

Mix Design Nomogram을 이용한 콘크리트 파괴에너지 예측

Prediction of Concrete Fracture Energy using Mix Design Nomogram

강 성 후*

Kang, Sung-Hoo

박 선 준**

Park, Sun-Joon

정 철 오***

Jeung, Chul-Oh

Abstract

The purpose of this study is to predict the fracture energy in accordance with the combination variables by applying the mix design nomogram in ready mixed concrete products. In terms of the experiment for drawing up Mix Design Nomogram, the beam is manufactured based on the mixture table described in the specifications of ready mixed concrete manufacturing company and a three-point bending test suggested in RILEM 50-FMC Committee is performed. As a result, this study makes sure the possibility to apply the mix design nomogram that is possible to predict the fracture energy in ready mixed concrete products and enables one to achieve the automation of the design of mixture for the production of ready mixed concrete products with the development of program using it.

요 지

본 연구에서는 레미콘 제품에 Mix Design Nomogram을 적용하여 배합변수에 따른 파괴에너지 예측 뿐만 아니라 파괴에너지에 따른 배합변수 예측을 가능하도록 하는데 그 목적이 있다. Mix Design Nomogram 작성을 위한 실험은 레미콘 생산회사의 실제 시방배합표를 사용하였으며, RILEM 50-FMC 위원회에서 제안한 3점 휨 실험을 실시하였다. 그 결과, 레미콘 제품에 파괴에너지가 예측 가능한 Mix Design Nomogram의 적용 가능성을 확인하였으며, 이를 이용한 프로그램 개발로 레미콘 배합설계 자동화를 위한 가능성을 확인하였다.

Keywords : Mix Design Nomogram, Fracture Energy, Three-Point Bending Test, Design Automation

핵심 용어 : 배합설계도, 파괴에너지, 3점 휨 실험, 설계자동화

* 정희원, 동신대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 동신대학교 토목공학과 조교수

*** 해외기술공사 사원, 공학석사

E-mail: parksj@dsu.ac.kr 061-330-3136

•본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트는 강재와는 달리 파괴양상이 취성적이며, 연화(Softening)부분이 있는 재료이기 때문에 구조물 부재 내에 미세균열, 또는 초기에 존재치 않더라도 사용중에 피로나 부식 등에 의하여 생성 발전된 균열이 존재할 가능성이 많아진다. 또한, 콘크리트에 인장응력이 발생하는 경우 미세균열이 충분히 발달한 후, 주균열이 발생하여 파괴에 이르므로 강도개념만으로는 파괴거동을 충분히 설명할 수 없으며, 강재와는 달리 소성변형에 의한 영구변형을 일으키기 보다는 균열에 의한 인장변형에 의하여 영구변형이 일어나기 때문에 소성이론이 아닌 에너지흡수능력을 고려한 파괴역학(Fracture Mechanics)의 개념을 적용하여야 한다. 또한 콘크리트 배합 설계 시 에서는 콘크리트의 압축강도가 거의 절대적인 기준으로 작용하고 있어, 에너지 흡수능력을 간과하고 압축강도를 기준으로 콘크리트 배합설계를 하게되면, 콘크리트 취성파괴 등의 구조적인 문제점을 동반하게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 배합설계시에 파괴에너지를 고려함으로써 고강도화 되어가는 콘크리트 제품의 구조적인 성능을 보다 정확히 평가할 수 있게 되고, 기존에는 고려하지 않았던 에너지 흡수능력을 배합설계 당시에 평가한 후 시공할 수 있다.

본 연구에서는 레미콘 제품생산을 위한 배합설계 시 파괴에너지 고려를 위하여 Mix Design Nomogram을 개발하고, 이를 이용하여 배합변수(물-시멘트 비, 골재-시멘트 비, 슬럼프, 시멘트량)에 따른 파괴에너지 예측과, 반대로 파괴에너지에 따른 배합변수를 예측하고자 한다. 또한, Mix Design Nomogram을 이용하여 파괴에너지를 고려할 수 있는 배합설계 프로그램을 개발하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 파괴에너지(Fracture Energy : G_F)

