

# 고분자 기포제를 이용한 경량 기포 콘크리트의 개발( I )

Development of Lightweight Foamed Concrete Using Polymer Foam Agent



변근주\*

Byun, Keun-Joo



송하원\*\*

Song, Ha-Won



박상순\*\*\*

Park, Sang-Soon

## 요 약

경량기포콘크리트란 시멘트슬러리 속에 미리 생성된 기포를 혼합시켜 양생시킴으로써 동일한 체적의 보통콘크리트보다 가볍게 만든 콘크리트를 의미한다. 본 연구의 목적은 고분자기포제를 이용하여 초경량성과 타설에 충분한 유동성을 확보하면서 소요강도를 갖는 최적의 선기포방식의 경량기포콘크리트를 개발하는데 있다. 연구결과 실리카흙, 플라이애쉬 등의 혼화재와 산업부산물인 발포폴리스티렌비드의 혼합으로 경량기포콘크리트의 역학적 특성을 개선시켜 기존의 선기포방식으로 제조된 경량기포콘크리트보다 유동성, 경량성과 강도특성이 우수한 경량기포콘크리트를 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 경량기포콘크리트의 여러 가지 배합인자에 따른 유동성 및 압축강도를 규명하였으며 최적 배합비를 도출하였다.

## Abstract

Lightweight foamed concrete is a concrete which is lighter than conventional concrete by mixing prefoamed foam in cement slurry. The objectives of this study are to develop optimal prefoamed lightweight foamed concrete with high lightness, high flowability and enough strength for special use of structural application by using the polymer foam agent.

\* 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정희원, 연세대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\* 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 4월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1997년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

By mixing the admixtures such as silica-fume and fly-ash and the industrial by-product such as styrofoam for the purpose of practical use of industrial waste, lightweight foamed concrete which has better lightness, flowability and strength than the conventional prefoamed lightweight foamed concrete is developed. This paper presents extensive data on characteristics of compressive strength and flowability of the concrete manufactured with the different factors in mix design and also presents optimum mix proportion.

Keywords : lightweight foamed concrete, polymer foam agent, styrofoam, mix design, optimum mix proportion, compressive strength, flow value.

## 1. 서 론

콘크리트는 시멘트와 물의 수화반응으로 경화체를 형성하는 다상(multi-phase)의 무기계 복합체로서 단위체적중량이 크다는 약점을 지니고 있는데,<sup>1)</sup> 이러한 약점을 보완하고 사용목적에 부합하는 물성을 갖는 경량골재콘크리트(lightweight aggregate concrete) 및 경량기포콘크리트(lightweight foamed concrete) 등의 경량콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경량기포콘크리트란 경량 콘크리트의 한 종류로서 시멘트슬러리내에 다량의 기포를 혼합시킴으로써 동일한 체적의 보통콘크리트보다 가벼운 콘크리트로 정의된다.<sup>2),3)</sup> 국내에서는 그 동안 단열재, 방음재 등의 2차제품 생산에 주로 활용되어 왔으나 근래에 해안매립지를 비롯한 연약 지반의 개발이 본격화되면서 연약지반개량재로서의 구조적 적용이 제한적으로 시도되고 있는 정도이다. 그러나 토목재료로서의 사용을 고려한 최적경량기포 콘크리트에 대한 연구가 전무한 실정이며 기술적인 측면에서도 제조기술이 표준화되어 있지 않을 뿐만 아니라 배합설계에 대한 표준화 및 시방화가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고분자기포제를 이용하여 플로우값이 180mm 이상으로 시공에 필요한 유동성과 단위체적중량 0.5t/m<sup>3</sup> 정도에서 압축강도가 30kg/cm<sup>2</sup> 이상의 최적의 경량기포콘크리트를 개발하고자 한다. 이를 위하여 경량기포콘크리트를 제조하여 각종 영향인자와 배합인자들을 분석하고 목표로 하는 유동성, 단위중량과 압축강도를 발현할 수 있는 최적배합조건을 도출하는데 연구의 목적을 둔다.

