



# 단일변수 Bayesian 방법을 이용한 성능중심형 배합설계법의 개발

김장호<sup>1)\*</sup> · 판덕형<sup>1)</sup> · 오일선<sup>1)</sup> · 이근성<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## Development of Performance Based Mix Design Method Using Single Parameter Bayesian Method

Jang-Ho Jay Kim,<sup>1)\*</sup> Hung-Duc Phan,<sup>1)</sup> Il-Sun Oh,<sup>1)</sup> and Keun-Sung Lee<sup>1)</sup>

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

**ABSTRACT** This paper presents a systematic approach for estimating material performance and designing mix proportion of concrete based on an application of Bayesian method in the form of satisfaction curves. The one-parameter satisfaction curve represents a satisfaction probability of a concrete performance criterion as a function of concrete material parameter. An analysis method to combine multiple satisfaction curves to form one unique satisfaction curve that can relate the performance of concrete to a single evaluating value called Goodness value is proposed. A proposed PBMD procedure and examples of application of the PBMD method for concrete mix proportion design are carried out to verify the validity of the proposed method. Finally, the comparison between the expected performance results of a concrete mix proportion designed using PBMD to the ACI estimation equation calculated results are performed to check the applicability of the method to actual construction.

**Keywords** : performance based design, Bayesian method, satisfaction curve, concrete mix proportion design

### 1. 서 론

이 연구의 목표는 단일변수 Bayesian 방법을 통해 얻어진 만족도 곡선을 활용해서 성능 기반형 콘크리트 배합설계<sup>1)</sup>(performance based mixture design, 이하 PBMD)를 하는 것이다. Bayesian 방법<sup>2,3)</sup>은 조건부확률을 이용한 확률통계이론이며, Shinozuka,<sup>4,5)</sup> Singhal and Kiremidjian<sup>6)</sup>에 의해 구조성능분석에 적용된 바 있다. PBMD에서도 콘크리트 재료적 성능을 평가하는데 위와 같은 방법이 사용된다.

현재 콘크리트 배합설계는 시산법위주의 설계과정이었으므로 체계화하기에 어려움이 있다. 국제 토목공사과제 발주와 타국 건설회사와의 협력관계가 증가함에 따라 PBMD와 같은 체계적이면서 유연한 설계 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 사용되고 있는 설계기준이나 규정은 이러한 PBMD 설계과정을 체계화하기에 충분하지 못하므로 이 논문에서는 선택된 특정 재료 변수에 대한 성능 만족도라는 새로운 개념을 도입한 PBMD 설계과정을 제시하고자 한다. 단일변수 Bayesian 방법을 이용해 개발된 만족도 곡선은 콘크리트 재료변수의 함수로 요구성능기준을 만족할 확률을 결정함으로써 콘크리트 배합비를 설계하고 평가하는데 까지 사용이 확대될 것이다.

PBMD의 설계과정은 3개의 주요과정과 7단계의 세부과정으로 구성되어 있으며 구조물의 용도별 요구성능을 기초로 하여 단계적으로 구성되어 있다. 또한 콘크리트의 여러 가지 성능의 상관관계를 나타내는 변수(Fig. 2), 요구성능수준의 분류(예를 들어 매우 우수, 우수, 보통, 최소), 각 재료변수들이 대상기준에 미치는 영향을 분석하여 얻어낸 변수의 importance factor(영향도 계수, 이하 IF)등 몇 가지의 새로운 개념들을 소개할 것이다. 서로 다른 콘크리트 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하기 위해 goodness value(영향도 계수, 이하 GV)라는 개념을 도입하여 여러 개의 만족도 곡선을 결합하는 방법 또한 제시되었다.

마지막으로 PBMD 방법을 사용한 콘크리트 배합설계과정의 실제 설계 예제를 제시하였고 실험을 통해 PBMD 방법으로부터 얻어진 분석적 배합설계의 실제 적용 가능성을 확인해 보았다. 또한 분석결과를 ACI 214R-02<sup>7)</sup>에 기술되어 있는 방법으로 구한 결과와 비교하여 그 실효성을 검토해 보았다.

### 2. PBMD의 설계 과정

#### 2.1 PBMD의 주요 설계 과정

PBMD 설계 과정은 만족도곡선<sup>1)</sup> 개념을 활용하여 최적의 콘크리트 배합을 찾아가는 과정이다. PBMD는 크

\*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr  
 Received, January 25, 2010, Revised May 17, 2010,  
 Accepted, June 4, 2010  
 ©2010 by Korea Concrete Institute

계 3개의 과정으로 구성되어있다. 첫 번째 과정은 발주자의 요구를 기초로 한 초기설계 과정, 두 번째 과정은 초기설계를 평가하고 최적화하는 과정, 세 번째 과정은 중간설계를 수정하여 최종설계로 완성하는 과정이다. 좀더 세부적으로 보면 첫 번째 과정은 다시 단계 1, 2로 나뉘고, 두 번째 과정은 단계 3, 4로, 세 번째 과정은 단계 5, 6, 7로 나뉜다. 1단계에서는 설계자가 발주자의 요구사항을 정확히 이해하여야 한다. 2단계에서는 발주자의 요구사항을 바탕으로 재료 특성, 목표설계기준, 구조물 성능등급을 결정하고 초기 콘크리트 표준배합을 한다. 3단계에서는 데이터를 수집하고 만족도곡선을 개발함으로써 초기설계의 성능을 평가하고, 4단계에서는 IF와 GV 개념을 사용하여 여러 개의 만족도 곡선을 하나의 만족도 곡선으로 결합한다. 5단계에서는 실제 평가된 성과 처음에 선정되었던 성능기준을 비교하고 이를 바탕으로 6단계에서는 배합수정작업을 거치면서 콘크리트배합을 최적화한다. 마지막으로 7단계에서는 최종 콘크리트배합이 발주자의 요구사항들을 만족하는지 검증한다. PBMD 과정의 각 단계에 대한 자세한 설명은 2.2절부터 2.4절에 걸쳐 설명되어있다. 선행 연구<sup>1)</sup>가 만족도 곡선을 이용하여 배합설계의 성능을 검토하는 방법에 대한 내용이라면 이 논문은 만족도 곡선을 활용한 PBMD의 전체적인 설계과정을 정립하는 데에 목표를 두고 있다. Fig. 1은 만족도 곡선을 이용한 PBMD의 주요과정을 나타낸 흐름도이다.

## 2.2 초기설계

### 2.2.1 1단계 - 요구조건 이해

PBMD의 최종 목표는 발주자가 원하는 수준의 성능을 갖춘 콘크리트를 배합설계하는 것이다. 대부분의 경우에 발주자는 구조물의 종류(교량, 빌딩, 댐, 해양 구조물, 지하 구조물 등), 건설 및 설계에 들어가는 총 비용, 구조물의 사용기간 등 광범위한 기준들에 중점을 둔다. 간혹 발주자가 고유동 자기충진 콘크리트, 섬유보강 콘크리트와 같은 특별한 콘크리트를 요구하는 경우도 있다. 설계자는 발주자의 요구를 만족시키기에 적당한 성질을 가지는 콘크리트 종류를 선택해야 하므로 설계자는 재료변수에 대한 초기결정을 하기 전에 발주자의 요구사항이 무엇인지, 어떤 종류의 콘크리트가 이 요구사항을 만족시킬 수 있을지 명확하게 이해해야만 한다.

