

## 일본의 내진설계법 및 내진성능 평가법의 소개

### Introduction of the Building Standard Law of Japan and the Performance-Based Seismic Design Methodology

진 대 한\*      노 필 성\*\*  
Jun, Dae Han      Roh, Pil Sung

#### ABSTRACT

This manuscript introduces the Building Standard Law of Japan revised at 2000, June. Recently, The Building Standard Law of Japan was revised into the performance-based design format following the trend of international. The structural performance was evaluated for two limiting states; serviceability and soundness limit state, and safety limit state. The design earthquake forces were determined on the basis of seismic activities of the construction site, taking into consideration (a)characteristics of focal mechanism, (b)amplification by local surfaces geology, and (c)soil-structure interaction, in addition to the properties of the planned building including scale, configuration, foundation system, and structural characteristics.

#### 1. 서론

최근 건축물의 구조설계분야에서 성능에 기초한 공학에 따른 성능설계법의 도입과 개발이 세계적인 추세이다. 특히 건축물의 내진설계에서 성능설계법의 적용은 그 의의가 높은 것으로 간주되어 세계 각 국에서는 독자적인 설계규범을 정립해가고 있는 추세이다<sup>3-7)</sup>.

지진 다발 지역인 일본은 구조물의 내진설계에 관한 많은 기술들을 개발하고 발전시켜 왔다. 많은 지진 피해를 경험하면서 내진설계법은 수 차례의 개정이 이루어졌다. 그러나 일본의 내진설계법은 일본 고유의 지진발생 메카니즘, 건축구법, 사회·문화적인 환경 등의 영향으로 일본만이 지닌 독특한 내진설계법으로 인식되어, 오늘날 세계화 시대에 적극적으로 기여하지 못한 점이 일본 자체에서도 비판받아 왔다. 1995년 1월 17일 발생한 효고현남부지진(일명 고베지진)을 계기로 일본의 내진설계법은 새로운 변화를 모색하게 되었으며, 세계적 추세인 성능에 기초한 설계규범으로 개정하는 사회적 합의가 이루어지게 되었다. 이후 관련 기관들의 지속적인 연구를 거쳐 새로운 건축기준법이 1998년 6월 12일 공포되게 되었다. 후속 조치로서 관련 법령, 조례, 규칙 등의 개정을 동반하여 2000년 6월 1일부터 새로운 건축기준법을 골격으로 새로운 내진설계법이 시행되게 되었다.

여기서는 새로 개정된 일본의 건축기준법에서 내진구조설계에 관한 내용을 중심으로 그 배경과 목적을 알아보고, 내진설계법의 주요 골격을 이루는 ‘한계내력계산법’의 개요를 간략히 소개하여,

\* 정회원, 동서대학교 건설공학부 조교수

\*\*정회원, 동아대학교 건축학부, 겸임교수

일본의 내진설계 기술이 국내의 내진설계수법 개발의 참고자료로 활용되기를 기대한다.

## 2. 일본의 건축기준법과 구조설계법의 체계

일본의 건축기준법은 우리 나라와 유사하게 건축물의 계획, 설비, 방재, 구조, 내구성 등 새로운 건축물을 건설하는데 필요한 법적 규칙을 정하는 법령으로 되어 있다. 그 중에서 구조설계에 관한 부분은 극히 일부분이고, 건축기준법에 언급된 사항들은 기본적인 내용만으로 되어 있다.

일본의 건축기준법의 구성과 구조설계와의 관계를 요약 정리하면 표 1과 같다. 표에서와 같이 최상위의 법으로서 건축기준법이 있고, 이것을 구체적으로 시행하는 방법론으로 시행령, 고시, 통달, 조례, 행정지도 등으로 제시되고, 구조계산 및 설계에 관한 사항들은 각 관련학회의 기준, 설계지침 등으로 정하고 있다. 관련학회에서 발행되는 기준과 설계지침이 매우 다양하기 때문에 일본의 내진설계법을 전체적으로 이해하는데 어려움이 따른다.

