超輕量骨材를 使用한 輕量콘크리트의 工學的 特性

Engineering Properties of Lightweight Concrete Using Surlightweight Aggregate

成 瓚 鏞*·金 成 完*·閔 正 基*
Sung, Chan Yong ·Kim, Seong Wan ·Min, Jeong Ki

Summary

This study was performed to evaluate the engineering properties of the lightweight concrete using surlightweight aggregate, foaming agent and high performance agent.

The following conclusions were drawn.

1. The unit weight of type A, B and C concrete was 0.912t/m^3, 1.592t/m^3 and 1.070t/m^3, respectively. Specially, the unit weight of type A concrete was decreased 42% than that of the type B concrete.

2. The highest engineering property was measured in the lightweight concrete using high performance agent. Also, the ratio of tensile and bending strength to compresive streng-th of the lightweight concrete was higher than that of the normal cement concrete.

3. The dynamic modulus of elasticity of the lightweight concrete was in the range of 2.86×10^5~9.86×10^5 kg/cm^2, which was approximately 300% than that of the normal cement concrete.

4. The ultrasonic pulse velocity of the lightweight concrete was in the range 2047~3394 m/sec, which was smaller than that of the normal cement concrete.

I. 緖 論

최근 건설분야의 기술이 비약적으로 발전하고 있으며, 특히 건설재료 분야에서 新素材 개발에 상당한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 최근에는 콘크리트 품질을 개선하기 위하여 다양한 특수재료가 개발되고 있는데, 이 가운데 하나가 무기질 단열 경량제인 퍼라이트이며, 이를 사용하여 제조한 것을 퍼라이트 콘크리트(perlite concrete)라고 한다.

* 忠南大學校 農科大學

키워드 : 輕量콘크리트, 超輕量骨材, 超泡劑, 強度, 高性能 混合劑, 單位重量, 脆性.

이것은 외국에서 1970년대 후반부터 연구 개발되기 시작하여 현재는 몇몇 선진국의 연구자들에 의해 연구활동이 전개되고 있다. 우리나라에서도 최근에 이르러 이 분야에 대한 관심이 고조되고 있어, 가까운 장래에 범용화 단계에 이를 것으로 기대된다.

시멘트 콘크리트는 압축강도가 크고 내구성이 좋아 건설재료로서 가장 많이 사용되고 있으나, 비중이 크다는 것이 결점 중의 하나이다. 그리하여 비중이 작은 콘크리트를 제조하기 위한 여러가지 방법이 이미 시도되어 왔으며, 그 예로서는 火山礫, 石灰穀, 高爐슬래그 등의 天然輕量骨材와 膨脹粘土, 膨脹슬래그, 蛭石, 眞珠岩, 플라이애쉬, 粉末 石灰岩 등과 같은 人工輕量骨材라든가, 기포제나 발포제를 사용하여 콘크리트 단위중량을 낮추는 방법을 들 수 있다.[5)]

이 가운데 기포제는 콘크리트 속에 미세하고 안정된 독립공기를 조성하여, 골재의 전체나 일부를 대용하는 것으로, 공기량이 증가하면 강도의 저하와 함께 흡수량이 증가하는 단점을 가지고 있는 반면, 경량성, 흡음성, 단열성, 유동성, 경제성 등에서 유리한 장점을 가지고 있다.[1,2,3)]

그리고 膨脹粘土는 천연골재의 구입이 용이하지 못한 곳에서 발달된 것으로서 1930년경부터 사용되기 시작하였으며, 蛭石은 미국 등지에서 오래 전부터 경량골재로 사용되어 오고 있다. 石灰穀은 1940년 경 부터 플라이애쉬를 石灰穀에 혼입하여 블럭을 만들어 사용하였으나, 제품의 품질이 균일하지 못한 결점이 있다.[5)]

따라서, 본 연구에서는 초경량콘크리트의 제조를 위한 기초자료로 제공키 위해 보통포틀랜드시멘트, 퍼라이트, 고성능 감수제 및 기포제를 사용한 경량콘크리트의 단위중량, 압축강도, 인장강도, 휨강도, 동탄성계수, 초음파 진동속도 등을 실험적으로 구명코자 한다.

Ⅱ. 材料 및 方法

1. 使用材料

가. 시멘트

경량콘크리트 제조에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트이며, 화학적 성분은 Table-1과 같다.

