

Research Paper

# 고주파 가열건조 시험방법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 추정식에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Water Content Formula of Fresh Concrete by Microwave Oven Drying Test Method

박민용<sup>1</sup> · 한민철<sup>2\*</sup>

Park, Min-Yong<sup>1</sup> · Han, Min-Cheol<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Managing Director, Technical Cooperation, Sampyo Industry, Jongno-Gu, Seoul, 03152, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju, 28503, Korea

\*Corresponding author

Han, Min-Cheol  
Tel : 82-43-229-8484  
E-mail : twhan@cju.ac.kr

ABSTRACT

In this research, the microwave oven drying method was investigated as a potential accurate testing approach for determining the water content of fresh concrete. To do so, water content estimation formulas employed in three prominent oven drying test methods were selected, and the calculation principles for each equation, along with potential error factors arising during the actual testing process, were considered. Moreover, a concrete test was conducted to validate the possible error factors. Consequently, it was confirmed that estimation errors in the water content of fresh concrete can occur due to sample deviations arising during the wet screening process for creating mortar specimens or deviations in the coarse aggregate sampling quantity during the sample collection process.

**Keywords :** water content of fresh concrete, formula for water content estimation, microwave oven drying test

Received : December 14, 2022

Revised : January 19, 2023

Accepted : February 2, 2023

## 1. 서론

건설현장에 사용되는 콘크리트는 시멘트, 혼화재, 골재, 화학혼화제, 물 또는 회수수와 같이 다양한 원재료를 조합하여 구성되기 때문에 각각의 원재료의 품질에 따라 콘크리트의 품질이 변화하게 된다. 이에 한국산업표준 및 국가건설기준에서는 콘크리트의 품질 뿐만 아니라 각각의 원재료 항목에 대해서도 품질기준을 수립하여 생산·관리 하도록 규정하고 있다. 하지만, 대부분의 콘크리트 원재료는 자연에서 채취하거나 산업부산물을 가공하여 생산되기 때문에 기본적으로 비균질성을 지니며, 공급원이나 채취시기 등에 따른 품질의 편차가 발생한다. 이러한 원재료의 비균질성 및 품질편차는 건설산업에서 콘크리트를 생산할 때도 영향을 미친다. 즉, 동일한 배합으로 생산된 콘크리트일지라도 원재료 품질변화에 따라서 타설하는 시점에서 충분한 작업성이 확보되지 않을 수 있다. 또한, 레미콘의 제조 및 생산, 운반 및 타설대기 등 콘크리트가 사용되기 전 모든 단계에서 작업성을 확보하여 사용하기 위한 가수행위가 우려될 수 있으며, 이를 모두 감독하기에는 인원부족, 관행에 따른 품질의식 등 현실적인 한계가 존재한다[1-3].

한편, 일본은 국토교통성 고시를 통해 공사의 중요도나 규모에 따라 굳지 않은 콘크리트 단위수량 검사를 의무적으로 시행하도록 규정하고 있다[4,5]. 그러나 국내는 최근 골재의 수급문제로 인해 공급원이 크게 변화하고 원재료 및 콘크리트의 품질 문제에 대하여 지속적으로 논의되고 있음에도 불구하고 현재까지 콘크리트 단위수량 검사는 적극적으로 시행되지 않고 있다.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

콘크리트의 강도는 배합에 의해 결정되며 특히, 골재품질과 단위수량 및 결합재가 크게 좌우한다. 콘크리트 강도는 일반적으로 재령 28일의 압축강도 시험을 통해 관리하기 때문에 이 시점에서 콘크리트의 품질에 결함이 있는 경우 이미 상부 구조물의 공정이 진행되고 있어 대규모 보수나 철거가 곤란하다. 이러한 문제를 사전에 방지하기 위해서는 콘크리트의 정해진 배합을 철저히 지켜 생산하고 사용해야만 한다[6]. 이에 현재 레미콘 공장의 계량 정밀도 향상 및 자동계량 기록기의 보급에 의해 실제 콘크리트 배합에 사용된 재료량을 비교적 정확하게 파악할 수 있게 발전되어져 왔다. 다만, 단위수량의 경우에는 계량정밀도와는 무관하게 사용되는 골재의 표면수에 따라 여전히 크게 차이가 날 수 있는 우려가 있다[7]. 특히, 국내의 경우에는 공장당 레미콘 생산량이 많고, 수급의 문제로 다수의 산지로부터 골재를 공급받아 사용하는 공장이 많아 골재의 품질뿐만 아니라 함유된 표면수의 변동이 수시로 발생하고 그 편차가 크다. 또한, 레미콘 생산시 사용되는 골재의 표면수를 매번 정확하게 파악하는 것이 곤란하고, 결과적으로 콘크리트 단위수량이 철저히 관리되지 않는 경우가 빈번하게 된다. 골재 품질의 변화가 굳지 않은 콘크리트의 작업성에 미치는 영향을 보정하기 위해 골재의 표면수량의 값을 인위적으로 변경해 투입수량을 수정하는 경우가 있어, 실제 건설현장에서 사용되는 콘크리트의 단위수량이 명확하지 않다[1,8].

