

지진가속도 값의 칼라코드 표준화 Suggestion of standard color code for displaying ground acceleration

지현철* 전정수* 신진수* 이희일* 박정호*
Chi, Heon Cheol Jeon, Jeong-Soo Shin, Jin-Soo Lee, Hee-Il Park, Jung-Ho

ABSTRACT

Color-code imaging should be one of the best display tools for the quick perception of both damage area and its intensity. In this study we proposed the standard color code corresponding to maximum observed acceleration value. Since the acceleration value changes with frequency contents, we suggested to limit the frequency band less than 10Hz. The background considerations of this limitation, magnitude vs. dominant frequency, natural characteristics of artificial noises and the relationship between velocity and acceleration, were reviewed in detail. The standard of color code was assigned from 0.001%g to 20%g based on the possible earthquakes at Korean peninsula and the color imaging given by RGB value was shown to be very consistent, irrespective of hardware configuration.

1. 서론

지진공학적 측면에서 빈번하게 사용되는 용어로 가속도의 값 또는 크기가 있다. 지구의 중력가속도인 $1g = 980 \text{ cm/sec}^2$ 를 단위로 하여 지반 진동의 크기를 나타낸 것으로 예를 들면 어느 지역의 일반구조물에 대한 내진설계 기준이 0.12g라든가 또는 원자력발전소의 SSE(Safe Shutdown Earthquake)가 0.1g라고 했을 때 이는 중력가속도와 의 비율을 의미하게 된다. 또 다른 예로는 지진계에 의해 관측된 가속도의 크기로, 1999년 6월 2일 경주보문단지에서 발생한 지진을 경주변 전소에 설치된 지진계로 관측한 결과 E-W성분의 가속도 크기가 0.115g로 SSE의 0.1g를 넘었다 하여 논란을 일으킨 적이 있다.

중력가속도는 위치에 따라 미세한 차이가 있으나 시간적으로는 변하지 않는 DC(direct current) 성분만을 가진 물리량으로 간주한다. 이에 반해 지반 진동(ground shaking)에 의한 (지반)가속도는 시간에 따라 변하는 파동 형태로서 AC(alternating current) 성분을 가진 물리량이다. 즉,

* 정회원, 한국지질자원연구원 지진연구센터, 연구원

지진분야에서 말하는 가속도는 주파수특성을 가지고 있으므로 동일한 진동이라도 관측된 주파수 영역에 따라 가속도의 값이 다르게 된다. 전자공학의 획기적 발전에 의해 현재 상용화된 대부분의 가속도센서와 디지털기록계의 측정 주파수대역(measurable frequency band)은 0.1~50 Hz로 넓어졌으며 이 대역 내에서는 공학적으로는 무시할 수 있는 아주 작은 오차를 보이고 있다. 본 연구에서는 가속도 크기를 정의할 때 전제조건으로 필요한 주파수 대역을 어떻게 설정할 것인지 제시하였다. 또한 가속도 크기의 공간적 분포나 시간적 변화를 쉽게 인지할 수 있는 방법은 크기를 대응되는 칼라로 표시하는 것으로 한국의 지진학적 특성을 고려하여 이의 표준화 방안을 제안하였다.

2. 규모에 따른 주파수영역 변화

단층면의 넓이, 전단강도, 파열속도(rupture velocity) 등에 따라 다소의 차이는 있으나 일반적으로 규모가 클수록 주된 에너지의 주파수영역은 저주파 대역으로 옮겨진다. 그림 1은 1996년 12월 13일 영월 근처에서 발생한 주지진(main shock)과 그 후에 동일지역에서 발생한 후지진(after shock)의 속도성분의 지진파형을 스펙트럼과 함께 도식화한 것이다. 지진규모(MI, local magnitude 또는 Richter magnitude)가 4.3인 경우를 보면 파형의 진폭(amplitude)이 그 당시에 설치된 지진계의 관측범위를 넘어서 포화(saturation) 상태가 되었으며, 규모가 작아질수록 파형의 진폭이 급격히 작아지는 것을 알 수 있다. 스펙트럼 상에서 보면 규모 2.7의 후지진 경우 7~9Hz 대역에, 규모 3.0의 후지진 경우 5~7Hz 대역에, 그리고 주지진의 경우 2~3Hz에 에너지가 모여 있는 것을 알 수 있다*. 일반적으로 규모가 4.5 이하의 경우 구조물에 거의 피해가 발생하지 않으며 피해지진인 규모 5.0 이상의 경우 주된 에너지의 주파수대역은 2Hz 이하가 일반적이다.

