



화음탐색법을 이용한 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 설계

이치훈¹⁾·이주하²⁾·윤영수^{2)*}

¹⁾동호(주) 건설기술연구소 ²⁾고려대학교 사회환경시스템공학과

(2005년 3월 14일 원고접수, 2006년 1월 12일 심사완료)

Optimized Mix Proportioning of Steel and Hybrid Reinforced Concrete Using Harmony Search Algorithm

Chi-Hoon Lee¹⁾, Joo-Ha Lee²⁾, and Young-Soo Yoon^{2)*}

¹⁾Institute of Construction Tech., DongHo Co., Ltd., Anyang 431-060, Korea

²⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received March 14, 2005, Accepted January 12, 2006)

ABSTRACT

The guide line of the SFRC mix design was not established, and the convenience of the practical application on the spot is not so good. In this paper, hence, the program which is optimized to result the mix proportion by the flexural strength and toughness, was developed to apply to SFRC on the practical spot. This program could minimize the number of trial mixes and get 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. Additionally, new algorithm, in this paper, 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, Musical performances seek a best state determined by aesthetic estimation, as the optimization algorithms seek a best state determined by objected function value. And, it was developed the program about single fiber reinforced concrete, beside to 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 research about hybrid fiber reinforced concrete.

Keywords : *harmony search, steel fiber, hybrid fiber, mix proportioning program, optimization*

1. 서 론

강섬유보강 콘크리트는 70년대 이전부터 많은 연구의 대상이 되어 왔으며, 그 결과 휨에 대해서 그 성능이 일반 콘크리트에 비해 월등히 우수한 것으로 알려져 있으나, 아직까지 국내에서는 이에 대한 명확한 배합설계 지침이 확립되어 있지 않은 상황이다. 또한, 강섬유를 2종 이상 동시에 혼입하여 사용하는 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대해서는 최근에 들어서야 그 연구가 시작되었으며, 이에 대해서도 배합에 대한 구체적인 지침이 확립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트와 강섬유의 형상이 각기 다른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 배합자료 수집·분석을 통한 최적 배합 프로그램 개발에 목적을 두고 있다. 이는 현장 시험 배합횟수의 감소 및 배합

설계의 편의성 향상 등에 도움이 될 것으로 기대된다.

최적 배합 프로그램의 개발에 있어서 주목할 점은 아직 구조 분야에서는 적용된 사례가 없는 새로운 최적화 기법인 화음탐색법(Harmony Search, HS)을 적용하였다는 것이다. 또한 본 연구에서는 검증 실험을 수행하여 개발 프로그램의 적합성을 검토하고, 정밀도를 향상시켰다.

2. 화음탐색법(Harmony Search, HS)

화음탐색법(이후 HS)은 2000년에 처음 제안되었으며 기존의 최적화 기법에 비해 최적해 탐색에 있어 우수한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 국내를 중심으로 연구가 진행 중인 최적화 기법이다. HS는 김종우¹⁾에 의해 처음 제안된 발전적 탐색법이다. HS는 음악에서 최적화음을 찾아내기 위해 시행착오를 거치는 것에 착안한 최적화 기법으로, 이후 MHS(Modified Harmony Search)와 ReHS(Revised Harmony Search)의 형태로 발전하게 되었다.

* Corresponding author

E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

2.1 화음탐색법의 개념(original HS)

대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어졌지만, HS는 화음이라는 인공적인 현상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘이다. 여러 가지 악기가 소리를 내어 어떠한 화음을 만들 때, 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 된다. 이렇게 만들어지는 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있을 수도 있고, 불협화음을 나타내는 경우도 있을 것이다. 작곡가는 지속적인 시행착오와 연습 과정을 통해 불협화음을 점차 없애고 최적의 화음을 찾아내게 된다. HS는 이러한 연습 과정(반복계산)을 통해 최적 화음, 즉 최적해를 찾아내고자하는 기법이다.

HS는 기존의 발견적 탐색법인 SA(Simulated Annealing)나 TS(Tabu Search)와 달리 군탐색을 한다. 즉, 각 악기(각 변수)가 어떤 음(어떤 값)을 가짐에 있어서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 되고 이는 바로 이전의 화음만이 영향을 미치는 것이 아니라 과거로부터 축적된 상당량의 화음집합이 새로이 만들어 내는 화음에 영향을 미치는 것이기 때문이다. 따라서 군탐색이라 볼 수 있으며 광대한 영역을 탐색하는 것이라고 볼 수 있다. 그러면서도 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서 TS의 특징을 가지는 것이며, 또한 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서 SA의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다.

같은 군탐색의 특징을 가지고 있는 GA(Genetic Algorithm)와 비교해보면, GA의 경우 새로운 해를 생성시 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 주며 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 된다. 그러나 HS는 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 얻게 되는 것이다.

HS에서도 다른 기법과 같이 몇 가지의 인자들을 사용하는데 이러한 인자로는 HM(harmony memory), HMCR(harmony memory considering rate), PAR(pitch adjusting rate) 등이 있다.

2.1.1 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. HM의 구조는 Fig. 1과 같다.

