

고강도 콘크리트의 수화열 저감에 미치는 혼화재 종류 및 대체율의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Admixture Types and Replacement Ratio on Hydration Heat Reduction of High-Strength Concrete

김 무 한*
Kim, Moo-Han

최 세 진**
Choi, Se-Jin

오 시 덕**
Oh, Si-Duk

김 용 로**
Kim, Yong-Ro

이 종 호***
Lee, Jong-Ho

ABSTRACT

The hydration of cement paste occurs when the cement is mixed with water. During the hydration, hydration heat causes the thermal stress depending on the size of concrete and the cement content. Especially in the high-strength concrete, we must give care to the concrete due to its large cement content.

In this study, conduction calorimeter and concrete insulation hydration heat meter were used to investigation the hydration heat characteristics of cement and concrete. To reduce hydration heat of high-strength concrete, several types of replacement of fly-ash and blast-furnace slag powder were used in this experiment.

As a result of this study, it was found that hydration heat of high-strength concrete was reduced by replacement of fly-ash and blast-furnace slag powder. In case of high-strength concrete using blast-furnace slag powder, the max-heat arrival time was delayed but an effect of heat reduction was lower than a case of high-strength concrete using fly-ash, because it was considered that the heat-dependence property of blast-furnace slag powder was higher than that of fly-ash.

키워드 : 고강도콘크리트, 플라이애시, 고로슬래그미분말, 수화열

Keywords : high-strength concrete, fly-ash, blast-furnace slag powder, hydration heat

1. 서 론

콘크리트 타설 후의 경화과정에서 발생하는 수화발열에 의한 온도상승은 강도 발현을 비롯한 콘크리트의 제성질에 영향을 미치게 된다. 이러한 콘크리트의 온도상승은 특히 단위시멘트량이 많은 고강도콘크리트에서 크게 일어나며, 콘크리트 내·외부의 온도차로 인한 온도응력에 의하여 균열이 발생하게 된다. 특히, 최근 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화, 고강도화 추세에 따라 수화열에 의한 균열을 예방하기 위한 각종 기술 및 공법에 많은 관심을 기울이고 있는 상황이다.^{1),2),3)}

따라서, 본 연구는 고강도콘크리트 제조시 높은 단위결합재량을 필요로 하기 때문에 발생할 수 있는 온도상승에 대한 실험적 연구로서, 높은 단위시멘트량을 줄이기 위한 혼화재료로서 플라이애시와 고로슬래그미분말을 사용하여,

혼화재 종류 및 대체율에 따른 고강도콘크리트의 수화열 억제효과를 비교·검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 실험의 실험계획 및 배합은 표 1에 나타난 바와 같이, 고강도콘크리트의 수화열 저감에 미치는 혼화재 종류 및 대체율의 영향을 관해 비교·검토하기 위하여, 예비실험을 통하여 물결합재비는 30.5%, 단위수량은 171kg/m^3 로 설정하였으며, 시멘트 중량에 대한 플라이애시 대체율은 15, 30, 45%, 고로슬래그미분말 대체율은 30, 45, 60%의 각각 3수준으로 설정하였다. 고성능감수제 첨가량은 고성능감수제의 영향을 배제하기 위하여 1.6%로 동일 첨가하였다.

측정항목은 굳지않은 콘크리트의 경우 비빔직후의 공기량 및 슬럼프-플로우 시험을 실시하였으며, 플라이애시 및 고로슬래그미분말 대체율에 따른 고강도콘크리트의 수화열 억제효과를 검토하기 위해서 미소수화열분석과 간이단열은