상기의 현황을 고려하면 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험을 통해 콘크리트 타설 전에 품질을 확인하여 시공·공용기간 동안 구조물의 안전성 및 내구성을 확보해야 할 필요성은 당연하다. 이에 현재까지 전 세계적으로 콘크리트 단위수량을 추정하기 위한 신속 시험방법들이 다수 개발되어져 왔으며, 국내에서도 여러 가지 시험방법에 대한 도입을 검토한바 있다. 다만, 콘크리트 결합재의 종류 및 사용량과 골재의 특성 등 콘크리트 배합인자의 변화에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위수량에 대한 영향여부를 분석한 선행연구는 부족한 것으로 조사되어 고찰이 필요한 시점이다.

한편, 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법들 중 시험에 소요되는 시간은 비교적 길지만, 가열을 통해 시료수분을 증발시키는 명료한 원리의 장점을 가지고 있는 가열건조 시험방법은 국내의 표준시방서(KCS) 및 건설공사품질관리업무지침에서 차용하고 있고, 미국 및 일본에서도 정밀성을 인정하고 있다.

따라서 본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법으로 활용되고 있는 가열건조 시험방법을 연구범위로 정하고, 이와 관련하여 국내·외에서 각각 정하고 있는 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 추정식별 산정값과 실제 투입된 배합설계 단위수량값을 비교·분석하였다. 이를 통하여 콘크리트 배합인자의 변화에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 오차율 및 영향여부를 고찰함으로써 굳지 않은 콘크리트의 단위수량을 정확하게 평가할 수 있는 시험방법의 개발에 활용하기 위한 실험적 연구를 실시하고자 한다.

## 2. 국내·외의 가열건조 시험방법의 추정식

Table 1은 국내·외의 가열건조 시험방법을 활용한 굳지 않은 콘크리트의 단위수량을 산정하는 추정식을 나타낸 것이다. 먼저, 국내에서는 한국콘크리트학회 제규격 레미콘 단위수량 신속측정 방법(이하 KCI-RM101)에서 제안하고 있는 가열건조 시험방법인 고주파가열법은 굳지 않은 콘크리트로부터 웨트스크리닝을 통해 굵은골재를 제거한 모르타르 시료를 제작하고 1,700W 이상의 정격출력을 가지는 전자레인지로 통해 가열하도록 하고 있다. 모르타르 시료를 이용함으로써 콘크리트 시료를 가열하는 시험방법에 비해 가열하는 시료량이 감소되어 가열건조에 소요되는 시간의 단축이 가능하지만, 모르타르 시료제작을 위한 별도의 작업시간은 소요된다. 모르타르를 이용하는 가열건조 시험방법은 굳지 않은 콘크리트로부터 굵은골재를 제거하고 가열하는 방법으로, 샘플링 과정에서 발생하는 굵은골재 채취량 편차에 의한 시험오차를 최소화할 수 있다. 하지만, 모르타르를 제작하기 위한 웨트스크리닝 과정상 불완전성에 기인하여 일부 수분, 미립 등과 같은 모르타르 구성 성분이 굵은골재에 부착되어 함께 소실되는 정도에 따라 시료편차가 발생하게 되며, 결과적으로 단위수량 추정오차에 무시할 수 없는 영향이 발생하는 것으로 알려져 있다[9,10].

미국의 가열건조 시험방법으로서 굳지 않은 콘크리트의 전자레인지법(이하 AASHTO T 318)에서는 모르타르가 아닌 콘

크리트 시료를 900W 이상의 정격출력을 가지는 전자레인지로 통해 가열하는 고주파가열법을 제안하고 있다[11]. 이 시험 방법은 콘크리트 시료를 가열하고, 가열 전 시료의 질량 대비 손실된 질량비에 시료의 단위용적질량 즉, 밀도를 곱하여 시료에 포함된 총 물의 질량을 계산한다. 물리학적 이론에 기반하여 가장 명료한 개념을 제시하고 있으나, 샘플링시 굵은골재 채취량 편차에 따라 오차에 의해 값이 크게 차이가 날 수 있다.

일본은 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 측정과 관련하여 다양한 시험방법의 사용을 정하고 있으며, 이 중에서 가열건조 시험방법은 높은 정밀성을 인정받고 있다. 일본콘크리트공학회(JCI)에 보고된 연구논문에는 가열건조 시험방법으로 전자레인지나 건조로를 사용하고, 굳지 않은 콘크리트 단위수량 추정을 위한 시료를 모르타르 또는 콘크리트로 사용하는 추정식을 각각 제안한 바 있다[6]. 다만, 모르타르 시료를 이용한 시험방법은 웻스크리닝에 의한 오차를 인식하고 있으며 추정식도 국내와 유사하다.

