

신뢰성 이론과 구조설계



김 원 종*

1. 서 론

일반적으로 기술자들은 신뢰성이론을 매우 어렵게 생각하는 경향이 많으며, 확률론을 이용하여 내리는 결론을 크게 신뢰하지 않는 경향이 있다. 또한, 일부 학자들도 "Educated Guess(교육 받은 추측)"라는 말로 신뢰성이론 자체를 소홀히 하는 경향이 있다. 그러나, 신뢰성이론은 무의식 중에 우리 생활에서 많이 사용되고 있으며, 자연 현상을 이상화시키고 실제 현상을 제대로 표현하기 위하여는 확률론과 신뢰성 이론에 대한 이해가 필수적이라고 할 수 있다.

신뢰성이론은 자연계에서 나타나는 불확실한 현상 또는 향후 발생할 가능성이 있는 일들을 보다 체계적으로 추론하여 예측함으로써 미래에 발생할 가능성이 있는 위험요소를 제거하는데 그 목적이 있다. 이러한 관점에서 기술자들이 내리는 판단은 과거의 경험과 현재의 현상을 바탕으로 향후 발생할 가능성이 있는 일들을 예측하기

때문에 무의식 중에 신뢰성이론을 활용하고 있다고 할 수 있으며, 자연계에서 나타나는 현상을 이상화시키기 위하여는 확률론의 방법으로 접근할 수 밖에 없다고 보여진다. 이러한 현상은 구조설계업무도 예외가 아니라고 보여지는데, 현재까지는 구조설계 업무가 구조계산 업무에 많이 치중되어 왔다고 하여도 과언이 아니라고 생각된다. 구조계산과 구조설계의 차이는 기술자들의 경험이 얼마나 구조계산에 반영되어 불확실한 하중에 대한 저항능력을 높이고 또 다른 하중경로(alternate loading path)를 만들어 구조물의 안정성을 확보하느냐는 것으로 생각된다. 따라서, 향후 구조설계시에는 과거의 구조계산 개념에 머물러 있을 상황이 아니라 기술자들의 경험을 축적하고 정리하여 구조설계의 개념으로 바뀌어져야만 고부가가치를 창출할 수 있고 구조물의 안정성이 보다 확보된다고 보여진다.

영국의 Ronan Point 붕괴사건으로 인한 하중경로(loading path)의 재정립과 미국의 Kansas

* (주)대우엔지니어링 건축구조부장, 공학박사, 건축구조기술사

City Hyatt Hotel 발코니 붕괴사건시에는 발코니 적재하중을 초과하는 현상이 나타났지만 이러한 파괴양상을 실험에 의해 재현시키기는 매우 어렵다. 국내에도 예외는 아니어서 실험실에서 제작이 거의 불가능한 콘크리트 저장도 및 다양한 형태의 균열이 나타나지만, 여러가지 요인에 의하여 체계화되지 못하고 이론적으로 정립되지 못하기 때문에 이와 유사한 실수가 반복되는 것이라고 볼 수 있다. 따라서, 기술자들의 다양한 경험을 체계화시켜 정리하는 문제와 이를 유사한 업무에 적용시키는 능력이 매우 중요하다고 할 수 있다. 즉, 기술자들의 경험이 축적되고 체계화되는 과정을 겪어야만 기술이 확보되고 자연현상 및 구조물의 거동에 대한 변수가 나름대로 정립되어야만 경제적인 설계가 가능하다고 판단된다. 이는 미래에 발생할 가능성이 있는 일들을 보다 정확히 예측하기 위하여 신뢰성이론의 도입이 필요하고, 이러한 현상들을 이상화시키는 과정에는 확률론의 도움이 필요하다는 것을 의미한다. 그러므로, 신뢰성이론은 "Educated Guess (교육받은 추측)"가 아닌 자연현상을 이상화하기 위한 방법이라고 볼 수 있다.

2. 신뢰성이론과 확률론

앞서 밝힌 바와 같이 일상생활에 일어나는 현상들을 이상화(idealization)시키기 위하여는 신뢰성이론의 도입이 필요하고, 이를 뒷받침하는 확률에 대해 간략히 기술하고자 한다.

2.1 자연현상과 신뢰성 이론

확률론에 대한 이론을 적용한 결과는 신뢰성으로 나타낼 수 있고, 이는 경험적인 방법과도 연관되어 있으며, 확률론적이며 경험적인 방법은 모르는 사이에 일상생활과 밀접하게 연결되어 있다. 이러한 현상은 일상생활에서의 표현방법에서도 잘 나타나는데, 흔히 사용되고 있는 표현 중에는 애매모호한 부분이 많고 그러한 표현이 매우 다양하게 사용되고 있으나, 이러한 표현 속에는 확률론적이며 경험적인 이론이 포함되어 있다

는 것을 느끼지 못할 따름이다. 그 한 예로서 차를 몰고 가다가, "오늘은 이상하게도 이 길이 막히지 않네."라는 단순한 표현을 듣자. 이 말을 다르게 표현하면, "오늘은 이상하게도 이 길의 소통이 원활하네."라고도 볼 수 있는데, 이 표현에 함축된 내용을 수식으로 이상화(idealization)시켜 표현하면 다음과 같이 될 수 있다고 보여진다.

