

# 論文 気泡剤種類および希釈濃度によるフレッシュ気泡コンクリートの特性

申 相澈<sup>\*1</sup>・金 振晩<sup>\*2</sup>・鄭 智溶<sup>\*3</sup>・朴 宣圭<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は先発泡方式で製造された軽量気泡コンクリートの開発のために行った基礎的な研究である。ここでは気泡剤の種類によって製造された気泡の特性を把握した後、各々の気泡を混入したフレッシュ気泡コンクリートの物理的特性を検討し、気泡剤の種類および希釈の濃度によるフレッシュ気泡コンクリートの特性を把握する研究を行った。実験の結果、タンパク質系の気泡剤は多量の水分を含んでいるため、不安定な気泡が生成されることが分かった。また、気泡自体の特性が気泡コンクリートに混入された後にも、フローとスラリー密度に影響を及ぼすことが明らかになった。

**キーワード：**気泡コンクリート, 気泡剤, 気泡, 表面張力, フロー, スラリー密度

## 1. はじめに

無機系材料である軽量気泡コンクリートは、セメントスラリーに気泡を混入して熱伝導率を低くした軽量コンクリートであり、断熱性能が優れているため建築物のエネルギー節約効果を期待することができる建設材料である<sup>1)2)</sup>。このような軽量気泡コンクリートは、気泡の導入方法によって先発泡方式と後発泡方式で分けられる。後発泡方式の代表的な製品であるALC(Autoclaved Light-weight Concrete)は高温・高圧条件の養生によってカルシウムとシリカの水熱合成反応を通じて得られるTobermorite水和物を利用した工場製品である。しかし、このようなALCはアルミニウムパウダーの反応による発泡、気泡の形状および分布などの管理が難しく密度の範囲が3種類に制限されており、適用用途が少ないという短所がある<sup>3)</sup>。一方、本研究で実験対象にしている先発泡方式による気泡コンクリートは、強度および断熱特性がALCのそれより少し低いにもかかわらず密度の範囲を0.7g/cm<sup>3</sup>以上の領域まで拡大することができ、多様な用途で使用することが可能である。また、先発泡方式は現場打ち込みが容易に適用でき、ALCのような養生方法を利用する場合には工場製品でも適用できる長所がある。

先発泡方式で製造された気泡コンクリートの特性において大きく影響を及ぼす要因は気泡剤である。気泡剤は親水基と疎水基で成り立った分子により液体の表面張力を低くするために用いられる混和剤であり、原料により種類が分類される。ここで、気泡剤の表面張力と粘度は、気泡の構造および液体の特性を変化させる主要原因であり、気泡コンクリートの製造においても重要な因子である<sup>4)5)</sup>。このような気泡剤の特性は、希釈液および軽量気泡コンクリートにおいて、気泡の発泡率、形状、サイ

ズおよび安定性などに大きな影響を与える。しかし、今までの研究では、先発泡方式の気泡コンクリートを製造するための気泡剤に関する研究は不十分な状況である。既存の研究では、主に気泡コンクリートの物理・力学的特性および混和材料(フライアッシュなど)の添加による気泡コンクリートの特性を検討する研究が行われた。しかし、気泡剤の種類による気泡の特性が気泡コンクリートの特性にどんな影響を及ぼすかについて検討した研究事例は少ない。

したがって、本研究では、気泡剤の種類による希釈液の表面張力、粘度、単位質量および発泡率などを検討した後、その液体を気泡コンクリートに適用し、先発泡方式で製造されたフレッシュ気泡コンクリートの物理的特性について検討を行った。

## 2. 実験計画および方法

### 2.1 実験計画

本研究の実験計画をTable-1に示す。気泡剤の種類および希釈濃度がフレッシュ気泡コンクリートに及ぼす影響を把握するために、まず気泡剤自体の材料特性について検討した。

