

고강도 콘크리트의 성능기반형 배합설계방법

Application of Performance Based Mixture Design (PBMD) for High Strength Concrete

김장호* · 오일선** · 판덕형*** · 이근성****
Kim, Jang-Ho Jay · Oh, Il Sun · Phan, Duc Hung · Lee, Keun Sung

Abstract

This paper is a study about application of recently proposed Performance Based Mixture Design (PBMD) for design of high strength concrete (HSC) to obtain HSC mix proportion that satisfies required performances. The PBMD method which uses Satisfaction curve based on a Bayesian method is a performance oriented concrete mix proportion design procedure easily applicable to any condition and environment for a possible replacement to the current prescriptive design standards. Based on extensive experimental results obtained for various materials and performance parameters of HSC, the application feasibility of the developed PBMD procedure for HSC has been verified. Also, the proposed PBMD procedure has been used to perform application examples to obtain desired target performances of HSC with optimum concrete mixture proportions using locally available materials, local environmental conditions, and available concrete production technologies. The validity and precision of HSC mix proportion design obtained using the PBMD method is verified with the experimental and ACI presented results to check the feasibility for actual design usage.

Keywords : *high strength concrete, performance based mixture design, concrete mix proportion design, bayesian method, satisfaction curve*

요 지

본 연구에서는 Bayesian 통계법을 이용한 성능기반형 배합설계방법(Performance Based Mixture Design, 이하 PBMD)을 고강도 콘크리트 배합설계에 활용하여 요구성능을 만족하는 고강도 콘크리트 배합비를 찾는 것을 목표로 하고 있다. PBMD 방법은 Bayesian 통계법을 통해 얻어진 만족도 곡선을 활용한 성능중심의 콘크리트배합설계과정으로서 어떠한 조건이나 환경에서도 쉽게 적용이 가능하여 현재의 설계기준을 대체할 수 있는 하나의 대안으로 생각된다. 고강도 콘크리트의 여러 가지 재료·성능 변수들을 구하기 위해 수행한 여러 가지 실험들의 결과를 바탕으로 고강도 콘크리트 배합설계 시 PBMD 방법의 적용가능성에 대해 검토하였으며 지역에 따른 환경조건, 사용 가능한 재료, 적용 가능한 콘크리트생산기술 등을 고려하여 목표성능을 만족시키는 최적의 콘크리트 배합비를 구하는 과정을 PBMD 방법을 적용한 예제를 통해 나타내었다. PBMD 과정을 적용한 고강도 콘크리트의 배합설계의 현장 적용성을 검토하기 위해 ACI에 기술된 결과와의 비교를 통해 그 유효성을 입증하였다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 성능기반형 설계, 콘크리트배합설계, Bayesian 방법, 만족도 곡선

1. 서 론

최근 일반강도 콘크리트(Normal Strength Concrete, 이하 NSC)보다는 고강도 콘크리트(High Strength Concrete, 이하 HSC)의 사용이 급격히 증가하고 있으며, 특히 장경간의 교량이나 초고층 건물을 시공 시 고강도이면서도 고유동성, 고내구성, 극한환경에 대한 저항성 등의 성질을 동시에 갖는 고성능 콘크리트(High Performance Concrete, 이하 HPC)에 대한 수요가 증가하고 있다(Holland, 2009). 발주자가 요구

하는 HPC의 주요 성능은 극한강도, 초기강도, 탄성계수가 클 것, 내구성, 작업성, 압송성이 양호할 것 등이다. HSC는 고유동 콘크리트, 고내구성 콘크리트와 같이 HPC의 한 종류이며, ACI에서 정의된 바에 의하면, HSC는 압축강도가 41 MPa 혹은 그 이상인 콘크리트를 뜻한다. HSC는 고층건물이나 장경간 교량의 상부구조를 축조할 때, 교량 상판의 내구성을 높여야 할 때, 내구성, 탄성계수, 휨강도 등 특별한 요구를 충족시켜야 할 때(댐, 경기장 지붕, 해양구조물 등) 사용된다. 따라서 현재까지 HSC에 대한 연구가 활발히

*정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (E-mail : jhkim@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 연세대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : ohilsun@gmail.com)

***연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : phanduchung@yonsei.ac.kr)

****연세대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : karma0108@paran.com)

진행되고 있지만 대부분의 연구가 HSC의 개별적 특징 및 속성, HSC에 사용되는 여러 가지 특별한 혼화제들, HSC를 사용한 구조부재의 성능들에 초점이 맞춰져 있는 반면 선택된 재료변수들에 따라서 대상기준의 성능만족도를 평가하는 방법에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 본 연구에서는 단일변수 Bayesian 방법으로 얻은 만족도 곡선을 활용한 성능기반형 배합설계(Performance Based Mixture Design, 이하 PBMD)(김장호 등, 2010b)를 HSC의 배합설계에 적용해 보았다. 선행연구로는 김장호 등이 Bayesian 통계방법(Ang 등, 2006; Box 등, 1992)과 성능기반형 설계방법(Shinozuka 등, 2000; Singhal 등, 1996; Singhal 등, 1998)을 바탕으로 만족도곡선을 작성하고 실제 데이터를 통해 이를 검증하였다(김장호 등, 2010a). 김장호 등은 만족도 곡선을 이용한 PBMD의 전체적인 설계과정을 정립하였으며 NSC에 이 방법을 적용시켜 ACI 214R-02에 기술되어 있는 방법으로 구한 결과와 비교하여 그 실효성을 검토해 보았다(김장호 등, 2010b). 김장호 등이 제시한 PBMD에는 다음과 같은 새로운 개념이 제시되었다: (1)콘크리트의 다양한 성능수준에 따른 상관관계변수, (2)각각의 재료변수가 대상기준에 미치는 영향의 정도를 나타내는 변수의 Importance Factor, (3)다수의 만족도 곡선을 통합하는 방법, (4)모든 콘크리트 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합한 Goodness Value 개념으로 되어있다. 본 논문에서는 HSC의 배합설계 시 PBMD의 적용가능성을 확인해 보기 위해 PBMD의 과정에 의한 HSC 배합설계에 대해 서술하였으며, 실제 예제를 통해 이를 구체화 해보았다. 또한 실험결과에 의해 PBMD방법을 통해 얻은 분석적 결과값들은 ACI 214R-02법으로 구한 결과값들과 비교하여 실제 적용이 가능한지 검토해 보았다.

2. PBMD를 적용한 HSC의 배합설계

PBMD 과정은 만족도곡선 개념을 활용하여 최적의 콘크리트 배합을 찾아가는 과정이다. PBMD의 전체 설계과정은 Fig. 1에 나타내었다(김장호 등, 2010b). 첫 번째 단계는 발주자의 요구를 기초로 한 초기설계 과정, 두 번째 단계는 초기설계를 평가하고 최적화하는 과정, 세 번째 단계는 중간

