

시멘트 및 혼화재의 품질관리를 위한 밀도 시험방법 비교 연구

A Study on Comparison of Density Test Methods for Quality Control of Cement and Mineral Admixture

이재승¹ · 노상균^{2*} · 박 철³ · 신홍철⁴

Jae-Seung Lee¹ · Sang-Kyun Noh^{2*} · Cheol Park³ · Hong-Chul Shin⁴

(Received November 7, 2022 / Revised December 1, 2022 / Accepted December 1, 2022)

In this study, the density of KS L 5110 was compared with that of gas pycnometer and electronic densimeter for efficient density management of cement, blast furnace slag powder and fly ash. Correlation and usability according to the test method were reviewed, and based on the results of the experiment, the availability of alternative test methods was analyzed. As a result of the density test according to test methods, the density of cement, blast furnace slag powder and fly ash tended to decrease in the order of gas pycnometer, KS L 5110 and electronic densimeter. Because the volume range of the sample to be evaluated is different depending on test methods. The coefficient of determination R^2 was in the range of 0.71 to 0.93, and the correlation according to test methods showed a relatively good correlation. If correction is applied through correlation, it is analyzed that alternative test methods can be used. As a result of the usability review considering the test procedure, measurement time and coefficient of variation, the gas pycnometer had the simplest test procedure and good reliability. In addition, it is expected that the reproducibility between the testers is relatively high because the skill is not greatly required.

키워드 : 시멘트, 혼화재, 품질관리, 밀도, 시험방법

Keywords : Cement, Mineral admixture, Quality control, Density, Test method

1. 서론

밀도란 사전적 의미로 단위 부피당 질량으로 정의되며, 일반적으로 물질의 질량을 부피로 나누어 계산한다. 물질마다 고유한 밀도 값을 가지는데, 이를 통해 재료의 상태, 성능 및 결함 등을 간접적으로 파악할 수 있다. 따라서 밀도는 화학, 물리 및 재료 분야에서 중요한 특성으로 다루어지며, 다양한 산업에서 제품의 생산, 품질 및 공정 관리를 위해 활용된다.

시멘트 및 콘크리트 분야에서 밀도 활용의 주된 목적은 재료의 품질관리와 콘크리트의 배합설계이다. 시멘트의 경우 밀도를 통해 클링커의 소성 상태, 불순물 첨가 및 풍화 정도 등을 추정할 수

있는데, 일반적으로 소성이 불량하고, 불순물 함량이 높으며, 풍화가 진행될수록 밀도가 저하된다(Kim et al. 2009). 콘크리트의 경우 배합설계 과정에서 콘크리트 1 m³를 만드는 데 필요한 구성 재료의 단위중량당 질량(kg/m³)을 산출하기 위해 밀도가 사용된다. 따라서 재료의 품질관리와 콘크리트 구성 재료의 소요량 산출을 위해 정확한 밀도 값의 제시는 필수적이다.

시멘트 및 혼화재에 대한 밀도 시험은 「KS L 5110 시멘트의 밀도 시험방법」에 따르도록 규정되어 있다. KS L 5110은 르샤틀리에 플라스크와 광유를 사용하여 밀도를 측정하는 방법으로 국내뿐만 아니라 세계적으로 적용되는 보편적인 시험방법이다(BS EN 196-6 2018; ASTM C 188 2017). 이 시험방법은 측정에 다소의

* Corresponding author E-mail: nosk0046@kcl.re.kr

¹한국건설생활환경시험연구원 스마트건설재료센터 연구원 (Smart Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Chungbuk, 28115, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 스마트건설재료센터 책임연구원 (Smart Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Chungbuk, 28115, Korea)

³쌍용 C&E 기술연구소 책임연구원 (Technology Research Center, Ssangyong C&E, Sejong, 30078, Korea)

⁴한국건설생활환경시험연구원 스마트건설재료센터 센터장 (Smart Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Chungbuk, 28115, Korea)

시간과 노동이 소요되고, 시험자의 숙련도에 따라 결과 차이가 큰 편이다. 또한, 시험 후 르사틀리에 플라스크의 세척이 까다롭고, 휘발성 및 가연성 물질인 광유는 처리에 어려움이 따른다(Mo et al. 2000).

한편, 다른 산업 분야에서는 밀도병을 활용한 시험방법 외에 가스 치환법 및 아르키메데스 원리 등 다양한 방법이 표준으로 제정되어 비교적 간편하고, 안전한 방법이 적용되고 있다(KS M ISO21687 2007; KS D 0033 2001; KS L ISO 18754 2013). 최근 시멘트 산업에서도 신속한 측정을 위해 다양한 시험방법이 활용되고 있으나, KS L 5110과 상관성에 대한 검토가 부족하여 시험 결과의 신뢰성이 저하될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 시멘트 및 혼화재의 밀도 시험에 대한 대체 시험방법 검토를 위해 KS L 5110과 가스 치환법을 활용한 가스 피크노미터 및 아르키메데스 원리를 활용한 전자 밀도계에 의한 밀도 값을 비교하였다. 시험방법에 따른 상관관계 및 사용성 검토를 통해 시멘트 및 혼화재의 신속하고 효율적인 밀도 관리를 위한 기초적 자료로 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 밀도의 분류

