

## 지진시 앵커기초의 한계성능 평가를 위한 진동대 실험

### Shaking Table Test for an Evaluation of the Limit State Capacity of an Anchor Foundation in the case of a Seismic Event

김민규<sup>1)</sup> · 최인길<sup>2)</sup> · 권형오<sup>3)</sup>

Kim, Min Kyu · Choi, In-Kil · Kwon, Hyung O

**국문 요약** >> 본 연구에서는 지진시 앵커기초의 파괴한계성능을 평가하기 위하여 진동대 실험을 수행하였다. 앵커기초에 발생 가능한 열화현상인 균열의 영향을 평가하기 위하여 균열이 없는 시편, 관통균열 시편 그리고 파괴예상면 내에 측면균열이 있는 시편을 제작하여 각각의 파괴한계성능을 평가하였다. 우선적으로 임팩트 해머에 의한 가진 실험을 통하여 동특성분석실험을 수행하여 실험모형의 동특성을 분석하였으며, 앵커기초의 파괴 시까지 진동대 실험을 수행하여 극한거동을 평가하였다. 최종적으로 앵커기초의 설계기준과 비교하여 거동특성을 분석하였다.

**주요어** 열화, 주파수 응답함수, 진동대 실험, 파괴하중

**ABSTRACT** >> In this study, a shaking table test was performed for the evaluation of the failure capacity of an anchor foundation system in the case of an aged condition. For the shaking table test, three kinds of specimens were manufactured as follows: 1) a non-damaged anchor; 2) a specimen with cracks running through the anchor; and 3) a specimen with cracks along the expected corn-shape fracture away from the anchor. A dynamic characteristic was determined through a measurement of the frequency response function (FRF), and the seismic capacity was evaluated by using a shaking table test. Failure capacities were calculated using an acceleration response and it was compared with the anchor design code.

**Key words** Aging, Frequency response function, Shaking table test, Failure capacity

## 1. 서론

본 연구에서는 원자력발전소의 구조물과 기기의 정착을 위해서 사용하는 콘크리트 앵커기초의 극한성능을 평가하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 원자력 발전소 내부에 설치되어 있는 원전설비는 기본적으로 국내에서 발생가능한 지진에 대하여 충분한 내력을 가지고 있도록 설계되어 있다. 하지만, 30년 이상의 운영기간동안 반복적인 외부하중과 온도 변화, 그리고 발전소 운영으로 인한 진동 및 충격 등은 설비를 지지하는 콘크리트를 열화 시키고 균열을 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 기초에 발생한 균열의 형태

가 설비를 지지하는 앵커부의 파괴에 미치는 영향을 알아보고, 추후 그에 따른 보강을 진행하는데 기초자료가 될 수 있도록 연구를 진행하였다.

미국의 SQUG(Seismic Qualification Utility Group)에서 1971년 발생한 San Fernando 지진이후 전 세계 주요 지진 발생지역에서 일반 발전소 및 기타 산업시설을 대상으로 피해 현장을 조사한 결과, 설비의 정착부가 주요 취약부위로 확인되었다.<sup>(1)</sup>

미국 원자력규제위원회에서 발행한 원자력 발전소 설계에 대한 표준심사지침(Standard Review Plan, SRP) 3.8.4 Appendix E에서는 콘크리트 앵커 시스템에 대한 규제입장을 명시하고 있는데, ACI 349-85, Appendix B에서는 콘크리트 슬래브의 인장균열과 같이 균열이 발생하는 위치에 설치된 앵커에 대한 앵커강도 감소효과를 합리적으로 고려할 수 있는 요건을 제시하지 못하므로 만족스럽지 못하다는 것이다.<sup>(2)</sup> 국내에서는 미국의 표준심사지침을 토대로 하여 1999년 10월 “경수로형 원자력발전소 안전심사지침서”에

<sup>1)</sup> 정회원·한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사  
(교신저자: minkyu@kaerl.re.kr)

<sup>2)</sup> 정회원·한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사  
<sup>3)</sup> 브이테크 대표, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 6. 16 / 수정일 : 2010. 8. 5. / 게재확정일 : 2010. 8. 19)

서도 동일한 기술적 입장을 취하고 있어 국내 원자력 발전소의 콘크리트 앵커 설계에도 콘크리트 균열로 인한 앵커의 강도감소 효과를 합리적으로 고려해야만 하는 상황이 되었다.<sup>(3)</sup>

ACI 349 코드위원회에서는 Appendix B의 문제점을 인식하고 이를 해결하고자 그 동안 개정을 위한 작업을 지속하여 왔으며, ACI 349-01년 판으로 확정되어 정식으로 발행되었다. 개정된 내용에서는 CEB 설계 지침에서 채택하고 있는 CCD(Concrete Capacity Design) 방법이 적용되었으며, 하중계수를 1로 사용하는 설계하중조합에서 계산상 인장응력이 콘크리트 인장강도를 초과하는 구역을 균열단면으로 정의하고 있다. CCD 방법은 독일 슈투트가르트대학의 Eligehausen, Fuchs 등이 개발한 것으로 균열단면에서의 앵커강도를 기본으로 하여 비균열 단면에서 앵커강도를 증가시키도록 하고 있다. ACI 349-01, Appendix B 개정판에서는 비균열 단면에서의 앵커강도 증가계수를 CCD 방법을 토대로 하여 결정하였으나 앵커 파괴모드별로 CEB 설계 지침에서 채택하고 있는 CCD 방법과는 다소 차이가 있다. 또한 ACI 349-01, Appendix B 개정판에서는 균열단면에서 정적 및 동적 성능이 입증된 것만을 원자력발전소에 사용할 수 있도록 규정하고 있으며, ACI 355.2에서 성능 입증을 위한 구체적인 실험 절차를 제시하고 있다.<sup>(4,6)</sup>

따라서 현행 규제요건을 충족시키기 위해서는 국내의 원전에 사용되는 콘크리트 앵커를 대상으로 균열이 앵커강도 감소에 미치는 영향을 합리적으로 규명하고, 앵커 설계에 균열이 미치는 영향 측면에서 최근에 발행된 ACI 349-01, Appendix B 개정판의 적정성, 그리고 균열단면에서의 앵커의 동적 저항능력을 확인할 필요가 있다. 특히, 확장형 앵커는 형상, 제원 및 제작회사 등에 따라 구조거동의 변동성이 매우 크다. 따라서 국내 원전에 사용되는 앵커의 균열단면에서의 거동특성을 분석하여 ACI 349-01, Appendix B 개정판이 보수적, 효율적으로 적용될 수 있는 지를 확인하고, 실험을 통해서 구할 수 있는 균열에 의한 성능저하를 확인할 필요가 있다. ACI 349-01의 기준은 국내 콘크리트설계 기준에서 동일하게 사용되고 있으므로 본 연구에서는 국내 콘크리트 설계기준을 사용하여 파괴강도를 구하고 이를 실험결과와 비교하였다.

