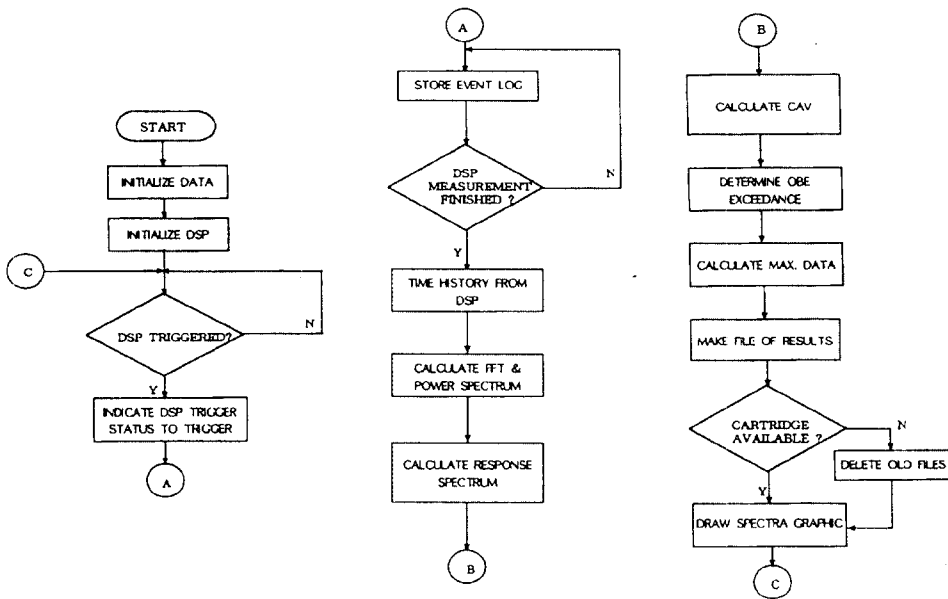


Fig. 5 데이터 분석 프로그램 flow chart