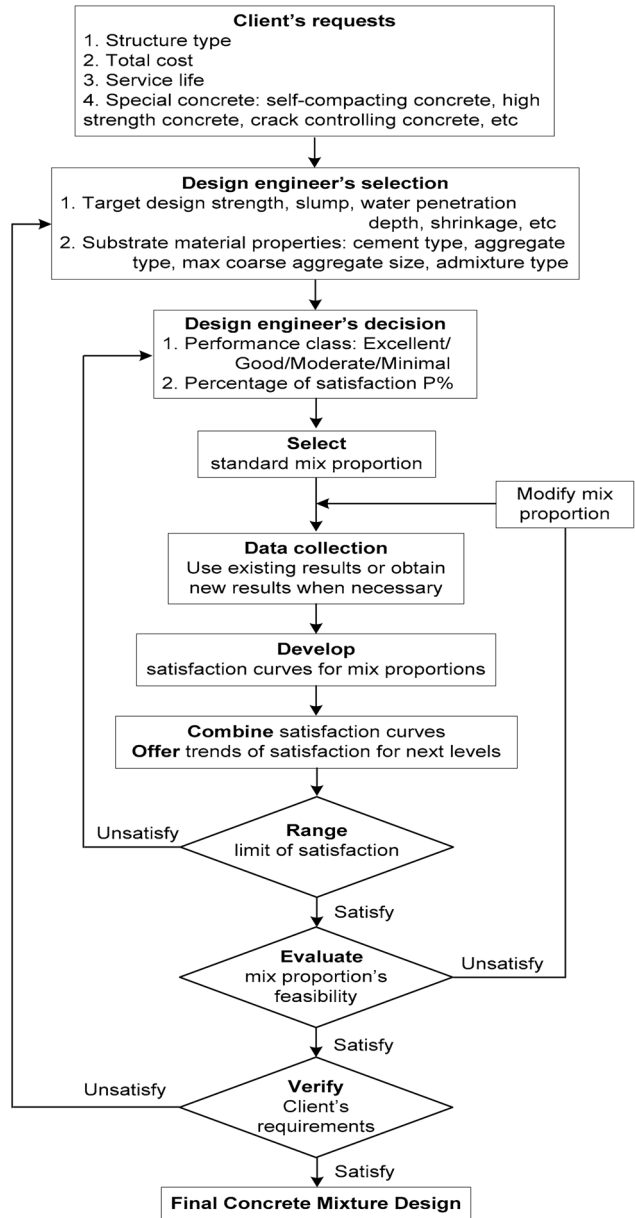


Fig. 1 Main Procedures of PBMD using Bayesian Method

설계를 수정하여 최종설계로 완성하는 단계이다. 좀 더 세부적으로 보면 첫 번째 단계는 다시 Step 1, 2로 나뉘고, 두

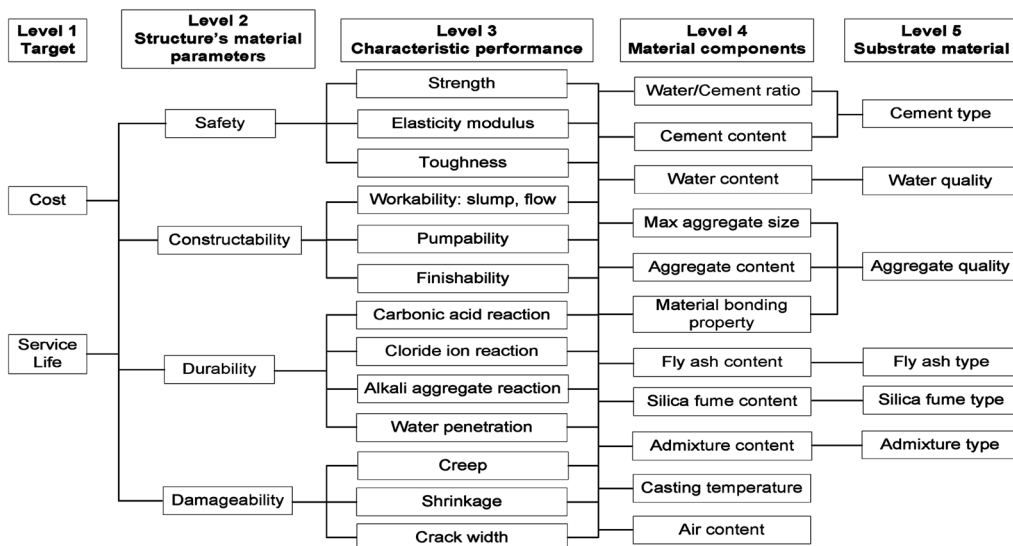


Fig. 2 Parameters for Various Levels of Concrete

번째 단계는 Step 3, 4로, 세 번째 단계는 Step 5, 6, 7로 나뉜다. Step 1에서는 설계자가 발주자의 요구사항을 정확히 이해하여야 한다. Step 2에서는 발주자의 요구사항을 바탕으로 재료 특성, 목표설계기준, 구조물 성능등급을 결정하고 초기 콘크리트 표준배합을 한다. Step 3에서는 데이터를 수집하고 만족도곡선을 개발함으로써 초기설계의 성능을 평가하고, Step 4에서는 Important Factor와 Goodness Value 개념을 사용하여 여러 개의 만족도 곡선을 하나의 만족도 곡선으로 결합한다. Step 5에서는 실제 평가된 성능과 처음에 선정되었던 성능기준을 비교하고 이를 바탕으로 Step 6에서는 배합수정작업을 거치면서 콘크리트배합을 최적화한다. 마지막으로 Step 7에서는 최종 콘크리트배합이 발주자의 요구사항들을 만족하는지 검증한다. NSC를 생산하는데 사용되는 기초재료들은 HSC를 생산하는 데에도 사용된다(Holland,

2009). 다만 차이가 있다면 HSC 생산 시에는 일반적으로 시멘트양이 증가하고 수량이 감소하며 다양한 혼화제가 사용된다는 것이다. 현재 생산되고 있는 대부분의 HSC는 포틀랜드시멘트에 플라이 애쉬(Fly Ash, 이하 FA), 실리카 폼(Silica fume, 이하 SF), 고로슬래그 미분말과 같은 결합제를 넣음으로써 압축강도나 내구성을 증진시킨다. 또한 콘크리트의 수송, 타설, 마무리를 쉽게 하기 위해서 유동화제(Superplasticizer, 이하 SP)와 같은 혼화제를 넣는다. HSC의 경우 요구강도를 만족하기 위해서 거의 대부분의 경우에 여러 가지 혼화제가 동시에 쓰인다. Fig. 2는 콘크리트의 여러 단계에 걸친 변수들을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보듯이 발주자는 궁극적으로 최종 배합설계의 비용과 내구수명에 대해 고려해야 하고, 이는 다른 하위 항목들의 결정에 영향을 준다(김장호 등, 2010b). HSC는 NSC와 달리 FA, SF 등

Table 1. Concrete Specimen Mix Proportions

Set	Specimen	Mix proportion							
		W/B	S/a	w	SP	c	SF	S	G
1	SP0.0	0.30	0.42	143.0	0.00	476.0	0	764	1047
	SP0.5	0.30	0.42	143.0	2.38	476.0	0	764	1047
	SP1.0	0.30	0.42	143.0	4.76	476.0	0	764	1047
	SP1.5	0.30	0.42	143.0	7.14	476.0	0	764	1047
2	SF5	0.30	0.42	143.0	4.76	452.2	23.80	764	1047
	SF8	0.30	0.42	143.0	4.76	437.9	38.08	764	1047
	SF12	0.30	0.42	143.0	4.76	418.9	57.12	764	1047
	SF15	0.30	0.42	143.0	4.76	404.6	71.40	764	1047
3-1	8WB25W	0.25	0.42	119.0	4.76	437.9	38.08	764	1047
	8WB28W	0.28	0.42	133.3	4.76	437.9	38.08	764	1047
	8WB32W	0.32	0.42	152.3	4.76	437.9	38.08	764	1047
	8WB35W	0.35	0.42	166.6	4.76	437.9	38.08	764	1047
3-2	8WB25C	0.25	0.42	143.0	5.72	526.2	45.76	764	1047
	8WB28C	0.28	0.42	143.0	5.11	469.9	40.86	764	1047
	8WB32C	0.32	0.42	143.0	4.47	411.1	35.75	764	1047
	8WB35C	0.35	0.42	143.0	4.09	375.9	32.69	764	1047
3-3	8SA40S	0.30	0.40	143.0	4.76	437.9	38.08	698	1047
	8SA44S	0.30	0.44	143.0	4.76	437.9	38.08	823	1047
3-4	8SA40G	0.30	0.40	143.0	4.76	437.9	38.08	764	1146
	8SA44G	0.30	0.44	143.0	4.76	437.9	38.08	764	972
4-1	5WB25W	0.25	0.42	119.0	4.76	452.2	23.80	764	1047
	5WB28W	0.28	0.42	133.3	4.76	452.2	23.80	764	1047
	5WB32W	0.32	0.42	152.3	4.76	452.2	23.80	764	1047
	5WB35W	0.35	0.42	166.6	4.76	452.2	23.80	764	1047
4-2	5WB25C	0.25	0.42	143.0	5.72	543.4	28.60	764	1047
	5WB28C	0.28	0.42	143.0	5.11	485.2	25.54	764	1047
	5WB32C	0.32	0.42	143.0	4.47	424.5	22.34	764	1047
	5WB35C	0.35	0.42	143.0	4.09	388.1	20.43	764	1047
4-3	5SA40S	0.30	0.40	143.0	4.76	452.2	23.80	698	1047
	5SA44S	0.30	0.44	143.0	4.76	452.2	23.80	823	1047
4-4	5SA40G	0.30	0.40	143.0	4.76	452.2	23.80	764	1146
	5SA44G	0.30	0.44	143.0	4.76	452.2	23.80	764	972

*W/B와 S/a는 무단위, w, SP, c, SF, S, G는 kg/m³

의 재료변수들이 Level 4에서 포함되어야 하며, 이 재료변수들의 종류에 대해서는 Level 5(Substrate material)에서 고려해 주어야 한다. PBMD에서는 이러한 상관관계를 사용하여 여러 가지 기준이나 콘크리트 재료변수들의 상호작용을 고려해 준다. 이는 곧 여러 가지 콘크리트 재료변수에 대해 콘크리트의 성능요구기준을 만족할 확률을 예측하고 평가하는 것이 가능하다는 것을 의미한다.

3. 실험 및 만족도 곡선 작성

콘크리트변수들과 HSC의 요구기준들(압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도)의 관계를 만족도 곡선의 형태로 작성하기 위해서 실험을 수행하여 데이터를 얻어냈다. 전에 언급되었듯이 HSC 배합비는 일반적으로 물-결합재비가 작아야 하며 이를 위해 많은 양의 SP를 첨가해야 한다. 또한 요구압축강

도를 만족시키기 위하여 FA, SF 등의 결합재가 사용된다.

