

솔잎재 콘크리트의 물리·역학적 특성

Physical and Mechanical Properties of Pine Needle Ash Concrete

성 찬 용* · 남 기 성**
Sung, Chan Yong · Nam, Ki Sung

Abstract

This study is performed to evaluate the physical and mechanical properties of pine needle ash(PNA) concrete. Materials used for this experiment are PNA, normal portland cement, natural fine and coarse aggregate.

Test results show that the unit weights of PNA concrete are decreased 1%~3% and the highest strength is achieved by 5% PNA filled PNA concrete.

Compressive strength increased by 5%, tensile strength by 20% and bending strength by 15% as compared with those of the normal cement concrete, respectively.

The highest ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity are achieved by 5% PNA filled PNA concrete, which are similar to those of the normal cement concrete.

I. 서 론

1824년 시멘트가 발명된 이래 콘크리트는 토목·건축 등 건설분야에 많은 기여를 하여 왔으며 또한, 20세기에 들어와 시멘트의 사용이 급격히 증가하였고, 압축강도도 140kgf/cm²에서 210~270kgf/cm²의 콘크리트가 일반적으로 사용되기에 이르렀으며, 근래에는 고강도이면서 내구적인 고성능 콘크리트가 개발되어 사용되고 있다.¹⁾

한편, 최근에는 고성능 콘크리트의 성능향상을 위해 시멘트량의 일부를 대체재로 사용한 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 특히, 산업의 고도성장으로 인한 산업 부산물인 플라이 애시, 고로 슬래그 등을 콘크리트 제품이나 골재 등에 일부 사용

하고 있으며, 농업 부산물인 왕겨, 벚짳 등이 물리·역학적 성능 증진 등의 목적으로 연구되고 있다.^{2,3,4)}

또한, 소나무는 우리 나라 곳곳에 분포하고 있어 이용이 가능하며, 쌓이는 솔잎을 적절히 처리함으로써 산림 식생에 좋은 영향을 주기 위하여 이에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다. 그러나, 솔잎의 채취와 소각 등에 어려움이 많아 이런 문제들이 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

따라서, 본 연구에서는 성능이 우수한 콘크리트를 개발하기 위하여 솔잎재를 시멘트량의 일부 대체재로 사용한 콘크리트의 단위중량, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 초음파 진동속도, 동탄성계수 등의 물리·역학적 특성을 실험적으로 구명하여 콘

* 충남대학교 농과대학

** 충남대학교 대학원

키워드 : 솔잎재 콘크리트, 단위중량, 강도, 초음파진동속도, 동탄성계수

크리트 구조물에 활용하기 위한 기초자료를 마련하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

KS F 5201에 규정된 국내 S회사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 성질 및 화학 성분은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1. Physical properties of normal Portland cement

Item	S.G	Specific surface (Blaine) (cm ² /gf)	Setting time (h-min)		Compressive strength (kgf/cm ²)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
Portland cement	3.15	3,240	3-7	7-20	194	216	323

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. 골재

본 실험에 사용한 잔골재와 굵은골재는 금강유역에서 채취한 천연 골재이며, 물리적 성질은 Table 3과 같다.

다. 솔잎재

본 실험에 사용된 솔잎재는 탄소성분(carbon)이 모두 손실되지 않도록 불완전연소 시켰으며, 솔잎재를 분쇄하기 위해 24시간 건조로에 건조시켜 입경 0.15mm망을 부착시킨 분쇄기로 분쇄하였고, 절대 건조상태에서 골재의 단위용적중량 시험방법(KS F 2505)의 지깅(jigging) 시험에 의해 3층 25회 실시하여 단위중량 241kgf/m³인 것을 사용하

Table 3. Physical properties of aggregate

Item	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	Fineness modulus	Unit weight (kgf/m ³)
Fine aggregate	0.15-4.75	2.62	2.35	2.35	1,471
Coarse aggregate	4.76-10	2.64	2.62	7.28	1,449

였으며, 화학 성분은 Table 4와 같다.

Table 4. Chemical composition of pine needle ash (Unit: %)

SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
92.87	4.37	1.37	1.32	0.07

2. 공시체 제작

가. 콘크리트 배합

솔잎재 콘크리트의 배합은 강도를 고려하고 솔입재의 혼입량을 변수로 하여 시멘트, 솔잎재, 잔골재 및 굵은골재의 배합비를 결정하였던 바, 솔잎재를 결합재(시멘트+솔잎재) 중량의 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15% 혼입한 P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 등 7가지 배합비로 하였으며, 이의 배합설계 결과는 Table 5와 같다.

