

내진여유도평가법에 근거한 기존 강구조물의 내진성능평가

Evaluation of Seismic Margin of Existing Steel Structure Based on Seismic Margin Assessment

황규호*, 송정국*, 강선구* 서용표**, 이종립**
K.H. Hwang, J.G. Song, S.K. Kang Y.P. Suh, J.R. Lee

ABSTRACT

The Turbine Building of nuclear power plant is classified as non safety-related structure. During the operation, there may be possibility the original licensing basis would be changed, which makes non safety-related structure safety-related. Such a change in regulation requires utility to perform seismic qualification for the existing structure and their facilities. Thus it is meaningful to evaluate seismic margin of the existing non-qualified building structure. In addition, in this paper it is shown that a modification to the structure can enhance their seismic capacity.

1. 서 론

안전관련 등급의 원전설비를 지지하고 있는 구조물이나 지지대는 안전관련 등급으로 분류되어 해당 내진설계요건에 따라 설계된다. 그러나 터빈건물은 자체에 안전관련 설비를 포함하고 있지 않으므로 안전관련 구조물에 적용되는 내진설계요건에 직접적으로 적용 받지 않는다. 다만, 터빈 건물의 붕괴가 인접 안전관련 구조물에 영향을 줄 수 있으므로 일반건축법규에 따른 내진설계요건이 적용된다. 그러나 기존의 비안전등급 설비가, 해당 기술기준의 변천으로 인하여, 안전등급으로 분류되는 사례가 종종 나타난다. 특정 구조물이 안전등급으로 분류되면, 이 구조물이 포함하는 설비들은 설계지진하중이 발생하는 동안과 그 이후에도 의도된 안전기능을 유지할 수 있어야 한다. 현재 시행 중에 있는 주기적안전성평가제도는 기술의 진보에 따른 기술기준의 변경이 기존의 인허가 기반에 미치는 영향을 평가하기 위한 제도로서 원자력 안전에 중요한 설비에 대해 개별적인 내진검증을 요구하고 있다. 본 논문은 이와 같이, 설계 당시 내진설계기준을 적용받지 않았지

* 정회원·한국전력기술(주) 종합안전성평가연구그룹 내진안전성평가팀

** 정회원·한국전력연구원 원자력연구실 토건그룹

만, 현행 인허가 기반에 비추어 내진성능의 보장이 새로이 요구되는 구조물에 대해 내진안전성평가를 수행함으로써, 해당 구조물의 실제 내진성능을 정량화하는 방안을 모색하고자 한다. 터빈건물은 전통적으로 일반건축법규에서 제시하고 있는 수준의 내진설계요건을 적용받고 있고, 일반건축법규에서 지정하는 내진성능 수준은 붕괴방지 수준으로서, 설계 당시 비내진등급으로 분류된 터빈건물에 대해 기능수행수준의 성능을 기대하기 어렵다.

본 연구에서는 최근 국내에서 도입되어 다수 원전에 적용된 바 있는 파손내력평가법을 이용하여 터빈건물의 내진성능을 검토하였다. 이 방법론은 내진여유도평가법의 근간을 이루는 기법으로서 기존의 확률적 접근법에서 탈피하여 구조물의 내진성능을 확정적으로 접근하는 평가기법이다. 확정적 평가법과 확률적 평가법 모두 궁극적인 평가 목표는 설계인허가 기반을 초과하는 내진여유도의 정량화에 있으며 두 기법을 적용한 내진성능값은, 그 방법론의 상이성에도 불구하고, 매우 유사한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 내진검증되지 않은 구조물에 대해 이들 기법을 이용하여 그 내진성능을 평가하는 작업은 주기적안전성평가제도가 시행되는 현 시점에서 매우 시의적절한 시도라고 사료된다. 특히 이 연구를 통하여 비내진등급 설비의 사용성에 대한 신뢰성 높은 내진성능의 도출은 원전의 안전개념을 고취시키고, 나아가 주기적안전성평가가 요구하는 안전목표를 달성하기 위한 초석이 될 것으로 판단된다.