지진파형의 주된 주파수대역이 구조물의 고유주기와 일치할 경우 공명(resonance) 현상이 발생하여 쉽게 파괴될 수 있다. 구조물의 층수를 N이라고 할 때 고유주파수(f)는 대략적으로 $f \sim 10/N$ 으로 단층의 가속은 10Hz 그리고 10층의 건물은 1Hz가 고유 주파수가 된다. 또한 구조물이 층수가 증가할수록 지반 진동에 의해 구조물의 최 하단에 집중되는 전단응력이 급격히 증가하여 비록 내진설계에 반영되어 있다고 하더라도 지진에 상대적으로 취약하게 된다. 따라서 지진공학적 측면에서 10Hz 이상의 주파수 대역의 가속도 파형은 크게 중요하지 않을 것으로 사료된다.

그림 2는 1999년 6월 2일 경주보문단지 현대호텔 바로 직하부 약 7Km에서 발생한 규모 3.8 (?)의 지진을 진양지(현대호텔)로부터 서쪽으로 2~3Km 떨어진 경주변전소에 설치된 전력연구원 소속 WSC관측소에서 기록한 가속도 파형과 스펙트럼을 도식화한 것이다. 스펙트럼 상에서 보면 주된 에너지가 9~10Hz에 집중되어 있고, 진양지와 관측소사이의 방향과 비슷한 E-W성분의 최대 가속도는 S파에서 나타나며 크기가 0.115g (또는 11.5(%g))이다. 이 지진이 논란거리가 된 첫 번째 이유는 WSC관측소가 월성원자력발전소의 지진안전성 평가와 관련하여 설치된 것으로 원자력발전소의 가동을 일시 중지시켜야 할 SSE 기준인 0.1g 보다 큰 가속도가 월성 주변에 관측될 수 있다는 것이고 두 번째는 그림에도 불구하고 아무런 피해가 없다는 것이다. 즉, 현대호텔의 최 상부에 있는 스카이라운지에서 근무하는 직원들은 놀랐지만 컵 하나 넘어지지 않았다는 것이다.

* 가속도 지진파형의 스펙트럼 경우 속도 스펙트럼의 경우 보다 주된 주파수가 조금 더 증가하며 4장 지반속도와 가속도 간의 관계에서 논의할 예정이다.

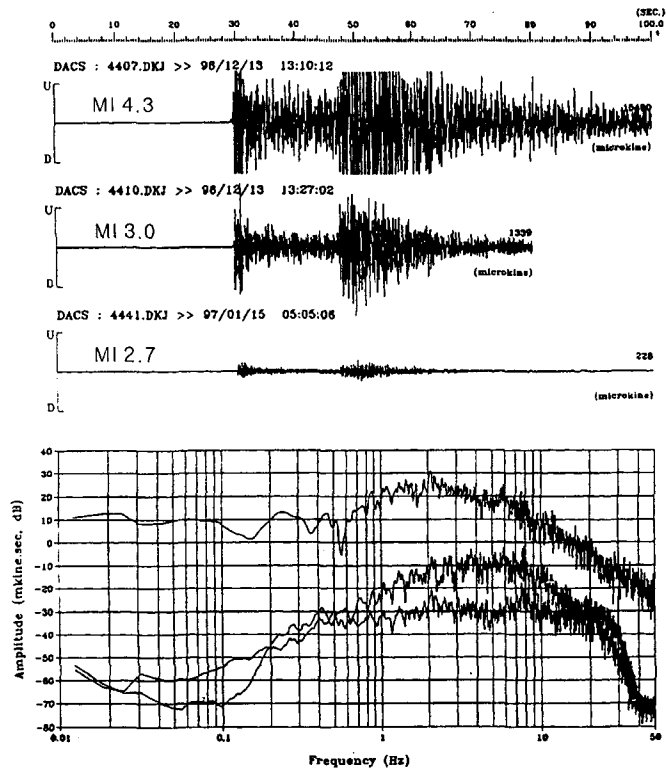


그림 1. 규모별 지진 속도파형 및 스펙트럼 비교

이와 같은 다소 모순된 상황이 발생하게 된 것은 주파수 영역을 고려하지 않고 단순히 최대 가속도(peak acceleration) 크기만을 가지고 규정을 정하기 때문이다. 특히 그림 2에서 보는 바와 같이 0.1g보다 큰 가속도의 지속시간은 0.2초 정도 (10 Hz 파형의 2 사이클)로 매우 짧아 에너지 측면에서 보면 규모가 지나치게 과대 계상된 것을 알 수 있다. Richter가 제창한 규모 계산식은 거리와 파형의 최대진폭만을 고려함으로 이와 같은 과대 계상 가능성은 언제나 존재하게 된다. 10Hz 이상의 주파수대역을 제거한(filtering) 초당 20 sample의 경우를 보게되면 최대 진폭이 반 정도로 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 따라서 현실적으로 최대진폭과 이의 지속시간을 병행하여 규정하기는 기술적으로 어렵지만 최대 진폭 산출 시의 주파수 영역을 한정하는 것은 매우 간단하며 그 기준으로 10Hz가 합리적일 것으로 판단된다.

