Bayesian 통계법을 활용한 성능기반형 콘크리트 배합설계방법 개발

김장호^{1)*} · 판덕형¹⁾ · 이근성¹⁾ · 이나현¹⁾ · 김성배¹⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Development of PBD Method for Concrete Mix Proportion Design Using Bayesian Probabilistic Method

Jang-Ho Jay Kim,^{1)*} Duc-Hung Phan,¹⁾ Keun-Sung Lee,¹⁾ Na-Hyun Yi,¹⁾ and Sung-Bae Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT Recently, Performance Based Design (PBD) method has been studied as a next generation structural design method, which enables a designed structure to satisfy the required performance during its service life. One method of deciding whether the required performance has been satisfied is Bayesian method, which has been commonly used in seismic analysis. Generally, it is presented as a conditional probability of exceeding some limit state (i.e., collapse) for a given ground motion. In PBD of concrete mixture design, the same methodology can be applied to assess concrete material performance based on some conditional parameters (i.e. strength, workability, carbonation, etc). In this paper, a detailed explanation of the procedure of drawing satisfaction curve by using Bayesian method based on various material parameters is shown. Also, a discussion of using the developed satisfaction curves for PBD for concrete mixture design is presented.

Keywords : performance based design, Bayesian method, satisfaction curve, concrete mixture design

1. 서 론

성능기반형 설계방법(performance based design method, 이하 PBD 설계방법으로 칭함)은 기존 과거 설계방법, 신규 해석법, 실험 결과 및 경험 등을 결합해, 구조물에 요구되는 재료 성능을 만족하는 성능기반형 설계방법으로, 최근 차세대 구조설계 방법의 한 대안으로 전 세계적으로 연구되고 있다.¹⁾ 이 연구에서는 PBD 방법을 사용하여 사용기간 동안 콘크리트의 재료적 성능에 요구되는 안전성, 사용성, 재활용성 및 내구성을 만족시킬 수 있는 배합설계방법을 개발하고자 한다.

Fig. 1은 PBD 일반 개념에 대한 모식도를 나타내고 있으며²⁾ PBD 설계개념은 새로운 설계방법이 아니라 현존하고 있는 설계방법, 해석 및 사용 결과, 과거의 경험 등을 총 통합하여 최적화된 설계를 하는 것을 목적으로 두고 있으며 특히 PBD의 최종 목적은 사용기간 중 충분한 성능을 갖춘 구조물을 설계, 시공하는데 있다. 이는 Euro Code,³⁾ Asian Concrete Model Code⁴⁾ 등과 같은 국가 또는 지역적 설계규정에도 포함되어 있는 개념이며, 특히 지진공학 분야⁵⁻⁷⁾에서 구조물의 사용목적 및 중요

성과 지진의 단계를 고려하여 설계하는 성능기반형 내진 설계 performance based seismic design(PBSD)⁸⁾와 유사한 설계방법이다. 성능기반형 재료설계 방법에서 콘크리트 재료는 사용 목적을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 하므로, 그 재료의 성능 수준에 따라 구분되어야 한다. 원자로 격납조에 사용되는 고강도 프리스트레스트 콘크리트, 해양 구조물에 사용되는 불침투성 콘크리트, 주거용 구조물에 사용되는 일반강도 콘크리트와 단기간 사용되는 최소 성능의 콘크리트는 각각의 사용 목적에 따라 매우 우수, 우수, 보통, 최소로 구분할 수 있다. 구조물에 요구되는 성능 수준에 따라 구분된 콘크리트는 콘크리트 재료의 만족도를 콘크리트 재료의 요구성능에 부합하는 배합설계에 따라 선택할 수 있게 된다. 데이터의 추가확보에 따라 조건부확률 개념을 적용한 확률통계방법인 Bayesian 방법^{9,10)}은 이러한 만족도를 계산하는데 매우 유용하다. Shinozuka⁵⁻⁷⁾는 통계방법을 구조물의 지진에 대한 취약도를 평가하는 데 사용하여 fragility라는 개념을 개발하였다. 여기서 취약도 분석방법은 Bayesian 통계법을 기반으로 유도된 내진성능평가 방법이다.