2. 구조물 개요

2.1 기하학적 구조

본 연구의 평가 대상 구조물인 터빈건물은 그 밀면적이 97.6m×65.1m이고, 터빈구역과 보조구역으로 구성되어 있다. 터빈구역은 터빈 발전기를 수용하고, 보조구역은 전기설비 (예를 들어 배터리, 충전기, 변환기 등), 탈기기, 급수탱크 등과 같은 비안전관련 설비들을 수용하고 있다. 터빈건물의 기초는 기초 상단 표고가 83.76m인 철근콘크리트 매트 기초이다. 매트 기초의 세 측면에는 건물 주변을 따라 철근콘크리트 옹벽이 설치되고, 나머지 한 측면은 인접한 서비스건물의 기초와 접하고 있다. 터빈 건물의 상부구조는 강구조로서 그 주요 기둥들이 주변 옹벽과 매트 기초에 지지되어 있고, 터빈을 외부 환경으로부터 보호하는 터빈구역과 운전 관련 설비들을 보호하는 다층의 보조구역으로 구성되어 있다.

터빈건물 상부구조물은 건물의 종방향으로 수직-브레이싱 시스템이 횡저항 구조시스템으로 작동하며, 건물의 횡방향으로는, 터빈구역과 보조구역이 각각 서로 다른 횡저항 구조시스템을 가지고 있다. 즉, 터빈구역의 횡저항 시스템은 모멘트 골조 시스템이고, 보조구역의 횡저항 시스템은 브레이싱 시스템이다. 또한 다층으로 구성된 보조구역의 수평-브레이싱 시스템은 합성보 시스템으로서 철근콘크리트 슬래브의 강성판 거동을 통하여 지진 관성력을 하부 수직-브레이싱 시스템에 적절히 분배되도록 배려되어 있다.

2.2 설계 검토

평가 대상 구조물이 놓인 부지의 수평지반운동은 그림 1과 같은 표준지반응답스펙트럼으로 정

의되며 0.2g의 최대지반가속도에 고정된다. 수직방향 입력지진운동은 전진동수 범위에 걸쳐 수평 방향 입력지진운동의 2/3을 취하고 있다. 볼트 연결 구조를 가진 터빈건물의 경우, 5% 감쇠비의 표준설계지반응답스펙트럼이 사용되었다.

본 터빈건물의 경우, 원자력안전요건 (nuclear safety requirement) 및 사용성요건 (operational reliability requirement) 두 가지 요건에 따른 내진설계가 수행되었다. 사용성 요건의 측면에서 터빈건물은 정상운전하중 및 일반건축법규 (NBCC⁽²⁾, National Building Code of Canada, seismic zone 2)에 따른 지진하중 조건에서 그 사용성이 보장되어야 한다. 이 요건을 충족하기 위하여 0.2g에 고정된 표준설계지반응답스펙트럼을 0.05g로 낮추어 설계 입력지진운동으로 사용하였다.

원자력 안전 요건 측면에서 볼 때, 터빈건물은 0.2g의 설계지진 조건에서 인접한 안전관련 구조물 (서비스건물)에 손상을 주지 않도록 설계되어야 한다. 이를 위해 설계지반운동에 근거한 탄성 응답스펙트럼해석이 수행되었으며, 이 탄성해석을 통해 얻어진 부재 내력에 적절한 감소계수를 가하여 설계 부재력으로 사용하였다. 이 감소계수는 캐나다 건축법규(NBCC)에서 규정하고 있는 내력수정계수로서 통상적인 연성을 가진 브레이싱 골조의 비탄성 거동 능력을 반영한다. 또한 모든 구조부재는 한계상태설계법 (Limit State Design)에 따라 설계되었으며, 계수하중에 대해 충분한 강도와 구조적 안정성을 유지하도록 설계되었다.

