



## CKD 혼합에 따른 Recycled Material의 회복탄성계수와 일축압축강도 특성

### Characteristic of Resilient Modulus and Unconfined Compressive Strength for Recycled Materials blend with Cement Kiln Dust

손영환<sup>\*,†</sup>

Son, Young Hwan<sup>\*,†</sup>

#### ABSTRACT

This study was conducted to determine the resilient modulus ( $M_r$ ) and the unconfined compressive strength (UCS) of two recycled roadway materials such as recycled pavement material (RPM) and road surface gravel (RSG) with or without cement kiln dust (CKD). The recycled materials were blended with two CKD contents (5, 10 %) and 28 day curing time.  $M_r$  and UCS tests were also conducted after 10cycles of freezing and thawing to assess the impact of freeze-thaw cycling.  $M_r$  was determined conducting by the laboratory test method described by NCHRP 1-28A. Stabilized RPM and RSG had a modulus and a strength higher than unstabilized RPM and RSG.  $M_r$  and UCS of RPM and RSG mixed with CKD increased with increasing CKD content. The results indicated that the addition of CKD could be improved the strength and the stiffness of RPM and RSG. Therefore, RPM, RSG and CKD could be used as an effective materials in the reconstruction of roads.

**Keywords:** Recycled pavement material; recycled surface gravel; cement kiln dust; resilient modulus; unconfined compressive strength; freeze-thaw

#### 1. 서 론

경제의 급속한 발전과 이로 인한 건설 분야의 성장은 천연자원의 이용량을 증가시키는 결과를 가져왔다. 특히, 각종 구조물이나 도로의 시공에 사용되는 골재와 같은 천연자원의 수요를 충족시키기 위해서는 자연환경의 훼손은 불가피한 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 국내에서도 여러 연구자들이 관련 연구를 수행한 바 있다. 재생골재와 산업부산물을 이용하여 콘크리트의 재료나 건설재료를 개발한 바 있으며 (Sung and Ryu, 2004; Sung and Back, 2005), 재생골재를 이용한 고강도 콘크리트의 동결융해 특성을 연구한 바 있다 (Sung et al., 2003). 또한, 폐비닐, 석탄폐석, 폐활성탄 등을 혼합하여 새로운 콘크리트의 개발, 도로포장 재료 및 골재의 대체 재료로 재활용하기 위한 연구를 수행한 바 있다 (Kim et al., 2001; Kim et al., 2002; Kang and Sung, 2009; Youn et al., 2009).

한편, 수명이 다한 도로나 전면적인 보수가 필요한 도로에서 발생하는 폐기물의 양은 증가하는 추세에 있다. 일부분의 폐기물은 재활용 되고 있으나 수거와 분리, 재활용을 위한 시스템이 명확하게 정립되지 않아 양질의 폐기물들이 단순 매립 등으로 사장되고 있다.

본 연구에서는 전면보수가 필요한 도로 혹은 완전히 새로운 포장에 필요한 현장의 기존도로에서 발생하는 RPM (Recycled Pavement Material)과 RSG (Recycled Surface Gravel) 그리고 포틀랜드 시멘트 제조시 발생하는 산업부산물인 CKD (Cement Kiln Dust)를 이용하여 이들의 재사용 가능성을 확인해 보았다.

RPM은 폐기되는 아스팔트 도로에서 발생하는 아스팔트 포장과 기층재료의 혼합물이며, 도로시공시 기층재료 재활용된 사례가 있다 (Wen et al., 2004; Li et al., 2008; Hatipoglu et al., 2008). RSG는 비포장 자갈도로의 표층에서 발생하는 재료이며, RPM과 마찬가지로 새로운 도로의 포장시공에서 기층재료로 재활용된 바 있다 (Hatipoglu et al., 2008).

일반적으로 시멘트는 도로시공에서 안정처리를 위하여 많이 사용되어 왔으며, 강도와 내구성 증진에 많이 기여하는 것으로 확인된 바 있다 (Halsted et al., 2006; Guthrie et al., 2007; Mallick et al., 2002). 한편, CKD는 시멘트 제조시 발생하는