3. 구조물에서 발생하는 잡음의 주파수 특성

구조물의 진동을 자유장(free field)과 함께 측정하는 예로는 인천국제공항 지진감지시스템이 있다. 그림 3은 지진계의 개략적 위치를 표시한 것으로 지하 48m 하부의 기반암 층인 G-48m, 그리고 mud 층인 G-12m와 G-3m에 시추공용 가속도센서가 각각 설치하였다. 그리고 여객터미널

• 지진정보 : 1999/06/02 18:12:22.62 (경주보문단지) M13.8

• 관측자료 : 한국전력연구원 WSC 관측소

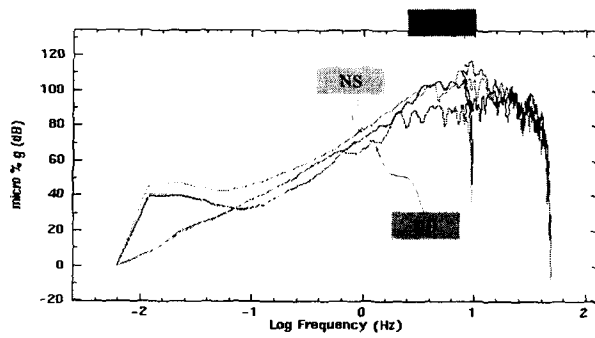
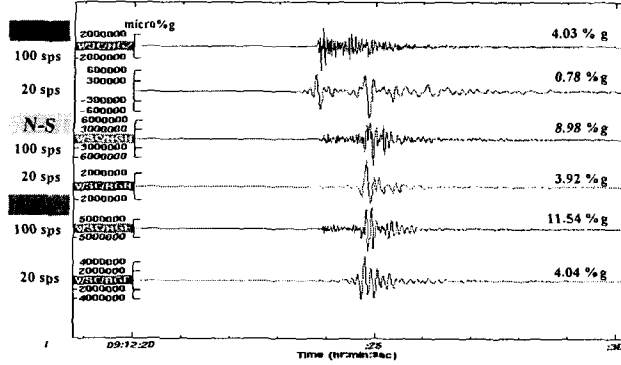


그림 2. 경주지진의 주파수대역에 따른 가속도 지진파형 비교

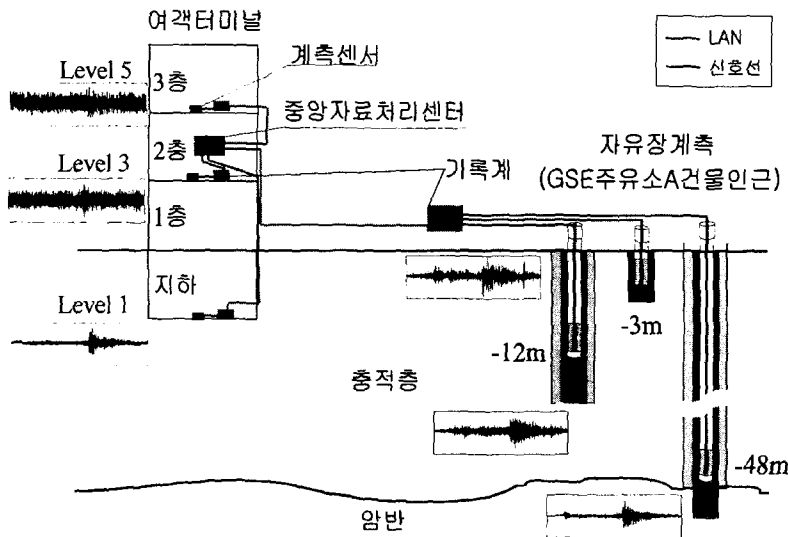


그림 3. 인천국제공항 지진감시시스템 위치도

의 지하 바닥인 Level 1, 지상 1층에 해당하는 Level 3, 그리고 최상부인 Level 5에 가속도센서를 각각 설치하여 실시간으로 모니터링하고 있다. 그림 4는 문경에서 발생한 지진을 관측한 것으로 암반 위에 설치한 G-48m와 터미널 최하부인 Level 1의 파형이 뚜렷하며 잡음이 낮은 것을 알 수 있다. Level 1의 잡음의 수준이 낮은 것은 여객터미널의 하부에서 기반암까지 파일이 박혀있어