* 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수·공박

** 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

*** 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

표 1. 실험계획 및 배합

구분	W/B ¹⁾ (%)	혼화재 대체율 (%)	잔골 재율 (%)	단 위 수 량 (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³) ²⁾					측정항목
					C	FA	BFS	S	G	
Plain	30.5	0	43	171	560	-	-	705	943	1. 공기량, 슬럼프-플로우 2. 미소수화열분석 (~72시간) 3. 간이단열온도상승시험 (~7일) 4. 압축강도 (7, 28일) 5. 코아 압축강도 (7, 28일)
FA15		15			476	84	-	691	923	
FA30		30			392	168	-	677	904	
FA45		45			308	252	-	662	886	
BFS30		30			392	-	168	702	938	
BFS45		45			308	-	252	701	936	
BFS60		60			224	-	336	700	933	

※ 1) W/B : 물결합재비, 2) C : 시멘트, FA : 플라이애시, BFS : 고로슬래그미분말, S : 잔골재, G : 굵은골재

표 2. 사용재료의 물리적 성질

사용재료	물리적 성질
시멘트	I종 보통포틀랜드시멘트 ·비중 : 3.15 ·분말도 : 3,630cm ² /g
혼화재	FA ·비중 : 2.12 ·분말도 : 2,976cm ² /g
	BFS ·비중 : 2.99 ·분말도 : 4,379cm ² /g
고성능감수제	·나프탈렌계 ·비중 : 1.19
잔골재	·제염사 ·최대치수 : 5mm ·비중 : 2.60 ·조립율 : 3.04
굵은골재	·부순자갈 ·최대치수 : 20mm ·비중 : 2.62 ·조립율 : 6.02

도상승시험을 실시하였다. 또한, 경화콘크리트의 경우 압축강도 발현성상을 분석·검토하기 위해 재령 7, 28일에서 압축강도를 측정하였으며, 표준공시체와의 비교를 위한 코아공시체의 압축강도를 재령 7, 28일에 측정하였다.

2.2 사용재료 및 비빔방법

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 표 2와 같이 시멘트는 I종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 혼화재는 분말도 2,976cm²/g의 플라이애시와 분말도 4,379cm²/g의 고로슬래그미분말을 사용하였다. 또한, 고성능감수제는 나프탈렌계를 사용하였으며, 골재로서 잔골재는 조립율 3.04의 제염사, 굵은골재는 최대치수 20mm, 조립율 6.02의 부순자갈을 사용하였다.

콘크리트의 비빔방법은 그림 1에서 보는 바와 같이 혼화재, 시멘트, 잔골재를 먼저 건비빔 한 후, 물, 굵은골재 및 고성능감수제를 투입하는 분할투입방식을 실시하였으며, 비빔시간은 총 210초가 소요되었다.