## 2. 최적경량기포콘크리트의 개발

### 2.1 사용재료의 기본물성

#### 2.1.1 기포제

기포제로는 염화물성분으로 인한 부식과 악취발생 등의 문제점을 가진 동물성 기포제의 단점을 극복했다고 평가되는 폴리아크릴레이드 계통의 고분자기포제를 사용하였다. 고분자기포제의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of polymer foam agent

color	viscosity (CPS)	PH	freezing temperature	Specific gravity
dark brown	500~1000	7	-5℃	1.12~1.2

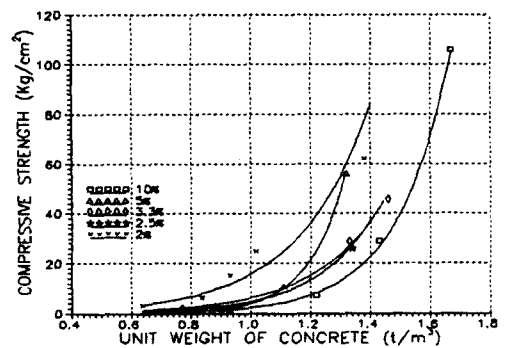


Fig. 1 Relation between unit weight and compressive strength by dilute ratio

회석비에 따른 단위체적중량과 압축강도의 관계는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타난 결과와 같이 동일 단위체적중량에서 회석비 2%의 경우에 가장 높은 압축강도를 나타내며, 포막이 안정적으로 형성되

었다. 또한 상대적으로 경제적이므로 회석수와 기포제의 최적 회석비는 50 : 1 (2%)로 정한다.

### 2.1.2 스티로폼

산업부산물인 발포폴리스티렌비드로 본 연구에서는 W사 제품인 스티로폼(styrofoam)을 사용하였고 스티로폼의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of styrofoam

specific gravity	water absorption (%)	particle size(mm)		porosity (%)	thermal conductivity kcal/mh°C
		max.	min.		
0.029	0	4	1	40	0.08

### 2.1.3 시멘트

본 실험에서는 S사 제품인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다.

### 2.1.4 잔골재

본 실험에서 사용된 잔골재는 충남 금강하류의 금강사로서 그 물리적 성질은 Table 3과 같고, 소포율을 줄이기 위해 입경이 작은 잔골재를 가능한 많이 사용하여 Fig. 2에서와 같이 표준입도 분포범위를 부분적으로 벗어나는 결과를 보였다.

Table 3 Physical properties of fine aggregate

water absorption	F.M.	aggregate size		specific gravity
		max.	min.	
1.3(%)	2.36	2.5	0.1	2.55

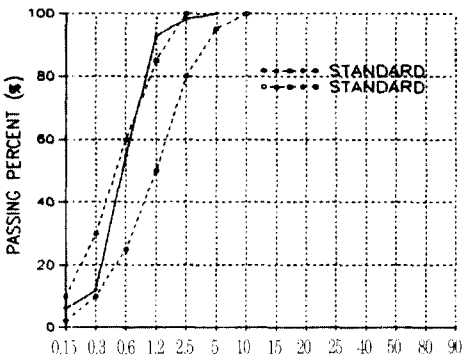


Fig. 2 Particle distribution curve of fine aggregate

### 2.1.5 혼화제

본 실험에서는 혼화제로 실리카흄과 플라이애쉬를

사용하였고 그 물리적 성질은 Table 4와 Table 5와 같다.

Table 4 Physical properties of silica-fume

specific gravity	fineness (cm <sup>2</sup> /g)	unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	grain size(μm)	shape
2.2	204,700	200~800	0.1~0.2	round

Table 5 Physical properties of fly-ash

specific gravity	fineness (cm <sup>2</sup> /g)	dry shrinkage (%)	soundness (%)	mean grain size (μm)
2.15	4,050	0.023	0.02	9.0

## 2.2 제조 공정

본 연구에서는 선기포방식으로 경량기포콘크리트를 제조하였고 그 과정은 Fig. 3과 같다.

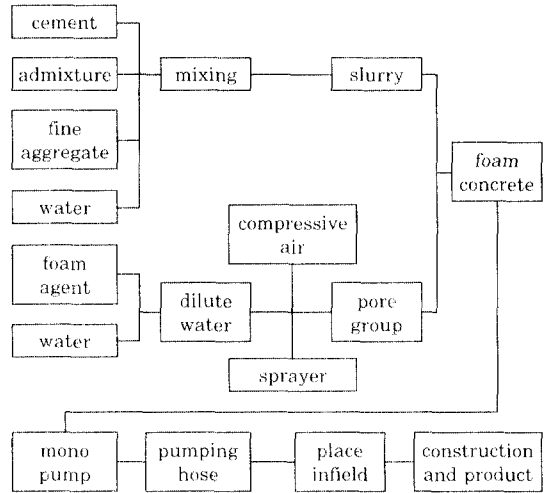


Fig. 3 Manufacturing procedure of foam concrete

## 2.3 배합설계

### 2.3.1 배합변수

(1) 본 실험에서는 굳지 않은 콘크리트의 단위중량이 0.5~1.0t/m<sup>3</sup>이 되도록 단위시멘트량과 물시멘트비, 기포율을 조정하여 배합하였다.