즉,

$$f(t_1, s_1, \dots) = a \quad (1)$$

f : 복잡한 정도를 나타내는 함수

t_1 : 시간

s_1 : 장소

a : 복잡한 정도를 나타내는 계수

("0"이면 차가 없는 경우이고, "1"이면 주차장인 경우를 의미한다고 가정한다.)

그 이외에도, f 라는 함수에 포함되는 변수로는 운전자와 운전자의 상태, 차의 종류 및 상태 등이 있으며, 이러한 단순한 표현에서도 매우 복잡한 함수와 이를 뒷받침하는 변수가 있는 것이다. 그런데, 위의 식 (1)을 이용하면 평소에는

$$f(\bar{t}, \bar{s}, \dots) = \bar{a} \quad (2)$$

로 나타낼수 있는 상태가 지금 시간에는 식(1)로 나타낼 수 있고, 여기서 운전자가 표현한 내용은

$$\bar{a} > a_1 \quad (3)$$

이라는 것도 포함되어 있다. 또한, 여기서의 a 도 주관적인 판단에 의해 좌우된다고 볼 수 있다.

도로 사정을 일레로 들었지만, 이러한 예들은 실제 생활에서 얼마든지 찾을 수 있다. 조금 더 복잡한 예를 든다면, 자동차 보험을 들 수 있다. 자동차 보험을 처음 가입하면, 운전수의 연령층, 가족형이나, 영업형이나 등의 구분, 차종, 연도,

자동차를 운전하는 거리, 지역 등의 많은 변수가 있다. 심지어는 자동차의 색깔(빨간색 스포츠카의 운전수는 매우 공격적인 성격이 있다고 함)도 변수로 작용할 수 있다. 그런데, 그 운전자가 일정기간이 지나 사고경력이 적거나 많게 되면, 처음 시작한 변수 외에 본인의 경력이 추가되어 본인의 사고 발생가능성에 따라 매년 보험요율이 갱신되는 것이다. 여기에는 처음에 고려되지 않았던 교통위반 기록까지 변수가 되는 것이다. 확률론에서는 이러한 분포를 Bayesian Approach라고 하는데, 초기의 일반 변수가 시간이 경과함에 따라 각 개인에 따른 특별변수로 계속 누적되어 기록되면서 자신의 함수가 새로 만들어지는 것이다.

우리의 생활과 자연현상에서 나타나는 현상 위에서 보듯이 시간과 경험이라는 변수가 추가되면서 새로운 함수를 만들어 내는 것이다. 따라서, 이러한 함수들을 이해하기 위하여는 분포와 이를 나타내는 분포함수에 대한 이해가 필수적이라고 할 수 있다.

2.2 확률과 분포 함수

분포함수는 자료들의 축적 형태에 따라 여러가지 형태로 나타낼 수 있다. 그 중 가장 많이 알려진 예는 정규분포(normal distribution)이다. 이 정규분포의 특성은 평균치 주위에 가장 많은 값이 몰려 있으며, 같은 평균이라 하더라도 표준편차가 적으면 몰려 있는 양이 그만큼 많아지게 된다. 그런데, central limit theorem에 의하면, 자료의 수가 많아지면 모든 분포 곡선은 정규분포에 가까워진다고 되어 있다. 또한, 모든 자료가 0보다 클 경우에는 로그정규분포(log-normal distribution)로 가정할 수 있으며, 삼각형 분포, 사각형 분포(그림 1 참조) 등으로 가정할 수 있다. 그러나, 이러한 여러가지 분포에 대한 확률함수는 다음의 두가지 특성이 있다.

$$p(x) \geq 0 \tag{4}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1.0 \tag{5}$$

단, $p(x)$ 는 확률 함수

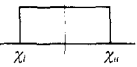
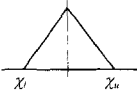
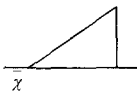
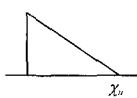
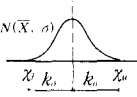
PDF	Mean Value,	cov., or
	$\frac{1}{2}(x_l + x_u)$	$\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{x_u - x_l}{\sqrt{3}} \right)$
	$\frac{1}{2}(x_l + x_u)$	$\frac{1}{\sqrt{6}} \left(\frac{x_u - x_l}{\sqrt{6}} \right)$
	$\frac{1}{3}(x_l + 2x_u)$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{x_u - x_l}{\sqrt{2}} \right)$
	$\frac{1}{3}(2x_l + x_u)$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{x_u - x_l}{\sqrt{2}} \right)$
	$\frac{1}{2}(x_l + x_u)$	$\frac{1}{k} \left(\frac{x_u - x_l}{k} \right)$

그림 1 여러가지 형태의 확률분포함수

이러한 확률함수는 자연계나 우리의 일상생활에서 발생하는 현상들을 수학적으로 표현이 가능하게 만들어 향후 예측이 가능하게 만드는 것이다.

