

고로슬래그시멘트 및 내한축진제를 사용한 콘크리트의 수축균열특성에 관한 연구

A Study on the Shrinkage Cracking Properties of Concrete by Using Blast Furnace Slag Cement and Frost-Resistant Accelerator

최 형 길¹

최 희 섭^{2*}

Choi, Hyeong-Gil¹ Choi, Hee-Sup^{2*}

Assistant Professor, Graduate School of Architecture, Kyungpook National University, Buk-Gu, Daegu, 14566, Korea¹

Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, kitami, Hokkaido, 090-8507, Japan²

Abstract

As a cold-weather-concrete construction technique for enhancing the sustainability and improving efficiency of cold-weather construction, the cracking timing, the starting point of deterioration for concrete, due to the shrinkage of the blast furnace slag cement concrete including accelerator was evaluated. As a result, by using blast furnace slag and accelerator, the cracking was developed faster with higher cracking potential under the restrained conditions at constant age and free-shrinkage strain. It can be considered that the results of decreased stress relaxation by creep or increased restraint with increased free-shrinkage strain causes the increased cracking development speed. Hence, it should be considered the necessary of cracking due to the shrinkage when blast furnace slag or accelerator was used for cold-weather construction.

Keywords : blast furnace slag cement, frost-resistant accelerator, shrinkage, cracking, stress relaxation, degree of restraint

1. 서 론

환경부하저감이나 산업부산물의 유효이용의 관점에서 고로슬래그 미분말을 혼합한 고로슬래그시멘트의 이용이 확대되고 있어, 최근에는 고로슬래그의 혼입율을 보다 높은 저발열·수축억제형 고로슬래그시멘트의 연구나, C중 영역의 슬래그 혼입율을 목표로 한 ECM(Energy·CO₂·Minimum) 시멘트의 연구가 이루어지고 있지만, 그 용도는 한정적이다

[1,2,3,4]. 고로슬래그시멘트는 저발열, 장기강도 증대, 차염성 증대, 알칼리골재 반응의 억제 등 뛰어난 장점을 가지는 반면, 초기강도의 발현이 늦고, 온도 의존성이 크기 때문에 동결기의 시공에 있어서는 초기동해를 받기 쉬운 문제가 있어 적용에 있어 유의점이 많다[5].

한편, 동결기에 콘크리트를 시공하는 경우, 콘크리트의 강도 발현의 지연이나 동결에 의한 초기동해의 발생을 방지하기 위해, 충분한 강도 (5N/mm²)를 발현할 때까지 반드시 동결시키지 않는 것이 중요하고, 양생 가설 천막 및 히터 등에 의한 급열양생을 실시하는 것이 일반적이다. 그러나, 양생 가설 천막은 지극히 열효율이 나쁜 공간에서 히터나 채난에 의한 CO₂ 배출 등의 문제가 발생하기 때문에 이러한 관점으로부터 초기동해를 방지하기 위해 내한축진제를 사용하는 경우가 증가하고 있다[6,7].

Received : December 5, 2018

Revision received : January 10, 2019

Accepted : January 14, 2019

* Corresponding author : Choi, Hee-Sup

[Tel: 81-157-26-9474, E-mail:hs-choi@mail.kitami-it.ac.jp]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

내한축진제를 혼입한 콘크리트는 경화축진, 동결점 저하 등의 성능을 발휘해 저온에서 콘크리트 강도 증진의 개선 효과[8]를 기대할 수 있으며, 동절기 시공에 있어서의 고로슬래그시멘트의 단점을 극복할 가능성이 있어, 최근에는 환경부하 저감형 한중콘크리트 시공기술로서 고로슬래그시멘트와 내한축진제를 병용한 콘크리트에 관한 연구가 진행되고 있다[9]. 하지만, 대부분의 연구는 보통포틀랜드시멘트를 베이스로 한 초기동해 방지의 관점에서 초기재령에 있어서의 강도회복을 중점으로 하고 있어, 장기재령에 있어서의 내구성, 특히 콘크리트의 열화의 기점이 되는 수축균열에 관한 연구는 적다.

따라서 본 연구에서는 고로슬래그시멘트 및 내한축진제를 이용한 콘크리트의 자유수축 및 구속수축 실험을 실시하여 수축 및 균열성상, 구속응력, 크리프 현상에 의한 응력이완, 구속도 등 수축 및 균열특성을 파악하는 것을 목적으로 검토를 실시했다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 사용재료

Table 1에 실험계획을 나타낸다. 실험은 물시멘트비를 50%를 대상으로 베이스 시멘트를 보통포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그시멘트로 하여 내한축진제를 0ml 및 표준 사용량인 시멘트 100kg당 4000ml를 첨가한 합계 4수준의 콘크리트로 했다. 본 실험에 사용한 내한축진제는 내한축진제만의 영향을 검토하기 위해 감수성분이나 AE성분 등이 포함되지 않고 내한축진 성분만으로 구성되어 있는 내한축진제 타입Ⅱ를 사용했다. 사용한 콘크리트의 목표 슬럼프는 180 ± 25 mm, 목표 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 이며, Table 2 및 Table 3에 사용재료 및 콘크리트 배합을 나타낸다.