- 지진정보 : 2001/11/21 10H 49M 36.7°N 128.3°E (문경북쪽 약 15 km) M13.5
- 관측자료 : 인천국제공항 지진감지 시스템

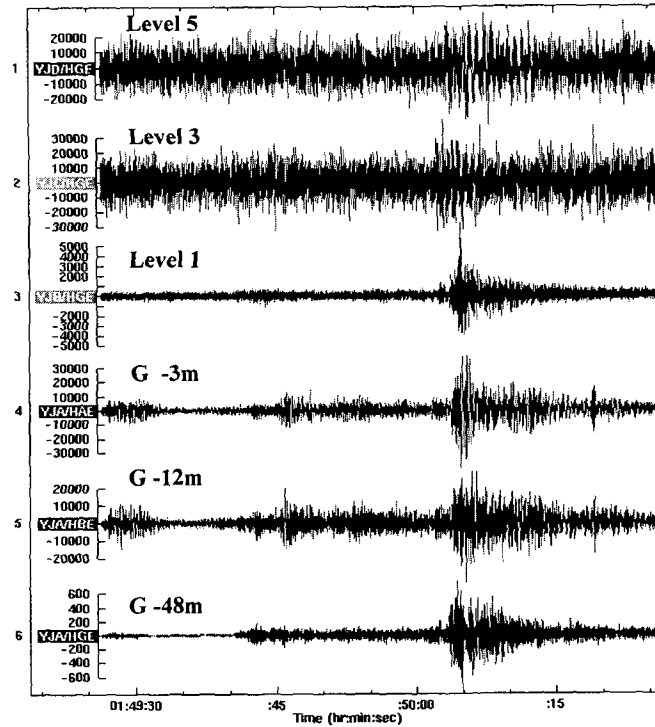


그림 4 시추공 및 구조물 가속도 지진관측 자료 비교

mud 층보다는 기반암 자료에 가까운 것으로 사료된다. 이에 반해 G-12m와 G-3m의 경우 지진 파형이 잡음과 함께 증폭효과에 의해 크게 나타났으며 터미널 내의 Level 3와 Level 5의 경우 지진파형이 잡음에 의해 식별이 불가능하다.

그림 5는 한국가스공사 평촌정압기지 내의 6개 지점의 잡음 측정 결과를 주파수 영역에서 동일 시간대의 대전소재 지진관측소의 잡음과 비교한 것이다. 가스시설물의 특성 상 주요 파이프라인 등을 지하에 매설하여야 함으로 정압기지가 토양층이 깊은 지역에 설치되어 있다. 평촌정압기지의 경우 연약층의 두께가 약 30m 정도이며 인천국제공항과 같이 잡음의 주된 에너지는 10Hz 이상이다. Governor Room에서 가스압력을 낮추어 줄 때 발생하는 진동이 전 지역의 주된 잡음 원인으로 판단되며 그로부터 가장 멀리 위치한 Vent Stack에서 잡음의 수준이 가장 낮게 나왔다. 그림 6은 Vent Stack에서의 3성분 잡음을 10Hz 이상을 제거(filtering)하였을 경우와 함께 도식화한 것으로 전체 잡음의 수준이 1/3 정도로 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 지진이 빈번하지 않는 지진학적 환경에서 약진에 의한 가속도의 변화를 감지하기 위해서는 잡음수준이 1m[%g]