파괴에너지는 단위면적의 균열이 생겨나는데 필요한 에너지로 정의되며, 직접인장시험에 의해 구해지나 콘

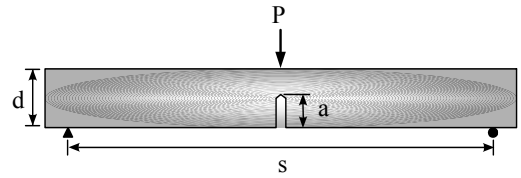


Fig. 1 3점휨 시험을 위한 시편

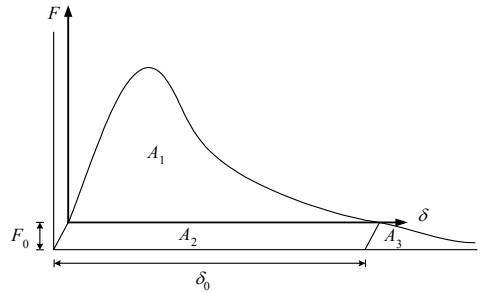


Fig. 2 하중-처짐곡선

크리트의 재료특성상 직접인장시험이 매우 어렵기 때문에 RILEM에서 제안한 3점휨 시험방법⁽¹¹⁾에 의하여 간접적으로 구하는 것이 일반적이다. Fig. 1과 같은 노치를 가진 시편이 파괴될 때까지 행해진 전체 일은 에너지 전체를 방출시키는데 사용된다.^{(8),(9)}

Fig. 2의 하중-처짐곡선으로부터 파괴에너지는 다음과 같이 계산된다.⁽¹¹⁾

$$G_F = \frac{A}{b(d-a)}$$

여기서, A : 하중 처짐곡선의 면적 ($A_1+A_2+A_3$)

a : 노치의 깊이

b : 보의 폭

d : 보의 깊이

A_1 : 외력에 의해 발생하는 에너지

A_2 : 외력이 0이 될 때 보의 자중에 의해 발생하는 에너지

A_3 : 보의 자중이 없을 경우 계속되는 처짐에 의해 발생하는 에너지

2.2 Mix Design Nomogram

콘크리트에 대한 Mix Design Nomogram은 경화

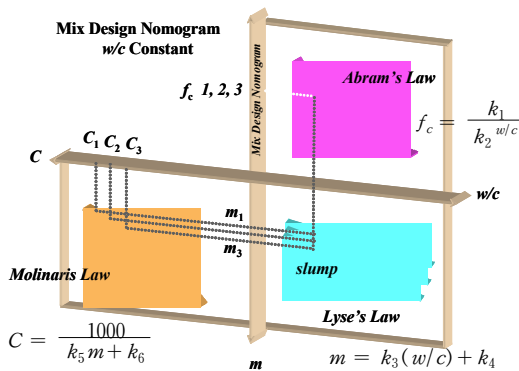


Fig. 3 Mix Design Nomogram의 개념

전과 경화후의 콘크리트 특성을 완벽하고 빠르게 예측할 수 있게 하며, 세 가지 기초적이며 고전적인 개념⁽¹⁰⁾의 배합설계에 기초로 한다.

3. Mix Design Nomogram을 위한 실험

3.1 개요

본 연구에서는 파괴에너지를 구하기 위해 RILEM 50-FMC 위원회에서 제안한 3점 휨 실험(Three

Table 1 Mix Design Nomogram의 기초개념

법칙	특성
Abram's 법칙	콘크리트의 압축강도를 물-시멘트 비(w/c)와 연관
Lyse's 법칙	물-시멘트 비(w/c)를 골재-시멘트 비(m)와 연관
Molinari's 법칙	시멘트량(C)를 골재-시멘트비(m)와 연관

여기서, f_c : 압축강도

k_1, k_2 : 물-시멘트 증량비 그리고 사용된 재료에 의한 상수

k_3, k_4 : 주어진 워커빌리티에 사용된 재료에 의존하는 상수

k_5, k_6 : 사용된 재료에 의존하는 상수

m : (잔골재/굵은골재)/시멘트의 증량비

C : 시멘트량 (kgf/cm^3)

