

재생굵은골재를 사용한 초유동 콘크리트의 강도 및 비파괴 특성

Strengths and Non-destruction Properties of Super Flow Concrete Using Recycled Coarse Aggregate

성 찬 용*

Sung, Chan Yong

Abstract

This study was performed to evaluate strengths and non-destruction properties of super flow concrete using recycled coarse aggregate.

At the curing age of 28 days, the compressive strength was 22.7~37.5 MPa, the splitting tensile strength was 2.65~3.73 MPa, the flexural strength was 5.78~6.86 MPa, the ultrasonic pulse velocity was 3,103~3,480 m/s, the dynamic modulus of elasticity was 3.401×10^4 ~ 4.521×10^4 MPa, respectively.

The strengths, ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity of super flow concrete were decreased with increasing the content of recycled coarse aggregate.

The super flow concretes using recycled coarse aggregate were improved by substitution in the range of less than the fly ash content 30% and recycled coarse aggregate content 75%.

Keywords : Recycled coarse aggregate, Super flow concrete, Strengths, Ultrasonic pulse velocity, Dynamic modulus of elasticity.

I. 서 론

최근 경제 발전에 따라 쓰레기, 생활 및 산업 폐기물이 크게 증가하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히 건설 폐기물 중 콘크리트 구조물의 노

후화, 성능저하 및 용도 목적의 변경 등으로 인하여 구조물의 해체에 의해 발생하는 폐콘크리트량이 급증하고 있는 실정이다.

2000년 현재 연간 약 1,500만톤 이었던 폐콘크리트 발생량이 2020년에는 연간 약 1억톤 이상으로 급격히 증가할 것으로 예상되기 때문에 그 대책으로서 폐콘크리트의 재자원화 기술개발 및 실용화 방안이 절실히 요구되고 있다.⁴⁾

일부 선진국에서는 폐콘크리트를 자원의 유효이용 및 환경보호의 차원에서 콘크리트용 골재로 활

* 충남대학교 농업생명과학대학
* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5798
Fax: +82-42-825-5791
E-mail address: cysung@cnu.ac.kr

용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며,²⁾ 우리나라에서도 근년에 와서 양질의 천연골재 부족현상의 해소 및 자연생태계의 유지 등을 목적으로 콘크리트 기술자들 사이에 폐콘크리트를 콘크리트용골재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.⁹⁾

화력발전소에서 원료로 사용하는 석탄을 연소할 때 발생하는 플라이 애시는 과거에는 매립용으로 사용되어 왔으나, 최근에는 콘크리트의 품질과 시멘트 대체를 위한 혼화재료로서 경제적 시공과 산업부산물의 재이용이라는 측면에서 그 활용방안이 연구되고 있다.⁸⁾

한편, 콘크리트 구조물이 대형화됨에 따라 콘크리트의 유동성을 증가시켜 인위적인 다짐이 거의 필요 없고, 내구성을 비롯한 콘크리트의 성능을 향상시킨 초유동 콘크리트가 널리 이용되고 있다.⁵⁾

따라서, 본 연구는 재생굵은골재, 시멘트, 고성능감수제, 쇄석, 천연잔골재와 플라이 애시를 사용하여 슬럼프 플로우가 60 ± 5 cm인 초유동 콘크리트의 압축강도, 조깅인장강도, 휨강도, 초음파진동속도, 동탄성계수등 강도와 비파괴 특성을 비교 분석하여 재생굵은골재를 초유동 콘크리트의 재료로 개발하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

시멘트는 KS F 5201에 규정된 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 1, 2 와 같다.

Table 1 Physical properties of normal Portland cement.

Specific gravity (20°C)	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
	Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	5-7	7-20	19	21	31

Table 2 Chemical compositions of normal Portland cement (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

나. 골재

굵은골재는 충남지역에서 생산되는 쇄석과 재생골재를, 잔골재는 금강유역에서 생산되는 천연골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 3, 4, 5 와 같다.

