

壓縮強度 2300kgf/cm²의 超高強度콘크리트의 開發에 關한 實驗的 研究

-제 1보, 실험계획 및 예비실험을 중심으로-

An Experimental Study on Manufacturing Ultra-High Strength Concrete of 2300kgf/cm² Compressive Strength

-Part 1, The Experimental Program and Preliminary Experiment-

○ 최 희 용* 김 규 용* 김 진 만** 김 무 한***
Choi, Hee Yong Kim, Gyu Yong Kim, Jin Man Kim, Moo Han

ABSTRACT

To reduce the size of structural members, high strength concrete has recently been utilized for structure such as ultra-high-rise buildings and prestressed concrete bridges in North America, and its compressive strength has gone up to 1300kgf/cm². In Japan, research on high-strength concrete has been undertaken on a large scale by the national enterprise so-called New RC Project, and this Project purposed to develop the design compressive strength of 1200kgf/cm².

Considering these circumstance, the aim of this experimental study is to develop ultra-high-strength concrete with compressive strength over 2300kgf/cm² with domestic current materials. There are so many factors which influence on manufacturing of ultra-high-strength concrete.

The experimental factors selected in this study are mixing methods, curing methods, water-binder ratio, maximum size of coarse aggregate, and the replacement proportion of cement by silica fume. The results of this experimental study show that it is possible to develop the ultra-high-strength concrete with compressive strength over 2300kgf/cm².

1. 서 론

콘크리트 배합기술의 개발, 시멘트를 비롯한 각종 결합재의 개선, 고성능감수제의 개발 및 품질개선에 따라 콘크리트가 발휘할 수 있는 강도의 수준이 계속 증가하고 있다.

본 연구는 압축강도 2300kgf/cm²의 초고강도 콘크리트를 제조하기 위한 실험적 연구로서 실험의 진행과정은 그림1과 같으며, 본보는 제1보로서 실험계획과 예비실험의 결과를 고찰한 것이다.

2. 초고강도콘크리트의 제조를 위한 예비 실험

2.1 골재 종류 및 양생온도의 영향에 관한 실험

2.1.1 실험계획 및 방법

골재는 콘크리트 용적의 약 65~75%를 차지하며, 콘크리트의 강도에 영향을 주는 중요한 요인이다. 일반적으로 골재의 표면이 거칠고, 조골재의 입자가 작아지면 골재와 시멘트 페이스트의 결합면적이 증가하기 때문에 콘크리트 내부에서 가장 취약한 부분인 시멘트 페이스트와 골재사이의 계면의 강도를 증가시키게 되어 전반적인 콘크리트의 강도증진을 도모할 수 있게 된다.

* 正會員, 忠南大 大學院 (碩士課程)

** 正會員, 忠南大 大學院 (博士課程)

*** 正會員, 忠南大 教授 工·博

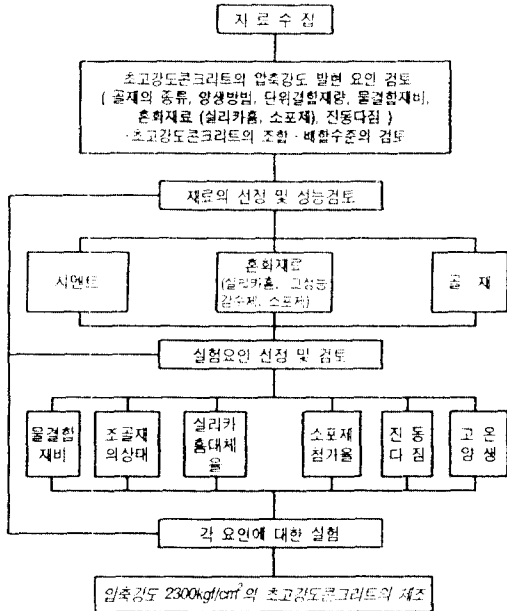


그림1 초고강도콘크리트 개발을 위한 실험추진 계획

또한, 콘크리트가 본질적으로 가지고 있는 강도를 잘 발휘하기 위해서는 콘크리트의 제조 후 적절한 양생을 하여야 한다. 일반적으로 고압의 고온고압양생과 고온증기양생은 콘크리트 초기의 수화반응을 촉진시켜 단시간에 장기의 강도를 얻기위한 방안으로 사용되고 있다.

본 제1차 예비실험은 골재의 종류와 양생방법에 따른 초고강도 콘크리트의 강도발현 특성을 알아보기 위한 것으로 골재의 종류를 ①쇄사

2.5mm 이하, ②제염사 1.2mm 이하, ③제염사 5mm이하 + 쇄석 10mm의 3종류를 선정하였으며, 양생방법은 40℃수중양생과 80℃의 고온수중양생은 선정하여 실험을 행하였으며, 콘크리트의 시험항목은 재령 3일 압축강도로 하였다.