새로운 건축기준법의 기본 체계는 성능항목은 '건축기준법'으로 명시하고, 성능기준은 '시행령'에 명시하며, 검증방법과 종래의 사양규준은 예시 사양으로 '시행규칙'과 '건설대신 고시'로 규정되어 있다. 즉, 화재시의 내화, 지진에 대한 구조안전 등을 성능항목으로 하여 건축법률로 정하고, 각각의 성능항목에 대응한 요구를 정하는 성능기준을 시행령에서 정하고, 성능기준에 대한 적합성을 판단하기 위한 검증방법 및 예시 사양은 시행규칙과 건설대신 고시로 규정하는 체계를 갖추고 있다.

## 3. 일본의 건축기준법과 구조설계법의 변천

일본 건축기준법의 변천과정을 살펴보면 대략 표 2와 같이 요약할 수 있다. 건축기준법의 개정은 명칭 변경과 함께 7차례 정도의 개정이 있었지만, 상위법에 해당하는 '건축기준법'을 제외한 '시행령' 이하의 규정은 이보다 훨씬 많은 개정과 수정이 있었다. 특히 대지진을 경험하면서 지진피해 경험을 바탕으로 구조계산 관련 규정들은 많은 개정을 거듭해 왔다고 볼 수 있다. 이들 개정 중 가장 중요한 것은 1981년의 신내진설계법과 1998년의 성능 검증법의 도입이라고 볼 수 있다.

신내진설계법은 컴퓨터에 의한 구조해석기술의 발달과 지진피해 경험을 토대로 얻어진 기술을 집약시켜 정리한 내진설계 수법이라고 말할 수 있다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 구조물의 동적특성과 지진동의 특성을 고려한 구조설계법이라고 볼 수 있다. 특히 1차(허용응력도 설계), 2차(보유수평내력 설계)로 나누어진 설계 개념은 그 동안의 탄성설계에 머무르고 있던 구조설계를 소성영역까지 확대한 설계법에 그 특성이 있다.

이번의 건축기준법 개정은 내진설계법의 기본골격은 신내진설계법의 구조계산법을 유지하면서, 건축물에 요구되는 성능에 관한 설계 개념의 도입에 그 특징이 있다. 성능설계법은 이미 밝힌바와

표 1 일본 건축기준법의 체계

	명 칭
1	건축기준법
2	건축기준법 시행령
3	건축기준법 시행규칙
4	건설대신 고시
5	건설성 주택국장 통달
6	지방자치단체 조례
7	특정행정청의 행정지도
8	관련학회의 기준, 지침, 시방서 등

같이 세계적인 추세이며, 일본도 그 흐름에 동반한다는 것을 의미하는 것이다.

표 2 일본의 건축기준법 변천 과정

년도	명칭	주요내용
1920	시가지건축물법·동시행령, 시행규칙 제정	허용응력도설계법, 6대 도시에만 적용
1924	시가지건축물법·동시행규칙 개정	佐野利己의 수평진도법 채택(수평진도 0.1)
1932	시가지건축물법·동시행규칙 개정	장기하중에 대한 허용응력도를 고려, 적재하중을 지진하중 산정시 고려
1947	일본건축규격건축3001'건축물의 구조계산' 제정	장기하중과 단기하중에 대한 허용응력도를 다르게 적용
1950	건축기준법·동시행령 제정	수평진도 0.2, 고층(5층이상)에서 진도 0.01씩 증가, 건물의 구조종별에 따라 진도를 경감, 지진지역계수(3지역) 도입
1963	건축기준법·동시행령 개정	건물의 높이 제한 철폐
1981	건축기준법·동시행령 개정 (신내진설계법)	보유수평내력, 구조특성계수, 진동특성계수, 지진충진단력분포계수, 형상계수(강성율, 편심율) 등 도입
1998	건축기준법·동시행령 개정	1981년 신내진설계법을 그대로 유지하면서 성능평가법(한계내력계산) 도입