### 2.2.2 2단계 - 초기 결정과 표준배합설계

설계자는 초기에 선정된 콘크리트의 종류를 기초로 하여 사용 목적에 맞는 기초재료 특성들(시멘트, 골재, 혼화재의 종류 등)을 결정한다. 요구 성능을 만족시키기 위해서 특별한 혼화재료(고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 실리카폼 등)가 선택되는 경우도 있다. 예를 들어 고강도 콘크리트를 얻기 위해서는 일반적으로 굵은골재는 견고하고 내구성이 좋아야 하며 굵은골재의 최대 치수는

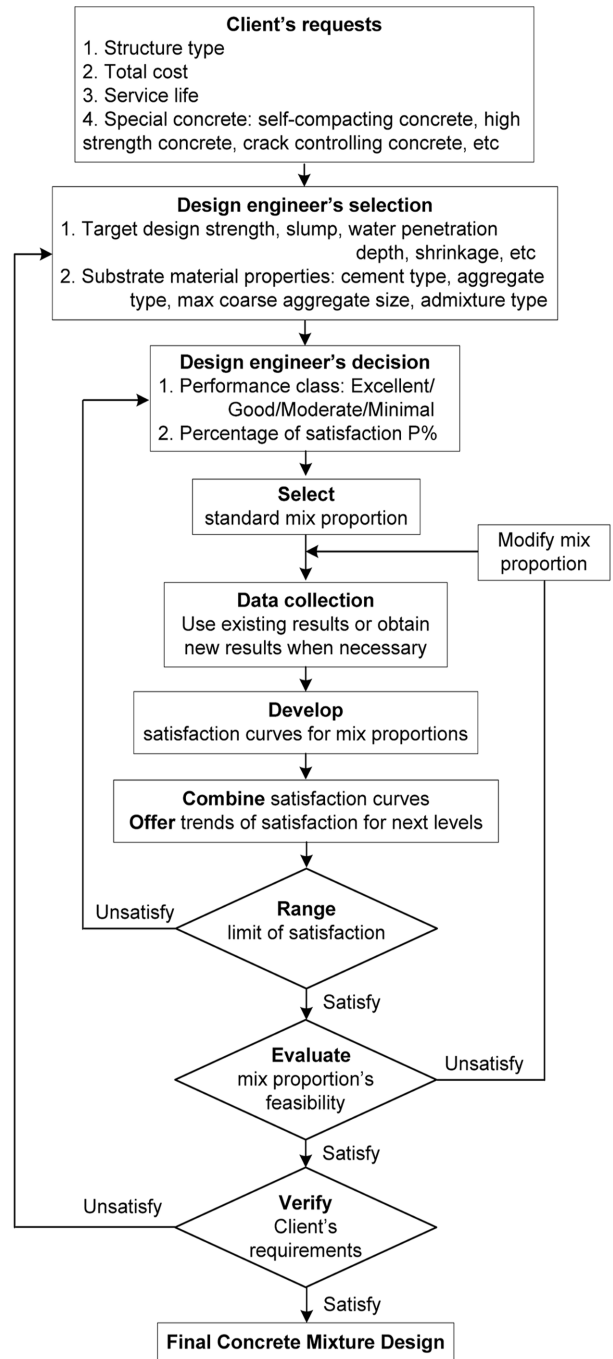


Fig. 1 Main procedures of PBMD using satisfaction curve

일반강도 콘크리트보다 작아야 한다. 이 외에도 고품질의 고강도 콘크리트를 만들기 위해서는 여러 가지 세부 조건들이 있다.

이 단계에서는 목표로 하는 성능기준(압축강도, 슬럼프 등)과 구조물의 사용목적에 따른 콘크리트재료의 성능등급(매우 우수, 우수, 보통, 최소)이 결정되어야 한다. 예를 들어 PSC(프리스트레스트 콘크리트) 원자로 격납건물에 쓰이는 고강도 콘크리트의 성능요구수준은 “매우 우수,” 고층구조물이나 교량의 주탑 등에 사용되는 콘크리트의 성능요구수준은 “우수,” 주거용 구조물에 쓰이는 일반강도 콘크리트의 성능요구수준은 “보통,” 임시 저장 구조물에 쓰이는 콘크리트의 성능요구수준은 “최소” 등

각각의 용도에 따라 성능등급을 달리 하는 것이다. 단 아직까지 성능만족확률값을 분류(categorization)하는 작업이 실행되지 않았으므로 성능등급 분류의 정확한 기준에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다. 목표성능기준에 따라 기존의 기준이나 표준을 바탕으로 초기 콘크리트 표준배합을 하게 된다. 이 초기 표준배합을 기준으로 삼아 요구성능을 만족시키는 최적배합설계가 얻어지게 된다.

### 2.3 성능평가 방법

#### 2.3.1 3단계 - 데이터 수집과 만족도곡선 작성

재료성능 평가에서 만족도 곡선 작성에 사용되는 데이터는 설계자의 의도에 부합해야만 한다. PBMD 과정 내에서 체계적인 성능평가와 콘크리트배합의 결정이 이루어지기 위해서는 콘크리트 재료변수들과 성능간의 관계를 계층을 이루는 단계들로 생각할 필요가 있다. 이 단계들은 콘크리트 기초재료(시멘트, 물, 골재, 혼화제 등) 단계에서부터 재료변수 단계, 성능변수 단계, 구조물의 성능요구단계, 마지막으로 비용과 사용기간 단계까지 그 범위를 두고 있다. 만족도 곡선 작성을 하기 위해서는 콘크리트 재료변수를 특성화하고 콘크리트 재료의 성능수준을 등급화할 필요가 있다. 콘크리트 기초재료의 양, 종류, 품질 등은 최종 콘크리트 성능에 영향을 미치는 중요한 특성들이다.

Fig. 2는 콘크리트의 여러 단계에 걸친 변수들을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보듯이 발주자는 궁극적으로 최종 배합설계의 비용과 내구수명에 대해 고려하게 되고, 이

는 다른 하위 항목들의 결정에 영향을 준다. 단, 이 논문에서는 기초 재료의 종류와 품질은 정해졌다고 가정했기 때문에 Level 5의 “기초 재료” 단계는 고려하지 않을 것이며, 콘크리트 배합설계가 주된 내용을 이루고 있으므로 Fig. 2에서는 콘크리트의 재료변수만을 고려하고 있다. 콘크리트 특성과 콘크리트 재료변수간의 관계는 단일변수 Bayesian 방법으로부터 얻어진 만족도 곡선을 이용하여 정해지며 각각의 콘크리트 배합에서 경계 기준값(목표 성능치)을 초과할 확률 역시 만족도 곡선을 이용하여 결정할 것이다. 단일변수 만족도 곡선은 선행연구에서 자세하게 서술하였다.<sup>1)</sup>

#### 2.3.2 4단계 - 만족도 곡선 결합

일단 주어진 배합설계의 목표 성능치로부터 모든 만족도 곡선들을 그리고 나면 이 만족도 곡선들을 하나의 만족도 곡선으로 결합하고 이를 “통합 만족도 곡선”이라 부른다. 통합 만족도 곡선을 얻기 위해 여러 개의 만족도 곡선을 결합하는 과정에서 Goodness value(이하 GV)와 Importance factor(이하 IF)의 개념이 도입된다. 통합 만족도 곡선은 성능만족확률을 나타내며 GV 함수의 형태로 표현된다. IF는 서로 다른 재료변수들이 콘크리트 성능에 미치는 영향을 정량하기 위해, GV는 서로 다른 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하기 위해 필요하다. 재료변수의 IF값은 사용가능한 데이터를 해석함으로써 결정되며 각각의 기준이나 경계값에 따라 다르다. 기준에 영향을 많이 주는 변수들은 주요변수들로 생각할 수 있으며 다른 변수들보다 큰 값을 부여한다. 예를 들