\* 위스콘신주립대학교 토목·환경공학과 연구원

† Corresponding author. Tel.: +1-608-265-4454

Fax: +1-608-890-1174

E-mail address: yson3@wisc.edu

2010년 1월 28일 투고

2010년 2월 4일 심사완료

2010년 2월 19일 게재확정

산업부산물이며, 이러한 이유로 매립이 되어졌다 (Todres et al., 1992). 그러나 CKD는 흙과 혼합시 포졸란 반응에 의해 강도 (strength)와 강성 (stiffness)이 개선되는 것으로 연구된 바 있다 (Bhatty et al., 1996; Baghdadi et al., 1995). 국내에서도 이와 관련한 연구가 수행된 바 있는데 Kim et al. (2004)은 CKD는 압축강도의 증진에 기여하며 적산온도에 의한 해석모델로 이를 해석하였다. 또한, CKD를 콘크리트, 아스팔트콘크리트와 혼합하여 물리적 특성과 거동특성에 대한 연구를 실시하여 산업부산물인 CKD를 활용하고자 하는 연구가 수행된 바 있다 (Cha, 2005; Namkoong, 2007).

본 연구에 사용된 RPM, RSG와 같은 재료는 FDR (Full Depth Reclamation)을 적용하여 재활용할 수 있다. FDR을 이용한 도로재료의 재활용은 경제적일뿐만 아니라 매우 친환경적이라고 할 수 있다. 이 방법을 적용하게 되면 일반적으로 사용되는 방법-제거 후 다시 시공하는 방법-에 비하여 25 %에서 50 %까지 비용을 절감할 수 있다고 하였다 (Luhr, 2004). 또한, 천연자원의 보존과 시공에 따른 시간절약, 에너지 보존과 매립 등을 감소하는데 기여할 수 있다고 하였다 (Kearney and Huffman, 1999; Wen and Edil, 2009).

이에 본 연구에서는 천연자원과 자연환경의 손실을 최소화하고 현장에서 발생하는 폐기물 또는 재활용률이 낮은 RPM과 RSG를 기본 재료로 하고, 이들 재료의 강도와 강성을 개선하기 위하여 산업부산물인 CKD를 이용하여 현장에서의 재활용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 CKD 혼합에 따른 RPM과 RSG의 회복탄성계수 (Resilient modulus) 시험과 일축압축강도 (Unconfined compressive strength) 시험을 실시하였으며, 동결·융해 (Freezing-thawing) 시험을 실시하여 이에 대한 영향도 확인하였다.

## II. 회복탄성계수 (Resilient Modulus)

도로와 같은 포장구조물의 역학적 거동특성은 하부구조 재료의 탄성계수로 평가한다. 이중 차량하중의 반복재하로 인해 발생하는 재료의 응력-변형 상태를 반영한 회복탄성계수는 재료의 특성을 합리적으로 반영하는 물성치로 평가되고 있다. 반복하중을 받는 재료는 변형률 경화를 통해 재료가 안정화되며, 반복재하횟수가 증가하면 회복변형률의 성분이 지배하게 된다. 이때의 응력-변형률 곡선의 기울기가 회복탄성계수이다. 회복탄성계수 (Mr)는 반복하중이 주어질 때 탄성계수와 회복변형률로 정의되며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_d$ : 축차응력,  $\epsilon_r$ : 회복변형

본 연구에서는 반복재하식 Mr 시험을 실시하였으며, 포장체에 유발되는 응력상태를 모사하여 0.1초간의 하중재하와 0.9초간의 휴지시간을 갖는 일정한 주기의 축차응력을 재하하여 변형률 응답을 얻었다.

포장재료의 회복탄성계수는 축차응력, 구속응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하게 된다. 즉, 노상토와 보조기층재료는 응력의 영향에 따라 적합한 모델을 적용하게 된다. 그러므로 연구자들은 응력과 재료적 요인 등을 고려한 여러 가지 모델을 제시하고 있다 (Uzan, 1985; May and Witczak, 1981; Kweon et al., 1999).

일반적으로 보조기층이나 기층재료는 체적응력이 증가할수록 회복탄성계수는 증가한다. 식 (2)의 모델은 Biarez (1962)가 제안한 체적응력모델이며, 이 모델은 국내에서도 적용성을 검증 받은 바 있다 (Kweon, 1999). 그러므로 본 연구에서도 식 (2)의 모델을 적용하여 회복탄성계수를 구하였다. 이때 계수  $k_1$ ,  $k_2$ 는 실험으로 결정된다.

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2)$$

여기서,  $\theta$ : 체적응력 (bulk stress),  $k_1$ ,  $k_2$ : 계수

## III. 재료 및 실험방법

### 1. 재료

본 연구에 사용한 RPM, RSG의 물리적 특성은 Table 1과 같으며, 사용재료의 입도분포시험 결과는 Fig. 1과 같다.

