

콘크리트 혼합재의 석회반응성에 관하여

장복기[†] · 윤정한*

전남대학교 신소재공학부

*전남대학교 자원공학과

(2002년 1월 7일 접수; 2002년 3월 22일 승인)

A Study on the Lime Reactivity of Concrete Admixtures

Pok-Kie Chang[†] and Chung-Han Yoon*

Department of Materials Science and Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Department of Mineral and Energy Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received January 7, 2002; Accepted March 22, 2002)

초 록

고로슬래그와 플라이 애쉬의 석회 반응성을 수열조건 하에서 각각 고찰하였다. 수열반응 조건은 CaO-SiO₂ 비(C/S), 수열온도(140°C와 180°C) 및 반응시간(20~60시간)이었다. 수열반응성은 각 수경성 재료에 함유된 SiO₂와 (순수)석회 사이의 반응을 및 반응 시편의 압축강도를 측정하여 조사하였다. 그리고 본 반응성 고찰을 위하여 기공률 측정 및 XRD 분석도 수행하였다. 압축강도 물성은 시편의 기공률 및 CaO-SiO₂ 반응성과 연계하여 고찰하였으며, XRD 분석으로 수열반응 중 C/S가 변화함을 확인할 수 있었다. 고로슬래그 중의 SiO₂는 플라이 애쉬에 함유된 SiO₂ 보다 석회반응성이 우수하여 전자의 경우 시편은 훨씬 높은 강도를 나타내었다. 수열반응 온도 180°C 및 40시간의 조건에서 고로슬래그는 최고 강도 807 kg/cm²을 나타냈으며, 플라이 애쉬의 경우 최고 강도는 397 kg/cm²이었다.

ABSTRACT

This paper addresses the hydrothermal reactivity of blast furnace slag and fly ash with lime, respectively. The test conditions were CaO-to-SiO₂ ratio (C/S), autoclaving temperature (140°C and 180°C) and time (20 to 60 h). The study was carried out in terms of the hydrothermal reactivity between SiO₂ contained in each hydraulic material and (pure) lime and the compressive strength of autoclaved specimens. Porosity measurement and the XRD analysis were also made in order to ascertain the hydraulicity of the siliceous materials. Compressive strength of the specimens was interpreted in terms of porosity and the reactivity of CaO and SiO₂. And the XRD analysis showed the C/S change of the hydrates in the course of autoclaving process. SiO₂ in the blast furnace slag was more reactive with CaO than that in the fly ash and consequently the blast furnace slag specimens resulted in much higher compressive strength. A maximum compressive strength of 807 kg/cm² was obtained for the blast furnace slag at the autoclaving condition of 180°C and 40 h, while only 397 kg/cm² was maximally to achieve with fly ash.

Key words : Blast furnace slag, Fly ash, Hydrothermal reactivity, Compressive strength

1. 서 론

고로 슬래그와(화력발전소에서 발생하는) 플라이 애쉬는 이미 잘 알려진 것처럼 시멘트 및 콘크리트의 혼합재로 널리 사용된다.¹⁻⁵⁾ 그러나 이들 두 재료가 시멘트 화학적으로 즉, 수경화 반응에 있어서 서로 어떻게 차이를 나타내는지는 실제 활용되고 있는 만큼 충분히 규명되어 있지 않다.

한편, 고로 슬래그와 플라이 애쉬는 수열반응을 이용한

콘크리트 구조물의 제조에 있어서 규산질(SiO₂) 원료로도 활용되는 바,⁴⁻⁹⁾ 그 예로서 lime-sand stone^{10,11)}과 AAC (Autoclaved Aerated Concrete)⁷⁾ 및 조립식 건축재 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 수열반응시 고로 슬래그와 플라이 애쉬가 각각 석회와 어떻게 반응하는지를 조사하였다. 일반 상압상온반응과 수열반응 사이에는 유사성(parallelism)이 존재하므로 본 연구의 수열반응성 비교결과는 전자의 일반적인 반응에도 적용하여 고찰할 수 있다고 본다. 예를 들면, 고로 슬래그는 포틀랜드 시멘트를 약 40% 대체하여 사용되나 플라이 애쉬 경우는 10% 정도가 보통인 바, 그 이유의 일면은 본 연구에서 얻은 결과로도 해석이 가능하다.

[†]Corresponding author : pkchang@chonnam.ac.kr
Tel : 82-62-530-1706 Fax : 82-62-530-1699

Table 1. Chemical Composition and Physical Property of Raw Materials

Raw Mat.	Chemical Composition								S ³⁾ (cm ² /g)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O ¹⁾	Ig.loss ²⁾	Total	
Blast furnace slag	41.21	34.72	14.91	7.28	0.64	0.71	0.0	99.47	4,530
Fly ash	2.64	55.96	22.82	1.94	6.03	5.02	4.62	99.03	6,260

1) Na₂O+K₂O

2) Ignition loss at 1,000°C

3) Specific surface area according to Blaine

본 연구에서는 석회원으로서 시약급 Ca(OH)₂를 사용하고, 여러 조건(원료의 배합비, 수열반응 온도 및 시간) 하에서 이 석회와 고로 슬래그 및 플라이 애쉬 사이의 반응을 조사하였다. 원료배합비 즉, C/S (CaO/SiO₂ 몰비)는 대표적인 수열반응 수화물인 tobermorite(5CaO·6SiO₂·5H₂O)와 xonotlite(6CaO·6SiO₂·H₂O) 그리고 포틀랜드 시멘트의 수화물인 afwilite(3CaO·2SiO₂·3H₂O)의 C/S를 참고로 하여 각각 0.8, 1.0, 1.3으로 정하였으며, 수열반응 온도는 140°C와 180°C로 하고 반응시간은 각각 20, 40 및 60시간으로 하였다.

