



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

구조물의 확률론적
위험성 평가를 위한 기초연구



2012년 2월

부경대학교 일반대학원

토 목 공 학 과

임 호 진

공학석사 학위논문

구조물의 확률론적
위험성 평가를 위한 기초연구



2012년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

임 호 진

임호진의 공학석사 학위논문을 인준함.

2012년 2월 24일



주 심 공학박사 김 명 식 ㉡

위 원 공학박사 장 희 석 ㉡

위 원 공학박사 이 환 우 ㉡

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구내용 및 방법	6
2. 이론적 배경	7
2.1 구조신뢰성해석의 기본 정의	7
2.2 구조신뢰성해석 기법	11
2.2.1 Level I 신뢰성해석	11
2.2.2 Level II 신뢰성해석	15
1) MVFOSM(Mean Value First Order Second Moment)	15
2) AFOSM(Advanced First Order Second Moment)	18
3) Rackwitz-Fiessler 변환법	20
2.3 신뢰성 설계법	22
2.4 응답면기법	23
2.5 계층분석법(AHP)	26
3. 계층분석법(AHP)을 이용한 확률변수 결정	28
3.1 쌍대비교(Paired comparison)	29
3.2 변동성에 대한 상대적 중요도 산정	31
3.3 일관성지수 검토	32
3.4 확률변수 결정	33
4. 대상구조물의 수치해석	34
4.1 해석대상의 제원 및 물성치	34

4.2 응답면기법을 통한 한계상태함수 정의	36
4.3 Level II 신뢰성해석 결과 및 고찰	39
4.4 Level I 신뢰성해석 결과 및 고찰	42
5. 결론	44
부 록 I 계층분석 과정의 설문조사 자료	45
참고문헌	48
감사의 글	51



그 립 목 차

그림 2.1 파괴확률의 개념	9
그림 2.2 신뢰도지수와 목표신뢰도지수	13
그림 2.3 Level I 신뢰성해석 순서도	14
그림 2.4 신뢰도지수의 확률적 개념	17
그림 2.5 응답면기법을 이용한 AFOSM 순서도	19
그림 2.6 응답면을 구하기 위한 구조해석점의 위치	24
그림 3.1 계층분석법에 사용된 설계변수	28
그림 4.1 대상 교량의 횡단면도	34
그림 4.2 구조해석점의 위치	36
그림 4.3 처짐에 대한 신뢰도지수 수렴결과	39
그림 4.4 콘크리트 응력에 대한 신뢰도지수 수렴결과	40

표 목 차

표 2.1 신뢰도지수에 대한 파괴확률	17
표 2.2 결정론적 설계법과 신뢰성 설계법의 비교	22
표 3.1 확률변수 결정에 대한 설문조사 개요	28
표 3.2 쌍대비교 기본 척도	29
표 3.3 설계변수에 대한 설문조사 양식	30
표 3.4 설계변수에 대한 중요도 산정 결과	31
표 3.5 평균무작위지수(Random Index)	32
표 3.6 각 설계변수들에 대한 일관성비율	33
표 4.1 콘크리트 물성치	34
표 4.2 확률변수의 평균과 표준편차, 확률분포	35
표 4.3 민감도계수 및 신뢰도지수와 파괴확률	40
표 4.4 부분안전계수	42
표 4.5 허용치와 설계검토치의 비교	43

Basic Study on Probabilistic Risk Assessment Structural Safety

Ho-Jin, Lim

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

Most of civil engineering structures are designed by the deterministic method. This method has many problems as experience is the only tool to identify the traits of the material. It is required to design in a probabilistic method, which practically reflects the characteristic of material as much as possible. The subject of this study is the risk assessment about the 30m standard I-shaped PSC beam which is the most common PSC beam. Random variables are the wobble friction coefficient(μ) and the curvature friction coefficient(k) which are determined by AHP(Analytic Hierarchy Process). This study conducted the reliability analysis on the deflection and tensile stress of concrete using the RSM(Response Surface Method). In this paper, it showed that the reliable conclusion could be drawn from using the random variable which was decided through not only the result of estimation about the risk assessment of the structure but also the method of AHP(Analytic Hierarchy Process).

keyword: PSC beam, Probabilistic analysis, Reliability analysis, RSM(Response Surface Method), AHP(Analytic Hierarchy Process)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 대부분의 토목구조물은 확정론적으로 설계가 이루어지고 있다. 대표적인 확정론적 설계법인 허용응력 설계법은 탄성해석을 통해 하중으로부터 응력을 계산하고, 계산된 응력들에 안전율을 곱하여서 그 값들이 항복이 일어나는 파괴점에서의 한계응력보다 작은지를 확인하는 것이다. 이러한 확정론적 설계법은 재료의 특성을 경험에 의존하여 판단하기 때문에 많은 문제점을 가지고 있다(박문재 등, 2009). 반면 확률론적 설계법은 재료가 가지는 확률적 특성이 최대한 실질적으로 반영되는 설계법이다. 따라서 현재는 확률론적설계법이 요구되고 있는 실정이다.

구조물이 완성되어 사용에 들어가면 구조물은 끊임없이 크고 작은 사용하중에 하에 놓이게 된다. 그러나 이러한 끊임없이 반복되는 사용하중 하에서도 갑작스런 취성파괴가 종종 발생하기도 한다. 이렇듯 불확실량의 제어를 정량화되지 않은 안전율 개념 즉, 확정론적 설계법만으로는 많은 부족함을 느낄 수밖에 없다. 이러한 이유로 정량화되고 신뢰성 있는 설계 및 검토 방법의 필요성이 대두되고 있다(허성호, 2006).

확률론적 설계법인 신뢰성해석을 할 때는 다수의 확률변수를 이용하여 해석을 수행할수록 결과값에 대한 신뢰도가 높아지는 것은 확인한 사실이다. 하지만, 막연히 확률변수의 개수를 늘리기만 하는 것은 신뢰성해석과정에서 구조해석점의 수가 급격히 증가하기 때문에 효율적이지 못한 방법이다. 이와 같은 이유로 적절한 수의 확률변수를 결정하는 것이 중요하다. 신뢰성해석에 대한 선행연구들을 살펴보면 확률변수를 선정하는 방법에 대해

서는 확연한 기준이 없는 것이 사실이다. 따라서, 이 연구에서는 계층분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 이용하여 확률변수를 결정함으로써, 신뢰성해석의 초기단계인 확률변수 결정과정에서부터 신뢰성을 높이고자 하는 목적을 두고 연구를 수행하였다.

이 연구에서는 30m 표준 I형 PSC 거더교량에서의 거더의 처짐과 하단부 콘크리트 인장응력에 대한 신뢰성해석을 수행하고자 한다. 구조물의 안전성을 판단함은 물론 확률변수 결정과정에서 계층분석법(AHP)을 적용하는 방법 또한 충분히 신뢰성이 있는 결과를 이끌어 낼 수 있다는 것을 확인하고자 연구를 진행하였다.



1.2 연구동향

구조공학분야에 신뢰성이론이 도입된 것은 Pugsley 및 Freudenthal 등에 의해서였으나 구조물의 안전도 평가에 신뢰성 이론이 실제로 적용되기 시작한 것은 1960년대부터였다. Freudenthal 등은 ASCE 안전위원회에 10여년간의 신뢰성 이론에 관한 연구 결과를 정리하여 보고서를 제출하였다. 보고서에서 그들은 안전율의 명확한 정의를 위하여 확률론에 근거한 신뢰성해석의 필요성을 강조하였다. 또한 구조물의 신뢰성해석을 확률분석으로부터 구할 수 있다는 가능성을 개념적으로 제시하였다. 또한 정적구조물을 연결고리구조(Weakest Link System)로 모델링하여 단순 구간식을 이용하여 해를 구하는 방법을 제시하였다(Freudenthal 등, 1966).

Sexsmith는 복잡한 확률분석으로부터 신뢰성을 해석하는 수식적인 방법에 한계가 있음을 지적하여 새로운 방법의 필요성을 강조하였다(Sexsmith, 1969).

Cornell은 정규분석의 경우 파괴함수의 평균과 표준편차의 비로 정의되는 신뢰도지수에 의해 평균 1계2차 모멘트법을 제시하였다. 그러나 평균 1계2차 모멘트법(FOSM, First Order Second Moment Method)은 평균점에서 파괴함수를 선형 근사함으로써 발생하는 불변성(invariant)의 문제를 지니고 있었다. 그리고 파괴함수의 비선형성이 클 경우 해석결과의 오차가 크다는 점이 지적되었다(Cornell, 1969).

Hasofer와 Lind는 확률변수를 평균 정규 공간(standard normal space)으로 변환하여 파괴점에서 파괴함수를 선형 근사시켜 불변성의 문제를 해결하였다. 안전성의 척도가 되는 신뢰지수는 정규공간에서 원점에서 파괴함수까지 최단거리로 정의하였으며 이를 개선된 1계2차 모멘트법(AFOSM, Advanced First Order Second Moment Method)이라 하였다(Hasofer 등,

1974).

Rackwitz와 Fiessler는 비정규 분포함수를 등비 정규분포로 치환하는 방법을 제시하여 신뢰도지수의 개념을 일반적인 분석까지 확장하였다. 그들은 소위 Rackwitz Fiessler Algorithm을 사용하여 신뢰지수를 편리하게 구할 수 있는 방법을 제시하였다(Rackwitz 등 1978).

Ellingwood는 1차 신뢰성 이론을 바탕으로 기존의 설계방법을 조절하여 ANSI에 하중계수와 저항계수의 기준을 제시하였다. ANSI(1982), AISC(1986)과 ACI(1989)는 이러한 연구결과를 바탕으로 하여 하중저항계수설계법을 채택하게 되었다. 선형적인 파괴함수식과 달리 파괴함수식의 비선형성은 비정규 분포인 확률변수의 변환으로부터 초래되는 것과 함수식 자체가 비선형이기 때문에 생기는 것으로 볼 수 있다. 비선형 파괴함수를 급수 전개하여 2차항까지 근사적으로 취하는 방법에는 Hyper Sphere와 Hyper Paraboloid에 의한 방법이 있는데 이를 사용한 해석법을 2차 신뢰성 해석(SORM, Second Order Reliability Method)이라고 한다(Ellingwood, 1978).

Fiessler등은 파괴함수를 파괴점에서 포물선, 타원, 및 변곡선 등 2차 포물면(quadratic surface)으로 적합(fitting)시키는 방법을 제시하였다. 이 방법은 파괴함수의 2차 미분값이 필요하여 비교적 복잡한 계산이 요구된다(Fiessler 등, 1979).