Table 1. Experimental program

Specimen	Base cement	Frost resistant accelerator (ml/C=100kg)	W/C (%)	Test items
OPC-0	Ordinary Portland Cement (OPC)	0	50	·Slump
OPC-4		4000		·Air contents
BB-0	Blast Furnace Slag Cement (BB)	0	50	·Compressive strength
BB-4		4000		·Free shrinkage
				·Restraint shrinkage
				·Stress relaxation
				·Degree of restraint

Table 2. Materials used

	Type
Cement	Ordinary portland cement, Density: 3.16 g/cm ³
	Blast furnace slag cement (Type 2), Density: 3.05 g/cm ³ , Specific surface area: 3830 cm ² /g
sand	Pit sand, Density: 2.67 g/cm ³ , Absorption ratio: 1.57%
Gravel	Crushed aggregate, Density: 2.57 g/cm ³ , Absorption ratio: 2.98%
	AE water reducing agent (Chemical compound with lignin sulphonic acid and polyol), Density: 1.23~1.27 g/cm ³
Admixture	Frost resistant accelerator (Type II), Density: 1.41~1.45 g/cm ³

Table 3. Mix designs

Specimen	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				AE water reducing agent (ml/C=100kg)	Frost resistant accelerator (ml/C=100kg)
			W	C	S	G		
OPC-0		44.8	178	356	764	965		0
OPC-4	50						250	
BB-0		44.9	174	349	769	965		4000
BB-4								

※ Target slump: 180±25mm, Target air contents: 4.5±1.5%

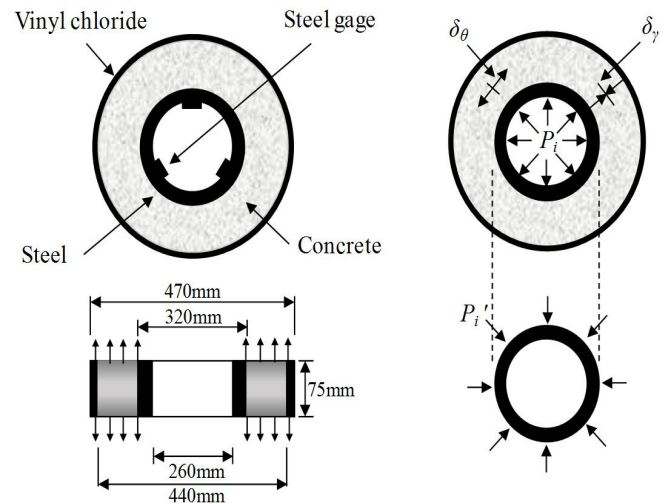


Figure 1. Overview of ring test

2.2 실험방법

굳지 않은 성상에 대해서는 콘크리트 타설 직후에 슬럼프 및 공기량을 측정했다.

압축강도는 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주 시험체를 제작하여 재령 1일에 탈형한 후 20℃ 표준 수중양생 하에서 재령 7, 28 및 56일에 KS F 2405에 준해 압축강도를 측정했다.

자유수축은 $100 \times 100 \times 400$ mm의 각주 시험체를 이용해 재령 1일에 탈형하여 7일간 수중양생을 실시한 후, 20℃, 60%RH의 항온항습실에서 KS F 2424 (다이얼 게이 지법)에 의해 소정의 재령에 있어서 길이변화를 측정했다.

구속수축은 Figure 1과 같이 모르타르 링의 단면에서

균등한 건조수축을 유도하기 위해서 링 시험체의 높이를 AASHTO PP34-98[10]에서 제안하는 기존의 152mm에서 75mm로 하여 내부 강재링의 구속에 의한 구속수축변형을 측정했다. 시험체 하부 및 외부링의 표면에는 구속을 방지하기 위해 테프론 시트 표면을 봉합하여 수분의 증발을 방지했다. 재령 1일 이후에 링시험체 하부의 목재판을 탈형하여 콘크리트 상·하부의 표면에서만 건조가 발생하도록 했다.