Table 3 Physical properties of crushed coarse aggregate

Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	F.M	Unit weight (kg/m ³)
5-20	2.61	1.13	6.02	1,448

Table 4 Physical properties of recycled coarse aggregate

Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	F.M	Unit weight (kg/m ³)
5-20	2.2	6.11	6.88	1,214

Table 5 Physical properties of natural fine aggregate

Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	F.M	Unit weight (kg/m ³)
0.6-5	2.61	2.34	2.32	1,476

다. 플라이 애시

플라이 애시는 보령화력발전소에서 부산되는 것을 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학성분은 Table 6, 7과 같다.

Table 6 Physical properties of fly ash

Specific gravity (20°C)	Specific surface (cm ² /g)	Unit weight (kg/m ³)	Grain size (mm)	Color
2.39	3,152	1,072	<0.15	Gray

Table 7 Chemical compositions of fly ash (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ig.loss
59.9	25.2	5.93	0.59	0.09	0.41	4.04	3.84

라. 고성능감수제

콘크리트의 유동성과 강도증진을 위하여 음이온 계면활성제인 나프탈렌 설폰산염을 주성분으로 한 고성능감수제를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table 8과 같다.

Table 8 General properties of superplasticizer

Specific gravity (20°C)	PH	Color	Freezing point (°C)	Principal ingredient	Unit weight (kg/m ³)
1.20	9±1	Dark brown liquid	-2	Naphthalene sulfonate	1,190

2. 시험체 제작

가. 콘크리트 배합

초유동 콘크리트의 배합은 유동성과 강도증진에 중점을 두었으며, 플라이 애시를 사용하여 분체량을 증가시키는 방법을 사용하였다. 목표 슬럼프 플로우가 60 ± 5 cm가 되도록 플라이 애시는 결합재 중량의 10%, 20%, 30%를 치환하였으며, 물-결합재비는 35%로 하였고,⁷⁾ 재생굵은골재는 쇄석의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%를 치환하였으며, 고성능감수제는 결합재 중량의 1.5%를 사용하였고, 슬럼프 플로우는 초유동 콘크리트의 슬럼프 플로우 값인 60 ± 5 cm로 하였으며, 이의 배합설계는 Table 9와 같다.

나. 시험체 제작 및 양생

시험체 제작은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하였으며, 몰드에 타설된 초유동 콘크리트는 24시간 정치 후 탈형하여 소정의 재령

Table 9 Mix design of super flow concrete using recycled coarse aggregate

(Unit: kg/m³)

Mix type	Binder		Fine aggregate	Coarse aggregate		Superplasticizer	Water	W/B (%)
	Cement	Fly ash		Crushed	Recycled			
RSF10-1	476	53	832	832	0	7.9	185	35
RSF10-2				624	208			
RSF10-3				416	416			
RSF10-4				208	624			
RSF10-5				0	832			
RSF20-1	406	101	842	842	0	7.6	178	35
RSF20-2				631	211			
RSF20-3				421	421			
RSF20-4				211	631			
RSF20-5				0	842			
RSF30-1	342	146	850	850	0	7.3	171	35
RSF30-2				638	212			
RSF30-3				425	425			
RSF30-4				212	638			
RSF30-5				0	850			

*RSF : Super flow concrete using recycled coarse aggregate

까지 수증양생 (23±1℃)을 하였다.

3. 시험방법

시험은 KS 와 BS에 규정된 방법에 따라 재령 7 일, 28일, 90일에 실시하였으며, 3회 반복 측정된 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

가. 강도 시험

압축강도는 Ø100×200 mm인 시험체를 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법), 쪼갬인장 강도는 Ø100×200 mm인 시험체를 KS F 2423 (콘크리트의 쪼갬인장강도 시험방법), 휨강도는 60×60×240 mm인 각주형 시험체를 KS F 2407 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 측정하였다.