Ditlevsen은 파괴함수의 차수에 따라 신뢰도지수가 일정치 않음을 해결하는 Generalized Second Moment Method를 제시하였다(Ditlevsen, 1979).

Kiureghian등은 파괴점 주위에서 점 적합 방법(point fitting)을 통해 포물선으로 근사시키는 방법을 제시하였다. 이 방법은 Breitung의 곡률에 의한 포물선 가정의 한계를 극복할 수 있도록 개선한 것이다(Kiureghian, 1987).

한편, 신뢰성해석에 관한 국내의 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. 우리나라에서는 조효남·임종권·박경훈 등이 체계신뢰성 방법에 기초한 강사장교의 안전도평가에 대한 연구를 수행하였으며(조효남 등, 1998), 이홍우는 국내 RC슬래브교 및 PSC거더교의 휨파괴에 대한 신뢰성평가에 대하여 연구를 수행하였다(이홍우, 2004). 그리고 이영주는 신뢰성 평가를 통한 강사장교의 설계하중-저항계수 결정에 관한 연구를 수행하였고(이영주, 2005), 박미연·조효남·조태준 등은 붕괴모드 조합 예측법에 의한 PSC사장교의 위험도 평가에 대하여 연구를 수행하였다(박미연 등, 2006).



1.3 연구내용 및 방법

이 연구에서는 구조물의 확률론적 위험성 평가를 위한 기초연구로서 신뢰성해석을 통하여 대상 구조물의 위험성을 평가한다. 위험성 평가의 대상으로는 일반국도에 가장 많이 사용되는 교량형식 중 하나인 30m 표준 I형 PSC 거더교량을 대상으로, 거더의 처짐과 하단부 콘크리트 인장응력에 대하여 위험성 평가를 수행한다.

위험성 평가 방법으로는 평균 1계2차 모멘트법(MVFOSM, Mean Value First Order Second Moment Method)이 가지고 있는 불변성의 단점을 보완한 개선된 1계2차 모멘트법(AFOSM, Advanced First Order Second Moment Method)을 사용하여 구조물의 위험성 평가를 수행하며, 해석에 사용될 확률변수(random variable)는 계층분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 통해 변동성이 큰 것으로 판단된 2개의 확률변수를 결정하여 신뢰성해석을 수행한다.

이 논문의 전체적인 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다. 1장에서는 이 연구에 대한 배경 및 목적, 연구동향 등에 대해 서술하고, 2장에서는 신뢰성해석과 계층분석법(AHP)의 이론에 대해 언급되며, 3장에서는 계층분석법(AHP)을 이용한 확률변수 결정과정에 대해 설명되어 있다. 그리고 4장에서는 Level II 신뢰성해석을 통한 신뢰도지수 산정과 Level I 신뢰성해석을 통해 부분안전계수를 구하여 목표신뢰도지수를 만족하는지에 대해 평가한다. 마지막으로 5장에서는 이 연구를 통해 얻어진 결과를 종합하여 결론을 도출한다.

2. 이론적 배경

2.1 구조신뢰성해석의 기본 정의

일반적으로 한계상태(limit state)란 구조물이나 구성요소가 설계된 목적을 더 이상 충족시키지 못하는 상태(즉, 파괴로 규정되는 기준 상태)를 의미한다. 만약 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 를 설계변수의 벡터라 정의한다면, 파괴를 나타내는 기본 확률변수의 한계상태함수(limit state function) 또는 파괴함수(failure function) $g(X)$ 는 식 (2.1.1)과 같이 표현된다.

$$g(X) \leq 0 \quad (2.1.1)$$

한계상태 또는 파괴면(failure surface)은 설계변수의 공간에서 안전과 파괴의 경계($g(X)=0$)를 정의하며, 파괴확률은 식 (2.1.2)로 표현되는 다차원 적분식(multidimensional integral equation)으로 정의된다(Haldar, 2000).

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = \int \dots \int_{g() \leq 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n \quad (2.1.2)$$

여기서, $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 기본 랜덤변수들 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 의 결합 확률밀도 함수(joint probability density function)이며, 파괴확률($g(X) < 0$)에 대하여 적분을 수행한다.

개념적 이해를 돕기 위하여 2개의 설계변수 저항 R 과 하중 S 를 가지는 간단한 구조 문제를 고려한다. 구조물의 설계 저항강도를 규정하는 설계변수 R 과 작용하중과 관련된 설계변수 S 를 고려할 때 파괴의 조건은 다음식

과 같이 표현 될 것이다.

$$\text{저항 } (R) \leq \text{하중 } (S) \quad (2.1.3)$$

이 때 한계상태함수는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$g(X) = R - S \quad (2.1.4)$$

한계상태 또는 파괴면은 설계변수의 공간에서 “안전”과 “파괴”의 경계 ($g(X)=0$)를 정의한다. 따라서 파괴확률은 다음 식으로 정의된다.

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = P(R \leq S) = P(R - S \leq 0) \quad (2.1.5)$$

이를 다차원 적분식으로 표현하면 아래 식 (2.1.6)과 같다.

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int \dots \int_D f_{RS}(r, s) dr, ds \quad (2.1.6)$$

여기서, D 는 파괴영역, f_{RS} 는 R 과 S 의 결합 확률밀도함수이다. 만약, 저항 R 과 하중 S 가 통계적 독립관계에 있다면, 즉 $f_{RS}(r, s) = f_R(r)f_S(s)$ 일 때, 식 (2.1.6)은 보다 간단한 식 (2.1.7)과 같이 표현된다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \int_{-\infty}^s f_R(r) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (2.1.7)$$

$$F_R(s) = \int_{-\infty}^s f_R(r) dr \quad (2.1.8)$$

여기서, $F_R(s)$ 는 랜덤변수인 저항 R 의 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)이다.

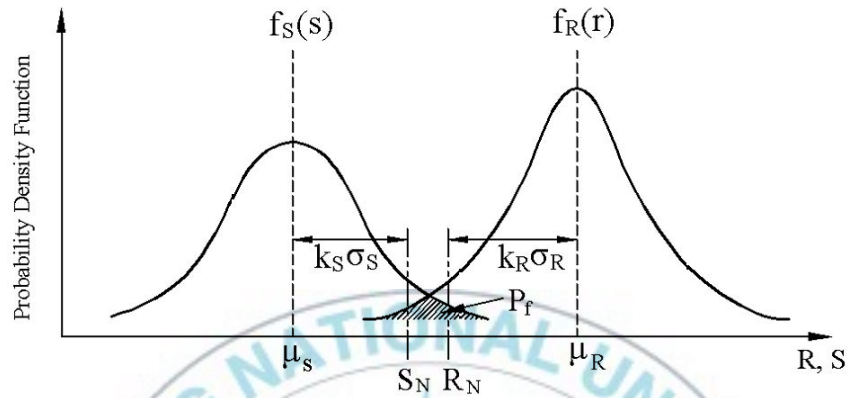


그림 2.1 파괴확률의 개념 (박옥주, 2006)

일반적으로 대부분의 실제적인 공학문제의 경우, 저항 R 의 누적분포함수(CDF)와 하중 S 의 확률밀도함수(PDF, Probabaility Density Function)가 양함수(explicit form)의 형태로 표현되지 않기 때문에, 식 (2.1.6)과 식 (2.1.7)의 직접적분을 통한 파괴확률의 계산은 거의 불가능하다. 하지만, 한 계상태함수와 모든 확률변수의 확률밀도함수(PDF)가 양함수의 형태로 표현 가능한 경우에는 적분을 수행하지 않고 계산이 가능하다.

구조물의 저항 R 과 하중 S 가 각각 평균 μ_R 과 μ_S , 분산 σ_R^2 과 σ_S^2 을 가지는 가우스분포(gaussian distribution) 또는 정규분포(normal distribution)의 확률변수라고 한다면, 구조안전성을 표현하는 또 다른 확률변수인 안전여유 $Z = R - S$ 또한 정규분포의 확률변수로서 평균 $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ 와 분산 $\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 - \sigma_S^2$ 을 갖는다. 따라서 식 (2.1.6)의 파괴확률 식은 다음 식 (2.1.9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P_f &= P(R - S \leq 0) = P(Z \leq 0) \\
 &= \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi(-\beta)
 \end{aligned} \tag{2.1.9}$$

여기서, Φ 는 표준정규분포($\mu=0$, $\sigma=1$) 확률변수의 누적분포함수를 나타내며, β 는 신뢰도지수(reliability index) 또는 안전도지수(safety index)라고 표현되며, 파괴확률과 역(inverse)의 관계를 가진다. 즉, 큰 값의 β 는 높은 신뢰성과 낮은 파괴확률을 의미한다.

신뢰도지수 β 는 확률론에 기초한 설계 및 신뢰성공학 분야에 있어서 일반적으로 파괴확률 P_f 를 대신하여 확률적 안전성을 표현하기 위하여 쓰이는 개념이다.



2.2 구조신뢰성해석 기법

신뢰성 공학에서 구조물의 안전성을 확률론적으로 평가하는 방법에는 통계적 정보의 성격에 따라 여러 가지가 있다. 2.2절에서는 각각의 신뢰성해석 방법들에 대한 내용을 다루고 있다.

2.2.1 Level I 신뢰성해석

신뢰성해석 방법 중 모멘트법에 의한 Level II 방법은 주어진 한계상태 함수에 대해 설계변수들의 확률변동성을 고려하여 파괴확률이나 신뢰도지수 산정을 통해 안전성을 평가하는 방법으로 신뢰성 설계방법에 대한 이론적 배경에 대한 깊은 이해가 필요하다. 그러나 실제 현장에서 설계나 제작에 임하는 설계자나 기술자는 구조물의 설계 및 제작의 지침으로 이용하여 설계시방서가 가능한 한 간단하고 이용하기 쉬운 형태로 제공되기를 기대한다.

Level I 방법은 이러한 점을 고려하여 구조물이 확보해야 할 목표신뢰도지수(target reliability index)를 설정하여 각 저항성분과 하중성분에 대해 목표한 안전성을 확보하기 위한 부분안전계수(partial safety factor)를 계산한다. 계산된 부분안전계수를 각 설계치에 곱하고 저항성분이 하중성분보다 클 때, 즉 한계상태함수가 양의 값을 가질 때 목표신뢰도지수를 만족하는 것으로 보고 설계하는 것이다.