콘크리트의 공시체의 제조는 명산한 다짐을 하기 위하여 붓다짐과 진동다짐을 병행하여 실시하였다.

2.1.2 실험결과 및 고찰

골재의 종류 및 양생온도의 영향에 관한 실험결과를 나타낸 표1 및 그림2에서 알 수 있는 바와같이 제염사 1.2mm 이하와 쇄사 2.5

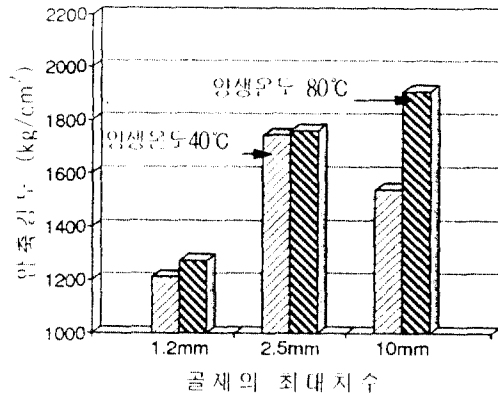


그림2 골재의 종류 및 양생방법에 따른 재령 3일 압축강도의 변화

표 1. 실험계획 및 압축강도의 시험결과

골재의 종류	W/B	S·F의 대체율 (%)	단위 수량 (kg/m³)	SP제 첨가율 (%)	절대용적 (t/m³)				단위중량 (kg/m³)				압축강도 (kg/cm²)	
					C	SF	S	G	C	SF	S	G	40℃ 양생 3일	80℃ 양생 3일
제염사 1.2mm 이하	0.18	15	214	3.5	324	81	395	-	1008	178	1015	-	1212	1273
쇄사 2.5mm 이하			214	3.5	324	81	395	-	1008	178	1023	-	1745	1760
제염사 5mm 이하 + 쇄석 10mm 이하			135	3.5	205	51	233	380	638	112	604	986	1540	1908

mm 이하를 사용한 경우를 비교하면, 제염사 1.2mm 이하를 사용한 경우보다 쇄사 2.5mm 이하를 사용한 경우가 양생온도에 관계없이 약 500kgf/cm² 정도 더 높은 압축강도를 발현하고 있다. 이는 제염사보다는 쇄사의 입형이 더 거칠어 골재와 시멘트페이스트간의 부착강도가 증진되어 나타난 결과로 사료된다.

또한, 쇄사 2.5mm 이하를 사용한 콘크리트와 제염사 5mm이하+쇄석 10mm를 사용한 콘크리트의 비교에서는 쇄사 2.5mm의 경우가 40℃수중에서는 높은 압축강도를 발현하고 있으나, 양생온도 80℃에서는 오히려 낮은 압축강도를 발현하고 있다.

이와같이 골재의 종류에 따라서는 쇄석을 사용하는 것이 콘크리트의 압축강도의 발현에 유리한 것으로 나타나고 있으나, 쇄석의 크기에 따른 영향은 명확히 나타나지 않고 있다.

양생조건에 따른 영향을 살펴보면, 전반적으로 양생온도 80℃의 경우가 높은 압축강도를 발현하고 있으며, 특히 제염사 5mm 이하+쇄석 10mm이하의 골재를 사용하였을 경우에는 380kgf/cm²의 매우 많은 차이를 보이고 있다.

본 실험의 측정 재령이 3일에 한정되어 양생방법에 따른 영향을 정확히 검토하기는 어려우나 초기에 초고강도화를 달성하기 위해서는 양생온도 80℃를 적용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

으로 사료된다.

2.2 골재의 크기 및 양생방법의 영향에 관한 실험

2.2.1 실험계획 및 방법

제2차 예비실험은 제1차 예비실험결과 쇄석의 크기에 따른 영향요인을 좀 더 명확히 하고 양생방법에서 건조에 따른 영향요인을 검토하기 위한 것으로서 표2에서 알 수 있는 바와같이 골재의 크기를 4가지 종류로 세분화하고, 양생방법은 80℃ 고온수중양생과 80℃ 고온수중양생후 100℃ 爐乾燥의 2종류로 구분하여 실험을 행하였다.

2.2.2 실험결과 및 고찰

조·세골재의 종류에 따른 영향을 살펴보면 시험결과를 나타낸 표 2 및 그림 3 에서 알 수 있는 바와같이 재령 3일에는 조골재의 크기가 작아질수록 높은 압축강도를 발현하였으나, 재령 7일에서는 조골재의 크기에 관계없이 동일한 수준의 강도를 발현하고 있다.

또한 콘크리트 조합에 있어서는 재령의 증가에 따라 압축강도도 증가하는 경향을 보이고 있으나, 모르타르 조합의 경우에는 재령이 증가에 따른 압축강도의 증가는 없는 것으로 나타나고 있다.

