

석탄가스화 용융슬래그를 활용한 매스콘크리트 수화열 제어공법

Reduction of hydration heat of mass concrete using coal gasification slag



신세준 Se-Jun Shin
㈜선엔지니어링종합건축사사무소
건설기술연구소 연구원
E-mail : ssj5462@seon.co.kr

1. 서론

최근 미세먼지 등으로 인한 대기오염 문제가 사회적 이슈로 부각되고 있는 가운데, 오염물질 배출을 줄이기 위한 다양한 대책들이 모색되고 있다. 특히, 석탄 화력발전 시 발생하는 미세먼지의 경우는 부정적인 여론이 점차 증가함에 따라 기존 화력발전소와 대비하여 대기오염물질 배출량을 약 20% 수준까지 감축시킬 수 있는 석탄가스화 복합발전(Integrated coal Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC)이 각광받고 있다.

하지만 IGCC에서는 석탄화가 용융되어 슬래그 형태로 배출되는데, 이를 물로 급랭시켜 고체 입자로 생성된 것이 석탄가스화 용융슬래그(Coal Gasification Slag, 이하 CGS)이다. 이렇게 발생된 CGS는 현재까지 적당한 활용방안을 찾지 못해 대부분 발전소 창고에 방치 보관되고 있는 실정이다.

한편, 국내 천연골재의 절대량이 부족해지면서 전국적으로 골재 수요에 비해 공급이 부족한 수요·공급 불균형 현상과 더불어 국내 토목 및 건축구조물이 초고층화 및 대형화에 따라 그에 적합한 매스콘크리트 부재의 적용사례가 증가하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 골재부족 현상과 매스콘크리트 수화열 문제를 해결하고자 선행연구를 통해 얻어진 CGS의 수화열 저감 성능을 기반으로 조강형 프리믹스 시멘트와 조합하여 매스콘크리트 수화열 제어 성능을 검토하고, 향후 매스콘크리트에서의 합리적인 활용방향을 모색하고자 한다.

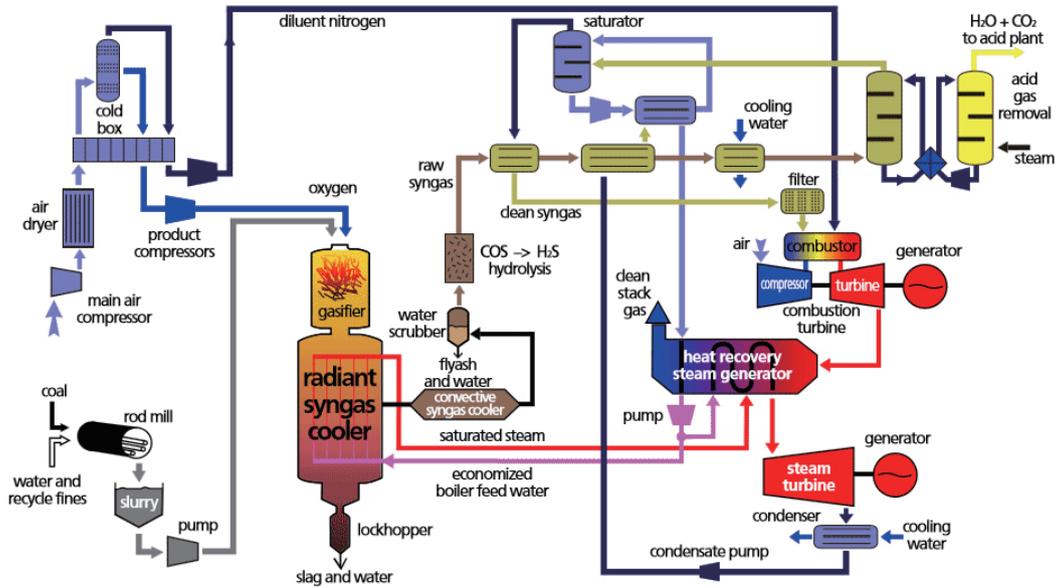


그림 1. 석탄가스화 복합화력발전 개념도

2. 이론적 고찰

2.1 IGCC 시스템

IGCC 시스템은 연료와 탈황제 주입 시스템, 가스화시스템 (Gasifier), 배기가스 정제시스템, 발전시스템(가스터빈, 증기 터빈, Reactor), 폐열회수 시스템 등으로 구성되어 있으며, IGCC에 의한 전체 공정과 다양한 에너지 생산 시스템의 개념도는 <그림 1>과 같다. IGCC에 필요한 공정으로는 석탄 전처리설비, 가스화기, 석탄가스냉각기, 집진장치, 가스정제설비, 산소분리기, 가스터빈, 배열회수(HRSG) 및 증기터빈이 있으며, 일반적으로 가스터빈이 총 출력의 65%, 증기터빈이 35%의 전력을 생산한다.