그림에서와 같이 saxophone, fiddle, keyboard의 세 개 악기가 내는 소리로 만들 수 있는 화음은 여러 가지가 있다. 그러나 화성악(和聲樂)적 입장에서 볼 때에는 그림의 세 화음 중에는 장3도로 이루어진 (C, E, G)이 (C, F, A)나 (B, D, G)보다는 잘 어울리는 화음이다. 또한 (C, F, A)가 (B, D, G)보다는 좋은 화음이 되며, HM안에서 순차적

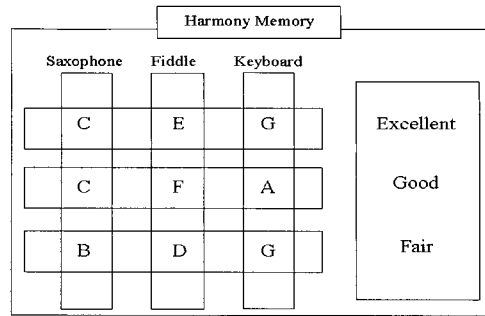


Fig.1 Structure of harmony memory

으로 배열된다. 이렇듯 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 적합도 함수(목적 함수)로 판단하게 된다.

2.1.2 HMCR(harmony memory considering rate)

HMCR이란 새로운 화음을 만들어 냄에 있어서 HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 아니면 전체 정의 영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 하는 확률이다. HM 중 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. Fig.1에서는 (B, D, G)가 가장 잘 어울리지 않는 화음으로 최하위에 랭크되어 있다. HMCR을 적용하여 새로운 화음 추가 시에 fiddle의 자리에 올 수 있는 소리는 특정 확률로 다음의 2가지 중에서 선택을 하게 된다. 발생한 난수가 MMCR보다 크면, 전체 정의영역에서 새로운 화음을 구성할 때에는 가능한 모든 소리인 (C, D, E, F, G, A, B)에서 새로운 값을 찾고, 그렇지 않다면 기존 HM안에서 fiddle의 음으로 존재하는 (E, F, D)안에서 새로운 화음의 fiddle음을 선택하게 된다.

HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 더 나은 곳으로 찾아갈 수 있는 가능성을 부여하는 것으로 마치 GA의 돌연변이율과 유사한 기능이라고 할 수 있다.

2.1.3 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. HS는 이와 같은 HM, HMCR, PAR을 중심으로 작동하며, 기본흐름은 Fig. 2와 같다.

2.2 MHS(Modified Harmony Search)

MHS는 HS의 PAR변화가 기본이 되며 HS의 기본흐름은

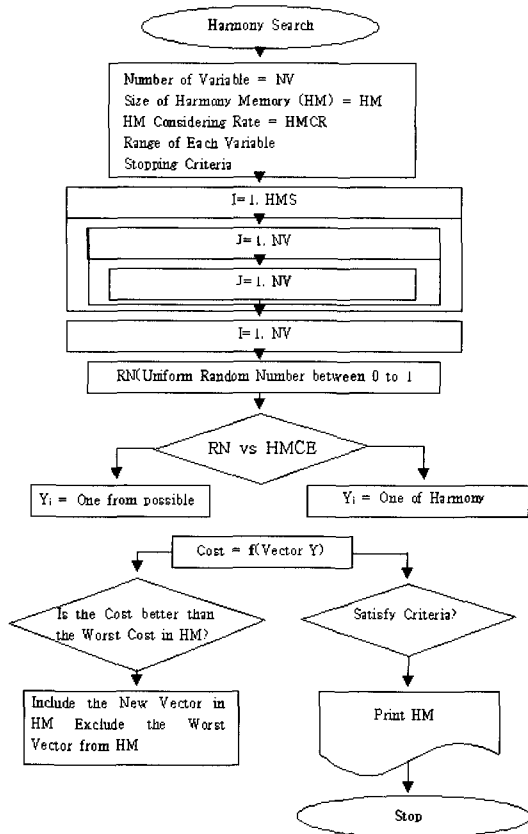


Fig. 2 Flowchart of harmony search

유지하되 주요 인자인 HM, HMCR, PAR의 적용에 변화를 준 형태로, 최적해를 찾기 위한 효율을 극대화하기 위해, 중복되는 조합을 제거시키도록 한 것이다.

중복되는 조합을 제거하는 방법은 다음과 같다. 반복계산(iteration)과정이 진행됨에 따라, 목적함수 값이 우수한 화음은 남게 되고 그렇지 못한 화음들은 점차 사라지게 되며, 많은 반복계산 후에는 각 화음의 매개변수 값들과 목적함수 값이 모두 일치하는 현상(effect of harmony duplication, EHD)이 발생할 수 있게 된다. 이와 같은 EHD 현상이 발생하였을 때, 단순한 문제의 경우는 이 값이 최적해로 판단될 수 있으나, 복잡한 문제의 경우 이런 결과는 국지해일 확률도 높다. 또한, 매개변수 값이 일치하는 화음들이 많아질 경우, 이는 계산시간만을 소모할 뿐 최적해로 수렴하는 것이 더 어려워지는 결과를 발생시킨다. 따라서, MHS는 HM에 변화를 준 것으로 발생된 화음 중 매개변수가 서로 일치하는 경우가 발생하면 하나만을 HM에 남겨놓고 다른 하나는 새롭게 화음을 구성하여 대치(elimination of overlapping harmony, EOH)시킨다.