구속수축변형은 내부 강재링의 중앙 ($h=37.5\text{mm}$)의 3개소에 변형게이지를 부착하여 20℃, 60%RH의 항온항습실에서 데이터로거에 의해서 측정했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 성상 및 압축강도

Table 4에 굳지 않은 성상 및 압축강도의 결과를 나타낸다. 본 연구로 사용한 내한축진제는 감수성분이나 AE성분 등이 포함되지 않은 내한축진 성분만으로 구성되어 있는 타입 II를 사용하고 있기 때문에 내한축진제 혼입에 따라 슬럼프는 약간 감소하는 경향이지만, 슬럼프 및 공기량 모두 목표 성능을 만족하는 것을 확인했다. 압축강도는 BB보다 OPC가 크고, 내한축진제를 첨가함에 따라 OPC, BB 모두 초기재령으로부터 압축강도가 증가하여, 재령 56일의 시점에서 약 $1.8\sim 7.8\text{N/mm}^2$ 정도 압축강도가 크게 나타나, 초기재령으로부터 내한축진제의 경화축진 효과를 확인할 수 있었다. 한편, BB의 경우는 OPC와 비교해 잠재수경성에 의한 수화반응에 의해 재령 28일 이후의 장기재령에서의 강도 증진율이 큰 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Fresh Properties and compressive strength

Specimen	Slump (mm)	Air content (%)	Compressive strength (N/mm^2)		
			7 days	28 days	56 days
OPC-0	191	5.0	31.3	41.4	45.3
OPC-4	177	4.5	37.5	45.2	47.1
BB-0	191	3.9	20.7	39.0	44.9
BB-4	171	4.8	29.3	44.5	52.7

3.2 자유수축변형 및 구속수축변형

Figure 2에 자유수축변형 결과를 나타낸다. 자유수축변형은 재령 56일의 시점에서 OPC는 680×10^{-6} , BB는

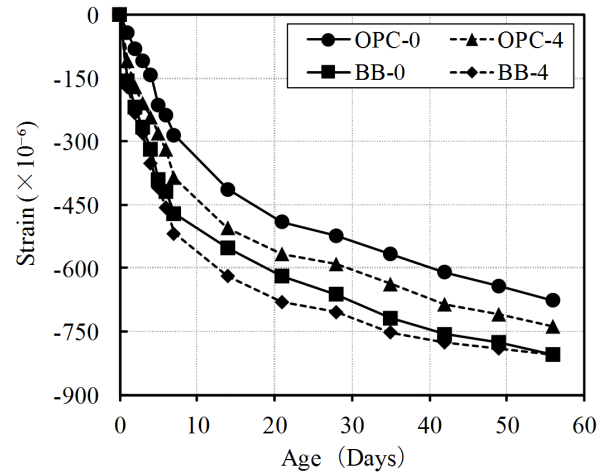


Figure 2. Free shrinkage

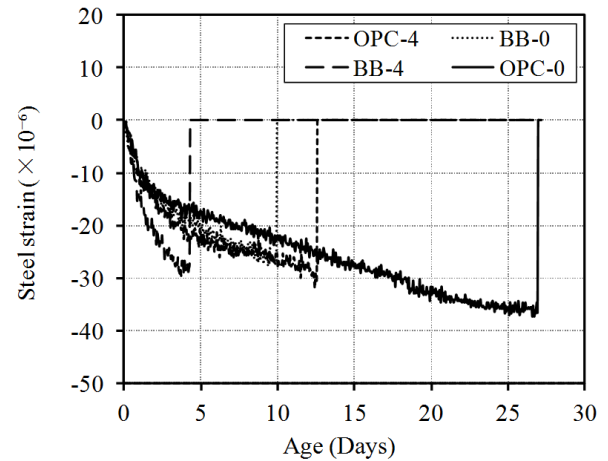


Figure 3. Restraint shrinkage

805×10^{-6} 로 OPC와 비교하여 BB의 수축량이 125×10^{-6} 정도 큰 값으로 일반적인 경향을 확인할 수 있었다. 한편, 내한축진제를 혼입한 경우, BB-4는 재령 56일의 수축량이 BB-0와 동일한 정도이지만, OPC-4은 OPC-0와 비교해 62×10^{-6} 정도 수축량이 큰 값으로, 전체적으로 내한축진제를 첨가함에 따라 OPC, BB 모두 초기재령으로부터 $50\sim 100\times 10^{-6}$ 정도의 수축량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

링테스트에 의한 구속수축변형을 Figure 3에 나타낸다. 구속수축변형은 재령의 진행에 따라 자유수축변형의 증가에 의해 서서히 증가하여 최대변형 후 관통균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 구속수축변형이 0이 된 시점이 각 시험체의 균열의 발생일이며, Table 5에 각 시험체에 있어서의 균열발생상황 및 균열 발생일을 나타낸다. 균열의 발생은 BB-4, BB-0, OPC-4, OPC-0의 순서로 발생하여

OPC보다 BB의 경우가 균열이 빨리 발생했으며, 내한축진제를 혼입한 시험체의 경우, 자유수축변형이 증가하여 균열 발생일도 빠른 것을 확인할 수 있었다.