Table-1. Chemical composition of normal portland cement(%)

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

나. 骨 材

第 3期 이후의 화산암 지대에서 생산되는 眞珠岩, 黑曜岩 또는 이와 유사한 암석을 분쇄하여 급속 가열 팽창시켜 제조된 인공경량골재인 퍼라이트를 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table-2와 같고, 화학적 성분은 Table-3과 같다.

Table-2. General properties of synthetic lightweight aggregate

Unit weight (g/cm^3)	Grain size (mm)	Color	PH	Sound-proof(%)
0.08	0.15-1.2	Pure-white	7	90<

Table-3. Chemical composition of synthetic lightweight aggregate(%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
75.5	15.2	0.9	0.12	0.08	3.5	4.0

다. 混和劑

혼화재는 고성능 감수제를 사용하였으며, 이의 화학적 성분은 Table-4와 같다.

라. 起泡劑

경량성이 우수한 混合氣泡注入型을 사용하였으며, 이의 일반적 성질은 Table-5와 같다.

Table-4. Physical properties of superplasticizer

Specific gravity(20℃)	PH	Color	Freezing point(℃)	Principal ingredient
1.20	9.5	Dark brown liquid	-2	Naphthalene formaldehyde

Table-5. Characteristics of foaming agent

Type	Specific gravity(20℃)	PH	Color	Principal ingredient
Mix-foaming type	1.06	10.85	Light brown liquid	Special anion surface active agent

2. 供試體 製作

가. 콘크리트 配合

배합비는 예비실험을 통하여 얻은 결과를 기초로 하여, 시멘트와 경량골재의 중량비를 6:1로 하였다. 그리고 Type A는 기포제를 시멘트 중량의 0.1%, Type B는 고성능 감수제를 0.1%, Type C는 기포제와 고성능 감수제를 각각 0.1%씩 첨가한 3종류로 하고, 슬럼프는 8±1cm로 하였으며, 그 배합설계는 Table-6과 같다.

Table-6. Experimental design of lightweight concrete

Treatment	Mix(wt.) (cement:aggregate)	Superplasticizer (kg/m^3)	Foaming agent (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	W/C (%)	Remarks
Type A	6:1	-	0.594	427	72	0.1% foaming agent.
Type B	6:1	0.924	-	549	59	0.1% superplasticizer.
Type C	6:1	0.6	0.6	438	73	0.1% foaming agent. + 0.1% superplasticizer.

나. 供試體 製作 및 養生

압축과 인장강도 및 단위중량시험용 공시체는 ϕ10×20cm, 동탄성계수와 초음파진동속도 및 휨강도시험용 공시체는 10×10×50cm로 제작하였다. 몰드에 타설된 경량콘크리트는 양생상자(20℃, 습도 96±2%)에서 24시간 정치후 탈형하여 소정의 재령까지 수중양생(20±1℃)을 하였다.

3. 試驗方法

가. 單位重量

각 Type별 단위중량은 재령 28일 까지 수중에서 양생시킨 공시체의 표면건조포화상태의 중량과 체적을 측정하여 다음과 같이 산출하였다.

$$U.W.=\frac{W}{V}\ (t/m^3)$$

여기서, U.W.=단위중량(t/m^3)

W =표면건조포화상태의 중량(t)

V =공시체 체적 (m^3)

나. 強 度

소정의 재령에서 압축강도 시험은 KSF-2405, 인장강도 시험은 KSF-2423, 휨강도 시험은 BS 1881[7]에 준하여 실시되었다.

다. 動彈性試驗

소정의 재령에서 BS 1881에 준하여 다음

식으로 동탄성계수를 산출하였다.[9)]

$$D.M.=40.81632n^2I^2\rho\times10^{-12}$$

여기서, D.M.=동탄성계수 (kg/cm^2)
n =측정치 (Hz)
I =공시체 길이 (mm)
ρ =공시체 밀도 (kg/m^3)

라. 超音波振動試驗

BS 4408에 준하여 다음식으로 초음파진동속도를 산출하였다.[10)]

$$P.V.=\frac{L}{D\times10^{-6}sec}$$

여기서, P.V.=초음파진동속도(m/sec)
D =측정치
L =공시체 길이 (m)

Ⅲ. 結果 및 考察

1. 單位重量

각 Type 별 단위중량은 재령 28까지 수중에서 양생된 공시체를 표면건조포화상태의 중량에 대한 체적비로 산출하였으며, 그 결과는 Table-7과 같고, 그림으로 도시하면 Fig. 1과 같다.

