

ICT 기반 지진가속도계측기 활용을 통한 콘크리트 댐의 긴급 지진안전성 평가 기술



최근 한반도 지진 발생 회수, 규모 증대 및 전과 다른 내륙에서 발생 등, 외적으로는 지진 하중의 위험성이 증가하고 있으며, 이와 더불어, 국내 사회기반시설물의 노후화에 따른 내적인 취약성 역시 가중되고 있다.

그러나, 이러한 지진 발생 시 긴급 대처와 유연한 대책 마련을 위한 과학적이고 합리적인 안전성 평가 기술은 시설물 자체 손상을 넘어 붕괴 시 많은 2차 피해를 야기할 수 있는 대표적인 사회기반시설인 댐 및 저수지에 있어 매우 미진한 상태이다. 또한, 중요시설물의 관리 주체는 시설물별 가속도 관측을 수행하고 있으나, 설치된 장비의 성능 및 비용을 고려 시 상대적 활용도가 매우 낮은 실정으로, 이러한 활용도를 제고하는 기술개발이 요구되는 상황이다.

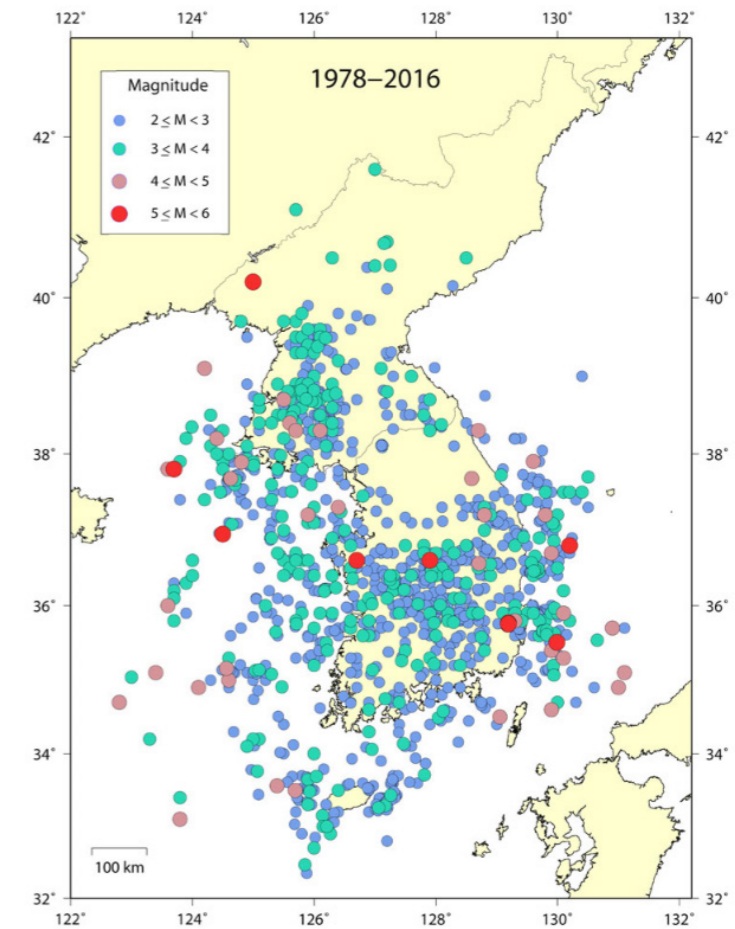
따라서, 지진하중과 시설노후화를 능동적으로 고려하고 지진 시, 긴급 대책 마련과 효율적 회복성을 마련하여 인적 물적 피해 최소화를 유도할 수 있는 ICT기반 지진가속도계를 활용한 긴급 안전성평가기술 마련이 시급하다.

현재 선행 시행된 공공건축물의 안전성평가기술과 더불어, 대표적 사회기반시설인 댐 및 저수지 관한 지진가속도계를 활용한 긴급안전성평가 기술을 개발하여 국내 지진재해 대응체계를 보완, 지진재난 대응능력을 강화하여 국민의 안전을 확보하고, 기반시설의 운영 중단에 따른 경제적 손실의 최소화를 위한 노력이 필요하다.