나. 초음파진동속도 시험

초음파진동속도는 비파괴시험의 일종으로서 75×75×415 mm인 각주형 시험체를 BS 1881 Part 203 (recommendation for the measurement of ultrasonic pulse velocity in concrete)에 준하여 PUNDIT로 측정하여 다음 식으로 산출하였다.

$$P.V = \frac{L}{D \times 10^{-6}}$$

여기서, P.V: 초음파진동속도 (m/s)

D : 측정치 (s)

L : 시험체 길이 (m)

다. 동탄성계수 시험

동탄성계수는 75×75×415 mm인 각주형 시험체를 BS 1881 Part 209 (recommendation for the measurement of dynamic modulus of elasticity)에 준하여 ERUDIT MIKI (resonant frequency test system)로 측정하여 다음 식으로 산출하였다.

$$E.M = DWn^2$$

여기서, E.M: 동탄성계수 (MPa)

D : 408×10⁻⁶ L/b.t (s²/cm²)

W : 시험체 중량 (kg)

n : 측정치 ($\frac{1}{s}$)

L : 시험체 길이 (cm)

b : 시험체 폭 (cm)

t : 시험체 높이 (cm)

III. 결과 및 고찰

1. 압축강도

보통 시멘트 콘크리트와 물리·역학적 성질이 다소 다른 재생골은골재와 플라이 애시를 사용한 초유동 콘크리트의 압축강도는 재생골재의 품질과 사용량에 따라 다르며, 각 배합비에 따른 압축강도를 비교하면 Table 10 및 Fig. 1과 같다.

Table 10 및 Fig. 1에서 보는 바와 같이 초유동 콘크리트의 압축강도는 플라이 애시와 재생골은골재의 사용량에 따라 재령 7일에서는 19.8~28.5 MPa, 재령 28일에서는 22.7~37.5 MPa, 재령 90일에서는 33.9~48.0 MPa 범위를 나타내었으며, 재생골은골재의 사용량이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다.

이와같은 결과는 재생골은골재 자체의 강도가 쇠석에 비하여 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 재생골은골재 사용량에 따른 압축강도는 사용량 증가에 따라 재령 7일에서는 최대 29%, 재령 28일에서는 39%, 재령 90일에서는 28% 감소되었다.

한편, 재령 28일의 압축강도는 각각의 배합에서 22 MPa 이상을 나타내었으며, 플라이 애시를 30% 치환하고 재생골은골재를 75% 치환한 재령 28일에서 28 MPa 이상을 나타내었고, 재령 90일에서

는 전 배합에서 33 MPa를 모두 초과하여, 압축강도면에서 볼 때, 본 시험에 사용한 재생굵은골재를 사용하여도 초유동 콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 플라이 애시 사용량에 따른 강도 변화는 재령초기에는 각각의 배합에서 유사한 강도 변화를 보였으나, 재령이 증가할수록 플라이 애시의 영향에 의해 초유동 콘크리트의 강도증진이 크게 나타나는 경향을 보였으며, 이는 Khatri³⁾의 결과와도 일치한다.

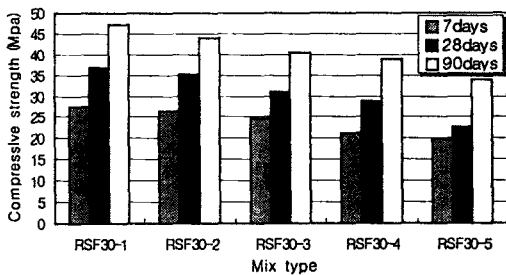
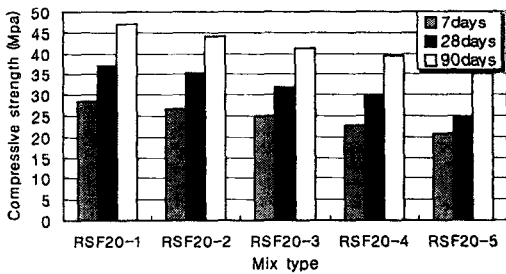
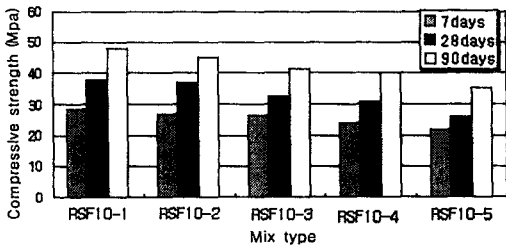


Fig. 1 Comparison of compressive strength by mix type

2. 쪼갬인장강도

재생골재 콘크리트의 경우, 골재의 흡수율이 높아 보통 시멘트 콘크리트에 비하여 동결융해, 건조수축 등 인장강도 발현에 불안정한 양상을 보이기 쉽고, 온도 및 수축응력에 대한 균열감소 등의 파악을 위하여 인장강도의 규명이 요구된다.