(2) 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 잔골재는 충남 금강하류에서 채취한 모래를 사용하였다. 기포제는 고분자기포제(polymer foam

agent)를 사용하였고, 기포제의 부분치환제로서 스티로폼을 사용하였다.

(3) 물시멘트비, 단위시멘트량, 혼화재 치환율, 스티로폼 치환율, 잔골재 혼합율을 배합변수로 하여 배합설계하였다.

### 2.3.2 배합설계과정

본 실험에서는 배합변수들을 조정하여 총 73배치(batch)의 배합을 실시하였으며 배합비의 결정과정을 정리하면 다음과 같다.

#### (1) 목표강도의 설정

사용목적에 맞게 목표강도를 설정하면 식 1에서 나타낸 바와 같이 압축강도( $\sigma$ )와 기포율( $P$ )의 관계식으로부터 기포율을 산정할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_0 (1 - P)^4 \quad (1a)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-10P} \quad (1b)$$

여기서  $\sigma_0$  = 영기포율에서의 압축강도 (kg/cm<sup>2</sup>)

#### (2) 물/시멘트비, 잔골재/시멘트비 결정

사용목적에 맞게 물/시멘트비( $W/C$ )와 잔골재/시멘트비( $S/C$ )를 결정한다.

#### (3) 기포제 및 회석수의 양결정

##### ① 스티로폼( $B$ )과 기포제( $F$ )의 체적비 결정

$$P_B = P \times \frac{B}{10} \quad (2)$$

$$P_F = P \times \frac{F}{10}$$

여기서  $P_B$  : 스티로폼의 체적(m<sup>3</sup>)

$P_F$  : 기포의 체적(m<sup>3</sup>)

##### ② 기포제와 회석수의 양결정

$$\text{기포제} : W_1 = P_F \times \frac{\rho_k}{K \times H} \quad (3)$$

$$\text{회석수} : W_2 = P_F \times \frac{\rho_w \times (K-1)}{K \times H}$$

여기서  $\rho_k$  : 기포제의 비중

$\rho_w$  : 물의 비중

$K$  : 회석율 (회석수/기포제양)

$H$  : 발포율 (발포체적/기포제양)

##### ③ 스티로폼의 양결정

스티로폼의 양은 스티로폼의 단위체적에 스티로폼의 비중 0.029를 곱하여 구한다.

$$W_B = P_B \times 0.029 \quad (4)$$

여기서  $W_B$  : 스티로폼의 양 (ton)

#### (4) 모르터의 단위체적중량 결정

$$\gamma_m = \frac{W_c + W_s + W_w}{V_c + V_s + V_w} \quad (5)$$

$$= \frac{8.19(1+W/C+S/C)}{(2.6+8.19 W/C+3.15 S/C)}$$

여기서  $\gamma_m$  : 모르터의 단위체적중량(t/m<sup>3</sup>)

$W_c, W_s, W_w$  : 배합변수들의 중량 (ton)

$V_c, V_s, V_w$  : 배합변수들의 체적 (m<sup>3</sup>)

#### (5) 단위시멘트량 결정 (ton)

$$W_c + W_s + W_w = \gamma_m (1 - P) \quad (6)$$

$$W_c = \frac{\gamma_m (1 - P)}{(1 + W/C + S/C)}$$

#### (6) 단위체적중량 결정

$$\gamma_{\text{fresh}} = (1 - P) \gamma_m + P_F \gamma_F + P_B \gamma_B \quad (7)$$

여기서  $\gamma_{\text{fresh}}$  : fresh콘크리트의 단위중량(t/m<sup>3</sup>)

$$\gamma_F = \frac{(W_1 + W_2)}{P_F} \quad (\text{t/m}^3)$$

$$\gamma_B = \frac{W_B}{P_B} \quad (\text{t/m}^3)$$

## 2.4 배합인자에 관한 실험적 분석

### 2.4.1 물시멘트비에 따른 압축강도 특성

스티로폼과 기포의 체적비를 변화시킨 배합설계에서 물시멘트비 효과를 Fig. 4에서 나타내었는데, 스티로폼과 기포의 체적비( $B : F$ )가 5 : 5인 경우에는 물시멘트비가 0.4일 때 압축강도가 32kg/cm<sup>2</sup>로 가장 높았고,  $B : F$ 가 0 : 10, 10 : 0인 경우에는 물시멘트비가 0.5인 경우 강도발현이 가장 높은 것을 알 수 있다.

