

# Bayesian Method를 적용한 성능기반설계기법(PBD)의 활용

## Implementation of Performance Based Design Method based on Application of Bayesian Method

김장호\*      이경민\*\*\*      박정호\*\*\*      홍종석\*\*\*      이정\*\*\*  
Kim Jang Ho   Lee Kyung Min   Park Jeong Ho   Hong Jong Suk   Li Jing

### ABSTRACT

In this paper Satisfaction Curve has been applied to estimate the material safety by using Bayesian Method based on given parameters which are obtained from experimental results of other researchers. From the results, Bayesian Method is proven to be an available method for safety estimation of material.

#### 1. 서론

콘크리트 구조물을 설계하기 위한 설계기준은 1902년 영국에서 처음으로 개발하여 사용한 이후 세계 각국에서 나라별 또는 지역별로 개발하여 사용하고 있다. 그리고 현재 까지 WSD, USD, LSD 등 여러 가지 설계법이 개발되어왔다. 성능기반형설계법(PBD)은 WSD, USD, LSD등 기존 설계법의 단점을 보완한 내용을 포괄적으로 포함하여 최적화된 설계를 하는 것에 목적을 두고 있다. 본 논문에서는 콘크리트 재료 및 시공에 대한 기대성능을 선정된 후 이 성능에 영향을 미치는 주요 인자들을 Bayesian Method으로 분석하는 방법을 사용한 성능기반형설계법(PBD)을 제시한다.

#### 2. Bayesian Method의 적용방법과 Formula

Satisfaction Curve는 2변수 대수정규분포 함수의 형태로 나타낼 수 있으며 중앙값과 대수 표준 편차는 Maximum Likelihood를 이용하여 구할 수 있다. 외력인자가 지진일 경우, Peak Ground Acceleration과 Peak Ground Velocity, Spectral Intensity 등을 대상으로 구하며 구조물의 특성에 따라 손상상태가 달라질 것을 예상하여 Bayesian Method를 도출해낼 수 있다.

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

\*정회원, 세종대학교 토목환경공학과 부교수  
\*\*정회원, 세종대학교 토목환경공학과 박사과정  
\*\*\*정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

매개 변수를 구하는 Likelihood Function은 (1)식과 같다. 여기서, F()는 특정상태의 손상에 대한 Bayesian Method를 나타내며,  $a_i$ 는  $i$ 번째 대상구조물에 대한 구조요소의 특성 값(Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity 등)이며  $x_{i=1}$ 과 0 은 구조요소의 특성 값이  $a_i$  이하일 때 구조물의 손상여부를 표시하고 N은 대상 구조물 전체의 수이다. 이 때, Lognormal Distribution, Normal Distribution 등 상황에 적합한 방법을 선택하여 사용할 수 있다. Lognormal Distribution을 가정하면, F()는 (2)식과 같다.

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

이 때,  $\Phi()$ 는 표준화 정규분포함수이다. 매개 변수  $c, \xi$ 는 L을 최대로 하기위해  $\ln L$ 을 최대로 하는 (3)식을 이용하여 구한  $c_e, \xi_e$ 를 사용한다.

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

### 3. 성능기반형 설계 기준의 기본 개념

구조물 설계의 기본 개념은 설계 강도가 요구 강도보다 크거나 같아야만 한다는 것이다. 이와 같이, 성능기반형 설계 기준 역시 설계 값이 요구 값의 이상이 되어야 한다. 즉,

$$\sum \text{설계(성능) 값} \geq \sum \text{소요(요구) 값}$$

이다. 이 때, 설계 값은 앞서 설명했듯이, Bayesian 개념을 활용하여 구하고, 요구 값은 사회성, 경제성, 기술력, 지역 환경 등과 같은 여러 가지 조건들을 고려하여 threshold value로 선정한다. 예를 들면, 사회성을 고려하여 선정한 parameter가  $\alpha_1$ , 경제성을 고려한 parameter가  $\alpha_2$ , 기술력에 대한 parameter는  $\alpha_3$ , 지역 환경 parameter가  $\alpha_4$ , 구조물 특성의 parameter가  $\alpha_5$ 로 선정 되었다면, 이러한 parameter들을 모두 고려하여 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\sum \text{설계(성능) Technique} \geq \sum \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \dots$$