2.3 ReHS(Revised Harmony Search)

일반적으로 HS에서는 HMCR은 0.95, PAR은 0.10을 적용하는 것이 보다 빨리 최적해를 탐색할 수 있는 것으로

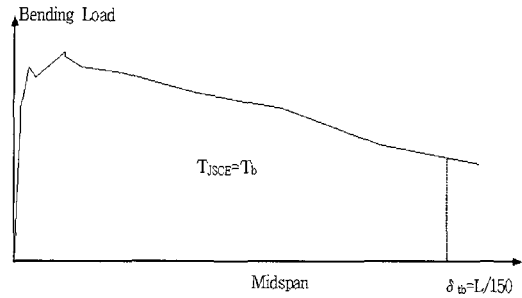


Fig. 3 Definition of JSCE toughness factor

연구되었다¹⁾. 그러나 HMCR과 PAR값들을 하나로 고정하는 것보다는 변화를 주는 것이 최적해를 더 빨리 찾아주는 것으로 나타났고, ReHS에서는 HMCR과 PAR값 자체에 변화를 준다. 탐색초기에는 최적해에 가까운 값을 찾아가는 속도를 높이기 위해 낮은 HMCR값과 PAR값을 적용하며 탐색이 진행함에 따라 국지해에서 빠져 나오고 빠르게 최적해에 접근하기 위해 HMCR은 감소시키고 PAR은 증가시킨다. 그러나 너무 낮은 HMCR과 너무 높은 PAR은 계산 시간을 증가시킬 수 있는 위험이 있다.

프로그램의 반복 실행을 통해 나타난, HMCR과 PAR의 값으로는 초기 HMCR은 0.95, 초기 PAR은 0.05, 최대 한계값으로는 HMCR은 0.70, PAR은 0.20정도가 적합한 것으로 나타났다.

3. 강섬유보강 콘크리트의 휨인성과 휨강도

3.1 휨 인성

강섬유보강 콘크리트의 휨인성을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 그 중에서 가장 널리 사용되고 있는 JSCE SF-4의 규정과 ASTM C1018의 규정에 대해서 언급하도록 하겠다.

3.1.1 JSCE SF-4

이 방법은 실험을 통해서 얻을 수 있는 하중-변위의 관계 곡선 그래프에서 일정 변위, 즉 L/150까지의 그래프 면적(T_b)을 구하여, 이를 식 (1)을 대입하여 휨인성을 평가하는 방법이다²⁾.

$$F_{JSCE} = \sigma_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{B \cdot H^2} \quad (1)$$

3.1.2 ASTM C1018

ASTM에서는 첫 번째 균열이 발생하는 시점까지의 면적과 첫 번째 균열이 발생하는 시점의 변위의 일정배수가 되는 변위까지의 면적의 비를 통해서 인성을 평가하는 방법이다³⁾.

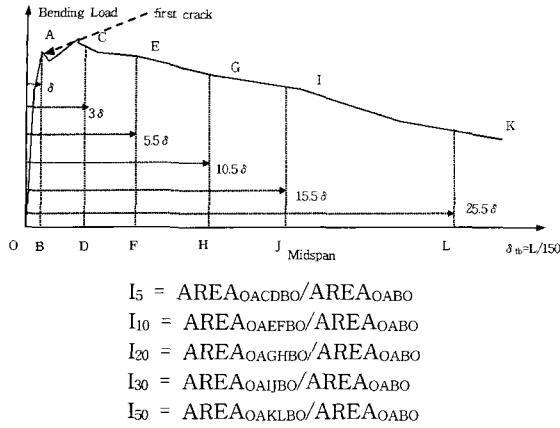


Fig. 4 Definition of ASTM toughness indices

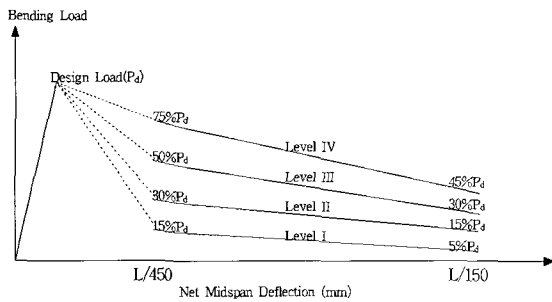


Fig. 5 Definition of flexural performance levels

첫 번째 균열이 발생하는 변위에 큰 영향을 받으므로, JSCE SF-4의 방법보다는 상대적인 접근 방법이라고 할 수 있다.

3.1.3 JSCE와 ASTM의 인성평가법 비교

여러 연구 결과에 의하면, JSCE의 인성평가 방법이 ASTM과 비교했을 때 상대적으로 시험체 시편의 크기에 대한 영향을 덜 받기 때문에, 여러 배합 자료를 수집해서 배합 프로그램에 반영해야 하는 본 연구의 성격상 JSCE의 인성평가 방법이 보다 유리하다. 또한, ASTM의 인성평가 방법은 첫 번째 균열이 발생하는 시점에서의 변위에 영향을 많이 받기 때문에 하중-변위 그래프 상에서 첫 번째 균열이 발생하는 위치를 인위적으로 판별해야 하는 점에서 인위적인 오차의 위험이 있다.