2. 실험방법

2.1. 원료

석회(CaO) 원료로는 시약급의 Ca(OH)₂를 사용하였다. 그리고 'H고로시멘트'의 고로 슬래그와 'H화력발전소'의 플라이 애쉬의 화학조성 및 물성(비표면적)은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 고로 슬래그는 플라이 애쉬와 달리 자체 내에 다량의 CaO를 함유하고 있으며 그 CaO/SiO₂ 몰비만도 C/S=1.3이 된다. 이는 곧 포틀랜드 시멘트의 대표적인 수화물인 afwilite(3CaO·2SiO₂·3H₂O)의 C/S(=1.5)에 근접하는 큰 값이다. 따라서 고로 슬래그는 자신(SiO₂)의 수화에 필요한 CaO를 이미 자체 안에 충분히 함유하고 있는 것이다.

한편 플라이 애쉬는 Table 1에서 보는 것처럼 상당량(4.62%)의 작열감량을 나타내는데, 이는 대부분이 미연소 탄소 때문으로 보인다. Fig. 1의 DTA/TGA 결과를 보면 500°C 부근에서 미연소 탄소의 연소로 보이는 발열피크가 나타나며, 이때 약 4.5%의 무게감량이 확인되고 있다. 플라이 애쉬는 400 메쉬의 체(37 μm)를 통과한 미분만을 사용하였다.

Fig. 2의 XRD 결과를 보면 플라이 애쉬는 주로 장석질(2θ=22-28)의 유리상으로 되어 있으면서 또한 결정상의 규산(quartz) 및 수열불활성의 mullite를 함유하고 있다. 한편 고로 슬래그는 모두 유리상으로만 되어 있다. 화학조성 및 유리상의 측면에서 고려할 때 고로 슬래그는 플라이 애쉬보다 콘크리트의 혼합재로서 더 적합하게 보인다.

고로 슬래그와 플라이 애쉬의 입도분석 결과를 Fig. 3

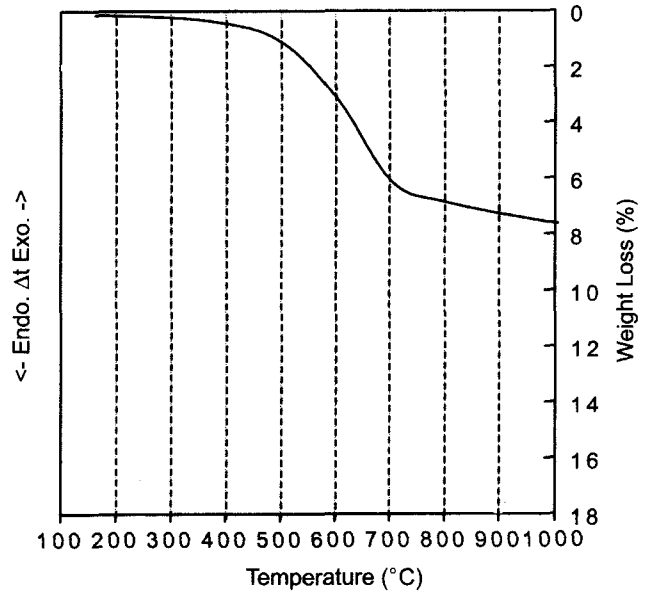


Fig. 1. DTA and TGA on the fly ash.

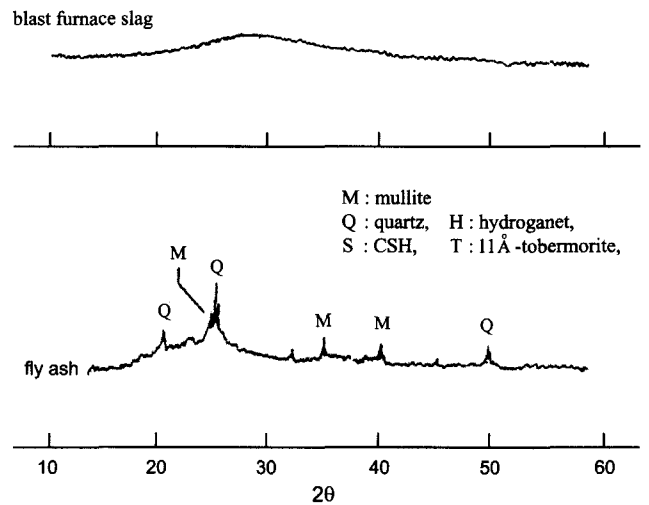


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of the raw materials.

