

## 재생골재를 사용한 콘크리트의 초기재령 수축에 관한 연구

A Study on Early Age Shrinkage of Concrete using Recycled Aggregate

구 봉 근\*            서 상 구\*\*            라 재 응\*\*\*            박 재 성\*\*\*  
Koo, Bong-Kuen    Seo, Sang-Gu        Rha, Jae-Woong     Park, Jae-Seong

### Abstract

Cracks in reinforced concrete structures reduce overall durability by allowing the penetration of water and aggressive agents, thereby accelerating the deterioration of the reinforcing steel. Highway pavement and bridge decks are especially susceptible to this type of deterioration since these structures exhibit high rates of shrinkage and are frequently exposed to aggressive environmental conditions. The objectives of this investigation included the development of experimental procedures for assessing shrinkage cracking potential of recycled aggregate concrete, the evaluation of mix composition on shrinkage cracking potential, and the development of theoretical models to simulate early-age cracking behavior.

Specifically, the influences of shrinkage-reducing admixture(SRA) and recycled aggregate concrete were investigated. The shrinkage-reducing admixture substantially reduces free shrinkage and restrains shrinkage cracking while providing similar mechanical properties. A fracture mechanics modeling approach was developed to predict the behavior of a variety of restrained concrete specimens. This modeling approach was used to successfully explain experimental results from a variety of mixture compositions. The model was used to demonstrate the influence of material and structural properties on the potential for cracking.

**Keywords :** Shrinkage reducing admixture, Recycled aggregate concrete

\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 충남도립 청양대학 토목과 조교수, 공학박사

\*\*\* 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료

E-mail : jck011@freeway.co.kr 011-9822-7563

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

현재 건설폐기물의 재활용 용도는 성토·매립용이 90% 이상을 차지하고 있으며, 도로 기층용이나 콘크리트용 골재 등과 같이 부가가치가 높은 부문에서의 재활용 실적은 거의 미비한 상태이다.<sup>(1)</sup>

한편, 일반골재나 재생골재로 만들어진 콘크리트는 시멘트와 물 등으로 이루어진 합성재료이다. 콘크리트에서 물은 두 가지의 목적으로 첨가된다.<sup>(2)</sup>

첫째는 워커빌리티를 확보하기 위해서 콘크리트를 유동의 상태로 변화시키고, 둘째는 시멘트와 함께 반응된 '아교'의 형태로 반응하여 화학적 작용(수화반응)에 관여한다. 일반적으로 콘크리트가 일정한 온도와 수분 환경 하에 있다면 체적적으로 안정하지만, 주변 환경의 온도와 습도 변화는 일반적으로 '수축'이라 부르는 체적변화의 결과를 초래하게 된다. 수축의 양은 배합비, 환경적조건, 건조재령, 구조물의 크기를 포함한 여러 요인으로 결정된다.

콘크리트가 비구속 조건하에 있다면, 작은 영향으로도 자유롭게 수축하고 팽창한다. 낮은 파괴 저항을 갖춘 콘크리트에 높은 인장응력은 균열의 결과를 초래하지만, 콘크리트로 이루어진 구조물은 자체적 잔류응력 발현의 결과인 이런 수축운동을 막아낸다.

본 연구는 재생골재를 콘크리트용 골재로 재활용함으로써 대형구조물, 교량상판, 상업용프리캐스트 구조물, 그리고 포장 등에서 재생골재 재활용 효율을 높이고 콘크리트 구조체의 수축특성과 파괴역학 사이의 상호작용에 대한 이해를 통해 각각의 영향인자 별 초기 재령 수축변화량의 역학적 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

굵은골재는 쇄석과 경북 경산에서 재생되는 재생골재를, 잔골재는 강모래가 사용되었다. 잔골재의 유효 흡수율은 0.93%로 측정되는 반면, 쇄석과 재생골재의 흡수율은 각각 2.98%와 9.10%(ASTM C-127 1994)이었다.<sup>(3)</sup> 모든 골재는 230℃에서 24시간

(ASTM C-566 1994)동안 건조되었다.<sup>(4)</sup>

모든 잔골재와 굵은골재는 ASTM C-33<sup>(5)</sup>에서 요구되는 표준입도에 만족했다.

