

폐활성탄을 사용한 다공성 콘크리트의 물리·역학적 성질

Physical and Mechanical Properties of Porous Concrete Using Waste Activated Carbon

윤준노* · 성찬용**† · 김영익*

Youn, Joon No* · Sung, Chan Yong**† · Kim, Young Ik*

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the physical and mechanical properties of porous concrete using waste activated carbon. Material used were ordinary portland cement, recycled coarse aggregate, waste activated carbon and superplasticizer. The replacement ratios of waste activated carbon were 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9, and 10 %. The void ratio was decreased and ultrasonic pulse velocity was increased with increasing the waste activated carbon powder, respectively. The compressive strength and flexural strength of porous concrete using waste activated carbon powder were in the range of 8.21~16.58 MPa and 1.69~3.68 MPa, respectively. The pH degree of porous concrete in 1day and 77days were shown in 12.50~12.63 and 10.21~10.70, respectively. Accordingly, waste activated carbon can be used for porous concrete material.

Keywords: Waste activated carbon; void ratio; ultrasonic pulse velocity; strength; pH

1. 서 론

현대 건설산업에서 콘크리트는 중요한 건설재료로 많이 사용되고 있으나, 콘크리트 제조시에 많은 자원과 에너지가 소비되고, 특히 주요재료인 시멘트는 제조시 지구 온난화의 원인인 CO₂를 다량으로 배출하게 되며, 포틀랜드시멘트 1톤을 제조하는 데에 CO₂가 약 800~1,000kg을 배출하며 (Mun et al., 2006), 시멘트 산업에서의 환경부하량이 매우 높아 시멘트 사용의 저감이 필요하다.

또한, 콘크리트 구조물이 성능 저하로 철거, 폐기 되고 있으며, 이렇게 발생하는 폐기물의 처리는 주로 매립에 의존해 왔으나, 처리장의 부족과 각종 규제 강화로 처리에 어려움을 겪고 있으며, 천연골재 생산지가 공사현장으로 부터 점차 원거리

화되고 있으며, 수송비용도 상승되고 있다 (Park et al., 2006).

환경문제가 사회적으로 크게 대두되면서 환경보존에 대한 인식이 확산됨에 따라 오랫동안 토목 및 건축공사의 가장 대표적인 재료로 인식되어 온 콘크리트에 대해 환경친화적인 재료로 전환시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Sung, 1998). 이와 같은 연구에는 산업부산물과 폐기물을 이용한 시멘트 대체재에 대한 연구가 있다 (Fintel, 1985; Sung et al., 1998). 또한 건설폐기물에서 순환골재에 대한 연구가 진행중에 있으며, 활성탄의 사용성에 대한 연구도 이러한 연구의 일환으로 수행되고 있다 (Woo, 2006).

한편, 수질환경과 오염물질의 정화를 위한 활성탄이 공업적으로 생산되어 화학공업의 급속한 발전과 함께 대기오염, 수질오염, 악취 등의 공해방지, 환경보존, 상하수도 처리 등 폭넓은 분야에 걸쳐 없어서는 안 될 중요한 위치를 차지하고 있으며 (Hassler, 1974), 이러한 이유로 그 양은 매년 증가하고 있어 폐활성탄이 시멘트의 일부 대체재로 활용성이 기대되고 있다 (Choi et al., 2000; Woo, 2006).

한편, 최근 우리나라는 집중호우에 큰 피해를 겪거나, 가뭄에 생활용수 부족을 겪고 있는데, 이는 우수에 대한 관리가 하천으로 유출시키는 관점에서 시작하였기 때문이다. 빗물은 일시

* 충남대학교 객원 연구원

** 충남대학교 농업생명과학대학

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

Fax: +82-42-821-8877

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

2009년 5월 28일 투고

2009년 7월 10일 심사완료

2009년 7월 24일 게재확정

에 하천으로 흘러 들어가고 따라서 하천을 중심으로 댐을 만들고, 제방을 높이는 등의 관리를 해 왔다. 하지만 이러한 관리 관점을 비가 내린 자리에 빗물을 모아 천천히 내려가게 하거나 지하로 침투하도록 하여 빗물이 한꺼번에 하천에 모여들지 않아 하천의 부담을 적게 하고, 지하수위를 높여 가뭄에 도움을 줄 수 있도록 전환하여 한다 (Han et al., 2003). 이러한 관리 관점의 전환을 하기 위한 토목구조물로서 다공성 콘크리트가 적합할 것으로 판단된다.