확률함수의 분포와 관련된 일상생활에서 하나의 예를 든다면 아파트에서 사용되는 유리를 들 수 있다. 이 아파트의 유리의 두께는 $30\text{mm} \pm 3\text{mm}$ 로 3mm의 오차를 허용하고 있으나, 실제 유리의 두께를 측정하면 27mm 직후의 두께가 가장 많이 측정된다고 한다. 이런 경우는 예측치가 정규분포함수인데, 실제로는 삼각형 함수로 정의될 수 있으므로 품질관리에 보다 엄격한 기준이 적용되어야 한다고 볼 수 있다.

이러한 확률을 나타내는 방법은 자연현상과 관련되어 여러가지 형태의 분포함수로 가정할 수 있는데, 매시간 측정된 풍속 등을 바탕으로 최대치를 예측하는 방법도 이에 속한다고 볼 수 있다. 특히, 최대치를 예측하는 방법에서 계산되는 값은 건물의 수명, 경제성 등을 고려하여 최적치(optimum value)를 사용한다면, 이 최대치를 초과하는 크기의 풍압 등도 충분히 예상할 수 있다.

3. 신뢰성 이론과 구조설계

앞서 밝힌 바와 같이 자연계의 현상을 나타내기 위하여는 신뢰성 이론의 도입이 필요하고, 신뢰성 이론을 활용하기 위하여는 확률론을 충분히 이해하여야 한다고 판단된다. 이는 모든 구조물의 용도와 위치가 다르다는 것을 잊고 동일한 용도와 동일한 위치에 건설되는 것으로 가정하고 있으므로 현재에 사용하고 있는 건물보다 질적으로 우수한 구조물을 만들기 위해서는 신뢰성이론을 잘 활용하여야 한다는 사실을 의미하게 된다. 즉, 일반 건축물과 원자력발전소 같은 건물의 안전율은 달라야 한다고 생각될 수 있다. 외국에서는 경비행기 사고가 자주 발생하는데, (국내에서도 헬리콥터 추락사고가 발생하는 경우도 있음) 그 경비행기가 추락하는 장소가 일반건물이나 아니면 원자력 발전소와 같이 2차 피해를 유발하는가에 따라 구조물의 설계 및 시공이 달라져야 한다는 것이다. 경비행기가 햄버그가게에 추락하는 경우가 발생하였다고 하여서 햄버그가게 설계시의 안전율을 높이는 방법은 제시되고 있지 않지만, 원자력발전소는 그러한 상황이 발생하였을 경우의 대처상황이 상세히 설정되어 있어야 하며, 설계시에도 외부의 급작스런 하중을 포함한 모든 가능성에 대비하여야 하는 것이다. 경우에 따라서는 일반 건물을 원자력발전소와 같은 크기의 안전율을 갖는 건물로도 설계할 수 있으나, 그 결과는 너무 비경제적인 설계가 될 것이다.

아울러, 자연계에서 발생하는 하중을 이해하기 위해서도 신뢰성이론의 도입이 필요한데, 이는 지진규모의 예측, 설계 풍압의 설정 등에서도 확률 개념이 도입되어 있다. 건물이 완성되기 전 발생하는 외력에 의하여 발생하는 하중과 시공 중 하중에 대한 검토를 하게 된다면, 시공 중 발생하는 외력이 완성된 뒤에 발생할 수 있는 외력과 비교하여 적게 가정하여도 가능할 것이라고 보여진다. 즉, 비록 그 차이는 크지 않지만 10년에 한 번 정도 발생할 것으로 예측하는 크기의 하중과 100년에 한 번 정도 발생할 것으로 예측하는 크기의 하중의 크기는 다를 것으로 충분히

예측되지만 이 값들을 결정하려면 확률론의 개념이 도입되어야만 표현이 가능하다. 따라서, 구조물의 설계시에는 건물의 수명과 이에 따른 하중의 크기, 건물의 안전율과 용도 등에 따라서도 달리 설계되고 사용되어야 한다고 보여지며, 본 장에서는 구조설계시 나타날 수 있는 몇 가지 사항들을 확률론 및 신뢰성이론의 관점에서 정리하고자 한다.

3.1 안전율

구조물에 대하여 안전율을 단정적으로 이야기하기에는 매우 어려운 점이 많으나, 허용응력법에서도 안전율의 개념이 도입되어 있다. 예를 들어 AISC에서 사용하고 있는 1.67의 경우에는 40%의 과하중과 15%의 재료의 저장도를 가정하면 1.65가 되어 허용응력에서 사용하고 있는 1.67과 거의 유사하게 된다. 철근의 허용응력도는 단면의 경제성과 그 동안에 사용된 관용값을 고려하여 정한다(철근콘크리트 구조계산 기준 해설)고 되어 있다. 아울러 말뚝기초의 경우 안전율은 "극한하중/3.0"을 적용하되, "말뚝 재하시험 횟수가 일반적 기준(250개/1회, 구조물별 1회)보다 많이 실시되었고, 지반조건이 큰 변화가 없는 동일한 현장에서 많은 횟수의 시험이 실시되는 경우에는 지반공학 전문가의 판단을 얻어 안전율을 3보다 작게 할 수 있다." (구조물 기초설계기준)라고 되어 있다.

