

지진신속피해평가시스템 구축
- 실시간 지진동의 2차원적 영상화

Construction of rapid earthquake damage evaluation system
- Real-time two-dimensional visualization of ground motion

지현철* 전정수* 이희일* 박정호* 임인섭**
Chi, Heon Cheol Jeon, Jeong-Soo Lee, Hee-Il Park, Jung-Ho Lim, In-Seub

ABSTRACT

In this study we developed the visualization scheme of spatial ground-motion measurements in real time by using DSS data. Even though this scheme itself is useful for national earthquake mitigation plans, this scheme could be served as the crucial core for constructing rapid earthquake damage evaluation system. DSS is the abbreviation of Data Subscription Service and this is the pre-assigned request for the seismic stations to send very limited brief data with high priority and negligible transmission load. In addition to visualize the damage area with intensity, the corresponding epicenter can be estimated roughly for quick event alarm. For the interpolation of spatially irregular PGA data, the program, named as surface, of GMT was used with NetCDF grid file format. Since the grid file is similar to a postscript file, the program, called as shading, was coded with C language by using Matpak library in order to convert grid files into image files.

1. 서론

지진 발생을 막을 수 없는 상황에서 지진재해를 최소화할 수 있는 방법은 지진의 발생 위치, 시간 및 규모를 예측하여 대처하는 것이다. 지진은 지각에 축적된 응력이 임계점을 넘을 경우 발생하므로 지진예지를 위해서는 응력 방향과 크기의 공간적·시간적 모니터링, 지역적 연약지대의 분포조

* 정회원, 한국지질자원연구원 지진연구센터 연구원

** 회송지오택(주)

사 등이 선행되어야 한다. 한반도에 일어나는 지진의 진원 심도는 대부분 2~18 Km에 위치하고 있으나 단층 등 연약대의 조사는 지표에 한정될 수 밖에 없다. 또한 지하공간 개발이나 대규모 토목에서 사용되는 지하 응력 측정은 심도가 500 m 이내로서 지형적 조건에 따라 많은 영향을 받는다. 심부의 응력 상태는 지진 발생 시 전파되는 파형의 분극(polarization)이나 파형 역산(waveform inversion) 등을 통해 유추할 수 있으나 이 또한 제한되어 있다. 따라서 지진예지는 지진분야의 궁극적인 목표로서 지속적인 연구와 지원이 이루어져야 하나 가까운 미래에 실현될 가능성은 매우 낮다.

지진을 사전에 예측하여 대처할 수 없다면 발생 시와 그 후의 피해를 최소화하는 것이 방재적 측면에서 합리적일 것이다. 지표조사를 통한 활성 가능성이 있는 단층의 분포도, 역사지진자료를 통한 확률적 최대지진의 크기와 재래주기, 계기지진자료를 통한 감쇠특성 등을 고려하여 내진설계 기준을 설정하고 이를 적용하는 것이 지진발생을 대비한 효율적인 지진방재 대책이다. 내진설계 기준은 구조물의 내구연한, 사회기능 측면에서의 중요성, 지진크기에 따른 재래주기 그리고 경제성을 고려하여 설정되었으므로 지진의 크기 및 특성에 따라 어느 정도의 피해는 감수하여야 하며, 때로는 막대한 피해로 인해 사회기능이 마비될 수도 있다. 지진발생 후의 대처 지연으로 인한 화재, 유해물질의 확산, 구조 지연에 의한 사상자 급증, 집단적인 심리적 공황으로 인한 혼란 등이 2차원적 지진피해로 사전 준비 정도에 따라 급격히 감소시킬 수 있다.

지진신속피해평가시스템은 관측된 지반진동 자료를 토대로 하여 토양의 종류와 심도, 인구 밀도, 구조물의 종류 등을 고려하여 지진발생 후의 지진피해의 범위 및 정도를 신속히 파악할 수 있는 기술로서 지진재해대응기술의 기본이 된다. 여기서는 피해평가시스템의 초기 단계로서 한반도 전역에 설치된 지진관측소의 실시간 지진자료로부터 지반진동의 세기의 2차원적 영상화한 기법을 제시하고자 한다.

