

팽창 폴리스틸렌 비드 콘크리트의 물리·역학적 특성

Physical and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Bead Concrete

민 정 기* · 김 성 완* · 성 찬 용*
Min, Jeong Ki · Kim, Seong Wan · Sung, Chan Yong

Summary

The normal cement concrete is widely used material to build the construction recently, but it has a fault to increase the dead load on account of its unit weight is large compared with strength.

So, main purpose of this study was to establish the physical and mechanical properties of lightweight concrete using expanded polystyrene bead on fine aggregate and natural gravel, expanded clay and pumice stone on coarse aggregate.

The test results of this study are summarized as follows;

1. The water-cement ratio of concrete using pumice stone was larger than that of the concrete using natural gravel and expanded clay.
2. The unit weights of concrete using pumice stone and expanded caly were shown less than $1,000\text{kg}/\text{m}^3$.
3. The compressive strengths of all types were shown less than $60\text{kg}/\text{cm}^2$, tensile and bending strengths were shown less than $13\text{kg}/\text{cm}^2$ and $31\text{kg}/\text{cm}^2$, respectively.
4. The pulse velocity of concrete was shown similar with using natural gravel and pumice stone, and shown the lowest using pumice stone.
5. The dynamic modulus of elasticity of concrete was shown considerably smaller, and shown the lowest using pumice stone.
6. The static modulus of elasticity of concrete using expanded clay and pumice stone were shown considerably smaller, and shown 22% ~ 29% as compared with the dynamic modulus of elasticity.
7. The stress-strain curves of concrete were shown similar, generally. And the curves were repeated at short intervals increase and decreased irregularly.

*충남대학교 농과대학

키워드 : 경량콘크리트, 팽창 폴리스틸렌 비드, 팽창집토, 경석, 단위중량, 강도, 응력-변형률곡선

I. 서 론

현대구조물에 있어서 가장 주된 재료로 사용되고 있는 것은 콘크리트이나, 이는 강도에 비하여 비중이 지나치게 높기 때문에 구조물의 자중을 증가시키고 부재의 단면이 커지게 되는 결점을 가지고 있다.

따라서, 이러한 결점을 보완하기 위하여 개발된 것이 경량콘크리트이며^{2,3)}, 외국에서는 19세기 경부터 이에 대한 연구가 시작되어 다양한 경량골재가 개발되었고, 이를 사용한 경량콘크리트에 대한 연구도 상당히 진전되어 현재는 비구조용 뿐만 아니라 구조용으로도 폭 넓게 사용되고 있다. 또한, 최근에는 단위중량이 1,000kg/m³이하인 초경량골재를 개발하여 이를 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으나¹⁾, 국내에서는 아직 이 분야에 대한 연구가 미흡하고 활용범위도 제한되어 일부에서만 사용되고 있는 실정이다.

최근에는 지가상승 및 건설용지 부족으로 인하여 콘크리트구조물은 고층화, 대형화, 고가화되어 가고 있으며, 해양구조물과 같은 특수구조물의 축조도 증가되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 공사는 이전에 접할 수 없었던 기술집약형으로 고도의 기술이 요구되고, 사용재료에 있어서도 현재보다는 더욱 강화된 내구성을 요구하고 있다.

특히, 이전의 해상부유구조물은 보통 시멘트 콘크리트로 시공이 되어 왔으나, 자체의 중량이 크고 설치에 있어서도 대형장비가 필요함에 따라, 최근에 축조되고 있는 해상부유구조물은 경량콘크리트로 시공되는 경우가 많

아지고 있는데, 초경량콘크리트의 경우는 단위중량이 1,000kg/m³이하이므로 이의 이용가능성이 상당히 크다고 할 수 있다.^{4,8)}

이러한 해상부유구조물 축조에 널리 이용되고 있는 경량골재로는 퍼라이트, 팽창 폴리스틸렌 비드, 팽창혈암, 팽창점토 등이다.

특히, 팽창 폴리스틸렌 비드는 내부에 독립적으로 존재하는 다량의 공극을 함유하기 때문에 흡수가 거의 일어나지 않고 단위중량이 상당히 작기 때문에, 해상부유구조물 축조에 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라 도로의 보조기층재료로 사용된 예도 있다.⁷⁾

따라서, 본 연구는 현대 구조물의 주된 재료인 콘크리트에 대한 경량화가 요구됨에 따라, 국내에서 구입이 용이한 경량골재를 사용하여 단위중량이 1,000kg/m³이하가 되는 초경량콘크리트를 제작하여, 이의 물리·역학적 특성을 구명함으로써 향후 이의 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 실시되었다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS F 5201에 규정된 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 이의 물리적 성질 및 화학성분은 Table-1 및 2와 같다.

