

## 단열콘크리트의 레올로지 특성에 관한 실험적 연구

# An Experimental Study on the Rheology Characteristics of Insulating Concrete

류동우<sup>1\*</sup> · 지식원<sup>2</sup> · 전현규<sup>3</sup>

Dong-Woo Ryu<sup>1\*</sup> · Suk-Won Ji<sup>2</sup> · Hyun-Kyu Jeon<sup>3</sup>

(Received May 13, 2016 / Revised June 7, 2016 / Accepted June 7, 2016)

The purpose of this study is to analyze the rheology characteristics of insulating concrete for each type of insulation performance improvement material and utilize the result as preliminary data for optimal flow designing and pumping analysis. As a result, when lightweight aggregate was mixed, the yield stress decreased significantly, and in case of type 2, the combination of micro form cell admixture (MFA) and calcined diatomite powder (DM) showed the most ideal flow characteristics. In case of type 3, the combination of micro form cell admixture (MFA), calcined diatomite powder (DM) and lightweight aggregate (L) showed the best flow characteristics.

**키워드** : 단열콘크리트, 레올로지, 마이크로기포제, 규조토 미분말, 경량골재

**Keywords** : Insulating concrete, Rheology, Micro form cell admixture, Calcined diatomite powder, Lightweight aggregate

## 1. 서론

건설산업은 국내 전체 재료 소비의 40%, 에너지 소비의 24%, CO<sub>2</sub> 배출량의 42%를 차지하고 있으며, 특히 건축물에서 LCCO<sub>2</sub>의 40~50%가 쾌적한 실내 환경조절을 위한 냉난방 설비를 운영하는 과정에서 방출되고 있다(Choi 2012). 이러한 관점에서 최근 건축물의 에너지 성능에 중요한 역할을 담당하고 있는 건물 외피의 중요성을 인식하고 이에 대한 에너지 절감방안 연구가 활발하게 진행되고 있으나 주로 창호 단열에 관한 연구가 주를 이루고 있는 반면 건축물 외피의 약 70% 이상을 차지하고 있는 콘크리트 벽체 자체의 단열성능 향상에 대한 연구는 미비한 실정이다.

콘크리트는 구조적 안전성은 매우 높으나 단열성능이 낮은 단점을 가지고 있어 단열재의 추가 시공이 필수적으로 요구되어진다. 그러나 국내 공동주택 거의 대부분의 경우가 내단열 시공으로 인한 열교현상(thermal bridge)이 발생하고 있는 점을 고려할 때 외단열 시스템 도입 뿐 만 아니라 콘크리트 자체에 단열성능을 부

여하여 열손실을 최소화시키는 방법도 현실적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

이에 선행연구(Park et al. 2016)로서 구조용 단열콘크리트의 제조를 위한 단열성능 향상 재료로서 마이크로기포제, 규조토 미분말, 경량골재, 할로마이크로스피어 등을 사용한 단열콘크리트의 열전도율 및 열관류율 특성을 평가하고 최적배합설계 및 생산기술을 개발하였다.

이러한 방법들은 다공성의 미세 분말을 사용함에 따라 콘크리트의 점성이 증가되며, 다공 구조의 재료들로 구성되어 있어 현장에서의 시공시 펌프 압송에 따라 콘크리트에 압력이 작용하여 체적변화 및 제반 물성 변화를 일으키게 된다. 따라서 본 연구에서는 단열콘크리트 제조시 예상되는 소성점도의 증가에 대한 레올로지 특성을 시멘트모르타르가 아닌 콘크리트를 대상으로 분석하여 단열 콘크리트의 최적 유동설계 및 펌핑해석을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

\* Corresponding author E-mail: dwryu@daejin.ac.kr

<sup>1</sup>대진대학교 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Daejin University, Gyeonggi-Do, 11159, Korea)

<sup>2</sup>인덕대학교 건축학과 (Department of Architecture, Induk University, Nowon-Gu, Seoul, 01878, Korea)

<sup>3</sup>GS건설 기술연구소 (Department of Research, GS E&C, Youngin-Si, Gyeonggi-Do, 17130, Korea)