그런데, 이러한 안전율은 부재 각각의 안전율에 대한 개념이며, 건물 전체의 안전율에 대한 개념을 정립하는 것은 매우 복잡한 작업이다. 예를 들어 골조시스템에서의 보 1개의 휨파괴와 플랫슬래브 구조에서의 뚫림전단은 그 중요도가 다르며, 1개 부재의 파괴가 연쇄 붕괴를 유발할 수도 있는 것이다.

따라서, 안전율은 특별히 어떤 부재의 하나의 거동에 대하여 정의될 수는 있지만, 전체구조물에 대한 안전율은 매우 정의하기가 어려우며, 그렇기 때문에 각 부재의 각각의 거동에 따라 조합하는 방법 또한 매우 중요하다. 현재 사용하고 있는 강도설계법에서는 부재의 거동에 따라 강도

저감계수를 다르게 적용하게 된다. 그러나, 휨에 대해서는 매우 안전한 기초판이 전단에 매우 취약하게 설계됨으로 인해 추가하중을 적재하는데 어려움을 주거나 용도 변경을 어렵게 만드는 경향이 있다. 가장 이상적인 설계는 동일한 크기의 하중에 대하여 모든 부재가 똑같이 붕괴하는 것이라고 할 수 있다.

이러한 관점에서 실제 구조물의 안전율은 단정적으로 특정값을 정하기 어려운 사항이나 관련 분야에 종사하는 기술자들도 안전율에 대하여 확정치를 요구하고 있다. 경우에 따라서는 구조물 전체의 안전율을, 구조물을 구성하는 각각 부재의 안전율 중 최소치로 정의할 수도 있으며 또는 각 부재별로 중요도를 감안하여 결정될 수도 있다. 즉, 기둥의 전단파괴를 보의 휨파괴보다 더 중요하다고 보는 방법이 그 한 예인데, 이 분야에 대해서는 별도의 연구가 필요하다고 판단된다. 결론적으로 구조물 전체의 안전율을 하나의 숫자로 나타낼 수 있다는 것은 합리적이라고 볼 수 없다.

3.2 콘크리트 구조물에서의 신뢰성 이론

콘크리트 구조물은 습식구조물로서 시공상태 및 작업자들에 따라 결과가 매우 다르게 나타날 수 있다. 그 중 몇 가지 대표적인 예로 콘크리트 부재의 상관관계 및 콘크리트의 압축강도에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

3.2.1 상관관계

콘크리트 압축강도를 측정하기 위하여 표면 압축강도를 측정하거나 코어를 채취하여 압축강도를 측정할 경우에 해당부위에서 측정하거나 해당부위를 채취하는 것이 가장 바람직하다고 볼 수 있다. 그러나, 해당부위에 마감이 있거나, 철근이 복잡하게 얽혀 있을 때 조사를 제대로 하지 못하는 수가 있다. 그 경우에 인접 부위를 채취하거나 골랐을때 채취 부위와 조사부위의 관계를 상관관계(Correlation)로 나타낼 수 있다. 즉, 채취부위와 조사부위가 동시에 타설되고 거리가 가까우며 동일한 조건이라면 상관관계를 나타내는 상

관지수(correlation factor)는 1.0이라고 볼 수 있다. 그러나, 채취 부위와 조사부위가 타설된 시점이 다르며 거리가 멀고 다른 조건(예를 들어, 콘사가 장기간 중지되거나 다른 시멘트회사의 제품을 사용하는 경우)에서는 상관관계를 나타내는 correlation factor는 0.0이라고 가정할 때 실제 조건은 0.0~1.0사이에 존재한다고 볼 수 있다.

구조물을 신체와 비교하기도 하나, 크게 다른 점은 인체의 조직은 비록 인접하여 있어도 기능이 다를 수가 있으나, 콘크리트 구조물이 동일한 형태의 부재에서는 거의 같은 기능을 수행한다고 보아도 큰 무리가 없다고 판단된다. 그러므로, 코어 등 샘플 채취부위가 조사부위와 인접하여 있고 거의 동시에 타설한 콘크리트라면 상관 관계가 매우 높으므로 동일한 콘크리트라고 보아도 가능하다고 보여진다.

3.2.2 콘크리트 압축강도와 두께

현장에서 시공되고 난 뒤에 코어를 채취하여 압축강도를 측정하면, 압축강도가 상당히 다르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 국내 규정("국한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계기준 2.2.7.4(4)")에서는 "코어시험에서 나타난 어느 부분의 콘크리트에서 만일 3개의 코어 평균값이 적어도 f_c (콘크리트의 기준압축강도)의 85%에 도달하고, 그 중 어느 코어도 75%보다 작지 않으면 구조적으로 적합하다고 생각할 수 있다."고 있다.