밀도는 부피를 정의하는 방법에 따라 진밀도(True density), 겉보기 밀도(Apparent density), 벌크 밀도(Bulk density)로 구분할 수 있다. 진밀도는 내·외부에 존재하는 모든 기공을 제외한 실제 물질의 부피만을 이용하여 계산한 것이다. 내부가 치밀하게 구성된 경우는 문제가 없지만 외부에서 접근하기 어려운 닫힌 기공이 존재하는 경우는 진밀도를 측정할 수 없다. 겉보기 밀도는 외부로 열린 기공을 제외한 부피를 이용해 계산한 것이다. 즉, 물질의 질량에 내부의 닫힌 기공을 포함한 부피로 나누어 계산한다. 벌크 밀도는 외부로 열린 기공 및 입자 사이의 공간까지 포함한 부피를 이용해 계산한 밀도이다(Webb 2001). 재료 특성에 따라 적용되는 밀도 종류가 다르며, 시멘트 및 혼화재는 배합수인 액체가 접근할 수 있는 열린 기공을 포함하는 범위인 겉보기 밀도가 사용된다. 이에 따라 KS L 5110 밀도 시험방법이 표준으로 활용된다.

2.2 KS L 5110 밀도 시험방법

KS L 5110은 액체가 담겨있는 플라스크에 시료를 투입하여 액체의 부피 변화를 통해 밀도를 계산하는 시험방법이다. 시험에 사용되는 르사틀리에 플라스크는 Fig. 1과 같고, 시험용 액체는 (20

± 1) °C에서 밀도 0.73 g/cm³ 이상인 완전히 탈수된 광유(등유 또는 나프타)를 사용한다.

KS L 5110은 정확한 밀도 값을 얻기 위해 다음과 같은 주의가 요구된다. 광유는 부피팽창계수가 약 0.1 %/°C로 온도에 따른 부피 변화가 크기 때문에 시료 투입 전·후 온도가 0.2 °C 이내일 때 눈금을 확인해야 한다(Lim 2014). 이러한 오차를 줄이기 위하여 상대적으로 비열이 높아 온도 유지가 용이한 물에 르사틀리에 플라스크를 넣어 온도가 안정화될 때 눈금을 읽는다. 투입 중 외부로 시료가 손실되거나, 플라스크 내부에 묻게 되면 투입량이 감소하여 실제보다 큰 밀도 값이 계산될 수 있다. 시료 투입 후 르사틀리에 플라스크 내부의 공기가 나오지 않을 때까지 공기를 제거해야 한다. 입자 표면의 공극뿐만 아니라 입자 사이의 공간까지 광유가 채워져야 정확한 부피를 측정할 수 있다.

KS L 5110은 숙련되면 정확한 밀도 값을 얻을 수 있지만, 시험자, 온도, 시료 투입 및 공기 제거 등에 따른 오차가 발생할 수 있으며, 측정에 다소 시간이 소요되어 단시간에 많은 시료를 측정하기에 어려운 단점이 있다.

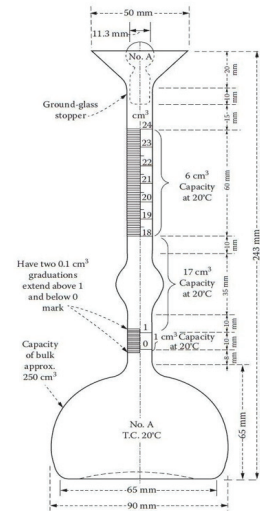


Fig. 1. Le Chatelier flask

2.3 가스 피크노미터 밀도 시험방법

가스 피크노미터는 헬륨과 같은 불활성 가스를 활용한 기체 치환으로 부피를 측정하는 시험방법이다. 일반적으로 촉매, 배터리 셀, 제약, 화장품, 토너, 안료 및 전자 부품 등의 밀도 측정에 활용된다. Fig. 2에 가스 피크노미터의 내부 모식도를 나타냈다. 시료를 투입하는 Sample chamber, 부피를 확장시켜 주는 Expansion chamber, Chamber 간의 압력변화를 측정하는 Pressure transducer 및 Valve로 구성되어있으며, Chamber의 부피와 압력변화로부터 시료 부피를 측정할 수 있다.

시료 부피 V_S를 측정하기 위해 시험 전 Standard ball을 통해 Sample chamber의 부피 V_C와 Expansion chamber의 부피 V_E를 측정한다. 그 후 Sample chamber에 시료를 투입하고, 가스를 주입하면 Fig. 3와 같은 단계로 V_S를 측정할 수 있다. 1단계는 Valve 2, Valve 3가 닫혀있는 상태로 Valve 1이 열리면서 부피

가 $V_C - V_S$ 인 Sample chamber의 평형 압력 P_1 이 된다. 2단계는 Valve 1이 닫히고 Sample chamber와 Expansion chamber 사이의 Valve 2가 열리면서 새로운 평형 압력 P_2 가 된다. 이때 부피는 Expansion chamber의 부피를 포함하여 $V_C - V_S + V_E$ 가 된다. 평형 압력 P_1, P_2 는 Pressure transducer를 통해 알 수 있으며, 두 단계 사이의 압력변화로부터 이상기체 상태방정식($PV = nRT$)를 적용하면 시료 부피 V_S 를 산출하여 밀도를 계산할 수 있다.

