

재생골재를 함유한 콘크리트의 열팽창계수 측정

Measurement for Coefficient of Thermal Expansion of Concretes Made with Recycled Concrete Aggregates

양 성 철	Yang, Sung Chul	정회원 · 홍익대학교 건축공학부 교수 · 교신저자 (E-mail : scyang@hongik.ac.kr)
이 활 응	Lee, Hwal Ung	정회원 · 홍익대학교 건축공학부 석사과정 (E-mail : histstructure@naver.com)
김 남 호	Kim, Namho	정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학부 교수 (E-mail : nhkim@kut.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study was performed to determine a systematic approach for measuring the coefficient of thermal expansion (COTE) of concrete specimens. This approach includes the initial calibration of measurement equipment. Test variables include coarse aggregate types such as natural aggregate, job-site produced recycled concrete aggregate, and recycled aggregate processed from an intermediate waste treatment company.

METHODS : First, two cylindrical SUS-304 specimens with a known COTE value of $17.3 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$, were used as reference specimens for the calibration of each measurement system. The well-known AASHTO TP-60 COTE apparatus for concrete measurement was utilized in this study. Four different measurement apparatuses were used with each LVDT installed and a calibration value was determined using each measurement apparatus.

RESULTS : In the initial experimental stage, calibration values for each measurement apparatus were assumed to be almost identical. However, using the SUS-304 samples as a reference, the calibration values for the four different measurement apparatuses were found to range from 3.49 to $8.86 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$. Using different adjusted values for each measurement apparatuses, COTE values for the three different concrete specimens were obtained. The COTE value of concrete made with natural coarse aggregate was $9.91 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$, that of job-site produced recycled coarse aggregate was $10.45 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$, and that of recycled aggregate processed from the intermediate waste treatment company was $10.82 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$.

CONCLUSIONS : We observed that the COTE value of concrete made from recycled concrete aggregates (RCA) was higher than that of concrete made from natural coarse aggregate. This difference is due to the fact that the total volumetric mortar proportion in the RCA mix is higher than that in the concrete mix made with natural coarse aggregate.

Keywords

coefficient of thermal expansion, natural aggregates, recycled concrete aggregates, SUS-304, calibration factor

Corresponding Author : Yang, Sung Chul, Professor
School of Architectural Engineering, Hongik University,
2639 Sejong-ro Jochiwon-eup, Sejong, 339-701, Korea
Tel : +82.44.860.2561 Fax : +82.44.865.2796
E-mail : scyang@hongik.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Aug. 1, 2014 Revised Aug. 4, 2014 Accepted Jan. 20, 2015

1. 서론

콘크리트 구조물에 발생하는 균열의 원인은 다양하지만, 그중에서도 습도나 온도에 의한 부피 변화의 차이로 인해 발생하는 불안정이 주 원인이다. 콘크리트포장에서

는 온도나 습도의 변화에 의한 컬링이 발생되기도 한다. 특히 콘크리트 덧씌우기포장 공사에서 재료의 열팽창계수가 다른 경우 기존 콘크리트 포장과 덧씌우기 재료 사이의 열적 불안정에 의해 인장균열, 스폴링 및 박리로 이

어지기도 한다(Kim et al., 2003; Park, 2013).

콘크리트의 열팽창계수는 사용하는 골재의 종류, 골재의 양, 콘크리트 배합, 재령, 온도 사이클, 습도조건 등에 따라 변화된다(Mindess et al., 2003; Byfors, 1980; Du and Lukefah, 2007). 시멘트 페이스트와 골재의 열팽창계수의 차이가 $5.5 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 이상인 경우 콘크리트의 동결융해 저항성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 시멘트 페이스트의 열팽창계수는 약 $11 \sim 20 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 정도로서 골재보다 큰 특징이 있으며, 골재의 열팽창계수가 증가하면 콘크리트의 열팽창계수도 증가하게 된다(Mindess et al., 2003; Kim et al., 2003).

특히 굵은골재의 양과 종류는 콘크리트의 열팽창계수를 크게 좌우한다. 더욱이 재생골재는 모암(Original Virtual Aggregate)의 종류뿐만 아니라 붙어있는 오래된 모르타르(Residual Mortar, RM)가 영향을 미치는 것으로 알려진다. 일반적으로 모르타르 또는 RM의 열팽창계수는 콘크리트에 비해 큰 것으로 알려진다(Mindess et al., 2003).

텍사스 주 도로국에서는 콘크리트의 열팽창계수의 상한을 시방에 명시하여 제한하고 있다. 이는 콘크리트 포장의 형식으로서 연속철근콘크리트(CRC)를 많이 채택하고 있으며 이러한 포장공법(CRCP)의 경우 콘크리트의 열팽창계수가 CRCP의 초기거동에 영향을 미치는 것으로 알려진다(McCullough and Dossey, 1999). 이는 텍사스주에서 일반적으로 사용되는 골재인 강자갈(Sandstone)의 열팽창계수가 석회암(Lime Stone)의 열팽창계수 보다 평균 30% 크기의 강자갈을 사용한 CRCP가 초기균열이 발생되기가 쉽다고 본다(Du and Lukefah, 2007).

한편 정부에서는 순환골재(재생골재)의 사용을 장려하는 차원에서 2013년 「건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률」에 의해 건설폐기물의 재활용에 관한 많은 법령, 지침 등이 마련되었다(국토교통부, 2013). 미국의 경우 현재 미네소타 주를 포함한 11개 주에서는 재생골재를 표층 골재로도 사용하고 있다(Carpenter and Gardner, 2007). 국내에서는 김진철 등이 폐콘크리트의 용도별 재활용 방안과 현장 적용성 연구의 일환으로 서울외곽순환도로 퇴계원 부근의 이면도로에 재생골재를 사용하여 기층에 적용한 실적이 있다(Kim et al., 2004).