설계변수를 X 라고 한다면 안전성을 확보하기 위해서는 다음을 만족해야 한다.

$$\sum_i \gamma_{iR} R_i(X) > \sum_i \gamma_{iS} S_i(X) \quad (2.2.1)$$

$R_i(X)$, $S_i(X)$: 저항함수, 하중함수

γ_{iR} , γ_{iS} : 저항함수와 하중함수에 대한 부분안전계수

목표신뢰도지수 β 에 대한 설계변수 X 의 부분안전계수 γ 와 설계치 X_d 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma_{X_i} = (1 - \alpha_{X_i} \beta_T V_{X_i}) \frac{\mu_{X_i}}{X_{ik}} \quad (2.2.2)$$

$$X_{id} = \gamma_{X_i} X_{ik} \quad (2.2.3)$$

X_{ik} : 특성치

X_{id} : 설계검토치

V_X : 변동계수 ($\frac{\sigma_X}{\mu_X}$)

α_{X_i} : 민감도계수 (Level II 신뢰성해석을 통해 구할 수 있는 값)

다음 그림 2.2는 표준확률변수 평면상에 신뢰도지수 β 와 목표신뢰도지수 β_T 를 타나낸 것으로 목표신뢰도지수를 β_{T_1} 이 되도록 한다면($\beta_T < \beta$) 한계상태함수가 음수가 되므로 설계를 보강하여 안전성을 더욱 확보해야 한다. 반대로 목표신뢰도지수를 β_{T_2} 가 되도록 한다면($\beta_T > \beta$) 한계상태함수는 양의 값을 가지게 되며 설계특성치를 조금 더 경제적으로 변경하더라도 안전성을 확보할 수 있게 된다는 의미이다.

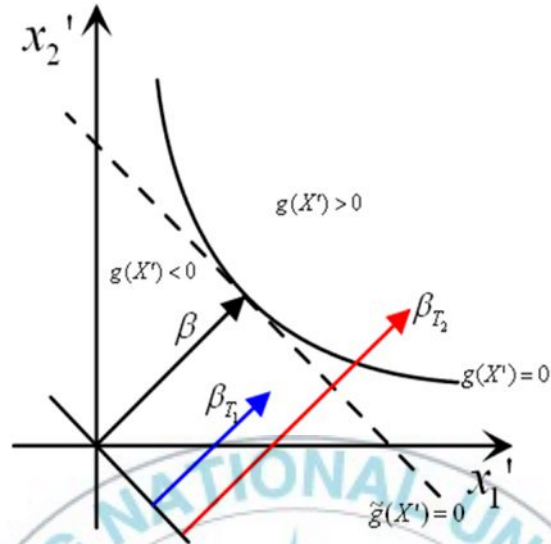


그림 2.2 신뢰도지수와 목표신뢰도지수 (이상근, 2010)

한편, Level I 신뢰성해석의 부분안전계수(partial safety factor)를 구하는 과정은 Level II 신뢰성해석 방법을 통해 결정되는 민감도계수(sensitivity coefficients)를 필요로 한다. 따라서 실제 신뢰성해석 순서는 Level II 신뢰성해석 후 Level I 신뢰성해석을 수행하는 순서로 해석이 진행된다.

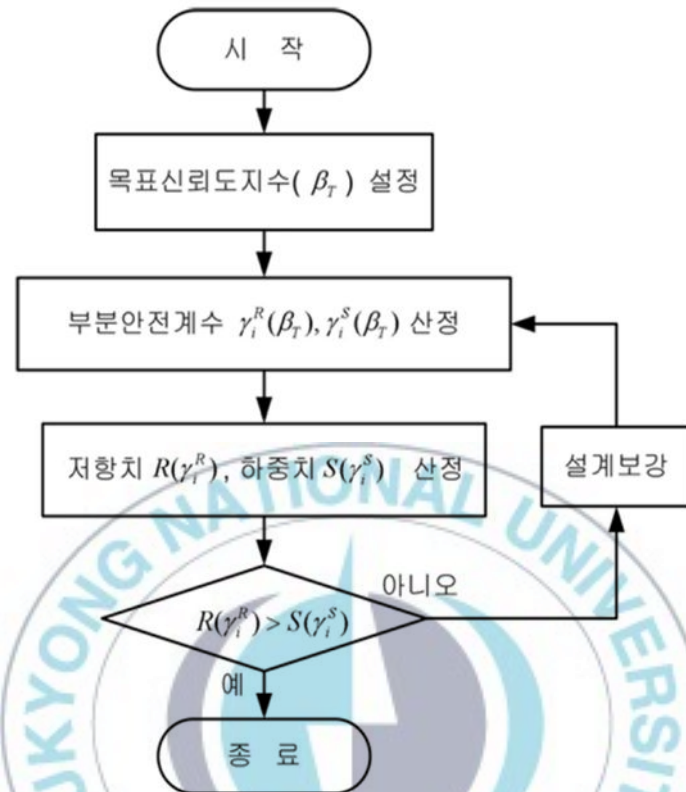


그림 2.3 Level I 신뢰성해석 순서도 (이상근, 2010)

다음 그림 2.3과 같이 Level I 신뢰성해석의 흐름을 정리해 볼 수 있다. 가장 먼저 목표신뢰도지수(β_T)를 설정한다. 다음으로 각 확률변수에 대하여 부분안전계수를 산정한 후 그 값을 각각 하중치와 저항치에 곱한다. 이때 하중치의 값이 저항치를 넘지 않으면 목표신뢰도지수(β_T)를 만족하는 것으로 보는 것이다.

2.2.2 Level II 신뢰성해석

Level II 방법은 각 확률변수의 평균과 분산, 그리고 분포형태만을 이용하여 파괴확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 방법이다. 즉, 한계상태방정식을 1차 혹은 2차 함수로 근사하여 단순화한 다음, 정규분포의 확률분포함수를 이용하여 파괴확률에 대한 간접적인 지표로서 신뢰도지수 β 를 계산하는 방법으로 모멘트법(moment method)이라고도 한다.

Cornell의 신뢰도지수 β 개념을 기반으로 구조물의 확률론적 안전성을 평가하는 방법으로는 1계2차 모멘트법(FOSM, First Order Second Moment)과 2계2차 모멘트법(SOSM, Second Order Second Moment)이 있다. 많은 경우에서 두 방법에 의한 해석 결과가 크게 차이나지 않음이 연구되어 있다(양영순 외, 1999). 이 논문에서는 Level II 신뢰성해석 방법들 중에서 평균 1계2차 모멘트법(MVFOSM, Mean Value First Order Second Moment), 개선된 1계2차 모멘트법(AFOSM, Advanced First Order Second Moment), Rackwitz-Fiessler 변환법 등에 대하여 이론적인 설명이 이루어질 것이다. 그리고 실제 대상 구조물에 대한 신뢰성해석시에는 개선된 1계2차 모멘트법(AFOSM)을 사용하여 해석을 수행하였다.

1) MVFOSM(Mean Value First Order Second Moment)

정규분포 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차가 각각 μ_i 와 σ_i 일 때, 한계상태식은 다음과 같다.

$$g = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n \quad (2.2.4)$$

여기서, 한계상태식의 값을 새로운 확률변수 G 라고 하면, 확률변수 G 의 확률분포는 정규분포가 되며 G 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\mu_G = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \quad (2.2.5)$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \text{Cov}[X_i, X_j] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (2.2.6)$$

한계상태식에 대한 파괴확률은 정의된 정규분포 확률변수 G 가 0보다 작을 확률이 된다.

$$P_f = P[G \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \quad (2.2.7)$$

여기서 한계상태식의 표준편차에 대한 평균의 비인 μ_G/σ_G 를 신뢰도지수 β 라고 정의하며, 파괴확률 P_f 와는 다음과 같은 관계가 된다.

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad \beta = \mu_G/\sigma_G \quad (2.2.8)$$

이와 같이 정의된 신뢰도지수 β 는 확률론적으로 0으로부터 확률변수 G 의 평균 μ_G 까지의 거리를 표준편차 σ_G 의 비로 이해할 수 있다.

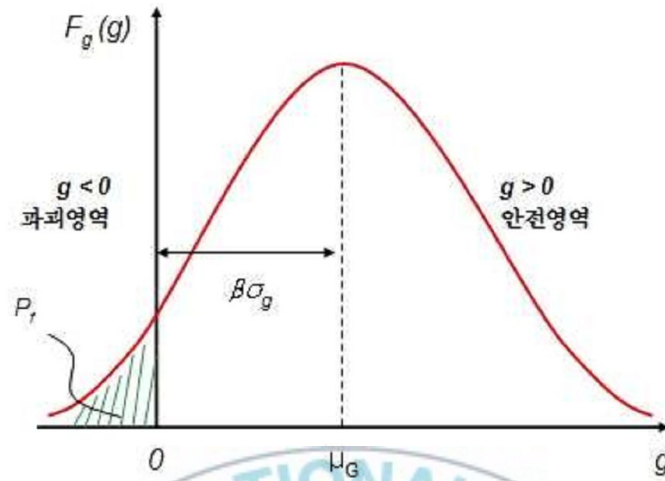


그림 2.4 신뢰도지수의 확률적 개념 (김종화, 2007)

식 (2.2.8)와 그림 2.4로부터 신뢰도지수가 커질수록 파괴확률은 감소하므로 신뢰도지수가 큰 값을 가질수록 구조물의 안전성은 증가한다고 볼 수 있다. 다음 표 2.1에 몇 가지 대표적인 신뢰도지수에 대한 파괴확률을 정리하였다.

표 2.1 신뢰도지수에 대한 파괴확률

β	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
P_f	0.5	0.15866	0.02275	0.00135	0.00135	3.16E-5	2.87E-7	9.87E-10

한계상태식이 정규분포 확률변수의 비선형식으로 주어진 경우에는 각 확률변수의 평균점 μ 에서 Taylor전개를 통해 비선형 한계상태식을 선형식으로 근사화시켜 일차항까지만 고려하여 해석할 수 있다. 선형 근사된 한계상태식에 의해 정의되는 새로운 확률변수의 평균과 분산은 정규분포 확률변수이므로 표준편차에 대한 평균의 비로 정의되는 신뢰도지수를 계산할 수 있다.