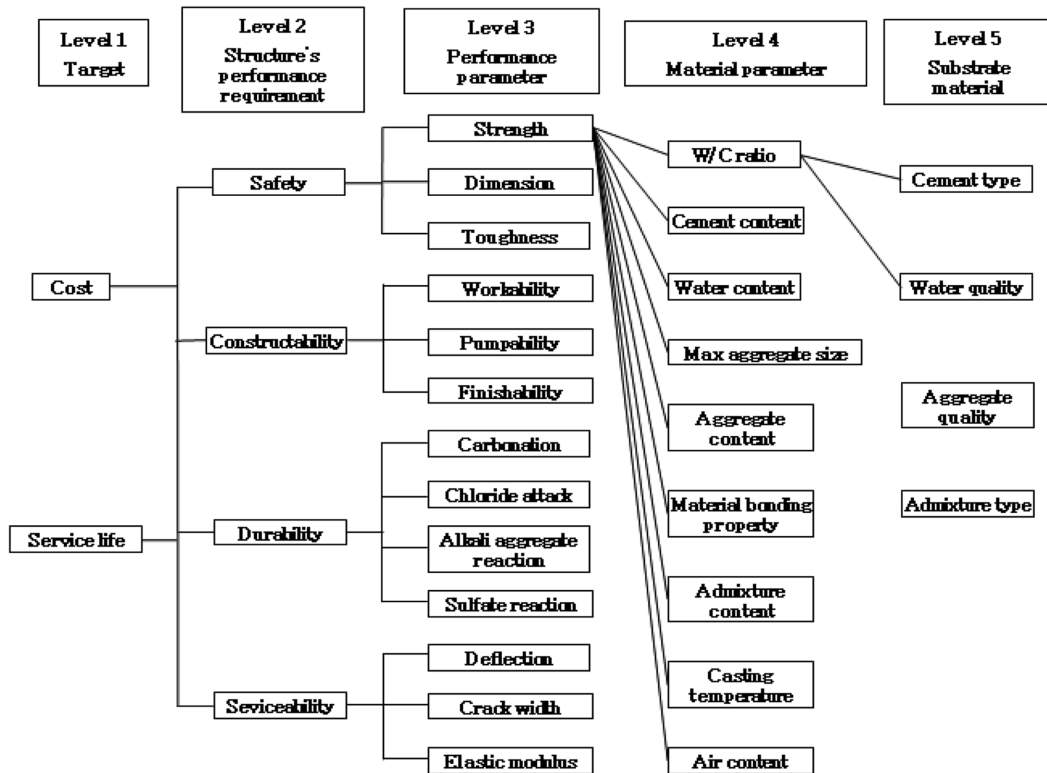


Fig. 2 Relationship between parameters of levels of concrete

어, 유동성에 영향을 주는 변수에는 단위수량, 굵은골재의 최대치수, 입도, 형상 등이 있으나 가장 많은 영향을 주는 변수는 단위수량이다. 그러므로 유동성에 대해 만족도 곡선을 결합할 때 단위수량은 다른 요소들보다 큰 IF값을 갖게 된다. 콘크리트의 강도를 고려한다면 주요 변수들은 물-결합재비, 골재와 시멘트의 비, 골재 특성, 굵은골재 최대치수 등이다. 이 중에서도 콘크리트 강도에 영향을 가장 많이 미치는 요소는 물-결합재비이므로 물-결합재비는 강도에 대해 만족도 곡선을 결합할 때 가장 큰 IF값을 갖게 되는 것이다. 결론적으로 말하면 성능에 영향을 미치는 모든 변수들 중에서 그 성능에 더 많은 영향을 미치는 변수의 IF값이 그렇지 않은 변수의 IF값보다 크다는 것이다.

만족도 곡선 결합 과정에서 모든 변수의 값과 범위는 다르다. 따라서 통합 만족도 곡선의 x축 변수값이 모든 변수 값을 대표할 수 있는 일반적인 값이기 위해서 변수들의 값과 범위가 보정되어야 한다. 이를 위해 “GV” 라고 부르는 보정된 변수값을 도입한다. 만족도 곡선 결합방법은 Fig. 3에 나타내었으며 다음과 같은 과정으로 진행된다.

콘크리트 배합은 많은 재료변수들이 다양한 범위의 값들을 갖기 때문에, 범위들을 보정하여 변수값들이 0~1까지의 적절한 범위 안에 있도록 하는 것이 중요하다. 이 변수들을 보정하기 위해 결합단계에서 표준화 방법이 사용되는데 이는 변수 범위를 단순화하기 위함이다. 각 변수의 GV( $G_i$ )는 아래의 식을 이용해 계산한다.

$$G_i = \frac{X_i - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \quad (1)$$

여기서  $X_i$ 는 콘크리트 변수,  $X_{imin}$ 과  $X_{imax}$ 는 변수  $X_i$ 의 최소값과 최대값을 각각 나타낸다. GV는 최대값과 최소값의 차이로 표준화(normalize)하여 다양한 x축 parameter들을 통일함으로써 배합의 만족성향을 파악하기 위한 통합 x축 parameter이다. Fig. 4를 보면 x축의 GV값이 클수록

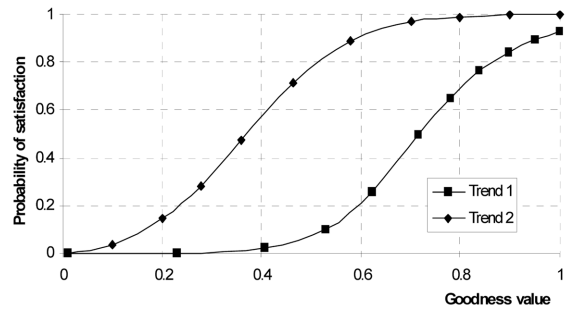


Fig. 4 Trend of safety satisfaction curve

y축의 만족확률값이 높는데 이는 곧 GV값이 클수록 요구기준을 초과할 확률이 높다는 것을 의미한다.

여러 가지 재료변수들의 만족도 곡선 상에서 표준 배합인 점들을 모두 x축 GV값이 0.5인 점으로 이동시키면 모든 곡선들이 한 점에서 만나며 이 점의 y축 만족확률값을 최소요구만족확률로 잡고 이 값을 “참조값”이라고 정의한다(Fig. 3의 (c)).

성능기반내진설계(performance based seismic design)에서 지배 요소(지진에 대한 최대지반가속도)는 손상확률을 항상 증가시키는 경향을 보인다. 그러나 재료설계나 재료특성에서는 이러한 일반적인 경향이 항상 동일하지는 않다. 물-결합재비의 증가는 유동성은 증가시키지만 강도의 저하를 초래한다. 재료변수 만족도 곡선들을 결합하여 통합 만족도 곡선을 작성하기 위해서는 전체적인 경향들이 적합성을 가져야 한다. 부적합성을 가진 경우는 전반적인 경향을 “양”의 추세로 생각하고 이것을 기준으로 반대의 경향(“음”의 추세)을 보이는 경우  $G_i$ 값을  $(1 - G_i)$ 로 바꿔줌으로써 “양”의 추세로 변환시킬 수 있으며 이때 적합확률인 P(%)는 일정한 값으로 유지시킨다.

만족도 곡선 결합의 다음 과정은 각각의 GV에서의 확률을 계산하는 것이며 이는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$P_j^k = P_i \alpha_i \quad (2)$$

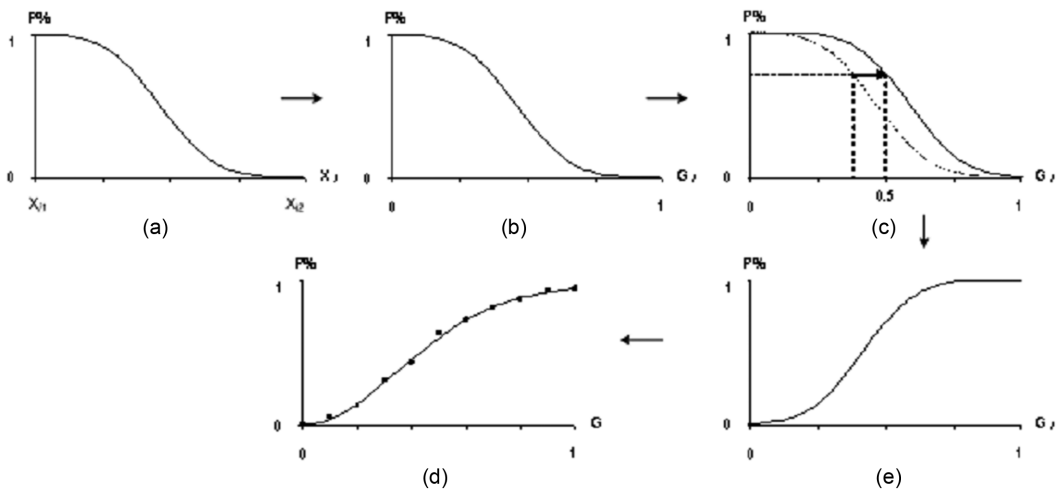


Fig. 3 Combination for various concrete parameters

여기서  $P_j^k$ 는 k단계(level)에서 기준 j를 만족할 확률,  $P_i$ 는 재료변수의 확률,  $\alpha_i$ 는 배합설계 내에서 명시된 기준에 대한 재료변수의 IF이다.

최종 만족도 곡선에 대한 비선형 회귀분석은 데이터를 결합하여 매끄러운 곡선을 얻음으로써 이루어진다. 이러한 결합과정의 목적은 설계자로 하여금 각 재료단계에서 성능의 경향을 명확히 이해하도록 돕는 것이다. 또한 발주자의 요구사항과 구조물의 용도에 부합하는 구조물의 종류와 이에 적합한 콘크리트를 사용하기 위해서 사용성과 기초재료의 품질을 기반으로 하여 콘크리트 배합비율을 최적화할 수 있다.

