

재생골재와 산업부산물을 사용한 콘크리트의 물리·역학적 특성

Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Recycled Aggregate and Industrial By-Products

성 찬 용* · 김 영 익**

Sung, Chan Yong · Kim, Young Ik

Abstract

This study is performed to examine the physical and mechanical properties of concrete using recycled aggregate and industrial by-products. The test results show that the unit weight, compressive and flexural strength, ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity are decreased with increasing the content of recycled aggregate. But, the absorption ratio is increased with increasing the content of recycled aggregate.

The unit weight is 2,237~2,307 kg/m³, the absorption ratio is 2.96~4.12%, the compressive strength is 415~532 kgf/cm², the flexural strength is 75~96 kgf/cm², the ultrasonic pulse velocity is 4,350~4,949 m/s and the dynamic modulus of elasticity is 390×10³~465×10³ kgf/cm², respectively

These recycled aggregate concrete can be used for high strength concrete.

Keywords : Recycled aggregate, Industrial by-product, Waste concrete, Recycling, Strengths

I. 서 론

최근 구조물은 고층화, 대형화되고 있는 추세이며 그에 따른 골재수요는 증가하고 있지만, 양질의 천연골재는 점차 고갈되어 가고 있다.⁴⁾

콘크리트 구조물 해체시 막대한 양의 건설폐기물이 발생함에 따라 도시 및 주거환경 파괴의 주범이 되고 있으며, 점차 사회·경제적인 측면에서 큰 문제로 제기되고 있다. 지금까지 건설폐기물은 주로 매립하거나 매립공사에 이용되어 왔지만 기존 매립지가 포화상태가 되고 신규 매립지 선정이 집단민원의 발생등으로 용이하지 않아 그 처리방법에 고심하고 있는 것이 현실이다.

한편, 건설폐기물의 불법투기 및 매립으로 인하여 환경오염을 야기시키고 있으며, 건설폐기물의

* 충남대학교 농업생명과학대학

** 충남대학교 농업과학연구소

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5798

fax: +82-42-825-5791

E-mail address: cysung@cnu.ac.kr

재활용은 자원절약뿐만 아니라 도시주거 환경보호 및 건설재해 방지라는 측면에서 국가·사회적인 문제로 제기되고 있다.

또한, 건설폐기물 중에서도 폐콘크리트가 약 90%로 대부분을 차지하고 있으며, 2000년 현재 약 1,500만톤이었던 폐콘크리트 발생량이 2020년에는 약 1억톤 이상으로 급격히 증가할 것으로 예상되기 때문에 날로 심각해지는 주거환경, 지역환경 및 지구환경파괴에 대한 대책으로서 부가가치가 높고 수요가 많은 폐콘크리트의 재자원화 기술개발 및 실용화 방안이 절실히 요구되고 있다.³⁾

그리고 화력발전소에서 원료로 사용하는 석탄을 연소할 때 발생하는 플라이 애시는 과거에는 매립용으로 사용되어 왔으나 최근에는 콘크리트의 품질과 시멘트 대체를 위한 혼화재료로서 경제적 시공과 산업부산물의 재이용이라는 측면에 그 활용방안이 연구되고 있다.⁶⁾

한편, 일부 선진국에서는 폐콘크리트를 자원의 유효이용 및 환경보전의 차원에서 콘크리트용 골재로 재활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며,¹⁾ 우리나라도 근년에 와서 양질의 천연골재 부족현상의 해소 및 자연생태계의 유지등을 목적으로 콘크리트 기술자들 사이에 폐콘크리트를 콘크리트용 재생골재로 재활용하기 위한 연구에 많은 관심을 나타내고 있다.²⁾

따라서, 본 연구는 재생골재와 산업부산물인 플라이 애시와 고로슬래그 미분말을 활용하기 위하여 재령28일의 압축강도를 400 kgf/cm² 이상의 고강도 재생골재콘크리트를 제조하고, 쇄석을 사용한 보통 시멘트 콘크리트와의 단위중량, 흡수율, 강도, 초음파진동속도 및 동탄성계수를 비교·고찰하여 새로운 건설재료로 개발하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

S회사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Physical properties of normal Portland cement

Specific gravity(20°C)	Setting time(h-min)		Compressive strength (kgf/cm ²)		
	Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	5-7	7-20	194	360	450

Table 2 Chemical composition of normal Portland cement (Unit : %)

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. 플라이 애시

보령산 플라이 애시를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 3, 4와 같다.