일반적인 한계상태식을 각 확률변수의 평균점에서 Taylor 전개를 이용하여 근사한 다음, 일차항까지만 취하여 평균에 대한 확률밀도함수의 이차모멘트인 분산(또는 표준편차)을 고려하여 신뢰도지수와 파괴확률을 산정하는 방법을 평균 일계 이차모멘트법(MVFOSM, Mean Value First Order Second Moment)이라고 한다. 이 방법은 다루기가 편리하지만 모든 확률변수가 정규분포 확률변수이어야 하며 한계상태식이 이들 확률변수의 선형함수로 표현될 때에만 정확한 파괴확률의 산정이 가능한 단점이 있다. 또한 비선형 한계상태식을 각 확률변수의 평균점에서 Taylor전개를 하기 때문에 역학적 동일한 파괴양식에 대한 한계상태일지라도 어떤 형태로 표현되는가에 따라 서로 다른 파괴확률이 계산되는 불변성(invariant) 결여의 문제점도 가지고 있다(Hasofer 등, 1974).

2) AFOSM(Advanced First Order Second Moment)

Hasofer와 Lind는 MVFOSM이 가지고 있는 불변성 결여의 문제점을 해결하기 위하여, 한계상태함수의 역학적 정식화 형태에 관계없이 일정한 신뢰도지수를 얻을 수 있는 방법을 제안하였다(Hasofer 등, 1974). 이 방법에서 신뢰도지수는 정규변량화한 공간에서 평균으로부터 파괴면까지의 최단거리로 정의되는데, 여기서 모든 확률변수는 정규분포(normal distribution)이며 상관성이 없는(uncorrelated) 경우로 가정한다.

AFOSM 방법에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

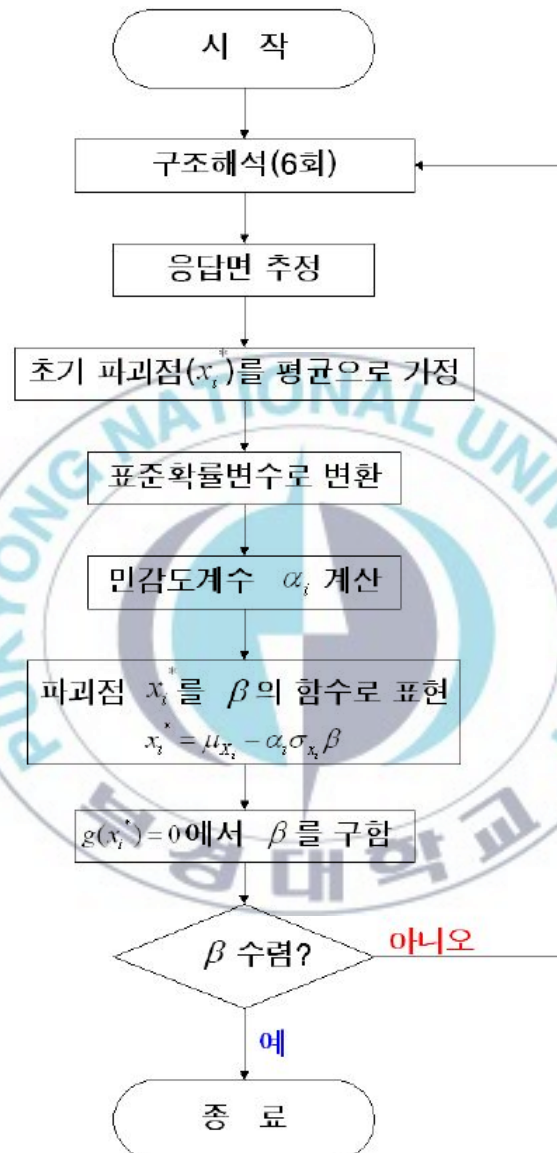


그림 2.5 응답면기법을 이용한 AFOSM 순서도 (이상근, 2010)

그러나 AFOSM 방법은 모든 확률변수들이 정규분포일 때 정확한 파괴 확률 값을 나타내지만, 일반적인 구조문제에서는 변수들이 정규분포를 따르지 않을 경우(대수정규분포, Gamma분포, Extreme 분포 등)가 대부분이다. 이러한 경우 신뢰도지수와 파괴확률 사이의 관계를 신뢰하기가 곤란하다는 단점을 가지고 있다. 이에 Rackwitz와 Fiessler는 이러한 문제점을 비정규분포 확률변수의 밀도함수와 분포함수의 값이 등가의 정규분포 확률변수의 밀도함수와 분포함수의 값과 같다고 가정한 등가 정규분포 확률변수의 평균과 표준편차를 추정하는 방법을 제안하였다.

3) Rackwitz-Fiessler 변환법

불변성 결여의 문제를 해결한 개선된 일계 이차모멘트법을 비롯한 대부분의 모멘트법은 표준정규분포 확률변수의 공간상에서 기하학적으로 정의되는 신뢰도지수 β 를 계산하였다.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.2.9)$$

공학문제에서 다루게 되는 많은 설계변수들은 비정규분포 확률변수인 경우가 대부분이다. 이러한 변수들을 취급하기 위해서는 적절한 방법을 이용하여 등가의 정규분포 확률변수의 형태로 치환을 하여야 한다. 비정규분포 확률변수를 포함하는 한계상태식에 대해 모멘트법을 이용하여 안전성을 평가하기 위해 등가의 정규분포 확률변수로 치환하는 방법으로는 Rackwitz-Fiessler 변환법이 주로 이용된다.

Rackwitz는 최대파괴확률점(MPFP, Most Probable Failure Point)에서는 등가의 정규분포 확률변수와 비정규분포 확률변수의 밀도함수와 분포함수

의 값이 서로 같다고 가정한다. 이로부터 등가정규분포 확률분포의 평균과 표준편차를 추정하는 방법을 제안했다(Rackwitz 등, 1978). 등가정규분포 확률변수의 평균과 표준편차를 각각 μ_X^N , σ_X^N 라고 하면, 비정규분포 확률변수의 밀도함수 $f_X(x)$ 와 분포함수 $F_X(x)$ 가 최대과괴확률점(MPFP)에서는 아래와 같다.

$$f_X(x^*) = \frac{1}{\sigma_X^N} \phi\left(\frac{x^* - \mu_X^N}{\sigma_X^N}\right) \quad (2.2.10)$$

$$F_X(x^*) = \Phi\left(\frac{x^* - \mu_X^N}{\sigma_X^N}\right) \quad (2.2.11)$$

식 (2.2.10)과 식 (2.2.11)의 역으로부터 등가정규분포 확률변수의 평균과 표준편차 μ_X^N , σ_X^N 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mu_X^N = x^* - \sigma_X^N \Phi^{-1}(F_X(x^*)) \quad (2.2.12)$$

$$\sigma_X^N = \frac{\phi(\Phi^{-1}(F_X(x^*)))}{f_X(x^*)} \quad (2.2.13)$$

따라서, Rackwitz-Fiessler 변환법을 이용하면 매번 갱신되는 최대과괴 확률점(MPFP)의 좌표마다 비정규분포 확률변수에 대하여 식 (2.2.12), 식 (2.2.13)으로부터 등가정규분포의 평균과 표준편차를 계산하여 표준정규분포 확률변수의 공간으로 변환시켜 신뢰도지수를 산정한다.

2.3 신뢰성 설계법

신뢰성 설계법은 설계에 사용되는 변수들이 확정값(deterministic value)을 갖는다는 가정 하에 설계를 행하는 것이 아니라, 외력의 확률적 특성, 구조물 재료물성의 변동특성 등을 종합적으로 고려하여 구조물이 외력에 의해 발생할 수 있는 각종 파괴모드에 대한 파괴확률을 허용치 이하로 두는 설계법이다. 현행의 결정론적 설계법과 확률론적 설계법인 신뢰성 설계법을 다음 표 2.2에 비교하였다.

표 2.2 결정론적 설계법과 신뢰성 설계법의 비교 (박옥주, 2006)

구분	결정론적 설계법	신뢰성 설계법
설계변수 및 설계환경	· 각종 외력(차량하중, 적재하중, 지진력 등)을 설계식에 의해 상수로 산정 · 가장 위험한 조건에서의 안전성 평가	· 단위중량, 압축강도, 지진하중, 크리프계수, 마찰계수 등을 모두 확률변수로 가정하여 설계
안전성 확보	· 외력 및 저항에 포함된 각종 불확실한 요소를 하중계수 및 안전율로 고려	· 목표파괴확률을 설정하여 그 값을 초과하지 않도록 설계
경제성	· 구조적 기능성에 문제가 없더라도 파괴모드가 발생하면 파괴로 간주하므로 과다설계가 불가피	· 파괴가 일정수준 이하로 발생하여도 구조물의 기능에 문제가 없도록 하는 설계가 가능해 경제적인 설계법

이처럼 신뢰성 설계법은 설계변수들의 불확실성을 정량적으로 고려하여 파괴확률을 정량화 할 수 있는 합리적인 설계법이다.

2.4 응답면기법

응답면기법은 고려하고자 하는 설계변수의 평균과 표준편차를 이용하여 설계점들에 대한 구조해석과정을 거쳐 주어진 설계점에서의 구조해석결과를 이용하여 음함수로 존재하는 한계상태함수를 양함수로 근사화 하는 방법이다. 응답면을 구한 후 기존의 Level II 신뢰성해석법을 적용하는 것이 응답면기법에 의한 신뢰성해석법이다. 응답면 기법에 의한 한계상태함수를 항복응력과 설계변수 X_i 에 의해 발생하는 최대응력으로 나타내면 다음과 같다.

$$g(X) = f_y - f_{\max}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.4.1)$$

f_y : 부재의 항복응력

$f_{\max}$: 부재의 최대응력

식 (2.4.1)에서 $f_{\max}$ 를 다음과 같이 응답면을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$f_{\max}(X_1, X_2, \dots, X_n) = c_0 + \sum c_i X_i + \sum c_{ii} (X_i)^2 + \sum_i \sum_{j \neq i} c_{ij} X_i X_j \quad (2.4.2)$$

응답면으로 정의된 최대응력의 응답면계수벡터 c 를 구하기 위해서는 구조해석을 수행해야 하며, 먼저 구조해석을 수행할 구조해석점을 결정해야 한다. 구조해석점 X_j 는 다음과 같다.

$$X_j = X_c + h\sigma I_j \quad (2.4.3)$$

X_c : 중심점

h : 응답면 확장계수

I_j : scattering index matrix

여기서, 응답면 확장계수 h 는 비선형성이 클수록 작은 값을 사용하고, 선형성이 클수록 큰 값을 사용하며, 대략 1.0 내외의 값을 사용해도 무방하다(Rajashekhar 등 1993). 이 연구에서는 Latin Hypercube 추출법을 이용하여 구조해석점의 수를 산정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$n = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (2.4.4)$$

k 는 확률변수의 개수이며, 확률변수 공간에 구조해석점을 표현하면 그림 2.6과 같다.