앵커기초의 성능평가에 대한 연구는 국내에서는 매우 제한적으로 수행되었다. 장정범 등에 의하여 실험적인 방법과 해석적인 방법으로 수행된 바 있다.<sup>(7),(8)</sup> 외국의 경우는 다양한 조건에서의 해석적방법과 실험적인 방법으로 앵커기초의 파괴거동에 대한 연구가 진행되어 왔다. Stangenberg 와

Jankowski<sup>(9)</sup>는 앵커기초의 인장파괴 거동을 해석하기 위한 비선형 유한요소법을 개발하였다. 콘크리트의 강도와 휨파괴 거동을 집중적으로 고려하였으며 균열의 전파거동을 해석하였다. Rodriguez 등<sup>(10)</sup>은 US NRC의 지원으로 앵커기초에 대한 동적 거동평가에 대한 연구를 수행하였으며, 특별히 균열의 유무에 따른 거동 평가연구를 실험적으로 수행한 바 있다. Rodriguez 등의 연구는 NUREG 보고서로 전체 연구내용이 정리되어 발간되었다.<sup>(11),(12)</sup> Obata 등<sup>(13)</sup>은 bond 형태의 앵커볼트가 균열면에 측면경계가 존재하는 경우의 파괴거동을 평가하기 위하여 수치해석방법을 제안하였고 실험을 통하여 검증하였다. 이처럼 앵커기초의 성능평가에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 실제로 진동대 위에서 지진하중에 의한 성능평가를 수행한 예는 전 세계적으로도 이루어지고 있지 않다. 동적하중이 작용하였을 경우에는 콘크리트 재료의 변형률속도 효과로 인하여 정적 하중상태와 비교하여 재료의 특성이 변화되므로 이에 대한 검토 역시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 균열에 따른 앵커기초의 지진시 한계성능 평가를 위한 진동대 실험을 수행하였다. 열화 된 원전 설비 기초의 내진성능평가를 위하여 원전 설비의 질량과 앵커, 그리고 콘크리트 기초를 표현할 수 있는 시편을 제작하였다. 시편의 종류는 크게 열화 손상이 발생하지 않았을 때를 가정한 무균열 시편과 열화 손상이 발생했을 때를 가정한 균열 시편으로 나눌 수 있으며, 균열이 있는 시편은 다시 앵커가 삽입되어 있는 면을 관통하는 균열이 발생한 경우(이하 ‘관통균열’)와 앵커의 인발로 인한 콘크리트 파괴면에 균열이 발생한 경우(이하 ‘측면 균열’)에 대해 제작하였다. 실험모형의 동적 거동 특성을 파악하기 위해 실험적 모드 기법을 이용하였으며, 진동대 실험을 수행하여 앵커부 파괴시 가속도 응답을 통해 내진성능을 평가하였다.

## 2. 실험모형 설계 및 제작

### 2.1 개요

원전설비의 종류는 매우 다양하며 크기 및 지지조건도 각기 다르므로, 특정 설비를 대상으로 하지는 않고 열화로 인해 발생한 균열을 표현할 수 있는 대표 모델로 제작하였다. 기초블록을 표현하기 위하여 콘크리트 시편을 제작하였으며, 제작시 앵커를 매입하여 상부구조물을 정착할 수 있도록 하였다. 기초블록의 손상에 따른 거동을 살펴보기 위하여 무균열 시편과 관통균열 시편, 측면균열 시편을 각 세 개씩 제작하였다. 상부구조물을 표현하기 위하여 강재 I형 부

재와 강재블록을 이용하여 제작하였다. 상부구조물은 강제 거동을 할 수 있도록 제작하여 앵커자체의 거동을 명확하게 확인 할 수 있도록 하였다.

### 2.2 콘크리트 시편설계 및 제작

앵커볼트가 설치되는 콘크리트 기초를 나타내기 위하여 콘크리트 시편을 제작하였다. 콘크리트 시편의 전체 크기는 900mm × 600mm × 200mm 이고 설계 강도는 280kg/cm<sup>2</sup>, 지지판의 크기는 200mm × 200mm 이다. 거푸집과 지지판이 완성되면 지지판에 앵커를 고정하고 콘크리트에 삽입될 앵글을 앵커에 부착한다. 앵커와 앵글의 설치는 콘크리트의 파괴면과 허용하중 등을 사전에 계산하여 M8 × 120mm의 고장력 볼트를 사용하였으며, 앵커의 단부에 설치되는 사각 앵글의 크기는 50mm × 50mm × 8mm로서 콘크리트 표면으로부터 60mm 깊이에 삽입되었다. 콘크리트에 발생한 균열을 생성시키기 위하여 스테인레스 강판을 이용하여 지정된 위치에서 앵글이 삽입된 깊이(60mm)까지 삽입하여 관통균열과 측면균열을 표현하였다. 스테인레스 강판을 삽입하여 균열을 임의로 발생시키는 경우 실제 발생하는 균열과는 달리 균열면에서의 마찰전단등을 구현할 수 없는 한계가