연료로는 석탄이 가장 활발히 사용되고 있으나, 향후 추가적인 기술개발에 따라 중유, 오리멸전, 잔사유 및 바이오매스 등을 사용할 수 있어 연료의 다양화 가능이라는 장점을 가지고 있다. 그러나 다수의 공정을 통합함에 따라 설비가 복잡하고 투자비가 다소 높다는 단점을 가지고 있다.

2.2 매스콘크리트의 수화열 온도균열

일반적으로 매스콘크리트의 수화열 온도균열은 매스콘크리트 표면부의 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 높게 나타날 때 생기게 되는데, 콘크리트가 수화반응을 일으키면서 매스콘크리트 중앙부의 온도와 표면부의 온도차이로 인해 부재의 팽창이 다르기 때문에 수화열 온도균열을 일으키게 된다.

그러므로 본 연구에서는 문제점을 해결하기 위한 방안으로 시멘트 종류 및 CGS를 잔골재로 활용하여 매스콘크리트에 적용하는 방법을 고안하였는데, 우선 CGS를 잔골재로 활용함에 따라 전체적인 수화열을 저감시키고, 시멘트 종류(저열, 중용열, 혼합, 플라이애시 시멘트, 고로슬래그 시멘트, 보통 포트랜드 시멘트, 준조강, 조강, 초속경 등)를 배합하여 품질의 향상 및 상·하부 콘크리트의 발열차를 최소화하여, 상·하부 콘크리트를 일체화함으로써 공기단축 및 품질향상을 도모하고자 한다. <그림 2>는 프리믹스 시멘트 종류 및 CGS를 잔골재로 활용한 매스콘크리트의 수화열 저감 공법의 온도균열 제어 개념을 나타낸 것으로 기존의 공법과 본 연구개발 공법을 비교 제시하고 있다.

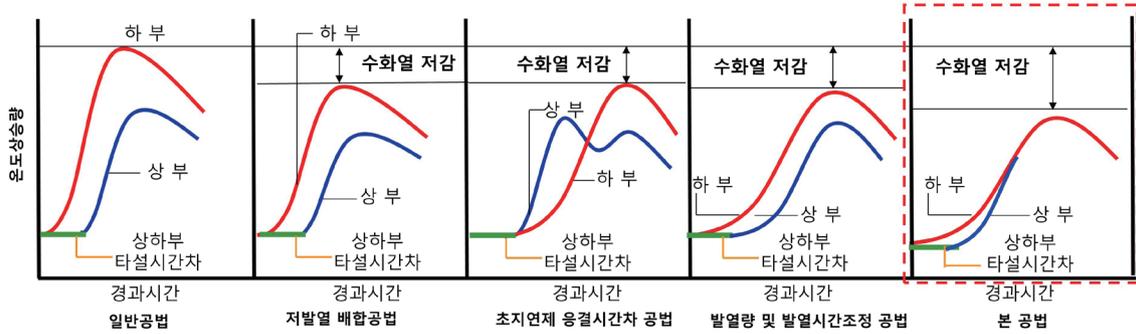


그림 2. 개발 공법의 수화열 조정 개념도

[표 1] 콘크리트 배합사항

Factors		Levels			
Mixture	W/B(%)	3	40	45	50
	Slump(mm)	1	180 ± 25		
	Air contents(%)		4.5 ± 1.5		
	Binder	6	OPC ¹⁾	SESC ²⁾	ESC ³⁾
			FAC ⁴⁾	BFSC ⁵⁾	TBC ⁶⁾
	Coarse aggregates	1	CG ⁷⁾		
	Fine aggregates	2	CS ⁸⁾		
	CGS ⁹⁾				
CGS contents(%)	3	0	25	50	

1) OPC : Ordinary Portland Cement
4) FAC : Fly Ash Cement
7) CG : Crushed Aggregate(Gravel)

2) SESC : Semi-High Early Strength Cement
5) BFSC : Blast Furnace Slag Cement
8) CS : Crushed Fine Aggregate

3) ESC : High Early Strength Cement
6) TBC : Ternary Blended Cement
9) CGS : Coal Gasification Slag

3. 실험계획

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합사항은 [표 1]과 같이 W/B 40, 45, 50%로 3수준에 대하여 결합재 종류 및 잔골재 치환율 변화에 따라 목표 슬럼프 180 ± 25 mm, 목표 공기량 4.5 ± 1.5%를 만족하도록 배합 설계한 후 배합변수에 따른 콘크리트의 영향을 분석하는 것으로 하였다.