다공성 콘크리트는 내부의 연속 공극률에 의한 우수의 저류나 토양 침투를 가능하게 하고, 식물이 생육할 수 있는 환경을 제공할 수 있게 되어 친환경적 건설구조물로 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구는 시멘트, 순환 굼은골재와 폐활성탄을 혼입한 다공성 콘크리트를 제작하여 공극률, 초음파진동속도, 강도 및 pH를 측정하여 물리·역학적 성질을 구명하여, 실용적인 다공성 콘크리트의 개발 및 제조에 사용하기 위한 기초자료를 수립하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

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

Table 1 Physical properties of ordinary portland cement

Specific gravity (20°C)	Specific surface area (cm ² /g)	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)			Unit weight (kg/m ³)
		Initial	Final	3days	7days	28days	
3.15	3,240	5-7	7-20	19	21	32	1,329

Table 2 Chemical composition of ordinary portland cement (Unit : wt. %)

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

Table 3 Physical properties of aggregate

Item	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	F.M	Unit weight (kg/m ³)
Recycled coarse aggregate	5 - 10	2.62	1.87	6.49	1,562

나. 골재

굼은골재는 경기도 I사에서 제조된 콘크리트 폐기물을 재활용한 1종 재생골재를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

다. 폐활성탄

시멘트의 일부 대체로 사용한 폐활성탄은 수질정화용으로 사용된 충남 부여군 H사에서 수집된 것을 사용하였으며, 그 물리적 성질 및 화학성분은 Table 4와 같다.

라. 고성능 감수제

콘크리트의 강도 증진과 유동성 확보를 위하여 음이온 계면활성제인 나프탈렌 설폰산염을 주성분으로 하는 고성능 감수제를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table 5와 같다.

2. 시험체 제작

가. 콘크리트 배합

일반콘크리트의 배합은 시멘트, 물, 잔골재, 굼은골재 및 혼화제로 이루어지지만, 다공성콘크리트의 배합은 공극을 확보하기 위하여 잔골재를 사용하지 않는 경우가 많기 때문에 강도와 연속공극을 어떻게 균형있게 확보하는가가 중요하다 (Sung, 1997). 따라서 다공성 콘크리트는 소정의 성능을 얻기 위하여 공극의 형성과 재료분리가 일어나지 않도록 충분한 예비실험이 필요하다. 본 실험의 배합은 강도와 공극을 고려하며 폐활성탄의 사용량에 역점을 두었으며, 폐활성탄의 사용량은 시멘트 체적에 대하여 1 %씩 대체하여 10 %까지 11종류, 목표 공극률은 20 %, 물-시멘트비는 20 %로 하였고 강도증진과 유동성 확보를 위하여 고성능감수제를 결합재 중량의 1.0 %를 첨가하였으며, 이의 배합설계는 Table 6과 같다.

Table 4 Physical properties and chemical composition of waste activated carbon

Physical properties				Chemical composition (%)		
Specific gravity (20°C)	Size (mm)	Unit weight (kg/m ³)	Color	CaCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1.39	< 0.6	0.544	Black	93.25	6.41	0.34

Table 5 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 sulphonate	1,190

Table 6 Mix design of porous concrete using waste activated carbon (Unit : kg/m³)

Mix type	Aggregate size (mm)	Cement	WACP	Water	Recycled coarse aggregate	SP	W/B (%)
PWA0	5 - 10	386.5	0	77.3	1,572	3.9	20.0
PWA1		382.6	1.7	76.9	1,572	3.8	
PWA2		378.8	3.4	76.4	1,572	3.8	
PWA3		374.9	5.1	76.0	1,572	3.8	
PWA4		371.0	6.8	75.6	1,572	3.7	
PWA5		367.2	8.5	75.1	1,572	3.7	
PWA6		363.3	10.2	74.7	1,572	3.7	
PWA7		359.4	11.9	74.3	1,572	3.7	
PWA8		355.6	13.6	73.8	1,572	3.7	
PWA9		351.7	15.3	73.4	1,572	3.7	
PWA10	347.9	17.0	73.0	1,572	3.6		

*PWA : porous concrete using waste activated carbon content 0-10%
 *WACP : waste activated carbon powder
 *W/B : water/(cement + waste activated carbon)
 *SP : superplasticizer

나. 시험체 제작 및 양생

시험체 제작은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 강제식 펜믹서를 사용하여 굵은골재를 혼합한 다음 결합제를 투입하여 건비빔을 30초간 실시한 후 물을 1차 투입하여 60초간 혼합하고, 물과 고성능감수제를 2차 투입하여 30초간 90 r.p.m으로 혼합하였으며, 몰드에 타설된 시험체는 24시간 정치 후 탈형하여 소정의 재령까지 20±2 °C로 수증양생을 하였다.