지진 발생 횟수는 매년 증가추세를 나타내고 있으며, 2016년 경주지진 발생 시점을 기준으로 큰 폭으로 지진 발생 횟수가 증가하였다. 지진 발생 규모면에서도 규모 4.0이상의 지진이 국내 전 지역에 걸쳐 발생하고 있다(그림 1).

이에 국민생활과 안전에 밀접한 관계가 있는 국가 주요시설물의 관리주체는 지진에 대

그림 1. 진앙분포도 (1978년~2016년)



비하여 안전성을 확보함으로써 지진에 대한 피해를 최소화해야 한다. 이를 위해 국내에서도 일본 고베지진 이후 내진설계기준(건설교통부, 1997) 및 댐설계기준(국토해양부, 2001)을 통해 내진특등급 구조물에 대한 지진계 설치 및 운영을 의무화하고 있다.

이론적인 내진설계 도입은 불과 100년 전이며, 내진설계개념이 최초로 도입된 구조물은 댐(저수지)이었다. 1923년, 1925년, 일본의 Mononobe 박사, Okabe 박사에 의해 지진 계수가 도입된 이래로 국내 내진설계기준 역시 1993년 제정되었으며, 2001년, 2005년, 2011년 3회에 걸쳐 개정되었다.

1979년에 댐 내진설계 개념이 최초로 도입되었고, 1997년 12월에는 건설교통부의 연구과제였던 내진설계기준 연구(II)를 통해 상위기준이 도입되었다. 2004년 5월에는 건설교통부와 한국시설안전공단이 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령을 제정하였고, 2008년 3월에는 지진재해대책법을 제정하였다. 2013년에는 2004년에 제정된 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령에 대한 개정 심의를 진행하였고, 2016년 1월 25일 지진 · 화

1. 국내 댐 및 저수지의 내진설계

산재해대책법이 개정 시행되었다.

국내 내진 설계기준의 기본개념은 댐에 미소한 변형과 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나 지진이 발생되더라도 통제 불가능한 저수의 유출이 없어야 하며, 댐의 저수기능이 유지되어 용수공급에 지장이 없어야 한다. 또한, 어떤 경우에도 댐이 붕괴되지 않도록 댐체의 활동이나 전도의 방지를 위한 충분한 안전율의 확보되어야 한다. 이 기준에 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

국내 내진설계기준 및 지침서는 댐 설계기준(국토해양부, 2011) 내진설계편에 필댐, 콘크리트댐, 아치댐에 대한 내진설계방법이 제시되었다. 콘크리트댐의 경우 활동과 전도에 대한 안전성을 평가하므로 전단마찰 안전율이 최소안전율 이상이고 체내 응력이 허용응력 이내에 존재해야 한다.

댐 설계기준(국토해양부, 2011)의 내진설계편에 따르면 내진 특등급 댐의 경우 지진 응답 계측기를 반드시 설치해야한다. 내진 1등급 댐에 대해서는 유지관리 및 내진설계를 위한 자료 확보를 위해 지진계를 설치하고 운영할 수 있는 것으로 제시되어 있다.

댐 저수지 지진가속도 계측과 관련된 기준은 「지진·화산재해대책법」, 시행령, 시행규칙 (2019.03.14), 「지진가속도계측기 설치 및 운영기준」(2018.11.08.)이 있다. 「지진·화산재해대책법」제6조 제1항 따라 지진으로 인한 피해가 우려되는 주요 시설물을 설치하거나 관리하는 자는 그 시설물의 지진가속도계측을 하여야 하며 제2항에 따라 지진가속도계측을 할 대상 시설과 규모 등에 대한 기준은 제14조에 따라 내진설계기준이 정하여진 시설 중 대통령령으로 정하였다. 설치 대상 댐 및 저수지는 「지진가속도계측기 설치 및 운영기준」제3장에 제1항에 명시한 「댐설계기준」 내진설계편에 따른 내진특 1등급의 댐과 「농업생산기반정비사업계획설계기준」에 따른 내진특등급의 댐을 말하며, 총 저수용량 500만톤 이상의 저수지를 말한다.