이 논문에서는 강도, 위커빌리티, 탄산화 깊이 등과 같은 설계조건에 따른 콘크리트 재료의 성능을 평가하는데 이 방법을 적용하고자한다. 재료성능의 만족도는 각 만족규정과 특정 콘크리트 재료 배합 설계 간의 관계를 표현하는 만족도 곡선으로 나타내었다. 그러므로 만족도

*Corresponding author E-mail: jjhkim@yonsei.ac.kr
Received July 10, 2009, Revised November 10, 2009,
Accepted January 5, 2010
©2010 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 Classification of design methods

곡선을 만드는 과정에서 콘크리트 재료특성과 그것의 다양한 단계에 대한 정의가 요구된다. 다양한 요구 성능에 의해 사용되는 재료가 결정되는 성능 기반 재료 설계방법을 이용하면 배합에 사용되는 콘크리트의 재료는 최적으로 설계될 수 있고, 효과적으로 구성될 수 있다. 이 방법에서는 환경조건, 구조물 종류, 예상 사용기간 등과 같은 구조물의 특성과 관련된 다양한 조건에 맞추어 콘크리트 재료를 설계한다. 그리고 만족도 곡선을 활용하여 콘크리트 배합의 성공 가능성을 평가할 수 있는 Bayesian 방법은 PBD에 적용되어 콘크리트 배합설계의 성능을 평가하는데 사용하고자 한다.

2. 성능기반 설계

2.1 성능기반 설계 방법

일반적으로 기존의 허용응력설계법(WSD), 강도설계법(USD), 한계상태설계법(LSD)와 같은 설계방법과 콘크리트 시방서에 기술되어 있는 설계방법은 여러 가지 요구조건을 만족시키는데 하나의 방법론에만 국한되는 경향을 보인다. 이러한 기존의 설계규정은 유연하지 못하여 설계자들을 규제하고 설계결과물이 반복적이며 창조적이지 못하게 제한하고 있다. 이와 같은 설계기준과 시방서들은 특수한 성능이 요구되는 설계에 있어서 설계자들로 하여금 그 해결방안을 도출하는 과정에 도움이 되지 않고 있으므로, 문제 해결에 있어 다양한 해결방안을 이끌어 낼 수 있는 더욱 유연하고 실용적인 설계방법이 필요한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 새로운 설계방법으로 성능기반 설계방법(PBD 방법)이 있으며 PBD는 다양한 해결책을 제시할 수 있을 뿐만 아니라 경제성과 기능성면에서도 최대한의 효과를 이끌어 낼 수 있는 방법이다. 또한 PBD 설계방법은 모든 기준과 사용기간 동안 재료와 구조물의 요구조건을 만족시키는 것을 목적으로 하고 있으므로 구조물의 중요성과 요구 성능에 맞추어 설계, 시공하고 유지할 수 있는 방법이라고 할 수 있으며, Fig. 2는 PBD의 통합특성을 보여주고 있다.

PBD 설계방법을 콘크리트 재료 설계에 적용하기 위해

Fig. 2 Property of PBD

서는 콘크리트의 요구성능을 만족하여야 한다. 그러므로 제공되는 콘크리트 재료는 구조물의 요구성능에 따라 매우 우수, 우수, 보통, 최소 등의 등급으로 분류될 필요가 있다. 설계 요소 값과 콘크리트 재료의 목표 성취 확률간의 관계는 Bayesian 방법의 만족도 곡선으로 나타낼 수 있다. 특히, 만족도 곡선을 사용함으로써 요구 확률에 대한 설계 요소 값을 수월하게 결정할 수 있다. Fig. 3은 Bayesian 방법을 이용한 PBD 설계과정이다. 만족도 곡선 작성 과정에서 재료 요소는 실제로 재료성능에 영향을 미치는 변수이고 재료 설계 과정에서 구조물의 성능을 반영하여 충분히 고려되어야 하므로 성능 수준을 고려하는 재료 설계 방법은 성능 기반형의 설계법이라고 할 수 있다.