일반적으로 재생골재를 사용하는 경우 강도특성, 탄성계수 및 건조수축이 영향을 미치는 것으로 여러 연구자들이 정리하고 있다. 재생골재를 사용한 콘크리트의 강

도특성은 시멘트 및 혼화제의 특성을 활용하면 강도가 조절되는 것으로 보고되고 있다. 반면 탄성계수나 건조수축은 전반적으로 천연골재를 사용한 콘크리트의 값에 비해 떨어지는 것으로 나타난다. 이러한 특성을 반영하여 최근에 EVM(Equivalent Volumetric Method)이란 새로운 배합방법이 제시되었으며 이 방법에 의한 콘크리트의 탄성계수나 건조수축이 기존에 비해 향상되는 것으로 나타나 재생골재를 사용한 콘크리트의 사용이 실용화 될 것으로 기대된다(Abbas, 2007; Fathifazl, 2008; Abbas et al., 2008; Fathifazl et al., 2009).

기존 연구에서는 재생골재의 열팽창계수를 측정하는 연구가 많지 않다. 이는 재생골재를 사용하는 콘크리트에 대해 강도특성이 기존 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 열등하기 때문에 열팽창계수에 대한 연구가 미진한 것으로 이해된다. 따라서 본 연구에서는 재생골재를 함유한 콘크리트의 열팽창계수를 비교적 정확히 산정하는 방법에 초점을 맞추었다.

2. 열팽창계수 측정 연구동향과 논문의 목적 및 방법

골재종류가 콘크리트의 열팽창계수에 미치는 영향에 대한 연구로서 재생골재를 포함하여 화강암 등 국내 대표적인 6가지 골재를 사용한 콘크리트에 대한 열팽창계수를 스트레인게이지 및 전기저항식 트랜스듀서 및 LVDT를 이용한 총 3가지 다른 방법을 사용하여 연구한 바 있다(Kim et al., 2003). 굵은골재의 종류에 따라서 콘크리트의 열팽창계수가 $9.2 \times 11.6 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 사이의 값으로 보고했다. 여기서 재생골재를 사용한 콘크리트의 열팽창계수가 가장 큰 값으로 나타났다. 또한 콘크리트의 시편을 박편과 원주형 공시체를 사용하여 시편형상이나 측정방법에 따라 열팽창계수의 값이 변하는 것으로 보고했다. 아울러 게이지 종류 등 측정방법에 따라서 열팽창계수가 다르게 나타났다.

Nam 등은 콘크리트의 열팽창계수를 전기저항식 변형률 게이지를 사용하여 게이지 상수 등을 보정하는 이론적 근거를 제시하였으며 이를 활용하는 방법을 제시하였다(Nam et al., 2013). 먼저 값을 알고 있는 일반 강재의 열팽창계수를 제시된 방법에 의해 구하여 산정한 값이 적절함을 보여준 후, 콘크리트의 열팽창계수의 값을 보정하여 구하였지만 일반적으로 알려진 값에 비해 다소 크게 계산되었다.

Choi 등은 현장 재활용 골재(모암이 SRG)를 사용한

시험시공용 콘크리트 포장의 품질시험 결과를 발표하였다(Choi and Moon, 2009). 재생골재를 100% 사용한 콘크리트 시편의 열팽창계수가 $8.5\sim 9.5 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 의 값을 가지며 천연골재를 사용한 일반적인 콘크리트의 열팽창계수와 비슷한 값으로 보고했다.

본 논문에서는 ○○공항 현장의 노후화된 포장슬래브를 파쇄한 재생 굵은골재와 중간처리업체에서 생산된 재생골재 및 천연골재를 각각 100% 사용한 콘크리트 시편에 대한 열팽창계수를 측정하였다. 본 연구에서는 상온에서 안정된 열팽창계수 값을 나타내는 SUS-304(열팽창계수 $17.3 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$)를 보정용으로 사용하여 측정용 프레임 장치 및 LVDT 전체 시스템의 보정계수를 산출하여 재생골재를 포함한 콘크리트의 열팽창계수를 구하였다.

콘크리트 포장 슬래브에 발생하는 응력은 차량하중 온도와 습도의 변화에 따른 건조수축, 열응력과 포장재 하부의 마찰력 등이 영향을 미친다. 강도 또한 콘크리트 혼합물의 다양한 영향인자에 의해 영향을 미치기에 단적으로 열팽창계수만 가지고 콘크리트용 골재로서 사용 가능한지에 대한 방향성을 판단하려면 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

3. 사용 재료 기초물성

3.1. 시멘트 및 잔골재

시멘트는 1종 보통 시멘트로 국내 S사에서 제공하는 비표면적 $3,310 \text{cm}^2/\text{g}$ 의 비중 3.15인 시멘트를 사용하였다. 잔골재는 자연사가 사용되었다.

3.2. 굵은골재

본 연구에서 사용된 굵은골재는 모두 최대치수 25mm 골재를 사용하였다. 굵은골재로서 화강암인 천연골재(Natural Aggregate)를 사용하였고 NA로 명명하였다. 다음은 ○○공항 포장에서 배출된 폐콘크리트를 골재중간처리업체를 통해 얻은 현장 재생골재(Air-field Recycled Aggregate)로서 AA로 명명하였다. 그리고 상기 업체에서 생산한 중간처리 재생골재(Plant Recycled Aggregate)로서 PA로 명명하였다. 잔골재와 굵은골재 모두 고속도로 전문시방서에서 요구되는 입도범위를 만족시켰다.

