



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2017年 2月

박사학위논문

고로슬래그 치환율에 따른
콘크리트의 물리적 특성과 적용성

조선대학교 대학원

토목공학과

양철진

고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 특성과 적용성

**Mechanical Properties and Applicability of Concrete
Depending on Substitution of Blast Furnace Slag**

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

토목공학과

양철진

고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 특성과 적용성

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

양 철 진

양철진의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 朴 吉 鉉 (인)

위 원 동신대학교 교수 朴 宣 俊 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 雲 中 (인)

위 원 조선대학교 교수 金 聖 洪 (인)

위 원 조선대학교 교수 朴 正 雄 (인)

2016년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구목표 및 범위	3
제 2 장 고로슬래그 시멘트에 대한 이론적 배경	4
2.1 고로슬래그 시멘트의 개요	4
2.1.1 시멘트의 일반사항	4
2.1.2 고로슬래그의 일반사항	6
2.1.3 고로슬래그 미분말의 품질규정	8
2.1.4 고로슬래그 시멘트	14
2.1.5 고로슬래그 환경적 영향	19
2.2 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성	25
2.2.1 굳지 않은 콘크리트 특성	25
2.2.2 경화된 콘크리트 특성	26
2.3 고로슬래그 미분말 적용성 확대 방안	31
2.3.1 화학적 방법	31
2.3.2 물리적 방법	37
제 3 장 고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 특성 변화	45

3.1 개요	45
3.2 실험계획 및 방법	47
3.2.1 실험계획 및 배합	47
3.2.2 사용재료	50
3.2.3 공시체 제작 및 실험 방법	52
3.3 실험결과 및 고찰	58
3.3.1 단위수량과 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 특성평가 (Series I)	58
3.3.2 단위수량 수정 고로슬래그 배합과 기존 저발열 시멘트 배합 특성평가 비교(Series II)	80
제 4 장 실물크기 모형 실험 및 적용성 평가	96
4.1 실물크기 모형 실험	96
4.1.1 개요	96
4.1.2 실물크기 모형 실험체 제작 및 수화열 측정	98
4.1.3 실물크기 모형 실험 결과	100
4.2 실부재에 대한 수화열 해석	107
제 5 장 결론	119
참고문헌	121

표 목 차

표 2.1	포틀랜드 시멘트 종류, 특성 및 용도	4
표 2.2	혼합시멘트 종류, 특성 및 용도	5
표 2.3	고로내 주요 반응	6
표 2.4	슬래그 특성 및 용도	7
표 2.5	고로슬래그 미분말의 품질(KS F 2563)	9
표 2.6	고로슬래그 시멘트의 품질규정	16
표 2.7	국내 포틀랜드 시멘트 생산업체	20
표 2.8	토양오염공정시험기준에 제시되니 정량한계 및 결과표기 방법	21
표 2.9	시멘트 분석을 위한 시료 분류	22
표 2.10	제조사별 시멘트의 주도 및 분말도 분석결과	23
표 2.11	토양오염공정시험기준에 따라 실시한 시멘트 분석결과	24
표 3.1	Series I 배합의 실험 및 목표 수준	47
표 3.2	Series I 배합 상세	48
표 3.3	Series II 배합의 실험 및 목표 수준	49
표 3.4	Series II 배합 상세	50
표 3.5	시멘트의 물리적 특성	50
표 3.6	잔골재의 물리적 특성	51
표 3.7	굵은골재의 물리적 특성	51
표 3.8	고로슬래그 미분말의 물리·화학적 특성	51
표 3.9	플라이애시의 물리·화학적 특성	52
표 3.10	고성능 감수제의 물리적 특성	52
표 3.11	고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 혼화제 사용량 및 슬럼프	58
표 3.12	고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 공기연행제 사용량 및 공기량	63
표 3.13	고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 블리딩량 측정 결과	66
표 3.14	각 배합에 따른 재령별 압축강도 측정결과	76
표 3.15	배합에 따른 혼화제 사용량 및 슬럼프 측정 결과	80
표 3.16	배합에 따른 공기연행제 사용량 및 공기량 측정 결과	82
표 3.17	경과시간에 따른 관입저항치 측정 결과	84

표 3.18 간이단열온도상승실험 결과87
 표 3.19 모든 배합의 재령에 따른 압축강도 측정 결과92
 표 4.1 현장실험을 위한 실험체 상세 및 평가항목96
 표 4.2 실물크기 모형 실험체 제작을 위한 현장 배합97
 표 4.3 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 물성 측정 결과100
 표 4.4 현장 코어 공시체와 현장 공시체의 압축강도 측정 결과102
 표 4.5 위치에 따른 최고온도 측정 결과105
 표 4.6 현장 실험체에 대한 수화열 특성 분석 결과105
 표 4.7 타설온도에 따라 보정된 단열온도 상승 특성값111
 표 4.8 매트기초 수화열 해석에 사용된 변수값112
 표 4.9 실물크기 모형 실험체 온도측정 결과와 해석 결과 비교114
 표 4.10 최고응력 발생시 응력분포, 응력시간이력 및 온도균열지수 해석 결과117

그림 목 차

그림 2.1 고로슬래그 미분말의 제조과정	6
그림 2.2 고로슬래그 미분말의 염기도와 압축강도와의 관계	11
그림 2.3 프랑스에서 사용되고 있는 고로슬래그 미분말	18
그림 2.4 유럽의 시멘트에 대한 시방서 표준	18
그림 2.5 국내 시멘트 공장 위치	19
그림 2.6 고로슬래그 미분말 치환율과 공기연행제 첨가량의 관계	25
그림 2.7 단열온도 상승의 개념도(슬래그 치환율별)	27
그림 2.8 분말도와 무투입 콘크리트에 대한 강도비율	28
그림 2.9 치환율과 압축강도 관계	28
그림 2.10 양생온도가 강도에 미치는 영향	29
그림 2.11 콘크리트 탄산화 시험결과	30
그림 2.12 알칼리 자극제로 사용된 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도	32
그림 2.13 성분에 따른 CSA의 경화구조	33
그림 2.14 에트링자이트 생성시기별 특성	34
그림 2.15 혼화제 종류별 관입저항치	35
그림 2.16 혼화제 종류에 따른 초결 및 종결시간	35
그림 2.17 혼화제 종류별 초기재령 압축강도	36
그림 2.18 혼화제 종류별 재령별 압축강도	36
그림 2.19 온도에 따른 응결시간(a)(b)(c)	38
그림 2.20 W/C와 양생온도 및 FC 치환율별 재령 28일 압축강도에 대한 백분율비	40
그림 2.21 고로슬래그 미분말 분말도별 경과시간에 따른 관입저항치 변화	43
그림 2.22 치환율에 따른 4,000 cm ² /g급에 대한 6,000 cm ² /g급 압축강도 발현비율	43
그림 3.1 콘크리트 배합순서	52
그림 3.2 단위수량 변화에 따른 감수제 사용량 (a)(b)(c)	59
그림 3.3 단위수량 변화에 따른 슬럼프 결과 (a)(b)(c)	60
그림 3.4 배합에 따른 슬럼프 측정 결과 비교	62
그림 3.5 단위수량 변화에 따른 공기량 결과 (a)(b)(c)	63
그림 3.6 배합에 따른 공기량 측정 결과 비교	65

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)(h)(i)(j)(k) ...67

그림 3.8 고로슬래그 치환율과 단위수량에 따른 블리딩 발생량73

그림 3.9 배합의 단위수량에 따른 블리딩을 회귀분석 결과 (a)(b)(c)74

그림 3.10 재령일에 따른 단위수량별 압축강도 비교(a)(b)(c)77

그림 3.11 배합별 재령일에 따른 압축강도 측정 결과 비교78

그림 3.12 목표 슬럼프 확보를 위한 감수제 사용량81

그림 3.13 배합에 따른 슬럼프 측정 결과 비교81

그림 3.14 목표 공기량 확보를 위한 공기연행제 사용량83

그림 3.15 배합에 따른 공기량 측정 결과83

그림 3.16 배합에 따른 응결시간 측정 결과85

그림 3.17 배합에 따른 초결시간 및 종결시간 비교 결과85

그림 3.18 포틀랜드 시멘트의 간이단열온도상승곡선88

그림 3.19 간이단열온도상승곡선 (a)(b)(c)(d)(e)(f)88

그림 3.20 모든 배합의 간이단열온도상승곡선 비교91

그림 3.21 모든 배합의 재령에 따른 압축강도 비교93

그림 3.22 모든 배합의 재령에 따른 압축강도비93

그림 4.1 실물크기 모형 실험체 제작용 거푸집 단면98

그림 4.2 실물크기 모형 실험체 열전대 설치 위치98

그림 4.3 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 슬럼프 측정 결과100

그림 4.4 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 공기량 측정 결과101

그림 4.5 현장 공시체 압축강도 측정 결과102

그림 4.6 코어 공시체 압축강도 측정 결과102

그림 4.7 실물크기 모형 실험체 수화열 측정 결과(a)(b)(c)103

그림 4.8 수화열 해석을 위한 매트기초 모델링 결과 (a)(b)(c)107

그림 4.9 매트기초 수화열 해석 흐름도110

그림 4.10 매트기초 최대온도 및 발생시간 해석 결과(구조물 중앙부)113

그림 4.11 매트기초 응력분포 시간이력, 온도균열 지수 해석 결과(중심부 표면) (a)(b)(c)115

사 진 목 차

사진 1.1 콘크리트 제조과정별 CO ₂ 발생 비율	1
사진 2.1 분말도 4,000 cm ² /g의 슬래그(1,000배)	10
사진 2.2 분말도 6,000 cm ² /g의 슬래그(500배)	10
사진 2.3 분말도 8,000 cm ² /g의 슬래그(1,000배)	11
사진 3.1 콘크리트 배합 믹서	53
사진 3.2 콘크리트 슬럼프 시험 전경	53
사진 3.3 콘크리트 공기량 시험 전경	54
사진 3.4 콘크리트 블리딩 시험 전경	54
사진 3.5 응결시간 시험을 위한 모르타르 분리 전경	55
사진 3.6 응결시간 측정 관입저항 실험 장치	55
사진 3.7 단열온도상승실험 장치	56
사진 3.8 압축강도 시험용 공시체 전경	57
사진 3.9 압축강도 시험용 공시체	57
사진 4.1 실물크기 모형 실험체 제작과정 전경	99
사진 4.2 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 슬럼프 및 공기량 측정 전경	101

ABSTRACT

Mechanical Properties and Applicability of Concrete Depending on Substitution of Blast Furnace Slag

Yang, Chul Jin

Advisor : Prof. Park, Jeong-Ung, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

This study presented to determine the effective usage of slag in concrete as cement binder. In order to determine the effective slag replacement ratio of cement matrix, the mixture proportions of Series I in accordance with unit weight of slag and water were designed and its mechanical properties regarding slump, air content, bleeding and compressive strength were tested. From the test results of Series I mixture, the Series II mixtures which were adjusted the unit weight of water were modified and the slump, air content, setting time and heat of hydration were tested. The effective slag substitutional ratio with 50% of the binder was selected in present study. To evaluate application of the slag mixture in construction site, the mock-up test including compressive strength and heat of hydration for OPC mixture and conventional low heat cement mixtures was performed. From the mock-up test it was found that the compressive strength of slag concrete was advantageous to the long-age strength of concrete depend on the latent hydraulic reactivity of cement incorporating slag. Moreover, the mixture incorporating slag was not only able to effectively decrease the maximum heat of hydration and hydration velocity of concrete compared with OPC mixture but it also presented similar low heat tendency of conventional low heat cement concrete. The mixture proportion of high volume slag concrete in this study is sufficiently adopted to the concrete structures requiring controlled heat distortion cracks and long-age strength.

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

최근 사회적 요구에 의해 건설 산업의 환경적 문제가 중요한 사회적 이슈로 대두됨에 따라 새로운 대안의 연구가 필요시 되고 있다. 특히 건설 및 시멘트 콘크리트 산업에서는 환경, 자원의 고갈 등이 중요한 문제점으로 대두됨에, 이를 해결하기 위한 각종 산업부산물과 폐기물을 콘크리트용 자원으로 재활용하는 제로에미션(Zero emission)의 방법이 대두되고 있다.

정부는 온실가스를 2020년까지 2005년(594백만톤) 대비 4% (23.8백만톤)를 감축 목표를 설정하였고 주요 산업별로 감축비(배출 전망치(BAU) 대비)를 보면 시멘트 8.5%, 건설업 7.1%로 시멘트 및 건설업에서의 감축비율이 매우 높게 설정되어 있음을 알 수 있다. 이 중 시멘트 산업의 온실가스 배출량은 2007년 기준 4,060만 톤으로 우리나라 온실가스 총 배출량의 6.6%에 달하는 비중을 차지하고 있다(한천구, 2008).

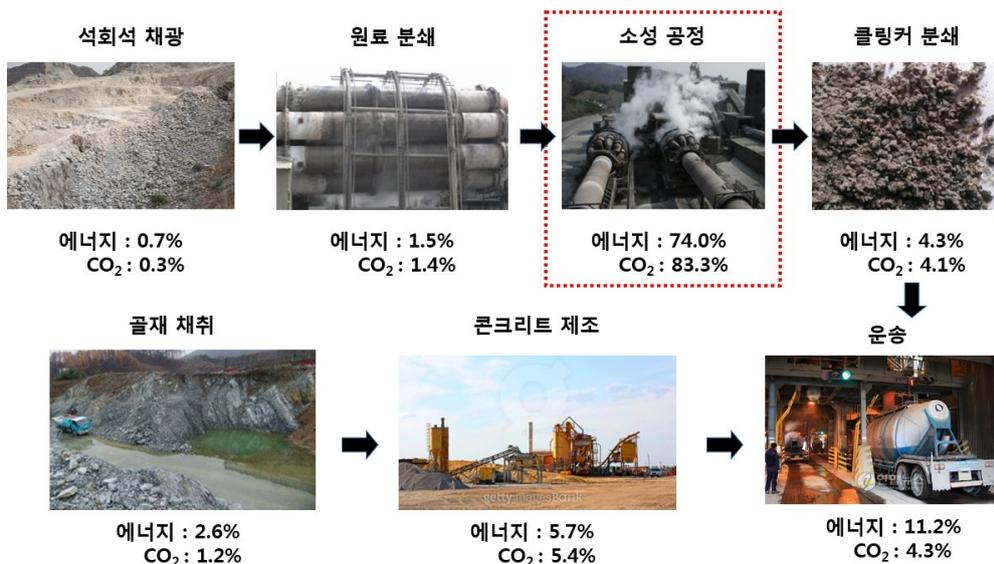


사진 1.1 콘크리트 제조공정별 CO₂ 발생 비율(진정언, 2015)

특히, 고로슬래그를 사용한 시멘트는 최근 대두되고 있는 기후변화에 따른 건설시장의 대처방안으로 두각을 나타내고 있으며, 콘크리트 분야에서는 시멘트량을 줄임으로써 원가를 줄이는 방안이 모색되고 있다. 고로슬래그 시멘트와 고로슬래그 미분말은 국내에서 정해진 KS 품질기준에 따라 생산되고 있으나, 고로슬래그의 투입량에 대한 특별한 특성분석 연구는 상이한 결과를 나타내고 있다. 이는 적용되는 건설 프로젝트의 특성에 따라 설계에서 반영하는 방식이 다른 점도 있지만, 고로슬래그 투입량에 따른 품질특성을 분석한 연구는 별로 이루어지지 않고 있기 때문이다. 국내에서 구조물이 대형화되면서 내구성능과 강도발현의 조기성능이 요구되고 있고 콘크리트에 사용되는 골재나 잔골재, 시멘트는 특성이 바뀌어가고 있기 때문에 예전의 연구결과나 적용 사례가 그대로 답습하기에는 한계가 나타나게 된다. 이러한 배경에 의해 기존의 고로슬래그 콘크리트에 대해서도 기존의 특성에 대한 연구를 보완하고 다양한 구조물의 용도에 따라 제조되는 고로슬래그 콘크리트의 구체적인 특성을 평가하여 안정된 품질의 콘크리트를 확보해야할 필요성이 증가하고 있다.

1.2 연구목표 및 범위

본 연구에서는 고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트 배합 및 재료의 특성을 분석하고 실험을 통해 고로슬래그 콘크리트의 특성을 고찰하고 현장 제작용 실험체에 적용하여 현장 적용성을 평가하였다. 특히 고로슬래그 시멘트를 사용한 다양한 콘크리트 배합 (Series I)에 대한 기초 물성을 실험을 통해 평가하였고, 블리딩양 저감을 위해 단위수량을 최적화한 Series II 배합을 제시하였다. Series II 배합에 대한 기초물성 실험, 현장적용 실험 및 수화열 특성 및 수화열 해석을 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트와 비교·평가함으로써 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트 배합의 현장 적용성을 평가하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해 본 논문은 아래와 같은 연구내용을 중심으로 수행되었다.

본 연구 논문은 총 5개의 장으로 구성된다.

제1장에서는 연구배경, 연구내용 및 각 장별 연구 방법에 대하여 서술하여, 본 연구 논문의 이해를 높이는 장으로 구성하였다.

제2장에서는 기존문헌의 조사/수집을 통해 고로슬래그 시멘트와 고로슬래그 미분말을 적용한 콘크리트의 기초특성을 분석하였다.

제3장에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 다양한 투입률에 따른 Series I 배합을 설정하였고, 기초물성을 실험을 통해 평가하였다. 특히 고로슬래그 미분말 적용 콘크리트의 단점인 블리딩 특성을 집중적으로 파악하여 단위수량 조절을 통한 최적의 투입률을 파악하기 위한 Series II 배합을 재설정하여 기존 저발열 시멘트 콘크리트와 포틀랜드 시멘트만을 사용한 배합과의 비교를 통해 본 연구의 고로슬래그 미분말 적용 콘크리트 배합의 특성을 평가하였다.

제4장에서는 Series II 배합에 대하여 현장적용 실험을 수행하여 수화발열 특성과 강도특성을 평가하여 본 연구의 고로슬래그 미분말을 적용한 콘크리트의 현장 적용성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

제5장에서는 본 연구를 통하여 얻어진 종합결과를 정리하여 기술하였다.

제 2 장 고로슬래그 시멘트에 대한 이론적 배경

2.1 고로슬래그 시멘트의 개요

2.1.1 시멘트의 일반사항

시멘트란 넓은 의미에서 물질과 물질을 접합시키는 성질을 가진 모든 재료를 말하며 무기질 결합제라고도 표현한다. 주성분으로는 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3) 및 석회(CaO)으로 구성되어 있다(김성수, 2015).

표 2.1 포틀랜드 시멘트 종류, 특성 및 용도(김성수, 2015)

Type	명칭	특성	용도
1종	보통 시멘트	·일반적인 시멘트 특성을 나타냄	·일반(토목,건축)
2종	중용열 시멘트	·물과 반응시 수화열이 낮다. ·보통(일반)시멘트보다 건조수축이 적다. ·초기강도는 보통(일반)시멘트보다 낮고 장기는 동등이상이며 휨강도가 크다.	·Mass공사(댐,발전소) ·도로포장, 활주로, 방파제 공사
3종	조강 시멘트	·수화속도가 빠르다. ·단기간 내에 고강도 발현 가능하다. (보통 시멘트 28일 강도를 7일만에 냄) ·저온에서도 강도발현이 좋고 수밀성이 뛰어나다.	·PC(교량상판) ·겨울철 한냉지 및 긴급공사 ·콘크리트 2차제품 ·물탈제품
4종	저발열 시멘트	·수화발열량이 매우낮다 ·Mass concrete공사에 최적 ·내구성 및 장기강도 우수하다. ·고강도,고유동 콘크리트 제조가 쉽다.	·기초(건물,교량) ·Box구조물(댐,지하철,지하 저장조)
5종	내황산염 시멘트	·황산염에 대한 저항성이 크다. ·화학적으로 매우 안정되어있다. ·강도발현이 우수하고 수화열 및 건조수축이 적다.	·황산염토양 및 온천지대의 구조물 공사 ·공장 폐수시설 공사 ·원자로 공사

표 2.2 혼합시멘트의 종류, 특성 및 용도(김성수, 2015)

제 품 명	특성	용도
고로슬래그 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> ·포틀랜드 시멘트와 제철소의 슬래그를 혼합한 시멘트임 ·건조수축, 수화열, 내화학적, 내해수성등에서 포틀랜드 1종 시멘트보다 우수함 	<ul style="list-style-type: none"> ·하천, 댐, 항만, 도로공사 ·일반 토목 건축공사
플라이애시 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> ·포틀랜드 시멘트와 제철소의 슬래그, 화력 발전소의 플라이애쉬를 혼합한 시멘트 ·내해수성이 우수하고 수화열이 낮아 온도 균열 억제 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ·대형 건축 및 토목 구조물 ·교량공사
포틀랜드 포졸란 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> ·포틀랜드시멘트 클링커와 포졸란을 잘분쇄, 혼합시킨 것. 또는 포틀랜드시멘트와 고운 포졸란을 잘 혼합시킨 것 	<ul style="list-style-type: none"> ·대형 건축 및 토목구조물

시멘트는 예로부터 자연 상태로 각종 공사(건축, 토목)에 사용됐고 근대 우리가 사용하는 시멘트는 1824년에 영국의 벽돌공인 Joseph Aspdin에 의해 시멘트 제조방법이 등록되면서 시작되었다. 당시 Joseph Aspdin 시멘트를 포틀랜드 시멘트라 명명하였고, 이후 많은 연구를 통해 현재의 다양한 시멘트 종류가 제조되고 있다. 시멘트는 종류가 많기 때문에 분류 방법도 여러 가지 제안되고 있으나 M, Spindel의 분류 방법이 가장 일반적이다. 시멘트를 크게 분류하면 공기 중에서 경화하는 기경성시멘트와 수분에 의해서 경화하는 수경성 시멘트로 분류하고 있다. 그러나 시멘트는 조성물의 결합상태, 시멘트 함유량에 따라 조성물의 경화 상태가 달라지고 성질과 용도에 따라 종류 또한 다양하게 분류된다. 또한 최근에도 새로운 계통의 시멘트가 출현하고 있으나 국내에서 생산되는 시멘트는 포틀랜드 시멘트가 대부분이며 단순히 시멘트라 함은 포틀랜드 시멘트를 의미한다고 생각해도 무방하다. 현재 토목건축용으로 사용되는 시멘트는 우리나라 산업규격에 따라 표 2.1 및 표 2.2와 같은 종류가 있다(정제동, 2002)(한국표준협회, 2016).

2.1.2 고로슬래그의 일반사항

1) 제조과정

고로슬래그는 선철을 제조하는 제철소 내 고로공정에서 발생되는데, 고로의 원료인 철광석이 산소와 결합되어 산화철(Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4)이 생성되는데 이 산화철(Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4)을 산소와 이물질로부터 철을 분리하기 위한 공정에서 발생된다. 그림 2.1은 고로슬래그의 발생공정을 나타낸 것이고, 표 2.3은 고로내의 반응을 나타낸 것이다.

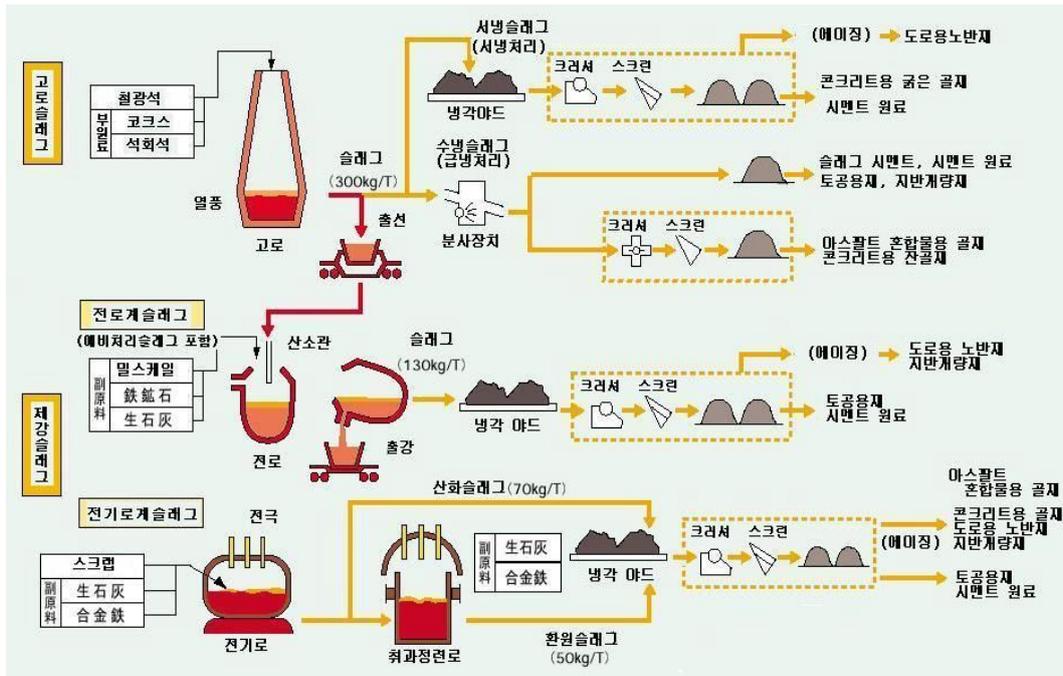


그림 2.1 고로슬래그 미분말의 제조과정(이상수, 2006)

표 2.3 고로내 반응(이상수, 2006)

반응	반응식
코크스의 연소	$C + O_2 \rightarrow CO_2, CO_2 + C \rightarrow 2CO$
간접환원	$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$
직접환원	$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$
고로슬래그의 생성	$FeS + CaO + C \rightarrow Fe + CaS + CO$ $CaO + SiO_2 \rightarrow CaO \cdot SiO_2$

2) 고로슬래그의 종류

일반적으로 고로에서 배출된 슬래그는 약 1,500 °C의 고온 용융상태이므로 냉각시켜야 하며, 냉각방법에 따라 형상과 성질이 다른 슬래그가 생성된다. 슬래그가 지닌 특별한 용도는 표 2.4와 같다(이도현, 2014).

표 2.4 슬래그 특성 및 용도(이도현, 2014)

종 류		특 성	용 도
서냉슬래그		수경성 비반응성 항알칼리성 섬유화에 의한 단열보온, 흡음성 SiO ₂ 성분	도로 노반용 콘크리트용 굵은골재 시멘트클링커 원료(점토대체) 암면원료(석면대체) 규산질 비료
급냉 슬래그	연질	미분쇄후 강한 잠재수경성 잠재수경성 저알칼리성 경량, 큰 내부마찰각, 큰투수성 SiO ₂ , CaO성분	고로시멘트 원료, 포틀랜드 시멘트 혼합재, 지반개량재 시멘트 클링커 원료 토공용제(복토재, 성토재, 노상 개량재) 규산질 비료, 토량 개량재
	경질	염분이나 유해물질을 함유하지 않은 인공잔골재	콘크리트용 잔골재

① 서냉 슬래그

용융상태의 슬래그를 고로 옆에 설치되어 있는 드라이비트에 흘려 넣어 적당히 살수하면서, 2~4일간 급냉하여 고체화 시킨다. 이렇게 냉각된 슬래그는 암상의 괴상상태가 되므로 이를 분쇄하여 괴재 슬래그화하여 도로 노반 보조기층재 등으로 사용된다.

② 급냉 슬래그

고온에서 선철과 분리되어 흘러나온 용융상태의 슬래그에 고압의 가압수를 다량 분사하여 급냉한 것으로 유리질 90%이상이 되며, 외관은 모래와 비슷하다. 급냉슬래그의 성분은 시멘트 원료와 비슷하며, 수경성을 지니고 있기 때문에 슬래그 잔골재 또는 미분말화하여 시멘트의 원료로 사용되고 있다.

2.1.3 고로슬래그 미분말의 품질규정

1) 고로슬래그 미분말의 물리/화학적 규정

우리나라의 경우 콘크리트에 이용하는 고로슬래그는 혼화재료로 이용할 경우 KS F 2563(한국표준협회, 2009)(콘크리트용 고로슬래그 미분말) 혼합시멘트로 이용할 경우 KS L 5210(고로슬래그 시멘트) 규정되어 있다(한국표준협회, 2016). KS F 2563에서 규정하고 있는 콘크리트용 고로슬래그 미분말의 품질은 표 2.5와 같다. 한편, 고로슬래그 미분말의 화학성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 및 MgO 로서 이 성분들의 합은 약 94~97%를 나타낸다. 포틀랜드 시멘트의 경우 MgO 가 5%를 초과하면 유리마그네시아가 생성되어 이상 팽창의 원인이 되지만 고로슬래그 미분말의 경우 15% 정도를 포함하고 있어도 해가 없다고 하며 대체로 9%이하의 함유율을 갖는다(김은겸, 2000). 또한, 고로슬래그 미분말에 석고를 투입하면 초기강도 개선, 건조수축 감소 및 수화열 억제에 효과가 크다. 고로슬래그 미분말 제조시 분말도 $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이상 제조하고 소량의 석고를 투입하는 경우가 많으나 고분말 분말도 $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이상 제품에는 장기강도 발현문제 때문에 투입하지 않는다. 고로슬래그 미분말의 반응성은 염기도 및 유리질화율이 높을수록 효과가 큰 경향이 있다. 고로슬래그의 비중량은 $1.89\sim 2.77 \text{ g}/\text{cm}^3$ 로서 그 범위가 넓지만 $74 \mu\text{m}$ 이하로 분쇄한 고로슬래그 미분말의 비중량은 $2.88\sim 2.95 \text{ g}/\text{cm}^3$ 의 범위이며 평균 비중량은 $2.90 \text{ g}/\text{cm}^3$ 정도이며 시멘트와 비중량을 비교하면 시멘트보다 비중 차이가 작으며 혼합 재료로서의 혼합성, 콘크리트에 있어서의 분산성이 큰 편이다.

국내에서 통용되고 있는 고로슬래그 미분말은 3종이다. 분말도는 대부분 $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이상인 것을 사용하고 있으며, 1종이나 2종의 경우에는 분말도를 증가시키기 위하여 분쇄작업이 추가되며 이는 3종 보다는 제조원가가 오르게 되어 경제적인 측면에서 불리하다. 그러나 초기강도를 증진하거나 그라우팅을 위한 재료로 특수하게 제조되어 사용되고 있다. 사진 2.1~사진 2.3은 전자현미경으로 고로슬래그의 분말도 $4,000$, $6,000$ 및 $8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 입자형상을 나타낸 것이다. 그림 2.2는 염기도 변화에 따른 활성화도 지수 값의 변화를 나타낸 것으로 염기도의 증가에 따라 활성화도 지수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 활성화도 지수(Slag activity Index)란, 기준 시멘트를 사용한 모르타르의 압축강도를 기준으로 고로슬래그 미분말을 혼합한 시멘트의 압축강도 비를 나타낸 것으로 활성화도 지수시험에 사용하는 골재는 표준사와 실리카질 모래를 혼합하여 소정의

입도로 만든 것을 사용하며, W/C는 0.5로 하고 C/S는 2.5로 한 배합의 모르타르가 사용된다(한국표준협회, 2009).

$$\text{활성도지수}(SAI) = \frac{\text{각재령별시험공시체의압축강도}}{\text{각재령별기준시멘트를사용한모르타르의압축강도}} \times 100(\%) \quad (2.1)$$

표 2.5 고로슬래그 미분말의 품질(KS F 2563)(한국표준협회, 2009)

품질		고로슬래그 미분말		
		1 종	2 종	3 종
밀도(g/cm ³)		2.80 이상	2.80 이상	2.80 이상
비표면적(cm ² /g)		8,000~10,000	6,000~8,000	4,000~6,000
활성도 지수 (%)	재령 7일	95 이상	75 이상	55 이상
	재령 28일	105 이상	95 이상	75 이상
	재령 91일	105 이상	105 이상	95 이상
플로우값비(%)		95 이상	95 이상	95 이상
산화마그네슘(%)		10.0 이하	10.0 이하	10.0 이하
삼산화황(SO ₃)(%)		4.0 이하	4.0 이하	4.0 이하
강열감량(%)		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
염화물 이온(%)		0.02 이하	0.02 이하	0.02 이하
염기도		1.6 이상		

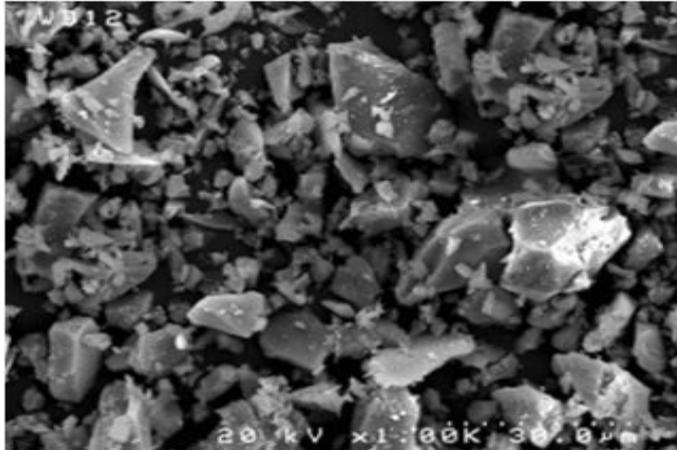


사진 2.1 분말도 4,000 cm^2/g 의 슬래그(1,000배) (한천구, 2008)

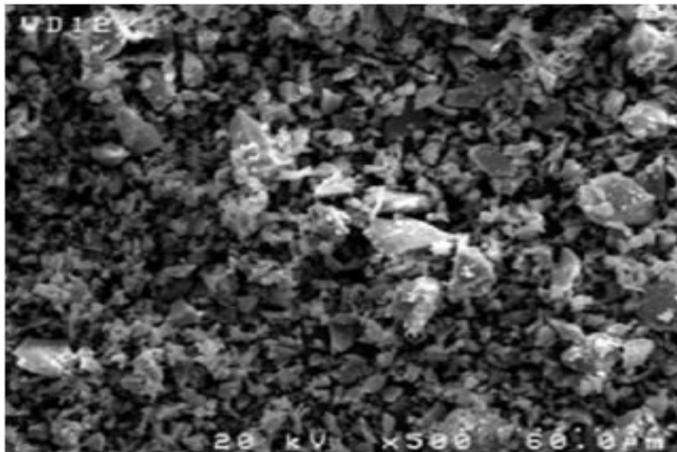


사진 2.2 분말도 6,000 cm^2/g 의 슬래그(500배) (한천구, 2008)

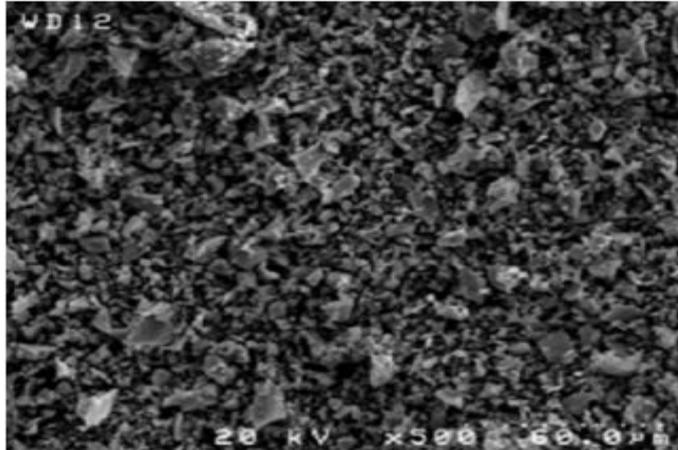


사진 2.3 분말도 8,000 cm²/g의 슬래그(1,000배) (한천구, 2008)

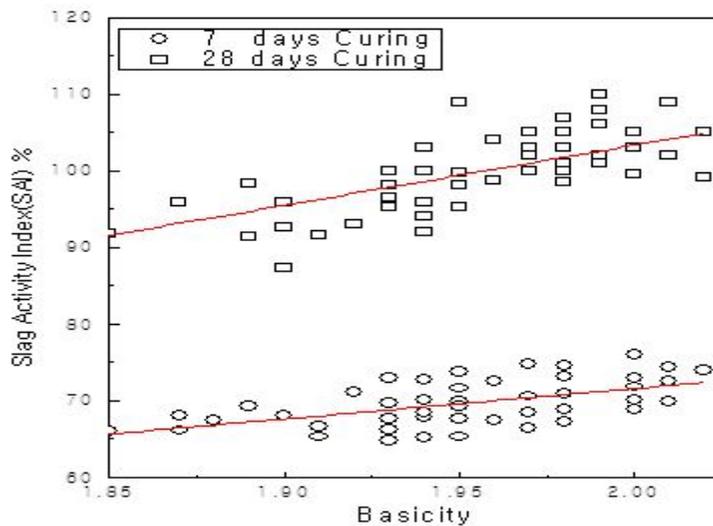


그림 2.2 고로슬래그 미분말의 염기도와 압축강도와의 관계 (한천구, 2008)

고로슬래그는 화학성분별로 Melilite계 ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2-2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$)와 Merwinite ($3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$)계가 있다. 국내 슬래그는 Melilite계에 속하고, Melilite

계의 슬래그에서는 유리질화율이 높으면 수화성이 높기 때문에 슬래그의 유리질화율은 95% 이상으로 조절되고 있다(진정언, 2015). 그렇지만 Merwinite계의 슬래그에서는 반드시 유리질화율이 높은 쪽이 좋은 것만은 아니라는 연구보고도 있다(이상수, 2005). 일반적으로 강도특성에 영향을 주는 요인으로서 유리질화율, 수재 염기도, 강열감량 등을 들 수 있다. 국내산 슬래그의 유리질화율은 99% 이상인 것으로 알려져 있다.