### 4. 예제

#### 4.1 여러 가지 변수에 대한 Bayesian Method적용 예제

그림 1부터 그림 6까지는 위에서 설명한 Bayesian Method를 이용한 Satisfaction Curve들이다. 강도, W/C, 골재 크기, 온도, 슬럼프, 건조 수축 등 다양한 변수에 대해 Bayesian Method를 적용함으로써 성능기반설계법(PBD)에 알맞은 활용성을 보여 주고 있다.

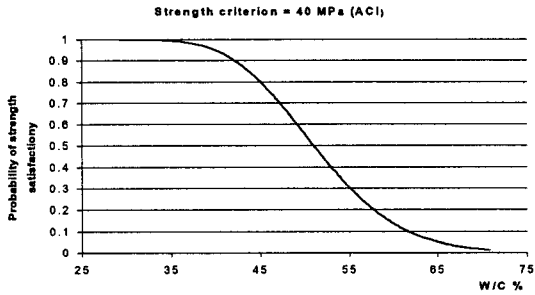


그림 1 Strength vs W/C for Temperature Variation

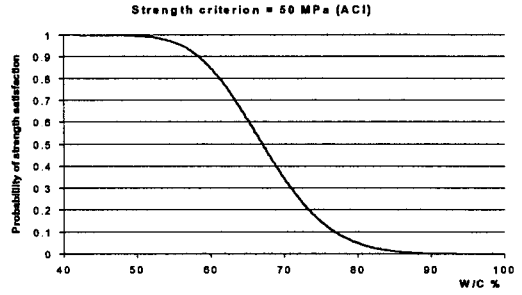


그림 2 Strength vs W/C for Silica Fume Content Variation

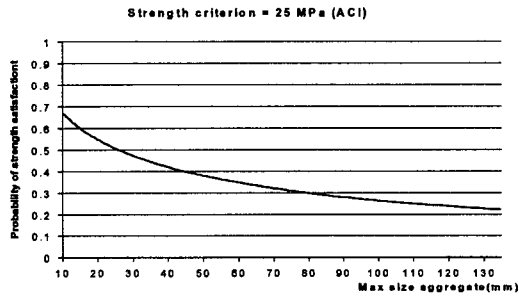


그림 3 Strength vs Maximum Aggregate Size for Cement Content Variation

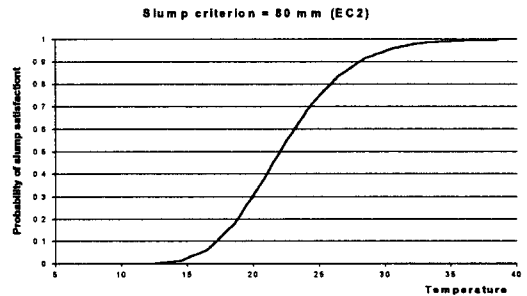


그림 4 Slump vs Temperature for Maximum Aggregate Size Variation

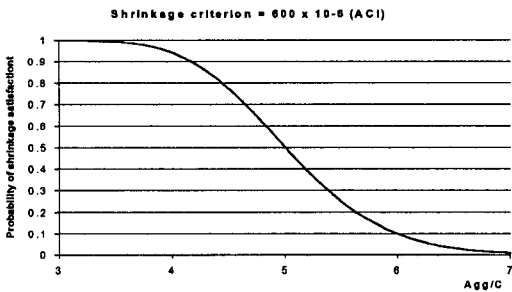


그림 5 Shrinkage vs Aggregate/Cement Ratio for W/C Ratio Variation

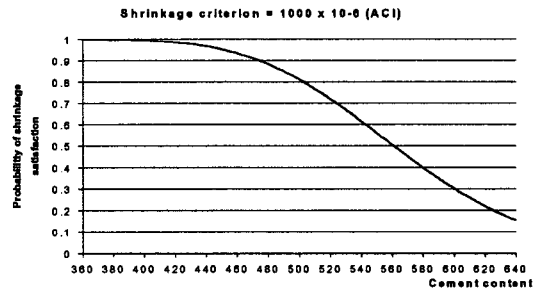


그림 6 Shrinkage vs Cement content for Water Content Variation

#### 4.2 Criterion 변화에 따른 Satisfaction Curve 변화

그림 7을 보면 설계 슬럼프 값을 15cm.에서 18cm변화시킴으로써 안정 범위(1에서 0사이)의 단위 수량 값이 변화는 것을 알 수 있다. 설계 값의 변화에 따라 Satisfaction Curve를 변화시킴으로써 재료의 필요 값을 용이하게 찾을 수 있다. 그림 8에서도 마찬가지로 설계 슬럼프 값의 변화에 따라 필요한 W/C를 찾을 수 있다.

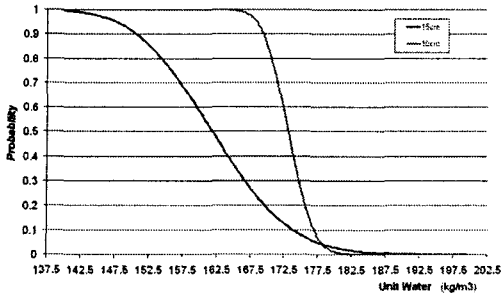


그림 7 Satisfaction curve for "w"