**Table 1.** Estimation Formula of Heat-Drying Test Method

Division	Specimen	Estimation formula	Note
KCI-RM101 (Korea)	Mortar	Formula (1) $W_e = \left\{ (M_1 - M_2) - C_s + C_{ad} \right\} \frac{(W + C + S)}{M_1}$	<p><math>W_e</math> : Total measured water content(kg/m<sup>3</sup>)  <math>M_1</math> : Fresh test specimen(g)  <math>M_2</math> : Dry test specimen(g)  <math>C_s</math> : Absorption rate correction of fine aggregate(g)  <math>C_{ad}</math> : Solid content correction of chemical admixtures for concrete(g)  <math>W</math> : Water content of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)  <math>C</math> : Binder of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)  <math>S</math> : Fine aggregate of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)</p>
AASHTO T 318 (United States of America)	Concrete	Formula (2) $MW = \left( \frac{WF - WD}{WF - WS} \times UW \right) - WT_A$	<p><math>MW</math> : Total measured water content(kg/m<sup>3</sup>)  <math>WF</math> : Mass of the tray+fresh test specimen(g)  <math>WD</math> : Mass of the tray+dry test specimen(g)  <math>WS</math> : Mass of the tray(g)  <math>UW</math> : Unit mass of the fresh concrete(kg/m<sup>3</sup>)  <math>WT_A</math> : Estimated absorbed water content of the aggregate(kg/m<sup>3</sup>)</p>
JCI (Japan)	Concrete	Formula (3) $W = \left( M_1 - M_2 - G_1 \times \frac{Q_g}{100 + Q_g} \right) \times \frac{M_c - W_w - W_s - M_g}{M_{m2}} - W_s$	<p><math>W</math> : Total measured water content(kg/m<sup>3</sup>)  <math>M_1</math> : Fresh test specimen(g)  <math>M_2</math> : Dry test specimen(g)  <math>G_1</math> : Amount of surface dry saturated condition of coarse aggregate in specimen(kg)  <math>Q_g</math> : Absorption rate of coarse aggregate(%)  <math>M_c</math> : Unit volume weight of concrete of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)  <math>W_w</math> : Water content of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)  <math>W_s</math> : Amount of absorption of fine aggregate of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)</p>
	Mortar	Formula (4) $W = (M_1 - M_2) \times \frac{M_c - W_w - W_s - M_g}{M_2} - W_s$	<p><math>M_g</math> : Coarse aggregate of specified proportion(kg/m<sup>3</sup>)  <math>M_{m2}</math> : Amount of dry test specimen correspond to mortar(kg)  <math>M_{m2} = M_1 - G_1 \times \left( 1 - \frac{Q_g}{100 + Q_g} \right)</math></p>

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 2와 같다. 먼저, 국내·외 가열건조 시험방법의 추정식을 고려하여 굳지 않은 콘크리트의 단위수량에 영향을 줄 것으로 예상되는 요인으로 단위결합재량 및 골재의 특성을 실험인자로 설정하였다. 그리고 각 추정식별 단위수량 추정값의 정확도 및 경향성을 분석하고자 유사한 추정식을 제외한 추정식 (1), (2), (3)으로 범위를 설정 하였다.

**Table 2.** Experimental Plan

Division	Factors	Levels		Water Content(kg/m <sup>3</sup> )	
Binder	340kg/m <sup>3</sup>	OPC <sup>a)</sup> = 100%	1	170, 180, 190, 200, 210	5
		OPC : FA <sup>b)</sup> : GGBS <sup>c)</sup> = 70% : 15% : 15%	1	170, 180, 190, 200, 210	5
	470kg/m <sup>3</sup>	OPC : FA : GGBS = 60% : 10% : 30%	1	160, 165, 170, 175	4
Aggregate	S/a	50%, 55%, 60%	3	170, 190, 210	3
	Gmax	13mm, 20mm, 25mm	3	180, 210	2