## 2.4 배합비율 검증과 수정

### 2.4.1 5단계 - 성능만족확률 평가

규정된 기준을 기초로 한 표준배합설계의 성능만족확률 P(%)는 초기에 평가된다. 성능만족확률 평가의 첫 번째 단계는 표준 배합설계의 성능만족확률이 요구범위 내에 존재하는지 확인하는 것이다. 만약 만족확률이 요구범위 내에 있지 않다면, 초기에 선정된 성능등급과 이에 대응되는 만족확률이 해당 배합에는 적합하지 않다는 것을 보여준다. 이와 같은 상황에서는 다른 성능등급과 이에 대응되는 만족확률을 다시 선택해야 한다. Fig. 1에서 설계과정의 첫 번째 루프는 성능등급과 이에 대응되는 만족확률을 조정하기 위해 수행된다.

### 2.4.2 6단계 - 배합수정

5단계를 만족한다면, 표준배합비율의 성능만족확률은 요구 범위를 만족한다는 뜻이다. 그 다음단계는 콘크리트 재료변수가 요구 성능만족확률을 만족하는지 확인하는 것이다. 만족하지 못하는 재료변수들은 작성된 만족도 곡선을 이용하여 더 나은 확률값을 얻도록 수정되어야 한다. Fig. 1에서 설계과정의 두 번째 루프는 요구 성능만족확률을 만족하기 위해 배합비율을 수정하는 것이다.

### 2.4.3 7단계 - 최종 콘크리트배합 및 검증

마지막 단계에서는 최종 수정된 배합이 만족도 확률 측면에서 발주자의 요구사항을 만족하는지 확인해야 한다. 발주자의 요구사항을 만족시키지 못하는 경우, 배합설계의 만족도 경향이 구조물 사용에 있어 불충분하다는 것을 보여주는 것이므로 콘크리트재료의 목표 설계기준이 수정되어야 한다. 하나의 예로 Fig. 4는 안전성능에 대한 2개의 통합 만족도 곡선을 보여준다. Fig. 4를 보면 Trend 1, Trend 2 모두 x축의 GV값이 클수록 y축의 만족확률값도 증가함을 볼 수 있다. 이는 곧 GV값이 클수록 요구기준을 초과할 확률도 증가함을 의미한다. 또한 같은 GV값에 대하여 y축의 만족확률값을 비교했을 때 대체적으로 Trend 2가 Trend 1보다 큰 것을 볼 수 있으며 이것은 Trend 2가 Trend 1보다 요구기준을 만족시킬 확률이 높음을 의미한다. 이는 재료의 안전성 측면에서

Trend 2의 배합비가 Trend 1보다 양호함을 나타낸다. 그러므로 Trend 1에서 Trend 2로 옮겨가려면 초기에 선택한 성능기준을 수정해야 한다. 이 과정은 PBMD 설계과정의 마지막 루프이며 동시에 가장 중요한 단계라고 할 수 있다. 목표 설계기준의 초기값과 수정값의 차이가 매우 큰 경우에는 만족도 곡선을 작성하는데 이용된 콘크리트 배합비율에 대한 데이터는 갱신되어야 한다. 일단 새로운 초기 설계기준값이 선택되면, PBMD 과정을 새로 시작하여 적합한 배합비율을 얻을 때까지 PBMD과정을 반복하여 최종 콘크리트 배합설계를 얻어 낸다. 설계과정의 마지막 루프로부터 얻어진 최종 콘크리트 배합비는 발주자의 요구사항을 만족하고 양호한 만족확률을 보여주어야 한다.

## 3. 설계 예제

이번 장에서는 콘크리트 배합설계에 만족도 곡선을 활용한 PBMD를 적용시킨 예제로 압축강도, 탄성계수 측면을 만족시키는 배합설계 예제에 대해 서술하였다. 일반적으로 탄성계수가 요구조건이 되는 예는 드문 것이 사실이지만 새로운 배합설계의 방법론을 제시하는 것이 이 논문의 목적이며 한정된 실험데이터 내에서 PBMD방법을 어떻게 콘크리트배합설계에 적용할 수 있는지를 보여주기 위해 압축강도와 탄성계수를 목표성능기준으로 삼게 되었다.

### 3.1 초기설계

#### 3.1.1 구조물의 형태

발주자의 요구가 보통의 안전도를 가지면서 일반적인 주거용 구조물의 용도와 내구수명을 가지는 구조물이라면 구조물의 건설에 이용되는 콘크리트는 일반콘크리트 요구사항 안에서 그 선택이 이루어질 것이다. 고강도 콘크리트, 뛰어난 부식방지효과 등과 같은 특별한 요구사항을 필요로 하지 않는다.

#### 3.1.2 기초 재료 선택

이러한 기본적인 요구조건을 기초로 하여 설계자는 다음과 같은 특성을 갖는 일반적인 기초재료를 선택한다.

KS L 5201<sup>8)</sup>을 따르는 보통 포틀랜드 시멘트가 모든 배합에 사용된다. 잔골재는 강모래를 선택하고 그 특성은 KS F 2526<sup>9)</sup>의 조건을 만족시킨다. 굵은골재는 최대 치수 25 mm, 용적비중이 1,565 kg/m<sup>3</sup>인 천연쇄석골재를 선택한다. 이 구조물은 일반 콘크리트 구조물이기 때문에 슬래그, 플라이애쉬와 같은 혼화제는 필요하지 않다. 압축강도와 탄성계수의 초기 목표기준값은 각각 25 MPa와 25 GPa이다. 이러한 종류의 구조물에서 수분침투깊이, 건조수축 등과 같은 기준은 크게 중요하지 않다.

#### 3.1.3 성능등급과 그에 적합한 만족확률

보통의 안전등급을 갖는 이러한 구조물에 대해 25 MPa

의 압축강도와 25 GPa의 탄성계수를 가지는 콘크리트배합을 선택한다. 이것의 성능등급은 “보통”의 성능 단계 안에 있으며 위의 요구기준들을 초과할 확률은 약 65% 정도이다. 단 아직까지 성능만족확률값을 분류하는 작업이 실행되지 않았으므로 “보통”의 성능단계가 요구기준들을 초과할 확률이 약 65%라는 것은 저자가 가정한 값이며 성능 등급 분류의 정확한 기준에 대해서는 추가적인 연구와 논의가 필요하다.

### 3.1.4 표준배합설계

목표 설계기준을 기초로 하여 표준배합설계가 이루어지고 만족도 곡선 작성에 필요한 실험데이터들을 수집한다. Bayesian 확률분석을 위한 적절한 데이터를 얻기 위하여 데이터는 이용가능하기만 하다면 분석적 결과, 실험적 결과, 이전의 설계 결과 등 어떤 형태이든 관계없이 사용할 수 있다.

콘크리트 배합에 따른 압축강도와 탄성계수 데이터를 얻기 위해 Table 1의 배합비들에 대해 실험을 수행하였다. 표준배합은 Table 1의 MSD이며 ACI 211.1-91<sup>10)</sup>에 따라 슬럼프 100 mm, 압축강도 25 MPa가 되도록 설계하였다. Table 1의 나머지 배합들은 한 가지 변수만을 변화시키고(시멘트량, 단위수량, 골재 최대 치수 등) 다른 요소들은 일정하게 유지한 배합비들이다. 이러한 방법으로 배합비의 상관관계를 얻는데 이용한다. 표에서 M은 배합, WC는 물-결합재비, SA는 잔골재율, W는 단위수

량, C는 시멘트량, S는 잔골재량, G는 굵은골재량을 의미한다. Tables 2와 3은 19개의 배합비에 대해 각각 3개의 콘크리트 시편의 재령 28일 압축강도와 탄성계수에 대한 실험 결과를 나타낸다.