## 2. 콘크리트의 레올로지 특성평가

### 2.1 굳지 않은 콘크리트의 유동해석

#### 2.1.1 콘크리트의 레올로지 특성

대부분의 건설현장에서는 콘크리트의 펌프압송성을 판단할 때 숙련자의 경험이나 슬럼프, 슬럼프 플로 시험 등과 같은 간단한 유동성 평가 방법에 의존하고 있다(Gambhir 2004). 이와 같은 정성적인 콘크리트 평가방법은 펌프 압송시 야기되는 여러 문제들을 정확히 예측하기 힘들기 때문에 펌프압송을 정량화하는 합리적인 펌프압송계획이 필요하다. 특히, 기존 콘크리트에 비해 고유동 콘크리트의 경우 W/B비가 낮고 다량의 결합재 및 화학혼화제가 사용되기 때문에 굳지 않은 상태의 점성이 높아 일반적으로 행하여지는 슬럼프 시험 등에서는 고유동 콘크리트의 컨시스턴시를 정량적으로 평가하는 것이 곤란하다(Ferraris et al, 1992; Kim 2001; Lee 2007). 최근에는 굳지 않은 콘크리트를 빙행(bingham) 유체로 가정한 레올로지 모델(rheology model)이 일반적으로 이용되고 있다(Wallevik 2006).

#### 2.1.2 빙행 모델의 특징

굳지 않은 상태의 시멘트계 재료는 여러 재료가 유체에 포함된 서스펜션(현탁액)으로 가정하여 특정한 응력수준(항복응력) 이하에서는 고체로 그 이상의 응력에서는 소성점도를 갖는 유체와 같이 거동하게 된다. 즉 항복응력은 콘크리트의 초기 유동을 하기 위한 최소의 전단응력을 말하며 소성점도는 초기 유동 이후 유동에 저항하는 정도를 나타낸다(Fig. 1, Fig. 2).

$$\tau = \tau_o + \mu\gamma \tag{1}$$

여기서,  $\mu$  : 소성점도(plastic viscosity) 또는 빙행점도(bingham)

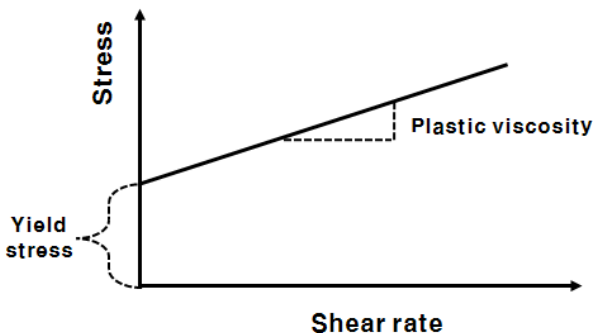


Fig. 1. Bingham model

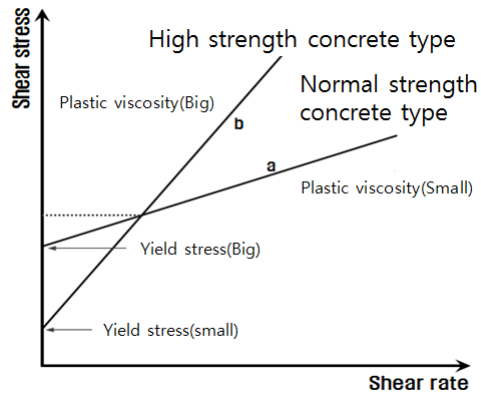


Fig. 2. Rheograph(principal illustrations)

viscosity),  $\tau$  : 전단응력(Pa),  $\tau_o$  : 빙행유체의 항복치(Pa),  $\gamma$  : 전단속도( $s^{-1}$ )이다.

