

가속도와 JMA진도 관계를 이용한 댐 시설의 지진 안정성 평가

Assessment of Dam Seismic Safety using the Relationship between Acceleration and JMA Intensity

강기천^{1)*} · 최병섭¹⁾ · 차기욱¹⁾ · 정상인¹⁾ · 이종욱²⁾

Kang, Gi-Chun^{1)*} · Choi, Byoung-Seub¹⁾ · Cha, Kee-Uk¹⁾ · Cheung, Sang-In¹⁾ · Lee, Jong-Wook²⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원사업본부 댐·유역관리처, ²⁾한국수자원공사 K-water연구원 기반시설연구소

¹⁾Dam & Watershed Maintenance Department, Water Resources Business Division, K-water, ²⁾Infrastructure Research Center, K-water Institute

/ A B S T R A C T /

Seismic intensity deduced from instrumental data has been evaluated using the empirical relationship between intensity and peak ground acceleration (PGA) during an earthquake. The Japan Meteorological Agency (JMA) developed a seismic intensity meter, which can estimate the real-time seismic intensity from seismic motions observed at a local site to evaluate the damage during the earthquake more correctly. This paper proposes a practical application of the JMA intensity to dams during the 2013 earthquake in Yeongcheon, Korea. In the present paper, seismic intensity was estimated from the relationships between accelerations observed at Yeongcheon Dam. Estimated seismic intensities were in the range of 0 to 3, which was verified from the displacements of dams and the variation of the ground water level observed at Yeongcheon dam during the earthquake. The JMA intensity, which is determined by considering the frequency, duration of cyclic loading, etc., was 0 (zero) and there was no damage to Yeoncheon dam during the earthquake.

Key words: PGA, Seismic intensity, Earthquake, Dam, Frequency, Duration of cyclic loading

1. 서론

2011년 3월 11일에 발생한 일본의 동북부 대지진(M=9.0)에 의해 세계적으로 지진에 대한 관심이 급격히 증가하였으며 지진에 의한 지반과 구조물에 많은 피해들이 보고되고 있다. 특히, 우리나라는 중국, 러시아 등을 포함하는 유라시아판의 동쪽 내륙에 위치하여 환태평양 지진대에 위치하는 주변국(일본)보다 지진으로부터 비교적 안전한 지역으로 인식되고 있으나, 최근 발생하고 있는 크고 작은 지진으로 인하여 지진 안정성에 대한 우려가 제기되고 있는 실정이다.

한편, 우리나라는 일본 한신-아와지 대지진(1995, M=7.3)이후 자연재해대책법에 지진이 자연재해로 포함되어 처음으로 지진관련 법적 조항이 마련되었고 이후, 각종 내진설계기준 등이 강화되어 중요 국가 시설물에 대해서는 지진계측이 법적으로 의무화 되고 있는 실정이다[1].

K-water에서 관리중인 댐 시설물에 대해서는 지진재해대책법의 제정

(2008.03.28)과 더불어 본격적으로 지진계의 설치 및 실시간 지진감시체계를 구축해왔다. 지진재해대책법 및 지진가속도계측기 설치 및 운영기준[2]에 의해 지진 가속도계 설치가 의무화된 곳은 Table 1과 같이 내진 특등급(S) 및 1등급(I) 32개 댐이 대상이 된다. 해당 댐에 대한 지진계 설치는 2011년까지 완료되었고 현재 K-water의 통합지진감시시스템(KEMS, K-water Earthquake Monitoring System)에 의해 실시간으로 지진 발생을 감시하고 있다.

본 연구에서는 지진발생 시 계측가속도를 활용한 진도에 의한 댐 시설의 안정성 평가 및 지진 전파체계 구축의 가능 여부에 대해 다루고 있다. 이를 위하여, 진도는 일본기상청(JMA, Japan Meteorological Agency) 및 Miyazai et al.(1999)에 의해 제안된 경험식을 이용하여, 계측된 가속도로 부터 계산되었다. 본 연구에서 이용된 경험식은 계측 가속도뿐만 아니라 지진 규모, 주파수, 지진 지속시간 등을 고려하도록 되어 있기 때문에 지진 지반운동 특성을 보다 상세하게 반영할 수 있는 장점이 있다[3].

*Corresponding author: Kang, Gi-Chun

E-mail: gichunkang@kwater.or.kr

(Received 12 March 2014; Revised 5 August 2014; Accepted 12 September 2014)

Table 1. Classification of K-water's Dam by seismic grade[2]

Type	Name	Height (m)	Storage Capacity ($\times 10^3 m^3$)	Seismic grade
Security	Peace Dam	125.0	2,630,000	S
	Soyang	123.0	2,900,000	S
Multipurpose dam	hwengsung	48.5	86,900	S
	Andong	83.0	1,248,000	S
	Choongju	97.5	2,750,000	S
	Imha	73.0	595,000	S
	Daecheong	72.0	1,490,000	S
	Buan	50.0	50,300	S
	Yongdam	70.0	815,000	S
	Hapcheon	96.0	790,000	S
	Miryang	89.0	73,600	S
	Seomjingang	64.0	466,000	S
	Namgang	34.0	309,200	S
	Jangheung	53.0	191,000	S
	Juam	58.0	457,000	S
	Boryung	50.0	116,900	S
	Water supply dam	Unmun	55.0	135,000
Gwangdong		39.5	11,000	I
Dalbang		53.5	7,700	I
Yeongcheon		42.0	96,000	I
Sayeon		46.0	25,000	I
Daeam		27.0	9,500	I
Angye		32.5	17,700	I
Yeoncho		24.5	5,000	I
Gucheon		50.0	10,000	I
Suo		67.0	28,000	I
Seonam		22.0	2,000	I
Daegok		52.0	28,500	I
Gampo		35.0	2,400	I
Pyeongim		37.3	8,500	I