a) Ordinary Portland cement

b) Fly ash

c) Ground granulated blast furnace slag

**Table 3.** Mix Proportions of Concretes

Division	Target			Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )											
	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	W	OPC	FA	GGBS	S	G	AE <sup>a)</sup>	AD <sup>b)</sup>				
Binder	OPC-340	210	4.5	58	170				1,036	756	1.4				
					180				1,021	745	0.7				
					190	340	-	-	1,006	734	0.5	2.4			
					200				991	723	0.7				
					210				976	712	1.0				
					210				976	712	1.0				
	Ternary-340	210	4.5	58	58	170				1,023	746	1.9	3.9		
						180				1,007	735	0.9	2.7		
						190	238	51	51	992	724	1.0	2.4		
						200				977	713	1.0	1.7		
						210				962	702	2.9	0.5		
						210				962	702	2.9	0.5		
Ternary-470	600 <sup>c)</sup>	3.0	48	48	160				804	877	6.9	4.0			
					165	282	47	141	797	870	4.7	3.8			
					170				791	864	2.8	3.5			
					175				785	857	1.9	3.5			
					175				785	857	1.9	3.5			
Aggregate	S/a 50			50	170				881	888	1.4				
					190				855	862	2.4				
					210				829	835	1.7				
	S/a 55	210	4.5	55	55	170				970	799	1.2			
						190	238	51	51	941	776	1.5	2.4		
						210				912	752	1.9			
S/a 60				60	170				1,058	711	0.9				
					190				1,026	689	1.4				
					210				995	668	2.0				
					Gmax				180			1,007	757	3.4	2.4
					13mm				210			962	723	6.8	1.7
Gmax	210	4.5	58	58	180				1,007	757	2.4	2.4			
					20mm	238	51	51	962	723	5.6	1.7			
					210				962	723	5.6	1.7			
					25mm				180			1,007	757	2.4	2.4
					210			962	723	5.1	1.7				

a) Air entraining agent

b) Admixture

c) Slump flow

콘크리트 배합의 결합재는 국내에서 유통되는 포틀랜드 시멘트(Ordinary Potland Cement, 이하 OPC), 플라이애시(Fly ash, 이하 FA) 및 고로슬래그미분말(Ground granulated blast-furnace slag, 이하 GGBS)을 사용하였으며, 결합재의 구성비가 서로 다른 2가지 배합에 대해 단위수량 170, 180, 190, 200 및 210kg/m<sup>3</sup>으로 5수준의 총 10배치의 실내배합실험을 실시하였다. 또한, 결합재량이 높고 단위수량이 낮은 경우에 대한 추정정확도를 확인하기 위해 결합재량 470kg/m<sup>3</sup>으로 설계한 배합의 단위수량을 160, 165, 170 및 175kg/m<sup>3</sup>으로 총 4배치의 실내배합실험을 진행하였다. 또한, 가열건조법에 사용되는 추정식의 계산과정에서 시료에 포함된 굵은골재량을 고려하여 잔골재율(S/a) 및 굵은골재 최대치수(G<sub>max</sub>) 변화에 대해서도 실내배합실험을 실시하였다. 즉, 잔골재율이 서로 다른 3가지 배합에 대해 단위수량 170, 190 및 210kg/m<sup>3</sup>으로 3수준의 총 9배치와 굵은골재의 최대치수가 서로 다른 3가지 배합에 대해 단위수량 180, 210kg/m<sup>3</sup>으로 2수준의 총 6배치의 실내배합실험을 진행하였다.

이에 따른 콘크리트 배합은 Table 3과 같다. 배합설계는 계획한 목표 슬럼프 및 목표 공기량을 만족하도록 배합을 수정하여 결정된 것이며, 이에 대한 목표 슬럼프의 허용오차는 ±10mm, 목표 공기량의 허용오차는 ±1.0% 로 정하였다. 이는 각각의 실내배합실험에서 가열건조에 의한 굳지 않은 콘크리트 단위수량 추정식을 보다 정확히 평가하기 위한 선행조건으로서 계획하였다.

### 3.2 실험방법

서로 다른 단위수량 추정식 (1), (2), (3)을 통해 산출된 결과값의 비교를 위해 동일한 수준의 굳지 않은 콘크리트로부터 시료를 채취하여 가열건조하였다. 각 국가별로 시료의 가열건조를 위해 제시된 방법은 전자레인지리를 이용한 고주파가열건조, 건조로를 이용한 가열건조를 제안하고 있으며 가열장비의 사양에 따라 가열시간이나 용기 등 세부적인 내용이 소폭 다르다. 이러한 가열건조 방식에 따른 오차가 발생할 수 있으나, 추정식에 의해 산출되는 편차보다 상대적으로 매우 작을 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 추정식의 차이에 따른 굳지 않은 콘크리트 단위수량 추정값의 비교분석에 초점을 두고자 가열건조에 사용되는 장비를 국내 KCI-RM101에서 제안하고 있는 정격출력 1,700W의 전자레인지리를 이용한 고주파가열건조 방식으로 일괄 적용하였다. 이와 관련하여 Figure 1은 굳지 않은 콘크리트의 단위수량의 추정을 위해 본 연구에서 실시한 고주파가열건조 시험방법의 순서를 나타낸 것이며, Table 4는 고주파가열건조 방식의 주요사항을 요약한 것이다.