2. 개발 배경

우리나라에서 지진관측소를 설치·운영하고 있는 기관으로는 지진통보를 담당하는 기상청, 지진 연구를 수행하는 한국지질자원연구원, 원자력발전소의 지진안전성 평가를 맡고 있는 한국원자력안전기술원, 각종 발전소와 송배전시설 등 발전설비의 지진대책을 책임지고 있는 한국전력(주) 등 4개 기관이 있으며 1999년에 중복 설치의 방지 및 자료의 공동 활용을 위해 '지진관측망 운영기관협의회'를 자율적으로 구성하였다. 그림 1은 4개 기관이 공동활용하고 있는 관측소 분포도로서 지역적으로 다소 편중되어 있으나 한반도 전역에 분포되어 있다. 앞으로의 확충 계획에 의해 지역적인 편중성은 해소될 것으로 사료되며 그 분포 또한 조밀해질 것으로 판단된다. 협의회의 주요 결의사항인 '지진 유관기관간의 데이터 공유'를 위해 지질자원연구원은 통합네트워크시스템인 KISS (Korea Integrated Seismic System)를 개발하여 현재 4개 기관 및 지진연구를 수행하는 대학에 설치·운영하고 있다.

지진자료를 실시간으로 공유하게 됨으로서 지진통보를 담당하는 기상청뿐 아니라 다른 기관에서도 지진요소인 발생시간, 진앙 위치 그리고 지진규모 (magnitude) 등을 결정할 수 있게 되었다. 그림 2는 지진발생 시의 지진통보를 도식화한 것으로 지진이 감지된 초기에는 자동분석시스템에 의해 지진요소가 결정되어 진다. 분석에 사용되는 관측소의 개수, S (shear)파의 사용여부, 분석

알고리즘 등에 따라 소요시간이 다르며, 현재 지진관측기관이 채택하고 있는 시스템의 경우 최소 5분 정도 소요되며 담당자의 검증과정을 통해 최종적으로 지진통보를 발령하는 데는 15분 정도 필요하다. 기상청은 지진통보에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 각종 프로젝트를 수행하고 있으

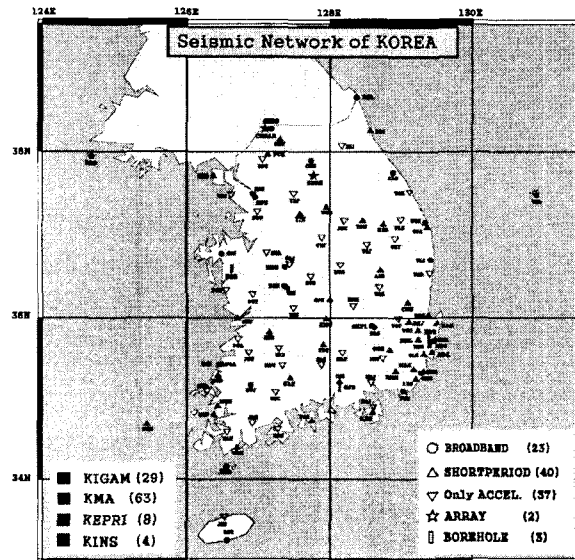


그림 1. 국내 지진관측소 분포도 (2002. 3. 20. 기준)

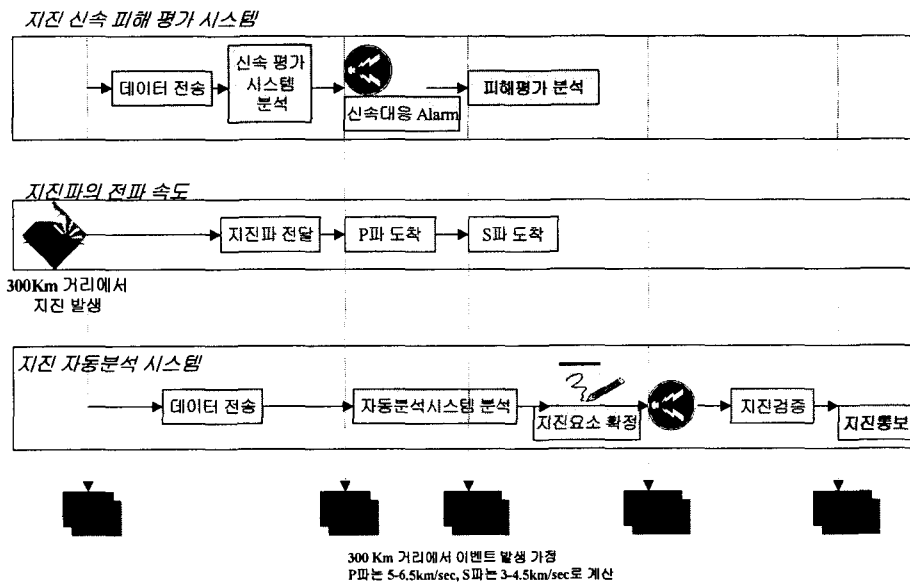


그림 2. 지진자료 처리시스템들의 시간대별 처리과정 비교

나 획기적인 단축에는 어느 정도 한계가 있다.

