

고강도경량 자기충전콘크리트에 관한 실험적 연구

최연왕¹⁾·김용직^{2)*}·문한영²⁾

¹⁾세명대학교 토목공학과 ²⁾한양대학교 토목공학과

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 9월 30일 심사완료)

An Experimental Study on the High Strength Lightweight Self-Compacting Concrete

Yun-Wang Choi¹⁾, Yong-Jic Kim^{2)*}, and Han-Young Moon²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Chungbuk, 390-711, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted September 30, 2005)

ABSTRACT

This paper was to evaluate the high strength lightweight self-compacting concrete(HLSSC) manufactured by Nan-Su, which main factor, Packing Factor(PF) for mixing design, has been modified and improved. We have examined HLSSC performance at its fresh condition as well as its mechanical properties at the hardened condition. The evaluation of HLSSC fluidity has been conducted per the standard of second class rating of JSCE, by three categories of flowability(slump-flow), segregation resistance ability(time required to reach 500 mm of slump-flow and time required to flow through V-funnel) and filling ability(U-box test) of fresh concrete. The compressive strength of HLSSC at 28 days has come out to more than 30 MPa in all mixes. The relationship between the compressive strength-splitting tensile strength and compressive strength-modulus of elasticity of HLSSC were similar those of typical lightweight concrete. Compressive strength and dry density of HLSSC at 28 days from the multiple regression analysis resulted as $f_c = -0.16LC - 0.008LS + 50.05(R=0.83)$ and $f_d = -3.598LC - 2.244LS + 2,310(R=0.99)$, respectively.

Keywords : HLSSC, packing factor(PF), density, multiple regression analysis

1. 서 론

콘크리트는 성형성 및 경계성 등이 탁월하여 가장 일반적으로 사용되는 건설 재료로 인정받고 있으나 우수한 강도 발현에 비하여 자중이 크므로 구조물의 이용성에 한계를 가지게 된다¹⁾. 또한, 국내에서는 3D 기피 현상으로 인한 건설 인력 확보가 어려워 건설 현장 작업자의 고령화 및 숙련공의 부족 현상이 뚜렷히 나타나고 있는 실정이다. 이와 같은 건설 환경의 전반적인 여건에 따라 시공의 효율성 및 품질 향상을 고려한 고성능콘크리트(High Performance Concrete) 및 콘크리트의 자중 감소와 단면 축소를 위한 고강도 경량 콘크리트(High-Strength Lightweight Concrete)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)는 캐나다 Altcin 교수가 최초로 고강도, 고유동 및 고내구성을 만족하는 콘크리트를 고성능콘크리트라고 발표한 이후 세계적으로 급속히 알려지기 시작

하였다³⁾. 그 이후 고강도, 고유동 및 고내구성 중 특히 유동성을 크게 증대시킨 자기충전콘크리트(Self-Compacting Concrete)는 일본 동경대의 Okamura 교수에 의해 개념이 제시된 이후 콘크리트에 대한 기존의 고정관념을 뛰어넘는 획기적인 공법으로 인정받고 있으며, 일본의 건설 회사 및 대학 연구소에서 실용화를 위한 지속적인 연구 및 현장 시공도 이루어지고 있다^{4,5)}. 그러나 Okamura 교수가 제시한 자기충전콘크리트의 배합설계방법은 일반 레미콘 공장에서 제조하는데 있어 배합방법이 까다롭고 매우 복잡하며, 다양한 골재의 특성을 반영하기 어렵다는 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 대만의 Nan S.는 골재채움률(Packing Factor : PF)을 이용하는 보다 간편한 배합설계 방법을 제시하였다^{6,7)}. 그러나 Nan S.의 배합설계방법은 배합의 간편성에도 불구하고 가장 중요한 변수인 PF 가정의 모호성 및 변동범위가 큰 문제점을 가지고 있다. 한편, 경량콘크리트는 구조물의 자중을 줄일 수 있어 부재 단면의 축소 및 시공의 간편화를 이룰 수 있기 때문에 전체적인 건설비용을 절감할 수 있는 경제성을 확보할 수 있으나, 경량골재 자체의 강도 저

* Corresponding author

E-mail : yong1yong2@hanmail.net

©2005 by Korea Concrete Institute

하에 의한 콘크리트 강도의 감소로 인하여 활용성이 극히 제한되어져 왔다. 그러나 최근 새로운 구조용 경량골재의 개발에 따라 고강도 경량콘크리트의 실용화에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