2) 수화기구 및 미세구조

선철 제조시 고로에서 생성되는 부산물인 고로슬래그는 주성분이 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO 의 네가지 성분으로서 전체 성분중 약 96%를 차지하고 있으며, 이외에 소량의 MnO , FeO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , 유황분 등을 함유하고 있다. 이것은 시멘트와 유사한 화학성분일 뿐만 아니라 화학반응, 시멘트의 수화반응과 유사한 반응을 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 고로슬래그의 수화반응은 포틀랜드 시멘트의 수경성 반응과는 다소 차이가 있는 잠재수경성이라는 특성에 의해 수화반응이 진행된다는 점이다(김성수, 2015). 이는 시멘트의 반응특성인 수경성은 물 분자와 접하면 성분들의 용출이 시작되면서 수화물을 형성하여 경화하는 메커니즘인 반면에 고로슬래그의 잠재수경성은 단순히 물과의 접촉만으로는 성분들이 용출되지 않고 자극제의 반응성이 필요하며 이것에 의해 고로슬래그의 반응이 촉진된다는 점에서 차이가 있다.

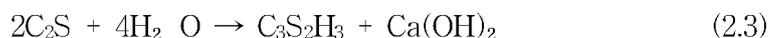
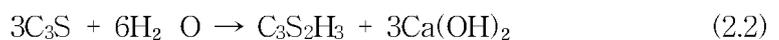
고로슬래그는 물과 반응 후 Ca^{2+} 이온이 용출되어 표면에 부정형 투과성에 의해 A-S-H의 산화피막이 형성되어 이 산화피막으로 인해 고로슬래그 입자 속으로 물의 침투, 이온의 용출이 억제되기 때문에 수화반응 진행이 힘들다. 그러나 고로슬래그는 알칼리 자극제에 의해 고로슬래그 입자에 OH^- 가 흡착되면서 유리구조가 파괴되어 SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 의 용출이 촉진되고 반응이 시작되면서 자체 속에서 용출되는 알칼리성분에 의해 높은 pH가 지속하게 된다. 따라서 고로슬래그의 알칼리 촉진제 양은 초기 수화반응을 일으킬 수 있는 정도만 필요하며 이후의 반응은 고로슬래그 속에 함유되어 있는 SiO_2 와 CaO 성분이 용출하여 지속적인 수화반응을 하면서 규산염 수화물(C-S-H)을 형성하게 되는 것이다. 이와 같은 수화진행 메커니즘으로 인해 고로슬래그의 잠재수경성은 포틀랜드 시멘트의 수화반응 진행속도에 비해 지연되게 되고, 고로슬래그 투입 경화체의 초기강도 지연을 가져오는 원인이 된다. 그러나 반응이 시작되면 장시간에 걸쳐 계속적으로 반응이 이루어져 장기강도에 있어서는 포틀랜드 시멘트를 사용하는 경우보다 우수한 것으로 알려져 있다. 고로슬래그의 초기강도 개선율

위한 알칼리 자극제로서 석고, 수산화칼슘, 수산화나트륨 등의 알칼리 자극제가 사용되고 있고, 그 중 일반적으로 고로슬래그 미분말 생산시에 사용되고 있는 것이 석고이며 석고의 투입율에 의한 SO₃의 함량 조절이다. 고로슬래그 미분말이 pH 12이상 수산화칼슘 포화용액에 노출되면, 알루미늄 규산염 결합은 약화돼 수화가 시작되고 칼슘이온이 소비된다. 그러나 Ca(OH)₂ 공급을 중단하고, 알칼리 농도가 희석되면 반응 또한 정지하게 된다. 고로슬래그가 물과 접촉하면 고로슬래그 입자 표면에 치밀한 불투성의 산성피막이 생긴다. 이 반응을 이어가기 위해서는 강알칼리에 의한 피막 파괴가 필요하고 이와 같은 자극작용을 위하여 NaOH, KOH나 Ca(OH)₂+CaSO₄의 투입도 유효하게 작용할 수 있다.

또한 자극작용에 의해 고로슬래그 표면부터 용해반응이 일어나고 그 용액으로부터 불용성 물질이 석출되면서 경화가 시작된다. 이 경우 고로슬래그는 장기적으로는 고로슬래그 질량의 약 10%에 해당하는 Ca(OH)₂와 결합한다. 포틀랜드 시멘트 클링커는 약 25%의 Ca(OH)₂를 생성 방출하기 때문에, 클링커 : 고로슬래그 = 25 : 75의 혼합비까지는 고로슬래그의 전부를 활성화시킬 수 있는 Ca(OH)₂를 확보할 수 있다. 고로슬래그의 수화물은 자극물질(반응촉진물질)에 의해 다소 차이는 있다. 어떤 경우에도 tobermorite와 유사한 칼슘실리케이트 수화물을 포함한다(문형철, 2008).

NaOH 등의 알칼리 자극제는, C-S-H, C₄AH 및 Gehlenite 수화물 C₂AH이 생성되고, Ca(OH)₂ 자극제는 C-S-H와 C₄AH이 생성되고 C₂ASH은 생성되지 않으며, 유산염 촉진제경우에서는 C-S-H, 에틀링자이트와 유사한 C₃A, C-S-H와 수산화알루미늄 Al(OH)₃가 생성된다. 자극물질이 석회, 알칼리, 유산염등이 석회와 함께 이루어 졌을 경우 Al(OH)₃는 에틀링자이트로 변화한다. 경화체 중에서 Mg(OH)₂는 나타나지 않고, 슬래그의 C-S-H에는 MgO가 매우 많이 차지하게 된다.

고로슬래그의 수화물이 수산화칼슘을 생성하지 않는다는 것을 모델화하여 설명하기 위해서는, 슬래그의 SiO₂, CaO 몰비가 1.3 정도인 것을 감안할 때, 슬래그가 C₃S₂라고 생각하면 클링커광물의 C₃S나 C₂S의 수화와 비교하여 다음과 같이 나타낼 수 있다 (김동현, 2014).



C-S-H의 성분을 조사해보면 C-S-H 중에 MgO, Al₂O₃ 가 포틀랜드 시멘트보다 많이 포함되어 있으며, 전자현미경 관찰에 의하면 C-S-H는 치밀하지만 결정성은 보다 좋지 않다. 또한 에틀링자이트은 침상결정을 하고 있으며, 고로슬래그 함유량이 많을수록 짧고 얇아진다. 고로슬래그계 경화체는 초기재령에서는 고로슬래그 함유량이 많을수록 전 세공용적은 크지만, 수화의 진행과 함께 고로슬래그의 함유량이 큰 것일수록 전 세공용적은 작아지고, 미소 세공량이 커진다. 또한 고로슬래그의 수화반응성은 고로슬래그의 양생조건, 화학조성, 유리화율, 분말도 등에 따라 다르다.

2.1.4 고로슬래그 시멘트

1) 고로슬래그 시멘트 개요

고로슬래그 미분말은 제철소 용광로(고로)에서 선철과 함께 생성하는 용융 고로슬래그를 물로 급냉 시키면서 만든 입상의 고로 수재슬래그를 건조시켜 미세 분쇄한 것으로 사용 목적에 따라 석고를 투입하는 경우도 있다. 고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 가지고 있고 고로슬래그 미분말 자체로 경화하는 성질이 약하지만 알카리 자극으로 경화한다. 포틀랜드 시멘트와 혼합한 경우에는 황산염이나 수산화칼슘의 작용에 의해 경화가 촉진되며, 포틀랜드 시멘트만에서 얻을 수 없는 아래와 같은 우수한 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다(김은겸, 2000).

- ① 콘크리트의 온도상승억제 효과 및 수화발열속도의 저감 효과가 있다.
- ② 수밀성이 향상된다.
- ③ 장기강도가 향상된다.
- ④ 철근의 발청 억제(염화물 이온 침투억제)에 효과가 있다.
- ⑤ 화학저항성(황산염)이 향상된다.
- ⑥ 알카리 실리카 반응의 억제에 효과가 있다.
- ⑦ 블리딩이 적고 유동성(고분말 고로슬래그 미분말 사용시)이 우수

이와 같은 특성을 가진 고로슬래그 미분말은 혼화재로서 사용량이 증가함에 따라, 즉, 사용자가 고로슬래그 미분말의 분말도, 사용량 및 포틀랜드 시멘트와의 혼합율을 자유롭게 선택할 수 있기 때문에, 사용 목적에 맞는 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다.

표 2.6에 나타낸 고로슬래그 시멘트 종류에 대한 품질규정 중, 국내에서 주로 사용되고 있는 고로슬래그 시멘트는 2 종이다. 대부분의 시멘트 생산회사에서는 계절별로 시멘트와 고로슬래그 미분말의 혼합비율을 4.5 : 5.5, 5.0 : 5.0 또는 5.5 : 4.5 상태로 생산하고 있으며 이는 1종의 경우에는 혼합에 따른 성능을 발휘하기에 다소 적게 혼합된 형태로, 7일 이전에 강도발현 효과를 얻기 위하여 사용되는 경우가 많고 3종의 경우에는 강도효과보다는 제설제나 바닷물 의한 염해를 방지하기 위하여 사용되는 경우가 많아 그 사용의 한계를 나타내고 있다. 또한, 고로슬래그 함유량이 증가함에 따라 삼산화황(SO₃) 사용량이 증가되는 것을 볼 수 있는데, 이는 고로슬래그 미분말의 투입량이 증가되면서 시멘트 사용량이 감소되고 이는 반응성이 감소되는 것을 보완하기 위하여 촉진제를 투입한다. 촉진제는 많은 양을 사용할 경우 팽창성을 제어하기 힘들기 때문에 제한을 둔 것이라 할 수 있다.

표 2.6 고로슬래그 시멘트의 품질규정(한국표준협회, 2016)

항 목		종 류		1종	2종	3종	
고로슬래그 함유량 (질량 %)				5 초과 30 이하	30 초과 60 이하	60 초과 70 이하	
화학적 성질	삼산화황(SO ₃)(%)				3.5 이하	4.0 이하	4.5 이하
	강열감량 (%)				3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
	산화마그네슘 (MgO) (%)				5.0 이하	6.0 이하	6.0 이하
분말도	비표면적(Blaine) (cm ² /g)				3000 이상	3000 이상	3000 이상
안정도	오토클레이브 팽창도(%)				0.2 이하	0.2 이하	0.2 이하
	르샤틀리에 (mm)				10 이하	10 이하	10 이하
응결 시간	비카 시험	초결 (분)		45	60	60	
		종결 (시간)		7	10	10	
압축강도 (MPa)	3 일				12.5 이상	10.0 이상	7.5 이상
	7 일				22.5 이상	17.5이상	15.0 이상
	28 일				42.5 이상	42.5 이상	40.0 이상

2) 고로슬래그 시멘트 기술 현황

고로슬래그의 사용역사를 살펴보면 1862년 독일의 E. Langen은 수재슬래그를 소석회와 반응 시 수경성이 발휘된다는 것을 발견하였고, 1895년 독일에서는 소석회와 고로슬래그를 투입한 슬래그가 상업화 되고, 프랑스, 영국 및 미국에서도 소석회 25~30%, 수재슬래그 70~75%의 투입비율의 고로슬래그시멘트가 대량으로 생산되었다(김은겸, 2000).

한편, 고로슬래그 미분말이 콘크리트용 혼화재로 사용되기 시작한 것은 독일의 N. Sutterheim이 1953년에 발표한 건조 고로슬래그 미분말로부터 사용되기 시작했다고 알려져 있다(진정언, 2015). 남아프리카에서는 1958년 이후 3,500 cm²/g이상의 분말도를

가진 고로슬래그 미분말이 일반적인 혼화재로 사용되었으며, 레디믹스트 콘크리트의 보급으로 신뢰성이 높은 콘크리트를 제조할 수 있기 때문에 가능하였다(김성환, 2011). 또한, 1969년 영국에서는 고향산업 슬래그 시멘트 제조공장을 운영하여 고로슬래그 미분말을 생산하게 되었으며 세계 최장의 Humber교 주탑 콘크리트에 사용되었다. 1970년 중반이후 고로슬래그 미분말을 제조하기 위해 분쇄·분급시스템의 개발이 가속화되었고, 제조된 고로슬래그 미분말의 활용범위도 확대되어 1980년 중반 이후 고로시멘트 시장이 형성되어 왔으나, 최근에는 높은 분말도의 고로슬래그 미분말을 이용한 주입제, 고화제 및 보수재 등의 고부가가치형 제품으로의 활용이 확대되고 있다. 일본의 경우 롤밀 및 볼밀과 분급기가 조합된 분쇄 시스템을 개발하여 분말도 6,000~15,000 cm^2/g 의 고로슬래그 미분말을 제조하여 분말도에 따라 건축 및 토목용 특수제품의 개발에 다양하게 활용하고 있다. 프랑스에서는 그림 2.3에서 보는바와 같이 년 간 약 3백만 톤이 생산되고 있는 약 73% 정도는 시멘트에 사용되고 있고, 나머지 약 17% 정도는 골재로 사용되고 있는 상황이다. 일반적으로 콘크리트용 혼화재로서 고로슬래그 미분말의 분말도는 포틀랜드 시멘트의 클링커보다도 미세한 분말도 4,000 cm^2/g 전후의 고로슬래그 미분말이 사용되고 있다. 그러나 분말도를 증가시키면 단위수량이 적고 블리딩이 적은 콘크리트를 얻을 수 있는 것으로 알려져 용도에 따라 분말도 4,000~8,000 cm^2/g 의 고로슬래그 미분말이 사용되고 있으며, 최근에는 고로슬래그 미분말의 용도를 확대하기 위해 6,000~10,000 cm^2/g 정도의 미분쇄한 고로슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재로 활용하기 위한 연구도 이루어지고 있다(김성환, 2011). 특히, 유럽에서는 시멘트 시방서 표준인 EN 197-1 (Composition, Specifications and conformity criteria for common cements, 2000)에 그림 2.4와 같이 슬래그 미분말에 대한 투입 정도에 따른 분류를 나타내고 있으며 EN 15 167-1(EN 197-1, 2000) (GGBS for direct use in concrete)에 콘크리트에 사용하기 위한 기준을 마련하여 사용되고 있다.

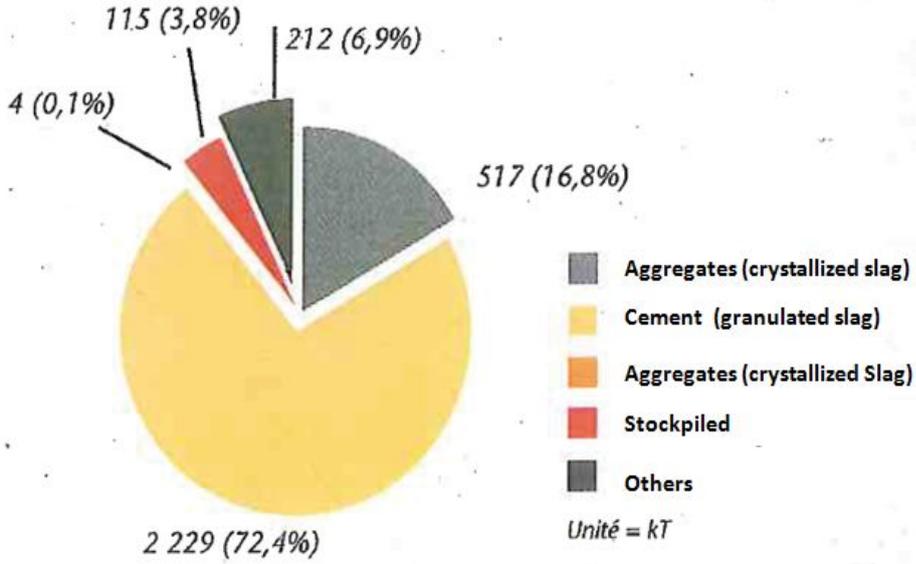


그림 2.3 프랑스에서 사용되고 있는 고로슬래그 미분말(원철, 2012)

CEMENT TYPE	DESIGNATION	CLINKER	SLAG	Silica F	FA	Pouzz	Burnt sh	Limestone	Sec Const	Ca Sulfate
		K	S	D	V	Z	T	LL		
		% mass	% mass	% mass	% mass	% mass	% mass	% mass	% mass	% mass
Portland- Slag Cement	CEM II/A-S	80-94	6-20						0-5	
	CEM II/B-S	65-79	21-35						0-5	
Composite Portland cement	CEM II/A-M	80-94				6-20			0-5	
	CEM II/B-M	65-79				21-35			0-5	
Blast furnace Cement	CEM III/A	35-64	36-65						0-5	
	CEM III/B	20-34	66-80						0-5	
	CEM III/C	5-19	81-95						0-5	
Composite Cement	CEM V/A	40-64	18-30			18-30			0-5	
	CEM V/B	20-38	31-50			31-50			0-5	
Super Sulfated Cement	SSC	>10	>80						0-5	<20

그림 2.4 유럽의 시멘트에 대한 시방서 표준(원철, 2012)

표 2.7 국내 포틀랜드 시멘트 생산업체 현황 (한국 시멘트 협회, 2016)

시멘트 생산업체	공장위치	kiln	
		킬른 수(개)	능력(천톤/년)
동양	삼척	7	10,045
쌍용	동해/영월/문경	7 / 5 / 2 총 : 14	11,221 / 3,537 / 568 총 : 15,160
아세아	제천	4	4,146
성신	단양	5	9,686
라파즈한라	옥계 / 신기	4 / 1 총 : 5	6,633 / 1,551 총 : 8,184

2) 분석내용 및 분석 방법

시멘트 유해이온 함량을 파악하기 위하여 토양오염공정시험기준[2015]에 의거된 실험을 통하여 폐기물 함량을 분석하였으며, 시험기준에 대한 정량한계에 대한 내용은 표 2.8에 나타내었다. 물리적인 특성인 주도와 분말도는 국내에서 2016년 생산된 시멘트 6개사의 제품(A, B, C, D, E, F)과 일본산 시멘트 1개사의 제품(G)을 분석하였고, 고로슬래그 미분말의 100 % (S/P)인 상태, 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말 비율이 70% : 30%(G-1), 60% : 40%(G-2), 50% : 50%(G-3), 40% : 60%(G-4), 30% : 70%(G-5)인 혼합 상태를 비교 분석하였다.

표 2.8 토양오염공정시험기준에 제시되니 정량한계 및 결과표기 방법

NO	성분명	1지역 우려기준 (mg/kg)	정량한계 (mg/kg)	시험결과 표시자리수
1	수분함량		0.1	0.0
2	수소이온농도		0.1	0.0
3	카드뮴 (Cd)	4	0.40(AAS) 0.10(ICP-AES)	0.00
4	구리 (Cu)	150	1.0	0.0
5	비소 (As)	25	0.10(HG-AAS) 1.50(ICP-AES) 0.10(HG-ICP-AES)	0.00
6	수은 (Hg)	4	0.05(CV-AAS) 0.01(TDA-AAS)	0.00
7	납 (Pb)	200	4.0(AAS) 1.5(ICP-AES)	0.0
8	6가크롬 (Cr)	5	0.5	0.0

표 2.9 시멘트 분석을 위한 시료 분류

Sample		시멘트비율	슬래그비율
No	시료명		
A	PC - A	100 %	0 %
B	PC - B	100 %	0 %
C	PC - C	100 %	0 %
D	PC - D	100 %	0 %
E	PC - E	100 %	0 %
F	PC - F	100 %	0 %
G	PC - G	100 %	0 %
S/P	고로슬래그 미분말	0 %	100 %
G - 1	고로슬래그 시멘트-1	70 %	30 %
G - 2	고로슬래그 시멘트-2	60 %	40 %
G - 3	고로슬래그 시멘트-3	50 %	50 %
G - 4	고로슬래그 시멘트-4	40 %	60 %
G - 5	고로슬래그 시멘트-5	30 %	70 %

3) 주도 및 분말도 분석결과

표 2.9는 제조사별 시멘트의 물리적 특성인 주도 및 분말도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 분석결과, 분말도는 2015년 이전보다 낮아진 것으로 파악되었으며, 주도는 대부분 유사한 경향을 나타내고 있으나, 분말도가 높은 PC - D 의 경우 주도가 높아지

는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말 치환율의 변화에 대한 분석에서도 유사한 경향을 보이고 있는데, 고로슬래그 미분말의 치환율이 높아지게 되면, 분말도가 올라가게 되고 주도가 높아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 분말도가 상승함에 따라 최소 혼입에 필요한 수량이 필요하게 된다는 것을 알 수 있었다.

표 2.10 제조사별 시멘트의 주도 및 분말도 분석결과

Sample		시멘트비율	슬래그비율	주도	분말도
No	시료명				
A	PC - A	100 %	0 %	29.5	3,570
B	PC - B	100 %	0 %	29.5	3,490
C	PC - C	100 %	0 %	30.5	3,590
D	PC - D	100 %	0 %	32.5	3,860
E	PC - E	100 %	0 %	29.0	3,540
F	PC - F	100 %	0 %	29.0	3,240
G	PC - G	100 %	0 %	29.5	3,520
S/P	고로슬래그 미분말	0 %	100 %	-	4,310
G - 1	고로슬래그 시멘트-1	70 %	30 %	30.3	3,900
G - 2	고로슬래그 시멘트-2	60 %	40 %	30.8	3,990
G - 3	고로슬래그 시멘트-3	50 %	50 %	31.0	4,150
G - 4	고로슬래그 시멘트-4	40 %	60 %	31.2	4,230
G - 5	고로슬래그 시멘트-5	30 %	70 %	32.0	4,605

2) 폐기물 분석결과

토양오염공정시험기준에 의거하여 실시한 시멘트 내 폐기물을 분석한 결과는 표

2.11에 나타내었다. 분석결과, 대부분 포틀랜드 시멘트에서는 유해 중금속이온이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 특히, PC - F 사 제품의 경우에는 토양오염공정기준에 제시한 기준보다는 작게 나타났지만, 타사 제품보다는 상대적으로 모든 항목에서 높은 것으로 파악되었다. 특히, 비소(As)는 PC - B, F 사의 10.0 이상의 수치를 나타내고 있어, 환경적인 측면과 작업자의 건강상의 문제를 야기 시킬 수 있는 부분이라 볼 수 있다. 최근 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트를 소성할 때 사용하고 있는 연료에서 이러한 중금속 이온이 포함되어 있어 향후에도 포틀랜드 시멘트를 사용할 경우에는 주기적인 평가가 요구된다.

고로슬래그 시멘트의 경우에는 이러한 중금속 이온의 함량이 상당히 많이 줄어든 상태로 검출되었기 때문에 환경적인 측면에서 고로슬래그 시멘트의 활용이 필요하다고 볼 수 있다.

표 2.11 토양오염공정시험기준에 따라 실시한 시멘트 분석결과

구분	측정 결과 (mg/kg)					
	Cd 4 이하	Cu 150 이하	Pb 200 이하	As 25 이하	Hg 4 이하	Cr 5 이하
PC - A	2.89	111	48.0	7.24	0.06	불검출
PC - B	2.46	71.4	27.5	16.8	불검출	불검출
PC - C	2.81	12.5	20.8	4.58	불검출	불검출
PC - D	2.33	101	41.4	7.99	0.09	불검출
PC - E	2.97	27.1	27.6	4.48	불검출	불검출
PC - F	3.08	134	43.4	13.8	불검출	불검출
PC - G	3.12	46.8	21.5	7.40	불검출	불검출
S/P	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
G-2	0.98	불검출	12.4	1.67	불검출	불검출
G-4	불검출	불검출	9.5	불검출	불검출	불검출

2.2 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성

2.2.1 굳지 않은 콘크리트 특성

1) 워커빌리티 및 공기량

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 일반콘크리트보다 워커빌리티가 좋아진다(한국콘크리트학회, 1997). 특히, 고로슬래그 미분말의 분말도가 크고, 치환율이 많을수록 양호해지는 경향이 있다. 또한, 소정의 공기량을 얻는데 필요한 공기연행제의 투입량은 그림 2.6와 같이 고로슬래그 미분말의 분말도, 치환율이 증가함에 따라 증가하며, 혼화제의 종류 및 콘크리트 비빔시의 온도에 따라 서로 변화되기 때문에 사용 환경에 가능한 가까운 조건에서 시험을 행하고 배합을 결정해야 하는 것이 요구된다(진정언, 2015). 단, 석고 투입 시 큰 차이가 없고 석고를 투입한 경우 약간 증가하는 경향이 있다.

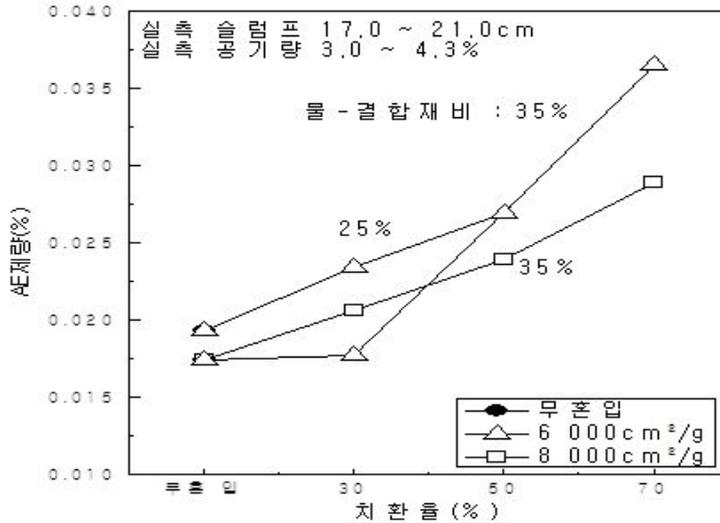


그림 2.6 고로슬래그 미분말 치환율과 공기연행제 투입량의 관계
(한국콘크리트학회, 1997)

2) 블리딩을 및 응결시간

일반적으로 고로슬래그 미분말의 분말도가 커짐에 따라 블리딩율은 감소하는데 이는 미분말의 효과에 의한 것으로 볼 수 있다. 한편, 응결시간의 경우는 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가함에 따라 초결, 종결 모두 지연되나 분말도에 따른 응결시간변화는 그다지 크지 않은 것으로 보고되고 있다(한국콘크리트학회, 1997).

2.2.2 경화된 콘크리트 특성

1) 수화열 및 단열온도 상승량

일반적으로 고로슬래그 미분말 치환율 약 30%까지는 수화열의 저감 효과가 작으며, 이는 소량의 고로슬래그 미분말이 공존하는 경우 클링커 광물의 수화를 촉진하기 때문인 것으로 알려져 있고 재령 7일의 수화열은 분말도에 비례하여 커지지만 재령 28 일에서는 분말도에 크게 영향을 받지 않는다(한국콘크리트학회, 1997).

단열온도상승의 경우는 그림 2.7에서 보는 것처럼 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우 수화초기에는 치환율의 증가에 따라 단열온도 상승량은 작아지나 후반부에서는 단열온도상승에 의하여 수화환경이 고온이 되면 고로슬래그 미분말의 수화반응은 급속히 진행되어 치환율 50%까지는 치환율에 따라 단열온도 상승량이 증가하게 된다(김득환, 2013). 이러한 현상은 고로슬래그 미분말 온도의존성이 크기 때문에 높은 온도에서는 반응이 활발히 진행되고, 낮은 온도에서는 반응의 진행이 어렵다. 치환율이 적은 경우 미분말의 존재가 클링커 광물의 수화반응을 촉진하기 때문으로 판단된다. 그러나, 치환율이 70%가 되면 단열온도 상승량은 작아지게 되고, 이는 클링커 물량이 30%로 작아져 발열이 감소하는 것과 생성되는 Ca(OH)_2 량이 적어서 고로슬래그 미분말의 반응이 감소하기 때문이다. 또한, 고로슬래그 미분말의 분말도가 $8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 것이 $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 것보다 단열온도 상승량이 작은 경향이 있다(한국콘크리트학회, 1997). 이것은 분말도가 $8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 정도가 되면 고온에서 고로슬래그 미분말의 수화반응이 활발하게 되어 고로슬래그 미분말의 수화생성계층이 클링커의 수화를 억제한다. 고로슬래그 미분말은 일반적인 포틀랜드 시멘트처럼 물과 접하는 것만으로 수화반응을 발현할 수 없는 잠재수경성 물질이다. 즉, 고로슬래그 미분말과 물이 접촉하게 되면 고로슬래그 미분말 입자의 표면에 치밀한 불투수성 껍막이 형성되고 입자 속까지 물이 침투하는 것이 방해되며 더 이상은 반응이 일어나지 않는다. 그러나 황산염

(CaSO₄)이나 알칼리(Ca(OH)₂, KOH, NaOH)등의 자극을 받으면 이 피막이 파괴되면서 겔로 변화되고, 고로슬래그 미분말은 이온의 용출과 불용성의 물질이 표출되면서 경화되기 시작한다. 이러한 수화반응을 잠재수경성이라고 한다. 고로슬래그 미분말은 장기적으로 고로슬래그 질량의 약 10%에 해당하는 Ca(OH)₂과 결합하면서, 일반적인 포트랜드 시멘트는 약 25%의 Ca(OH)₂을 생성 방출하기 때문에 이론적으로는 고로슬래그 미분말을 시멘트의 75%까지 치환하여도 고로슬래그 미분말 75%를 반응시킬 수 있다.

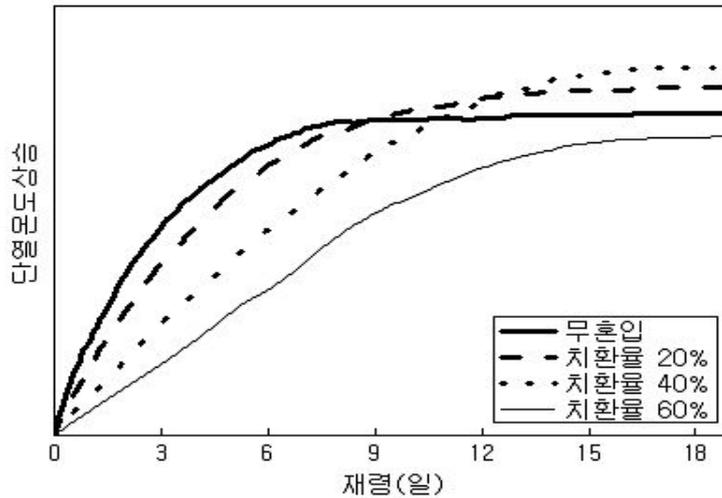


그림 2.7 단열온도 상승의 개념도(슬래그 치환율별)
(한국콘크리트학회, 1997)

2) 압축강도 특성

고로슬래그 미분말을 사용하는 콘크리트의 압축강도는 물-결합재비, 재령 및 양생방법 외에 고로슬래그 미분말의 치환율 및 분말도의 영향을 받는다. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 물-결합재비{물/결합재(시멘트+고로슬래그 미분말)의 질량비}와 거의 직선적인 관계가 있다. 또한, 치환율이 크면 초기 강도증진이 낮아지고 잠재수경성반응에 의해 장기재령으로 갈수록 강도는 더욱 증진된다. 단, 그림 2.8과 같이 분말도가 6,000 cm²/g 이상인 경우에는 고로슬래그 미분말을 사용하지 않는 정도의 초기강도를 얻을 수 있다. 한편, 치환율이 증가하면 그림 2.9에서처럼 초기 재령은 압축강도가 저하되고, 장기 재령은 치환율이 70 %가 되어도 압축강도는 상승한다.

