

# 고로슬래그 다량치환 콘크리트의 원전 콘크리트 적용을 위한 내구성능 평가

## Durability Properties of High Volume Blast Furnace Slag Concrete for Application in Nuclear Power Plants

서은아<sup>1</sup> · 이장화<sup>1</sup> · 이호재<sup>1</sup> · 김도겸<sup>1\*</sup>

Eun-A Seo<sup>1</sup> · Jang-Hwa Lee<sup>1</sup> · Ho-Jea Lee<sup>1</sup> · Do-Gyeum Kim<sup>1\*</sup>

(Received February 27, 2017 / Revised March 15, 2017 / Accepted March 15, 2017)

This study evaluated the durability of nuclear power plant concrete. The main parameters were the water-to-binder ratio and admixture type. The results revealed that high-volume ground granulated blast-furnace slag(GGBS) concrete had lower initial strength, while the strength reached higher after 28 days. On the other hand, the initial strength of fly ash blended concrete was high, but the long-term strength of the robbery was low. The measured durability of GGBS blended concrete was found to be better than that of the existing concrete mix for use in the construction of nuclear power plants. Especially, the GGBS blended concrete was more durable than the fly ash blended concrete in terms of chloride attack, carbonation resistivity and freezing–thawing durability in low compressive strength. The effects of concrete compressive strength according to gamma rays were minor.

**키워드** : 원전 콘크리트, 내구특성, 동결융해, 염화물 확산계수, 감마선

**Keywords** : NPP concrete, Durability, Freezing and thawing, Chloride diffusion coefficient, Gamma ray

### 1. 서론

원자력발전소는 다른 발전시설과 비교하여 원료의 높은 효율성과 안정적인 원료수급을 장점으로 전 세계적으로 약 430여기가 가동되고 있다. 최근 온실가스 저감에 대한 국제적인 의식의 확산으로 온실가스 배출 문제에선 친환경 에너지원으로 재조명받고 있다(KAIA 2013). 하지만 원자력발전소는 핵융합을 이용하여 에너지를 생산하기 때문에 방사선 및 핵폐기물 등에 의한 사고발생 위험성이 존재한다. 원자력발전소에서는 운영 중에 발생할 수 있는 사고에 대해 충분한 안전성이 확보된 설계를 적용하고 있다. 격납건물과 보조건물 및 냉각수의 취·배수 구조물 등은 안전성과 관련된 구조물로 별도로 구분되어 관리되고 있다.

국내 원전구조물은 냉각수의 취·배수를 위해 해안가 지역에 위치하기 때문에 가동년수가 증가함에 따라 염해와 황산염을 비롯한 다양한 열화인자로 인한 손상이 발생하고 있다. 또한 원전 구조

물 중 격납건물은 일반적으로 두께 1.2m의 철근 콘크리트 구조물로 구성되어 내·외부 온도차에 의한 온도균열의 제어가 필수적이다(Mun et al. 2015).

현재 원전 콘크리트는 내구성 확보 및 수화열 저감을 위하여 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트를 사용하고 있으며, CP-C2에 의해 시공되고 KEPIC 규정에 의해 관리되고 있다. 하지만 플라이애시의 20% 치환을 통한 콘크리트의 수화열 저감 효과는 한계가 있다. ACI 318-99 code에서는 동결융해 및 해수 등의 화학적 침해를 동시에 받는 콘크리트에 대해서는 플라이애시의 치환율을 최대 25%로 제한하고 있다(ACI 318-99 1999). 반면, 고로슬래그 콘크리트는 최대 치환율을 50%로 제한하고 있으며, 일정한 품질 확보 및 수화열 저감효과가 우수한 장점이 있다(Kim et al. 2014). 이에 따라 원전 콘크리트의 내구성 및 경제성 향상과 수화열 저감을 위해 고로슬래그가 다량 치환된 고성능 콘크리트의 개발과 이에 대한 검증 연구가 진행되고 있다(Ferraris et al. 2006).