에 Bennet 좌표표를 써서 도시하였다. 고로 슬래그는, 플라이 애쉬와 비교하여, 상대적으로 기울기가 낮은 분포선을 나타내는데, 이는 입도가 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있음을 의미한다. 또 y-축의 절편 위치가 높은 것으로 보아

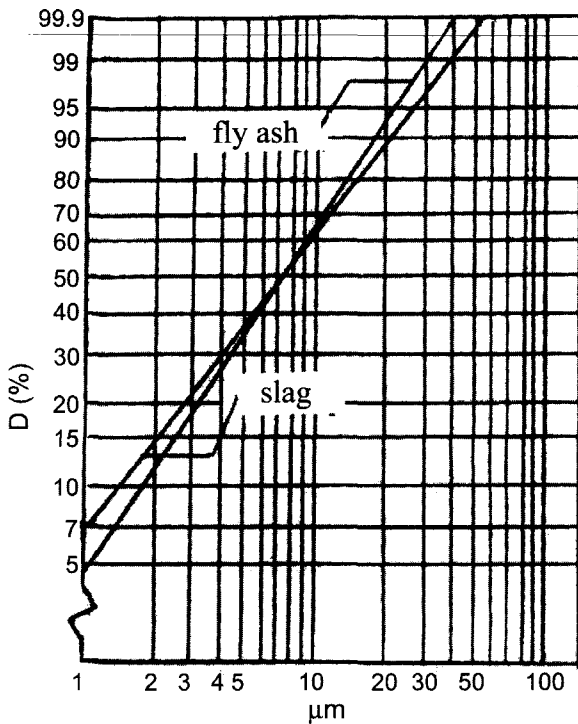


Fig. 3. Fineness of the blast furnace slag and the fly ash (D: passage).

고로 슬래그에는 그만큼 플라이 애쉬보다 조립이 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 그리고 비표면적(Table 1)을 보면, 플라이 애쉬가 고로 슬래그보다 훨씬 큰 값을 보여주고 있다.

2.2. 시편제조 및 수열반응

Table 1의 분석치에 따라, 석회(Ca(OH)₂)와 고로 슬래그(SiO₂) 및 석회와 플라이 애쉬(SiO₂)의 배합비가 각각 C/S

(CaO:SiO₂ 볼비)=0.8, 1.0, 1.3이 되게 서로 혼합하였다. 고로 슬래그는 자체 내에 CaO를 다량 함유하고 있지만, 시편제조를 위한 원료배합 시 이를 무시하였다. 따라서 만일 고로슬래그 자체 내의 CaO까지를 합산하면, 고로슬래그의 경우 C/S는 각각 2.07, 2.28, 2.58로 그 비율이 크게 증가한다.

이렇게 배합한 각 원료 혼합물에 W/S(물:고형물 중량비)=0.2가 되도록 물을 첨가하고 충분히 혼합하였다. 그리고 30 kg/cm²의 압력으로 가압성형하여 직경 20 mm, 높이 25 mm 크기의 원주형 시편을 만들었다. 이들 성형체는 Marui사의 autoclave(승온 및 냉각속도 5°C/min)를 사용하여 각각 140°C와 180°C에서 20, 40, 60시간 동안 수열반응을 행하였다.

2.3. 물성측정

수열반응 시편의 압축강도는 Instron사의 Instron 115를 사용하여 10 kg/s의 가압속도로 측정하였다.

고로 슬래그와 플라이 애쉬의 화학조성(Table 1)은 KS L 5120이 정한 분석법에 따라 정량하였다.

또 석회와 규산질 사이의 반응(물)을 조사하기 위하여 수열반응 시간 5, 10, 20, 40, 60시간 별로 미반응한 석회(CaO) 및 규산(SiO₂)을 정량하였는 바, 본 정량은 Kondo¹²⁾가 제시한 분석법에 따라 정량하였다.

KS L 3114에 준하여 시편의 기공률을 측정하였으며, 수화물의 결정상을 확인하기 위하여 Rigaku사의 Geigerflex XRD로 X-선 회절분석을 수행하였다.

시편들의 기공구조를 조사하기 위하여 우선 N₂ 개스 흡착등온선을 구하였다. 이때 등온선은 Micrometrics사의 ASAP 2000을 사용하였으며, 본 장치에 부착된 컴퓨터는 기공의 모양을 모세공으로 가정하고 분석하는 BJH법에 따라 기공구조를 분석하였다.

Table 2. Reactivity and the Total Reactivity of lime and SiO₂ in the Blast Furnace Slag Specimen(BS) and the Fly Ash Specimen(FA), Respectively

Specimen	Time (h)	Free (%)		Total Reactivity (α) ¹⁾	Different. Reactivity ²⁾	
		CaO	SiO ₂		Time (h)	Δα ²⁾
BS	5	16.3	32.5	0.78	5	0.31
	10	5.4	28.7	0.87		
	20	0	16.1	0.93	10	0.30
	40	0	10.8	0.96		
	60	0	6.9	0.98		
FA	5	38.1	64.3	0.47	20	0.19
	10	17.5	48.3	0.57		
	20	8.6	41.0	0.74	40	0.15
	40	0	34.5	0.81		
	60	0	32.6	0.82		

1) Reacted(CaO+SiO₂)/Total(CaO+SiO₂)