CKD의 화학적 특성분석 결과는 Table 2에 정리하였다. 결과에서와 같이  $\text{CaCO}_3$ 의 함유량은 54.1 %로 상당히 높아 일반적인 석회석 분말의 경향과 유사함을 보이고 있어 CKD는 석회석 분말의 일종으로 판단할 수 있다. 한편, Namkoong (2007)은  $\text{SO}_3$  성분은 석회석분말이 시멘트의 원료로 투입되는 과정에서 생성되는 화학성분으로 판단하였으며, Cha (2005)는 점토성분에 기인하여  $\text{SiO}_2$ 가 존재한다고 하였다.

Table 1 Physical properties of Materials

| Sample | $G_s$ | $W_{opt}$ (%) | $\gamma_{dmax}$ ( $\text{kN/m}^3$ ) | % Gravel | % Sand | % Fines | USCS  | LL (%) | PL (%) |
|--------|-------|---------------|-------------------------------------|----------|--------|---------|-------|--------|--------|
| RPM    | 2.64  | 7.5           | 21.2                                | 46.0     | 43.0   | 10.6    | GW-GM | N.P.   | N.P.   |
| RSG    | 2.73  | 7.5           | 22.6                                | 28.6     | 59.0   | 12.4    | SC-SM | 21     | 14     |

$G_s$ : specific gravity,  $W_{opt}$ : optimum water content, LL: liquid limit, PL: plastic limit,  $\gamma_{dmax}$ : maximum dry unit weight, N.P.: non-plastic.

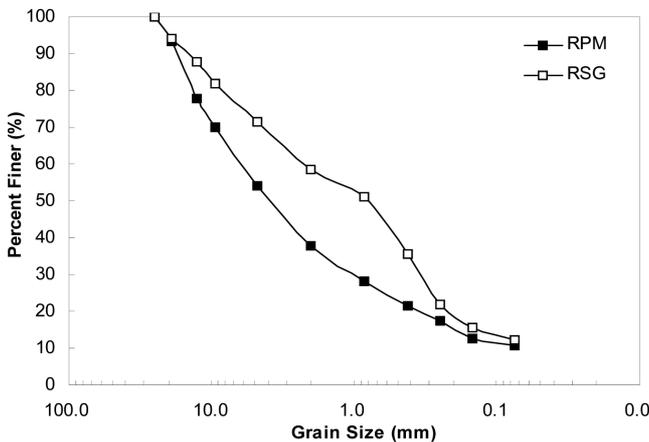


Fig. 1 Particle size distribution for RPM and RSG

Table 2 Chemical composition of CKD (unit: %)

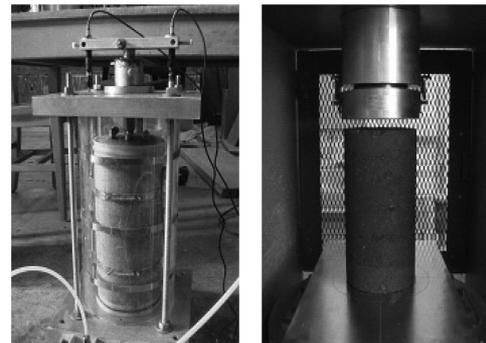
| CaCO <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SO <sub>3</sub> | Free CaO | LOI* | Total alkali** |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|----------|------|----------------|
| 54.1              | 12.0             | 4.4                            | 2.1                            | 1.7 | 12.5            | 13.9     | 10.7 | 2.33           |

LOI\*: loss on ignition, Total alkali\*\*: Na<sub>2</sub>O+0.658×K<sub>2</sub>O

## 2. 실험방법

RPM, RSG와 CKD의 혼합은 두 시료의 건조중량을 기준으로 5 %와 10 %를 각각 적용하였다. 모든 실험에 동일조건 및 동일성분의 시료가 적용되어야만 일관성 있는 결과를 얻을 수 있으므로 시료의 혼합은 매우 중요하다. 그러므로 시료의 혼합 시 시료전체가 동일한 색깔을 보일 때까지 철저히 혼합하였다. 혼합된 시료를 이용하여 ASTM D 1557-02의 Method C를 기준하여 다짐시험을 실시하였다. 이는 KS F 2312의 다짐 방법 D와 시험방법은 동일하며, 낙하고, 해머무게, 층당다짐횟수에서 약간의 차이-ASTM: 45.7 cm, 4.54 kg, 56회, KS F 2312: 45 cm, 4.5 kg, 55회-가 있다. 다짐시험에서 구해진 최대건조단위중량과 최적함수비는 Mr 시험에 사용된 시료의 성형에 적용되었다. 시료는 원통형의 모양을 가지며 규격은 지름 152 mm, 높이 305 mm이다. 성형 후 시료추출에 따른 교란의 영향을 최소화하기 위하여 분리가 가능한 몰드를 사용하였으며, 시료를 분리시킨 후 28일을 양생시켰다.

