화음탐색법을 이용한 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 설계

Optimal Mix Proportion of Steel Fiber and Hybrid Fiber Reinforced Concrete Using Harmony Search

이 치 훈* 이 주 하** 윤 영 수***
Lee, Chi Hoon Lee, Joo Ha Yoon, Young Soo

ABSTRACT

Today, the guide line of the SFRC mix design and the construction was not embodied, and the convenience of the practical application on the spot is not good. In this research, hence, the program which is optimized to result the mix proportion by the flexural strength and toughness, was developed to apply with ease SFRC on the practical spot. This program would minimize the number of trial mixes and achieve an economical and appropriate mixture. In addition, the theoretical background on which the program is based, will be the basis of the embodied method to mixing SFRC. New algorithm, in this research, was used to develop the mix proportioning program of SFRC. The new algorithm is the Harmony Search which is the heuristic method mimicking the improvisation of music players. And, beside to single fiber reinforced concrete, it was developed the program about the hybrid fiber reinforced concrete that two kinds of steel fibers, which have the different geometry, was reinforced. This will be able to keep the world trend to study, hence, offers the basis of the next generation research.

1. 서론

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트와 혼입한 강섬유의 형상이 다른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 배합자료를 수집 분석하여, 이에 대한 최적 배합 프로그램을 개발하여, 현장에서의 시험 배합횟수를 줄이며, 현장에서 사용하기에 편리하도록 하고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 최적 배합프로그램을 개발함에 있어서 아직 구조 분야에서는 적용된 적이 없는 새로운 최적화 기법인 화음탐색법(Harmony Search, HS)를 적용하였으며, 이에 대한 검증을 실제 실험을 통해 수행함으로써 프로그램의 정밀도를 높일 수 있도록 하였다.

2. 화음탐색법(HS, Harmony Search)

음악에서 여러 가지 악기가 소리를 내 어떠한 화음을 만들 때, 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 된다. 이렇게 만들어지는 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있을 수도 있고, 불협화음을 나타

* 정회원, 금호엔지니어링부설 기술연구소 연구원
** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
*** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

내는 경우도 있을 것이다. 그러나 연습과정을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 화음으로서 적합한 화음(local optimum)이 있을 것이며 많은 연습을 통해 구성할 수 있을 것이다. HS는 이러한 연습과정(반복계산)을 통해 찾아지는 최적 화음이, 사용자가 찾고자 하는 최적해라 보는 기법이다.

· HM (Harmony Memory) - HM이란 이제까지 경험했던 화음(harmony) 중에서 제일 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 되는 것이다. HS에서는 탐색하고자 하는 각 매개변수를 악기라 하고 , 매개변수의 값을 악기의 음조라 하면 HS에서는 가장 잘 어울리는 악기의 소리조합을 탐색하는 것이다. 이때 화음의 어울림 정도는 GA에서와 같이 적합도함수(목적함수)로 판단하게 된다.

· HMCR (Harmony Memory Considering Rate) - HMCR이란 새로운 화음을 만들어 냄에 있어서 HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. HM중 새로운 화음을 추가할 때, 발생시킨 난수가 HMCR값보다 크면, 전체 정의 영역에서 무작위로 새로운 화음을 발생시키고, HMCR보다 작으면 기존 HM에 있는 화음을 바탕으로 새로운 화음을 구성하게 된다.

· PAR(Pitch Adjusting Rate) - PAR은 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같이 우수한 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자이다.

3. Toughness Performance Level

본 연구에서는 현장에서의 적용 편의성을 높이기 위해서, Toughness Performance Level의 개념을 적용하여 배합프로그램을 개발하였다. 이 개념은 지정된 변위, 즉 L/150, L/450에서의 잔류강도가 초기 균열이 일어난 시점에 비해서 얼마나 남아있는지에 대한 비교를 통해 인성의 등급을 매긴 것으로 이 개념을 그래프를 통해서 그림 1로 나타내었다. 이 개념을 배합 프로그램에 반영함으로써 정해진 범위만큼의 인성을 가지는 배합을 찾아낼 수 있도록 하였다.