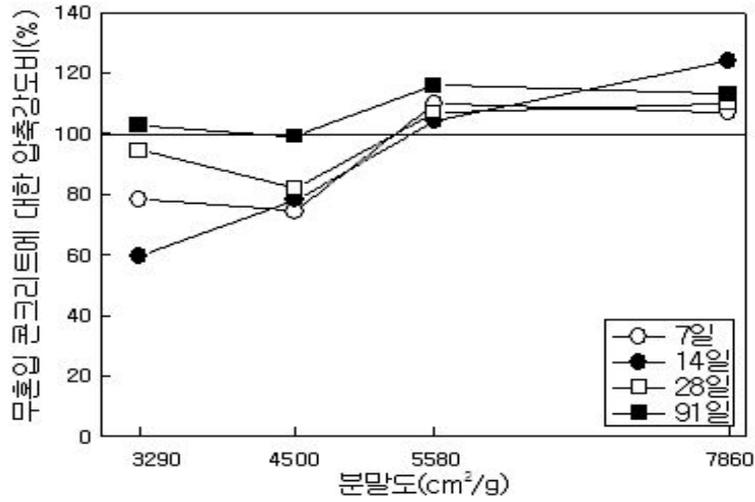


그림 2.8 분말도와 무투입 콘크리트에 대한 강도비율(한천구, 2008)

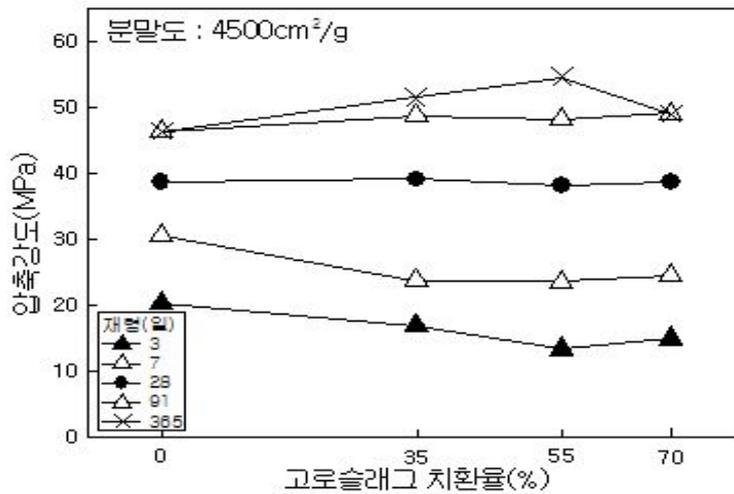


그림 2.9 치환율과 압축강도 관계(한천구, 2008)

양생온도가 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 고로슬래그 미분말을 투입하지 않은 콘크리트보다 낮다. 즉, 그림 2.10와 같이 양생온도가 저온 일 때 초기강도의 증진이 둔화되는 것을 알 수 있고, 20°C 이상의 고온양생에서는 초기강도가 높게 증진됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 분말도가 낮을수록, 치환율이 높을수록 낮다. 따라서 한중 및 서중 콘크리트와 같은 저온 및 고온 일 경우에는 치환율과 분말도 등을 종합적으로 고려하여 판단해야 한다.

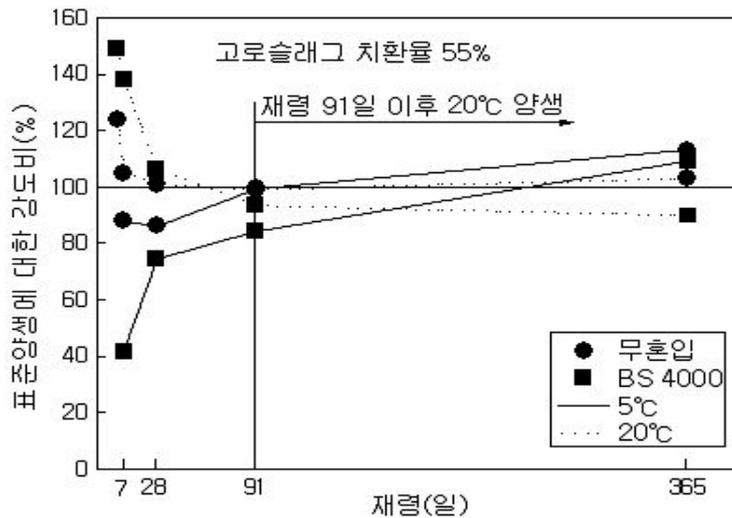


그림 2.10 양생온도가 강도에 미치는 영향(한천구, 2008)

3) 내구특성

(1) 건조수축

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 건조수축은 분말도 및 치환율에 따라 다르며 보통 건조일수가 5주까지는 분말도 및 치환율이 크면 건조수축이 증대되는 경향을 나타낸다. 그러나 그 이후에서는 건조수축이 둔화되면서 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 거의 유사한 경향을 나타낸다.

(2) 탄산화

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 시멘트의 수화반응시 발생하는 Ca(OH)_2 과

고로슬래그 미분말의 성분과 반응하면 콘크리트의 알칼리성이 저하되고 그림 2.11과 같이 콘크리트의 탄산화가 보통 콘크리트에 비하여 빠르게 진행된다(한국콘크리트학회, 1997). 따라서 고로슬래그 미분말을 사용한 경우 콘크리트의 탄산화에 대하여 충분히 고려해야 한다. 탄산화와 분말도 관계는 분말도가 증가하면 콘크리트가 밀실하게 됨으로써 탄산화 깊이는 작아지고 초기 수중양생기간이 길면 탄산화 깊이는 작아지므로 충분한 습윤 양생이 중요하다.

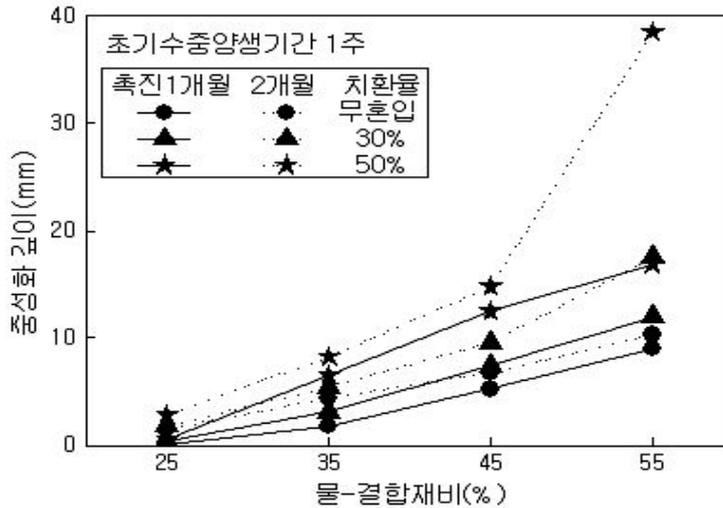


그림 2.11 콘크리트 탄산화 시험결과(한국콘크리트학회, 1997)

(3) 수밀성 및 내해수성

콘크리트가 치밀한 정도를 수밀성이라 한다. 공극량이 적고, 공극직경이 작고, 공극이 불연속적으로 분포 할수록 수밀성은 증가된다. 고로슬래그 미분말을 투입한 콘크리트에서는 잠재수경성에 의해 생성된 C-S-H겔이 공극구조를 개선함으로써 수밀성은 증가된다(한국콘크리트학회, 1997). 이러한 수밀성의 증가에 의해 황산염, 염소이온의 침투 등에 대한 저항성도 크게 되며, 내해수성 경우 고로슬래그 미분말은 콘크리트 중에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 반응하여 C-S-H 겔을 형성하기 때문에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 해수중의 황산염 반응에 의한 팽창수화물의 생성량을 저감할 수 있다. 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트는 보통 콘크리트보다 내해수성이 향상된다(한국콘크리트학회, 1997). 또한 고로슬래그 미분말에 석고를 투입하면 내해수성은 향상되고, 이는 표층부에 치밀한 에틀링자이트가 생성되면서 내해수성은 향상된다.

(4) 기타

고로슬래그 미분말의 치환율이 증가하면서 알칼리골재 반응의 억제효과가 크게 나타난다. 내산성 및 내황산염에 대한 저항성이 증가되고 고로슬래그 미분말의 분말도 및 치환율의 증가와 물결합재비의 감소에 따라 알칼리골재 반응 억제 효과가 크게 향상되므로 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 큰 장점 중 하나이다(한국콘크리트학회, 1997). 종합적으로 고로슬래그 미분말을 콘크리트에 활용하게 될 경우 수밀성의 향상, 장기강도의 증진, 화학적 저항성, 수화열 억제 등이 향상되고 경제적 측면에서 긍정적인 효과가 크지만, 초기에 발생하는 초기강도 감소, 건조수축의 증가, 탄산화 문제 등이 단점으로 대두되므로 이에 대한 대책이 반드시 필요하다.

2.3 고로슬래그 미분말 적용성 확대 방안

2.3.1 화학적 방법

고로슬래그 미분말을 다량으로 사용한 콘크리트는 응결지연, 초기강도 저하, 탄산화 촉진 등 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 크게 화학적 방법 및 물리적 방법이 있으며, 화학적인 방법은 주로 알칼리 자극제를 투입하거나, 수화반응을 촉진하는 물질을 혼합하거나, 조강성능을 나타내는 화학 혼화제를 사용하는 방법을 나눌 수 있다.

1) 촉진제투입 방법

고로슬래그 미분말을 다량으로 사용하는 콘크리트의 품질개선용 촉진제로는 보통 KOH, NaOH, Ca(OH)₂, Na₂SiO₃ 등이 있다. 이러한 알칼리 촉진제는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응을 활용하는 방식으로, 고로슬래그 미분말 중의 Al₂O₃, CaO, SiO₂ 등을 용출을 촉진시켜 빠르게 경화를 촉진하는 특성을 나타낸다. 그림 2.12은 Na₂SiO₃, NaOH 수용액이 촉진제로 사용된 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도를 나타낸 그래프이다(이화영, 2006). F1~F10까지는 알칼리 자극제인 Na₂SiO₃과 NaOH 수용액을 투입한 것에 대한 결과이고, F1~F3은 Na₂SiO₃의 투입량을 고정시킨 후 NaOH를 증가시

킨 것이고, F4~F5는 Na_2SiO_3 의 값을 최대값에 가까운 수치로 증가시킨 후 NaOH를 최소에 가까운 값으로 고정시킨 것이고, F6~F9는 NaOH의 값을 고정하고 Na_2SiO_3 의 투입량을 늘린 것이며, F10은 Na_2SiO_3 의 값을 최대로 하고, NaOH의 값을 중간 값 정도로 투입한 것이다(진정언, 2015). 전반적으로 F1~F2의 경우는 알칼리 촉진제 및 촉진제를 투입하지 않은 포틀랜드 시멘트 보다 강도가 낮게 나타나고, F9 및 F10은 강도가 크게 발현되었다. 따라서 NaOH의 투입량을 늘리는 것보다는 Na_2SiO_3 의 투입량을 늘리는 것이 초기 및 장기강도를 확보하는데 유리하다고 볼 수 있다. 여기서, 고로슬래그 미분말에 알칼리 촉진제의 적절한 투입은 포틀랜드 시멘트 이상의 강도를 발현할 수 있다. 동시에 초기강도의 개선이 가능하며 알칼리 촉진제의 과당 사용은 알칼리 골재 반응과 단가 상승, 급결 반응 등의 문제점을 야기시키게 되므로 그 사용에 있어 충분한 고려가 필요하다(소양섭, 2002).

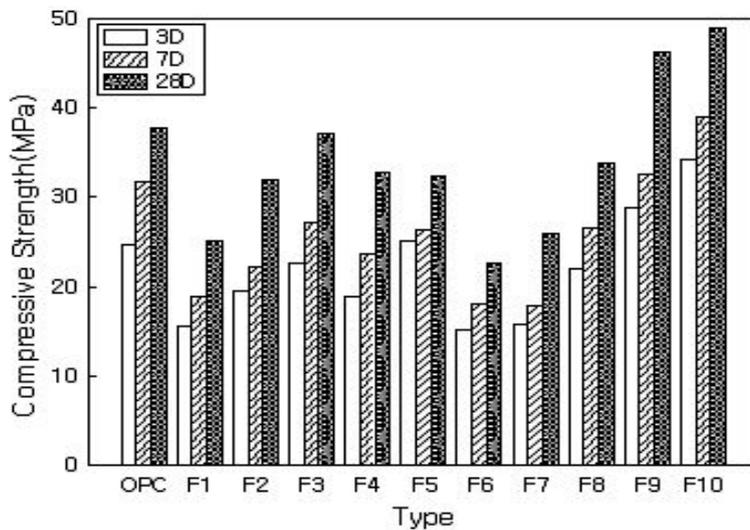


그림 2.12 알칼리 촉진제 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도
(이화영, 2006)

2) CSA 투입방법

CSA(Calcium Sulfo Aluminate)의 수화반응은 시멘트와 석고중의 유리석회와 반응하여 다량인 32몰의 결정수를 갖는 에틀링자이트라는 수화물을 생성하게 된다(김효락, 1996).



만일 다음과 같이 외부에서 석고가 공급되지 않거나 부족하다면,



상기의 식 (2.6)에서와 같이 CSA의 수화반응에 의해서 모노설퍼네이트라는 수화물이 생성되었고, 이 모노설퍼네이트라는 수화물은 결합수가 작지만 생성속도가 빠른 특징을 갖고 있다. 또한, 식 (2.5)와 식 (2.6)의 CaO 마저 부족하게 될경우 일부는 모노설퍼네이트 수화물이 생성되고 일부는 급결성 수화물이 된다. 이상의 반응 메커니즘을 보면, CSA는 외부 투입되는 석고, 시멘트에 따라 수화물의 생성속도, 종류 및 수화물성상이 좌우되어, 이 반응에 따라 고강도, 속경성, 팽창성의 성능을 조절할 수 있게 된다(소양섭, 2002).

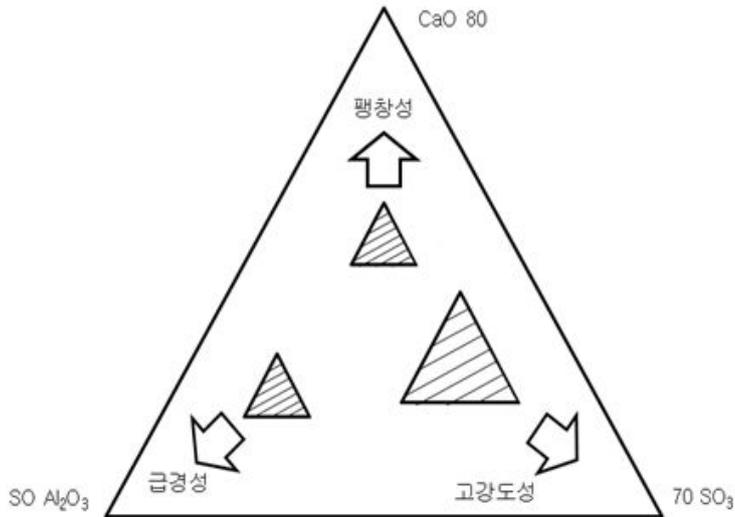


그림 2.13 성분에 따른 CSA의 경화구조(김효락, 1996)

에틀링자이트계 수화물은 고강도화, 팽창성, 속경성을 나타내는 특성이 있는데 이 같은 현상은 간단하게 에틀링자이트계 수화물의 특성만으로 설명하기 어렵다. 포틀랜드 시멘트의 수화반응속도와 에틀링자이트계 수화물의 생성시기의 시간적인 조화가 중요하다. 또한, 그림 2.13와 같이 조성에 있어서 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SO}_3$ 3성분 중에서 CaO 의 양이 증대될수록 팽창성이 나타나게 되며 Al_2O_3 의 양이 증가하면 속경성, SO_3 의 양이 증대되면 강도 발현 성능이 증가한다(소양섭, 2002). 한편, 시멘트의 응결과정과 에틀링자이트의 생성시기의 관련성이 각종 특성에 미치는 영향을 보면 그림 2.14과 같다. I 시기에 있어서 에틀링자이트가 주로 생성되면서 속경성 현상이 나타나게 되고, II 시기(시멘트의 응결경화)에는 에틀링자이트가 집중적으로 생성되면서 강도 증진성이, III시기에서 생성되는 경우는 팽창성을 나타나게 된다. 그리고 IV시기(시멘트 페이스트의 경화 후)에 에틀링자이트가 생성되면 팽창파괴가 일어날 확률이 커진다.

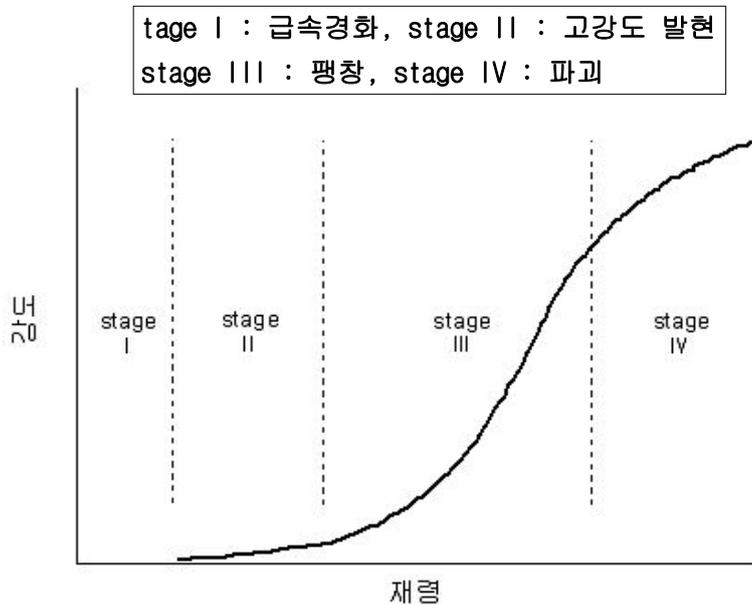


그림 2.14 에틀링자이트 생성시기별 특성(김효락, 1996)

3) 조강형 화학혼화제 투입방법

그림 2.15는 각종 혼화제 종류별 경과시간에 따른 관입저항값, 그림 2.16는 초결 및 종결시간만을 나타낸 것이다.

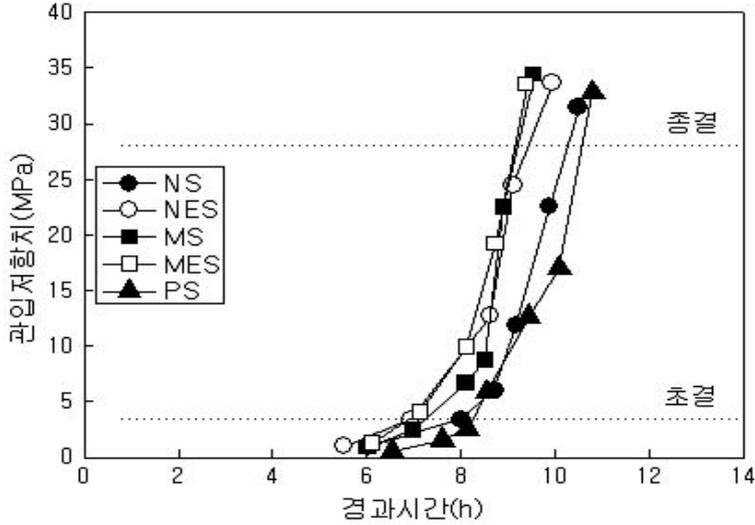


그림 2.15 혼화제 종류별 관입저항치(황인성, 2003)

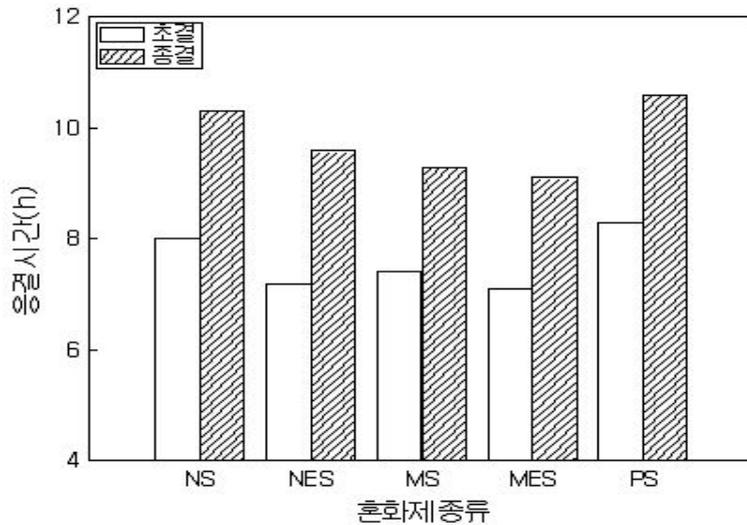


그림 2.16 혼화제 종류에 따른 초결 및 종결시간(황인성, 2003)

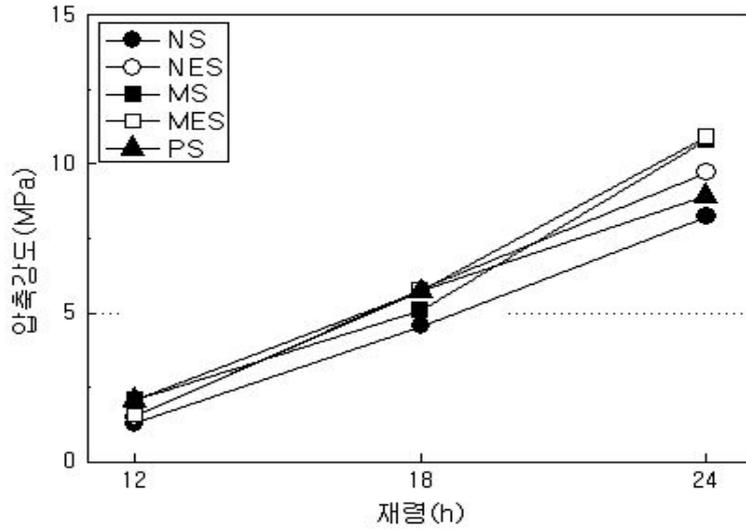


그림 2.17 혼화제 종류별 초기재령 압축강도(황인성, 2003)

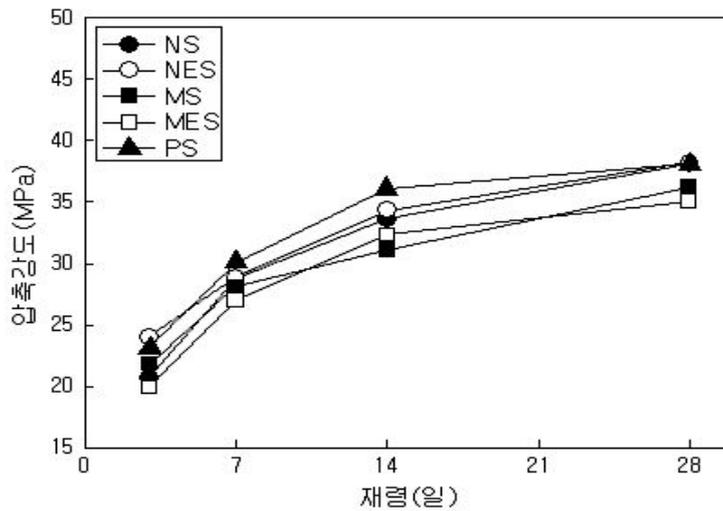


그림 2.18 혼화제 종류별 재령별 압축강도(황인성, 2003)

혼화제 종류 중에 나프탈렌계는 촉진형은 표준형보다 1시간 정도 응결시간이 빠르게 나타나고, 멜라민계의 경우는 촉진형과 표준형 응결시간 차이가 크지 않았으며, 폴리칼본산계는 멜라민 및 나프탈렌보다 응결시간이 다소 지연되는 것으로 나타났다.

그림 2.17 및 그림 2.18은 각종 혼화제 종류별 초기재령 24시간 및 재령 28일까지의 압축강도 증진 경향을 나타낸 것이다. 초기재령 24시간 내에서 강도증진은 혼화제 종류별 큰 차이 없으며 18시간 전후에서 측면 거푸집 탈형 가능한 압축강도인 5MPa를 발휘하는 것으로 나타났다. 혼화제 촉진형은 표준형보다 강도증진이 빠른 것으로 나타났다고 효과는 크게 없는 것으로 나타났다. 또한, 재령경과에 따른 압축강도는 재령이 경과할수록 증가하고, 나프탈렌계, 폴리칼본산계, 멜라민계는 공기량이 작은 순에 따라 크게 나타나며 차이는 크게 없는 것으로 분석할 수 있다.

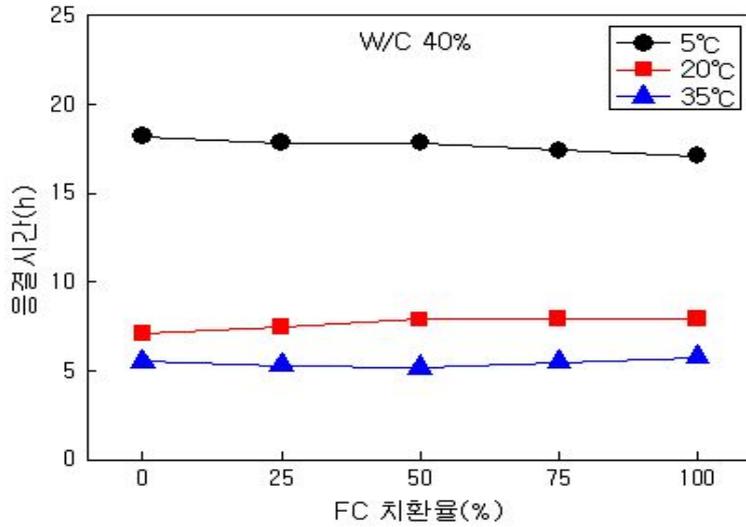
2.3.2 물리적 방법

고로슬래그 미분말을 많은 양을 사용하기 위한 콘크리트 물리적인 방법은 고로슬래그, 시멘트의 분말도를 높여 초기에 수화반응면적을 증가시켜 활성화 시키는 방법이 있다(김동진, 2011). 본 절은 미세분쇄(고분말) 시멘트와 고로슬래그 미분말의 분말도에 따른 특성은 다음과 같다.

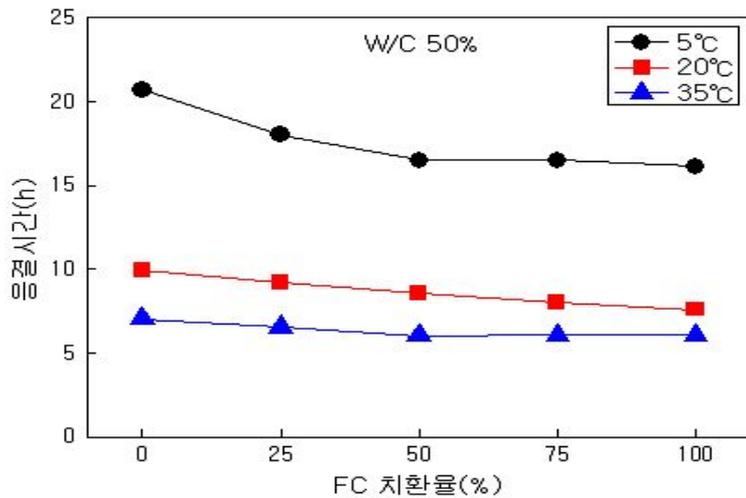
1) 미세분쇄(고분말) 시멘트 사용방법

미세분쇄(고분말) 시멘트는 물과의 접촉 면적이 크므로 수화반응이 빠르며 단기강도가 증가된다. 콘크리트와 모르타르에 있어 미세분쇄(고분말) 시멘트는 골재와 균일하게 혼합되어 골재와 골재의 결합을 치밀하게 하기 때문에 강도는 증진하게 된다. 그러나 시멘트를 지나치게 미세분쇄(고분말)화하면 물을 투입과 동시에 알루미늄이 물과 접촉하면서 석고가 급속히 소모되고, 모노설퍼네이트로의 변화도 빠르게 진행되며 모노설퍼네이트와 C-A-H 겔이 Alite 입자를 감싸면서 수화반응을 방해한다. 이와 같은 시멘트를 물 먹는 시멘트라 부르고 강도도 또한 저하되는 현상이 나타난다. 대안으로는 석고 양을 증가시키는 것 이외에는 없지만 어느 정도의 분말도, 입도분포가 좋은가는 분명한 결론은 얻어져 있지 않았으며 경제적으로도 어느 정도 한계가 따른다(최성우, 2011). 시멘트의 수화반응속도는 시멘트 입자와 물과의 접촉 범위에 따라 좌우되고 일반적으로 입도보다는 비표면적으로 나타내는 것이 편리하다. 그림 2.19 (a) (b) (c)는 W/C 및 미세분쇄(고분말) 시멘트(이하 FC) 치환율 온도 변화에 따른 응결시간을

나타낸 그래프이다. 미세분쇄(고분말) 시멘트 치환율에 따른 응결시간의 경우 저온 상태에서는 치환율이 증가하고 응결시간의 축진이 되며, 고온 조건에서는 고로슬래그 미분말을 다량 사용에 기인하여 응결축진이 뚜렷하게 나타나지는 않았다.

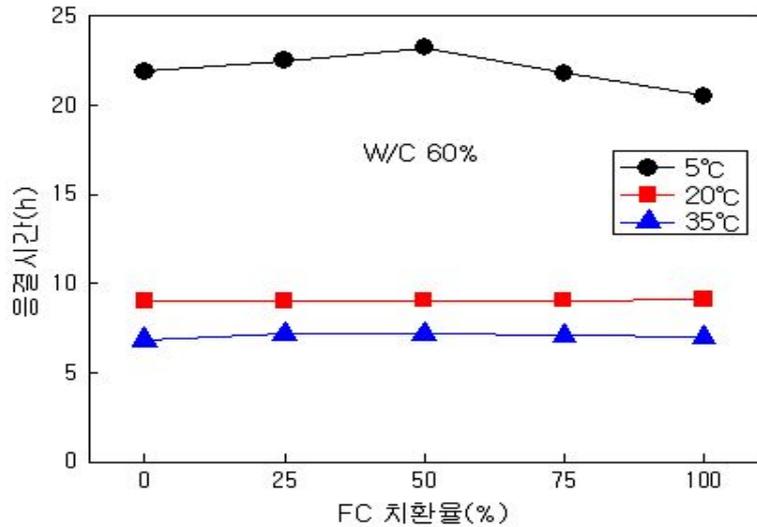


(a) W/B 40%



(b) W/B 50%

그림 2.19 온도에 따른 응결시간(계속)



(c) W/B 50%

그림 2.19 온도에 따른 응결시간(최성용, 2007)

그림 2.20은 물-시멘트비(W/C)와 양생온도 및 FC 치환율별 재령 28일 압축강도에 대한 백분율비를 나타낸 그래프이다(최성용, 2007). 미세분쇄(고분말) 시멘트 치환율 변화에 따른 압축강도 변화는 치환율이 증가할 수록 상대적으로 증가하였는데, 포틀랜드 시멘트에 미세분쇄(고분말) 시멘트를 50% 치환한 경우는 초기재령 1일에서 약 30~40% 정도 증가하는 것으로 나타났다, 예상대로 미세분쇄(고분말) 시멘트를 사용할 경우 높은 초기강도를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

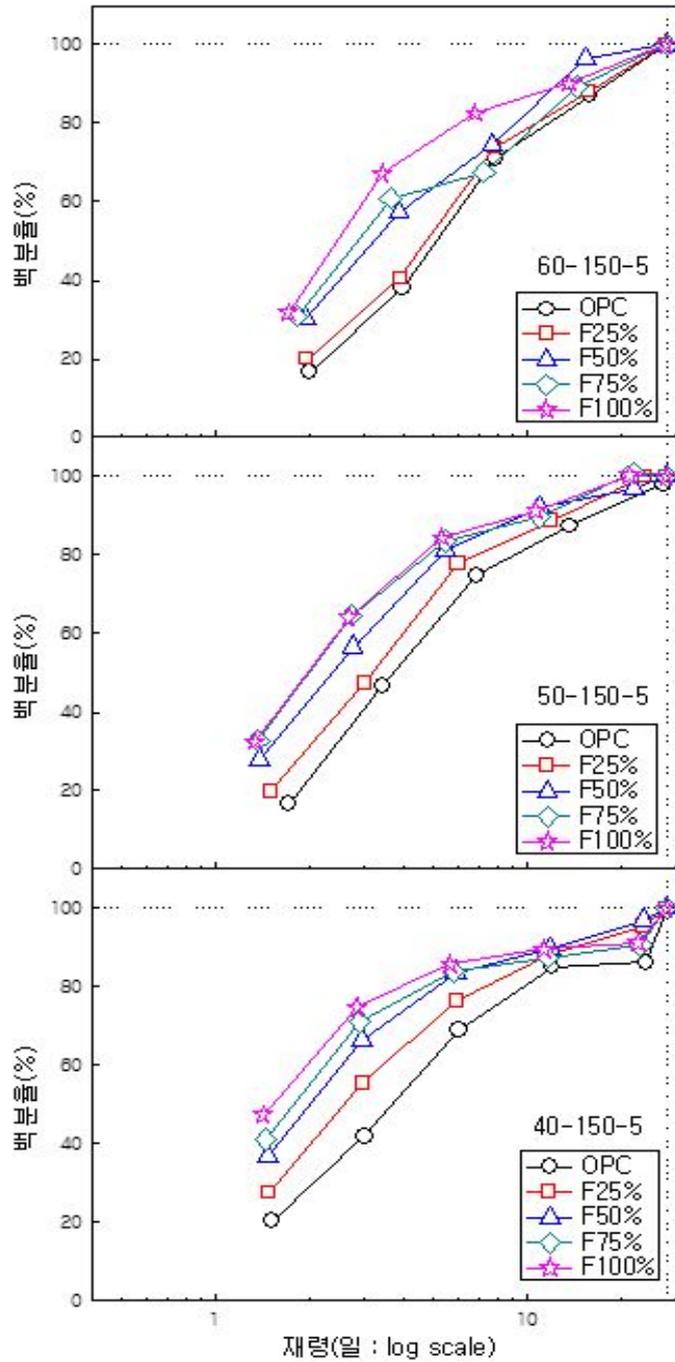


그림 2.20 W/C와 양생온도 및 FC 치환율별 재령 28일 압축강도에 대한 백분율비(최성용,2007)

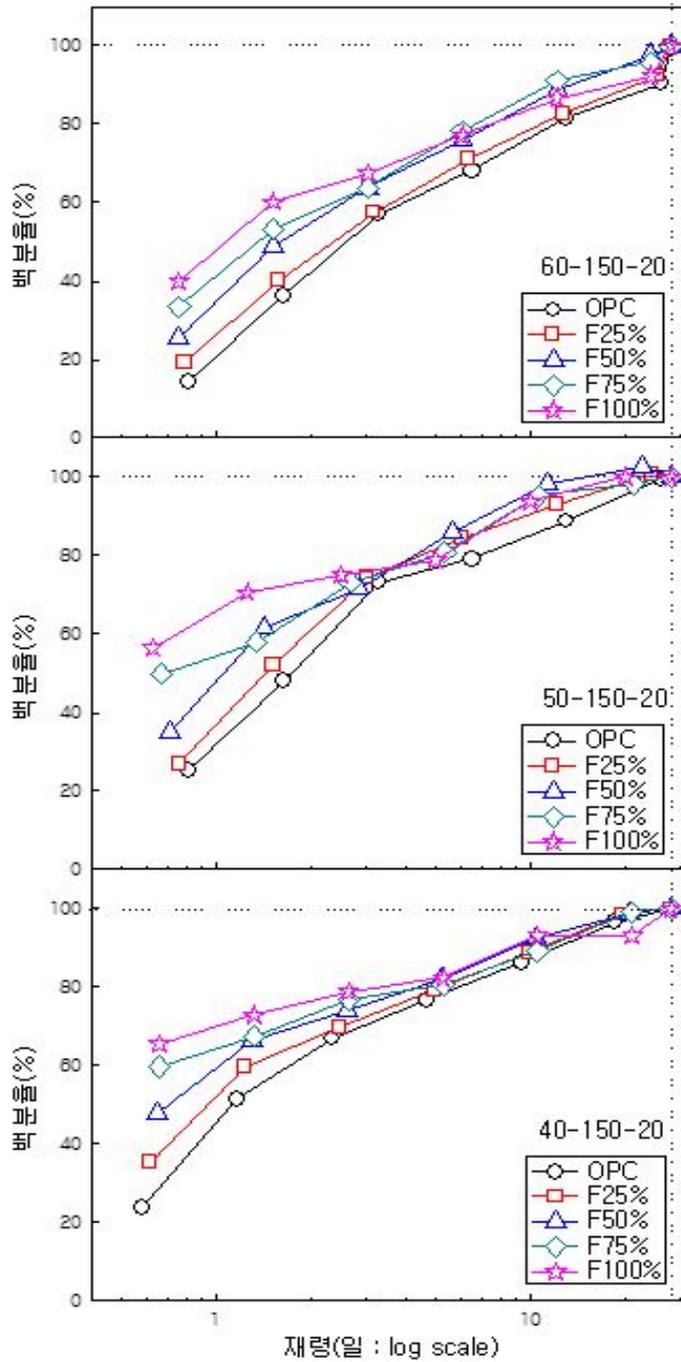


그림 2.20 W/C와 양생온도 및 FC 치환율별 재령 28일 압축강도에 대한 백분율 비(계속)

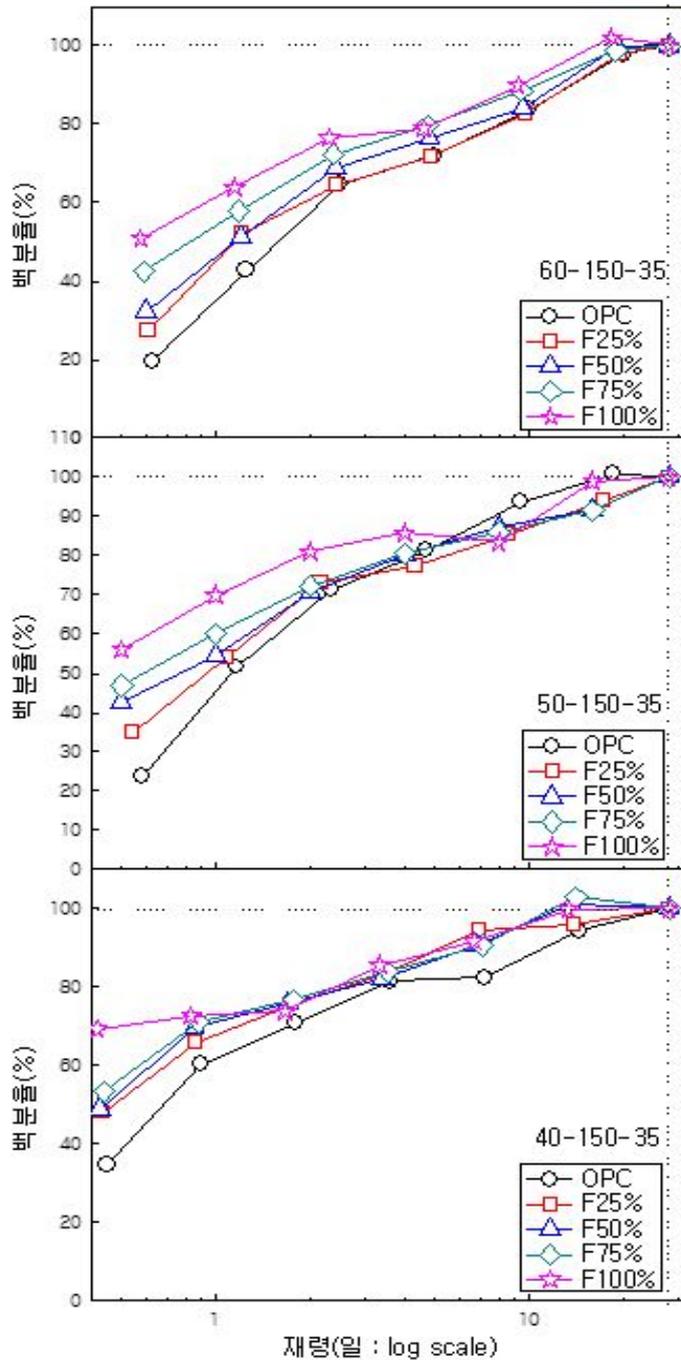


그림 2.20 W/C와 양생온도 및 FC 치환율별 재령 28일 압축강도에 대한 백분율비(최성용, 2007)

2) 고로슬래그 미분말 적용

그림 2.21는 고로슬래그 미분말의 분말도별 경과시간에 따른 관입 저항치 변화를 나타낸 그래프로, 고로슬래그 미분말의 분말도가 낮을수록 초결 및 종결 도달시간이 지연되는 것으로 나타났다(김무한, 2007).