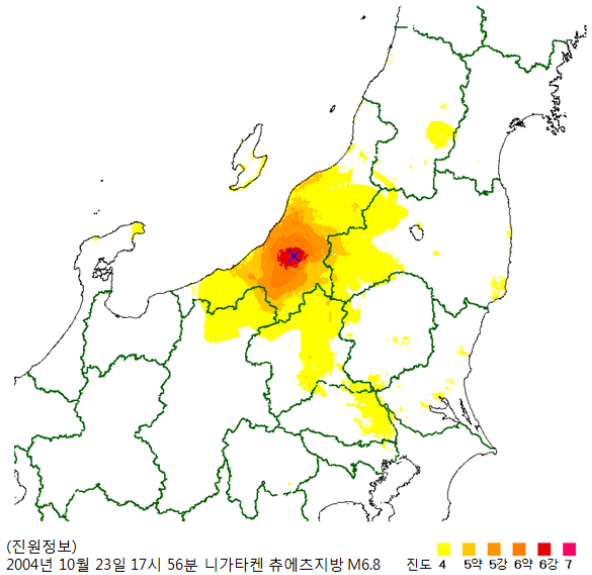


Fig. 1. Distribution of seismic intensity during 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake

도를 대표할 수 있는 진도에 의한 지진대응 체계가 수행되어 진다고 볼 수 있다.

2.2 국내 댐시설물의 지진대응 체계

K-water에서는 기상청에서 통보된 지진이 Fig. 2에 나타난 바와 같이 한반도 (동경 124°~131°, 북위 33°~39°)에서 규모 4.0이상의 지진이 발생하면 「지진재난」 위기대응 표준매뉴얼에 의거 작성된 K-water의 「지진」 위기대응 실무매뉴얼에 따라 3시간 이내 K-water 관리중인 전 댐에 대한 현장 긴급점검 및 6시간 이내 현장 확인점검을 수행하고 국토교통부에 그 상황을 보고하도록 되어 있다. 2013년에는 4월 21일, 5월 18일, 9월 11일에 각각 규모 4.9, 4.9, 4.0의 지진이 발생하여 K-water내 전사적으로 지진 위기대응을 수행하였다. 예를 들어, 2013년 9월 11일에 발생한 지진은 전남 신안군 가거도 남남동쪽 60 km의 해역에서 발생하였으며, Fig. 3에 나타난바와 같이 진앙지로부터 상당히 떨어져 있는 평화의댐(562.4 km), 달방댐(549.0 km), 소양강댐(534.4 km), 광동댐(529.8 km), 군남댐(526.2 km)에서는 지진이 미감지되었음에도 불구하고 현장 긴급점검(3시간 이내) 및 확인점검(6시간 이내)을 수행하는 등의 불필요한 인력, 시간낭비가 발생하고 있는 실정이다.

2. 댐시설물의 지진대응 체계

2.1 일본의 지진대응 체계

일본은 세계적으로 지진발생 빈도가 가장 높은 국가로써 지진에 대한 대응 및 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일본에서의 댐 시설물에 대한 지진대응에 대해서 요약하면 다음과 같다. 우선, 지진이 발생하면 일본 기상청의 지진통보가 속보에 의해 전국에 전파된다. 이때, 지진의 진원지에 대한 규모(M)뿐만 아니라 일본 열도 전체를 진도로 통보한다. Fig. 1은 2004년 니가타켄츄에츠 지진(2004.10.23., 규모6.8) 발생시 일본 기상청에서 통보한 진도정보로써, 진도 4.0 이상이 계속된 지역의 댐 시설물에 대해서는 현장 점검을 실시하고 일본 교통성에 보고하는 체계로 되어 있다[4]. Fig. 1과 같이 진원지에서의 규모는 지진에 대한 절대적인 에너지를 나타내는 값이기 때문에 특정 지역의 피해를 대표할 수 없으며, 각 지역에 대한 지진 피해 정

3. 계속진도 산정

3.1 일본 기상청 계속진도 산정법

진도는 지진동에 대한 인체의 느낌, 구조물의 응답 및 지반의 피해 등을 기준으로 하여 설정한 척도이다. 국내에는 1931년에 제정된 북미지역에서 일반적으로 이용되고 있는 MMI(Modified Mercalli Intensity)진도가 사용되고 있다. 일본 기상청 진도(JMA Intensity)는 1949년에 일본 기상청

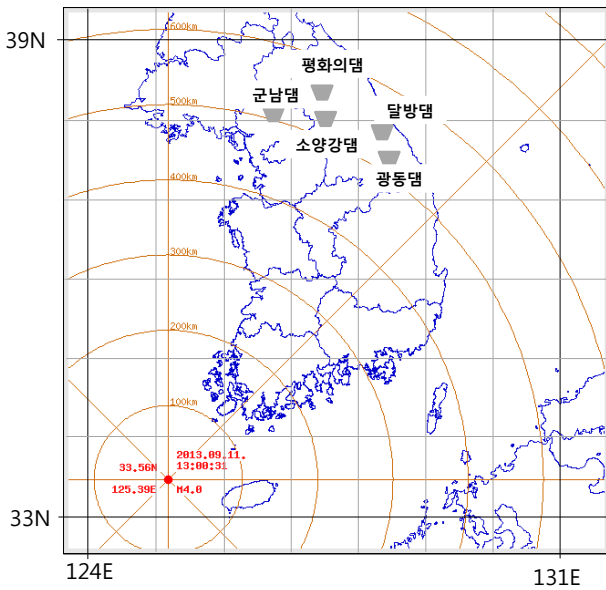


Fig. 2. The example of KMA's earthquake notice (An earthquake event on 11 September 2013 in Korea)

에 의해 도입된 진도로서 종래에는 주로 사람이 느끼는 감각이나 피해를 종합하여 진도를 결정하였다. 그러나 1990년대 초반의 JMA는 사람이 느끼는 판단이 아니라 기계에 의한 계측진도(Instrumental)를 도입하기 시작하였다. 표2는 JMA에서 사용하는 진도계급과 계측진도와의 관계를 나타내고 있고 10등급으로 나누어져 있다.