골재의 물리적 특성의 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of used aggregates

Classification	Specific gravity	Fineness modulus	Abrasion ratio (%)	Absorption ratio (%)
Crushed stone	2.60	6.76	28.0	2.98
Recycled aggregate	2.32	6.71	39.5	9.10
River sand	2.50	2.57	-	0.93

시멘트는 S사에서 생산중인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. Table 2는 시멘트(KS L 5201)의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

Table 2 Physical and chemical properties of cement

Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Congelation time(h:m)		Stability (%)	Comp. strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		Initial	Final		3 days	7 days	28 days
3.15	3,220	3:55	6:15	0.15	211	292	385

고강도 콘크리트계열의 유동성 확보를 위해 상업적으로 많이 쓰이는 고성능 유동화제(superplasticizer : SP)가 사용되었다. 나프탈렌 술탄계를 포함한 수성계로 분류된 SP의 물성치는 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of superplasticizer

Specific gravity (20 ℃)	Solid powder (%)	pH	Main ingredient	Type	Color
1.20	41	8	Naphthalene sulphonate polymer	Liquid	Dark brown

비팽창 액성수축저감제(SRA)가 콘크리트에서 물의 표면 인장력을 저감시키기 위해서 사용되었다. SRA에 대한 물성은 Table 4와 같다.

Table 4 Physical and chemical properties of SRA

Specific gravity	Solubility in water (%)	pH	Evaporation rate	Appearance and odor
0.94	15	7	0.02	clear, colorless liquid, ether-like odor

## 2.2 실험계획 및 방법

실험은 재생골재 대체율, 물-시멘트비, 그리고 건조 수축저감제(SRA)의 영향을 살펴보기 위해 행해졌다.

이런 변수를 고려한 배합설계는 Table 5와 같다.

Table 5 Mixture proportions by weight(unit:kgf/m<sup>3</sup>)

Mixture identification	Water	Ceme nt	Aggregates			SRA*	SP**
			Coarse		Fine		
			Cru.	Recy.			
W/C = 0.50 - RA0	185	370	1033	0	662	0	0
W/C = 0.50 - RA30	185	370	723	310	662	0	0
W/C = 0.50 - RA50	185	370	516.5	516.5	662	0	0
W/C = 0.50 - RA100	185	370	0	1033	662	0	0
W/C = 0.50 - RA0 - SRA	175.75	370	1033	0	662	9.25	0
W/C = 0.50 - RA30 - SRA	175.75	370	723	310	662	9.25	0
W/C = 0.50 - RA50 - SRA	175.75	370	516.5	516.5	662	9.25	0
W/C = 0.50 - RA100 - SRA	175.75	370	0	1033	662	9.25	0
W/C = 0.45 - RA0	185	411	1013	0	649	0	0
W/C = 0.45 - RA30	185	411	709	304	649	0	0
W/C = 0.45 - RA50	185	411	506.5	506.5	649	0	0
W/C = 0.45 - RA100	185	411	0	1013	649	0	0
W/C = 0.45 - RA0 - SRA	175.75	411	1013	0	649	9.25	0
W/C = 0.45 - RA30 - SRA	175.75	411	709	304	649	9.25	0
W/C = 0.45 - RA50 - SRA	175.75	411	506.5	506.5	649	9.25	0
W/C = 0.45 - RA100 - SRA	175.75	411	0	1013	649	9.25	0
W/C = 0.30 - RA0	185	616.7	911	0	584	0	3.08
W/C = 0.30 - RA30	185	616.7	638	273	584	0	3.08
W/C = 0.30 - RA50	185	616.7	455.5	455.5	584	0	3.08
W/C = 0.30 - RA100	185	616.7	0	911	584	0	3.08
W/C = 0.30 - RA0 - SRA	175.75	616.7	911	0	584	9.25	3.08
W/C = 0.30 - RA30 - SRA	175.75	616.7	638	273	584	9.25	3.08
W/C = 0.30 - RA50 - SRA	175.75	616.7	455.5	455.5	584	9.25	3.08
W/C = 0.30 - RA100 - SRA	175.75	616.7	0	911	584	9.25	3.08

Note) RA30→Recycled aggregate is 30% of coarse aggregate weight

\* 5% of the total water was replaced with SRA

\*\* 0.5% of the total binder were replaced with SP

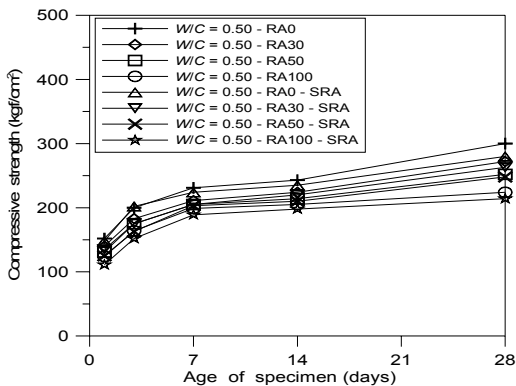


Fig. 1 Time dependent compressive strength development (W/C = 0.50)