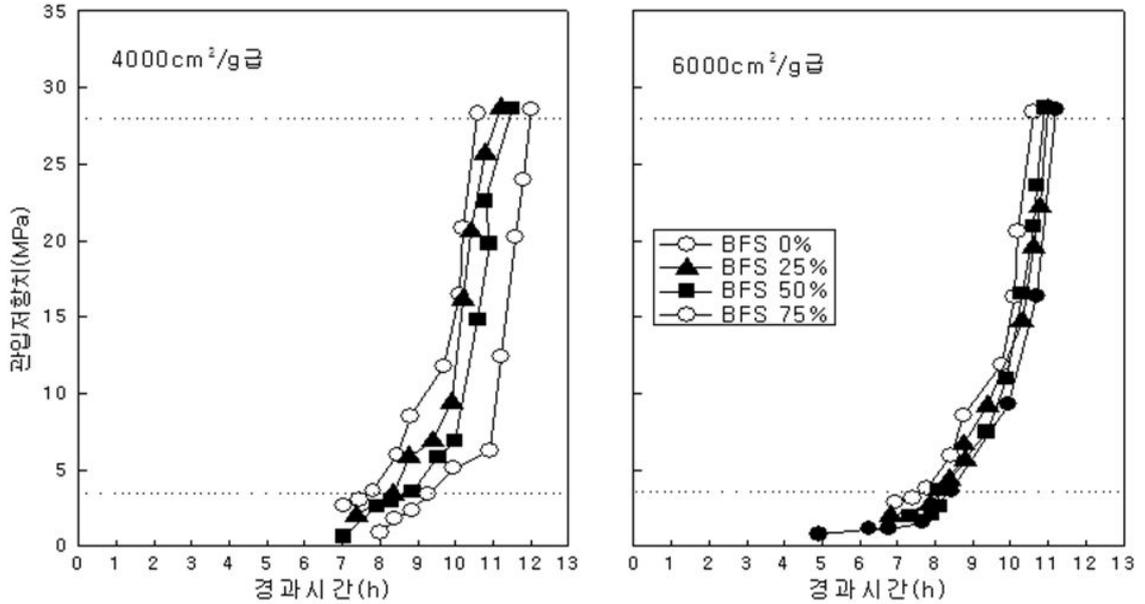


그림 2.21 고로슬래그 미분말 분말도별 경과시간에 따른 관입 저항치 변화(김무한,2007))

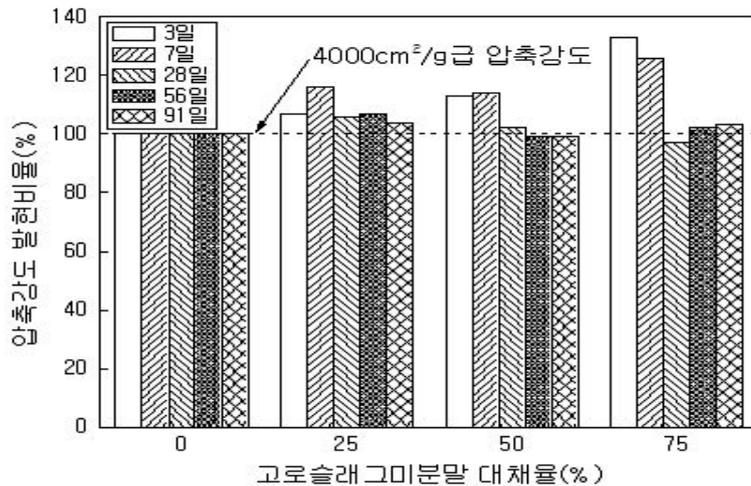


그림 2.22 치환율에 따른 4,000 cm²/g급에 대한 6,000 cm²/g급 압축강도 증진비율(김무한,2007)

그림 2.22은 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 4,000 cm²/g급에 대한 6,000 cm²/g급 시험체의 압축강도 증진비율을 나타낸 그래프이다. 재령 7일의 경우 고로슬래그 미분말 치환율 0, 25, 50 및 75%에서 각각 100, 116, 115 및 126%, 재령 28일의 경우 각각 100, 106, 102 및 98%의 수준으로 고로슬래그 미분말 치환율에 상관없이 분말도가 높을수록 초기 재령에서 매우 높은 수준의 압축강도를 증진하는 것으로 나타났다(김무한, 2007).

제 3 장 고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트 특성 변화

3.1 개요

최근 건설 산업에서는 환경문제가 무엇보다도 중요한 사안으로 대두됨에 따라 이에 대한 대처방안이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히, 건설 산업에서 가장 많이 사용되는 콘크리트는 환경문제와 더불어 부존자원의 고갈대책도 중요한 문제점으로 나타나고 있어 이를 해결하기 위한 각종 산업부산물이나 산업폐기물을 콘크리트용 자원으로 재활용 방법이 검토되고 있다.

위와 같은 측면으로 말미암아 현재 우리나라의 레미콘 산업에서는 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등 산업부산물의 재활용으로부터 지구 온난화 등 환경문제의 해결과 부존자원 고갈 등 자원부족 문제를 동시에 해결하고자 하는 노력이 이어지고 있다. 특히, 고로슬래그는 우리나라의 특성상 서해지역, 남해지역, 동해지역에 위치한 철강 산업의 발전에 따라 해마다 많은 양이 배출되고 있으며, 이를 재활용하기 위한 연구가 진행된 바 있다. 이에 한국 산업표준협회에서는 고로슬래그 미분말에 대한 기준과 고로슬래그시멘트에 대한 기준을 제정하여 그 활용성을 높이고 있으며, 최근에서는 철강협회에서도 슬래그 활용성을 증진시키기 위한 연구 활동을 지원하고 있다. 고로슬래그 재활용은 연간 4천만 톤 이상 발생하는 시멘트 생산 일부를 감소시킴으로써, 에너지 절약 및 이산화탄소 발생을 저감 시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

본 연구에서는 이러한 환경적 문제점 및 자원고갈에 대한 대안으로 제시되고 있는 고로슬래그 시멘트의 활용도를 높이고, 이를 통하여 다양한 고로슬래그시멘트의 차별화된 특성을 파악하고 이를 통하여 콘크리트용 자원의 다각화를 모색하는 것을 목표로 하고 있다

이에 본 장에서는 고로슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재로 적극 활용하기 위해 치환량에 변화를 주어 치환율이 콘크리트의 기초적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 1종 포틀랜드 시멘트를 적용한 콘크리트 배합을 기본배합으로 설정하였으며, 단위수량의 변화와 슬래그 미분말 치환율(30, 50, 70%)에 따른 콘크리트의 기초적 물성 변화를 검토하여 단위수량이 고로슬래그 미분말 치환 콘크리트에 미치는 영향을 평가하였다(Series I).

또한 Series I 배합의 기초실험 결과로부터 결정한 단위수량 및 고로슬래그 미분말 치환에 따른 콘크리트 배합과 기존 사용되는 두 종류의 저발열 시멘트 배합 및 플라이 애시를 25% 치환한 배합 총 7 배합에 대한 비교 실험을 수행하여 본 연구의 고로슬래그 미분말 콘크리트의 특성을 비교·평가하였다. 실험 사항으로는 굳지 않은 콘크리트의 유동성, 공기량 측정, 블리딩량 측정 및 재령일별 강도 증진 특성, 블리딩량 특성 및 수화발열 특성을 평가함으로써 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 적극 활용할 수 있는 배합을 결정하였다.

3.2 실험계획 및 방법

3.2.1 실험계획 및 배합

1) Series I 배합의 실험 계획

단위수량과 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 Series I 콘크리트 배합 특성 평가를 위하여 본 연구에서 계획한 실험 및 목표 수준은 다음 표 3.1과 같다. 물-결합재비 44.1% 및 단위수량 165 kg/m^3 1종 포틀랜드 시멘트 100%를 사용한 배합을 기본배합으로 설정하였고, 고로슬래그 미분말의 치환율 30%, 50% 및 70%와 물-결합재비를 44.1%, 43.3%, 42.5%로 설정한 표 3.2의 총 13종류의 배합에 대한 물성 평가를 수행하였다.

표 3.1 Series I 배합의 실험 및 목표 수준

실험요인		실험수준
배합사항	규격	· 25-27-180
	기본배합 목표 슬럼프 (mm)	· 180 ± 25
	기본배합 목표 공기량 (%)	· 4.5 ± 1.5
	고로슬래그 미분말 치환율 (%/B)	· 0, 30, 50, 70
실험사항	굳지 않은 콘크리트	· 슬럼프 (2회 수행) · 공기량 (2회 수행) · 블리딩율 (1회 수행)
	경화 콘크리트	· 압축강도 (1, 3, 7, 28일) -3개 공시체 평균값

표 3.2 Series I 배합 상세

배합	W/B (%)	BS 치환율 (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)					
				B	W	C	BS	S	G
포틀랜드 시멘트	44.1	0	48	374	165	374	-	841	925
30-165		30				262	112	837	921
30-162	162				841			925	
30-159	159				845	929			
30-156	156				848	933			
50-165	50				187	187	835	918	
50-161		161					840	924	
50-157		157			845	929			
50-153		153			850	934			
70-165	70	112			262	832	915		
70-160						160	838	922	
70-155						155	845	929	
70-150						150	851	936	

* 여기서, W/B: 물-결합재비, S/a: 잔골재율, C: 1종 보통 포틀랜드 시멘트, B: 결합재 (C, BS), BS: 고로슬래그 미분말, S: 잔골재, G: 굵은골재임

기본배합(포틀랜드 시멘트)의 목표 슬럼프를 180±25 mm으로 설정한 후 혼화제의 투입량을 조절하였으며, 공기량 목표치는 4.5±1.5%를 만족하도록 AE제의 사용량을 동일하게 투입하여 고로슬래그 미분말의 사용에 따른 배합의 물성 변화를 평가하였다. 모든 배합은 굳지 않은 콘크리트 특성평가를 위해 슬럼프 시험, 공기량 시험, 블리딩 시험을 수행하였고, 경화 콘크리트는 20℃ 상온양생으로 재령 1일, 3일, 7일 및 28일 압축강도를 측정하였다.

2) Series II 배합의 실험 계획

Series II 배합의 실험 요인으로는 단위수량 및 고로슬래그 미분말 투입률에 따른 3 배합, 플라이애시(이하 FA) 25% 치환한 배합과 기존 저발열 시멘트 배합 PC : BS : FA 40 : 40 : 20, 40 : 30 : 30 2배합 총 7 배합에 대한 콘크리트의 물성을 평가하였다. 이때 모든 배합에 대하여 목표 슬럼프 180±25 mm, 공기량 목표치 4.5±1.5%를 만족하도록 배합설계를 실시하였다. 실험사항으로 굳지 않은 콘크리트의 공기량, 슬럼프, 블리딩율, 응결시간을 평가하였고, 경화 콘크리트에서는 압축강도 재령 3, 7 및 28일과 배합에 따른 단열온도 상승시험을 실시하는 것으로 계획하였다.

표 3.3 Series II 배합의 실험 및 목표 수준

실험 요인		실험 수준
배합 사항	규격	· 25-27-180
	결합재 치환율 (%/B)	· PC 100% · BS(30%, 50%, 70%) · FA(25%) · 2종류 저발열 시멘트 배합
	목표 슬럼프 (mm)	· 180±25
	단위수량 (kg/m ³)	· Series I 에서 도출
실험 사항	굳지 않은 콘크리트	· 슬럼프 (2회 수행) · 공기량 (2회 수행) · 응결시간 (1회 수행)
	경화 콘크리트	· 압축강도 (3, 7, 28일)-3개 공시체 평균값 · 간이단열온도상승시험

표 3.4 Series II 배합 상세

배합	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)							
			B	W	C	BS	FA	S	G	
포틀랜드 시멘트	44.1	48.5	374		165	374	-	-	850	916
BS30	43.3			162	262	112	-	850	916	
BS50	42.5			159	187	187	-	851	918	
BS70	41.7			156	262	262	-	850	919	
4-3-2	42.8			160	150	112	112	833	898	
4-4-2	42.8			160	150	150	74	838	903	
FA25	43.3			162	281	-	94	837	903	

* 여기서, W/B: 물-결합재비, S/a: 잔골재율, C: 1종 포틀랜드 시멘트,
 FA: 플라이애시 B: 결합재 (C, BS, FA), BS: 고로슬래그 미분말, S: 잔골재,
 G: 굵은 골재임

3.2.2 사용재료

1) 1종 포틀랜드 시멘트

본 연구의 주결합재료 국내 A사의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 물리적 특성을 표 3.5에 나타내었다.

표 3.5 시멘트의 물리적 특성

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ³ /g)	안정도 (%)	응결시간 (분)		압축강도 (MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3285	0.16	211	300	22.3	28.8	38.8

2) 골재

잔골재는 5 mm 이하 천연 잔골재로서 콘크리트 표준시방서에 제시된 조립률 및 입도분포를 모두 만족한 것을 사용하였고 물리적 특성을 표 3.6에 나타내었다. 또한 굵은 골재는 안정성, 흡수율, 마모율 등 품질기준을 충족하며 최대치수 25 mm인 화강암질 부순돌을 사용하였으며 물리적 특성은 표 3.7에 나타낸 바와 같다.

표 3.6 잔골재의 물리적 특성

크기분포 (mm)	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	조립률 (F.M)	안정성 (%)
≤ 5	2.50	2.63	1,598	2.95	2.7

표 3.7 굵은 골재의 물리적 특성

크기분포 (mm)	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	실적률 (%)	조립률 (F.M)
5 ~ 25	2.65	1.0	1,664	2.75	2.62

3) 혼화재료

혼화재료로 고로슬래그 미분말은 국내 D사 광양산을 사용하였으며, 플라이애시는 분급 정제된 하동화력산을 사용하였으며, 각각의 물리·화학적 성질은 표 3.8 및 표 3.9와 같다. 화학 혼화제로는 국내산 H사의 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였으며 특성은 표 3.10에 나타낸 바와 같다.

표 3.8 고로슬래그 미분말의 물리·화학적 특성

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	화학적 구성 (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.91	4,550	2.2	36.11	15.29	0.23	42.20	6.44	0.12

표 3.9 플라이애시의 물리·화학적 특성

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	SiO ₂	습분 (%)
2.21	3,989	2.51	51.0	0.09

표 3.10 고성능 감수제의 물리적 특성

성분	색상	형태	밀도 (g/cm ³)	고형분 (%)
폴리카르본산계	연갈색	액상	1.02	12.1

3.2.3 공시체 제작 및 실험 방법

1) 콘크리트 혼합

콘크리트의 혼합은 그림 3.1의 순서에 따라 실시하였고, 100ℓ 콘크리트용 1축형 강제식 샤프트 믹서를 사용하여 35 rpm으로 조절한 다음 잔골재 및 굵은 골재를 투입하여 건비빔을 30초간 실시한 후, 시멘트, 고로슬래그 및 플라이애시를 투입하여 2차 건비빔 30초 실시하였다. 그 후, 혼화제 및 배합수를 투입하여 90초 혼합하여 배출하여 콘크리트 믹싱을 완료하였다(사진 3.1).



그림 3.1 콘크리트 배합순서



사진 3.1 콘크리트 배합 믹서

2) 굳지 않은 콘크리트 시험 방법

(1) 슬럼프 시험

굳지 않은 콘크리트의 유동성 평가 슬럼프 시험은 KS F 2402(한국표준협회, 2007) 규정에 의거 사진 3.2와 같이 실시하였다.



사진 3.2 콘크리트 슬럼프 시험 전경

(2) 공기량 시험

공기량 시험은 KS F 2421(한국표준협회, 2006)에 규정에 공기실 압력법에 의한 공기

함유량 시험방법으로 측정하였으며 사진 3.3과 같이 실시하였다.



사진 3.3 콘크리트 공기량 시험 전경

(3) 블리딩 측정 시험

블리딩 측정 시험은 KS F 2414(한국표준협회, 2015)의 규정에 의거 하여 실시하였고 블리딩 시험을 위해 온도 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 습도 60%로 조절되는 항온·항습실에서 사진 3.4와 같이 지름 250 mm, 높이 285 mm의 실린더 용기에 각 배합별 동일량의 콘크리트를 충전한 후 처음 60분 동안 10분 간격으로 그 후 블리딩이 멈출 때 까지 30분 간격으로 물을 빨아내어 시간에 따른 블리딩량과 누적 블리딩량을 측정하였다.



(a) 블리딩 측정용 콘크리트 용기



(b) 블리딩 측정 전경

사진 3.4 콘크리트 블리딩 시험 전경

(4) 응결 시험

응결시간은 KS F 2436(한국표준협회, 2007)에 규정한 프록터 관입저항 시험방법에 의거 실시하였다. 시료는 제조한 콘크리트를 5.0 mm 체를 사용하여 모르타르만을 분리하였고(사진 3.5), $\phi 150 \times 150$ mm 실린더 몰드에 채운 후 시간경과에 따른 관입시험을 수행하였다. 초결시간은 3.5 MPa에 도달하는 시간, 28.0 MPa 이상이 될 때의 시간을 종결로 하였다(사진 3.6).



사진 3.5 응결시간 시험을 위한 모르타르 분리 전경



사진 3.6 응결시간 측정 관입저항 실험 장치

3) 경화 콘크리트 시험 방법

(1) 간이단열온도상승실험

Series II 배합의 수화열 평가하기 위해 단열온도상승실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 실험 장비는 사진 3.7에 나타난 바와 같으며, 용기에 담기는 콘크리트 실험체를 수냉식 방법으로 내부 단열상태를 유지하였으며, 경과 시간에 따른 수화온도 상승량을 측정할 수 있도록 시료와 항온조 내 온도차를 0에 가깝게 유지하였다. 제조된 콘크리트 시료를 단열용기에 채운 후 항온조 내에 격납하였다. 격납된 시료와 항온조 내의 온도차가 없는 상태로 유지하여 콘크리트 시료가 단열상태에 도달하게 된 후 콘크리트 자체 발열량에 의한 단열온도 상승량, 경과 시간을 측정하여 기록하였다. 온도 측정 시에는 K 타입의 열전대(thermocouple)을 이용하였다.



사진 3.7 단열온도상승실험 장치

(2) 압축강도 시험

모든 공시체 압축강도 시험은 KS F 2405(한국표준협회, 2010) 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 실시하였다. 모든 공시체는 사진 3.8과 같이 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더 형태로 제작하였고, 사진 3.9의 최대용량 100 ton급 유압식 만능재료 시험기를 사용하여 재령별 공시체의 최대하중을 측정하여 압축강도를 계산하였다.



사진 3.8 압축강도 시험용 공시체 전경



사진 3.9 압축강도 시험용 공시체

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 단위수량과 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 특성평가 (Series I)

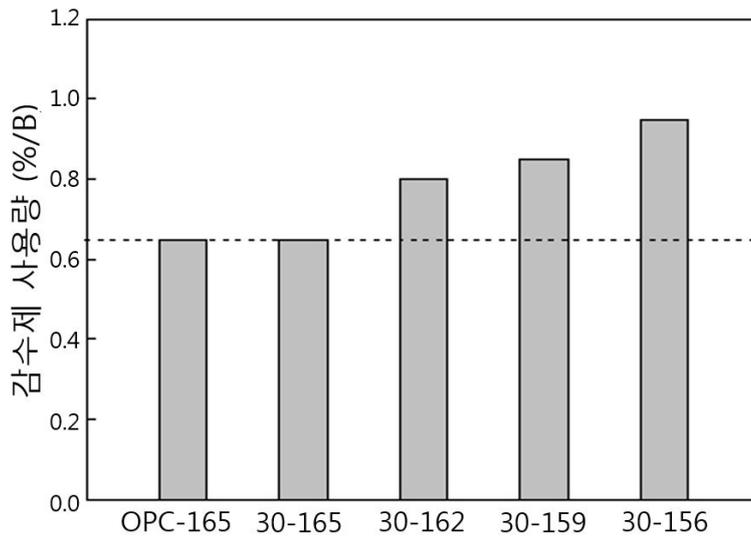
1) 굳지 않은 콘크리트 특성

(1) 슬럼프 시험 결과

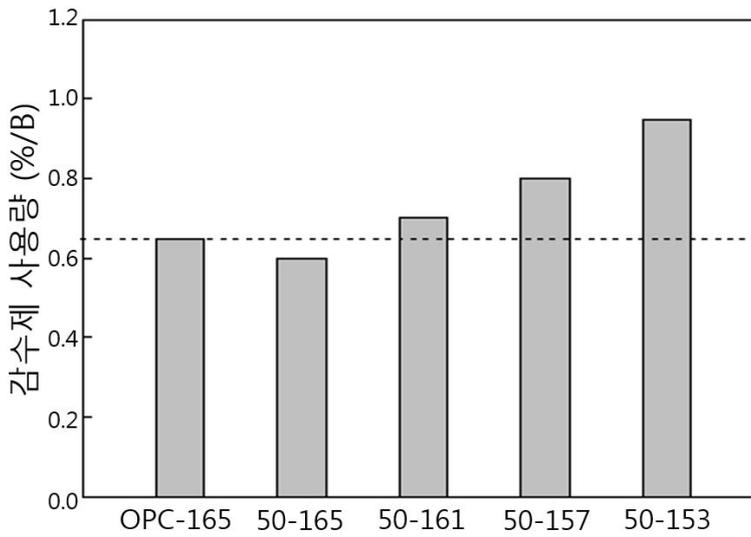
표 3.11은 Series I 배합의 고로슬래그 미분말 치환율과 단위수량 증감에 의한 혼화제 사용량 및 슬럼프 결과를 정리한 것이며, 그림 3.2 (a) (b) (c)는 고로슬래그 미분말 치환율별 단위수량 변화에 따른 슬럼프와 목표 슬럼프를 만족시키기 위한 혼화제 투입량을 나타낸 것이다.

표 3.11 고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 혼화제 사용량 및 슬럼프

배합	W/B (%)	BS 치환율 (%)	단위수량	AD (%/B)	슬럼프 (mm)	
					즉시	60분 후
포틀랜드 시멘트	44.1	0	165	0.65	195	180
30-165				0.65	185	170
30-162	43.3	30	162	0.80	185	165
30-159	42.5		157	0.85	185	170
30-156	41.7		156	0.95	190	180
50-165	44.1		165	0.60	190	170
50-161	43.0	50	161	0.70	185	160
50-157	42.0		157	0.80	190	170
50-153	40.9		153	0.95	195	175
70-165	44.1		165	0.50	195	165
70-160	42.8	70	160	0.60	195	170
70-155	41.4		155	0.75	200	175
70-150	40.1		150	0.90	195	170



(a) BS 30% 치환



(b) BS 50% 치환

그림 3.2 단위수량 변화에 따른 감수제 사용량(계속)

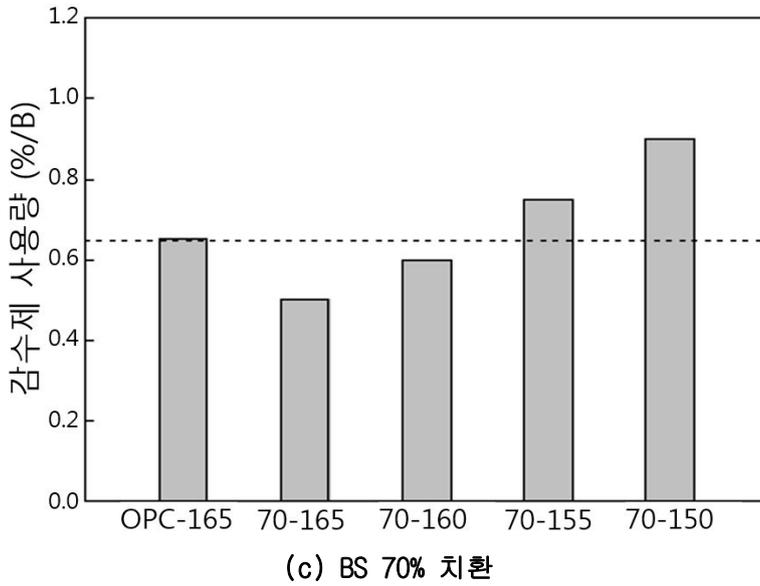


그림 3.2 단위수량 변화에 따른 감수제 사용량

또한 단위수량 고로슬래그 미분말 치환율과 단위수량 변화에 따른 측정된 슬럼프 결과를 그림 3.3 (a) (b) (c)에 나타내었다.

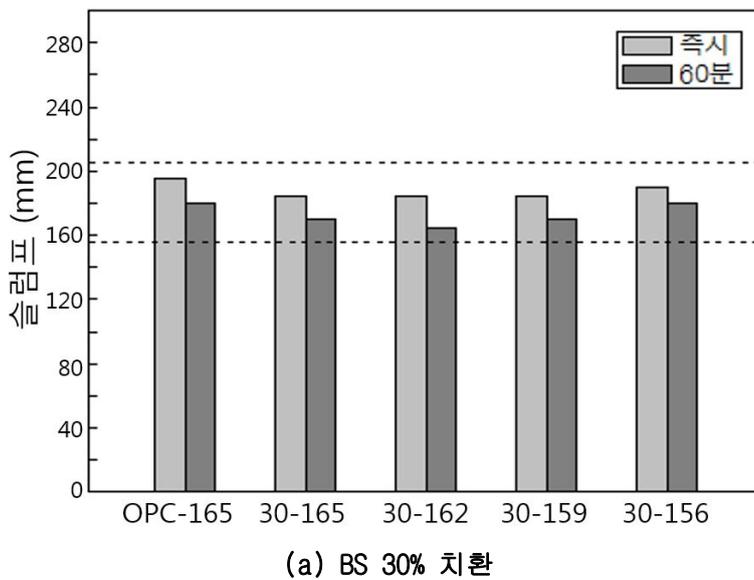
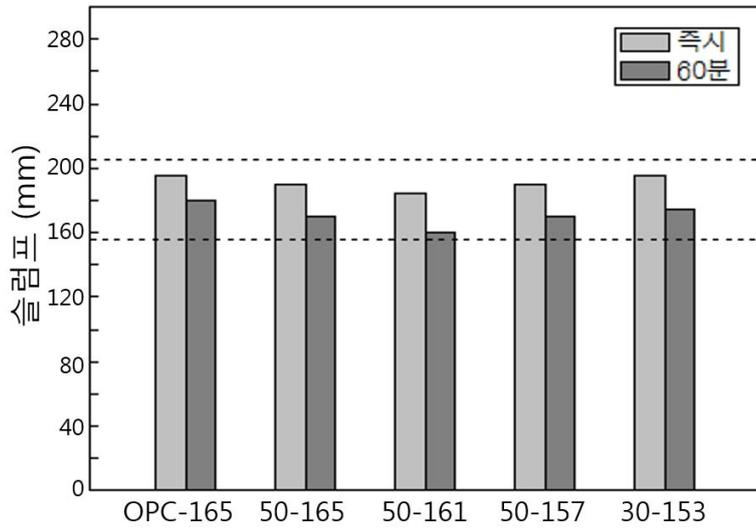
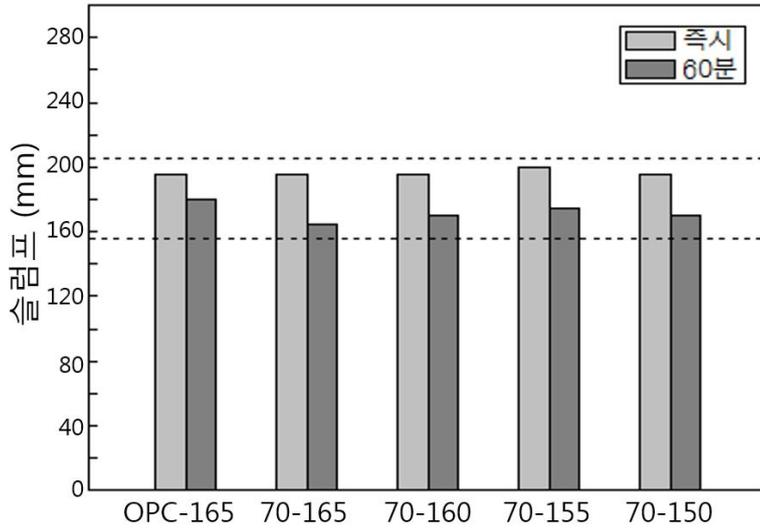


그림 3.3 단위수량 변화에 따른 슬럼프 결과(계속)



(b) BS 50% 치환



(c) BS 70% 치환

그림 3.3 단위수량 변화에 따른 슬럼프 결과

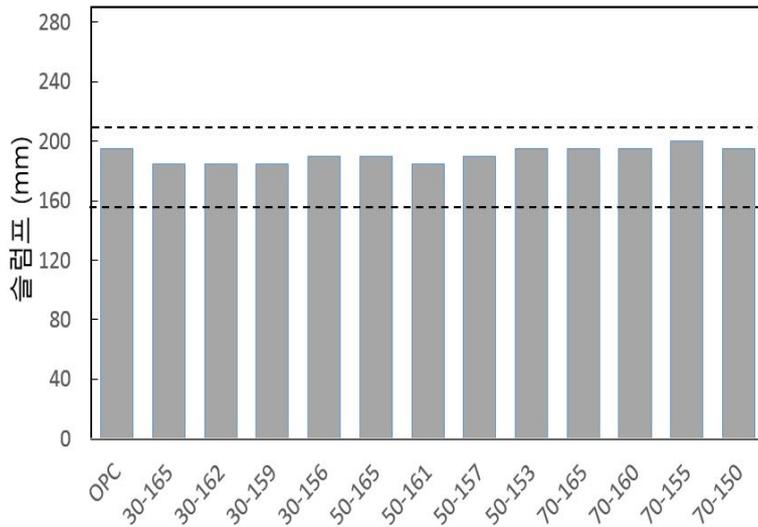


그림 3.4 배합에 따른 슬럼프 측정 결과 비교

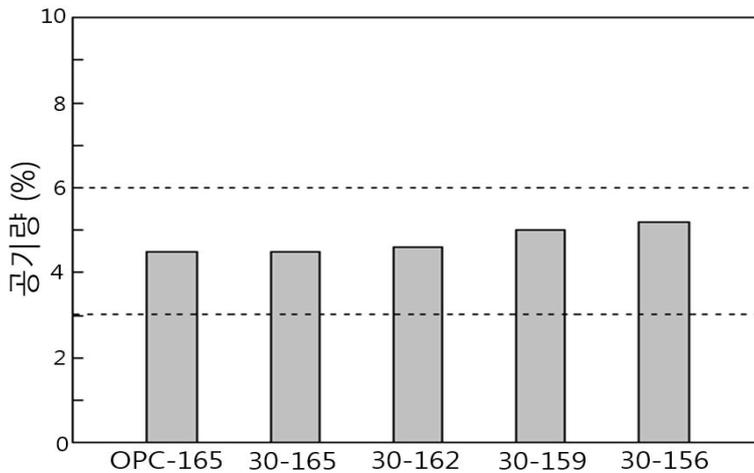
먼저, 포틀랜드 시멘트만을 사용한 기본배합의 슬럼프는 196 mm로 목표 슬럼프를 만족한다. 고로슬래그 미분말 치환율 50%와 70%는 치환율 30%에 비해 185~200 mm의 슬럼프를 확보하기 위해 사용되는 감수제량이 평균 0.05%와 0.13% 감소되는 것을 통해 치환율이 증가할수록 유동성이 증가하는 것을 알 수 있다. 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가하면 고로슬래그 미분말의 입자 표면이 시멘트 입자의 표면에 비하여 치밀하고 되고 페이스트와 골재 계면의 마찰이 작아지면서 초기 수화반응에 참여하지 않는 잠재수경성을 띠는 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 단위수량을 감소시키는 경우 역시 소요의 슬럼프를 확보하기 위해서는 혼화제의 사용량이 증가되는 것으로 확인되며 경시변화에 의한 슬럼프 손실 또한 혼화제 비율에 의해 조정이 가능한 것으로 확인되어 유동성의 경우 혼화제의 사용으로 충분히 그림 3.4에 나타낸 바와 같이 기본배합과 동등수준의 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 공기량 시험 결과

표 3.12는 Series I 배합의 공기연행제 사용량과 공기량 측정 결과를 정리하여 나타낸 것이며, 그림 3.5은 단위수량 변화에 따른 공기량 결과, 그림 3.6은 각 배합에 따른 공기량 변화를 나타낸 것이다.