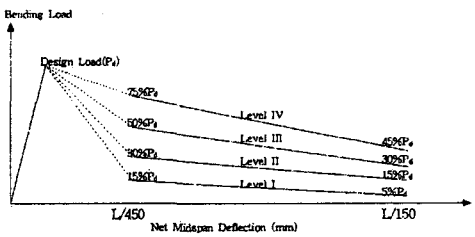

그림 1 휨인성 지수의 정의

표 1 목적함수

Independent Variable	Fitness Function
Flexural Toughness	$FT(MPa) = 0.478 - 0.174(W/C) - 0.0125(S/a) + 0.0228(l/d) + 2.235V_f$
Flexural Stress	$f_f(kg/cm^2) = -281.379 - 0.0478(W/C) + 2.25(S/a) + 0.0916W + 0.130C + 0.000281S + 0.147G + 0.228(l/d) + 6.311V_f$
Tensile Stress	$f_{tensile}(kg/cm^2) = -66.775 + 0.546(W/C) + 1.708(S/a) - 0.213W + 0.177C - 0.045S + 0.0424G + 0.0733(l/d) + 15.499V_f$

4. 배합 프로그램

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트의 휨 인성에 대해 약 70개, 휨 응력과 인장 응력에 대한 각 50개의 배합 자료를 수집하여, 범용 통계프로그램인 SPSS V10.0을 통하여 각 경우에 대한 목적함수를 표 1와 같이 도출하였다.

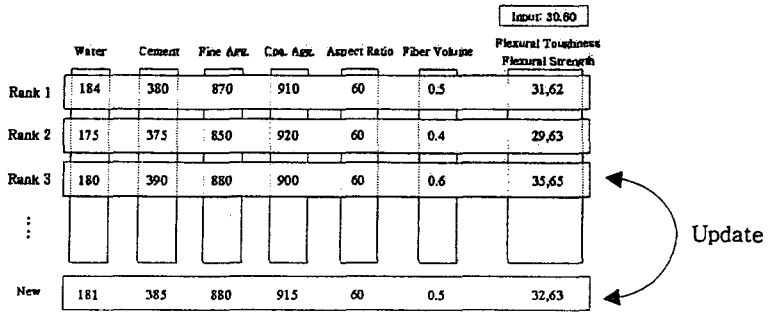

그림 2 화음탐색법을 통한 최적비 도출과정

통계분석을 통해 얻은 목적함수를 이용하여, 물(W), 시멘트(C), 잔골재(F), 굵은골재(C), 강섬유의 아스펙트비(ℓ/d), 강성유의 혼입율(V_f)을 독립변수로 하고, 휨인성, 휨응력, 그리고 인장응력을 종속변수로하여, Harmony Memory를 초기화하여, 반복된 최적화 과정을 통해 최적의 배합을 얻을 수 있도록 Fortran과 Visual Basic V6.0을 사용하여 최적배합 프로그램을 개발하였다. 그림 2에서는 본 연구에서 개발한 프로그램에서 화음탐색법을 어떻게 적용하였는가에 대해서 보여주고 있다. 휨인성이 30, 휨강도가 60인 값이 입력되었다고 예를 들어 설명하고 있는 것인데, 독립변수가 초기화되어 Harmony Memory가 그림 2와 같이 생성되었다고 가정하고, 최적화가 시작되어 새로운 조합이 생겨났다고 할 때, 새로이 생겨난 조합은 기존의 Rank 3의 값보다 입력값에 보다 더 가깝기 때문에, Harmony Memory내에 기존의 값을 제외시키고 새로이 조합된 값을 저장시킨다. 이러한 반복 과정을 주어지 반복횟수만큼 혹은 원하는 최적화의 정도만큼 수행한 후, 그 때까지의 결과를 보여줌으로써 최적 배합을 얻을 수 있도록 하였다.

5. 검증실험 및 실험결과

본 연구에서 실험한 각 시험체 별 배합은 표 2와 같다. 강섬유는 보강했을 때, 휨성능의 향상이 가장 우수할 것이라 알려져 있는 Both ended hooked를 사용하였으며, 각 시편의 슬럼프를 11±2cm의 범위로 맞출 수 있도록 혼화제를 사용하였고, 휨 시험은 KS F 2566, KS F 2408을 따랐으며, 시편의 크기는 150×150×550mm로, 실험은 4점 재하 휨시험을 하였다. 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 뿐 아니라, 길이가 다른 2종의 강섬유를 동시에 혼입하여 실험함으로써, 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능에 대한 증가치를 얻어서 이를 배합 프로그램 상에 반영하고자 하였다. 각 시험체 별 휨강도에 대한 결과는 표 3과 같으며, 휨인성에 대한 결과는 표 4과 같다. 표 3에서는 실험결과와 프로그램 결과 값과 비교했을 때 그 오차가 10%미만으로 비교적 양호한 값을 얻었음을 알 수 있으며, 표 4에서는 휨인성에 대해서는 프로그램에서 제시하는 휨 인성의 범위(Toughness Level)에 실험결과 값이 모두 만족함을 알 수 있다.