양생이 끝난 시료는 Cell (Fig. 2(a))에 설치한 후 시험을 실시하였으며, NCHRP 1-28A (NCHRP 2004)에 따라 반복재하식으로 실시하였다. 변형을 측정하기 위한 장치인 LVDT (linear variable differential transducers)는 0.005 mm의 정확도를 가지며, Cell의 외부와 내부에 각 2개씩 설치하여 내부와 외부에서 발생하는 변형을 동시에 측정하였다. 외부 LVDT는 Cell의 상부에 있는 top plate에 설치되었으며, 내부 LVDT는 cell 내부의 시료에 설치되었다. 시험에 적용된 하중은 MTS system



(a) Mr (b) UCS  
Fig. 2 Testing Equipments

(Model 244.12 servo-hydraulic machine)을 이용하여 주어졌다. 본 시험에 앞서 예비시험을 실시하였으며, 이때 1000 cycle의 반복하중이 주어진다. 예비시험에서 수직변형이 5 % 이상 발생하지 않으면, 본 시험의 단계로 진행된다. 각 하중단계에서의 회복탄성계수를 구하기 위하여 각 단계에서 실시되는 100번의 cycle 중에서 마지막 5번의 cycle에서 구해진 값을 평균하여 적용하였으며, 회복탄성계수는 체적응력이 208 kPa인 경우를 기준으로 하여 구하였다 (NCHRP 2004). 그리고 UCS 시험 (Fig. 2(b))은 ASTM D 5102에 따라 실시하였으며, 변형률은 분당 0.21 %가 적용되었다 (Acosta, 2002). 동결-융해 시험은 RPM, RSG와 CKD 10 %를 혼합한 경우에 대해서 실시하였다. 시료를 성형한 후 -19 °C의 냉동고에서 하루를 보관하고, 다음 날은 상온에서 하루를 보관하였으며, 이러한 과정을 1cycle로 하여 각 시료별로 10cycle을 적용하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 다짐시험

CKD를 혼합하지 않은 RPM, RSG와 두 시료의 건조중량을 기준으로 CKD 5 %, 10 %를 각각 혼합한 시료에 대하여 다짐시험을 실시하였으며, 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3과 같이 CKD의 혼합양이 증가할수록 건조단위중량은 감소하였다. RPM은 21.20 kN/m<sup>3</sup>에서 20.97 kN/m<sup>3</sup>로 감소하였으며, RSG는 22.60 kN/m<sup>3</sup>에서 20.93 kN/m<sup>3</sup>로 감소하였다. 그러므로 CKD 혼합에 따른 변화정도는 RSG가 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 최적함수비는 CKD가 5 % 혼합되면 혼합되지 않은 경우에 비해 감소하였다가, CKD가 10 % 혼합될 경우 다시 증가하는 경향을 보였다. 또한 증가율은 RSG에서 상대적으로 크게 나타났다. 즉, RSG는 CKD가 혼합에 따른 건조단위중량과 함수비의 변화가 RPM에 비해 상대적으로 큰 것으로 나

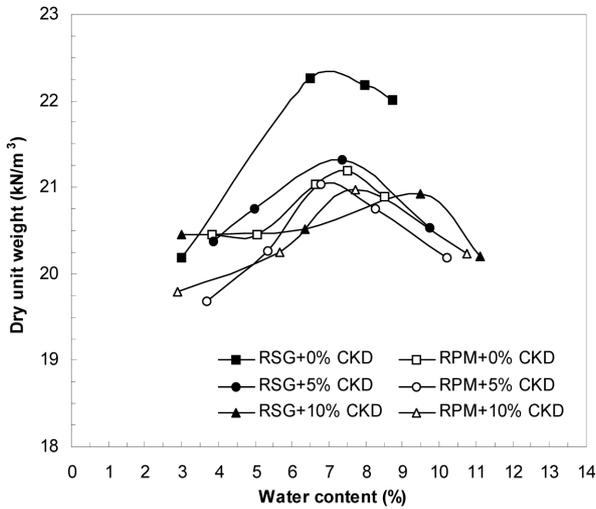


Fig. 3 Compaction curve for RPM and RSG

타났다. 또한, CKD가 혼합될 경우, 최적함수비의 습윤 측에서의 함수비 변화에 따른 건조단위중량의 감소정도도 RSG에서 크게 나타났다.