\* Corresponding author E-mail: dgkim@kict.re.kr

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil engineering and Building technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

이 연구의 목적은 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 원전 콘크리트 적용성 검토를 위한 것으로 기존 원전 콘크리트와 고로슬래그 다량 치환 콘크리트에 대한 내구특성과 감마선 조사 시험을 수행하였다. 고로슬래그를 제외한 모든 콘크리트 재료는 실제로 원전 콘크리트에 적용되는 재료를 수급하여 실험하였다. 기존 원전 콘크리트는 플라이애시가 20% 치환된 배합(FA20)이며, 신규 배합은 고로슬래그를 50%치환한 배합(BS50)이다. 시험 항목은 재령에 따른 압축강도와 염해 저항성, 동결융해 저항성, 탄산화 저항성이며, 방사선적 내구특성은 감마선 조사에 따른 시험체 온도상승과 및 감마선 조사 전·후의 압축강도 및 화학적 성분 변화를 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 실험방법

### 2.1 배합설계

원전용 콘크리트의 내구특성 평가는 FA20 배합과 BS50 배합에 대하여 콘크리트 설계 강도에 따라 평가하였으며, 배합설계는 Table 1과 같다. 물-결합재비는 50% 배합의 콘크리트 설계강도는 4,000psi(28MPa)이며, 40% 배합은 5,000psi(35MPa)와 6,000psi(41MPa)이다. 6,000psi 배합은 압축강도의 향상을 위하여 5,000psi 배합보다 결합재량을 높게 설계하였다.

### 2.2 사용재료

배합에 사용된 시멘트와 플라이애시, 골재는 국내 원전에서 사용되는 동일재료를 사용하였다. 고로슬래그의 경우 국내 원전 콘크리트에 적용 전이기 때문에 국내 철강에서 제조된 제품을 사용하였다. 시멘트는 원전 납품용 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으

Table 1. Mixture proportions

Specimen	W/B (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						Designed strength
		Water	Cement	FA	BS	Sand	Gravel	
FA20-28	50	163	263	66	-	850	959	28MPa (4,000psi)
FA20-35	40	160	323	81	-	728	1023	35MPa (5,000psi)
FA20-41	40	163	329	82	-	775	962	41MPa (6,000psi)
BS50-28	50	163	163	-	163	856	965	28MPa (4,000psi)
BS50-35	40	160	202	-	202	733	1029	35MPa (5,000psi)
BS50-41	40	163	206	-	206	779	968	41MPa (6,000psi)

Table 2. Chemical compositions and physical properties of binders

Item	Cement	FA	BS	
Density(g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.35	2.93	
Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)	3,256	3,426	4,645	
Chemical characteristic (%)	SiO <sub>2</sub>	20.6	58.4	35.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4	18.4	16.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	7.9	0.5
	CaO	60.4	5.3	39.5
	MgO	4.1	1.7	3.8
	SO <sub>3</sub>	2.5	-	4.0
	K <sub>2</sub> O	1.07	1.4	0.51
	Na <sub>2</sub> O	0.08	1.5	0.24
LOI	2.37	2.41	-0.86	

Table 3. Physical properties of aggregates

Item	Sand	Gravel
Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.77	2.68
Absorption ratio(%)	1.33	2.8
0.08mm passing content(%)	0.91	4.8
Bulk density(kg/m <sup>3</sup> )	1.702	1.662

며, 밀도와 분말도는 3.15g/cm<sup>3</sup>과 3,256cm<sup>2</sup>/g이다. 시멘트와 플라이애시, 고로슬래그의 물리적 특성과 화학적 특성은 Table 2와 같다. 잔골재는 밀도 2,77g/cm<sup>3</sup>의 울진산 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대 치수 25mm, 밀도 2,68g/cm<sup>3</sup>인 울진산 부순 자갈을 사용하였다(Table 3).

### 2.3 내구성 실험방법

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법을 준용하여  $\phi$ 100x200mm의 시험체를 제작하고 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 시험을 수행하였다.

염해저항성은 염해촉진시험인 NT Build 492 시험법에 따랐으며, 양극용액은 0.3N NaOH의 용액을 음극용액은 10% NaCl의 용액을 사용하였다.  $\phi$ 100 x 50mm 시험체를 전위차에 따른 염소이온 침투 저항성 실험을 수행하였다.

동결융해 저항성은 ASTM C 666에 준하여 시편을 제작하여 동결융해 촉진시험을 수행하였다. 배합별로 2개의 시험체에 대하여 상대동탄성계수와 중량감소율을 측정하였다. 탄산화 저항성은 KS F 2584에 준하여  $\phi$ 100 x 200mm 시험체를 제작하고 재령 28일까지의 표준양생 후 탄산화 촉진실험을 수행하였다. 탄산화 깊이는 시험 개시 후 1, 4, 8, 13, 26주가 되었을 때 측정하였다.