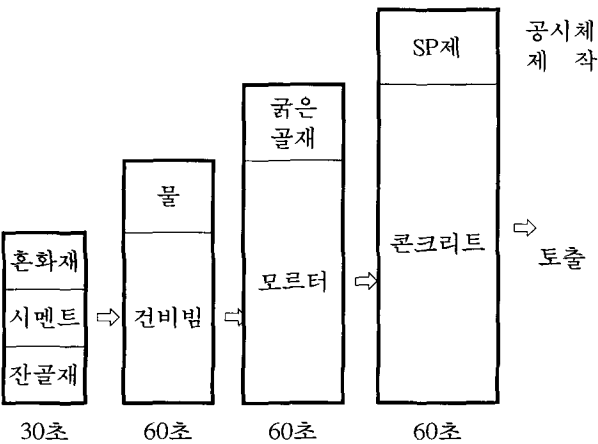


그림 1. 콘크리트의 비빔방법

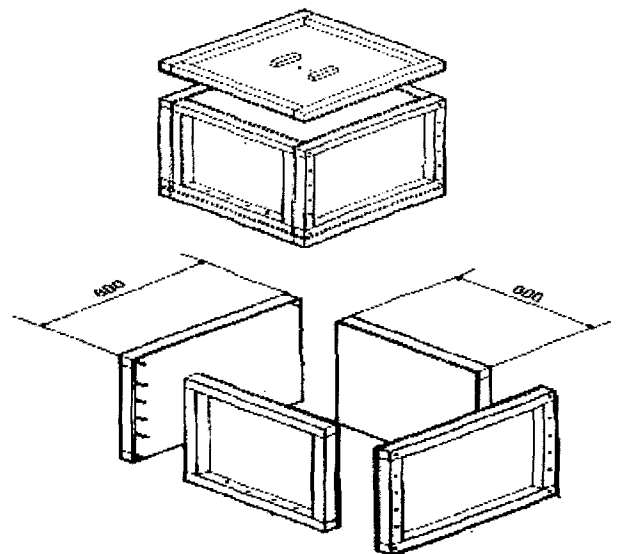


그림 2. 간이단열온도상승 측정용 거푸집

표 3. 굳지않은 성상 및 미소수화열량 측정결과

구 분	비빔온도 (°C)	SP제 첨가율 (%)	공 기 량 (%)	슬 럽 프 플 로 우 (cm)	발열속도		발열량	
					Max. (cal/g/h)	저감율 (%)	Max. (cal/g)	저감율 (%)
Plain	26	1.6	5.2	62.0	2.97	-	64.8	-
FA15	26		5.5	66.5	2.46	17.2	55.3	14.7
FA30	25		4.4	70.0	2.07	30.3	46.8	27.8
FA45	26		3.8	72.0	1.62	45.5	38.8	59.9
BFS30	26		4.5	63.5	2.33	21.5	53.7	17.1
BFS45	26		4.3	67.5	1.98	33.3	48.5	25.2
BFS60	26		4.2	71.0	1.71	42.4	42.7	34.1

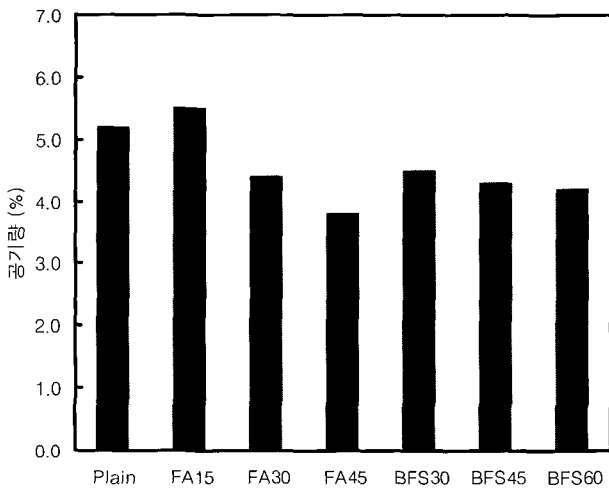


그림 3. 혼화제 종류 및 대체율에 따른 공기량의 변화

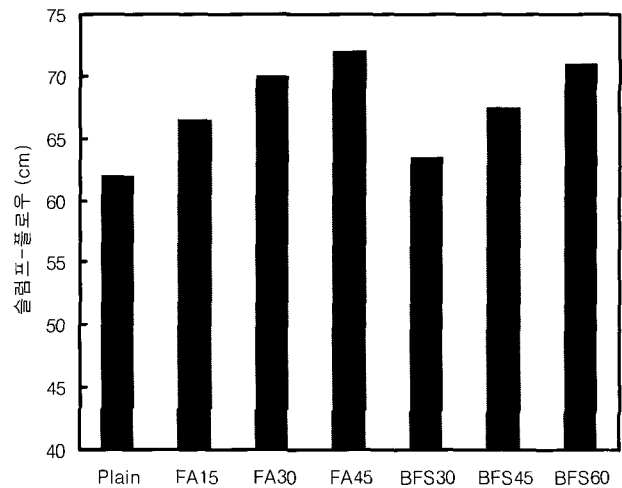


그림 4. 혼화제 종류 및 대체율에 따른 슬럼프-플로우의 변화

2.3 시험방법

1) 미소수화열분석

혼화제 종류별 경과시간에 따른 수화발열 특성을 파악하기 위하여, 혼화제 대체율별로 물결합재비를 50%로 설정하여 20°C의 환경조건에서 72시간 동안의 경과시간에 따른 수화발열량을 미소수화열량계를 이용하여 측정하였다.