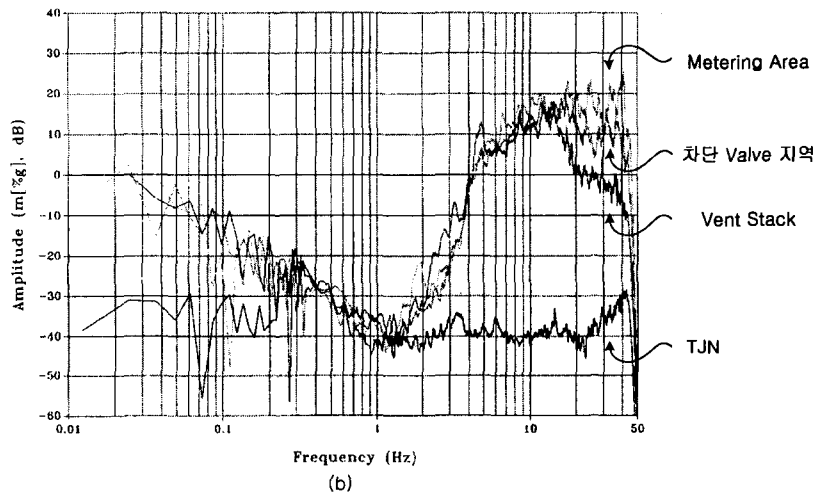
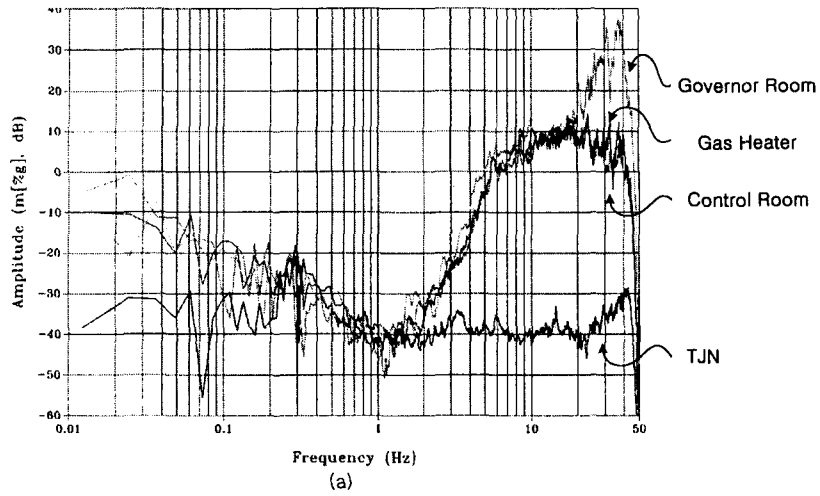


그림 5. 가스공사 평촌정압기지 가속도 잡음의 주파수특성

이하를 유지하여야 하며 거의 모든 지진관측소는 이를 만족시킨다. 이에 반해 10Hz 이상을 제거한 후의 잡음 수준이 10m[%g] 정도인 정압기지의 경우 중진 이상만을 관측할 수 있게 된다. 암반 위에 설치된 구조물의 지하인 경우 잡음 수준이 1m[%g] 이하로 유지할 수가 있으므로 가능한 암반 지역의 구조물 지하에 설치하는 것이 지진에 의한 가속도 변화를 감지하는 데에 좋다.

4. 지반 속도와 가속도간의 관계

전자공학의 발달로 지진센서의 동적 영역이 보통 120dB에서 140dB까지 확대되었으며, 기록계에서는 24bit A/D를 사용함으로 거의 140dB의 기록범위가 가지고 있다. 하지만 규모 2 이하의 미소지진으로부터 규모 7이상의 강진을 측정하기 위해서는 동적영역이 180dB 이상이 되어야함으로

▪ 관측 시간 : 1999/08/10 09:48:00 - 09:49:00

▪ 관측 장소 : 한국가스공사 평촌 가스 정압소, Vent Stack Area

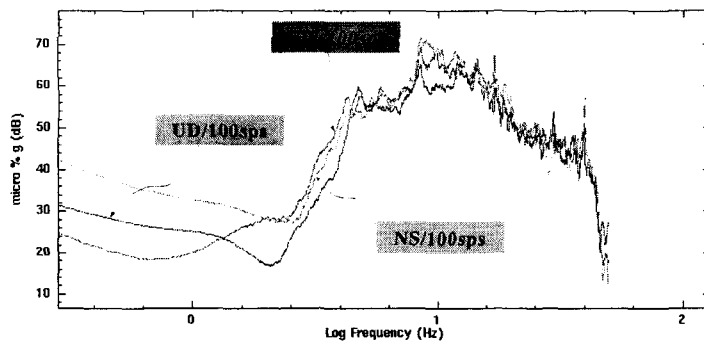
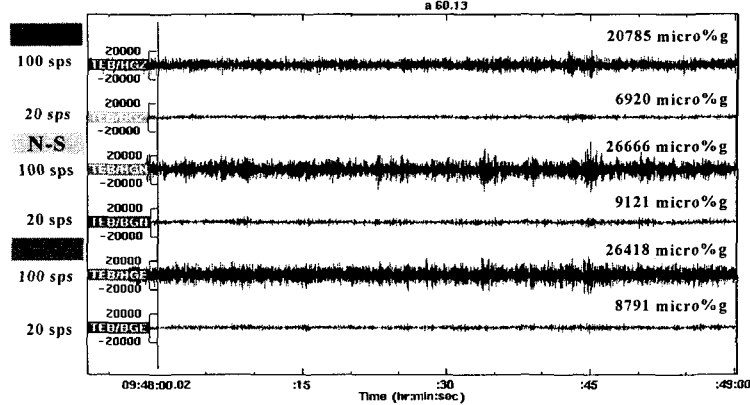