한편 1995년 1월 17일 일본 한신-아와지 대지진시 고베시 나가야마에서의 최대가속도는 818gal, 진도는 6이 기록된바 있다. 이 지진은 진도에 비해 최대지반 가속도값이 크게 계측되었으며, 특히 아주 큰 피해를 발생시킨바 있다. 이를 개선하기 위해서 JMA는 1996년에 계측진도 산정방법을 수정하였고, 현재의 계측진도를 구하는 방법으로 계산하면 Table 2의 6+에 상당한다. 이러한 계측진도를 사용하여 좀 더 객관적으로 진도를 평가할 수 있게 되었으며, 다수의 관측소에서 자료를 신속히 수집하여 지진발생과 동시에 진도도(Intensity Map)를 작성하여 지진 직후 지역적으로 그 피해 정도를 통보하고 있다. 김혜림 등[5]은 국내에서의 JMA 계측진도의 실제적인 활용방안을 제시하였다. JMA 진도와 MMI 진도는 대략적으로 다음과 같은 관계를 나타낸다[6].

$$I_{MMI} = 0.5 + 1.5I_{JMA} \quad (1)$$

여기서, I_{MMI} 는 MMI 진도, I_{JMA} 는 JMA 진도 이다.

일본은 JMA 소유의 진도계는 664개소, 지방공공단체 소유는 2,917개소, 방재과학기술연구소 소유는 776개소로 지진발생시 총 4,357개소의 관측소에서 계측된 진도를 취합하여 국가적인 차원에서 진도도(Intensity Map)를 통보하고 있다. 일본 지진관측소에서 계측하고 있는 진도는 PGA(Peak Ground Acceleration) 뿐만 아니라 지진파의 주파수(Hz) 및 지속시간 등을 고려하고 있으며 다음과 같은 절차로 산정하고 있다[8].

Table 2. JMA seismic intensity scale [7]

Scale	Measured Intensity	Remarks
0	under 0.5	Imperceptible to people
1	0.5~1.5	Felt by only keen person
2	1.5~2.5	Felt by many people in the building. Some sleeping people awake
3	2.5~3.5	Felt by most people in the building. Some people are frightened
4	3.5~4.5	Many people are frightened. Some people try to escape from a danger. Most sleeping people awake
5-	4.5~5.0	Most people try to escape from a danger. Some people find it difficult to move
5+	5.0~5.5	In many cases, unreinforced concrete-block walls collapse and tombstones overturn. Many automobiles stop due to difficulty to drive. Occasionally, poorly installed vending machines fall
6-	5.5~6.0	In some buildings, wall tiles and windowpanes are damaged and fall.
6+	6.0~6.5	In many buildings, wall tiles and windowpanes are damaged and fall. Most unreinforced concrete-block walls collapse.
7	more than 6.5	In most buildings, wall tiles and windowpanes are damaged fall. In some cases, reinforced concrete-block walls collapse.

- ① 관측소에서 계측된 가속도 3성분(x, y, z)의 기록을 Fourier 변환.
- ② 3개의 필터의 곱으로 구성된 다음 식과 같은 대역통과 필터 $F(f)$ 를 Fourier 변환된 3성분 스펙트럼 진폭에 각각 곱하여 보정(Fig. 3(a)).

$$F(f) = F_1(f)F_2(f)F_3(f) \quad (2)$$

여기서,

$$\text{Period-effect Filter: } F_1(f) = (1/f)^{1/2}$$

High-cut Filter:

$$F_2(f) = (1 + 0.694x^2 + 0.24x^4 + 0.0557x^6 + 0.009664x^8 + 0.00134x^{10} + 0.000155x^{12})^{-1/2} \quad (x = f/f_c)$$

$$\text{Low-cut Filter: } F_3(f) = ((1 - \exp(-f/f_0))^3)^{1/2} \\ f_0 = 0.5\text{Hz}, f_c = 10\text{Hz}$$

- ③ 3성분의 스펙트럼을 Fourier 역변환하여 다시 가속도 기록으로 변환
- ④ 3성분을 vector로 합성하여 하나의 성분으로 표시.
- ⑤ 합성된 가속도 기록의 진폭(절대치)이 특정 값 a_0 보다 큰 값을 갖는 시간의 합이 0.3초, 즉 지속시간이 0.3초가 되는 진폭 a_0 를 결정한다 (Fig. 3(b)).
- ⑥ 결정된 진폭 a_0 를 적용하여 다음 식으로부터 JMA 진도 I_{JMA} 를 결정한다.

$$I_{JMA} = 2\log a_0 + 0.94 \quad (3)$$

Fig. 3(a)는 ②의 방법으로 산정된 필터에 따른 보정계수를 도식한 것이다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 구조물의 피해에 민감한 주파수영역인 0.5 Hz ~ 10 Hz의 범위를 강조하고 있다.

Shabestari et al.[9]은 미국 서부지역에서 관측된 강진동에 대한 JMA 계측진도의 진폭 a_0 와 조사된 MMI 진도와의 관계에 대하여 다음과 같은 경험식을 유도하였다.

$$MMI = 3.931 \log a_0 - 1.17 \quad (4)$$

Fig. 4는 균일한 진동이 몇 초간 지속되었을 때의 주기, 가속도, 진도와의 관계를 나타내고 있다[8]. 실제 지진파는 다양한 주기의 파가 포함되어 있기 때문에 JMA 진도 7에 대한 가속도가 몇 gal에 상당하는지 정량적으로 평가할 수는 없지만, 주기 1초의 파가 같은 진폭으로 몇 초간 지속되었다면, JMA 진도 7의 하한에 상당하는 계측 진도 6.5이상(Table 2참조)이 되기 위해서는 3성분의 합성치로 약 500 gal이상의 가속도가 필요한 것으로 간주된다.

