

실험실 수준에서 배합변수별 굳지 않은 콘크리트 단위수량 실험방법의 추정오차 및 신뢰성 검토

Estimation Error and Reliability of Measuring Unit Water Content Test Methods for Fresh Concrete Depending on Mix Design Factors at the Laboratory Level

박민용¹ · 한민철^{2*}

Min-Yong Park¹ · Min-Cheol Han^{2*}

(Received March 2, 2022 / Revised March 28, 2022 / Accepted March 29, 2022)

In this study, water content tests were performed on various fresh concretes subjected to different binder compositions to review the estimation errors and reliability of water content test methods. Micro-oven drying method, air-meter method, capacitance method and microwave penetration method were used to estimate water content of fresh concrete. Errors in water content estimation were analyzed by each test method. Regardless of the test method of water content, the estimation error was less than 5 %, and in the case of the test using mortar, the error in the estimation value was relatively large. In addition, based on the test results of water content of various concrete, the probability density function in which the estimation error for each test method becomes the population was analyzed. Water content test methods of fresh concrete which using concrete samples showed high estimate reliability of 97 % within the estimation error range of $\pm 10 \text{ kg/m}^3$. On the other hand, the reliability of water content test method using mortar samples was lower.

키워드 : 단위수량, 고주파가열법, 단위용적질량법, 정전용량법, 마이크로파법

Keywords : Unit water content, Microwave oven drying, Air-meter, Capacitance, Microwave penetration

1. 서론

최근 사회적으로 안전에 대한 높은 관심과 함께 국민의 안전 및 재산보호를 위하여 국토부에서는 ‘건축물 안전강화 종합대책’을 발표하고 ‘장수명 주택 인증’ 정책을 시행하는 등 건설 패러다임의 전환이 요구되고 있다. 또한, 각 국가별 설계기준에서도 콘크리트 강도나 단위수량 등을 규정함으로써 구조물의 수명 또는 내구성능을 확보하여 안전한 건설구조물이 시공·유지될 수 있도록 하는 기준을 발전시켜 온 것을 확인할 수 있다(An 2015; Hong 2018; Lee and Lim 2013).

한편, 건설 구조물의 품질과 내구성능은 구조체를 이루는 콘크리트에 의해 결정되며, 콘크리트의 품질은 사용되는 원재료에 의

해 크게 좌우된다. 따라서 콘크리트 원재료로 사용되는 시멘트, 혼화재, 골재 등은 한국산업표준규격(KS)에 의해 엄격히 관리되어야 하나, 골재의 경우 심각한 수급난으로 인해 저품질 발파석 골재의 유통이 만연하다. 또한, 시멘트 등 다른 원재료와는 달리 골재는 특히 KS 인증조차 받지 않은 다수의 소형 제조사가 대부분의 시장유통을 담당하고 있어 제도권 내에서 적합한 품질검사·관리가 힘든 실정이다(Han and Lee 2017).

국내 콘크리트 품질은 이러한 원재료 품질에 따라 직접적인 영향을 받고 있다. 특히, 콘크리트의 제조과정에서 불량골재가 사용되는 경우, 입도불량 및 잔입자량의 증가로 인해 단위수량이 증가하게 되며, 결국 콘크리트의 내구성능 뿐만 아니라 시공성능, 압축강도, 건조수축, 균열 등에 걸쳐 전반적인 콘크리트의 품질을 위협

* Corresponding author E-mail: twan@cj.u.ac.kr

¹청주대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheong–ju University, Cheongju–City, 28503, Korea)

²청주대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Cheong–ju University, Cheongju–City, 28503, Korea)

할 수 있다(Min and Han 2016; Lee et al. 2015). 이러한 이유로 일본의 경우 국토교통성 고시를 통해 공사의 중요도나 규모에 따라 굳지 않은 콘크리트 단위수량시험을 의무적으로 시행하도록 하고 있는 반면(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in Japan, 2003), 국내의 경우 국가건설기준인 표준시방서(KCS) 및 국토교통부에서 고시하는 건설공사 품질관리 업무지침에서 단위수량 시험에 대해 언급은 하고 있다. 하지만, 시험방법의 적합성 및 신뢰성 평가가 이루어지지 못했다는 이유로 의무화가 이루어지지 못해 극히 일부 현장에서만 시행되고 있다(Kim et al. 2007; Korea Concrete Institute, 2022; Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Korea, 2022).

특히, 최근들어 건설근로자의 감소에 따른 외국인노동자의 증가, 근무시간의 축소로 인한 현장의 인력상황 뿐만 아니라 환경보호를 위한 양질의 산림골재 채취량이 감소하면서 저품질 골재가 유통되는 등의 국내 건설 산업여건은 열악해지고 있는 반면, 건설 구조물의 고층화·대형화·장수명화 등 건설 패러다임의 변화는 지속적으로 요구되어져 왔다. 이러한 현황에서, 국내 건설현장에서 받아들여지는 콘크리트의 품질은 더 이상 현장책임자의 품질의 식에만 의존하기에는 그 한계가 명확하다(Kim et al. 2005).

콘크리트 품질관리가 기존의 강도관리 중심에서 콘크리트 단위수량 관리까지 확대된다면, 단순히 콘크리트의 품질을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 국내시장에서 이슈가 되고 있는 저품질 골재를 비롯한 모든 콘크리트 원재료의 품질의 전반적인 개선 효과를 기대할 수 있을 것이다. 나아가 건설구조물의 내구성 향상의 관점에서 콘크리트 기술의 진일보에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 단위수량 평가를 콘크리트의 중요한 품질관리 수단으로써 적극적인 활용을 모색하기 위해서 다양한 결합재 및 배합변수별 콘크리트에 대한 단위수량 시험을 실시하고, 이를 통해 콘크리트의 배합요인의 변화가 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험 정확도에 미치는 영향을 실험적으로 검토함으로써 단위수량 시험방법의 신뢰성을 확인하고자 한다.