이를 수식으로 나타내면,

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \geq 0.85f_c \quad (6)$$

$$\min\{x_1, x_2, x_3\} \geq 0.75f_c \quad (7)$$

가 되는데, 식(6)은 평균치에 대한 분포이며, 식(7)은 최저치에 대한 기준으로 콘크리트 압축강도가 흩어져 있지 않아야 된다는 것을 의미한다. 미국규준인 ACI 318-95에서는 콘크리트 배합에 사용되는 소요평균압축강도와 기준압축강도의 표준

편차(standard deviation)와 변동계수(C.O.V. : Coefficient of Variation)에 대한 명확한 언급은 없으나, 소요평균압축강도와 기준압축강도의 변동계수를 거의 유사하다고 가정하고 있다. 그 결과 콘크리트 품질에 대한 표준편차를 3,000~4,000psi (210~280kg/cm²)의 일반구조용 콘크리트에서는 표 1과 같이 품질을 분류하고 있다.

그러나, 국내에 건설된 구조물에서 콘크리트 코어를 채취하면 정규분포와 매우 다른 분포가 나타남을 알 수 있다(그림 2 참조). 즉, 상한치와 하한치에 많이 몰려 있으며 실제로 많이 몰려 있어야 하는 평균치 근처에는 압축강도가 많이 몰려 있지 않다는 것이다. 이 경우에는 콘크리트의 강도를 좋게 가정할 수 있는 근거는 없다고 보여진다. 이 결과를 자세히 지켜보면 콘크리트는 최대 압축강도를 높이는 것보다는 고른 압축

강도를 얻는 것이 훨씬 중요하다는 것을 알 수 있다.

3.3 철골구조물의 신뢰지수

철골구조의 한계상태설계법에서는 허용응력법에서 정의되지 않는 새로운 개념이 도입되어 있다. 즉, 신뢰지수(Reliability Index)에 대한 개념이 도입되었는데, 신뢰지수(Reliability Index) β 는 저항(R)이 하중(Q)보다 큰 상태, 즉, $R > Q$, $R/Q > 1.0$ 또는 $\ln(R/Q) > 0$ 인 함수에 대한 안전여유(margin of safety)를 나타낸다.

철골구조물은 건식공법으로 공장에서 생산된 부재를 현장에서 조합하여 접합하기 때문에 재료의 균일성은 어느 정도 확보되어 있다고 볼 수 있다. 따라서, 접합부위에 대한 허용응력도는 모재의 허용응력도 이상("강구조계산규준 2.3용접")으로 하지만, 접합부에 대한 신뢰지수(Reliability Index)도 모재의 신뢰지수보다 높게 설계하도록 되어 있다.

여기서의 신뢰 지수(Reliability Index)는 β 로 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{\ln(R_m/Q_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (8)$$

단,

$$V_R = \sigma_R/R_m$$

$$V_Q = \sigma_Q/Q_m$$

R_m : 평균 설계강도 (the mean of Resistance)

표 1 콘크리트의 품질관리 규정(ACI 318-95)

표준편차		변동계수	상태
300~400psi	210~280 kg/cm ²	10.0%	매우 양호한 품질관리
400~500psi	280~350 kg/cm ²	12.5%	양호한 품질관리
500~600psi	350~420 kg/cm ²	15.0%	보통의 품질관리
600psi 이상	420kg/cm ² 이상	15.0 이상	불량한 품질관리

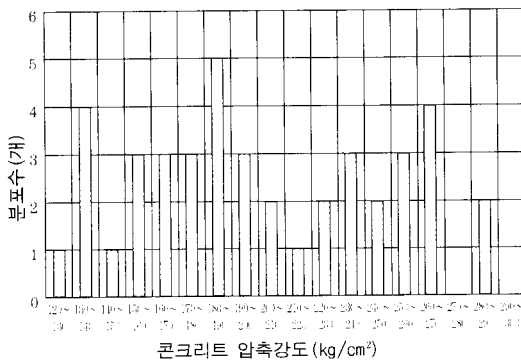


그림 2 콘크리트 코어 압축강도의 분포예(정규분포를 이루어야 하는 압축강도의 분포가 거의 사각형 분포를 이루고 있음)

표 2 철골구조물에서의 부위별 신뢰지수

하중 조합 Load Combinations	목표 신뢰 지수 Objective Reliability Index	
고정하중 + 적재하중	부재	3.0
	접합부	4.5
고정하중 + 적재하중 + 풍하중	부재	2.5
고정하중 + 적재하중 + 지진하중	부재	1.75