### 2.4.2 단위시멘트량에 따른 압축강도 특성

경량기포콘크리트에서 단위시멘트량과 압축강도와 관계를 고찰하기 위하여  $W/C=0.5, S/C=0$  인 경량기포콘크리트의  $B : F$ 를 0 : 10, 3 : 7, 5 : 5, 7 : 3,

10 : 0으로 변화시켜 각각의 단위시멘트량과 압축강도의 관계를 Fig. 5에 나타내었는데, 단위체적중량이  $0.6t/m^3$  이하이고 압축강도  $30kg/cm^2$  이상인 최적의 경량기포콘크리트의 개발을 위해서는 기포에 대한 스티로폼의 치환비율이 50% 이상인 경우는 단위시멘트량을  $460kg$  이하로 결정하는것이 바람직하고, 50%이하인 경우의 최적 단위시멘트량은  $450\sim 520kg$  이다. 본 논문에서는 초기재령에서의 경량기포콘크리트의 수화열과 건조수축 등은 고려하지 않았다.

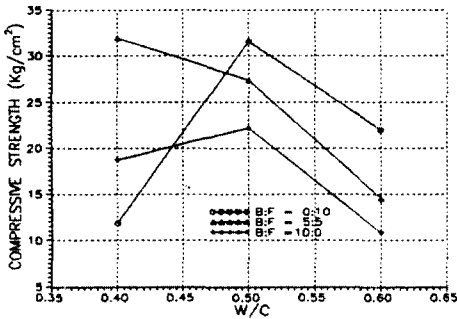


Fig. 4 Relation between w/c and compressive strength by replacing rate of styrofoam

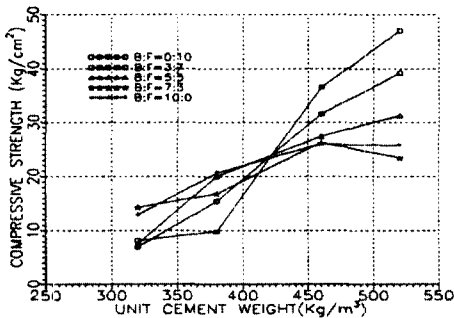


Fig. 5 Compressive strength change by unit cement weight

#### 2.4.3 혼화제 치환율에 따른 압축강도특성

Fig. 6에서는 플라이애쉬의 시멘트 치환율을 10~50%로 변화시키면서, B : F가 0 : 10, 7 : 3, 5 : 5인 경우의 압축강도의 변화를 비교하였는데 플라이애쉬의 시멘트치환은 보통콘크리트의 경우와 같이 초기강도 증진에는 큰 기여를 하지 못하는 것으로 판단된다.

실리카흄 치환율에 따른 강도특성의 변화는 Fig. 7에서와 같이 동일한 단위체적중량이 되도록 기포의 양을 조절할 상태에서 실리카흄의 시멘트 치환율을 0~20%로 변화시켜 경량기포콘크리트의 압축강도 변

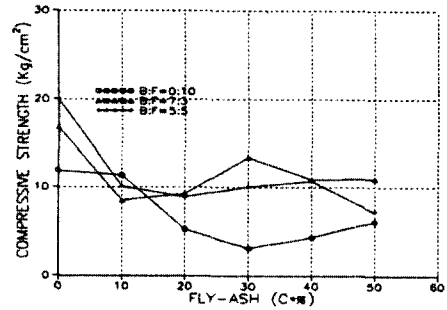


Fig. 6 Compressive strength change by replacing rate of fly-ash

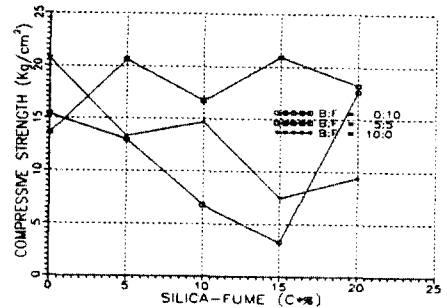


Fig. 7 Compressive strength change by replacing rate of silica-fume

화를 나타내었다.