2.2 Fragility 방법

일반적으로 fragility 방법에서, fragility 곡선은 지진이 발생한 상황에서 교량 및 구조물의 취약성을 확률론적인 방법으로 평가하는 데 이용된다. Shinozuka⁵⁻⁷⁾에 의해 개

Fig. 3 Main procedures of PBD method

발된 이 방법은 주어진 지반 진동 강도에 대해 붕괴와 같은 한계초과 현상이 발생할 조건부 확률을 정규분포함수의 곡선으로 나타내는 방법이며 그 평균값과 로그 표준편차값을 maximum likelihood 방법을 통해 추산하는 방법이다. 현재 목적에 부합하는 likelihood 함수는 다음과 같다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (1)$$

여기서 $F(\cdot)$ 는 특정 손상단계의 fragility 곡선을 의미하고, a_i 는 교량 i 를 대상으로 한 최대 지반 진동 가속도(peak ground acceleration, PGA)값이며, x_i 는 a_i 와 같은 PGA값 이하의 교량 손상에 따라 0 혹은 1로 결정된다. N 은 지진 후 조사된 총 교량의 수로 정한다. 통용되는 로그 정규분포의 가정 하에서는 $F(a)$ 는 다음과 같은 형태를 취한다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{c}\right)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서 a 는 PGA를, $\Phi[\cdot]$ 는 표준화된 정규분포 함수를 나타낸다. 식 (2)에서 c 와 ζ 는 식 (3)으로 나타낸 $\ln L$ 를 최대화하기 위해 계산된 값이다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (3)$$

이 계산은 널리 사용되고 있는 최대화 알고리즘에 의해 수행된다. 이 연구에서는 이와 같은 방법론을 통해 PGA 대신 콘크리트 재료의 특성을 기반으로 만족 확률을 추산하는데 이용하였으며, 그 요구되는 성능 수준에 의해 결정되는 확률 곡선을 ‘만족도 곡선’이라 부르기로 결정하였다.

3. 만족도 곡선 작성 방법

3.1 만족도 곡선 작성 과정

일반적으로 만족도 곡선을 작성하기 위해서는 3가지 주요 단계를 거친다.

- 1단계: 필요한 콘크리트 재료에 대한 데이터를 충분히 수집한다. 그러나 데이터가 부족할 경우 표준정규분포 함수로부터 가상의 데이터를 도출하여 그 부족한 데이터를 보완할 수 있다.
- 2단계: 각 데이터의 만족여부(성공/실패) 상태는 미리 정한 재료성능규정에 의해 결정한다.
- 3단계: Bayesian 방법을 이용하여 만족도 곡선을 작성한다.

재료 기반 만족도 곡선을 작성하는 과정을 보여주기

위하여 한 가지의 예제를 전제하는 방법으로 설명하고자 한다. “단위수량”에 의해 결정되는 콘크리트 배합의 위커빌리티의 만족도 곡선을 작성하고, “단위 수량” 요소를 기반으로 한 만족도 곡선 작성 과정을 예제로 제시하고자 한다. 예제에 사용되는 두 가지 데이터는 (1) 물시멘트 비 “w/c”와 (2) 단위 수량 “w”이다. 예제에서, “w/c”와 “w”는 콘크리트의 위커빌리티 혹은 슬럼프에 영향을 주는 요소이다. 그리고 일정 단계의 슬럼프는 콘크리트 배합비의 성공·실패 여부를 결정한다.

3.2 가상 데이터 생성 방법

만족도 곡선은 선택한 parameter의 성공/실패 여부를 결정하는 통계적인 방법이므로 실제로 사용 가능한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 풍부한 데이터가 필요하다. 그러나 일반적으로 만족도 곡선을 작성하는데 필요한 실험 데이터가 불충분하므로 이 한계를 극복하기 위해 실제 실험 데이터를 이용해 정규분포곡선을 그리고 이 곡선으로부터 가상 데이터를 도출해야한다. 가상 데이터를 구하는 방법은 다음과 같다. Table 1에 나타난 것과 같이 물시멘트비에 대한 단위수량은 총 4 가지로 155, 165, 175, 185이며 이 값들의 평균과 표준편차는 170, 22.36이다. 이 두 가지 값을 이용해 단위수량의 정규분포곡선을 그릴 수 있고 이 곡선으로부터 가상의 데이터를 얻어낼 수 있다. 정규분포 곡선안의 점이 1만개라고 생각하고 각 단위수량에 대한 x축의 길이를 균일하게 1로 잡아주면 곡선의 높이는 곧 넓이가 된다. 예를 들어 단위 수량 170.5에 대한 가상 데이터의 수를 알기 위해서 단위수량 170부터 171까지의 곡선이 x축과 이루는 넓이(정규분포곡선을 x가 170부터 171일 때까지 적분)를 계산한 값이 356이라면 x축의 길이가 1이므로 그 높이는 결국 356이 되고 이는 곧 가상 데이터의 수가 356임을 의미한다. Table 1은 물시멘트비와 단위 수량에 대한 슬럼프값을 실험을 통해 얻어낸 결과이며, Fig. 4는 “단위 수량”의 정규분포곡선이다. Table 2는 Fig. 4의 정규