Figure 1. Flow of Microwave Oven Drying Test Method



**Table 4.** Experimental Method with Microwave Oven Drying

Formula for water content estimation	Sampling	Additional processing	Specimen		Microwave oven drying Time <sup>b)</sup>
			Type	Amount <sup>a)</sup>	
Formula (1) (KCI-RM101)	5kg	Wet screening	Mortar	400±1g	6 min
Formula (2) (AASHTO T 318)	5kg	-	Concrete	1,000±25g	12 min
Formula (3) (JCI)					

a) Two specimen each  
b) Time required for one specimen

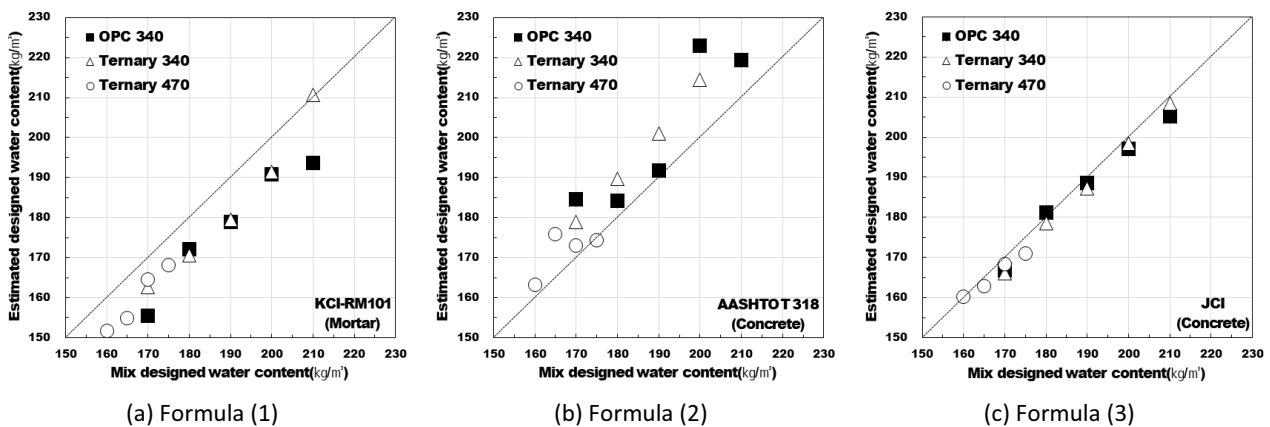
## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 결합재 변화별 상관관계

Figure 2는 콘크리트 결합재 종류, 혼화재 치환율 및 결합재량의 변화에 따라 배합한 콘크리트의 단위수량과 각 배합별 시료를 고주파가열건조법을 활용한 추정식 (1)~(3)으로 산정된 단위수량 실험결과 간의 상관관계를 나타낸 것이다.

먼저, 각각의 추정식별 굳지 않은 단위수량 시험결과를 비교했을 때, 상대적으로 추정식 (1), (2) 대비 추정식 (3)에서 매우 높은 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 추정식 (1), (2)에서 결합재의 변화에 따라 불규칙한 편차가 발생하는 것처럼 보이지만, 추정식 (3)에서 결합재의 변화에 따른 단위수량 추정값의 변동은 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

한편, 추정식 (1)의 경우, 모르타르 시료를 제작하는 웨트스크리닝 과정에서 발생하는 시료편차가 단위수량 추정오차로 나타나는 것으로 사료된다. 추정식 (2)의 경우, 추정식 (3)이 콘크리트 시료를 가열건조 후 시료에 포함된 굵은골재의 양을 파악하여 추정식에서 시료 샘플링시 발생한 굵은골재 채취량 편차를 반영하는 점을 고려할 때, 추정식 (2)에서 나타나는 단위수량 추정값의 오차가 분체의 변화로 인한 오차가 아닌 콘크리트 시료 샘플링 오차에서 기인하는 것으로 사료된다.



**Figure 2.** Water Content Estimate by Formula (1)~(3) According to Change of Binder

### 4.2 골재 변화별 상관관계

Figure 3 및 Figure 4는 콘크리트 골재의 변화에 따라 배합한 콘크리트의 단위수량과 각 배합별 시료를 고주파가열건조법

을 활용한 추정식 (1)~(3)으로 산정된 단위수량 실험결과 간의 상관관계를 나타낸 것이다.

먼저, 잔골재를 변화에 따른 Figure 3의 실험결과 및 굵은골재 최대치수 변화에 따른 Figure 4의 실험결과는 앞서 실시했던 결합재 변화에 따른 분석과 유사한 경향으로 나타났다. 즉, 상대적으로 추정식 (1), (2) 대비 추정식 (3)이 가장 높은 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전반적으로 콘크리트 배합상 결합재의 변화와 비교하여 추정값의 편차는 상대적으로 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 콘크리트 배합에서 골재가 차지하는 비율을 고려할 때 다른 배합인자보다 골재의 특성변화가 고주파가열건조법 단위수량 추정 정확도에 영향을 미치는 정도가 큰 것으로 사료된다.