방재적 측면에서는 지진요소도 중요하지만 피해의 정도와 범위의 신속한 파악이 보다 현실적으로 중요하며 이는 지진의 발생 특성, 심도와 크기에 따라 다르다. 규모 7 이하의 경우 일반적으로 반경 100 Km 이내로 한정되며, 우리나라 지진학회에서 추정하고 있는 최대 가능한 규모 6.5의 지진일 경우 그 범위가 더욱 제한될 것으로 사료된다. 지진의 피해는 파형의 진폭이 크면서 진동 방향이 수평인 S파나 바로 뒤에 오는 표면파에 의해 대부분 발생한다. 따라서 그림 2에서와 같이 S파의 관측과 동시에 피해 범위 및 정도를 파악할 경우 신속히 대처할 수 있게 된다.

3. 지진자료 전송 방식

디지털 세계에서 연속성은 엄밀하게 말해서 틀린 것으로 외견상으로 연속되어 있는 것처럼 보일 뿐이다. VTR, CD 또는 최근의 Internet 동영상도 단속적으로 받은 자료패킷을 버퍼(buffer, 자료를 일시적으로 저장하는 장소)에 저장하여 일정한 자료를 확보된 후에 TV, earphone 또는 PC 모니터에 연속적으로 자료를 보내어 시청자 입장에서는 마침 실시간으로 연속해서 자료를 받는 착각을 일으키게 한다. 지진자료의 전송도 이와 유사하다.

그림 3은 지진관측소의 센서로부터 지진기록계를 거쳐 지진자료가 중앙자료처리센터에 있는 자동분석시스템에 보내지는 과정을 도식화한 것이다. 진앙지를 정확히 결정하기 위해서는 P와 S파

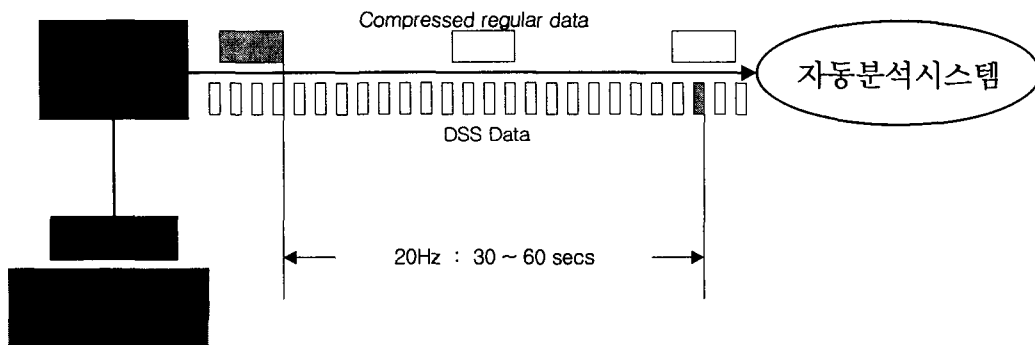


그림 3. 일반지진자료와 DSS자료의 전송 비교

의 정확한 도착시간(arrival time)을 식별하여야 하므로 각 채널마다 1초에 20~100번 sampling하며, 진폭의 동적 영역(dynamic range)을 최대화하기 위하여 각 sample마다 24bit를 할당한다. 지진자료는 지구물리·화학적 모니터링의 대상이 되는 모든 항목 중에서 자료의 양이 가장 많다. 따라서 여러 관측소에서 모든 자료를 압축하지 않고 전송할 경우 전송선로에 막대한 부하가 걸리게 된다. 일반적으로 4~8배 압축하여 일정한 패킷으로 전송하게 되며 이를 본래의 자료 형태로 전환하여 분석시스템에 입력하는 데 일반적으로 30초 이상의 시간이 소요된다. 반면에 지진피해와 관련된 자료만을 추출하여 이를 바로 보낼 경우 전송시간을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 이와 같이 기록계에서 주요 자료만을 추출하여 기록계에 등록된 모든 기관(subscribed institutes)에

동시에 전송하는 것을 DSS(Data Subscription Service) 라고 하며 이때의 자료를 DSS data라고 한다.