기존의 경량콘크리트 제조는 주로 일반 콘크리트의 배합으로 진행되어 왔으며, 이러한 일반 콘크리트 배합에 경량골재를 혼합할 경우 골재의 경량화에 따른 재료분리 및 강도저하 현상이 발생한다. 한편, 분체계 자기충전콘크리트는 그 특성상 다량의 분체를 사용함에 따라 점성증대와 더불어 설계기준강도 40MPa 이상의 고강도콘크리트로 제조된다. 따라서 이러한 자기충전콘크리트에 경량골재를 혼합할 경우 경량골재의 재료분리 현상 방지에 따른 품질 안정 및 고강도경량콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 자기충전성, 경량성 및 설계기준강도 30MPa 이상을 만족하는 고강도경량콘크리트를 제조하기 위하여 Nan S.의 자기충전콘크리트 배합설계방법 중 주요인자인 PF를 수정 및 보완하여 자기충전콘크리트의 기준배합을 선정하였다. 선정된 기준 자기충전콘크리트의 배합 비를 활용하여 경량골재를 부피비로 혼합하여 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조한 후 굳지 않은 상태에서의 각종 성능평가를 실시하였으며, 또한 경화된 콘크리트의 각종 역학적 특성을 검토하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트 및 골재

시멘트는 밀도 3.15g/cm^3 및 비표면적 $3,539\text{cm}^2/\text{g}$ 인 국내 S사의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 20mm, 밀도 2.72g/cm^3 인 부순골재(이하 NC로 약함)를 사용하였고, 잔골재는 밀도 2.55g/cm^3 인 예천산 강모래(이하 RS로 약함)를 사용하였다. 경량골재는 유문암계 미분말을 주원료로 제조한 것을 사용하였으며, 경량굵은골재(이하 LC로 약함)의 최대치수는 20mm, 밀도는 1.58g/cm^3 이고, 경량잔골재(이하 LS로 약함)의 밀도는 1.87g/cm^3 , 0.08mm 통과 미립분 양 5%인 것을 사용하였다. 사용 골재의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 혼화제

자기충전콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 폴리카르복산계 고성능 감수제 및 공기연행제를 사용하였으며 밀도 및 사용량은 각각 1.10 ± 0.02 및 1.04 ± 0.01 와 시멘트 질량에 대하여 $1.0\pm 0.1\%$ 및 $0.005\pm 0.001\%$ 를 사용하였다.

Table 1 Physical properties of aggregates

Items \ Types	NC	RS	LC	LS
$G_{max}(\text{mm})$	20	-	20	-
Density(g/cm^3)	2.72	2.55	1.58	1.87
Absorption(%)	0.80	2.43	28.09	13.71
F.M.	6.72	2.81	6.40	2.64
Bulk density(kg/m^3)	1,668	1,666	793	1,127
Percentage of solids(%)	62.3	62.6	50.2	60.3
Crushing ratio(%)	14.6	-	23.8	-

2.2 배합 결정

본 실험에 사용한 콘크리트 배합은 Nan S.의 배합설계법을 수정·보완하여 사용하였다. 즉 Nan S. 배합설계법에서 주요인자인 PF 가정의 모호성을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 사전 실험을 실시하여 PF 값을 찾을 수 있도록 하였다^{8,9)}. 수정된 PF 값은 ASTM C 29에 따라 실험을 실시하여 골재의 느슨한 상태에 대한 밀실한 상태의 단위용적질량의 비로서 콘크리트 배합에 적용되는 잔골재율에 따라 가중치를 적용하여 구한 값이다¹⁰⁾.

적합한 PF의 결정은 소요의 콘크리트 배합을 얻고자하는 예비 실험 단계에서 실험의 반복 횟수를 크게 줄여 시간과 노력의 절감 효과가 크다. 이러한 예비 실험에 의해 굵은골재와 잔골재 각각의 PF를 계산한 다음 잔골재율은 일반적으로 자기충전콘크리트에 있어서 50~57%의 범위에 존재하기 때문에 잔골재율을 53%로 가정한 후 최종적으로 PF 값을 결정한다.