다음 Table 1은 굵은골재에 따른 비중, 흡수율에 대한 결과를 보여준다. 천연골재는 비중 2.64, 흡수율 0.77%인 골재를 사용하여 콘크리트 시편을 제작하여

실험하였다. 현장재생골재는 현장에서 직접 파쇄하여 생산하는 것을 모사한 것으로 비중 2.42, 흡수율 5.37%인 골재를 사용하였으며, 공장재생골재는 일반적으로 보급되는 방식인 중간처리업체를 통하여 생산한 골재로써 비중 2.37, 흡수율 5.39%인 골재를 사용하였다(Yang et al., 2012; Park, 2013). 천연골재에 비해 재생골재의 비중이 낮고 흡수율이 높은 이유는 표면에 이전의 모르타르 성분(Residual Mortar: RM)을 포함하고 있기 때문이다.

Table 1. Specific Gravity, Absorption Rate for Coarse Aggregate Types

Aggregate type	Specific gravity			Absorption rate(%)		
	#1	#2	Avg	#1	#2	Avg
NA	2.64	2.65	2.64	0.77	0.76	0.77
AA	2.40	2.43	2.42	5.13	5.60	5.37
PA	2.35	2.39	2.37	5.33	5.45	5.39

4. 시편의 준비 및 측정방법

4.1. 콘크리트 배합설계 및 압축강도 결과

용적배합설계를 기준으로 하였으며 최종배합은 Table 2와 같다. 전문시방서 기준인 슬럼프 40mm 이하, 공기량 4~7%을 만족시켰다. $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 공시체를 통한 콘크리트의 재령28일 압축강도는 NA시편은 37.4MPa, AA시편은 37.5MPa, PA시편은 32.7MPa로 측정되었다.

Table 2. Mix Proportions with Respect to Different Coarse Aggregates

Aggregate type	W/C (%)	Unit weight (kg/m^3)				AE (%)
		Water	Cement	Coarse agg.	Fine agg.	
NA	40	128	320	1157	736	0.005
AA	40	128	320	1056	736	0.003
PA	40	128	320	1038	736	0.003

4.2. 열팽창계수 측정용 콘크리트 공시체 준비

다음 Fig. 1과 같이 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 공시체를 제작하였으며, 열팽창계수 측정을 위해 동일한 크기로 콘크리트의 열팽창계수 보정을 위해 SUS-304 시편을 제작하여 사용하였다(Park et al., 2013).



(a) Concrete (b) SUS-304

Fig. 1 Specimens for Thermal Expansion

4.3. LVDT를 이용한 콘크리트 열팽창계수 측정 방법

본 실험에서는 미국 연방 도로국에서는 개발한 LVDT를 이용하여 콘크리트의 열팽창계수를 측정하는 방법인 AASHTO TP 60 시험방법을 이용하였다. 다음 Fig. 2와 같이 온도 변화에 거의 영향을 받지 않는 Invar 재료를 서포트 프레임에 사용하였으며 상단에 LVDT를 설치하여 이것을 데이터로거에 연결, 실시간으로 온도에 따른 시편의 길이 변화를 측정하였다 (AASHTO TP 60, 2000; Lee, 2003).

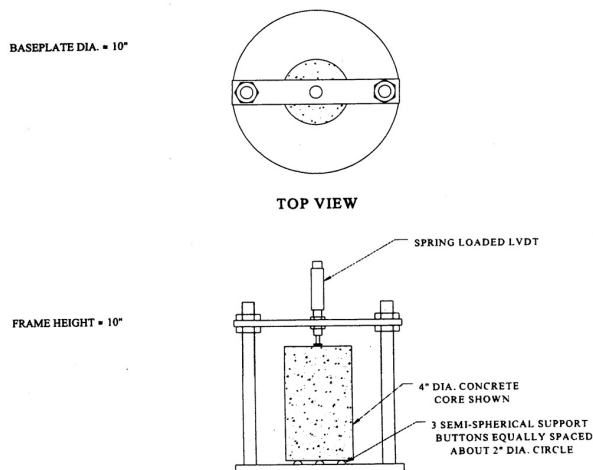


Fig. 2 Conceptual Configuration using LVDT for COTE

AASHTO TP 60-00 시험방법을 참조하여 다음 Fig. 3과 같이 10°C에서 실험을 시작한 후 온도를 2시간동안 20°C로 상승시킨 후에 20°C에서 2시간동안 유지시켰다. 같은 방법으로 30, 40, 50°C까지 매 10°C씩 증가시키고 50°C를 2시간 유지시킨 후 이를 한 실험단

계로 정한다. 다시 40, 30, 20, 10°C까지 매 10°C씩 하강시키고 이를 다음 실험단계로 한다. 이러한 과정을 반복하여 각 실험단계의 열팽창계수 차이가 $0.3 \mu\epsilon/\text{°C}$ 이 내가 될 때까지 측정하였다. 다음 Fig. 4는 열팽창계수 측정용 수조 내부에 설치된 측정장비에 부착된 시편을 보여준다. 측정장비 중간에 있는 콘크리트 시편은 시편 중앙에 열선이 설치되어 이를 통해 콘크리트의 온도를 측정한다(Lee, 2003; Park et al., 2013).