4. 지진자료 특성

지진피해는 지진파의 진폭 크기에 비례하며, 구조물은 일반적으로 수평성분에 취약하다. 지진 규모가 클수록 주된 주파수 영역(dominant frequency band) 은 저주파로 이동하게 된다. 한반도에 관측된 계기진의 경우 규모 3.0 이상의 경우 주된 주파수가 10 Hz 이하이며, 규모 4.5의 경우 2~3 Hz이다. 따라서 10 Hz이하의 지진파형을 가지고 있는 초당 20개 sampling (sps, sampling per second) 자료로부터 DSS 자료를 추출하였다.

고층빌딩 같은 구조물의 피해는 지반 가속도 크기에 민감하며, 장대교량 같은 것은 지반속도에, 그리고 가스파이프 등 지하매설물의 경우 지반 변위량에 보다 직접적인 영향을 받는다. 하지만 지진관측기관간의 네트워크를 통해서 얻을 수 있는 가장 일반적인 자료는 가속도자료임으로 이를 기준으로 하였다. 그림 4는 지진피해와 관련된 지진파형의 최대 진폭을 설명한 것으로 가속도 자료에는 어느 정도의 DC drifting이 있다. 이를 제거하기 위해서 먼저 매 초마다의 평균값 (AVG)

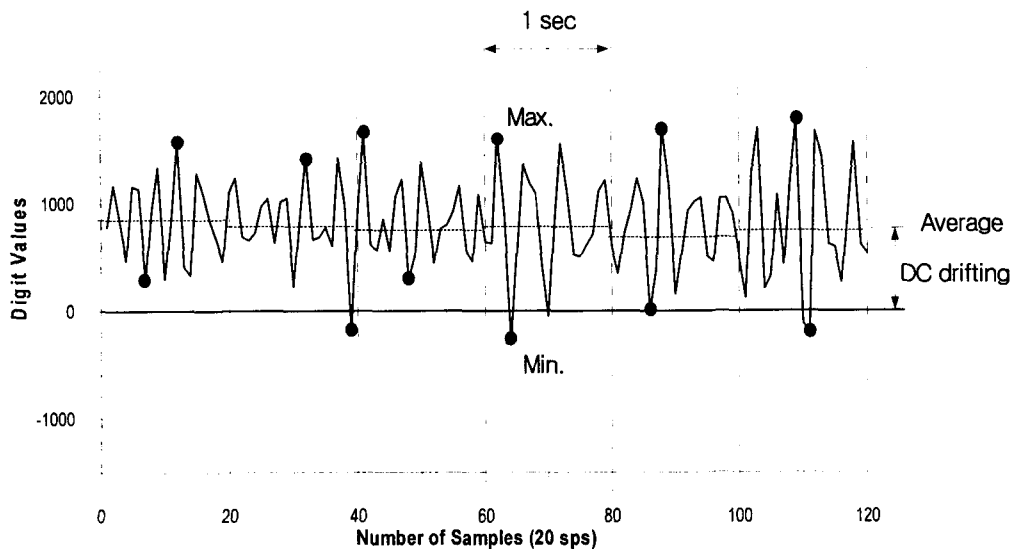


그림 4. DSS data의 매 초당 MAX, MIN과 AVG의 개념도

을 저장한 후에 앞의 10초 동안 저장된 평균치를 다시 평균한 값 (Mavg, moving average)을 사용함으로써 저주파의 DC drifting을 효율적으로 제거할 수 있었다. 그림 5는 매초마다 영광원자력발전소 내 (YGA)와 밖 (YGB)에 설치된 한국전력연구원의 관측소로부터 받는 DSS 자료의 실제적인 형태로 20 sps 가속도자료 중에 E-W성분의 최대치(MAX), 최소치(MIN) 및 평균치(AVG)를 나타낸 것이다. 진앙지와 관측소의 상대적 방향에 따라 두 개의 수평성분, E-W와 N-S의 크기가 달라지므로 두 성분의 벡터 합을 사용하는 것이 일관성이 있으며 이를 각 관측소의 매초당

YGA, BGE MMA T=998345821.687696 MIN=-78892.000 MAX=-78861.000 AVG=-78879.852
 YGB, BGE MMA T=998345821.687696 MIN=-99574.000 MAX=-99569.000 AVG=-99572.102
 YGA, BGE MMA T=998345822.687696 MIN=-78896.000 MAX=-78866.000 AVG=-78880.703
 YGB, BGE MMA T=998345822.687696 MIN=-99575.000 MAX=-99570.000 AVG=-99572.102

그림 5. 실제적인 DSS data의 모습

PGA (Peak Ground Acceleration)로 정의하였다. 각 관측소별 PGA를 구하는 데이터 처리과정은 다음과 같다.