Table 1 Toughness performance levels

Toughness performance level	Residual strengths at deflections (by % of design flexural strength)	
	1/450 Span	1/150 Span
0	No fiber reinforcement(%)	
I	15	5
II	30	15
III	50	30
IV	75	45

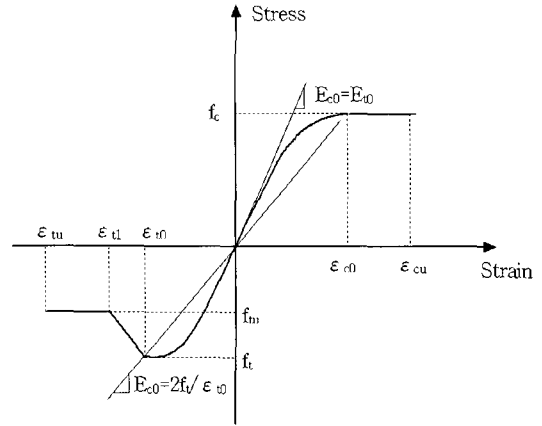


Fig. 6 Stress-strain relationship of SFRC

따라서 본 연구에서는 에너지 개념의 설계가 중시되는 현 설계추세와도 부합되는 JSCE의 휨인성 측정 방법을 채택하였다^{4,5)}.

3.1.4 Toughness Performance Level

본 연구에서는 현장에서의 적용 편의성을 높이기 위해서, Toughness Performance Level이라는 개념을 적용하여 프로그램을 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 그 등급은 Table 1과 같이 정의되며, 이 개념을 그래프를 통해서 Fig. 5로 나타내었다.

이 개념을 배합 프로그램에 반영함으로써 정해진 범위만큼의 인성을 가지는 배합을 찾아낼 수 있도록 하였다.

3.2 휨 강도

강섬유보강 콘크리트의 응력-변형률의 관계 그래프는 Fig. 6과 같다. 일반 콘크리트와 비교하였을 때, 압축측에는 큰 변화가 없으나, 인장측에서는 균열 발생 후에도 잔류 응력이 남아 있는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 인장 성능이 향상된 것을 알 수 있다^{6,7)}.

강섬유보강 콘크리트의 이러한 역학적 특성과 다음의 3가지 가정을 통해, 식 (2)와 같이 강섬유보강 콘크리트의 휨응력을 인장응력에 대한 식으로 유도할 수 있다.

- 1) 평단면은 휨변형후에도 평단면을 유지한다.
- 2) 인장측에서 초기 접선계수는 인장측에서의 할선계수의 2배이다.
- 3) 압축부의 응력계산은 압축부의 거동이 선형이라 가정하여 계산한다.

$$M_{ult} = \frac{\int_{\epsilon_c}^0 \sigma_c \epsilon d\epsilon + \int_{\epsilon_m}^0 \sigma_t \epsilon d\epsilon}{\phi_{ult}^2}$$

$$= \frac{\frac{2}{3} \sigma^{3/2} + \alpha + \beta - \frac{1}{4}}{(\lambda + \sqrt{\alpha})^2} f_t H^2$$

$$f_{ult} = 6 \frac{\frac{2}{3} \alpha^{3/2} + \alpha + \beta - \frac{1}{4}}{(\lambda + \sqrt{\alpha})^2} f_t \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \frac{2}{3} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{f_{tu}}{f_t} \right) (\lambda - 1)$, $\beta = \frac{1}{6} \left(2 + \frac{f_{tu}}{f_t} \right) (\lambda - 1)^2$

f_t = 콘크리트의 직접인장강도
 f_{ult} = 콘크리트의 극한인장강도
 $\lambda = \epsilon_{t1} / \epsilon_{t0}$, H=부재의 치수(두께)
 ϕ_{ult} = 콘크리트의 극한곡률

본 연구에서는 식 (2)를 통하여 휨응력에 대한 배합자료 수집이 미흡했던 점을 인장응력에 대한 배합수집으로 대체하여 보완함으로써, 인장응력을 통해 휨응력을 구할 수 있도록 하여 배합 프로그램 상에 반영하였다.

4. 배합 프로그램

4.1 목적함수의 도출

본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트의 휨 인성에 대해 약 70개, 휨 응력과 인장 응력에 대한 각 50개의 배합 자료를 수집하여⁸⁻¹⁵⁾, 범용 통계 프로그램인 SPSS V10.0을 통하여 각 경우에 대한 목적함수를 Table 2와 같이 도출하였다.

4.2 독립변수의 설정

적화 프로그램은 핵심 알고리즘의 설정 뿐 아니라, 프로그램이 최적해에 도달하기 쉽도록 여러가지 제한을 두어야 한다. 다시 말하면, 목적지에 도달하기 위한 안내가 필요하며, 이를 프로그램 내에서 독립변수의 적절한 설정으로 반영하여야 한다.

4.2.1 물/시멘트 비(W/C ratio)

일반적으로, 물/시멘트 비가 감소하면 압축강도가 증가하고, 휨강도 또한 비슷한 양상으로 증가한다. 그래서 본 연구의 프로그램에서는 입력되는 휨강도가 증가할수록 물/시멘트 비가 작아지도록 설정하였다.

하지만 휨인성에 대한 것은 물/시멘트 비가 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 다만 물/시멘트 비가 0.35미만에서는 물/시멘트 비가 작아질수록 초기균열강도값이 증가하는 경향을 보인다. 하지만 이러한 것이 인성을 결정하는 잔류강도 측면에서 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 따라서 본 프로그램에서는 휨인성에 대한 물/시멘트 비에 대한 특별한 설정은 취하지 않았다.