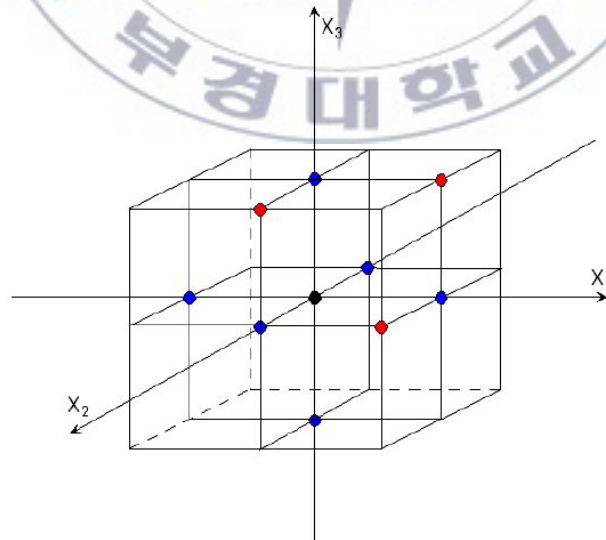


그림 2.6 응답면을 구하기 위한 구조해석점의 위치 (이상근, 2010)

식 (2.4.4)를 통해 구해진 구조해석점에서 구조해석을 n 회 수행하고, 그 결과를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} f_{\max_1} \\ f_{\max_2} \\ \vdots \\ f_{\max_n} \end{bmatrix} \quad (2.4.5)$$

$$Y_n = [1, X_1, X_2, \dots, X_i, X_1^2, X_2^2, \dots, X_i^2, \dots, X_i X_j]$$

c : 응답면계수벡터

$f_{\max}$: 최대응력

구해진 행렬식으로 식 (2.4.2)의 응답면계수벡터 c 는 다음과 같이 계산 하므로써 응답면을 찾게 되는 것이다.

$$c = Y^{-1}F \quad (2.4.6)$$

위와 같은 일련의 과정을 Level II 신뢰성해석시에 매회 갱신되는 파괴 점에 따라 응답면을 다시 구해야 한다.

2.5 계층분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)

1970년대 초반 Thomas L. saaty에 의해 개발된 계층분석적 의사결정방법(AHP, Analytic Hierarchy Process)은 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교에 의한 판단을 통하여 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하고자 하는 하나의 새로운 의사결정방법론이다. 이 기법은 다양한 이용상의 장점 때문에 기술·사회·경제·경영·정치 등 응용분야가 매우 광범위하여 모든 의사결정 문제에 적용되고 있다(Luis, 1990).

계층분석법은 이론의 단순성 및 명확성과 적용의 간편성 및 범용성이라는 특징으로 말미암아 여러 의사결정 분야에서 널리 응용되고 있으며, 이론구조 자체에 관해서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 계층분석법은 다수의 속성들을 계층적으로 분류하여 각 속성의 중요도를 파악함으로써 최적대안을 선정하는 기법으로 의사결정요소들의 속성과 그 측정 척도가 다양한 의사결정문제에 효과적으로 적용되어 의사결정자가 선택할 수 있는 여러 가지 대안들을 체계적으로 순위화 시키고, 그 가중치를 비율척도로 도출하는 방법을 제시한다. 이러한 의사결정요소 및 대안간의 비교와 이에 따른 의사결정의 응용과 같은 방법론적 특징을 지닌 계층분석법은 다양한 프로젝트의 결과를 비교 평가하는 분야에 응용될 수 있는 확장성을 갖고 있다. 이는 계층분석법이 의사결정 및 판단에 필요한 속성의 식별과 이에 대한 대안간의 비교라는 개념적인 특징을 지니고 있기 때문이다.

계층분석법을 이용한 일반적인 평가방법에는 기본적으로 정량적 방법과 정성적 방법이 있다. 정량적 방법은 각 항목이 갖는 정량적 속성에 따라 우열을 평가하는 방법으로 속성 값이 바로 점수로 환산되므로 주관의 배제된 정확한 측정이 가능하나 정량적 방법을 적용하는 데에는 해당 항목이 정량화가 가능해야 한다는 전제조건이 필요하다. 또한 해당 항목이 정량화

되지 못한다면 정량적 방법은 오히려 왜곡을 초래할 가능성이 크다. 반면, 정성적 방법은 평가자의 주관에 근거하여 각 항목을 점수화 하는 방식으로써 이 방법은 점수를 부여하는 자의 주관이 반영되므로 객관성이 떨어질 가능성이 높지만, 항목이 정확하게 정량화되지 못할 경우에 널리 활용된다. 특히 해당 분야에 전문적인 지식을 갖고 있을 경우, 정성적 평가방법은 전문지식을 반영할 수 있다는 측면에서 매우 유용하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 계층분석기법 중 하나인 쌍대비교법을 사용하였다. 이 방법은 각 항목들의 속성을 정량화하는 것이 곤란한 경우, 상대적 중요도 또는 선호도를 체계적으로 비율척도화하여 정량적인 형태로 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 평가에 사용되는 것은 9점 척도로 구성되지만 평가 내용 및 수준 등을 고려하여 평가자가 적절한 단계로 구성이 가능하다.



3. 계층분석법(AHP)을 이용한 확률변수 결정

이 연구에서는 30m 표준 I형 PSC 거더교량의 여러 설계변수 중 7개의 설계변수를 대상으로 계층분석법을 이용하여 확률변수를 결정하였다. 계층분석에 사용된 설계변수는 다음과 같다.

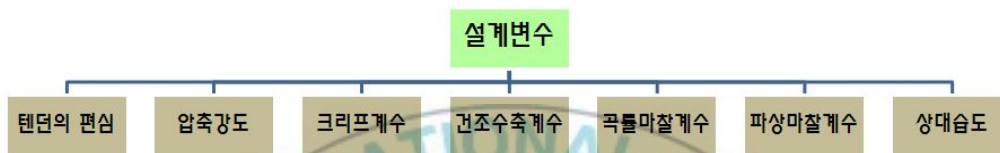


그림 3.1 계층분석법에 사용된 설계변수

표 3.1 확률변수 결정에 대한 설문조사 개요

조사내용	■ 표준 I형 PSC 거더교량에서 변동성이 큰 확률변수 조사
조사대상	■ 설계사, 시공사, 엔지니어링 회사, 감리
조사방법	■ 직접 방문 설문조사, E-mail을 통한 설문조사
분석방법	■ AHP 분석 기법

표 3.1과 같이 30m 표준 I형 PSC 거더교량에서 변동성이 큰 확률변수에 대해서 조사를 실시하였으며, 조사대상은 설계 회사, 시공 회사, 엔지니어링 회사 등 다양한 분야에 걸쳐 총 6명의 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하였다.

3.1 쌍대비교(Paired comparison)

확률변수를 결정하기 위한 계층분석법(AHP)의 첫 번째 단계로 신뢰성 해석을 위해 고려되는 설계변수들에 대해서 쌍대비교를 하는 과정이다. 총 7개의 설계변수에 대해서 쌍대비교를 하였으며, 평가척도는 가장 일반적인 9점 척도를 사용하였다. 9점 척도에 대한 사항은 표 3.2에 설명되어있다.

표 3.2 쌍대비교 기본 척도

변동성	의미
1	기준항목이 비교항목과 동일한 변동성 (Equal Flexible)
3	기준항목이 비교항목보다 변동성이 약간 큼 (Moderate Flexible)
5	기준항목이 비교항목보다 변동성이 적당히 큼 (Essential or Strong Flexible)
7	기준항목이 비교항목보다 변동성이 매우 큼 (Demonstrated Flexible)
9	기준항목이 비교항목보다 변동성이 아주 매우 큼 (Extreme Flexible)
2, 4, 6, 8	각 변동성의 사이값 (Intermediate Value)
기타	기준항목이 비교항목보다 변동성이 작은 경우, 각 값의 역수를 취함

표 3.3은 설문조사 표 양식을 나타낸 것이다. 표의 좌측은 기준항목이고 표의 위쪽은 비교항목으로서, 기준항목이 비교항목에 비해 상대적 변동성이 얼마나 크다고 생각하는지에 대해서 표 3.2의 쌍대비교 기본 척도를 참고하여 작성하는 것이다. 만약 기준항목이 비교항목보다 상대적 변동성이 작다고 판단하는 경우에는 제시된 변동성 값의 역수로써 표현할 수 있다.

표 3.3 설계변수에 대한 설문조사 양식

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도		1	-	-	-	-	-
C	크리프계수			1	-	-	-	-
D	건조수축계수				1	-	-	-
E	곡률마찰계수					1	-	-
F	파상마찰계수						1	-
G	상대습도							1

위의 설문표를 통한 결과를 토대로 각 확률변수의 변동성에 대한 상대적 중요도를 결정할 것이다. 그리고 설문조사 표에서는 좌측상단에서부터 우측하단까지 모든 값이 1인 부분을 기준으로 우측 상단의 값들은 조사되지 않았는데, 이는 우측 상단의 값들이 좌측 하단의 값들과 역수로서 대칭(symmetry)을 이루기 때문이다. 따라서 실제 상대적 중요도를 결정하는 과정에서는 모든 값들이 채워진 상태로 계산될 것이다.

3.2 변동성에 대한 상대적 중요도 산정

3.1절에서 제시된 쌍대비교 자료를 통하여 각각의 설계변수의 변동성에 대한 상대적 중요도를 결정하는 단계이다. 각각의 설계변수에 대해 평가된 척도 값들을 정규화(normalize)하여 각 항목에 대한 상대비중을 결정한다. 각 설문지별 설계변수에 대한 상대비중을 다음 표에 나타내었다.