3. 시험방법

시험방법은 KS와 BS에 규정된 방법에 준하여 실시하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

가. 공극률시험

다공성 콘크리트의 공극률 측정은 일본콘크리트공학협회에 코콘크리트연구위원회의 『포러스 콘크리트의 공극률 시험방법(안)』중 용적법 (Japan Concrete Institute, 1995)에 준하여, 다음 식으로 산출하였다.

$$V_r = \left\{ 1 - \frac{W_2 - W_1}{V} \right\} \times 100 \quad (1)$$

여기서, V_r : 공극률 (%)

W_1 : 공시체의 수증중량 (g)

W_2 : 24시간 자연방치 후 기건중량 (g)

V : 시험체의 용적 (cm³)

나. 초음파진동속도시험

초음파진동속도시험은 BS 4408 (콘크리트의 초음파진동속도 측정방법)에 준하여 영국 C.N.S 사의 PUNDIT를 이용하여 시험체의 전파시간을 측정하여, 다음 식으로 산출하였다.

$$P_V = \frac{L}{D \times 10^{-6}} \quad (2)$$

여기서, P_V : 초음파진동속도 (m/s)

D : 측정치 (sec)

L : 시험체길이 (m)

다. 강도시험

다공성콘크리트의 압축강도시험은 $\phi 100 \times 200$ mm의 시험체를 제작하여 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 재령7일과 재령28일에 측정하였으며, 휨강도시험은 60×60×240 mm의 시험체를 제작하여 KS F 2407 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여, 재령28일에 측정하였다.

라. pH 측정시험

5×5×5 cm 시험체를 시험체 부피 5배의 증류수에 1일간 침지하여 밀봉한 후 pH를 측정하여 비교하였으며, pH 시험장치는 유리전극과 비교전극으로 구성된 것을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공극률

폐활성탄을 사용한 각 배합에 따른 공극률시험의 결과를 나타내면 Table 7과 같고, 도시하면 Fig. 1과 같다.

다공성 콘크리트의 공극에는 전공극과 연속공극이 있다. 전공극은 다공성 콘크리트 안에 존재하는 모든 공극이고, 연속공극은 전공극에서 독립기포를 제외한 공극이다. 배합설계시 공극률은 전공극으로 설계되지만 투수능력 등 다공성 콘크리트의 주요한 기능들은 연속공극률에 의해 결정된다.

배합에 따른 목표공극률과 실측공극률과의 차이는 최대 2.18% 이내인 것으로 나타나 배합설계시 계획했던 목표치를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 7과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폐활성탄을 사용한 다공성 콘크리트의 공극률은 폐활성탄을 사용하지 않은 PWA0에 비하여 0.25~1.46% 정도 감소하는 것으로 나타나, 폐활

Table 7 Test results of porous concrete using waste activated carbon powder

Mix type	Void ratio (%)	Pulse velocity (m/s)	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)
			7days	28days	28days
PWA0	19.28	3,466	11.08	15.27	3.21
PWA1	19.03	3,488	11.69	15.79	3.57
PWA2	18.98	3,593	12.26	16.58	3.68
PWA3	18.68	3,800	11.63	15.72	3.33
PWA4	18.37	3,884	10.85	14.57	3.15
PWA5	18.33	4,227	10.59	13.42	2.98
PWA6	18.22	4,250	10.25	12.76	2.61
PWA7	18.20	4,263	8.37	10.41	2.58
PWA8	18.17	4,367	7.56	9.28	1.99
PWA9	17.84	4,366	6.96	8.52	1.70
PWA10	17.82	4,282	6.73	8.21	1.69