Table 1 Experimental data of w/c, unit water and slump

w/c (%)	Unit water (kg/m ³)	Slump (mm)
400	155	61
	165	90
	175	170
	185	190
50	155	140
	165	150
	175	195
	185	209
60	155	169
	165	179
	175	190
	185	210

Fig. 4 Standard normal distribution of “unit water”

Table 2 Virtual data points for “unit water”, “w/c”

w (kg/m ³)	Number	w/c (%)	Number
132.5	1	40.5	248
133.5	1	41.5	284
134.5	2	42.5	320
...	...	...	...
169.5	356	49.5	398
170.5	356	50.5	398
...	...	...	...
205.5	2	57.5	320
206.5	1	58.5	284
207.5	1	59.5	248

분포 곡선을 이용해 구한 총 1만개의 가상데이터가 단위 수량과 물시멘트비에 따라 어떻게 분포하고 있는지 표로 나타낸 것이다.

3.3 기준에 따른 성공/실패 결정 과정

각 데이터 점은 미리 정한 기준에 따라 그 성공 여부를 확인하며, “w/c”와 “w”의 경우, 그 배합이 적당한가에 대한 판단은 슬럼프 기준 규정을 이용하여 결정한다. 이 예제에서는 실험으로 획득한 “w”와 “w/c” 기반으로 슬럼프 150 mm에 대한 만족도 곡선(Fig. 5)이며 “w”와

Fig. 5 “w” and “w/c” -slump curve

Table 3 Success/failure status of “w”

w (kg/m ³)	Number of data points	s or f
139.5	1	0
140.5	1	0
140.5	1	0
140.5	1	0
...	...	...
198.5	1	1
198.5	1	1
198.5	1	1

“w/c”의 데이터 중 150 mm 위의 값들은 성공, 그 이하는 실패로 결정한다. 성공 실패 여부를 결정하는 과정에서 1은 성공, 0은 실패를 의미하여 이 과정은 모든 데이터 점에 적용한다. Table 3은 단위 수량에 따라 슬럼프가 150 mm 이상을 만족하는지 success(s) 또는 fail(f)로 나타낸 표이다.

3.4 만족도 곡선 개발

만족 확률을 계산하기 위해서 로그정규누적분포법이 사용된다. 로그정규누적분포법은 재료변수값, 평균값, 표준편차, 이 세 가지 변수들을 필요로 하는 확률함수이다. 이 연구의 경우 최우도함수(maximum likelihood function) 식에서 a_g (peak ground acceleration, PGA)값대신에 콘크리트 재료 변수를 넣고, N값에는 재료변수 데이터의 수를 넣었다. 또한 교량 손상에 따라 0 혹은 1 값을 넣는 것 대신에 재료 변수가 기준 성능을 만족하면 1, 불만족하면 0을 넣고 이 세 가지 변수데이터들을 베이지안 확률 계산 프로그램 코드에 넣어 계산하면 로그정규 분포로부터 평균값과 표준편차를 구할 수 있으며 최종적으로 만족도 곡선을 얻어낼 수 있다. 그리고 이 곡선을 이용해 특정 변수값에서의 만족확률을 구할 수 있다. Fig. 6은 위에 서술한 방법으로 여부(슬럼프가 150 mm를 초과하면 성공, 150 mm를 넘지 못하면 실패)의 확률을 나타낸다. Figs. 7과 8은 여러 슬럼프 기준값(140 mm, 150 mm,