시험과정에서 압축강도는 지름 100mm, 높이 200mm 원주형 공시체를 사용하여 시험하였으며, 압축탄성계수는 컴프레소메타를 이용하여 측정하였다. 파괴실험[휨탄성계수(EF), 임계응력확대계수(KIC), 임계균열선단개구변위]은 50mm×100mm×460mm 빔시편을 사용하여 측정하였으며, 수축특성(자기수축, 건조수축, 온도수축)은 100mm×100mm×400mm의 빔시편을 이용하여 측정하였다.

굵은골재와 잔골재는 표준직립원형믹서를 사용하여 믹싱하였으며, 거푸집에 콘크리트를 타설하고 10~15초 정도 진동다짐을 하였으며 철제 혼순으로 마무리하였다. 그리고 물의 손실을 막기 위해서 얇은 비닐로 시편을 덮었다. 타설후, 시편은 24시간 동안 온도 27~30℃, 상대습도는 35~40% 정도를 유지하였다.

이 연구와 관련된 대부분의 실험은 KS와 ASTM에 규정된 방법으로 실험을 하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도 특성

재령 (1, 3, 7, 14, 28일)에 따른 압축강도의 발현 특성을 Fig. 1과 2에 나타내었다. W/C = 0.50에서는 재생골재 대체율(30, 50, 100%)에 따른 압축강도 발현(28일)이 일반골재를 사용한 것 보다 약 9.3~25.3% 작게 나타났으며, W/C = 0.30에서는 약

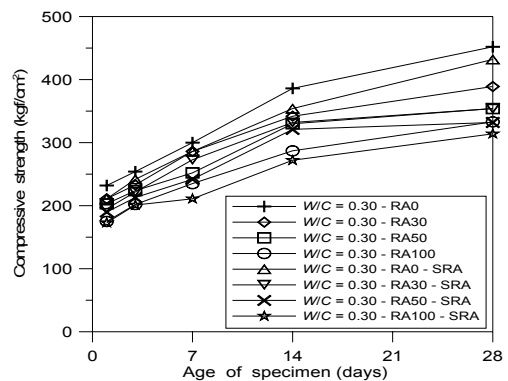


Fig. 2 Time dependent compressive strength development (W/C = 0.30)

13.9~26.3%로 W/C가 작을수록 재생골재 함유율에 따른 강도변화는 약간 큰 것으로 나타났다.

한편, SRA(건조수축저감제) 첨가에 따른 강도변화는 W/C=0.50에서 약 6.1~23.6%, W/C=0.30에서 약 18.1~27.3%로 마찬가지로 W/C가 작을수록 재생골재 함유율에 따른 강도변화는 약간 큰 것으로 나타났다. 그러나 SRA 첨가시 재생골재 대체율별 압축강도 발현(28일)은 W/C=0.50에서 약 1.6~6.7%, W/C=0.30에서 약 4.4~9.0% 정도 SRA 미첨가시 보다 감소한 것으로 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4는 양생조건과 물-시멘트비에 따른 28일 압축강도 발현 값을 막대그래프로 도시한 것이다. 대부분 공기양생보다는 수중양생이 약 1.46~6.7% 정도 높은 압축강도 값을 나타내었다. 그리고, 재

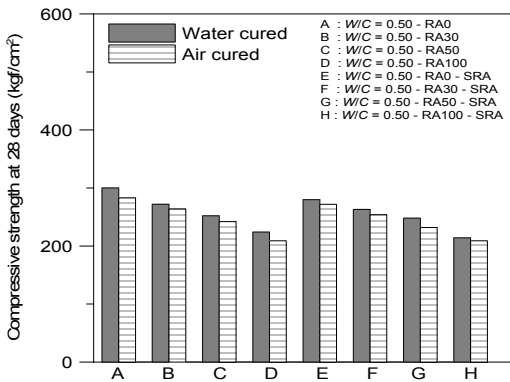


Fig. 3 Influence of curing on 28 days compressive strength (W/C = 0.50)