Table 3 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 4 Chemical composition of fly (Unit : %)

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

다. 고로슬래그 미분말

국내 제철소의 고로에서 용융상태의 고로슬래그를 급냉하여 입상화한 것을 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학성분은 Table 5, 6과 같다.

Table 5 Physical properties of blast furnace slag powder

Specific gravity (20°C)	Specific surface (cm ² /g)	Unit weight (kg/m ³)	Grain size (mm)	Color
2.92	4.401	1.077	<0.15	White

Table 6 Chemical composition of blast furnace slag powder (Unit : %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	lg.loss
27.85	8.98	50.45	6.98	2.74	2.31	0.69

라. 골재

잔골재는 금강유역에서 채취한 천연모래를, 굵은골재는 쇄석과 I사의 KS규격 1종 재생골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 7과 같다.

Table 7 Physical properties of aggregates

Item	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)
Fine aggregate (natural sand)	<4.75	2.62	0.87	2.66	1.675
Coarse aggregate (crushed aggregate)	4.75 ~20	2.64	1.25	6.72	1.571
Coarse aggregate (recycled aggregate)	4.75 ~20	2.62	1.87	6.49	1.543

마. 고성능 AE감수제

단위수량을 감소하여 콘크리트의 강도를 증진시

키고, 공기량 확보를 위하여 S사의 나프탈렌 포르말린 축합물을 주성분으로 한 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table 8과 같다.

Table 8 General properties of super AE water reducing agent

Specific gravity (20°C)	pH	Color	Water reducing ratio (%)	Setting time		Bleeding quantity ratio (%)
				Initial (min)	Final (h-min)	
1.191	6.61	Dark brown liquid	18.4	453	10-36	56.4

2. 시험체 제작

가. 콘크리트 배합

재생골재와 산업부산물을 사용한 콘크리트의 배합은 재생골재의 사용성과 활용방안을 구명하기 위하여 플라이 애시와 고로슬래그 미분말을 결합재 중량의 20%로 하였으며, 재생조골재는 중량비로 쇄석골재의 0%, 25%, 50%, 75%, 100%를 대체하여 5종으로 하였고, 슬럼프는 보통 레미콘 슬럼프와 유사하게 15±1 cm로 하였다.

또한, 콘크리트의 강도와 내구성 증진 및 공기량 (4.5±0.5%) 확보를 위하여 고성능 AE감수제를 결합재 중량의 1%를 사용하였으며, 재령28일 목표 압축강도가 고강도인 400 kgf/cm² 이상이 되도록 Table 9와 같이 배합설계를 하였다.

나. 시험체 제작 및 양생

시험체 제작은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 잔골재와 굵은골재를 혼합한 다음 시멘트와 혼화재를 투입하고 건비빔을 30초간 실시한 후 물을 1차 투입하여 1분간 믹싱하고, 물과 고성능 AE감수제를 2차 투입하여 1분간 90 rpm으로 혼합하여 시험체를 제작하였으며, 몰드에 타설된 콘크리트는 양생상자(21°C, 습도 96±2%)

Table 9 Mix design of concrete using recycled aggregate and industrial by-product

Mix type	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)								Super AE water reducing agent
			Water	Binder	Cement	Fly ash	Blast furnace slag powder	Sand	Crushed gravel	Recycled gravel	
RGF1	35	39	170	486	389	97	-	650	1024	-	4.86
RGF2	35	39	170	486	389	97	-	650	768	256	4.86
RGF3	35	39	170	486	389	97	-	650	512	512	4.86
RGF4	35	39	170	486	389	97	-	650	256	768	4.86
RGF5	35	39	170	486	389	97	-	650	-	1024	4.86
RGB1	35	39	170	486	389	-	97	650	1024	-	4.86
RGB2	35	39	170	486	389	-	97	650	768	256	4.86
RGB3	35	39	170	486	389	-	97	650	512	512	4.86
RGB4	35	39	170	486	389	-	97	650	256	768	4.86
RGB5	35	39	170	486	389	-	97	650	-	1024	4.86