지진계는 댐의 동적거동에 대한 정보를 획득하기 위해 설치하며, 기초암반, 양안 암반, 댐체 내부, 중간 표고부 또는 댐 경사면에 배치하여 지진 응답가속도를 측정한다. 표준 조합은 3개소로 구성되나 정밀한 분석을 위해서는 5개소로 하는 것이 권장된다. 또한 지진계의 측정값은 진동규격 Kine(cm/s)로 변환이 가능하도록 계획해야 한다.

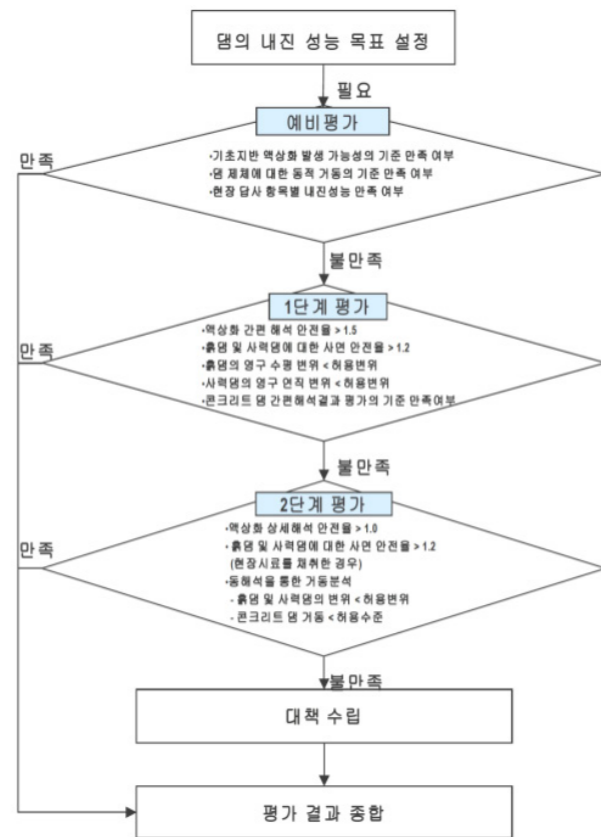
지진가속도계측기는 「지진가속도계측기 설치 및 운영기준」(2018, 행정안전부)에 의거 「국가표준기본법」 제23조 및 같은 법 시행령 제16조에 따라 설립된 한국인정기구의 공인기관에서 발행한 성적서를 첨부하여야 하며, 동일한 제조사의 동일한 모델의 경우 성적서를 1회만 첨부할 수 있다. 또한 지진가속도계측기의 유지관리시 관리주체는 2년에 1회 이상 공인된 검·교정 기관에서 지진가속도계를 검·교정 받아야 한다. 검·교정 결과 제 38조의 표준규격을 만족시키지 못할 경우 교체하여야 한다.

지진가속도계측기는 지진가속도계, 기록계, 통신기기 및 부대시설로 구성된다. 시설물에 설치되는 지진가속도계는 그 시설물의 지진거동특성을 효율적으로 계측할 수 있도록 시설물의 고유주기와 최대 계측 허용범위를 고려해야 한다. 기록계는 지진가속도계에서 획득한 계측자료를 모두 디지털 신호로 변환할 수 있는 성능을 가져야 한다. 계측된 데이터는 댐지진감시시스템(DEMS)에 그 데이터를 제공할 수 있도록 구성되어야 한다. 통신기기는 지진가속도 계측자료를 동시에 다중 전송할 수 있어야 하며, 기록계가 통신기능을 보유한 복합형이거나 통신기기 단독으로 통신기능을 보유해야 한다. 그 외 지진가속도계측기 운영에 필요한 전원공급장치나 낙뢰보호장치 등으로 구성된다.