- Q_m : 평균 소요강도 (the mean of Load)
- σ_R : 설계강도의 표준편차 (the standard deviation of Resistance)
- σ_Q : 소요강도의 표준편차 (the standard deviation of Load)
- V_R : 설계강도의 변동계수 (the coefficient of variation in Resistance)
- V_Q : 소요강도의 변동계수 (the coefficient of variation in Load)

위의 식을 분석하여 보면, β 가 크다는 것은 안전에 여유치가 많다는 뜻이며, 궁극적으로 그만큼 안전하다는 것을 나타내게 된다. 식 (8)에서 나타난 것처럼 β 를 증가시키기 위하여 평균소요강도에 대한 평균설계강도의 비를 증가시키는 방법이 거론될 수 있다. 그러나, 이 경우에는 평균소요강도에 대한 평균설계강도의 비에 대한 로그만큼 증가시키게 되나, 이 비율을 증가시킨다는 것은 과다설계를 의미하게 된다. 그 이외에 안전지수를 높이는 방법으로는 설계강도와 소요강도의 변동계수를 줄이는 방법인데, 이 방법은 하중과 재료의 불확실성을 줄인다는 것을 의미하게 된다. 여기서, 하중의 불확실성은 장기간의 관측과 보다 정확한 수학적 모델의 정립으로 줄일 수 있으며, 재료의 불확실성은 재료의 품질을 균일화함으로써 줄일 수 있다. 또한, 위의 식 (8)은 하중이 불확실하면 과다설계가 불가피하다는 것을 보여준다.

3.4 지진 하중

동적해석에 의한 지진 하중을 적용시에는 보통 El Centro 지진의 남북방향 기록을 사용한다. 이 El Centro 지진은 1940년 5월 18일에 발생한 지진으로 지역의 지진센타에서 측정된 기록으로 이 기록은 0.02초 간격으로 가속도를 측정 한 결과 341cm/sec^2 (0.34G, $1G=980\text{cm/sec}^2$)의 최대가속도를 기록하고 있다. 그러나, 다른 지역에서 구조물을 설계하는데 있어 동일한 지진이 발생할 가능성은 없음에도 불구하고, 구조물의 응답을

구하는데 많이 사용하고 있다. 1971년 2월 9일 PACOMIA DAM에서 기록된 San Fernando 지진은 수평최대가속도가 1.1G로써 크기로서는 최대가 된다. 멕시코 지진은 그 나뉠대로 오랜 시간 (3분) 동안 측정된 기록이 있다. 그러나, 지금까지 측정된 지진기록이 반복되어 나타난 적은 한 번도 없었는데, 이는 1979년 Imperial Valley에서 발생한 지진은 1940년 발생한 El Centro 지진과 동일한 단층지대 (Fault)에서 발생하였으나, 크기 및 거동이 전혀 다르다. 따라서, 우리가 많이 사용하고 있는 응답 (response spectrum)은 특정지진을 하중으로 입력하여 각 주파수마다 구한 최대 변위, 최대 속도 및 최대 가속도이므로 여기에서 예측되는 값들이 향후 그 지역에 발생하는 지진에 대하여 최대 변위, 최대 속도 및 최대 가속도를 나타낸다고 할 수는 없다.

따라서, 어떤 확정치의 해를 기준으로 설계하기 보다는 향후 발생가능한 지진의 크기와 이에 대한 최대가속도, 속도 및 변위를 변동함수로 나타내는 것이 보다 정확하다고 할 것이다. 지반의 움직임을 변동함수로 나타내기 위하여는 무작위진동 (random vibration)의 기본 이론이 도입되어야 하는데, 이는 어떤 시간 t 에 대한 값은 측정시마다 달라도, 그 측정치들은 어떤 분포를 이루고 있다고 가정하는데에서 출발한다. 즉,

$$\mu(x) = E[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \tag{9}$$

$$E[x^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2p(x) dx \tag{10}$$

단, $\mu(x)$: $x(t)$ 의 평균치
 $E[]$: 기대값

라고 가정한 뒤, $x(t)$ 에 대한 값들이 어떤 특성을 가진다면 이들의 특성들을 이용할 수 있는 것이다. 예를 들어 무한히 반복되는 진동의 경우에만 시간구간마다 측정되는 값이 어떤 분포를 이룬다고 가정하는 것이다. 여기에서 가장 많이 이용되는 분포가 가우스분포 (gaussian distribution,

정규분포, normal distribution)인데, 이는 무한히 반복되는 운동의 경우에는 이러한 가정을 하여도 된다(central limit theorem). 만약, 이러한 특징만 이용할 수 있다면 정규분포에 대하여 수학적으로 사용할 수 있는 공식을 다 이용할 수가 있다. 그 중에서도 정규분포는 평균과 표준편차가 중요하므로 이 두가지 성질만이라도 정규분포를 나타내는 운동을 Weakly Gaussian이라고 하는데, 이는 모든 성질이 정규 분포를 나타내는 Strictly Gaussian에 대한 대비 개념으로 사용된다. 만약 이들 $\chi(t)$ 의 평균이 0이고 표준편차가 cm/σ^2 이라면, 식 (9)과 (10)는

$$\mu = E[\chi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \chi p(\chi) d\chi = 0 \quad (11)$$

$$E[\chi^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \chi^2 p(\chi) d\chi = \sigma^2 \quad (12)$$