2. 단위수량 실험방법

2.1 고주파가열법 (Microwave oven drying method)

시료의 가열건조를 통해 증발한 물의 질량을 이용하여 콘크리트의 단위수량을 추정하는 실험방법으로, 가열건조에 소요되는 시간 단축을 위해 전자레인지 사용하는 실험방법이며, 현재 한국 콘크리트학회 제규격(KCI-RM101:2021)에 따라 가열건조에 사용

되는 시료는 모르타르로 하였다.

2.2 단위용적질량법 (Air-meter method)

단위수량이 증가하면 콘크리트의 단위용적질량은 감소하는 원리를 이용한 추정식을 이용하는 실험방법으로, 일반적으로 전용측정기를 사용하여 콘크리트 시료의 정확한 단위용적질량 및 공기량을 측정하고 시방배합 대비 감소한 단위용적질량만큼 가수된 것으로 추정하여 계산을 통해 최종적인 단위수량을 구하는 시험방법이다.

2.3 정전용량법 (Capacitance method)

물질의 유전율이 수분량에 따라 변화하는 것을 응용하여, 모르타르 중의 정전용량과 수분율의 관계식에 의해 단위수량을 추정하는 전자기적 시험방법으로 분류된다. 전자기적 시험을 통해 시료의 수분율이 구해지면, 최종적인 단위수량을 계산하기 위해서는 측정된 구해진 수분율에서 골재에 흡수된 수분을 제외하는 과정이 필요하며, 이를 위해 사용된 골재량 및 흡수율을 이용한다.

2.4 마이크로파법 (Microwave penetration method)

정전용량법과 마찬가지로 전자기적 시험방법으로써 전기신호의 전도특성을 이용하여 콘크리트에 프로브(probe)를 탐침하여 프로브에서 발신하는 마이크로파의 감쇄, 반향시간 등을 측정함으로써 콘크리트의 수분율을 구하는 실험방법이다. 측정원리에 따라 마이크로파 파장의 감쇄를 이용하는 FDR(Frequency domain reflectometer)과 파장의 반향 시간을 이용하는 TDR(Time domain reflectometer) 방법으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 TDR 방법의 측정기기를 사용하였다. 다른 시험방법과 마찬가지로 시료의 수분율을 구하는 시험방법으로, 구해진 수분율에서 골재에 흡수된 수분량(kg/m³)을 제외해야 한다. 본 연구에서는 주파수 0.6~1.2 GHz 영역의 전자기파를 사용하는 TDR 방법의 측정기기를 사용하였다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구에서는 Table 1과 같이 콘크리트 실험변수를 계획하였다. 다양한 배합요인에 따른 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험정확도를 검토하기 위하여 총 3개의 Series로 실험을 구성하였다. 모든

Table 1. Experimental plan

Series		Factors	Levels		Water content (kg/m ³)	
I	Mix design factors	Water content	Ternary blended concrete ^{a)}	1	170, 180, 190, 200, 210	5
		Slump (mm)		5	80, 120, 150, 180, 210	5
		Air (%)		4	3, 4.5, 6, 8	1
II	Material factors	Binder compositions (%)	OPC = 100	1	170, 180, 190, 200, 210	5
			FA ^{c)} = 0, 10, 20 GGBS ^{d)} = 0, 10, 20, 30	12	185	1
III	Material factors	Aggregate	Sea sand = 0, 10, 20, 30, 50	5	185	1
			S/a = 50, 55, 60	3	170, 190, 210	3
			G _{max} = 13, 20, 25	3	180, 210	2

a) OPC : FA : GGBS = 70 : 15: 15, Binder = 340 kg/m³

b) water content has been adjusted to each slump levels

c) Fly ash

d) Granulated blast furnace slag



(a) Microwave oven drying method(Mortar)



(b) Air-meter method (Concrete)



(c) Capacitance method (Mortar)



(d) Microwave penetration method (Concrete)

Fig. 1. Test kits of concrete water content

실험에서 사용된 분체량은 340 kg/m³로 시험조건에서 단위수량이 변화할 때, 물-결합재비도 변화되는 환경에서 실험을 진행하였다.

먼저, Series I에서는 단위수량, 슬럼프 및 공기량의 3가지 배합 설계 요인이 변화할 때, 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험 정확도를 평가하고자 하였다. 3성분계 콘크리트를 대상으로 단위수량을 170, 180, 190, 200 및 210 kg/m³의 5수준, 슬럼프는 80, 120, 150, 180 및 210 mm의 5수준, 공기량은 3.0, 4.5, 6.0 및 8.0 %의 4수준으로 —콘크리트 배합을 설정하고 각각의 실내 배합시험을 진행하였다.

Series II에서는 단일성분계, 2성분계, 3성분계로 구분하여 혼화재의 치환율이 변화할 때, 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험 정확도를 평가하고자 하였다. 우선 보통 포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement :이하 OPC)를 100 % 사용한 배합에서 단위수량 170, 180, 190, 200, 210 kg/m³의 5수준으로 배합시험을 진행한 후, 단위수량을 185 kg/m³로 동일하게 설정한 상태에서 플라이애시(Fly Ash : 이하 FA) 0, 10, 20 %의 3수준, 고로슬래그 미분말(Granulated Blast Furnace Slag : 이하 GGBS) 0, 10, 20,

30 %의 4수준을 각기 서로 교차시켜 혼화재 치환율이 서로 다른 혼합 콘크리트에 대한 실내배합시험을 진행하였다.

Series III에서는 골재의 조립률, 잔골재율 및 굵은골재 최대치수와 같이 사용되는 골재의 물리적 특성이 변화할 때, 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험 정확도를 평가하고자 하였다. 잔골재의 조립률(Fineness Modulus : 이하 FM)을 5수준, 잔골재율을 50, 55, 60 %로 설정하고 각각 단위수량 170, 190, 210 kg/m³을 적용하여 9수준, 골재최대치수를 13 mm, 20 mm, 25 mm로 설정하고 각각 단위수량 180, 210 kg/m³을 적용하여 6수준으로 설정하고 실내배합시험을 진행하였다.