2) 간이단열온도상승 시험방법

간이단열온도상승 시험은 그림 2와 같은 단열재로 단열을 실시한 용량 64 l (40×40×40cm)의 거푸집을 제작하여 비빔 직후에 콘크리트를 타설한 후, 고강도콘크리트의 수화반응에 의한 수화반응열을 측정하기 위해 열전자쌍인열전대(Thermocouple)를 콘크리트의 중앙부에 정착하여 Maturity meter로써 콘크리트 내부의 온도변화를 측정하였다.

3. 실험결과 분석 및 검토

표 3은 혼화제 종류 및 대체율에 따른 콘크리트의 굳지않은 성상 및 미소수화열량의 측정결과를 나타낸 것이다.

3.1 굳지않은 콘크리트의 측정결과 분석 및 검토

그림 3은 혼화제 종류 및 대체율에 따른 굳지않은 콘크리트의 공기량 변화를 나타낸 것으로서, 3.8~5.5%의 수준으로 나타났으며, FA 및 BFS 대체율이 증가할수록 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 그림 4는 혼화제 종류 및 대체율에 따른 콘크리트의 슬럼프-플로우 변화를 나타낸 것으로 62~72cm 수준으로 나타났다.

3.2 온도상승시험 결과 분석 및 검토

1) 소수화열량

그림 5는 혼화제 종류 및 대체율에 따른 미소수화발열속도를 나타낸 것으로서, 시멘트의 수화반응은 발열반응으로 4시간 이후 시멘트 수화발열속도가 급속히 증가하여 12시간 전후로 최고발열속도를 나타내고 있다. Plain의 경우 최고발열속도가 2.97cal/g/h로 나타났으며, FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 발열속도가 저감됨을 알 수 있으며, Plain에 비해 FA 및 BFS의 대체에 의한 수화발열속도의 저감율은 FA45의 경우 45.5%, BFS60의 경우 42.4%로 나타났다.