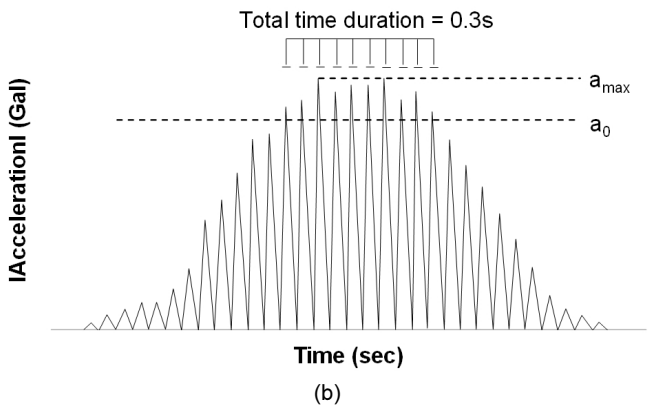
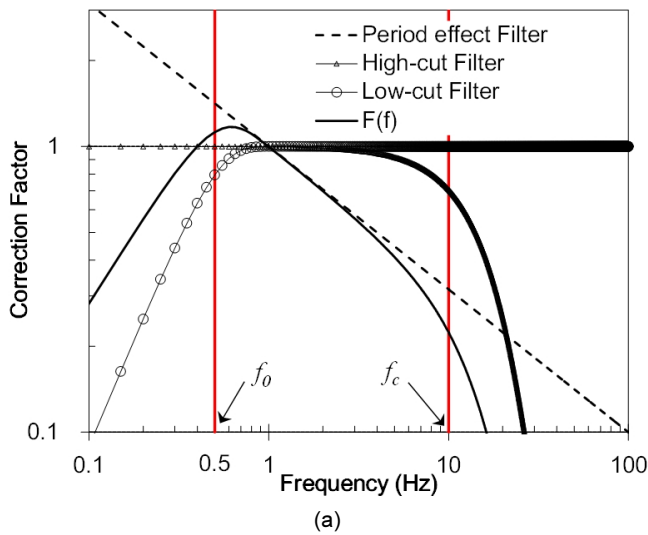


Fig. 3. Characteristic of filters for calculating JMA intensity; (a) applying a band pass filter in the frequency domain and (b) summing the time segments exceeding a reference PGA value of acceleration records [8]

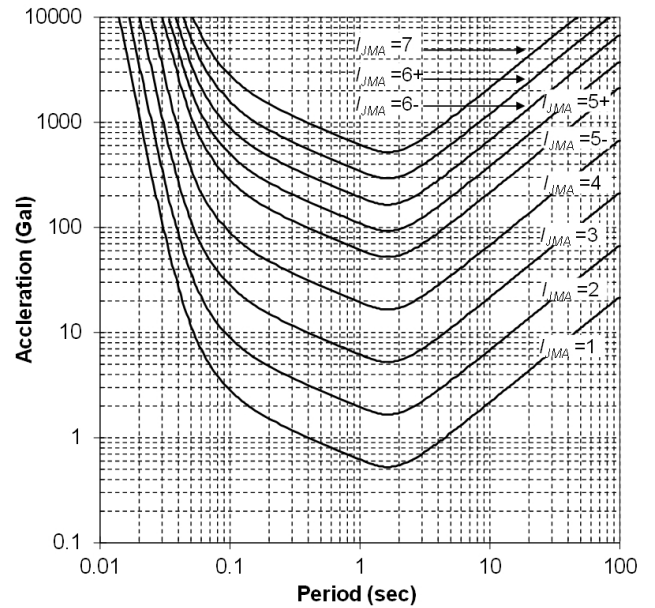


Fig. 4. Relationship among period, acceleration, and JMA intensity

3.2 경험식에 의한 계측진도 산정법

지역의 지진방재 경감을 목적으로 피해예측 또는 실제 토목·건축분야에 서의 내진설계에 있어서 지진동 강도로서 최대가속도, 최대속도, 또는 응답 스펙트럼 등의 물리량이 일반적으로 널리 이용되고 있다. 또 다른 방법으로는 지진동 강도 분포 또는 지진피해의 설명과 이해를 위해 진도가 유효하다. 이러한 목적을 위해 Kawasumi[11], Midorikawa and Hukuoka[12], Tong et al.[13], Muramatsu[14]등 다수의 연구자에 의해 최대가속도 및 최대속도와 진도와의 관계식이 제안되었다.

$$I = 2 \log A + 0.7 \quad [10] \quad (5)$$

$$I = \{ \log A + 0.27 \} / 0.54 \quad [12] \quad (6)$$

$$I_k = 1.89 \log A + 0.59 \quad [13] \quad (7)$$

또는,

$$I = 2 \log V + 2.8 \quad [14] \quad (8)$$

$$I = \{ \log V + 1.14 \} / 0.49 \quad [12] \quad (9)$$

$$I_k = 2.01 \log V + 2.30 \quad [13] \quad (10)$$

여기서, I =총래의 기상청 진도, A =최대가속도(gal), V =최대속도(kine)이다. 또한 Tong et al.[13]의 경험식은 기계에 의한 계측진도(I_k)를 대상으로 산정되었고 모든 경험식이 $I = a \log(A \text{ 또는 } V) + b$ 의 형식으로 이루어진 경험식이다. 이 경험식들은 지진 규모 6~7.9 정도의 대규모지진의 지진파로부터 산정되었다.

한편, Miyazaki et al.[3]에 의해 제안된 경험식은 다음과 같으며, 159개의 지진(규모=3.2~6.6, 일본기상청 발표), 3167개의 기록파형($I_k=0.0 \sim 5.9$)으로부터 산출되었다.

$$I_k = (0.11M + 1.22)\log A + 0.28M - 1.30 \quad (11)$$

여기서, I_k =계측진도, M =기상청통보 지진규모이며, 종래의 경험식과 비교하여 지진규모가 고려되어 좀 더 현실적인 경험식이라고 할 수 있다.