* RGF : Concrete using recycled aggregate and fly ash

RGB : Concrete using recycled aggregate and blast furnace slag powder

에서 24시간 정치 후 탈형하여 소정의 재령까지 수증양생(21±1℃)을 하였다.

3. 시험방법

시험은 KS 와 BS에 규정된 방법에 따라 재령 28일에 실시하였으며, 3회 반복 측정된 것의 평균 값을 실험 결과치로 하였다.

가. 단위용적중량 시험

단위용적중량은 $\phi 10$ cm×20 cm인 시험체를 표면건조포화상태에서의 중량과 체적을 측정하여 산출하였다.

나. 흡수율 시험

흡수율은 $\phi 10$ cm×20 cm인 시험체를 표면건조포화상태에서의 중량과 105±5℃의 건조기에서 24시간 건조 후 중량을 측정하여 산출하였다.

다. 압축강도 시험

압축강도는 $\phi 10$ cm×20 cm인 시험체를 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 측정하였다.

라. 휨강도 시험

휨강도는 6 cm×6 cm×24 cm인 각주형 시험체를 KS F 2407(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 측정하였다.

마. 초음파진동속도 시험

초음파진동속도는 7.6 cm×7.6 cm×41.2 cm인 각주형 시험체를 BS 1881 Part 203 (recommendation for the measurement of ultrasonic pulse velocity in concrete)에 준하여 PUNDIT 로 측정하여 다음식으로 산출하였다.

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

여기서, P.V = 초음파진동속도 (m/s)
 D = 측정치 (s)
 L = 시험체 길이 (m)

바. 동탄성계수 시험
 동탄성계수는 7.6 cm×7.6 cm×41.2 cm인 각 주형 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.

$$E_D = DWn^2$$

여기서, E_D = 동탄성계수 (kgf/cm²)
 D = 408×10⁻⁵ L/b·t (s²/cm²)
 W = 시험체 중량 (kgf)
 n = 측정치 ($\frac{1}{S}$)
 L = 시험체 길이 (cm)
 b = 시험체 폭 (cm)
 t = 시험체 높이 (cm)

III. 결과 및 고찰

1. 단위용적중량

콘크리트의 단위용적중량은 압축강도와 탄성계수 등 역학적 성능과 밀접한 관련이 있는 물리적 특성 중 하나로서 본 시험에서 얻은 결과는 Table 10과 같다.

Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 단위용적중량은 감소하였으며, 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 단위용적중량은 2,237~2,271 kg/m³의 범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 단위용적중량은 2,261~2,295 kg/m³의 범위로 나타나 재생골재를 사용하지 않은 콘크리트의 단위용적중량 2,283과 2,307 kg/m³에 비하여 각각 작게 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트보다 1% 정도 단위용적중량이 더 크게 나타났다. 이와같이 플라이 애시가 고로슬래그 미분말보다 단위용적중량 감소에 영향을 더 크게 미치는 것으로 나타났는데, 이와 같은 단위용적중량 감소원인은 쇄석보다 재생

Table 10 Test results of concrete using recycled aggregate and industrial by-products

Mix type	Unit weight (kg/m ³)	Absorption ratio (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Flexural strength (kgf/cm ²)	Ultrasonic pulse velocity (m/s)	Dynamic modulus of elasticity (×10 ³ kgf/cm ²)
RGF1	2,283	3.75	478	86	4,841	433
RGF2	2,271	3.91	469	84	4,640	416
RGF3	2,260	3.98	453	82	4,543	407
RGF4	2,248	4.05	427	77	4,447	399
RGF5	2,237	4.12	415	75	4,350	390
RGB1	2,307	2.96	532	96	4,949	465
RGB2	2,295	3.08	517	93	4,741	447
RGB3	2,282	3.14	489	88	4,643	437
RGB4	2,272	3.20	486	87	4,543	429
RGB5	2,261	3.26	478	86	4,445	419

골재의 단위용적중량이 작고, 고로슬래그 미분말이 플라이 애시의 단위용적중량보다 상대적으로 더 크기 때문이라 생각된다. 또한, 재생골재의 사용량에 따라 2% 정도 단위용적중량이 감소되어 운반 및 작업성에 다소나마 도움이 될 것으로 생각된다.