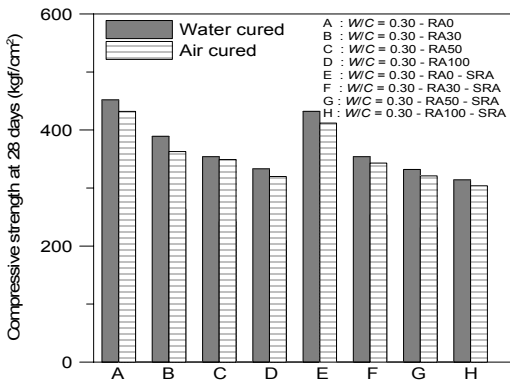


Fig. 4 Influence of curing on 28 days compressive strength (W/C = 0.30)

생골재의 함량에 따른 양생조건별 압축강도 차이는 미소하였다. SRA 첨가에 따른 양생조건별 강도변화는 W/C=0.50에서 약 2.3~6.5%로 SRA 미첨가시(약 2.9~6.7%)와 큰 차이를 보이지 않았으나, W/C=0.30에서는 약 3.1~4.6%로 SRA 미첨가시(약 1.4~6.7%) 보다 적은 양생조건별 강도변화를 보였다.

### 3.2 파괴특성

파괴실험이 휨탄성계수( $E_F$ ), 임계응력확대계수( $K_{IC}$ )을 얻기 위해서 수행되었다. Fig. 5는 전형적인 하중과 CMOD 곡선을 나타내고 있다. 초기 하중과 CMOD 곡선과의 기울기를 결정하기 위해서, 선형회귀방정식이 극한하중의 5%에서 40%사이에서 결정되었고 초기 하중 컴플라이언스( $C_i$ )로 언급되었다.

식 (1)에서 보여진 바와 같이 탄성계수는 형상계수로 하중 컴플라이언스와 관련해서 계산되었다.

$$E_F = \frac{6S a_0 V_1(\alpha)}{C_i d^2 b} \quad (1)$$

$$V_1(\alpha) = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + \frac{0.66}{(1-\alpha)^2}$$

여기서, S는 지간길이,  $a_0$ 은 초기 균열길이, d는 시편 깊이, b는 시편의 폭, 그리고  $\alpha$ 는 초기 균열길이( $a_0$ )와 시편 깊이(d)의 비이다.

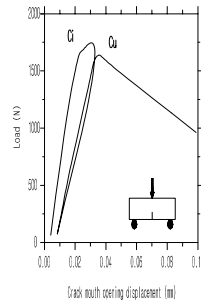


Fig. 5 Typical test result for the two parameter fracture model(TPFM): Load versus crack mouth opening displacement(CMOD) curve

임계응력확대계수( $K_{IC}$ )를 결정하기 위해서 추가적인 정보가 극한하중에서 임계유효균열( $a_c$ ) 길이에 접근하기 위해서 필요하다. 이런 유효균열의 길이는 초기 컴플라이언스와 극한하중에서의 컴플라이언스와의 차이점이 유효균열의 발현에 의해서 계산된다는 개념에서 기본적으로 계산된다.

탈재하 컴플라이언스( $C_u$ )는 하중이 제거된 이후 보의 응답과 관련된 선형을 피팅하므로써 계산된다. 이상적으로, 시편은 극한하중에서 탈재하되나 실험과 정동안 최대하중을 증명하는 것은 극도로 어렵다. 이런 이유는 Fig. 5에서 보여진 것과 같이 극한하중의 95%에서 시편이 탈재하되었다.

탈재하 컴플라이언스( $C_u$ )의 회귀는 전형적으로 극한하중의 40~70%에서 나타난다. 휨탄성계수( $E_F$ )에서 얻어지는 값을 사용하여, 임계균열길이( $a_c$ )는 식 (2)를 사용하여 계산될 수 있다.

$$E_F = \frac{6S a_c V_1(a)}{C_u d^2 b} \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 균열길이( $d$ )와 유효균열( $a_c$ )과의 비이며, 임계유효균열 비( $a_c/a_0$ )를 이용하기 때문에, 임계응력확대계수( $K_{IC}$ )는 식 (3)을 사용하여 계산된다.

$$K_{IC} = 3(P_{max} + 0.5w) \frac{\sqrt{(\pi a_c) F(a)}}{2d^2 b} \quad (3)$$

$$F(a) = \frac{1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)}{\sqrt{\pi(1+2a)(1-a)^{3/2}}}$$

여기서,  $P_{max}$ 는 최대하중,  $w$ 는 보의 자중, 그리고  $a$ 는 임계유효균열길이와 시편 길이( $a_0/d$ )의 비를 나타낸다.