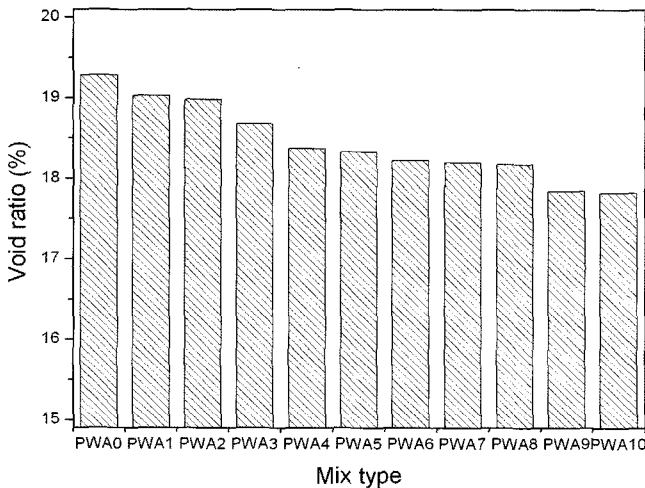


Fig. 1 Comparison of void ratio of porous concrete using waste activated carbon powder

성탄 분말의 사용에 따른 공극률의 감소가 미미하다고 할 수 있는데, 이는 폐활성탄 분말이 시멘트 체적에 따라 대체되어 사용되었기 때문이라 할 수 있다.

한편, 폐활성탄 분말의 사용에 따른 공극률의 미소한 변화는 분말도가 시멘트에 비해 높은 활성탄분말이 시멘트 페이스트를 형성하는 과정에서 점성을 증가시켜 골재의 피복 두께를 증가시켰기 때문이라 생각되며, 이는 기존의 연구 결과와 유사하다 (Sung, 1997; Sung et al., 2002; Sung et al., 2003).

Fig. 2은 수증양생된 시험체 중 공극률이 거의 비슷한 시험체를 꺼내 24시간동안 일정시간별 중량과 105±5 °C로 1일 동안 건조시킨 후 절대건조상태의 중량을 측정하여 시험체별 수분 보유량의 변화 (Fig. 2 (a))와 그 변화율 (Fig. 2 (b))을

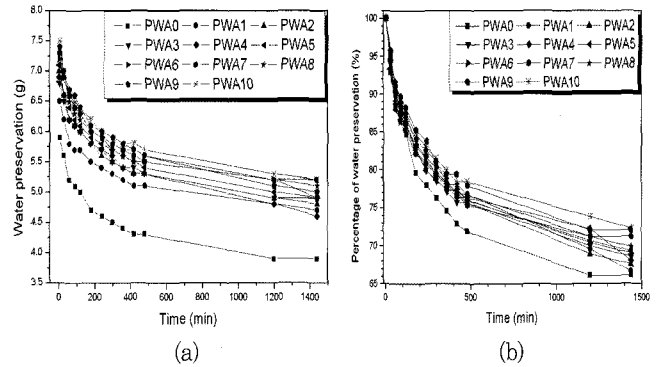


Fig. 2 Variation of water preservation according to the mix type

나타낸 것이다. 폐활성탄 분말을 사용하지 않은 PWA0는 초기 포함하고 있는 수분의 양이 폐활성탄을 사용한 시험체에 비해 적은 것으로 나타났으며, 폐활성탄 분말의 사용량이 증가함에 따라 수분의 보유량도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 시간에 따른 수분의 보유율도 폐활성탄의 사용율이 증가 할수록 높게 나타났다.

이는 동일한 공극률에서 폐활성탄의 사용 증가가 수분을 더욱 오랫동안 보유하고 있을 수 있는 것을 나타내는 것으로 수분의 단기간 유출을 억제할 수 있을 것으로 생각되며, 식물 생육 등과 같은 다공성 콘크리트의 역할을 하는데 있어서 유리하게 작용할 것으로 생각된다.

2. 초음파진동속도

일반적으로 사용되고 있는 초음파속도법은 펄스 전송시간을 측정하는 방법으로 발신자로부터 발신된 초음파가 수신자에 도달할 때까지의 시간차를 구하고, 전파거리를 시간차로 나누어 매체에서의 전파속도를 산출하게 된다. 이 방법은 콘크리트의 매질 상태에 따라 발신된 초음파 신호의 산란 정도가 달라진다.