気泡剤は韓国で一般的に販売されている製品を用いた。すなわち、イオン系の界面活性剤が主成分であるAESとAOS、植物性樹脂系のVSおよび加水分解のタンパク質系であるFPの4種類を用いた。4種類の気泡剤を対象にして、濃度を0.5, 1, 3および5%の質量比で希釈した後、気泡希釈液の表面張力、発泡率および単位質量を測定した。

また、気泡の特性がフレッシュ気泡コンクリートの物理的な特性の変化に及ぼす影響を検討するため、4種類の

\*1 大韓民国 国立公州大学校 研究員

\*2 大韓民国 国立公州大学校 建築工学科 教授

\*3 大韓民国 国立公州大学校 研究員

\*4 大韓民国 牧園大学校 建築工学科 教授

気泡剤を1, 3および5%の希釈濃度で製造された気泡に対してスラリー容積比30, 50, 70%で混合した後, 気泡コンクリートの密度領域を3水準で設定しフローとスラリー密度を測定した。実験配合をTable-2に示す。水・結合材比は40%, CaO/SiO<sub>2</sub>のモル比は1.0とした。

**Table-1 Plan of Experiment**

Factors	Levels	Test items
Types of foam agent	AES <sup>1)</sup> , AOS <sup>2)</sup> , VS <sup>3)</sup> , FP <sup>4)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface tension</li> <li>• Viscosity</li> <li>• Foaming rate</li> <li>• Unit weight of foam</li> <li>• Flow</li> <li>• Slurry density</li> </ul>
Concentrations of foam agent (%)	0.5*, 1, 3, 5	
Percent of foam (%)	30, 50, 70	

1) AES : Alcohol Ethoxy Sulfate, 2) AOS :  $\alpha$ -Olefin Sulfonate

3) VS : Vegetable Soap, 4) FP : Fe-Protein

\*. 0.5% is applicable only to surface tension, foaming rate and unit weight of foam.

## 2.2 使用材料

気泡剤の物理・化学的特性および使用材料の化学組成をTable-3およびTable-4に示す。気泡コンクリートの強度発現のために水熱合成反応でカルシウム原料として使用されるセメントは、普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>, 粉末度3,000cm<sup>3</sup>/g)を使用した。シリカ材料としては、粉末度が3,000cm<sup>3</sup>/g以上、SiO<sub>2</sub>の含量が88%である珪砂微粉を使用した。また、初期凝結の促進および材料分離の防止のためにAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含量が60%であるアルミナセメント(密度2.65g/cm<sup>3</sup>, 粉末度4,000cm<sup>3</sup>/g)を使用した。消石灰はカルシウムシリケート化合物の水和促進のために使用した。また、無水石膏はアルミナセメントによるミキシング中の偽凝結防止を目的として添加した。高性能減水剤はナフタリン系でセメント質量の1%を添加した。

**Table-2 Mixing design of Experiment**

W/B (%)	C/S mol ratio	Types of foam agent	Concentrations of foam agent (%)	Percent of foam (%)	Water (g/cm <sup>3</sup> )	Unit volume(ml/cm <sup>3</sup> )					Unit weight(g/cm <sup>3</sup> )					
						PC <sup>1)</sup>	Q <sup>2)</sup>	AC <sup>3)</sup>	CH <sup>4)</sup>	AG <sup>5)</sup>	Foam	PC	Q	AC	CH	AG
40	1.0	AES, AOS, VS, FP	1, 3, 5	70	160	60	64	6	4	6	700	189	168	19	9	15
				50	267	100	108	10	6	9	500	315	280	31	15	25
				30	374	140	150	14	9	13	300	441	393	44	21	35

1) PC : Portland Cement, 2) Q : Quartz, 3) AC : Alumina Cement 4) CH : Calcium Hydroxide, 5) AG : Anhydrite Gypsum