나. 물

본 실험에 사용한 물은 콘크리트 표준시방서에 따라 유해량의 기름, 산, 알칼리, 염류,

Table-1. Physical properties of normal portland cement

Item	S.G	Fineness blaine (cm ² /g)	Setting time (hrs-min)		Compressive strength (kg/cm ²)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
Portland cement	3.15	3,240	5-7	7-20	194	216	323

하여 음이온 계면활성제로서 나프탈렌 설폰산 염을 주성분으로 한 고성능감수제인 Mighty-150을 사용하였고, 다른 하나는 콘크리트의 경량성을 증진시키기 위하여 기포제를 사용하였는데, 이는 일본에서 생산된 계면활성제의 일종으로 경량성이 우수한 혼합기포주입형으로서, 이들의 일반적 성질은 Table-5와 같다.

2. 공시체 제작

가. 콘크리트배합

본 실험에서는 우선 시멘트와 인공경량세골재인 퍼라이트만을 사용하여, 시멘트에 대한 퍼라이트의 배합비를 중량비 4:1~8:1로 변화시켜 실험한 결과, 물-시멘트비(슬럼프 8±1cm)는 시멘트의 사용량이 증가할 수록 감소하였으며, 단위중량은 배합비 4:1에서 1,473kg/m³인 반면, 배합비 8:1에서는 1,647kg/m³으로 약간 증가하였고, 압축강도는 시멘트의 사용량이 증가할 수록 증가하여 배합비 8:1에서 최고 249kg/cm²을 보임에 따라, 1차적으로 시멘트에 대한 인공경량세골재인 퍼라이트의 중량 배합비를 8:1로 선정하였다.

그리고 위에서 선정된 배합비에 인공경량조골재인 팽창점토의 사용량을 시멘트 중량의 0.5%, 1.0%, 1.5%로 변화시켜서 실험한 결과, 조골재의 사용량이 증가할 수록 물-시멘트비(슬럼프 8±1cm)는 증가하였고, 단위중량은 배합비 8:1:0.5에서 1,544kg/m³, 8:1:1일때 1,465kg/m³, 8:1:1.5에서 1,441kg/m³로 조골재의 사용량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으나, 압축강도는 조골재의 사용량이 증가할 수록 감소하는 경향을 보였으며, 배합비 8:1:0.5에서 최고 235kg/cm²로 나타났다.

이상의 예비실험 결과, 시멘트에 대한 퍼라이트 및 팽창점토의 중량 배합비를 물-시멘트비, 단위중량 및 압축강도가 최적이 되는 8:1:0.5를 기준 배합비로 설정하였으며, 콘크

리트의 강도증진과 유동성 확보를 위하여 고성능감수제를 시멘트중량의 0.6~2.4%, 콘크리트의 경량성을 향상시키기 위하여 기포제를 시멘트중량의 0.5~2.0%로 변화시켜 실험한 결과, 고성능감수제는 시멘트중량의 1.2%, 기포제는 1.0%가 적정량으로 나타났다.

따라서, 본 실험에서는 예비실험을 통하여 얻어진 기본배합비를 그대로 채택하였으며, 퍼라이트와 팽창 폴리스티렌 비드의 단위중량을 비교하고, 팽창점토와 강자갈 및 경석의 단위중량을 비교하여 사용골재의 체적이 동일하게 되도록 각 재료의 배합비를 결정하였고, 고성능감수제는 시멘트중량의 1.2%, 기포제는 시멘트중량의 1.0%를 첨가시켰으며, 이의 배합설계결과는 Table-6과 같다.

나. 공시체 제작 및 양생

단위중량, 압축강도 및 인장강도 시험용 공시체는 $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$, 휨강도, 초음파진동속도, 동탄성계수 측정용 공시체는 6×6×24cm, 응력-변형을 측정용 공시체는 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 로 제작하였으며, 몰드에 타설된 콘크리트는 24시간 정치한 후 탈형하여 재령 28일까지 일정온도(20±1℃)에서 수중양생을 실시하였다.

3. 시험방법

가. 단위중량

단위중량은 재령 28일까지 수중에서 양생시킨 공시체의 표면건조포화상태의 중량과 체적을 측정하여 다음식에 의해서 산출하였다.

$$U \cdot W = \frac{W}{V}$$

여기서, U·W = 단위중량(kg/m³)

W = 표면건조포화상태의 중량(kg)

V = 공시체 체적(m³)

나. 강도

모든 강도시험은 재령 28일에 실시하였으

Table-6. Mix design of lightweight concrete using expanded polystyrene bead

Type	Cement	Bead	Coarse aggregate			S.P	F.A	Slump(cm)
			Natural gravel	Expanded clay	Pumice stone			
CBG	574	13	152	-	-	-	-	2±1
CBGS	545	12	144	-	-	7.6	-	
CBGF	464	10	123	-	-	-	5.1	
CBE	542	12	-	34	-	-	-	
CBES	606	13	-	37	-	8.5	-	
CBEF	447	10	-	28	-	-	4.9	
CBL	529	12	-	-	33	-	-	
CBLS	522	11	-	-	32	7.3	-	
CBLF	495	11	-	-	31	-	5.5	

※ CBG : Cement + Expanded polystyrene bead + Natural gravel S.P : Superplasticizer
 CBE : Cement + Expanded polystyrene bead + Expanded clay F.A : Foaming agent
 CBL : Cement + Expanded polystyrene bead + Pumice stone

며, 압축강도시험은 KS F 2405에 준하여 캡 팽경파운드로 캡핑을 실시하여 측정하였고, 인장강도시험은 KS F 2423, 휨강도시험은 KS F 2407에 준하여 측정하였다.