Table 5. Crack configuration and cracking days

Specimen	OPC-0	OPC-4
Cracking		
Days of cracking	26.88	12.54
Specimen	BB-0	BB-4
Cracking		
Days of cracking	9.92	4.25

3.3 구속인장응력 및 균열포텐셜

구속인장응력은 링 시험체에 타설한 콘크리트가 선형거동으로 수축이 전단면에서 균등하게 발생한다고 가정하고, 콘크리트 및 강재링의 반경과 강재링의 구속수축변형 및 탄성계수를 이용하여 식(1)로부터 구할 수 있다[11,12,13].

$$\sigma_{max} = \frac{r_{os}^2 - r_{is}^2}{2r_{os}^2} \cdot \frac{r_{ic}^2 + r_{oc}^2}{r_{oc}^2 - r_{ic}^2} \cdot E_{st} \cdot \epsilon_{st} \quad \text{--- (1)}$$

여기서, σ_{max} 는 구속인장응력, r_{is} , r_{os} 는 강재의 내부 및 외부의 반경, r_{ic} , r_{oc} 는 콘크리트의 내부 및 외부의 반경, E_{st} 는 강재의 탄성계수, ϵ_{st} 는 구속수축변형을 나타낸다.

식 (1)로부터 계산한 구속인장응력을 Figure 4에 나타낸다. 구속인장응력은 구속수축변형의 증가에 따라 증가하여 약 3.1~3.9N/mm²의 최대 구속인장응력 후 균열이 발생했다. 내한축진제를 혼입함에 따라 OPC, BB 모두 내부 강재링에 발생하는 압력의 증가에 의해 구속인장응력은 증가하고, 이에 따라 콘크리트의 균열의 발생이 빠

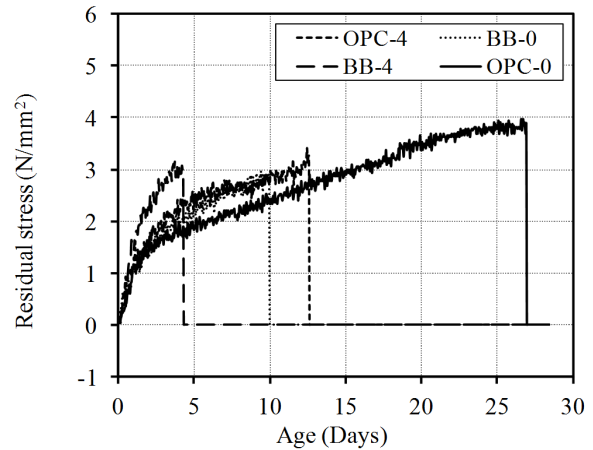


Figure 4. Restraint stresses

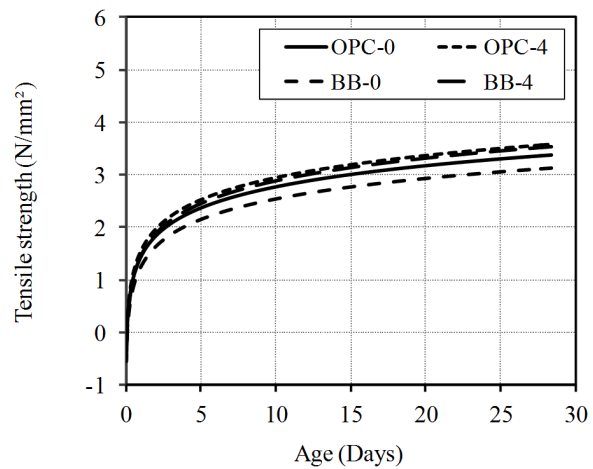


Figure 5. Tensile strength

른 것을 알 수 있다.

동일재령에서의 구속인장응력은 내한축진제 혼입에 따라 커지는 경향으로 내한축진제를 혼입한 경우 초기재령으로부터 자유수축변형의 증가에 의해 내부 강재링의 변형이 크게되어 인장크리프에 의한 응력이완이 감소했던 것이원인으로 생각할 수 있다. 한편, 균열포텐셜은 구속인장응력/인장강도로 각 재령에 있어서의 응력 강도비에 의해서 산정했으며, Figure 5에 인장강도를 나타낸다. 인장강도는 압축강도의 결과를 이용하여 이하의 식 (2)로부터 산출했다[14,15].

$$\sigma_{tensile} = 0.291 \cdot F_c^{0.658} \quad \text{----- (2)}$$

여기서, $\sigma_{tensile}$ 는 인장강도, F_c 는 압축강도를 나타낸다.