터빈건물 각 부재력을 얻기 위하여 삼차원 유한요소모델을 이용한 설계해석이 수행되었다. 기둥, 수평 보, 수직-횡저항 구조시스템의 사재와 같은 주요 구조 부재들이 상세 모델에 포함되었고, 각 층의 콘크리트 슬래브는, 유한요소를 이용하여, 그 강성을 적절히 반영하여 모델에 포함되었다. 전체 구조물의 중력방향하중을 지지하는 주요 기둥의 주각부는 힌지로 가정되었다. 터빈건물의 삼면을 둘러 싸고 있는 수직방향 옹벽은 표고 88.81m에 고정된 등가의 수직방향 캔틸레버 부재로 고려되었다. 지진응답해석 결과, 터빈건물의 지배진동수는, 보조구역의 비틀림 응답성분을 포함한 축방향 병진모드가 0.95Hz에서 나타났고, 터빈건물 상부구조물의 전체 응답 모드가 2.5Hz에서 나타났다.

3. 파손내력평가

3.1 방법론⁽³⁾

(1) 하중조합

확정적 파손내력평가법에서, 평가지진이 유발하는 부재력은 정상운전하중과 조합되어 사용된다. 정상운전하중은 지진하중과 동시에 작용하며 모든 하중 조건에서 하중계수는 1.0이다. 즉, 평가지진에 대한 여유도를 결정할 때 사용되는 하중조합식에는 아무런 보수성도 내재하지 않는다.

(2) 구조응답

내진여유도 평가를 수행하는 과정에서, 평가지진에 대한 요구지진력의 계산은, 평가지진 자체에

큰 불확실성이 있을 수 있다는 사실을 감안하여 보수적으로 평가되도록 요구되고 있다. 즉, 평가 지진은 84% 비초과확률의 지반응답스펙트럼으로 정의되며 이 때, 구조물 전체의 각 위치에서 84% 비초과확률의 응답을 보증하기 위하여 각종 응답 파라메타에 추가적인 보수성을 가할 필요는 없다. 이상적인 경우, 감쇠 및 모델링과 관련된 파라메터들은 메디안 값을 사용하는 것으로 충분하다. 동적 모델에 이용되는 감쇠비로서 메디안 감쇠비를 사용하되 보수적으로 평가된 값이어야 한다. 구조물이 대규모 지진하중에 의해 큰 응력 상태에 놓일 경우, NUREG/CR-0098⁽⁴⁾에 제시된 범위의 감쇠비가 적당한 것으로 알려져 있다.

(3) 구조내력

해석의 결과로서 도출된 잠재 파손모드에 대한 구조내력의 평가를 위해서는, 재료 강도, 정적 내력, 그리고 비탄성에너지 흡수 능력에 대한 평가가 수행되어야 한다. 어느 정도의 비탄성에너지 흡수능력을 가진 설비라면, 극한 내력은 대략 98% 초과확률에서 정의되어야 하는 바, 이 목적을 충족시키는 방법으로서 재료 강도와 정적 내력을 다음과 같이 정의할 수 있다.

◦ 재료 강도

확정적 파손내력평가법에서 사용되는 재료강도는 실제 강도가 내진여유도평가에서 사용된 강도보다 작을 가능성이 거의 없을 만큼 충분히 보수적으로 평가되어야 한다. 시험 데이터가 주어질 경우, 대략 95% 초과확률의 재료강도가 사용되어야 한다. 시험 데이터가 없는 경우, 해당 규준에서 지정한 최소값을 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 재료 강도는 규준에서 지정한 값을 사용하였다.

◦ 정적 내력

일반적으로 구조 부재는 해당 규준에서 제시한 공식에 의해 구해진 하중보다 낮은 하중에서 파손될 가능성은 거의 없으므로 구조부재의 정적 내력 평가는 규준에서 정한 극한내력 접근법에 근거하여야 한다. 본 연구에서 사용한 강재의 정적 내력은, 내력감소계수를 고려한, 강도 한계상태에 근거하여 평가되었다.

◦ 비탄성에너지 흡수계수

구조물을 비롯한 거의 모든 공학적 설비들은 파손 전에 어느 정도의 연성거동을 보이는 것이 일반적이다. 지진동의 총 에너지 함량은 제한적이고 지진동 고유의 진동 특성 때문에 구조물의 연성거동은 구조물의 파손에 대한 내진여유도를 확보하는 데 필수적으로 고려되어야 할 사항이다. 내진여유도 평가 과정에서, 평가대상 구조물의 비탄성에너지 흡수능력 여부에 대한 평가는 필수적이다. 이 효과를 무시한 평가는 파손내력을 비현실적으로 낮게 평가하는 결과가 되며, 이 효과를 고려하지 않고서는, 과거 지진경험 사례에서 얻은 구조물의 성능과, 탄성해석으로 예측한 내력간에 어떤 상관관계를 찾는다는 것은 불가능하다.