## 2.4 감마선 조사 시험

고준위 감마선 및 중성자는 원전의 격납벽 콘크리트 내부에 열을 발생시키며, 압축강도와 탄성계수 등의 역학적 특성 손실 및 균열을 초래할 수 있다. 이에 따라 원전 콘크리트 강도감소 평가 시 중성자 및 감마선 조사 임계치를 사용하고 있다. IAEA의 방사선 조사 임계치는 열중성자  $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ , 감마선  $10^8 \text{Gy}$ 로, ASME에서는 열중성자  $1 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ , 감마선  $2 \times 10^8 \text{Gy}$ 로 제한하고 있다 (IAEA-TECDOC-1025 1998; ASME BPVC Sec. III Division 2 2010). 한국형 원전인 APR 1400의 경우에는 격납건물의 설계 시 고려한 FSAR 상 감마선의 총 누적방사선량이 가장 큰 위치는 Reactor cavity이며, 정상 시  $4.9 \times 10^7 \text{Gy}$ , 사고 시  $6 \times 10^7 \text{Gy}$ 로 격납 건물 설계기준인 ASME( $2 \times 10^8 \text{Gy}$ ) 대비 작다.

감마선은 원전 콘크리트에 대하여 이온 및 금속 결합으로 구성된 고형재료에는 큰 영향이 없다. 하지만 공유결합의 파괴 및 방사선 분해 과정을 통해 공극수의 방사선 분해와 반응 생성물의 방사선 탈수작용으로 인한 미세균열이 발생할 수 있다. 콘크리트에 흡수된 방사선의 열 전환은 콘크리트의 물리적 및 역학적 성능 저하에 영향을 주는 요인 중에 하나이다. (Le Pape et al, 2014; Le Pape et al, 2015)

이 연구에서는 기존 원전 콘크리트와 고로슬래그 다량치환 콘크리트에 대하여 방사선 조사에 따른 강도변화와 화학적 성분변화 분석을 목적으로 감마선 조사시험을 수행하였다. 감마선 조사 시험은 한국원자력연구원에서 수행하였으며,  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  시험체를 제작하여 재령 91일에 고준위 감마선을 조사하여 시험체 온도 상승과 압축강도의 변화를 평가하였다. 사용된 핵종은 Co-60이며, 선량은 시험이 가능한 최대치인  $4.52 \times 10^6 \text{Gy}$ 로 2주간 조사하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 유동성

목표 슬럼프와 공기량은 CP-C2에서 제시하고 있는  $4 \pm 1 \text{in}$ (76~127mm)와 3.5~6.5%로 설정하고 실험을 수행하였다. Table 4는 시험체에 따른 유동성 실험결과와 감수제 및 공기연행제의 첨가율을 나타내었다. 모든 배합의 슬럼프와 공기량은 목표 성능을 만족하였으며, FA20과 BS50에 따른 유동성은 유사하게 나타났다. 감수제 사용량은 설계강도와 단위수량 대비 단위 분체량의 증가에 따라 사용량이 증가하였다. FA20의 AE제 사용량은 고로슬래그 배합에 비해 약 2배 증가하는 경향을 나타내었다.

일반적으로 공기연행제 첨가량은 플라이애시 중의 탄소량, 강

Table 4. Result of fluidity

Specimen	Slump (mm)	Air content (%)	AD (%)	AE (%)
FA20-28	95	4.5	0.5	0.010
FA20-35	90	4.0	0.5	0.010
FA20-41	90	4.0	0.6	0.010
BS50-28	90	4.8	0.5	0.005
BS50-35	100	4.0	0.5	0.005
BS50-41	95	4.0	0.6	0.005

열감량, 분말도 및 유기재료의 양에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그 중 플라이애시 사용에 따른 공기연행제 첨가량의 증가는 주로 플라이애시에 포함된 미연탄소의 공기연행제 흡착작용으로 판단된다(Lee et al, 2000).