또한, 각 변수의 영향을 정확히 평가하기 위해서 각각의 콘크리트 배합을 실내에서 믹싱했을 때, 배합설계에서 목표로 했던 슬럼프 및 공기량을 충족하는 것을 확인 후 단위수량 시험을 진행하였다. 목표 슬럼프의 허용오차 범위는 ± 10 mm, 목표 공기량의 허용 오차 범위는 ± 1.0 %로 하였다. 목표 슬럼프 및 공기량을 만족하지 못하는 경우, 배합을 조정하여 목표 슬럼프 및 목표 공기량의 오차범위를 만족하도록 하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서 단위수량 시험방법에 사용된 측정장비는 Fig. 1과 같다. 국내에서 사용되고 있는 한국콘크리트학회 제규격(KCI-RM101:2021)에 기재된 고주파가열법, 단위용적질량법, 정전용량법 및 마이크로파법으로 총 4가지의 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험방법에 대한 정확도를 각각 평가하고자 하였다. 고주파가열법 및 정전용량법의 경우, 굳지 않은 콘크리트로부터 습식 선별(wet screening)한 모르타르를 활용했고, 단위용적질량법 및 마이크로파법의 경우, 굳지 않은 콘크리트를 그대로 활용했다.

각 실험방법별로 시료의 준비과정부터 단위수량 추정값 도출까지 소요되는 시간은 평균적으로 고주파가열법 15분, 단위용적질량법 8분, 정전용량법 8분, 마이크로파법 2분 정도로 고주파가열법이 가장 오랜 시간이 소요되었고, 마이크로파법이 가장 신속했다.

4. 실험결과 및 분석

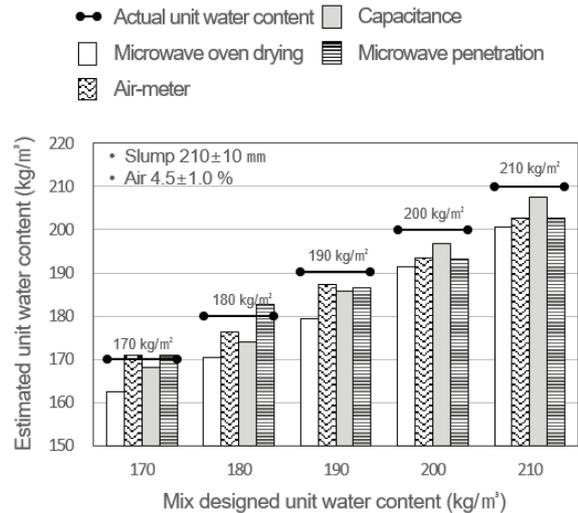
4.1 배합설계 요인 변화가 콘크리트 단위수량 시험결과에 미치는 영향 검토 (Series 1)

Fig. 2는 3성분계 콘크리트에서 단위수량, 슬럼프 및 공기량의 변화에 따른 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 고주파 가열법을 적용한 경우가 타 시험방법에 비하여 단위수량을 가장 낮게 추정하고 있으며, 마이크로파법을 적용한 경우가 변수별 차이는 있지만 단위수량을 가장 높게 추정하는 것으로 나타났다. Fig. 2(a)와 같이 실제 시료의 단위수량이 증가할 때, 시험을 통한 단위수량 추정값도 증가하는 경향을 나타냈다. 단위수량이 증가할수록 단위수량 시험결과 오차는 소폭 증가하는 경향이 나타났으나, 일반적으로 허용되는 콘크리트 배합의 단위수량이 185 kg/m³ 이하인 것을 고려할 때, 4가지 단위수량 시험방법 모두 신뢰성이 양호한 것으로 판단된다.

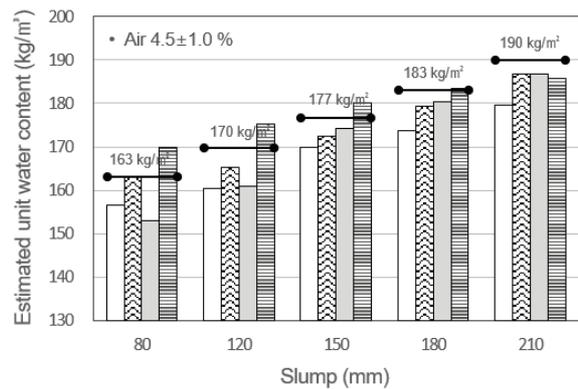
Fig. 2(b), (c)에서 슬럼프 및 공기량 변화가 단위수량 시험결과에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 배합설계 요인 변화에 따른 단위수량 시험결과 오차범위는 약 ± 10 kg/m³ 수준인 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 Series 1에서 실시한 모든 콘크리트 단위수량 시험결과 오차를 모집단으로 하는 상대오차 및 표준편차를 나타낸 것이다. 단위수량 시험의 상대오차는 4.0 % 이하, 표준편차는 4.7 kg/m³ 이하로 시험결과 정확도가 양호한 것을 확인할 수 있었다. 한편, 고주파가열법의 경우는 Fig. 2와 같이 대부분의 실험에서 단위수량 추정값이 다른 시험방법들에 비해 낮은 결과를 나타

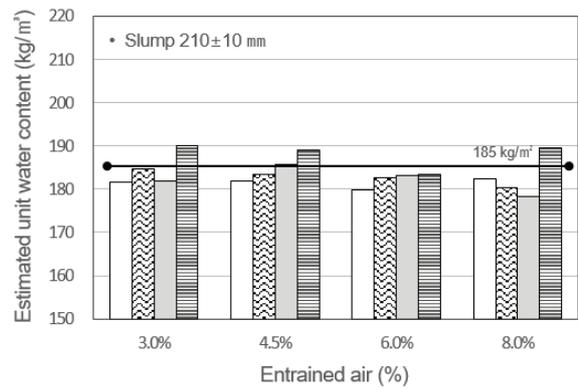
냈으며, Fig. 3과 같이 시험오차의 표준편차가 작은 반면 상대오차



(a) Variation by designed unit water content(Ternary concrete)