Table 10에서 보는 바와 같이 초유동 콘크리트의 쪼갬인장강도는 플라이 애시와 재생굵은골재의 사용량에 따라 재령 7일에서는 2.25~3.04 MPa, 재령 28일에서는 2.65~3.73 MPa, 재령 90일에서는 4.02~4.80 MPa의 범위를 나타내었고, 재생굵은골재 사용량이 증가함에 따라 재령 7일에서는 최대 21%, 재령 28일에서는 25%, 재령 90일에서는 13% 정도 감소되었다. 이는 강도와 밀접한 관계가 있는 단위중량이 작은 재생골재를 사용함으로써, 재령초기에는 강도가 작게 나타났지만 장기재령으로 갈수록 결합재와의 결합이 견고하여 강도의 차이가 작게 나타난 결과라 생각된다.

한편, 재령 28일의 쪼갬인장강도는 각각의 배합에서 2.65 MPa 이상을 나타내었으며, 플라이 애시를 30% 사용하고, 재생굵은골재를 75% 사용한 경우 재령 28일에서 쪼갬인장강도는 3.04 MPa 이상을 나타내었고, 재령 90일에서는 전 배합에서 4.02 MPa를 모두 초과하여, 쪼갬인장강도면에서 볼 때, 본 시험에 사용한 재생굵은골재를 사용하여도 초유동 콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 휨강도

Table 10에서 보는 바와 같이 초유동 콘크리트의 휨강도는 재령 7일에서는 4.31~5.49 MPa, 재령 28일에서는 5.78~6.86 MPa, 재령 90일에서는 7.84~8.92 MPa의 범위를 나타내었으며, 재생굵은골재 사용량이 증가함에 따라 재령 7일과 28일에서 각각 최대 14%, 재령 90일에서는 11% 정도 감소되었다.

Table 10 Strength test results of super flow concrete using recycled coarse aggregate (MPa)

Mix type	Compressive			Splitting tensile			Flexural		
	7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days
RSF10-1	28.5	37.5	48.0	3.04	3.73	4.80	5.49	6.86	8.92
RSF10-2	26.9	36.9	45.0	2.84	3.63	4.61	5.29	6.76	8.73
RSF10-3	26.0	32.4	41.7	2.75	3.43	4.51	5.20	6.57	8.53
RSF10-4	23.9	31.0	40.0	2.55	3.24	4.41	5.00	6.27	8.33
RSF10-5	21.6	25.8	35.4	2.45	2.94	4.22	4.90	6.08	8.04
RSF20-1	28.4	36.9	47.2	2.94	3.63	4.71	5.29	6.76	8.82
RSF20-2	26.7	35.5	44.2	2.75	3.53	4.51	5.09	6.67	8.63
RSF20-3	24.9	31.9	41.2	2.55	3.24	4.41	5.00	6.37	8.43
RSF20-4	22.5	29.9	39.4	2.45	3.14	4.31	4.80	6.08	8.24
RSF20-5	20.7	24.8	35.2	2.35	2.75	4.12	4.61	5.98	7.94
RSF30-1	27.6	36.7	47.0	2.84	3.53	4.61	5.09	6.67	8.73
RSF30-2	26.5	35.2	43.8	2.65	3.24	4.41	4.90	6.57	8.53
RSF30-3	24.6	31.0	40.4	2.45	3.14	4.31	4.71	6.27	8.33
RSF30-4	21.1	28.8	39.0	2.35	3.04	4.22	4.61	5.98	8.14
RSF30-5	19.8	22.7	33.9	2.25	2.65	4.02	4.31	5.78	7.84

한편, 재령 28일의 휨강도는 각각의 배합에서 5.78 MPa 이상을 나타내었으며, 플라이 애시를 30% 사용하고, 재생굵은골재를 75% 사용한 경우도 재령 28일에서 5.98 MPa 이상을 나타내었고, 재령 90일에서는 전 배합에서 7.84 MPa를 모두 초과하여, 휨강도면에서 볼 때, 본 시험에 사용한 재생굵은골재를 사용하여도 초유동 콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 초음파진동속도