(4) 내진 여유도 (Seismic Margin)

확정적 파손내력평가법에서 사용되는 평가지진은, 설계 지진보다 크게 정의되는 바, 이렇게 함으로써 평가 대상 구조물의 비탄성 거동 여부를 고려한 실제 내진성능을 얻게 된다. 그림 1은 국내 부지에서 가정된 평가 지진의 한 예이며 본 연구에서 사용되었다. 이 지진수준에서 대상설비는 고유의 극한 내력을 발휘한다고 간주되며 이 지진에 대한 요구지진력을 구하고, 개별 부재의 극한 내력을 계산함으로써 평가대상 구조물의 내진성능을 결정하게 된다. 내진여유도평가법에서 평가대상 설비의 내진성능은 고신뢰도-저파손확률-가속도 내력 (A_{HCLPF} High Confidence of Low Probability of Failure)으로 표현되며 다음과 같은 공식으로 얻어진다.

$$A_{HCLPF} = F_S \times F_\mu \times RLE$$

여기서 A_{HCLPF} : 최대지반가속도 내력 (g)

F_S : 내진강도계수

F_μ : 비탄성에너지흡수계수

RLE : 평가수준지진 (Review Level Earthquake)

내진강도계수는 구조물의 내진성능을 강도 측면에서 정의한 것으로서, 지진하중과 정상운전하중 (즉, 상시하중)의 조합 하중조건에서 구조물의 내력을 정량화하는 데 사용되는 개념이다. 즉,

$$F_S = \frac{C - D_{NS}}{D_S + \Delta C_S}$$

여기서 C : 부재의 극한내력

D_{NS} : 지진 외의 요구력 (정상운전하중)

D_S : 지진 요구력 (RLE 하중효과)

ΔC_S : 지진하중에 의한 극한내력 증가분

3.2 기존 구조물의 내진성능

터빈건물의 전체구조물에 대한 지진하중의 전달경로를 검토하고, 상부 강구조를 형성하는 주요 기둥 및 그 주각부, 사재 및 그 접합부, 그리고 보 부재에 대한 설계지진하중과 정상운전하중의 조합하중 대비 규준에서 정한 내력비를 비교, 검토하였다. 검토 결과, 터빈건물 보조구역의 축방향과 나란히 배치된 수직-브레이싱 시스템의 사재들이 내진 관점에서 가장 취약한 것으로 파악되었다. (그림 3 참조).

이 위치의 수직-브레이싱 시스템을 구성하는 사재에 발생하는 하중 및 관련 물성치는 다음과 같다.

- 설계지진에 의한 축하중, $P_{EQ} = 800 \text{ kN}$
- 평가지진에 의한 축하중, $P_{RLE} = 1742 \text{ kN}$
- 정상운전시의 축하중 (상시하중), $P_{NOL} = 139 \text{ kN}$
- 항복강도, $F_y = 248 \text{ MPa}$
- 인장강도, $F_u = 400 \text{ MPa}$
- 탄성계수, $E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$

사용된 사재는 H 형강(W10×54)으로서, 4개의 앵글을 볼트 체결하여 인접 기둥과 보에 연결된다. 앵글의 한 끝단은 사재의 복부와 연결되고, 다른 끝단은 가새 플레이트에 A325 고장력 볼트로 연결된다. 이 브레이싱 시스템의 잠재적인 파손모드 및 구조내력은 다음과 같다.