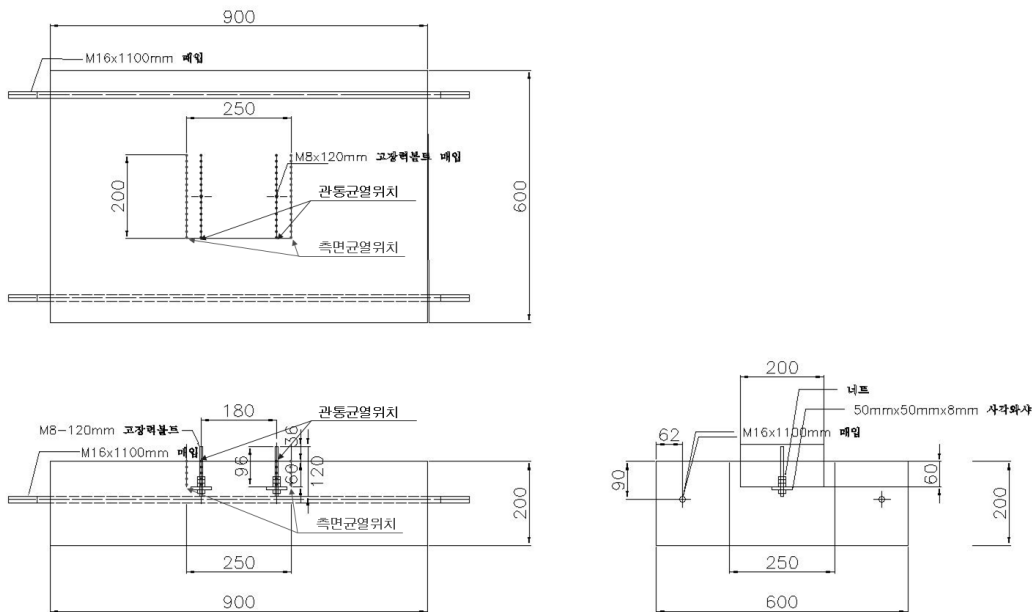
있으나 현실적으로 인위적인 균열의 발생을 위해서 사용할 수 있는 가장 적절한 방법인 것으로 판단된다. 관통균열과 측면균열의 위치를 포함한 콘크리트 시편의 도면을 그림 1에 도시하였다.

콘크리트 시편의 실제 압축강도를 알아보기 위하여 3개의 표준공시체를 제작하여 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도 실험결과를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 공칭강도는 설계강도에 비하여 20% 가량 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

콘크리트 시편의 균열형상이 고려된 예상파괴하중의 검토를 2007년도 콘크리트 설계기준<sup>(14)</sup>에 따라 수행하여 표 2에 정리하였다. 콘크리트 시편의 균열은 인위적으로 제작된 균열만이 고려되었다. 실제 파괴 하중을 예상하기 위해 강도감소계수는 고려하지 않았다.

### 2.3 실험모형 제원

실험모형은 400kg의 강재블럭 2개를 이용하여 구조물을 표현하였으며, I형 보를 기둥으로 하여 콘크리트 기초에 앵커로 고정하였다. I형 보와 강재블럭을 강결하여 상부구조물이 강제거동을 하도록 하여 앵커의 거동을 정확하게 알



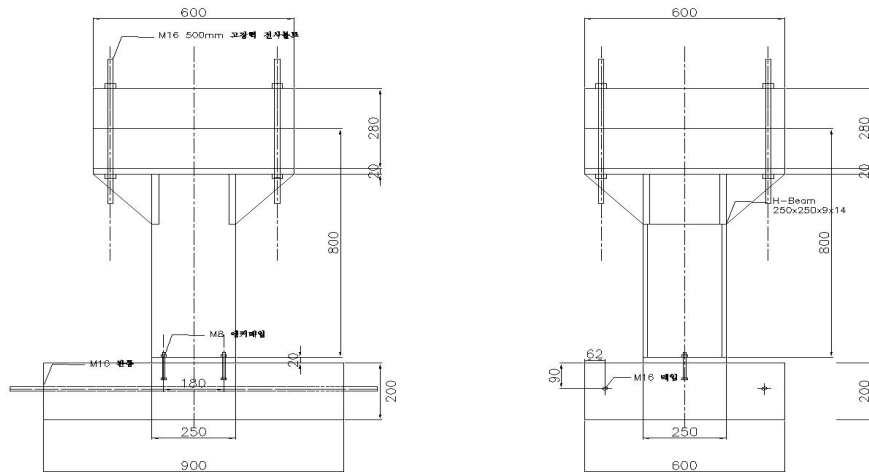
〈그림 1〉 콘크리트 시편의 도면

〈표 1〉 콘크리트 공시체 압축실험 결과

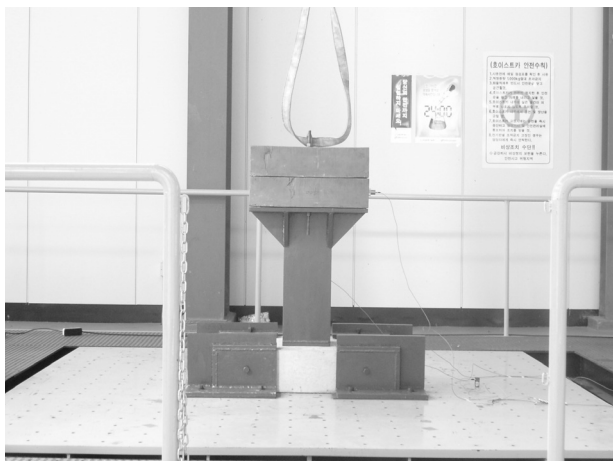
| 공시체 번호 | 파괴하중(MPa) | 시편크기(mm×mm) | 공칭강도(MPa)                      |
|--------|-----------|-------------|--------------------------------|
| 1      | 32.84     | 100×200     | 32.85 (335kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 2      | 32.35     | 100×200     | 32.36 (330kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 3      | 34.31     | 100×200     | 34.32 (350kg/cm <sup>2</sup> ) |