2. 흡수율

Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 흡수율은 3.91~4.12%의 범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 흡수율은 3.08~3.26%의 범위로 나타나 재생골재를 사용하지 않은 콘크리트의 흡수율 3.75 및 2.96%에 비하여 각각 크게 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트보다 흡수율이 21%정도 작게 나타났는데, 이는 고로슬래그 미분말이 플라이 애시보다 비표면적이 더 크기 때문이라 판단된다. 또한, 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 흡수율이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 쇄석보다 재생골재의 흡수율이 50% 정도 더 크기 때문이라 생각된다.

3. 압축강도

보통 시멘트 콘크리트와 역학적 성질이 다소 다른 재생골재와 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 재생골재의 품질과 사용량에 따라 다르며, 각 배합비에 따른 압축강도를 비교하면 Table 10과 같다.

Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 압축강도는 감소하였으며, 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 압축강도는 415~469 kgf/cm²의 범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 478~517 kgf/cm²의 범위로서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한

콘크리트의 압축강도보다 8~15% 정도 크게 나타났다.

또한, 재생골재 콘크리트는 재생골재를 사용하지 않고 쇄석과 플라이 애시를 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 압축강도 478 kgf/cm²와 쇄석과 고로슬래그 미분말을 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 압축강도 532 kgf/cm²에 비해 각각 최대 13%와 10% 정도 감소되었으나 목표강도 400 kgf/cm²를 모두 초과하여 시험에 이용한 재생골재를 사용해도 고강도 콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 휨강도

Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 휨강도는 감소하였으며, 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 휨강도는 75~84 kgf/cm² 범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 휨강도는 86~93 kgf/cm²의 범위로서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 휨강도보다 7~15% 정도 크게 나타났다.

또한, 재생골재 콘크리트는 재생골재를 사용하지 않고 쇄석과 플라이 애시를 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 휨강도 86 kgf/cm²와 쇄석과 고로슬래그 미분말을 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 휨강도 96 kgf/cm²에 비해 각각 최대 13%와 10% 정도 감소되었는데, 이는 단위용적중량이 재생골재가 쇄석보다 작기 때문이라 생각된다.

5. 초음파진동속도

초음파진동속도시험은 시험체내에 pulse를 종방향으로 방사하여 이것이 전달되는 시간으로부터 품질을 검사하는 비파괴시험의 일종으로서, 시험체의 밀도, 공극, 균열 등의 분석과 음향기기를 만드는 목재의 재질을 분석하는 데에도 이용된다. 음속에

영향을 미치는 것은 발신자측에서는 pulse의 진폭, 케이블 길이, 수신자측에서는 시험체의 표면상태나 케이블 길이, 증폭기의 성능, 시험체에서는 전과거리, 시험체의 성숙도, 함수량, 밀도 등이다.⁷⁾

초음파진동속도는 Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 감소하였으며, 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 초음파진동속도는 4,350~4,640 m/s 범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 초음파진동속도는 4,445~4,741 m/s의 범위로서, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트보다 초음파진동속도가 2% 정도 크게 나타났는데, 이는 플라이 애시보다 고로슬래그 미분말이 비표면적이 커서 콘크리트를 치밀하게 만든 결과라 하겠다.

또한, 재생골재 콘크리트는 재생골재를 사용하지 않고 쇄석과 플라이 애시를 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 초음파진동속도 4,841 m/s와 쇄석과 고로슬래그 미분말을 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 초음파진동속도 4,949 m/s에 비해 다같이 10% 정도 감소되었는데, 이는 재생골재의 단위용적중량이 쇄석보다 작기 때문이라 할 수 있다.