가스 피크노미터는 큰 숙련도가 필요 없으며, 시험 절차가 간단하여 측정시간이 빠르다. 적은 시료량으로 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 별도의 전처리 과정이 필요하지 않다. 기체 치환 방법이 액체 치환 방법보다 작은 기공까지 치환되므로 밀도 값이 상대적으로 높은 경향을 보인다(Webb 2001; de Terris et al. 2019; Chang 1988).

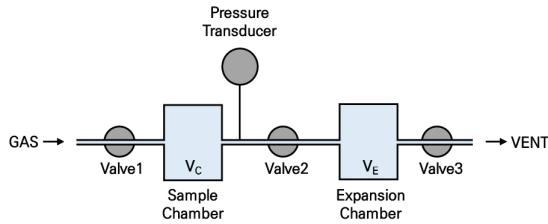


Fig. 2. Schematic diagram of gas pycnometer

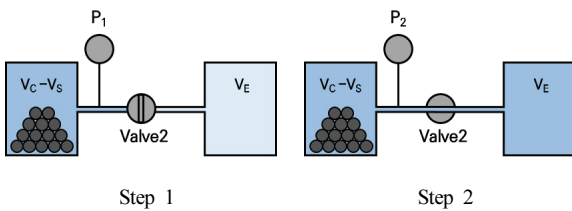


Fig. 3. Schematic diagram of the measurement steps of gas pycnometer

2.4 전자 밀도계 밀도 시험방법

전자 밀도계는 액체 내에서 물체가 받는 부력은 물체가 차지하는 부피에 해당하는 액체의 질량과 같다는 아르키메데스의 원리를 적용한 시험방법이다. Fig. 4는 전자 밀도계의 측정 순서를 모식으로 나타낸 것으로 시료의 기중 질량과 액체 내 질량을 측정하여 두 값을 통해 밀도를 계산한다. 일반적으로 벌크 상태의 고체 밀도 측정에 많이 사용되며, 굵은 골재의 밀도 시험방법에 이 원리가 적용된다.

전자 밀도계는 정확한 밀도 값을 얻기 위해 다음과 같은 주의가 요구된다. 사용하는 액체와 시료가 반응성이 있거나 액체 내에서 시료가 흐트러지면 측정이 불가능하므로 사전 확인이 필요하다. 액체 내에서 시료 질량을 측정하기 때문에 액상이 안정화된 후 질량을 측정해야 하며, 시료 및 장비에 부착된 기포에 의한 부력 작용으로 액체 내 질량에 오차가 발생할 수 있다. 액체 내에서 시료 질량은 액체의 온도에 따라 변하기 때문에 액체의 온도를 일정하게 유지해야 한다(de Terris et al. 2019).

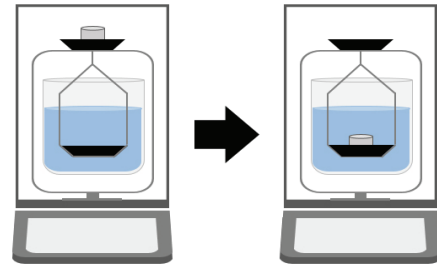


Fig. 4. Measurement procedure of electronic densimeter

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

국내에서 시판 중인 보통 포틀랜드 시멘트 1종(이하 시멘트, PC), 콘크리트용 고로슬래그 미분말 3종(이하 고로슬래그 미분말, SP) 및 플라이 애시 2종(이하 플라이 애시, FA)을 각각 10개씩 확보하여 시험용 시료로 사용하였다.

3.2 실험방법

시험은 온도(20 ± 1) °C, 상대습도(65 ± 5) % 환경조건에서 진행하였다. KS L 5110의 시료량은 KS L 5110, KS F 2563 및 KS L 5405에 따라 시멘트 약 64 g, 고로슬래그 미분말 약 55 g 및 플라이 애시 약 70 g을 사용하였으며, 시험용 액체인 광유는 완전 탈수된 등유를 사용하였다. KS L 5110 밀도는 식 1에 따라 계산하였다.