〈표 2〉 앵커 파괴하중 산정

| 항목                                       | 계산식  | 계산값   |                       |
|--|--|---|-----------------------|
| 인장을 받는 앵커의 강재강도                          | 고장력 볼트 인장강도 (10.9, 8mm)  | $f_{uta} = 0.9 \cdot 100 \text{ kgf/mm}^2$    | 882.598 MPa           |
|  | 앵커의 유효 단면적   | $A_{se} = \frac{\pi \cdot (8\text{mm})^2}{4}$ | 50.265mm <sup>2</sup> |
|  | 앵커의 강재강도   | $N_{sa} = A_{se} \cdot f_{uta}$               | 44.364 kN             |
| 콘크리트 강도                                  | $f_{ck} = 33 \text{ MPa}$  |   |                       |
| 삽입깊이                                     | $h_{ef} = 60 \text{ mm}$   |   |                       |
| 인장에 의한 기본 콘크리트 파괴강도 계수(선설치 앵커)           | $k_c = 10$   |   |                       |
| 단일 앵커에 대한 콘크리트 파괴면의 투영면적                 | $A_{N_m} = 9 \cdot h_{ef}^2$   | 3.24×104 mm <sup>2</sup>                      |                       |
| 측면균열에 의한 콘크리트 파괴면의 투영면적                  | $A_{N_c} = 3 \cdot h_{ef}(1.5h_{ef} + 35\text{mm})$  | 2.25×104 mm <sup>2</sup>                      |                       |
| 가장자리 영향에 의한 수정계수 (1.5h <sub>ef</sub> 이상) | $\psi_{edN} = 1$   |   |                       |
| 균열 유무에 따른 인장강도에 의한 수정계수(무균열, 선설치 앵커)     | $\psi_{cN} = 1.25$   |   |                       |
| 비균열 콘크리트에 사용하기 위한 인장강도에 대한 수정계수(선설치 앵커)  | $\psi_{cpN} = 1.0$   |   |                       |
| 단일앵커의 기본 콘크리트 파괴강도                       | $N_b = k_c \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5}$   | 26.698 kN                                     |                       |
| 콘크리트 예상파괴강도(무균열)                         | $N_{cm} = \frac{A_{N_m}}{A_{N_c}} \cdot \psi_{edN} \cdot \psi_{cN} \cdot \psi_{cpN} \cdot N_b$ | 33.373 kN                                     |                       |
| 콘크리트 예상파괴강도(측면균열)                        | $N_{cm} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_m}} \cdot \psi_{edN} \cdot \psi_{cN} \cdot \psi_{cpN} \cdot N_b$ | 23.176 kN                                     |                       |



〈그림 2〉 실험모형의 도면



〈그림 3〉 실험모형의 형상

〈표 3〉 실험모형의 구성 및 질량중심

|        | 무게(kg) | 도심(진동대 바닥 기준, m) |
|--------|--------|------------------|
| 상부질량   | 800.00 | 0.80             |
| 질량받침   | 56.52  | 0.65             |
| 수직보강재  | 19.23  | 0.58             |
| 수평보강재  | 8.40   | 0.48             |
| I-beam | 46.34  | 0.32             |
| 앵커연결부  | 8.40   | 0.01             |
| 전체     | 938.89 | 0.753            |

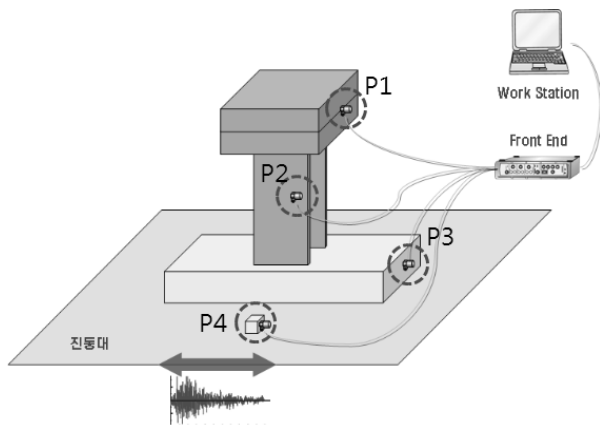
수 있도록 하였다. 실험모형의 도면과 제작되어 진동대에 설치된 형상은 각각 그림 2 및 그림 3과 같다. 또한 실험모형 각 부분의 무게와 진동대 바닥면을 중심으로 한 무게 중심은 표 3에 정리하였다.

### 3. 진동대실험

#### 3.1 측정시스템 및 측정방법

본 연구를 수행하는데 사용된 측정 시스템 개요는 그림 4와 같다. 각각의 위치에 진동을 가장 효과적으로 측정할 수 있는 특성을 갖는 가속도계를 부착하여 사용하였으며, 가속도계는 데이터 수집 장치(Data Acquisition System)로 연결된다. 데이터 수집 장치는 가속도 측정을 위한 전원을 안정적으로 가속도계에 공급해주고, 다시 가속도계로부터 출력되는 전원을 받아 가속도로 변환시켜주는 역할을 한다. 데이터 수집 장치는 컴퓨터에 연결되어 측정 테스트 셋업 및 측정 결과를 분석/출력할 수 있다. 측정에 사용된 가속도계는 그림 4에 도시한 바와 같이 P1 ~ P4에 설치하였으며, P1은 전체 실험모형의 무게중심에 설치하였고, P2는 기둥의 중앙에, P3은 기초 콘크리트에 그리고 P4는 진동대 바닥면에 설치하였다. 본 연구에서는 전력연구원에서 보유하고 있는 1차원 가진이 가능한 진동대를 사용하였으며 그 제원은 표 4와 같다.

가속도 진동응답의 측정은 진동대가 작동하기 전부터 시작하여 진동대가 완전히 멈춘 후 까지 혹은 콘크리트나 앵



〈그림 4〉 측정 시스템 개요

〈표 4〉 1방향 진동대 사양

|             |            |               |
|-------------|------------|---------------|
| 진동대 구성      | Actuator   | 40 tonf       |
|             | 지진 질량      | 60 tonf       |
|             | Air Spring | 12 tonf x 6개  |
|             | 진동수 시스템    | 2.0 Hz        |
| 피실험 모델 수용용량 | 크기         | 3.0 m x 3.0 m |
|             | 최대실험중량     | 10 tonf       |
|             | 최대가속도      | 1 g           |
|             | 최대변위       | 300 mm        |

커부의 파괴가 진행될 때까지의 시간 응답데이터를 모두 저장하였다. 이 때, 샘플링 진동수는 256 Hz로 설정하였으며, 이에 따라 샘플링 비율(Sampling Rate)은 1초에 256개의 진동 가속도 데이터를 계속하도록 설정되었다.