그림 6 정압기지 잡음의 주파수 대역에 따른 지진파형 비교

우리나라 지진관측을 수행하는 대부분의 관측소에서는 두 개의 센서를 같이 사용하는 데 속도센서는 미소지진쪽을 담당하고 가속도센서는 강진쪽을 대상으로 조정되어있다. 따라서 중간 대역에서는 중복 관측되며 주파수 영역에서는 표 1의 관계를 가지게 된다.

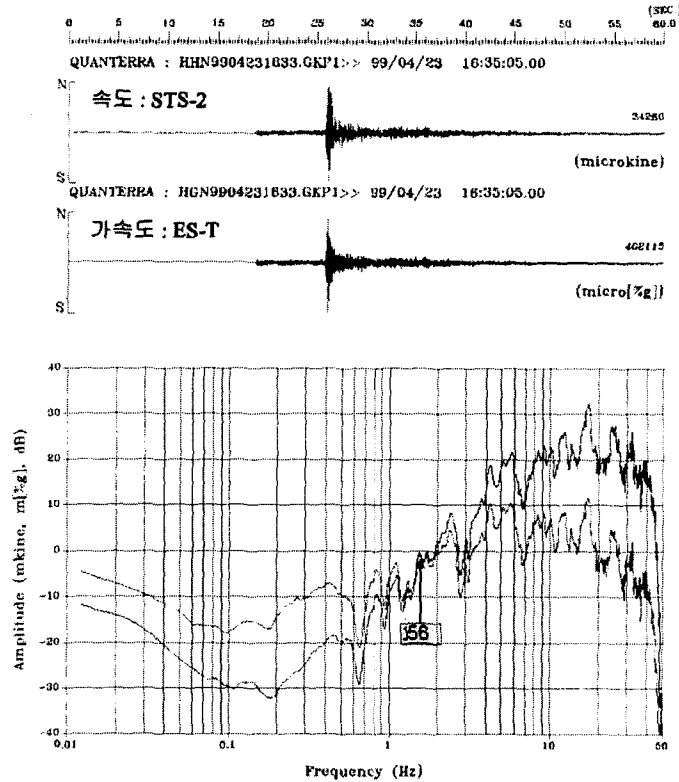
표 1. 주파수 영역에서의 관계식

| | | | |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| <u>속도</u> | | <u>가속도</u> | |
| $F(f)$ | \Leftrightarrow | $i2\pi f F(f)$ (6dB/octave) | |
| $1 \text{ kine} = 1 \text{ cm/sec}$ | | $1 [\%g] = 9.8 \text{ cm/sec}^2$ | |

그림 7은 경북대학교 자연과학대학 건물 옆에 설치된 GKP1 관측소에서 광대역 속도센서 (STS-2)와 가속도센서 (ES-T)에 의해 관측된 지진파형을 스펙트럼과 함께 도식화한 것이다. 표 1에서 주어진 단위를 사용할 경우 주파수영역에서 $2\pi f = [\%g]/\text{kine}=9.8$ 이 되는 주파수인 $f=1.56\text{Hz}$ 에서 두 개의 스펙트럼 곡선이 만나게 되며 그 이상의 주파수 대역에서는 가속도 스펙트럼이 속도스펙트럼에 비해 6dB/octave로 증가하게 된다. 따라서 가속도 자료의 단위로 [%g]를 사용할

경우 속도 자료와 쉽게 비교할 수 있다.

그림 7은 규모가 2.5 이하의 지진으로 속도스펙트럼의 주된 주파수는 10~12Hz이나 가속도스펙트럼의 주된 주파수는 16~18Hz로 증가하게 되는 데 이는 속도성분에서 가속도성분으로 전환하는 것에 해당하는 미분 (differential) 효과인 $2\pi f$ 에 의해 야기된 것이다. 하지만 주된 주파수가 1Hz



기록계 Q4128 on the hard rock at the surface.
GKP1 : Gyungbuk National University #1 Station.