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (1)$$

여기서 ρ : 밀도(g/cm³)
 W : 시료 질량(g)
 V : 르샤틀리에 플라스크 눈금 차(mL)

가스 피크노미터는 MICROTRAC MRB사의 BELPYCNO 장비를 사용하였으며, 시험용 기체는 헬륨(He) 가스를 사용하였다. 시료량은 부피 10 cm³ 용기에 약 80 %까지 채워 넣어 질량을 측정하였다. 가스 피크노미터 부피는 식 2에 따라 계산되며, 측정된 질량으로 나누어 밀도를 계산하였다(Webb 2001; de Terris et al. 2019; Chang 1988).

$$V_s = V_C - \frac{V_E}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (2)$$

여기서 V_s : 시료 부피(cm³)
 V_C : sample chamber 부피(cm³)
 V_E : expansion chamber 부피(cm³),
 P_1, P_2 : 팽창 전 · 후 압력(kPa)

전자 밀도계는 Alfa Mirage사의 SD-200 L를 사용하였으며, 시험용 액체는 시료와 반응성이 없는 밀도 0.66 g/cm³의 노르말 헥산(n-Hexane)을 사용하였다. 시료량은 약 5 g으로 기준 질량과 액체 내 질량을 측정하였으며, 전자 밀도계 밀도는 식 3에 따라 계산하였다(de Terris et al. 2019).

$$\rho = \frac{W_A}{W_A - W_F} \times (\rho_F - \rho_A) + \rho_A \quad (3)$$

여기서 ρ : 밀도(g/cm³)
 W_A : 기준 질량(g)
 W_F : 액체 내 질량(g)
 ρ_A : 공기 밀도(g/cm³)
 ρ_F : 액체 밀도(g/cm³)

4. 실험결과 및 분석

4.1 시험방법에 따른 시멘트 밀도

Fig. 5는 시험방법에 따른 시멘트의 밀도를 나타낸 그래프이다. KS L 5110은 3.08~3.14 g/cm³, 가스 피크노미터는 3.10~3.18 g/cm³, 전자 밀도계는 3.01~3.08 g/cm³의 밀도 범위를 나타냈으며, 가스 피크노미터, KS L 5110, 전자 밀도계 순으로 밀도 값이 낮아지는 경향을 나타냈다.

가스 피크노미터에 의한 시멘트 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 0.02~0.05 g/cm³ 높은 값을 나타낸 반면 전자 밀도계에 의한 시멘트 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 0.04~0.08 g/cm³ 낮은 값을 나타냈다. 가스 피크노미터는 기체 치환을 통해 부피를 측정하는 방법으로 액상이 침투할 수 있는 모세관 공극보다 더 미세한 공극까지 침투가 가능하다. 따라서 여타의 시험방법보다 부피가 상대적으로 작게 평가되므로 높은 밀도 값이 계산된다(Helsel et al. 2016). 한편, 전자 밀도계는 약 10분 이내의 단시간에 측정이 이루어지나, KS L 5110은 약 2시간 이상의 안정화 시간이 소요된다. 따라서 전자 밀도계는 액체가 시료 공극에 침투할 수 있는 시간이 상대적으로 부족하여 부피가 크게 평가되므로 낮은 밀도 값이 계산된다. 따라서 충분한 시간을 정치시키면 두 시험