Fig. 7에서와 같이 스티로폼을 치환하지 않은 경량기포콘크리트의 최적 실리카흄의 시멘트치환율은 20%이며, 스티로폼을 치환한 경우에는 5%가 최적 치환율이다. 일반콘크리트의 경우 실리카흄이 시멘트페이스트와 골재사이의 천이영역(interface transition zone)의 물성을 개선시켜 강도증진 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나, 골재를 사용하지 않은 경량기포콘크리트의 경우 천이영역의 존재 여부가 명확치 않아 실리카흄 치환에 의한 강도증진 효과는 분명하지 않았다.

#### 2.4.4 스티로폼 치환율에 따른 압축강도특성

스티로폼은 비중이 0.03 이하로 기포제에 의해 발포된 기포의 비중 0.05보다도 작기 때문에 본 실험에서는 기포제의 부분 치환제로서 사용하여 기포콘크리트 전체 체적중 시멘트 모르타가 차지하는 체적외의 공극을, B : F를 10 : 0, 7 : 3, 5 : 5, 3 : 7, 0 : 10로 변화시켜 채우는 방식으로 각 치환율에 따른 단위체

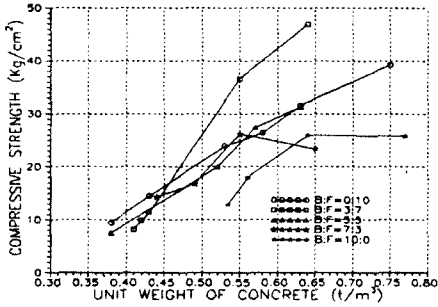


Fig. 8 Compressive strength change by replacing rate of styrofoam

적중량과 압축강도의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서와 같이 단위체적중량 0.55t/m³에서의 압축강도를 비교해보면 B:F가 3:7일 때 36.6kg/cm²으로 순수기포콘크리트의 압축강도 24kg/cm²보다 압축강도가 향상되었다. 그러므로 최적의 스티로폼 치환율은 기포의 30%이다.

#### 2.4.5 잔골재 혼합율에 따른 압축강도특성

본 실험에서는 Fig. 9에서와 같이 S/C를 0, 0.5, 1, 1.5로 변화시켜 단위체적중량에 따른 압축강도변화를 비교하였다.

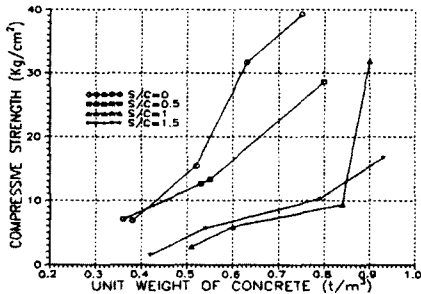


Fig. 9 Compressive strength change by mixing rate of fine aggregate

단위체적중량이 0.8t/m³ 이하인 경량기포콘크리트는 Fig. 9에서와 같이 잔골재 혼합율이 증가할수록 압축강도가 저하되었으며, 소포현상으로 인한 체적 감소현상이 더욱 두드러져 잔골재를 혼합하지 않는 것이 바람직하였다.

#### 2.4.6 기포율과 압축강도와의 관계

경량기포콘크리트의 압축강도와 기포율은 직접적

인 함수관계를 가지고 있다. Fig. 10에서는 기포율에 따른 경량기포콘크리트의 압축강도비( $\sigma/\sigma_0$ )를 보여준다. 그 결과를 회귀분석하면 배합설계과정에서 언급한 식 1과 같다. 이 식은 Balshin과 Ryshkewitch의 제안식<sup>(4),(5)</sup>과 동일한 형태를 갖는다.