4. 계측가속도-진도 관계

본 연구에서는 K-water 관리중인 32개 댐에서 실제 계측된 지진데이터를 활용하여 JMA진도를 산정하였다. K-water 통합지진감시시스템(KEMS)의 구축(2013년 5월말) 및 지진 발생위치(내륙 및 해역), 주변 댐과의 거리, 지진규모를 고려하여 2013년 12월 13일 11:40:10 경북 영천시 북북동쪽 17 km지점(기상청 통보) 발생한 규모 2.5의 지진을 대상으로 선정하였고, 진앙지로부터 가장 가까운 영천댐(4.7 km)에서 계측된 가속도로부터 진도를 산정하였다. 영천댐의 제원은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

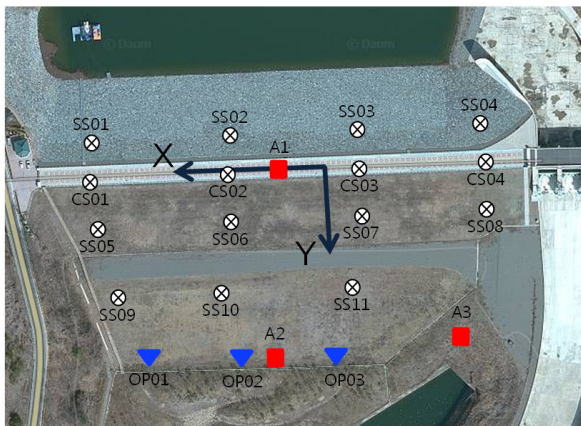
4.1 계측 가속도

영천댐은 Fig. 5에서처럼 가속도계는 댐 정상(A1), 댐 하류(A2), 댐하류의 왼쪽(A3)에 설치되어있다. 지진 발생시 K-water 통합지진감시시스템 KEMS에 의해 전체 댐에 대한 지진가속도를 취합 분석하여 피해여부를 판단하고 있다. 그림에 나타내듯이 댐에 설치되는 가속도계의 방향은 댐

Table 3. Characteristics of Yeoncheon Dam

Dam type	Earth Core Rock Fill Dam
Hight(H, m)	42
Length(L, m)	300
Storage capacity(V, 10 ³ m ³)	96,400
Expected natural frequency(f, Hz)*	3.7~6.8

*It was calculated by Okamoto [15], $f=100/(0.35\sim 0.65)H$



- Accelerometer
- ⊗ Displacement Transducer
- ▼ Ground water level

Fig. 5. Measurement plan view of Yeongcheon Dam

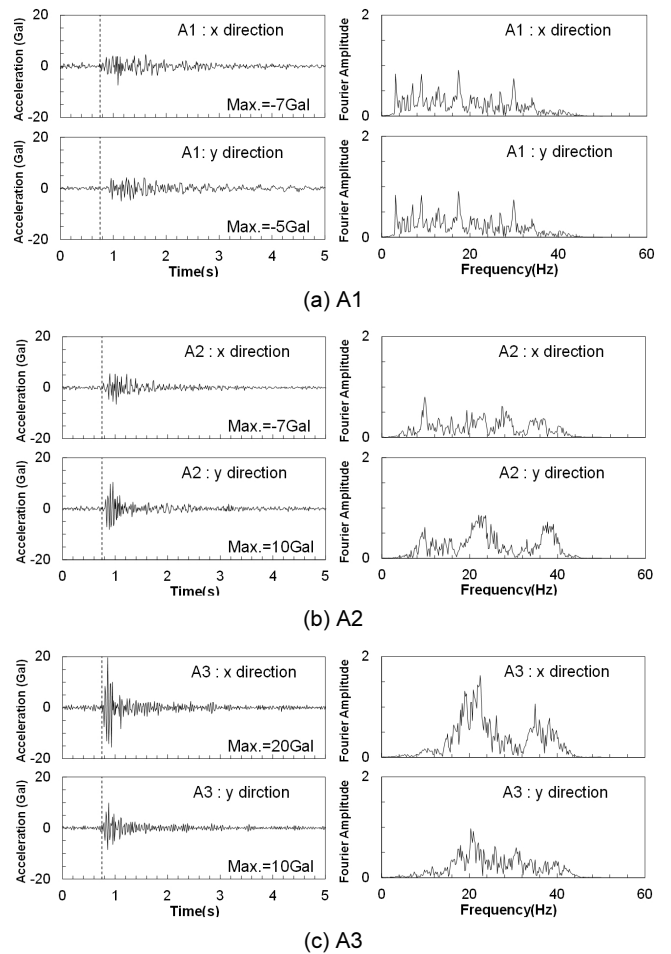


Fig. 6. Measured accelerations at the top of Yeongcheon Dam

상 하류(y방향), 댐 축(x방향), 그리고 수직(z방향)으로 분류된다.

Fig. 6은 영천댐에서 계측된 지진가속도를 나타내고 있으며 수평성분에 대해서만 도시하였다. 대상 지진은 3초 이상 지속되었고 실제 계측된 최대 가속도는 A3의 X방향에서 발생하였으며, 약 20 gal을 기록하였다. 이는 A3가 댐하류에 위치하고 있으며 그 하류 왼쪽 편에는 터널식 여수로가 존재하며, 이 터널의 영향으로 계측 가속도가 증가하였을 가능성이 있다. 댐 하부와 상부는 비슷한 양상을 기록하였으며 그 최대값은 5~7gal 정도이다. Fig. 6의 왼쪽 편은 FFT(Fast Fourier Transform)에 의해 변환된 주파수영역을 나타내고 있다. A3에서는 25 Hz 정도에서 탁월 진동수가 보이며 A2 및 A1에서는 4~30 Hz까지 진동수 범위가 상대적으로 넓은 것을 알 수 있다. Okamoto[15]에 의해 제안된 경험식으로부터 산정된 영천댐의 고유진동수는 3.7~6.8 Hz 범위(Table 3 참조)였으며 해당 지진에서는 고유진동수에 의한 가속도의 증폭현상은 발견되지 않았다.