**Table-3 Physical & chemical properties of foam agent**

Types	Active Matter (%)	Free Oil (%)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Klett Color* (5%AM)	pH (Neat, 25°C)	Specific gravity (20°C)
AES	28.2	0.30	4.00	0.15	7.53	-
AOS	35.2	1.10	0.24	25.00	12.9	-
VS	25.7	-	-	-	7.47	1.02
FP	35.8	-	-	-	7.44	1.16

\*Klett color : color scale for measuring detergent of surfactant

**Table-4 Chemical composition of binders**

Types	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
PC	72.1	11.2	2.3	0.1	5.5	5.2	2.7	0.1	-	0.3
AC	37.1	2.8	59.8	-	0.2	-	-	-	-	-
Q	1.2	88.1	5.0	0.1	3.5	-	1.8	-	-	0.4
CH	93.8	1.4	0.6	0.1	1.4	1.5	-	0.1	-	-
AG	38.0	2.3	0.8	-	0.2	58.7	-	0.1	-	-

## 2.3 実験方法

### (1) 気泡および気泡コンクリートの製造方法

気泡コンクリートを製造するための混合方法をFigure-1に示す。Figure-2で示したように先発泡方式は、製造した気泡を気泡コンクリートのスラリーで添加する方法である。気泡の製造は空気圧出方式で気泡剤の希釈水溶液を流入させた後、発泡機を利用して製造した。また、セメントペーストは水熱合成反応を誘導するために普通ポルトランドセメントと珪砂微粉に混合材を添加した後、アスファルトミキサで2分30秒間混合した。

### (2) 測定方法

気泡自体の材料特性を調べるための気泡希釈液の表面張力実験は、KSに準じてFigure-3に示す表面張力計を、粘度は回転粘度計を用いて測定した。圧縮空気により発

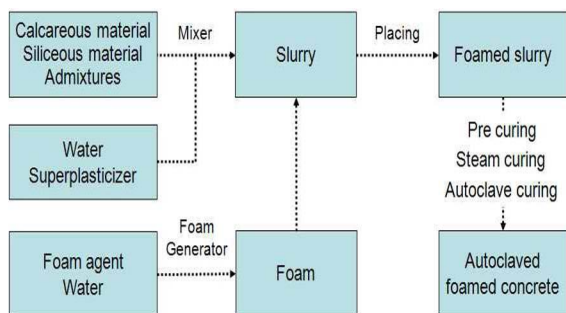


Figure-1 Mixing method

生じた気泡の発泡率は、気泡剤の希釈水溶液の単位質量を1000g/Lと仮定して測定したし式(1)で表すことができる。

$$A = \frac{S_w - F_w}{F_w} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、A : 発泡率 (%),  $S_w$  : 気泡剤の希釈水溶液単位質量 (g/L),  $F_w$  : 発泡された気泡の単位質量 (g/L)

また、気泡コンクリートのフローはKS F 4039, スラリー密度はKS F 2701に準じて試験を行った。

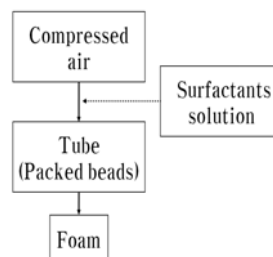


Figure-2 Schematic diagram of foam production method



Figure-3 Surface tensiometer

### 3. 実験結果および考察

本研究で行った気泡剤の種類および希釈濃度による気泡コンクリートの実験結果をTable-5に示す。

#### 3.1 表面張力

気泡の安定性は、気泡を生成する溶液の表面粘度、表面弾性などと関連があり、表面張力が小さければ気泡の生成が容易となり、安定性が優れると知られている。気泡剤の種類および希釈濃度による表面張力の変化をFigure-4に示す。表面張力の場合、一般的な水では