2) Differential Reactivity(Δα=α_{BS}-α_{FA}) at each autoclaving temperature

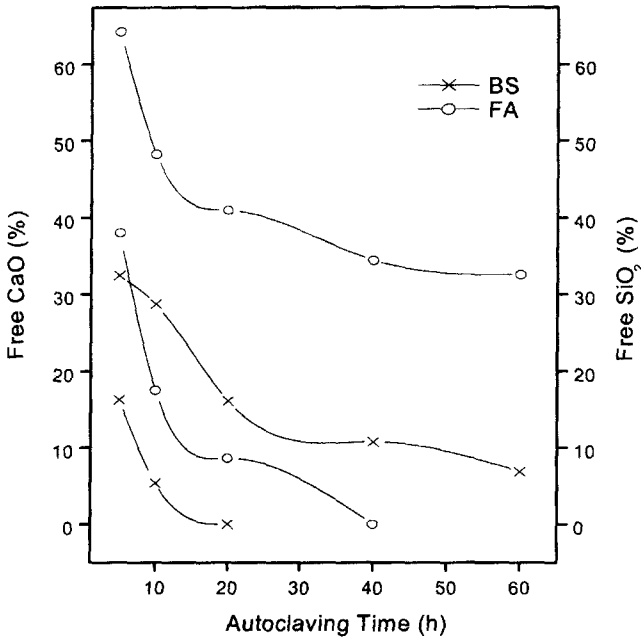


Fig. 4. Reactivity of lime and SiO₂ in the blast furnace slag specimen(BS) and the fly ash specimen(FA), respectively.

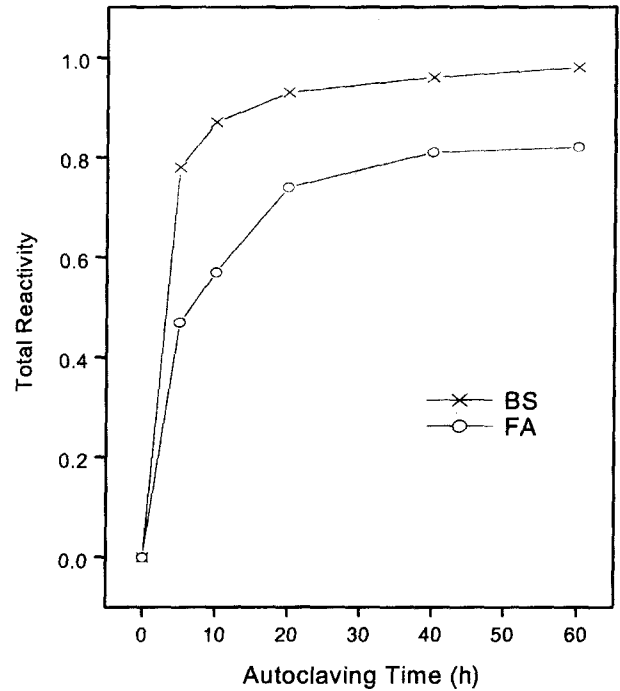


Fig. 5. Total reactivity of lime and SiO₂ in the blast furnace slag specimen(BS) and the fly ash specimen(FA), respectively.

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응률 측정

3.1.1. 미반응 CaO 및 SiO₂

석회(Ca(OH)₂)와 규산(원료 중의 SiO₂)의 수열반응 관계를 알기 위하여, 압축강도가 가장 우수한 조건(고로 슬래그: C/S=0.8 및 반응 40시간, 플라이 애쉬: C/S=1.3 및 반응 60시간 그리고 각 180°C, “3. 반응조건과 강도” 참조)의 경우에 대하여 반응시간 별 미반응 석회 및 미반응 규산의 양을 각각 측정하였으며 그 결과를 Table 2 및 Fig. 4에 나타냈다.

Fig. 4에서 고로 슬래그의 경우를 보면, 석회는 수열반응 20시간 내에 이미 전량 반응한 반면 규산은 60시간 후에도 아직 미반응한 양이 6.9%나 된다. 이같이 미반응 규산이 잔류하는데도 석회는 전량 반응하게 된 이유는, 석회는 규산과 CSH(xCaO · ySiO₂ · zH₂O)상을 생성하는 외에 슬래그 내의 Al₂O₃와도 반응하여 gehlenite 수화물(2CaO · Al₂O₃ · SiO₂ · 8H₂O)을 생성하는 때문이라 보인다. 그뿐만 아니라 반응시간에 따라 CSH상 자체의 C/S비(x/y)가 점차 변하는 바, 반응초기에는 C/S 값이 큰 C/S > 1.5의 CSH상이 생성된다. 이 C/S 비는 반응시간에 따라 점차 약 0.8까지 저하한다(Fig. 6의 XRD 분석 참조!).

한편 플라이 애쉬는 수열반응이 아주 더디게 진행되어 미반응 석회는 반응 40시간이 되어야 사라지며, 규산은 60시간이 경과한 후에도 아직 30% 이상이 미반응 상태로 남아 있다. 즉, 플라이 애쉬는 높은 분말도(큰 비표면

적)에도 불구하고 수열반응속도가 고로 슬래그보다 훨씬 느림을 알 수 있다. 석회의 반응속도만 고려할 때 20:40 시간, 즉 반응속도는 고로 슬래그 경우의 1/2이다.

3.1.2. 반응률

원료 배치(batch)에 함유된 석회(Ca(OH)₂ 및 CaO)와 규산의 총량당 반응시간에 따른 이들 두 성분의 전체 수열반응량 관계[반응(석회+규산)/총(석회+규산)]를 계산하여 Fig. 5 및 Table 2에 나타냈다. 고로 슬래그의 경우 반응 5시간 이내에 석회와 규산의 거의 80%가 반응을 완료하고, 20시간 이후에는 반응시간이 더 길어져도 반응률은 거의 증가하지 않는다.

또 플라이 애쉬는, 이미 Fig. 4에서 확인한 바와 같이, 고로 슬래그보다 반응률이 상당히 낮다. 그리고 그 차이는 반응초기에 더 크며(Table 2의 “differential reactivity” 참조), 반응 40시간 이후부터는 거의 일정한 차이로 진행된다. 즉, 플라이 애쉬는 수열반응속도가 원래 느릴뿐만 아니라, 반응시간을 오래 늘려도 고로 슬래그의 반응률을 능가할 수 없다.