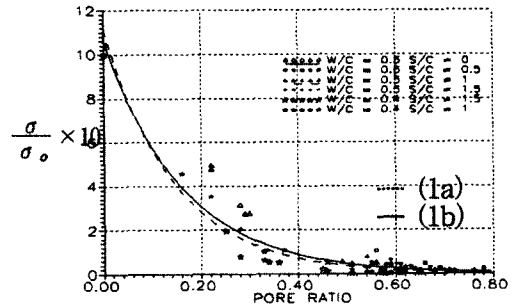


Fig. 10 Relation between pore ratio and compressive strength

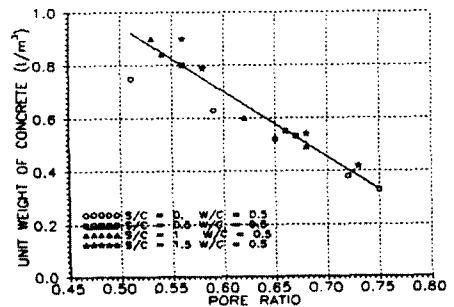


Fig. 11 Relation between pore ratio and unit weight

기포율은 경량기포콘크리트의 단위체적중량과도 직접적인 함수관계를 가지고 있는데, 기포율과 단위체적중량의 관계를 도시하면 Fig. 11과 같다.

Fig. 11의 결과를 회귀분석하여 기포율 (P)과 단위체적중량과의 관계식을 나타내면 식 8과 같다.

$$\gamma_m = 2.1 - 2.3 P \quad (8)$$

여기서  $\gamma_m$ : 기포콘크리트의 단위체적중량(t/m³)

#### 2.4.7 유동성

유동성은 플로우실험으로부터 얻은 플로우값에 의하여 판단된다. 경량기포콘크리트의 물시멘트비에 따른 플로우 실험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 본 실험의 기본배합에서는 180mm를 기본값으로 정하였는데 플로우값 180mm는 재료분리 없이 500m 정도의 펌프압송이 가능하며 타설시에 충분한 유동성을 확

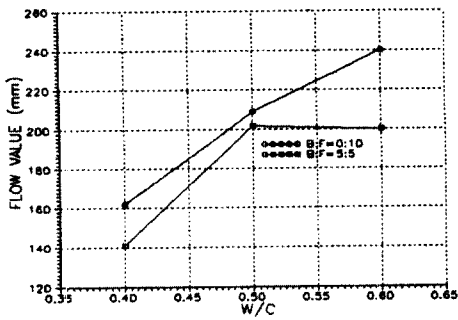


Fig. 12 Flow values change by w/c

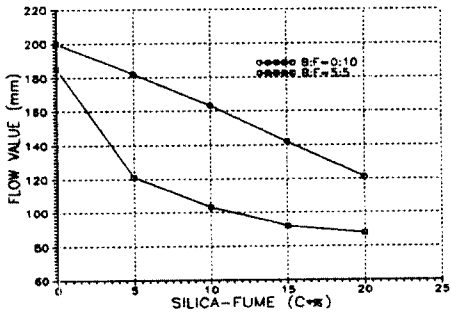


Fig. 13 Flow values change by replacing rate of silica-fume

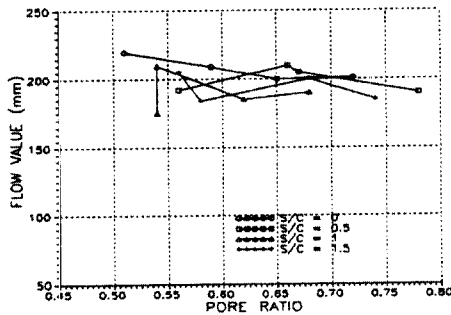


Fig. 14 Flow values change by pore ratio

보할 수 있기 때문이다.<sup>10,11)</sup> 스티로폼을 혼합하지 않은 기포콘크리트의 경우에는 물시멘트비가 0.45 이상이면 180mm 이상의 플로우값을 나타내어 충분한 유동성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 물시멘트비의 증가에 따라 플로우값이 증가하는 경향을 보였다. 스티로폼을 혼합한 기포콘크리트의 경우에는 물시멘트비 0.5일 때 가장 높은 플로우값을 나타내었다. Fig. 13에서는 실리카흄 치환율에 따른 플로우값 변화를 나타내었는데, 치환율이 증가할수록 플로우값이 선형적으로 감소하는 결과를 보였고, 스티로폼을 함께 혼

합한 경우에는 상대적으로 급격한 비율로 플로우값이 감소함을 알 수 있다. Fig. 14에서는 기포율에 따른 플로우값의 변화를 나타냈는데, 기포율이 0.5 이상인 경우 모래시멘트비(S/C)에 관계없이 대체로 180mm 이상의 플로우값을 나타내었다.