- 1) 각 관측소별 두 개의 수평성분인 E-W와 N-S의 20 sps 자료로부터 매초 당 MAX, MIN과 AVG를 DSS 자료로 전송 받는다.
- 2) 각 성분별로 Moving Average인 Mavg를 계산한다.
- 3) 각 성분별 최대 진폭, EW = 최대치 (|MAX-Mavg| and |MIN-Mavg|)을 구한다.
- 4) 두 수평성분의 벡터 합인 $PGA = \sqrt{sq(EW) + sq(NS)}$)를 구한다.

그림 6은 2002년 6월 28일 중국 무단장에서 발생한 규모 7.2의 지진을 대전 (TJN), 군산시 나포리 (NPR), 보길도 (BGD)에서 관측하여 DSS data로 PGA를 계산하여 도식화한 것이다.

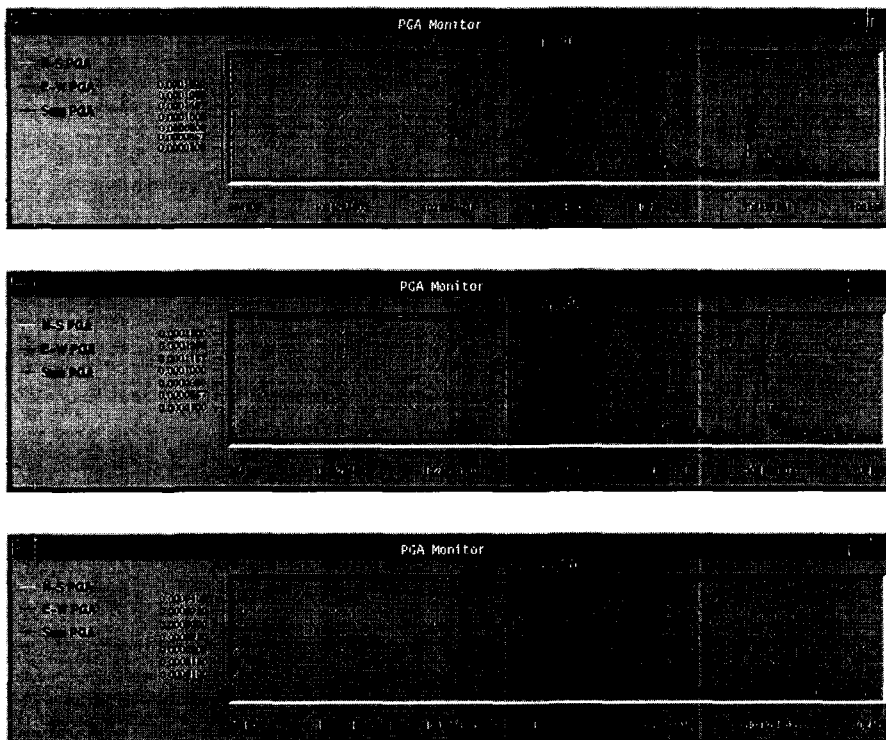


그림 6 DSS data를 이용한 각 관측소별 PGA의 시간별 변화

5. 데이터의 수집

미국 Quanterra사에서 제작된 Q-series 기록계(Q330, Q730, Q4120 등)가 설치된 각 관측소로부터 DSS 데이터를 직접 수신하는 방법을 기본으로 하고 있다. 그러나 각 기관별로 설치된 Firewall 등 현실적인 네트워크 상황을 고려하여 각 기관별로 따로 데이터를 수신하고 이를 한 곳으로 취합하여 데이터를 가공하여 교환할 수 있는 기능을 추가하였다. 각 기관에서는 해당 관측소의 정보를 정확하게 입력한 설정 파일을 활용하여 sendDSSdata라는 프로세스를 구동시켜서 DSS 데이터를 수신하고 이 프로세스는 또 특정 위치로 DSS 데이터를 곧바로 전송하게 된다. 수신하는 측 - 현재는 KISS server - 은 항상 recvDSSdata라는 프로그램이 작동하고 있어야 한다. 특히 recvDSSdata와 sendDSSdata는 UDP 프로토콜을 활용하고 있어 상대적으로 각 관측소의 Firewall의 영향을 적게 받을 수 있도록 설계·구현되었다. 현재 DSS 데이터의 수집은 지질자원연구원, KEPRI의 데이터를 취합하고 있으며 기상청의 데이터는 적용 시험 중에 있다.

6. 지진발생 감지 및 통보