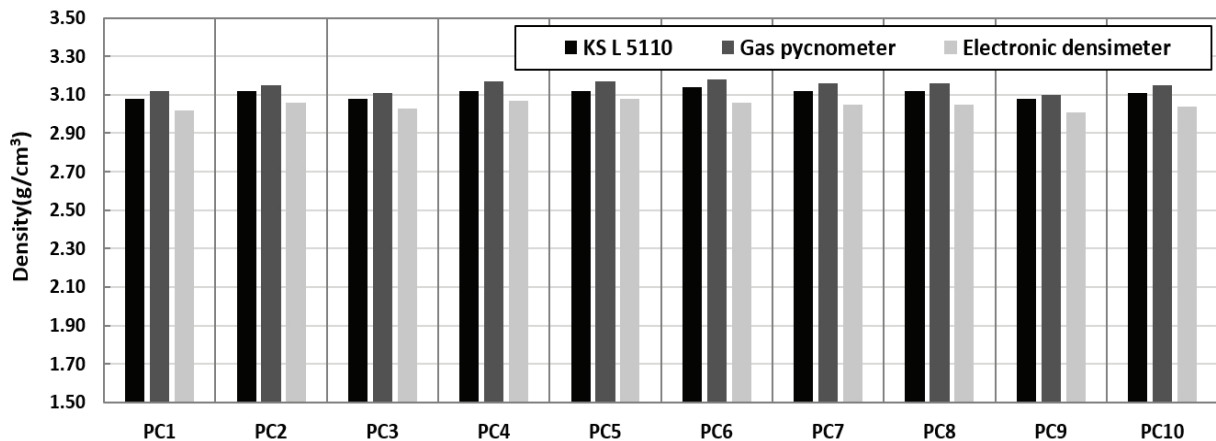


Fig. 5. Density of cement according to the test method

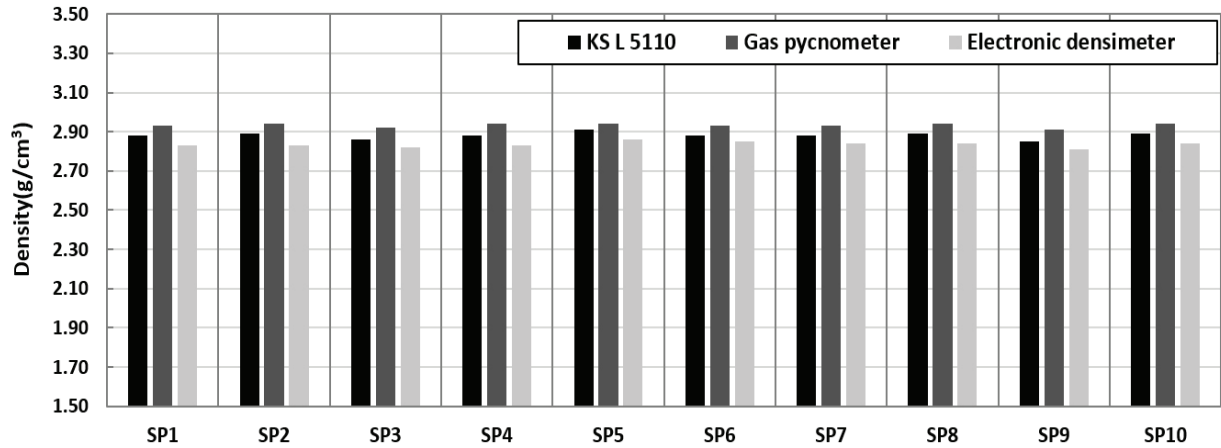


Fig. 6. Density of blast furnace slag powder according to the test method

방법 간 밀도 값의 차이는 줄어들 것으로 판단된다.

4.2 시험방법에 따른 고로슬래그 미분말 밀도

Fig. 6는 시험방법에 따른 고로슬래그 미분말의 밀도를 나타낸 그래프이다. KS L 5110은 2.85~2.91 g/cm³, 가스 피크노미터는 2.91~2.94 g/cm³, 전자 밀도계는 2.81~2.86 g/cm³의 범위를 나타냈다.

가스 피크노미터에 의한 고로슬래그 미분말의 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 0.03~0.06 g/cm³ 높은 값을 나타낸 반면 전자 밀도계에 의한 고로슬래그 미분말의 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 약 0.03~0.06 g/cm³ 낮은 값을 나타냈다. 이는 시멘트 밀도와 유사한 시험결과로 가스 피크노미터, KS L 5110, 전자 밀도계 순으로 밀도 값은 낮아지는 경향이며, 앞서 설명한 것과 동일한 요인으로 분석된다.

4.3 시험방법에 따른 플라이 애시 밀도

Fig. 7은 시험방법에 따른 플라이 애시의 밀도를 나타낸 그래프이다. KS L 5110은 2.19~2.37 g/cm³, 가스 피크노미터는 2.28~2.43 g/cm³, 전자 밀도계는 2.07~2.29 g/cm³의 밀도 범위를 나타냈다. 플라이 애시는 시멘트 및 고로슬래그 미분말에 비하여 넓은 밀도 분포를 나타냈는데, 이는 사용하는 연료 종류 및 발전 설비 차이 등으로 인해 화력 발전소마다 플라이 애시의 품질에 차이가 크기 때문에 나타난 결과이다.

가스 피크노미터에 의한 플라이 애시의 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 0.02~0.11 g/cm³ 높은 값을 나타낸 반면 전자 밀도계에 의한 플라이 애시의 밀도는 KS L 5110과 비교하였을 때 약 0.07~0.12 g/cm³ 낮은 값을 나타냈다. 플라이 애시는 시멘트 및 고로슬래그 미분말과 비교하여 상대적으로 시험방법에 따른 밀도