한편, 추정식 (1)에서는 추정식 (2), (3)과는 다르게 골재 특성변화에 따라 단위수량 추정오차의 크기가 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 배합에서 굵은골재의 사용비가 높을수록 또는 굵은골재의 최대치수가 작을수록 추정식 (1)을 이용한 고주파가열건조법의 상대적인 단위수량 추정오차가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 모르타르 시료를 제작하기 위한 웨트스크리닝 과정에서 시료편차가 발생하게 되고 결과적으로 단위수량 추정오차에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

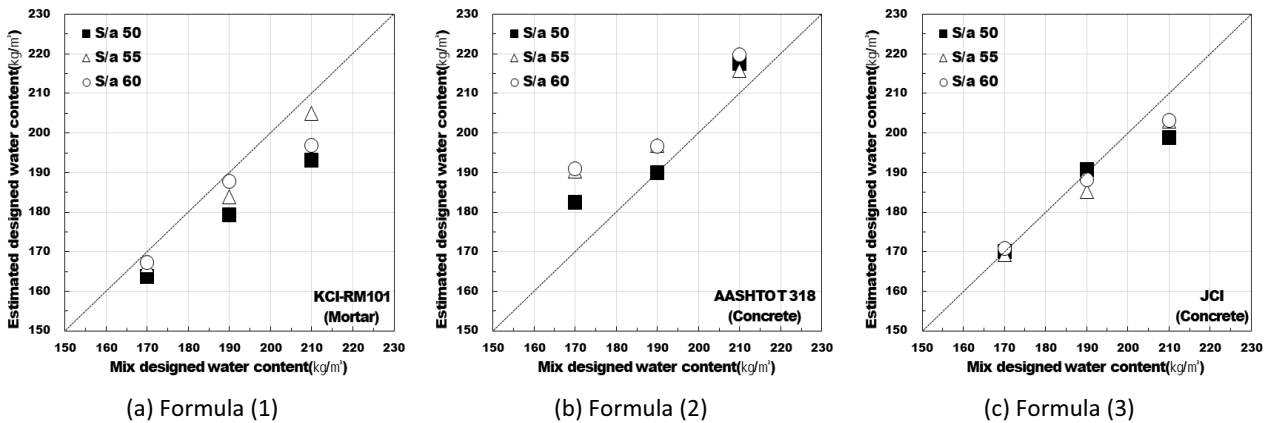


Figure 3. Water Content Estimate by Formula (1)~(3) According to Change of Aggregate by S/a

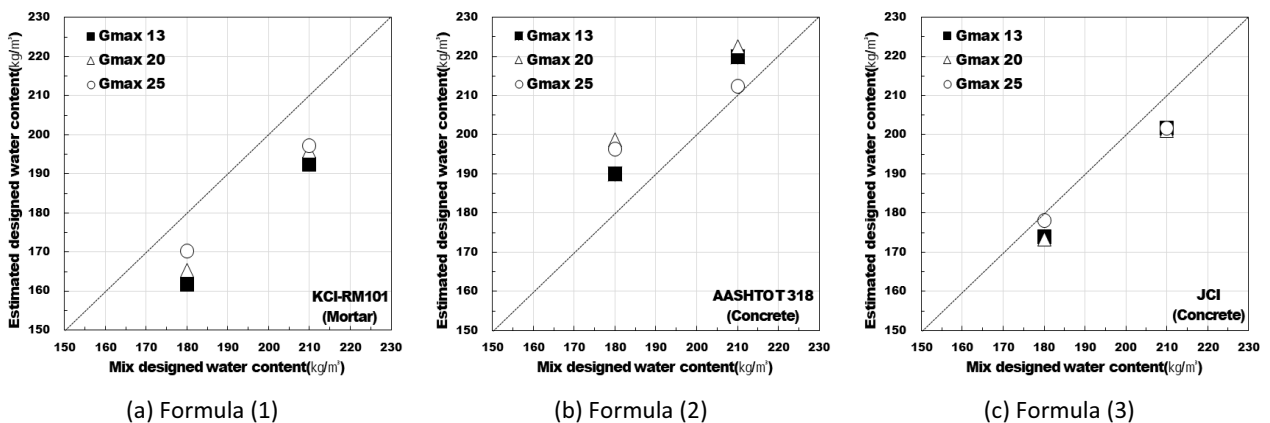


Figure 4. Water Content Estimate by Formula (1)~(3) According to Change of Aggregate by G<sub>max</sub>

즉, 모르타르를 시료로 사용하는 추정식 (1)은 시방배합상 모르타르의 잔골재 질량비가 웨트스크리닝을 통해 제작한 실제 모르타르 시료의 잔골재 질량비와 동일한 것으로 가정하지만, 실험과정에서 굵은골재에 묻어 함께 제거되는 잔골재와 시멘

트 페이스트 성분이 존재함에 따라 추정식에서 정량적인 값으로 가정한 요인이 직접적인 오차로 기여하기 때문이다. 이는 굽은골재의 사용비가 높을 경우나 굽은골재의 최대치수가 작아 표면적이 증가할 경우 등 굽은골재에 묻어나는 시멘트 페이스트가 증가할 수 있는 시료편차 조건이 단위수량 추정오차의 크기에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이뿐만 아니라 이러한 시료편차 이외에 웨트스크리닝 과정의 마찰 또는 수분 소실 등에 의한 편차도 고려할 필요가 있다.