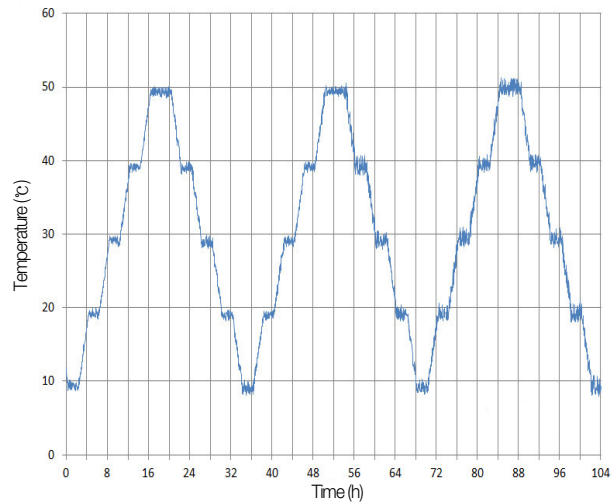


Fig. 3 Temperature Variations with Time



Fig. 4 Inside the COTE Water Bath

다음 Eq. (1)을 이용하여 각 골재의 열팽창계수를 보정하여 비교하였다.

$$\alpha_{true} = \alpha_{nom} \pm \alpha_{ref} \quad (1)$$

여기서,

α_{true} : 보정된 열팽창계수 ($\times 10^{-6} \text{m/m/°C}$)

α_{nom} : 측정된 열팽창계수 ($\times 10^{-6} \text{m/m/°C}$)

α_{ref} : 표준시편으로부터 산정한 열팽창계수 보정계수 ($\times 10^{-6} \text{m/m/°C}$)

5. 실험결과 및 분석

본 논문에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각 4개의 서로 다른 LVDT와 서포트 프레임을 사용하여 골재의 열팽창계수를 측정하고 보정하였다. 다음의 Fig. 5는 각 실험단계별로 나타나는 온도에 따른 변형률의 기울기의 한 예를 보여준다.

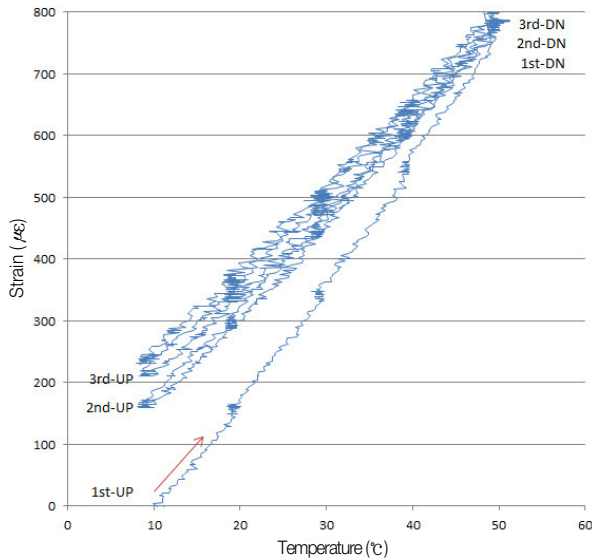


Fig. 5 Strain Variations of AA Concrete Specimen with Temperature Change

위의 Fig. 5를 보면 1st-UP의 기울기가 그 이후에 비해 현저히 크게 나타나는데 이는 실험초기에 실험기구가 자리를 잡아가는 Pre-Loading 과정에 해당하므로 이러한 과정을 실험결과에서 제외시키기 위해, AASHTO TP 60-00 방법에 따라 각 실험단계 별로 측정된 이전과 이후의 결과 값 차이가 $0.3\mu\epsilon/\text{C}$ 이하인 경우 두 값의 평균을 열팽창계수 값으로 정한다. 다음의 Table 3은 위의 실험방법을 적용한 결과를 보여준다.

5.1. 측정시스템의 보정계수 산정

먼저 Table 3에서 측정된 표준시편인 SUS-304의 열팽창계수 값을 길보기 값으로서 α_{nom} 로 명명하였다. 앞에서 소개된 Eq. (1)을 이용하여 A, B, C, D 4개의 서로 다른 측정시스템(Fig. 4 참조)의 보정계수로서 각각의 α_{ref} 를 구하였다. 다음 Fig. 6~9는 4개의 측정시스템 각각의 열팽창계수 보정계수와 평균값을 보여준다.

최초 실험 시 모든 LVDT 및 측정시스템의 보정계수가 동일할 것으로 예상했으나, 실험결과 4가지 시스템의 보정계수가 서로 다른 것으로 나타났다. 시스템 A는

5번의 반복실험으로 부터 $\alpha_{ref-A} = 6.00$ 이었고, 표준편차는 0.286, 시스템 B는 4번의 반복실험으로부터 $\alpha_{ref-B} = 5.64$, 표준편차는 0.758, 시스템 C는 6번의 반복 실험으로 부터 $\alpha_{ref-C} = 3.49$ 이었고, 표준편차는 0.408, 시스템 D는 4번의 반복실험으로부터 $\alpha_{ref-D} = 8.86$, 표준편차는 1.031로 나타났다. 각각의 측정시스템이 유사하게 제작되었으나 각각의 LVDT와 서포트 프레임간의 안착 정도에 따라 보정계수가 3.49~8.86까지 다르게 나타났다. Table 4에는 각 시스템의 보정계수에 대한 평균 및 표준편차 결과를 정리하였다.