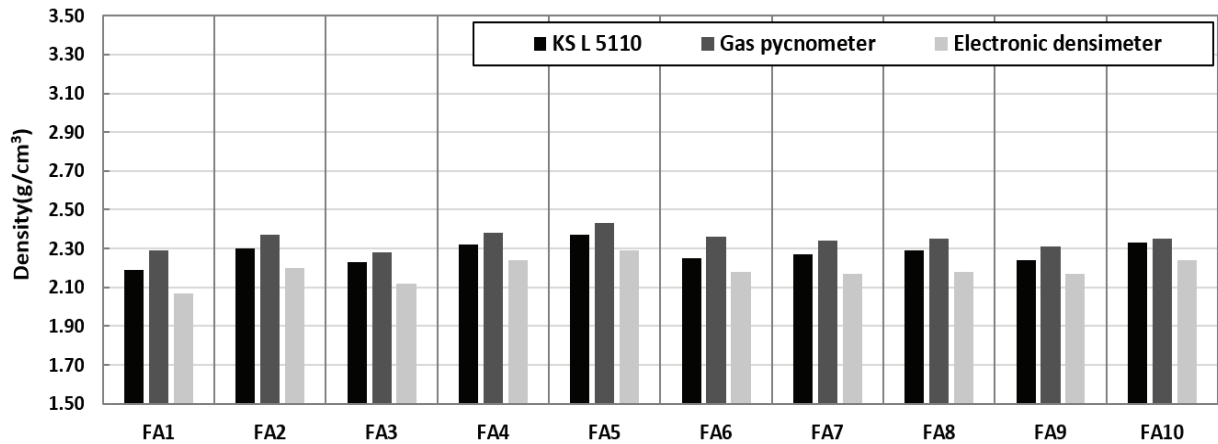


Fig. 7. Density of fly ash according to the test method

값의 차이가 크게 나타났는데, 이는 플라이 애시의 입자 형태에 따른 것으로 판단된다. 플라이 애시는 입자 형태는 속이 빈 Cenosphere, 속이 빈 입자 속에 미세한 입자가 가득 차 있는 Plerosphere, 다공질의 미연탄소 등을 포함하고 있다. 이러한 입자 형태는 고온의 연소영역에서 노출된 정도에 따라 변화하기 때문에 플라이 애시마다 상이하게 나타난다(Lee and Lee 1998). 따라서 다공질의 입자 비율이 높은 플라이 애시는 시험방법 간의 밀도 값의 차이가 크게 나타나고, 반면에 다공질의 입자 비율이 낮은 플라이 애시는 밀도 값의 차이가 작게 나타나는 것으로 판단 된다.

4.4 시험방법에 따른 상관관계

Fig. 8 및 Fig. 9은 KS L 5110과 가스 피크노미터 및 전자밀도계의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 결정계수 R² 값은 0.71~0.93 범위로 KS L 5110과 대체 시험방법 간의 비교적 양호한 상관성을

나타내고 있다.

KS L 5110과 가스 피크노미터의 상관관계를 살펴보면 추세선이 중심 사선의 아래쪽에 분포하여 가스 피크노미터에 의한 밀도가 높게 측정됨을 확인할 수 있다. 반면 KS L 5110과 전자 밀도계의 상관관계는 추세선이 위쪽에 분포하여 전자 밀도계에 의한 밀도가 낮게 측정됨을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 10과 같이 시험방법에 따라 시료의 부피를 평가하는 범위의 차이에 따른 것으로 결과적으로 밀도 값에 영향을 미친다(Webb 2001; Caizán– Juanarena et al, 2020).

실제 콘크리트 배합설계 시 배합수인 액체가 접근할 수 있는 범위인 겉보기 밀도가 사용되어 KS L 5110에 의한 밀도 값이 기준이 된다. 따라서 대체 시험방법으로 KS L 5110의 밀도 값을 추정하기 위해서는 보정이 필요하며, 상관식을 통해 이를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