## 3. 실험계획

### 3.1 실험개요

선행연구에서는 24~27MPa급 단열콘크리트의 개발을 위하여 Table 1과 Table 7에 나타난 바와 같이 원재료 분석을 통한 분체류(할로마이크로스피어, 규조토), 골재류(경량골재), 혼화제류(마이

Table 1. Component of insulation performance improvement materials

Component	Materials	Signs
1 Type	Plain concrete(25-27-150)	PL
	Lightweight aggregate	L
	Hollow micro sphere 25%	HMS25
	Calcined diatomite powder 10%	DM10
	Micro foam cell admixture 4%	MFA4
2 Type	Hollow micro sphere 25% + Lightweight aggregate	HMS25L
	Calcined diatomite powder 10% + Lightweight aggregate	DM10L
	Micro foam cell admixture 4% + Lightweight aggregate	MFA4L
	Micro foam cell admixture 4% + Calcined diatomite powder 10%	MFA4DM10
3 Type	Micro foam cell admixture 4% + Calcined diatomite powder 10% + Lightweight aggregate	MFA4DM10L
	Micro foam cell admixture 4% + Hollow micro sphere 25% + Lightweight aggregate	MFA4HMS25L

크로기포제) 등 3가지 종류의 단열성능 향상재료를 선정하여 그 치환율 및 배합변화에 따른 단열콘크리트의 기본적인 유동특성 및 열적 특성을 비교검토하여 최적의 배합을 선정하였다. 본 연구에서는 단열성능 향상재료의 타입에 따른 콘크리트의 레올로지 특성을 분석하고 그 영향을 평가하여 향후 단열 콘크리트의 최적 유동설계 및 펌핑해석을 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서 제안된 단열성능 향상재료(분체류, 골재류, 혼화제류)를 사용함에 따른 콘크리트 점성 증가 또는 펌프 압송에 따른 배관내 유동거동을 정량적으로 예측하기 위해서는 콘크리트의 레올로지 점수 즉, 항복응력(yield stress)과 소성점도(plastic viscosity)의 파악은 필수적이다.

### 3.2 사용재료

#### 3.2.1 경량골재(lightweight aggregate)

본 실험에 사용한 경량골재의 물리적 성질은 Table 2와 같으며, 주원료는 팽창 점판암이며 로터리 킬른을 이용하여 1,200℃의 온도로 소성하여 제조된 쉼개모양의 비조립형 경량골재이다. 또한 본 경량골재의 표면과 내부 공극구조를 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 SEM 촬영을 실시한 결과 폐쇄된 독립공극 구조를 지닌 것으로 분석되었다.

#### 3.2.2 할로마이크로스피어(hollow micro sphere)

할로마이크로스피어의 화학적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같이 SiO<sub>2</sub>와 CaO 등을 혼합하여 생성되는 산업제품으로 주요 성분은 규산질로 이루어져 있으며 하나의 입자는 중공구조로 되어 있다. 할로마이크로스피어의 제조는 주원료인 실리카(Silica, SiO<sub>2</sub>)

Table 2. Physical property of lightweight aggregate

Oven dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	24h absorption(%)	Porosity (%)	F.M
1.46	1.54	5.6	45.5	6.4

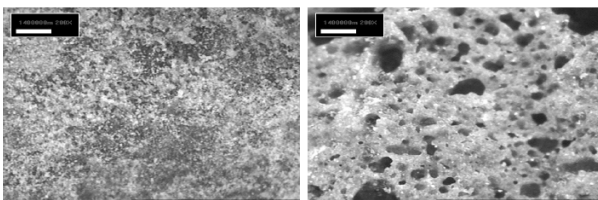


Fig. 3. Surface and internal pore of LA

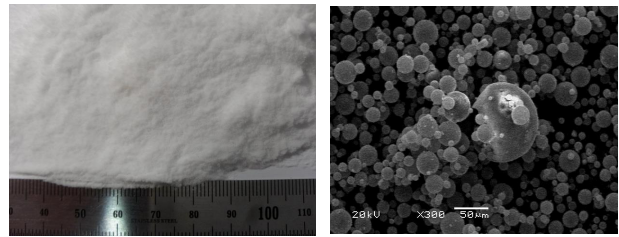


Fig. 4. Shape of hollow micro sphere

Table 3. Chemical property of hollow micro sphere

SiO <sub>2</sub>	NaO <sub>2</sub>	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
79	5.5	11.5	2.3

와 부원료인 NaO<sub>2</sub>, CaO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등을 혼합하여 고온에 용융한 뒤, 냉각수로 급냉시켜 자연적인 파쇄와 기계적인 분쇄에 의해 고분말 형태로 만들어 진다. 그리고 미세한 분말에 고온의 증기압과 야황 산가스로 발포시켜 구형의 입자로 만들고 고착방지를 위하여 흠드 실리카를 표면에 도포하는 과정을 거치면 다공성의 할로마이크로스피어가 생성되어진다. 이러한 할로마이크로스피어는 흡수율이 0.1% 이하로 중량감소, 유동성 향상, 수축/휨 저항성, 단열성, 내화학적 등의 장점이 있다. 특히 Fig. 4와 같이 얇은 박막내부에 충전된 공기와 SiO<sub>2</sub>를 감싸고 있는 중공구조의 형태로 인해 단열성능이 우수한 재료로 평가 받고 있다.