3.1 실험

3.1.1 실험 재료

실험에 사용된 잔골재는 조립률이 2.80이고 비중이 2.60인 강모래이며 굵은 골재의 최대치수는 20 mm이며 비중이 2.65이다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Type 1)가 사용되었으며 SF 콘크리트의 타설을 위해 가루형태의 SF를 사용하였다. 사용한 SF의 성분은 SiO₂ 93%, C 3.5%, Fe₂O₃ 0.6%, K₂O 0.5%, Al₂O₃, CaO, MgO 각각 0.3% 등으로 이루어져 있으며 분말도는 150000~300000 cm²/g이다. 나프탈렌 포름알데히드술포화 SP는 고체형태로서 실험에 사용되었다.

3.1.2 배합비

이 실험의 목적은 70 MPa의 압축강도를 갖는 고강도 콘

Table 2. Test Results

Specimen	Slump [cm]	Compressive strength [MPa]			Splitting tensile strength [MPa]			Flexural strength [MPa]		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
SP0.0	0	59.5	58.6	56.0	4.73	4.61	4.54	9.93	9.79	9.40
SP0.5	4	60.5	57.9	56.8	4.75	4.71	4.59	10.08	9.69	9.52
SP1.0	12	63.6	59.0	56.7	4.79	4.75	4.61	10.25	9.85	9.51
SP1.5	15	52.2	49.6	45.3	4.57	4.43	4.34	9.83	9.44	8.95
SF5	11	73.0	71.8	69.3	5.02	4.96	4.89	10.94	10.70	10.41
SF8	8	74.2	72.8	69.6	5.03	5.00	4.91	11.07	10.85	10.38
SF12	6	71.4	69.6	68.2	4.98	4.91	4.86	10.59	10.34	9.77
SF15	4	68.5	66.6	65.1	4.91	4.87	4.81	10.33	9.99	9.47
8WB25W	3	75.2	74.7	72.2	5.09	5.03	4.98	11.21	11.11	10.82
8WB28W	6	74.9	73.3	70.9	5.08	5.01	4.96	11.24	11.06	10.61
8WB32W	11	70.9	67.9	65.5	4.95	4.86	4.74	10.54	10.29	9.81
8WB35W	16	66.6	61.4	55.8	4.89	4.71	4.64	8.99	8.21	8.37
8WB25C	2	78.3	77.1	74.8	5.20	5.13	5.07	11.26	11.13	10.94
8WB28C	5	76.6	74.5	72.1	5.11	5.07	4.96	11.19	10.97	10.65
8WB32C	9	71.1	69.5	66.9	4.95	4.89	4.80	10.48	10.23	9.91
8WB35C	11	68.3	63.7	60.6	4.89	4.75	4.61	9.77	9.46	8.99
8SA40S	10	70.9	69.3	67.3	4.97	4.89	4.85	10.79	10.47	10.26
8SA44S	7	74.9	72.1	70.5	5.06	5.01	4.93	11.07	10.89	10.63
8SA40G	6	71.5	68.9	67.3	4.99	4.91	4.79	10.97	10.70	10.14
8SA44G	10	75.1	72.9	70.4	5.05	4.98	4.93	11.12	10.87	10.67
5WB25W	5	75.0	72.9	71.4	5.05	5.00	4.95	11.18	10.95	10.72
5WB28W	9	73.6	72.0	70.5	5.05	4.98	4.93	11.04	10.85	10.53
5WB32W	14	68.5	66.1	62.1	4.89	4.78	4.73	10.53	10.05	9.72
5WB35W	19	59.2	56.2	52.0	4.57	4.40	4.30	8.92	8.53	8.03
5WB25C	4	76.8	74.3	72.2	5.13	5.06	4.95	11.32	11.12	10.70
5WB28C	7	74.1	73.4	70.8	5.03	4.99	4.92	11.22	10.96	10.60
5WB32C	12	69.6	65.5	63.9	4.91	4.86	4.79	10.44	10.31	10.04
5WB35C	14	61.1	59.3	57.3	4.63	4.52	4.46	9.17	8.90	8.45
5SA40S	12	69.2	66.9	64.7	4.93	4.88	4.76	10.63	10.33	10.09
5SA44S	9	73.8	71.7	70.2	5.03	4.97	4.91	11.00	10.72	10.53
5SA40G	9	69.2	67.7	63.6	4.97	4.86	4.78	10.68	10.58	10.30
5SA44G	13	73.5	71.8	70.1	5.04	4.99	4.92	11.04	10.84	10.61

크리트를 생산하는 것이다. ACI 211.4R-08에 따르면 배합비를 정하는 일반적인 접근 방법은 비슷한 압축강도를 목표로 했던 과거의 성공 배합비를 사용하는 것으로부터 시작한다. 시험 배합체를 일정한 환경조건하에서 타설하여 HSC의 성능과 이전 다른 연구에서 사용된 실제 HSC의 성능과 비교한다. 본 연구에서는 각각의 기초재료들이 HSC의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 다양한 배합비에 대한 실험을 수행하였다. 배합설계변수가 콘크리트의 성질에 미치는 독립적인 영향을 결정하기 위해 다른 배합설계변수들을 일정하게 하였다. 위의 조건들을 바탕으로 Table 1과 같이 총 4set의 콘크리트 배합에 대하여 실험을 수행하였다. 표에서 WB는 물-결합재비(W/B), SA는 잔골재율(S/a)이며 무단위이다. W는 단위수량, C는 시멘트량, S는 잔골재량, G는 굵은 골재량이며 단위는 kg/m^3 이다. Set 1에서는 SP의 양을 독립변수로 하여 각각 총 결합재량의 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%를 첨가하여 8~12 cm의 슬럼프를 가지는 콘크리트를 얻는데 적절한 SP의 용량을 확인해 보고자 하였다. 그 결과 총 결합재량의 1.0%가 가장 적절한 SP의 양으로 판단하였으며 나머지 set의 실험에 이것을 적용하였다. 일반적인 배합설계 실험 시 배합이 변할 경우 목표슬럼프 및 공기량을 만족하는 SP 첨가량은 실험을 통해 구하도록 하고 있으나 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 배합설계에 성능기반형 배합설계를 적용함에 있어서 단일변수가 요구성능 초과확률에 미치는 영향을 보기 위해 set 2,3,4의 경우 유동화제의 양을 일정하게 하였다. Set 2에서는 시멘트 대신 SF를 각각 총 결합재량의 5%, 8%, 12%, 15% 치환하여 SF가 콘크리트 압축강도

에 미치는 영향을 평가하였다. Set 3과 4에서는 수량과 결합재량을 변화시킴으로써 다양한 물-결합재비에 대해, 잔골재량과 굵은골재량은 변화시킴으로써 다양한 잔골재율에 대해 실험을 수행하였다. Set 3의 배합에 사용된 SF는 8%이며, set 4에는 SF 5%가 사용되었다.

3.1.3 실험 결과

압축강도와 쪼갠장강도 시험에 사용된 시편은 100×200 mm 원주형 공시체이며 휨인장강도 시험에는 $100 \times 100 \times 400$ mm의 시험체가 사용되었다. 휨 시험은 300 mm 순경간을 가진 보에 3등분점 재하법이 사용되었으며 지지방식은 roller-hinge가 사용되었다. 굳지 않은 콘크리트배합의 유동성을 확인해보기 위해 KS F 2402:2007의 규정에 따라 슬럼프 프시험을 진행하였다. 타설 후 콘크리트 시편은 젖은 천과 폴리에틸렌시트로 덮어두었으며 24시간동안 실험실에 보관하였다. 탈형 후 모든 시편들은 수중 양생하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405:2005에 따라, 쪼갠장강도시험은 KS F 2423:2006에 따라, 휨강도는 KS F 2408:2000에 따라 시험을 진행하였다. 32개의 배합비에 대한 압축강도, 쪼갠장강도, 휨강도 실험결과는 Table 2에 나타내었다.

set 1의 시험결과를 보면 SP의 용량에 따라 강도가 약간 변화하고 있다. SP 1.5인 경우 강도가 약간 저하되었는데 실제 실험 시 재료분리가 나타났으며 이로 인해 강도가 저하된 것으로 사료된다. 또한 SF의 용량은 목표 강도를 달성하기 위해 중요한 요소임을 알 수 있다. SF 8%의 강도는 SF 5%의 강도보다 약간 높지만 비용측면에서 SF의 가격이