3.2. XRD 분석

Fig. 6에 X-선 회절분석 결과를 도시하였다. 본 XRD 분석결과는, Figs. 4 및 5의 경우와 마찬가지로, 압축강도가 가장 우수한 C/S 및 반응온도(180°C) 조건의 시편들에 대한 것이다.

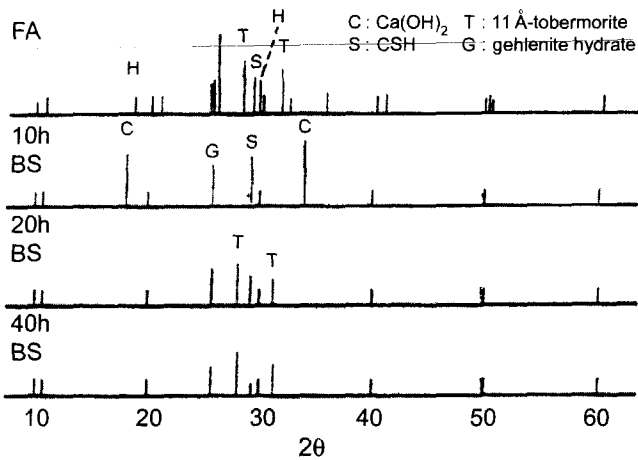


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the fly ash specimen(FA) and the blast furnace slag specimen(BS), respectively.

Table 3. Compressive Strength and Porosity of the Blast Furnace Slag Specimens

CaO/SiO ₂	Temperature (°C)	Time (h)	Compres. Strength (kg/cm ²)	Porosity (%)
0.8	140	40	113	36.9
		60	127	36.1
	180	40	634	8.1
		60	807	6.3
	140	40	146	-
		60	170	-
1.0	180	40	481	14.0
		60	714	10.1
	140	40	185	27.2
		60	226	25.9
	180	40	425	16.1
		60	492	14.7
140	40	425	16.9	

수열반응 10시간이 경과한 고로 슬래그의 경우를 보면, 아직 미반응한 소석회 결정피크와 C/S=1.0~>1.5의 CSH(I, II)상이 관찰되며 동시에 gehlenite 수화물의 생성도 확인된다. 한편, 반응 20시간인 시편에서는 소석회가 사라지고 없고, 석회규산질 수화물로는 CSH와 동시에 11 Å-tobermorite(C/S=0.8)가 관찰되고 있다. 또 반응시간이 40시간일 때는 이미 생성된 11 Å-tobermorite 결정이 한층 더 잘 발달했음을 짐작할 수 있다.

한편, 다량의 Al₂O₃를 함유하는 플라이 애쉬는 수열반응물로서 hydrogarnet[일반식: C₃(A,F)S_nH_(6-2n)]을 생성하고 있다. hydrogarnet은 분자식에서 보는 것처럼 CSH 생성에 필요한 석회를 다량 소비하며, 또 결정이 입방형이어서

Table 4. Compressive Strength and Porosity of the Fly Ash Specimens

CaO/SiO ₂	Temperature (°C)	Time (h)	Compres. Strength (kg/cm ²)	Porosity (%)
0.8	140	40	178	27.5
		60	181	27.0
	180	20	239	15.1
		40	372	9.9
	140	40	181	26.7
		60	185	25.1
1.3	180	20	252	15.2
		40	386	7.9
	60	397	6.8	

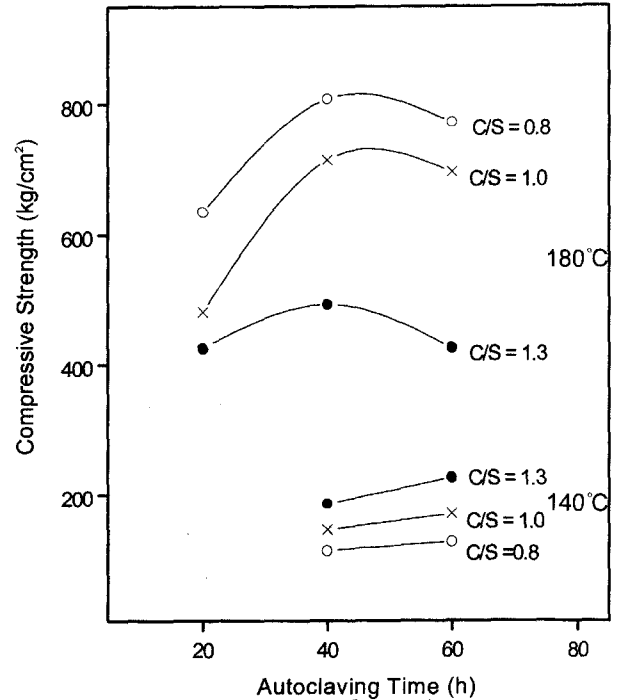


Fig. 7. Compressive strength of the blast furnace slag specimens depending on autoclaving time at different C/S and autoclaving temperature.

수열반응 시편의 강도를 저하시키는 결과를 가져온다.⁷⁾

3.3. 반응조건과 강도

3.1.1. 반응조건-압축강도 관계

석회-고로 슬래그 계에서 수열반응 조건(C/S, 온도 및 시간)이 시편의 압축강도에 미치는 영향을 실험하여 그 결과를 Table 3과 Fig. 7에, 그리고 플라이 애쉬의 경우를 Table 4와 Fig. 8에 각각 나타냈다.