### 3.2 압축강도

재령에 따른 압축강도 측정결과와 압축강도 발현율은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 모든 배합은 변수와 관계없이 설계압축강도를 만족하였으며, 재령 7일까지 BS50의 압축강도는 F20보다 약

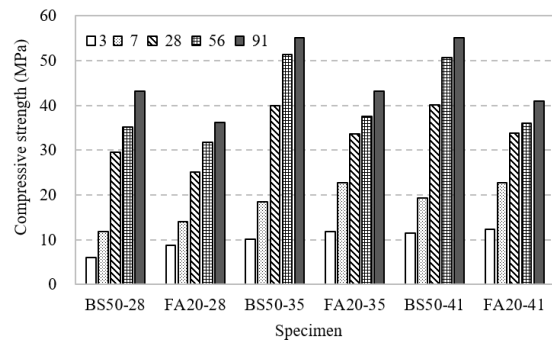


Fig. 1. Test result of compressive strength

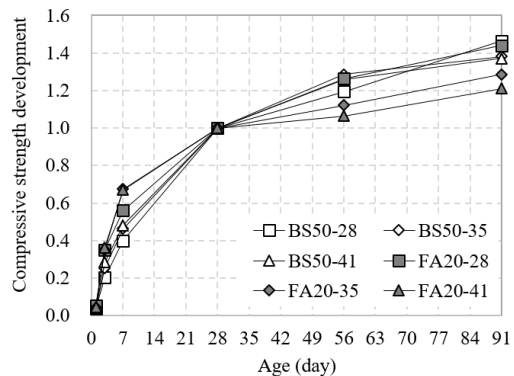


Fig. 2. Compressive strength development

20% 정도 낮게 나타났다. 하지만 재령 7일 이후부터의 장기 압축 강도는 BS500I FA20보다 1.2~1.4배 높게 나타났다.

압축강도 발현율은 재령 28일의 압축강도를 기준으로 각 재령에 대하여 평가하였다. FA20은 설계 압축강도와 관계없이 초기 재령에서 높은 발현율이 나타났지만, 28일 이후의 압축강도의 증가율은 다소 낮게 나타났다. 반면 BS50은 초기 재령에서 FA20보다 평균 20%의 낮은 발현율을 나타냈지만, 재령 28일을 기점으로 강도 발현율이 급격히 증가하였다. 이는 고로슬래그 미분말이 시멘트의 수화과정에서 발생한 알칼리와 반응하여 치밀한 구조의 수화물 경화체를 형성함으로써 장기내구성이 증진된 것으로 판단된다(Jeong et al, 2015; Mehta et al, 2004).

### 3.3 염해 저항성

재령 91일에서의 염화물 확산계수는 Fig. 3에 나타내었다. 28MPa급과 35MPa급에서는 FA20의 염화물 확산계수가 BS50과 비교하여 각각 약 1.5배와 1.3배 높게 나타났다. 41MPa 급에서는 FA20의 염화물 확산계수가 BS50보다 약 10% 높게 나타났다.

또한 저강도의 콘크리트의 염화물 확산계수는 배합설계의 영향을 현저하게 받았지만, 강도가 증가함에 따라 염화물 확산계수에 대한 혼화재 종류 및 치환율의 영향은 감소하였다. 이는 압축강도가 증가함에 따라 W/B의 감소와 결합재량의 증가로 인하여 콘크리트 내부 조직이 치밀해져 물리적인 저항능력이 향상되기 때문이다. 또한 시멘트의 성분 중 염화물을 구속하는 것으로 밝혀진 CsA와 CsAF가 적어지기 때문으로 판단된다(Yang et al, 2004). 결과적으로 BS50의 염화물 확산계수는 기존 원전 콘크리트인 FA20보다 1.1~1.5배 낮게 측정되어 기존 원전 콘크리트와 동등이상의 염해저항성이 확보되었다.

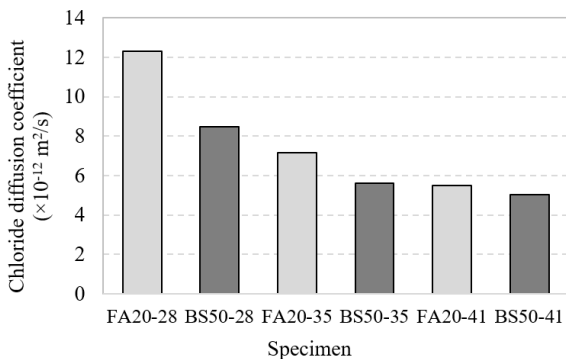


Fig. 3. Chloride diffusion coefficient

Table 5. Carbonation depth

Specimen	Carbonation depth(week, mm)				
	1	4	8	13	26
FA20-28	0	4.4	7.5	9.9	12.3
BS50-28	0	2.4	4	5.3	7.81
FA20-35	0	0	1.8	2.9	3
BS50-35	0	0	1	3.6	3.71
FA20-41	0	0	1.7	1.9	2
BS50-41	0	0	0.3	1.7	2.17