#### 3.2.3 규조토 미분말(calcined diatomite powder)

본 실험에 사용한 규조토 미분말은 일반적인 규조토를 150mesh에 대부분 통과시켜 1차 가공한 고분말 규조토이다.

규조토 미분말의 밀도는 1.1g/cm<sup>3</sup>, 단위용적질량은 215kg/m<sup>3</sup>이며 화학적 성질과 물리적 성질은 각각 Table 4와 Table 5와 같다. Fig. 5와 같이 규조토 미분말의 SEM 분석 결과 규조토 미분말은 저밀도, 고분말의 특성으로 인해 분체의 고결현상이 비교적 적게 일어나 입자와 입자 사이에 수많은 공극을 포함한 것을 알 수 있다.

Table 4. Chemical property of calcined diatomite powder

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Loss Ign
84.6	5.3	4.8	2.3	0.7	0.4	1.2

Table 5. Physical property of calcined diatomite powder

Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	150 Mesh (% retained)	Color
215	1.1	0.5	0.5	Red

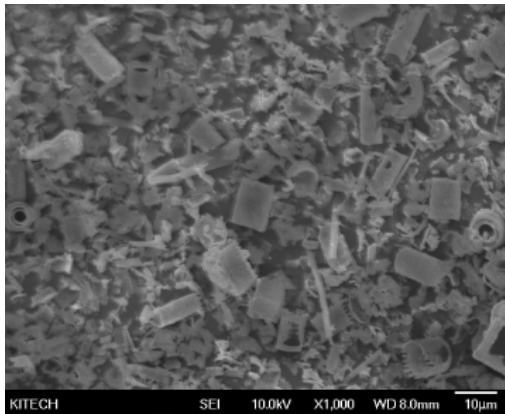


Fig. 5. SEM images of calcined diatomite powder(x1000)

### 3.2.4 마이크로기포제(micro foam admixture)

본 연구에 사용한 마이크로기포제는 콘크리트 내부에 마이크로 크기의 미세 기포를 형성하는 특징을 가지고 있으며, 고점성으로 인해 내외부 영향에 의해 발생하는 소포작용을 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다. 마이크로기포제는 콘크리트 비빔과정에서 골재와의 마찰에 의해 콘크리트 내부에 마이크로 크기의 기포를 발생시켜 콘크리트의 내부공극을 증가시키는 역할을 하게 된다. 마이크로기포제의 물리적 성질은 Table 6과 같으며 밀도는 2.15g/cm<sup>3</sup>, 점도는 80(CPS), 고형분은 약 15%로 측정되었다. 이는 일반 콘크리트용 감수제 또는 AE제 보다 밀도와 점도가 다소 높으며 증점제와 유사한 특성을 보였다.

### 3.3 실험방법

단열콘크리트 실험방법은 콘크리트 제조직후, 굳지 않은 상태에서 슬럼프와 공기량을 측정하였으며 이후 레올로지 정수를 도출하기 위한 점도 측정을 실시하였다. 단열성능 향상 재료 중 마이크로기포제는 비빔과정에서의 기포 발생을 위하여 투입량 및 투입시간 조절이 필요하며, 구조토 미분말은 고분말·저밀도 분체로써 시멘트보다 매우 미세하며 기존 배치플랜트 설비를 이용할 경우 분진발생, 재료손실, 계량 정밀 저하 등의 문제점이 발생된다. 또한 경량골재는 다공성으로 표면건조 포화상태를 유지하여야 하며 입형이 둥근 골재가 많아 컨베이어벨트에 의해 골재 이동시 골재 손

Table 6. Property of micro foam cell admixture

pH	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity (CPS)	Residue ratio (%)	Color
6.97	2.15	80	15.6	White