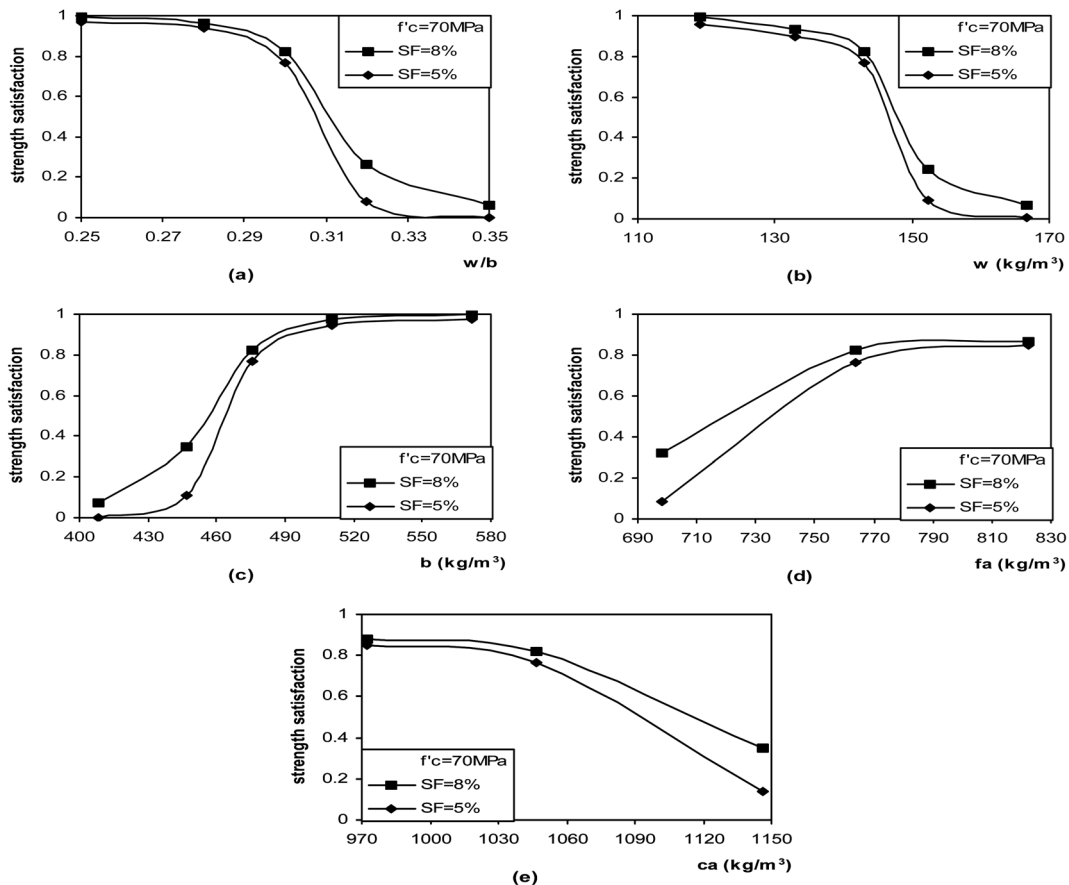


Fig. 3 Compressive Strength Satisfaction Curve of (a) water-to-binder ratio, (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

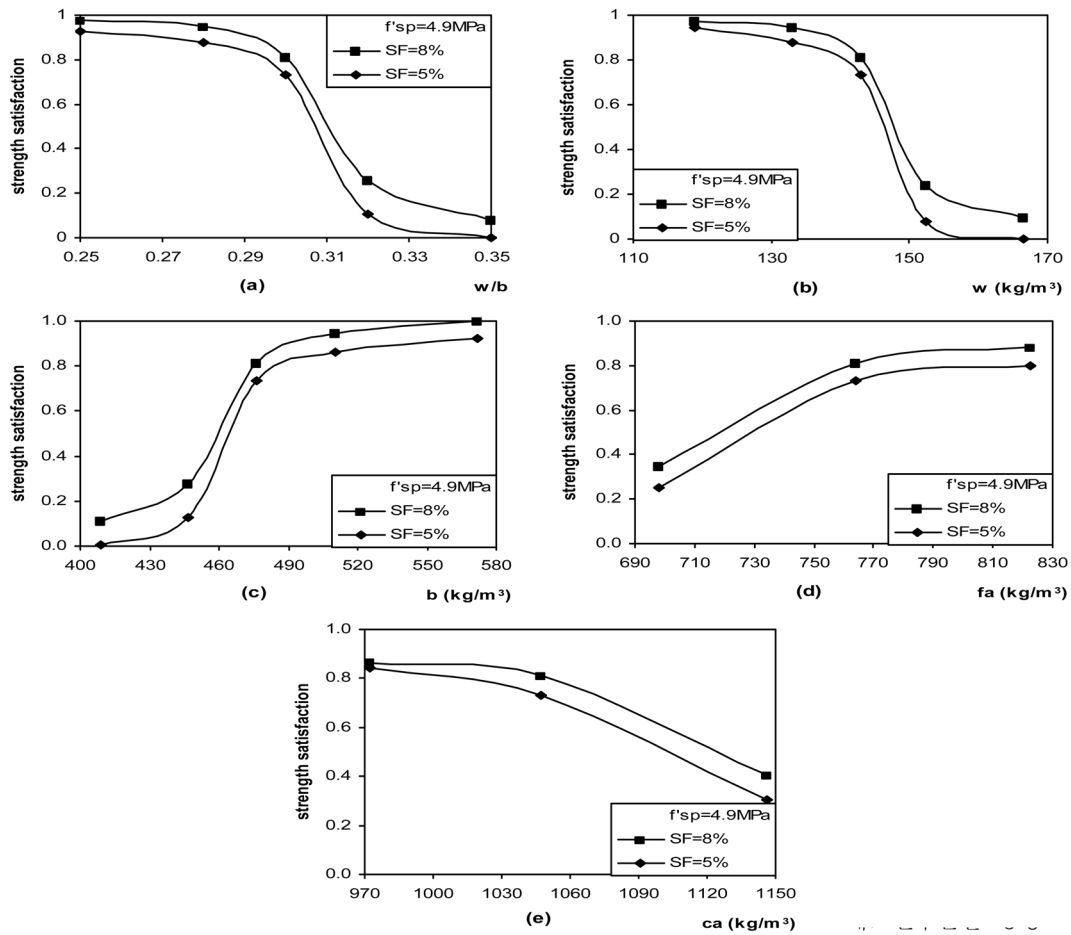


Fig. 4 Splitting Tensile Strength Satisfaction Curve of (a) water-to-binder ratio, (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

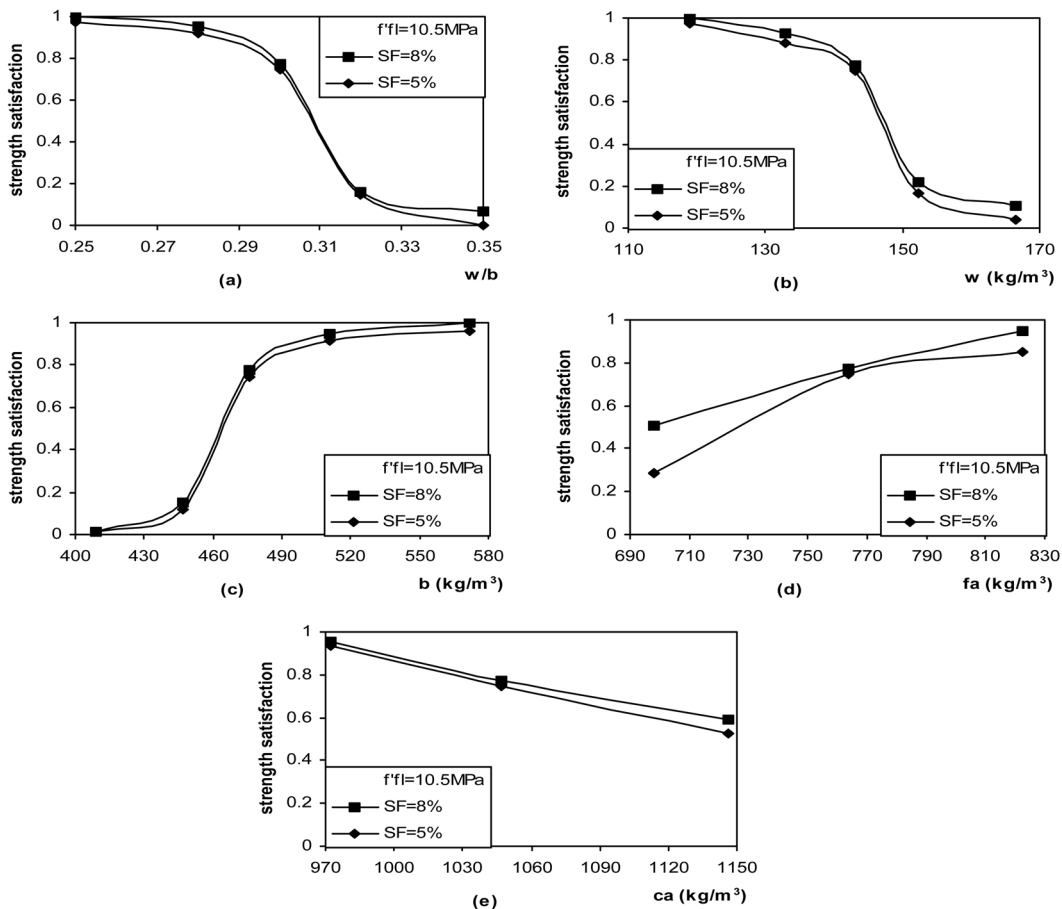


Fig. 5 Flexural Strength Satisfaction Curve of (a) water-to-binder ratio, (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

보통포틀랜드 시멘트보다 높으므로 SF 8%가 SF 5%보다 생산비용이 많이 든다. 따라서 SF8과 SF5 모두 표준배합으로 생각할 수 있으며 SF8과 SF5 모두 목표 슬럼프 기준을 만족한다. 하지만 콘크리트 재료변수가 변하면 목표슬럼프도 변하게 되므로 콘크리트 배합설계과정에서 이를 반드시 고려해 주어야 한다.