(b) Variation by slump



(c) Variation by entrained air

Fig. 2. Variation of estimated unit water content by concrete mix design factor

가 4 %로 가장 크게 나타났는데, 이는 습식 선별(wet screening)을 통한 모르타르 제작과정에서 발생하는 시료 편차가 고주파가열법 시험방법에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 이러한 모르타르 시료를 이용한 고주파가열법이 실제 시료의 수분에 비해 낮게 측정되는 오차경향은 기존연구에서도 밝혀진 바 있으며, 습식선별(wet screening)의 방법 및 콘크리트의 물성에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Woo et al. 2011). 따라서, 모르타르 시료를 이용한 고주파가열법의 이러한 오차를 극복하기 위해서는 추가적인 연구를 통해 보정식의 개발검토가 필요할 것이며, 혹은 콘크리트 시료로 실험을 실시하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

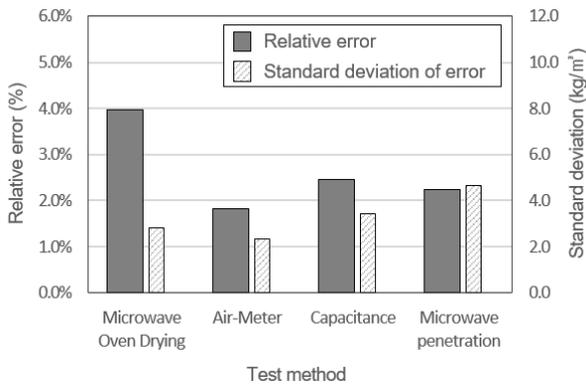
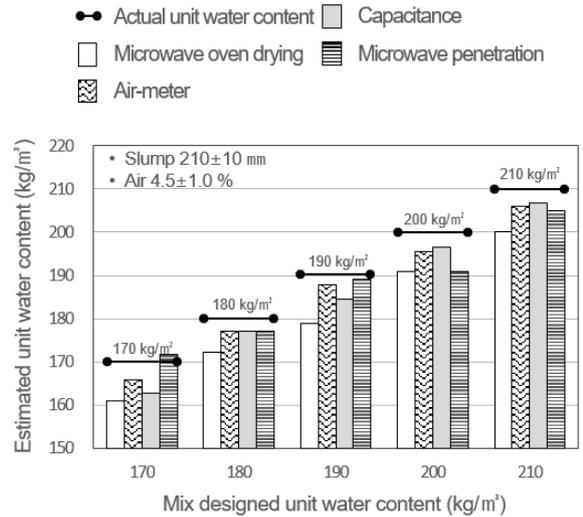


Fig. 3. Relative error and standard deviation by test methods (Series 1)

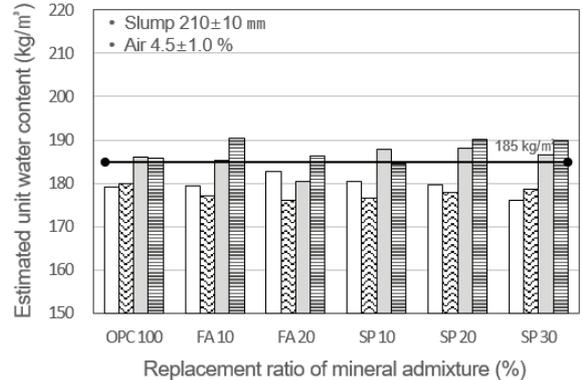
한편, 마찬가지로 모르타르 시료를 이용하는 정전용량법의 경우는 고주파가열법에 비해 추정오차의 크기가 작은 것을 확인할 수 있는데, 이는 전자기적 시험방법의 원리상 습식선별(wet screening) 과정에서 손실된 잔골재 및 페이스트의 무게가 추정식의 계산과정에서 직접적으로 반영되는 고주파가열법과 달리, 전자기적 방식으로 시료의 수분을 측정할 때는 습식선별(wet screening)에 따른 시료편차는 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.2 혼화재 치환율 변화가 콘크리트 단위수량 시험결과에 미치는 영향 검토 (Series 2)

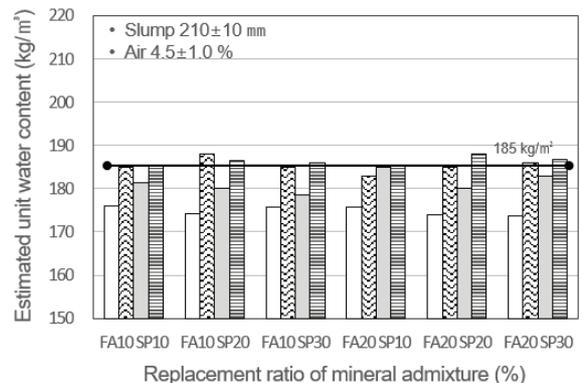
Fig. 4는 단일성분계, 2성분계, 3성분계로 구분하여 혼화재의 치환율에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험결과를 나타낸 것이다. 시험방법별로 추정값은 서로 차이가 있었으나, 동일한 시험방법의 단위수량 추정값을 비교했을 때, 혼화재 치환율에 따른 경향은 나타나지 않았으며, 오차범위는 약 $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ 로 Series 1 과 유사한 수준인 것을 확인할 수 있었다.