## 2.5 경량기포콘크리트의 최적배합비 도출

실험결과를 통하여 연구목적에 부합되는 최적의 배합비는 Table 6과 같다.

Table 6 Optimum mix proportions

factor	ratio	comment
W/C	0.5	-
unit weight of cement(kg)	450~520	if B : F > 5 : 5, below 460kg
fine aggregate	0	-
amount of silica-fume in cement(×C%)	5	if B : F = 0 : 10, 20%
amount of styrofoam in pore (×P%)	30	-
porosity(P)	0.55~0.6	-

## 2.6 타연구결과와의 비교

본 연구를 통해 개발한 경량기포콘크리트와 기존의 선기포방식의 경량기포콘크리트<sup>10)</sup>의 단위체적중량과 압축강도의 관계를 비교하면 Fig. 15와 같이 단위체적중량이 0.38~0.64t/m<sup>3</sup>인 범위에서 기존 경량기포콘크리트보다 압축강도가 높으며, 최고 47kg/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 갖고 있어 기존의 경량기포콘크리트에 비해 약 1.5배 이상 압축강도특성이 우수한 것으로 나타났다.

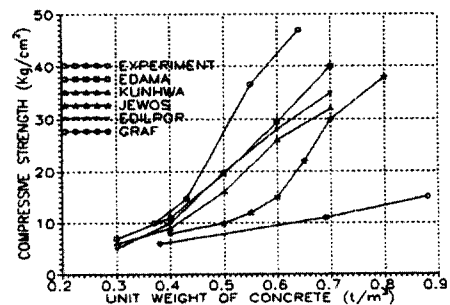


Fig. 15 Comparison of compressive strength with other experiment

### 3. 결 론

본 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구를 통하여 플로우값이 180mm 이상으로 시공에 필요한 유동성을 가지며 기존 선기포방식의 경량기포콘크리트 보다 1.5배 이상의 압축강도를 갖는 경량기포콘크리트를 개발하였다. 개발된 경량기포콘크리트는 단위체적중량 0.55t/m<sup>3</sup>에서 압축강도 36.6kg/cm<sup>2</sup>, 단위체적중량 0.64t/m<sup>3</sup>에서 압축강도 47kg/cm<sup>2</sup>를 갖는다.
2. 배합인자의 강도특성과 유동성에 관한 실험적 분석을 통하여 개발목표치(플로우값 180mm, 단위중량 0.5t/m<sup>3</sup>, 압축강도 30kg/cm<sup>2</sup>)를 얻기 위한 최적의 경량기포콘크리트의 배합비는 물시멘트비 0.5, 단위시멘트량 520kg, 스티로폼과 기포의 체적비 3:7, 실리카흙 치환률 5%이었다.
3. 경량기포콘크리트의 배합인자의 실험적 분석을 통해 배합설계과정을 체계화시켰으며 기포율과 압축강도와의 관계 및 기포율과 단위체적중량과의 관계를 정식화시켰다.
4. 향후 시멘트 사용량의 증가에 따른 초기재령에서의 수화열, 건조수축 및 소포에 의한 체적 감소현상 등의 문제점에 대한 보다 명확한 규명이 필요하다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Watson, K. L., Eden, N. B. and Farrant, J. R., "The Effect of Admixture on the Relationship between Compressive Strength and Density of Autoclaved Aerated Concrete made from Slate Powder and Portland Cement", Silicates Industrials, Vol. 43, 1978, pp. 57-64.
2. Short, A. and Kinniburgh, W., Lightweight Concrete, 3rd Ed., Applied Science Publishers Ltd., London, 1978, pp. 1-14.
3. 山田哲夫, "超軽量콘크리트開發", セメント・コンクリート, No. 577, 1995, pp. 32-36.
4. Watson, K. L., "Autoclaved Aerated Concrete from Slate Waste, Part 2: Some Property/Porosity Relationships", The International Journal of Lightweight Concrete, Vol. 3, No. 2, 1980, pp. 121-123.
5. Edan, N. B., Manthorpe, A. R., Miell, S. A., Szymanek, P. H. and Watson, K. L., "Autoclaved Aerated Concrete from Slate Waste, Part 1: Some Property/Density Relationships", The International Journal of Lightweight Concrete, Vol. 2, No. 2, 1980, pp. 95-100.
6. 쌍용양회공업주식회사, ALC개론, 1992, pp. 13-38.  
(접수일자 : 1996. 8. 6)