## 2. CKD 혼합량과 동결·융해에 따른 Mr 값과 UCS의 변화

CKD 혼합량에 따른 Mr 값과 UCS를 구하고, 재료별 변화특성을 확인하였다. Mr 시험의 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였으며, 구해진 계수와 각 시험에서의 결과 값은 Table 3과 같다.

Fig. 4와 같이 RPM과 RSG는 CKD의 혼합량이 증가할수록 Mr 값은 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 일반적으로 외부 (external) LVDT를 이용해서 구해진 Mr 값은 시료의 설치와 성형에 많은 영향을 받게 된다. 즉, 시료를 cell에 설치할 때 상부와 하부면에 발생하는 교란의 영향과 성형시에 발생할 수 있는 시료의 상부와 하부면의 수평상태에 따라 많은 영향을 받게 되므로 내부 (internal) LVDT의 측정값에 비해 상대적으로 신뢰성이 떨어진다. 그러므로 이후 해석에는 내부 LVDT를 이용해서 측정된 값을 적용하였다. CKD를 5% 혼합하였을 경우에는 RPM의 Mr 값이 더 크게 나타났으나, 10%를 혼합하였을 경우는 RSG의 값이 더 크게 나타났다. 또한, 10% 혼합 시 두 재료에서 구해진 계수  $k_2$ 의 값은 0으로 나타났다. 이는 Mr 값이 체적응력 (bulk stress)에 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타냄을 의미한다. 특히, RSG의 경우에는 CKD를 5%만 혼합하여도 계수  $k_2$ 의 값은 0으로 나타났다. 이러한 경향으로 미루어 RSG와 CKD 혼합시료는 체적응력의 영향을 거의 받지 않는다고 볼 수 있다. 즉, 체적응력의 변화에 상관없이

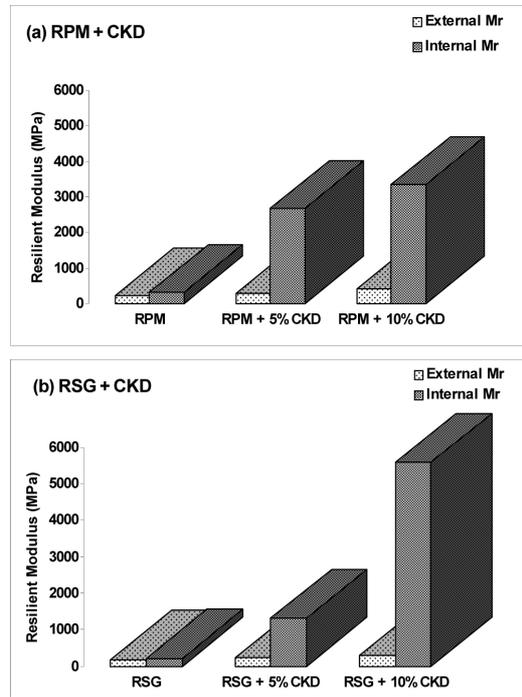


Fig. 4 External and Internal Resilient Modulus for RPM and RSG mixed with or without CKD

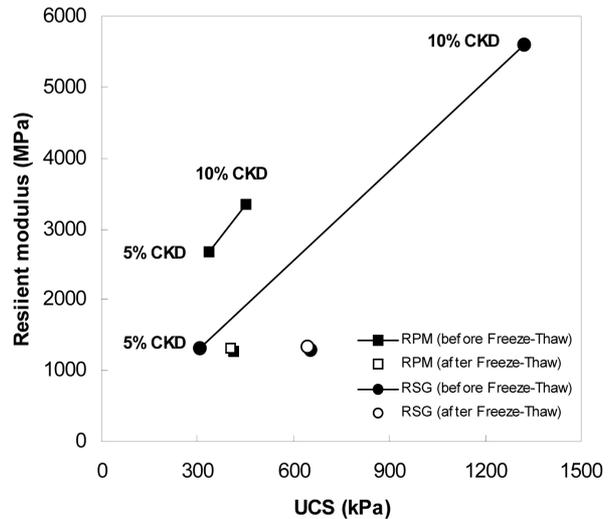


Fig. 5 Relationship between Mr and UCS for RPM and RSG mixed CKD with or without freeze-thaw cycling

일정한 회복탄성계수를 가진다.