## 3.2 성능 평가 방법

### 3.2.1 만족도 곡선 개발

단위수량(W), 시멘트량(C), 물-결합재비(W/C), 잔골재량(S), 굵은골재량(G)과 콘크리트 설계기준강도 25 MPa 간의 관계는 Bayesian방법을 이용한 단일변수 만족도 곡선<sup>1)</sup>으로 보여준다. 이 설계 예제에서 고려되는 배합비는 물-시멘트비의 만족도 곡선에 근거하여 설계기준강도 25 MPa에 대한 것이다. 선행 연구<sup>1)</sup>에서 기술한 방법대로 만족도 곡선을 작성하면 변수 물-결합재비에 대한 압축강도 만족도 곡선의 결과는 Fig. 5(a)와 같이 나타난다. 다른 변수(단위수량, 시멘트량, 잔골재량, 굵은골재량)에 대해서도 같은 분석을 적용하여 도출해낸 결과는 각각 Fig. 5(b)~(e)에 나타났다. 비슷한 방법으로, Table 3의 탄성계수 실험결과를 이용해 물-결합재비, 단위수량, 시멘트량, 잔골재량, 굵은골재량에 대한 탄성계수의 만족도 곡선을 작성한 결과는 Fig. 6과 같다.

## 3.3 IF와 GV를 이용한 만족도 곡선 결합

**Table 1** Concrete mix proportion

Symbol	Mix proportion					
	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
MSD	50	42	175.6	351.1	737.2	985.8
MWC80W	80	42	280.9	351.1	737.2	985.8
MWC80C	80	42	175.6	219.5	737.2	985.8
MSA35S	50	35	175.6	351.1	540	985.8
MSA50S	50	50	175.6	351.1	1000	985.8
MSA35G	50	35	175.6	351.1	737.2	730
MSA50G	50	50	175.6	351.1	737.2	1350
MWC35W	35	42	122.9	351.1	737.2	985.8
MWC65W	65	42	228.2	351.1	737.2	985.8
MWC35C	35	42	175.6	501.6	737.2	985.8
MWC65C	65	42	175.6	270.1	737.2	985.8
MWC45W	45	42	158	351.1	737.2	985.8
MWC55W	55	42	193.1	351.1	737.2	985.8
MWC45C	45	42	175.6	390.1	737.2	985.8
MWC55C	55	42	175.6	319.2	737.2	985.8
MSA39S	50	39	175.6	351.1	640	985.8
MSA45S	50	45	175.6	351.1	840	985.8
MSA39G	50	39	175.6	351.1	737.2	870
MSA45G	50	45	175.6	351.1	737.2	1100

**Table 2** Compression strength test results

Symbol	Compressive strength (MPa)					
	Specimen			Mean	Standard deviation	
	1	2	3			
MSD	23.6	28.7	34.4	28.9	5.4	
MWC80W	8.2	10.0	11.2	9.8	1.5	
MWC80C	8.0	9.6	11.5	9.7	1.8	
MSA35S	17.5	23.8	29.2	23.5	5.9	
MSA50S	25.3	31.8	37.4	31.5	6.1	
MSA35G	24.6	31.7	37.6	31.3	6.5	
MSA50G	22.7	27.3	31.6	27.2	4.5	
MWC35W	41.1	50.6	57.4	49.7	8.2	
MWC65W	12.4	14.9	17.4	14.9	2.5	
MWC35C	45.4	56.3	63.9	55.2	9.3	
MWC65C	13.4	15.7	19.2	16.1	2.9	
MWC45W	31.5	35.3	44.7	37.2	6.8	
MWC55W	20.4	24.0	30.0	24.8	4.8	
MWC45C	30.0	38.1	43.9	37.3	7.0	
MWC55C	20.0	23.6	29.6	24.4	4.9	
MSA39S	22.4	26.6	32.7	27.2	5.2	
MSA45S	24.7	29.8	36.1	30.2	5.7	
MSA39G	24.0	30.1	35.6	29.9	5.8	
MSA45G	23.6	27.4	33.1	28.0	4.8	

**Table 3** Elastic modulus test results

Symbol	Elastic modulus (MPa)				
	Specimen			Mean	Standard deviation
	1	2	3		
MSD	23350	25635	27994	25660	2322
MWC80W	8450	12017	14084	11517	2850
MWC80C	17558	19744	21450	19584	1951
MSA35S	22025	23580	26011	23872	2009
MSA50S	25685	27958	30452	28032	2384
MSA35S	24542	26392	29142	26692	2315
MSA50G	20574	24366	26292	23744	2909
MWC35W	29420	30919	33068	31136	1834
MWC65W	16483	19270	21895	19216	2706
MWC35C	29359	30558	33457	31125	2107
MWC65C	19080	21428	22849	21119	1903
MWC45W	25279	28866	29345	27830	2222
MWC55W	20397	23589	25578	23188	2614
MWC45C	24437	26750	28469	26552	2023
MWC55C	21286	24445	25027	23586	2013
MSA39S	22140	24108	26286	24178	2074
MSA45S	24448	25447	28579	26158	2155
MSA39G	24213	24818	28422	25818	2276
MSA45G	21919	23994	27380	24431	2757

3.3.1 Importance factor(영향도 계수, IF로 약칭)

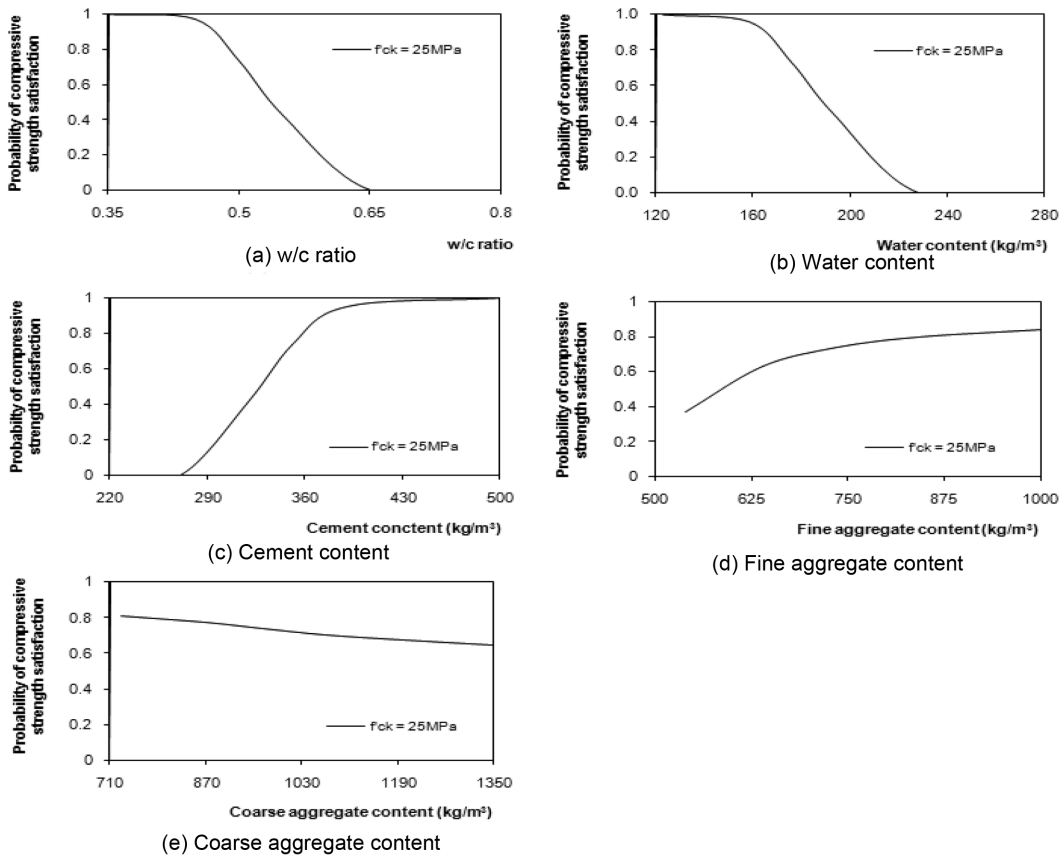
앞에서 설명했듯이, IF는 각 변수들이 콘크리트배합에 미치는 영향의 정도에 대한 과거의 지식을 바탕으로 결정된다. 식 (2)에 사용된 각 콘크리트 배합 변수들의 IF는 Table 4처럼 가정되었다. Table 4의 importance factor 값들은 과거의 경험에서 저자가 합리적으로 가정한 값들이며 importance factor값의 결정과정에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 하나의 배합의 모든 IF 값들의 총합은 1.0을 넘을 수 없다. 이것은 IF가 한쪽으로 치우치거나 남용되는 것을 방지하기 위한 것이다.