4.2 계측 진도

영천댐에서의 JMA진도를 계산하기 위 A1~A3에서 계측된 가속도를 사용하였으며, Table 4에서는 일본 기상청에 의한 방법 및 Kawasumi[11], Midorikawa and Hukuoka[12], Tong et al.[13], Miyazaki et al.[3]에 의해 제안된 방법을 이용하여 진도값을 산정한 결과와 비교하였다. 또한, 최

Table 4. Calculated Seismic Intensities of Yeoncheon by JMA etc

Type	Calculated Intensity(JMA Intensity)								
	Yeoncheon dam (2013.10.11)			Chungnam Tae'an Earthquake (2014.4.1)					
	A1	A2	A3	Buan dam			Boryeong dam		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Eq. (2)	0(0)	0(0)	0(0)	1.5(2)	1.2(1)	0(0)	0.2(0)	2.0(2)	0.1(0)
Eq. (3)	2.4(2)	2.7(3)	3.3(3)	2.5(3)	1.9(2)	0.4(0)	1.4(1)	2.6(3)	0.8(1)
Eq. (4)	2.1(2)	2.4(2)	2.9(3)	2.2(2)	1.7(2)	0.2(0)	1.2(1)	2.3(2)	0.6(1)
Eq. (5)	2.2(2)	2.5(3)	3.0(3)	2.3(2)	1.8(2)	0.3(0)	1.3(1)	2.4(2)	0.7(1)
Eq. (10)	0.7(1)	0.9(1)	1.3(1)	0.8(1)	0.3(0)	0(0)	0(0)	0.8(1)	0(0)

근에 충남태안에서 발생한 규모 5.1 지진에 대해서 부안댐(232 km)와 보령댐(206 km)에서 계측된 지진계측 데이터로부터 진도값을 산정하여 함께 비교하였다. 부안댐과 보령댐에서 계측된 최대가속도는 각각 8.0 gal, 8.9 gal이었으며, 영천지진과 비교해서 지속시간이 약 100초로 지진동이 상대적으로 길지만 최대지반가속도는 작은 특성을 보였다. 표에서 나타내듯이 영천댐의 일본기상청 계측진도(I_{MM})는 0으로 산정되었다. 이는 주파수 영역 10 Hz 이상이 탁월하며, 계측된 최대가속도가 작으며, 지속시간이 3초 정도로 짧기 때문에 판단된다. 그리고 보령댐과 부안댐의 경우는 일본기상청 계측진도가 1, 2로 산정되었다. 이는 최대가속도는 상대적으로 작으나 지속시간이 길기 때문에 진도가 상향된 것으로 생각할 수 있다. 그리고 Miyazaki et al.[3]에 의해 제안된 방법은 과거의 방법에 비해 상대적으로 많은 데이터 수 및 지진규모를 고려하고 있기 때문에 상대적으로 일본기상청 진도와 근접한 결과를 나타내고 있고, 기존의 경험식에 의해 산정된 방법으로는 2~3의 진도로 계산되었다. 기존의 경험식에서는 최대지진가속도만을 고려하고 있기 때문에 상대적으로 과대평가된 경향이 나타났다. 대상 지진이 발생하였을 경우 영천댐, 부안댐, 보령댐관리단 및 현장에서는 어떠한 지진의 진동을 느끼지 못하였다는 현장의견을 반영하면, 계측진도의 결과는 비교적 객관적이라고 판단할 수 있다.

4.3 지진시 댐 거동분석

K-water 관리중인 댐에 대해서는 댐의 실시간 안전성을 관측 평가하기 위하여 댐 체의 외부변위, 침투수량(누수량, 지하수위 등)에 대해서 현장-본사간 실시간으로 연동되어 이중화 계측시스템이 구축되어 있다. 댐체 외 주변위는 토탈스테이션(광파기)에 의해 Fig. 6에 나타나있는 지점에 대해서 x,y의 변위를 계측하고 있으며, 영천댐의 경우는 하류사면에 설치된 지하수위의 변화에 대해서 댐체를 통과하는 침투수량을 평가한다. Fig. 7은 2013년 12월 1개월간 계측된 강우-저수위-지하수위의 관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 지진 발생 전후로 하여 강우는 최대 약 1mm 정도이며 저수위 및 지하수위는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 다시 말해서 지진에 의해 댐 하류의 지하수위의 영향은 없었던 것으로 판단 가능하다.

Fig. 8은 댐 정상에서의 변위로서 지점 CS01, CS02, CS03에 대한 2013년 12월의 1개월간의 변화를 나타내고 있다. 각 지점의 계측값에서 상-하 변동에 대한 차가 발생하고 있으며 이는 토탈스테이션(광파기)의 설치위치에 따른 거리 및 측각오차이다. 영천댐의 경우는 댐 우안의 사면에 설

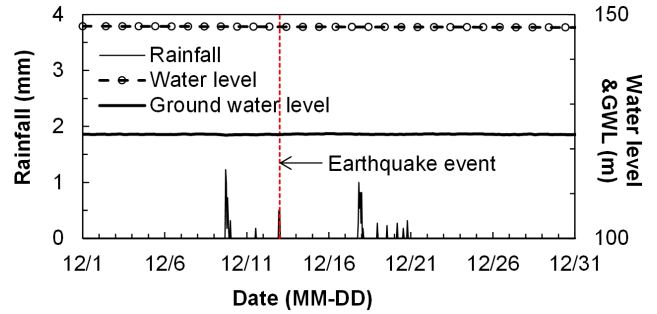


Fig. 7. Measured rainfall, water level, and ground water level at Yeongcheon Dam on December 2013