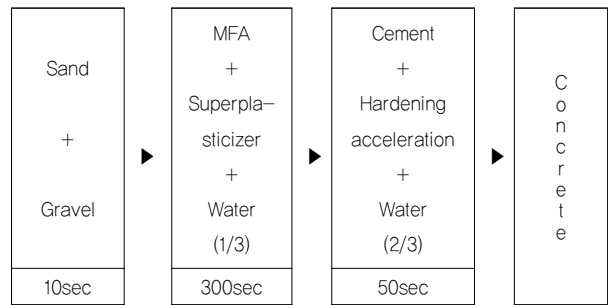


Fig. 6. Mixing method



Fig. 7. ConTec Visco5

실이 발생되므로 이를 방지할 수 있는 방안이 필요하다.

특히 본 실험에 사용된 마이크로기포제는 비빔과정에서 골재, 배합수 등과의 마찰에 의해 미세한 기포를 발생시키며 분체에 의해 발생된 기포가 손실되기도 한다. 따라서 마이크로기포제 사용 시 최적의 기포 발생을 위해 사용되는 각 재료는 적합한 투입순서와 일정한 비빔시간이 필요하며 그 순서와 시간은 Fig. 6과 같다.

단열콘크리트의 점도측정은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 ConTec Visco5를 이용하여 회전속도(rotation speed[round/s])와 회전력(torque[Nm])과의 관계를 도출한 후 Reiner-Riwlin에 적용하여 bingham 유체로 해석하여 소성점도(plastic viscosity)와 항복응력(yield stress)을 도출하였다.

## 4. 실험결과

### 4.1 슬럼프 및 공기량

Table 8에 각 타입별 단열콘크리트의 SP첨가량 및 슬럼프 측정 결과를 나타내었다. 1 type에서는 단일인자로써 목표 슬럼프를 180±10mm로 설정하였으며, MFA4를 제외한 모든 배합이 목표슬럼프를 만족하였다. 마이크로기포제를 사용한 경우, 배합시 생성되는 다량의 기포에 의해 상대적으로 높은 슬럼프를 나타내었다.

Table 7. Mix proportions for Insulating concrete

Types	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						Admixture	W/C (%)	S/a (%)	
	W	C	HMS	DM	S	G	MFA			
1	Plain	169	378	0	0	887	852	0	0.45	0.51
	L	161	310	0	0	802	543	0	0.52	0.45
	HMS	215	391	92	0	540	666	0	0.55	0.45
	DM	256	466	0	61	580	715	0	0.55	0.45
	MFA	144	479	0	0	720	726	19.16	0.30	0.50
2	HMSL	215	391	92	0	540	366	0	0.55	0.45
	DML	256	466	0	61	580	393	0	0.55	0.45
	MFAL	144	479	0	0	720	399	19.16	0.30	0.50
	MFADM	216	479	0	53	564	569	19.16	0.45	0.50
3	MFALDM	216	479	0	53	564	313	19.16	0.45	0.50
	MFALHMS	216	479	72	0	470	261	19.16	0.45	0.50

Table 8. Results measurement of slump and air

Types	Signs	Slump (mm)	Air (%)	SP (%)
1 Type	PL	180	5.3	0.06
	L	190	5.2	0.37
	HMS25	185	4.4	0.16
	DM10	180	5.5	0.40
	MFA4	225	-	0.26
2 Type	HMS25L	205	4.7	0.18
	DM10L	220	3.1	0.86
	MFA4L	230	-	0.26
	MFA4DM10	235	4.7	1.10
3 Type	MFA4DM10L	225	5.8	0.56
	MFA4HMS25L	210	-	0.06

Table 9. Results measurement of rheology constant

Types	Signs	Yield stress (Pa)	Plastic viscosity (Pa·s)
1 Type	PL	284.6	31.5
	L	179.3	41.4
	HMS25	381.3	37.8
	DM10	536.7	57.5
	MFA4	337.9	42.5
2 Type	HMS25L	277.4	43.3
	DM10L	267.3	35.4
	MFA4L	281.9	29.5
	MFA4DM10	163.8	65.0
3 Type	MFA4DM10L	288.3	51.7
	MFA4HMS25L	290.7	16.8

반면 규조토를 사용한 배합의 경우는 높은 분체량으로 인한 점성이 증가하여 타 배합에 비해 낮은 슬럼프를 나타내었고, 유동성을 확보하기 위한 SP제의 첨가량 또한 증가하였다.