Table-7. Test results of unit weight

Treatment	Unit weight(t/m^3)
Type A	0.912
Type B	1.592
Type C	1.070

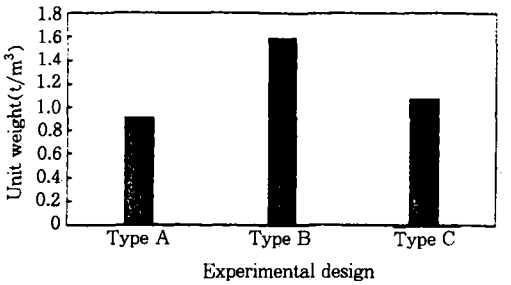

Fig. 1. Comparision of unit weights

경량콘크리트의 성질 중에서 가장 중요한 것은 단위중량이라고 할 수 있으며, 이는 사용골재의 종류와 배합조건에 따라 큰 차이가 있다.

Table-7에서 보는 바와 같이, 퍼라이트를 사용한 경량콘크리트의 단위중량은 각각 0.912t/m^3, 1.592t/m^3 및 1.070t/m^{3}로써, 보통시멘트콘크리트의 단위중량 2.3t/m^{3}과 비교할때 각각 39%, 69% 및 46%로써, 31~61%의 단위중량이 감소되었다. 이의 주요 원인은 인공경량골재인 퍼라이트와 기포제의 사용에 의해 공시체 내부의 공극이 증가했기 때문이라고 하겠다.

또한, 각 Type 별 물-시멘트비를 비교해 보면, Type B의 경우 고성능 감수제의 영향으로 Type A에 비하여 단위수량이 13%정도 감소하였으나, Type C의 경우는 기포제 첨가에 따른 점성의 증가로 단위수량의 감소가 거의 없는 것으로 나타났다.

2. 強 度

가. 壓縮強度

경량콘크리트의 압축강도는 사용한 인공경량골재의 강도, 배합조건 등에 따라 다르며, 이로부터 인장강도, 휨강도, 탄성계수, 내구성 등을 추정 할 수 있다.

보통시멘트콘크리트와 역학적 특성이 다소 다른 것으로 알려진 경량콘크리트의 배합방법에 따른 압축강도 시험결과를 비교하면 Table-8 및 Fig. 2와 같다.

이 결과에서 알 수 있듯이 보통시멘트콘크리트의 재령 28일 압축강도 210kg/cm^{2}를 100%로 할 경우 Type A는 18%, Type B는 162%, Type C는 26%의 강도를 나타냄으로써, Type B를 제외한 Type A와 C는 보통시멘트콘크리트 보다 강도가 상당히 저하되었다. 이러한 원인은 Type A의 경우 기포제 첨가로 강도저하를 가속화시켰고, Type C의 경우는 기포제의 사용으로 인한 강도저하가 고

Table-8. Test results of compressive strength (kg/cm^2)

Treatment	Curing age (days)		
	7	28	60
Type A	30	39	44
Type B	179	341	350
Type C	39	56	73

Table-9. Test results of tensile strength(kg/cm^2)

Treatment	Curing age (days)		
	7	28	60
Type A	6.2	7.9	9.8
Type B	23.3	28.0	28.5
Type C	7.7	9.9	11.2

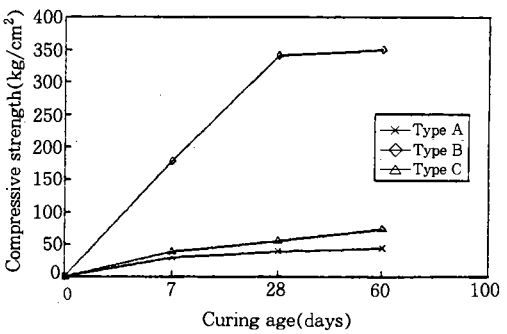

Fig. 2. Relation between curing age and compressive strength

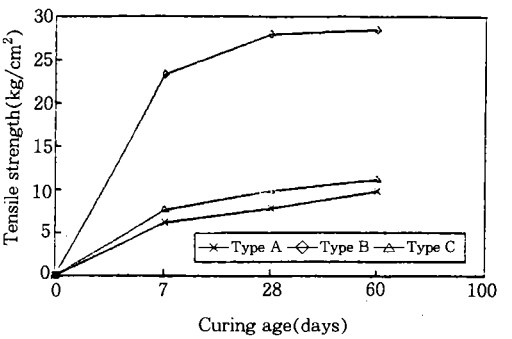

Fig. 3. Relation between curing age and tensile strength

성능 감수제의 사용으로 어느 정도 감쇄된 반면, Type B의 경우는 고성능 감수제의 사용으로 강도 증진을 가져왔기 때문이라고 할 수 있겠다.