4.2.2 잔골재율(S/a)

강섬유보강 콘크리트를 배합하는데 있어서 잔골재율은 일반 콘크리트 보다 훨씬 중요한 의미를 가진다. 왜냐하면 콘크리트 매트릭스 내의 섬유 분산도가 잔골재율에 의해 크게 좌우되기 때문이다. 이는 콘크리트 강도에 직접적인 영향을 미친다. 그리고 강섬유는 굵은 골재와 마찬가지로 수분을 많이 흡수하므로, 반죽질기 및 슬럼프에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구의 프로그램에서는 섬유의 혼입률이 높아짐에 따른 워커빌리티의 저하를 잔골재율을 높여줌으로써 일정수준의 슬럼프를 얻을 수 있도록 하였다.

4.2.3 강섬유 혼입률

강섬유의 혼입률은 강섬유보강 콘크리트의 휨성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 강섬유의 혼입률이 높기만 하고 좋은 것이 아니라, 일반적으로 혼입률이 0.5% ~ 1.0% 일때 그 성능이 가장 우수하다. 본 프로그램에서는 휨인성 및 휨강도가 입력되는 값에 따라서 일정수준을 유지할 수 있도록 하였다. 다시 말해, 강섬유의 혼입률을 통해서 휨인성이나 휨강도의 변동폭을 제한하였다.

4.2.4 강섬유의 형상

이전의 국내외 실험에서 휨성능을 증가시키는 데 가장 우수한 형상은 양단 혹(Hooked)형상인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서의 검증실험은 물론 수집된 모든 자료는 양단 혹 형상만을 고려하였으며 본 프로그램 또한 양단 혹 형상의 사용에만 적용하는 것으로 하였다.

Table 2 Fitness functions

Independent variable	Fitness function
Flexural toughness	$FT(MPa) = 0.478 - 0.174(W/C) - 0.0125(S/a) + 0.0228(l/d) + 2.235 V_f$
Flexural stress	$f_t(MPa) = -0.281 - 0.00478(W/C) + 0.225(S/a) + 0.00916W + 0.0130C$ $+ 0.0000281S + 0.0147G + 0.0228(l/d) + 0.631 V_f$
Tensile stress	$f_{tensile}(MPa) = -6.67 + 0.0546(W/C) + 0.171(S/a) - 0.0213W + 0.0177C$ $- 0.00450S + 0.00424G + 0.00733(l/d) + 1.55 V_f$

	Water	Cement	Fine Agg.	Coa. Agg.	Aspect Ratio	Fiber Volume	Flexural Toughness Flexural Strength
Rank 1	184	380	870	910	60	0.5	31.62
Rank 2	175	375	850	920	60	0.4	29.63
Rank 3	180	390	880	900	60	0.6	35.65
⋮							
New	181	385	880	915	60	0.5	32.63

Input: 30.60

Update

Fig. 7 Optimizing mix proportion via Harmony Search

그리고 강섬유의 아스펙트 비는 여건상 특정값만을 사용하였으며, 이는 프로그램의 적용대상 배합에 제한을 두어야 함을 의미한다.

4.2.5 공기량

본 연구의 프로그램은 체적배합을 바탕으로 하였으면 공기량은 $4 \pm 2\%$ 로 하였다. 즉 공기량을 제외한 총체적은 $940 \text{ ml/m}^3 \sim 980 \text{ ml/m}^3$ 을 유지하도록 하였다.

4.2.6 휨인성도(toughness level)

입력되는 휨인성도(level 1~4)에 따라서 앞서 설명한 범위 내에서 최적해를 찾을 수 있도록 제한하였다.

4.2.7 혼화제

강섬유보강 콘크리트의 배합에 있어서, 강섬유의 표면적에 부착되는 수분의 양이 많기 때문에 워커빌리티 및 슬럼프의 문제가 되는 것이 사실이고, 이러한 이유로 혼화제의 사용은 매우 중요하다.

하지만, 혼화제의 종류는 이전의 국내외 실험에서도 그러했듯이 너무나 다양하여, 하나로 정해서 사용하기에는 무리가 있어, 본 연구에서는 일정 정도의 슬럼프를 발생시킬 수 있는 혼화제의 사용이 필요하다는 가정을 프로그램의 바탕에 두었다.

4.3 프로그램의 작성

프로그램 작성에 앞서, 국내외 타 연구의 실험자료를 수집하여 SPSS를 이용, 선형회귀분석 하였다¹⁹⁾. 통계분석을 통해 얻은 목적함수를 이용하여, 물(W), 시멘트(C), 잔골재(F), 굵은골재(C), 강섬유의 아스펙트 비(l/d), 강섬유의 혼입률(V_f)을 독립변수로 하고, 휨인성, 휨응력, 그리고 인장응력을 종속변수로 하는 목적함수를 도출하였다.

이러한 변수들의 harmony memory를 초기화하여, 반복된 최적화 과정을 통해 최적의 배합을 얻을 수 있도록

Fortran과 Visual Basic V6.0을 사용하여 최적배합 프로그램을 개발하였다.