3.3.2 Goodness value(유요 경향값, GV로 약칭)

변수의 만족도 곡선들을 결합하기 위해서는 여러 가지 변수들이 모든 변수값을 대표할 수 있는 일반적인 값으로 표현되어야 한다. Table 5의 콘크리트 재료변수의 최소값과 최대값은 식 (1)을 이용하여 재료변수를 0~1의 범위내에 있는 GV로 변환된다. 예를 들어, 변수 물-결합재비의 GV는 (물-시멘트비-0.35)/(0.8-0.35)로 계산되며 여기서 물-결합재비는 0.35~0.8 범위의 값을 갖는다.

3.3.3 만족도 곡선 결합

만족도 곡선 결합과정은 여러 개의 만족도 곡선의 성질들을 경계기준을 기반으로 하여 통합 만족도 곡선으로 나타내기 위해 수행된다. 앞에서 정의했듯이, 표준배합



**Fig. 5** Compressive strength satisfaction curve

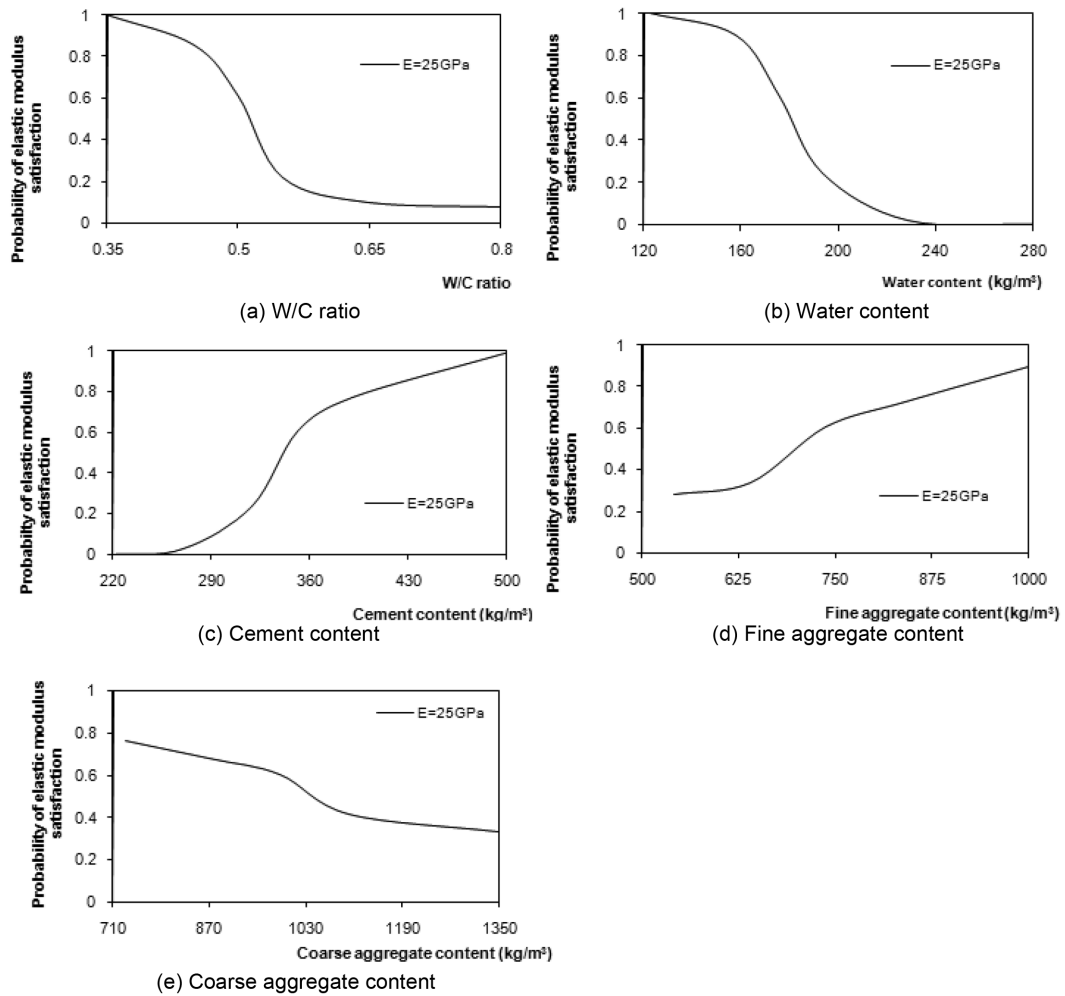


Fig. 6 Elastic modulus satisfaction curve

Table 4 The importance factors of concrete parameters

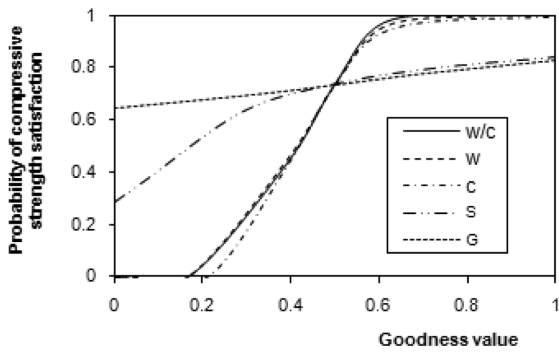
Parameter	Importance factor	
	Compressive strength	Elastic modulus
W/C	0.50	0.35
W	0.10	0.25
C	0.30	0.30
S	0.05	0.05
G	0.05	0.05
...	0.00	0.00
Total	1.00	1.00

Table 5 The divided and shifted compatible value of concrete material parameters

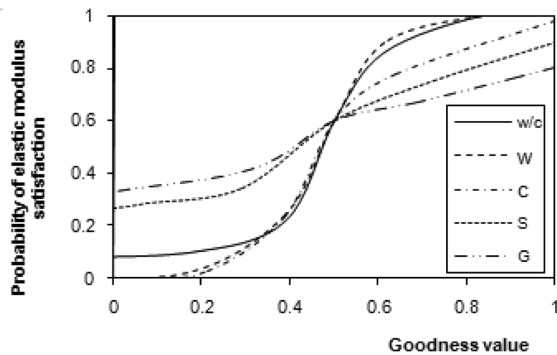
Concrete material parameter	Divided compatible value	Shifted compatible value
W/C	$0.8 - 0.35 = 0.45$	0.1667
W (kg/m <sup>3</sup> )	$280.9 - 122.9 = 158$	0.1667
C (kg/m <sup>3</sup> )	$501.6 - 219.5 = 282.1$	0.0335
S (kg/m <sup>3</sup> )	$1000 - 540 = 460$	0.0713
G (kg/m <sup>3</sup> )	$1350 - 730 = 620$	0.0874

변수들의 GV는 참조값으로서 0.5로 정해진다. 그러므로 각 변수의 만족도 곡선은 GV 참조값 0.5를 기준으로 Table 5의 적정이동값(shifted compatible value)을 이용하여 이동된다. 표준배합의 물-결합재비는 0.5이며 물-결합재비에 대한 GV의 적정이동값은  $0.5 - (0.5 - 0.35) / (0.8 - 0.35) = 0.1667$ 와 같이 얻는다. 강도 기준이 적용될 때 물-결합재비와 단위수량은 “양”의 추세로 변환해야 하는데 이는 물-결합재비와 단위수량이 증가하면 강도는 감소하기 때문이다. 따라서 각 단계에 대해 재료변수의 만족도 곡선들을 하나의 통합 만족도 곡선으로 결합하기 위해서  $G_i$ 를  $(1 - G_i)$ 로 바꿔줌으로써 “양”의 추세로 변환시킨다. 단, 적정확률 P% 값은 유지시킨다. 위의 방법으로 Figs. 5와 6의 강도와 탄성계수에 대한 만족도 곡선의 x축 값이 다시 계산되며 Figs. 7과 8에 이를 나타내었다. 결합 과정은 식 (2)를 이용하여 수행된다. 그 결과 압축강도 25 MPa와 탄성계수 25 GPa를 만족시키는 콘크리트 배합의 최종 통합 만족도 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 이 예제에서는 압축강도와 탄성계수가 성능기준으로 선택되었다. 따라서 Level 3에 속해 있는 압축강도와 탄성계수의 만족도 곡선은 Level 2(Fig. 3 참고)에 속해 있는 안전성 만족확률을 얻기 위하여 통합된다. 압축강도와 탄성계수





**Fig. 7** Compressive strength satisfaction curve of Goodness Value of (a) W/C ratio; (b) water content; (c) cement content; (d) fine aggregate content; (e) coarse aggregate content