SRA 첨가시와 미첨가시의 재생골재 대체율별 휨탄성계수( $E_F$ )의 발현값에 대한 차이는 Fig. 6과 Fig. 7에서와 같이  $W/C = 0.50$ 에서 약 2.9~10.4%,  $W/C = 0.30$ 에서 약 0.3~2.3% 정도로  $W/C$ 가 작을수록 휨탄성계수( $E_F$ )의 발현값에 대한 차이가 적었으며, 재생골재 대체율이 증가할 경우 휨탄성계수( $E_F$ )는 약 5.8~10.4%의 변화를 나타내었다.

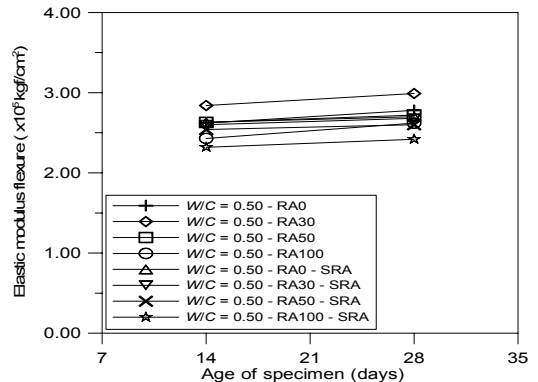


Fig. 6 Time dependent flexural modulus development (W/C = 0.50)

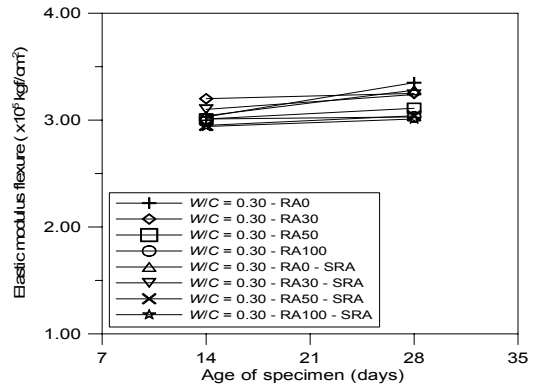


Fig. 7 Time dependent flexural modulus development (W/C = 0.30)

한편, 임계응력확대계수( $K_{IC}$ )도 휨탄성계수( $E_F$ )에서 나타난 것과 비슷한 경향을 나타내었다.

임계응력확대계수( $K_{IC}$ )값은 Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이  $W/C = 0.3(RA 0)$ 에서 가장 큰 값( $2.45 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>)을 나타냈으며,  $W/C = 0.5(RA 100, SRA)$ 에서 가장 작은 값( $1.07 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>)을 나타냈다.

### 3.3 수축특성

시편의 수축특성을 시험하기 위하여 혼합후 30℃의 일정한 온도를 유지하였다.

하중이 없는 시편에 대한 전체적인 수축은 식(4)에 나타난 것과 같이 온도, 건조, 그리고 자기 수축의 합으로 나타난다.

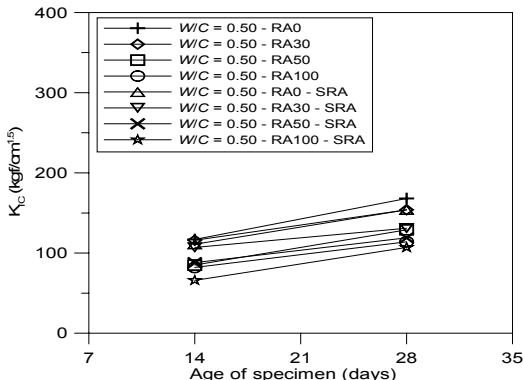


Fig. 8 Time dependent critical stress intensity factor development (W/C = 0.50)