Table-5 Results of experiment

Types of foam agent	Concentrations of foam agent (%)	Percent of foam (%)	Foam				Foamed concrete	
			Surface tension (mN/m)	Viscosity (cP)	Foaming rate (%)	Unit weight of foam (g/cm <sup>3</sup> )	Flow (mm)	Slurry density (g/cm <sup>3</sup> )
AES	(0.5)*	70	(42)	(9.8)	(556)	(152)	168	0.53
		50					195	0.96
		30					240	1.35
	1	70	47	11.1	1,763	54	174	0.50
		50					203	0.91
		30					229	1.32
	3	70	47	11.1	2,679	36	206	0.50
		50					215	0.90
		30					246	1.33
AOS	(0.5)	70	(31)	(9.7)	(316)	(240)	189	0.52
		50					169	0.92
		30					228	1.35
	1	70	29	10.8	796	112	180	0.49
		50					175	0.89
		30					217	1.33
	3	70	29	11.1	2,340	41	165	0.48
		50					171	0.88
		30					219	1.31
VS	(0.5)	70	(40)	(11.3)	(527)	(159)	214	0.59
		50					223	1.00
		30					223	1.42
	1	70	39	11.3	1,445	65	193	0.53
		50					199	0.98
		30					238	1.37
	3	70	45	10.5	2,877	34	197	0.51
		50					204	0.92
		30					243	1.31
FP	(0.5)	70	(70)	(11)	(114)	(466)	280	0.73
		50					307	1.09
		30					309	1.40
	1	70	69	11.1	221	311	167	0.50
		50					180	0.91
		30					218	1.29
	3	70	66	11.7	1,982	48	154	0.47
		50					179	0.88
		30					208	1.29
5	70	61	12.2	2,638	37			
	50							
	30							

\* : Bracket is the result of 0.5% aqueous solution

72.2mN/mとなるが、気泡剤を添加した希釈液の場合、低下しており、気泡剤の種類による差異は(FP>AES≒VS>AOS)の順序で現れた。FPは濃度5%で60.9mN/mを示しており、濃度の増加により希釈液の表面張力が緩やかに減少したが、AES、VSおよびAOSの場合、濃度0.5%で42.1、39.6および30.9mN/mを示しており、とても少量で水溶液の表面張力が低下することが分かった。しかし、それ以上の濃度増加による表面張力の減少は認められなかった。気泡剤の種類による表面張力の差は、親水基と疎水基で成り立った分子の活性度が異なるためであると推察される。また、気泡剤の希釈濃度が持続的に高くなっても表面張力の変化が比例的に増加しない原因は、臨界ミセル濃度(Critical-Micelle Concentration, CMC)によるためであると推察される。ここで、CMCとは水に希釈した気泡剤の濃度が増加しても、電気伝導率がこれ以上増加しないでミセルという集合体が形成される時期の濃度である<sup>6,7)</sup>。

### 3.2 粘度

一般的に液体の粘度が低くなると、排液が早くなるため気泡膜の乾燥が早くなる<sup>8)</sup>。しかし、気泡剤を希釈した水溶液は、気泡剤分子の長鎖により粘性が増加し、気泡の乾燥を遅くなるようにする。したがって、溶液の粘性は気泡の安定性に影響を及ぼす重要な因子であると言える。

気泡希釈液の粘度測定結果をFigure-5に示す。気泡剤を希釈するために用られた一般上水の粘度は8.7cPであり、水溶液の濃度が増加するほど、多少増加する傾向を示す。FPを使用する場合、ほぼすべての条件で少し高い値を示した。一般的にFPを使用した気泡コンクリートは、独立した気泡を形成すると報告されており、本実験でもFP希釈水溶液の粘度が一番高くなることが分かった。

### 3.3 気泡発泡率および単位質量

一般的に溶液の性質は、CMCを境界にして顕著に変化する。CMCは気泡剤各々に固有な値であり、共存するイオンの濃度および温度はCMCに影響を及ぼす。気泡発泡率を高くするためには、気泡希釈液の濃度をCMC以上に維持しなければならない。