정상 콘크리트 시험체의 경우 초음파는 산란이 적고 가장 짧은 경로로 전파하게 되며, 내부 공극이나 균열이 있는 콘크리트 시험체의 경우 산란이 심해지며 정상 시험체보다 경로가 길어지게 된다. 이러한 원리를 활용하면 다공성 콘크리트의 내부 공극률을 평가하는 방법으로 유효하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 폐활성탄 분말의 사용량이 증가 할수록 초음파진동속도는 4~26 % 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 폐활성탄 분말의 증가에 따라 공극이 감소한 결과라 할 수 있다.

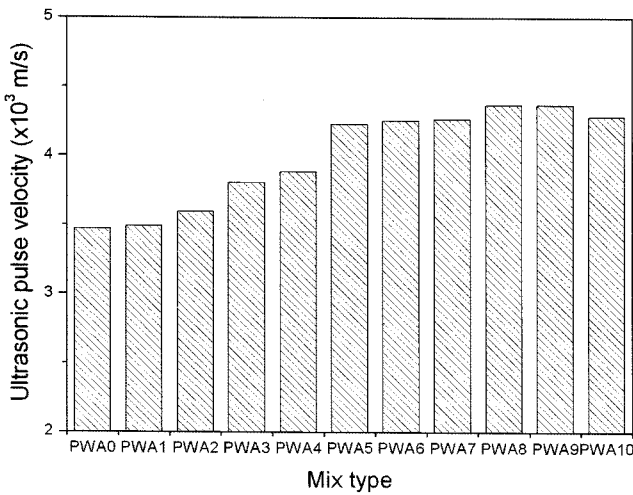


Fig. 3 Comparison of ultrasonic pulse velocity of porous concrete using waste activated carbon powder

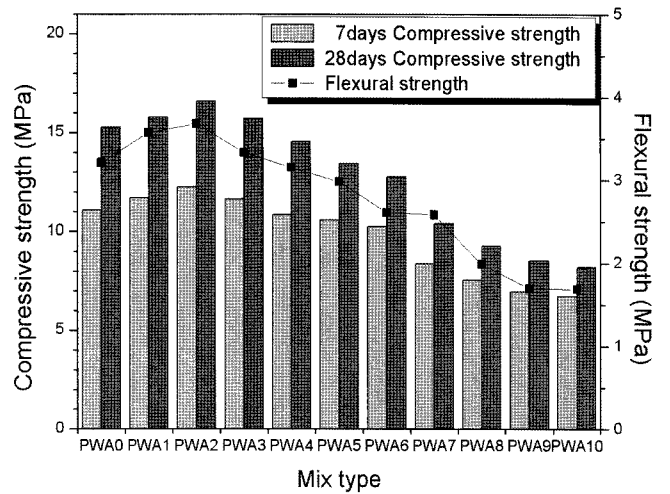


Fig. 5 Comparison of strength of porous concrete using waste activated carbon powder

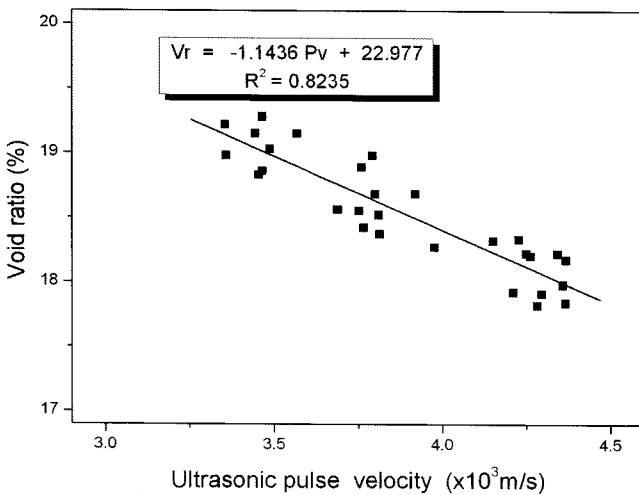


Fig. 4 Relationship between void ratio and ultrasonic pulse velocity

Fig. 4는 실험에서 측정된 초음파진동속도와 공극률의 관계를 나타낸 것으로 다공성 콘크리트의 초음파진동속도가 증가할수록 공극률은 감소하는 것으로 나타났으며 이는 다른 연구자들의 결과와 유사하다 (Sung et al., 2002). 또한, 폐활성탄 분말을 사용한 시험체에서의 초음파진동속도와 공극률의 상관식에 대한 결정계수 (R^2)는 0.8235로 비교적 높은 상관성을 보이고 있어 초음파진동속도의 측정에 의한 다공성 콘크리트 내부 공극률을 추정하는 방법이 가능할 것으로 판단된다.