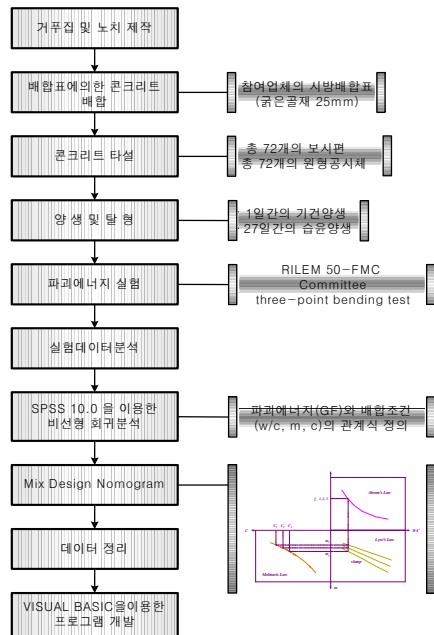


Fig. 4 실험 순서도

Point Bending Test)을 실시하였으며, 실험에서는 실제 생산현장의 적용가능성을 검토하기 위하여 OO레미콘 회사의 시방배합표와 공장생산 레미콘을 사용하였다.

3.2 실험재료 및 시편의 제작

실험에 사용된 시멘트와 골재(굵은골재, 잔골재)의 특성은 Table 2와 같다.

RILEM 50-FMC 위원회에서 제안한 3점 휨을 받는 보시편의 경우에는 굵은 골재의 치수에 따라 시편의 치수가 달라지는데 이 조건을 Table 3에 나타내었으며 본 실험에 사용된 치수의 보시편을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 2 시멘트 및 골재의 특성

종류	밀도 (g/cm^3)	조립률(F.M)	최대치수(mm)	비고
시멘트	3.16	-	-	보통포틀랜드 시멘트
잔골재	2.58	2.91	-	OO레미콘 회사 제공
굵은골재	2.61	6.82	25	

Table 3 굵은골재 치수에 따른 보시편의 치수

D_{max} (mm)	Depth ; d (mm)	Width ; b (mm)	Length ; L (mm)	Span ; l (mm)
1 to 16	100 ± 5	100 ± 5	840 ± 5	800 ± 5
16.1 to 32	200 ± 5	100 ± 5	$1,190 \pm 5$	$1,130 \pm 5$
32.1 to 48	300 ± 5	150 ± 5	$1,450 \pm 5$	$1,385 \pm 5$
48.1 to 64	400 ± 5	200 ± 5	$1,640 \pm 5$	$1,600 \pm 5$

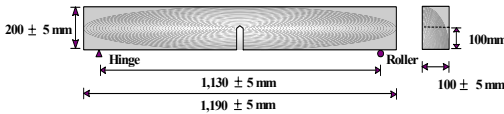


Fig. 5 3점 휨 시험을 위한 보시편

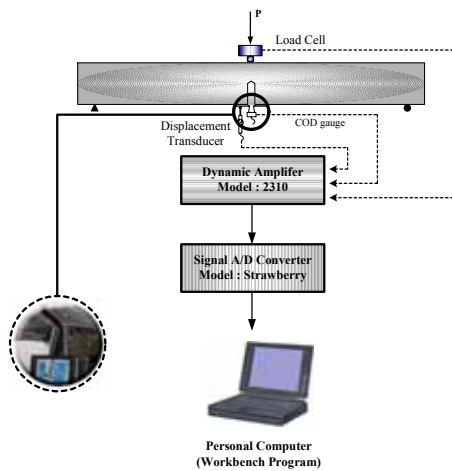


Fig. 6 파괴에너지 시스템 계통도

보의 노치는 초기깊이 0.5d로 일정하게 하였으며 거푸집에 가공된 철재노치 형틀을 부착하여 보 시편을 제작하였다. 시편의 제작은 각 배합마다 3개씩 제작하여 각각 구한 파괴에너지 값을 평균하였다. 파괴에너지 시험을 위한 각 시스템의 계통도는 Fig. 6에 나타내었다. 시편은 28일 동안 습윤양생 하였다

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

총 24종류의 설계기준강도(f_{ck})에 따른 슬럼프

Table 4 f_{ck} , 슬럼프에 따른 실험결과 값 (단위 : kgf/m)

$f_{ck}(kgf/cm^2)$		160	180	210	240	280	300	
슬럼프 cm	G_F kgf/m	8	10.42	10.70	11.20	11.69	12.72	13.18
		10	10.26	10.59	11.00	11.27	12.60	13.02
		12	10.21	10.63	11.05	11.46	12.43	12.88
		15	10.11	10.37	10.91	11.22	12.32	12.70
슬럼프 cm	f_{28} kgf/cm^2	8	188.44	213.34	239.25	272.72	312.12	331.43
		10	179.64	199.35	228.43	246.81	311.82	329.81
		12	178.25	207.12	230.11	261.44	299.63	320.11
		15	169.39	181.93	224.09	240.32	297.55	312.04