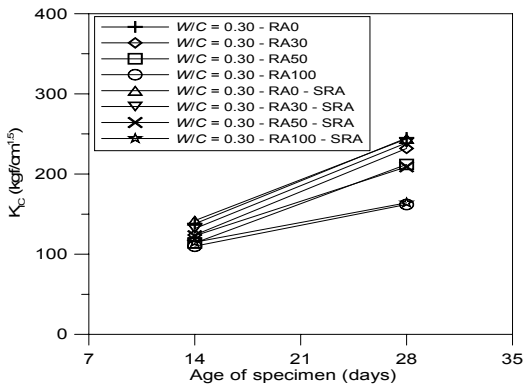


Fig. 9 Time dependent critical stress intensity factor development (W/C = 0.30)

$$\epsilon_{\text{Total}} = \epsilon_{\text{Thermal}} + \epsilon_{\text{Drying}} + \epsilon_{\text{Autogenous}} \quad (4)$$

낮은 물-시멘트비로 만들어진 콘크리트는 전형적으로 더 낮은 건조수축을 나타낸다고 일반적으로 알려져 있다(Neville 1996).<sup>(6)</sup>

본 연구는 물-시멘트비와 재생골재 대체율을 변화시키면서 배합의 자유수축특성에 관련된 SRA의 역할을 조사하였다. 변형은 24시간 동안 측정되었다. 시편들은 30°C의 온도와 40%의 상대습도에서 모든 방향으로 건조되었다. 변형률은 ASTM C-341(1994)<sup>(7)</sup>에 관련된 게이지 길이와 전체적인 모든 변형의 비에 기초하여 계산되었다. 24시간동안 발생한 변형은 350 mm 게이지를 사용한 변형률로 치환되었다.



Fig. 10 The procedure for computing the corresponding thermal, autogenous, and drying shrinkage components

실링된 시편은 온도와 자체 체적변화를 나타낸 반면 실링 되지 않은 시편은 건조, 온도, 자체의 변화로 이루어진 전체 체적변화를 나타내었다. Fig. 10은 수축의 개개 변화가 주어진 배합에 어떻게 계산되는지를 나타낸다. 온도수축은 팽창계수(COTE = 10E<sup>-6</sup>/°C)를 가정하고 온도변화(ΔT)를 곱함으로써 온도변형률(ε<sub>Thermal</sub> = COTEΔT)(JCI 1999)<sup>(8)</sup>이 계산된다.

온도 변형률은 콘크리트가 일정한 온도에서 계속되기 때문에 초기 48시간 후에는 무시된다. 수축에 의한 길이변화는 ASTM-157(1994)<sup>(9)</sup>과 관련하여 자유수축 시편을 통하여 측정된다.

자기수축은 실링된 시편의 길이변화에서 온도수축을 뺀으로써 결정된다. 초기 길이는 350 mm 게이지 길이로 된 표준길이 컴포레이터(comparator)를 사용하여 디몰딩 시간에 측정된다. 본 실험에서 길이변화는 초기 게이지 길이에 의해서 변형률로 표시된다.

Fig. 11~16은 물-시멘트비, 재생골재 대체율, SRA의 첨가에 따른 시편 혼합 후 48시간 이내에서의 자기수축 값을 도시하였다. 결과적으로, 초기 48시간 동안 세 개의 시편을 사용하여 측정된 평균 자기수축은 가장 낮은 물-시멘트비 0.30으로 된 시편(RA 100)에서 370 με (= mm/mm\*10<sup>-6</sup>)의 가장 큰 자기수축 변형률을 나타내었다. 물-시멘트비 0.45~0.50에서의 자기수축변형률은 물-시멘트비 0.30(RA 0)에 비해 54~86% 감소하였다.

재생골재에 대한 영향을 살펴보면 RA100 배합에서 물-시멘트비 증가에 따른 자기수축의 값이 가장 적게 변화하였다. 한편, SRA가 첨가된 모든 계열에서 약 48~97%정도의 자기수축 감소 변화를 나타내었다.

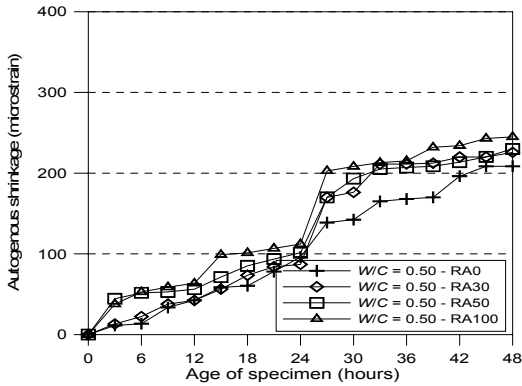


Fig. 11 The autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.50)