초음파진동속도는 시험체내에 pulse를 종방향으로 방사하며 이것이 전달되는 시간으로부터 콘크리트의 품질을 검사하는 비파괴시험의 일종으로서, 수cm에서 수m의 규모에 이르기까지 적용할 수 있다. 또한, 오래된 구조물이나 화재를 입은 구조물의 내구성을 측정할 수도 있으며, 음향기기를 만드는 목재의 재질을 분석하는 데에도 사용하고, 충격하

중, 지진하중에 구속받는 구조물의 응력해석에도 활용하는 등 광범위하게 이용할 수 있으며,¹⁾ 초유동 콘크리트의 초음파진동속도 시험결과를 나타내면 Table 11과 같다.

초음파진동속도는 재령 7일에서 2,958~3,431 m/s, 재령 28일에서 3,103~3,480 m/s, 재령 90일에서 3,240~3,574 m/s의 범위로 나타났으며, 재생굵은골재와 플라이 애시의 사용량이 증가함에 따라 초음파진동속도는 작게 나타났다. 이와 같이 재생굵은골재와 플라이 애시의 사용량이 증가할수록 초음파진동속도가 감소하였는데, 이러한 결과는 재생굵은골재의 표면에 부착되어있는 불순물과 비중이 다른 플라이 애시의 사용량이 증가하여 초음파의 진행속도를 저하시켰기 때문이라 판단된다.

한편, 재령이 증가할수록 초음파진동속도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 콘크리트 수화반응의 진행과 플라이 애시의 포졸란 반응에 의해 콘크리트 내부의 공극이 감소하여 초음파진동속도를 저해

Table 11 Test results of super flow concrete using recycled coarse aggregate

Mix type	Ultrasonic pulse velocity (m/s)			Dynamic modulus of elasticity ($\times 10^4$ MPa)		
	7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days
RSF10-1	3,431	3,480	3,574	4,159	4,521	4,753
RSF10-2	3,370	3,466	3,549	4,071	4,451	4,675
RSF10-3	3,187	3,378	3,439	3,643	3,985	4,290
RSF10-4	3,109	3,324	3,374	3,450	3,861	4,062
RSF10-5	3,050	3,172	3,260	3,249	3,516	3,716
RSF20-1	3,396	3,466	3,555	4,069	4,516	4,745
RSF20-2	3,269	3,384	3,494	3,907	4,256	4,599
RSF20-3	3,174	3,342	3,435	3,618	3,944	4,288
RSF20-4	3,100	3,221	3,363	3,436	3,789	4,059
RSF20-5	2,990	3,112	3,245	3,117	3,456	3,714
RSF30-1	3,304	3,431	3,542	3,900	4,361	4,743
RSF30-2	3,119	3,335	3,466	3,526	3,971	4,427
RSF30-3	3,087	3,264	3,429	3,402	3,782	4,140
RSF30-4	3,062	3,191	3,355	3,320	3,679	3,907
RSF30-5	2,958	3,103	3,240	3,083	3,401	3,711

하는 요인이 감소되었기 때문이라 생각된다.

또한, 재생골은골재 사용량에 따른 초음파진동속도는 사용량 증가에 따라 재령 7일에서는 최대 12%, 재령 28일에서는 11%, 재령 90일에서는 9%정도 감소되었으나, 재령 28일에서 보통 시멘트 콘크리트의 초음파진동속도와 유사한 결과를 나타내어 초유동 콘크리트 제조에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 동탄성계수

동탄성계수는 하중을 가하지 않고 전파를 시험체의 상대편에 방사하여 Hz를 측정하여 동탄성계수를 구하며, 동결융해저항성을 나타내는 내구성지수의 계산, 산, 알칼리 등의 화학약품에 대한 저항성, 화재에 의한 콘크리트의 열화상황 등 콘크리트 성능시험에 사용되는 비파괴시험방법이다.⁶⁾ 초유동 콘크리트의 동탄성계수에 대한 시험결과를 비교하

면 Table 11과 같이, 재령 7일에서의 동탄성계수는 $3.083 \times 10^4 \sim 4.159 \times 10^4$ MPa, 재령 28일에서는 $3.401 \times 10^4 \sim 4.521 \times 10^4$ MPa, 재령 90일에서 $3.711 \times 10^4 \sim 4.753 \times 10^4$ MPa으로 나타났으며, 재생골은골재와 플라이 애시의 사용량이 증가할수록 동탄성계수가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이러한 결과는 천연골재와 시멘트보다 비중이 작은 재생골은골재와 플라이 애시를 사용함으로써 전파의 속도를 저하시켰기 때문이라 판단된다.