#### 4. 개정 건축기준법

##### 4.1 개정 건축기준법의 의의와 성능설계법의 도입 배경

1998년 6월 12일 공포된 일본의 개정 건축기준법은 '건축확인 검사의 민간개방', '건축규제 내용의 합리화', '건축규제의 실효성의 확보' 라는 중요한 3가지 축을 기반으로 대폭적인 개정을 실시하였다. 개정법의 공포 후 관련되는 시행령, 시행규칙, 건설대신고시 등이 순차적으로 개정되어 2000년 6월 1일부터 전체적인 시행 규정이 완료되게 되었다. 이번에 개정된 건축기준법의 골격은 건축물에 요구되는 성능에 관한 설계 개념의 도입이라고 볼 수 있다. 구체적으로 신제품, 신기술 개발의 촉진, 해외 제품과 자재의 일본 시장 유입의 원활화를 도모하고, 설계의 자유도를 높이기 위하여 건축기준법을 근본적으로 개정하여 디자인, 구조방법, 재료의 선택 등을 자유롭게 하기 위해 현재의 시방서 형식의 건축기준법을 건축물에 요구되는 성능을 규정하는 방식으로 재구축 하는 것을 목표로 하고 있다.

건축기준법의 성능기준의 목적은 건축물에서 요구되는 각종 성능을 만족시킬 수만 있다면, 어떠한 재료나 시스템, 설계법, 검증법을 사용해도 무관하다는 것이다. 구조분야에서 구조성능이란 외적 작용과 외적 조건 또는 이들의 변화에 대하여 구조체에 나타나는 능력 특성이라고 할 수 있다. 이러한 관점에서 구조설계와 관련된 성능으로 여러 가지가 있겠지만, 우선 기능성(안전성, 신뢰성, 내구성, 쾌적성), 경제성(유지보존성, 시공성), 구조 의장성(구조미, 구조감각) 등을 들 수 있다. 이들 성능에 관한 항목들에 대하여 현시점에서 적용할 수 있는 부분도 있지만, 경우에 따라서는 성능 평가가 불가능한 분야도 많이 있다. 따라서 현 단계에서는 적용 가능한 범위까지 적용하는 것을 명문화시키는 것이다.

성능설계에 대한 기술적인 문제를 요약하면 다음과 같다.

①설계자는 건축구조물이 목표로 하는 구조에 관한 성능을 건축주와 사용자측의 요구를 감안하

여 설계한다.

②설계하고자 하는 구조물의 특성과 주어진 여러 가지 조건에 따라 적절한 계산법을 선택하여 구조물을 가 설계한다.

③가 설계된 구조물이 ①에서 설정된 목표성능을 보유하고 있는지를 확인한다.

(성능평가:보유성능의 추정과 목표성능의 달성 확인).

④목표로 한 성능과 보유하고 있다고 평가된 성능을 건축주와 사용자측에 알기 쉽게 설명한다 (성능표시).

이와 같이 성능설계란 목표로 하는 성능을 명확히 하여 그 성능을 만족하도록 설계와 평가를 수행하는 것이다. 여기서 목표성능을 달성하기 위한 계산법과 상세한 절차는 설계자의 판단과 선택에 맡기는 것이 기술자의 판단을 자유롭게 하고 자유도가 높은 구조설계가 가능하도록 하는 것이다. 성능표시의 한 예로서 표 3과 같이 지진하중에 대한 요구성능 매트릭스가 제시되어 있다.

표 3 지진하중에 대한 요구성능 매트릭스

하중 크기		L1	L2	L3	L4
재현기간		20년	100년	500년	1,000년
50년간 초과확률		92%	39%	9.5%	4.9%
주요 구조 등급	A	무피해(변형제한)	무피해(변형제한)	계속 사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)
	B	무피해(변형제한)	계속 사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)
	C	계속 사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)	
	D	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)		

#### 4.2 개정 건축기준법의 주요내용

개정된 건축기준법의 주요내용 중 구조설계와 직접 관련성이 적은 부분에 대해서는 참고문헌<sup>2)</sup>을 참고하고, 여기서는 구조계산과 관련된 사항만을 언급한다.