UCS 시험에 의한 압축강도는 안정처리 물질이 첨가된 경우, 즉 CKD가 혼합된 경우에 대해서 실험을 실시하였으며, Fig. 5와 같이 RPM과 RSG의 압축강도는 CKD 혼합량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. CKD가 5% 혼합된 경우에는 RPM이 약간 큰 값을 보였으나 10%가 혼합된 경우에는 RSG가

**Table 3 Resilient modulus ( $M_r$ ), coefficients ( $k_1$ ,  $k_2$ ) and unconfined compressive strength ( $q_u$ ) for RPM & RSG mixed with or without CKD**

| Material | CKD Content (%) | External |       |             | Internal |       |             | $q_u$ (kPa) |
|----------|-----------------|----------|-------|-------------|----------|-------|-------------|-------------|
|          |                 | $k_1$    | $k_2$ | $M_r$ (MPa) | $k_1$    | $k_2$ | $M_r$ (MPa) |             |
| RPM      | 0               | 33.5     | 0.352 | 220.0       | 49.2     | 0.344 | 309.0       | -           |
|          | 5               | 14.5     | 0.480 | 287.9       | 150.0    | 0.540 | 2678.2      | 336         |
|          | 10              | 202.7    | 0.137 | 422.0       | 3350.0   | 0     | 3350.0      | 450         |
| RSG      | 0               | 23.0     | 0.384 | 179.0       | 17.0     | 0.473 | 212.0       | -           |
|          | 5               | 34.6     | 0.252 | 233.0       | 1311.0   | 0     | 1311.0      | 309         |
|          | 10              | 76.1     | 0.245 | 281.6       | 5591.0   | 0     | 5591.0      | 1324        |

상대적으로 큰 값을 보였으며, 증가율도 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 포장층 지반재료의 역학적 해석과 설계를 위해  $M_r$  값을 적용하고 있으나, 그 시험방법 등의 어려움과 시간을 절약하기 위하여 간접적인 방법으로 CBR을 이용하여  $M_r$  값을 추정하고자 하는 연구가 많이 시도되었다 (Green and Hall, 1975; Powell et al., 1984; Sukumaran et al., 2002). 또한, PCA (2008)에서는 시멘트 및 플라이애쉬를 혼합한 재료의 일축압축강도를 구하여 회복탄성계수를 추정할 수 있는 경험식을 제시하기도 하였다. 이에 본 연구에서도 UCS 시험에서 구한 일축압축강도 ( $q_u$ )를 이용하여 회복탄성계수 ( $M_r$ )를 추정할 수 있는 관계식을 다음 식 (3), 식 (4)와 같이 RPM과 RSG로 구분하여 제안하였다.

$$M_{r,RPM}(MPa)=7.6329 \cdot q_u \text{ (kPa)} \quad (3)$$

$$M_{r,RSG}(MPa)=4.2238 \cdot q_u \text{ (kPa)} \quad (4)$$

앞선 실험에 적용된 CKD 10 % 혼합시료에 대하여 동결·융해 (Freeze-Thaw) 시험을 실시하였다. 10번의 동결과 융해를 반복한 후  $M_r$ 과 UCS 시험을 실시하였다. 실험결과,  $M_r$ 과 UCS 값은 Fig. 5와 같이 동결·융해 과정을 겪지 않은 재료에 비해 감소하는 경향을 보였다. RPM의  $M_r$  값은 3350.0 MPa에서 1324.9 MPa로 감소하였고, RSG는 5591.0 MPa에서 1346.9 MPa로 감소하였다. 감소율은 RSG가 약 76 %로 60 %의 감소율을 보인 RPM보다 상대적으로 더 많이 감소하는 것으로 나타났다. 한편, RPM의 압축강도는 450 kPa에서 405 kPa로, RSG의 경우는 1324 kPa에서 646 kPa로 감소하였다. 압축강도에서도 RSG의 감소율이 약 51 %로 RPM의 10 % 감소율에 비해 상대적으로 더 많이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 10회의 동결·융해 과정을 반복하기 전에는 RSG의  $M_r$  값이 RPM보다 큰 경향을 보였으나, 동결·융해 과정 이후에는 큰 차이가

없었다. 그러나 압축강도의 경우는 동결·융해 과정 이후에도 RSG의 경우가 상대적으로 큰 값을 나타냈다. 결과적으로 실험에 적용된 혼합재료는 동결·융해의 영향을 받으며, 이로 인해 강도와 강성이 감소하는 것으로 확인되었다.