일반적인 댐에는 그림 3 같은 순서대로 자유장 지진가속도계를 포함하여 지진가속도계를 3개소 이상 설치해야 하고, 저수지는 자유장 지진가속도계를 포함하여 3개소에 설치한다.

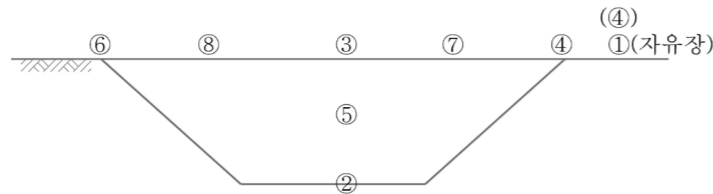
2. 지진가속도 계측 관련 기준

그림 2. 댐의 내진성능 평가 흐름도 (한국시설안전공단, 2004)



기존 댐의 내진성능평가요령(한국시설안전기술공단, 2004)에 콘크리트댐에 대한 예비평가와 2단계 상세평가법이 제시되었다. 콘크리트댐의 상세평가는 댐체의 전단력 안전율, 합력 작용점, 허용 압축응력 및 허용 인장응력을 구하여 내진성능을 평가하고 콘크리트댐의 내진성능을 향상하기 위한 가이드라인이 제시되고 있다 (그림 2).

그림 3. 일반적인 댐 및 저수지인 경우 지진가속도계 설치위치





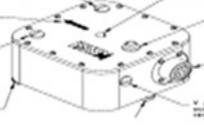



댐 및 저수지의 각 위치에 설치되는 지진가속도계측센서 성분은 다음과 같다.

- 1) 자유장 : 3성분(연직 1성분, 수평 2성분)
- 2) 댐 기초부 : 3성분(연직 1성분, 수평 2성분)
- 3) 댐 마루 중앙 : 2성분(수평 2성분)
- 4) 좌측 또는 우측 측벽 : 3성분(연직 1성분, 수평 2성분), 자유장이 댐 가까이 설치되어 있을 경우 자유장 지진가속도계로 대체 가능
- 5) 댐체 중간(댐 높이의 60~70%) 지점 : 1성분(댐축에 수직인 수평성분)
- 6) 댐의 좌안 또는 우안에 설치되지 않은 나머지 위치 : 2성분(수평 2성분)
- 7) 벽체로부터 댐 마루 길이의 1/3되는 지점 : 1성분(댐축에 수직인 수평성분)
- 8) 제6호의 반대편 벽체로부터 댐 마루 길이의 1/4되는 지점 : 1성분(댐축에 수직인 수평성분)

국내·외에서 활용되는 지진가속도계 센서와 기록계는 그림 4 와 같은 3가지 통신방식 (TCP-IP Ethernet, TCP-IP SerialToEthernet 그리고 Dial-up Modem)으로 분류할 수 있다.

3. 계측기반 긴급 지진안전성 평가 시스템

그림 4. 지진가속도계 센서와 기록계

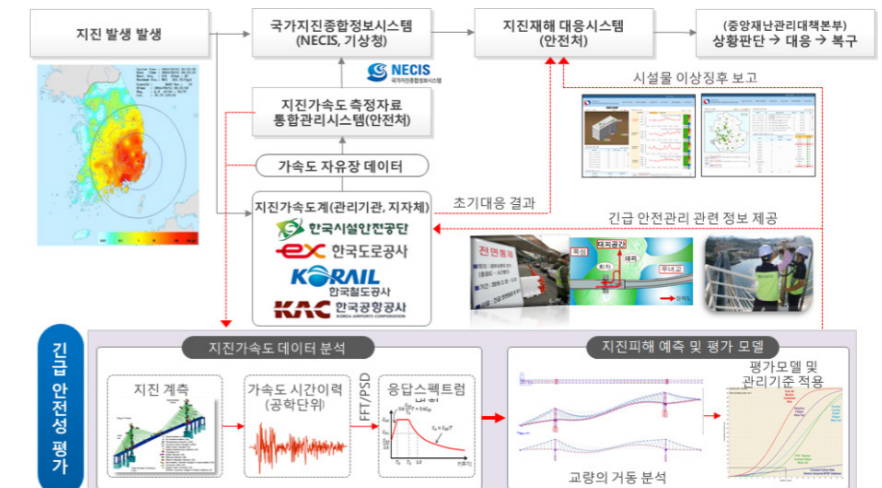
가속도계	 <ES-T>	 <AC-23>	 <ES-T, FBA-23>
기록계	 <CMG-DM24, DCM>	 <GNC-CR24>	 <K2>
통신방식	TCP-IP(Ethernet) 1:N 통신	TCP-IP(SerialToEthernet) 1:1 통신	Dial-up Modem