표 3.4 설계변수에 대한 중요도 산정 결과

설계변수	상대적 중요도 값						평균값
	설문 1	설문 2	설문 3	설문 4	설문 5	설문 6	
텐던의 편심	0.053	0.078	0.063	0.088	0.058	0.083	0.071
압축강도	0.202	0.202	0.203	0.226	0.199	0.169	0.200
크리프계수	0.125	0.097	0.124	0.104	0.085	0.168	0.117
건조수축계수	0.080	0.066	0.083	0.054	0.068	0.051	0.067
곡률마찰계수	0.224	0.213	0.224	0.255	0.234	0.133	0.214
파상마찰계수	0.226	0.213	0.215	0.166	0.284	0.181	0.214
상대습도	0.090	0.130	0.088	0.106	0.072	0.214	0.116

위의 표 3.4와 같이 각 설문별로 산정된 설계변수들의 변동성에 대한 중요도 값을 평균으로 하여 우선순위를 결정하였다. 그 결과, 곡률마찰계수와 파상마찰계수는 0.214로 가장 높은 값을 나타내었으며, 그 뒤로 압축강도, 크리프계수, 상대습도 등의 순으로 변동성에 대한 상대적 중요도가 산정되었다.

3.3 일관성지수 검토

각 설문 결과 값이 효과적이고 일관성이 있는지 볼 수 있도록 일관성 평가를 수행하여야 한다. 일관성 평가는 일관성비율을 통하여 판단이 가능하다. 일관성비율(CR, Consistency Rate)은 일관성 지수(CI, Consistency Index)를 경험적으로 얻어진 평균무작위지수(RI, Random Index)로 나눈 값이다. 일관성비율이 0.1(10%) 이내인 경우만 신뢰할 수 있는 결과로서 사용할 수 있다.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.3.1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.3.2)$$

여기서, $\lambda_{\max}$ = 비교행렬의 최대 eigenvalue
 n = 설계변수의 수

표 3.5 평균무작위지수(Random Index)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 값	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

한편, 평균무작위지수(RI)의 값은 표 3.5와 같으며 실험을 통해서 결정된 값이다(Tomas, 1990). 한 속성에 대한 판단 결과가 일관성을 갖는 것으로 받아들여지려면, 최종적으로 산정된 일관성비율(CR)값이 0.1(10%) 이하여야 한다.

다음 표 3.6은 총 6개의 설문지에 대한 설계변수들의 일관성비율을 계산한 값이다.

표 3.6 각 설계변수들에 대한 일관성비율

확률변수	텐던의 편심	압축강도	크리프 계수	건조수축 계수	곡률마찰 계수	파상마찰 계수	상대습도
일관성비율	0.0324	0.0621	0.0374	0.0296	0.0681	0.0701	0.0427

이 연구에서는 모든 설계변수에 대한 일관성비율(CR)이 0.1이하로 나타났다. 따라서 3.1절의 쌍대비교 과정은 일관성있게 설문이 이루어진 것이며 3.2절에서 산정된 변동성에 대한 상대적 중요도 값은 유효하다고 볼 수 있다.

3.4 확률변수 결정

계층분석법을 통해 설계변수들의 변동성에 대한 상대적 중요도를 결정하였고, 쌍대비교 과정의 일관성을 확인하였다. 이를 통해, 총 7개의 설계변수 중 변동성이 가장 큰 것으로 판단된 곡률마찰계수와 파상마찰계수를 해석에 사용될 확률변수로 결정하였다. 계층분석법을 통해 결정된 이 2개의 확률변수를 가지고 30m 표준 I형 PSC 거더교량에서 거더의 처짐과 하단부 콘크리트 응력에 대한 위험성 평가를 수행할 것이다.

4. 대상구조물의 수치해석

4.1 해석대상의 제원 및 물성치

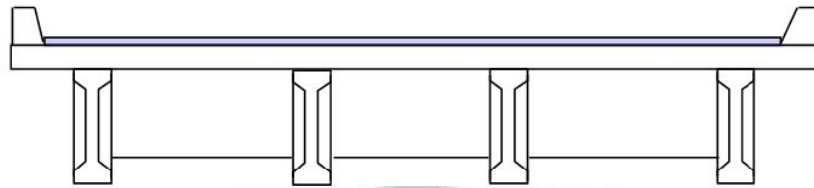


그림 4.1 대상 교량의 횡단면도

이 연구에서 위험성 평가의 대상으로 선정한 구조물은 일반국도에 가장 많이 사용되는 교량형식 중 하나인 30m 표준 I형 PSC 거더교량으로서, 실제 경남 밀양시에 있는 OO교를 대상으로 위험성 평가를 수행하였다. 그림 4.1은 대상 교량의 횡단면도를 나타낸 그림이며, 주형 거더와 바닥판 슬래브에 사용된 콘크리트 물성치는 아래의 표 4.1과 같다.

표 4.1 콘크리트 물성치

구분	주형 거더	바닥판 슬래브
설계기준강도	40 MPa	27 MPa
탄성계수	28 GPa	24.647 GPa
단위중량	23 kN/m ³	23 kN/m ³

또한 긴장재는 KSD 7002-88 SWPC7B를 사용하였으며, 긴장재의 항복강도는 1.6 GPa, 탄성계수는 200 GPa 이다.

그리고 3장에서 계층분석법(AHP)을 통해 결정된 2개의 확률변수 곡률마찰계수와 파상마찰계수의 평균과 표준편차 그리고 확률분포는 다음의 표 4.2와 같다.

표 4.2 확률변수의 평균과 표준편차, 확률분포

구분	평균	표준편차	확률분포
곡률마찰계수(μ)	0.25	0.05	정규분포
파상마찰계수(k)	0.005	0.001	정규분포

표 4.2에 나타나있는 평균과 표준편차의 값은 각각 가정된 값으로서, 평균은 대상구조물의 구조계산서를 통해 실제 시공시 적용된 값을 사용하였다. 그리고 선행연구들에서 평균의 15~20% 정도의 값을 표준편차로 적용한 것을 참고하여 콘크리트구조설계기준에 제시되어 있는 곡률마찰계수와 파상마찰계수의 상·하한 값을 벗어나지 않는 범위 내에서 각각 가정하였다. 그리고 Level II 신뢰성해석시에 AFOSM을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였는데, 이 방법은 변수들의 확률분포가 정규분포일 때만 적용이 가능하며, 두 변수에 대한 확률분포를 정규분포로 가정하여 신뢰성해석을 수행하였다.

4.2 응답면기법을 통한 한계상태함수 정의

2개의 확률변수 곡률마찰계수(μ)와 파상마찰계수(k)로써 거더의 처짐과 하단부 콘크리트 인장응력에 대한 한계상태함수를 표현하면 다음과 같다.

$$\langle \text{처짐} \rangle \quad g(\mu, k) = \delta_y - \delta_{\max}(\mu, k) \quad (4.2.1)$$

$$\langle \text{응력} \rangle \quad g(\mu, k) = P_y - P_{\max}(\mu, k) \quad (4.2.2)$$

여기서 $\delta_{\max}$, $P_{\max}$ 는 구조해석을 통해 얻을 수 있는 값으로 응답면을 통해 식 (4.2.3), 식 (4.2.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{\max}(\mu, k) = C_0 + C_1\mu + C_2k + C_3\mu^2 + C_4k^2 + C_5\mu k \quad (4.2.3)$$

$$P_{\max}(\mu, k) = C_0 + C_1\mu + C_2k + C_3\mu^2 + C_4k^2 + C_5\mu k \quad (4.2.4)$$

위의 식에서 각각의 확률변수를 x_1 , x_2 라고 하고, 이를 확률변수 공간에 나타내면 총 6개의 구조해석점으로 그림 4.2와 같이 나타낼 수 있다.

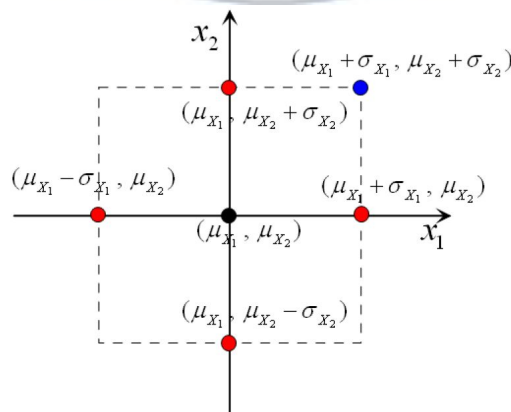


그림 4.2 구조해석점의 위치 (이상근, 2010)

그림 4.2의 구조해석점을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$X_j = X_c + h\sigma I_j \quad (4.2.5)$$

X_c : 중심점

h : 응답면 확장계수

I_j : scattering index matrix

응답면 확장계수는 표준편차에 곱해지는 값으로 중심점(파괴점)으로부터 얼마만큼 떨어진 설계점에서 구조해석을 할 것인지를 결정하는 값이다. 이 값은 비선형성이 클수록 작은 값을 사용하고, 선형성이 클수록 큰 값을 사용하며, 일반적으로 1.0 내외의 값을 사용해도 무방하다(Rajashekhar 등, 1993). 이 연구에서는 응답면 확장계수를 1.0으로 설정하였다. 그리고 식 (4.2.5)에서 I_j 는 구조해석점의 방향을 결정하는 행렬로 다음과 같다.

$$I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

확률변수가 2개인 경우 구조해석은 총 6번 수행해야하며, 그 결과를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} f_{\max_1} \\ f_{\max_2} \\ \vdots \\ f_{\max_n} \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

$$Y_n = [1, \mu, k, \mu^2, k^2, \mu k]$$

c : 응답면 계수벡터

$f_{\max}$: 각 구조해석점에서 구조해석을 통한 최대값

이렇게 구해진 행렬식 Y 와 F 를 이용해 응답면 계수벡터 c 는 다음과 같이 간단한 회귀분석을 통해 구할 수 있다.

$$c = Y^{-1}F \quad (4.2.8)$$

또한 구해진 응답면 계수벡터 c 를 식 (4.2.3)과 식 (4.2.4)에 대입하면 다음과 같이 응답면 기법을 통해 한계상태함수를 정의할 수 있다.

$$g(\mu, k) = \delta_y - (C_0 + C_1\mu + C_0k + C_0\mu^2 + C_0k^2 + C_0\mu k) \quad (4.2.9)$$

$$g(\mu, k) = P_y - (C_0 + C_1\mu + C_0k + C_0\mu^2 + C_0k^2 + C_0\mu k) \quad (4.2.10)$$

δ_y : 허용 처짐

P_y : 허용 인장응력

$C_0 \sim C_5$: 응답면 계수벡터

위와 같은 일련의 과정은 Level II 신뢰성해석시 매회 갱신되는 파괴점에서 새로운 응답면을 구해야 한다.