이때, 석탄 화력발전소에서 발생된 CGS 1~41회분을 일정량 혼합(물성 평준화)하여 1개의 시료로 만들어 잔골재로 활용하였는데, 잔골재는 양호한 입도의 석산 부순 잔골재(CS)에 CGS의 치환율을 0, 25, 50%로 변화시켜 최적 혼합비율을 도출하고자 하였다.

실험사항으로는 프리믹스 시멘트 종류 및 CGS 치환율에 따른 단열온도상승 특성 분석을 통하여, 국내 건설공사의 분할 타설 및 기존 연구의 발열량차 방법의 고발열 배합 및 저발열 배합을 제시하고, 수화열 발생 시기 및 객관적인 실험 상수값을 도출하고자 한다.

4. 실험결과

[표 2]는 콘크리트 단열온도상승시험 결과 및 제안식을 토대로 최고온도 및 온도상승계수를 도출한 값이다. 먼저, 보통 포틀랜드시멘트(OPC)의 경우 콘크리트 타설 후 103시간에

[표 2] 단열온도상승시험을 통한 k 및 α 값

결합재	CGS 치환율 (%)	$Q = k(1 - e^{-\alpha t})$		
		k	α	R ²
OPC	0	53.7	1.50	0.991
ESC	0	57.3	1.90	0.981
SESC	0	56.1	1.45	0.983
FAC	0	49.2	1.10	0.992
BFSC	0	47.2	0.85	0.992
TBC	0	36.5	0.73	0.987
FAC	25	46.5	1.00	0.991
FAC	50	42.7	0.75	0.980
BFSC	25	40.7	0.85	0.990
BFSC	50	39.3	1.00	0.992
TBC	25	37.0	0.65	0.983
TBC	50	34.9	0.85	0.984

최고온도 53.7℃를 나타냈다. 준조강 시멘트(SESC)는 콘크리트 타설 후 92시간 후에 최고온도 56.0℃로 나타났으며, 3종 조강시멘트(ESC)는 콘크리트 타설 후 73시간 후에 최고온도 57.3℃로 나타났다. 즉, 조강형 시멘트의 경우 ESC > SESC > OPC 순으로 최고온도 57.3℃, 56.0℃, 53.7℃로 나타났다.

플라이애시 시멘트(FAC)의 경우 콘크리트 타설 후 121시간에 최고온도 49.2℃로 조강형 시멘트인 OPC에 비해 -4.5℃의 수화열 저감을 나타냈다. FAC에 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과는 FAC에 CGS 25% 치환 시 콘크리트 타설 후 127시간 후에 최고온도 46.5℃로 나타났으며, CGS 치환율 50%의 경우 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도 42.0℃로 나타났다. 즉, OPC > FAC > FAC CGS 25% > FAC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 49.2℃, 46.5℃, 42.0℃로 나타났으며, OPC와 FAC+CGS 50%의 최고온도 도달시간 차이는 약 18시간으로 나타났다. 수화열 저감 성능은 FAC+CGS 50%가 우수하였으며, 최대 -11.7℃의 수화열 저감 성능을 나타냈다.

고로슬래그 시멘트(BFSC)의 경우 콘크리트 타설 후 128시간에 최고온도 47.2℃로 조강형 시멘트인 OPC에 비해 -6.5℃의 수화열 저감을 나타냈다. BFSC에 CGS 치환율에 따른

단열온도상승시험 결과는 BFSC에 CGS 25% 치환 시 콘크리트 타설 후 128시간 후에 최고온도 40.5℃로 나타났으며, CGS 치환율 50%의 경우 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도 39.3℃로 나타났다. 즉, OPC > BFSC > BFSC+CGS 25% > BFSC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 47.2℃, 40.5℃, 39.3℃로 나타났으며, OPC와 BFSC+CGS 50%의 최고온도 도달시간 차이는 약 34시간으로 나타났다. 하지만, BFSC의 경우 CGS 치환율에 따른 수화열 저감은 근소한 차이를 보였다. BFSC의 수화열 저감 성능은 FAC+CGS 50%는 최대 -11.7℃의 수화열 저감 효과를 보이지만, BFSC+CGS 50%는 -14.4℃로 FAC+CGS 50%보다 -2.7℃ 더 우수한 수화열 저감 효과를 나타냈다.