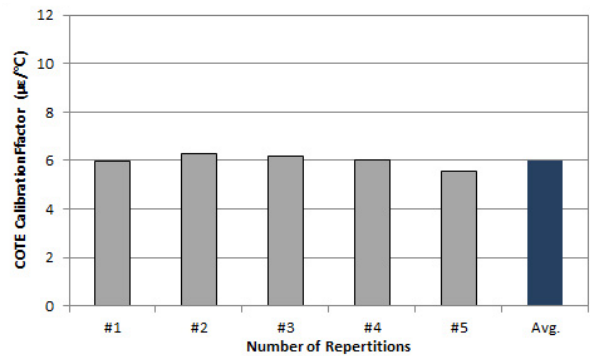


Fig. 6 Adjusted COTE Calibration Factor Measured with System A

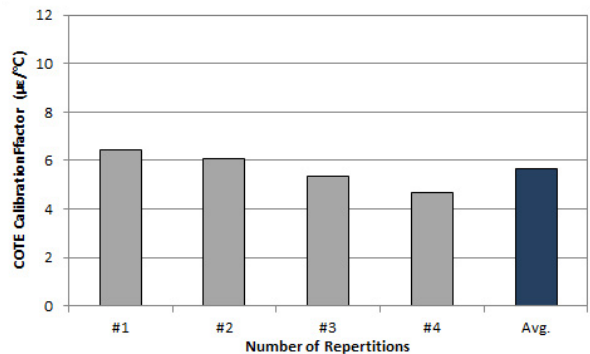


Fig. 7 Adjusted COTE Calibration Factor Measured with System B

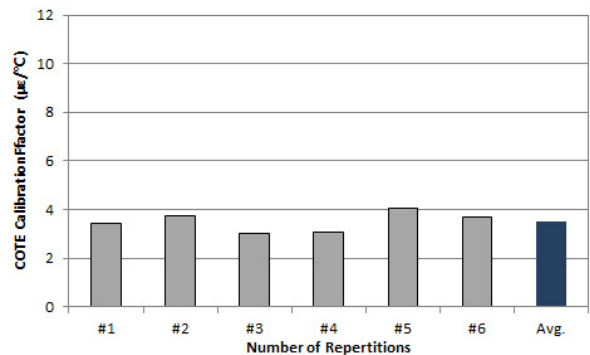


Fig. 8 Adjusted COTE Calibration Factor Measured with System C

Table 3. COTE Test Series and Their Nominal Values ($\times 10^{-6}$ mm/mm/ $^{\circ}$ C)

Experiment number		Cycles								Nominal values
		1st_UP	1st_DN	2nd_UP	2nd_DN	3rd_UP	3rd_DN	4th_UP	4th_DN	
Test 1	NA1-1-A ^{a)}	15.44	15.37							15.41
	NA2-1-B	15.58	15.66							15.62
	AA1-3-C	15.10	15.23							15.16
	PA1-ER-D	22.34	22.14	-	-	-	-	-	-	-c)
Test 2	NA1-2-A	14.89	16.13	15.72	15.92					15.82
	NA2-2-B	16.42	16.20							16.31
	AA2-ER-C	13.01	13.97	11.58	14.19	-	-	-	-	-b)
	PA2-ER-D	22.06	22.41	22.30						-c)
Test 3	AA1-1-A	16.13	16.85	16.24	16.04					16.14
	PA1-ER-B	15.00	16.27	15.63	15.32	-	-	-	-	-b)
	AA2-1-C	13.97	14.92	14.21	14.25					14.23
	PA2-ER-D	21.75	22.27	21.96	21.49	-	-	-	-	-b)
Test 4	NA1-3-A	15.25	15.38							15.32
	SUS1-1-B	24.86	23.59	23.86						23.72
	NA2-3-C	12.69	12.93							12.81
	SUS2-1-D	26.71	26.60							26.65
Test 5	SUS1-2-A	22.85	22.54	23.28	23.25					23.27
	AA1-2-B	15.21	16.14	16.02						16.08
	SUS2-2-C	20.76	20.66							20.71
	AA2-ER-D	19.59	19.12	19.82	20.40	-	-	-	-	-b)
Test 6	NA1-4-C	14.28	12.76	13.22	13.41					13.31
	SUS1-3-D	28.80	24.93	27.42	27.20					27.31
Test 7	SUS2-3-C	21.03	21.01							21.02
	NA2-4-D	19.57	19.88	19.79						19.83
Test 8	AA1-4-C	20.04	15.31	14.82	14.14	14.28				14.21
	SUS2-4-D	26.47	25.08	24.83						24.96
Test 9	SUS1-4-C	20.27	20.33							20.30
	AA2-2-D	18.80	18.51							18.66
Test 10	PA1-ER-C	12.85	12.70	-	-	-	-	-	-	-c)
	SUS1-5-D	25.74	25.72							25.73
Test 11	SUS2-5-C	20.63	19.94	20.33	20.37					20.35
	PA2-ER-D	18.71	18.15	18.36	-	-	-	-	-	-c)
Test 12	SUS1-6-C	23.52	22.17	21.76	21.37	21.30				21.33
	PA1-1-D	20.83	21.14	20.67	19.98	19.83				19.91
Test 13	PA2-ER-C	0.54	0.99	0.54	0.54	-	-	-	-	-c)
	AA2-3-D	21.18	19.35	19.92	19.64					19.78
Test 14	PA1-2-C	14.76	14.26	14.32						14.29
	AA2-4-D	16.56	18.33	17.82	18.21	17.90	18.20			18.05
Test 15	PA1-3-C	14.88	14.13	14.44	14.16					14.30
	PA2-2-D	19.59	20.42	20.57						20.50
Test 16	SUS1-7-C	21.55	20.77	21.11	20.92					21.01
	PA2-3-D	20.39	20.24							20.31
Test 17	PA2-4-C	12.00	13.36	13.26						13.31
	PA1-4-D	18.81	20.48	20.26						20.37
Test 18	PA2-1-C	11.01	13.59	12.89	13.34	12.84	13.30	12.82	13.10	12.96
Test 19	SUS1-12-A	11.34	24.63	22.67	25.73	24.68	-	-	-	-c)
	SUS2-9-B	14.03	13.68	14.85	15.6	16.56	-	-	-	-c)
Test 20	SUS1-8-A	20.49	23.64	23.55						23.60
	SUS2-10-B	450.02	443.35	4.32	2.69	2.84	-	-	-	-c)
Test 21	SUS1-9-A	23.62	23.34							23.48
	SUS2-11-B	3.01	2.51	369.81	370.07	485.02	-	-	-	-c)
Test 22	SUS1-10-A	22.90	23.48	23.18						23.33
	SUS2-12-B	455.84	56.98	-5.46	-0.08	26.98	-	-	-	-c)
Test 23	SUS1-11-A	23.79	22.99	22.71						22.85
	SUS2-6-B	24.26	-273.2	-269.07	23.13	23.85	23.07	23.45	23.29	23.37
Test 24	SUS2-7-B	22.63	22.72							22.68
Test 25	SUS2-8-B	21.93	22.08							22.01