(a) Variation by designed unit water content(OPC 100 %)



(b) Variation by mineral admixture replacement(Binary concrete)



(c) Variation by mineral admixture replacement(Ternary concrete)

Fig. 4. Variation of estimated unit water content by concrete mix design factor

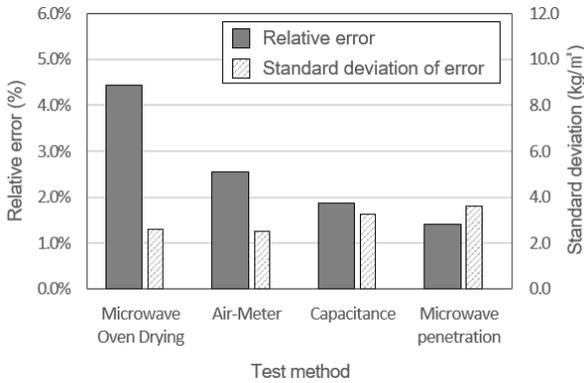


Fig. 5. Relative error and standard deviation by test methods (Series II)

Fig. 5는 Series II에서 실시한 모든 콘크리트 단위수량 시험결과의 오차를 모집단으로 하는 상대오차 및 표준편차를 나타낸 것이다. 단위수량 시험의 상대오차는 5.0 % 이하, 오차의 표준편차는 3.7 kg/m^3 이하로 시험결과의 정확도가 양호한 것을 확인할 수 있었고, Series I과 마찬가지로 고주파가열법의 단위수량 추정값은 다른 시험방법에 비해 낮게 나타내는 경향으로 인해 상대오차는 상대적으로 크게 나타났다.

4.3 골재의 물리적 특성 변화가 콘크리트 단위수량 시험결과에 미치는 영향 검토 (Series 3)

Fig. 6은 단위수량 170, 190 및 210 kg/m^3 에서 잔골재율이 변화할 때, 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험결과를 나타낸 것이다.

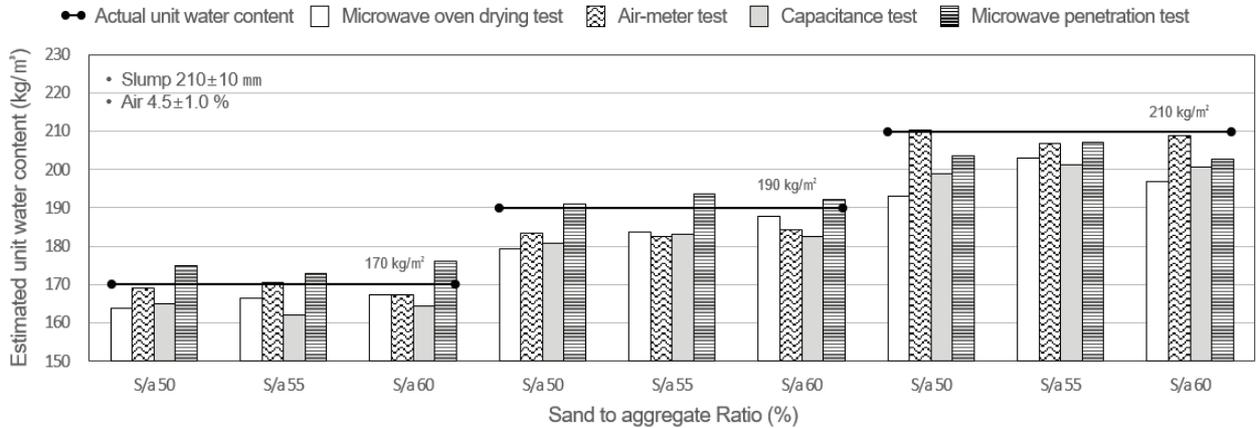


Fig. 6. Variation of estimated unit water content by sand to aggregate ratio

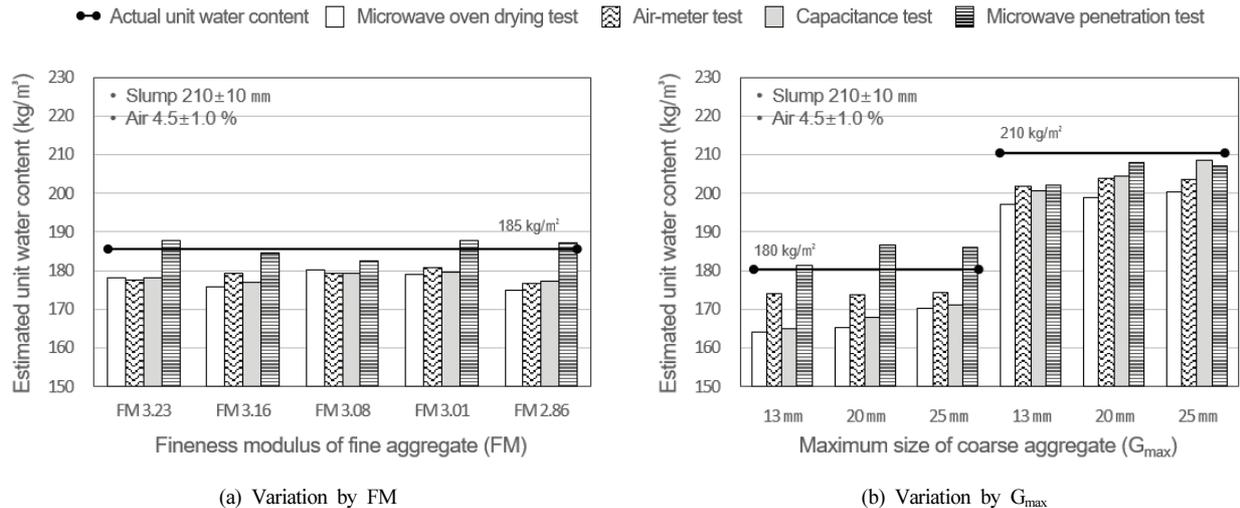


Fig. 7. Variation of estimated unit water content by FM and G_{max}

동일한 시험방법의 단위수량 추정값을 비교했을 때, 잔골재율에 따른 특정한 경향은 나타나지 않았다. Fig. 7은 잔골재의 조립율이 변화 및 굵은골재의 최대치수가 변화할 때의 굳지 않은 콘크리트 단위수량 시험결과를 나타낸다. 마찬가지로 동일한 시험방법일 때, 골재의 물리적 특성 변화가 추정값에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 고주파가열법과 정전용량법의 경우 실험에 따라 추정값의 오차의 범위는 $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ 를 초과하는 경우가 있었지만, 골재의 물리적 특성 변화에 따른 일정한 경향을 나타내지는 않았다. 따라서 습식 선별(wet screening)을 통한 모르타르 시료채취 과정에서 불규칙적으로 발생하는 시료편차의 영향으로 보는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