### 4.3 단위수량 추정식별 허용오차

굳지 않은 콘크리트의 단위수량 검사를 실시하는 일본은 시험오차 및 제조오차에 기인하여 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 오차 허용기준을  $\pm 15 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ 으로 정하고 있다. 또한, 한국도로공사에서도 동일한 허용기준으로 관리 매뉴얼을 운영하고 있다. 따라서, Figure 5에서는 고주파가열건조법 단위수량 추정식에 따른 전체적인 경향 파악을 위해 Figure 2, 3, 4에서 나타낸 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험결과를 종합하고  $\pm 15 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ 의 상·하한선을 함께 표시하였다. 본 연구범위 내에서 모르타르 시료를 이용한 고주파가열법 추정식의 경우, 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험결과는 추정식 (1)과 같이  $\pm 20 \text{ kg/m}^3$  이내의 오차범위를 만족하였으나, 웨트스크리닝의 영향에 따라 상대적으로 단위수량을 과소평가하는 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 추정식 (2)는 콘크리트 시료를 이용한 고주파가열법의 경우, 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험결과는 대부분  $\pm 20 \text{ kg/m}^3$  이내의 오차범위를 만족하였지만, 상대적으로 단위수량을 과대평가하는 경향을 나타냈다. 추정식 (3)에서는 추정식 (2)에서와 동일한 콘크리트 시료를 사용하여 고주파가열건조를 진행했지만, 추정식에서 샘플링시 발생하는 굽은골재의 편차를 반영함으로써 실제 굳지 않은 콘크리트의 단위수량에 가장 근접한 추정값을 도출하는 것으로 나타났다.

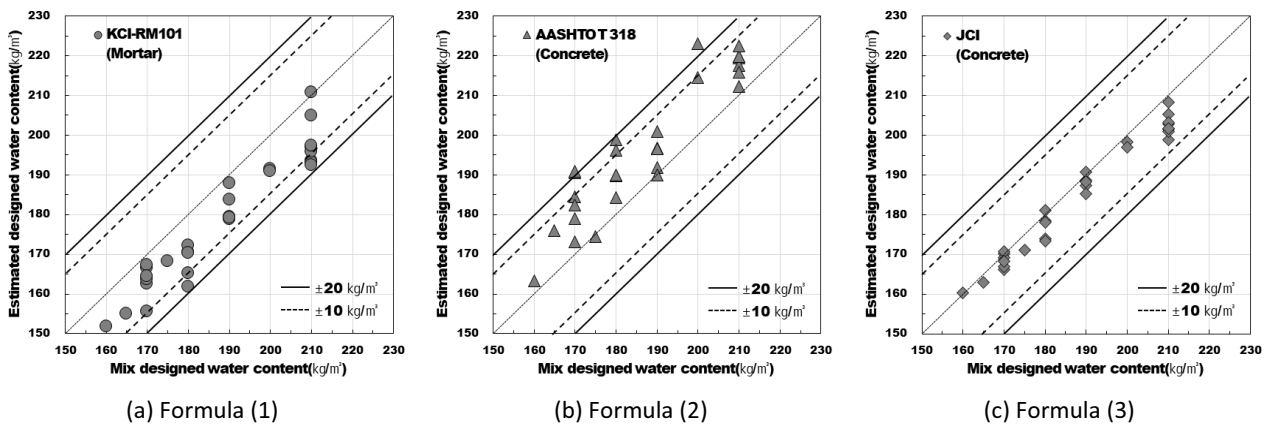


Figure 5. Edge Tolerance of Water Content Estimate by Formula (1)~(3)

## 5. 결론

본 연구에서는 국내외에서 가열건조를 통한 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법에 적용되는 대표적인 3가지의 추정식의 원리를 파악하고, 추정식의 계산과정에서 고려되지 않는 콘크리트 배합인자의 변화에 따른 영향여부를 확인하고자 실제 콘크리트 배합실험을 통해 추정식별로 도출되는 단위수량 추정값의 경향 및 오차요인을 분석하였는데, 이에 대한 종합적인 요약결과는 다음과 같다.

- 1) 모르타르 시료를 제작하고 가열건조 하는 추정식을 사용하는 경우, 웨트스크리닝으로 인한 시료편차가 단위수량 추정 정확도에 영향을 미치는 것을 확인하였고 콘크리트 배합에서 굽은골재의 사용비가 크거나 최대치수가 작을 때 굽은



골재의 표면적 증가로 인해 웨트스크리닝 과정에서 굵은골재에 묻어 손실되는 모르타르가 증가하여 단위수량 추정값의 오차정도가 커지는 것으로 판단된다.