또한, 재령이 증가할수록 동탄성계수가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 콘크리트 수화반응의 진행과 플라이 애시의 포졸란 반응에 의해 내부의 공극이 감소되었기 때문이라 생각된다.

한편, 재생골은골재 사용량에 따른 동탄성계수는 사용량 증가에 따라 재령 7일과 28일에서는 각각 최대 24%, 재령 90일에서는 22% 정도 감소되었으나, 초유동 콘크리트 제조에 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 압축강도와 쪼갬인장강도, 휨

강도, 초음파진동속도 및 동탄성계수는 재생굵은골재의 사용량이 증가할수록 각각 11~39% 정도 감소하였다.

본 논문은 2002년도 농림기술개발 사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

IV. 결 론

이 연구는 재생굵은골재를 쇄석의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%, 플라이 애시를 결합재 중량의 10%, 20%, 30%, 고성능감수제를 결합재 중량의 1.5% 사용한 초유동 콘크리트를 개발하여 강도 및 비파괴 특성을 구명하였으며, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축강도는 재령 28일에서 22.7~37.5 MPa 범위로 나타났으며, 재생굵은골재의 사용량이 증가할수록 최대 39% 정도 감소하였으나, 이와 같은 재생굵은골재를 사용하여도 초유동 콘크리트 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

2. 쪼갬인장강도는 재령 28일에서 2.65~3.73 MPa 범위로 나타났으며, 재생굵은골재의 사용량이 증가할수록 최대 25% 정도 감소하였으나, 이러한 재생굵은골재를 사용하여도 초유동 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단된다.

3. 휨강도는 재령 28일에서 5.78~6.86 MPa 범위로 나타났으며, 재생굵은골재 사용량이 증가할수록 최대 14% 정도 감소하였으나, 초유동 콘크리트 강도면에서는 특별한 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 초음파진동속도와 동탄성계수는 재령 28일에서 각각 3,103~3,480 m/s와 $3.401 \times 10^4 \sim 4.521 \times 10^4$ MPa 범위로 나타났으며, 재생굵은골재의 사용량이 증가할수록 각각 최대 11%와 24% 정도 감소하였으나, 초유동 콘크리트 제조에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 재생굵은골재를 75%, 플라이 애시를 30% 사용한 경우에도 초유동 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단되며, 폐기물의 활용과 골재난 해소를 위한 자연환경의 훼손을 경감할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Blake, J. R. A., 1990, Test methods (ultrasonic nondestructive evaluate on techniques for composite materials), *Technomic publishing company*: 57-78.
2. Henrichsen, A., 2000, Use of recycled aggregates in Europe, *International Workshop on Recycled Concrete*: 1-8, JSPS 76 Committee on Construction Materials.
3. Khatri, R. P., 1995, Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of performance concrete, *Cement and Concrete Research* (25): 209-220.
4. Kim, M. H and S. P. Kang., 2003, Technology for reuse of waste concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute* 15(2): 21-29. (in Korean)
5. Lachemi, M., 2001, Self-compacting concrete incorporating high volumes of fly ash preliminary result, *Cement and Concrete Research* (31): 413-420.
6. Malhotra, V. H and N. J. Carino., 1991, Handbook on nondestructive testing of concrete, *CRC Press*: 50-83.
7. Nan, Su., 2001, A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* (31): 1,799-1,807.
8. Sung, C. Y and Y. I. Kim., 2003, Physical and mechanical properties of concrete using recycled aggregate and industrial by-products, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(6): 128-135. (in Korean)
9. Sung, C. Y and S. H. Im., 2004, Freezing and thawing properties of high strength concrete using recycled coarse aggregate, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(2): 59-66. (in Korean)