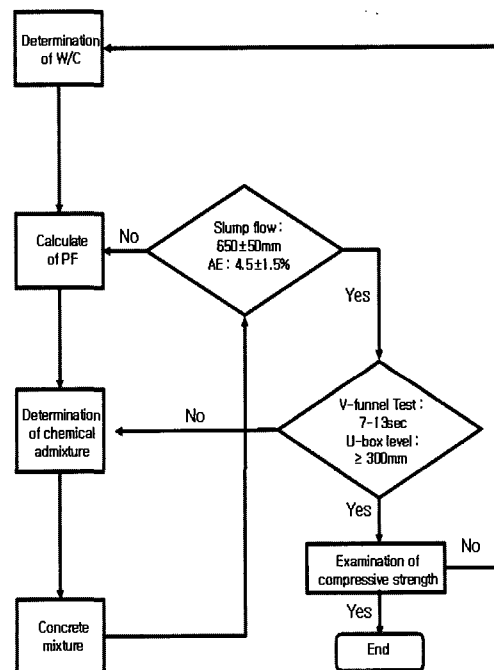


Fig. 1 Flowchart of the SCC mix design method

Table 2 Mixture proportion of concrete

Group no.	Mix no.	S/a (%)	W/OPC (%)	LC/(LC+NC)(%)	LS/(LS+RS)(%)	Unit weight(kg/m ³)					
						W	OPC	RS	NC	LS	LC
A	1	53	38	0	0	175	460	861	810	0	0
	2	53	38	25	0	175	460	861	608	0	117
B	3	53	38	50	0	175	460	861	405	0	234
	4	53	38	75	0	175	460	861	203	0	352
	5	53	38	100	0	175	460	861	0	0	469
C	6	53	38	0	25	175	460	645	810	158	0
	7	53	38	0	50	175	460	430	810	316	0
	8	53	38	0	75	175	460	215	810	473	0
	9	53	38	0	100	175	460	0	810	631	0
D	10	53	38	100	25	175	460	645	0	158	469
	11	53	38	100	50	175	460	430	0	316	469
	12	53	38	100	75	175	460	215	0	473	469
E	13	53	38	25	100	175	460	0	608	631	117
	14	53	38	50	100	175	460	0	405	631	234
	15	53	38	75	100	175	460	0	203	631	352
F	16	53	38	100	100	175	460	0	0	631	469

Fig. 1은 본 연구에서 제시한 자기충전콘크리트의 배합 설계 순서를 나타낸 것이다. 이러한 배합설계 순서를 통하여 최종적으로 자기충전성을 검토한 후 자기충전성을 만족하지 않을 경우 실험에 의해 결정한 PF 값의 근사값에서 소요의 배합이 존재할 것이다.

본 연구에서 ASTM C 29에 의하여 골재의 느슨한 상태와 밀실한 상태의 단위용적질량을 측정하고, 굵은골재의 느슨한 단위용적질량은 1,461 kg/m³, 밀실한 상태의 단위용적질량은 1,668 kg/m³로 측정되었고, 잔골재의 느슨한 단위용적질량은 1,376 kg/m³, 밀실한 상태의 단위용적질량은 1,666 kg/m³로 측정되었다. 따라서, 잔골재율 53%를 적용시켜 골재의 PF 값을 계산한 결과 약 1.18로 계산된다. 식 (1)은 PF 값을 결정하기 위한 계산식이다.

Table 2는 콘크리트 배합을 나타낸 것이며 경량잔골재 및 굵은골재의 혼합량에 따라 분류한 것이다.

$$PF = \frac{B}{A} \times \left(1 - \frac{S}{a}\right) + \frac{D}{C} \times \frac{S}{a} \quad (1)$$

- 여기서, A : 굵은골재의 느슨한 상태 단위용적질량
- B : 굵은골재의 다짐한 상태 단위용적질량
- C : 잔골재의 느슨한 상태 단위용적질량
- D : 잔골재의 다짐한 상태 단위용적질량

2.3 시험 방법

경량골재는 표면건조 포화상태의 조건으로 콘크리트를 제조하였다. 경량골재의 표면건조 포화상태는 콘크리트 배합 24시간 전에 pre-wetting 과정을 통하여 수분을 충분히 흡수시켜 표면건조 포화상태로 제조하였다.

고강도경량 자기충전콘크리트의 자기충전성 평가인 Slump-flow, Slump-flow 500 mm 도달시간, V-funnel 유하시간 및 U-box 충전 시험은 콘크리트 믹싱후에 바로 측정하였으며, 평가 방법은 일본토목학회(JSCE)의 “자기충전콘크리트의 성능평가 기준(안)”에 의해 검토하였고 평가 기준을 Table 3에 나타내었다¹¹⁾.

콘크리트 시험용 공시체는 다짐작업 없이 Ø 100×200 mm로 제조하였으며, 제작된 공시체는 24시간 후에 몰드를 제거한 다음 시험 전 까지 20±3 °C에서 수중 표준양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 재령 3, 7 및 28일에서 측정하였으며, 쪼갬 인장강도, 탄성계수 및 기전 단위용적질량은 재령 28일에 측정하였다.

또한, 경화된 콘크리트의 경량골재 혼합률에 따른 특성을 통계프로그램 SPSS를 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석은 LC 및 LS의 혼합률을 독립변수로 하고 경화콘크리트의 역학적 특성인 압축강도 및 기전 단위용적질량을 종속변수로 하여 추정식을 제시하고 실측값과 비교·검토하였다.