- 2) 콘크리트 시료를 그대로 가열건조에 이용하는 추정식의 경우, 굳지 않은 콘크리트의 샘플링 과정에서 발생하는 굵은골재의 채취량 편차에 의해서 단위수량 추정오차가 발생하였다. 반면, 콘크리트 시료를 가열건조에 이용하되 굵은골재의 채취량 편차를 실험을 통해 추적하여 추정식의 계산과정에서 반영하여 바로잡는 경우에는 단위수량 추정값이 실제 단위수량에 매우 근접하는 것을 확인 할 수 있었다.

향후 추가적인 연구를 통해 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 정밀 측정방법으로써 국내 가열건조 단위수량 시험방법에 사용될 추정식의 개발 및 활용이 필요할 것으로 사료된다.

## 요약


본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 정밀 측정방법으로써 고주파가열법을 검토하기 위해 3가지의 대표적인 가열건조 시험방법에 사용되는 단위수량 추정식을 선정하고 계산의 원리 및 실제 시험과정에서 발생할 수 있는 오차 요인을 고찰하였다. 또한, 각 단위수량 추정식의 계산과정에서 고려될 수 없는 실험적 요인인 분체 및 골재의 구성비나 물리특성을 변화시킨 콘크리트에 대해 고주파가열법을 통한 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험을 진행하였다. 고주파 가열법을 이용한 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법은  $\pm 20\text{kg/m}^3$ 의 허용오차 범위를 대부분 만족하였으나, 추정식에 따라 경향 및 오차의 크기가 차이를 나타냈다. 웨트스크리닝 과정에서 발생하는 시료 편차 또는 시료 샘플링 과정에서 발생하는 굵은골재 채취량 편차로 인한 추정오차의 영향을 최소화하기 위해서는 가열 건조시 콘크리트 시료를 이용하고 이후 시료의 굵은골재의 채취량 편차를 추정식에서 보정하는 방법으로 추정한 단위수량이 가장 정확한 결과를 나타내는 것을 실내 배합시험을 통해 확인할 수 있었다.


키워드 : 굳지않는 콘크리트 단위수량, 단위수량 추정식, 고주파가열건조시험

## Funding

Not applicable

## ORCID

Min-Yong Park,  <https://orcid.org/0000-0002-0190-2191>

Min-Cheol Han,  <http://orcid.org/0000-0002-2555-673X>

## References

1. Han GB. Defects in concrete quality due to the addition of water to ready-mixed concrete. *Journal of the Korea Construction Safety Engineering Association*. 2006 Apr;36:65-72.
2. Lee JH, Choe IS. Problems and their improvements of ready-mixed concrete. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 1993 Sep;5(3):55-62.
3. Yoshikane T, Kono H, Suzuki K, Tsuji Y, Togawa S. Report of research committee on rapid measurement and management

- system of water content volume of fresh concrete. *Annual Proceedings of Concrete Engineering*. 2004 Jun;26(1):37-46.
4. Goto T, Kawanishi Y, Yamada M, Takano S. Determination of the water content of freshly mixed concrete by measuring chloride ion concentration of intermixed with chloride solution. *Concrete Journal*. 2005 Jul;43(7):34-41. [https://doi.org/10.3151/coj1975.43.7\\_34](https://doi.org/10.3151/coj1975.43.7_34)
  5. JASS 5 Reinforced Concrete Work, Japanese Architectural Standard Specification. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2015. Japan.
  6. Katahira H, Kawano H. A proposal on rapid test method on water content of fresh concrete. *Journal of the Japan Concrete Institute*. 2000 Jun;22(1):337-42.
  7. Han CG, Jeon CK, Kim KS, Kim YD. A study on the estimation of unit water content of fresh concrete using heat drying. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2004 Jan;20(1):115-22.
  8. Korea Concrete Institute. Standard Test Method to Measure Rapidly Unit Water of Fresh Concrete. Seoul (Korea): Standards of Korea Concrete Institute; 2021. p. 230-6.
  9. Kim YR, Choi IH, Jung YH, Lee DB. An experimental study on the application of measuring method of water content for quality control of concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2007 Apr;19(2):179-88. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2007.19.2.179>
  10. Korea Conformity Laboratories. Development of Automatic System for Quality Control in Ready Mixed Concrete Manufacturing. Seoul (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2011 Nov. 240 p. Report No.: TRKO201600003723. <https://doi.org/10.23000/TRKO201600003723>
  11. AASHTO T-318. Standard Test Method of Test for Water Content of Freshly Mixed Concrete Using Microwave Oven Drying. WA: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2015 Jan.