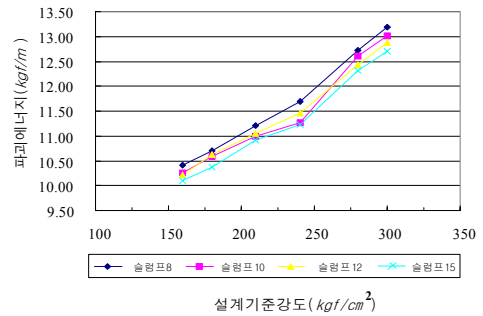


Fig. 7 설계기준강도, 슬럼프에 따른 파괴에너지 값

별 파괴에너지(G_F) 값과 28일 압축강도(f_{28}) 값은 Table 4에 나타내었다.

4.2 Mix Design Nomogram 작성

실험 결과 값과 OO레미콘 회사의 시방배합표를 바탕으로 파괴에너지와 물-시멘트 비의 관계, 물-시멘트 비와 골재-시멘트 비(m)의 관계, 골재-시멘트 비(m)와 시멘트(C)의 관계를 상용화된 통계해석 프로그램인 SPSS 10.0을 이용하여 비선형 회귀분석을 하였다.

4장에서 사용된 슬럼프 값들은 모두 “cm”의 단위를 갖는다.

4.2.1 파괴에너지와 물-시멘트 비의 관계

Abram's 법칙의 모델 식에 슬럼프 영향을 고려하여, 파괴에너지를 종속변수로 물-시멘트 비를 독립변수로 슬럼프별 관계식을 회귀분석 하였다(각각의 상수 값 들에 대한 정의는 Table 1 참고).

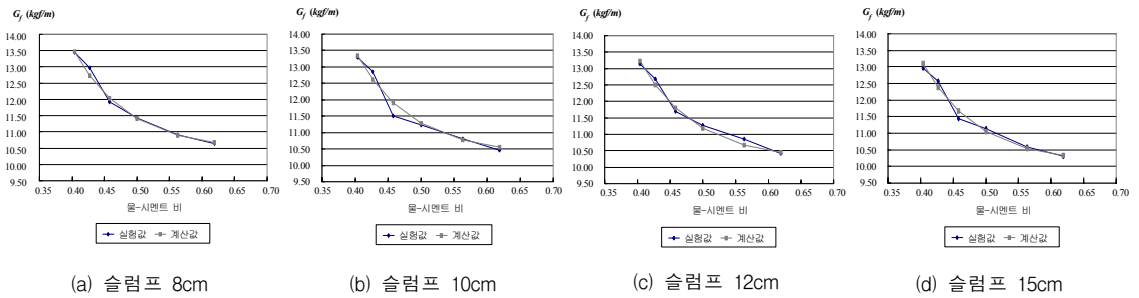


Fig. 8 슬럼프별 물-시멘트 비에 따른 파괴에너지 값

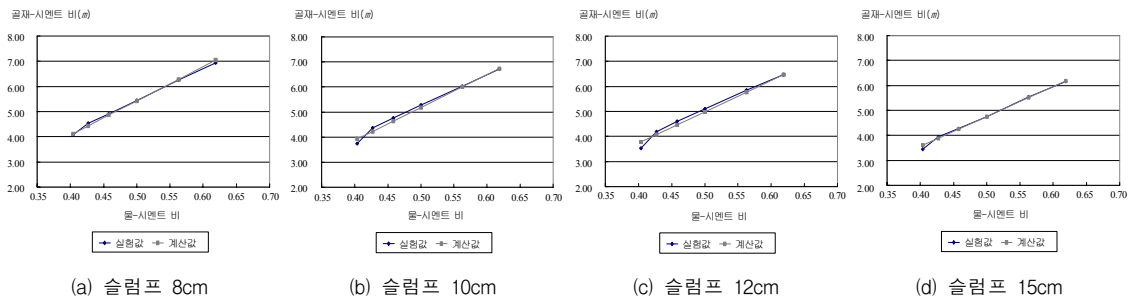


Fig. 9 슬럼프별 물-시멘트 비에 따른 골재-시멘트 비(m)

- 비선형 회귀분석을 위한 모델

$$G_F = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} + [A_1 - A_2 \ln(\text{슬럼프})]$$

- 비선형 회귀분석 방정식

$$\therefore G_F = \frac{377.09}{155560.34^{w/c}} + [11.65 - 0.58 \ln(\text{슬럼프})]$$

(단위 : kgf/m)

Fig. 8은 비선형 회귀분석 방정식에 의해 계산된 값과 실험값을 슬럼프 종류에 따라 비교한 것이다.