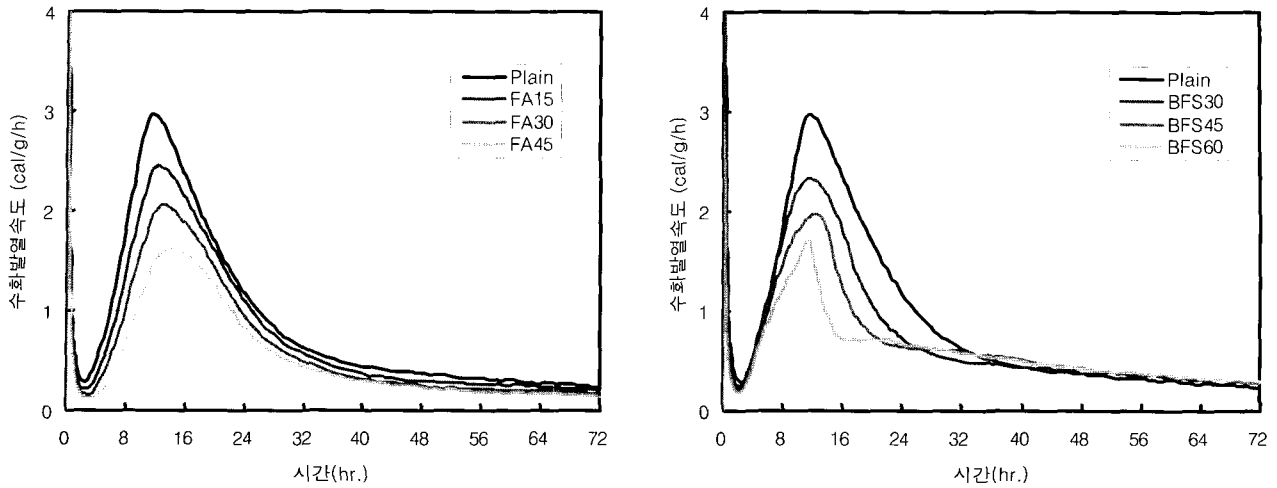


그림 5. 혼화재 종류 및 대체율에 따른 미소수화발열속도

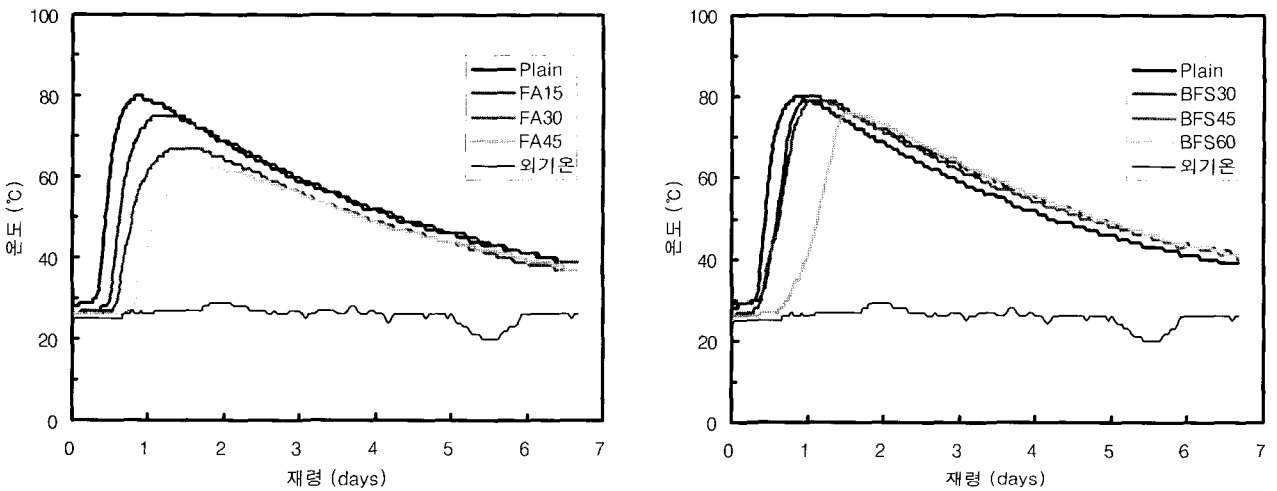


그림 6. 혼화재 종류 및 대체율에 따른 간이단열온도 시험체의 온도변화

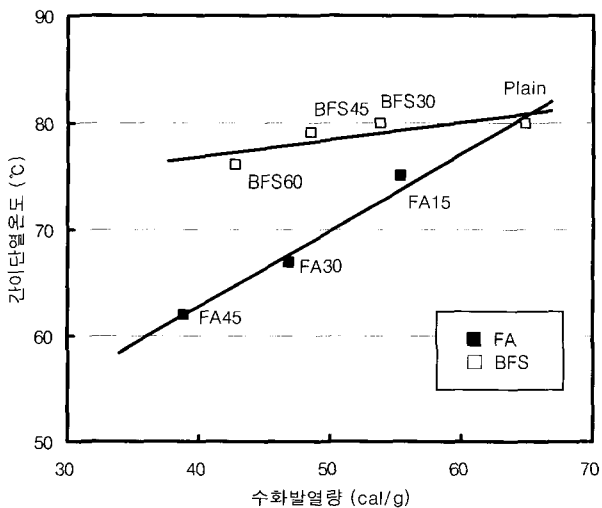


그림 7. 수화발열량과 최고단열온도와의 관계

또한, 혼화재 종류 및 대체율별 72시간 경과 후의 미소수화발열량은 Plain의 경우 64.8cal/g으로 나타났으며, FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 수화발열량이 감소하는 것을 알 수 있다. 혼화재 종류별로 살펴보면 FA의 경우 FA15, FA30, FA45로 대체율이 증가함에 따라 각각 55.3, 46.8, 38.8cal/g으로서 낮은 수화발열량을 보이고 있으며, BFS의 경우도 BFS30, BFS45, BFS60으로 대체율이 증가함에 따라 각각 53.7, 48.5, 42.7cal/g으로서 수화발열량이 낮아지고 있다.

따라서 미소수화발열속도 및 미소수화발열량은 FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 결합재 중의 시멘트량 감소에 기인한 것으로 사료된다.

2) 간이단열온도상승시험

그림 6은 혼화재 종류 및 대체율에 따른 간이단열온도 시험체의 온도이력을 나타낸 것으로 FA 및 BFS 대체율이 증가할수록 최고온도가 낮아지고, 최고온도 도달시간도 지연되는 것을 알 수 있다.

배합별로 살펴보면 Plain의 경우 최고온도는 80℃로 나타났으며, FA의 경우 FA15가 75℃, FA30이 67℃, FA45가 62℃로서 Plain에 비해 FA 대체율이 증가함에 따라 5~35℃ 온도저감 효과가 나타났다. 그러나, BFS의 경우 대체율별 최대온도는 BFS30이 80℃, BFS45가 79℃, BFS60이 76℃로서 대체율에 관계없이 Plain과 유사한 수준의 최고온도를 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, 최고온도 도달시간을 살펴보면 Plain은 20시간, FA의 경우 FA15, FA30 및 FA45는 각각 25.5시간, 30.5시간 및 42.5시간으로 FA의 대체율이 증가할수록 최고온도 도달 시간이 지연되고 있으며, BFS의 경우도 BFS30, BFS45, BFS60은 각각 22.5시간, 24시간 및 35.5시간으로 BFS의 대체율이 증가할수록 최고온도 도달시간이 지연되고 있음을 알 수 있다.