3.2 만족도 곡선 작성

만족도 곡선은 다양한 콘크리트 재료변수들에 대해 성능만족확률이 기준치 내에 있을 조건부확률을 계산함으로써 얻어낼 수 있다(김장호 등, 2010b). 이 조건부 확률은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$P_{ik} = P[S \geq s_i | Y = y_k] \quad (1)$$

여기서 P_{ik} 는 주어진 콘크리트 재료변수 y_k 에 대해 기준인 s_i 를 초과할 확률을 의미한다. S 는 기준 벡터 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ 에서 정의된 기준확률변수이며, Y 는 콘크리트 재료확률변수이다. 각각의 콘크리트 배합변수(물결합재비, 단위수량, 결합재량, 잔골재량, 굵은 골재량)와 콘크리트 압축, 쪼갬인장과 휨 강도의 성능요구치(70 MPa, 4.92 MPa, 10.5 MPa) 간의 관계는 Figs. 3, 4와 5에 각각 나타내었다. 이 만족도 곡선들은 모두 단일변수 Bayesian 방법에 의해 작성된 것이다(김장호 등, 2010a; 김장호 등, 2010b). 만족도 곡선 형태로 나타난 실험결과들은 콘크리트변수들의 요구기준만족확률을 평가하는데 사용될 것이다. 다음 장에는 HSC의 최적배합에 접근하도록 하는 만족도 곡선을 사용한 PBMD 과정에 대해 설명하고자 한다.

4. 설계 예제

4.1 발주자의 요구를 기초로 한 가정 사항

4.1.1 구조물의 종류

발주자의 요구가 높은 안전도를 확보할 수 있는 새로운 구조물을 짓는 것이라면 구조물의 건설에 사용되는 콘크리트는 HSC가 될 가능성이 높다. HSC의 초기 설계목표 압축, 쪼갬인장, 휨강도는 각각 70 MPa, 4.92 MPa, 10.52 MPa로 설정하였다. 다른 콘크리트 재료기준은 이 예제에서는 고려하지 않는다.

4.1.2 성능 등급과 그에 적합한 만족확률

높은 안전도를 갖는 이런 종류의 구조물인 경우 콘크리트 강도기준에 대한 요구 성능등급은 “우수” 등급 내에 들어야 하며 이는 요구기준을 초과할 확률이 약 75% 라는 의미이

다. 단 아직까지 성능만족확률값을 분류(categorization)하는 작업이 실행되지 않았으므로 성능등급 분류의 정확한 기준에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다.

4.1.3 기초재료선택과 표준배합설계

이번 단계의 목표는 Bayesian 확률분석을 위한 적절한 데이터를 얻는 것이다. 데이터는 이용가능하기만 하다면 분석적 결과, 실험적 결과, 이전의 설계 결과 등 어떤 형태이든 관계없이 사용할 수 있다(김장호 등, 2010b). 요구조건이나 목표설계기준을 고려해 보았을 때 전장에서 서술한 실험적 결과들은 이 설계예제에 사용되기에 적합하다. 요구성능기준을 만족시키기 위한 표준배합설계로는 SF8 혹은 SF5를 사용할 수 있다.

4.2 평가방법

4.2.1 만족도 곡선 작성

재료성능평가에 있어서 만족도 곡선 작성에 사용되는 데이터는 설계자의 의도와 부합해야 한다(김장호 등, 2010b). Figs. 3~5에 작성된 만족도 곡선을 이 예제에서 사용할 수 있다.

4.2.2 Goodness Value와 Importance Factor를 이용한 만족도 곡선의 결합

일단 주어진 콘크리트배합에서 요구 경계기준으로부터 모든 만족도 곡선이 작성되면 결합과정을 거쳐 “통합 만족도 곡선”으로 나타낸다(김장호 등, 2010b).

1) Goodness Value

결합과정에서 모든 변수들은 값과 범위가 다르기 때문에 통합 만족도 곡선의 X축 변수값을 하나의 공통된 값으로 나타내기 위해서 변수값들은 보정되어야 한다. 서로 다른 재료 변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하기 위해서 Goodness Value라고 불리는 보정된 변수의 개념을 도입한다. 변수들을 보정하기 위해 표준화 방법을 사용하여 각 변수의 Goodness Value(G_i)는 아래의 식을 이용해 계산한다(김장호 등, 2010b).

$$G_i = \frac{X_i - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \quad (2)$$

여기서, X_i 는 콘크리트 변수; X_{imin} 과 X_{imax} 는 변수 X_i 의 최소값과 최대값을 각각 나타낸다. 식 (2)와 Table 3에 나타난 콘크리트 재료변수들의 최소값과 최대값을 이용함으로써 재료변수들을 0부터 1 범위 안의 Goodness Value 변수로 변환할 수 있다. 예를 들어 물-결합재비(w/b)가 0.25와 0.35사

Table 3. Concrete Material Parameter Values

Concrete material parameter	Min value of parameter	Max value of parameter	Shifted compatible value
w/b ratio	0.25	0.35	+0.00
Water content (kg/m ³)	119.0	133.3	+0.00
Binder content (kg/m ³)	408.6	572.0	+0.09
Fine aggregate content (kg/m ³)	698.0	822.6	-0.03
Coarse aggregate content (kg/m ³)	972.0	1146.0	+0.07

Table 4. Importance Factors of Concrete Parameters

Parameter	Importance Factor
w/b ratio	0.50
Water content (kg/m ³)	0.10
Binder content (kg/m ³)	0.30
Fine aggregate content (kg/m ³)	0.05
Coarse aggregate content (kg/m ³)	0.05
...	0.00
Total	1.00

이의 값을 가질 때 물-결합재비의 Goodness Value는 $(w/b-0.25)/(0.35-0.25)$ 로 계산될 수 있는 것이다.

2) Importance Factor

Importance Factor는 서로 다른 재료변수들이 콘크리트 성능에 미치는 영향을 정량화하기 위해 도입된 개념이며 각각의 기준이나 경계값에 따라 다르다. 기준에 영향을 많이 주는 변수들은 주요변수들로 생각할 수 있으며 다른 변수들보다 큰 값을 부여 한다(김장호 등, 2010b). 각각의 콘크리트 배합변수의 Importance Factor는 Table 4에 나타내었다. 단, 이 값들은 오직 이번 예제에서 HSC 기준에 적용한 가정값들이며, 다른 경우나 기준의 경우에는 값이 사용될 수 있다. 또한, 하나의 배합의 모든 Importance Factor 값들의 총합은 1.0을 넘을 수 없다. 이러한 제한 조건을 주는 이유는 Importance Factor 선정시 한쪽으로 치우치거나 남용되는 것

을 방지하기 위한 것이다(김장호 등, 2010b).

3) Combination of Satisfaction Curves

설계에서 참조값으로서 절대적인 변수값을 만들기 위해 최소요구만족확률을 “참조값”으로 정의한다. 예를 들어 표준배합의 모든 재료변수의 Goodness Value의 값은 참조값으로서 0.5로 정해진다(김장호 등, 2010). 그러므로 각 변수의 만족도 곡선은 Goodness Value 참조값 0.5을 기준으로 Table 3에 있는 적정이동값(Shifted compatible value)을 이용하여 이동된다. 예를 들어 표준배합의 물-결합재비 변수는 0.3이다. 물-결합재비 변수의 Goodness Value 적정이동값은 $0.5-(0.3-0.25)/(0.35-0.25)=0$ 과 같이 얻을 수 있다. 여기서 고려해야 할 점은 전체적인 만족도 곡선의 경향이 항상 같은 방향은 아니라는 점이다. 각 단계에 대해 다수의 재료변수의 만족도 곡선을 통합만족도 곡선으로 결합하기 위해서는 전체적인 경향이 서로 적합해야 한다(김장호 등, 2010b). 강도 기준이 적용될 때 물-결합재비, 수량, 굵은골재량은 “양”의 추세로 변환해야 한다. 예를 들어 물결합재비와 수량이 증가하면 강도는 감소하기 때문에 G 를 $(1-G)$ 로 바꿔줌으로써 “양”의 추세로 변환시킨다. 단, 적정확률 P%는 엄격히 유지해야 한다. 위의 방법으로 Figs. 3, 4와 5에 나타낸 X축 값들(압축강도, 조꿈인장강도, 휨강도의 만족도 곡선)이 바뀌며 각각 Figs. 6, 7와 8에 이를 나타내었다.