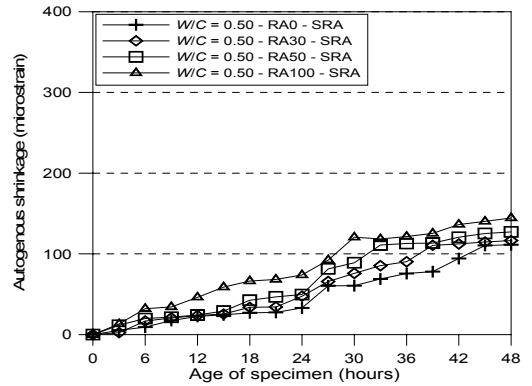


Fig. 14 Influence of a shrinkage reducing admixture (SRA) on the autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.50)

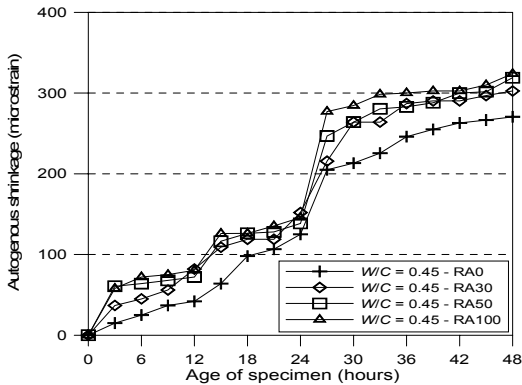


Fig. 12 The autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.45)

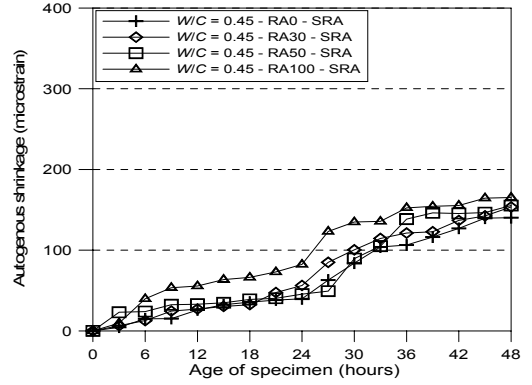


Fig. 15 Influence of a shrinkage reducing admixture (SRA) on the autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.45)

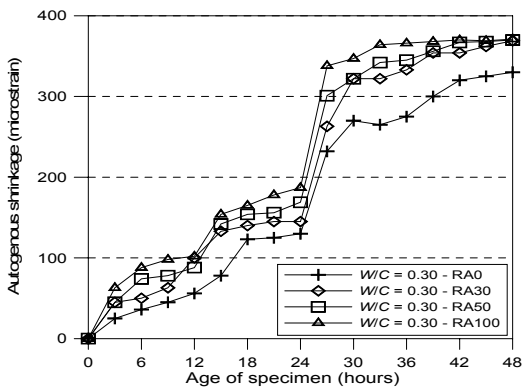


Fig. 13 The autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.30)

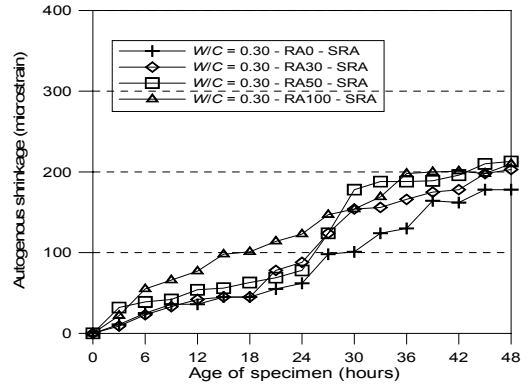


Fig. 16 Influence of a shrinkage reducing admixture (SRA) on the autogenous shrinkage during the first 48 hours (W/C = 0.30)

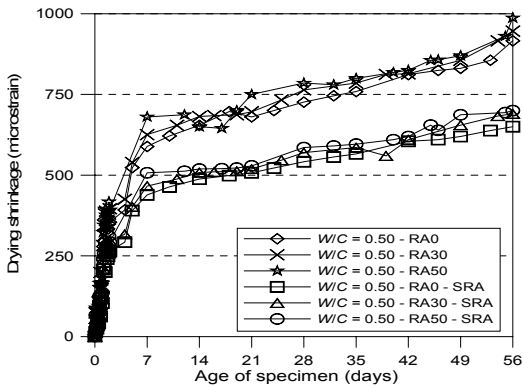


Fig. 17 The influence of RA and a shrinkage reducing admixture on the drying shrinkage (drying initiated at 24 hours, W/C = 0.50)

Fig. 17과 Fig. 18은 재생골재 대체율 변화와 SRA의 첨가에 따른 장기 건조수축값을 조사한 것이다. 예상했던 대로 물-시멘트비가 증가(0.30→0.50)함에 따라 약 8주동안의 건조수축 값은 약 50% 증가하였고 SRA의 첨가에 따른 건조수축 값은 약 25%의 감소 효과를 가져왔다.