3. 강도

다공성 콘크리트의 압축강도는 공극의 크기뿐만 아니라 공극률과 밀접한 관계가 있으며, 동일한 공극률인 경우 공극의 크

기가 작을수록, 공극의 크기가 동일한 경우 공극률이 작을수록 강도면에 유리하다.

또한, 공극의 크기와 공극률은 골재의 크기 및 입도 분포와 밀접한 관계가 있어 골재의 크기가 작을수록 공극의 크기는 작고, 골재의 입도분포가 양호할수록 공극률이 적어지므로 압축강도는 클 것으로 생각된다.

한편, 보통 시멘트 콘크리트가 시멘트 페이스트와 굵은골재 및 잔골재 등의 결합으로 인하여 강도 발현을 하는 것에 비해, 다공성 콘크리트는 공극형성을 위하여 골재 주위를 시멘트 페이스트가 피복하여 굵은골재 간의 맞물림에 의하여 강도 발현을 하기 때문에 골재를 피복하는 시멘트 페이스트의 피복과 맞물림 정도가 압축강도 발현에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다 (Sung et al., 2002; Sung et al., 2003).

Table 7과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 폐활성탄을 사용한 다공성 콘크리트의 각 배합에 따른 압축강도는 재령 7일에서 6.73~12.26 MPa, 재령 28일에서 8.21~16.58 MPa로 나타났으며, 폐활성탄 분말을 2% 사용한 다공성 콘크리트의 압축강도가 가장 크게 나타났는데, 이는 분말화된 폐활성탄의 주성분이 콘크리트의 초기강도 발현에 효과가 있는 탄산칼슘 ($CaCO_3$)으로 대부분 이루어져 있으며, 시멘트 페이스트의 형성과정에서 점성을 증가시켜 골재의 피복두께를 증가시켜 골재와 골재의 부착성을 증가 시켰기 때문이라 판단된다. 또한, 폐활성탄 분말을 3% 사용한 PWA3에서 폐활성탄 분말을 사용하지 않은 시험체와 비슷한 강도를 보여 다공성 콘크리트에서의 폐활성탄 분말의 사용은 3% 정도가 적절할 것으로 생각된다.

또한, 휨강도는 2.69~4.68 MPa의 범위로 나타났으며, 압축강도에서와 같이 폐활성탄 분말을 2% 사용한 다공성 콘크

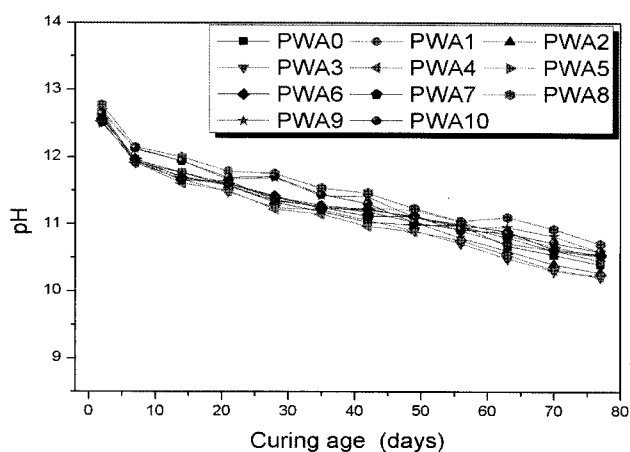


Fig. 6 Variation of pH according to the mix type

리트에서 휨강도가 가장 크게 나타났으며, 전체적인 휨강도의 경향은 압축강도와 유사하게 나타났다.

4. pH

물질의 산성 또는 알칼리성을 판단하기 위해 일반적으로 용액속의 수소이온농도를 측정하는데 수소이온농도는 용액에 따라 대단히 큰 차이를 보이기 때문에 이를 상용로그를 이용해서 수소이온지수 (pH)로 바꾸어 1~14까지의 수로 나타내며, pH가 7이하면 산성, pH가 7 이상이면 알칼리성을 나타낸다.