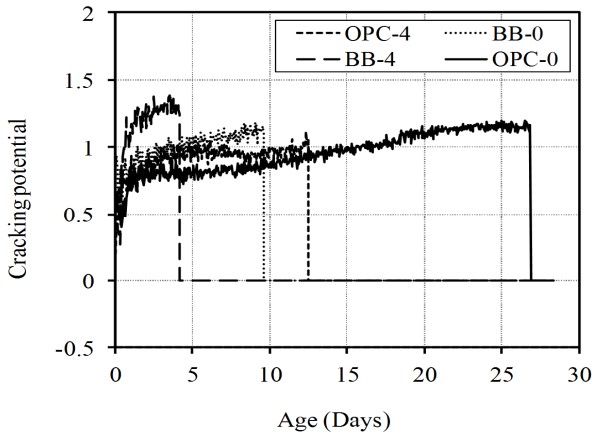


Figure 6. Cracking potential

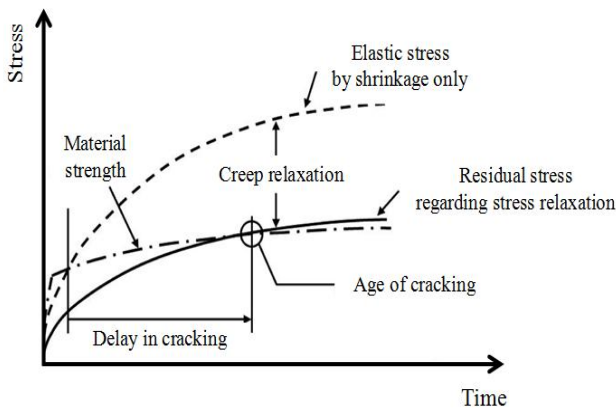


Figure 7. Conceptual diagram of the stress on the concrete generated by restrained shrinkage[14]

Figure 6에 각 시험체의 균열 포텐셜을 나타낸다.

OPC보다 BB의 경우 균열 포텐셜은 크고, 내한 촉진제를 첨가함에 따라 OPC, BB 모두 균열 포텐셜은 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. OPC-4 및 BB-4 (각 시멘트에 있어서 균열발생일이 빠른 시점)를 기준으로 본 실험의 구속조건의 범위에서, 수축에 의한 균열의 발생가능성은 내한촉진제의 혼입에 따라 OPC의 경우 약 12%, BB의 경우 약 21%정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 인장크리프에 의한 응력이완

콘크리트의 구속균열의 발생 시기는 콘크리트의 인장 크리프의 영향을 받게 된다. 구속수축에 의해 콘크리트에 발생하는 응력의 개념도를 Figure 7에 나타낸다[14]. 후크 법칙에 의한 탄성수축응력은 지속적인 구속하중에 의한 응력이완에 의해서 감소한다.

콘크리트의 수축에 의한 균열은 구속인장응력과 콘크리

트의 강도 (인장강도)가 동일한 시점에서 발생하게 되며, 인장 크리프는 콘크리트의 수축이 구속되어 발생하는 응력을 이완시키게 되며, 그에 따라 콘크리트의 균열발생을 지연하게 된다[16].

한편, Hossain, Weiss 등의 연구[11]에서는 링 테스트에서 Shrink-fit 이론에 의해 콘크리트의 수축에 의해 발생하는 내부 강재링의 변형을 고려하여 이하의 식 (3)과 같이 탄성수축응력의 계산식을 제안하고 있으며, 본 연구에서도 이것을 참고로 콘크리트 링에 발생하는 탄성수축응력을 계산했다.

$$\sigma_{ec} = \frac{-\varepsilon_{sh} E_c \frac{r_{os}^2 + r_{oc}^2}{r_{oc}^2 - r_{os}^2}}{\frac{E_c (1 - \nu_c) r_{os}^2 + (1 + \nu_c) r_{oc}^2}{E_s t} + \frac{(1 - \nu_s) r_{is}^2 + (1 + \nu_s) r_{os}^2}{r_{os}^2 - r_{is}^2}} \quad (3)$$

여기서, σ_{ec} 는 탄성수축응력, ν_c , ν_s 는 콘크리트 및 강재의 포아송비, E_c 는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸다.