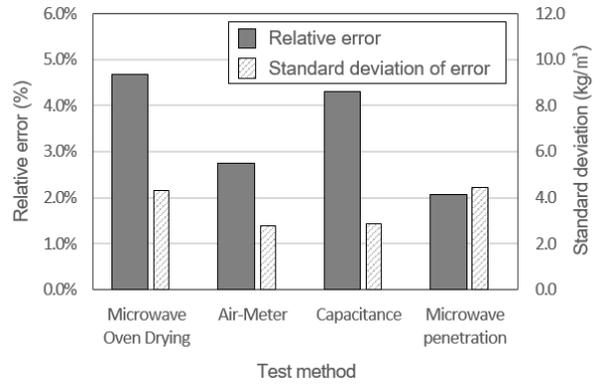
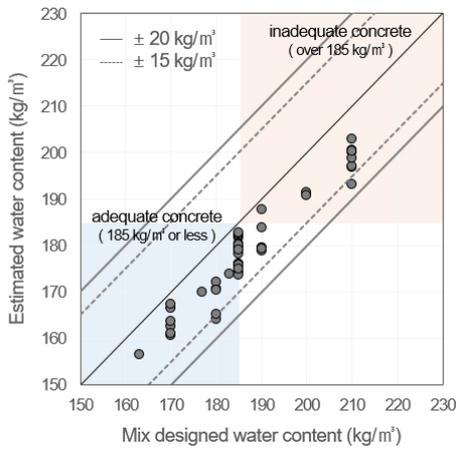
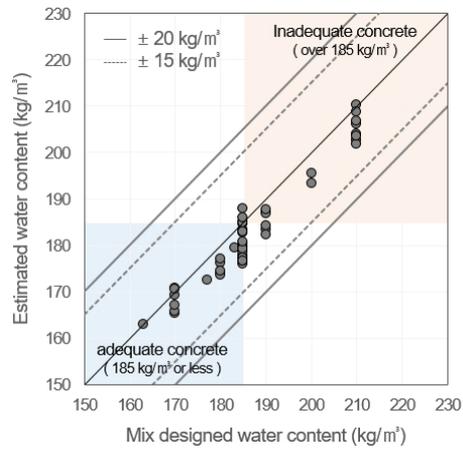


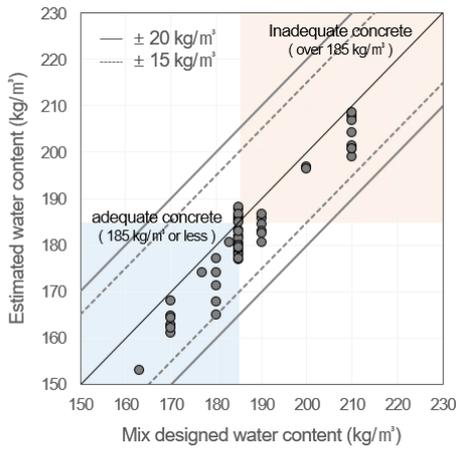
Fig. 8. Relative error and standard deviation of error by test methods (Series III)



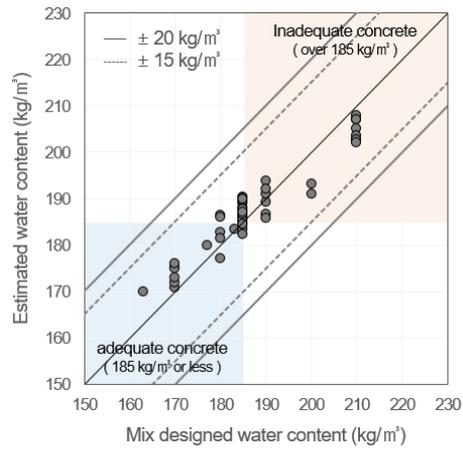
(a) Microwave oven drying method



(b) Air-meter method



(c) Capacitance method



(d) Microwave penetration method

Fig. 9. Scatter diagram of estimated water content by test methods

Fig. 8은 Series III에서 실시한 모든 콘크리트 단위수량 시험결과 오차를 모집단으로 하는 상대오차 및 표준편차를 나타낸 것이다. 전반적으로 Series I 및 Series II 대비 가장 큰 상대오차를 나타냈다. 골재는 콘크리트 용적의 약 70 %를 차지하는 만큼, 다른 요인에 비해 단위수량을 추정하는 시험방법에 상대적으로 영향이 큰 것으로 판단된다. 특히, 단위수량 추정을 위해 모르타르 시료를 활용하는 고주파가열 및 정전용량 시험방법은 콘크리트 시료를 활용하는 단위용적질량 및 마이크로파 시험방법에 비해 오차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

5. 단위수량 추정오차의 경향성 및 확률밀도 함수 분석

5.1 콘크리트 단위수량 시험방법별 시험오차의 경향성

Fig. 9는 본 연구에서 실시한 모든 단위수량 실험을 종합하여 실제 콘크리트 시료의 단위수량 대비 시험방법별 추정값의 분포를

나타낸 것이다. 일반적인 단위수량 관리값 185 kg/m³를 기준으로 적합·부적합 콘크리트를 구분하기 위해 구역을 나누어 나타냈고, 해외 및 한국도로공사의 단위수량 허용오차와 관련된 정확성을 시각적으로 파악하기 위해 경고기준 ± 15 kg/m³ 및 반품기준 ± 20 kg/m³의 오차범위를 표현하였다.