나. 공시체 제작 및 양생

솔잎재 콘크리트의 제작은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 굵은골재와 잔골재를 잘 혼합한 다음 시멘트와 솔잎재를 투입하는 순서로 하였으며, 몰드에 타설된 콘크리트는 양생상자(21°C, 습도 96±2%)에서 24시간 정치 후 탈형하여 소정의 재령까지 수증양생(20±1°C)을 하였다.

Table 5. Mix design of pine needle ash concrete

Type	Maximum size of coarse aggregate (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Unit weight(kgf/m ³)			Coarse aggregate (mm)	Fine aggregate (mm)
				Water	Cement	Fine aggregate		
P1	10	8±1	55	225.1	408.0	741.4	4.76~10	0.15~4.75
P2			56	230.1	397.6	739.5		
P3			59	238.9	387.1	735.8		
P4			61	248.1	376.7	732.1		
P5			62	251.3	366.4	730.7		
P6			63	256.4	356.1	729.6		
P7			64	259.6	345.8	727.9		

3. 시험방법

시험은 다음과 같이 KS와 BS에 규정된 방법에 준하여 재령 28일에 실시하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과치로 하였다.

가. 단위중량시험

단위중량시험은 $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체의 표면 건조포화상태의 중량과 체적을 측정하여 산출하였다.

나. 강도시험

압축강도시험은 KS F 2405에 준하여 $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체를 캐핑 컴파운드로 캐핑하여 측정하였고, 인장강도시험은 $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체를 KS F 2423에 준하여 측정하였으며, 휨강도시험은 $60 \times 60 \times 240$ mm의 시험체를 KS F 2407에 준하여 측정하였다.

다. 초음파진동속도

초음파진동속도는 BS 4408⁵⁾에 준하여 $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체를 PUNDIT를 사용하여 측정하였으며, 계기의 디지털 숫자가 안정된 후 유효 숫자를 읽어 그것을 통과시간으로 하여 산출하였다.

라. 동탄성계수

동탄성계수는 BS 1881⁴⁾에 준하여 $\phi 150 \times 300$ mm인 시험체를 ERUDIT측정기를 사용하여 측정하였으며, 그 값은 다음 식으로 산출하였다.

$$D_d = DWn^2$$

여기서,

D_d = 동탄성계수 (kgf/cm²)

D = $519.4 \times 10^{-5} L/d^2$ (s²/cm²)

L = 공시체의 길이(cm)

d = 공시체의 직경(cm)

W = 공시체의 중량(kgf)

n = 측정치(1/s)

III. 결과 및 고찰

1. 단위중량

솔잎재 콘크리트는 시멘트량의 일부로 솔잎재를 사용하였기 때문에 단위중량이 감소하고, 배합비에 따라 차이가 있으며, 각 배합비에 따른 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다.

Table 6에서 알 수 있듯이 솔잎재 콘크리트는 보통 시멘트 콘크리트의 단위중량 2,332kgf/m³의

Table 6. Test results of pine needle ash concrete

Mix type	Unit weight (kgf/m ³)	Strength(kgf/cm ²)			Ultrasonic pulse velocity (m/s)	Dynamic modulus of elasticity (×10 ³ kgf/cm ²)
		Compressive	Tensile	Bending		
P1	2,332	352	29	62	4,221	319
P2	2,326	355	31	67	4,230	325
P3	2,310	370	35	71	4,261	327
P4	2,299	336	32	68	4,129	298
P5	2,291	317	31	67	4,066	294
P6	2,280	289	30	63	4,052	288
P7	2,274	275	28	61	3,971	273

97%~99% 정도로 1%~3% 정도 감소되었는데, 이와 같은 단위중량 감소의 주요 원인은 시멘트량의 일부로 단위중량이 월등히 가벼운 솔잎재를 사용하였기 때문이며, 솔잎재의 혼입량이 증가할수록 단위중량은 감소하는 경향을 보였다.

2. 강도

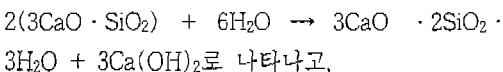
가. 압축강도

압축강도는 배합설계의 기준이 될 뿐만 아니라, 콘크리트를 타설할 때 거꾸집의 제거 시기를 결정할 수 있는 기준이 된다 또한 보통 시멘트 콘크리트와 역학적 성질이 다소 다른 솔잎재 콘크리트의 압축강도는 솔잎재의 혼입량에 따라 다르며, 각 배합비에 따른 압축강도 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다. Table 6에서 보는 바와 같이 솔잎재를 5% 혼입한 콘크리트에서 압축강도가 가장 크게 나타났으며, 보통 시멘트 콘크리트 보다 5% 정도 크게 나타났다.