Fig. 7에서는 본 연구에서 개발한 프로그램에서 화음탐색법을 어떻게 적용하였는가에 대해서, 휨인성이 30, 휨강도가 60인 값을 입력하였을 때를 예를 들어 설명하고 있다. 독립변수가 초기화되어 harmony memory가 Fig. 7과 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 주어진 반복횟수만큼 혹은 원하는 최적화의 정도만큼 수행한 후, 그 때까지의 결과를 보여줌으로써 최적 배합을 얻을 수 있도록 하였다. 물론, 이 외에도 HMCR과 PAR이라는 변수를 사용하여 최적화의 효율을 높이도록 하였으며, 각 독립변수들은 변화의 범위를 제한시켜 보다 빨리 최적 배합을 찾을 수 있도록 하였다.

5. 검증 실험 및 결과

본 연구에서 자료 수집·분석을 통해 개발된 최적배합 프로그램은 검증이 필요하다고 생각되는 배합에 대해 실험을 수행함으로써 검증, 보완하여 프로그램의 신뢰도를 높이고자 하였다.

본 연구에서 실험한 각 시험체별 배합은 Table 3과 같다. SFT는 강섬유를 1종만 혼입한 경우이며, HFT는 강섬유를 2종 동시에 혼입한 하이브리드섬유보강 콘크리트이다. 또한 시험체명의 1~4의 숫자는 앞서 정의한 Toughness Performance Level을 의미한다. 강섬유는 보강했을 때 휨성능의 향상이 가장 우수할 것이라 알려져 있는 both ended hooked를 사용하였으며, 물리적인 성질은 Table 4와 같다¹⁶⁾. 각 시험체별 배합시 슬럼프를 $11 \pm 2 \text{ cm}$ 의 범위로 맞출 수 있도록 혼화제가 사용되었으며, 휨 시험은 KS F 2566, KS F 2408을 따랐다. 시편의 크기는 $150 \times$

Table 3 Mix proportions

Specimen series	Water(kg/m ³)	Cement(kg/m ³)	Fine agg.(kg/m ³)	Coarse agg.(kg/m ³)	Fiber content(%)	Aspect ratio
SFT1	185	350	692	974	0.21	60
SFT2	181	356	724	932	0.51	60
SFT3	179	401	778	856	0.77	75
SFT4	193	400	949	658	1.44	75
HFT2	181	356	724	932	0.26/0.26	60/75
HFT3	179	401	778	856	0.39/0.39	60/75
HFT4	193	400	949	658	0.72/0.72	60/75

150×550 mm이며, 실험은 Fig. 8과 같이 4점 재하 휨시험을 하였다.¹⁷⁾ 그리고 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 뿐만 아니라, 길이가 다른 2종의 강섬유를 동시에 혼입하여 실험함으로써 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능에 대한 증가치를 얻어 이를 배합 프로그램 상에 반영하고자 하였다.¹⁸⁾

Table 4 Physical characteristics of fibers

	Long type	Short type
Length (mm)	30	60
Diameter (mm)	0.5	0.8
Aspect ratio (l/d)	60	75
Gravity	7.9	7.9
Type	Hooked-ended	Hooked-ended

Table 5 Flexural strength of SFT

Specimen	Input strength(MPa)	Test strength(MPa)	Error(%)
SFT1	5.5	5.66	2.4
SFT2	6.0	6.45	7.5
SFT3	6.5	6.49	0.2
SFT4	7.0	7.13	1.9

Table 6 Flexural toughness of SFT(MPa)

Specimen	Range		Test	Comment
	Min.	Max.		
SFT1	19.2	26.1	23.1	O.K.
SFT2	28.5	39.3	32.1	O.K.
SFT3	42.3	55.5	52.8	O.K.
SFT4	59.4	∞	73.8	O.K.

Table 7 Comparison of SFT and HFT for flexural strength(MPa)

TL	2	3	4
SFT	6.45	6.49	71.3
HFT	6.44	7.25	75.8
Increase (%)	0	11.7	6.3

Table 8 Comparison of SFT and HFT for flexural toughness(MPa)

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

SFT series 시험체의 휨강도 및 휨인성에 대한 실험 결과를 Tables 5과 6에 정리하였다. Table 5에서 볼 수 있듯이, 휨강도의 실험 결과와 프로그램 결과값을 비교할 때 그 오차가 10%미만으로 양호한 값을 얻었음을 알 수 있다. 또한 휨인성에 대해서는 프로그램에서 제시하는 휨인성의 범위에 실험 결과 값이 모두 만족함을 Table 6에서 알 수 있다.

각 시험체별 SFT와 HFT 시편의 휨강도 및 휨인성에 대한 비교를 Tables 7과 8에 나타내었다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 일반 강섬유보강 콘크리트에 비해 휨강도와 휨인성 모두 다 우수함을 알 수가 있다.

실험 결과를 그래프로 비교하여 보면, Fig. 9에서는 강섬유보강 콘크리트의 경우 Toughness Level에 따라 휨인성의 차이가 나는 것을 볼 수가 있으며, 이와 동시에 앞서 정의한 비율로 잔류강도가 남아있는 것도 확인 할 수 있다. Figs. 10~12는 강섬유 혼입률을 같게 하였을 때, 각 혼입률별 강섬유보강 콘크리트와 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 비교 그래프이다. 모든 경우에 대해서 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능이 우수하게 나타났다.