또한, 콘크리트의 온도이력곡선에서 발열이 급격히 직선적으로 상승하는 시점에서 최고온도까지의 온도차를 시간으로 나눈 값인 온도상승속도의 경우 Plain은 4.00℃/h로 나타났으며, FA15는 3.33℃/h, FA30은 2.31℃/h, FA45는 1.41℃/h로 FA 대체율이 증가할수록 최고온도에 도달하는 온도상승속도도 지연되는 것으로 나타났으며, BFS의 경우에 있어서도 BFS30은 3.13℃/h, BFS45는 3.38℃/h, BFS60은 2.56℃/h로 BFS 대체율이 증가할수록 온도상승속도가 지연되는 것으로 나타났으나, FA 대체의 경우에 비하여 그 효과는 적은 것으로 나타났다.

3) 미소수화발열량과 간이단열온도와의 관계

그림 7은 미소수화발열량과 간이단열온도시험의 최고단열온도의 관계를 나타낸 것으로 FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 미소수화발열량 및 최고단열온도가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 특히 FA의 경우 미소수화발열량이 증가할수록 단열온도가 급속하게 증가하는 것으로 나타났으나 BFS의 경우에는 다소 완만하게 증가하고 있다. 이는 BFS의 경우 온도의존성이 FA에 비해 크기 때문에 주변온도가 높을수록 수화반응이 보다 활발하게 이루어져 단열조건하에서 실험할 경우 시료내부에서 발생한 수화열에 의해 온도가 상승하게 되고, 이것이 수화반응을 촉진시켜 결과적으로 간이단열온도가 크게 나타나는 결과를 가져온 것으로 사료된다.⁶⁾

3.3 압축강도

그림 8은 표준공시체와 간이단열온도시험체에서 채취한 코아공시체의 재령 7일 및 28일의 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 표준공시체의 경우 FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 압축강도가 상대적으로 감소하고 있으며, 재령 7일 및 28일에서의 혼화재 대체율에 따른 압축강도를 비교해 보면 FA에 비하여 BFS의 압축강도가 높게 발현되고 있다.