#### 3.2 동특성 분석을 위한 충격실험

실험모델의 동특성 분석을 위하여 Impact Hammer를 이용한 강제진동실험을 수행하였으며 그 결과로 주파수 응답함수(Frequency Response Function : FRF)를 측정하여 전달함수를 구하였다. 이와 같은 실험을 이용하면 구조물의 동적특성을 비교적 정확하게 구할 수 있다. 주파수 응답함수는 실험모형의 질량중심을 가진하여 구하였으며, 타격위치, 하중 등에 의해 발생하는 측정의 오차를 줄이기 위하여 동일한 지점을 3회 타격하여 평균값을 사용하였다. 진동대의 가진방향과 동일한 방향으로 타격하여 실험을 수행하였다. 가진 및 응답 데이터 모두 256 Hz로 샘플링 하였으며, 실험모형의 감쇠율이 매우 적으므로 가진력이 완전히 사라질 때까지 1회 타격에 16초 동안 계속하였다.

#### 3.3 진동대 실험

주파수 응답 측정을 한 후에는 진동대 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 지진파는 원자력발전소의 내진설계에 사용하는 US NRC Reg.Guide 1.60<sup>(15)</sup>의 설계응답스펙트럼에 준하여 생성시킨 인공지진파를 스케일링하여 사용하였으며, 시편이 파괴될 때까지 점증하였다. 가속도 점증에 따른 시편의 피로 등의 영향을 검증하기 위해 점증실험 시 파괴된 가속도에 대해 1회 최대가속도 실험을 실시하였다. 진동대 실험을 위해서는 입력 지진의 목표 스펙트럼에 준하는 인공지진파를 진동대가 효과적으로 생성하도록 실험체를 진동대에 설치 한 이후에 목표스펙트럼에 부합하는 입력 지진운동을 생성하기 위하여 수많은 반복계산을 통하여 정확한 입력운동을 구하게 된다. 그러나 본 실험에서는 실험체의 파괴를 목표로 하여 실험을 수행하므로 그와 같은 입력운동을 사전에 실험체의 설치 후에 시험한다는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 목표 최대가속도가 0.1g 인 경우의 입력운동을 생성해서 그것을 증폭시켜 가면서 진동대 실험을 수행하였다. 목표 최대가속도가 0.1g 인 경우를 1/4 하중 조건이라고 가정하여 표시하였으므로 목표 최대가속도가 0.4g 인 경우는 4/4하중조건이 된다. 실험을 1축 진동대를 사용하여 수행하였으므로 1방향 거동만을 평가하게 되면 진동대 가진 방향은 그림 4에서 도시하고 있는 바와 같다.

### 4. 실험결과 및 분석

#### 4.1 실험결과

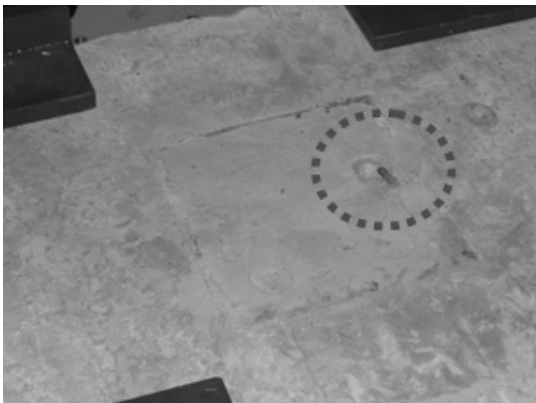
주파수 응답함수(FRF) 및 진동대 실험으로부터 나온 결과를 요약하여 표 5에 정리하였다. 표에서 1차 모드 진동수는 주파수 응답함수(FRF) 실험에 의한 결과로서 진동대 실험 전에 실험체를 설치한 이후 바로 실험을 수행한 결과이다. 실험체의 고유진동수를 평가하여 비교하는 것은 실험체의 동특성을 이해하기 위함이고 입력지진동의 탁월주파수 영역과의 관계를 파악하기 위함이다.

표에서 보는 바와 같이 무균열 실험체에 대한 점증실험결과 하중조건 7/4에서 볼트의 인장파괴가 발생하였으며 새로운 시편을 설치하여 7/4하중에 의한 실험을 바로 수행하였을 때 동일한 파괴가 발생하였다. 관통균열이 있는 시편체의 경우도 4/4하중조건부터 점증실험을 수행한 결과 무균열 시편과 동일한 하중인 7/4하중에서 앵커볼트의 인장파괴가

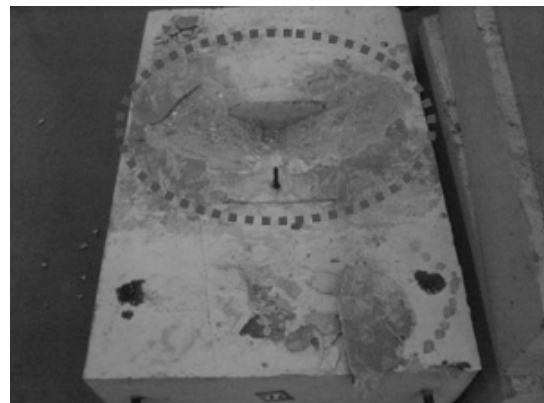
발생하였다. 진동대에서의 최대가속도와 P1 지점에서의 최대가속도 수준도 유사한 범위에서 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 관통균열에 대한 시편 교체 후 최대가속도 실험을 수행한 결과 동일한 하중에서 볼트의 인장파괴가 발생하는 것을 알 수 있었다. 측면균열이 존재하는 실험체에 대한 실험에서는 1차 모드 고유진동수가 8.25Hz와 8.75Hz로서 무균열 시편 및 관통균열 시편의 경우에 비하여 다소 작게 평가되어, 측면균열에 의해서 앵커기초의 정착력이 다소 감소하고 있음을 알 수 있다. 하중조건 3/4의 경우부터 점증하여 진동대 실험을 수행한 결과 하중조건 4/4에서 콘크리트 콘파괴가 발생하였다. 시편을 교체하여 파괴하중인 4/4하중에 대한 진동대 실험결과 유사한 최대가속도 수준에서 동일한 형상의 파괴가 발생하는 것을 알 수 있었다. 무균열 시편과 관통균열 시편에서 발생한 앵커볼트의 인장파괴 형상과 측면균열 시편에서 발생한 콘크리트 콘파괴 형상을 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 측면균열이 존재하는