다. 초음파진동속도

초음파진동속도는 BS 4408⁶⁾에 준하여 측정하였으며, 측정장치는 영국 C.N.S.사의 PUNDIT를 사용하여 계기의 디지털 숫자가 안정된 후 유효숫자를 읽어 그것을 통과시간으로 하였고, 측정시에는 공시체면에 그리이스를 발라 단자와 공시체면에 공극이 생기지 않도록 하여, 다음 식으로 초음파진동속도를 산출하였다.

$$P \cdot V = \frac{L}{D \times 10^{-6} \text{sec}}$$

여기서, P·V=초음파진동속도(m/sec)

D=측정치

L=공시체길이(m)

라. 동탄성계수

동탄성계수 측정은 BS 1881⁵⁾에 준하여 영

국의 C.N.S.사의 ERUDIT측정기를 사용하여 다음식으로 산출하였다.

$$D \cdot M = 40.81632n^{2.12} \rho \times 10^{-12}$$

여기서, D·M=동탄성계수(kg/cm²)

I=공시체 길이(mm)

n=측정치

ρ=단위중량(kg/m³)

마. 변형특성

본 실험에서 응력-변형율을 측정하기 위하여 공시체의 횡방향과 종방향에 비선형성이 0.06%이고, Hysteresis가 0.09%인 게이지를 부착하여, 하중재하에 따른 공시체의 변형량을 측정하여 응력과 변형율과의 관계를 구명하였으며, 이를 위하여 구성된 계측 및 자료 채집장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

압축강도 측정시 공시체가 받는 힘은 Controller의 내부 소형증폭기에 의해 출력되는 값을 Amplifier를 통해서 -5~5volt 사이의 voltage값으로 증폭 조정되고, 변형은 공시체 옆면에 설치된 게이지로 들어오는 변형량이

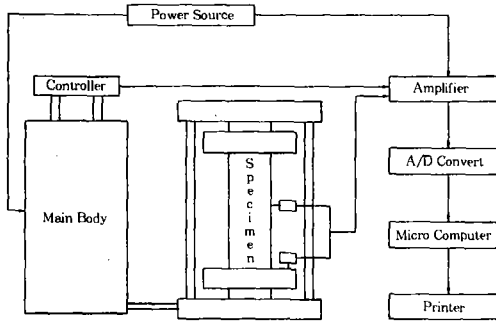


Fig. 2. Schematic and block diagram of compressive test apparatus

저항값으로 감지되어, Amplifier에서 voltage 값으로 증폭 전환시키게 된다.

증폭된 이들의 전기적인 아날로그 신호는 컴퓨터 내에 설치된 A/D변환기에서 디지털 값으로 전환되고, 이와 같이 측정된 값은 계측 및 그래픽프로그램을 이용하여 컴퓨터에서 하나의 화일로 기록됨과 동시에 모니터상으로 응력 및 변형값을 그래프로 확인 할 수 있도록 하였다.

컴퓨터에 입력된 자료는 측도설정(Calibration)에서 얻어진 수식을 이용하여 본 실험에서 필요한 정탄성계수와 시간에 대한 하중 및 응력과 변형을 관계를 프린터로 출력시킬 수

있도록 하였다.

여기서, 정탄성계수는 세컨트방법에 의하여 압축강도시험과 동시에 얻어진 응력-변형률 곡선에서 극한강도 40%의 응력(σ)과 변형률(ϵ)을 비교하여 $E_s = \sigma/\epsilon$ 에 의해 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

시험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 Table-7과 같다.

1. 물-시멘트비

팽창 폴리스티렌 비드는 골재의 특성상 흡수가 거의 일어나지 않고, 입형이 등골기 때문에 동일 슬럼프를 얻는데 필요로 하는 단위수량은 보통골재보다 적으며, 특히 단위수량이 과다할 경우 재료의 분리가 일어나기 쉽다.

따라서, 본 시험에서는 작업에 지장이 없고 재료의 분리가 일어나지 않는 슬럼프 2 ± 1 cm를 기준으로 하여 물-시멘트비를 설정하였으며, 시험결과 얻어진 물-시멘트비는 Table-7에 나타나 있다.