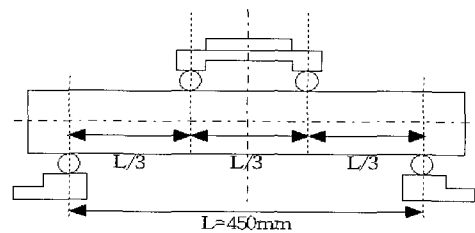


Fig. 8 Test setup

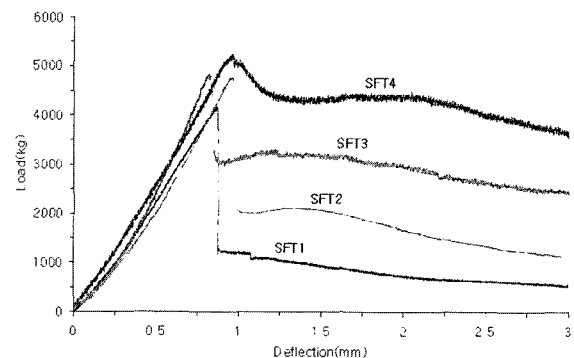


Fig. 9 Test results of SFT series

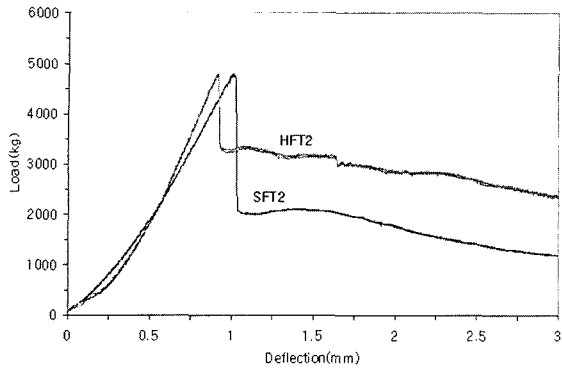


Fig. 10 Test results of SFT2 and HFT2

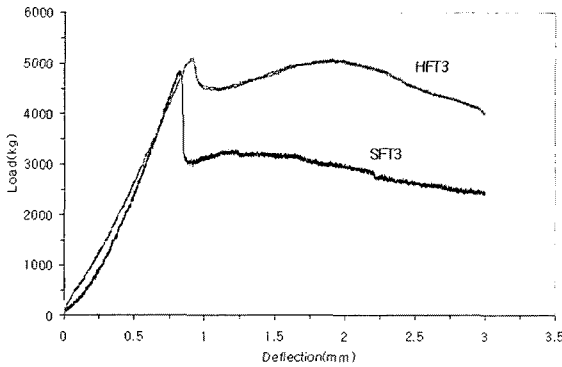


Fig. 11 Test results of SFT3 and HFT3

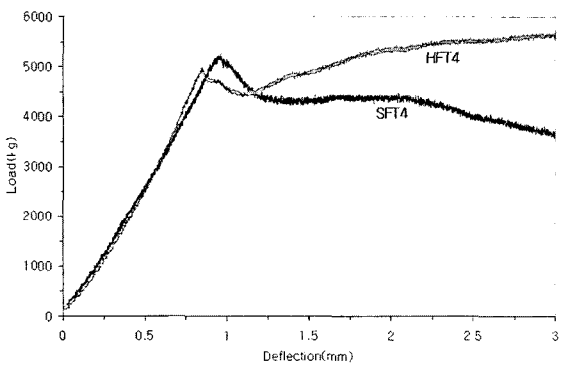


Fig. 12 Test results of SFT4 and HFT4

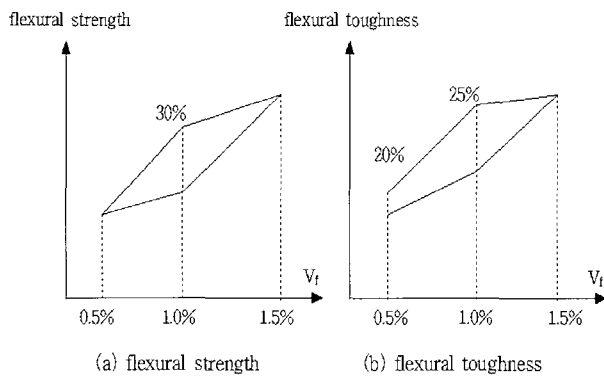


Fig. 13 Assumptions of the improvement of HFRC on flexural performance

본 실험을 통하여 얻은 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능의 증가치는, 기존의 국내 타 연구의 자료와 함께 분석한 후, 설계상의 안전을 개념을 도입하여 배합 프로그램 상에 증가계수의 개념으로 도입하여 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합설계 프로그램을 개발하였다. 프로그램 상에서 고려한 증가계수는 강섬유의 혼입률 별로 달리하여, Fig. 13과 같이 적용하였다.

참고로, 이는 본 실험의 결과 및 국내 타 연구의 실험 결과 중에서, SFT에 대한 HFT의 휨성능의 증가비율이 가장 보수적인 것을 선택하여 설정한 것으로 향후 지속적인 실험을 통해 보완 하여 꾸준히 정밀성을 높여야 할 것으로 생각된다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 화음탐색법을 이용하여 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 프로그램을 개발하기 위해, 기존 타 연구의 실험 배합자료를 최대한 수집하여 프로그램의 틀을 먼저 완성한 후, 검증이 필요하다고 판단되는 몇 개의 배합을 선택하여 실험을 통해 검증함으로써 프로그램의 신뢰도를 높였다. 최종적으로 실험 결과를 프로그램에 반영하여 수정·보완하였으며, 프로그램을 통한 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 도출을 가능케 하였다.