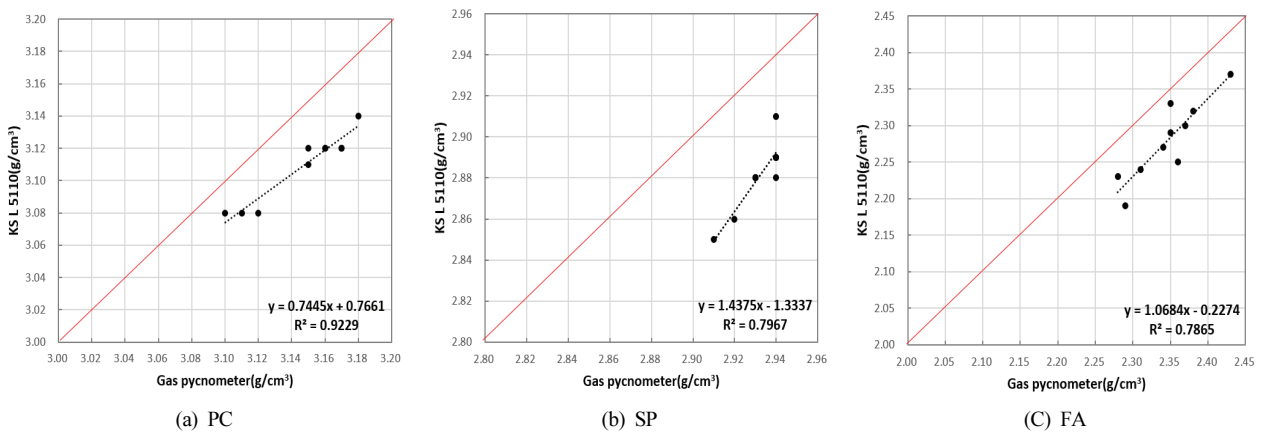


Fig. 8. Correlation between gas pycnometer and KS L 5110

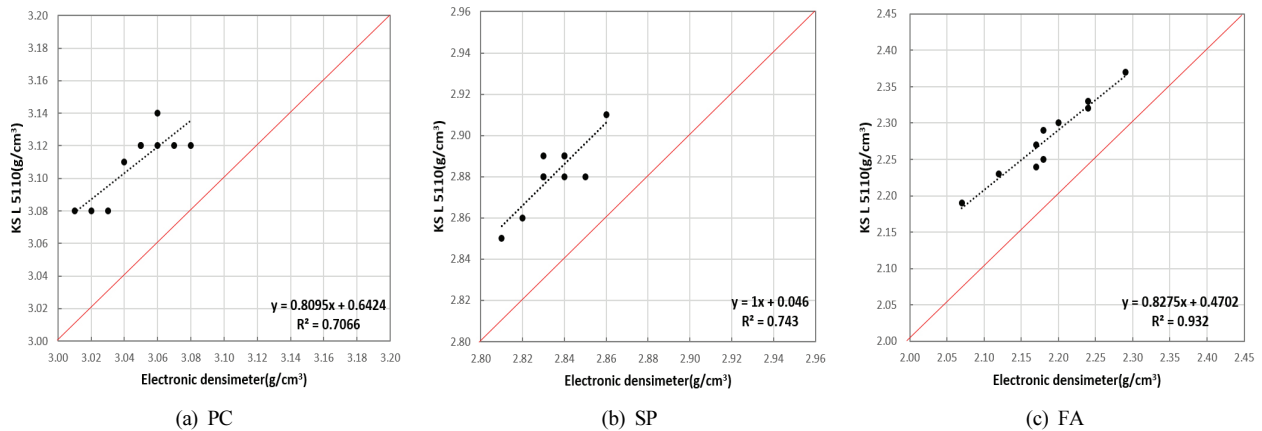


Fig. 9. Correlation between gas electronic densimeter and KS L 5110

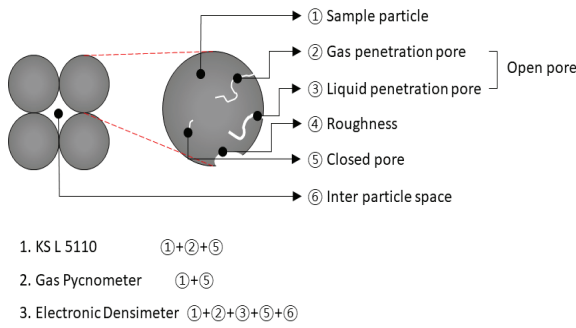


Fig. 10. Volume evaluation range according to measurement method

4.5 사용성 검토

Table 1은 시험방법에 따른 사용성을 비교한 것이다. 우선 시험 절차를 Fig. 11에 도식화하여 나타냈다. KS L 5110의 경우 5단계로 진행되고, 가스 피크노미터는 2단계로 진행되며, 전자 밀도계는 3단계로 진행된다. 따라서 상대적으로 가스 피크노미터의 시험 절차가 가장 간편하며, 시험자 간의 오차도 적을 것으로 판단된다.

측정 시간은 시험자 및 시험환경에 따라 차이는 있겠지만, 일반적으로 KS L 5110은 광유 안정화 및 기포 제거를 고려하면 3시간 이상이 소요되고, 가스 피크노미터 및 전자 밀도계는 10분 정도 소요되어 대체 시험방법 적용 시 신속한 측정이 가능하다.

시험방법에 따른 반복성을 검토하기 위해 동일한 시험자가 동일한 시료를 각각 10회씩 측정된 결과에 대한 변동계수(Coefficient of variation)를 계산하였다. 모든 시험방법에 따른 변동계수는 0.2~0.3%로 대체 시험방법과 KS L 5110의 반복 시험에 따른 결과의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of usability according to test method

	Test procedure (steps)	Measurement time (min)	Coefficient of variation (%)		
			PC	SP	FA
KS L 5110	5	More than 180	0.3	0.3	0.2
Gas pycnometer	2	10	0.2	0.2	0.3
Electronic densimeter	3	10	0.3	0.3	0.2

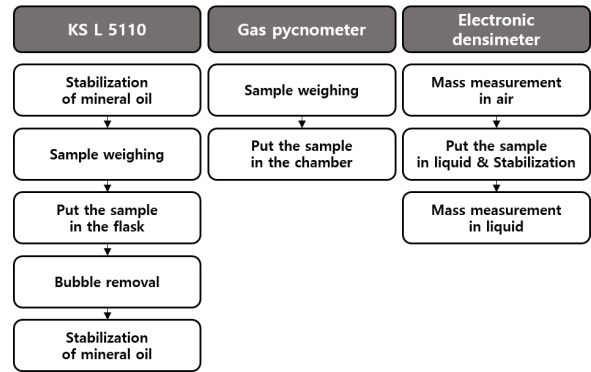


Fig. 11. Test procedure according to measurement method

5. 결론

본 연구에서는 시멘트 및 혼화재의 효율적인 밀도 관리를 위해 KS L 5110과 가스 피크노미터 및 전자 밀도계의 밀도 값을 비교하고, 대체 시험방법에 대한 활용 가능성을 분석하였다.