Table 3 Specification of SCC proposed by JSCE

Items		Rank		
		1	2	3
Construction condition	Minimum gap between reinforcement(mm)	35-60	60-200	≥200
	Amount of reinforcement (kg/m ³)	≥350	100-350	≤100
Flowability	Slump flow(mm)	600-700	600-700	500-650
Segregation resistance ability	Time required to flow through V-funnel(s)	9-20	7-13	4-11
	Time required to reach 500 mm of slump flow(s)	5-20	3-15	3-15
Filling height of U-box test(mm)		≥300	≥300	≥300
Absolute volume of coarse aggregate per unit volume of SCC(m ³ /m ³)		0.28-0.30	0.30-0.33	0.32-0.35

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고강도경량 자기충전콘크리트의 자기충전성 평가

Figs. 2, 3 및 4는 각각 고강도경량 자기충전콘크리트의 유동성, 재료분리저항성 및 충전특성을 정리한 것이다. Fig. 2의 유동성 측정을 위한 Slump-flow 측정 결과 Group F(Mix No.16)를 제외한 모든 배합에서 JSCE 2등급 기준 600~700mm를 만족하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 경량골재를 혼합할 경우 콘크리트의 자중이 감소하여 보다 양호한 유동성을 확보한 것으로 판단되며, 또한 실험 전에 경량골재를 사전 흡수시켜 사용하므로 배합수량이 증가된 것으로 판단된다²⁾. 그러나 Group F(Mix No. 16)와 같이 지나친 경량화는 오히려 유동성에 불리한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 고강도경량 자기충전콘크리트의 재료분리 저항성을 알아보기 위하여 V-funnel 유하시간과 Slump-flow 500mm 도달시간과의 관계를 정리한 그림이다. Fig. 3의 Slump-flow 500mm 도달시간은 대부분 모든 배합에서 본 연구에서 제시한 목표 성능 범위를 만족하였다. 그러나 V-funnel 유하시간은 Group D, E 및 F에서 목표 기준 범위를 대부분 만족하고 있으나, Group C의 경우 LS의 혼합률이 증가할수록 Slump-flow 500mm 도달시간과 V-funnel 유하시간이 목표 범위보다 점차 지연되는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 LS의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 미분이 증가하여 점성이 증가되었기 때문으로 판단된다. 그러나 LS를 부순 잔골재의 콘크리트 표준시방서 기준을 적용할 경우 0.08mm체 통과량 7% 이하인 5%로서 기준 범위를 만족하고 있다. 또한, LC 및 LS를 동시에 혼합하여 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조한 Group D, E 및 F의 경우 LC 및 LS를 각각 혼합하여 제조한 Group B 및 C와 비교하여 Slump-flow 500mm 도달시간과 V-funnel 유하시간이 다소 빠르고 기준 범위를 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 이는 LC와 LS를 동시에 혼합하여 사용함으로써 콘크리트의 자중감소 효과에 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서 고강도경량 자기충전콘크리트 제조에 있어서 LC 및 LS를 동시에 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 고강도경량 자기충전콘크리트의 충전성 평가를 위한 U-box 충전높이를 정리한 것이다. Fig. 4의 결과 대부분 목표 성능 기준을 만족하고 있으나, LS를 혼합한(Group C) 경우 혼합률 25%에서만 기준 범위를 만족하고 있다. 이러한 원인은 Figs. 2 및 3의 결과와 유사한 LS에 포함된 미분의 영향으로 점성이 증대되고 유동성이 다소 감소되었기 때문으로 판단된다.

3.2 고강도경량 자기충전콘크리트의 역학적 특성 평가

Fig. 5는 고강도경량 자기충전콘크리트의 재령에 따른 압축강도를 정리한 그림이다.

Fig. 5의 결과 모든 배합에서 재령 28일 압축강도가 30MPa 이상 측정되었다. 특히, LS를 혼합한(Group C) 고강도경량 자기충전콘크리트의 경우 46MPa 이상의 압축강도가 발현되는 경향을 보이고 있다. 이는 LS의 혼합률이 증가할수록 미립분이 많아져 콘크리트 내부의 공극을 채워주는 filler 역할을 한 것으로 판단된다. 그러나 LC만을 혼합한 Group B의 경우 혼합률이 증가할수록 압

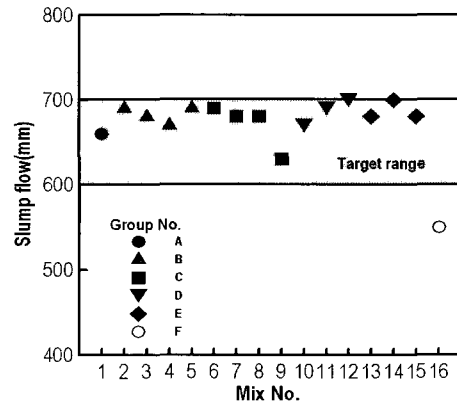


Fig. 2 Slump-flow

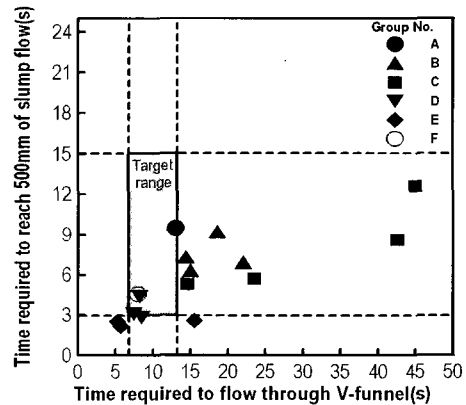


Fig. 3 Relationship of time required to flow through V-funnel and reach 500mm of slump-flow