여기서 보는 바와 같이, 사용골재에 의한 물-시멘트비는 팽창 폴리스티렌 비드에 강자

Table-7. Test results of lightweight concrete using expanded polystyrene bead

Item Type	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)	Strength (kg/cm ²)			Pulse velocity (m/sec)	Dynamic modulus of elasticity (kg/cm ²)	Static modulus of elasticity (kg/cm ²)
			Comp.	Tensile	Bending			
CBG	30	1,053	60	13	30	2,927	66,474	14,950
CBGS	26	1,130	66	15	32	3,101	73,532	21,636
CBGF	27	830	8	6	14	2,245	38,305	13,729
CBE	31	760	42	12	23	2,899	57,568	14,107
CBES	25	830	50	14	31	3,101	69,951	15,147
CBEF	26	610	9	5	8	1,928	31,527	11,903
CBL	35	758	37	10	15	2,765	42,859	12,363
CBLs	30	815	40	11	22	2,923	49,550	14,526
CBLF	31	619	6	4	7	1,173	20,942	941

갈을 사용한 CBG는 30%, 팽창점토를 사용한 CBE는 31%, 경석을 사용한 CBL은 35%로, 경석을 사용한 CBL에서 가장 크게 나타났다.

이는 다른 골재에 비하여 경석의 입형이 거칠기 때문에 동일한 반죽질기를 가지는데 있어서 다른 골재보다 더 많은 혼합수를 필요로 하기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 전반적인 물-시멘트비는 35%이하로 상당히 작게 나타났는데, 이는 사용한 골재의 특성에서 기인된 결과로, 세골재로 사용된 팽창 폴리스틸렌 비드는 골재자체의 흡수가 거의 일어나지 않고, 팽창점토는 흡수율 저하를 위하여 골재표면이 피막처리 되어 있고, 경석은 골재 내부에 다량의 공극이 존재하지만 이 공극이 개개의 독립적 셀(cell)형상으로 존재함으로 초기흡수가 작게 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

2. 단위중량

단위중량에 대한 시험결과는 Table-7에서 알 수 있듯이, 강자갈을 사용한 CBG는 1,053kg/m³으로 나타났고, 감수제를 첨가한 CBGS는 1,130kg/m³, 기포제를 첨가한 CBGF는 830kg/m³으로 나타나, 감수제 첨가에 의하여 증가하였고 기포제 첨가에 의하여 감소하는 경향을 보였다.

이는 감수제 첨가로 콘크리트 유동성이 증가하여 동일 슬럼프를 가지는데 필요로 하는 혼합수를 적게 요구함으로 콘크리트 내부조직이 치밀해져서 나타난 결과이며, 기포제를 첨가한 경우는 발생된 기포가 콘크리트중에 다량 존재하여, 발생된 기포만큼 단위시멘트량이 감소하고 콘크리트 조직이 다공질화 되어 나타난 결과라 하겠다.

한편, 팽창점토를 사용한 CBE의 단위중량은 760kg/m³, 감수제를 첨가한 CBES는 830kg/m³, 기포제를 첨가한 CBEF는 610kg/

m³으로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 758kg/m³, 감수제를 첨가한 CBLS는 815kg/m³, 기포제를 첨가한 CBLF는 619kg/m³으로 나타나, 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 경량성이 상당히 크게 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 경향은 CBG와 유사하게 나타났다.

사용조골재 차이에 의한 단위중량의 변화는, 강자갈을 사용한 경우 가장 크게 나타났고 팽창점토와 경석을 사용한 경우는 거의 유사하게 나타났는데, 이는 사용조골재의 단위중량 차이에서 기인된 결과라 하겠다.

3. 강 도

가. 압축강도

압축강도에 대한 시험결과는 Table-7에서 보는 바와 같이, 팽창 폴리스틸렌 비드에 조골재로 강자갈을 사용한 CBG의 압축강도는 60kg/cm²으로 나타났고, 감수제를 첨가한 CBGS는 66kg/cm², 기포제를 첨가한 CBGF는 8kg/cm²으로 나타나, 감수제 첨가로 증가하였고 기포제 첨가로 크게 감소하는 경향을 보였다.

이는 감수제 첨가로 콘크리트 유동성이 증가하여 동일 슬럼프의 워커빌리티를 갖는데 필요로 하는 단위수량이 감소함으로서 콘크리트 내부의 수밀성이 증가하여 나타난 결과이고, 기포제 첨가에 의해서는 혼합시 발생된 기포가 콘크리트 내부에 다량의 공극으로 존재하여 시멘트 페이스트와 골재와의 결합력이 저하되어 나타난 결과라 하겠다.