Fig. 9(a), (c)를 통해 고주파가열법 및 정전용량법을 사용한 콘크리트의 단위수량 실험은 실제 배합단위수량의 고저에 무관하게 전반적으로 낮은 추정값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9(b), (c) 단위용적질량법 및 마이크로파법을 사용한 콘크리트 단위수량 시험에서도 낮은 추정값을 나타내는 경우가 있으나, 상대적으로 모르타르를 활용하는 시험방법인 고주파가열법 및 정전용량법의 오차가 확연히 큰 경향을 확인할 수 있었다. 마이크로파법의 경우 실제 배합단위수량이 낮을 때 추정값은 높고, 실제 배합단위수량이 높을수록 추정값이 낮은 경향을 보였지만, 추정오차의 정도는 크지 않은 것을 확인할 수 있었는데, 탐침 프로브(probe)를 콘크리트 시료에 삽입하여 다짐한 후 측정하는 과정에서 콘크리트 물성에 따른 프로브 측정면의 공기포 혹은 굵은골재의 침전으로 인해 소정의 오차가 발생하는 것으로 사료된다.

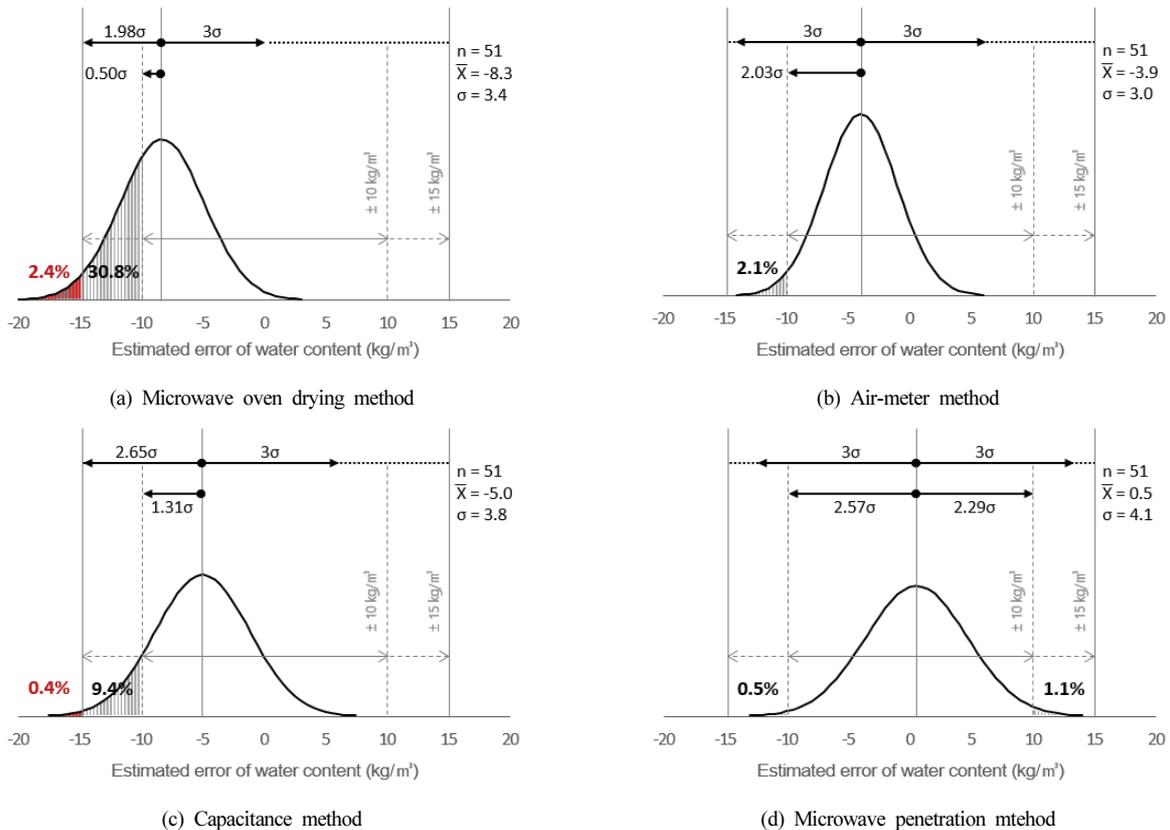


Fig. 10. Probability density function of estimated error of water content by test methods

본 연구의 범위내에서 추정값의 최대오차는 고주파가열법은 17 kg/m³, 단위용적질량법 9 kg/m³, 정전용량법 15 kg/m³, 마이크로 파법 9 kg/m³로 나타났으며, 오차의 표준편차는 고주파가열법 3.7 kg/m³, 단위용적질량법 2.9 kg/m³, 정전용량법 4.0 kg/m³, 마이크로파법 4.5 kg/m³로 나타났다.

5.2 확률밀도함수 분석

Fig. 10은 본 연구에서 실시한 모든 단위수량 실험의 오차를 모집단으로 하는 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 각각의 단위수량 시험방법별로 본 연구의 범위에서 실시한 51회의 실험결과를 바탕으로 각 실험방법별 확률론적 오차범위 및 신뢰성을 검토하고자 하였다.

본 연구의 범위 내에서 확률밀도함수를 통해 분석한 결과, Fig. 10(a), (c)과 같이 모르타르 시료를 이용해 단위수량을 추정하는 실험방법인 고주파가열법 및 정전용량법을 사용하는 경우, 오차가 ± 15 kg/m³ 범위에서 약 97.6 %의 신뢰성을 가지는 것을 확인할 수 있었고, Fig. 10(b), (d)와 같이 콘크리트 시료를 이용하는 단위용적질량법 및 마이크로파법의 경우 오차가 ± 10 kg/m³ 범위에서 약 97.9 %의 신뢰성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 공통적으로 모르타르 시료를 이용하는 단위수량 실험방법에서 전반적인 추정값이 작게 나타나는 오차로 인해 단위용적질량법 및 마이크로파법의 신뢰성이 상대적으로 더 높게 평가되었고, 모르타르를 이용하는 실험방법의 경우 향후 실험에 사용되는 시료의 종류에 대한 고민과 더불어 보정식의 개발에 관한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법의 신뢰성을 검증하기 위해 실내 콘크리트 배합실험을 통해 제작된 다양한 콘크리트에 고주파가열법, 단위용적질량법, 정전용량법 및 마이크로파법의 4가지 시험방법을 사용하여 시료의 실제 단위수량과 비교분석하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구범위 내에서 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험결과 4가지 시험방법 모두 추정오차 5 % 이하의 양호한 결과를 나타냈으며, 단위수량 163~210 kg/m³ 범위 내에서 대부분 ± 15 kg/m³의 오차범위를 만족하는 수준임을 확인할 수 있었다.
2. 고주파가열법의 경우 추정오차가 가장 크게 나타났지만 추정오