Fig. 6 Satisfaction curve for w parameter

Fig. 7 Satisfaction curve for w/c parameter

Fig. 8 Satisfaction curve for unit water parameter

160 mm)에 있어서의 각각의 “w/c”와 “w”에 관한 만족도 곡선이다. 사실 만족도 곡선에서의 확률 값은 0~1 구간 혹은 1~0 구간에서 연속인 곡선이 되어야 하나, 때로는 비현실적인 데이터를 제거해야만 하므로 해당 구간 안에서 잘린 곡선이 나오기도 한다. 예를 들어 Fig. 7의 경우가 이런 경우이다.

3.5 PBD형 만족도 곡선의 사용 방법

이미 언급한 것과 같이 만족도 곡선은 PBD에 적용될 것이다. 이 예제에서 사용된 Bayesian 방법은 2개의 변수를 사용하는 방법이며, “단위 수량” 의거해 만족도 곡선을 사용할 수 있다. Fig. 6의 “단위 수량” 대한 만족도 곡선은 여러 단위 수량 값에 따른 150 mm 슬럼프 값의 초과 확률을 보여준다. 예를 들어 150 mm 슬럼프 기준이 적당하다면, 이 기준을 50% 이상 만족하기 위해서는 단위수량이 160 kg/m^3 이상이 되어야한다.

3.6 재료 특성 만족도 곡선 작성

앞에서 사용한 예제는 특정 위커빌리티 기준 값에 대한 물시멘트 비율과 단위 수량을 보여주는 성능만족효율 예제이다. 사실 그 이외의 콘크리트 재료 변수(단위 시

멘트량, 단위 골재량, 최대 굵은 골재 치수, 단위 첨가제 등)들은 콘크리트 재료 성능(위커빌리티, 강도, 변위, 탄성계수, 균열 폭, 건조수축, 크리프 등)에 모두 영향을 미치며, 이러한 관계는 콘크리트 품질에 직접적인 영향을 미친다. 콘크리트 재료 요소의 다른 재료 성능기준에 대한 영향을 잘 보여줄 수 있는 몇 가지 예를 들어보도록 하고자 한다. 먼저 골재의 최대 치수와 28일 강도를 기준으로 한 시멘트량을 인자로 분석하였다.¹¹⁾ 시멘트량과 최대 골재 치수에 대한 재령 28일 강도 25 MPa 콘크리트의 만족도 곡선은 Figs. 9와 10에 나타내었다.

두 번째 예는 2년간 65%와 100%의 상대 습도에 노출된 콘크리트의 압축강도를 기반으로 한 탄산화 깊이에 대한 실험 결과에 대한 분석이다.¹²⁾ 상대습도와 강도를 기준으로 한 5 mm 깊이의 탄산화에 대한 만족도 곡선은 Figs. 11과 12에 나타내었다.

세 번째로 물시멘트 비와 단위수량, 시멘트 함량에 대한 수축 변형률에 대한 실험적 데이터를 실었다.¹³⁾ “단위 수량”과 시멘트량에 대한 100×10^{-6} 수축 변형률의 만족도 곡선을 Figs. 13과 14에 나타내었다.

이와 같이 PBD 설계방법은 Bayesian 방법을 사용하여 그려진 다양한 콘크리트 성능만족곡선을 활용하여 현재 제시된 배합설계가 기준 성능을 만족하는지의 여부를 평가할 수 있다. 또한 이렇게 다양한 콘크리트 재료요소들

Fig. 9 Satisfaction curve for max. aggregate size

Fig. 10 Satisfaction curve for cement content

Fig. 11 Satisfaction curve for strength

Fig. 12 Satisfaction curve for relative humidity

Fig. 13 Satisfaction curve for water content

을 콘크리트에 대한 성능의 만족여부를 0%에서 100%까지 나타낼 수 있는 만족도 곡선으로 나타낸다면 콘크리트 배합설계에 매우 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 사용기간 동안 재료적 성능과 구조물에 요구되는 안전성, 사용성, 내구성 등을 만족시킬 수 있는 합리적인 차세대 설계 방법인 PBD 방법을 Bayesian 통계법을 적용하여 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