気泡剤の希釈濃度による気泡剤の種類別の発泡率をFigure-6に示す。濃度が高くなるほど発泡率が増加することが分かった。濃度1%の水準で、AES>VS>AOS>FPの順番で気泡の発泡率が高くなっており、濃度2%以上でVSがAESより若干高い値を示している。FPの場合、他の種類に比べ発泡率が低い傾向を示しており、安定的な気泡を得るためには気泡剤の希釈濃度を増加する必要があると考えられる。希釈濃度による発泡率の増加の推移を見ると、AESとVSは濃度3%まで発泡率が増加していることが分かる。それ以後では、2,600~2,800%を維持しており、

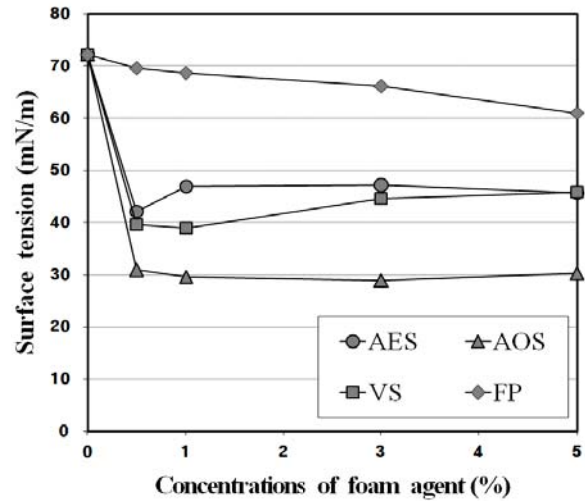


Figure-4 Variance of surface tension by concentrations of foam agent

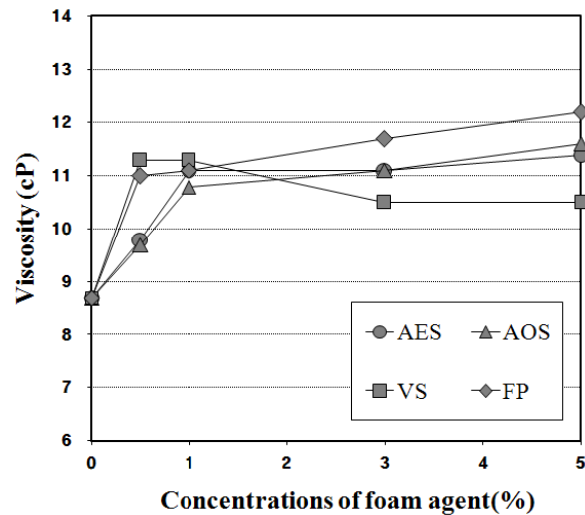


Figure-5 Variance of viscosity by concentrations of foam agent (20°C)