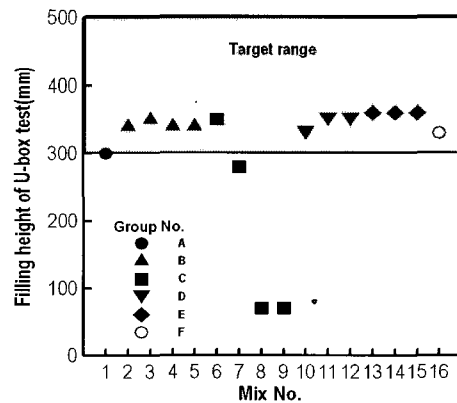


Fig. 4 Filling height of U-box test

축강도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 LC의 파쇄율이 NC 보다 약 63% 높아 골재 자체의 강도가 낮기 때문이고, 또한 LC 자체의 흡수율이 28.09%로 NC의 흡수율에 비하여 상당히 크다. 따라서 실험전에 사전흡수에 의한 전체 콘크리트의 배합수량이 증가되었기 때문으로 판단된다. 일반적으로 경량골재를 혼합한 콘크리트의 경우 단위용적질량의 감소에 따라 압축강도가 저하하는 현상이 나타나고 있으며 이러한 이유로 경량콘크리트의 강도발현 특성을 구조적 효율을 계산하여 평가하고 있다. 구조적 효율성 평가는 경량콘크리트의 압축강도와 기전 단위용적질량의 비로서 구한다.

Fig. 6은 구조적 효율을 계산하여 정리한 그림이다. Fig. 6의 결과 LC만을 혼합하여 제조할 경우 혼합률 75%까지는 구조적 효율성은 큰 차이를 나타내고 있지 않지만 혼