지진발생 시, 시설물의 거동을 분석하여 안전성 및 피해발생 유·무를 신속하고 정확하게 파악하여 객관적인 평가지표 및 기준에 맞춰 해당 관리기관의 담당자가 긴급점검의 실시 유·무 등의 의사결정을 지원할 수 있는 긴급 안전성 평가 프로그램을 개발하는 기술이다. 지진발생 시 계측된 지진가속도 정보로부터 실제 시설물의 주요 위치에 대한 응답을 시설물 전체에 대한 응답으로 신속히 변환하고, 그 결과를 해당 구조물 및 주요부재에

적합한 피해도 평가 모델과 관리기준을 적용하여 지진피해를 예측한 후 관리자에게 의사결정을 지원하는 체계로 다음 주요 절차에 의해 운영된다.

먼저 지진 발생 시, 대상 시설물에 계측된 지진가속도 정보를 활용하여 대상 시설물의 지진에 대한 거동을 분석할 수 있는 공학적 단위(주파수→응답스펙트럼 및 변위 등)의 자료로 변환한다. 변환된 자료를 적용하여 시설물의 거동을 분석(주요부재 및 시스템)하여 안전도를 평가할 수 있는 평가모델 적용 및 신속한 해석을 수행하며, 시설물의 합리적인 관리기준 아래 사용제한, 주민대피, 긴급점검 실시와 같은 관리주체 의사결정 지원 및 점검 우선순위 등 시설물의 안전관리 관한 정보를 신속하게 제공하는 시스템이다 (그림 5)

그림 5. 최종 연구개발 기술 개요 및 활용



저수지(댐) 지진위험도 평가란, 지진재난의 사전적 관리차원에서 발생 가능한 지진에 대해 저수지(댐)의 취약성을 예측하여 보수보강 순위를 결정하고, 지진발생 직후 구조물의 사용가능 여부를 신속하게 평가함으로써 여진으로 인한 추가 붕괴 등의 2차 피해 평가하는 것을 말한다. 따라서 지진위험도 평가는 다음의 4가지 사항을 포함해야한다.

- ① 지진위험도 특성화(Hazard Characterization)
공간적으로 분포되어 있는 저수지(댐)은 특정지점의 구조물보다 지진위험에 노출될 확률이 크다. 따라서 지진위험도 평가에는 지반운동 세기의 공간적 랜덤분포를 고려하여 정확한 지진요구도(Seismic Demand)를 적용해야 한다.
- ② 시스템수준 효과(System-Level Effects)
요소수준(Component-level)의 지진위험도평가보다는 시스템수준(System-level)의 지진위험도평가를 수행해야 한다.
- ③ 저수지(댐)과 부속시설물의 연관성

4. 콘크리트댐의 긴급지진안전성 평가기술 및 지표개발

저수지(댐)와 부속시설물은 서로 연관되어 있으며, 이러한 연관성을 고려하여 위험도를 평가해야한다. 예를 들어, 저수지(댐)와 여수로 중 저수지(댐)에만 내진보강을 한다면 여수로의 파괴가 전체구조물의 붕괴로 이어질 수 있다.