〈표 5〉 주파수 응답함수(FRF) 및 진동대 실험 결과

| 실험모형 타입 | 실험조건    | 하중조건 | PGA (P4, g) | 파괴가속도 (P1, g) | 파괴모드     | 1차 모드 진동수 |
|---------|---------|------|-------------|---------------|----------|-----------|
| 무균열     | 점증실험    | 4/4  | 0.49        | -             | -        | 11.00     |
|         |         | 5/4  | 0.54        | -             | -        |           |
|         |         | 6/4  | 0.67        | -             | -        |           |
|         |         | 7/4  | 0.82        | 1.28          | 볼트 인장파괴  |           |
|         | 최대가속도실험 | 7/4  | 0.79        | 1.47          | 볼트 인장파괴  | 11.50     |
| 관통균열    | 점증실험    | 4/4  | 0.46        | -             | -        | 13.63     |
|         |         | 5/4  | 0.52        | -             | -        |           |
|         |         | 6/4  | 0.67        | -             | -        |           |
|         |         | 7/4  | 0.80        | 1.42          | 볼트 인장파괴  |           |
|         | 최대가속도실험 | 7/4  | 0.82        | 1.39          | 볼트 인장파괴  | 10.00     |
| 측면균열    | 점증실험    | 3/4  | 0.38        | -             | -        | 8.25      |
|         |         | 4/4  | 0.46        | 0.95          | 콘크리트 콘파괴 |           |
|         | 최대가속도실험 | 4/4  | 0.45        | 1.06          | 콘크리트 콘파괴 | 8.75      |



(a) 볼트 인장파괴

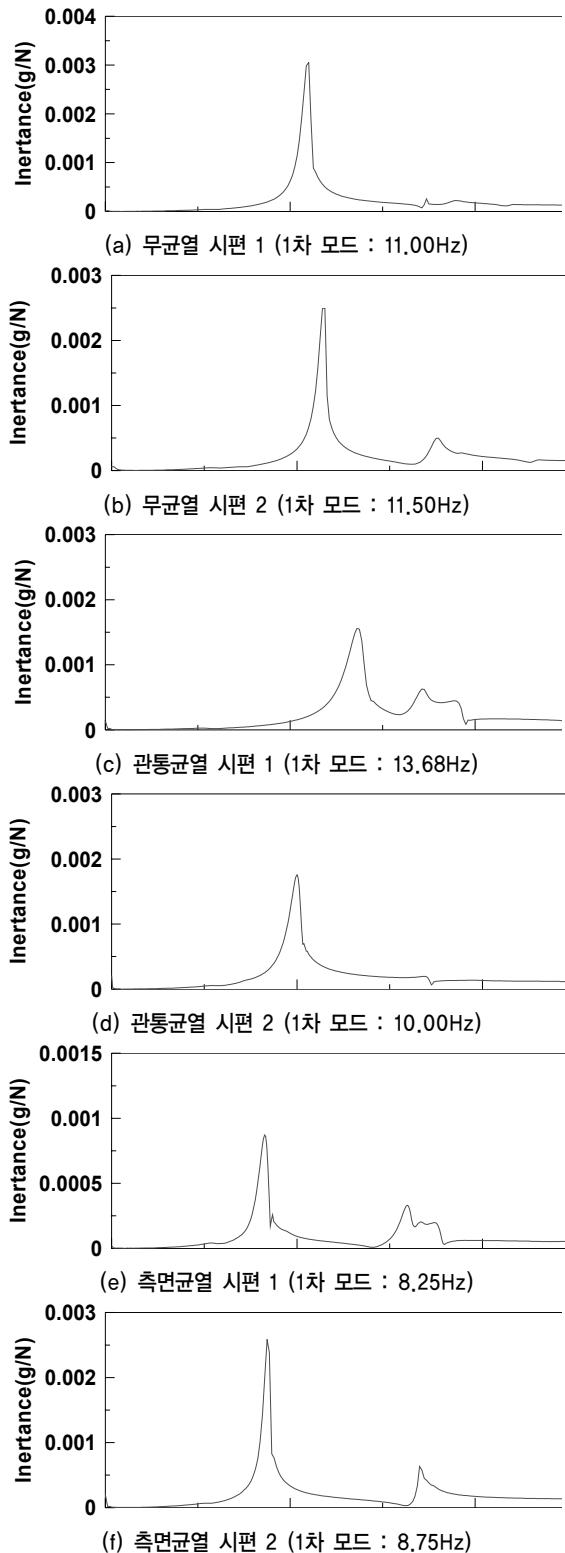


(b) 콘크리트 콘파괴

〈그림 5〉 진동대 실험의 파괴형상

시편의 경우는 균열면에 의하여 콘크리트 저항면적이 감소하여 콘파괴가 발생한 것을 알 수 있다.

실험모형의 주파수 응답함수 실험으로부터 실험모형의 동적 거동 특성을 파악하였으며 결과는 그림 6에 도시하였다. 또한 각 시편에 대한 진동대 실험시 파괴되는 경우에 대