그리고 팽창점토를 사용한 CBE의 압축강도는 42kg/cm², 감수제를 첨가한 CBES는 50kg/cm², 기포제를 첨가한 CBEF는 9kg/cm²으로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 37kg/cm², 감수제를 첨가한 CBLS는 40kg/cm², 기포제를 첨가한 CBLF는 6kg/cm²으로 나타났으며, 혼화제를 첨가했을 때의 압축강도의 변화는 CBG와 유사하게 나타났다.

한편, 사용골재에 의한 압축강도의 차이는 강자갈을 사용한 경우가 가장 크게 나타났고, 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났는데, 이는 사용골재의 강도차이에서 기인된 결과로 생각이 된다.

그리고 전체적인 압축강도는 상당히 작게 나타났는데, 이는 세골재로서 자체강도가 거의 없는 팽창 폴리스티렌 비드가 사용되었기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

따라서, 팽창 폴리스티렌 비드는 콘크리트 내에서 입자 자체가 하나의 공극을 형성하여 존재할 뿐, 콘크리트의 강도발현에 기여하지 못하므로, 여기에 자체강도를 가지고 있는 조골재를 사용하여도 콘크리트의 압축강도는 크게 발현되지 못한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 콘크리트 조직이 영성해짐으로 해서 시멘트 페이스트와 골재와의 결합이 완전하지 못한 상태로 경화가 이루어진 것을 의미한다.

나. 인장강도

인장강도에 대한 시험결과는 Table-7에 나타나 있듯이, 강자갈을 사용한 CBG의 인장강도는 13kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBGS는 15kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBGF는 6kg/cm^2 으로 나타났고, 팽창점토를 사용한 CBE는 12kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBES는 14kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBEF는 5kg/cm^2 으로 나타났다. 그리고 경석을 사용한 CBL의 인장강도는 10kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBLS는 11kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBLF는 4kg/cm^2 으로 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 인장강도의 변화는 압축강도와 유사하게 나타났다.

그리고 인장강도도 압축강도와 마찬가지로 상당히 작게 나타났는데, 이는 사용된 각 골재의 강도특성 및 입도등에서 기인된 결과로 생각이 되며, 시멘트 페이스트와 골재와의 결합력이 상당히 미약하다는 것을 알 수 있었다.

다. 휨강도

휨강도에 대한 시험결과는 Table-7에서 보는 바와 같이, 강자갈을 사용한 CBG의 휨강도는 30kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBGS는 32kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBGF는 14kg/cm^2 으로 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 경향은 압축강도와 유사하게 나타났다.

그리고 팽창점토를 사용한 CBE는 23kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBES는 31kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBEF는 8kg/cm^2 으로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 15kg/cm^2 , 감수제를 첨가한 CBLS는 22kg/cm^2 , 기포제를 첨가한 CBLF는 7kg/cm^2 으로 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 경향은 압축강도와 유사하게 나타났다.

그리고 사용골재에 의한 휨강도는 강자갈을 사용한 경우가 가장 크게 나타났고 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났으며, 이는 압축강도와 유사한 원인에서 기인된 결과라 하겠다.

이상에서 살펴 본 바와 같이, 사용골재에 의한 각 강도는 강자갈을 사용한 경우가 가장 크게 나타났고 팽창점토와 경석을 사용한 경우는 거의 유사하게 나타났으며, 최대압축강도는 66kg/cm^2 이하로 아주 작게 나타났다. 그리고 감수제 첨가로 강도는 증가하는 경향을 보였으나, 기포제 첨가에 의한 강도의 감소는 상당히 크게 나타나 강도값이 아주 작게 나타났다.

따라서, 세골재로 팽창 폴리스티렌 비드를 사용한 콘크리트의 강도는 조골재의 영향보다는 세골재의 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있었다.

4. 초음파진동속도

초음파진동속도 시험결과는 Table-7에 나타나 있듯이, 강자갈을 사용한 CBG의 초음파진동속도는 $2,927\text{m/sec}$, 감수제를 첨가한 CBGS

는 3,101m/sec, 기포제를 첨가한 CBGF는 2, 245m/sec로 나타나, 감수제 첨가로 증가하였고 기포제 첨가로 감소하는 경향을 보였다.

이는 감수제를 첨가함으로써 콘크리트의 단위수량 감소로 밀도가 증가되었고, 기포제 첨가로 혼합시 발생된 기포에 의해서 콘크리트의 유동성이 증가하여 단위수량은 감소하였으나, 발생된 기포로 콘크리트 내부에 다량의 공극이 존재하게 되고, 이 공극이 초음파전달 속도를 저하시켜 나타난 결과로 생각된다.

그리고 팽창점토를 사용한 CBE의 초음파진동속도는 2,899m/sec, 감수제를 첨가한 CBES는 3,101m/sec, 기포제를 첨가한 CBEF는 1,928m/sec로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 2,765m/sec, 감수제를 첨가한 CBLS는 2,923m/sec, 기포제를 첨가한 CBLF는 1, 173m/sec로 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 변화는 CBG와 유사하게 나타났다.