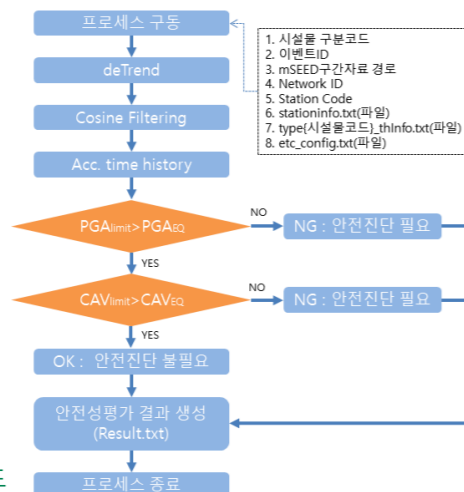
④ 자료의 갱신

시스템 요소들의 지진요구도(Seismic Demand), 지진역량(Seismic Capacity) 또는 구조 상태 자료가 추가될 경우 시스템 전체의 확률로 갱신되어야 한다. 또한 갱신된 확률은 명시적으로 의사결정 모델에 반영해야 한다.

댐의 파괴는 많은 인명피해와 헤아릴 수 없는 재산적 피해를 야기할 수 있다. 그러나 지진 시 댐의 거동은 구조역학적으로 가장 예측하기 쉽지 않고 복잡하다. 콘크리트댐의 지진안전성은 주로 응력, 균열깊이, 슬라이딩, 결합구부분의 변형 등 다양한 유형의 기준을 토대로 평가된다. 강진계측기록은 잠재적인 손상을 주는 자극으로 인해 생기는 대규모 구조물의 반응에 대한 자료를 제공한다. 이러한 기록은 강진진동시험에서 작은 진폭 주변의 응답동안 많은 구조물의 동적특성들이 현저한 차이를 가진다는 것을 알려준다. 큰 진폭의 특성은 물론 내진설계와 관련성이 높다. 따라서 강진 데이터로부터의 구조적 거동에 대한 정보를 추출하는 것은 상당한 관심과 중요성을 지닌다. 시스템 식별은 콘크리트댐의 구조적 거동을 파악하는 일반적인 방법이다.

콘크리트 댐의 긴급안전성 평가는 댐의 허용 최대지반가속도(PGA_{lim}) 또는 누적절대속도(CAV_{lim})가 자유장에서 계측된 가속도 데이터를 이용하여 최대지반가속도(PGA_{EQ}) 또는 누적절대속도(CAV_{EQ})를 구하고 이를 비교하여 계산된 지표값이 작으면 안전, 크면 안전성 평가가 필요하다고 평가하는 기술이다. 그림 6은 콘크리트댐의 안전성평가에 대해 필요한 데이터를 동일한 로직으로 산출하기 위한 흐름도 이다.