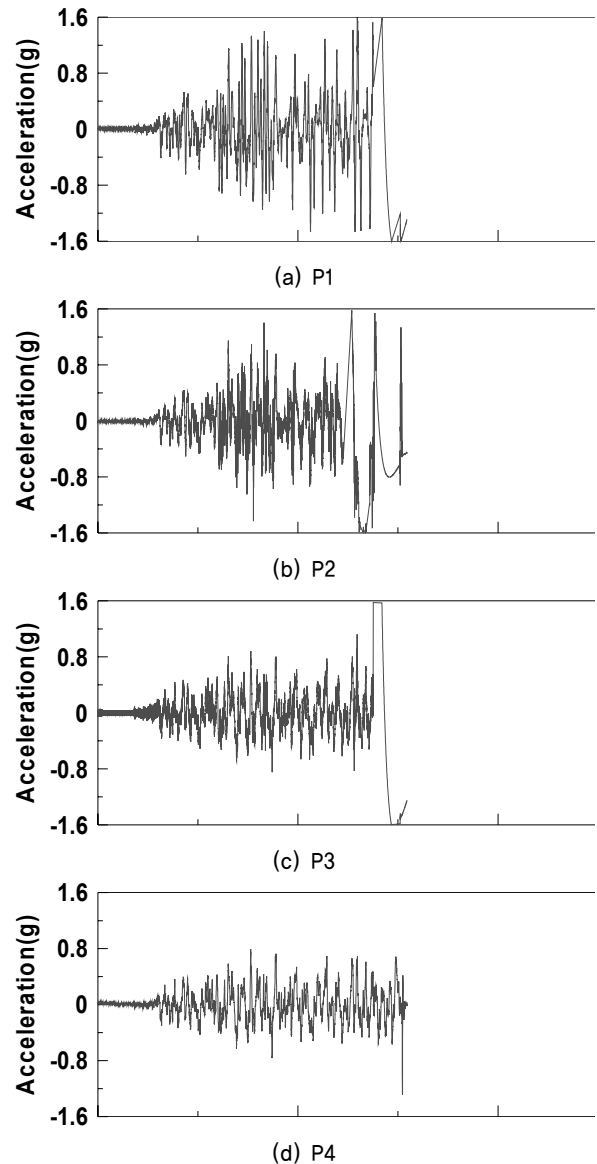
〈그림 6〉 주파수 응답함수 실험결과

한 결과를 가속도 시간이력으로 그림 7~그림 9에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 앵커의 인장파괴가 발생한 경우에는 파괴시점을 명확하게 알 수 있으나 콘크리트의 콘파괴가 발생한 경우에는 실험이 끝까지 진행되어 파괴시점이 명확하게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 다만 콘크리트가 인장 파괴된 시점에서부터 가속도 응답의 진동수가 명백하게 변화하는 것을 알 수 있다.

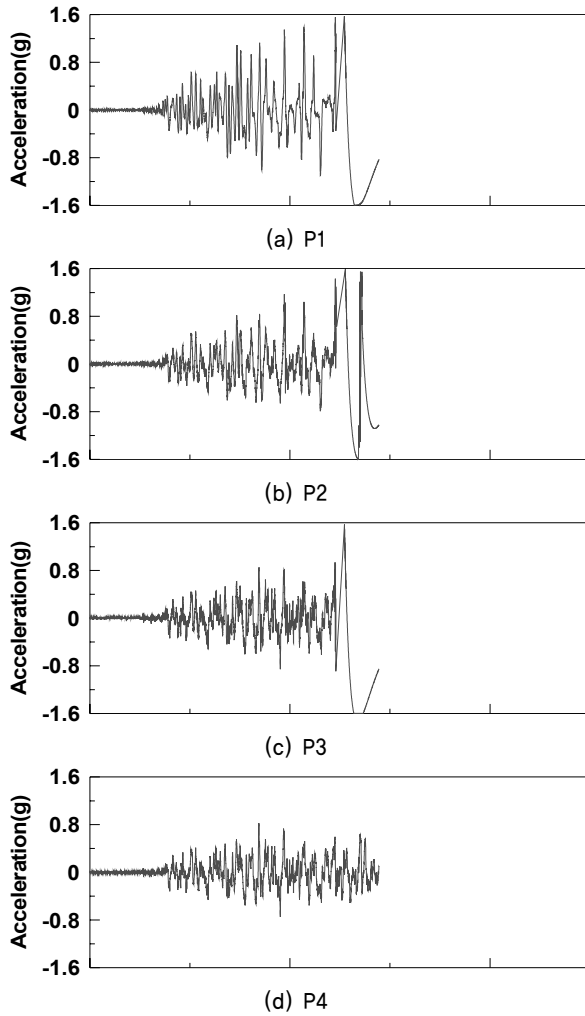
### 4.2 실험결과의 분석

본 절에서는 설계시의 파괴모드에 따른 예상 파괴하중과 실제 파괴하중 및 실제 파괴모드를 분석하여 실험의 결과를 분석하였다.

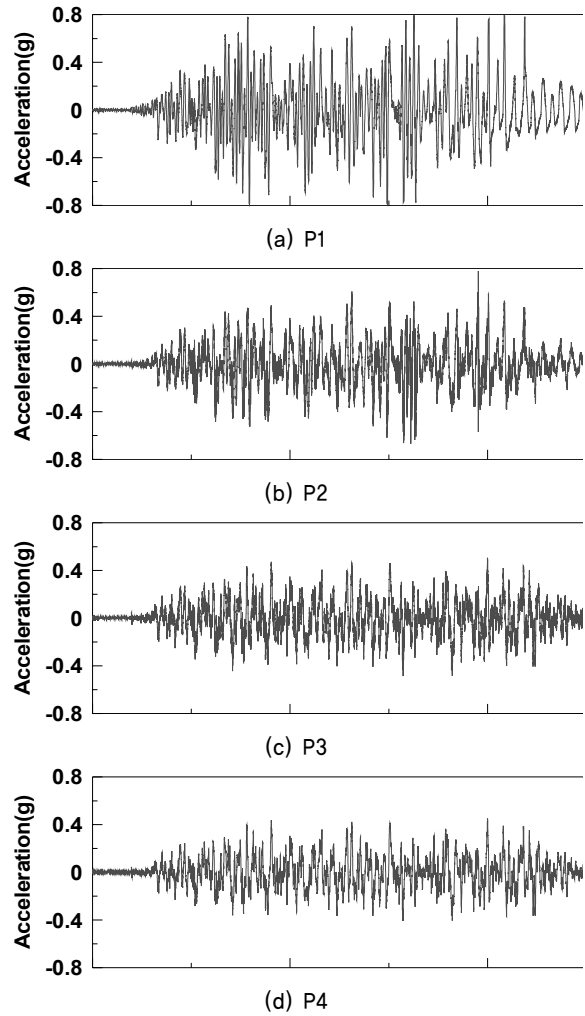
균열형상 시편종류에 따른 앵커설계 시 파괴강도와 실험



〈그림 7〉 무균열 시편 2 최대가속도실험 시간이력 (7/4 case)



〈그림 8〉 관통균열 시편 2 최대 가속도 실험 시간이력 (7/4 case)



〈그림 9〉 측면균열 시편 2 최대가속도 실험 시간이력 (4/4 case)