새로운 건축기준법에서 구조관계 규정 적용에 관한 흐름 도를 그림 1에 나타낸다. 구조관련 규정은 과거와 같이 '구조방법규정'(사양서 형식의 규정)과 성능기준에 입각한 검증방법으로서의 성격을 갖는 '구조계산규정'으로 구성되어 있어 과거의 건축기준법과 큰 차이는 없다. 과거의 구조규정은 기본적으로 소규모 건물에서는 '구조방법규정'만 적용되고, 그 외의 건축물에 대해서는 '구조방법규정'과 '구조계산규정'이 적용되도록 되어 있었다. 즉, '구조계산규정'은 '구조방법규정'에 적합하다는 조건을 전제로 한 것이고, '구조계산규정'만으로는 성능을 검증하는 방법으로서 완전한 것이라고 할 수 없었다. 따라서 새로운 건축법에서는 '구조방법규정'을 전제로 하지 않는 새로운 검

증방법을 모색하는 방법으로 개정이 이루어졌다. 구체적으로는 '구조방법규정'이 '내구성 등 관계 규정'과 '그 외의 규정'으로, '구조계산규정'이 '허용응력도계산(종래의 구조계산)', '한계내력계산', '건축기준법시행령 제81조 2의 계산'의 3가지 방법으로 나누어진다. 구조계산으로서 '한계내력계산' 또는 '건설대신고시기준(건축기준법시행령 제81조 2의 계산)'에 의한 경우에는 '구조방법규정' 중 내구성규정만이 적용되는 것으로 된다. 즉, '한계내력계산'과 '건축기준법시행령 제81조 2의 계산'이 성능형의 증방법으로서 적용된다. '내구성 등 관계규정'은 '구조방법규정'중 예외적으로 구조계산으로 대체할 수 없는 '구조설계에 관한 기본원칙', '건축물의 품질 확보', '내구성', '시공성', '방화성'에 관한 규정이다. '건축기준법시행령 제81조 2의 계산'에서는 시각이력해석법을 기본으로 하는 해석방법이 규정되어 있지만, 이 방법에 따를 경우에는 고도한 기술적 판단이 필요하므로 '건설대신의 인증'이 필요하게 되어 있다.