또한, 재령 7일에서의 코아공시체의 압축강도를 살펴보면 표준공시체보다 높은 압축강도를 발현하고 있는데, 이는 초기의 높은 수화열로 양생온도가 높아졌기 때문으로 판단되며, 재령 28일의 경우에는 표준공시체의 압축강도와 유사한 수준으로 나타났다.

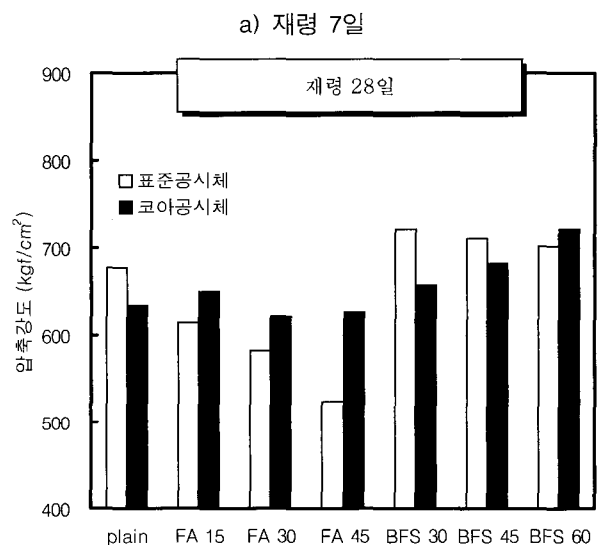
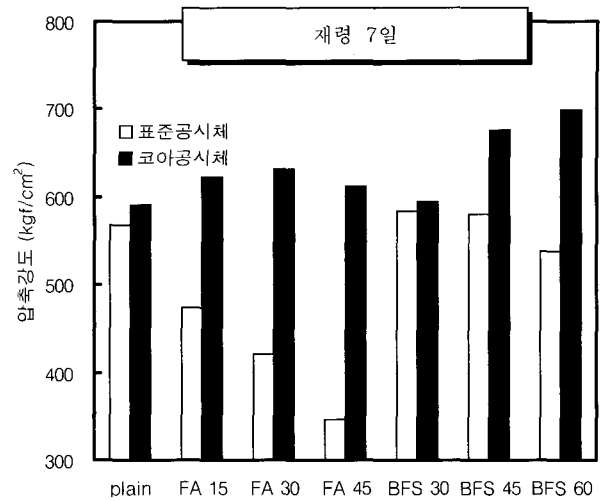


그림 8. 표준공시체와 코아공시체의 압축강도 관계

4 결론

플라이애시 및 고로슬래그미분말의 대체율에 따른 고강도콘크리트의 수화열 저감에 미치는 혼화재 종류 및 대체율의 영향을 검토·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미소수화열분석 및 간이단열온도상승시험 결과 FA 및 BFS를 대체함으로써 수화열 저감 효과를 가져올 수 있었다.
- 2) 고로슬래그미분말의 경우 최고온도도달시간의 지연효과를 얻을 수 있었지만 온도저감효과는 플라이애시에 비

해 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그미분말의 경우 온도의존성이 플라이애시에 비해 크기 때문에 주변온도가 높을수록 수화반응이 보다 활발하게 이루어져 단열조건하에서 실험할 경우 시료내부에서 발생한 수화열에 의해 온도가 상승하게 되고, 이것이 수화반응을 촉진시켜 결과적으로 간이단열온도상승이 커지는 결과를 가져온 것으로 사료된다.