- 사재의 좌굴 : 1243 kN (강축방향 좌굴)
- 사재의 인장항복 : 2339 kN
- 연결 볼트의 활동 : 909 kN
- 연결부 앵글의 항복 : 1111 kN

본 구조물의 설계시에는 탄성해석 결과로부터 얻은 하중을 내력수정계수 2로 나누어 설계하중으로 사용하였으나, 성능평가 단계에서는 평가지진에 근거한 탄성해석 결과로부터 얻은 하중을 사용한다는 사실을 잊지 말아야 한다. 본 평가의 목적은 터빈건물의 붕괴 여부를 판단하는 것으로서 이는 대상 부지에서 발생 가능한 지진 수준에서 터빈 건물이 그 구조적 건전성을 유지하도록 함으로써 인접 안전관련 설비에 악영향을 미치지 않도록 하여야 하기 때문이다.

평가 결과, 연결부 연결 볼트의 활동이 지배 파손모드로 선정되었다. 여기서 압축측 사재의 좌굴은 인장측 사재의 인장 내력 때문에 구조물 전체의 파손모드를 형성하지 못한다. 또한 표 2에서 보듯이 사재의 인장 항복이나 연결부 앵글의 항복은 전체 구조물의 파손모드를 형성하지만 내진 성능 값이 연결부 활동 내력에 비해 상대적으로 높게 나타나므로 지배적인 파손모드가 아니다. 지배적인 파손모드는 앵글과 사재의 연결 볼트에서 발생하는 활동 파손으로 결정되었으며 이 파손모드와 관련된 구조물의 내진성능은 0.07g로 나타났다. 특히 이 파손모드에서는, 사재의 항복이 발생하기 전에 연결 볼트의 활동이 발생하므로, 비탄성 거동을 기대하기 어려우므로 본 구조 시스템은 충분한 내진성능을 발휘하지 못하는 결함을 가지고 있다.

3.3 개선된 구조물의 내진성능

내진설계에서 중요시 하는 두 가지 관점, 즉 부실시공 방지와 연성거동의 확보 여부는 내진안전성 평가에 매우 중요한 사안이다. 시공품질이 내진성능에 미치는 영향을 정량화하기 위한 노력은 경제개발협력기구(OECD) 원자력협력국 산하 전문가 그룹에서 활발히 논의되고 있으나 실무에 적용 가능한 방안은 아직까지 도출되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 시공

품질은 충분히 보장된다고 가정하고 연성거동의 확보 여부에 대해 논하고자 한다.

앞서 논의된 기존 구조물의 비탄성거동을 확보하기 위한 방안으로서 기존 사재의 부재치수보다 작은 치수의 대체 사재를 선정하여, 연결볼트의 활동에 앞서 대체사재의 인장항복을 유도하도록 하였다. 본 구조물의 성능 수준이 붕괴방지 수준이므로 좌굴의 발생이 구조물의 붕괴를 유발하지 않으므로 이러한 개선조치는 타당하다.

압축 사재의 좌굴 이후에 인장 사재의 항복이 유도되려면, 대체 부재의 연결부 활동내력이 사재의 항복내력보다 커야 하므로 기존의 사재에 대한 대체부재로서 W12×19의 H 형강이 선정되었다. 이 부재 및 연결부에 대한 잠재파손모드별 구조 내력은 다음과 같다.

- 사재의 좌굴 : 76.6 kN (약축방향 좌굴)
- 사재의 인장항복 : 803 kN
- 연결 볼트의 활동 : 909 kN
- 연결부 앵글의 항복 : 1111 kN

여기서 기존 구조물과 달리 사재의 항복강도가 연결부 활동 내력보다 작음을 유의하여야 한다.

평가 결과는 표3에 제시되어 있다. 이 표에서 보듯이 연결부 활동에 대한 내진성능은 0.07g로서 기존 구조물의 내진성능과 동일하지만, 연결부 활동이 발생하기 이전에 인장 사재에서 항복이 우선적으로 발생하므로 연결부 활동은 전체 구조물의 파손을 유발하지 않을 뿐만 아니라 사재의 비탄성에너지 흡수능력을 활용할 수 있게 된다.