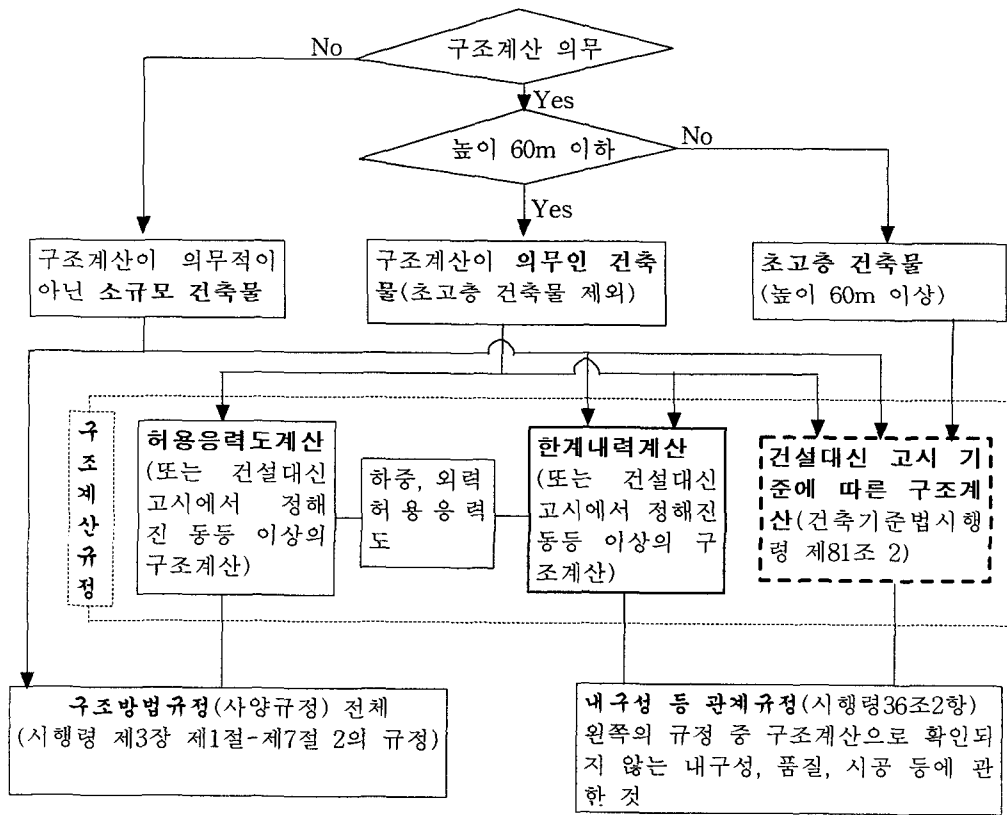


그림 1. 새로운 구조관계 규정 적용에 관한 흐름도

### 4.3 기존의 구조설계법과 한계내력계산법의 차이

개정 건축기준법에서 내진설계와 관련된 구조계산은 1981년도 개정 '신내진설계법'의 기본 골격을 유지하면서 구조물의 성능 검증 항목이 추가된 형식을 취하고 있다. 기존의 '신내진설계법'에서는 변형을 정확히 계산할 수 없었기 때문에 구조물에 요구되는 필요 내력을 계산하여 설계조건을 만족하도록 되어 있었다. 개정 건축기준법의 '한계내력계산'은 대규모의 폭설 및 폭풍에 대한 안전

성을 직접 검증하는 것과 동시에, 지진시 건축물의 변형을 계산하고 그 변형을 기준으로 필요한 내력을 계산하여 안전성을 확인하는 방법이다. 그러므로 '한계내력계산법'은 '내구성규정'을 제외하고는 기존의 구조계산법의 적용을 받지 않아도 된다.

또한 '한계내력계산법'은 설정된 지진동에 대한 건축물의 응답치를 구하여, 그 응답치가 한계치에 이르지 않았다는 것을 확인하는 것이기 때문에 건축물의 소성화에 따른 주기의 증가, 감쇠의 영향 등을 직접 응답평가에 고려할 수 있다. 따라서 면진구조, 제진구조 등에도 동일하게 적용할 수 있다. 그러나 기존의 구조설계법은 건물에 발생하는 응답 전단력을 설정하여, 그 힘에 대하여 건물을 설계하는 방법이므로 건물의 감쇠특성, 소성변형 후의 주기 특성, 변형특성을 직접 고려하는 것이 곤란한 부분이 많았다.

## 5. 한계내력계산

앞에서 언급된 바와 같이 한계내력계산법은 새로운 '구조관계 규정(성능설계 규정)'에서 구조성능을 검증하는 방법으로 적용될 수 있는 한가지 방법의 예라고 할 수 있다. 성능설계법의 구조성능 검증방법으로 한계내력계산 외에도 건설대신의 고시에 따른 '건축기준법시행령 제81조 2의 규정'에 따라 검증할 수 있지만, 시각이력해석 등을 필요로 하기 때문에 여러 가지 어려움이 따른다. 따라서, 초고층 건축물(높이 60m 이상)을 제외한 중·소규모의 건축물에서는 일반적으로 한계내력계산이 일반화 될 것을 염두에 두고, 한계내력계산법을 제안하고 있다.

시행규칙과 건설대신 고시에 명시된 한계내력계산에서의 내진성능 검증 흐름을 그림 2에 나타낸다. 한계내력계산에서는 기본적으로 손상, 전도, 붕괴의 방지를 지진하중뿐만 아니라 풍하중, 설하중에 대해서도 직접 검증하도록 규정되어 있다. 적재하중에 대해서는 손상 방지를 검증하는 것만으로 전도와 붕괴에 대한 안전성은 자동적으로 확보된다고 보고 생략된다.

그림 3에는 지진하중에 대한 골조구조의 안전성 검증에 대하여 한계내력계산법에 의한 구체적인 검증 예를 나타낸 것이다. 이하에 그 구체적인 방법을 설명한다.

(1)적용범위와 사용재료에 대한 확인이 필요하다. 한계내력계산은 원칙적으로 어떤 구조에 대해서도 적용할 수 있도록 되어 있다. 그러나 초고층 건축물(높이 60m 초과)에 대해서는 '내구성 등 관계규정'에 따르고, 또한 '건축기준법시행령 제81조 2'의 규정에 따라 건설대신이 인증하는 구조계산에 의하도록 되어 있다. 이 외에도 1차 모드가 지배적인 모드임을 보증할 수 있도록 유효질량비 규정에 대한 확인이 필요하며, 또한 탄성범위가 매우 작으면서 극단적으로 큰 지진응답변형을 일으킬 수 있는 건축물에 적용하는 것은 응답변형이 지나치게 증가될 가능성이 있으므로 주의가 필요하다. 구조재료에 관해서는 허용응력과 재료강도가 규정된 구조재료에 적용할 수 있으며, 규정에 없는 재료를 이용한 구조물(신재료, 면진구조, 제진구조 등)은 건설대신의 인증이 필요하다.