4.3 Level II 신뢰성해석 결과 및 고찰

응답면기법에 의한 30m 표준 I형 PSC 거더교량의 Level II 신뢰성해석을 수행하였다.

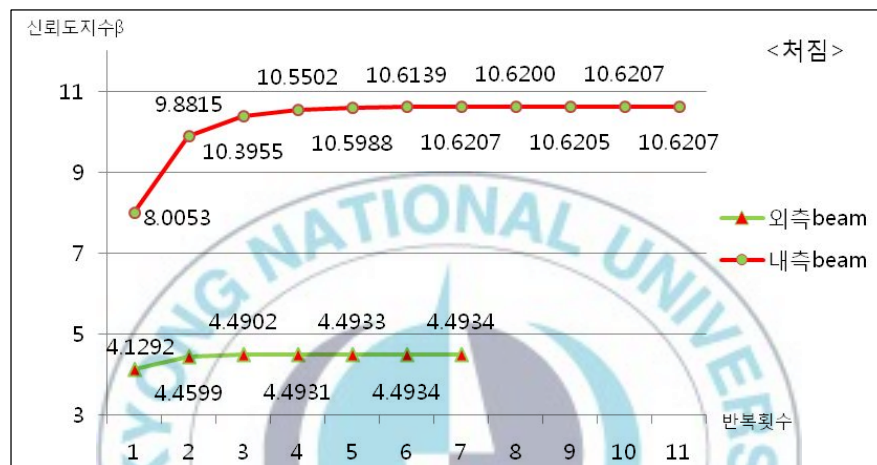


그림 4.3 처짐에 대한 신뢰도지수 수렴결과

처짐에 대한 신뢰도지수 β 의 수렴결과는 그림 4.3에 나타나있다. 그림에서 보는 바와 같이 외측 거더의 경우 약 4회 이상의 반복 계산에서부터 신뢰도지수가 4.49 근처의 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 내측 거더의 경우에는 약 7회 이상의 반복 계산에서부터 신뢰도지수가 10.62 근처의 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

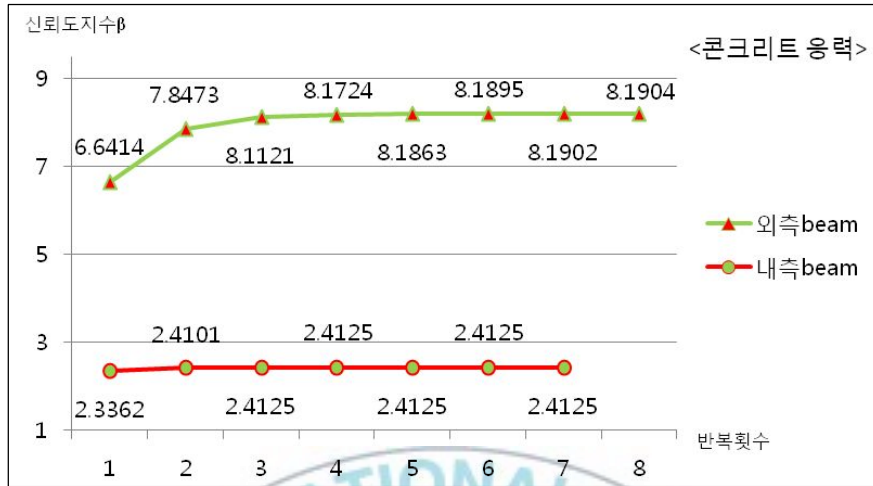


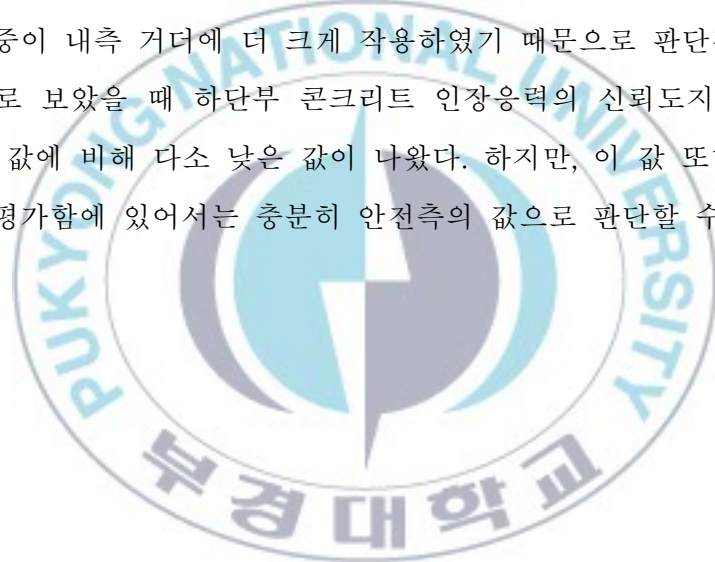
그림 4.4 콘크리트 응력에 대한 신뢰도지수 수렴결과

하단부 콘크리트 응력에 대한 신뢰도지수 β 의 수렴결과는 그림 4.4에 나타나있다. 그림에서 보는 바와 같이 외측 거더의 경우 약 5회 이상의 반복 계산에서부터 신뢰도지수가 8.18 근처의 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 내측 거더의 경우에는 약 2회 이상의 반복 계산에서부터 신뢰도지수가 2.41 근처의 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

표 4.3 민감도계수 및 신뢰도지수와 파괴확률

구 분		민감도계수		신뢰도지수	파괴확률(%)
		곡률마찰계수(μ)	파상마찰계수(k)		
처짐	외측	-0.2909	-0.9567	4.4934	0.000351
	내측	-0.2699	-0.9629	10.6207	0
콘크리트 응력	외측	-0.33263	-0.94305	8.1904	0
	내측	-0.29935	-0.95414	2.4125	0.889404

처짐과 하단부 콘크리트 응력에 대한 각각의 민감도계수, 신뢰도지수, 파괴확률을 표 4.3에 정리하여 나타내었다. 그 결과 처짐에 대한 신뢰도지수는 내측 거더가 10.6207, 외측 거더가 4.4934로 외측 거더의 신뢰도지수가 더 낮게 나타났다. 즉, 외측 거더의 파괴확률이 더 높게 나타났다는 의미인데, 그 이유로는 슬래브 합성 후 고정하중의 영향으로 외측 거더에 더 큰 모멘트가 발생하였기 때문으로 판단된다. 그리고 콘크리트 응력에 대한 신뢰도지수는 내측 거더가 2.4125, 외측 거더가 8.1904로 내측 거더의 파괴확률이 더 높게 나타났고, 그 이유로는 cross beam의 영향으로 슬래브 합성 전 고정하중이 내측 거더에 더 크게 작용하였기 때문으로 판단된다. 표 4.2의 결과들로 보았을 때 하단부 콘크리트 인장응력의 신뢰도지수가 2.4125로서 다른 값에 비해 다소 낮은 값이 나왔다. 하지만, 이 값 또한 구조물의 안전성을 평가함에 있어서는 충분히 안전측의 값으로 판단할 수 있다.



4.4 Level I 신뢰성해석 결과 및 고찰

부분안전계수를 적용한 설계방법은 계산설계치에 부분안전계수를 곱한 값을 설계검토치로 사용하는 방법이다. 즉, 계산된 설계검토치의 값들이 허용치를 초과하는지 검토함으로써 각각에 대한 목표신뢰도지수 충족 여부를 평가할 수 있다. 이 연구에서는 목표신뢰도지수를 처짐에 대해서는 4.0, 콘크리트 응력에 대해서는 2.0으로 설정하였다. 목표신뢰도지수는 선행연구들을 참고하였을 때 Level II 과정을 통해 계산된 신뢰도지수를 넘지 않는 수준으로 설정하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 목표신뢰도지수를 더 낮게 설정함으로써 파괴확률은 더 높아지게 되는데, 이렇게 더 높은 파괴확률에 대한 검토를 통해 목표신뢰도지수를 만족하는지 여부를 평가하는 것이다.

표 4.4 부분안전계수

구 분		부분안전계수	
		곡률마찰계수(μ)	파상마찰계수(k)
처짐	외측	1.23275	1.76539
	내측	1.21591	1.77031
콘크리트 응력	외측	1.13305	1.37722
	내측	1.11974	1.38166

표 4.4의 부분안전계수 값을 보면 곡률마찰계수에 대해서는 1.11974 ~ 1.23275의 값을 나타내었으며, 파상마찰계수에 대해서는 1.37722 ~ 1.77031의 값을 나타내었다. 대체적으로 파상마찰계수에 대한 민감도계수가 곡률마찰계수에 대한 값보다 크게 나온 것을 볼 수 있다. 그 이유로는 Level II 신뢰성해석 과정에서 구했던 파상마찰계수에 대한 민감도계수의 값이 곡률마찰계수에 대한 값보다 상대적으로 크게 나왔기 때문이다.

$$X_d = \gamma_X X_k \quad (4.4.1)$$

X_d : 설계검토치

X_k : 설계치

γ_X : 부분안전계수

각 확률변수의 설계검토치는 식 (4.4.1)와 같이 설계치에 부분안전계수를 곱한 것으로 다음 식과 같다.

표 4.5 허용치와 설계검토치의 비교

구 분		허용치	설계검토치
처짐 (mm)	외측	37.5	37.45
	내측		37.45
콘크리트 응력 (MPa)	외측	40	27.563
	내측		39.027

* 설계검토치 = 계산설계치 × 부분안전계수

표 4.5에 각각에 대한 허용치와 설계검토치를 비교하여 나타내었다. 처짐과 하단부 콘크리트 응력의 내·외측 거더 모두 설계검토치의 값들이 허용치의 값들을 넘지 않는 수준임을 확인할 수 있다. 즉, 내·외측 거더 모두 처짐과 하단부 콘크리트 인장응력에 대해 초기에 설정한 목표신뢰도지수를 충족시키는 결과를 나타냄을 의미한다.

5. 결 론

이 연구에서는 구조물의 위험도를 정량적으로 평가하는 신뢰성해석을 다루고 있다. 30m 표준 I형 PSC 거터교량을 대상으로 거더의 처짐과 하단부 콘크리트 인장응력에 대한 위험성 평가를 수행하였다. 신뢰성해석에 사용될 확률변수는 계층분석법(AHP)을 이용하여 결정하였다.