그림 1에서 도식된 자동분석시스템의 지진요소 결정에 소요되는 시간을 단축하는 데에는 근본적인 문제점이 있다. 먼저 각 파형의 도달시간을 구하기 위해서는 최소한 진앙지와와의 거리를 전파속도로 나눈 시간만큼은 기다려야 한다. P파가 일찍 도달함으로써 P파만을 사용하여 진앙지의 위치를 계산할 수 있으나 만일 진앙지가 관측망 밖에 위치할 경우 실제 진앙지가 계산과정에서 관측망 중에 가장 가까운 관측소 주변에 있는 것으로 항상 왜곡되어 오차가 크게 발생하며, 관측소의 잡음이 상호 연계성 (association) 검증 과정에서 잘못된 결과, 즉 false alarm를 자주 생성하게 된다. 더구나 지진규모 (MI, local magnitude) 를 계산하기 위해서는 최대 진폭의 크기를 알아야 함으로 S파가 도달할 때까지 기다려야 한다. 현재 P와 S파형을 모두 사용할 경우 진앙지의 오차범위가 5 Km 이내에 있다.

만일 가속도관측소가 균일하게 분포되어 있으며 진앙지와 가까울수록 관측된 PGA가 클 것이며 거리의 증가에 비례하여 감소할 것이다. 따라서 20 Km 마다 격자형식으로 관측소가 분포되어 있을 경우 이론적으로 최대 진앙지 오차는 10 Km 이내가 된다. 즉, 매 초마다 전체관측소의 PGA를 검색하여 미리 설정된 가속도 값을 넘는 관측소의 개수가 일정 이상일 경우 공간적 중앙 지점을 진앙지로 간주하여 지진발생 (event alarm) 을 통보할 수 있다. 이 방법의 장점은 진앙지와 가까운 관측소들의 자료를 사용함으로써 진앙지의 대략적 위치 및 피해 범위를 빨리 파악할 수 있어 방재적 측면에서 매우 효율적인 것이다. 이때 관측소와 진앙지와 거리를 고려하여 정해진 시간동안 충분히 검색할 수 있도록 하여야 한다. 지진발생이 감지될 경우 이를 e-mail과 휴대폰 문자 메시지로 통보하고 Oracle 데이터베이스에 저장하게 된다.

7. 영상화 기법

전국적 규모의 실시간 지진자료 영상화를 개발하는 과정에서 가장 중요하게 여겨지는 내용은

어떻게 매초마다 들어오는 전국 약 100여 곳의 데이터를 초기 연산과정을 거쳐 역시 매초 영상화를 시키는가 하는 문제이다. 즉 각 과정에서 소요되는 시간의 최소화가 가장 큰 과제였다. 금번 영상화 연구에서는 이를 해결하기 위한 여러 가지 노력이 수반되었으며 여기에 UNIX 설계의 기본적인 개념 즉 'simple is powerful'을 적용하여 초기 데이터 수집 과정, 1차적인 데이터 연산 과정, 2차적인 이미지 생성과정과 그리고 마지막 화면 표현 과정으로 크게 4단계로 나누어 각각의 module를 개발함으로써 프로그램의 확정성 및 견고성을 유지할 수 있도록 하였다.