6. 동탄성계수

동탄성계수시험은 전혀 하중을 가하지 않고 전파를 공시체의 상대면에 방사하여 측정된 주파수로 동탄성계수를 구하는 방법으로, 화재에 대한 콘크리트의 열화상황등 콘크리트의 성능시험에 사용되며, 대체적으로 탄성계수가 크면 강도가 크게 나타난다는 것을 의미한다.⁵⁾

동탄성계수는 Table 10에서 보는 바와 같이 재생골재의 사용량이 증가함에 따라 감소되었으며, 재생골재와 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 동탄성계수는 $390 \times 10^3 \sim 416 \times 10^3$ kgf/cm²범위이고, 재생골재와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트

의 동탄성계수는 $419 \times 10^3 \sim 447 \times 10^3$ kgf/cm²범위로서 재생골재를 사용하지 않고 플라이 애시를 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 동탄성계수 433×10^3 kgf/cm²과 고로슬래그 미분말을 결합재 중량의 20%를 사용한 콘크리트의 동탄성계수 465×10^3 kgf/cm²에 비해 다같이 10% 정도 감소되었으며 초음파진동속도와 유사한 결과를 나타내었다.

한편, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동탄성계수가 플라이 애시를 사용한 콘크리트보다 7% 정도 크게 나타났는데, 이는 고로슬래그 미분말의 비표면적이 플라이 애시보다 크기 때문이라 하겠다.

IV. 결 론

이 연구는 재생골재와 산업부산물을 사용한 콘크리트의 물리·역학적 특성을 구명한 것으로서, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단위용적중량은 2,237~2,295 kg/m³의 범위로 나타났으며, 재생골재의 사용량이 증가할수록 단위용적중량은 감소하는 경향을 나타내었다.
2. 흡수율은 2.96~4.12%의 범위로 나타났으며, 재생골재의 사용량이 증가할수록 흡수율은 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 압축강도는 415~517 kgf/cm²의 범위로 나타났으며, 재생골재의 사용량이 증가할수록 압축강도는 감소하였으나, 재생골재를 사용하여도 고강도 콘크리트 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
4. 휨강도는 75~93 kgf/cm²의 범위로 나타났으며, 재생골재의 사용량이 증가할수록 휨강도는 감소하였고, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트의 휨강도보다 7~15% 정도 크게 나타났다.
5. 초음파속도는 4,350~4,741 m/s, 동탄성계수는 $390 \times 10^3 \sim 447 \times 10^3$ kgf/cm²의 범위로 나타났으며, 재생골재의 사용량이 증가할수록 다같이

10% 정도 감소하였고, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 플라이 애시를 사용한 콘크리트보다 초음파진동속도는 2% 정도, 동탄성계수는 7% 정도 크게 나타났다.

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 부설 "석재복합 신소재 제품 연구 센터"의 지원에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

References

1. Henrichsen. A., 2000, Use of recycled aggregates in Europe, *International Workshop on Recycled Concrete*, 1-8. JSPS 76 Committee on Construction Materials
2. Kim, J. M., S. H. Lee and H. D. Yun., 2003, Recycling of waste concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(2) : 14-20. (in Korean)
3. Kim, M. H and S. P. Kang., 2003, Technology for reuse of waste concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(2) : 21-29. (in Korean)
4. Lee, S. H and C. H. Seo., 2001, Properties of high strength recycled aggregate concrete, *Jornal of the Korea Concrete Institute*, 13(6) : 575-583. (in Korean)
5. Malhotra, V. H and N. J. Carino., 1991, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 50-83. CRC Press,
6. Sung. C. Y., S. H. Lee and C. S. Song., 2000, Experimental study on physical and mechanical properties of concrete with fly ash, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 45(3) : 107-113. (in Korean)
7. Swamy, R. N and A. H. Al-Hamed., 1984, The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air dried cubes and hence in situ strength of concrete, *Journal of the ACI*, 81(2) : 247-276.