1. 시험방법에 따른 밀도 시험결과 시멘트, 고로 슬래그 미분말 및 플라이 애시 모두 가스 피크노미터, KS L 5110 및 전자 밀도계 순으로 밀도 값이 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 시험방법에 따라 시료의 부피를 평가하는 범위의 차이에 따른 것이다.
3. 플라이 애시는 시멘트 및 고로슬래그 미분말에 비해 시료 간 밀도 값의 분포가 크게 나타났으며, 시험방법에 따른 밀도 값의 차이도 크게 나타났다. 이는 생산지인 화력 발전소가 다양하게 존재하고, 다공질 입자 비율에 따른 품질 차이가 원인으로 분석된다.
4. KS L 5110과 대체 시험방법 간의 양호한 상관성을 확인하였으며, 상관식을 통해 오차에 대한 보정을 적용하면 대체 시험방법의 활용이 가능할 것으로 분석된다. 단, 본 논문은 시멘트 1종, 고로슬래그 미분말 3종 및 플라이 애시 2종의 일반적인 밀도 범위에 대한 결과로 모든 종류에 적용하기에는 한계가 있다.
5. 시험 절차, 측정시간 및 변동계수를 고려한 사용성을 검토한 결과 가스 피크노미터가 시험 절차가 가장 간단하며, 신뢰성도 양호하였다. 또한, 숙련도가 크게 필요하지 않기 때문에 시험자 간의 재현성도 상대적으로 높을 것으로 예상된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 소재부품기술개발사업의 연구비 지원에 의한 연구임 (20010607)

References

ASTM C 188-17 (2017). Standard test method for density of hydraulic cement, ASTM International, 7th Ed., United States of America.

BS EN 196-6 (2018). Methods of testing cement, determination of fineness, British Standard Institution, 3th Ed., United Kingdom.

Caizán-Juanarena, L., Sleutels, T., Borsje, C., ter Heijne, A. (2020). Considerations for application of granular activated carbon as capacitive bioanode in bioelectrochemical systems, *Renewable Energy*, **157**, 782-792.

Chang, C.S. (1988). Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer, *Cereal Chemistry*, **65(1)**, 13-15.

Helsel, M.A., Ferraris, C.F., Bentz, D. (2016). Comparative study of methods to measure the density of cementitious powders, *Journal of Testing and Evaluation*, **44(6)**.

Kim, S.S., Ryou, J.S., Lee, S.T., Jung, H.S. (2009). Construction Materials Engineering, Goomibook, Korea, 26-34.

KS D 0033 (2001). Method for determination of density of metal powder sintered materials, Korean Agency for Technology and

Standards, 3th Ed., Korea.

KS L ISO 18754 (2013). Fine ceramics(advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of density and apparent porosity, 4th Ed., Korea.

KS L 5110 (2021). Test method of density of hydraulic cement, Korean Agency for Technology and Standards, 4th Ed., Korea.

KS M ISO 21687 (2007). Carbonaceous materials used in the production of aluminium – Determination of density by gas pycnometry(volumetric) using helium as the analysis gas – Solid materials, Korean Agency for Technology and Standards, 2nd Ed., Korea.

Lee, J.E., Lee, J.K. (1998). Physical, morphological, and chemical analysis of fly ash generated from the coal fired power plant, *Journal of Energy Engineering*, **7(1)**, 146-156 [in Korean].

Lim, K.W. (2014). Volume variation of liquid fuel by seasonal, regional temperature changes, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, **38(2)**, 155-163 [in Korean].

Mo, E.K., Lee, S.J., Son, J.W., Kim, D.G., Park, M.J., Lee, M.G., Hyun, I.G., Jung, K.S., Nam, E.S. (2000). Four cases of kerosene pneumonitis, *The Korean Journal of Medicine*, **59(2)**, 235-240.

de Terris, T., Andreau, O., Peyre, P., Adamski, F., Koutiri, I., Gorny, C., Dupuy, C. (2019). Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of selective laser melted metallic parts, *Additive Manufacturing*, **28**, 802-813.

Webb, P.A. (2001). Volume and density determinations for particle technologists, Micromeritics Instrument Corporation.

시멘트 및 혼화재의 품질관리를 위한 밀도 시험방법 비교 연구

본 연구에서는 시멘트, 고로슬래그 미분말 및 플라이 애시의 효율적인 밀도 관리를 위해 KS L 5110과 가스 피크노미터 및 전자 밀도계에 의한 밀도 값을 비교하였다. 시험방법에 따른 상관관계 및 사용성을 검토하였으며, 이를 바탕으로 대체 시험방법에 대한 활용 가능성을 분석하였다. 시험방법에 따른 밀도 시험결과 시멘트, 고로 슬래그 미분말 및 플라이 애시 모두 가스 피크노미터, KS L 5110 및 전자 밀도계 순으로 밀도 값이 낮아지는 경향을 나타냈으며, 이는 시험방법에 따라 시료의 부피를 평가하는 범위의 차이에 따른 것으로 분석된다. 시험방법에 따른 상관관계는 결정계수 R^2 값이 0.71~0.93 범위로 비교적 양호한 상관성을 나타냈으며, 상관식을 통해 오차에 대한 보정을 적용하면 대체 시험방법의 활용이 가능할 것으로 분석된다. 시험 절차, 측정시간 및 변동계수를 고려한 사용성 검토 결과 가스 피크노미터는 시험 절차가 가장 간단하며, 신뢰성도 양호하였다. 또한, 숙련도가 크게 필요하지 않기 때문에 시험자 간의 재현성도 상대적으로 높을 것으로 예상된다.