또한, 단위중량의 변화에 따른 압축강도를 살펴보면, 단위중량이 작을수록 압축강도가 낮게 나타났는데, 이는 첨가된 퍼라이트는 매우 약하기 때문에 골재 자체의 강도는 기대할 수 없고, 단지 퍼라이트를 피복하고 있는 시멘트 풀에 전적으로 의존하기 때문이다. 또한, 콘크리트의 강도는 내부 공극량에 직접적으로 영향을 받는데, Type A와 C의 경우는 첨가된 기포제에 의한 내부 공극의 증가때문에 강도가 저하한 것으로 판단된다.

나. 引張強度

경량콘크리트의 배합방법에 따른 인장강도 시험결과를 비교하면 Table-9 및 Fig. 3과 같다.

인장강도는 압축강도와 비슷한 경향을 보였으며, 보통시멘트콘크리트와 같이 압축강도에 비례하여 인장강도가 증가됨을 알 수 있었다.

또한, 보통시멘트콘크리트의 재령 28일 인장강도 $21kg/cm^2$을 100%로 할 경우, Type A는 37%, Type B는 133%, Type C는 47%의 강도를 발현함으로써, 압축강도와 마찬가지로 Type B가 Type A와 C에 비하여 상대적으로 크게 나타났다.

한편, Type B의 강도를 100%로 할 경우 Type A는 28%, Type C는 35%의 강도를 발현하였는데, 이와같이 Type A가 상대적으로 작게 나타난 것은 기포제의 사용으로 인한 내부 공극의 증가때문이며, Type C의 경우는 고성능 감수제의 사용으로 밀도 감소에 따른 강도 저하가 어느 정도 억제되었기 때문이라 생각된다.

다. 휨強度

경량콘크리트의 배합방법에 따른 휨강도 시험결과를 비교하면 Table-10 및 Fig. 4와 같다.

이 결과에서 보는 바와 같이 Type A와 C는 보통시멘트콘리트보다 휨강도가 작게 나타났으나, Type B는 보통시멘트콘크리트보다

Table-10 Test results of flexural strength (kg/cm^2)

Treatment	Curing age (days)		
	7	28	60
Type A	9.7	11.6	12.5
Type B	43.7	53.8	60.7
Type C	12.6	18.4	20.1

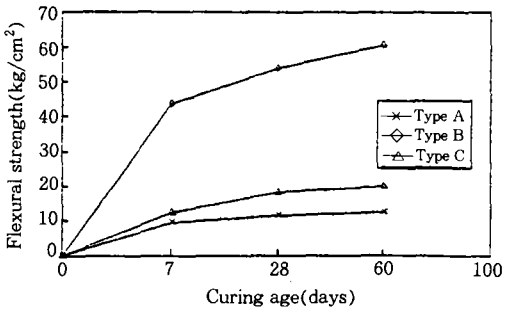

Fig. 4. Relation between curing age and flexural strength

크게 나타났으며, 압축보다는 인장강도와 유사한 경향을 나타내었는데, 이는 사용한 퍼라이트의 역학적 성질에 의한 영향으로 생각된다.

또한, 보통시멘트콘크리트의 재령 28일 휨강도 $42kg/cm^2$를 100%로 할 경우, Type A는 27%, Type B는 128%, Type C는 44%의 강도를 나타냄으로써, 압축 및 인장강도와 마찬가지로 Type B는 보통시멘트콘크리트의 강도보다 크게 나타난 반면, Type A와 C는 작게 나타났다.

한편, Type B의 재령 28일 휨강도를 100%로 할 경우, Type A는 21%, Type C는 34%의 강도를 나타내었는데, 이러한 결과는 압축 및 인장강도와 유사한 경향을 보이는 것이다.

라. 強度比

경량콘크리트의 각 Type 별 압축, 인장 및 휨강도에 대한 재령 28일의 강도비를 나타내면 Table-11과 같다.

여기서 보는 바와 같이 강도비는 대체적으로 Type A, C, B순으로 크게 나타났고, Type A와 C는 보통시멘트콘크리트($\sigma t/\sigma c=1/10\sim1/13$, $\sigma b/\sigma c=1/5\sim1/8$)보다 크게 나타났으며, Type B는 보통시멘트콘크리트와 유사한 경향을 보였다.