4.2.2 물-시멘트 비와 골재-시멘트 비(m)의 관계

Lyse's 법칙의 모델 식에 슬럼프 영향을 고려하여, 골재-시멘트 비(m)를 종속변수로 물-시멘트 비를 독립변수로 슬럼프별 방정식을 회귀분석 하였다.

- 비선형 회귀분석을 위한 모델

$$m = [k_3 \cdot (w/c) + k_4] \cdot (A_3 \cdot \text{슬럼프}^{A_1})$$

- 비선형 회귀분석 방정식

$$\therefore m = [8.27 \cdot (w/c) - 0.84] \cdot (2.55 \cdot \text{슬럼프}^{-0.21})$$

Fig. 9는 비선형 회귀분석 방정식에 의해 계산된 값과 실험값을 슬럼프 종류에 따라 비교한 것이다.

4.2.3 시멘트와 골재-시멘트 비(m)의 관계

Lyse's 법칙의 모델 식에 시멘트량(C)을 종속변수로 골재-시멘트 비(m)을 독립변수로 하여 비선형 회귀분석을 하였다.

- 비선형 회귀분석을 위한 모델 식

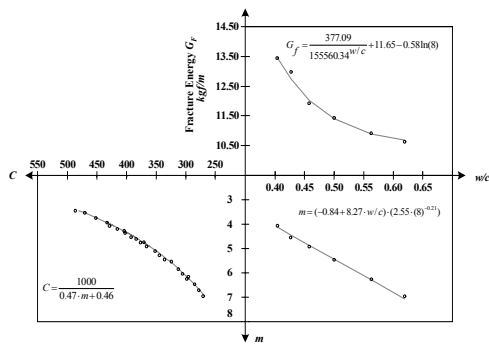
$$C = \frac{1000}{k_5 \cdot m + k_6}$$

- 비선형 회귀분석 방정식

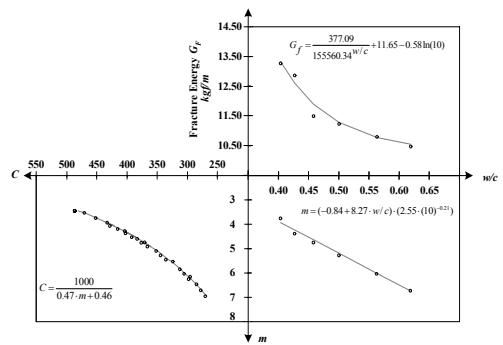
$$\therefore C = \frac{1000}{0.47 \cdot m + 0.46}$$

단위 : kgf

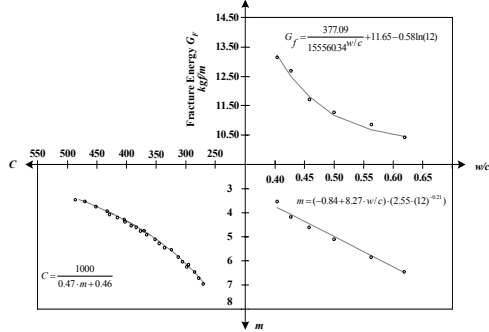
Fig. 11은 비선형 회귀분석 방정식에 의해 계산된 값과 실험값을 비교한 것이다. 이들 관계의 회귀분석한 결과 값들의 조합으로 Mix Design Nomogram을 작성하였다. Mix Design Nomogram은 슬럼프의 종류에 따라 Fig. 10에 나타내었다