## V. 요약 및 결론

현장에서 발생하는 recycled material인 RPM과 RSG, 산업 부산물인 CKD를 이용하여 회복탄성계수 ( $M_r$ )와 압축강도 (UCS) 시험을 실시하였다. 시험결과로부터 이들 혼합재료의 사용가능성을 확인하고자 하였으며, 동결·융해가 재료의  $M_r$ 과 UCS에 미치는 영향을 검토하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. RPM, RSG에 CKD를 혼합할 경우  $M_r$ 과 UCS의 값은 증가하는 경향을 보였다. CKD 5 % 혼합시 RPM의  $M_r$  값은 2678.2 MPa, UCS는 336 kPa로 측정되어 RSG의 측정값에 비해 큰 값이 구해졌으나, CKD 10% 혼합시에는 RSG의  $M_r$  값이 5591.0 MPa, UCS는 1324 kPa로 더 크게 구해졌으며, 증가율도 상대적으로 크게 나타났다.

2. RSG와 CKD 혼합시료의  $M_r$  시험에서 계수  $k_2$  값이 0으로 구해져 체적응력의 변화에 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 또한, RPM도 CKD와 10 % 혼합할 경우 이와 동일한 경향을 보였다. 이는 CKD와 혼합된 시료는 체적응력의 영향을 받지 않고 일정한  $M_r$  값을 가짐을 의미한다.

3. 주어진 CKD 혼합범위 내에서 구해진 UCS 값을 이용하여  $M_r$  값을 추정할 수 있는 관계식을 재료별로  $M_{r,RPM}=7.6329 \cdot q_u$ ,  $M_{r,RSG}=4.2238 \cdot q_u$ 의 방정식으로 제안하였다. 그러나 이러한 관계식은 CKD의 혼합 정도, 재활용 재료의 종류 등에 따라 달라질 수 있으므로, 본 시험에 적용된 혼합범위를 벗어날 경우에는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

4. 동결·융해 과정을 10회 반복한 후의  $M_r$ 과 UCS의 값은 감소하였다. RPM은  $M_r$  값이 3350.0 MPa에서 1324.9 MPa로, RSG는 5591.0 MPa에서 1346.9 MPa로 감소하였다. 감소율은 RSG가 약 76 %로 60 %의 RPM보다 상대적으로 크게 나타났다. RPM의 UCS 값은 450 kPa에서 405 kPa로, RSG는 1324 kPa에서 646 kPa로 감소하였다. UCS의 경우에서도 RSG의 감소율이 약 51 %로 RPM의 10 % 감소율에 비해 상대적으로 더 크게 나타났다. 즉, 혼합재료는 동결·융해의 영향을 받으며, RSG가 동결·융해의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단할 수 있다.