사용골재에 의한 초음파진동속도는 강자갈과 팽창점토를 사용한 경우는 거의 유사하게 나타났고 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났는데, 이는 다른 골재보다 경석의 내부에 공극이 더 많이 존재함을 의미하는 것으로 생각된다.

특히, 기포제 첨가에 의한 초음파진동속도의 감소폭이 감수제 첨가에 의한 증가폭 보다 상당히 크게 나타났는데, 이는 감수제 첨가에 의한 콘크리트의 밀도 증가보다는 기포제 첨가에 의한 공극형성 효과가 더 크다는 것을 나타내는 것이다. 그리고 기포제 첨가시 경석을 사용한 경우의 초음파진동속도가 가장 작게 나타났는데, 이로써 골재의 입형이 거칠고 모달 수록 기포제 첨가에 의한 기포발생효과가 더 크다는 것을 알 수 있었다.

5. 동탄성계수

시험결과 나타난 동탄성계수는 Table-7에서 보는 바와 같이, 강자갈을 사용한 CBG는 0.66

$\times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났고, 감수제를 첨가한 CBGS는 $0.74 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBGF는 $0.38 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났으며, 감수제 첨가에 의하여 증가하였고, 기포제 첨가에 의하여 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 감수제 첨가에 의한 단위수량의 감소로 콘크리트의 밀도가 증가하였고, 기포제를 첨가함으로써 혼합시 발생된 기포로 인하여 콘크리트의 내부에 다량의 공극이 존재하여 나타난 결과로 생각된다.

그리고 팽창점토를 사용한 CBE의 동탄성계수는 $0.58 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 감수제를 첨가한 CBES는 $0.70 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBEF는 $0.32 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 $0.43 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 감수제를 첨가한 CBLS는 $0.50 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBLF는 $0.21 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났으며, 혼화제 첨가에 의한 동탄성계수의 변화는 CBG와 유사하게 나타났다.

한편, 사용골재 차이에 의한 동탄성계수는 강자갈을 사용한 경우가 가장 크게 나타났고, 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났는데, 이는 골재의 특성에서 기인된 결과로 생각된다. 즉, 다른 골재에 비하여 강자갈의 내부조직은 천연골재로서 상당히 치밀하며 큰 강도를 가지는 조직으로 이루어져 있지만, 팽창점토나 경석의 경우는 골재 제조시 내부에 다량의 공극을 함유하고 있고, 특히 경석은 팽창점토보다 내부공극이 더 많고 강도가 약하기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

6. 정탄성계수

정탄성계수 시험결과 Table-7에 나타나 있듯이, 팽창 폴리스틸렌 비드에 강자갈을 사용한 CBG의 정탄성계수는 $0.15 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났고, 감수제를 첨가한 CBGS는 $0.22 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBGF는 $0.14 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났으며, 감수제 첨

가로 증가하였고 기포제 첨가로 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 감수제 첨가로 콘크리트의 단위수량이 감소하여 내부조직이 치밀해졌고, 기포제 첨가에 의해서 발생된 기포로 콘크리트의 조직이 다공질화되어 나타난 결과라 하겠다.

그리고 팽창 폴리스틸렌 비드에 팽창점토를 사용한 CBE의 정탄성계수는 $0.14 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 감수제를 첨가한 CBES는 $0.15 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBEF는 $0.12 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 으로 나타났고, 경석을 사용한 CBL은 $0.12 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 감수제를 첨가한 CBLS는 $0.15 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 기포제를 첨가한 CBLF는 $0.009 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 로 나타났으며, 혼화제 첨

가에 의한 정탄성계수의 변화는 CBG와 유사하게 나타났다.

전반적인 정탄성계수는 상당히 작게 나타났고, 사용골재에 의한 정탄성계수의 변화는 강자갈을 사용한 CBG가 가장 크게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 이는 세골재로 사용된 팽창 폴리스틸렌 비드는 자체강도가 전혀 없기 때문에 콘크리트 내부에서 강도발현에 기여를 못하고, 단지 팽창 폴리스틸렌 비드가 차지하고 있는 공간만큼 공극을 생성시켜 주는 역할만 하기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

한편, 사용조골재 및 혼화제 첨가의 유무에 따른 각 Type별 물리·역학적 성질의 비교치를 나타내면 Table-8과 같다.