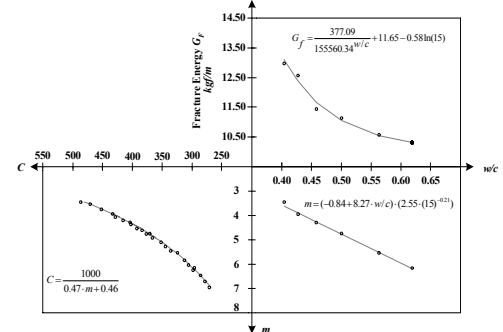
(a) 슬럼프 8cm



(b) 슬럼프 10cm



(c) 슬럼프 12cm



(d) 슬럼프 15cm

Fig. 10 슬럼프종류에 따른 Mix Design Nomogram

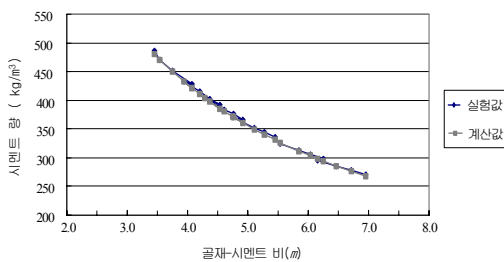


Fig. 11 시멘트량과 골재-시멘트 비의 관계

5. 프로그램의 개발

5.1 개요

배합조건에 의한 시편의 파괴에너지 실험을 통하여 Mix Design Nomogram을 작성하였으며, 비선형 회귀분석으로 얻은 방정식들 Microsoft TM 사의

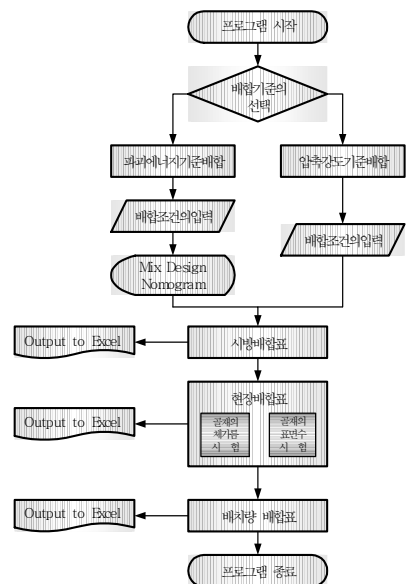


Fig. 12 프로그램 흐름도

Visual Basic 에 적용시켜 프로그램이 Windows 운영 체제 하에서 작동하도록 하였다.

배합설계에 사용되는 각 품의 데이터는 모듈로 선언 하여, 프로그램의 어느 부분에서라도 연동이 가능하도록 하였다. 본 연구의 프로그램 흐름도는 Fig. 12에 나타내었다.

5.2 프로그램의 구성

5.2.1 메인 폼

시작 폼의 메인화면으로 상단에 Coolbar 를 두어 어느 폼에서나 원하는 폼으로의 이동을 가능하게 하였다.

5.2.2 배합설계 기준의 선택 폼

본 프로그램은 배합설계기준 폼에 Option 버튼을

두어 두 가지 기준에 대해서 선택할 수 있도록 하였다. 먼저 파괴에너지를 기준으로한 배합설계 선택 시, 배합조건 입력에 따라 Mix Design Nomogram 을 load 한 다음 비선형 회귀분석한 방정식을 이용하여 시방배합표의 값을 예측하게 하였다.

압축강도를 기준으로한 배합설계 선택 시, OO 레미콘 회사의 시방배합표의 값들이 나타나는데, 이는 다음단계에서 입력한 배합조건에 따라 데이터화된 값들이 Load 되도록 하였다.

5.2.3 배합조건 입력 폼

배합설계 기준의 선택 폼에서 파괴에너지를 기준으로한 배합설계 선택 시 Fig. 15(a)와 같은 폼이 load 되며, 압축강도를 기준으로한 배합설계 선택 시 Fig. 15(b)와 같은 폼이 load 된다.



Fig. 13 메인 폼



(a) 파괴에너지 기준 선택시



Fig. 14 배합설계기준의 선택 폼



(b) 압축강도 기준 선택시
Fig. 15 배합조건 입력 폼

Table 5 종류에 따른 Combobox 선택 값

종 류	Combobox 선택 값
압축강도(kgf/cm^2)	160, 180, 210, 240, 280, 300
슬럼프 (cm)	8, 10, 12, 15

파괴에너지를 기준으로한 배합설계 선택시 배합조건
의 입력에서 굵은골재의 최대치수는 고정값인 25mm
이며, 파괴에너지 값은 Textbox 를 두어 원하는 값을
입력할 수 있도록 하였다.