Table-11. Comparison of strength ratio

Treatment	$\sigma t/\sigma c$	$\sigma b/\sigma c$	$\sigma t/\sigma b$
Type A	0.202	0.297	0.681
Type B	0.082	0.157	0.520
Type C	0.176	0.328	0.538

이와같이 Type B가 Type A와 C에 비하여 강도비가 작게 나타난 것은 첨가된 고성능 감수제의 영향으로, Type A 및 C와 비교해 상대적으로 수밀성이 큰 콘크리트가 됨으로서 나타나는 현상으로 생각된다.

한편, Type B의 강도비를 100%로 할 경우, 압축에 대한 인장강도의 비는 Type A가 246%, Type C가 214%의 값을 보였으며, 압축에 대한 휨강도의 비는 Type B가 189%, Type C가 208%로 거의 2배 정도의 값을 나타내었고, 휨에 대한 인장강도의 비는 Type A가 130%, Type C가 103%의 값을 나타내었다. 이는 경량골재의 단위중량과 강도와의 상관관계에서 가볍고 강도가 큰 콘크리트일수록 압축과 인장강도, 압축과 휨강도의 비가 높다는 일반적인 이론[6]과 상이한 결과이다. 이것은 경량골재인 퍼라이트의 물성에 기인된 것으로써, Type A와 C의 경우는 사용한 퍼라이트의 단위중량이 상당히 작고 기포제가 첨가되면서 내부 공극의 증가로 단위중량의 감소와 함께 강도의 저하가 있었기 때문이며, Type B의 경우는 퍼라이트 첨가에 따른 단위중량의 감소에 의한 강도 저하가 고성능 감수제에 의하여 억제되었기 때문이라고 생각된다.

3. 動彈性係數

경량콘크리트의 동탄성계수 시험결과를 나타내면 Table-12 및 Fig. 5와 같다.

Table-12. Test results of dynamic modulus of elasticity ($\times 10^3 kg/cm^2$)

Treatment	Curing age (days)		
	7	28	60
Type A	231	286	524
Type B	885	986	1,148
Type C	601	672	714

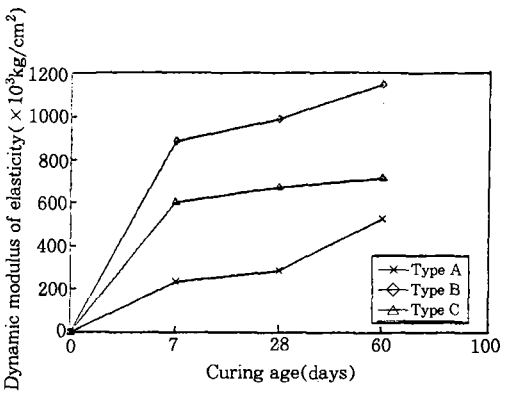

Fig. 5. Relation between curing age and dynamic modulus of elasticity

이 결과에서 보는 바와 같이 Type A, B, C 콘크리트의 동탄성계수는 모두 보통시멘트콘크리트 보다 월등히 크게 나타났으며, 재령 28일의 보통시멘트콘크리트의 동탄성계수 2.1 $\times 10^5 kg/cm^2$을 100%로 할 경우, Type A는 136%, Type B는 469%, Type C는 320%의 값을 나타냈다.

한편, 기포제가 첨가된 Type A와 C 콘크리트는 내부 공극이 증가되었음에도 불구하고 오히려 동탄성계수는 보통시멘트콘크리트 보다 크게 나타났는데, 이는 퍼라이트 자체의 특성에 기인된 것으로 생각된다. 또한, 각 Type 별 단위중량과의 관계를 살펴보면, 기포제를 첨가하지 않은 Type B가 Type A나 C에 비해 각각 344%와 146%로서, 단위중량이 클수록 크게 나타났다. 또한 압축강도와의 관계를 비교해 보면, 압축강도가 클수록 동탄성계수도 크게 나타났는데, 이것은 공기량과 내부 공극이 작을수록, 압축강도가 클수록 동탄성계수가 커진다는 일반적인 이론[8]과 일치하는 결과라고 하겠다.