가 된다. 이는 각 시간마다 측정되는 값들이 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 정규분포를 이루고 있다고 가정하는 것이다. 그 경우 다음과 같은 관계식을 이용하여 강도(Intensity)의 개념을 도입할 수 있는 것이다, 즉,

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (13)$$

가 된다. 여기서 $S(\omega)$ 를 Power Spectral Density라고 하고, $R(\tau)$ 를 Auto-Correlation Function이라고 하는데,

$$\begin{aligned} R(\tau) &= E[\chi(t)\chi(t+\tau)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \end{aligned} \quad (14)$$

의 관계가 있다. 식(12)과 식(14)를 비교할 때 식(12)은 식(14)에서 $R(0) = \sigma^2$ 라는 것을 알 수 있는데, 이는 $\chi(t)$ 의 값들과 $\chi(t+\Delta t)$ 의 값의 상관관계를 나타내는 Auto-correlation Function의 값은 0으로 나타나게 되므로 이들 값은

전혀 상관관계가 없고, 단지 시간 t 에서의 값 $\chi(t)$ 의 평균과 표준편차만이 각각 0이며 표준편차가 σ^2 이라는 것을 의미하게 된다. 즉, $t+\Delta t$ 에서의 값 $\chi(t+\Delta t)$ 는 t 에서의 값 $\chi(t)$ 에 전혀 영향을 받지않는다는 것을 의미하게 된다. 이러한 운동을 백색 잡음(white noise)라고 하는데, 이 운동의 특징은 모든 주파수 구간에 관계없이 PSD(Power Spectral Density)는 항상 일정한 값을 갖게 된다. 이 백색잡음의 경우는 만약 어떤 운동이 백색잡음의 거동을 나타낸다면, 측정치들의 값이 정규분포를 나타내므로 정규분포의 특성을 이용하여 해석할 수 있다. 그러나, 이러한 백색잡음(white noise)을 실제 지진의 운동에 이러한 이론을 적용하기에는 몇가지 문제점이 있다. 우선, 지진운동에서 발생한 값들을 모두 합하면 0이 되지 않는다는 것과 지진운동은 시간이 지남에 따라 운동이 줄어들기 때문에 무한한 운동으로 가정할 수 없다는 것이다. 그러나, 이러한 문제점은 지진이 측정되는 구간이 0.02초로 매우 짧는데 비하여 측정시간은 적어도 50 초 이상 되므로 한번 측정에 2000개 이상의 자료가 구해지기 때문에 이들의 분포를 파악하여 확률이론을 적용함으로써 향후 발생할 수 있는 최대치를 예측하는데 사용될 수 있을 것이다. 특히, 지진의 운동을 시간에 관련된 함수와 시간과 무관한 부분으로 구분한 뒤, 시간과 관련이 없는 부분이 정규분포를 나타낸다고 가정한 뒤에 지진의 운동을 해석하는 방법의 사용이 가능하다면 시간에 따른 변동을 보다 효과적으로 나타낼 수 있다. 그 결과 지진의 운동은 다음과 같이 구분될 수 있으며,

$$\ddot{X}_g(t) = I(t) Y(t) \quad (15)$$

단,

- $\ddot{X}_g(t)$: 시간별로 나타나는 지반운동
- $I(t)$: Intensity Envelope(시간에 따라 변함)
- $Y(t)$: 백색 잡음 거동을 나타내는 함수

또한, 지반운동에 Power Spectral Density $S_{x_k x_k}(\omega)$ 는 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$S_{x_k x_k}(\omega) = I^2(t) S_{yy}(\omega) \tag{16}$$

여기서, $S_{yy}(\omega)$ 는 주기함수에 의한 Power Spectral Density이고, $I^2(t)$ 는 시간에 따라 변동하는 함수가 되므로 그 결과 $S_{x_k x_k}(\omega)$ 는 시간에 따라 변동하는 Power Spectral Density가 된다. 이를 Evolutionary Power Spectral Density라고 하고, $I(t)$ 는 학자들에 따라 의견이 다르나, 다음과 같은 의견들이 있다.

$$I^2(t) = \begin{cases} I_0(t/t_1)^2 & t < t_1 \\ I_0 & t_1 < t < t_2 \\ I_0 e^{-ct} & t > t_2 \end{cases} \tag{17}$$

또는,

$$I(t) = C_n [e^{-c_1 t} - e^{-c_2 t}] \tag{18}$$

또는

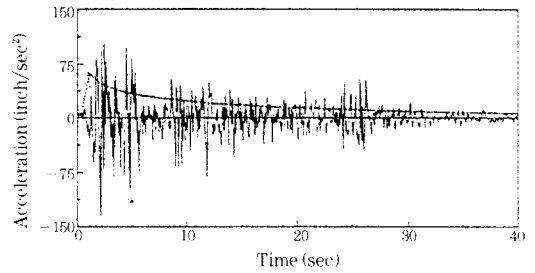
$$I(t) = at^b e^{-ct} \tag{19}$$

로 두기도 한다.