압축강도를 기준으로한 배합설계 선택 시 압축강도
와 Slump 값의 입력에 Combobox 두어 종류별 선택
이 가능 하도록 하였다.

5.2.4 Mix Design Nomogram 폼

파괴에너지를 기준으로한 배합설계 선택 시 나타나
는 Mix Design Nomogram 폼으로, 배합조건 입력
폼의 Slump 선택 값에 의해 load 된다.

5.2.5 시방배합표 폼

배합표에 사용된 단위는 사용자의 편의를 위해 종래
의 한국산업규격인 KS 단위계를 사용하였으며, 단위의
국제적 통일을 위한 세계적 추세에 따라 국제단위계인
SI 단위계를 함께 표시하였다. 시방배합표의 저장은
"Excel" program으로, 왼쪽 하단의 " Output to Excel " 버튼
을 이용하였다.

5.2.6 현장배합표 폼

시방배합표의 각 재료량은 현장의 골재상태에 따라

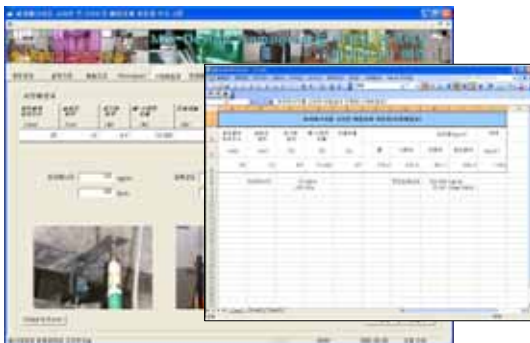


Fig. 16 시방배합표 폼

다르기 때문에 이를 고려한 현장배합표가 필요하다.
현장의 골재 상태를 보다 편리하게 적용하기 위하여
"골재의 체가름 시험", "골재의 표면수량 시험" 이라는
Command 버튼을 만들었다.

1) 골재의 체가름 시험

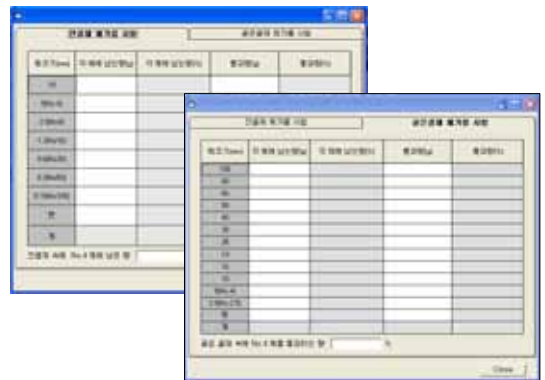
잔골재와 굵은골재 체가름 시험의 Sheet 구분은
SSTab 을 이용하였으며, 체 크기에 따른 남는량과 통
과량의 자동계산 방법은 Spread Sheet을 이용하여
결론적으로 얻고자하는 No.4 체에 남는 량과 통과 량
을 Textbox에 자동으로 나타내게 하였다.

2) 골재의 표면수량 시험

골재의 표면수량 시험 역시 골재의 체가름 시험과
동일한 방법으로 SSTab 을 이용하여 Sheet 의 구분

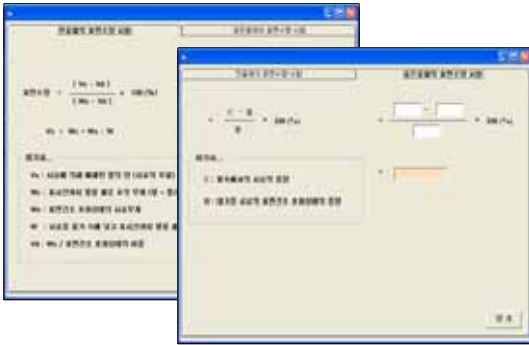


Fig. 17 현장배합표 폼



(a) 잔골재의 체가름 시험 (b) 굵은골재의 체가름 시험

Fig. 18 골재의 체가름 시험



(a) 잔골재의 표면수량 시험 (b) 굵은골재의 표면수량 시험
Fig. 19 골재의 표면수량 시험

을 두었다. 실험값의 입력은 Textbox 에 연산기능을 적용시켜 계산식과 동일한 위치에 배치함으로써 사용자의 이해를 쉽게 하였다.