만족도 곡선 결합과정의 다음 과정은 각각의 Goodness Value에서의 확률을 계산하는 것이며 P_j^k 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

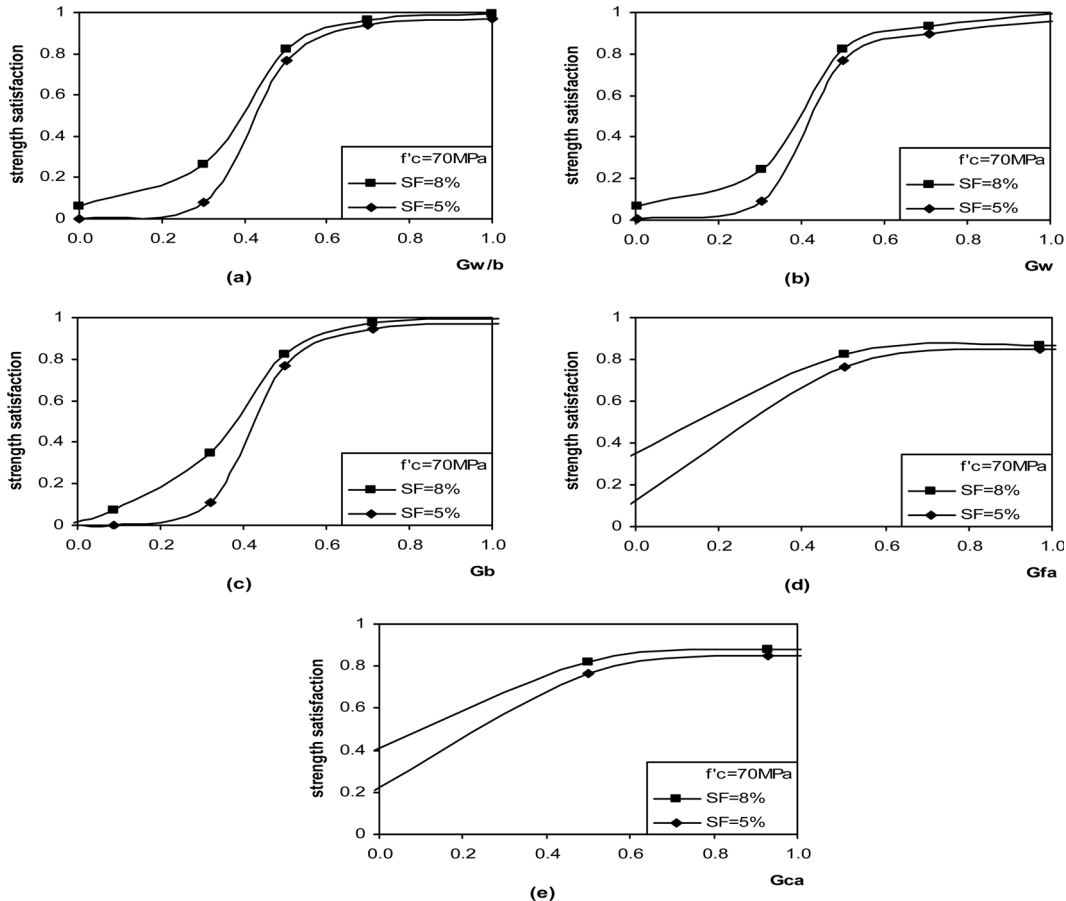


Fig. 6 Compressive Strength Satisfaction Curve of Goodness Value of (a) water-to-binder ratio, (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

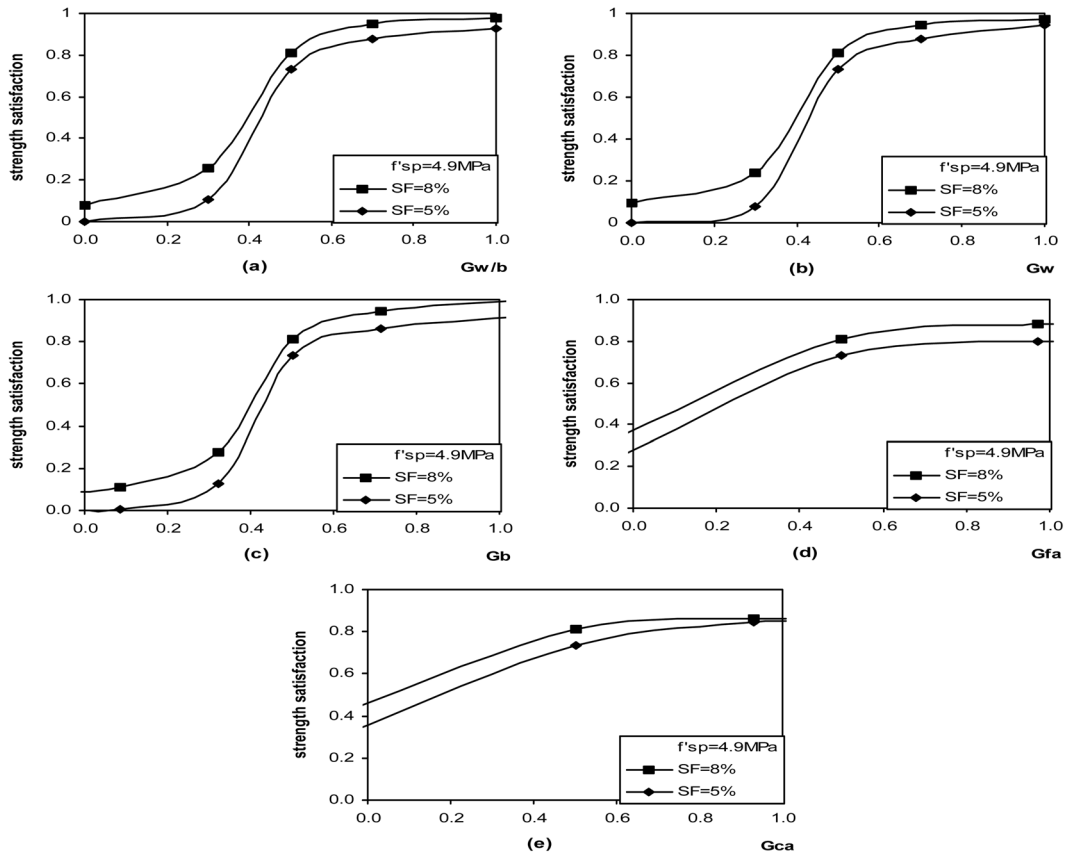


Fig. 7 Splitting Tensile Strength Satisfaction Curve of Goodness Value of (a) water-to-binder ratio; (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

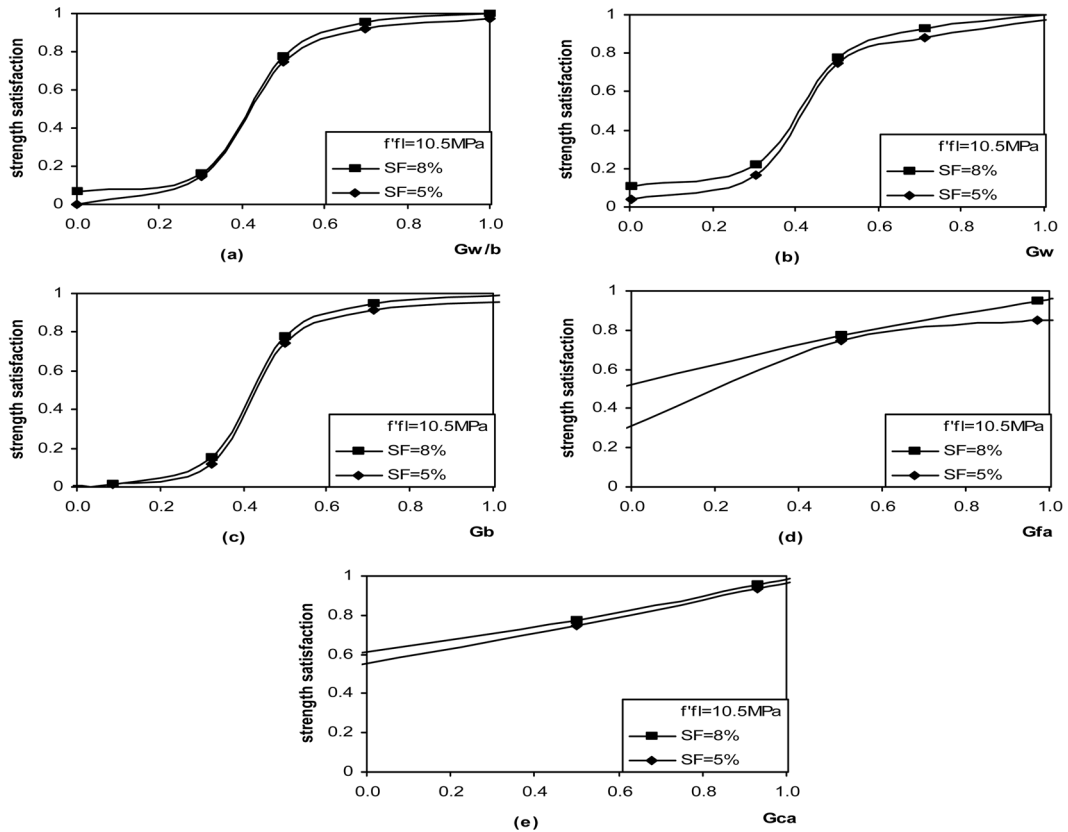


Fig. 8 Flexural Strength Satisfaction Curve of Goodness Value of (a) water-to-binder ratio, (b) water content, (c) binder content, (d) fine aggregate content, (e) coarse aggregate content

$$P_j^k = P_i \alpha_i \quad (3)$$

여기서 P_j^k 는 k단계(level)에서 기준 j를 만족할 확률; P_i 는

재료변수의 확률; α_i 는 배합설계 내에서 명시된 기준에 대한 재료변수의 Importance Factor이다. 이러한 결합과정의 목적은 설계자로 하여금 각 재료단계에서 성능의 경향을 명확히