따라서, 인장크리프에 의한 응력 이완량 σ_{sr} 는 탄성수축응력과 구속인장응력을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다[11].

$$\sigma_{sr} = \sigma_{ec} - \sigma_{max} \quad (4)$$

Figure 8, 9, 10, 11에 탄성수축응력, 구속수축응력 및 응력의 이완량을, Table 6에 응력의 이완율을 나타낸다. 탄성수축응력 및 응력이완량은 재령에 따라 서서히 증가하여 자유수축변형 증가율의 감소나 콘크리트가 강성을 확보함에 따라 일정치에 수렴하는 경향을 나타냈다.

OPC, BB 모두 내한촉진제를 첨가하는 것에 따라 초기 재령으로부터 크리프 현상에 의한 구속인장응력의 이완 효과가 저하되어, 내한촉진제를 첨가함에 따라 균열 발생시의 응력의 이완율 (σ_{sr}/σ_{ec})은 내한촉진제 무첨가의 시험체와 비교해 약 12% 정도 작은 결과로 이는 내한촉진제의 첨가에 따라 균열발생이 조기화된 원인으로서 생각할 수 있다.

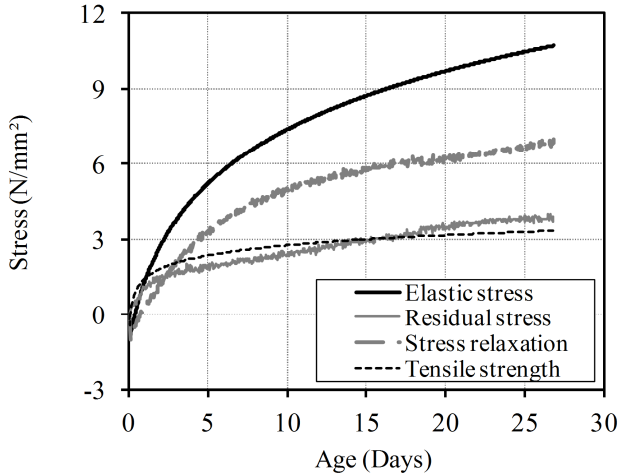


Figure 8. Elastic stress, residual stress and stress relaxation (OPC-0)

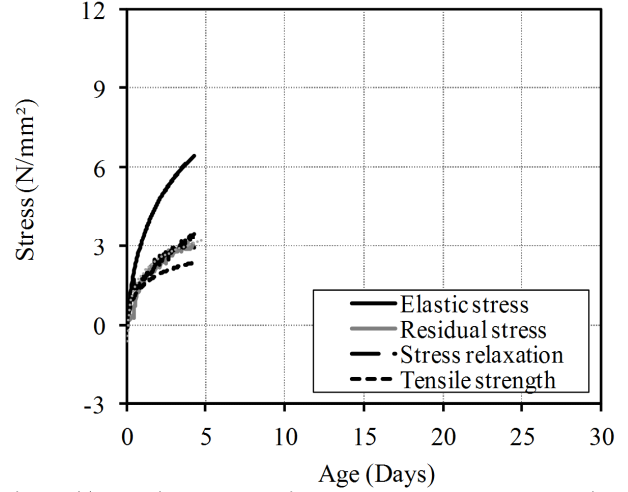


Figure 11. Elastic stress, residual stress and stress relaxation (BB-4)

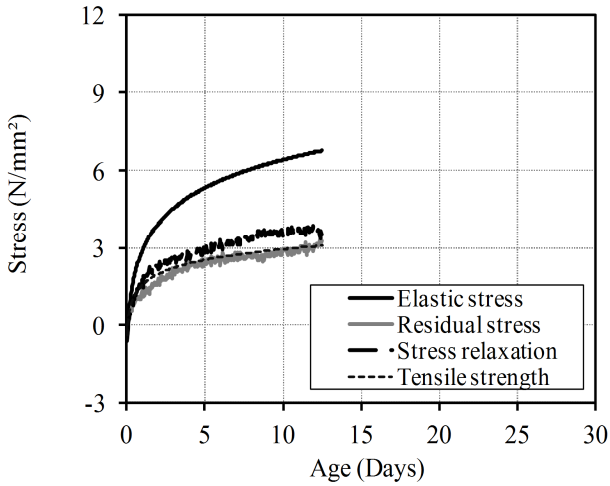


Figure 9. Elastic stress, residual stress and stress relaxation (OPC-4)