Table-8. Comparison of physical and mechanical properties

Type \ Item	CBG	CBGS	CBGF	CBE	CBES	CBEF	CBL	CBLS	CBLF
Unit weight(kg/m ³)	100	107.3	78.8	72.2	78.8	57.9	72.0	77.4	58.8
Compressive strength(kg/cm ²)	100	110	13.3	70.0	83.3	15.0	61.7	66.7	10.0
Static modulus of elasticity(kg/cm ²)	100	144.7	91.8	94.4	101.3	79.6	82.7	97.2	6.3
Dynamic modulus of elasticity(kg/cm ²)	100	110.6	57.6	86.6	105.2	47.4	64.5	74.5	31.5
Pulse velocity(m/sec)	100	105.9	76.7	99.0	105.9	65.9	94.5	99.9	40.1

여기서 보는 바와 같이, 강자갈을 사용한 CBG에 감수제를 첨가한 CBGS를 제외한 모든 Type에서 역학적 특성이 저하되는 것으로 나타났으며, 특히 각 Type별 기포제를 첨가한 경우의 압축강도는 CBG와 비교하여 상당히 작은 것으로 나타났다.

7. 응력-변형율곡선

시험결과 나타난 각 Type별 응력-변형율곡선은 Fig. 3, 4, 5와 같다.

여기서 보는 바와 같이, 강자갈을 사용한

CBG의 응력-변형율곡선은 응력의 증가와 함께 기울기가 증가하여 파괴응력 후 급격히 감소하다가 서서히 증가하는 경향으로 나타났으며, 초기응력 재하시 곡선의 기울기는 상당히 크게 나타났으나, 응력을 회복하여 가는 영역에서의 기울기는 상당히 완만하게 나타났다.

그리고 파괴응력하에서의 변형은 크게 나타나지 않았으나, 파괴이후 내하능력을 회복하는 구간에서는 최대응력의 일정량을 지속적으로 지탱하면서 변형이 진행되는 것으로 나타났다. 이는 세골재로 사용된 팽창 폴리스틸렌

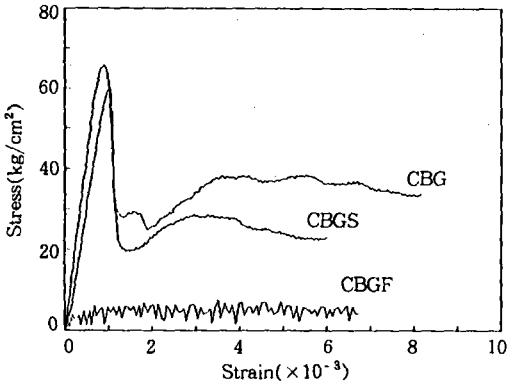


Fig. 3. Comparison of stress-strain curve (Type CBG)

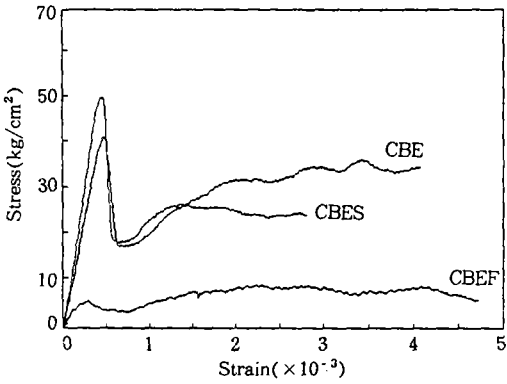


Fig. 4. Comparison of stress-strain curve (Type CBE)

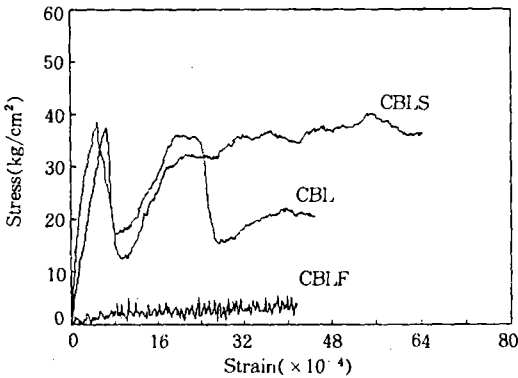


Fig. 5. Comparison of stress-strain curve (Type CBL)

비드가 콘크리트의 강도발현에 기여하지는 못하고, 단지 골재가 차지한 영역이 공극의 형태로 존재함으로써 나타난 현상으로 생각된다.

즉, 응력의 증가에 의한 콘크리트의 파괴형상은 골재와 시멘트 페이스트의 결합파괴가 표면으로부터 생기고, 이런 파괴가 콘크리트의 내부로 진행이 되어가는 과정에서 이미 파괴된 부분에서는 골재의 압밀이 생겨서 내부 응력이 증가한다는 것을 의미하는 것으로, 최대응력 하에서 콘크리트는 파괴가 되나 내부의 시멘트 페이스트와 골재는 아직 견고한 결합력을 가지고 있다는 것을 의미하는 것으로, 팽창점토를 사용한 경우도 이와 유사하게 나타났다.