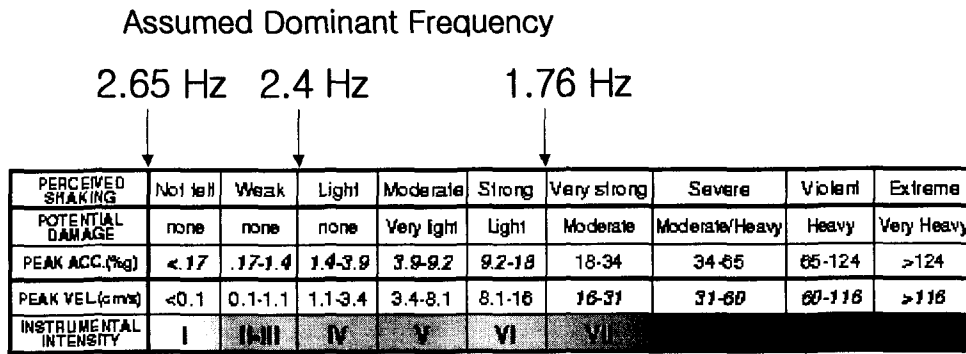
그림 7. 속도와 가속도 지진파형의 스펙트럼 비교

에 가까울 경우 미분에 의한 주된 주파수의 이동이 없어진다. 지진피해를 발생시키기 시작하는 중형지진인 규모 5부터 대형지진인 규모 7까지의 속도스펙트럼에서 주된 주파수가 0.4~2Hz이므로 이에 상응하는 가속도스펙트럼의 주된 주파수도 비슷하게 나타나게 된다. 주된 주파수대역의 에너지가 파형의 최대 진폭에 결정적인 역할을 함으로 이를 비교하게 되면 가속도 최대치(A_{max})와 주된 주파수(f_0)로부터 속도 최대치(V_{max})를 개략적으로 유추할 수 있다. 즉, $V_{max} \approx A_{max} * 9.8 / 2\pi f_0 \approx 1.56 A_{max} / f_0$. 으로 그림 7의 경우를 예를 들면 $A_{max} = 402115 \mu[\%g]$, $f_0 = 17\text{Hz}$ 이므로 $V_{max}(\text{cal.}) \approx 36900 \mu\text{kine}$ 이 되며 실제 관측된 $V_{max} = 43260 \mu\text{kine}$ 와 비슷한 결과를 얻을 수 있는데 주된 주파수가 1Hz에 가까울수록 즉, 규모가 큰 지진일수록 보다 잘 일치한다. 이와 같은 주된 에너지가 집중된 주파수 대역에 따른 최대속도와 최대가속도와 상관관계는 지진규모와

주된 주파수대역간의 관계와 함께 지진피해의 정도 및 유형을 관측자료와 함께 조사하는 데 매우 유용한 개념이다.

4. 가속도 크기의 표준 칼라코드

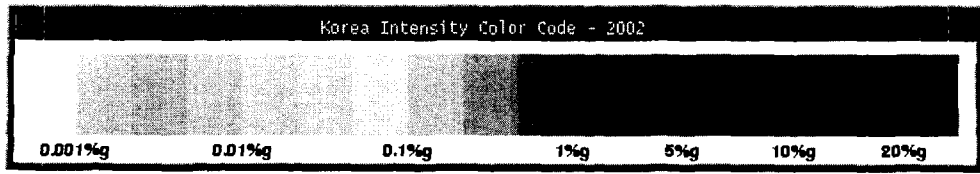
미국 California 남부에는 약 400여 개의 지진관측소로 구성된 TRINET이라는 관측망이 있으며 Los Angeles 인근 Pasadena에 있는 CalTech (California Institute of Technology)에서 관리하고 있다. 그림 8은 TRINET과 관련하여 운영 중인 Web 사이트, www.trinet.org/shake에서 볼 수 있는 최대가속도와 최대속도간의 경험적 대비, 관측자료에 의한 지진강도 (Instrumental Intensity) 를 칼라코드와 함께 도식화한 것이다. TRINET에서 최대가속도와 최대속도간의 전환에 사용된 주된 주파수는 우리나라에서 환측되는 지진의 주된 주파수보다 다소 낮은 것으로 사료된다.