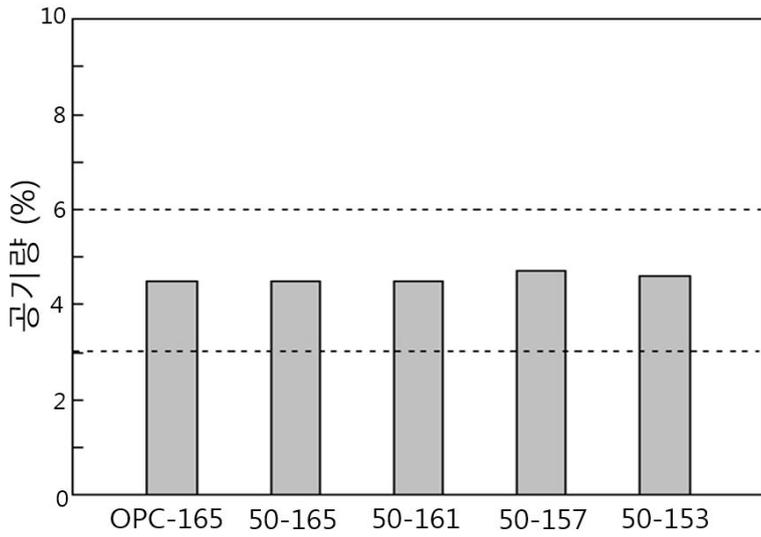
표 3.12 고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 공기연행제 사용량 및 공기량

배합	W/B (%)	BS 치환율 (%)	단위수량	AE (%/B)	공기량 (%)
포틀랜드 시멘트	44.1	0	164	0.008	4.5
30-165		30		0.007	4.5
30-162	43.3		162	0.007	4.6
30-159	42.5		157	0.007	5.0
30-156	41.7		156	0.007	5.2
50-165	44.1		50	165	0.007
50-161	43.0	161		0.007	4.5
50-157	42.0	157		0.008	4.7
50-153	40.9	153		0.007	4.6
70-165	44.1	70	165	0.009	4.5
70-160	42.8		160	0.008	3.8
70-155	41.4		155	0.009	4.0
70-150	40.1		150	0.010	4.9

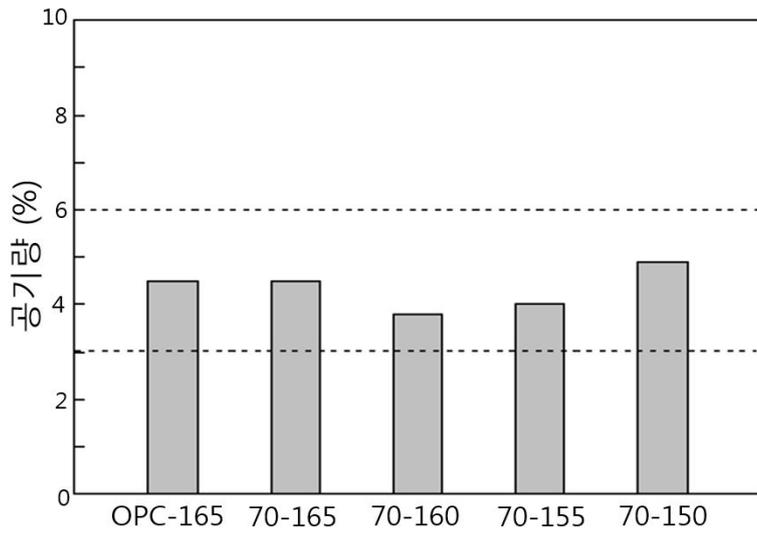


(a) BS 30% 치환

그림 3.5 단위수량 변화에 따른 공기량 결과(계속)



(b) 50% 치환



(c) 70% 치환

그림 3.5 단위수량 변화에 따른 공기량 결과

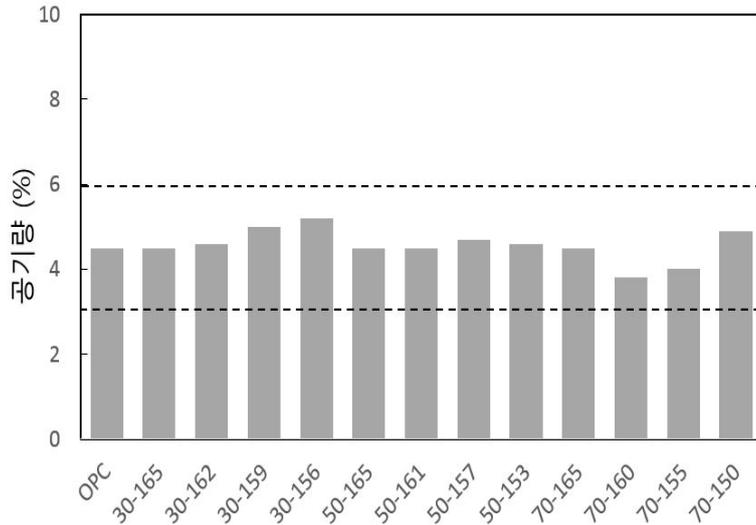


그림 3.6 배합에 따른 공기량 측정 결과 비교

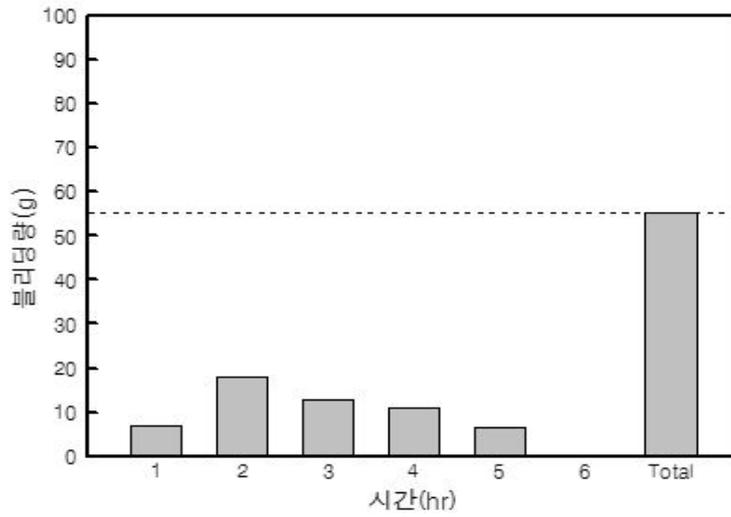
기본배합의 공기량은 4.5%로 목표범위를 만족하였으며, 고로슬래그 미분말의 치환율 30%의 경우 단위수량이 감소하고 공기량은 소폭 증가하는 경향을 보이며, 치환율 50%의 경우에도 이와 유사한 경향이 관찰되었는데 이는 공기연행제의 사용량을 고정시켜 실험하였으며 단위수량 감소에 다른 감수제의 사용량 증가에 기인한 것으로 판단된다(그림 3.6). 본 실험에서 감수제로 폴리칼본산계 감수제를 사용하였는데 폴리칼본산계 감수제가 일부 공기 연행 작용에 영향을 미치기 때문으로 판단된다(한국표준협회, 2006). 그러나 고로슬래그 미분말 치환율 70%의 경우는 공기량이 감소하고 공기연행제의 사용량이 소폭 증가하면서 고로슬래그 미분말 30% 치환환 결과 값과 반대의 현상이 나타났는데 이는 감수제에 의한 공기량의 증가보다 분말도가 시멘트에 비해 큰 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가하였기 때문이며 30%에 비해 50%의 공기량 증가 추세가 감소한 것으로 판단된다. 현재 고로슬래그 미분말은 지속적으로 사용되고 있으므로 더 사용량은 증가 될 것으로 예상되며 감수제 흡착 및 연행공기 소포작용 문제를 유발하고 있는 플라이애시와 비교할 때 성능은 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한 고로슬래그 미분말은 플라이애시와 달리 콘크리트의 유동성 측면에서도 기존의 문헌(한천구, 2010) 및 실험을 통해 확인하였던 플라이애시에 비해 우수한 성능을 증진하는 것으로 나타났다.

(3) 블리딩 특성

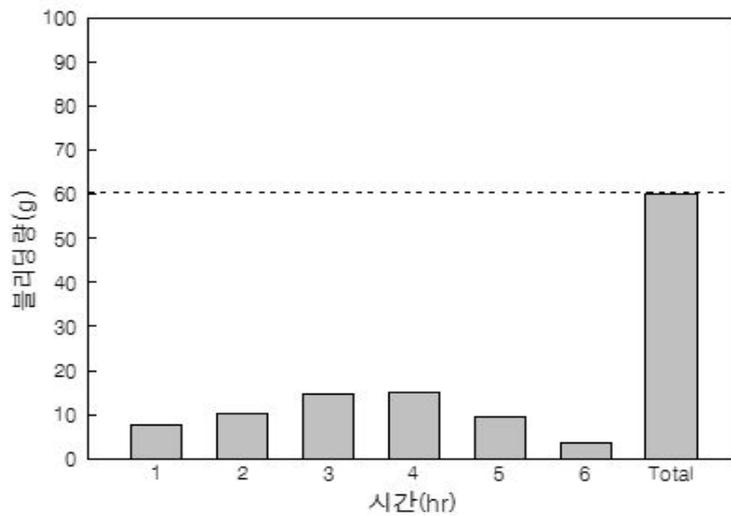
표 3.13은 고로슬래그 미분말 치환율 및 단위수량 변화에 따른 콘크리트의 블리딩 발생량 및 블리딩율을 측정된 결과이다. 그림 3.7은 각 배합에 따른 시간대별 블리딩 발생량을 나타낸 것이며, 그림 3.8는 각 배합의 블리딩율을 종합하여 비교한 것이다. 또한 그림 3.9은 단위수량 변화에 따른 블리딩량의 변화를 확인하기 위해 측정된 실험 결과 간의 관계를 회귀분석한 시험결과를 나타낸 것이다.

표 3.13 고로슬래그 치환율 및 단위수량에 따른 블리딩량 측정 결과

배합	BS 치환율 (%)	블리딩 발생량 (g)							블리딩율 (%)
		1hr	2hr s	3hr s	4hr s	5hr s	6hr s	총량	
포틀랜드 시멘트	0	6.70	18.0	12.9	10.8	6.7	0.1	55.2	3.9
30-165	30	7.7	10.3	14.6	14.9	9.3	3.5	60.3	5.5
30-162		6.7	13.4	15.4	10.2	10.7	1.2	57.6	3.8
30-159		5.2	10.5	9.8	8.8	8.0	0.4	42.7	3.8
30-156		3.6	10.4	7.9	10.0	5.6	0.7	38.2	2.1
50-165	50	16.5	14.5	17.6	15.6	9.7	3.2	77.1	5.4
50-161		7.2	9.0	14.1	12.2	8.4	3.4	54.2	3.9
50-157		5.6	5.1	14.1	10.1	8.3	3.2	46.4	3.4
50-153		3.5	8.5	9.6	10.0	6.2	3.1	40.9	3.1
70-165	70	11.7	23.3	18.8	13.0	9.0	3.8	79.6	4.2
70-160		3.9	14.2	14.3	10.9	7.5	2.9	53.6	4.1
70-155		2.3	9.8	20.9	10.8	6.5	2.5	52.7	3.2
70-150		1.4	5.2	7.0	7.5	5.6	2.2	28.9	2.9

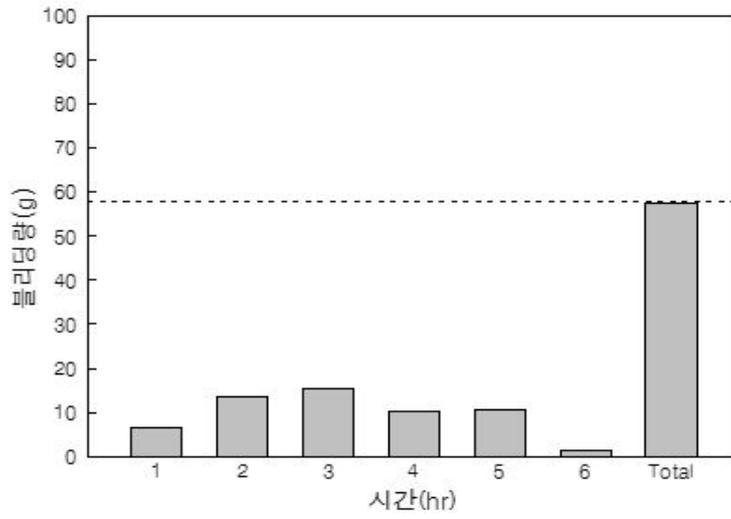


(a) 포틀랜드 시멘트

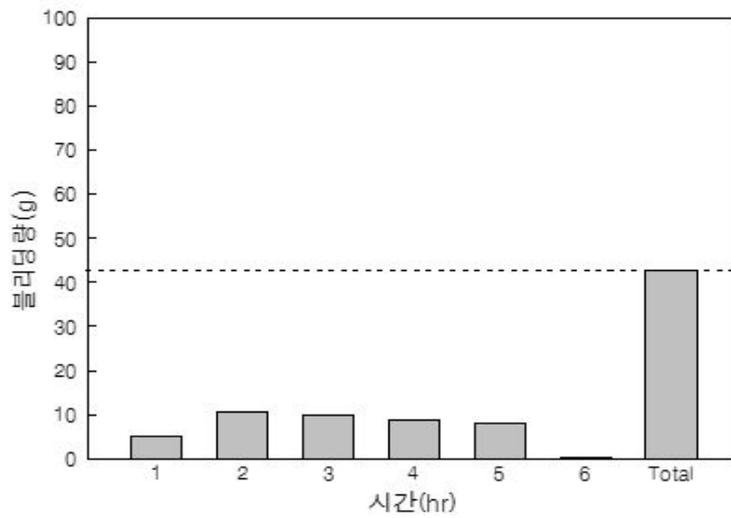


(b) 30-165

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)

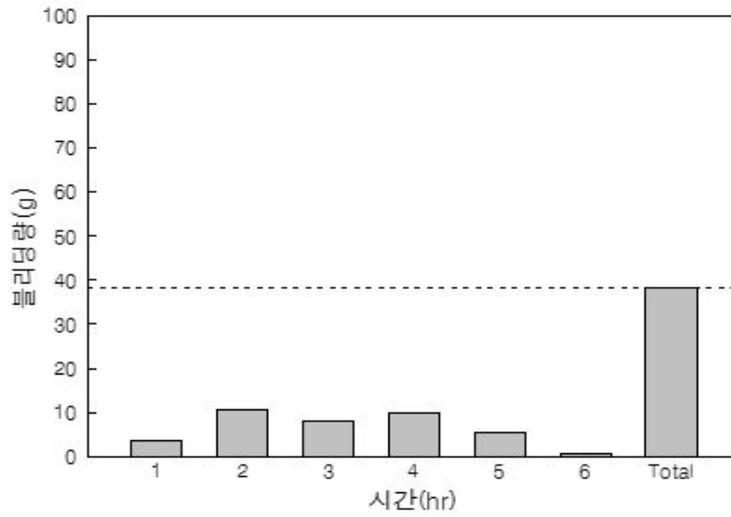


(c) 30-162

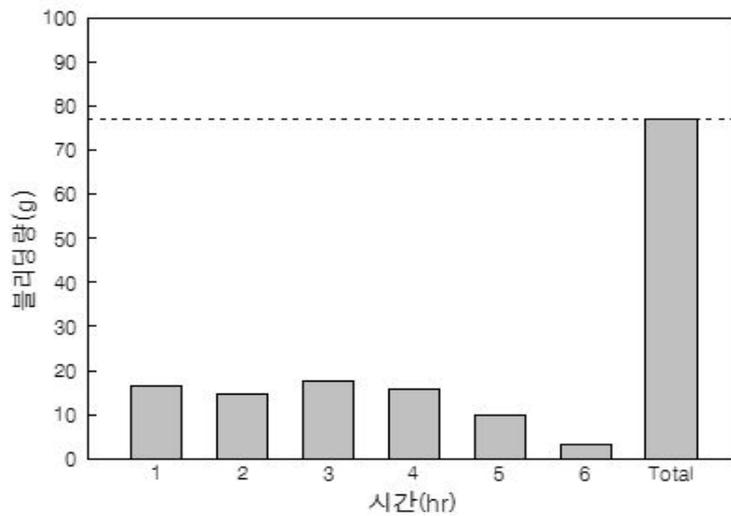


(d) 30-159

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)

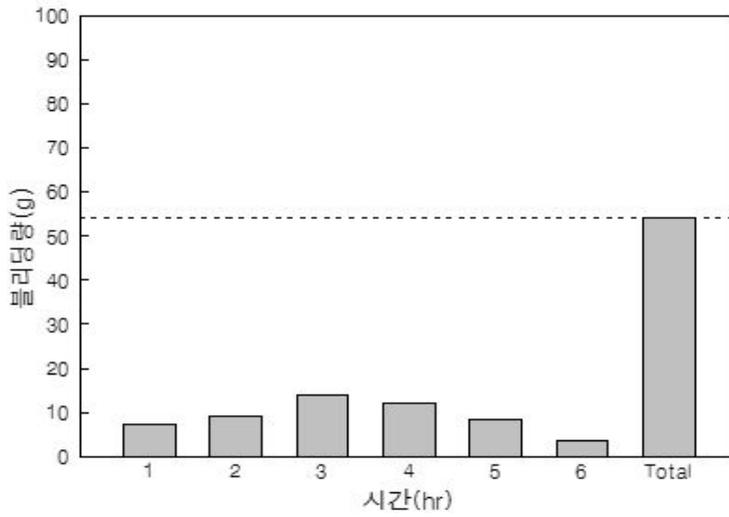


(d) 30-156

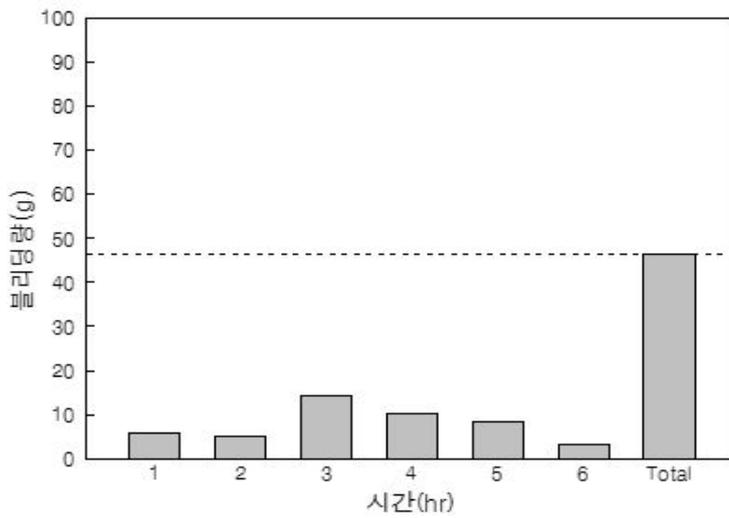


(e) 50-165

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)

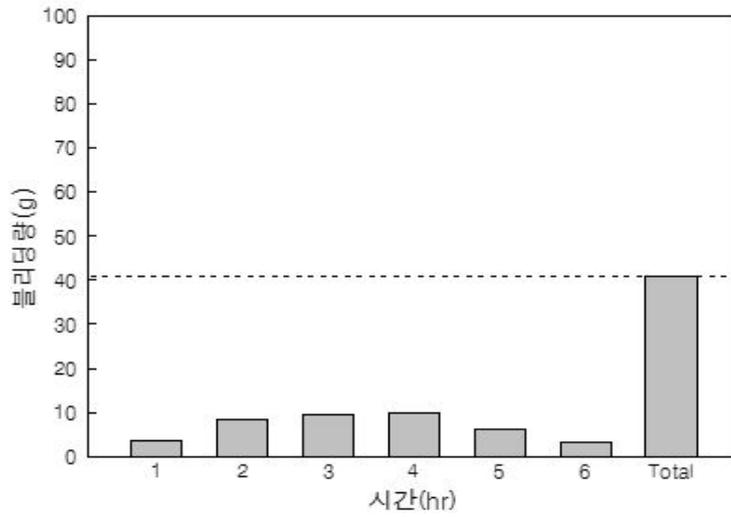


(f) 50-161

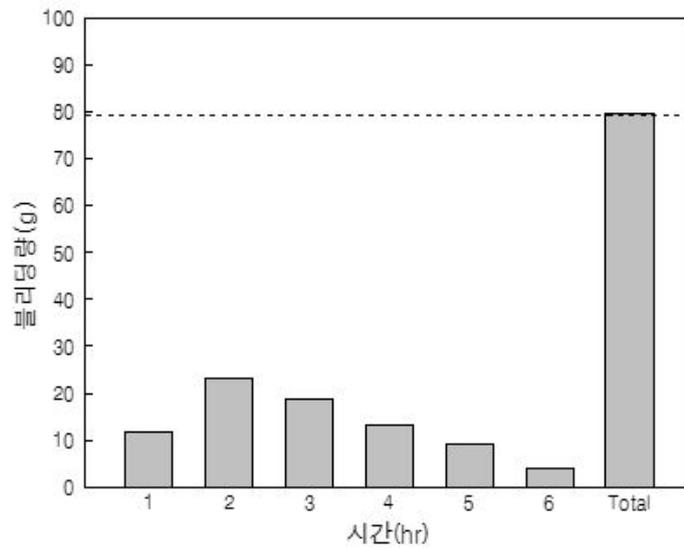


(f) 50-157

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)

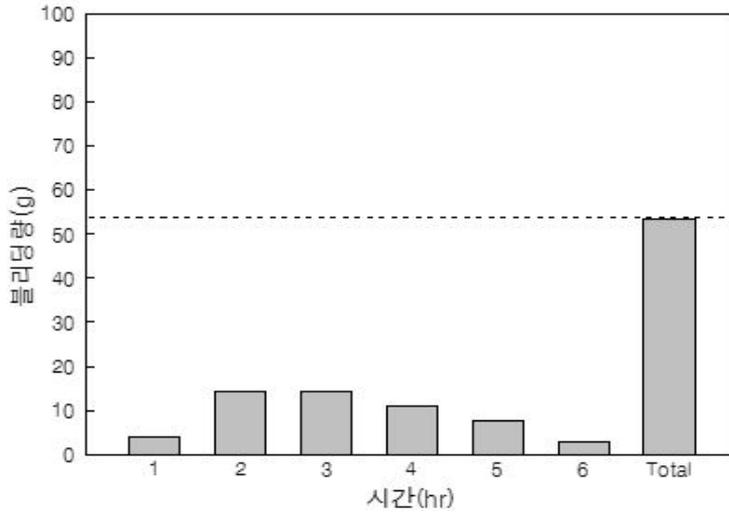


(g) 50-153

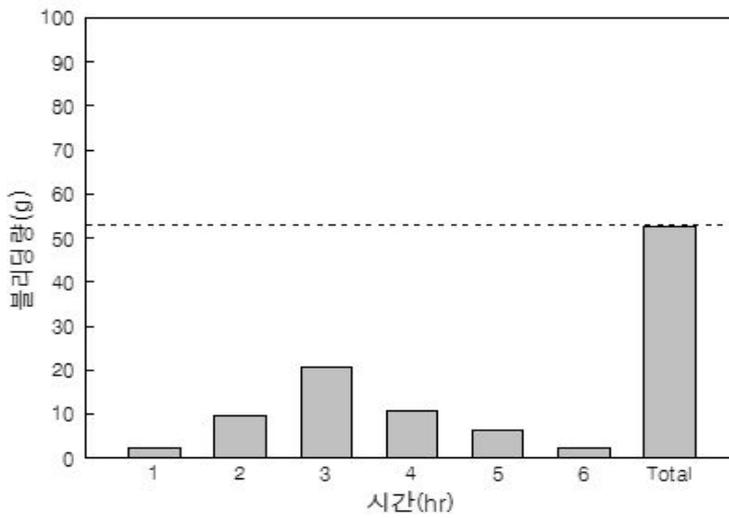


(h) 70-165

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)

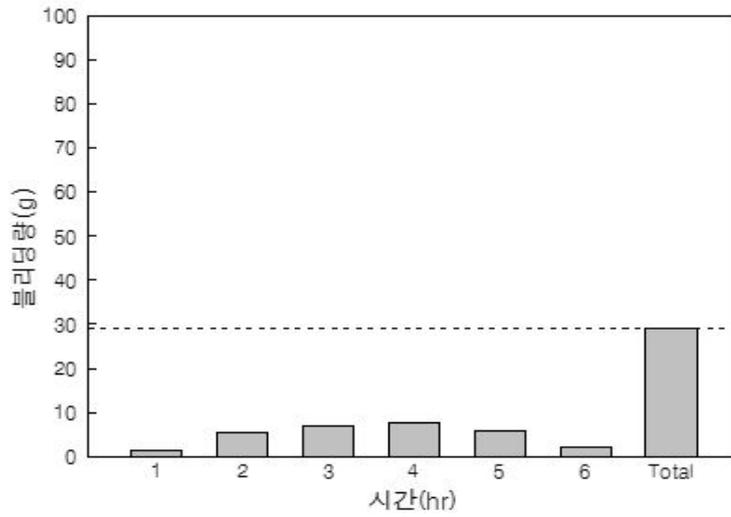


(i) 70-160



(j) 70-155

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량 (계속)



(k) 70-150

그림 3.7 배합별 시간에 따른 블리딩 발생량

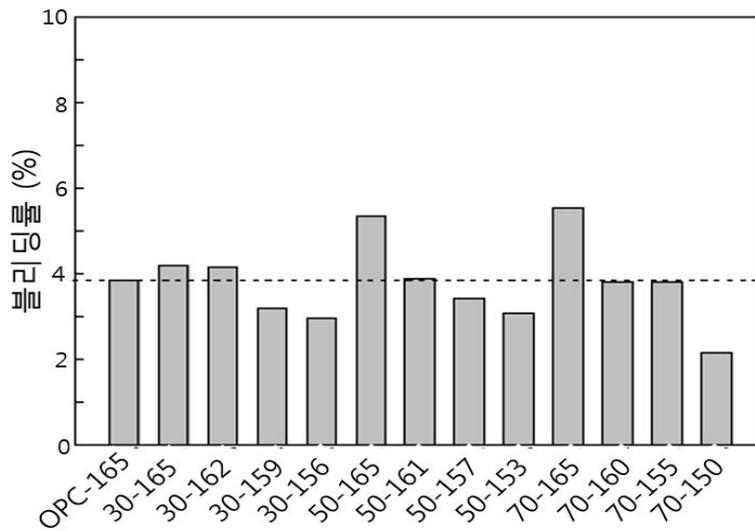
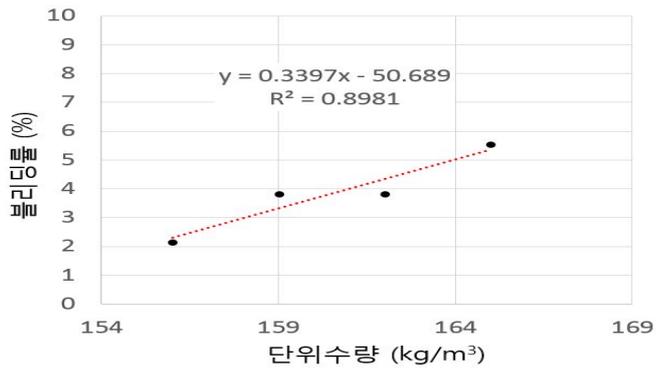
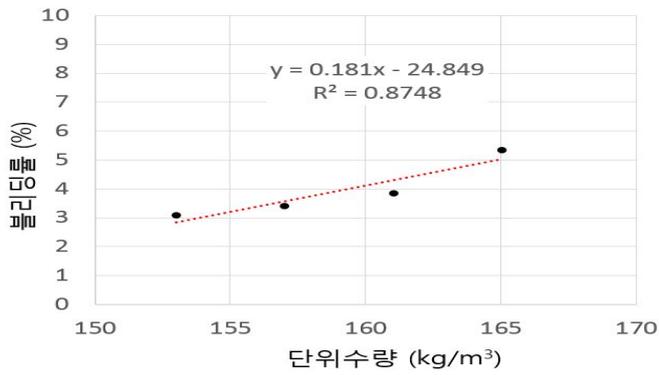


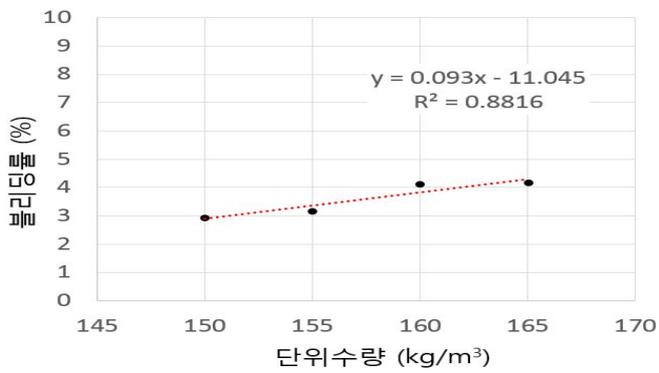
그림 3.8 고로슬래그 치환율과 단위수량에 따른 블리딩 발생량



(a) BS 30% 치환



(b) BS 50% 치환



(c) BS 70% 치환

그림 3.9 배합의 단위수량에 따른 블리딩률 회귀분석 결과

기본배합과 비교하면 동일한 단위수량에서 고로슬래그 미분말 치환율이 높으면 블리딩 발생량이 증가하고, 추가적인 간이 배합실험에서도 동일한 결과가 나타났다. 물과 접촉 시 낮은 흡수반응을 지니고 있는 고로슬래그 미분말은 물과 접촉시 바로 이를 흡수 반응하는 포틀랜드 시멘트와는 달리 잠재수경성 반응을 지니고 있다. 고로슬래그 미분말은 물과 접촉 시 바로 반응하지 않기 때문에 포틀랜드 시멘트에 비해 발생하는 잉여수가 많은 것으로 판단되고 이러한 현상들로 인하여 잉여수 들이 콘크리트 상부에 노출되면서 블리딩 현상이 크게 증가하는 것으로 판단된다.

고로슬래그 미분말 치환율의 경우에는 단위수량이 감소하면 블리딩 현상이 감소하고 블리딩 현상의 과다로 인한 들뜸, 균열 현상은 단위수량 조절을 통해 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 위의 결과를 토대로 고로슬래그 미분말 치환율이 높아지면 단위수량이 저감되고, 이는 블리딩 저감에도 유리한 것으로 판단되며, 이로 인한 물-결합재비 저감으로 인해 강도보상이 가능할 것으로 판단된다. 포틀랜드 시멘트는 시간대별 블리딩 발생량을 보면 초기에 블리딩이 많이 발생되고 고로슬래그 미분말이 치환된 경우에는 점성의 증가에 의해 초기 블리딩 발생량이 적어진다. 시간이 지난 후에 블리딩의 발생량이 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 고로슬래그 미분말을 치환하여 타설한 콘크리트는 타설 후 블리딩 발생량이 적은 것으로 오인하고 표면 마무리 작업을 하게 되어 이는 표면 마무리 작업 후 블리딩이 발생하게 되는 원인이 되어 블리딩이 표면에 떠오르지 못하고 마감면 아래에 고이게 되는 원인을 제공한다. 따라서 고로슬래그 미분말 치환시 표면의 균열 방지, 들뜸 현상을 방지하기 위해서는 표면 마무리 작업을 신중하게 해야 한다고 판단된다.

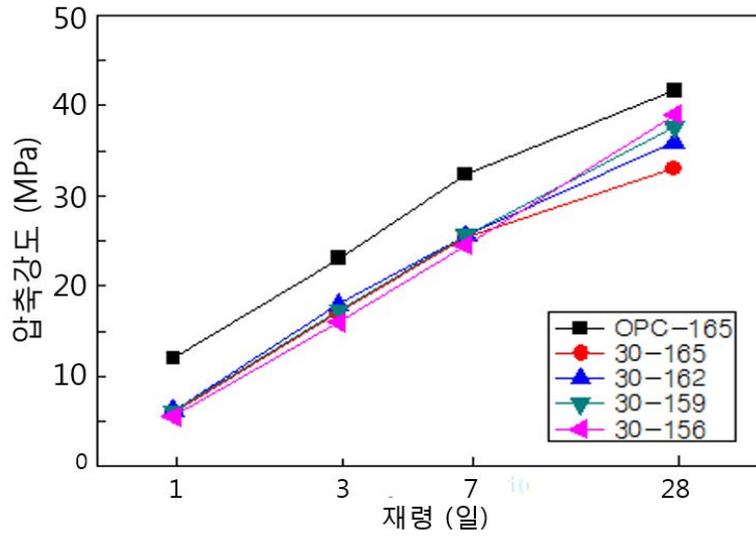
고로슬래그 미분말 치환율별 단위수량 변화에 의해 블리딩량을 종합하고 이를 회귀 분석 한 결과 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 30% 사용시 포틀랜드 시멘트 100% 사용배합의 단위수량 대비 약 2%, 고로슬래그 미분말 50% 치환 사용시 약 4%, 고로슬래그 미분말 70% 치환 사용시 약 6% 정도를 감소시며 포틀랜드 시멘트 100%에 준하는 블리딩이 발생하는 것으로 확인되었다. 블리딩을 회귀분석 결과를 통해 고로슬래그 치환율에 따른 고로슬래그 콘크리트의 블리딩율을 기본배합의 블리딩량률 3.86%와 동일한 수준을 확보할 수 있도록 단위수량을 수정하였다.