(2)자중, 적재하중은 실제 상황에 맞게 산정하고, 단면의 크기를 가정한다.

(3)손상 한계시, 안전 한계시의 건축물 기초 저면에서의 가속도 응답스펙트럼  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ 를 산정한다. 이것은 한계내력계산법의 중요한 특징 중에 하나이다. 즉, 건축물의 기초 저면에서의 지진동에 대한 건축물의 응답스펙트럼을 공학적 기반 위치에서의 지진동( $S_{a0}$ )과 대상지역의 지진활동도( $Z$ ),

표층지반의 증폭특성( $G_s$ )을 고려하여 산정한다.

(4)건축물의 하중-변형 관계의 산정 및 변형에 따른 건물 감쇠의 산정도 한계내력계산법의 중요한 골자이다. 실제적으로는 수평외력 분포를  $A_i$  분포로 하여 하중중분해석으로 건축물의 하중-변형관계를 산정하여, 규정에 따라 1자유도계로 단순화한다. 손상한계시의 감쇠는 등가점성감쇠 값으로 5%로 한다. 안전한계시는 변형의 정도에 따라 이력감쇠를 등가점성감쇠로 취급한다.

(5)손상한계시의 검증은 손상한계내력( $Q_d$ )일 때의 주기를 산정하여 지표면에서의 가속도응답 스펙트럼으로부터 대응하는 주기의 가속도  $S_{a1}$ 을 얻는다.  $Q_d$ 가  $S_{a1} \cdot M_d$ (손상한계시의 유효질량)을 상회하는 것을 확인한다. 또한 각층의 층간변위가  $1/200$  이하가 되도록 확인한다.

(6)안전한계시의 검증은 우선 최초의 안전한계 변위를 설정하여(보통 최대 층간변위가  $1/100-1/30$  일 때 건물의 대표변형으로 한다), 그 때 1층의 전단력  $Q_1$ 을  $Q_s$ (안전한계 내력)로서 구한다. 설정한 안전한계 변위시의 주기를 산정하여, 지표면에서의 가속도 응답 스펙트럼으로부터 대응하는 주기의 가속도  $S_{a2}$ 를 안전한계 변위에 따라 저감한  $S_{a2} \cdot F_h$ 를 얻는다.  $Q_s$ 가  $S_{a2} \cdot F_h \cdot M_s$ (안전 한계시의 유효질량)을 상회하는가를 확인한다. 이 방법에서 중요한 점은 설정한 안전한계 변위시의 각 부재의 응력, 변형이 부재의 내력, 한계변형을 상회하지 않아야 하고, 또한 설정한 안전한계 변위시의 각 부재의 응력, 변형을 보증하고 있다는 것을 확인하는 것이다.