### 3.4 탄산화 저항성

원전 콘크리트의 탄산화 침투깊이 측정결과는 Table 5에 나타내었다. 탄산화 깊이는 압축강도가 증가함에 따라 현저히 줄어드는 경향이 나타났다. 특히 목표 압축강도가 28MPa에서 35MPa로 증가함에 따라 탄산화 깊이는 약 70% 저감되었다. 일반적으로 압축강도가 증가함에 따라 W/B가 감소하여 콘크리트의 공극률이 감소하게 된다. 이러한 공극률의 감소는 CO<sub>2</sub> 가스의 유입 저항성을 향상시키기 때문에 탄산화 저항성이 향상된다(Choi et al, 2009).

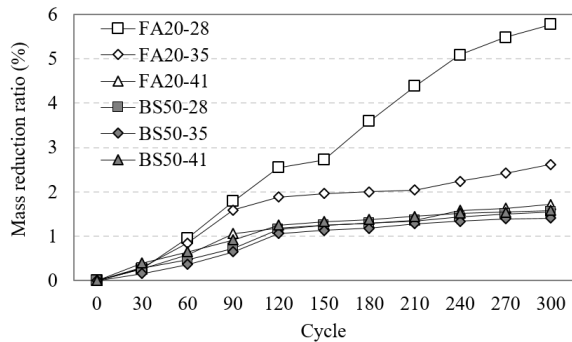
28MPa급에서는 BS50의 탄산화 저항성이 FA20과 비교하여 약 37% 향상되었다. 반면, 35MPa이상에서는 FA20과 BS50의 탄산화 깊이가 1mm 이하로 그 차이가 미미하였다. BS50은 기존 원전 콘크리트와 비교하여 동등이상의 탄산화 저항성을 확보한 것으로 평가되었다.

### 3.5 동결융해 저항성

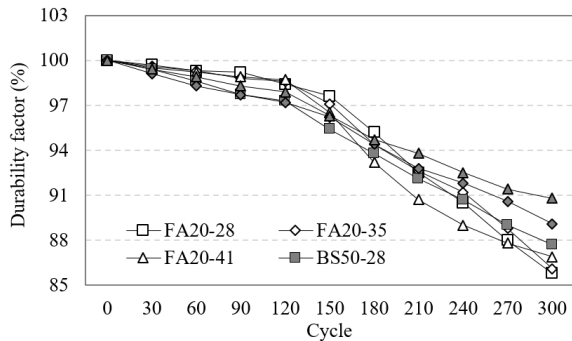
동결융해 촉진시험에 따른 각 Cycle별 중량감소율과 상대동탄성계수는 Fig. 4에 나타내었다. 중량감소율은 동결융해로 인한 콘크리트의 표면부 박락으로 인한 중량감소를 의미하며 낮을수록 동결융해 저항성이 우수하다(Park et al, 2011; Haiyan et al, 2013). 동결융해 저항성을 판단하기 위한 상대동탄성계수의 기준은 300 cycle에서 60이상으로 제시되고 있다.

중량감소율이 가장 높은 시험체는 FA20-28으로, 270cycle이후의 중량감소율에 대한 증가율은 감소하였으며, 300cycle에서의 감소율은 5.8%이었다. 한편, BS50의 300cycle 중량감소율은 평균 1.5%로 FA20과 비교하여 현저히 낮게 나타났다. 또한 BS50 시험체는 300cycle에서 육안으로 보이는 표면 박리는 거의 없었다. 하지만 FA20 시험체의 경우 180cycle부터 육안으로 보이는 표면박리가 나타났다.

상대동탄성계수는 압축강도가 증가함에 따라 증가하였으며, FA20과 BS50의 평균 동결융해 내구성지수는 86.3%와 89.2%로



(a) Mass reduction ratio of freezing and thawing



(b) Durability factor

Fig. 4. Result of freezing-thawing resistance

나타났다. 결과적으로 모든 시험체의 내구성지수는 85% 이상으로 동결융해 저항성이 우수하였으며, 중량 손실률에 대해서는 고로슬래그 배합이 유리하였다.