(4) 압축강도 특성

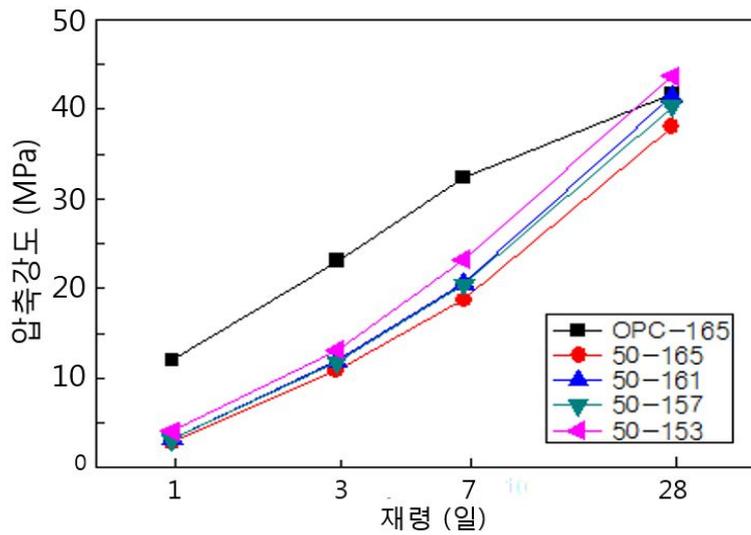
각 배합에 대하여 재령에 의한 단위수량별 압축강도 측정 결과는 표 3.14와 같으며, 그림 3.10은 각 치환율별 재령에 따른 압축강도를 로그 스케일로 비교하여 나타낸 것이다.

표 3.14 각 배합에 따른 재령별 압축강도 측정결과

배합	BS 치환율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)			
			1일	3일	7일	28일
포틀랜드 시멘트	0	165	12.1	23.1	32.4	41.7
30-165	30	165	5.9	17.1	25.5	33.0
30-162		162	6.2	18.0	25.6	36.0
30-159		159	6.2	17.4	25.7	27.7
30-156		156	5.5	16.0	24.5	39.0
50-165	50	165	2.7	10.8	18.8	38.1
50-161		161	3.2	11.9	20.6	41.5
50-157		157	3.1	11.8	20.5	40.4
50-153		153	4.1	13.2	23.3	43.7
70-165	70	165	1.1	7.1	17.3	45.8
70-160		160	1.5	8.1	19.3	47.3
70-155		155	1.6	8.7	21.4	45.8
70-150		150	1.7	9.2	21.2	41.8

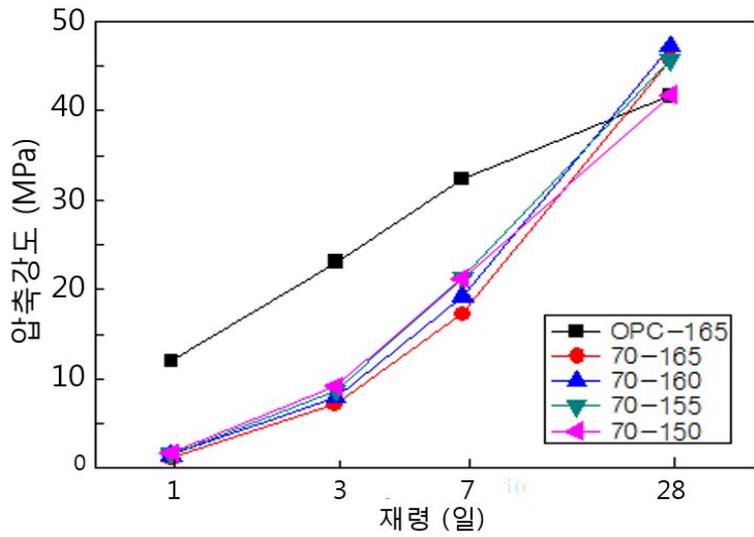


(a) BS 30%



(b) BS 50%

그림 3.10 재령일에 따른 단위수량별 압축강도 비교 (계속)



(c) BS 70%

그림 3.10 재령일에 따른 단위수량별 압축강도 비교

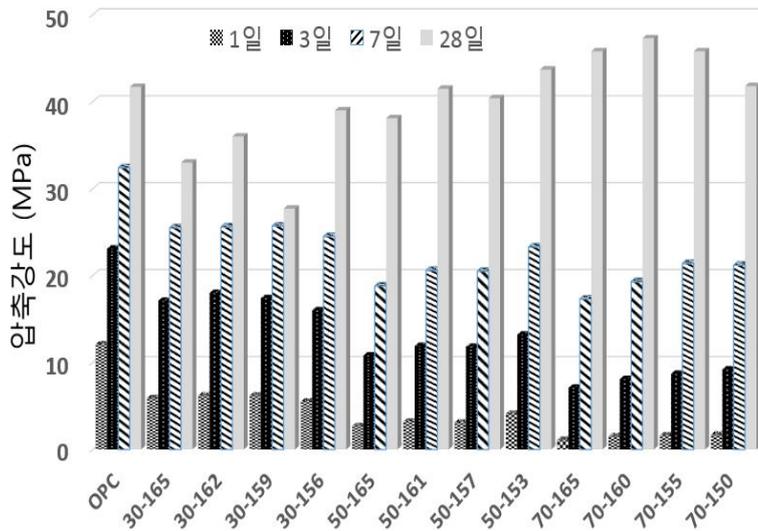


그림 3.11 배합별 재령일에 따른 압축강도 측정 결과 비교

일반적으로 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트 배합에 비해 초기강도가 취약한 문제점을 지니고 있는데(한민철, 2006) 그림 3.11

의 실험결과에서도 나타나듯이 초기 1일 강도에서 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 압축강도가 현저하게 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 모든 수준에서 단위수량 감소에 의한 강도 상승은 확인되었고 초기재령에서는 그 영향이 적어 고로슬래그 미분말 30% 치환 사용 시 단위수량에 관계없이 모두 50%의 강도 결과를 나타냈으며, 고로슬래그 미분말 50% 치환 사용 시 약 25~30%, 70%에서는 약 10%의 결과를 나타내었다. 고로슬래그 미분말 다량 치환 시에는 초기강도 증진을 위한 혼화제나 촉진제 등의 사용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

그러나 재령 7일 이후에는 포틀랜드 시멘트의 강도 보다 더욱 상회하는 결과를 나타내었고 재령이 지남에 따른 강도 확보에는 효과적인 것으로 확인되었으며 고로슬래그 미분말의 치환사용량이 커질수록 강도는 더욱 커지는 것으로 나타났다. 대부분의 수준에서 압축강도는 단위수량의 감소에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있어 고로슬래그 미분말의 치환 사용 시 단위수량을 감소시켜 배합을 실시한다면 압축강도 확보에 유리한 것으로 판단된다.

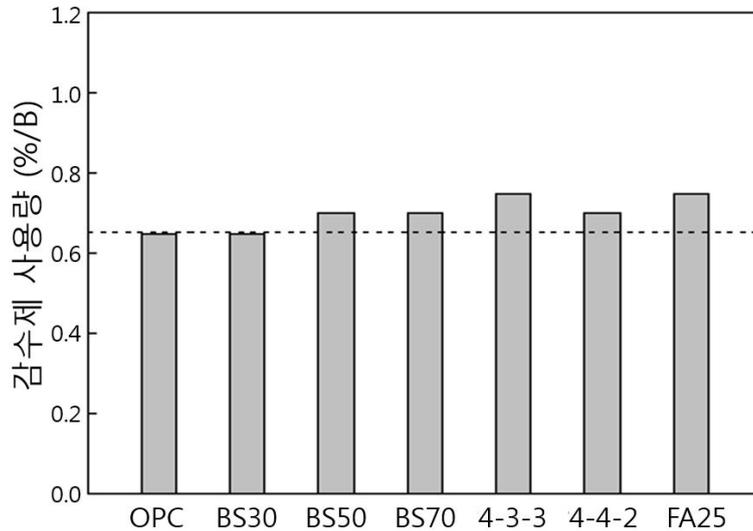


그림 3.12 목표 슬럼프 확보를 위한 감수제 사용량

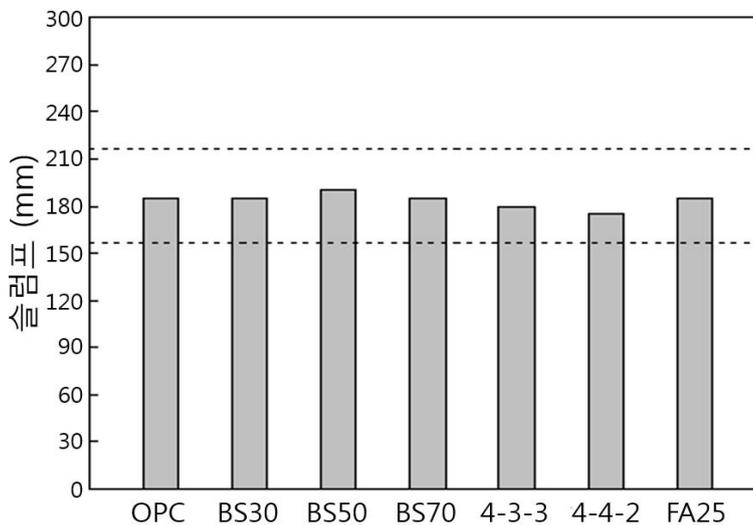


그림 3.13 배합에 따른 슬럼프 측정 결과 비교

모든 배합에서 목표 슬럼프 값을 만족하였고, 목표 슬럼프 값을 확보하기 위한 감수제의 사용량은 포틀랜드 시멘트와 비교 할 때 고로슬래그 미분말 30% 치환을 제외한 모든 배합에서 소폭 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 이것은 단위수량을 각각 일정부분 감소시킨 원인이라 판단된다. 하지만 플라이애시를 치환한 FA25 배합에서는 감수

제의 사용량이 다른 배합에 비해 크게 상승하는 것으로 나타났는데 이는 플라이애시의
 혼화제 흡착작용의 원인으로 판단된다. 선행실험의 실험결과와 동일하게 고로슬래그
 미분말 치환율을 70%로 다량 치환할 때 단위수량은 감소하고 혼화제 사용량은 유동성
 을 확보하기 위해서 사용량이 증가하였으나 플라이애시 치환한 경우보다는 적게 사용
 되었다.

(2) 공기량 및 공기연행제 사용량 평가

표 3.16은 각 배합별 공기연행제 사용량 및 공기량 실험결과를 나타낸 것이며, 그림
 3.14는 각 배합별 목표 공기량을 만족시키기 위한 공기연행제 사용량을 나타낸 것이다.
 또한 그림 3.15는 각 배합에 따른 공기량 측정 결과를 나타낸 것이다.

표 3.16 배합에 따른 공기연행제 사용량 및 공기량 측정 결과

배합	단위수량 (kg/m ³)	AE (%/B)	공기량 (%)
포틀랜드 시멘트	165	0.005	4.4
BS30	162	0.005	4.6
BS50	159	0.005	4.3
BS70	156	0.005	4.4
4-3-3	158	0.015	3.6
4-4-2	158	0.015	3.9
FA25	162	0.020	3.8

* 여기서, 4-3-3 및 4-4-2는 저발열 시멘트 배합을 나타내며 사용결합재 포틀랜드 시
 멘트, 고로슬래그, 플라이애시의 투입비율임. AE는 공기연행제를 나타냄

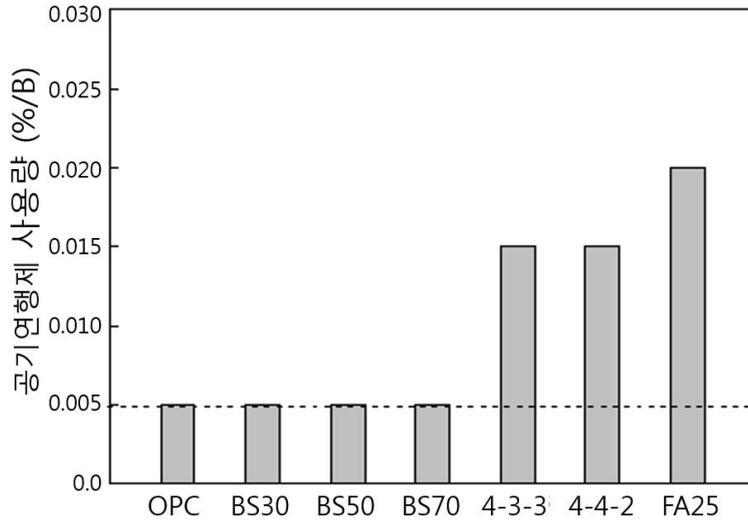


그림 3.14 목표 공기량 확보를 위한 공기연행제 사용량

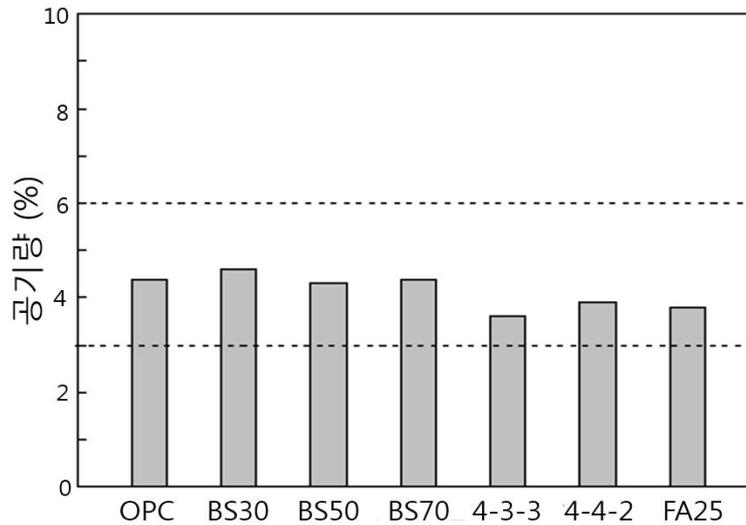


그림 3.15 배합에 따른 공기량 측정 결과

모든 배합은 본 연구의 목표 공기량 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 고로슬래그 미분말을 치환 사용한 콘크리트 배합의 경우 공기연행제의 사용량과 상관없이 공기량이 유사한 수준으로 측정되었으나 플라이애시를 사용한 FA25 배합의 경우 공기연행제의 사용량이 고로슬래그 미분말 배합의 경우보다 3~4 배의 양을 투입하였으나 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 미분말 배합의 경우에 못 미치는 결과를 나타냈다. 이

는 플라이애시의 미연분 탄소의 공기연행제 흡착 및 연행공기 소포작용에 기인한 것으로 판단된다. 현재 국내에 유통되는 플라이애시의 품질의 편차가 매우 크다. 그 원인은 미연소된 플라이애쉬(FA)의 국내 콘크리트 시장에 유통되면서 본 배합실험에서도 발생하는 플라이애시의 검은 띠가 콘크리트 표면위로 떠오르는 현상을 보일 정도이다. 미연소 탄소를 다량으로 함유하고 있는 플라이애쉬(FA) 보다 고로슬래그 미분말은 균질한 공기량 확보와 공기연행제 사용량에 있어 고로슬래그 미분말을 사용한 본 연구의 배합이 유리한 것으로 나타났다.

(3) 응결 시간

표 3.17은 각 배합에 대하여 응결 시험시 측정된 경과시간에 따른 관입저항값을 나타낸 것이며, 그림 3.16과 그림 3.17은 초결과 종결시간을 나타낸 것이다.

표 3.17 경과시간에 따른 관입저항치 측정 결과

포틀랜드 시멘트		BS 70%		BS 50%		BS 30%	
경과시간	관입저항 (MPa)	시간	관입저항 (MPa)	시간	관입저항 (MPa)	시간	관입저항 (MPa)
5:00	0.65	6:50	0.59	5:30	0.21	5:20	0.55
6:00	1.18	7:30	0.96	6:10	0.76	6:00	0.98
7:10	3.54	8:30	2.7	6:40	1.54	6:30	1.69
8:00	11.31	9:00	4.56	7:30	2.99	7:20	3.16
8:30	30	9:30	12.53	8:30	5.82	8:20	12.13
-	-	10:00	-	9:15	15.85	9:05	30.33
-	-	10:30	-	9:45	28.12	-	-
40-30-30		40-40-20		FA-25%			
경과시간	관입저항 (MPa)	시간	관입저항 (MPa)	시간	관입저항 (MPa)		
6:15	0.65	7:00	0.84	5:15	0.51		
7:15	1.98	8:05	6.69	6:05	1.04		
8:15	3.40	8:40	5.90	6:55	2.53		
8:45	5.14	9:25	15.43	7:25	3.83		
9:15	8.01	10:30	38.74	7:55	8.28		
9:45	20.26	-	-	8:25	21.50		
10:15	29.76	-	-	8:55	36.60		

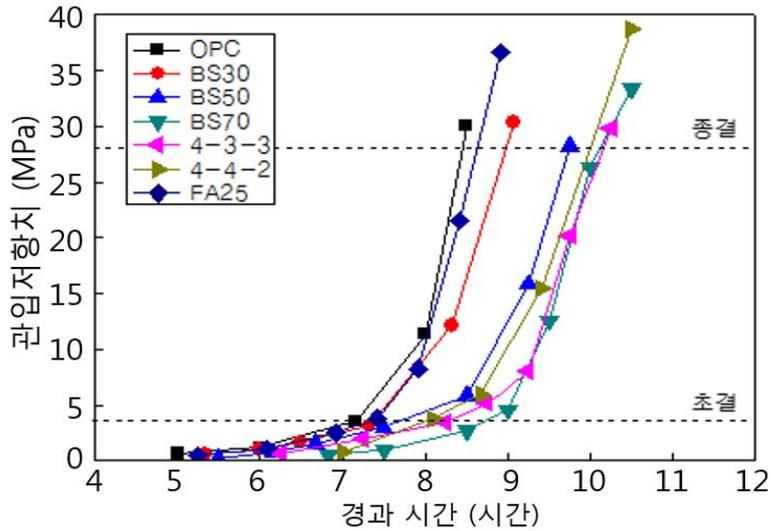


그림 3.16 배합에 따른 응결시간 측정 결과

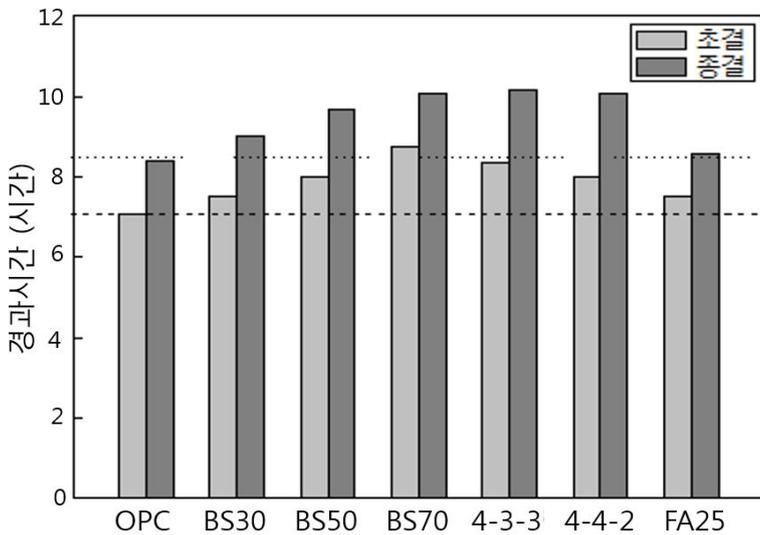


그림 3.17 배합에 따른 초결 시간 및 종결 시간 비교 결과

각 배합별 응결시간 측정결과 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가할수록 응결이 지연되고, 플라이애시가 치환된 경우에도 응결지연 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말 및 플라이애시는 포틀랜드 시멘트와는 달리 반응이 빠르게 일어나지 않는 것에 기인한. 따라서 포틀랜드 시멘트의 투입량이 많은 배합일수록 초결 및

종결 응결시간이 빠르게 나타났다. 기존 저발열 시멘트 배합의 응결시간 결과도 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 총 투입률이 증가할수록 응결시간 지연이 발생하는 것으로 나타났으나 상대적으로 포틀랜드 시멘트의 투입량이 많은 FA25 배합은 고로슬래그 미분말을 투입한 본 연구의 배합과 기존 저발열 시멘트 배합에 비해 상대적으로 응결시간에 빨리 도달하는 것이 관찰되었다.

초결 시간은 포틀랜드 시멘트가 가장 빠르며(7:30) 고로슬래그 미분말 70 % 치환 콘크리트가 종결시간이 가장 늦게(9:00) 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 저발열 시멘트 배합의 경우에도 종결시간에서는 오히려 고로슬래그 미분말 70%치환의 콘크리트 수준보다 더 늦어지는 것으로 나타나 포틀랜드 시멘트의 사용량에 따라 응결시간이 폭이 좌우되는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 수화발열 특성

현대 콘크리트 구조물은 점차 대형화 되어감에 따라 기초 콘크리트가 매스콘크리트로 타설되는 경우가 많아지고 있다. 이러한 매스콘크리트는 수화열에 의해서 발생하는 온도균열이 가장 큰 문제라 인식되고 있어 3성분계, 4성분계의 저발열 시멘트 배합이나 플라이애시 기반의 콘크리트를 타설하는 사례가 많아지고 있다. 플라이애시는 고로슬래그 미분말에 비해 수화발열량이 적고 콘크리트의 수화열 저감에 가장 중요한 재료로서 알려져 있으나 플라이애시의 품질이 안정적이지 못해 혼화제의 과다사용, 응결지연 및 콘크리트 부재의 얼룩 등 많은 문제점이 드러나고 있다. 따라서 플라이애시를 대체하는 저발열 시멘트 콘크리트용 광물성 혼화재료로서 고로슬래그 미분말의 적극적인 활용을 위해 고로슬래그 미분말의 수화발열 특성에 대해 검토하고자 하였다.

단열온도상승실험을 통해 측정된 결과를 표 3.18에 정리하였고, 각 배합에 따른 시간에 따른 수화발열 온도와의 관계를 그림 3.18 ~ 그림 3.20에 나타내었다.

표 3.18 간이단열온도상승실험 결과

재령(일)	Plain	BS30	BS50	BS70	4-3-3	4-4-2	FA25
0.0	24.4	23.0	24.0	23.5	25.2	24.2	24.6
0.5	51.2	42.1	40.2	35.6	42.1	42.5	57.2
1.0	66.3	63.1	59.4	52.8	54.5	53.7	61.7
1.5	64.7	65.3	59.4	53.1	55.3	55.3	59.8
2.0	62.0	63.5	56.0	50.6	53.0	53.2	56.3
2.5	59.0	61.4	53.1	48.0	50.3	50.1	53.2
3.0	56.4	58.7	50.1	45.5	47.7	47.6	50.1
3.5	54.2	56.6	47.4	43.4	45.1	45.0	47.3
4.0	51.6	54.1	44.8	41.2	43.5	42.8	45.4
4.5	49.7	52.1	42.5	39.7	41.4	41.0	42.7
5.0	47.5	50.0	40.4	37.8	39.5	39.3	40.7
5.5	45.8	48.2	38.2	36.0	38.0	37.7	38.5
6.0	43.8	46.2	36.0	34.5	36.4	36.2	36.2
6.5	42.6	44.8	33.7	32.4	34.6	34.3	34.8
7.0	41.1	43.3	31.5	30.5	33.0	32.6	31.7
7.5	40.0	42.2	29.5	29.4	31.4	31.2	29.8
8.0	39.0	41.1	27.3	27.5	30.1	29.5	27.7

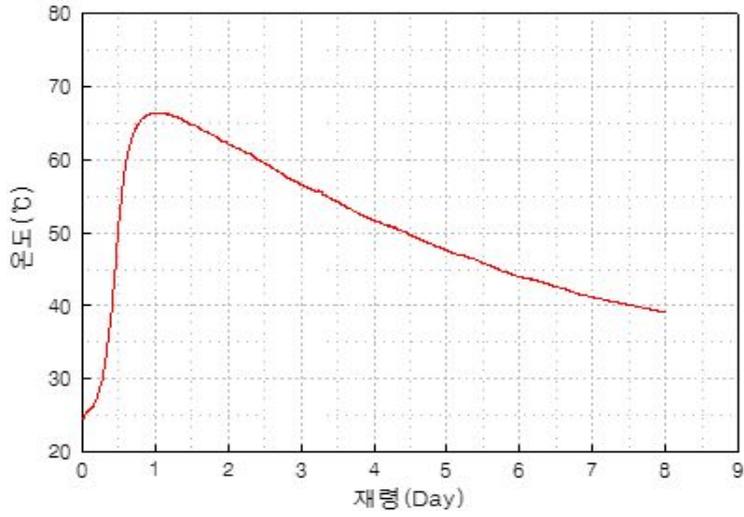
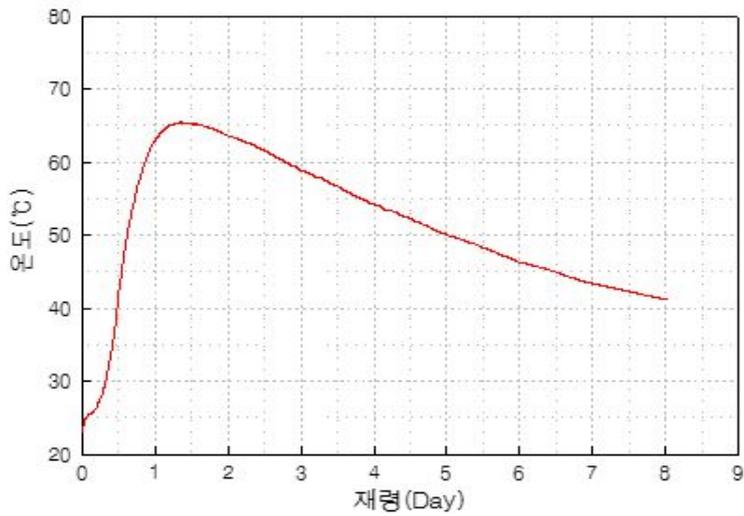
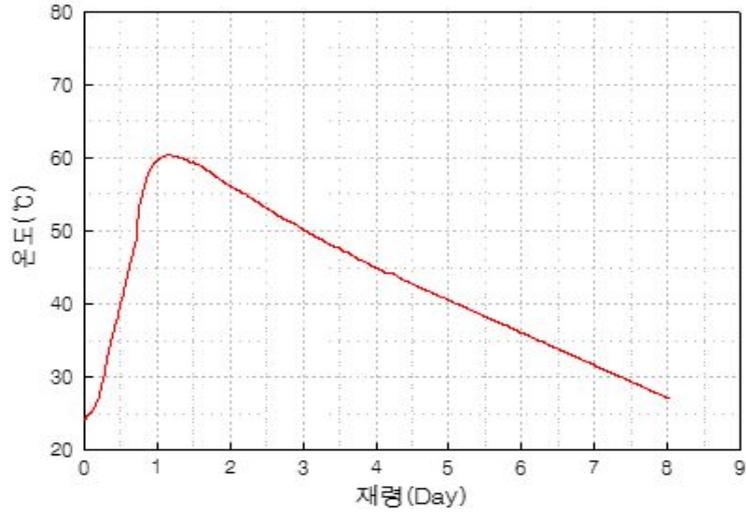


그림 3.18 포틀랜드 시멘트의 간이단열온도상승곡선

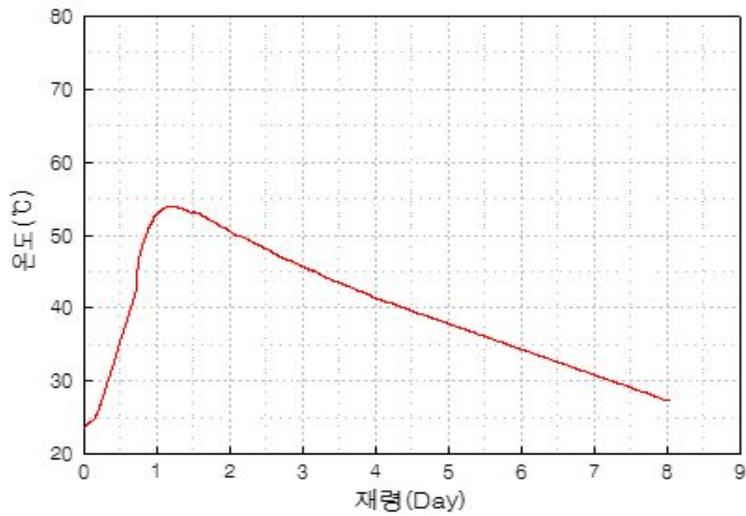


(a) BS 30

그림 3.19 간이단열온도상승곡선(계속)

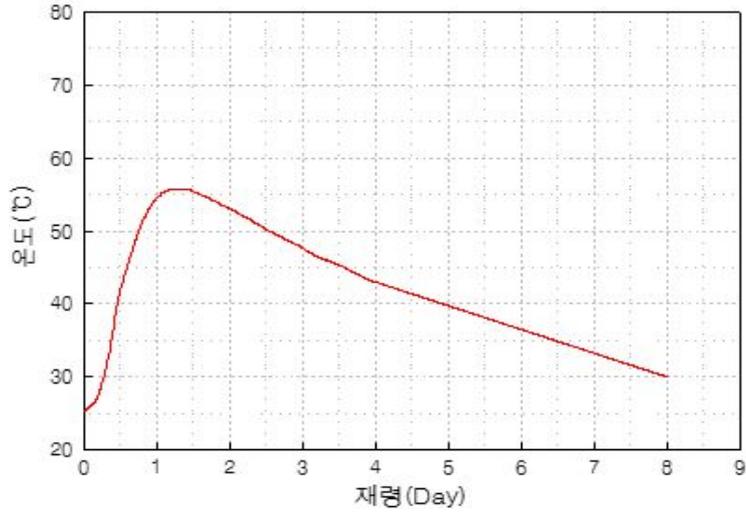


(b) BS 50

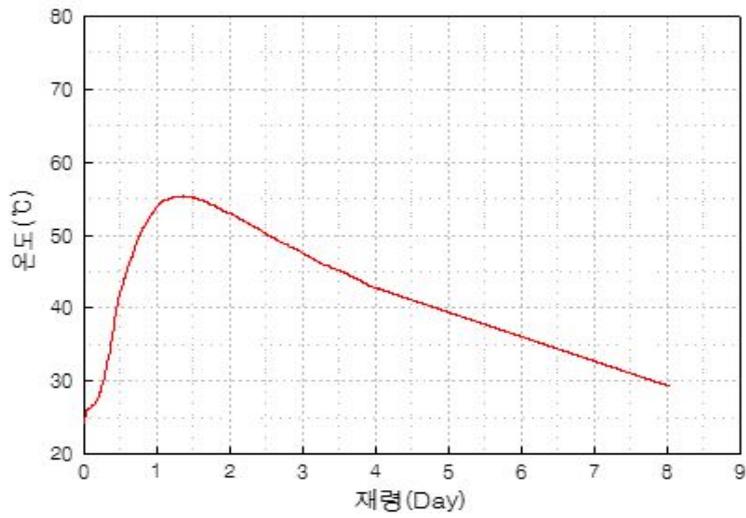


(c) BS 70

그림 3.19 간이단열온도상승곡선(계속)

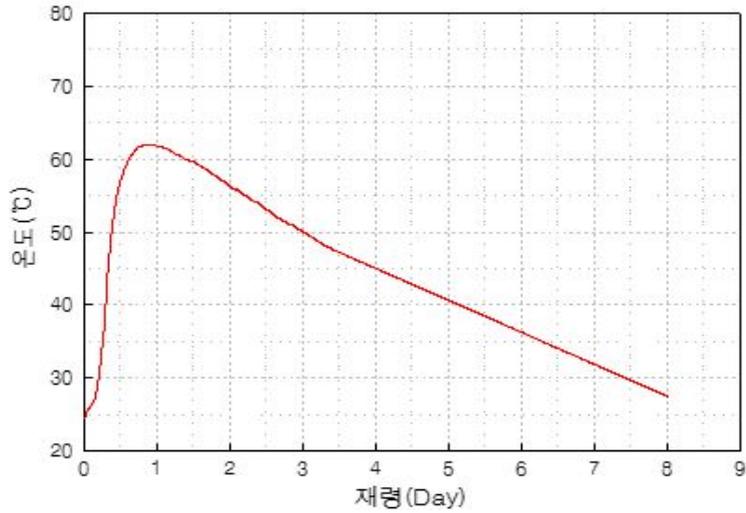


(d) 4-3-3



(e) 4-4-2

그림 3.19 간이단열온도상승곡선(계속)



(f) FA25

그림 3.19 간이단열온도상승곡선

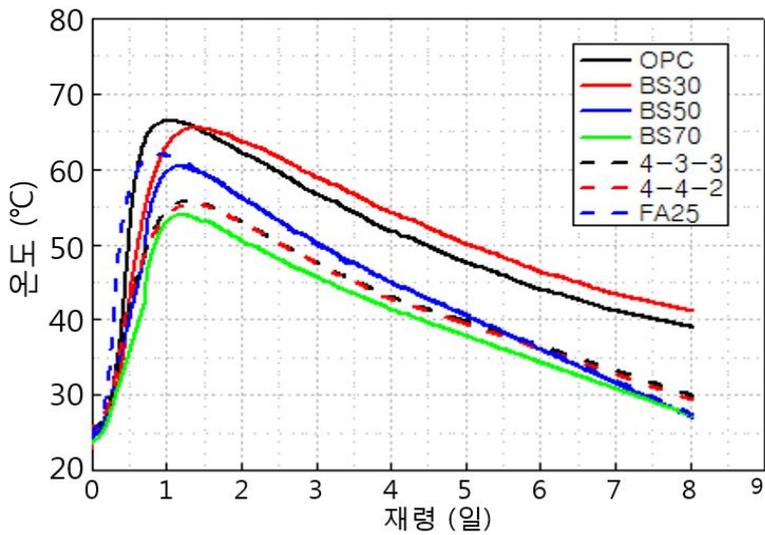


그림 3.20 모든 배합의 간이단열온도상승곡선 비교

모든 배합의 타설시 초기 온도는 22~25°C 사이이며 최고온도까지 도달시간은 대부분 24~37 시간 정도 소요되었다. 최고온도는 포틀랜드 시멘트가 가장 높게 측정되었고 초기 온도상승 기울기도 커 초기 수화발열 속도가 가장 빠르게 나타났다. 고로슬래그 미분말을 치환 사용하는 경우 치환량이 증가할수록 최고온도와 수화속도가 적은 것

으로 나타났으며 고로슬래그 미분말 70% 치환 배합이 가장 낮은 최고온도를 기록하였다. 고로슬래그 미분말을 다량 치환하는 경우 기존 저발열 시멘트 배합보다 수화열이 낮게 측정되어 수화열 저감에도 큰 효과를 나타낼 것으로 판단된다. 플라이애시(F/A)는 초기 수화발열 특성이 매우 빠르나 최고온도는 포틀랜드 시멘트에 비해 낮게 측정되었다. 고로슬래그 미분말을 치환하는 경우에는 약 40% 수준에서 플라이애시(F/A) 25%에 준하는 발열 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났고 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가함에 따라 온도상승곡선의 기울기가 완만해 지는 것을 확인할 수 있었으며, 저발열 시멘트 배합의 경우 4-3-3과 4-4-2는 거의 유사한 결과를 나타냈다.