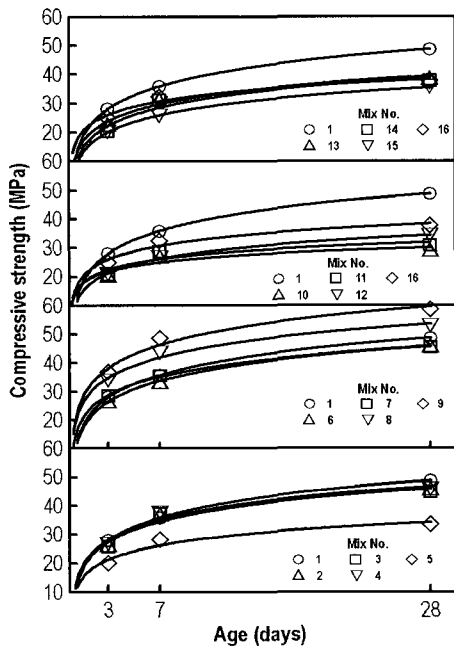


Fig. 5 Compressive strength according to ages

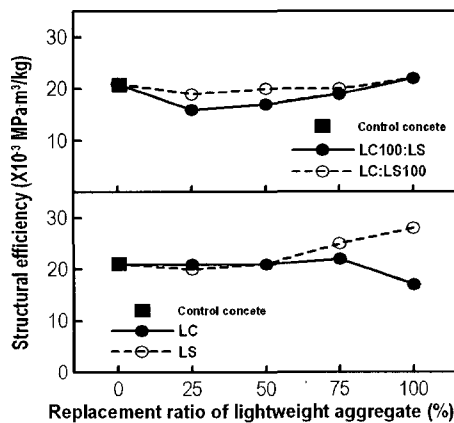


Fig. 6 Structural efficiency

합률 100%의 경우 기준 콘크리트에 비해 약 20% 감소하는 경향이 있다. 그러나 LS 만을 혼합한 경우는 LS 혼합률이 증가할수록 구조적 효율성도 다소 증가하는 경향을 나타냈으며, 혼합률 100%의 경우 최대 40% 정도의 구조적 효율성이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 LC 및 LS를 각각 혼합하여 제조할 경우 기준 콘크리트에 비해 기전 단위용적질량의 차이가 크게 감소하지 않은 상태에서 압축강도 발현현상이 상이하게 나타난 결과로 판단된다. 즉, LC만(Group B)을 사용한 경우 혼합률이 증가함에 따라서 다소 감소하다가 LC 혼합률 100%에서 약 31%의 압축강도 감소 현상이 나타났으며, 반대로 LS만(Group C)을 사용한 경우에는 혼합률이 증가함에 따라 압축강도가 증가하여 LS 100%의 경우 기준에 비해 약 20%의 압축강도 증가 현상이 나타났다. 또한, LC 및 LS를 동시에 혼합하여 제조한 Group D의 경우 구조적 효율이 기준과 비교하여 현저히 저하하는 경향이 나타났으며, Group E의 경우는 기준과 비교하여 거의 동등한 구조적 효율성을 나타내고 있다. 이는 Group B 및 C의 압축강도 결과와 관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 구조적 효율성을 고려하여 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조할 경우 LC의 혼합률 75%와 LS의 혼합률 50% 이상을 고려하여 제조하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Figs. 7 및 8은 고강도경량 자기충전콘크리트의 재령 28일에서 압축강도와 쪼갠 인장강도 및 탄성계수의 관계를 정리한 것이다. Fig. 7의 결과 고강도경량 자기충전콘크리트의 압축강도와 쪼갠 인장강도의 관계는 압축강도가 커짐에 따라 쪼갠 인장강도가 비례적으로 증가하여 $f_t=0.205 \times f_c^{0.78}$ 의 관계로 표현되며, 압축강도와 쪼갠 인장강도(f_t/f_c)의 비는 9~12.6의 범위로 나타났다. 또한, 압축강도와 탄성계수의 관계를 정리한 것이 Fig. 8이며, 제시된 식들은 ACI 및 CEB-FIB Model Code를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 고강도경량 자기충전콘크리트 압축강도와 탄성계수의 관계는 콘크리트의 단위용적질량을 고려한 ACI 연구 경향과 유사한 결과를 나타냈다. 일반적으로 경량콘크리트의 탄성계수는 골재의 종류 및 특성, 콘크리트의 압축강도와 단위용적질량 등의 영향을 받으며 일반콘크리트의 40~70% 정도로 나타나는데 이는 경량골재 자체의 탄성계수가 작기 때문인 것으로 알려져 있다. Fig. 9의 결과로부터 고강도경량 자기충전콘크리트의 탄성계수는 기준 콘크리트와 비교하여 44~97% 범위로 나타났다.

Fig. 9는 고강도경량 자기충전콘크리트의 자중감소 효과를 알아보기 위하여 재령 28일의 콘크리트 기전 단위용적질량을 측정하여 정리한 것이다. Fig. 9의 결과 자중감소 효과는 LC 및 LS(Group B 및 C)를 각각 혼합한 경우 최대 15%의 자중 감소효과가 있었지만, LC 및 LS(Group D, E 및 F)를 동시에 혼합한 경우 최대 26%의 자중 감소 효과가 있다. 따라서 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조

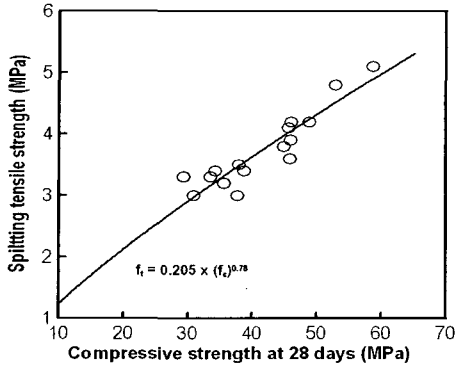


Fig. 7 Relationship of compressive strength and splitting tensile strength

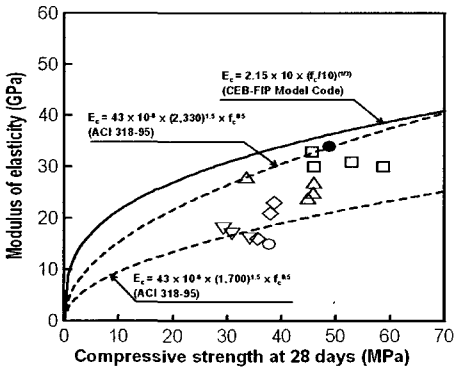


Fig. 8 Relationship of compressive strength and modulus of elasticity

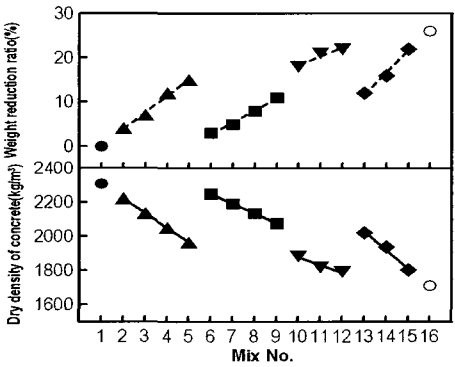


Fig. 9 Dry density of concrete

할 경우 경량잔골재 및 굵은골재를 동시에 혼합하여 사용하는 것이 자중 감소에 유리할 것으로 판단된다. 따라서 자기충전성을 만족하며, 압축강도와의 관계를 고려한 구조적 효율성이 높은 경량 잔골재의 혼합률 75%와 경량굵은골재의 혼합률 100%를 동시에 혼합하여 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.3 고강도경량 자기충전콘크리트의 통계 분석