4. 超音波振動速度

초음파진동속도시험은 20KHz 이상의 초음파 종파 pulse를 콘크리트 중에 방사해서 그 전파시간으로부터 얻어지는 전파속도에 의해 콘크리트의 품질을 평가하는 방법으로서, 10~20m의 구간에서부터 수 cm의 소규모에까지 적용할 수 있는 비파괴시험방법[4]이다. 경량콘크리트의 초음파진동속도에 대한 시험결과는 Table-13 및 Fig. 6과 같다.

Table-13. Test results of ultrasonic pulse velocity (m/sec)

Treatment	Curing age (days)		
	7	28	60
Type A	1,898	2,047	2,340
Type B	2,886	3,394	3,431
Type C	1,953	2,247	2,366

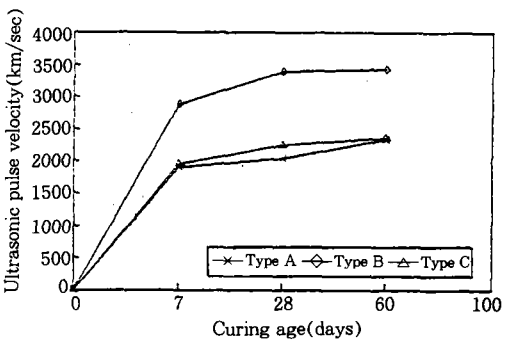

Fig. 6. Relation between curing age and ultrasonic pulse velocity

이 결과에서 보는 바와 같이 재령이 증가할수록 초음파진동속도는 크게 나타났으며, Type B가 Type A와 C에 비하여 재령 28일에서 각각 166%와 151% 컸는데, 이는 Type A와 C는 기포제의 사용으로 인하여 내부 공극이 Type B에 비하여 상대적으로 증가되었기 때

문에 공시체내의 독립 기공을 통과 할 때의 전파시간의 변화로 인하여 초음파진동속도가 작게 나타났기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, 각 Type 별 단위중량과의 관계에서, 단위중량이 클수록 초음파진동속도가 크게 나타났으며, 압축강도와 동탄성계수가 클수록 역시 그 속도는 크게 나타났다.

IV. 結 論

이 연구는 초경량골재와 기포제, 고성능 감수제를 사용한 경량콘크리트의 공학적 성질을 구명한 것으로서, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 표면건조포화상태의 단위중량은 기포제를 첨가한 콘크리트에서 0.912t/m^3, 고성능 감수제를 첨가한 콘크리트에서 1.592t/m^3, 기포제와 고성능 감수제를 함께 첨가한 콘크리트에서 1.070t/m^3이었다.

2. 압축, 인장 및 휨강도와 동탄성계수, 초음파진동속도, 단위중량은 고성능 감수제를 첨가한 콘크리트에서 컸으며, 기포제를 첨가한 콘크리트에서 작았다. 또한, 압축강도에 대한 인장 및 휨강도의 비는 보통시멘트콘크리트 보다 크게 나타났다.

3. 동탄성계수는 2.86×10^5~9.86×10^5kg/cm^2으로서 보통시멘트콘크리트의 300% 수준으로 매우 크게 나타났다.

4. 초음파진동속도는 2047~3394 m/sec 로써 보통시멘트콘크리트 보다 작게 나타났다.

參 考 文 獻

1. 成瓚鏞, 黃垠, 1985, 기포제가 모르터의 제성질에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 한국농공학회지, 27(1):46~61.
2. 成瓚鏞, 1988, 기포모르터의 제특성에 관한 실험적 연구(I), 한국농공학회지, 30(1):73~80.
3. 成瓚鏞, 1988, 기포모르터의 제특성에 관한 실험적 연구(II), 한국농공학회지, 30(3):106~113.
4. 한국건설기술연구원, 1989, 국내 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 위한 조사연구, 한국건설기술연구원 연구 보고서:110~124.
5. 洪思天, 1977, 경량골재콘크리트 및 기타에 관한 각국의 발명특허, 대한건축학회지, 21(74):45~48.
6. Andrew Short, 1976, Lightweight Concrete, Applied Science Publishers, KTD.
7. BS 1881, 1970, Methods of testing hardened cncrete for other than strength, British Standards Institution, (Part 5):38.
8. Neville, 1981, Properties of Concrete, Pitman Publishing Limited, London:605~635.
9. Swamy, R. N. & G. Rigby, 1971, Dynamic properties of hardened paste, mortar, and concrete, RILEM, 14(19):13~40.
10. Swamy, R. N. & 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.