**Fig. 8** Elastic modulus satisfaction curve of Goodness Value of (a) w/c ratio; (b) water content; (c) cement content; (d) fine aggregate content; (e) coarse aggregate content

만족도 곡선의 결합과정은 식 (2)와 Table 6에서 가정된 IF 기준값을 사용하여 이루어진다. Safety\_1, Safety\_2, Safety\_3에 주어진 IF들을 결합할 때 탄성계수의 IF는 감소하는 반면 압축강도의 IF는 증가한다. IF들의 결합을 이용해 계산된 만족확률은 안전성 만족확률이 증가추세임을 보여준다. 만약 설계자가 다른 성능기준(예를 들어

**Table 6** The importance factors for safety satisfaction curve

Parameter	Importance factor		
	Safety_1	Safety_2	Safety_3
Compressive strength	0.2	0.5	0.8
Elastic modulus	0.8	0.5	0.2
...	0.0	0.0	0.0
Total	1.0	1.0	1.0

슬럼프, 크리프, 건조수축 등)을 고려해야만 한다면 만족도 곡선을 결합하는 데에 다른 IF 간의 결합이 이용될 수 있다. 일단 주어진 단계에서 모든 단일변수 만족도 곡선들이 결합되면, 그 상위 단계에서도 주어진 배합비에 대해 여러 변수에 대한 만족도 곡선이 전체적인 만족도 경향을 충족할 때까지 이 과정을 반복한다.

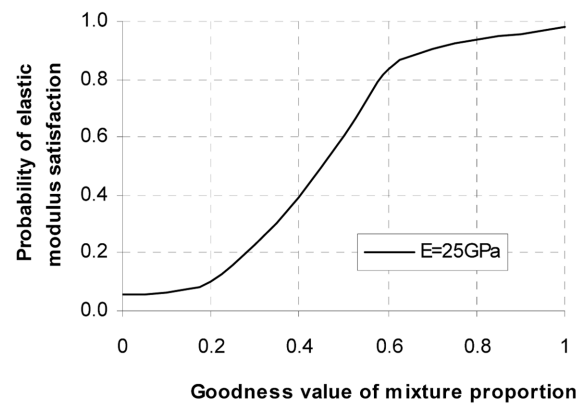
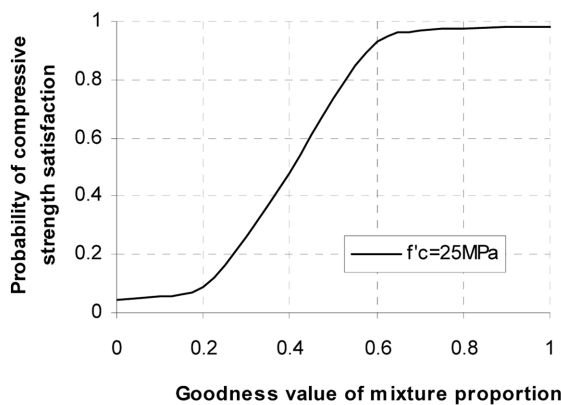
### 3.4 설계 배합비 검증 및 수정

#### 3.4.1 성능만족확률 평가

설계 표준배합비는 재료만족확률을 평가하기 위해 사용하며 이는 요구만족확률 P%를 만족해야만 한다. 이 예제에서는 표준배합에 대한 모든 변수의 GV를 0.5로 동일하게 선택하였고 이를 참조점으로 생각하였다. Fig. 9에서 압축강도 25 MPa와 탄성계수 25 GPa에 대한 만족확률은 각각 74%와 61%임을 알 수 있다. 압축강도 만족확률은 요구확률 65%보다 크고, 탄성계수 만족도 확률은 이보다 작다. 만족확률의 차이는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{만족확률의 차이} = \frac{P - P_{PBMD}}{P} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서 P는 요구기준만족확률,  $P_{PBMD}$ 는 재료 요소에 PBMD 방법을 적용한 요구기준만족확률이다. 식 (3)을 이용하면, 압축강도와 탄성계수의 확률 차이는 각각 13.8%와 6.1%이다.



**Fig. 9** Combined (a) compressive strength and (b) elastic modulus satisfaction curve of concrete mix proportion

### 3.4.2 콘크리트 배합비 수정

일반적으로 초기에 선정된 표준배합비는 첫 시도에 모든 요구설계목표기준을 만족할 수 없는 경우는 드물며 대개 일부 기준만을 만족시킨다. Fig. 10은 GV가 증가함에 따라 기준을 만족할 확률도 증가하는 것을 보여준다. 그러므로 배합비가 압축강도와 탄성계수의 만족확률을 만족한다면, 그 배합에 대한 GV의 범위가 더 큰 범위 안에 있도록 배합비를 수정해야한다. 이 경우에는 탄성계수 만족확률은 만족할 것이지만, 압축강도 만족확률은 요구값과 차이를 나타낼 것이다. 그러나 선택된 모든 요구기준 중에서도 주요 기준을 만족시키는 것이 더 중요하다. 이 예제의 경우에는 배합비가 반드시 충족시켜야만 하는 주요 기준은 콘크리트 압축강도인 반면에 탄성계수 기준은 압축강도보다는 덜 중요하게 여겨진다. 심지어 탄성계수 만족확률이 요구값(6.1%)보다 작더라도 콘크리트 배합비는 수정이 필요 없다. 그러나 요구값을 만족하기 위해 콘크리트 배합비를 수정하는 상세내용을 설명하기 위해 이번 콘크리트 배합비는 수정될 것이다. 배합비를 수정하기 위해서는, IF에 대해 확실하게 이해해야 한다. Table 4에 나타난 압축강도 기준에 대한 콘크리트 변수의 IF에 근거하여 배합비의 주요변수는 물-결합재비와 시멘트량이다. 그러므로 이 두 개의 변수들은 수정하고, 다른 변수들은 일정하게 유지한다. 물-결합재비와 시멘트량의 값은 0.5와 351.13(kg/m<sup>3</sup>)에서 0.49와 358.3(kg/m<sup>3</sup>)으로 대체될 것이다. 물-결합재비와 시멘트량의 GV는 각각  $(0.49 - 0.35) / (0.8 - 0.35) + 0.1667 = 0.48$  과  $(358.3 - 219.5) / (501.6 - 219.5) + 0.0335 = 0.53$  으로 계산된다. 물-결합재비의 만족도 곡선은 “양”의 추세로 변

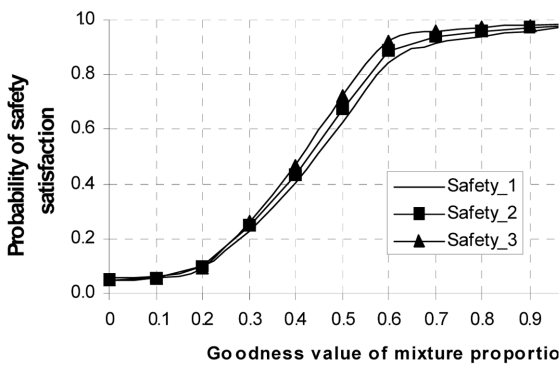


Fig. 10 Combined safety satisfaction curve of concrete mix proportion

환되어야 하기 때문에 물-결합재비의 최종 GV는  $1 - 0.48 = 0.52$ 이다. 수정된 배합비의 변수값들, 변수들의 GV 값은 Table 7에 나타났다. 압축강도와 탄성계수에 대한 수정된 배합비의 GV는 다음 식에 의해 결정될 수 있다.

$$G = G_i \alpha_i \quad (4)$$

여기서  $G_i$ 는 재료변수의 GV,  $\alpha_i$ 는 배합 설계에서 특정 기준에 대한 재료변수의 IF이다. 수정된 배합비의 압축강도와 탄성계수에 대해 x축 GV와 y축 만족확률로 만들어진 만족도 곡선은 Fig. 10(a)와 (b), 그리고 Table 8에 나타내었다. 수정된 배합비로부터 얻어진 압축강도와 탄성계수에 대한 만족도 확률 77%와 66%는 요구 만족도 확률 65%를 충족한다. 그러므로 수정된 콘크리트배합은 적절한 설계라 할 수 있다.