우선 고로 슬래그 계에서 C/S가 미치는 영향을 보면,

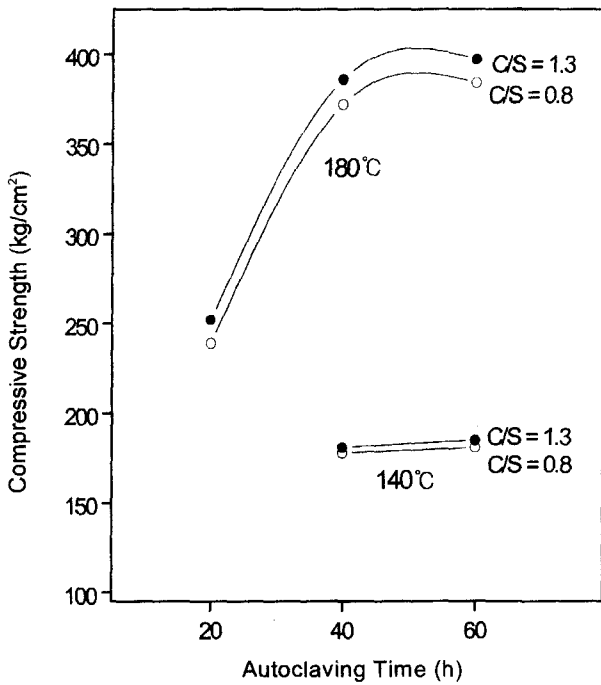


Fig. 8. Compressive strength of the fly ash specimens depending on autoclaving time at different C/S and autoclaving temperature.

C/S=0.8일 때 가장 우수한 강도가 얻어졌다. 그리고 반응 온도(180°C) 및 시간이 일정할 때, C/S=0.8>1.0>1.3의 순으로 강도에 미치는 C/S의 영향이 좋았다. 온도의 영향은 180°C 때가 140°C 때보다 월등히 우수하였으며, 이는 수열합성의 이치대로 보다 고온 및 고압이 석회-규산 간의 반응을 상대적으로 더욱 촉진시키는 때문으로 판단된다. 반응시간은 40시간 때가 제일 좋고 그 이상(60시간)으로 더 길어지면 오히려 강도가 저하되는 경향을 보였다. 이는 Table 2의 기공률 변화가 의미하듯이, 반응시간이 너무 길어지면 수화물 결정이 과대하게 성장되면서 큰 기공들 및 기공률 증가가 수반되는 때문으로 사료된다. 한편, C/S=1.3의 경우는 이와 다른 경향, 즉 강도의 저하에도 불구하고 기공률이 오히려 감소하는 경향이 나타나는 데, 따라서 C/S=1.3인 조건에서는 반응시간에 따른 결정 성장 외에 과대한 C/S 등 또 다른 요인이 강도에 영향을 미친다고 판단된다.

Table 4 및 Fig. 8의 플라이 애쉬에서도, 고로 슬래그 때와 마찬가지로, C/S의 대소에 상관 없이 수열반응 온도가 강도 발현에 큰 영향을 미친다. 그리고 고로 슬래그에서와 달리, C/S가 클수록 시편의 압축강도가 다소 높게 나타나는 바, 이는 플라이 애쉬의 경우 C/S값이 원래 너무 낮은 때문으로 볼 수 있다. 또 플라이 애쉬에서는 반응 시간이 길어질수록 강도가 다소나마 계속 증가하고 있는데, 이는 전술("1. 반응을 측정")한 바와 같이 플라이 애

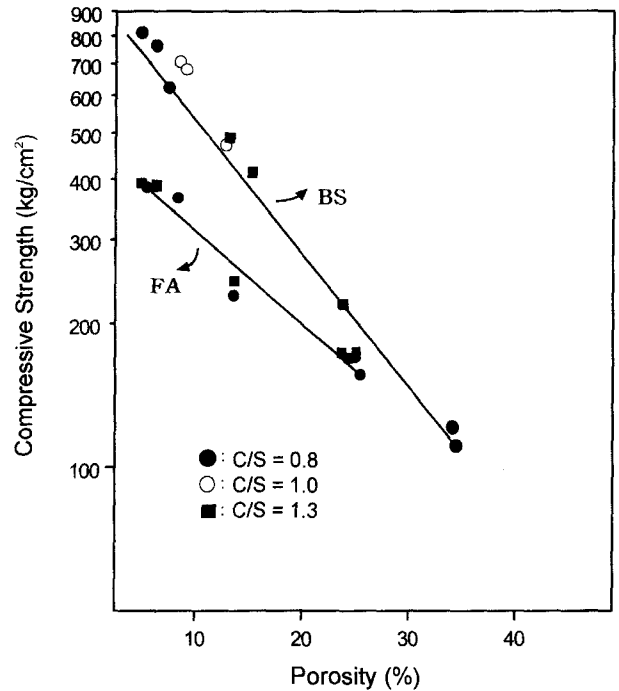


Fig. 9. Compressive strength of the blast furnace slag specimens(BS) and the fly ash specimens(FA) in a linear dependence on their porosity.