표 1 각 과정별 module 명칭 및 주요 기능

단계	데이터 수신 과정	1차 데이터 연산 과정	이미지 생성 과정	화면 표출 과정
이름	HSdss_client	HSDSSMan	HSMakeImage	HSPGAViewer
내용	각 관측소로부터 초당 두 수평성분의 데이터를 수신하여 특정 영역에 저장	특정 영역으로부터 동일 시각의 각 관측소 데이터를 읽어서 관측소별 PGA를 계산	모든 관측소의 동일 시각 PGA를 읽어와서 이를 이미지 구축	구축된 이미지를 화면에 표시하는 과정
비고	sendDSSdata recvDSSdata	even alarm	GMT surface (interpolation) Matpak library	QT library

우선 초기 데이터 수집 과정은 각 관측소에서 20Hz 자료로부터 N-S와 E-W 두 수평성분의 DSS data을 수집하여 같은 시각의 자료를 하나의 덩어리로 묶어 일정한 컴퓨터 공간에 임시 저장하게 했다. 특히 실시간으로 전송되는 데이터의 유실을 막기 위해 이 과정에서는 단순히 동일 시각의 데이터를 하나로 묶는 과정만 진행했으며 만약 이 후의 프로세스가 데이터를 처리하지 못할 경우라도 계속 신규로 유입되는 최신 자료를 계속 저장할 수 있도록 설계하였다. 수신하는 프로세스와는 별개로 특정영역에 저장된 데이터를 읽어와서 해당 시각의 각 관측소별 PGA를 계산하여 전체 관측소의 동일 시각의 PGA를 하나로 묶어 또 다른 영역에 저장하는 HSDSSMan 모듈을 작성하였다. 이 모듈에 매초 전체 관측소에 대한 동일 시각의 PGA를 조사하여 일정 규모와 일정 개수 이상의 이상 징후를 발견할 경우 지진경보를 발하는 event alarm 기능이 있으며 이런 경우에 실제의 지진파형이 패킷으로 데이터베이스에 도착할 때까지 기다린 후에 관련된 지진자료만을 별도로 저장할 수 있도록 설계 구현되었다. 세 번째 프로세스는 전국을 망라한 관측소의 동일 시각 PGA를 가지고 이미지를 만드는 역할을 수행한다. 특히 지역적으로 균일하게 분포되어 있지 않는 100여개 지진관측소 데이터를 가지고 전국적 규모의 Intensity Map을 구현하기 위해서 여러 종류의 interpolation 방법을 적용하여 보았다. 연구의 초기 단계에서는 GMT에서 지원하는 세가지 방법 - nearneighbor, surface, triangulate - 를 모두 적용하여 비교해 본 후 surface를 채택하였고 그로부터 나오는 NetCDF (network Common Data Form)의 grid 파일을 활용해 shading을 구현했으나 출력을 얻는 시간과 그 활용에 많은 시간이 소요되어 이후 shading은 Matpack library를 활용하여 C 언어로 다시 작성하였다. 마지막 화면 표출은 TrollTech사의 QT

library를 활용하여 구축되었다.

그림 7은 중국 무단장지진으로 인한 각 관측소별 PGA를 동영상화한 것의 snapshot 이다. 실제로 제주도, 울릉도의 데이터는 내륙에서 멀리 떨어져 있어서 별로 영향을 주지 않고 있지만 백령도의 경우 내륙과 상대적으로 가까우며 특히 데이터 획득이 불가능한 북한 남서부 지역과 인접해 있는 서울 이북 지역의 데이터가 많이 왜곡되어 나타남을 알 수 있었다. 또한 일부 관측소의 잡음에 의한 왜곡이 심각한 경우도 발생하였다. 이를 해결하기 위해서는 interpolation 영향 반경을 관측소의 분포에 따라 조정하는 방안을 고려하고 있으며 실시간 영상화의 핵심인 Interpolation과 관련해서는 데이터의 특성 상 그 정밀도가 높다고 생각되는 kriging 기법을 고려하고 있으나 실제 구현 시 보다 정밀한 비교 적용이 필요해 보인다. 일부 잡음이 심한 관측소는 이전 등 개선책을 마련하여 추진되도록 노력할 것이다.