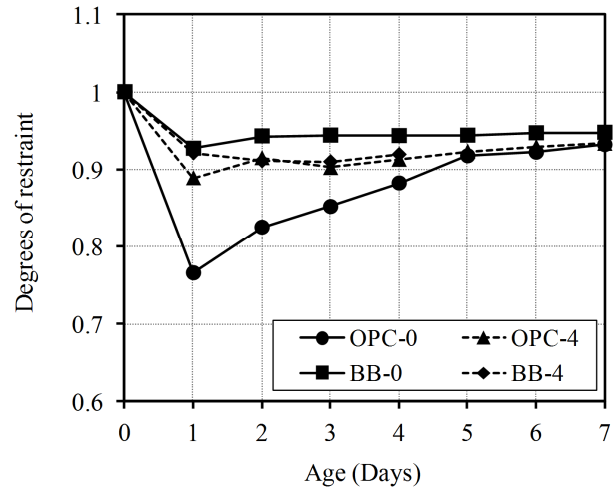


Figure 12. Degree of restraint

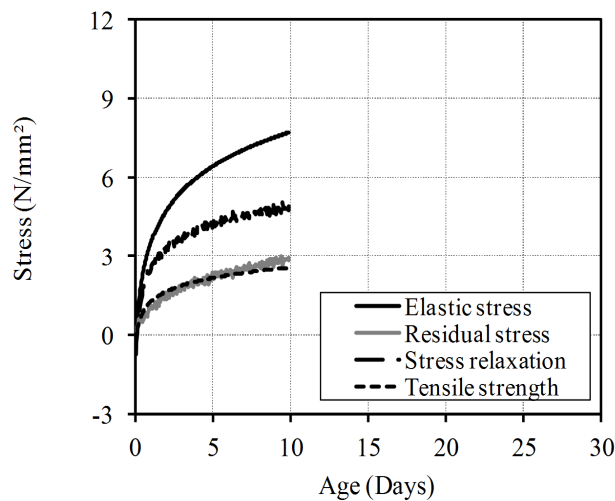


Figure 10. Elastic stress, residual stress and stress relaxation (BB-0)

Table 6. Stress relaxation

Specimen	Stress relaxation, σ_{sr} (N/mm ²)	Elastic shrinkage stress, σ_{ec} (N/mm ²)	Stress relaxation (%)
OPC-0	5.22	8.11	64.36
OPC-4	3.50	6.76	51.78
BB-0	4.09	6.12	66.83
BB-4	3.49	6.42	54.36

* OPC is estimated at an age of 12.54 days and BB is estimated at an age of 4.25 days.

3.5 구속도

구속도(ψ)는 자유수축 및 구속수축 실험의 결과를 이용하여 다음 식(5)로부터 산출했다.

$$\psi = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_r}{\varepsilon_f} = 1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} \quad \text{-----} \quad (5)$$

여기서, ψ 는 구속도, ε_f 는 자유수축변형, ε_r 은 구속수축 변형을 나타낸다.

Figure 12에 구속도의 산정결과를 나타낸다. 전체적으로 OPC보다 BB의 구속도가 큰 것을 알 수 있다. BB의 경우는 초기재령에 링테스트에 의한 구속수축 실험에 있어, 내부 강재링의 변형이 크게 측정되어 내한 촉진제 첨가 유무에 의한 구속도의 차이를 볼 수 없었다. 하지만, OPC의 경우는 내한 촉진제를 첨가하는 것으로 초기재령으로부터 높은 구속도를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있어, 내한 촉진제를 적용할 때는 구속 조건하에서의 수축에 의한 균열발생에 대해 검토할 필요가 있다고 생각할 수 있다.

4. 결 론

고로슬래그시멘트 및 내한촉진제를 사용한 콘크리트의 수축특성에 대해 검토한 결과 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 내한촉진제 혼입에 따라 콘크리트의 균지 않은 성상에 미치는 영향은 작았다. 또한, 내한촉진제를 첨가함에 따라 OPC, BB 모두 초기재령으로부터 압축강도가 증가하여, 초기재령으로부터 내한촉진제의 경화 촉진 효과를 확인할 수 있었다.
- 2) 내한촉진제의 혼입에 따라 OPC, BB 모두 초기재령으로부터 자유수축변형은 증가하며, 구속조건하에서의 균열의 발생도 빠른 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 내한 촉진제를 혼입함에 따라 OPC, BB 모두 균열 포텐셜은 증가하는 경향이었으며, 본 실험의 구속 조건의 범위에서, OPC의 경우 약 12%, BB의 경우 약 21%정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) OPC, BB 모두 내한촉진제의 혼입에 따른 수축에 의한 균열의 조기화 현상은 내한촉진제 혼입에 의한 자유수축변형량의 증가와 함께 크리프 현상에 의한 응력 이완량의 감소나 구속도의 증가 등이 원인으로서 생각할 수 있다.
- 4) 전체적으로 OPC에 비하여 BB를 적용할 때나 내한촉진제를 사용할 경우 수축량은 증가하여, 균열 발생가능성은 높아진다. 따라서, 동절기 시공에 있어서 BB

와 및 내한촉진제를 적용할 경우에는 수축에 의한 균열발생에 대해 충분히 검토한 후 적용할 필요가 있다고 생각할 수 있다.