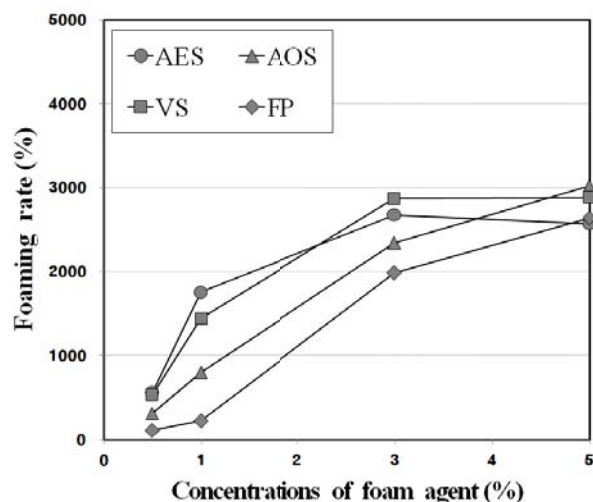


Figure-6 Variance of foaming rate by concentrations of foam agent

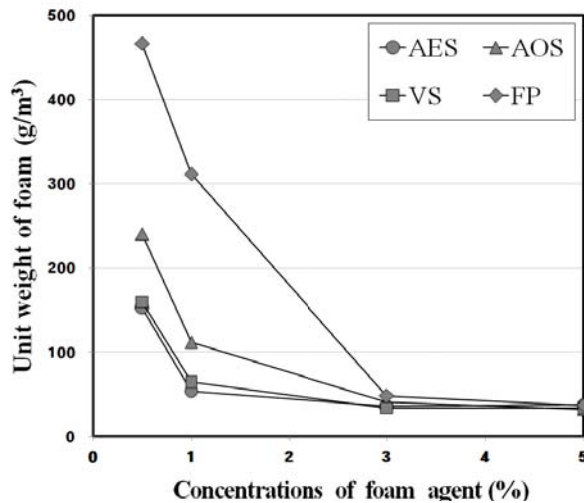


Figure-7 Variance of unit weight by concentrations of foam agent

AOSとFPは濃度5%まで漸進的に増加する傾向を示す。気泡の単位質量をFigure-7示す。気泡の単位質量は発泡率と反比例的な傾向(FP>AOS>VS>AES)を示している。AESとVSは濃度1%まで減少するが、以後ではほとんど変化がないことが分かる。また、AOSとFPは3%濃度まで単位質量が減少しているが、3%以上では、34~48g/cm<sup>3</sup>を示しており、4種類の気泡剤がすべて同等の値を示した。一方、FPを低濃度で希釈して製造した気泡は多量の水分を含有した液状の形態を示しており、0.5%で466 g/cm<sup>3</sup>、1%で311g/cm<sup>3</sup>水準の高い単位質量を示した。したがって、FPの場合、気泡の安定性を高くするためには、3%以上の濃度で希釈する必要があると考えられる。

### 3.4 フロー

気泡剤の希釈濃度および気泡率による流動性の実験結果をFigure-8に示す。1%の場合、気泡剤の種類による差が発生しているが、3%以上の場合、全体的に同等の傾向を示している。希釈濃度1%の条件における気泡剤の種類別フローの差異は、気泡の単位質量と表面張力の影響を受けており、AES、AOSおよびVSの場合、気泡剤の表面張力と同等の変化を示している。FPの場合、表面張力が高くてもフローが高いことは、発泡率が低く、水を多く含有しているためであると判断される。希釈濃度3%以上の条件におけるフローは、気泡剤のCMCにより安定的な気泡が形成され同等な傾向を示していると判断される。

気泡率の増加によるフローの低下は、希釈液の密度が低くなりながら流動エネルギーが相対的に減少され、長鎖構造の疎水基の気泡剤分子が水の界面に配列されて、気泡薄膜内の排水速度を減少させ液体の粘性が増加されるためであると判断される。

### 3.5 スラリー密度

気泡剤の種類と希釈濃度によるスラリー密度をFigure-9

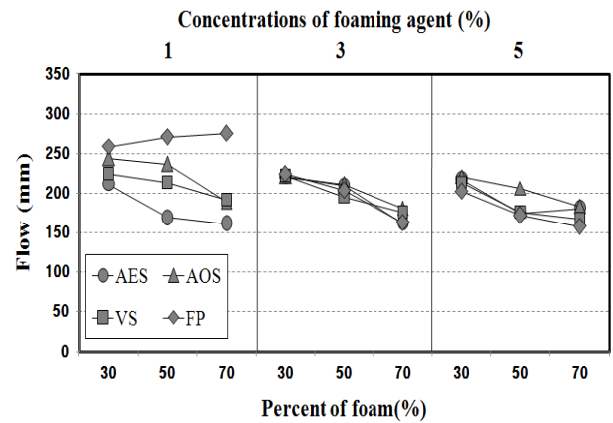


Figure-8 Variance of flow according to percent of foam and concentrations of foam agent