(5) 압축강도 특성

각 배합에 따른 압축강도 측정 결과는 표 3.19와 같으며, 그림 3.21은 각 치환율별 재령일에 따른 압축강도를 나타낸 것이며, 그림 3.22은 모든 배합의 압축강도 비율을 나타낸 것이다.

표 3.19 모든 배합의 재령에 따른 압축강도 측정 결과

구분	단위수량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)			
		1일	3일	7일	28일
포틀랜드 시멘트	165	14.4	25.8	33.5	43.1
BS30	162	9.6	23.4	34.5	45.7
BS50	159	6.3	20.9	32.5	46.6
BS70	156	4.1	18.6	34.0	48.7
4-3-3	158	5.0	17.4	27.2	38.5
4-4-2	158	4.3	16.7	27.4	40.7
FA25	162	9.7	25.0	31.7	41.3

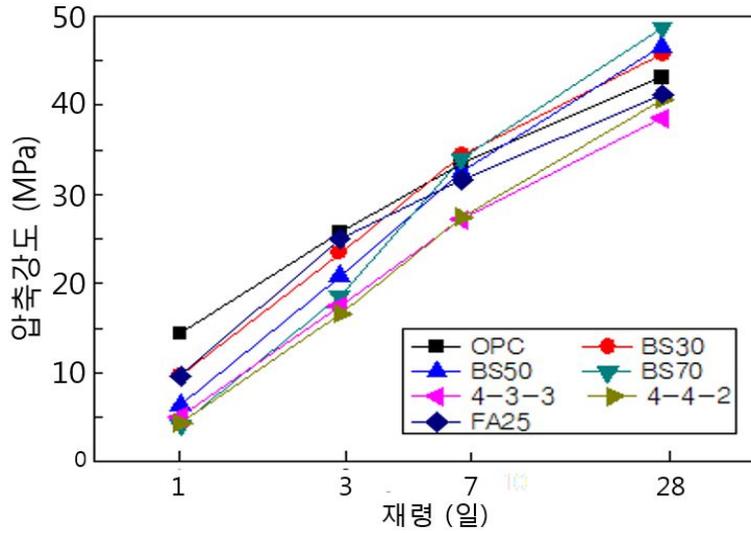


그림 3.21 모든 배합의 재령에 따른 압축강도 비교

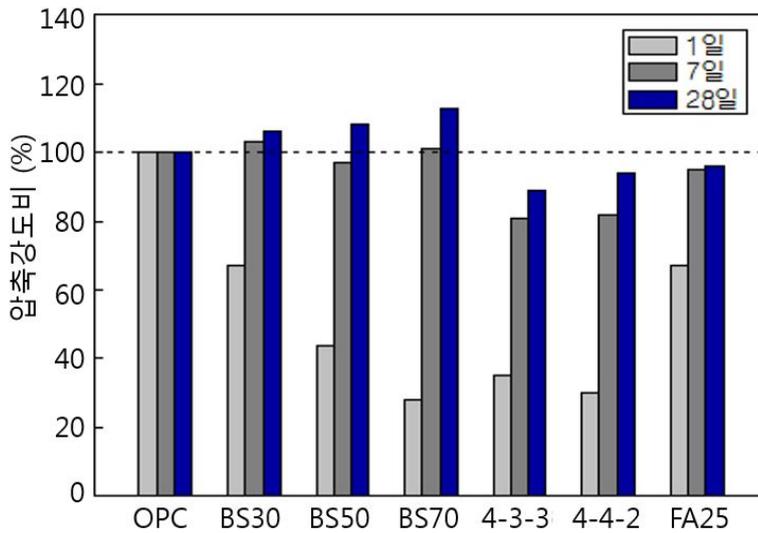


그림 3.22 모든 배합의 재령에 따른 압축강도비

압축강도 측정결과 초기 1일 강도는 모든 수준이 포틀랜드 시멘트에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 플라이애시 25%와 고로슬래그 미분말 치환 30%가 유사한 강도를 나타냈다. 고로슬래그 미분말 치환 50%와 70% 및 저발열 시멘트 배합 2종은 모두 5 MPa 내외의 강도를 나타냈으며 포틀랜드 시멘트는 14 MPa의 강도를 나타냈다. 전 재령에서 저발열 시멘트 배합은 낮은 강도를 나타내 저발열 시멘트 배합은 강도증진이 미흡한 것이 확인되었으며, 초기 1일과 3일에서는 포틀랜드 시멘트의 강도가 가장 양호하게 나타났다. 하지만 재령 7일 이후에 고로슬래그 미분말 치환 콘크리트의 강도가 크게 상승하기 시작하였으며, 재령 28일에는 모든 배합이 포틀랜드 시멘트의 강도를 상회하는 것으로 확인되어 강도확보에 가장 유리한 것으로 나타났다. 재령에 따라 포틀랜드 시멘트의 강도를 100%로 하여 각 배합의 압축강도를 비교한 결과 재령 1일에는 포틀랜드 시멘트를 제외한 모든 배합이 강도증진 수준이 크게 떨어지지만 7일 이후에는 본 연구의 고로슬래그 미분말 치환 배합의 강도는 포틀랜드 시멘트 배합과 동등 수준 강도비를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 저발열 시멘트 배합은 포틀랜드 시멘트 배합에 비해 80% 수준의 강도증진을 보이며 28일 재령에는 90% 수준의 강도를 나타내었지만 재령의 증가에 따른 압축강도 상승률이 증가하는 것을 알 수 있다.

이상으로 본 연구의 3종류의 고로슬래그 미분말 치환 배합과 포틀랜드 시멘트배합 및 기존 저발열 시멘트를 사용한 3 종류 배합과의 경화 전·후의 특성을 비교·평가한 결과는 다음과 같다. Series I 배합의 기초실험을 통해 고로슬래그 미분말의 사용의 증가는 콘크리트 유동성을 향상시키는 것으로 나타났지만 블리딩량이 증가하는 단점이 발생하였다.

이러한 결과를 보완하기 위해 본 연구에서는 단위수량 조절을 통해 블리딩량을 최적화 시킬 수 있는 Series II 배합을 설정하였고 기존의 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시를 혼합하여 제조한 저발열 시멘트 배합과 포틀랜드 시멘트만을 사용한 기본배합과의 기초 물성을 실험을 통해 비교·평가하였다.

본 연구의 3종류의 고로슬래그 미분말 치환 배합은 기존 저발열 시멘트 배합에 비해 슬럼프, 공기량 확보를 위해 투입하는 혼화제의 사용량을 저감시킬 수 있고 균일한 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 초결 시간과 종결시간을 측정한 응결시험을 통해 기존 저발열 시멘트 배합과 유사한 응결시간을 확보할 수 있었다. 그러나 간이단열온도상승실험 결과 플라이애시를 투입한 저발열 시멘트 배합에 비해 최고온도, 수화속도는 다소 높게 나타났지만 고로슬래그 미분말 70% 투입한 배합은 이와 유사한

수화증진 특성을 나타내었다.

압축강도 증진 수준은 포틀랜드 시멘트 배합에 비해 초기재령에는 매우 저하되는 특성을 나타내었지만 7일 이후에는 동등수준 이상을 확보할 수 있고 기존 저발열 시멘트 배합에 비해 강도증진 수준이 상회하는 것으로 나타나 강도확보에는 유리할 것으로 판단되나 초기재령 압축강도 확보를 위한 조기강도 증진형 혼화제나 잠재수경성 반응을 촉진할 수 있는 촉진제의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

제 4 장 실물크기 모형 실험 및 적용성 평가

4.1 실물크기 모형 실험

4.1.1 개요

본 연구의 3장에서는 고로슬래그 미분말을 적용한 콘크리트 배합에 대한 기초 물성 실험을 수행하였고, 3종류의 고로슬래그 미분말 콘크리트 배합과 기존 저발열 시멘트 배합과의 물성을 비교·평가 하였다. 본 연구의 4장에서는 앞서 평가한 콘크리트 배합의 현장 적용성 평가를 위한 실물크기 모형 실험을 계획하였다. 실물크기 모형 실험체는 가을철 기온상태에 타설한 매트기초 구조물을 대상으로 진행하였다. 실험체에 대한 평가는 코어 시편의 재령에 따른 압축강도와 실험체 상부(10 cm), 중앙부(50 cm), 하부(90 cm) 총 3곳의 단열상태의 수화온도 증진 특성을 열전대를 설치하여 실시간 모니터링을 수행하였다. 실물크기 모형 실험을 위해 계획한 실험체의 크기 및 평가항목을 표 4.1에 정리하였다. 실험체 제작을 위해 사용된 콘크리트 배합은 총 3종류이며, 본 연구 3장에서 평가한 포틀랜드 시멘트를 사용한 기본배합, 고로슬래그 미분말 50%를 치환한 BS50 배합 및 기존 저발열 시멘트 4-4-2 배합이다. 실험체 제작은 본 연구의 Series II 배합의 3종류를 사용하되 근처에 위치한 H사 레디믹스트 콘크리트를 사용하였다.

표 4.1 현장실험을 위한 실험체 상세 및 평가항목

실험 항목	실험 내용	비 고
실험체 상세	1.0 m × 1.0 m × 1.0 m 박스형 모형 실험체	3종류 배합
수화열 측정	실험체 내부 열전대 설치 후 실시간 수화열 발생 수준 측정	표면부, 중앙부, 하부
강도증진	실험체 코어강도, 공시체 압축강도 -3개의 공시체 평균값 제시	코어 공시체 (3일, 7일, 28일) 실린더 실험체 (3일, 7일, 28일)

레디믹스트 콘크리트의 배합은 표 4.2에 나타낸 바와 같으며, 굵은골재 최대치수 25 mm, 설계기준 압축강도 27 MPa, 슬럼프 180 mm이다(25-27-180). 현장에서 슬럼프 실험과 공기량 실험을 실시한 후 실내실험과 유사한 굳지 않은 콘크리트 조건을 확인한 후 타설하였다.

표 4.2 실물크기 모형 실험체 제작을 위한 현장 배합

Mix.	투입률(%)			W/B (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m ³)							
	C	BS	FA			W	C	BS	FA	S	G	AD	AE
포틀랜드 시멘트	100	-	-	44.1	48.5	165	374	-	-	850	916	0.65	0.005
BS50	50	50	-	42.5		159	187	187	-	851	918	0.70	0.005
4-4-2	40	40	20	42.8		160	150	150	74	838	903	0.70	0.015

※ 여기서, W/B; 물-결합재비, S/a; 잔골재율, W; 물, C: 시멘트, BS: 고로슬래그 미분말, FA: 플라이애시, S: 잔골재, G: 굵은골재, AD: 감수제, AE: 공기연행제를 나타냄

4.1.2 실물크기 모형 실험체 제작 및 수화열 측정

그림 4.1은 실험체 제작을 위해 제작된 거푸집 단면을 나타낸 것이다. 단열상태에서의 수화열 증진 특성을 측정하기 위해 모든 단면을 단열재를 이용하여 외부 열손실을 최소화하고 내부열이 발산되는 것을 방지하도록 계획하였다. 그림 4.2는 열전대 설치 위치를 나타낸 것이며 데이터로거를 통해 실시간 온도변화를 측정하였다. 그림 4.3은 현장 실험체를 제작하는 과정을 나타낸 것이며, 콘크리트 타설은 레미콘 차량의 슈트를 이용하여 타설하였고 외기온도, 슬럼프, 공기량을 측정하였다.

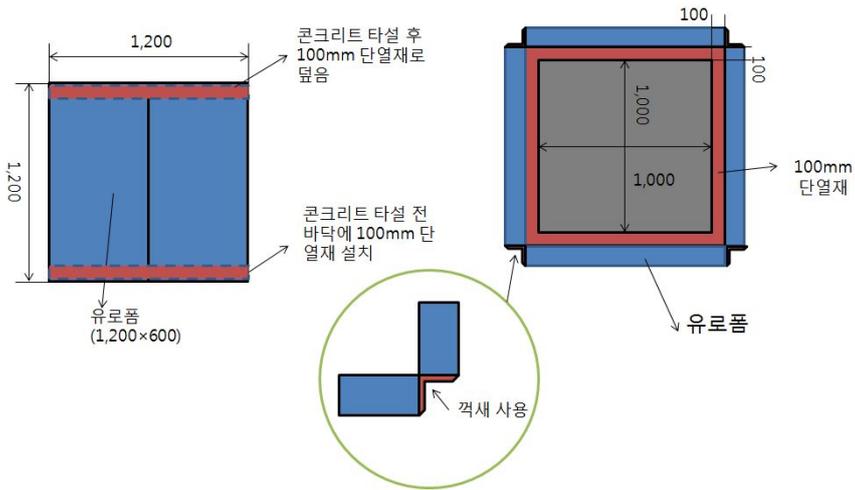


그림 4.1 실물크기 모형 실험체 제작용 거푸집 단면

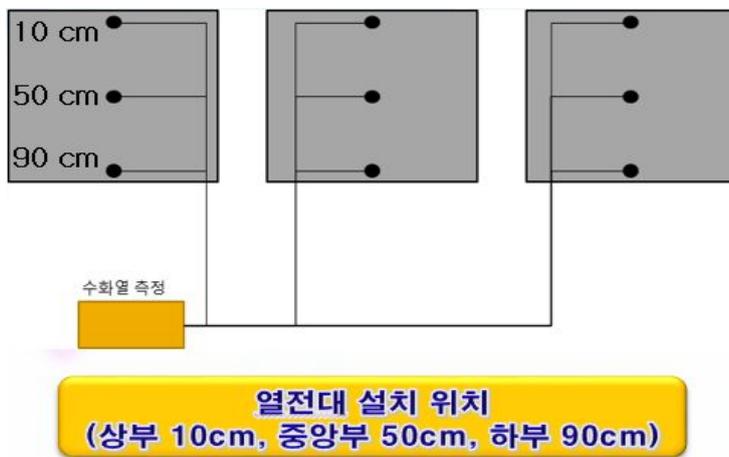


그림 4.2 실물크기 모형 실험체 열전대 설치 위치



(a) 거푸집 제작



(b) 열전대 설치



(c) 콘크리트 타설



(d) 콘크리트 타설 후 전경



(e) 콘크리트 기초 물성 평가



(f) 현장실험체 제작완료 및 양생

사진 4.1 실물크기 모형 실험체 제작과정 전경

4.1.3 실물크기 모형 실험 결과

1) 콘크리트 슬럼프, 공기량 및 콘크리트 온도

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 측정한 결과를 표 4.3과 그림 4.3 및 그림 4.4에 정리하였고, 측정 전경을 사진 4.2에 나타내었다. 3종류의 콘크리트 슬럼프는 180 ±25 mm 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 공기량은 4.5 ± 1.5% 기준을 만족하는 것으로 측정되었고, 실내 실험을 통해 평가한 물성치와 유사한 값을 확보한 것을 확인하였다. 콘크리트 온도는 타설 간격인 1시간 차이에 따라 1℃ 정도씩 차이를 나타내었다.

표 4.3 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 물성 측정 결과

배합	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	콘크리트 온도 (℃)
포틀랜드시멘트	200	5.9	26.2
BS50	180	4.4	25.2
4-4-2	190	3.7	24.2

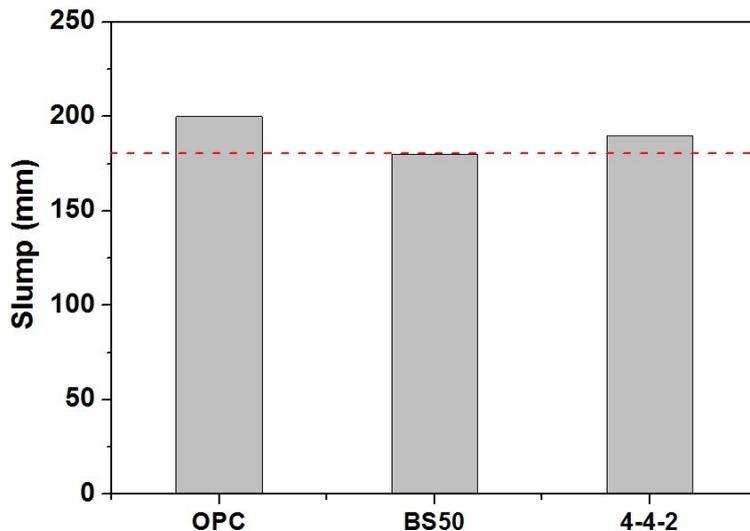


그림 4.3 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 슬럼프 측정 결과

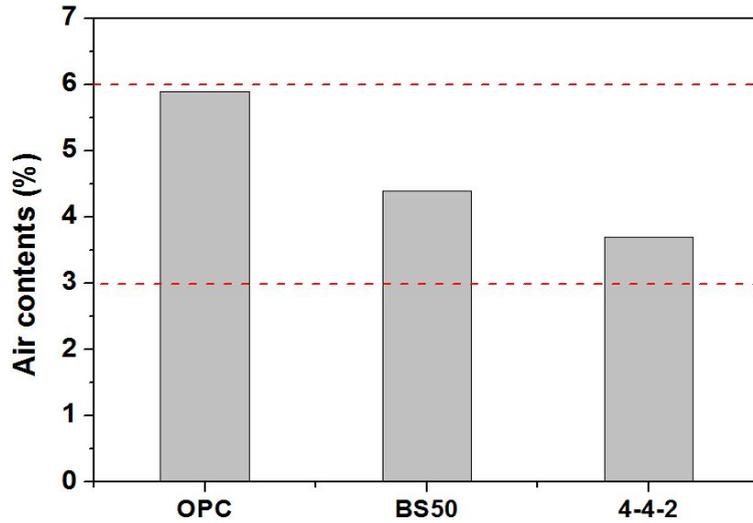


그림 4.4 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 공기량 측정 결과



사진 4.2 실물크기 모형 실험체 제작용 콘크리트 슬럼프 및 공기량 측정 전경

2) 압축강도

실물크기 모형 실험체 제작 후 현장에서 제작한 실린더 압축공시체와 현장 실험체 상부에서 채취한 코어공시체의 재령에 따른 압축강도 증진 수준을 표 4.4에 비교하여 정리하였다. 측정된 재령은 타설 후 3일, 7일, 28일로 각각의 압축강도 측정 결과를 그림 4.5 및 그림 4.6에 나타내었다. 시멘트의 사용량이 가장 높은 포틀랜드 시멘트 배합이 모든 재령에서 타 2배합에 비해 압축강도가 가장 높게 측정되었고, BS50, 4-4-2 배합의 순으로 압축강도가 높게 측정되었다. 현장에서 제작한 공시체와 코어공시체의 압축강도를 비교한 결과 재령 3일에서는 대부분 코어강도가 공시체에 비해 낮게 측정되었는데 이는 코어 채취시 시편의 교란에 의한 강도저하가 발생되었기 때문으로 판단된다.

표 4.4 현장 코어 공시체와 현장 공시체의 압축강도 측정 결과

구분	공시체 강도			코어 공시체 강도		
	3일	7일	28일	3일	7일	28일
포틀랜드시멘트	19.5	25.4	32.6	16.4	27.6	34.8
BS50	18.4	24.6	33.8	15.6	21.6	31.8
4-4-2	13.1	18.6	29.0	11.4	20.8	29.4

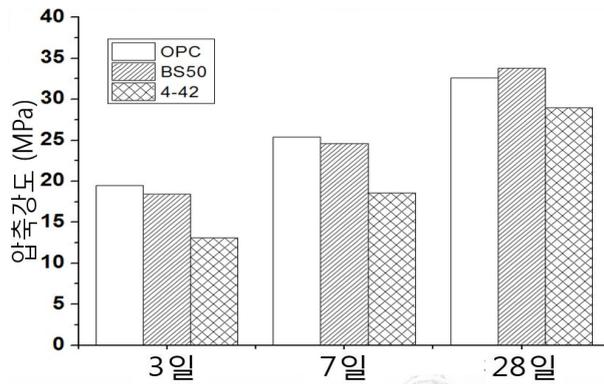


그림 4.5 현장 공시체 압축강도 측정 결과

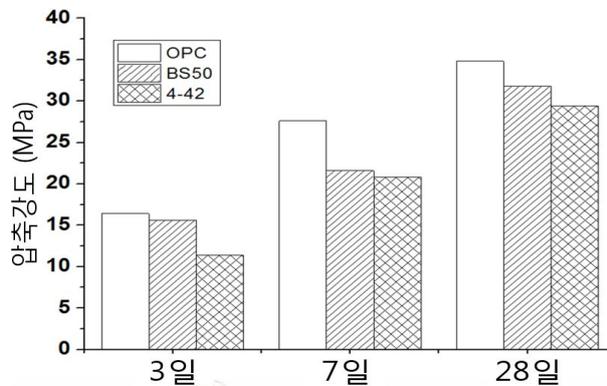
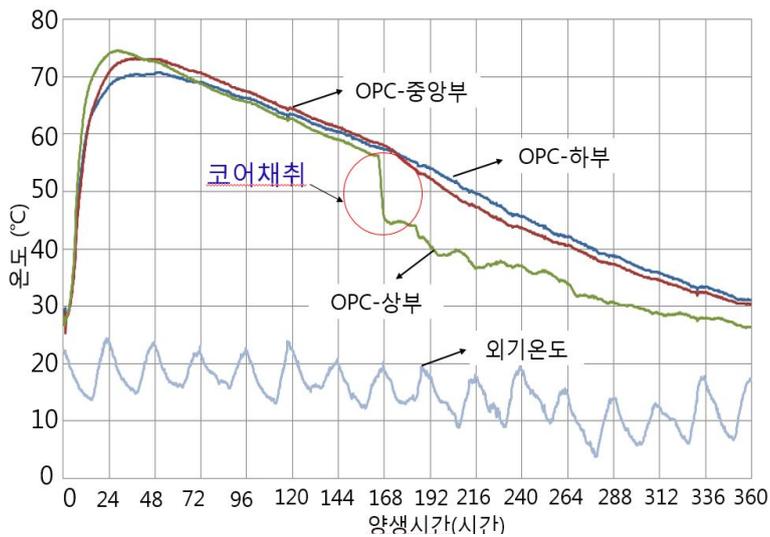


그림 4.6 코어 공시체 압축강도 측정 결과

그러나 콘크리트 경화가 안정적인 상태에 돌입하는 7일 및 28일의 압축강도를 살펴 보면 대부분 코어 공시체 강도가 현장제작한 공시체 보다 다소 높은 수준으로 평가되었다. 모든 배합은 실내에서 수행한 배합에 비해 강도가 다소 낮게 측정되었지만 본 연구의 설계기준압축강도 27MPa를 상회하여 기준을 만족함을 알 수 있다. 또한 본 연구의 BS50 배합은 기존 저발열 시멘트 배합에 비해 강도확보 수준이 높은 것으로 나타나 현장적용에도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

3) 실물크기 모형 실험체 수화열 측정 결과

수화열 측정결과에서 재령 168시간(재령 7일)에서는 상부 부분의 온도가 강하하는 것은 코어 공시체 작업을 위하여 거푸집을 해체하면서 발생된 것이다. 실험을 수행하는 15 일간의 대기온도는 평균 약 15°C를 나타내었으며, 최고온도는 24.4°C에 최저온도는 3.8°C를 나타내었다. 실험체 양생에서 가장 중요한 양생온도는 제작일이 10월 중순이기 때문에 낮을 것으로 예상하여 최대한 보양을 하도록 조치하였고, 단열재의 두께를 100 mm를 사용함으로써, 외부온도에 의한 내부 열손실을 최소화하였기 때문에 외부조건에 영향을 적었을 것으로 볼 수 있다. 그림 4.7 (a)는 포틀랜드 시멘트 배합에 대한 수화열 측정결과이며, 그림 4.7 (b)는 BS50 배합에 대한 수화열 측정결과이다. 그림 4.7 (c)는 기존 저발열 시멘트를 사용한 4-4-2 배합에 대한 수화열 측정결과이다.



(a) 포틀랜드 시멘트

그림 4.7 실물크기 모형 실험체 수화열 측정 결과(계속)

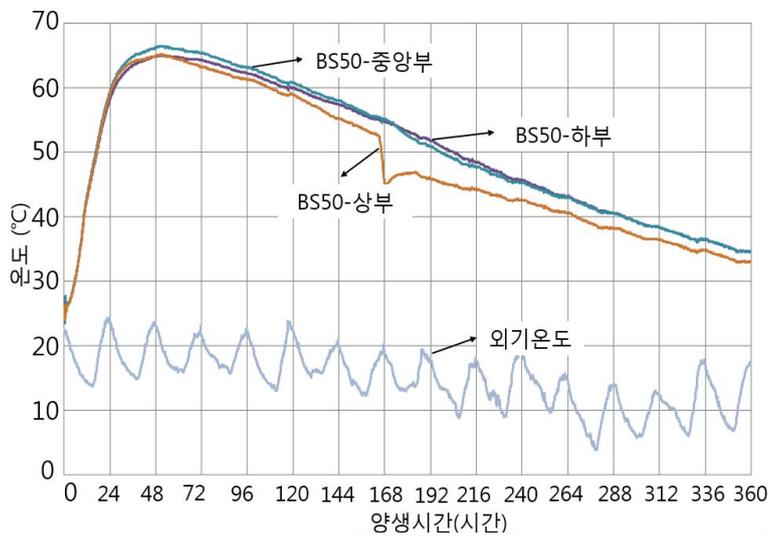
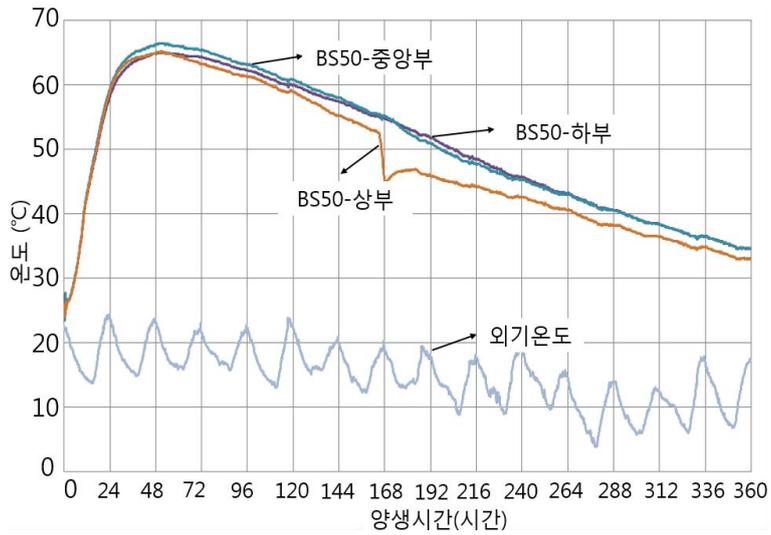


그림 4.7 실물크기 모형 실험체 수화열 측정 결과

표 4.5 위치에 따른 최고온도 측정 결과

배합	하부 최고온도 (온도 °C/시간 hr)	중심부 최고온도 (온도 °C/시간 hr)	상부 온도 (온도 °C/시간 hr)
포틀랜드시멘트	70.8 / 50.5	73.0 / 50.5	74.6 / 28.5
BS50	67.8 / 53.3	68.9 / 53.3	67.1 / 50.5
4-4-2	65.2 / 69.0	66.5 / 69.0	65.3 / 69.0

표 4.5는 현장 실험체의 수화열에 대한 최고온도 수준을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 표에는 최고온도가 증진되는 시간과 온도를 부위별로 나타내었다. 중심부의 최고온도가 가장 낮은 경우는 4-4-2 배합으로 포틀랜드 시멘트 배합과 비교해 보면, 약 6.5°C 정도 낮은 것으로 나타났다. BS50 배합의 경우에는 약 4.1°C 정도 포틀랜드 시멘트 배합보다 낮게 측정되었으나 기존 저발열 시멘트 4-4-2 배합에 비해서는 2.4°C 높게 측정되었지만 포틀랜드 시멘트 배합에 비해 중심부 최고온도를 4.1°C 감소시킬 수 있고 상부와 하부의 최고온도 역시 6.5°C 및 3°C 저감시킬 수 있어 수화열 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 기존 저발열 시멘트를 사용한 4-4-2 배합에 비해 최고온도가 모든 부분에서 높게 측정되었는데 이러한 결과는 4-4-2 배합에서 수화열 저감에 효과적인 플라이애시를 사용한 결과로 판단된다. 표 4.6은 현장실험의 수화열 측정결과를 통하여 수화발열 특성을 분석한 결과를 나타낸 것이다.

표 4.6 현장 실험체에 대한 수화열 특성 분석 결과

배합	최초온도 (°C)	초기 상승온도량 (°C)	초기 상승속도 (°C/hr)	온도 하강량 (°C) (최고 온도 후)	온도 하강속도 (°C/hr)
포틀랜드 시멘트	26.2	47.0	0.931	42.8	0.138
BS50	25.2	42.7	0.739	35.5	0.115
4-4-2	24.2	40.3	0.628	34.5	0.119

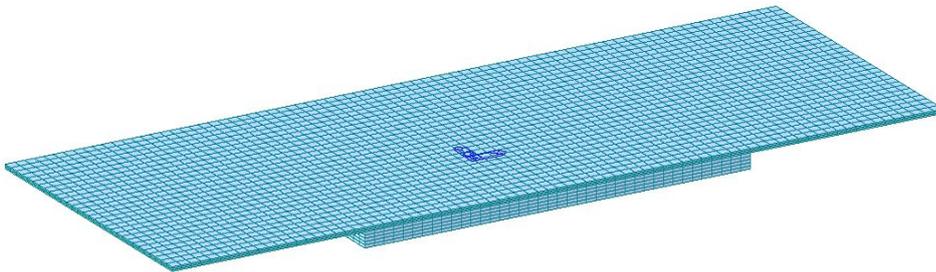
초기상승 온도량은 4-4-2, BS50, 포틀랜드 시멘트 배합 순으로 낮은 것으로 분석되었다. 초기 온도상승속도와 후기 온도하강속도를 분석해 보면, 포틀랜드 시멘트배합이 가장 빨리 상승하고 하강하는 것으로 분석되었으며, BS50 배합은 4-4-2배합에 비해 상승속도는 크지만 하강속도는 다소 느린 특징을 나타냈는데 기존 4-4-2 배합과 유사한 거동의 온도상승 및 하강 속도를 나타내는 것을 확인할 수 있어 BS50 배합 역시 수화열 관리에 유리할 것으로 판단된다.

그러나 수화열은 부재의 크기, 양생하는 조건, 주변 대기온도변화, 배합에 사용되는 결합재 사용량, 배합강도 수준 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 현장에서는 충분한 사전 검토가 필요하다. 또한, 시멘트의 사용량이 증가할수록 발생하는 수화열이 높게 나타는 경향이 있고, 동일한 포틀랜드 시멘트라도 다양한 제품의 수화발열 특성이 다르기 때문에 현장 적용시 수화발열 특성을 실험을 통해 예측하는 것이 적용성 향상을 위해 중요할 것으로 판단된다.

4.2 실무제에 대한 수화열 해석

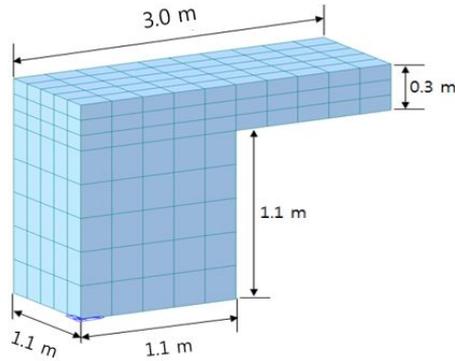
1) 수화열 해석 개요

본 절에서는 3장에서 기본배합, 고로슬래그 콘크리트 배합 및 기존 저발열 시멘트 배합에 대하여 실물크기 모형 실험체 수화열 결과인 최대 단열온도 상승값 및 반응속도 등의 실험 결과를 이용하여 매트기초의 수화열 해석을 수행하였다. 수화열 해석 목적은 고로슬래그 콘크리트 배합을 실제 현장 매트기초에 적용하기 위함이다. 수화열 해석시 실제 사이즈 크기의 해석 시간의 단축 및 온도분포 상태 확인의 편리성을 위하여 1/4 대칭 모델을 적용한 실물크기 모형 실험체에 대한 수화열 해석을 수행하고 실제 실물크기 모형 실험체로부터 측정된 수화열 데이터를 비교하여 해석결과의 타당성을 검증하였다. 또한 실제 크기인 매트기초에 대한 수화열 해석을 수행한 후 온도균열 발생을 억제하기 위한 배합검토를 수행하여 현장 적용시 활용될 수 있는 기초자료를 구축하고자 하였다. 그림 4.8은 수화열해석을 위한 실제 매트기초 모델링 결과이다. 모델링을 통해 시공단계별 열전달 해석을 위한 전체 크기의 4등분한 모델링을 통해 응력분포, 온도균열지수를 예측하여 3종류의 배합에 따른 국내 콘크리트표준 사양서 기준의 만족여부를 검토하였다.