마지막으로 위와 동일한 요령으로 삼성분계시멘트(TBC)와 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과는 콘크리트 타설 후 128시간에 최고온도 37.0℃로 조강형 시멘트인 OPC에 비해 -16.7℃의 수화열 저감을 나타냈다. TBC에 CGS 치환율에 따른 단열온도상승시험 결과는 TBC에 CGS 25% 치환 시 콘크리트 타설 후 128시간 후에 최고온도 36.5℃로 나타났으며, TBC와 TBC+CGS 25%는 근소한 차이로 나타났다. 하지만, TBC에 CGS 치환율 50%의 경우 콘크리트 타설 후 137시간 후에 최고온도 34.3℃로 나타났다. 즉, OPC > TBC > TBC+CGS 25% > TBC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 37.0℃, 36.5℃, 34.3℃로 나타났다. 또한, TBC의 수화열 저감 성능은 BFSC+CGS 50%는 -14.4℃의 수화열 저감 효과를 보이지만, TBC+CGS 50%는 -5.0℃의 수화열 저감 효과를 나타냈다.

이는 기존 연구에서의 CGS의 수화열 저감과 유사한 경향으로 나타났는데, 수화열 저감 원인은 CGS의 붕소 함유량에 따른 응결지연으로 분석되고 있다. 하지만, 이온용출량, 미소수화열 및 수화반응물 분석 등을 통하여 CGS 잔골재의 수화열 저감에 대한 검증 실험이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 맺음말

프리믹스 시멘트 종류 및 CGS 치환율에 따른 단열온도상승 특성은 조강형 시멘트의 경우 ESC > SESC > OPC 순으로

최고온도 57.3℃, 56.0℃, 53.7℃로 나타났다. 저발열 시멘트 중 플라이애시 시멘트는 FAC > FAC+CGS 25% > FAC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 49.2℃, 46.5℃, 42.0℃로 나타났으며, BFSC의 경우 BFSC > BFSC+CGS 25% > BFSC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 47.2℃, 40.5℃, 39.3℃로 나타났다. TBC의 경우 TBC > TBC+CGS 25% > TBC+CGS 50% 순으로 최고온도 53.7℃, 37.0℃, 36.5℃, 34.3℃로 나타났다. 또한, TBC의 수화열 저감 성능은 BFSC+CGS 50%가 -14.4℃의 수화열 저감으로 가장 우수한 효과를 보였다.

마지막으로 아직 CGS의 실용화까지는 물리적 화학적 분석과 석탄화력발전소에서 배출되는 물성 평준화 문제 등이

남아있어 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 하지만 다양한 연구 및 검증을 통해 산업부산물의 고부가가치화를 이룬다면 경제적, 환경적 효과 또한 매우 클 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 (주)한국서부발전과 (주)선엔지니어링종합건축사사무소의 기술개발사업 및 연구비 지원을 통해(연구명 : 조강형 프리믹스 시멘트와 석탄가스화 용융슬래그 저발열 골재를 조합한 매스콘크리트의 수화열 제어 공법) 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 사단법인 한국콘크리트학회, 매스콘크리트 온도균열제어, 콘크리트
2. 국가환경정보센터, 차세대 석탄가스복합발전(IGCC)기술과 CCS, 한국환경산업기술원, 2016-081호, 2016. 11
3. 김국한, "크리프와 건조수축을 고려한 매스 콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력 해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제4권 3호, 1992
4. 김종, "타설시간차에 의한 고로슬래그 미분말의 치환율별 매스 콘크리트의 온도특성", 대한건축학회 논문집, 제35권 10호, 2019. 10
5. 박경택, 한민철, 현승용, "석탄가스화 용융슬래그를 잔골재로 치환한 콘크리트의 공학적 특성", 한국건설순환자원학회 논문집, 제7권 제3호, 2019. 09
6. 박경택, 한민철, 현승용, "콘크리트용 잔골재로서 석탄가스화 용융슬래그(CG)의 활용성 분석", 한국건설순환자원학회 논문집, 제7권 제2호, 2019. 06
7. 김병관, 이수정, 전철민, 최홍식, "석탄가스화 복합발전 슬래그의 알칼리 활성 시멘트로써의 가능성", 한국건설순환자원학회 논문집, 제27권 제2호, 2018. 03

담당 편집위원 : 한동엽(경상국립대학교)