### 3.6 감마선 조사에 따른 콘크리트의 압축강도와 화학적 성분 변화 분석

감마선은 콘크리트의 구성성분의 화학적 성분 및 공극수에 영향을 미쳐 화학성분의 분해과정에서 열을 발생시킨다. 콘크리트의 감마선 조사에 의한 열 발생은 콘크리트 역학적 성능(강도 등)의 저하에 영향을 끼친다. 따라서 감마선 조사에 따른 시험체의 온도 이력과 온도상승으로 인한 콘크리트 압축강도에 대한 영향도를 분석하였다. Fig. 5에는 감마선 조사에 따른 실험실 온도와 시험체 온도를 나타내었으며, Fig. 6에는 기존 원전 콘크리트와 고로슬래그 다량치환 콘크리트의 감마선 조사 전·후의 압축강도를 나타내었다.

시험체 온도는 실험실 온도보다 12.5~22.4°C 높게 나타났으며, 24.9~38.2°C의 범위로 나타났다. 따라서 4.52x10<sup>6</sup>Gy 선량의 감마선에 의한 시험체의 온도 상승량은 콘크리트의 역학적 성능에 영향을 미칠 정도로 발생하지 않았다.

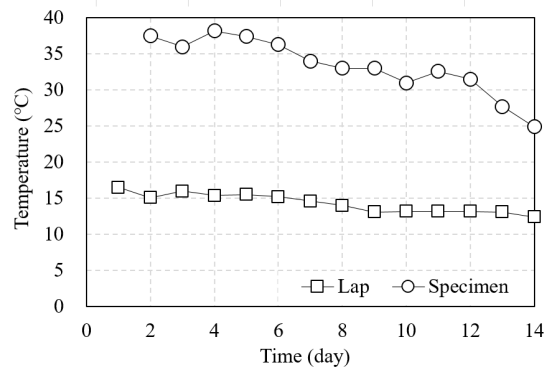


Fig. 5. Temperature record

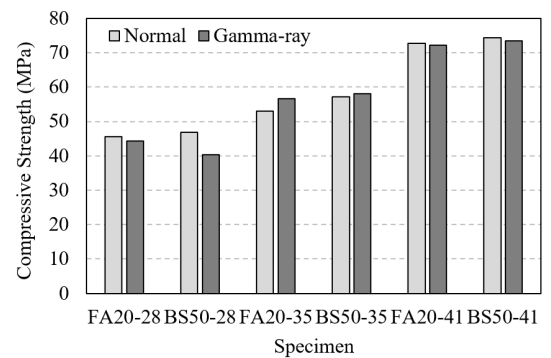


Fig. 6. The effect of gamma-ray radiation on concrete strength

감마선 조사 전·후의 압축강도 변화량은 모든 시험체에서 미미하게 나타났으며, 감마선 조사 후의 압축강도는 모두 설계강도 이상을 확보하였다. 또한 FA20과 BS50의 감마선 조사 전·후의 압축강도 변화는 유사한 경향을 나타냈다. 특히, 압축강도 증가함에 따라 감마선 조사에 따른 압축강도의 영향이 현저히 감소하였다.

감마선 조사에 따른 콘크리트의 화학적 특성 분석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 감마선 조사 전·후의 화학적 구성성분의 변화는 FA20과 BS50이 유사한 경향을 나타내었다. 화학적 성분분석결과, 가장 많은 구성성분은 SiO<sub>2</sub>와 CaO 성분이었으며, 전체 성분의 약 70%를 차지하고 있었다. 특히, SiO<sub>2</sub>는 가장 많은 부분을 구성하고 있으며, 감마선을 조사한 이후 SiO<sub>2</sub> 구성 비율의 증감과 압축강도의 증감은 유사한 경향을 나타냈다. 일반적으로 SiO<sub>2</sub>와 CaO 성분은 C-S-H 상을 이루는 주요 화합물이며, 성분의 변화는 콘크리트 특성에 영향을 준다. 하지만 감마선의 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 TG-DTA를 통한 내부 수화구조 분해 평가 및 미세구조분석을 통한 수화구조 파괴와 공극구조 분석 등의 다각적인 평가와 분석이 필요할 것으로 판단된다.