쉬의 반응속도가 본래 느린 결과 때문이라 할 수 있다. 결론적으로, 플라이 애쉬 계의 시편이 고로 슬래그의 경우보다 낮은 강도를 발현하는 이유는 우선 그 낮은 반응성 때문이라 할 수 있다. 또 Fig. 1에서 확인한 바와 같이 약 4.5%에 달하는 미연소 탄소분 역시 강도발현을 위하여 저해요인으로 작용하며, Fig. 6에서 본 mullite 또한 불활성 성분으로서 강도를 발현하는 수화물 생성에는 참여치 않는다.

3.1.2. 압축강도-기공률 관계

Table 3(고로 슬래그) 및 Table 4(플라이 애쉬)에 나타낸 모든 시편에 대하여 강도-기공률 관계를 Fig. 9에 도시하였다. 일반적으로 시멘트 경화체 및 콘크리트의 강도(S)와 기공률(P)은 $S=S_0 \cdot \exp(-bP)$ 로 표시되며, 이 식(S_0 는 기공률 0일 때의 강도, b는 상수)에 준하면 강도는 다만 기공률에 따라 지수함수적으로 변화한다.

Fig. 9의 강도-기공률 관계를 보면, 수열반응의 조건(C/S, 온도, 시간)에 관계 없이 시편들의 강도(대수값)는 기공률에 따라 대체로 직선적으로 변한다. 따라서 이 결과에 준하면, 수열반응의 조건들은 그들이 수화물의 미세구조에 어떤 영향을 미치는가에 따라 그들의 의미가 결정되는 것이라 할 수 있다. 즉, 수화물을 많이 합성하여 기공률이 될수록 적은 미세구조를 형성하게 되는 수열반응 조건이 가장 바람직하다. 그리고 Fig. 9의 결과에서 고로 슬래그의 경우 $\log S = \log S_0 - bP$ 의 S_0 (외삽법)값이

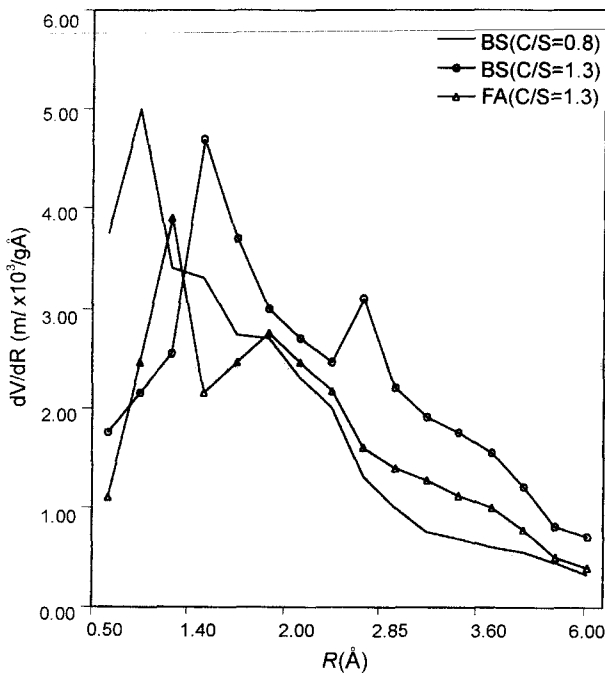


Fig. 10. Pore volume distribution curves of the blast furnace slag specimen(BS) and the fly ash specimen(FA).

$S_0=1,120 \text{ kg/cm}^2$ 이고 기울기 b 는, P 를 %로 나타낼 경우, $b=5.9 \cdot 10^{-2}$ 이다.

플라이 애쉬 계 역시, 고로 슬래그 계와 기공구조(Fig. 10 참조) 등 물성이 다른데도 불구하고, 시편의 압축강도는 기공률 크기에 따라 직선적으로 변한다. 그러나 고로 슬래그 시편들에서 보다 직선의 기울기 값이 작으며 따라서 S_0 값도 작다. 이는 아마도 특히 미연소 탄소량 때문으로 보이며, 이 미연소 탄소의 시편강도에 미치는 나쁜 영향은 시편의 기공률이 작을수록, 즉 고강도가 될수록 상대적으로 커진다. 그리고 Fig. 9에서 플라이 애쉬의 경우 $S_0=515 \text{ kg/cm}^2$ 이고 $b=1.68 \cdot 10^{-2}$ 이다.

3.4. 기공구조 분석

강도-기공률 관계에서 대표적인 시편 세 개를 선택하여, 즉 고로 슬래그 경우 $C/S=0.8$ 과 1.3 (수열반응 온도 및 시간은 공히 180°C 및 40시간) 그리고 플라이 애쉬 경우 $C/S=1.3$ (반응온도 및 시간은 각각 180°C 와 60) 시편에 대하여 각각 기공구조 분석을 수행하였다. 각 시편들의 기공크기 별 부피 분포 관계를 보면 Fig. 10에 도시한 바와 같다.

고로 슬래그의 $C/S=0.8$ 과 1.3 시편을 서로 비교하면, 시편 $C/S=1.3$ 의 낮은 강도(492 kg/cm^2)는 우선 그의 큰 기공률(14.7%) 때문으로 보이지만(Table 3, Fig. 7 참조), 그러나 Fig. 10에 의하면 C/S 시편의 기공들은 동시에 크기가 큰 기공들로 이루어져 있음을 알 수 있다. 즉, $C/S=1.3$ 시편의 낮은 강도는 기공률 외에 크기가 큰 기공구조 때문

이라 할 수 있다.