지진에너지를 흡수하는 능력을 정량화한 비탄성에너지흡수계수는 대상 구조물이 파손에 도달하는 시점에서의 시스템 연성을 사용하여 계산될 수 있다. 시스템 연성은 구조물 강성의 손상이 급격하게 시작되는 시점에서 선정된다. 이 시점에 이르기까지의 연성거동이 실질적으로 건물의 붕괴에 대한 내진여유도를 제공하게 된다.

터빈건물 보조구역의 파손이 발생하는 시점에서의 극한 상대층변위 (story drift)는 보수적으로 0.7%로 가정하였다. 본 구조물은 다자유도 시스템이므로 단일 층의 연성 대신에 전체 시스템 연성을 계산할 필요가 있다. 시스템 연성은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\mu_{system} = \frac{\sum W_i \Delta_{\mu,i}}{\sum W_i \Delta_{e,i}}$$

여기서, W_i 는 각 층의 기여 중량, Δ_{μ} 는 파괴 시점에서의 층 변위, Δ_e 는 항복 시점에서의 탄성 층 변위를 나타낸다. 이 식으로부터 구한 시스템 연성을 이용하여 Newmark-Riddell 절차⁽⁵⁾에 따라 비탄성 에너지흡수계수를 얻을 수 있었다. 특히, 터빈건물의 주요 진동모드가 0.95Hz와 2.5Hz

에서 나타나므로 속도중폭구간과 가속도중폭구간에서 유효 진동수 및 유효 감쇠비를 구하고, 이에 대응하는 각각의 비탄성에너지 흡수계수를 구하였다. 이 두 계수의 평균값을 본 구조물의 비탄성 에너지 흡수계수로 사용하였으며 평가된 최종 비탄성에너지 흡수계수는 1.92이다.

한편 강도평가에 근거한 사재의 인장내력에 대한 내진안전율은 0.19로서 설계 내력을 만족시키지 못하고 있지만, 인장 사재의 항복에 따른 비탄성거동의 내진안전율은 1.92로서 두 안전율은 최종적으로 0.11g라는 향상된 내진성능 값을 보여주고 있다.

3. 논의 및 결론

본 구조물은 비안전등급 구조물로서 내진설계수준은 붕괴방지 수준이다. 흔히 강도 설계에 치우친 설계자들은 시스템 연성의 중요도를 간과하는 경향이 있다. 본 구조물의 경우도 설계단계에서 설계자는 보수적인 설계를 목적으로 사재 선택시, 좌굴 내력을 허용기준으로 보았다. 실제에 있어서 이와 같은 설계자의 보수적 의도는, 연결부의 활동 파손 (slippage) 이전에 사재의 인장 항복을 막고 구조 시스템의 연성거동을 차단함으로써, 결과적으로는 구조물의 내진성능을 크게 저하시키는 결과를 초래하고 있다. 이러한 구조물의 내진성능을 확보하기 위한 방안으로서 연결부의 활동 파손 이전에 사재의 인장항복을 유도함으로써 전체 구조시스템의 연성을 확보하는 방안을 검토하였다. 즉, 사재의 단면 치수를 줄임으로써, 기존의 0.07g의 내진성능을 57% 높은 0.11g라는 비교적 높은 내진성능을 확보할 수 있었다. 그러나 0.3g의 평가 지진에서 본 구조물이 구조적 건전성을 유지하기 위해서는 사재의 내력에 대응하는 연결부 활동 내력의 강화가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 가동원전 주기적 안전성평가 사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. K.H. Hwang, et. al., "Seismic Margin Study for Korean Standard Nuclear Power Plants", OECD/NEA/CSNI Workshop on Seismic Risk, Tokyo, Japan, August 10-12, 1999.
2. National Building Code of Canada, 1985.
3. J.W. Reed, R.P. Kennedy, et. al., "A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin" Revision 1, EPRI NP-6041, August 1991.
4. N.M. Hall and W.J. Hall, "Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants", NUREG/CR-0098, May 1978.
5. Riddell, R., and N.M. Newmark, "Statistical Analysis of the Response of Nonlinear Systems Subjected to Earthquakes," Department of Civil Engineering, Report UILU 79-2016, University of Illinois, Urbana, Illinois, August 1979.