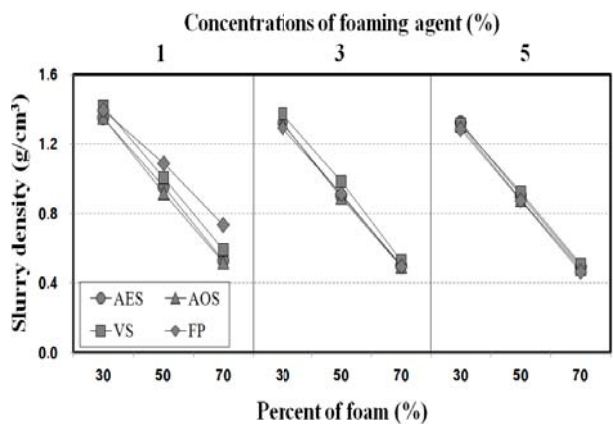


Figure-9 Variance of slurry density according to percent of foam and concentrations of foam agent

示す。本研究では、材料と配合比を同一に設定し、気泡の特性による密度の変化について検討した。スラリーの密度はすべての供試体がほぼ一定な範囲内であったが、気泡剤の希釈濃度が低いほど気泡自体の特性差異が大きくなるため、気泡剤間の差異が多少発生することが分かった。特に、FP濃度1%条件の場合、気泡率50、70%において多少高い値を示した。このような現象はFigure-6およびFigure-7と同じようにFP1%で製造された気泡は、発泡が充分でなく、水が多量に含有されているためと考えられる。また、濃度が増加するほど密度が少し減少することは気泡の弾性、すなわち、安定性が高くなり、気泡コンクリートの混合過程で発生する気泡の損失が小さいためであると判断される。

## 4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 気泡希釈液の表面張力の場合、FPを用いた希釈液が最大の値を示した。また、AOSを用いた場合は、希釈液が少ない量で表面張力を低下させることが分

かった。

- (2) AESとVSを用いて製造した気泡の単位質量は、低い値を示した。また、FPの場合、濃度1%で製造された気泡は多量の水分を含有しているため、3%以上の濃度とすることにより安定的な気泡を生成することができると考えられる。
- (3) フレッシュ気泡コンクリートの流動性において、気泡剤の希釈濃度の影響は現れなかった。また、FPの場合、濃度1%の条件では気泡の特性が流動性に大きく影響を与えることが分かった。
- (4) スラリー密度は、気泡剤の希釈濃度が低いほど気泡剤の種類によって差が発生しており、気泡の単位質量によって影響を受けることが分かった。

## 謝辞

本論文は、2011年韓国の教育科学技術部から支援を受けて実施された研究(地域拠点研究団育成事業/エネルギー自立型グリーンビレッジ核心技術事業団)および2011年韓国の知識経済部のエネルギー技術評価院(KETEPP)から支援を受けて実施された研究(No.20114010203040)成果の一部であり、付記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 朴敏花：釜山石膏を利用した無機断熱材の製造に関する研究，江原大学校硕士学位论文論文，pp.6~11，2010.
- 2) 金振晩外2人：気泡剤の種類による軽量気泡コンクリートの気泡構造および熱的特性に関する研究，韓国建築施工学会論文集，9巻，4号，pp.63~73，2009.
- 3) 姜澈：ボトムアッシュおよびウエストコンクリート微粉末を利用したオートクレーブ軽量気泡コンクリートの開発，公州大学校，博士学位論文，pp.155，2010.
- 4) 李丞漢：軽量気泡コンクリートの連続空隙の形成に及ぼす気泡剤の影響，韓国コンクリート学会論文集，14巻，5号，pp.742~749，2002.
- 5) 笠井芳夫，坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，東京，pp.272~280，2007.
- 6) K. Holmberg, B. Jönsson, B. Kronberg, B. Lindman : Surfactants and Polymers in Aqueous Solution, John Wiley & Sons, England, pp.1~2, 2003.
- 7) David R. Karsa : Surfactants in Polymers, Coatings, Inks and Adhesives, Blackwell Publishing, UK, pp.95~99, 2003.
- 8) P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro : Concrete Microstructure Properties and materials, McGraw-Hill, San Francisco, pp.49~67, 2004.