또 고로 슬래그의 $C/S=0.8$ 과 플라이 애쉬의 시편을 서로 비교하면, 이들의 기공률은 거의 같은데(각각 6.3 과 6.8% , Tables 3과 4 참조), 반대로 강도는 큰 차이를 나타낸다. 그 이유는, 전술한 바와 같이 강도-기공률 관계에서 기울기가 서로 다른 때문도 있겠지만, 기공구조(Fig. 10) 측면에서 보면 플라이 애쉬 시편의 기공들이 크기가 큰 데에 있다고 사료된다. Fig. 10에 의하면, 고로 슬래그($C/S=0.8$) 시편은 특히 크기가 작은 $5 \sim 10 \text{ \AA}$ 범위에서 높은 분포를 보인다.

한편, 고로 슬래그($C/S=1.3$)와 플라이 애쉬의 시편을 서로 비교하면, 고로 슬래그 시편은 높은 기공률($14.7:6.8\%$)과 또한 기공크기가 큰 분포에도 불구하고 오히려 더 큰 강도($492:397 \text{ kg/cm}^2$) 값을 나타낸다. 이는 강도-기공률 관계에서 플라이 애쉬 시편에 부정적으로 작용하는 요인들과 기공(률 및 크기)의 강도에 미치는 영향이 서로 작용한 때문이며 그리고 이들 두 요인 가운데 전자가 더 큰 영향을 미치는 때문으로 보인다.

4. 결 론

석회와 규산질 재료(고로슬래그 및 플라이 애쉬)와의 수열반응성을 조사하기 위하여 수행한 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 고로슬래그는 플라이 애쉬보다 석회와의 수열반응성이 더 좋으며, 그 결과 수열합성 시편은 상대적으로 보다 높은 강도를 발현하였다.
2. 플라이 애쉬는 강도-기공률의 직선관계에 있어서 고로슬래그 보다 낮은 기울기를 갖는데, 따라서 수열반응이 진행되어 시편들의 기공률이 낮아질수록 고로슬래그와 플라이 애쉬 시편들의 강도차이는 커진다.
3. 고로슬래그의 경우, CaO 와 SiO_2 의 비(C/S)가 $C/S=0.80$ 그리고 수열반응 온도 및 시간이 각각 180°C 와 40시간일 때 가장 높은 강도(807 kg/cm^2)를 나타냈다. 한편, 플라이 애쉬는 반응시간이 길수록 시편의 강도가 향상되는 경향을 보였는데, $C/S=1.3$ 및 반응 60시간(반응온도 180°C) 때에 가장 높은 강도(491 kg/cm^2)를 나타냈다.
4. 플라이 애쉬와 비교하여 고로슬래그의 석회반응성이 상대적으로 훨씬 우수한 이유는 후자의 경우 자경성(self-hydraulic)인 포틀랜드 시멘트에 버금가는 다량의 석회를 자체 안에 유리상태(glassy)로서 함유하고 있는 때문이라 판단된다.

REFERENCES

1. K. Sato, T. Hashida, H. Takahashi and N. Yamasaki, "Strengthening of Hydrothermal Hot-pressed Concrete

- Waste by the Addition of Slag," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **105** [3] 262-64 (1997).
2. C. Shi, "Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali-activated Slag Mortars," *Cem. Concr. Res.*, **26** [12] 1789-99 (1996).
 3. J. T. Song, J. Y. Kim, H. K. Choi and S. H. Byun, "Properties of Blended Cement Using Ground Blast-furnace Slag with Low Blaine Value(*in Kor.*)," **37** [1] 70-6 (2000).
 4. J. S. Rho, D. S. Kim, S. S. Hong, G. G. Lim and S. S. Lim, "Fluidity and Setting Properties of Cement Paste by Adding of Fluoroanhydrite and Fly Ash(*in Kor.*)," **34** [12] 1261-67 (1997).
 5. S. J. Jung, W. K. Bang and C. E. Kim, "The Effects of Na_2SO_4 on the Hydration of Fly Ash Blended Cement(*in Kor.*)," **35** [11] 1227-32 (1998).
 6. S. Kahyaoglu, "Brown Coal Fly Ash and Blast Furnace Slag Sand as Raw Materials for the Lime-sand Industry(*in Ger.*)," Master thesis, RWTH Aachen, 1989.
 7. N. Kohler, "Global Energetic Budget of Aerated Concrete," pp. 13-26 in "Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties," Ed. by Wittmann, F.H., Elsevier, Amsterdam, 1983.
 8. G. O. Asserson, "Hydrothermal Reaktion Between $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and Silicic-acid Containing Materials at 120-220°C(*in Ger.*)," *Zement-Kalk-Gips*, **12** [10] 537-44 (1961).
 9. T. Holzapfel and K. Miskiewicz, "Brown Coal Fly Ash as Raw Material for the Preparation of Hydrothermally Hardened Building Elements(*in Ger.*)," *Zement-Kalk-Gips*, **117** [3] 111-24 (1993).
 10. W. Hinz, "Silicates: Principles of the Silicate Science and Silicate Technique(*in Ger.*)," **2** 363-74, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1971.
 11. DIN 106, "Lime sand stone".
 12. R. Kondo, "Kinetic Study on Hydrothermal Reaction Between Lime and Silica," pp. 92-7 in "1st Intern. Symp. on Autoclaved Calcium Silicate Building Products," published by the Soc. of Chem. Indust., London, 1967.