표 1 : 기존 사재 및 대체 사재의 치수 비교

	부재 ID	단면적	회전반경(약축)	부재 길이
기존 사재	AISC W10×54 (H 250×255×14×14)	10,470 mm ²	60.96 mm	10.967 m
대체 사재	AISC W12×19	3,594 mm ²	20.879 mm	10.967 m
비율		2.9	2.9	1.0

표 2 : 기존 구조물의 내진성능

파손모드	HCLPF 내력	설명
사재의 좌굴	0.19g	파손모드를 형성하지 못하므로 좌굴에 대한 설계는 무의미함.
사재의 항복	0.19g	파손모드를 형성하나 임계 모드가 아님.
연결부 활동	0.07g	전체 구조의 내진성능 결정하는 최소 내력의 임계 파손모드 형성
연결부 앵글 항복	0.16g	파손모드를 형성하나 임계 모드가 아님.

표 3 : 내진보강 후의 내진성능

파손모드	HCLPF 내력	설명
사재의 좌굴	0.06g	압축부재의 좌굴에 이어 사재의 연성 거동이 보장되므로 파손모드를 형성하지 않음.
사재의 항복	0.11g	전체 구조의 내진성능 결정하는 최소 내력의 임계 파손모드 형성
연결부 활동	0.07g	연결부 활동 전에 사재의 항복이 발생하므로 파손모드를 형성하지 않음.
연결부 앵글 항복	0.16g	파손모드를 형성하나 임계 모드가 아님.