식 (2) 및 (3)은 본 연구에서 사용한 LC 및 LS의 혼합률을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 실시한 결과이며, 식

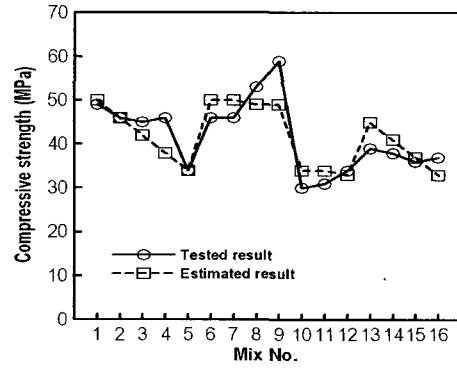


Fig. 10 Comparison of tested and estimated value (compressive strength)

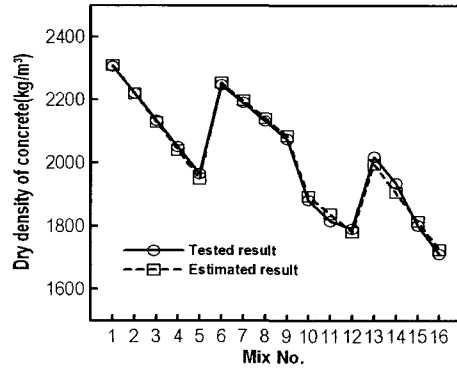


Fig. 11 Comparison of tested and estimated value (dry density of concrete)

Table 4 Result of tested and estimated value

Group No.	Mix No.	Compressive strength (MPa)		Dry density of concrete(kg/m ³)	
		Tested	Estimated	Tested	Estimated
A	1	49	50	2,306	2,310
	2	46	46	2,221	2,220
B	3	45	42	2,135	2,130
	4	46	38	2,051	2,040
	5	34	34	1,965	1,950
C	6	46	50	2,248	2,254
	7	46	50	2,191	2,198
	8	53	49	2,133	2,142
D	9	59	49	2,076	2,086
	10	30	34	1,883	1,894
	11	31	34	1,817	1,838
E	12	34	33	1,792	1,782
	13	39	45	2,020	1,996
F	14	38	41	1,937	1,906
	15	36	37	1,802	1,816
F	16	37	33	1,712	1,726

(2)는 압축강도, 식 (3)은 기건 단위용적질량을 종속변수로 계산한 것이다. 다중회귀분석 결과 압축강도 예측식인 식 (2)는 상관계수가 83%로 나타나 경량골재 혼합률에 따른 압축강도 예측은 어느 정도 상관성이 있는 것으로 판단되며, 기건 단위용적질량과 경량골재 혼합률과의 상관계수는 식 (3)에 나타나듯이 99%로 우수하게 나타났다.

$$f_c = -0.16LC - 0.008LS + 50.05 \quad R=0.83 \quad (2)$$

$$f_d = -3.598LC - 2.244LS + 2,310 \quad R=0.99 \quad (3)$$

여기서, f_c : 재령 28일 압축강도(MPa)
 f_d : 재령 28일 기건 단위용적질량(kg/m³)
 LC : 경량굵은골재 혼합률(%)
 LS : 경량잔골재 혼합률(%)

Table 4는 다중회귀분석을 실시하여 구한 예측식들의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제로 측정된 값과 다중회귀 분석에 의하여 예측된 값을 정리한 것이다.