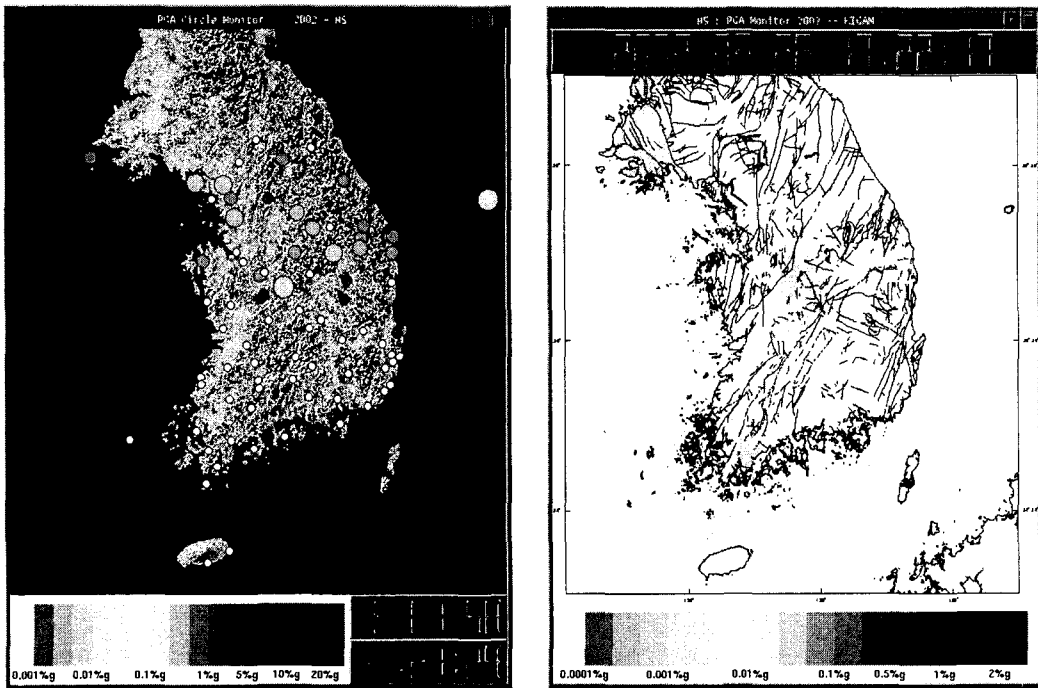


그림 7 수평가속도성분 벡터 합의 2차원적 영상화. (a)는 가속도의 크기를 관측소 위치에서의 원 크기로 나타낸 것이며, (b)는 이들을 공간적으로 contour하여 칼라로 표시한 것이다.

8. 결론

본 연구에서 지진관측기관의 모든 실시간 가속도 자료를 이용한 2차원적 지진동의 영상화 기법을 제시하였다. 이는 지진방재 대응기술의 주축이 되는 지진피해신속평가시스템의 기본이 되는 것으로 2003년 상반기까지 시험운영을 목표로 다음 사항을 개선해 나가고자 한다.

- 1) 네트워크 : 각 기관에서 산하 관측소로부터 DSS data를 취합하여 기관간에 자료 교환이 원

활히 수행될 수 있도록 네트워크를 보강하여야 하며, 중앙처리시스템에 문제가 발생할 경우를
우회하여 전송할 수 있도록 구성한다.

2) 데이터 품질 : 현재 DSS 자료를 수신하고 있는 관측소 중 대부분의 관측소 데이터 상태는
매우 양호하나 일부 관측소에서는 초기 데이터를 그대로 적용시킬 수 없을 정도로 잡음이 심
하게 나타나 이를 보정하기 위한 특별한 조치가 필요해 보인다. 관측소 센서실 지반이 암반일
경우 잡음의 수준이 낮고 지역별 주파수 증폭 특성이 크게 다르지 않다. 반면에 토양일 경우
지반 증폭현상에 의해 자료가 크게 왜곡되므로 이의 보정이 필요하게 된다. 특히 전국적으로
조밀하지 않은 관측소의 분포를 볼 때 일부 관측소의 잡음이 Color Mapping의 과정에서 전
반적인 패턴을 왜곡시킬 수 있으므로 센서실의 보강 또는 관측소 이전 등을 통해 각 관측소
의 데이터 품질을 일정 수준이상으로 향상시킨다.

3) 영상화 기법 : 관측소의 분포가 균일하지 않은 자료 특성에 보다 적합한 interpolation 방법
및 동영상에 필요한 초당 프레임간의 부드러운 전환에 필요한 프로그램에 대한 자료를 수집
하여 계속 비교·적용하여 최적화시킨다.

관측된 자료로부터 지진피해를 보다 정확히 유추하기 위해서는 인구 밀집도, 지역별 구조물 취
약도, 지질학적 특성 등을 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해서 GIS 개념을 도입하고 사용자의
측면에서 여러 가지 부가기능을 추가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (과제명 : 지진연구망구축 및 네트워크운영 기술개발)의
지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.