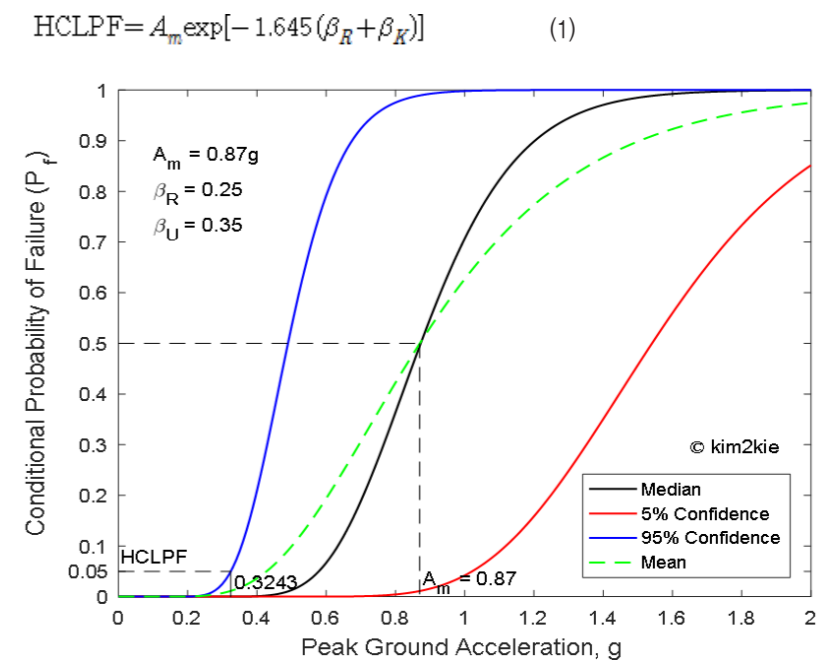
그림 6. 콘크리트 댐의 긴급 지진안전성 평가 흐름도



4.1 최대지반가속도

구조물의 지진취약도분석 수행결과는 지진취약도곡선으로 작성되고, 대상 구조물의 내진성능 지표로 HCLPF(고신뢰도저파괴확률, high confidence low probability of failure)값을 사용하여 구조물의 내진성능을 최대지반가속도(PGA, Peak ground acceleration) 값을 나타낸다. 일반적으로 HCLPF는 95% 비초과확률수준(즉, 고신뢰도) 취약도곡선에서 5% 파괴확률(즉, 저파괴확률)에 해당하는 내진성능값으로 다음과 같이 유도할 수 있다 (Ravindra, 1988). 참고로 지진취약도곡선(Fragility curve)은 랜덤변수의 변동성(variability)이 클수록(즉, β 가 클수록) 변동영역의 가로축 구간이 넓으며, 동일한 중앙값(A_m)에 대하여 대수표준편차(β)가 클수록 HCLPF값(즉, 내진성능)은 감소한다.

그림 7. 지진취약도곡선과 HCLPF 산정 예

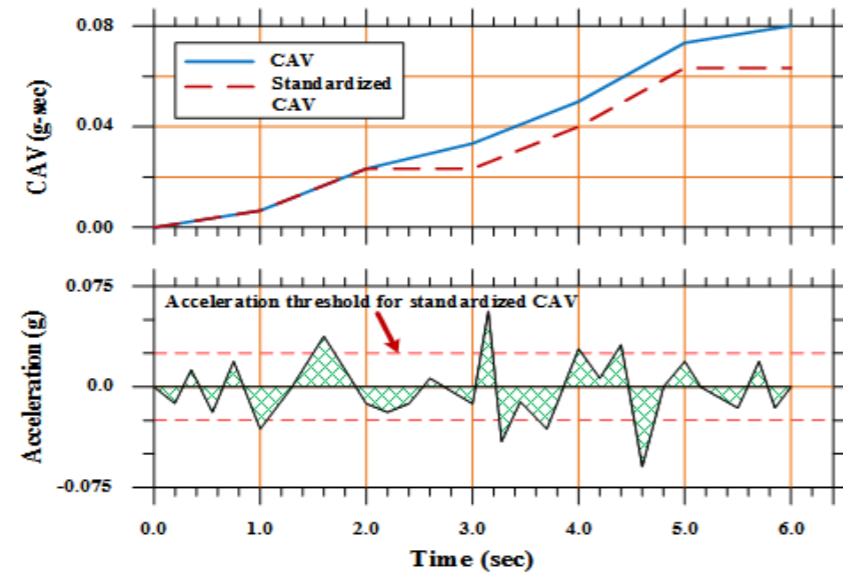


댐의 상부 변위 및 댐 상부면단의 인장강도에 대한 지진취약도곡선을 작성하고, 지진취약도곡선의 PGA_{EQ} 와 댐의 PGA_{lim} 값을 비교한다.

4.2 누적절대속도 (CAV)

누적절대속도(CAV, Cumulative Absolute Velocity)는 지진가속도, Arias 강도 등과 함께 지진 위험도를 선별하고 판단하는 평가자료로 사용될 수 있다. CAV는 원자력발전소(이하 원전) 등에서 최대지반가속도(PGA), 응답스펙트럼을 사용한 판별기준과 함께 지진위험도를 미리 판단하는 평가자료로 널리 사용되고 있지만, 원전을 제외한 일반 구조물에 적용한 구체적인 평가자료나 관련 연구는 많지 않다. 이 연구에서는 콘크리트 중력댐에 대해 CAV를 지진 위험도를 선별 평가하는 지표로 사용하는 방법을 검토하고 제시하였다.