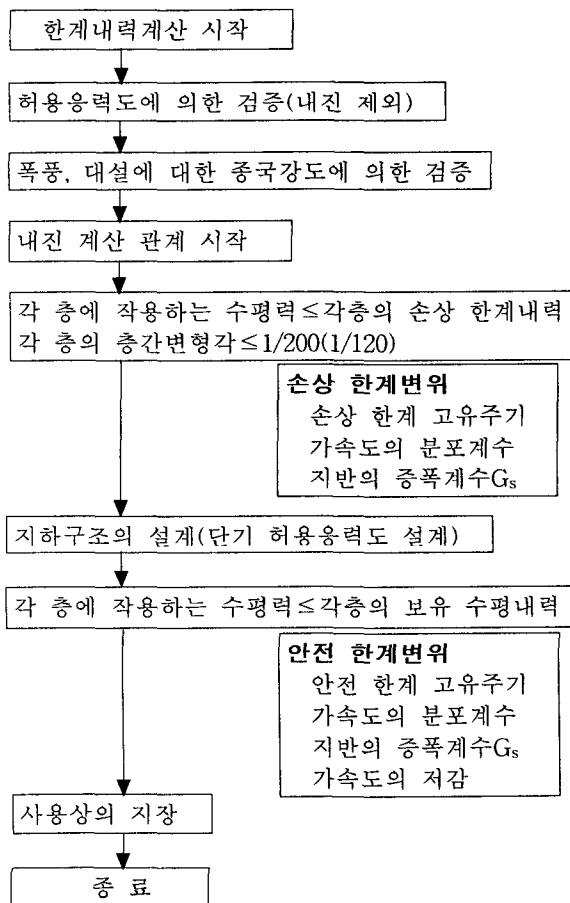


그림 2. 한계내력계산에서의 내진성능 검증 흐름

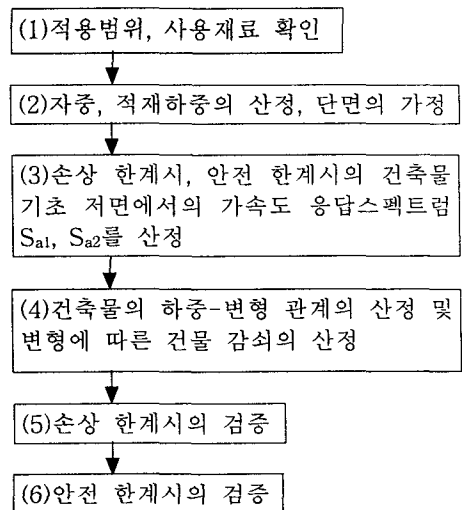


그림 3. 한계내력계산의 흐름

## 6. 결론

이상으로 2000년 6월 1일부터 시행된 일본의 건축기준법과 한계내력계산법에 대하여 알아보았다. 일본의 내진설계법은 다른 나라의 설계법에 비하여 매우 복잡하고, 그 내용을 이해하기 어려운 점이 많다. 그 이유는 일본이 가지고 있는 내진 설계기술의 독창성과 일본에서 빈번히 발생하는 지진피해의 영향이라고 볼 수 있다. 이번에 개정된 건축기준법은 세계적 흐름인 성능에 기초한 성능설계법의 개념에 입각하여 개정되었다. 그러나 기존의 내진설계법의 기본적인 틀을 그대로 유지하면서 응답의 평가기준을 성능설계에 맞추는 형식으로 개정된 것으로 이해할 수 있다. 현재까지 허용응력도 설계법과 보유내력 설계법의 2단계로 나누어진 내진설계규정이 성능검증 규정이 추가되면서 손상한계와 안전한계로 나누어 건축물의 성능을 평가하도록 한 것이 주요한 개정 사항이라 본다.

이번 건축기준법의 개정에서 건축구조물의 내진설계와 관련된 항목은 '한계내력계산법'의 등장이 주요한 골자이다. 본 논문에서 한계내력계산법에 관하여 좀 더 심도 있게 다루고자 하였으나, 일본의 내진설계법을 포괄적으로 이해하기 위해서는 건축기준법의 전반적인 이해 없이는 불가능하다고 생각되어 초점에서 벗어난 건축기준법을 다루게 되었다. 한계내력계산법에 대해서는 다음 기회를 빌어 소개하고자 합니다.

## 참고문헌

1. 전대환, “학술기사:일본의 개정 건축기준법과 한계내력계산법의 소개”, 전산구조공학 제 14권 제4호, 2001.12, pp.23-29.
2. 권기혁, “특집:최근 내진설계 개념의 발전방향-일본의 내진설계기준과 지침”, 콘크리트학회지 10권 5호, 1998. 10, pp.10-18.
3. SEAOC, “Performance Based Seismic Engineering of Buildings”, Vision 2000 Committee, Structural Engineering Association of California, Sacramento, California, 1995.
4. ATC, “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings : Volume 1, 2”, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1995.
5. BSSC, “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, ATC-33 Project, BSSC, FEMA 273, 1997.
6. BSSC, “NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, ATC-33 Project, BSSC, FEMA 274, 1997.
7. Chopra, A.K., “Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice-Hall, New Jersey, 2001.
8. 山内泰之 외, “特輯-限界耐力計算の理解と活用”, 建築技術, 2001년 4월
9. NPO法人建築技術支援協會, “改正建築基準法-構造の性能規定化-を解く”, 彰國社, 2001. 3