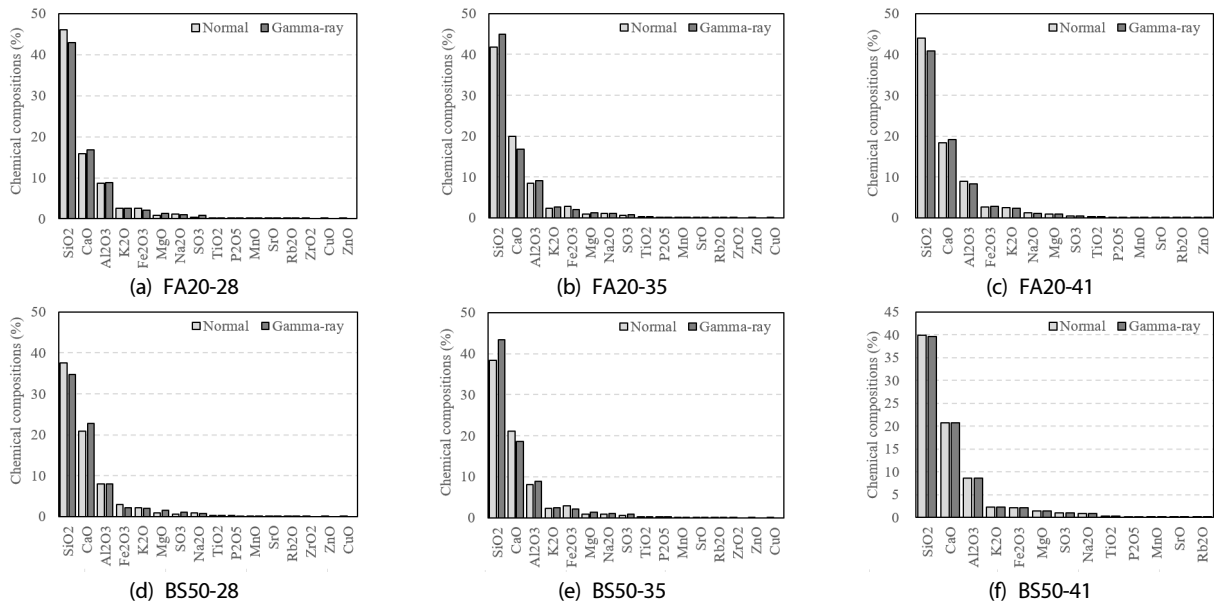


Fig. 7. Chemical compositions

#### 4. 결론

이 연구에서는 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 원전 콘크리트 적용성을 평가하기 위해 내구특성평가와 감마선 조사에 따른 압축강도 및 화학적 성분 분석을 하였으며, 기존 원전 콘크리트와의 성능검토를 수행하였다. 내구특성 분석항목은 콘크리트의 압축강도와 염화물 및 탄산화 저항성, 동결융해 저항성이며, 감마선 조사에 따른 압축강도 및 화학적 성분의 변화를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 압축강도는 초기재령에는 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트보다 낮게 나타났다. 반면, 재령 28일 이후에는 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 장기강도는 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트보다 1.2~1.4배 높게 나타났다.
2. 염화물 확산계수는 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트가 기존 원전 콘크리트보다 약 10% 낮게 나타나 염해 저항성이 향상 되었다.
3. 탄산화 깊이는 설계강도 28MPa급의 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트가 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트보다 약 1.6 배 높게 측정되었다. 반면, 설계강도 35MPa급 이상의 콘크리트의 탄산화 깊이의 차이는 미미하였다.
4. 동결융해에 따른 시험체의 중량 감소율은 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트가 5.8%로, 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트는 1.5%로 나타났다.

5. 동결융해 상대동탄성계수는 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트가 더 높았으며, 모든 시험체가 85% 이상으로 측정되어 동결융해 저항성이 우수하였다.
6. 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 감마선 조사에 의한 압축강도 변화는 기존 원전콘크리트와 유사한 경향을 나타냈으며, 감마선을 조사한 이후 SiO<sub>2</sub> 구성 비율의 증감과 압축강도의 증감은 유사한 경향을 나타냈다.
7. 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 내구특성과 감마선 조사에 따른 압축강도 및 화학성분 검토 결과, 기존 원전 콘크리트와 유사한 성능을 나타내었다. 하지만 원전 콘크리트로 적용을 위해서는 시공성과 장기적인 내구성, 중성자 및 감마선의 영향성, 차폐성 등 의 정량적인 평가와 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20161510300420).