### 3.4.3 최종 콘크리트 배합설계에 대한 발주자의 요구 사항 검증

이 단계에서는 만족도 경향이 발주자에 의해 확인되어야 한다. 콘크리트용도에 따른 성능등급에 따라 기준들의 IF가 가정되며 이에 적합한 안전성에 대한 만족도 곡선 경향을 얻는다. 이 예제에서는 보통의 요구안전성으로 배합설계를 만족해야만 하므로 압축강도가 탄성계수보다 중요하게 고려된다. 그러므로 Table 6의 선택목록 중에서 Safety\_3의 IF가 사용되었다. Fig. 10에 나타난 안전성 만족도 곡선의 경향은 구조물로 사용하기에 충분하다는 것을 보여준다. 안전성 만족도 곡선은 GV가 0.2~0.6 범위에서는 선형적으로 증가하고, 0.0~0.2(불만족) 범위와 0.6~1.0(만족) 범위에서는 거의 수평을 이룬다. 이 만족도 곡선의 경향은 재료변수의 GV가 변하더라도 만족도 확률이 극심하게 변화하지는 않는다는 것을 보여준다. 이전에도 언급했듯이, 만족도 곡선 경향에서 넓은 GV 범위에 걸쳐 불만족이거나 좁은 GV범위에서 극심한 변화

Table 7 Modified mix proportion

Parameter	Standard mix proportion	Modified mix proportion	Parameter's goodness value
W/C	0.5	0.49	0.52
W (kg/m <sup>3</sup> )	175.57	175.57	0.5
C (kg/m <sup>3</sup> )	351.13	358.3	0.53
S (kg/m <sup>3</sup> )	737.21	737.21	0.5
G (kg/m <sup>3</sup> )	985.79	985.79	0.5

Table 8 Goodness value and satisfaction probability of the modified mix proportion

Parameter	Parameter's goodness value	Importance factor		Goodness value of modified mix		Probability of satisfaction (%)	
		$f'_c$	E	$f'_c$	E	$f'_c$	E
W/C	0.52	0.50	0.35	0.519	0.516	77	66
W	0.5	0.10	0.25				
C	0.53	0.30	0.30				
S	0.5	0.05	0.05				
G	0.5	0.05	0.05				

구간을 갖는다면, 만족도 곡선의 경향은 구조물로 사용하기에 충분한 안전성을 갖지 않는다고 결론을 내릴 수 있다.

### 3.5 증명 및 토론

수정배합의 성능에 대한 검증은 압축강도와 탄성계수의 실험 결과를 이용하여 이루어지며 실험적 결과는 Table 9에 나타났다. Table 9의 MSDM은 수정된 배합비를 의미한다. 압축강도 25 MPa와 탄성계수 25 GPa의 기준을 만족할 확률은 압축시험 결과를 바탕으로 하여 ACI 214R-02<sup>7)</sup>에 소개된 방법을 이용하여 계산된다. ACI 214R-02에는 표준편차법이나 분산계수법을 이용해 배합강도를 구하는 방법에 대하여 서술되어 있으며 분산계수와 정규분포곡선을 이용해 배합강도가 설계기준강도를 초과할 확률을 계산할 수 있다. 이를 통해 계산한 압축강도 25 MPa와 탄성계수 25 GPa의 기준을 넘을 초과 확률은 각각 74%와 68.6%이다. ACI와 PBMD 방법을 비교했을 때 압축강도와 탄성계수의 차이는 각각 4.1%와 3.9%로 허용 오차범위 5%이내이다. 결론적으로 압축강도 25 MPa와 탄성계수 25 GPa의 설계요구기준을 갖는 콘크리트 배합은 “보통”의 성능등급으로 분류할 수 있으며 이것은 곧 위의 요구 기준을 초과할 확률이 대략 65%임을 말해준다. 최종 수정 콘크리트 배합비(W/C=0.49, W=175.57 kg/m<sup>3</sup>, C=358.30 kg/m<sup>3</sup>, S=737.21 kg/m<sup>3</sup>, G=985.79 kg/m<sup>3</sup>)로부터 압축강도와 탄성계수의 만족확률이 각각 77%, 66%임을 산출하였다. ACI 214R-02의 방법을 이용하여 이 배합비로부터 얻어진 압축강도와 탄성계수의 만족확률이 74%와 68.6%이고 압축강도와 탄성계수의 평균값은 각각 27.5 MPa, 26.3 GPa이다. 이 결과들이 서로 근접하다는 것은 수정된 콘크리트 배합비가 만족도 확률뿐만 아니라 요구 성능을 만족시킨다는 것을 보여준다. 단일변수 Bayesian방법을 이용한 PBMD 과정을 통해 얻어진 분석적 결과는 PBMD를 콘크리트 배합설계에 사용하는 것을 충분히 신뢰할 수 있다는 것을 보여준다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 PBMD의 설계 과정을 제시하고 PBMD

**Table 9** The extra tests for MSDM

MSDM	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
1	22.1	22445
2	29.3	26865
3	31.2	28694
4	23.1	23398
5	28.9	27757
6	30.5	29035
Mean	27.5	26349
Standard deviation	3.91	2773

를 이용한 실제 설계 예제를 통해 검증을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배합설계 예제는 PBMD 과정을 이용하여 수행되었으며 요구 사용성을 만족시킨다. 이 예제를 통해 각 재료변수 단계에서 콘크리트 요구성능 기준의 만족 확률을 구하는 PBMD 과정에 대한 일반적이고 상세한 개념을 알 수 있다.
- 2) PBMD 과정 내에서 goodness value 개념을 도입함으로써 서로 다른 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하는 것이 가능해진다.
- 3) 만족도 곡선 결합과정과 콘크리트 배합설계 수정과정에서 importance factor 개념을 도입함으로써 서로 다른 재료변수들이 콘크리트성능에 미치는 영향을 정량화하는 것이 가능해진다.
- 4) 설계 예제는 주어진 재료변수나 배합비에서 콘크리트 요구성능기준을 만족할 확률을 평가함으로써 PBMD과정의 유효성을 보여주었다.
- 5) PBMD를 이용해 얻은 결과와 ACI 214R-02에 제시된 방법을 이용해 얻은 결과간의 차이는 5%이내로서 허용오차범위 이내이다. 그러므로 PBMD 방법은 실제범위의 재료변수값에 대해 콘크리트 요구성능 기준의 만족확률을 예측할 수 있으며 설계에 사용될 수 있다.

## 참고문헌

1. 김장호, 판덕형, 이근성, 이나현, 김성배, “Bayesian 통계법을 활용한 성능기반형 콘크리트 배합설계방법 개발,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 2호, 2010, pp. 171~178.
2. Ang, A. H. S. and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering*, Wiley, Hoboken, N. J., 2006.
3. Box, G. E. P. and Tiao, G. C., *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1992.
4. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T., *Statistical Analysis of Fragility Curves*, Technical Report MCEER, Department of Civil and Environmental Engineering University of Southern California, Los Angeles, California, 2001.
5. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. H., and Naganuma, T., “Statistical Analysis of Fragility Curves,” *Journal of Engineering Mechanics*, 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.
7. Cook, J. E., *Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, ACI 214R-02, 2002, pp. 8~12.
8. Korean Standard Association, Portland Cement, KS L 5201, 2006.
9. Korean Agency for Technology and Standards. Concrete Aggregate, KS F 2526, 2007.
10. ACI Committee 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI 211.1~91, 1991.

---

**요약** 이 연구의 목적은 Bayesian 통계법을 통하여 얻어진 만족도 곡선을 활용하여 체계적으로 콘크리트 재료성능을 평가하고 배합설계를 하는 것이다. 단일변수 만족도 곡선은 콘크리트 성능기준을 만족할 확률을 콘크리트 재료변수 함수로서 나타낸다. 여러 개의 만족도 곡선을 결합해 하나의 만족도 곡선으로 나타내기 위하여 Importance Factor와 Goodness value라는 신규개념을 도입하여 서로 다른 재료변수들이 콘크리트성능에 미치는 영향을 정량화하고 서로 다른 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하는 것을 가능하도록 하였다. 또한 PBMD 과정에 의한 설계예제를 제시함으로써 목표지향적 콘크리트배합설계의 한 방법을 제시하고 그 유효성에 대해 증명하였다. 마지막으로, 실제 구조물에 대한 적용 가능성을 확인하기 위해 PBMD과정에 의한 콘크리트의 기대성능 결과값과 ACI 기준에 의한 결과값을 비교하였다.

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