Fig. 14 Satisfaction curve for cement content

- 1) Bayesian 통계법은 여러 가지 재료 요소들을 기반으로 성능을 판단하며, Bayesian 방법을 이용하여 간단하고도 실용적인 콘크리트 재료 성능평가가 가능하다.
- 2) Bayesian 통계법은 PBD에 이용 가능한 만족도 곡선을 도출하는 것이 가능하다. 이 곡선은 모든 재료 변수와 재료성능 만족에 대한 평가 곡선이며, 특히, 활용이 잦은 다양한 콘크리트 재료 특성 요소에 대한 성능만족 여부의 판단이 가능하다. 콘크리트 배합 설계에 있어서는 만족도 곡선 이용은 재료 특성 요소에 따른 구조물의 성능 만족 가능성을 측정할 뿐만 아니라, 역으로 각 재료들의 특성요소 값에 따른 성능 중심 배합설계가 가능하다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부에 의해 지원된 한국콘크리트학회의 Construction Core Technology Program D11, “Center for Concrete Corea”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. PeBBu, “Performance Based Building,” *Report of EC 5th Framework*, 2005, 97 pp.
2. Korean Concrete Institute (KCI), “Performance Based Design,” *KCI Report*, 2005, 411 pp.
3. European Committee for Standardization, *Euro Code 2: Design of Concrete Structure*, British Standards 2004, 225 pp.
4. International Committee on Concrete Model Code for Asia, *Asian Concrete Model Code*, ACMC, 2001, 82 pp.
5. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. H., and Naganuma, T., “Statistical Analysis of Fragility Curves,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1224~1231.
6. Singhal, A. and Kiremidjian, A. S., “A Method for Earthquake Motion Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frame,” *Report No. 119*, 1996, 186 pp.
7. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda,

- T., *Statistical Analysis of Fragility Curves*, Department of Civil and Environmental Engineering University of Southern California, Los Angeles, California, 2001, 143 pp.
8. Comité Euro International du Béton and the Federation International de la Précontrainte, *Displacement Based Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*, CEB-FIB, 2003, 184 pp.
 9. Ang, A. H. S-S. and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering*, Wiley, Hoboken, N. J., 2006, 409 pp.
 10. Box, G. E. P. and Tiao, G. C., *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, Addison Wesley, Reading, Mass., 1992, 608 pp.
 11. Higginson, E. C., Wallace, G. B., and Ore, E. L., "Effect of Maximum Size of Aggregate on Compressive Strength of Mass Concrete," *ACI Special Publication*, Vol. 6, 1963, pp. 219~256.
 12. Shoya, M., "Drying Shrinkage and Moisture Loss of Super Plasticizer Admixed Concrete of Low Water Cement Ratio," *Transactions of the Japan Concrete Institute, Technical Report*, No. II-5, 1979, pp. 103~110.
 13. Bassat, M. B., Nixon, P. J., and Hardcastle, J., "The Effect of Differences in the Composition of Portland Cement on the Properties of Hardened Concrete," *Magazine Concrete Research*, Vol. 42, No. 151, 1990, pp. 59~66.

요 약 최근 내구수명기간 동안 요구되는 성능을 만족시키는 차세대 구조설계 연구의 일환으로 PBD 방법에 대한 관심이 증가하고 있다. 성능의 유효여부를 결정하는 방법 중의 하나인 Bayesian 방법은 일반적으로 내진해석 및 설계에서 많이 사용되어왔다. 이 방법은 어느 지진가속도로 인해 발생할 수 있는 구조물의 한계상태(i.e. 붕괴)의 초과확률을 체계적으로 계산할 수 있는 통계방법이다. 이 연구에서는 Bayesian 방법을 활용하여 콘크리트 배합에 대한 강도, 워커빌리티, 탄산화 등과 같은 재료성능의 만족도를 만족 비율로 계산할 수 있는 PBD 개념을 개발하고자 한다. 설계 또는 분석에 사용될 수 있는 Bayesian 방법은 다양한 재료의 특성을 고려하여 만족도 곡선 작성 과정을 설명하고 작성된 만족도 곡선을 사용하는 방법을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 성능기반형 설계, Bayesian 방법, 만족도 곡선, 콘크리트 배합설계