#### References

ASME BPVC Section III Division 2, (2010). Rules for Construction of Nuclear Facility Components—Code for Concrete Containments,

- ASTM C 1012. (2010). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, In Annual Book of ASTM.
- ASTM C 666. (1984). Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, In Annual Book of ASTM Standards.
- Choi, S., Lee, K.M., Jung, S.H., Kim, J.H. (2009). A study on the carbonation characteristics of fly ash concrete by accelerated carbonation test, Journal of the Korea Concrete Institute, **21(4)**, 449-455 [in Korean].
- Ferraris, C.F., Obla, K.H. Hill, R. (2006). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and Concrete Research, **31(2)**, 245-255.
- Haiyan, M., Hongfa, Y., Wei, S. (2013). Freezing-thawing durability and its improvement of high strength shrinkage compensation concrete with high volume mineral admixtures, Construction and Building Materials, **39**, 124-128.
- IAEA-TECDOC-1025 (1998). Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Concrete Containment Buildings.
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015). Effects of limestone powder and silica fume on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement mortars, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(2)**, 127-136 [in Korean].
- KAIA. (2013) Ministry of Land, Infrastructure and Transport R&D Trends Teport(plant), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 176.
- Kim, D.Y., Cho, H.K., Lee, H.S. (2014). Effects of the reaction degree of ground granulated blast furnace slag on the properties of cement paste, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(6)**, 723-730 [in Korean].
- KS F 2584. (2010). Standard Test Method for Accelerated Carbonation of Concrete, KSA.
- Le Pape, Y., Field, K.G. Remec, I. (2015). Radiation effects in concrete for nuclear power plants – part ii: perspective from micromechanical modeling, Nuclear Engineering and Design, **282**, 114-157.
- Le Pape, Y., Rosseel, T.M., Remec, I., Field, K.G., Wall, J.J., Guimaraes, M., Saouma, V. (2014). Perspectives on the role of concrete structures on the license renewal and long term operation on U.S. nuclear power generation, Technical Innovation in Nuclear Civil Engineering-TINCE 2014.
- Lee, S.H., Kim, H.J. (2000). A factor of fly ash on fluidity of fly ash cement paste, Proceedings of the Korea Concrete Institute, Korea, **12(1)**, 153-158.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2004). Concrete, Microstructure, Properties, and Materials, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 659.
- Mun, J.S., Yang, K.H., Kim, D.G. (2015). Evaluation on in-site compressive strength of high-strength concrete mass elements under cold weather, Journal of Korea Institute of Building Construction, **15(6)**, 589-595 [in Korean].
- NT Build 492. (1991). Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Nonsteady-state Migration Experiments, Nordtest Method.
- Park, K.P., Kim, S.S., Lee, S.T., Kim, J.P., Jung, H.S. (2011). Properties on the freeze-thaw of concrete subjected to seawater attack, Journal of the Korea Concrete Institute, **23(1)**, 23-30 [in Korean].
- Yang, E.I., Kim, M.Y., Min, S.H (2004). Chloride diffusion in hardened concrete with concrete properties and testing method, Journal of the Korea Concrete Institute, **16(2)**, 261-268 [in Korean].

#### 고로슬래그 다량치환 콘크리트의 원전 콘크리트 적용을 위한 내구성능 평가

이 연구에서는 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 원전 콘크리트 적용을 위하여 기존 원전 콘크리트와의 내구성능 비교 및 분석을 수행하였다. 연구결과에 따르면 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 압축강도는 초기강도는 기존 원전 콘크리트보다 낮지만, 우수한 장기강도를 나타내었다. 반면, 기존 원전 콘크리트의 초기강도는 높았지만, 장기강도 발현율이 낮게 나타났다. 내구성능의 평가결과, 고로슬래그를 50% 치환한 콘크리트의 내구성능은 모든 평가항목에서 플라이애시 20% 치환 콘크리트와 비교하여 동등이상의 성능을 나타내었다. 특히, 저강도에서의 고로슬래그 50% 치환한 콘크리트는 염해 저항성과 탄산화 저항성, 동결융해 저항성의 향상효과가 뚜렷하게 나타났다. 반면, 감마선 조사에 따른 콘크리트 압축강도와 화학성분의 변화는 미미하게 나타났다.