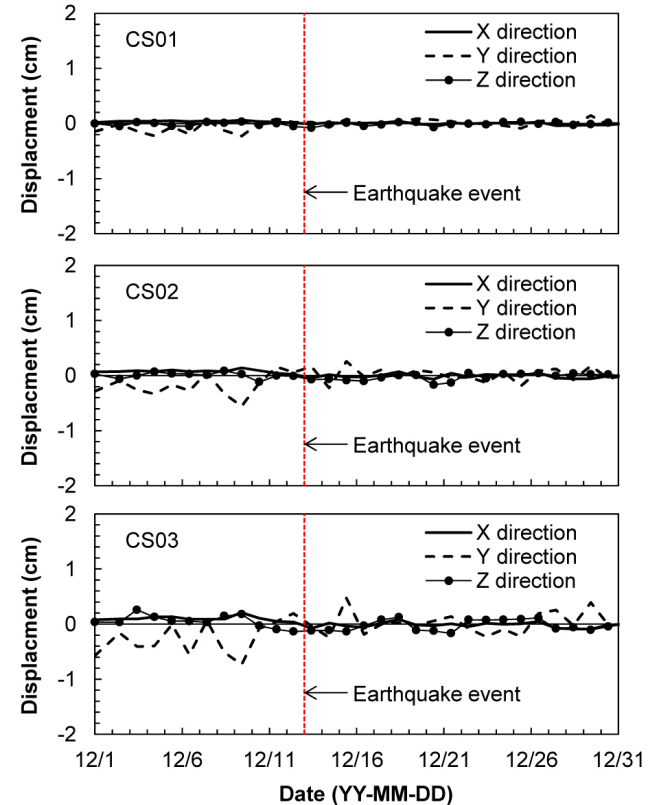


Fig. 8. Measured displacement at the top of Yeongcheon Dam on December 2013

치되어 Fig. 5에 나타난 CS01~04 및 SS01~SS11의 15개소를 측정하고 있다. 이는 토탈스테이션에서 가까운 CS01의 경우는 상대적으로 거리-측각오차가 작기 때문에 Fig. 8에 나타난 것처럼 상-하 변동폭이 작게 계측이 되었으며, 토탈스테이션에서 멀어질수록 상-하 변동폭이 증가(CS03)한 것이다. 하지만 이러한 변위의 변동폭이 실제 댐의 변위를 나타 내는 것이 아니라 계측장비(토탈스테이션)가 가지는 오차(거리 및 측각)의 폭으로 간주되기 때문에 각 지점의 경시변화로부터 큰 변위의 발생 유무를 판단하는 것이 중요하다.

Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이 지진이 발생한 시점을 전후로 하여 댐 상부의 침하(z방향), 상-하류방향의 변위(y방향) 및 댐 축(x방향)의 변위에 큰 변화는 없다. 이는 지진이 발생하여 댐체에 전달된 진동이 댐의 탄성변위뿐만 아니라 소성변위를 발생시킬 정도로 발생하지 않은 것을 의미한다.

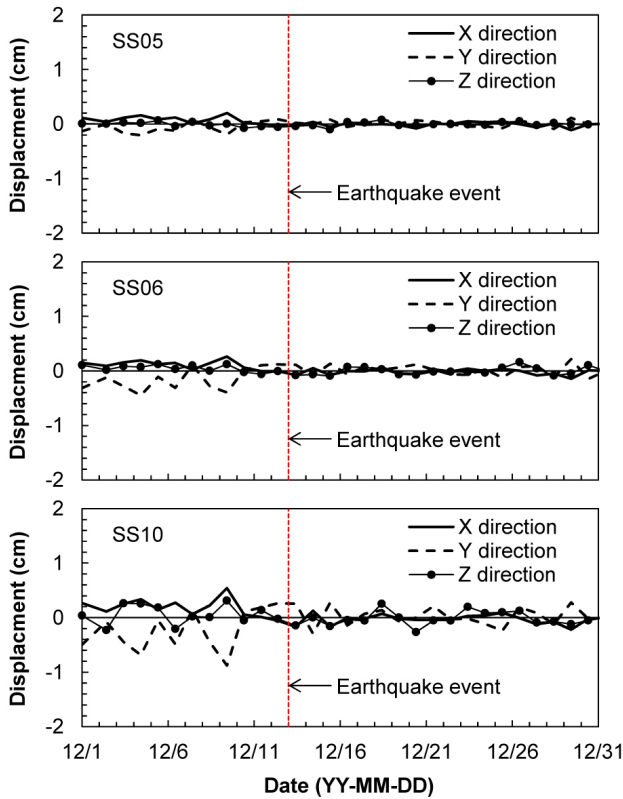


Fig. 9. Measured displacement at the slope of Yeongcheon Dam on December 2013

Fig. 9는 댐 하류사면의 SS05, SS06, SS10에서 계속된 변위를 나타내고 있다. 위에서 언급한 댐 정상에서의 계속값과 동일한 양상의 결과를 보이고 있다. 특히 토탈스테이션과 가장 가까이 근접한 SS05 및 댐의 취약면으로 간주되는 중간 단면에서의 변위는 지진 발생 전·후로 큰 변위는 발생하지 않았다. 다시 말해서 해당 지진에 따른 영천댐에는 어떠한 영향도 없었던 것으로 생각할 수 있다. 그리고 앞서 계산된 JMA진도와 실제 댐의 거동을 분석한 결과 JMA진도가 0인 것이 타당한 것으로 판단된다.