a) NA1-1-A) First notation 'NA1' denotes specimen 1 made from natural aggregates, secondly '1' means number of repetitions, and thirdly 'A' denotes a measurement apparatus number

b) Data was excluded due to COTE difference over $0.3 \times m/mm/^{\circ}C$ at adjacent cycles

c) Data was excluded due to malfunction of the experiment facility

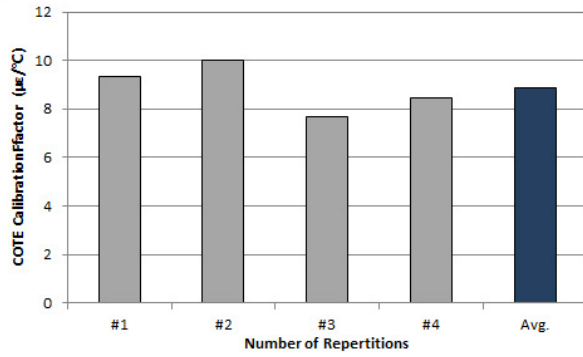


Fig. 9 Adjusted COTE Calibration Factor Measured with System D

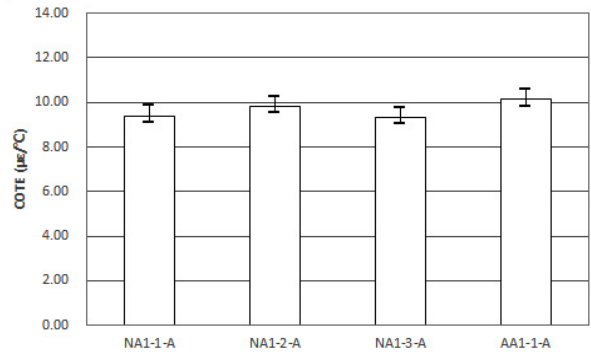


Fig. 10 Adjusted COTE Results Measured with System A

Table 4. Calibration Values for Each Measurement Apparatus and Statistics Results

System	Calibration No.	Values($\times 10^{-6}m/m/^{\circ}C$)		
		Calibration value	Average	Standard deviation
A	1	5.97	6.00	0.286
	2	6.30		
	3	6.18		
	4	6.03		
	5	5.55		
B	1	6.42	5.65	0.758
	2	6.07		
	3	5.38		
	4	4.71		
C	1	3.41	3.49	0.408
	2	3.72		
	3	3.00		
	4	3.05		
	5	4.03		
	6	3.71		
D	1	9.35	8.86	1.031
	2	10.01		
	3	7.66		
	4	8.43		

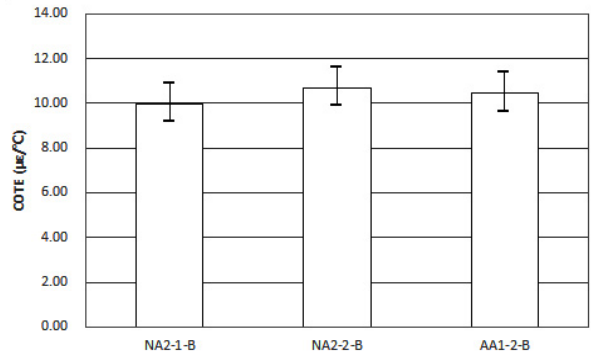


Fig. 11 Adjusted COTE Results Measured with System B

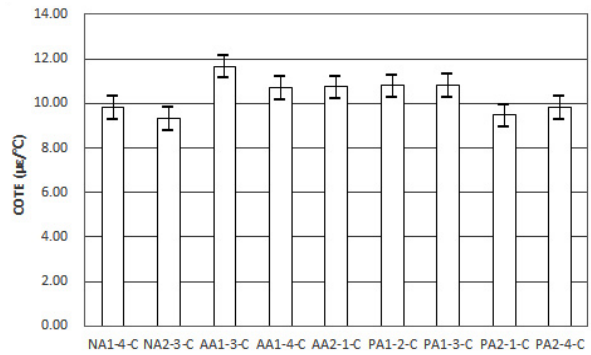


Fig. 12 Adjusted COTE Results Measured with System C

5.2. 보정된 콘크리트의 열팽창계수 산정

5.1절에서 산정된 각 측정시스템의 평균보정계수를 사용하여 Table 3으로 부터 세 종류의 굵은골재를 함유한 콘크리트 시편의 보정된 열팽창계수를 구하여 측정시스템별로 Fig. 10~13에 도식화하였다. 그림에서 각 막대그래프에 표기된 오차범위는 각 측정시스템의 보정계수의 오차범위를 감안한 것이다.