Table 5. Importance Factors for Safety Satisfaction Curve

Parameter	Importance Factor
Compressive strength	0.50
Splitting tensile strength	0.25
Flexural strength	0.25
...	0.00
Total	1.00

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(김장호 등, 2010b). 그 결과 압축강도 70 MPa, 쪼갬인장강도 4.92 MPa, 휨강도 10.5 MPa를 만족시키는 콘크리트 배합의 최종 통합 만족도 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 이 예제에서는 선택된 성능기준이 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도였다. 그러므로 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도에 대한 만족도 곡선들을 결합하여 HSC 배합의 강도에 대한 최종 통합 만족도 곡선을 Fig. 10처럼 나타낼 수 있다. 이러한 결합과정은 식 (3)과 Table 5에서 가장한 Importance Factor 기준값을 사용하여 이루어진다. 일단 주어진 단계에서 모든 단일변수만족도 곡선들이 결합되면, 그 상위 단계에서도 주어진 배합비에 대해 여러 변수에 대한 만족도 곡선이 전체적인 만족도 경향을 충족할 때까지 이 과정을 반복한다(김장호 등, 2010b).

4.3 설계 배합비 검증 및 수정

4.3.1 성능만족확률 평가

설계 표준배합비는 재료만족확률을 평가하기 위해 사용하며 이는 요구만족확률 P%를 만족해야만 한다(김장호 등, 2010b). 이 예제에서는 표준배합에 대한 모든 변수의 Goodness Value를 0.5로 동일하게 선택하였고 이를 참조점으로 생각하였다. Fig. 9에서 압축강도 70 MPa, 쪼갬인장강도 4.92 MPa, 휨강도 10.5 MPa에 대한 만족 확률은 각각

SF8 배합에서 82.2%, 81.1%, 77.6%이며 SF5 배합에서 76.7%, 73.3%, 74.5%임을 알 수 있다. PBMD 과정을 통한 만족확률과 요구확률과의 차이는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$Probability\ Difference = \frac{P_{PBMD} - P}{P} \times 100\% \quad (4)$$

여기서, P는 요구기준만족확률, P_{PBMD} 는 재료 요소에 PBMD 방법을 적용한 요구기준만족확률이다. 식 (4)를 이용하면, 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도의 확률 차이는 각각 SF8 배합에서 9.6%, 8.1%, 3.5%이며 SF5 배합에서 2.3%, -2.3%, -0.7%임을 알 수 있다. 이러한 편차값으로부터 SF8과 SF5의 표준배합비의 성능만족확률값이 요구만족범위와 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 따라서 초기 선정된 성능등급과 그에 상응하는 만족 확률은 이 설계용도의 배합에 적합하다는 것을 보여준다.

4.3.2 콘크리트 배합비 수정

일반적으로 초기에 선정된 표준배합비는 첫 시도에 모든 요구설계목표기준을 만족할 수 없다. 이는 배합설계가 대체로 일부 기준만을 만족시킨다는 것을 뜻한다(김장호 등, 2010b). 이 단계에서는 어떤 콘크리트 재료변수가 요구성능 만족확률을 만족시키지 못하는지 확인해 보아야 한다. 만족시키지 못한 변수들은 요구 확률값을 만족시키도록 작성된 만족도 곡선을 이용하여 수정해야 한다. 이전에 계산된 SF8 배합의 확률 차이값은 모두 요구확률을 만족시킨다. SF8의 편차값(9.6%, 8.1%, 3.5%)과 비교했을 때, SF5의 편차값(2.3%, -2.3%, -0.7%)은 그 값이 더 작으며 허용가능한 수준이다. 그러나 SF5의 쪼갬인장강도와 휨강도의 만족확률은 편차값의 절대값은 작지만 요구기준을 만족시키지 못하므로 SF8 배합을 사용하거나 SF5 배합을 수정하여 사용 가능하다. 하지만 무엇보다도 중요한 것은 선택된 모든 기준들 중에서도 주요기준을 만족시키는 것이다. 이 예제에서는 배합비가 만족시켜야 하는 주요기준이 압축강도이며 그에 비해 쪼갬인장강도나 휨강도는 덜 중요한 기준으로 볼 수 있다.

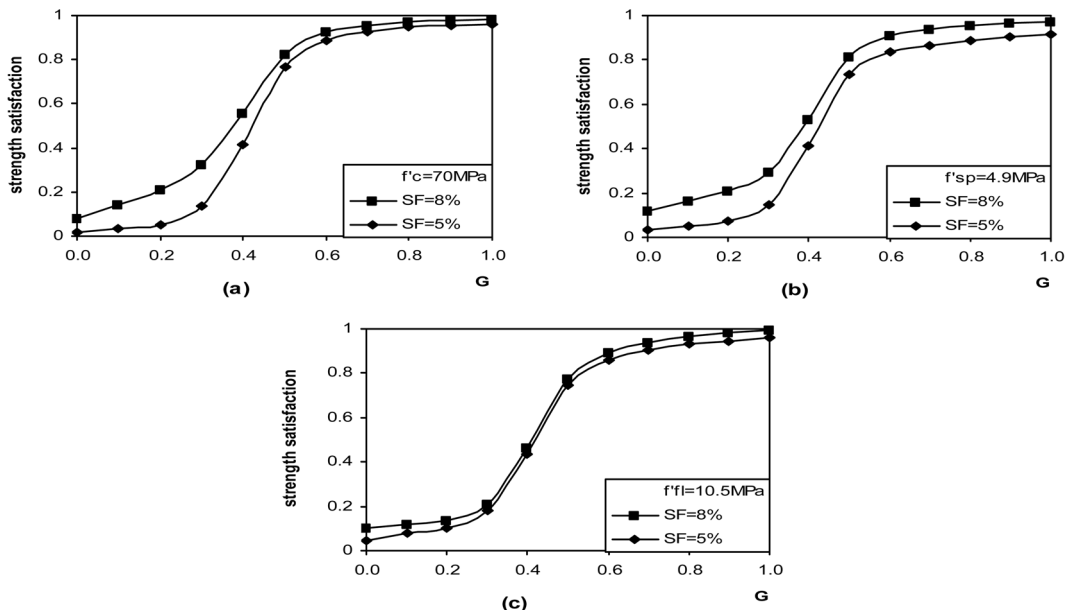


Fig. 9 Combined Satisfaction Curve of Concrete Mix Proportion for (a) compressive, (b) splitting tensile, (c) flexural strength

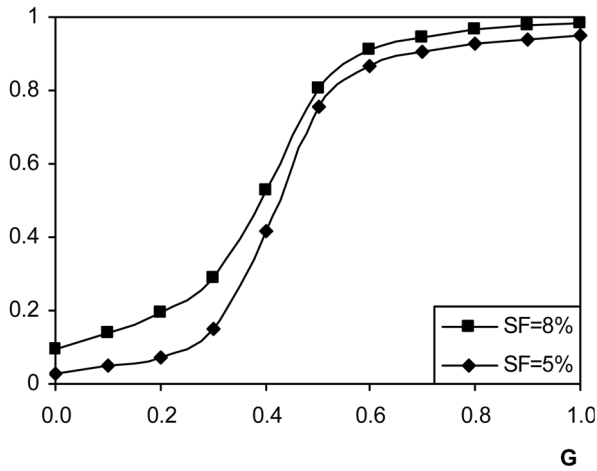


Fig. 10 Combined Strength Satisfaction Curve Trend of Concrete Mix Proportion

Table 6. Modified Mix Proportion MSF5

Parameter	SF5	MSF5	Goodness Value
w/b	0.3	0.295	0.55
w(kg/m ³)	143.0	143.0	0.5
b(kg/m ³)	476.0	484.7	0.55
S(kg/m ³)	764.0	764.0	0.5
G(kg/m ³)	1047.0	1047.0	0.5

또한 요구조건을 콘크리트 배합의 강도 기준으로 생각한다면 Fig. 10에서 얻은 SF8 배합과 SF5 배합의 만족확률은 각각 80.8%, 75.3% 이며 이들 모두 요구 조건(75%)을 만족시키고 있으며 SF5 배합의 경우에도 수정없이 사용될 수 있다. 단, 이 예제에서는 요구조건을 만족시키도록 콘크리트 배합비를 수정하는 상세과정을 설명하기 위해 SF5를 수정할 것이다. Table 4에 나타난 강도기준에 대한 콘크리트 변수들의 Importance Factor를 보면 배합비의 주요변수가 물-결합재비(w/b)와 결합재의 양(b)임을 알 수 있다. 그러므로 이 두 가지 변수 들을 수정하고 나머지 변수들은 일정하게 유지한다. w/b와 b의 값을 각각 0.3에서 0.295로 476.0 kg/m³에서 484.7 kg/m³로 변화시킨다. (w/b)와 b의 Goodness Value는 각각(0.295-0.25)/(0.35-0.25)+0.0=0.45와 (484.7-408.6)/(572.0-408.6)+0.09=0.55가 된다. 물-결합재비의 만족도 곡선은 “양”의 추세로 변환되어야 하기 때문에 물-결합재비의 최

종 Goodness Value는 1-0.45=0.55이다. 수정된 배합비의 변수값과, 변수들의 Goodness Value값은 Table 6에 나타났다. 수정된 배합비의 Goodness Value는 다음 식에 의해 결합될 수 있다.

$$G = G_i \alpha_i \quad (5)$$

여기서, G_i 는 재료변수의 Goodness Value; α_i 는 배합 설계에서 특정 기준에 대한 재료변수의 Importance Factor이다.