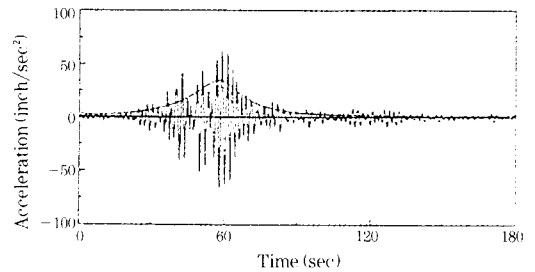
단, 여기서 I_0, c, c_1, c_2, a, b 는 계수를 나타내고, t_1, t_2 는 각각 시간을 나타낸다.

이 모든 방법 등의 특징은 Intensity Envelope가 초기에는 증가하다가(초기 증가구간) 어느 시점에서 일정한 값을 가지며, 그 후에는 일정한 값을 가지다가 다시 감소한다는 것이다. 경우에 따라서는 중간에 일정한 값을 가지는 부분이 없기도 하며 경우에 따라서는 특정구간이 다른 구간에 비하여 짧기도 하고 상대적으로 길게 되기도 한다(그림 3 참조).

이러한 기법은 주식시세를 분석하는데에도 이용될 수 있는데, 주식시세는 시간과 더불어 꾸준히 증가하는 부분과 주기함수의 성질을 갖는 부분으로 구분한 뒤 주기함수의 성질을 갖는 부분에 대하여 확률이론을 적용할 수 있는 것이다.



(a) El Centro 지진 기록 (1940 N-S 방향)



(b) 멕시코 지진 기록(1985)

그림 3 지진기록과 Intensity Envelope (지진기록과 지진기록을 Intensity Envelope와 백색잡음으로 구분할 경우에 표현되는 Intensity Envelope를 진하게 나타내었음)

3.5 풍하중

풍하중은 대표적인 최대치를 예측하기 위하여 극한 분포(extreme distribution)를 사용한다. 만약 매시간구간마다 측정되는 풍하중 X 를 무작위 변수(random variable)라 두고 X 에서 n 개의 값이 선택되어지면,

$$Y_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) \tag{20}$$

라 정의된다.

그 결과 Y_n 에 대한 분포함수를 구할 수 있는데, 이 분포함수는 n 이 증가함에 따라 최대치에 대한 누적확률함수(cumulative density function) $F_{Y_n}(y)$ 이 특정한 값에 접근하게 된다. 또한, 최

대치의 분포는 초기 무작위변수 X 에 따라 좌우되는데, X 가 정규분포(normal distribution)이면 Type I 이 되고, 로그정규분포(log-normal distribution)이면 Type II의 거동을 나타낸다. 대부분의 국가(한국 포함)에서는 현재 Type I 분포를 따르고 있으며, 일부 국가에서는 Type II의 분포를 사용하기도 한다. 따라서, 예측되는 건물 수명이 50년 이상되는 건물이나 시공중 단기간에 발생하는 하중에 대비하는 경우에는 최대치분포에 대한 확률이론을 적용하여 최대치를 달리 설계할 수 있는 근거는 있다고 보여진다.

4. 결 론

신뢰성이론과 확률론을 매우 어려운 분야로 생각하고, 기술자들도 어떤 특정한 값을 원하는 경우가 많으며 확률론에 의하여 내리는 결론을 신뢰하지 않는 경우가 많다. 그러나, 실제 생활에는 경험을 바탕으로 판단을 내려야하는 경우가 많고, 구조설계 분야도 예외는 아니다. 특히, 지진, 바람의 자연계 현상을 바르게 해석하기 위하여는 확률론에 대한 올바른 해석이 필요하며, 구조물의 용도 및 예상 수명에 따라 안전율도 새롭게 정립되어야 한다. 국내에서의 건설현장과 외

국의 건설현장은 그 조건이 매우 다르다고 할 수 있으며, 그 결과 외국에서 사용되고 있는 계수들이 국내 실정과 맞지 않는 경우도 있다고 보여진다. 따라서, 신뢰성이론을 귀찮고 복잡한 분야로 취급할 것이 아니라 기술자들의 경험과 자연현상을 제대로 파악하기 위하여는 필요한 학문이므로 기술자들의 경험을 체계적으로 정립하여 새로운 설계 개념을 도입함으로써 경제적인 설계가 가능하도록 하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Salmon, C. G. and Johnson, J. E, "Steel Structures-Design and Behavior", Harper-Collins College Publishers, 4th ed., 1996
2. PCA, "Notes on ACI 318-95", Portland Cement Association, 6th ed. 1996
3. Ang, A. H-S and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Vol. 1, John Wiley & Sons, 1975
4. Ang, A. H-S and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Vol. 2, John Wiley & Sons, 1984