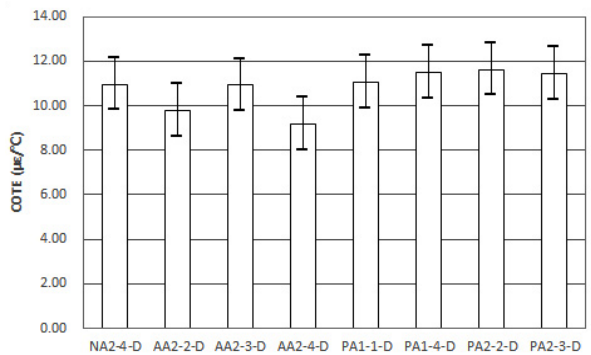


Fig. 13 Adjusted COTE Results Measured with System D

위의 실험결과를 Table 5에 정리하였다. 실험변수로는 3종류의 굵은골재가 사용된 콘크리트가 되며, 각 콘크리트 변수당 2개의 시편에 대해 서로 다른 측정시스템을 사용하여 4번 측정하여 얻은 결과이다.

Table 5. COTE Test Series and Their Final Adjusted COTE Values

Specimen	Test No.	COTE Values($\times 10^{-6}$ mm/mm/ $^{\circ}$ C)		
		Adjusted values	Average per specimen	Average per test variable
NA1	1-1-A	9.40	9.59	9.91
	1-2-A	9.82		
	1-3-A	9.31		
	1-4-C	9.83		
NA2	2-1-B	9.98	10.23	
	2-2-B	10.66		
	2-3-C	9.32		
	2-4-D	10.97		
AA1	1-1-A	10.13	10.74	
	1-2-B	10.44		
	1-3-C	11.68		
	1-4-C	10.72		
AA2	2-1-C	10.74	10.16	
	2-2-D	9.80		
	2-3-D	10.92		
	2-4-D	9.19		
PA1	1-1-D	11.04	11.04	10.82
	1-2-C	10.80		
	1-3-C	10.81		
	1-4-D	11.51		
PA2	2-1-C	9.47	10.60	
	2-2-D	11.64		
	2-3-D	11.45		
	2-4-C	9.82		

천연골재를 사용한 콘크리트(NA) 시편은 A 시스템에 대해 3번, B 시스템에 2번, C 시스템에 2번, D 시스템에 1번 측정하였다. NA 시편 1에 대해서는 9.59×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C, NA 시편 2에 대해서는 10.23×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C의 평균값을 얻어서 최종 NA 시편에 대한 열팽창계수는 9.91×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C가 된다.

현장재생골재를 사용한 콘크리트(AA) 시편은 A 시스템에 대해 1번, B 시스템에 1번, C 시스템에 3번, D 시스템에 3번 측정하였다. AA 시편 1에 대해서는 10.74×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C, NA 시편 2에 대해서는 10.16×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C의 평균값을 얻어서 최종 AA 시편에 대한 열팽창계

수는 10.45×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C가 된다.

공장재생골재를 사용한 콘크리트(PA) 시편은 A, B 시스템은 사용하지 못했으며, C 시스템에 4번, D 시스템에 4번 측정하였다. PA 시편 1에 대해서는 11.04×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C, PA 시편 2에 대해서는 10.60×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C의 평균값을 얻어서 최종 PA 시편에 대한 열팽창계수는 10.82×10^{-6} m/m/ $^{\circ}$ C가 된다.

NA시편과 AA 시편의 경우에는 모두 4개의 서로 다른 측정 시스템을 사용하여 보정한 결과이므로 최종 얻어진 NA 시편과 AA 시편의 열팽창계수 평균값을 비교하는 데에는 무리가 없을 것으로 예상된다. 비록 PA 시편의 경우 다른 기관에서 빌려서 사용했던 상황으로 인해 PA 시편의 경우 C, D 시스템만 이용하였으나, PA 시편 1이나 PA 시편 2는 각각 C, D 시스템을 2번씩 이용하여 얻은 결과이므로, C 시스템과 D 시스템 간에는 차이가 없는 것으로 보인다.

더욱이 콘크리트의 열팽창계수는 콘크리트에 사용된 성분에 따라 다음 식으로 쉽게 표현된다.

$$\alpha_{CONC} = \alpha_{NA} \times V_{NA} \pm \alpha_M \times V_M \quad (2)$$

여기서,

α_{CONC} : 콘크리트의 열팽창계수

α_{NA} : 굵은골재(여기서는 일반적으로 천연골재)의 열팽창계수

V_{NA} : 전체 콘크리트 용적 중에서 굵은골재가 차지하는 용적비

α_M : 콘크리트 배합내의 굵은골재를 제외한 모르타르의 열팽창계수

V_M : 전체 콘크리트 용적 중에서 모르타르가 차지하는 용적비, $1-V_{NA}$

일반적으로 α_{NA} 의 열팽창계수는 골재의 종류에 따라 다른 값을 가지며, α_M 의 값이 α_{NA} 의 값 보다 매우 큰 것으로 알려진다. 그리고 전체 콘크리트 용적 중에서 V_M 의 범위에 따라 콘크리트의 열팽창계수가 다르게 된다. 재생골재를 사용하는 콘크리트 배합의 경우에는 Table 2에서 알 수 있듯이 재생골재에 붙어있는 RM을 골재의 일부분으로 간주하여 배합에 필요한 모르타르 량을 천연골재를 함유한 콘크리트와 거의 동일하게 산정하게 된다. 그러나 실제로는 재생골재에 붙어있는 RM은 성분상 기존의 모르타르의 특성을 갖고 있다.