Table 4의 결과를 정리한 것이 Figs. 10 및 11이다. Fig. 10은 콘크리트의 압축강도에 대하여 추정값과 예측값을 비교한 것으로 실측값에 비해 최대 17%의 압축강도 차이를 보이는 Mix No. 4 및 9를 제외한 모든 배합에서 식 (2)에 의해 압축강도 추정이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 11은 고강도경량 자기충전콘크리트의 자중감소 효과를 검토하기 위하여 기건 단위용적질량의 실측값과 예측값을 비교한 것으로 기건 단위용적질량의 예측은 식 (3)에 의해 추정이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 유동성 분석 결과 Group F를 제외한 모든 배합에서 목표 성능을 만족하였으며, 재료분리저항성 측정 결과는 Group D, E 및 F 배합에 목표 성능을 만족하였고 충전성 평가 결과 Group C를 제외한 모든 배합에서 목표 기준을 만족하고 있어, 고강도경량 자기충전콘크리트를 제조할 경우 경량 잔·굵은골재를 동시에 혼합하여 사용하는 것이 자기충전성을 만족할 것으로 판단된다.
- 2) 고강도경량 자기충전콘크리트의 재령 28일 압축강도 측정 결과 기준 콘크리트에 비해 최대 36.6%의 압축강도 감소 경향이 있었으나 모든 배합에서 30MPa 이상의 압축강도가 발휘되었고, 쪼갬 인장강도 및 탄성계수 측정 결과는 기존의 연구 경향과 유사하였으며, 구조적 효율을 검토한 결과 LC의 혼합률 75%, LS의 혼합률 50% 이상 동시에 혼합하여 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.
- 3) 통계분석에 의한 고강도경량 자기충전콘크리트의 경량골재 혼합률에 따른 압축강도 예측식은 상관계수 0.83, 기건 단위용적질량 예측식은 상관계수 0.99로 나타났으며, 실측값과 비교한 결과 압축강도 예측은 Mix No 4 및 9에서 최대인 17%의 차이를 보이고 있었고, 기건 단위용적질량 예측은 실측값과 유사한 경향을 나타내고 있어, 앞으로 추가적인 반복 실험을 실시하여 통계 분석을 실시한다면 보다 신뢰성 높은 예측식을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 건설교통부 2002년도 산·학·연 과제(C102A1000017-03A0200-01520) 「ET 신기술 경량골재를 이용한 고강도 경량 프리캐스트 바닥판 시공시스템 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yasar E., Atis C. D., Kilic A., and Gulsen H., "Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Pumice and Fly-Ash", *Materials Letters*, Vol.57, Issue15, 2003, pp.2267~2270.
2. Kilic A., Atis C. D., Yasar E., and Ozcan F., "High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, Issue10, 2003, pp.1595~1599.
3. Aitcin P. C., *High-Performance Concrete*, E&FN SPON, London, 1998, pp.84~99.
4. Okamura H., *Self-compacting high performance concrete*, Social System Institute, Tokyo, 1999, pp.5~15.
5. Okamura H., Maekawa K., and Ozawa K., *High Performance Concrete*, Gihoudou Pub., Tokyo, 1998, pp.5~21.
6. Nan S. and Miao B., "A New Method for the Mix Design of Medium Strength Flowing Concrete with Low Cement Content", *Cement and Concrete Composite*, Vol.25, Issue2, 2003, pp.215~222.
7. Nan S., Hsu K. C., and Chai H. W., "Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, Issue12, 2001, pp.1799~1807.
8. 최연왕, 정문영, 정지승, 문대중, 안성일, "골재 채움률과 잔골재 용적비를 고려한 자기충전형 콘크리트의 최적배합", 한국콘크리트학회 기술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 14권 2호, 2002, pp.549~554.
9. 최연왕, 조선규, 최욱, 김경환, 안성일, "간편 배합설계 방법을 통한 중간강도 자기충전콘크리트의 특성", 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 15권 1호, 2003, pp.83~88.
10. ASTM C 29, *Atandard Test Method for Unit Weight and Voides in Aggregate*, American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1997, Vol.4, No.2.
11. JSCE, *Japanese Society of Civil Engineering Guide to Construction of high Flowing Concrete*, Gihoudou Pub., Tokyo, 1986, 40pp.
12. Lo T. Y., Cui H. Z., and Li Z. G., "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete", *Waste Management*, Vol.24, Issue4, 2004, pp.333~338.

요 약

본 연구에서는 Nan-Su의 자기충전콘크리트(Self-Compacting Concrete)의 배합설계 방법중 주요인자인 골재 채움률(Packing Factor : PF)을 수정 및 보완한 배합설계 방법을 이용하여 고강도경량 자기충전콘크리트(High Strength Lightweight Self-Compacting Concrete)를 제조하고 자기충전성 및 역학적 특성을 검토하였다. 콘크리트의 자기충전성 평가는 Slump-flow, V-funnel 유하시간, Slump-flow 500mm 도달시간 및 U-box 충전높이를 측정하여 일본토목학회(JSCE)의 자기충전콘크리트 기준 중 2등급 범위를 적용시켜 검토하였다. 고강도경량 자기충전콘크리트의 재령 28일 압축강도는 모든 배합에서 30 MPa 이상으로 나타났으며, 압축강도와 쪼갬 인장강도 및 탄성계수의 비는 기존의 연구경향과 유사한 값을 나타내고 있었다. 또한, 재령 28일 압축강도와 기건 단위용적질량은 다중회귀분석 결과 $f_c = -0.16LC - 0.008LS + 50.05$ ($R=0.83$) 및 $f_d = -3.598LC - 2.244LS + 2,310$ ($R=0.99$)로 나타났다.

핵심용어 : 고강도경량 자기충전콘크리트, 골재 채움률, 기건 단위용적질량, 다중회귀분석