5. RPM, RSG에 CKD를 혼합할 경우 발생하는  $M_r$ 과 UCS 값의 증가는 강도와 강성의 증가를 의미하며, 이를 근거로 재활용의 가능성을 확인할 수 있었다.

## REFERENCES

1. Acosta, H. A., 2002. Stabilization of soft subgrade soils using fly ash. MS Thesis, University of Wisconsin-Madison.
2. Baghdadi, Z. A., M. N. Fatani, and N. A. Sabban, 1995. Soil Modification by Cement Kiln Dust. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 7(4): 218-222.
3. Bhatta, J. I., S. Bhattacharja, and H. A. Todres, 1996. *Use of Cement Kiln Dust in Stabilizing Clays*. RP343, Portland Cement Association, Skokie, IL.
4. Biarez, J., 1962. Contribution a l'Etude des Proprieties Mecaniques des Sols et des materiaux Pulverulents. D.Sc. Thesis, University of Grenoble.
5. Cha, C. S., 2005. A study on the Physical Properties of Concrete Using Cement Kiln Dust. Ph. D. diss., Cheongju University (in Korean).
6. Green, J. L., and J. W. Hall, 1975. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume1: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure. Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1: 214.
7. Guthrie, S., A. Brown, and D. Eggett, 2007. Cement Stabilization of Aggregate Base Material Blended with Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of the Transportation Research Board* 2026: 47-53.
8. Halsted, G., D. Luhr, and W. Adaska, 2006. *Guide to Cement-Treated Base (CTB)*. Publication EB236, Portland Cement Association, Skokie, IL.
9. Hatipogle, B., T. Edil, and C. Benson, 2008. Evaluation of Base Prepared from Road Surface Gravel Stabilized with Fly Ash. *Geocongress 2008 ASCE Geotechnical Special Publication*, New Orleans, LA, 177: 288-295.
10. Huang, Y., 2004. *Pavement Analysis and Design, 2nd Ed.* Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
11. Kang, H. S., and C. Y. Sung, 2009. Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Waste Activated Carbon. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 21-26 (in Korean).
12. Kearney, E. J., and J. E. Huffman, 1999. Full-Depth Reclamation Process. *Journal of the Transportation Research Board* 1684: 203-209.
13. Kim, K. W., Y. S. Doh, and X. F. Li, 2001. Evaluation for Characteristics of Coal-mine Waste Concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(2): 132-139 (in Korean).
14. Kim, K. W., J. I. Kim, S. J. Lee, and S. J. Kim, 2002. Experimental Study for Determination of Optimum Waste Vinyl Contents in Asphalt Concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 88-95 (in Korean).
15. Kim, S. S., C. S. Cha, and E. H. Joo, 2004. Estimation of the Strength Development of Cement Incorporating Cement Kiln Dust (CKD). *Journal of Ind. Sci.*, 22(1): 155-160.
16. Kweon, G. C., 1999. Alternative Mr testing methods for subgrade and subbase materials considering deformational characteristics of soils. Ph.D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean).
17. Kweon, G., D. Kim, and M. Song, 1999. Stiffness Characteristics of Subgrade and Subbase Materials in Korea. *Korean Society of Civil Engineers, Proceeding* 133-136 (in Korean).
18. Li, L., C. H. Benson, T. B. Edil, and B. Hatipoglu, 2008. Sustainable Construction Case History: Fly Ash Stabilization of Recycled Asphalt Pavement Material. *Geotechnical and Geological Engineering* 26(2): 177-188.
19. Luhr, D., 2004. Recycling Roads Saves Money and Natural Resources, *Public Works* 136(5): 115-117.
20. Mallick, R. B., M. R. Teto, P. S. Kandhal, E. R. Brown, R. L. Bradbury, and E. F. Kearney, 2002. Laboratory Study of Full-Depth Reclamation Mixes. *Journal of the Transportation Research Board* 1813: 103-110.
21. May, R. W., and M. W. Witczak, 1981. Effective Granular Modulus to Model Pavement Responses, Layered Pavement Systems. *Transportation Research Board* 810: 1-9.
22. Namkoong, Y., 2007. A study on Performance Characteristics of Asphalt Concrete by Using Cement Kiln Dust as Filler. Ph. D. diss., Dankook University (in Korean).

23. NCHRP, 2004. *Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. National Cooperative Highway Research Program Research Results Digest 285: 1-48.
24. PCA, 2008. *Thickness Design System for Pavements Containing Soil-Cement Bases*. The Portland Cement Association: 33-37.
25. Powell, W. D., J. F. Potter, H. C. Mayhew, and M. E. Nunn, 1984. The Structural Design of Bituminous Roads. Transport and Road Research Lab., TRRL Laboratory Report 1132, Department of Transport, Berkshire, United Kingdom.
26. Sukumaran, B., V. Kyatham, A. Shah, and D. Sheth, 2002. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus. *Proceeding of Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*.
27. Sung, C. Y., J. N. Youn, Y. I. Kim, S. H. Im, and D. H. Jung, 2003. Freezing and Thawing Properties of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate. *Journal of Agri. Sci.* 30(2): 154-163 (in Korean).
28. Sung, C. Y., and N. H. Ryu, 2004. Characteristics of Recycled Concrete Using Recycled Coarse Aggregate and Industrial by-Products. *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites* 9: 125-132 (in Korean).
29. Sung, C. Y., and S. C. Back, 2005. Physical and Mechanical Properties of Polymer Concrete Using Recycled Aggregate. *Journal of Agri. Sci.* 32(1): 19-27 (in Korean).
30. Todres, H. A., A. Mishulovich, and J. Ahmad, 1992. *Cement Kiln Dust Management: Permeability*. Research and Development Bulletin RD103t, Portland Cement Association, Skokie, IL.
31. Uzan, J., 1985. Characterization of Granular Material, Analysis and Testing of Granular Base and Subbase. *Transportation Research Record* 1022: 1-9.
32. Wen, H., and T. B. Edil, 2009. Sustainable Reconstruction of Highways with In-Situ Reclamation of Materials Stabilized for Heavier Loads. BCR2A 09, *Proceeding of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Champaign, IL.
33. Wen, H., M. Tharaniyil, B. Ramme, and U. Krebs, 2004. Field Performance Evaluation of Class C Fly Ash in Full-Depth Reclamation: Case History Study. *Journal of the Transportation Research Board* 1869: 41-46.
34. Youn, J. N., C. Y. Sung, and Y. I. Kim, 2009. Physical and Mechanical Properties of Porous Concrete Using Waste Activated Carbon. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 21-27 (in Korean).