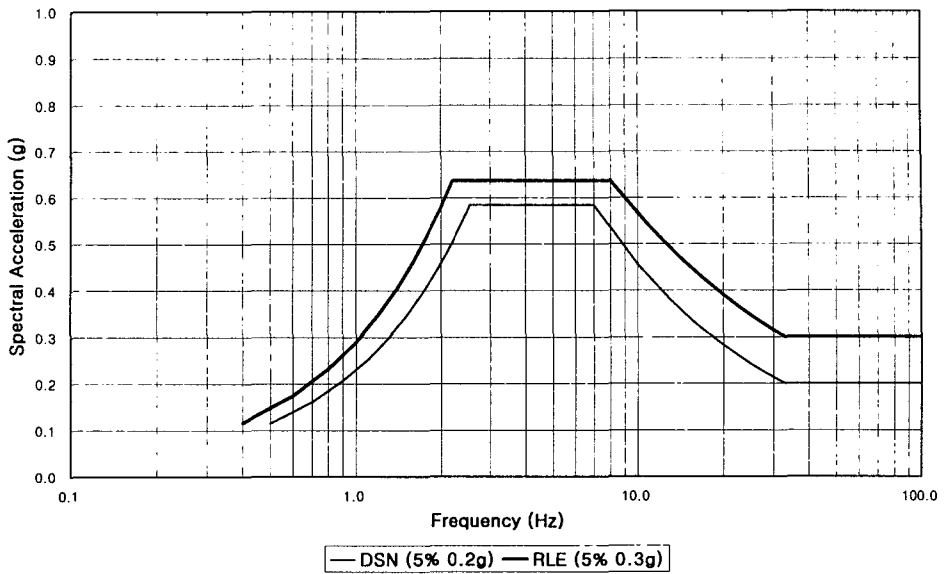


그림 1 : 평가지진과 설계지진의 비교

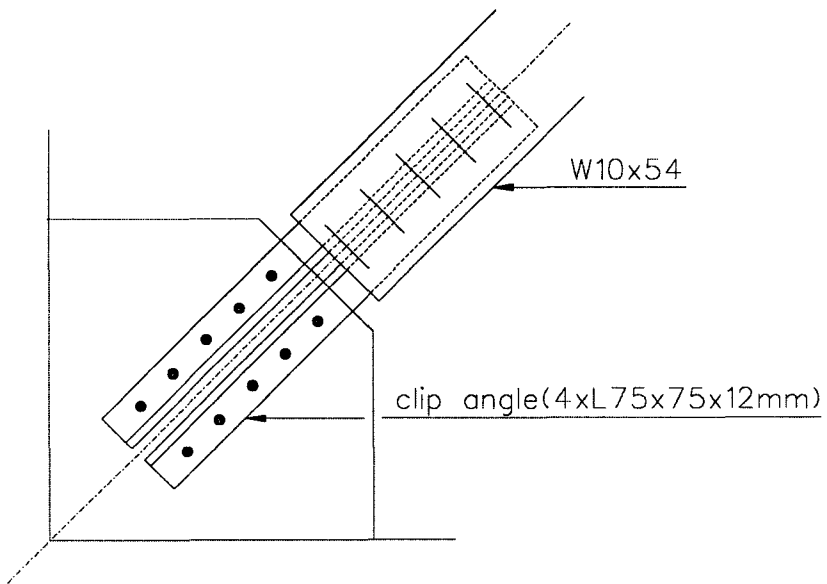


그림 2 : 사재 연결부 상세

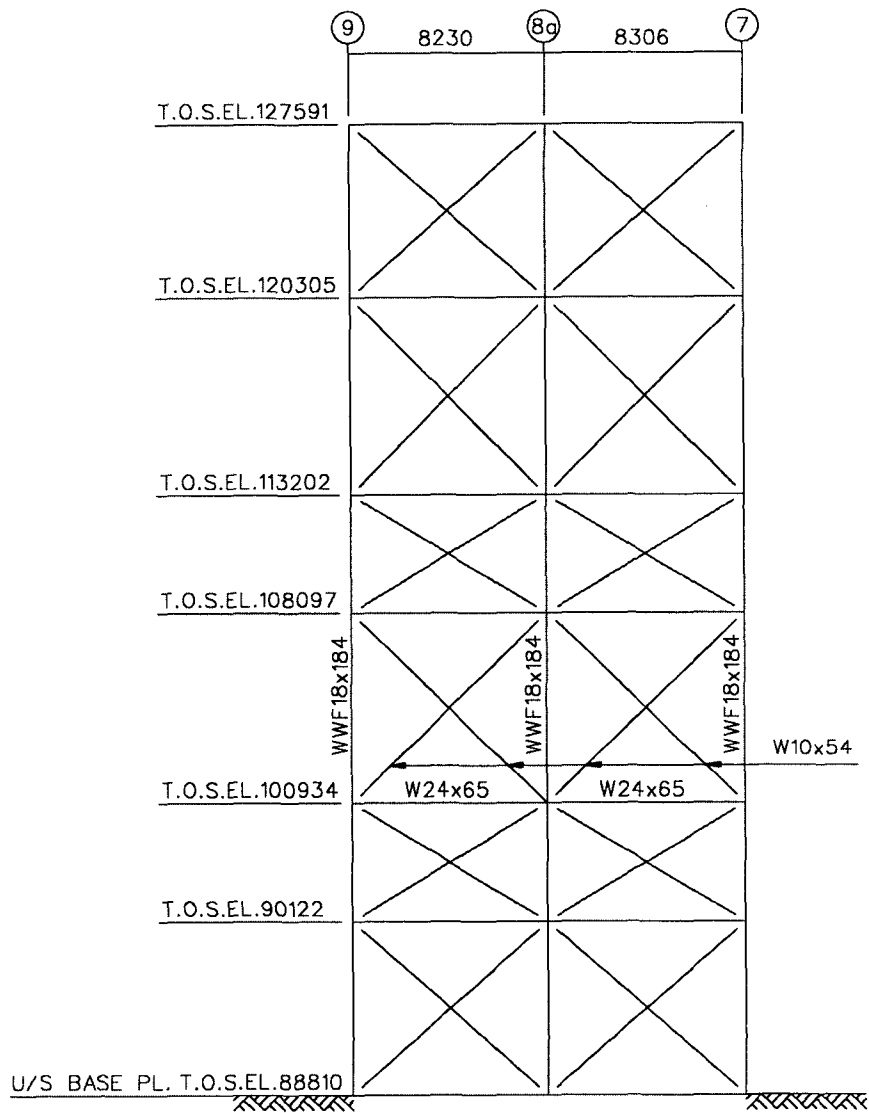


그림 3 : 터빈건물 보조구역 수직-브레이싱 시스템 입면도