결과를 비교하여 표 6에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 앵커강재의 파괴하중은 설계시의 예측값과 실제 실험시의 결과가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 측면균열 시편에서 나타난 콘크리트의 콘파괴는 예상 설계치와 비교하였을 때 1.475배 큰 하중에서 파괴되는 것을 알 수 있다. 콘크리트 재료의 경우 강재에 비해서 불확실성이 높은 재료이므로 설계시방서의 기준이 많은 안전율을 포함하고 있기 때문인 것과, 또한 동적실험에서는 콘크리트 재료의 변형률 속도 효과(Strain rate effect)에 기인한 것으로 판단된다.<sup>(16)</sup> 즉 콘크리트 재료의 경우 작용하는 하중에 속도증가에 따라서 콘크리트의 압축강도와 인장강도가 증가하는 효과에 의해서 일시적으로 정적 파괴강도보다 큰 강도가 나타나므로 콘크리트가 예측한 경우보다 더 큰 하중에서 파괴되는 것으로 판단된다. ACI 349-01<sup>(5)</sup>에서도 충격과 같은 동적 하중 시 콘크리트의 인장과 휨 및 전단강도를 증가하여 고려하는 동적증가계수(Dynamic Increase Factor, DIF)를 제시하고 있다. ACI 349-01에서 제시하는 값은 인장의 경우 최대

〈표 6〉 앵커 설계시 파괴강도와 실험결과의 비교분석

|           | 무균열    | 관통균열   | 측면균열   |
|-----------|--------|--------|--------|
| 파괴형태      | 앵커강재파괴 | 앵커강재파괴 | 콘크리트파괴 |
| 진동대실험(kN) | 47.408 | 44.828 | 34.186 |
| 설계시(kN)   | 44.364 | 44.364 | 23.176 |
| 진동대/설계    | 1.067  | 1.010  | 1.475  |

1.25배의 강도증가가 가능한 것으로 나타나고 있다.

대부분 앵커기초에서 발생하는 균열은 앵커를 관통하는 관통균열인 것으로 나타나고 있으므로<sup>(17)</sup> 원전에서 발생하는 앵커기초의 균열은 구조물 및 설비의 내진성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그러나 파괴예상면 내에서 발생하는 측면균열의 경우는 균열의 발생으로 인하여 설비의 내진성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 이 경우에는 반드시 보수보강이 필요한 것으로 판단된다.



## 5. 결론

본 연구에서는 앵커기초의 파괴한계성능 평가를 위하여 가진 해머에 의한 진동실험과 진동대실험을 수행하여 그 결과를 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 무균열 시편, 관통균열 시편 그리고 측면균열 시편의 세 가지 콘크리트 기초의 상태를 표현하여 진동대 실험을 수행하였으며, 무균열 시편과 관통균열 시편에서는 앵커볼트의 인장파괴가 발생하였으며 측면균열 시편에서는 콘크리트 콘파괴가 발생하였다.
2. 실험체에 대한 동특성 분석을 위해서 가진 해머를 이용한 주파수응답함수를 비교하였다. 비교 결과 관통균열 시편의 경우 무균열 시편과 비교하여 주목할 만한 동특성의 변화가 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 측면균열의 경우 무균열 시편 및 관통균열 시편의 경우보다 강성이 다소 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 실험은 각 경우에 대하여 단지 3개의 시편만을 대상으로 수행한 실험이므로 일반적인 결론을 도출하기에는 무지가 있는 것으로 판단되며 추후 여러 개의 시편을 대상으로 한 실험을 수행하여 그 경향을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 설계시방서에서 콘크리트의 경우 강재에 비하여 안전율을 높게 제시하고 있는 것으로 판단되며, 특히 동적하중이 작용하는 경우 변형률속도효과에 의한 콘크리트의 파괴강도가 높게 나타나므로 앵커의 인장파괴가 먼저 발생한 것으로 판단된다.
4. 앵커를 관통하는 관통균열의 경우 무균열 상태와 유사한 하중에서 앵커볼트의 인장파괴가 발생하였으며, 균열이 앵커를 관통하는 경우 앵커의 성능의 저하는 크지 않는 것을 알 수 있었다.
5. 앵커기초의 파괴면 상에 존재하는 측면균열의 경우 무균열 또는 관통균열 시편에 비하여 약 30%의 성능저하가 있는 것을 확인 할 수 있었으며 이것은 내진성능 저하의 직접적인 요인이 될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. SQUG, Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment, 1993.
2. US NRC, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants 3.8.4 Appendix E (Draft Rev. 2), 1996.
3. KINS-G-001, 경수로형 원자력발전소 안전심사지침서, 한국 원자력안전기술원, 1999.10.
4. ACI 349-97, "Code Requirements for Nuclear Safe-Related Concrete Structures," App. B, "Steel Embedments," American Concrete Institute, 1997.
5. ACI 349-01 "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures," APPENDIX C-Special Provisions for Impulsive and Impactive Effects, American Concrete Institute, 2001.
6. CEB Design Guide, "Design of Fastenings in Concrete," 1997.
7. 장정범, 서용표, 이종립, "직매형 앵커기초의 설계기준 개선에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 23(6A), 1331-1338, 2003.
8. Jang, J.B., and Suh, Y.P., "The experimental investigation of a crack's influence on the concrete breakout strength of a cast-in-place anchor," *Nuclear Engineering and Design*, 236(9), 948-953, 2006.
9. Stangenberg, F., and Jankowski, D., "Anchorage under Tensile Loading A Nonlinear Numerical Analysis," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, 38, 341-353, 1989.
10. Rodriguez, M., Zhang, Y.G., Lotz, D., Graves III, H.L., and Klingner, R.E., "Dynamic behaviour of anchors in cracked and uncracked concrete: a progress report," *Nuclear Engineering and Design*, 168, 23-34, 1997.
11. NUREG/CR-5563, A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria, USNRC, Washington, D.C., 1999.
12. NUREG/CR-5434, Anchor Bolt Behavior and Strength During Earthquake, USNRC, Washington, D.C., 1998.
13. Obata, M., Inoue, M., and Goto, Y., "The failure mechanism and the pull-out strength of a bond-type anchor near a free edge," *Mechanics of Materials* 28, 113-122, 1998.
14. 한국콘크리트학회 (2007), 콘크리트구조설계기준 2007.
15. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
16. Javier Malvar and C. Allen Ross, Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension, *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 6, November-December, 1998.
17. KAERI/CM-1033/2007, 가동 중 원전 내 주요 안전설비의 경년열화 손상특성 조사 2008.03.07