차간의 편차가 작고 추정오차가 일률적으로 낮은 경향을 나타내고 있는 것을 고려할 때, 모르타르 시료채취 과정에서 발생하는 습식 선별(wet screening)의 영향으로 분석되며, 손실된 잔골재 및 페이스트의 무게가 추정식의 계산에 직접적으로 관여되면서 발생하는 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 따라서, 고주파가열법의 보다 정확한 단위수량 추정을 위해서는 실험에 사용되는 시료를 콘크리트로 하거나, 보정식의 개발 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3. 정전용량법 역시 모르타르를 채취하여 실험에 사용하지만 고주파가열법에 비해 추정결과에 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 정전용량법의 측정 원리상 습식 선별(wet screening)에 의한 골재나 페이스트의 손실된 질량과는 무관하게 시료에 포함된 수분율을 전자기적 방법으로 측정하기 때문인 것으로 판단된다.
4. 실내 배합실험의 수준에서 발생한 추정오차를 모집단으로 확률밀도함수를 분석했을 때, 4가지 단위수량 실험방법 중 단위용적질량법 및 마이크로파법의 신뢰성이 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있었으며, 모르타르 시료를 이용하는 고주파가열법 및 정전용량법은 ± 15 kg/m³ 오차범위에서 97 % 이상, 콘크리트 시료를 이용하는 단위용적질량법 및 마이크로파법은 ± 10 kg/m³ 오차범위에서 97 % 이상 신뢰성을 나타냈다.

향후 추가적인 연구를 통해 계량오차, 생산편차, 회수수 사용 및 가수상환 등이 발생하는 실제현장에서 단위수량 시험의 정확도 확인 및 신뢰성에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

References

- An, H.S. (2015). 20 years after sampoong disaster ; do we fully take the responsibilities?, Magazine of the Korea Institute of Building Construction, **15(1)**, 4–6 [in Korean].
- Hong, S.H. (2018). 4th basic plan for safety and maintenance of facilities, Korean Magazine of Construction Engineering and Management, **19(3)**, 24–31 [in Korean].
- Lee, H.S., Lim, S.Y. (2013). A study on activation of long-life housing, Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, **13(4)**, 95–102 [in Korean].

- Han, M.C., Lee, J.S. (2017). Evaluation of aggregates properties depending on producing sectors and regions in Korea, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **17(6)**, 499–506 [in Korean].
- Min, K.C., Han, C.G. (2016). Influence of low-quality aggregate on engineering properties of concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(2)**, 187–194 [in Korean].
- Lee, S.J., Song, Y.L., Lee, H.K., Lee, M.H., Han, M.C., Han, C.G. (2015). “Effect of poor quality aggregates on the properties of high strength concrete”, Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference, Seoul, Korea, **15(2)**, 113–114 [in Korean].
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in Japan, (2003). About Operation for Quality Assurance of Ready-mixed Concrete. Notification, National Building No. 95.
- Kim, Y.R., Choi, I.H., Jung, Y.H., Lee, D.B. (2007). An experimental study on the application of measuring method of water content for quality control of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **19(2)**, 179–188 [in Korean].
- Korea Concrete Institute. (2022). Korean Construction Specification, Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Korea, KCS 14 20 10 [in Korean].
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Korea. (2022). Construction Work Quality Management Guidelines, Notification, No. 2022–30 [in Korean].
- Kim, Y.R., Jung, Y.H., Choi, I.H., Kim, H.R., Lee, D.B. (2005). Development of measuring method and application status for unit water content of fresh concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **17(5)**, 58–64 [in Korean].
- Woo, Y.J., Lee, B.C., Choi, Y.C., Moon, K.D., Jo, Y.K., Kim, J.H., Son, Y.J. (2011). Development of Automatic System for Quality Control in Ready Mixed Concrete Manufacturing, Report No. TRKO201600003723, Korea Conformity Laboratories, Seoul, Korea [in Korean].

실험실 수준에서 배합변수별 굳지 않은 콘크리트 단위수량 실험방법의 추정오차 및 신뢰성 검토

본 연구에서는 고주파가열법, 단위용적질량법, 정전용량법 및 마이크로파법의 4가지의 굳지 않은 콘크리트의 단위수량 시험방법의 신뢰성을 검토하기 위해 배합요인, 혼화재 치환율 및 골재의 물리적 특성 변화에 따른 다양한 콘크리트를 대상으로 단위수량 실험을 실시하고 시험방법별 단위수량 추정값의 오차를 분석하였다. 단위수량의 시험방법과 무관하게 추정오차는 5% 이하의 수준을 나타냈으며, 모르타르를 이용하는 시험의 경우 상대적으로 추정값의 오차가 크게 나타났다. 다양한 배합의 콘크리트에 대한 단위수량 실험결과를 토대로 각 실험방법별 추정오차를 모집단으로 하는 확률밀도함수를 분석한 결과 모르타르 시료를 이용하는 단위수량 실험방법은 추정오차 $\pm 15 \text{ kg/m}^3$ 내 97%, 콘크리트 시료를 이용하는 단위수량 실험방법은 추정오차 $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ 내 97% 이상의 신뢰성을 나타냈다. 향후 실제현장에서 다양한 생산변수를 고려하여 단위수량 실험방법의 신뢰성을 추가적으로 검증할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.