#### 4.2 단열콘크리트의 레올로지 정수 측정결과

Table 9에 각 타입별 단열콘크리트의 레올로지 정수의 측정결과를 나타내었다. Fig. 8은 단열성능 향상재료 즉 분체류(할로마이 크로스피어HMS, 규조토DM), 골재류(경량골재L), 혼화제류(마이크로기포제MFA)를 혼입한 1 type 단열콘크리트의 유동특성을 나타낸 것이다.

항복응력(yield stress)은 DM > HMS > MFA > PL > L 순으로 높은 경향을 나타내었다. 특히, 분체류 중에서도 규조토(DM)의 경

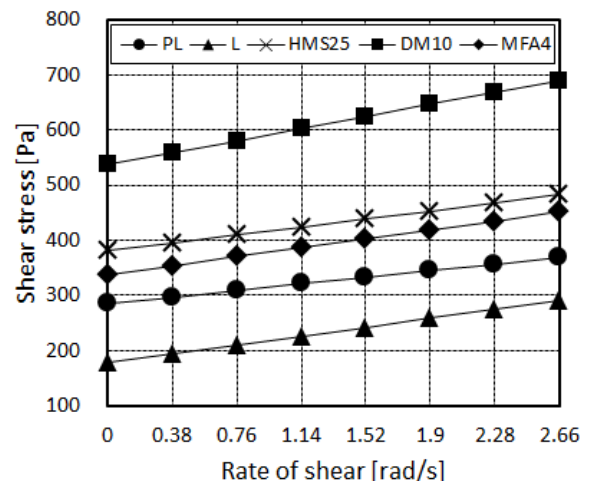


Fig. 8. Flow properties of Insulating concrete(1 type)

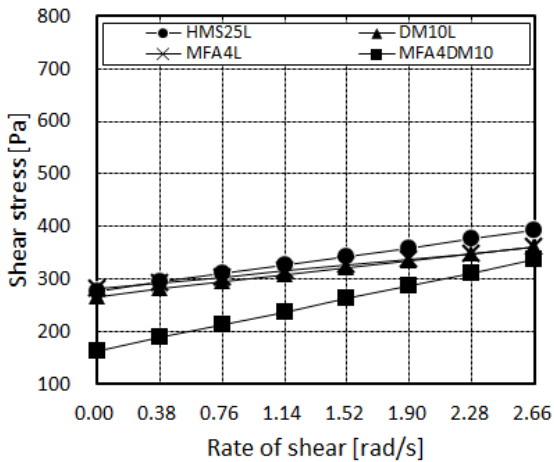


Fig. 9. Flow properties of Insulating concrete(2 type)

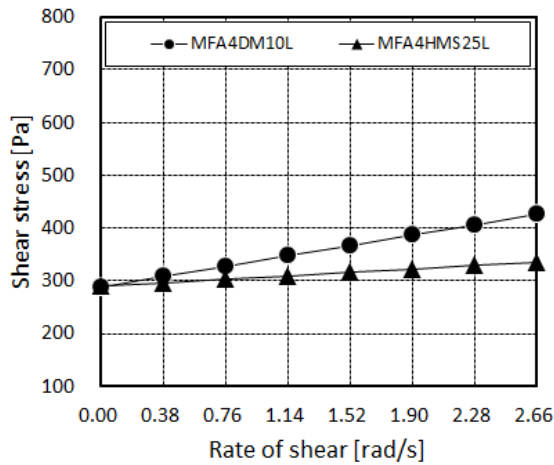


Fig. 10. Flow properties of Insulating concrete(3 type)

우가 가장 높았으며 경량골재(L)의 경우가 가장 낮았다. 소성점도(plastic viscosity)는 DM > MFA > L > HMS > PL 순으로 높은 경향을 나타내었다.