5. 결론

K-water는 기상청에서 통보하는 지진정보를 참조하여 한반도에서 규모 4.0이상의 지진이 발생하면 3시간 이내 K-water 관리중인 전 댐에 대한 현장 긴급점검 및 6시간 이내 현장 확인점검을 수행하고 국토교통부에 그 상황을 보고하도록 되어 있다. 한편, 일본의 경우는 JMA 진도 4.0이상 계속된 지역의 댐 시설물에 대해서만 현장점검을 실시하고 일본교통성에 보고하는 체계로 되어 있다. 본 연구에서는 JMA진도의 댐 시설의 안정성 평가 활용 여부를 검토하기 위해 2013년 12월 13일 11:40:10 경북 영천시 북북동쪽 17 km 지점(기상청 통보)에 발생한 규모 2.5의 지진을 대상으로 진앙지와 4.7 km 떨어진 영천댐에서 계속 가속도-진도관계로부터 JMA진도를 산정하였으며, 그 타당성에 대해서는 실제 계속된 댐의 변위와 지하수위를 검토하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 대상 지진은 약 2~3초간 지속되었고 A3의 X방향에서 최대 가속도(약

20gal)가 기록되었다. 댐 하부와 상부는 비슷한 양상을 기록하였으며 그 최대값은 5~7gal 정도이다. Okamoto[15]에 의해 제안된 경험식으로부터 산정된 영천댐의 고유진동수는 3.7~6.8 Hz 범위(표 3 참조)였으며 해당 지진에서는 고유진동수에 의한 가속도의 증폭현상은 발견되지 않았다.

- 2) 영천댐에서의 지진 진도를 계산하기 위 A1~A3에서 계속된 가속도를 사용하였고 일본 기상청 진도 산정법 및 Kawasumi[11], Midorikawa and Hukuoka[12], Tong et al.[13], Miyazaki et al.[3]에 의해 제안된 방법을 이용하여 산정·비교하였다. 일본기상청의 계속진도는 0으로 산정되었고 기존의 경험식에 의해 산정된 방법으로는 1~3의 진도로 계산되었다. 기존의 경험식에서는 지진의 지속시간, 주파수 영역 등을 고려하지 못하였기 때문에 과대평과된 경향이 나타났다.
- 3) 2013년 12월에 영천댐에서 계속된 강우-저수위-지하수위의 관계에서 지진 발생 전·후로 하여 저수위 및 지하수위는 거의 일정하며, 이는 지진에 의해 댐 하류의 지하수위의 영향은 없었던 것으로 판단된다. 또한 토탈스테이션에 의한 댐 정상 및 하류사면의 변위를 분석한 결과 지진 발생 전·후로 하여 댐 상부의 침하(z방향), 상·하류방향의 변위(y방향) 및 댐 축의 변위(x방향)에 큰 변화는 없다. 따라서 해당 지진에 따른 영천댐에는 어떠한 영향도 없었던 것으로 간주된다.

본 연구에서 수행한 현장 계속결과로부터 일본 기상청에서 산정되는 JMA진도가 가장 타당한 것으로 나타났다. 즉, JMA진도는 0으로 산정되어 댐 시설의 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

하지만 K-water 관리 중에 댐에 대한 통합지진감시시스템은 2013년 5월말에 구축이 되어 실제 계속된 지진데이터가 부족하고 한반도에서는 4.0 이상의 규모의 지진은 빈번하게 발생하지 않기 때문에 본 연구에서는 JMA진도의 국내 이용의 가능 여부에 대한 검토만 하였으며, 이후 많은 지진데이터가 수집이 되면 그 타당성에 대한 더 많은 선행 연구 및 그 결과에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 생각된다. 또한 지진발생시 JMA진도 등의 통보에 따라 행해지는 위기대응체계에 대한 제도 개선이 필요하며, 이와 더불어 국가적인 차원에서의 지역적인 지진정보방안을 모색하여 공공기관 및 일반시민 등에게 정확한 지진정보를 전달해야 할 것으로 생각된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 K-water 관리중 댐의 안전총괄 담당인 댐·유역관리처 댐안전팀의 지원으로 작성되었으며, 본 논문이 완성되기까지 여러 가지 조언을 주신 김영목 차장님과 댐안전팀원들께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

/ REFERENCES /

1. National Emergency Management Agency, Korean Earthquake Damage Prevention Law.
2. National Emergency Management Agency, Guideline for earthquake acceleration measuring instrument.
3. Miyazaki M, Shirinashihama S, Akiyoshi T, A study on the relation between the measured seismic intensity and peak ground acceleration

- and velocity, Proceedings of the 25th conference on JSCE, 1999 July; 2(3):53-56.
4. Water Resources Environment Center, Management of Dam, Sankaito Publication; c2006, 407 p.
 5. Kim HL, Kim SK, Choi KR, Application of the JMA instrumental intensity in Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 2010; 14(2):49-56
 6. Doh DH, Ko JM, Earthquake Engineering, Hyosungmedia; 1992: 51-52
 7. Kashima, T. Available from: http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/soa_2000/soa.htm
 8. Karim KR, Yamazaki F, Corelation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters, EESD, 2002 Apr;31(5): 1191-1212.
 9. Shabestari KT, Yamazaki F, A proposal of instumental seismic intensity scale compatible with MMI evalated from three-com-ponent acceleration records, Earthquake Spectra, 2001;17:711-723.
 10. Japan Meteorological Agency, Available from: <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>
 11. Kawasumi H, Relationship between seismic intensity and scale, JSCE, 1943;15:6-12.
 12. Midorikawa S, Hukuoka T. Correlation of Japan meteorological agency intensity scale with physical parameters of earthquake ground motion, JSSJ, 1988 Jun; 41(2):223-233.
 13. Tong H, Yamazaki H, Shimizu Y, Sasaki H, Correspondent relation-ship of measured seismic intensity and conventional earthquake vibration intensity index, Proceedings of the 51th conference of JSCE, 1988 Sep;I-B229:458-459.
 14. Muramatsu I, Seismic risk, JSSJ, 1967; 20(2):281-290.
 15. Okamoto S, Introduction to earthquak engineering, 2nd ed, University of Tokyo press; c1984, p.466-477.