표 2 실험체 제작을 위한 각 시편의 배합비

TL	Specimen Series	Water (kg/m³)	Cement (kg/m³)	Fine Agg. (kg/m³)	Coarse Agg. (kg/m³)	Fiber content (%)	Aspect ratio
1	SFT1-30	185	350	692	974	0.21	60
2	SFT2-30	181	356	724	932	0.51	60
3	SFT3-60	179	401	778	856	0.77	75
4	SFT4-60	193	400	949	658	1.44	75
2	HFT2-36	181	356	724	932	0.26/ 0.26	60/75
3	HFT3-36	179	401	778	856	0.39/ 0.39	60/75
4	HFT4-36	193	400	949	658	0.72/ 0.72	60/75

표 3 SFT시편의 휨강도 실험결과

Specimen	Input Strength (kg/㎠)	Test Strength (kg/㎠)	Error(%)
SFT1	55	56.6	2.4
SFT2	60	64.5	7.5
SFT3	65	64.9	0.2
SFT4	70	71.3	1.9

표 4 SFT시편의 휨인성 실험결과

Specimen	Toughness Level	Range		Test	Comment
		from	to		
SFT1	1	19.2	26.1	23.1	O.K.
SFT2	2	28.5	39.3	32.1	O.K.
SFT3	3	42.3	55.5	52.8	O.K.
SFT4	4	59.4	-	73.8	O.K.

표 5 HFT시편의 휨강도 실험결과

TL	2	3	4
SFT	64.5	64.9	71.3
HFT	64.4	72.5	75.8
Increase (%)	0	11.7	6.3

표 6 HFT시편의 휨인성 실험 결과

TL	2	3	4
SFT	32.1	52.8	73.8
HFT	51.9	81.9	86.4
Increase (%)	64.8	55.1	17.1

본 실험을 통하여 얻은 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능에 대한 증가치는, 기존의 국내 타 연구의 자료와 함께 분석한 후, 설계상의 안전율 개념을 고려하고, 배합프로그램 상에 증가계수의 개념으로 도입하여 하이브리드 섬유 보강 콘크리트의 최적배합설계 프로그램을 개발하였다. 프로그램 상에서 고려한 증가계수는 강섬유의 혼입율 별로 달리하여, 그림 3과 같이 적용하였다.

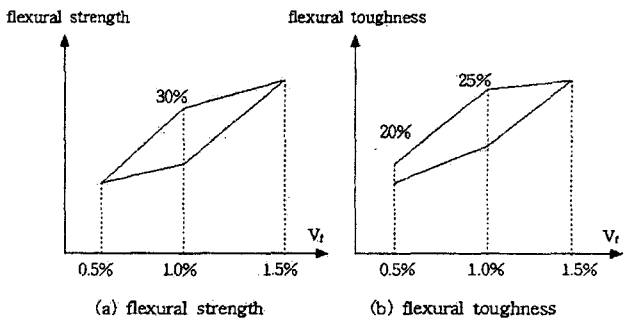

그림 3 HFRC의 휨성능에 대한 증가계수의 가정

6. 결론 및 고찰

1) 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합설계 프로그램을 개발함으로써 현장에서의 시험 배합 횟수를 줄이고, 현장에서 사용보다 편리하도록 하고자 하였다.
2) 본 연구를 통해 개발된 배합 프로그램은 계속된 시험데이터의 축적으로 프로그램의 신뢰도를 점차 높일 수 있을 것으로 기대된다.
3) 아직 세계적으로도 연구의 초기 단계에 있는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 프로그램 개발을 시도함으로써, 이 분야의 향후 국내 연구의 발판을 마련하였다는 점에서 고무적이라 생각된다.

참고문헌

1. Jong Woo Geem and Joong Hoon Kim, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", *Simulation* 76-2, February, 2001, pp.60-68.
2. Lianrong Chen, Sidney Mindess, and Dudley R. Morgan, "Specimen Geometry and Toughness of Steel-Fiber-Reinforced Concrete", ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 4, November 1994, pp.529~541.
3. Kim, Nam Wook, et al, "Flexural Fracture Toughness Charateristics of Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete", KSCE, 2003, Vol. 23, No. 4A, pp619~625.