- (1) 대상 구조물의 위험성 평가 결과, 대체적으로 처짐에 대한 신뢰도지수 값이 하단부 콘크리트 인장응력에 대한 신뢰도지수 보다 높게 나타난 것을 알 수 있었다.
- (2) 처짐에 대한 신뢰성해석 결과는 내측 거더보다 외측 거더의 파괴확률이 더 높게 나타났으며, 하단부 콘크리트 응력에 대한 신뢰성해석 결과는 외측 거더보다 내측 거더의 파괴확률이 더 높게 나타났다.
- (3) 이 논문은 확률론적인 관점에서 토목구조물의 위험성평가를 위해 기초가 되는 연구를 수행하였다. 추후의 토목구조물의 확률론적 위험성 평가에 대해서도 계층분석법(AHP)을 이용하여 확률변수를 결정한다면 충분히 신뢰성있는 결과를 도출해 낼 수 있을 것이라고 판단된다.

한편, 이 논문의 기초연구를 토대로 추후 계층분석법을 사용하여 연구를 진행한다면 계층분석과정의 설문조사 단계시 설문대상자의 수를 늘리기보다 설문대상자의 전문성을 더욱 고려하는 것이 해석결과의 신뢰도를 높여 줄 것으로 판단되며, 향후 연구에서 반드시 주의해야 할 부분이다.

부 록 I 계층분석 과정의 설문조사 자료

표 1 설계변수에 대한 설문지(1)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	4	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	3	0.33	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	2	0.33	0.33	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	3	2	2	3	1	-	-
F	파상마찰계수	3	2	2	2	1	1	-
G	상대습도	2	0.33	1	1	0.5	0.33	1

표 2 설계변수에 대한 설문지(2)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	2	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	1	0.5	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	1	0.33	0.5	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	3	1	2	3	1	-	-
F	파상마찰계수	3	1	2	3	1	1	-
G	상대습도	2	0.5	2	2	0.5	0.5	1

표 3 설계변수에 대한 설문지(3)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	4	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	3	0.33	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	2	0.25	0.5	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	2	3	2	4	1	-	-
F	파상마찰계수	3	2	2	3	1	1	-
G	상대습도	1	0.33	0.5	0.5	1	0.5	1

표 4 설계변수에 대한 설문지(4)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	4	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	2	0.5	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	0.33	0.5	0.33	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	2	1	3	5	1	-	-
F	파상마찰계수	3	0.5	2	3	0.5	1	-
G	상대습도	1	0.5	2	2	0.33	0.5	1

표 5 설계변수에 대한 설문지(5)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	4	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	2	0.25	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	1	0.33	1	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	4	2	2	3	1	-	-
F	파상마찰계수	4	3	3	3	1	1	-
G	상대습도	1	0.25	1	2	0.25	0.2	1

표 6 설계변수에 대한 설문지(6)

기준 항목		비교 항목						
		A	B	C	D	E	F	G
A	텐던의 편심	1	-	-	-	-	-	-
B	압축강도	2	1	-	-	-	-	-
C	크리프계수	2	1	1	-	-	-	-
D	건조수축계수	0.33	0.5	0.25	1	-	-	-
E	곡률마찰계수	3	0.5	1	4	1	-	-
F	파상마찰계수	4	1	1	3	2	1	-
G	상대습도	2	1	1	3	3	2	1

참 고 문 헌

- 1) **김명진** (2003) 계층화 분석법(AHP)에 의한 한국의 적정 국방비 수준 결정에 관한 연구 경희대 대학원 석사학위논문
- 2) **김시진** (2009) AHP를 이용한 버스터미널 입지선정 우선순위분석에 관한 연구, 한밭대 산업대학원 석사학위논문.
- 3) **김종화** (2007) 확률론적 해석기법들을 이용한 구조 신뢰성 해석 프로그램 개발, 세종대 대학원 석사학위논문.
- 4) **남호윤** (2009) 일계이차모멘트법에 의한 기존 철근콘크리트 부재의 안전성 평가, 한양대 대학원 석사학위논문
- 5) **박문재, 김광철** (2009) 목구조 설계를 위한 확정론적 구조설계법과 확률 기반 구조설계법의 비교 연구, 한국가구학회지, 한국가구학회, Vol. 20(4), pp. 358~373
- 6) **박미연, 조효남, 조태준** (2006) 붕괴모드 조합 예측법에 의한 PSC 사장교의 위험도평가, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol. 26(4), pp. 647~657
- 7) **박옥주** (2006) 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 신뢰성해석, 여수대 대학원 석사학위논문.
- 8) **박재영** (2005) 축력과 휨을 받는 철근콘크리트 전단벽의 신뢰성 해석, 이화여대 과학기술대학원 석사학위논문.
- 9) **이상근** (2010) 잔교식 안벽의 신뢰성 설계, 군산대 대학원 석사학위논문.
- 10) **이영주** (2006) 신뢰성 평가를 통한 강사장교의 하중-저항계수 결정에 관한 연구, 서울대 대학원 석사학위논문.
- 11) **이홍우** (2004) 국내 RC 슬래브교 및 PSC 거더교의 휨파괴에 대한 신뢰성 평가, 서울대 대학원 석사학위논문.
- 12) **양영순, 서용석, 이재욱** (1999) 구조신뢰성공학, 서울대학교 출판부
- 13) **조병일** (2009) 해상교량의 선박 충돌 위험도 해석, 군산대 대학원 석사학위논문.

- 14) **조효남, 임종권, 박경훈** (1998) 체계신뢰성방법에 기초한 강사장교의 내하력 평가, 전산구조공학회지, 전산구조공학회, Vol. 11(4), pp. 341~350
- 15) **한국콘크리트학회** (2007) 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당
- 16) **허성호** (2006) 신뢰성 해석을 이용한 강거더교의 피로해석, 제주대 대학원 석사학위논문.
- 17) **Cornell, C. A.** (1969) A Probability - Based Structural Code, Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 66, No. 12, pp. 974~985
- 18) **Ditlevsen, O.** (1979) Generalized Second Moment Reliability Index, Journal of Structural Mechanics, Vol. 7, No. 4, pp. 435~451
- 19) **Ellingwood, B.** (1978) Reliability Basis of Load and Resistance factors for Reinforced Concrete Design, National Bureau of Standards Building Science Series 110, National Bureau of Standards, Washington D. C.
- 20) **Freudenthal, Am. M., Garrelts, J. M., Shinozuka, M.** (1966) The Analysis of Structural Safety, Journal of the Structural. Division, ASCE, Vol. 92, pp. 267~326
- 21) **Fiessler, B., Neumann, H. J., Rackwitz, R.** (1979) Quadratic Limit States In Structural Reliability, Journal fo The Engineering Mechnics Division. ASCE, Vol. 105, No. 4, pp. 661~676
- 22) **Haldar, A., Mahadevan, S.** (2000a) Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, N.Y
- 23) **Haldar, A., Mahadevan, S.** (2000b) Reliability Assessment using Stochastic Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, New York, N.Y
- 24) **Hasofer, A. M., and Lind, L. C.** (1974) Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. 1, pp. 111~121)
- 25) **Kiureghian, A. D., Lin, H-Z., Hwang, S-J** (1987) Second-Order Reliability Approximations, Journal of the Engineering Mechnics Division, ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 1208~1225

- 26) **Luis G. Vargas**, (1990) An overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications, European Journal of Operation Reaseach, Vol. 48, pp.4~5
- 27) **Rackwitz, R., Fiessler, B.** (1978) Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computers and Structures, Vol. 9, pp.489~494
- 28) **Rajashekhar, M.R., Ellingwood, B.R.** (1993) A new look at the response surface approach for reliability analysis, Structural Safety, Vol. 12, pp. 205~220.
- 29) **Sexsmith, R. G.**, (1969) Reliability Analysis of Concrete Member, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 66, pp. 413~420
- 30) **Thomas L. Saaty** (1990) The Analytic Hierarchy Process, Pittsburgh RWS Publications, pp.21
- 31) **Thomas L. Saaty, Kevin P. Kearns** (1985) Analytical Planning : The Orhanization of Systems, Pittsburgh RWS Publications, pp.34

감사의 글

부족함이 많은 저도 어느덧 논문을 마무리 하면서 감사의 글을 쓰는 순간이 오게 되었네요. 멀게만, 길게만 느껴졌던 2년도 지금은 지나간 시간으로 조금의 아쉬움과 함께 만감이 교차하는 순간입니다. 2년이라는 길고도 짧은 시간동안 저에게 많은 도움이 되어주신 분들께 짧게나마 감사한 마음을 전하고자 합니다.

항상 열과 성을 다해 논문을 지도해주시며, 부족한 저를 논문이 마무리되기까지 잘 이끌어주신 이환우 교수님께 진심으로 깊은 감사드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 논문에 대해 세밀한 검토와 지도를 해주신 김명식 교수님, 장희석 교수님과 학위 과정에서 강의를 통해 많은 것을 지도해주신 이동욱 교수님, 국승규 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 2년 동안 연구실 생활을 하면서 많은 도움을 주시고, 조언을 해주신 선배님들에게도 진심으로 감사의 뜻을 전합니다.

제가 처음 연구실에 들어올 때 반갑게 맞이해주던 호준이 행님, 재엽이 행님, 그리고 지금은 잠시 떨어져있지만 대학 1학년부터 거의 항상 같이 웃고, 같이 다녔던 동기 승일이, 같은 년도 생일인데 형님대우 해준다고 고생한 똑똑한 경섭이와 우여곡절 많은 인보에게까지 모두 모두에게 누구 못지않은 크나큰 고마움을 전하고, 사회에 나와서도 힘든 일이 있으면 망설임 없이 연락하며, 서로 믿고 의지하자는 말을 전합니다.

또한, 배움을 위해 준산까지 먼 걸음 하였을 때 반갑게 맞아주신 김동현 교수님, 그리고 신뢰성해석에 눈을 뜨게 해준 이상근 형에게도 결코 잊지 않고 감사한 마음을 갖고 있습니다. 그리고 이제는 우리 둘뿐이라는 내친구 재민이와 멀리서 지켜보고 있을 내친구 성우에게도 미안한 마음과 함께 고맙다는 말을 전합니다.

마지막으로 항상 아들을 믿고 바라보며 와주신 아버지, 어머니에게 글로는 다 표현할 수 없는 감사한 마음을 전합니다. 그리고 못난 동생 항상 챙겨주고, 걱정해준 최고 멋진 우리누나에게도 고마움을 전하며, 우리가족 모두에게 사랑한다는 말과 함께 이 논문을 바칩니다.