따라서 재생골재를 사용한 AA 시편이나 PA 시편의 경우에는 NA 시편보다 V_M 이 상대적으로 큰 값이 되기에 콘크리트의 열팽창계수 α_{CONC} 이 크게 나타난다. 여러 모양이 섞여있는 PA 재생골재가 한 현장에서 생산된 AA 재생골재에 비해 열팽창계수가 $0.37 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 크게 나타났지만 값의 차이는 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 콘크리트 시편에 비해 열팽창계수가 크며 상온에서 안정된 값을 주는 SUS-304(열팽창계수 $17.3 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$)를 보정시편으로 사용하여 측정용 프레임 장치 및 LVDT 전체 시스템의 보정계수를 산출하여 재생골재를 포함한 콘크리트의 열팽창계수를 구하였다. 변수로는 굵은골재로서 천연골재, 현장재생골재, 공장재생골재를 각각 100% 사용한 콘크리트의 열팽창계수를 측정하여 보정하는 실험을 하였다.

1. 각각의 측정시스템이 유사하게 제작되었으므로 모든 LVDT 및 측정시스템의 보정계수가 동일할 것으로 예상했으나, 실험결과 보정계수가 $3.49 \sim 8.86 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 까지 다르게 나타났다.
2. 각 측정시스템의 보정계수를 사용하여 콘크리트 시편의 보정된 열팽창계수를 구하여 적정한 범위의 콘크리트의 열팽창계수를 구하였다. 천연골재를 사용한 콘크리트는 $9.91 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$, 현장재생골재를 사용한 콘크리트는 $10.45 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$, 공장재생골재를 사용한 콘크리트는 $10.82 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 으로 나타났다.
3. 재생골재를 사용한 콘크리트의 열팽창계수가 높은 것은 재생골재에 붙어있는 기존의 모르타르(RM)을 고려한다면 전체 배합 중에 총 모르타르가 차지하는 용적률이 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 결과적으로 크기 때문이다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부와 국토교통과학기술진흥원의 국토해양기술 연구개발사업인 "저탄소 녹색공향 포장 시공 및 유지관리기법 개발"의 연구지원으로 중앙대학교 녹색공향포장 연구단 산하에서 수행되었으며, 아울러 2013학년도 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원을 받아 수행되었기 관계자분들께 감사드립니다.

BIBLIOGRAPHY

- AASHTO TP 60-00. (2000) Standard Test Method for the Concrete at Atmospheric Pressure, ACI, State-of-the-Art, Manual of Concrete Practice, Part 5.
- Abbas, A. (2007) Durability of Green Concrete as a Structural Materials, Ph.D Dissertation, Carleton University, Canada.
- Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B. and Foo, S. (2008) Proposed Method for Determining the Residual Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates, Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 1, pp. 1-12.
- Byfors, J. (1980) Plain Concrete at Early Ages, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden.
- Carpenter, A. and Gardner, K. (2007) Recycled Material Highway Construction Environmental Assessment: Life Cycle Based Risk Assessment of Recycled Materials in Roadway Construction, RMRC Project No. 43, Recycled materials Resource Center, University of New Hampshire.
- Choi, S. and Moon, W. (2009) Performance of Continuously reinforced Concrete Pavement Containing Recycled Concrete Aggregate, GeoHunan International Conference, pp.165-172.
- Cho, Y. et al. (2012) Development of Pavement Reconstruction Methodology for Sustainable Green Airport, Interim Research Report, Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning.
- Du, L. and Lukefah, E. (2007) Coefficient of Thermal Expansion of Concrete with Different Coarse Aggregates, Paper presented at the Annual Symposium of the International Center for Aggregates Research, Austin, Texas.
- Fathifazl, G. (2008) Structural Performance of Steel Reinforced Recycled Concrete Members, Ph.D Dissertation, Carleton University, Canada.
- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A.G., Isgor, O.B., Fournier, B. and Foo, S. (2009) New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 21, No. 10, pp.601-611.
- Kim, J., Shim, J. and Cho, K. (2004) The Site Application by using the Recycled Concrete Aggregate, Research Report ME-04-13, Korea Highway Corporation.
- Kim, J., Yang, S. and Kim, N. (2003) Influencing Factor on thermal Coefficient of Concrete due to Aggregate Type, Spring Conference of the Korean Concrete Institute, Vol.15, No.1, pp.249-254.
- Lee, H. (2003) A Study on the Material Property of Concrete according to Environment Loads, Masters Thesis, Hongik University.
- McCullough, B. F. and Dossey, T. (1999) Considerations for High-Performance Concrete Paving: Recommendations from 20 Years of Field Experience in Texas, Transportation Research Record, No. 1684, pp. 17-24.

Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. (2003) Concrete, 2nd Ed., Prentice Hall.

Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2013) MLTM 2013: Regulations on the Mandatory Use of Recycled Aggregates for Construction Projects.

Nam, J., An, D. and Kim, Y. (2013) Coefficient of Thermal Expansion Measurement of Concrete using Electrical Resistance Strain Gauge, Int. J. Highw. Eng., Vol.15, No.6,

pp.25-32.

Park, J., Lee, H., Yang, S., Kang, S. and Kim, I. (2013) Thermal Expansion Coefficient of Concrete Using Job-site Processed Recycled Aggregates,

Park, J. (2013) Mechanical Strength and Durability Tests on Concrete Mixes Using Recycled Aggregates, Masters Thesis, Hongik University.