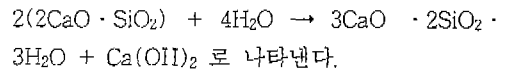
이는 솔잎재의 공극충전효과로 인하여 공시체 내부 조직이 치밀하게 되어 강도의 향상을 가져온 것으로 생각된다.

또한, 다음의 시멘트 수화작용에서 보는 바와 같이

규산 삼칼슘의 수화반응 과정은



규산 이칼슘의 수화반응 과정은



수산화칼슘이 반응성 SiO₂와 포졸란 반응을 하여 장기적인 강도증진을 가져오는데, 솔잎재의 반응성 SiO₂가 C-S-H 생성물 내의 공극을 충전하고 Ca(OH)₂와 포졸란 반응을 하여 0.1μm 이하의 미세한 공극이 상대적으로 늘어나 골재와 결합재간의 부착력을 증대시켜 강도가 증가된 것으로 생각된다.

그러나, 솔잎재를 7.5% 이상 혼입한 콘크리트는 압축강도가 감소되었는데 이는 반응성 SiO₂의 양이 조직내의 Ca(OH)₂보다 많기 때문에 포졸란 반응을 하지 못한 여분의 반응성 SiO₂와 결정형 SiO₂(비반응형)가 조직내 잔류하여 골재와의 접착성을 떨어뜨렸기 때문인 것으로 생각된다.

나. 인장강도

인장강도는 포장판, 교량 등의 설계에서 중요시 되는 요소이며, 경화 건조 수축과 온도변화에 의한 균열의 경감과 방지를 하는데 설계 기준이 되고, 보통 압축강도의 1/8~1/12 정도이다. 솔잎재 콘크리트의 인장강도 시험결과를 나타내면 Table 6과 같다.

Table 6에서 보는 바와 같이 솔잎재 5%를 혼입

한 P3가 솔잎재를 넣지 않은 P1보다 20% 정도 크게 나타났으며, 이는 비결정형 SiO₂가 침체된 형상을 하므로 이것이 수화생성물간을 연결하는 보강재의 역할을 하여 인장강도가 증가한 것으로 생각된다.

한편, 솔잎재를 15% 혼입한 P7은 솔잎재를 혼입하지 않은 P1보다 대략 1% 정도 작게 나타났다.

다. 휨강도

휨강도는 도로나 활주로와 같이 직접 휨응력을 받는 포장판 및 콘크리트 판, shell, 기둥, 콘크리트 말뚝 등의 설계 기준 강도에 이용되고, 이들 콘크리트의 품질 관리 및 콘크리트의 휨 균열발생 예측 등의 공학적 성질을 판단하는 기준에 이용되고 있다.⁷⁾

솔잎재 콘크리트의 휨강도 시험결과를 나타내면 Table 6과 같다. 여기서 보는 바와 같이 보통 시멘트 콘크리트의 휨강도 62kgf/cm²에 비해 솔잎재 2.5%를 혼입한 P2부터 솔잎재 12.5%를 혼입한 P6까지는 크게 나타났으며, 솔잎재를 5% 혼입한 P3에서 71kgf/cm²으로 보통 시멘트 콘크리트의 휨강도보다 약 15%정도 크게 나타났다. 이는 인장강도에서와 마찬가지로 비결정형 SiO₂는 침체된 형상을 하므로 이것이 수화생성물간을 연결하는 보강재의 역할을 하여 휨강도가 증가한 것으로 생각된다.

2. 초음파진동속도

초음파진동속도시험은 비파괴 시험방법의 일종으로서, 초음파를 부재나 구조물에 방사해서 그 전파시간으로부터 얻어지는 전파속도에 의해 콘크리트의 성능을 평가하는 방법으로서 수m의 규모에 이르기까지 적용할 수 있다. 또한, 오래된 구조물이나 화재를 입은 구조물의 내구성을 측정할 수 있으며, 음향기기를 만드는 부재의 재질을 분석하는 데도 사용하는 등 광범위하게 적용할 수 있다. 한편, 솔잎재 콘크리트의 초음파진동속도에 대한 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다. 이 결과에

서 알 수 있듯이 솔잎재 콘크리트의 초음파진동속도는 3,971~4,261m/s의 범위로, 보통 시멘트 콘크리트의 초음파진동속도 4,221m/s의 94%~101% 정도로 나타났다.