5.2.7 배치량 배합표 폼

실험실 믹서의 용량에 따라 한 배치를 믹싱하기 위한 각 재료의 양을 계산하기 위한 폼으로, 배치량 입력조건 단위를 l와 m³로 구분하여 단위 적용의 효율성을 높였다.

6. 결 론

콘크리트 제품의 구조적인 성능개선을 위해 본 연구에서는 레미콘 생산회사의 공장제품 규격 중 주요 구조물에서 쓰이는 굵은골재 최대치수 25mm로 제한된 보시편을 제작하여, RILEM 50-FMC 위원회에서 제안한 3점 휨 시험을 실시하였다. 콘크리트 성능평가에 파괴에너지를 도입하기 위한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 압축강도만을 기준으로 한 배합설계에서 Mix Design Nomogram을 이용한 파괴에너지를 고려함으로써 콘크리트의 에너지 흡수능력을 배합설계 시 알 수 있도록 하였다.
- 2) 레미콘 공장생산 제품에 Mix Design Nomogram을 적용하여 배합변수(물-시멘트 비, 골재-시멘트 비, 슬럼프, 시멘트량)에 따른 파괴에너지 예측뿐만 아니라 파괴에너지에 따른 배합변수 예측을 가능하도록

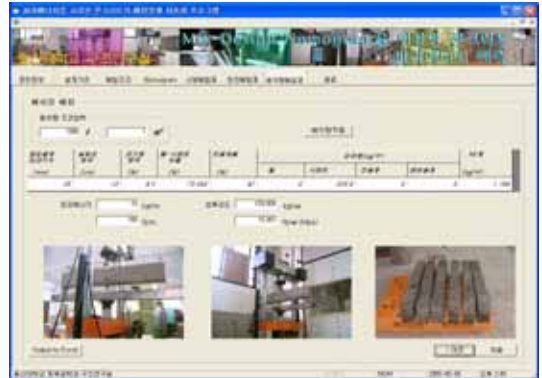


Fig. 20 배치량 배합 폼

하였으며, 콘크리트 제품의 품질향상을 위한 파괴에너지 적용 가능성을 제시하였다.

- 3) 배합설계 프로그램은 수집된 결과와 해석적 연구를 바탕으로 Mix Design Nomogram에 의해 회귀분석한 방정식들을 Microsoft TM 社의 Visual Basic 에 적용시켜 Windows 운영체제 하에서 작동하도록 하였으며, 레미콘 공장제품 생산을 위한 배합설계 자동화를 가능하도록 하였다.

본 연구는 굵은골재 최대치수 25mm와 슬럼프 범위의 제한으로 특정규격에 국한된 실험이나, 레미콘 회사의 시방배합표의 사용으로 공장생산 제품에 파괴에너지가 예측 가능한 Mix Design Nomogram의 적용 가능성을 확인하였다. 따라서 실용성 향상을 위해서 다양한 실험변수가 고려된 실험 및 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성수, “토목재료학”, 구미서관, 1997.
2. 강성후, 김우, “동적하중을 받는 콘크리트의 균열성장”, 대한토목학회 논문집 제8권 2호, 1988.
3. 강성후, 김우, 박선준, “동적하중을 받는 콘크리트 보의 파괴거동”, 한국콘크리트학회 논문집, 제8권 1호, 1996.
4. 류재구, “한글 Visual Basic Using Bible”, 영진출판사, 1999.
5. 오병환, “콘크리트 파괴역학의 이론과 실제 응용”, 대한 콘크리트학회지, 제5권 1호, 1993.
6. 한국콘크리트학회, “최신콘크리트 공학”, 기문당, 1993.

-
7. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서 해설”, 한국콘크리트학회, 2000.
 8. Hillerborg, A., “Analysis of One Single Crack Fracture Mechanics of Concrete” ed. by Wittmann, F. H., Elsevier, 1983, pp.223-249.
 9. Hillerborg, A., “Concrete Fracture Energy Test Performed by 9 Laboratories according to a Draft RILEM Recommendation”, Report TVBM-3015, Lund, Sweden, 1983.
 10. Monteiro, P. J. M., Kang, S. H., et al, “Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy”, Materials and Structures, Vol. 26, No.162, 1993, pp.443-452.
 11. RILEM 50-FMC Committee, “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams”, Draft Recommendation. *ibid*, Vol 18, No.106, 1985, pp.285-290.

(접수일자 : 2005년 9월 16일)