요 약

환경부하저감 및 동절기 시공의 효율을 위해 환경부하저감형 한중콘크리트 시공기술로서 고로슬래그시멘트와 내한촉진제를 병용한 콘크리트에 있어 열화의 기점이 되는 수축균열에 관해 검토했다. 그 결과, 고로슬래그시멘트 및 내한촉진제를 첨가함으로써 자유수축변형량 및 동일재령에 있어서 균열포텐셜은 증가하는 경향으로 구속조건하에서의 균열의 발생도 빠른 것을 확인할 수 있었다. 이것은, 자유수축변형량의 증가와 함께 크리프에 의한 응력 이완량의 감소나 구속도의 증가 등이 원인으로서 생각할 수 있으며, 동절기 시공에 있어서 고로슬래그 및 내한촉진제를 적용할 때는 수축에 의한 균열발생에 대해 검토할 필요가 있다고 판단된다.

키워드 : 고로슬래그, 내한촉진제, 수축, 균열, 응력이완, 구속도

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2018R1A5A1025137). This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2018R1D1A1B07049812)

References

1. Yonezawa T, Sakai E, Koibuchi K, Kinoshita M, Kawano H, Energy CO₂, Minimum (ECM) Cement-Concrete System, Concrete Journal, 2010 Sep;48(9):69-73.
2. Tsuji D, Kojima M, Kuroda M, Sakata N, Study on the basic properties of concrete using high amount of ground-granulated blast-furnace slag. Proceedings of the Japan Concrete Institute; 2013 Jul 9-11; Nagoya, Japan, Tokyo (Japan): Japan Concrete

- Institute; 2013. p. 145–50.
3. Yonezawa T, Sakai E, Koibuchi K, Kinoshita M. High-slag cement and structures for substantial reduction of energy - CO₂. fib symposium, Concrete structures for a sustainable community; 2012 Jun 11–14; Stockholm, Sweden, Stockholm (Sweden): Swedish Concrete Association; 2012. p. 163–6.
 4. Tamaki S, Saito K, Okada K, Atarashi D, Sakai E. Properties of a new type of polycarboxylate admixture for concrete using high volume blast furnace slag cement. Special Publication, 2015 Jun;302:113–24.
 5. AIJ. Recommendation for practice of concrete with portland cement and ground granulated blast-furnace slag. Tokyo: Architectural Institute of Japan; 2001. p. 61–3.
 6. AIJ. Recommendation for Practice of Cold Weather Concreting. Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2010. 240 p.
 7. Taniguchi M, Nakamura T, Koike S, Nishi H. Study on effect and mechanism of accelerator for freeze protection. Hokkaido(Japan): Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute; 2015 Mar. 1–11 p. Report No.: 358.
 8. Hama Y, Kamada E. The properties of concrete containing a frost-resistant accelerator. Concrete Journal. 1999 Jan;37(11):3–8.
 9. Nonomura Y, Shimata A, Shimada H, Yoshida S. A fundamental study on expansion of use of frost-resistant accelerator for blast furnace slag cement. Hokkaido(Japan): Civil Engineering Research Institute for Cold Region (Monthly report); 2015 Oct. 45–50 p. Report No.:749.
 10. AASHTO. Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials; 1998. p. 34–99.
 11. Hossain AB, Weiss WJ. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. Cement and Concrete Composites. 2004 Jul;26(5):531–40.
 12. Weiss WJ, Fergeson S. Restrained Shrinkage Testing: The Impact of Specimen Geometry on Quality Control Testing for Material Performance Assessment: Concreep 6, Creep, Shrinkage, and Durability Mechanic of Concrete and other Quasi-Brittle Materials. Ulm FJ, Bazant ZP, and Wittman FH, eds., Elsevier, Cambridge MA, 2001. p. 645–51.
 13. Ugural AC, Fenster SK. Advanced Strength and Applied Elasticity. 3rd ed. America, New Jersey: Prentice Hall PTR, Inc.; 1995. p. 327–34.
 14. Choi HG, Lim MK, Kitagaki R, Noguchi T, Kim GY. Restrained shrinkage behavior of expansive mortar at early ages. Construction and Building Materials, 2015 Jun;84(1):468–76.
 15. Noguchi T, Tomozawa F. Relationship between compressive strength and various mechanical properties of high strength concrete, Journal of Structural and Construction Engineering. 1995 Jun;60(472):11–6.
 16. Weiss WJ. Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete elements [dissertation]. [Evanston (Illinois)]: Northwestern University; 1999. 274 p.