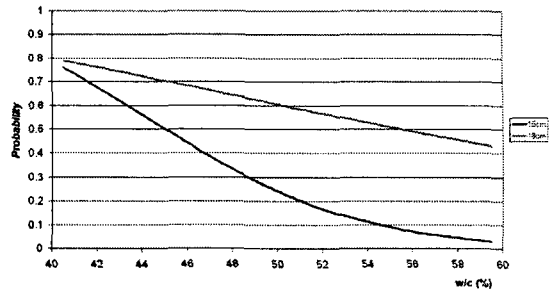


그림 8 Satisfaction curve for "w/c"

## 5. 결론

본 논문에서는 여러 예제들을 통해 주로 지진하중에 대한 구조물 안전성 평가로 사용되던 Bayesian Method를 성능기반형설계법(PBD)에 적용함으로써 다양한 콘크리트 재료 및 성능에 대해 활용 가능성을 보여 주었다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005년도 산·학·연 과제 「고성능/다기능 콘크리트의 핵심 및 활용기술 개발」 중 한국콘크리트학회에서 수행하는 「고성능 콘크리트 설계·시공지침 및 매뉴얼 개발」에 관한 일련의 연구이며 이 연구를 가능케한 한국콘크리트학회에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인 (2003) "내진보강 된 콘크리트 교량의 손상도 곡선", 대한토목학회 2003년도 정기학술대회 논문집, pp.787-790.
2. 변근주, 송하원, 홍성걸, 김장호, (2005) "성능 평가형 콘크리트의 제조 및 시공 기법", 한국콘크리트 학회
3. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., Ueda, T. (2002) "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.
4. Dutta, A. & Mander, J.B. (2002) "Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges", Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.
5. Kreyszig, E., Ohio State University at Columbus, "Advance Engineering Mathematics" Fourth edition, Ohio, USA., pp.879-884, pp.929-931.
6. Schaum, Murray R. Spiegel, "Mathematical Handbook of Formulas and Tables", pp.189, pp.259.
7. The Standard Specification for Materials and Construction of Concrete Structures in JAPAN-LEVEL3 Document.