특히, 규조토(DM)의 경우 항복응력과 소성점도 모두 가장 높은 경향을 나타내고 있어 펌프압송시 유동속도의 저하 및 폐색의 위험이 있을 것으로 판단된다. 반면 경량골재의 경우 낮은 항복응력과 비교적 높은 소성점도의 특성을 지니고 있어 높은 간극통과성을 지니고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각기 다른 단열재료를 2개씩 조합한 2 type 단열콘크리트의 유동특성을 나타낸 것이다. 대체적으로 경량골재를 혼합 배합할 경우 항복응력이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있으며 2 type인 경우에는 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM)이 조합이 가장 이상적인 유동특성을 나타낸 것으로 판단된다. Fig. 10은 각

기 다른 단열재료를 3개씩 조합한 3 type 단열콘크리트의 유동특성을 나타낸 것이다. 2 type 단열콘크리트의 경우와 마찬가지로 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM)이 포함된 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM) + 경량골재(L)의 조합이 낮은 항복응력과 높은 소성점도를 나타내고 있어 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM) + 할로마이크로스피어(HMS)의 조합보다 우수한 유동특성을 나타내고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 단열성능 향상재료를 단독 또는 2가지, 3가지 종류를 상호조합한 콘크리트배합에 대한 레올로지 특성을 비교분석하여 향후 펌프압송성 평가에 활용하고자 하였다.

일반적으로 시멘트 및 혼화재의 종류, W/C비, 고성능 AE 감수제의 종류 및 첨가량, 골재량 등 수많은 배합요인이 균치 않은 콘크리트의 유동특성에 영향을 미치지만 특히 펌프압송에 따른 배관내 유동거동에서 중요한 요소는 레올로지 정수 즉, 항복응력과 소성점도이다.

즉, 콘크리트의 레올로지 특성이 펌프압송관내 마찰저항과 관련이 있으며, 소성점도가 높은 콘크리트 일수록 압력손실이 커지는 경향을 고려해 볼 때 항복응력이 낮고 소성점도가 너무 높지 않은 어느 일정 값 이상의 것이 바람직한 것으로 판단된다.

본 연구에서의 단열재료 타입별 단열콘크리트의 레올로지 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1 type의 경우 경량골재의 경우가 낮은 항복응력과 비교적 높은 소성점도의 특성을 지니고 있어 높은 간극통과성을 지니고 있는 것으로 판단된다.
- 2 type의 경우 경량골재 혼입시 항복응력이 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났으며, 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM)이 조합이 가장 이상적인 유동특성을 나타내었다.
- 3 type의 경우 마이크로기포제(MFA) + 규조토(DM) + 경량골재(L)의 조합이 우수한 유동특성을 나타내었다.

## References

Choi, M.S. (2012). Energy Efficiency Indicators for Services and Residential Sectors, Korea Energy Economics Institute [in Korean].  
 Ferraris, C.F., Gaidis, J.M. (1992). Connection between the

- rheology of concrete and rheology of cement paste, ACI Material Journal, 388–393.
- Gambhir, M.L. (2004). Concrete Technology, Tata McGraw Hill.
- Kim, W.Y. (2001). Evaluation Method of Flowability of Self-leveling Concrete by Rheology and Excess-Paste Theory, Master's Thesis, Dongeui University [in Korean].
- Lee, G.C. (2007). Study on rheological properties of suspension by shear box test, Journal of AIK, **23(8)**, 149–156 [in Korean].
- Park, Y.S. (2016). The thermal conduction property of structural concrete using insulation performance improvement materials, Journal of KIC, **16(1)**, 9–15 [in Korean].
- Wallevik, J.E. (2006). Relationship between the bingham parameters and slump, Cement and Concrete Research, **36**, 1214–1221.

#### 단열콘크리트의 레올로지 특성에 관한 실험적 연구

본 연구는 단열성능 향상 재료의 타입별 단열콘크리트의 레올로지 특성을 분석하여 최적 유동설계 및 펌핑해석을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 그 결과 경량골재 혼입시 항복응력이 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났으며, 2 type의 경우 마이크로기포제(MFA) + 규조토 미분말(DM)의 조합이 가장 이상적인 유동특성을 나타내었다. 또한 3 type의 경우 마이크로기포제(MFA) + 규조토 미분말(DM) + 경량골재(L)의 조합이 가장 우수한 유동특성을 나타내었다.