MSF5의 Goodness Value는 0.54이다. Fig. 9를 사용하면 수정 배합된 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도에 대한 최종 만족확률은 각각 83.2%, 79.3%, 81.0%이며 이는 요구확률보다 크므로 수정된 배합비가 요구 만족확률을 만족시킴을 보여 준다. 그러므로 수정된 MSF5 배합은 허용가능한 배합설계이다.

4.3.3 최종 콘크리트 배합설계에 대한 발주자의 요구사항 검증

최종 수정배합은 발주자의 요구조건들을 만족시키는데 대한 여부를 확인해 보아야 한다. 이 예제에서는 Fig. 10에 나타난 강도 만족도 곡선 경향이 건설용도에 충분히 적합한 지에 대한 확인이 필요하다. Fig. 10을 보면 0.25에서 0.55 사이의 Goodness Value에서 만족도 곡선이 선형적으로 증가하며 0.0에서 0.25사이(불만족)와, 0.55에서 1.0 사이(만족)에서는 거의 수평을 이루고 있다. 만족도 곡선의 경향을 보면 재료변수의 Goodness Value가 변하더라도 만족확률이 급격하게 변화하지는 않음을 알 수 있다. 만족도 곡선 경향에서 넓은 Goodness Value 범위에 걸쳐 불만족이거나 좁은 Goodness Value 범위에서 극심한 변화구간을 갖는다면, 만족도 곡선의 경향은 구조물로 사용하기에 충분한 안전성을 갖지 않는다고 결론을 내릴 수 있다(김장호 등, 2010b).

5. 증명 및 토론

압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도 실험결과를 이용하여 SF8과 MSF5의 성능검증이 이루어졌으며 실험결과들은 Table 7에 나타내었다.

ACI 214R-02의 방법으로 실험데이터를 바탕으로 계산된 70 MPa의 압축강도, 4.92 MPa의 쪼갬인장강도, 10.5 MPa의 휨강도를 만족할 확률은 각각 SF8의 경우 80%, 80.5%,

Table 7. Additional Tests for SF8 and MSF5

	Compressive Strength (MPa)		Splitting tensile strength (MPa)		Flexural strength (MPa)	
	SF5	MSF5	SF8	MSF5	SF8	MSF5
1	74.5	73.9	5.09	5.12	11.08	11.18
2	73.3	70.6	5.16	5.09	11.12	10.93
3	72.6	70.9	4.98	4.93	10.89	10.75
4	71.1	71.8	5.05	5.03	10.64	10.61
5	69.1	68.8	4.94	4.91	10.35	10.42
6	69.9	73	4.86	4.88	10.48	10.52
Mean	71.8	71.5	5.01	4.99	10.76	10.74
Standard deviation	2.08	1.82	0.108	0.101	0.32	0.28

79.2%이며 MSF5의 경우 79.5%, 76.7%, 79.8%였다. ACI 방법에 의한 만족확률값과 PBMD에 의한 값의 차이는 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도가 각각 SF8의 경우 2.8%, 0.4%, -2.0%이며 MSF5의 경우 4.7%, 3.4%, 1.5%였다. ACI의 압축강도 분포확률을 보면 최대범위가 95.45%이므로 확률 차이값 5% 허용범위 내에 있다.

결과값들이 근접하다는 것은 배합비가 요구성능조건을 만족시킨다는 것을 의미한다. 또한 단일변수 Bayesian방법을 이용한 PBMD과정을 통해 얻어진 분석적 결과는 PBMD를 콘크리트 배합설계에 사용하는 것이 충분히 신뢰할 수 있다는 것을 보여준다.

이 연구에서는 세 가지 요구 성능을 고려하여 HSC 배합설계에 PBMD 과정을 적용한 예제이다. 시공목적에 따라서 다른 종류의 HPC에 대한 검토가 필요할 수 있다. 초고층 건물 시공 시에는 탄성계수가 크고 높은 수송성과 작업성을 지니는 HPC가 필요하며(Zhou 등, 1995; Duval 등, 1998) 해안에 위치한 장경간의 교량에는 피로저항성, 내구성, 동결융해저항성 등이 큰 HPC가 요구된다(Poursae 등, 2008; Schneider 등, 1998). 하지만 이러한 다른 종류의 HPC도 이 논문에서 제시한 PBMD 방법으로 배합설계가 가능하다. PBMD 과정을 HSC에 적용시킴으로써 콘크리트의 여러 단계에 걸친 변수들의 관계에 의해 HSC의 여러 특성들과 재료특성 간의 관계가 명확해지며 재료특성에 대한 HSC의 민감도는 만족도 곡선에 의해 쉽게 평가될 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 Bayesian 확률법을 이용한 PBMD를 HSC 배합설계에 적용하기 위해 여러 가지 배합비에 대한 검토를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PBMD를 통해 요구성능(압축강도, 쪼갬인장강도, 휨강도)과 콘크리트 변수들과의 관계를 만족도 곡선의 형태로 나타냄으로써 요구 성능기준을 만족할 확률을 구하고 최적의 배합비를 찾는 것이 가능하다.
2. PBMD에서는 Goodness Value 개념을 도입함으로써 서로 다른 재료변수들을 공통된 하나의 변수로 통합하는 것이 가능해지며 Importance Factor개념을 도입함으로써 서로 다른 재료변수들이 콘크리트성능에 미치는 영향을 정량화하는 것이 가능해진다.
3. PBMD의 장점은 HSC의 성능과 관련하여 변수들 간에

상호연관성을 고려할 수 있다는 점과 배합설계를 쉽게 수정할 수 있다는 점이다.

4. PBMD과정에 의한 분석적 결과값과 ACI 214R-02에 의한 결과값 간의 차이는 5% 이내로서 허용오차범위 이내이다. 그러므로 제안된 PBMD방법은 실제범위의 재료변수값에 대해 HSC의 요구성능기준 만족확률을 예측할 수 있으며 설계에 사용될 수 있다.

참고문헌

- 김장호, 판덕형, 이근성, 이나현, 김성배(2010) Bayesian 통계법을 활용한 성능기반형 콘크리트 배합설계방법 개발. **콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제22권 제2호, pp. 171-177.
- 김장호, 판덕형, 오일선, 이근성(2010) 단일변수 Bayesian 방법을 이용한 성능중심형 배합설계법의 개발. **콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제22권 제4호, pp. 499-510.
- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (2006) *Probability concepts in engineering*, Wiley, Hoboken, N.J.
- Box, G.E.P. and Tiao G.C. (1992) *Bayesian inference in statistical analysis*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Holland, T.C. (2009) High Performance Concrete, *Concrete Products Magazine*.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J.H., and Naganuma, T. (2000) Statistical analysis of fragility curves, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1224-1231.
- Singhal, A. and Kiremidjian, A.S. (1996) Method for probabilistic evaluation of seismic structural Damage, *Journal of structural Engineering* Vol. 122, No. 12, pp. 1459-1467.
- Singhal, A. and Kiremidjian, A.S. (1998) Bayesian updating of fragilities with application to RC frames, *Journal of structural Engineering*, Vol. 124, No. 8, pp. 922-929.
- Spekkink, D. (2005) Performance based building, *Report of EC 5th Framework*.
- ACI Committee 214 (2002) Evaluation of strength test results of concrete(ACI 214-02), *American Concrete Institute*.
- ACI Committee 211 (2008) Guide for selecting proportions for high-strength concrete using portland cement and other cementitious materials (ACI 211.4R-08), *American Concrete Institute*.
- Method of test for slump of concrete (KS F 2402:2007), *Korean Agency for Technology and Standards*.
- Method of test for compressive strength of concrete (KS F 2405:2005), *Korean Agency for Technology and Standards*.
- Method of test for splitting tensile strength of concrete(KS F 2423:2006), *Korean Agency for Technology and Standards*.
- Method of test for flexural strength of concrete(KS F 2408:2000), *Korean Agency for Technology and Standards*.

(접수일: 2010.2.5/심사일: 2010.7.24/심사완료일: 2010.9.5)