그림 8.
시간 경과에 따른
CAV 및 표준
CAV의 정의



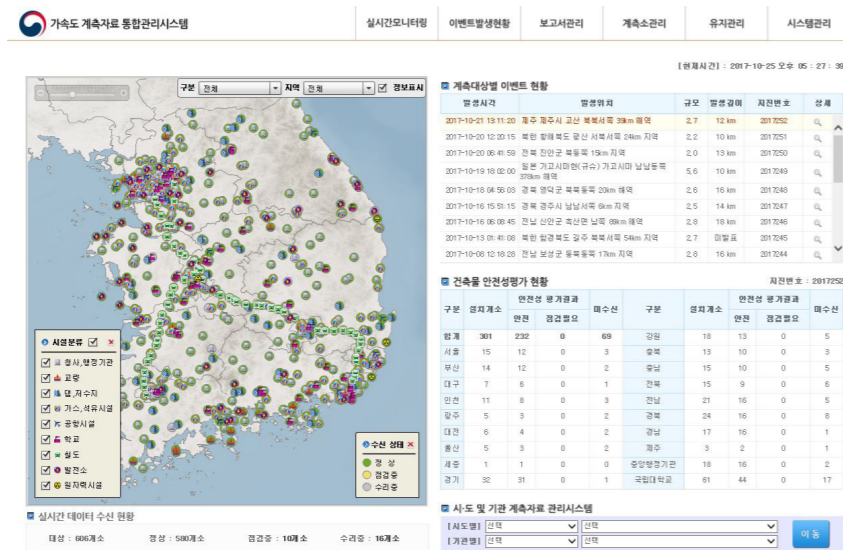
지진 발생 후 댐의 손상여부를 결정하는 절차로서 사용되는 CAV는 가속도 시계열의 절댓값의 적분으로 다음과 같이 정의된다 (계측된 가속도의 절대값을 모두 더함) (그림 8).

$$CAV_{EQ} = \int_0^{t_{max}} |acc(t)| dt \quad (2)$$

여기서, t_{max} 는 계측지진 시간, acc 는 지진가속도, dt 는 시간 간격
댐의 상부 변위 및 댐 상부면단의 인장강도에 대한 지진취약도곡선을 작성하고, 지진취약도곡선의 CAV_{EQ} 와 댐의 CAV_{limit} 값을 비교한다.

5. 기대효과 및 향후 계획

그림 9.
가속도계측자료
통합관리시스템



감사의 글

본 연구과제에서 개발한 콘크리트 댐의 지진안전성 평가프로그램은 현재 행정안전부에서 사용중인 긴급 지진안전성 평가시스템(그림 9)에 반영하여 현재 기관별로 혼재되어 있는 긴급 안전성 평가기준 및 지진재해대응 체계에서 시설물별 안전성 분석 및 피해예측 방안을 마련함으로써 사회적으로 지진재난에 대응하는 능력을 강화하고 구조물 손상에 즉각적으로 대응이 가능하여 국민의 안전을 확보하고 기반시설의 운영 중단에 따른 경제적 손실의 최소화 및 지진 발생 시 댐·저수지 등의 파괴를 사전에 정확하게 예측하여 주민 대피가 가능해짐에 따라 인적, 재산적 2차 피해 예방이 가능할 것으로 기대한다.

연구 내용은 지진하중에 한정되나 구조물에 대한 해석모델이 구축되므로 각 종 재난에 특성화된 작용 하중산정 방안을 개발한다면, 태풍(바람), 홍수, 폭설, 화산, 산사태 등 다양한 문제에 적용이 가능할 것으로 예상되며 또한 시스템 내 '시설물 관리 DB' 및 '구조물 해석모델 DB'를 타 시설물에 확장하는 경우 다양한 시설물의 개별 지진 안전성 평가에 활용 가능하므로 확대연구를 모색하고자 한다.

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-002)에 의해 수행되었습니다.