Fig. 6은 폐활성탄 분말을 사용한 시험체의 pH 변화를 나타낸 것으로 폐활성탄이 사용되지 않은 시험체와 폐활성탄 분말을 혼입한 시험체의 pH 변화는 거의 비슷하게 감소하는 것으로 나타났다 (Sung et al., 2002). 이러한 경향은 수화반응 시 생성되는 수산화칼슘의 알칼리 이온이 물 분자에 의해 분해되면서 용출되는 정도가 비슷하다는 것이며, 식생 등의 용도로 사용되는 경우에는 중성화 처리를 실시하여야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 콘크리트의 식생 등을 통한 환경부하 저감과 우수의 저류와 침투를 통한 우수 활용을 증대시키기 위하여 시멘트 대체제로 폐활성탄 분말을 사용하고, 건설폐기물에서 생산된 순환 굵은골재를 사용한 다공성 콘크리트의 공극률, 초음파 진동속도, 압축강도, 휨강도 및 pH 등의 시험을 실시하였으며, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 공극률은 17.82~19.28 %의 범위로 나타났으며, 폐활성탄 분말의 사용량이 증가할수록 공극률은 감소하는 경향을 나타내었다.

2) 초음파진동속도는 폐활성탄의 사용량이 증가할수록 증가

하는 경향을 나타내었으며, 공극률과 비교적 높은 상관성을 보이고 있어 적용범위 및 편차, 공극의 크기 및 형태 등에 따른 검토가 이루어지면 다공성 콘크리트의 내부 공극률을 추정하는 것이 가능 할 것으로 생각된다.

3) 압축강도는 재령 7일에서 6.73~12.26 MPa, 재령 28일에서 8.21~16.58 MPa로 나타났으며, 폐활성탄 분말을 2 % 사용한 다공성 콘크리트에서 압축강도가 가장 크게 나타났다. 휨강도는 재령 28일에서 1.69~3.68 MPa로 나타났으며, 압축강도의 경향과 유사하게 나타났다.

4) pH의 변화는 폐활성탄 분말의 혼입에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 식생을 하기 위해서는 중성화 처리가 필요한 것으로 나타났다.

REFERENCES

- Choi, L., and J. C. Kim, 1998. ECO-Concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute* 10(6): 11-21 (in Korean).
- Choi, H. Y., H. J. Hwang, M. H. Kim, and M. H. Kim, 2000. A study on the development of hwangto admixture for the application of cement mortar, *Journal of the Korean Institute of Building Construction* 6: 95-102 (in Korean).
- Han, J. Y., and S. R. Kim, 2003. Wager risk minimization through new paradigm of rainwater management, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineering*: 5539-5550 (in Korean).
- Hassler, J. W., 1974. *Purification with activated carbon*, New York, Chemical Publishing Co.
- ECO-Concrete Research Committee, 1995. Report of the ECO-Concrete research committee, *Japan Concrete Institute Tokyo*: 5-30 (in Japanese).
- Fintel, M., 1985. *Handbook of concrete engineering*, 2nd Ed, Van Nostrand Reinhold: 45-94.
- Mun, K. J., C. W. Lee, S. Y. So, and Y. S. Soh, 2006. Hydration reaction of non-sintering cement using inorganic industrial waste as activator, *Journal of the Korea Concrete Institute* 18(6): 267-274 (in Korean).
- Park, D. K., M. K. Lee, and K. Y. Yang, 2006. Study on the development of environment-friendly tetrapod using recycled, *Journal of the Korean institute of construction* 6(2): 73-79 (in Korean).
- Sung, C. Y., 1997. An experimental study on the development and engineering performance of rice-husk

- ash concrete, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(5): 55-63 (in Korean).
10. Sung, C. Y., and Y. I. Kim, 1998. Physical and mechanical properties of rice straw ash concrete, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 40(4): 103-108 (in Korean).
 11. Sung, C. Y., and Y. I. Kim, 2002. Experimental study on physical and mechanical properties of eco-concrete using rice straw ash, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 79-87 (in Korean).
 12. 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).
 13. Sung, C. Y., N. H. Ryu, and J. N. Youn, 2002. Physical and mechanical properties of mortar using non-active hwangto and stone dust, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(6): 83-89 (in Korean).
 14. Woo, J. K., 2006. A study on the development of friendly environment mortar by using activated carbon as fine aggregate, *Journal of the Korean Institute of Building Construction* 6(2): 105-109 (in Korean).