한편, 기포제를 첨가한 경우의 응력-변형률 곡선은 초기응력부터 일정한 기울기로 증가하는 것이 아니고, 증가와 감소가 반복되는 파형으로 나타났는데, 이는 세골재로 팽창 폴리스틸렌 비드가 사용되었고 기포제 첨가에 의한 기포발생으로 인하여 콘크리트는 상당히 다공질의 결정체가 됨으로, 응력증가에 의한 파괴형상이 시멘트 페이스트와 골재의 결합파괴와 파괴된 부분에서의 골재의 압밀과정이 다른 Type보다 상당히 짧은 시간에 반복적으로 진행되어 나타난 현상으로, 응력증가에 의한 변형은 이러한 파괴가 콘크리트 전체에서 발생될 때까지 계속될 것으로 판단된다.

또한, 경석을 사용한 CBL의 응력-변형률 곡선은 응력의 증가와 함께 변형이 증가하여 파괴응력 이후에 급격히 감소하는 경향을 보이다가, 파괴응력의 50% 근처에서 다시 증가하여 감소하는 형태를 반복하여 나타내는 경향을 보였는데, 이는 초기 하중 증가시 콘크리트의 표면에서 골재의 맞물림이 견고하게 이루어지면서 하중을 지탱하다가 파괴가 된 후 내하능력을 상실하지만, 이후 내하능력을 회복하고 상실하는 현상을 반복적으로 가지기 때문이다.

한편, 사용골재에 의한 응력-변형을 곡선은 거의 유사하게 나타났으나, 경석을 사용한 CBL은 파괴 이후에 나타나는 내하능력의 발휘가 다른 Type의 콘크리트보다 상당히 크게 회복되는 것으로 나타났는데, 이는 경석의 입형이 다른 골재에 비하여 거칠고 모았기 때문에, 시멘트 페이스트와 골재와의 결합력이 다른 Type보다 강하고, 하중이 증가함으로써 나타나는 골재의 압밀에 의한 맞물림이 강하기 때문이라 하겠다.

IV. 결 론

본 실험은 세골재로 팽창 폴리스틸렌 비드를 사용하고 조골재로서 강자갈과 팽창점토 및 경석을 사용한 초경량 콘크리트를 제작하여, 이의 물리·역학적 특성을 구명하고 실제 활용을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 실시되었으며, 실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 물-시멘트비는 조골재로 강자갈과 팽창점토를 사용한 경우보다 경석을 사용한 경우가 크게 나타났다.

2. 단위중량은 조골재로 강자갈을 사용한 경우를 제외하고 $1,000\text{kg}/\text{m}^3$ 이하로 상당히 작게 나타났으며, 팽창점토와 경석의 사용에 따른 차이는 거의 없었다.

3. 사용골재에 따른 압축강도는 $60\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하로 상당히 작게 나타났고, 팽창점토보다는 경석의 사용에 의한 강도감소 현상이 크게 나타났으며, 인장강도 및 휨강도도 각각 $13\text{kg}/\text{cm}^2$, $31\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하로 상당히 작게 나타났다.

4. 초음파진동속도는 사용골재에 상관없이 거의 유사하게 나타났으며, 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났다.

5. 동탄성계수는 전체적으로 상당히 작게 나타났으며, 경석을 사용한 경우가 가장 작게 나타났다.

6. 정탄성계수는 사용골재에 상관없이 전체적으로 상당히 작게 나타났고, 사용조골재의 차이에 따른 차이는 거의 없었으며, 동탄성계수의 22%~29% 정도의 수준으로 나타났다.

7. 사용조골재에 따른 응력-변형곡선은 거의 유사하게 나타났으며, 최대응력하에서의 변형은 작게 일어났으나, 이후의 변형은 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

1. 김성완·성찬용·민정기·정현정(1995), 경량콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구, 한국농공학회지 제37권 제5호, pp. 90-100.
2. 성찬용·김성완·민정기(1993), 양생조건이 경량골재 콘크리트의 ASR에 미치는 영향, 한국농공학회지 제35권 제4호, pp. 38-46.
3. 성찬용·김성완·민정기(1994), 초경량골재를 사용한 경량콘크리트의 공학적 특성, 한국농공학회지 제36권 제4호, pp. 48-55.
4. Seabrook, P. I. and Wilson, H. S. (1988), High strength lightweight concrete for use in offshore structures : utilisation of fly ash and silica fume, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.10, No.3, pp.183-192.
5. Swamy, R. N. and Rigby, G. (1971), Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete, RILEM, Vol. 14, No. 19, pp. 13-40.
6. Swamy, R. N. and Al-Hamed, A. (1984), The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete, Journal of ACI, Vol.81, No. 2, pp. 31-37.

7. Vincent, S. (1975), Lightweight Plastic-Aggregate Concrete, ACI Journal, pp. 321-323.
8. Yoshino, A. et al. (1981), Study of the development of floating concrete for ma-

rine structure, Proc. Annual Conf. of Chugoku-Shikoku of JSCE in Japanese, pp. 346-347.

(접수일자 : 1996년 11월 7일)