또한, 초음파진동속도는 P3에서 가장 크게 나타났는데, 이는 솔잎재로 인하여 콘크리트 내부의 공극이 적절히 채워져 초음파 진동속도를 저해하는 요인이 감소되었기 때문으로 생각된다.

한편, 솔잎재 콘크리트의 초음파진동속도는 P3, P2, P1, P4, P5, P6, P7순으로 초음파 진동속도가 크게 나타났는데, 이는 솔잎재의 혼입량을 결정하는데 매우 중요한 결과라 할 수 있다.

3. 동탄성계수

동탄성계수시험은 콘크리트의 성능시험을 하는 방법 중의 하나로 전혀 하중을 가하지 않고 전파를 시험체의 상대편에서 방사하여 측정된 주파수로 동탄성계수를 구하는 비파괴 시험방법이며, 일반적으로 탄성계수가 작으면 재료의 변형량이 크고 탄성계수가 크면 대체적으로 강도가 크게 나타난다는 것을 의미한다. 솔잎재 콘크리트의 동탄성계수에 대한 시험결과를 비교하면 Table 6과 같다. 이 결과에서 알 수 있듯이 솔잎재 콘크리트의 동탄성계수는 $273 \times 10^3 \sim 327 \times 10^3$ kgf/cm²로 보통 시멘트 콘크리트의 동탄성계수와 유사하게 나타났다.

또한, 동탄성계수는 P3에서 가장 크게 나타났고, 압축강도와 유사하게 나타났는데, 이는 미세립인 솔잎재의 공극충전효과로 인한 콘크리트 내부 조직의 치밀성이 증가되었기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 솔잎재를 7.5% 이상 혼입한 경우 보통 시멘트 콘크리트보다 동탄성계수가 작게 나타났는데, 이는 7.5% 이상 혼입할 경우 반응성 SiO₂의 양이 조직내의 Ca(OH)₂보다 많기 때문에 포졸란 반응을 하지 못한 역분의 반응성 SiO₂와 결정형 SiO₂(비반응형)가 조직내 잔류함으로써 수화생성물과 골재의 접착이 단절된 부분이 상대적으로 증가하였기 때문으로 생각된다.

IV. 결 론

이 연구는 솔잎재와 시멘트 및 천연골재를 사용한 솔잎재 콘크리트를 개발하여 솔잎재 콘크리트의 물리·역학적 특성을 실험적으로 구명한 것으로, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단위중량은 배합설계에 따라 $2,274 \sim 2,326 \text{kgf/m}^3$ 범위로 보통 시멘트 콘크리트에 비해 1%~3% 정도 감소하였다.

2. 각 강도는 솔잎재를 결합재량의 5%를 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났으며, 보통 시멘트 콘크리트에 비해 압축강도는 5%, 인장강도는 20%, 휨강도는 15% 정도 증가하였다.

3. 초음파진동속도는 배합설계에 따라 $3,971 \sim 4,261 \text{m/s}$ 정도로 보통 시멘트 콘크리트와 유사하게 나타났으며, 솔잎재를 5% 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났다.

4. 동탄성계수는 $273 \times 10^3 \sim 327 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 정도로 보통 시멘트 콘크리트와 유사하게 나타났으며, 솔잎재를 5% 혼입한 콘크리트에서 가장 크게 나타났다.

5. 적정량의 솔잎재를 혼입하여 콘크리트를 제조할 경우, 솔잎재 콘크리트의 물리·역학적 특성이 보통 시멘트 콘크리트보다 우수할 뿐만 아니라, 임업 부산물의 활용 측면에서도 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김무한 외 2명, 1996, 콘크리트의 고강도화에 관한 이론과 고강도 콘크리트용 재료의 특성, 건자재, 통권 7호, pp. 171-183.
2. 성찬용, 1997, 왕겨재 콘크리트의 개발 및 그 공학적 성능에 관한 실험적 연구, 한국농공학회지, 39(5), pp. 55-63.
3. 성찬용 외 1인, 1998, 벚짚재 콘크리트의 물리·역학적 특성, 한국농공학회지, 40(4), pp. 103-108.
4. Swamy, R. N., and G. Rigby., 1971, Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete, RILEM, 14(19), pp. 13-40.
5. 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), pp. 247-276.
6. Swamy, R. N., 1986, Cement replacement materials, Surrey University Press, 3, pp. 40-70.
7. Swartz, S.E., and Nikazen, A. et al., 1987, Structural bending properties of higher strength concrete, Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, Norway, pp. 147-178.
8. Wolfgang Czernin., 1980, Cement chemistry and physics for civil engineers, Wiesbadener Graphische Betriebe GmbH, pp. 10-55.