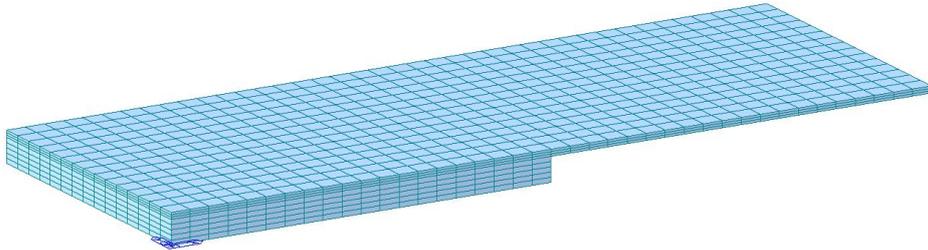


(a) 실제 매트기초 전체 크기 모델링 (1.4 m × 20.0 m × 60.0 m)

그림 4.8 수화열 해석을 위한 매트기초 모델링 결과 (계속)



(b) 실제 매트기초 전체 1/20 크기 4등분 모델링 결과



(c) 실제 매트기초 전체 4등분 모델링 결과

그림 4.8 수화열 해석을 위한 매트기초 모델링 결과

열전달 해석의 경우 시멘트의 수화과정에서 발생하는 발열, 대류, 전도 등에 의한 시간에 따른 온도변화를 계산하였고, 열응력 해석은 열전달 해석에서 계산된 시간별 절점의 온도분포 및 시간, 온도에 따른 재질 변화, 시간에 따른 건조수축, 시간, 응력에 따른 크리프 등을 고려하여 매트기초에 미치는 응력을 계산하였다. 지반의 경우 비열과 열전도율을 가진 부재로 모델링하여 콘크리트에서 발생한 열이 지반으로 전달되는 과정을 모사하도록 모델링하였다. 본 연구의 매트기초 수화열 해석을 수행하기 위하여 적용한 콘크리트 배합은 기본배합, BS50, 4-4-2 총 3종류이다. 최대 단열온도 상승 값(K) 및 상승속도(α)는 콘크리트 발열특성을 결정짓는 중요한 변수로써 각종 시공여건 및 타설 온도에 따라 크게 다르게 나타나 해석에서는 실제 시공여건 및 타설 온도 등

이 고려된 정확한 값이 적용되어야 한다. 앞 절에서 수행한 단열온도상승 시험결과는 20℃ 표준조건에서 실시된 결과이므로 실물크기 모형 실험체 제작시의 측정된 콘크리트 타설 온도에서의 단열온도상승 특성을 도출하기 위한 보정을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 수화열 해석 과정은 다음 그림 4.9에 나타낸 바와 같으며, 유한요소해석구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하였다.

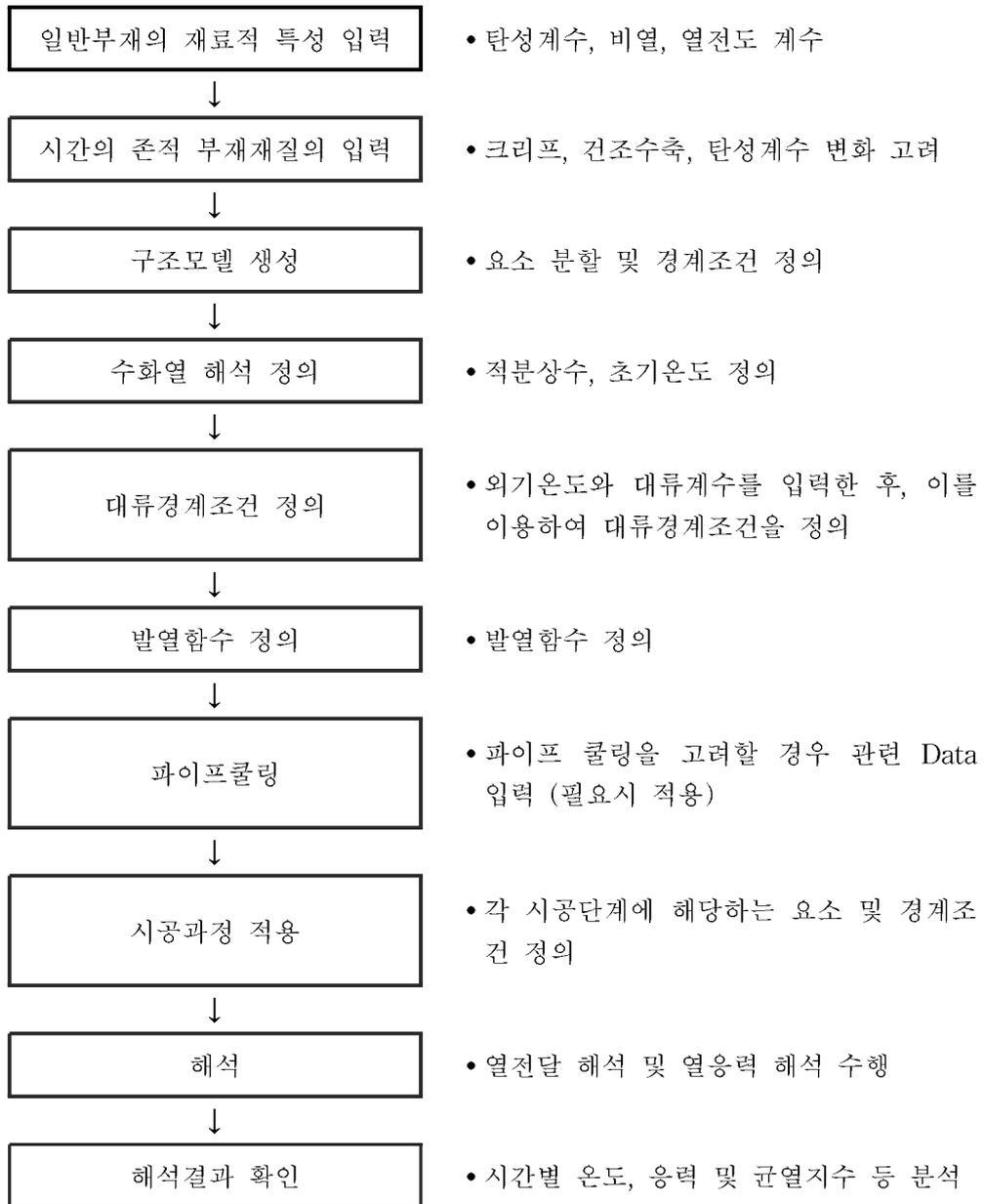


그림 4.9 매트기초 수화열 해석 흐름도

기본배합의 경우 ‘콘크리트 표준시방서 제 18장 매스콘크리트편 <표 18.1>에서 제시하고 있는 타설 온도에 따른 단열온도상승 표준 값에 근거하여 보정하였고, 고로슬래그 치환 50% 배합과 4-4-2 배합의 경우 국내외 기준이 수립되지 않았기 때문에, 국내 S사 기술자료(한국콘크리트학회, 2009)에서 제시하고 있는 3성분계 저발열 시멘트 콘크리트의 타설 온도에 따른 단열온도상승 표준 값에 근거하여 보정하여 해석에 적용하였다. 3종류의 배합에 대하여 보정된 단열온도 상승 특성 값을 다음 표 4.7에 정리하였다. 표준 20℃를 기준으로 본 연구의 평균 외기기온 15℃일 경우 보정된 결과 값이다.

표 4.7 타설온도에 따라 보정된 단열온도 상승 특성값

구 분	최대 단열온도 상승값, K (℃)			반응 속도, α (℃/hr)		
	타설온도 (℃)	20℃ (표준값)	보정값 (℃)	타설온도 (℃)	20℃ (표준)	보정값 (℃/hr)
기본배합	26.2	44.3	52.5	26.2	0.887	1.073
BS50	25.2	42.9	38.3	25.2	0.557	0.720
4-4-2	24.2	40.7	38.7	24.2	0.466	0.689

매트기초의 수화열 해석 시 콘크리트 표준시방서에 준하여 압축강도 및 인장강도의 증진을 예상하는 식을 적용하였다. 단순히 물리적인 개념이 아닌 성숙도에 근거한 등가재령의 개념으로 콘크리트의 온도가 높은 상태에서는 더욱 빨리 강도증진이 되고, 낮은 상태에서는 천천히 강도증진이 이루어지는 실제 초기 재령 콘크리트의 거동이 반영될 수 있다. 콘크리트 압축강도 및 인장강도 증진에 영향을 미치는 강도증진 식은 아래 식 (4.1)과 식 (4.2)와 같다. 여기에서 t는 재령(일)이며, 본 매트기초 구조물의 28일 설계기준강도는 27MPa이다.

$$\bullet \text{ 압축강도 } f_{cu}(t) = \frac{t}{a+bt}d(i)f_{ck} \quad (4.1)$$

$$\bullet \text{ 인장강도 } f_{sp}(t) = 1.4\sqrt{f_{cu}(t)} \quad (4.2)$$

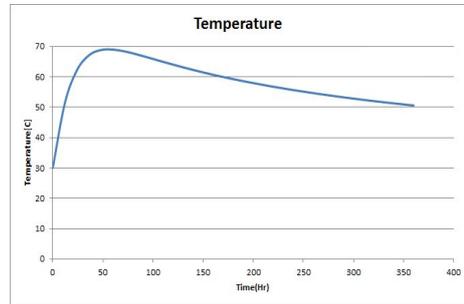
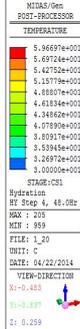
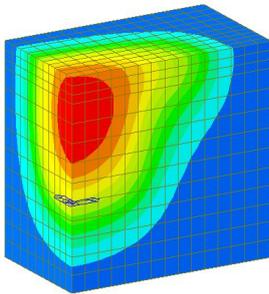
표 4.8은 매트기초의 수화열 해석을 수행하기 위한 기본 입력 값을 나타낸 것이다. 해석 수행에 필요한 조건들에 대해서는 가능한 한 현장에서의 시공조건을 고려하여 적절하게 가정하였으며, 그 외 조건들에 대해서는 콘크리트 표준시방서에 준하여 매스콘크리트 수화열 해석을 위한 조건을 입력하여 실시하였다. 배합별 압축강도 증진계수는 앞서 실험된 압축강도 공시체에서의 강도를 기준으로 각각 계산하여 산정하였다.

표 4.8 매트기초 수화열 해석에 사용된 변수값

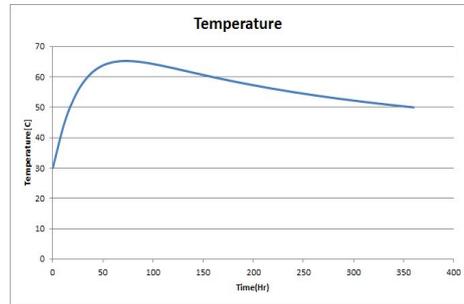
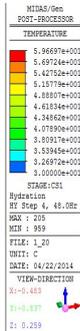
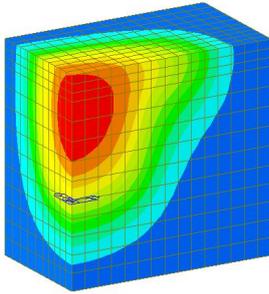
재료의 물성	사용 재료	매트기초				지 반
		$f_{ck} = 27 \text{ MPa}$				
비열 (kcal/kg℃)		0.25				0.2
밀도 (kg/m ³)		2,500				1,800
열전도율 (kcal/mh℃)		2.3				1.7
대류계수 (W/(m ² ℃))		14.0				-
콘크리트 온도 (℃)		직접 측정한 온도 적용				직접 측정한 온도 적용
외기온도 (℃)		15℃				-
압축강도 증진 계수	기온 조건	배합조건	a	b	$d(i)$	
	15℃	기본배합	3.8	0.95	1.15	
		BS50	8.3	0.92	1.48	
		4-4-2	9.0	0.85	1.43	

2) 중앙부 온도상승 해석 결과

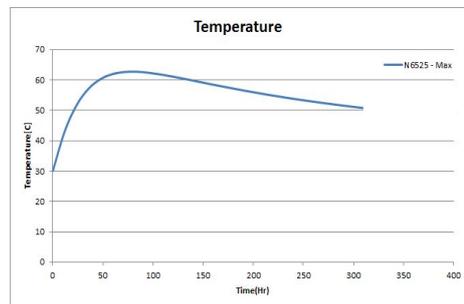
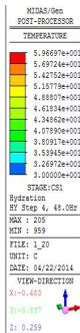
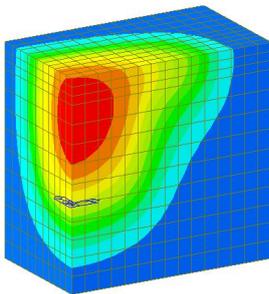
그림 4.10은 실제 매트기초 1/20 크기를 4등분한 실험체 크기의 배합에 따른 온도상승 해석결과를 나타낸 것이며, 최대온도 및 발생시간을 정리하여 표 4.9에 나타내었다.



(a) 기본배합



(b) BS50



(c) 4-4-2

그림 4.10 매트기초 최대온도 및 발생시간 해석 결과 (구조물 중앙부)

각 배합에 대한 수화열 해석 결과 수화열에 의한 온도상승이 가장 크게 나타나는 위치는 구조물의 정중앙 부분인 것으로 확인되었다. 외기와외의 접촉거리가 가까운 표면에 근접할수록 온도 상승량이 중앙부에 비해 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 한편, 배합별 최고 온도 상승량은 기본배합이 BS50과 4-4-2 배합에 비해 높은 것으로 나타났으며, 최고온도 발생시간도 60시간으로 수화열이 가장 급격히 상승하였다. 포틀랜드 시멘트 사용량이 가장 적은 4-4-2 배합은 기본배합에 비해 최고온도는 6.5℃, 발생시간은 19시간 이상 늦게 발생하는 것으로 해석되어, 매스콘크리트 타설시 수화열 발생을 저감시킬 수 있는 가장 유리한 배합으로 나타났다. 본 연구의 BS50 배합 역시 기본배합의 최고온도를 약 4.1℃저감시킬 수 있는 것으로 나타났고 발생시간도 약 3시간 늦출 수 있어 수화열 저감을 위한 배합으로 유효할 것으로 판단된다.

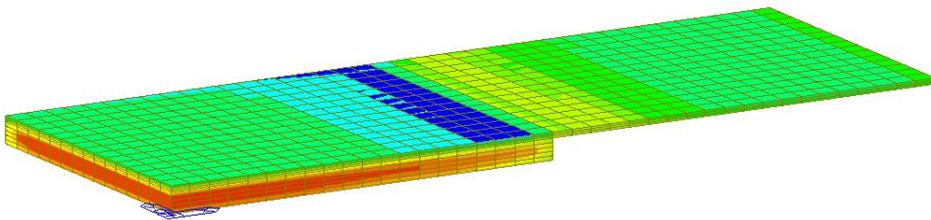
표 4.9 실물크기 모형 실험체 온도측정 결과와 해석 결과 비교

구 분	외기온도 15℃			
	실험체 측정결과		수화열 해석 결과	
	최고온도 (℃)	발생시간(hr)	최고온도 (℃)	발생시간(hr)
기본배합	73.0	50.5	69.0	60
BS50	68.9	53.3	65.2	72
4-4-2	66.5	69.0	62.7	84

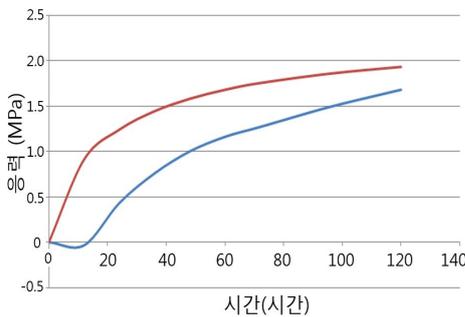
3) 응력분포, 온도균열지수 평가 결과

그림 4.11은 실제 매트기초 크기의 1/4배 모델링 부재에 대한 수화열 해석결과를 나타낸 것으로 최고응력 발생 시 응력분포, 응력시간이력 및 온도균열지수를 해석한 결과이며, 표 4.10은 해석결과를 정리한 것이다. 해석결과 매트기초의 중심부 표면 부분에서의 응력발생이 상대적으로 크게 나타났다. 또한 응력시간이력 그래프에서 시간경과에 따라 수화열에 의한 인장응력이 증가되며 나타나는 전형적인 내부구속에 의한 인장응력 발생 패턴을 확인할 수 있다. 따라서 실제 매트기초 구조물에 발생하는 열응력

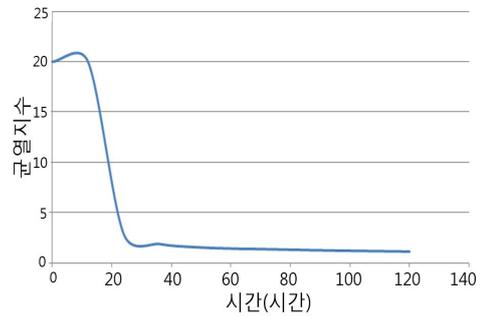
에 의한 균열은 콘크리트 타설 후 약 3~5일 사이에 발생하는 내부구속에 의한 온도균열 양상을 보일 것으로 예상된다. 콘크리트 타설 경과 약 120시간 후 포틀랜드 시멘트 배합은 최소 온도균열지수가 1.042로 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “온도균열 발생은 허용하지만 유해한 균열발생을 제한할 경우에 해당하는 0.7 이상 1.2 미만”에 해당하는 수치로 확인되었다. 또한 BS50과 4-4-2 배합의 경우 모두 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “균열발생을 제한하는 경우에 해당하는 온도균열지수 1.2 이상 1.5 미만”에 해당 되어 포틀랜드 시멘트를 사용한 기본배합에 비해 수화열 저감 및 온도균열 제어에 효과적인 것으로 나타났다.



(응력 분포)



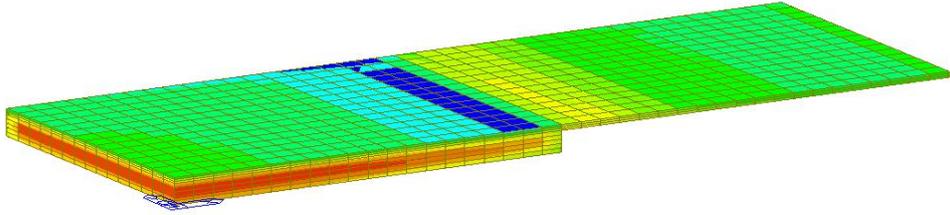
(응력분포 시간이력)



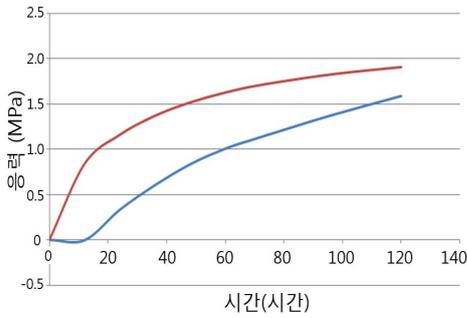
(온도균열지수)

(a) 기본배합

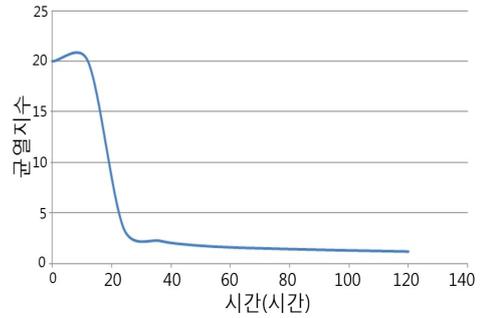
그림 4.11 매트기초 응력분포 시간이력, 온도균열 지수 해석 결과(중심부 표면, 계속)



(응력 분포)

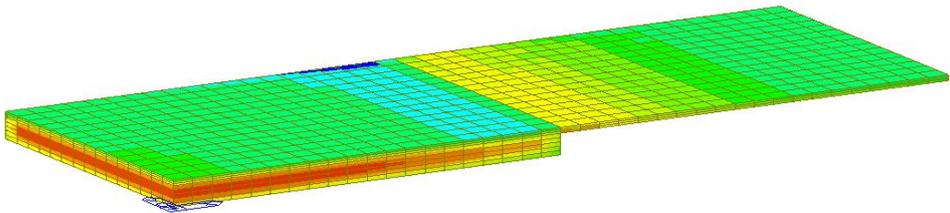


(응력분포 시간이력)

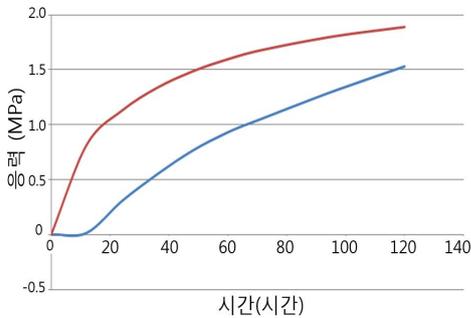


(온도균열지수)

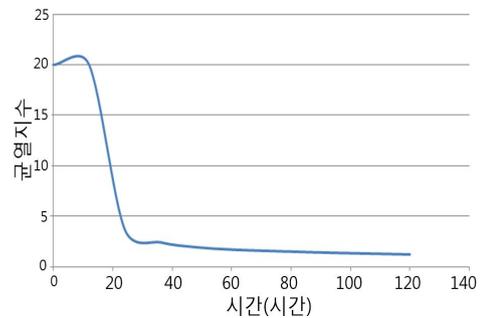
(b) BS50



응력 분포



응력분포 시간이력



온도균열지수

(c) TBC-442

그림 4.11 매트기초 응력분포 시간이력, 온도균열 지수 해석 결과(중심부 표면)

표 4.10 최고응력 발생시 응력분포, 응력시간이력 및 온도균열지수 해석 결과

구 분	최대 인장응력(MPa)	최소 온도균열지수	발생시간(hr)
기본배합	1.787	1.042	120
BS50	1.424	1.214	120
4-4-2	1.345	1.238	120

본장에서는 앞서 3장에서 평가한 콘크리트 배합의 현장 적용성 평가를 위한 실물크기 모형 실험을 계획하였다. 실험체는 가을철 기온상태에 타설한 매트기초 구조물을 대상으로 진행하였다. 실물크기 모형 실험체에 대한 평가는 코어 시편의 재령에 따른 압축강도와 실물크기 모형 실험체 상부(10 cm), 중앙부(50 cm), 하부(90 cm) 총 3곳의 단열상태의 수화온도 증진 특성을 열전대를 설치하여 실시간 모니터링을 수행하였다. 또한, 실부재에 대한 적용성 평가를 위하여 수화열 해석을 실시하여 최고온도 및 온도균열지수를 평가하였다.

실물크기 모형 실험체의 압축강도의 측면에서 살펴보면, 콘크리트 경화가 안정적인 상태에 돌입하는 7일 및 28일의 압축강도는 대부분 코어공시체 강도가 현장제작한 공시체 보다 높은 수준으로 평가되었으며, 모든 배합은 본 연구의 설계기준압축강도 27 MPa를 상회하여 기준을 만족함을 알 수 있다. 또한 본 연구의 BS50 배합은 기존 저발열 시멘트 배합에 비해 강도확보 수준이 높은 것으로 나타나 현장적용에도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

실물크기 모형 실험체의 수화열 측정결과, 초기상승 온도량은 4-4-2, BS50, 포틀랜드 시멘트 배합 순으로 낮은 것으로 분석되었다. 초기 온도상승속도와 후기 온도하강속도를 분석해 보면, 포틀랜드 시멘트배합이 가장 빨리 상승하고 하강하는 것으로 분석되었으며, BS50 배합은 4-4-2 배합에 비해 상승속도는 크지만 하강속도는 다소 느린 특징을 나타냈는데 기존 4-4-2 배합과 유사한 거동의 온도상승 및 하강 속도를 나타내는 것을 확인할 수 있어 BS50 배합 역시 수화열 관리에 유리할 것으로 판단된다.

실부재에 대한 적용성 평가를 위하여 매트기초에 대한 수화열 해석을 실시하여 최고 온도 및 온도균열지수를 평가한 결과, 포틀랜드 시멘트 사용량이 가장 적은 4-4-2 배합은 포틀랜드 시멘트 배합에 비해 최고온도는 6.5℃, 발생시간은 19시간 이상 늦게 발

생하는 것으로 해석되어, 매스콘크리트 타설시 수화열 발생을 저감시킬 수 있는 가장 유리한 배합으로 나타났다. 본 연구의 BS50 배합 역시 기본배합의 최고온도를 약 4.1℃ 저감시킬 수 있는 것으로 나타났고 발생시간도 약 3시간 늦출 수 있어 수화열 저감을 위한 배합으로 유효할 것으로 판단된다.

온도균열지수의 경우, 포틀랜드 시멘트 배합은 최소 온도균열지수가 1.042로 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “온도균열 발생은 허용하지만 유해한 균열발생을 제한할 경우에 해당하는 0.7 이상 1.2 미만”에 해당하는 수치로 확인되었다. 또한 BS50과 4-4-2 배합의 경우 모두 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “균열발생을 제한하는 경우에 해당하는 온도균열지수 1.2 이상 1.5 미만”에 해당 되어 포틀랜드 시멘트를 사용한 기본배합에 비해 수화열 저감 및 온도균열 제어에 효과적인 것으로 나타났다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 산업부산물로 다량 발생하는 고로슬래그의 콘크리트 적용성을 확대하고 고로슬래그 콘크리트의 블리딩 문제를 해결함으로써 향상된 품질의 고로슬래그콘크리트 배합을 도출하였다. 또한 이를 이용하여 건설 현장에 적용하기 위한 일련의 연구를 수행하였다. 본 연구를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 고로슬래그를 치환한 Series II 배합의 단위수량은 포틀랜드 시멘트만 사용한 기본 배합의 블리딩을 3.86%를 목표 값으로 설정하였을 때, Series I 배합의 블리딩량 회귀분석을 통해 고로슬래그 30% 치환 시 기본배합 대비 단위수량 2%, 50% 치환 시 단위수량 4%, 70% 치환 시 단위수량 6% 수준으로 감소시킬 경우 블리딩을 목표값(3.86%)을 확보하였다.
2. 고로슬래그 미분말 치환율 30%, 50%, 70% 배합과 기존 저발열 시멘트 콘크리트 배합의 슬럼프 실험을 통해, 기존 저발열 시멘트 콘크리트 배합과 같은 슬럼프 값을 확보하기 위해서는 고로슬래그 미분말 치환율 배합에서 최대 7.7% 감수제량을 감소시킬 수 있었다. 또한 목표 공기량의 경우 공기연행제 사용량을 3~4배 감소시킬 수 있어 혼화제 사용량 저감 측면에서 기존 저발열 시멘트 콘크리트에 비해 고로슬래그 콘크리트 배합이 우수하게 나타났다.
3. 간이단열 온도상승실험에서 포틀랜드(기본배합), 3가지 고로슬래그 미분말 치환율(30%, 50%, 70%) 배합, 2가지 저발열 시멘트(PC:BS:FA; 40-30-30, 40-40-20) 배합, 그리고 플라이애시(25%) 배합에 대해 온도를 측정 한 결과 기본배합이 66.4°C로 가장 높게 측정되었다. 그 외의 배합에서는 기본배합에 비해 각각 최저 1.1°C에서 최고 13.2°C 사이로 낮게 측정되어 수화열 발생 저감에 효과적으로 나타났다. 특히, 고로슬래그 미분말 70%배합이 기본배합의 온도 보다 13.2°C로 가장 낮게 측정되었다.
4. 기본배합의 재령 1일과 3일 압축강도는 14.4 MPa와 25.8 MPa로 나타났다. 고로슬래그 및 기존 저발열 시멘트 배합의 압축강도는 기본배합의 재령 1일 강도보다 1.5

~ 3.5배, 재령 3일 강도보다는 1.0~ 1.5배 높게 측정되었다. 그러나 재령 7일부터 고로슬래그 배합은 기본배합에 비해 0.97 ~ 1.03배 범위의 동등수준의 강도를 확보하였고, 기존 저발열 시멘트 콘크리트에 비해서는 1.03 ~ 1.27배 더 높은 강도가 나타났다.

5. 실물크기 모형의 중앙부에서 직접 측정된 수화열은 간이단열상승실험과 동일한 경향을 나타내었다. 기본배합의 최고온도가 73°C로 가장 높게 나타났으며, 고로슬래그 치환율 50% 배합이 68.9°C, 기존 저발열 시멘트 콘크리트 4-4-2 (PC:BS:FA; 40-40-20) 배합이 66.5°C 순으로 낮게 측정되었다. 또한 최대 온도에 도달하는 시간도 동일한 순서의 경향을 나타내었다. 고로슬래그 배합도 수화열 저감을 목적으로 제조된 기존 저발열 시멘트 콘크리트 배합과 유사하게 수화열 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

6. 수화열 해석을 통해 온도균열지수를 평가한 결과 기본배합이 1.042로 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 “온도균열 발생은 허용하지만 유해한 균열발생을 제한할 경우에 해당하는 0.7 ~ 1.2 미만”에 해당되었다. 고로슬래그 치환율 50% 배합은 1.214, 저발열 시멘트 4-4-2 (PC:BS:FA; 40-40-20) 배합은 1.238로 “균열발생을 제한하는 경우에 해당하는 온도균열지수 1.2 ~ 1.5 미만”에 해당 되어 기본배합에 비해 온도균열 발생확률이 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 고로슬래그 사용량을 극대화하고 블리딩 문제점을 개선할 수 있는 콘크리트 배합을 제시하였다. 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 블리딩율은 기본 배합과 동일한 수준을 확보할 수 있도록 단위수량을 조절하여 최적화하였다. 또한 수화열 해석 및 실험을 통해 온도균열지수 및 발열온도 저감측면에서도 우수한 결과를 도출할 수 있었다. 따라서 본 연구의 고로슬래그 콘크리트 배합설계는 마스크 콘크리트 현장에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동진(2011) 외; “슬래그 시멘트 조기강도 향상 방안에 대한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, 논문집, 제23권, 제1호.
2. 김동현(2014) 외; “친환경 슬래그시멘트 PosMent 개발”, 한국건설순환자원학회지, Vol. 14.
3. 김무한, 김규용, 조봉석, 나철성, 김영덕(2007); “고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계 제23권, 제3호, pp.61-68.
4. 김득환(2013); “유화처리된 폐식용유(ERCO) 처리방법이 혼화재 다량사용 콘크리트의 중성화 억제에 미치는 영향”, 청주대학교 산업경영대학원.
5. 김성수(2015) 외; “토목재료학”, 구미서관, pp. 19-44.
6. 김성환(2011); “고로슬래그 미분말을 다량 사용한 콘크리트의 성능 향상”, 청주대학교 대학원, 박사학위논문.
7. 김은겸(2000); “고로슬래그 콘크리트의 시방서 개정 방향”, KCI POSCO Forum, pp. 311-329.
8. 김효락, 박재우; “팽창성 수축보상재를 이용한 공동주택 바닥미장공법”, 대림기술정보 96 가을호.
9. 문형철(2008); “고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 성질”, 광주대학교, 석사학위논문.
10. 소양섭(2002); “자극제 종류에 따른 고로슬래그 시멘트 모르타르의 특성”, 대한건축학회, 학회지, 제18권, 제5호, pp.65-72.
11. 송하원(2000); “고로슬래그 미분말을 사용한 고내구성 콘크리트의 개발”, KCI POSCO Forum, pp.163-214.
12. 쌍용양회공업주식회사 (2009). 해양·매스콘크리트 가이드북.
13. 원철(2012) 외; “건설사 수재 slag 배합 확대 연구”, GS건설 기술연구소.
14. 이도현(2014) 외; “고로슬래그 미분말 및 슬래그시멘트의 콘크리트 구조체 적용 지침”, 한국건설순환자원학회지, Vol. 14.
15. 이상수(2006) 외; “고로수재슬래그 수요촉진을 위한 고성능 콘크리트 개발”,

- 포항산업과학연구원 보고서.
16. 이화영, 장홍석, 문경주, 소승영, 소양섭(2006); “알칼리 자극제를 이용한 비소성 시멘트 모르타르의 압축강도 개선”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 26권 제1호, pp. 677-680.
 17. 정재동(2002); “고강도·고유동·저발열 콘크리트용 특수 시멘트”, 한국레미콘공업협회 학술논문집, pp.18-27.
 18. 진정언(2015); “고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 굳기 전과 굳은 후의 물성” 전남대학교, 석사논문집.
 19. 최상원; “국내·외 철강 슬래그의 발생, 재활용 현황 및 친환경적 이용에 대한 연구 동향”
 20. 최성용, 노동현, 김경민, 박상준, 권오봉, 한민철(2007); “미분 시멘트의 치환율 변화가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향”, 한국건축시공학회 2007년 추계 학술발표대회 논문집, 제7권, 제2호, pp.133-136.
 21. 최성우(2011) 외; “고로슬래그 다량 혼합 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 기초물성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, 논문집, 제23권, 제2호.
 22. 한국콘크리트학회(2009); 콘크리트 표준시방서 해설, 18장 매스콘크리트.
 23. 한국콘크리트학회(1997); “콘크리트 혼화재료”, 기문당.
 24. 한국표준협회(2007); KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험 방법.
 25. 한국표준협회(2010); KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험방법.
 26. 한국표준협회(2015); KS F 2414 콘크리트의 블리딩 시험 방법.
 27. 한국표준협회(2006); KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법.
 28. 한국표준협회(2007); KS F 2436 관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험방법.
 29. 한국표준협회(2009); KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그 미분말.
 30. 한국표준협회(2016); KS L 5210 고로 슬래그 시멘트.
 31. 한국표준협회(2016); KS L 5201 포틀랜드 시멘트.
 32. 한민철(2006); “고로슬래그를 사용한 초지연 콘크리트의 응결시간예측”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제22권, 제12호, pp.87-95.

33. 환경부(2014); “철강 슬래그 및 석탄재배출 사업자의 활용 지침” 2014-581호,
34. 한천구(2008); “혼화재 다량 사용한 콘크리트의 성능 향상에 관한 연구”, 한국건설기술연구원 연구보고서.
35. 한천구, 한민철, 김성환(2010); “등가재령 방법에 의한 고로슬래그 미분말 다량치환 콘크리트의 응결시간 예측”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제26권 제4호, pp. 71-78.
36. 황인성, 나운, 이승훈, 류현기, 한천구(2003); “콘크리트의 초기 강도발현에 미치는 혼화제의 영향”, 콘크리트학회 춘계학술발표논문집, 제15권, 1호, pp.741-744.
37. EN 15 167-1(2006); GGBS for direct use in concrete.
38. EN 197-1(2000); Composition, Specifications and conformity criteria for common cements.
39. MIDAS Information Technology Co., Ltd, MIDAS/Gen Ver. 7.4.1 Users Manual.
40. Numata, S(1995).; “Trend in Uses and research works of ground granulated blast furnace slag as replacement of cement for concrete”, Concrete Journal, Vol.33, No.5, pp.15-24.
41. Lee, S.H., Kim, W.K., and Kang, S.H(2012).; “Slag and Concrete Hydration Mechanism of Ground Granulated Blast Furnace Slag”, Korea Concrete Institute, Vol.24, No.6, pp.31-34.
42. Sersale, Riccardo Cioffi, Raffaele Frigione, Giuseppe Zenone, Fortunato(1991); “Relationship between gypsum content, porosity and strength in cement. I. Effect of SO₃ on the physical microstructure of Portland cement mortars,” Cement and Concrete Research, Vol.21, No.1, pp.120-126.
43. Siddique, R. and Bennacer, R(2012).; “Use of iron and steel industry by-product(GGBS) in cement paste and mortar,” Resources Conservation and Recycling, Vol.69, pp.29-34.