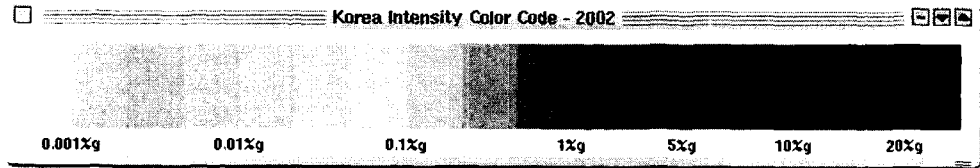
TriNet Instrumental Intensity Map Color Code

그림 8. TRINET의 칼라 코드

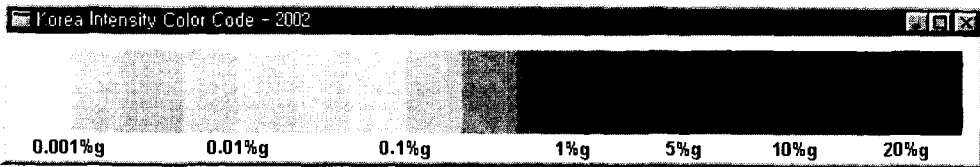
활성단층으로 그 연장선과 폭이 가장 큰 San Andres 단층이 California 동쪽을 지나가기 때문에 지진학적으로 지진에 가장 취약한 지역 중에 하나이다. 따라서 최대가속도 크기가 중력가속도를 넘는 최악의 상황까지도 고려하여 칼라코드를 정의하였다. 이에 반해 한반도는 중약진 지대로서 내진설계 기준이 가장 높은 원자력발전소의 경우에도 기준이 20%g이며 구조물의 경우 14%g 이하이므로 그림 9에서와 같이 20%g 이상의 경우 같은 칼라코드를 부여하였다. 그리고 TRINET에서는 0.17%g를 최소치로 설정하였으나 지진발생이 빈번하지 않고 그 규모도 작은 우리나라의 실정에 맞추어 최소치를 0.001%g로 설정하였다. 표 2는 각 가속도 최대치에 대한 상용한 칼라코드의 RGB값으로 그림 9에서 보는 바와 같이 SUN sparc 계열이나 X86 계열의 Linux나 MS Windows 환경에서도 칼라 변화가 잘 일치하고 있다.



(a) SUN에서의 Color Code



(b) Linux에서의 Color Code



(c) Windows에서의 Color Code

그림 9. Hardware의 계열별 칼라 코드에 따른 색상 비교

표 2. 가속도 값에 상응하는 Color Code의 RGB 값

| 순번 | 값 | Red | Green | Blue | 비고 |
|----|---------|-----|-------|------|----|
| 1 | 0.001%g | 191 | 255 | 255 | |
| 2 | | 95 | 255 | 238 | |
| 3 | 0.01%g | 95 | 255 | 175 | |
| 4 | | 159 | 255 | 111 | |
| 5 | | 191 | 255 | 81 | |
| 6 | | 223 | 255 | 48 | |
| 7 | | 255 | 255 | 15 | |
| 8 | | 255 | 239 | 0 | |
| 9 | 0.1%g | 255 | 207 | 0 | |
| 10 | | 255 | 175 | 0 | |
| 11 | 1%g | 255 | 143 | 0 | |
| 12 | 5%g | 255 | 111 | 0 | |
| 13 | | 255 | 81 | 0 | |
| 14 | 10%g | 255 | 48 | 0 | |
| 15 | | 255 | 15 | 0 | |
| 16 | 20%g | 239 | 0 | 0 | |
| 17 | | 207 | 0 | 0 | |

5. 결론

내진설계 기준을 설정할 때나 잡음의 수준을 명시할 때에 사용되는 지진파형의 최대가속도 (또는 최대속도) 크기는 주파수 대역에 따라 큰 편차를 보일 수 있으므로 다음과 같은 이유로 10Hz 이하의 주파수대역으로 한정할 것을 제안하였다.

1) 지진공학적 대상인 피해지진의 경우 일반적으로 2~3Hz 이하이며, 10Hz 이상의 고주파에 의해 지속시간이 짧은 spike성의 지진관측에 의한 과장된 규모 산정 및 잘못된 피해 예측을 예방할 있다.

2) 구조물이나 시설물들의 주변 잡음은 상당히 크나 주파수대역이 10Hz 이상임으로 이를 제거할 경우에 지진에 의한 가속도 크기의 변화를 보다 뚜렷하게 관측할 수 있다.

가속도자료의 단위로 중력가속도 g 대신에 %g를 사용할 경우 속도 자료의 단위인 kine과의 관계를 쉽게 이해할 수 있을 뿐 아니라 최대속도치와 이에 상응하는 최대가속도치를 식, $V_{max}(kine) \approx 1.56 A_{max}(\%g)/f_0$ 을 통해 쉽게 전환할 수 있다.

중약진 지대인 한반도의 현실에 맞게 최대가속도 크기에 대한 칼라 코드를 제안하였다. 가속도 크기에 상응하는 RGB 값으로 주어진 칼라코드는 SUN과 X86 계열 모두에서 색상이 잘 일치하고 있다.

감사의 글

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