- 3) 미소수화발열량과 간이단열온도의 경우 FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 미소수화발열량 및 최고단열온도가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 특히 FA의 경우 미소수화발열량이 증가할수록 단열온도가 급속하게 증가하는 것으로 나타났으나 BFS의 경우에는 다소 완만하게 증가하고 있다.
- 4) 표준공시체의 경우 FA 및 BFS의 대체율이 증가할수록 압축강도가 상대적으로 감소하고 있으며, FA에 비하여 BFS의 압축강도가 높게 발현되고 있다. 또한 재령 7일에서의 코아공시체의 압축강도를 살펴보면 표준공시체보다 높은 압축강도를 발현하고 있으며, 재령 28일의 경우에는 표준공시체의 압축강도와 유사한 수준으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 대한주택공사의 연구과제의 일부임을 밝히며, 본 연구를 위해 협조해주신 대한주택공사 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김무한 외 ; 플라이애시를 사용한 저발열 콘크리트의 현장적용 및 품질관리, 한국레미콘공업협회 레미콘지 통권 제58호, 1991.1, pp.57~64
2. 김진근 외 ; 온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구, 콘크리트학회논문집 제7권 6호, 1995.12, pp.176~185
3. 정상진 외 ; 매스콘크리트의 수화열이 압축강도특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한건축학회학술발표논문집 제18권 제1호, 1998.4, pp.889~894
4. 김상철 외 ; 혼합형 저발열 시멘트의 특성과 콘크리트 기초 물성에 관한 연구, 콘크리트학회지 제10권 5호, 1998.10, pp.177~187
5. 한천구 외, 양생온도변화에 따른 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도증진 성상, 한국콘크리트학회가을학술발표논문집, 제11권 2호, 2000. 11, pp.163~166
6. 国府勝郎ほか ; 高炉スラグ微分末の用いたコクリートの断熱温度上昇, 日本土木学会 高炉スラグ微分末の用いたコクリートの適用の関するシンポジウム, 1987.3, pp.51~58
7. 黒羽建嗣ほか ; 高強度コンクリートの水和発熱による温度上昇がセメントの水和と強度発現に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14 No.1, 1992, pp.457~462
8. 長滝重義 ; 高強度コンクリートの諸性質, コンクリート工学, Vol.14, No.3, pp.38~41, 1976. 3.
9. 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5 鉄筋コンクリート工事)-高強度コンクリート一, pp.422~450, 1997.
10. 近藤時夫 ; 高強度コンクリート諸性状に関する研究, 土木学会論文報告集, 第236号, pp.121~134, 1977. 1.
11. 土木学会 ; コンクリートライブラリ第47号, 高強度コンクリート設計施工指針(案), 資料2 設計計算関する資料, pp.61~44, 1980. 4.
12. 立部正則・田中伸幸・今井 実 ; 超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究(その3) ` 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.269~270, 1988. 10.
13. 小柳 哈 ; コンクリートの高強度化とその限界, コンクリート工学, Vol.14, No.3, pp. 3~8, 1976. 3.
14. 友史沢紀・岸谷孝一・福土 勳・阿部道彦・橋爪 進 ; 高強度コンクリート用高性能減水剤の品質基準および使用規準作成に関する研究(その1~その2) ` 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.657~660, 1988. 10.
15. 谷川恭雄・森 博嗣・渡辺健治・三輪正保 ; 高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する研究, 第 12回コンクリート工学年次論文報告集, 第 12巻第 1号, pp.275~280, 1990.
16. Fafitis and Shah ; Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Publ, ACI, Vol,sp-87, pp.213~232, 1985.
17. S.P.Shah, "High Strength Concrete Workshop", Proceedings of a Workshop held at the University of Illinois, Chicago, 1979.
18. Ail R. Khaloo and Shuaib H. Ahmad ; Behavior of High-Strength Concrete under Torsional Triaxial Compression, ACI Materials Journal, Vol.86, No.6, pp.550~558, November-December, 1989.