#### 4. 결론

본 연구는 재생골재를 사용한 콘크리트 부재의 초기 재령 수축거동을 다루었다. 기본적인 연구는 자기수축, 건조수축, 그리고 파괴의 상호 작용에 접근하기 위해서 실시되었다. 실험 및 이론적인 방법은 초기재령 구속수축과 연관이 되는 메카니즘에 접근하기 위해서 조사되었다.

- 1) SRA 첨가에 따른 재생골재 대체율 별 휨탄성계수 ( $E_f$ )의 발현값은 W/C가 작을수록 편차가 적었으며, 재생골재 대체율이 증가할 경우는 약 5.8~10.4%의 변화를 나타내었다. 한편, 임계응력확대 계수( $K_{IC}$ )도 휨탄성계수( $E_f$ )에서 나타난 것과 비슷한 경향을 나타내었다.
- 2) SRA를 포함한 배합은 건조수축과 자기수축에서, 특히 초기재령에서 실질적인 감소를 나타내었다. SRA를 포함한 배합의 역학적 특성은 압축강도 값이 W/C = 0.50에서 약 1.6~6.7%, W/C = 0.30에서 약 4.4~9.0% 정도 감소하였으며, 유

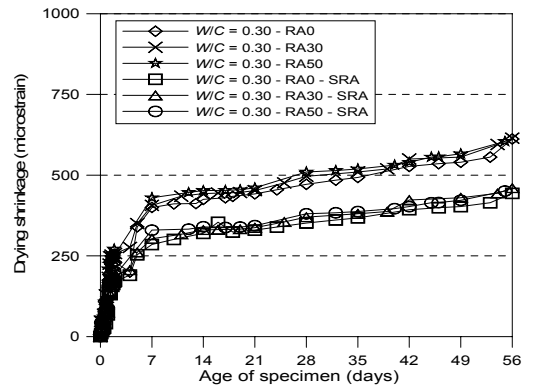


Fig. 18 The influence of RA and a shrinkage reducing admixture on the drying shrinkage (drying initiated at 24 hours, W/C = 0.30)

사한 탄성계수, 파괴역학적 변수를 나타내었다.

- 3) 재생골재 첨가에 따른 자기수축의 변화는 W/C = 0.30으로 된 시편(RA 100)에서 가장 큰 자기수축 변형률을 나타내었으며, W/C = 0.45~0.50에서의 자기수축변형률은 54~86% 감소하였다.

SRA가 첨가된 모든 계열에서는 약 48~97% 정도의 자기수축 감소 변화를 나타내었다. 따라서, SRA의 첨가에 따라 재생골재 사용에 대한 수축균열의 단점이 보완될 수 있을 것으로 사료되었다.

본 연구는 재료특성의 내역과 콘크리트의 파괴 및 수축거동에 대한 기초적 특성을 제시하였으나, 향후 배합설계, 양생조건, 그리고 구속조건에 관한 다양한 데이터베이스를 구비한 모델을 대상으로 정밀한 검토가 필요 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 건설폐기물 재활용촉진대책, 일간건설신문, 2002.11.22.
2. 구봉근 외, 토목재료학, 도서출판나라, 2002, p. 92.
3. ASTM C-127. (2001) "Standard Test Method for Density, Relative Density(Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate".
4. ASTM C-566. (1997) "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying".
5. ASTM C-33. (2001) "Standard Specification for Concrete Aggregates".



- 
6. Neville, A. M., (1996) "Properties of Concrete". 4th Edition, Addison Wesley Longman, Essex England.
  7. ASTM C-341. (1994) "Standard Test Method for Length Change of Drilled or Sawed Specimens of Hydraulic Cement Mortar and Concrete".
  8. JCI-Committee Report of the Japan Concrete Institute (1998) "Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete", Autoshrink '98, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Ed. Tazawa, E., Hiroshima, Japan, June 13~14.
  9. ASTM C-157. (1999) "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete".

(접수일자 : 2003년 1월 17일)