본 연구를 통해서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 설계 프로그램을 개발함으로써 현장 시험 배합 횟수의 감소 및 배합 설계의 편의성 향상이 기대된다.
- 2) Toughness Performance Level의 개념을 도입하여, 실제 설계에서의 편의성을 높이고 에너지 개념의 설계를 충분히 반영할 수 있도록 하였다.
- 3) 동일한 강섬유 혼입률이라 하더라도, 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 일반 강섬유보강 콘크리트보다 휨강도 및 휨인성 모두 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 세계적으로도 아직 연구 초기 단계에 있는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 프로그램을 개발함으로써, 관련 분야의 연구 및 실무 적용에 도움이 될 것으로 기대된다.
- 5) 새로운 최적화 기법인 화음탐색법(Harmony Search)을 콘크리트의 최적 배합에 접목하여 그 적용 가능성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Jong-Woo Geem and Joong-Hoon Kim, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", *Simulation* 76-2, Feb., 2001, pp.60~68.
2. JSCE Standard SF-4, *Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*, JSCE, 1984, pp.58~66.
3. ASTM C1018, *Standard Test Methods for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading)*, ASTM, V4.02, pp.637~634.
4. M. C. Nataraja, N. Dhang, A.P., and Gupta, "Toughness Characterization of Steel Fiber-Reinforced Concrete by JSCE Approach", *Cement and Concrete Research* 30, 2000, pp.593~597.
5. 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, Nov. 1994, pp.529~541.
6. Tak-Seng Lok and Jin-Song Pei, "Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.10, No.2, May, 1998, pp.86~97.
7. T. S. Lok and J. R. Xiao, "Flexural Strength Assessment of Steel Fiber Reinforced Concrete", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.11, No.3, Aug. 1999, pp.188~196.
8. 전찬기, "강섬유의 형태에 따른 SFRC보의 휨 거동에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 12권, 1992년 12월 pp.95~106.
9. Norihiko Kurihara, "Tension Softening Diagrams and Evaluation of Properties of Steel Fier Reinforced Cocncrete", *Engineering Fracture Mechanics* 65, 2000, pp.235~245.
10. 박승범, 강섬유의 종류에 따른 강섬유보강 콘크리트의 강도 및 휨변형 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1996, pp.328~334.
11. S. Mindess, L. Chen and D. R. Morgan, "Determination of the First-Crack Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete," *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, Issue 5, Jul. 1994, pp.201~208.
12. Jeon, Chan Ki, "Fiber Type Effects on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", *KSCE* Vol.12, No.4, Dec. 1992, pp.95~106.
13. Kim, Nakseok, et al., "Effect of Concrete Strength and Steel Fiber Content on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete", *Inst. of Ind Tech. Journal*, Kyonggi Univ. 1997, Vol.14, pp.45~63.
14. Park, Seung Bum, "An Experimental Study on the Strengths and Flexural Deformation of Steel Fiber Reinforced Concrete According to the Steel Fiber Type", *KCI Autumn Convention*, 1996, pp.328~334.
15. Jean-Francois Trottier and Nemkumar Banthia, "Toughness Characterization of Steel Fiber Reinforced Concrete", *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.6, No.2, May 1994, pp.264~289.
16. Parviz Soroushian and Ziad Bayasi, "Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete", *ACI Material Journal*, Mar.-Apr. 1991, pp.129~134.
17. ACI Committee Report, "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete", *ACI Material Journal*, Vol.90, No.1, Jan.-Feb. 1993, pp.94~101.
18. Kim, Nam Wook, et al, "Flexural Fracture Toughness Charateristics of Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete", *KSCE*, 2003, Vol.23, No. 4A, pp.619~625.
19. SPSS corp., *SPSS(Statistical Packages for Social Science) Version 10.0*, 1999.

요 약

강섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 휨성능이 월등히 우수하지만, 아직까지 국내에는 이에 대한 명확한 배합설계 지침이 확립되어 있지 않은 상황이다. 또한, 강섬유를 2종이상 동시에 혼입하여 사용하는 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대해서는 최근에 들어서야 그 연구가 시작되었으며, 이에 대해서도 배합에 대한 구체적인 지침이 확립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 새로운 최적화 기법인 화음탐색법을 이용하여 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 프로그램을 개발하였으며, 검증 실험을 수행하여 프로그램의 신뢰도를 높였다. 이는 현장 시험 배합횟수의 감소 및 배합설계의 편의성 향상 등에 도움이 될 것으로 기대된다. 또한, 실험 결과 동일한 강섬유 혼입률이라 하더라도, 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 일반 강섬유보강 콘크리트보다 휨강도 및 휨인성 모두 우수한 것으로 나타났으며 이를 프로그램 상에 추가 반영하였다. 이는 세계적으로도 아직 연구 초기 단계에 있는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 특성을 파악하는데에도 향후 연구의 발판이 될 것으로 생각되며, 지속적인 실험 및 연구로 보완이 된다면 보다 더 정밀도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 화음탐색법, 강섬유보강 콘크리트, 하이브리드 섬유보강 콘크리트, 최적배합 프로그램