양생방법에 따른 압축강도의 변화를 살펴

표 2. 실험계획 및 압축강도 시험결과

조합의 구분		W/B	SP제 첨가율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	절대용적 (ℓ/m ³)				단위중량 (kg/m ³)				3일 압축강도 (kg/cm ²)		7일 압축강도 (kg/cm ²)	
					C	SF	S	G	C	SF	S	G	A	B	A	B
제염사 1.2mm이하 + 쇄사 2.5mm이하	모르타르	0.18	3.5%	214	324	81	395	-	1008	178	1019	-	1799	-	1748	1630
	콘크리트			135	205	51	614	-	638	112	1590	-	1772	-	1835	1887
제염사 5mm이하 + 쇄석 2.5~5mm	콘크리트			135	205	51	233	381	638	112	599	987	1736	-	1801	1925
쇄사 5mm이하 + 쇄석 10mm	콘크리트			135	205	51	233	381	638	112	603	987	1640	-	1887	1659

A:80℃고온수중양생, B:80℃고온수중양생 후1일 100℃노건조

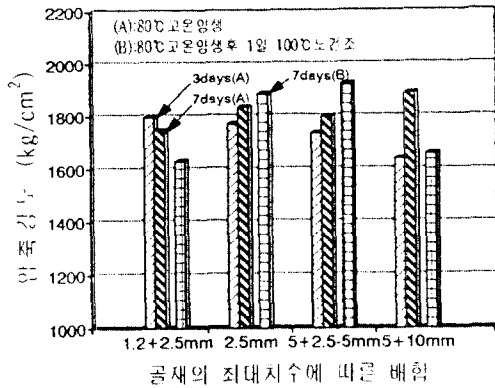


그림3 골재의 크기 및 양생방법에 따른 압축강도의 변화

면, 80°C에서 계속적으로 양생한 경우와 80°C 양생후 100°C 爐乾燥한 경우에 일관된 경향은 없는 것으로 나타나고 있다.

본 실험의 경우 최고의 압축강도를 발현하고 있는 조합은 제염사 5mm 이하와 쇄석 2.5~5 mm를 함께 사용한 경우로서 재령 7일에 1925kgf/cm²의 초고강도를 발현하고 있다.

골재의 크기 및 양생방법에 관한 실험결과를 종합하면, 골재의 크기는 5mm 이하로 하고, 골재의 종류는 쇄석으로 하는 것이 좀 더 높은 초고강도를 발현할 수 있을 것으로 사료된다.

2.3 단위결합재량의 영향에 관한 실험

2.3.1 실험계획 및 방법

본 실험은 결합재의 양을 변화시켜 초고강도

를 발현하기 위한 최적의 단위결합재량의 수준을 검토하기 위한 것으로, 실험계획은 표3에서 알 수 있는 바와같이 단위결합재량을 900~1100kg/m³ 사이에서 3수준을 설정하여 실험을 행하였다.

단위결합재량을 900~1100kg/m³ 사이에서 변화시킨 이유는 이전의 예비실험 결과에서 채택한 단위결합재량은 750~1200kg/m³ 정도인데, 결합재량이 750kg/m³ 정도의 조합에서는 콘크리트의 분체량이 적어 붕마이크로에 의한 다짐효과가 나타나지 않았으며, 단위결합재량 1200kg/m³ 정도의 배합은 페이스트의 유동성 및 다짐성능은 좋았으나, 결합재량 750kg/m³과 비교하여 압축강도의 발현이 낮게 나타나고 있어, 최적의 결합재량은 결합재량 750~1200kg/m³ 사이에 존재할 것으로 판단하였기 때문이다.

2.3.2 실험결과 및 고찰

단위결합재량의 영향에 관한 실험결과를 나타낸 표3 및 그림4에서 알 수 있는 바와같이 단위결합재량 900kg/m³과 1000kg/m³에서 2200~2400kgf/cm²의 높은 압축강도를 발현하고 있어 초고강도를 발현하기 위한 단위결합재량의 수준은 900~1000kg/m³ 수준일 것으로 사료된다.

재령에 따른 영향을 살펴보면, 단위결합재량 1000kg/m³ 및 1100 kg/m³의 콘크리트의 압축강도는 재령이 증가할수록 압축강도는 저하하는 경향을 보이고 있으며, 단위결합재량

표 3. 실험계획 및 압축강도 시험결과

단위결합재량 (kg/m ³)	물결합재 비	단 위 수 량 (kg/m ³)	SP제 첨가량 (%)	절대용적 (ℓ/m ³)			단위중량 (kg/m ³)			3일 압축강도 (kg/cm ²)		7일 압축강도 (kg/cm ²)	
				C	SF	S	C	SF	S				
900	0.18	162	4.0	217	102	539	675	225	1396	2273	2136	2357	2229
1000		180	4.0	241	114	488	750	250	1264	2259	2240	2164	1960
1100		198	4.0	265	125	438	824	275	1134	2049	1879	1904	1905

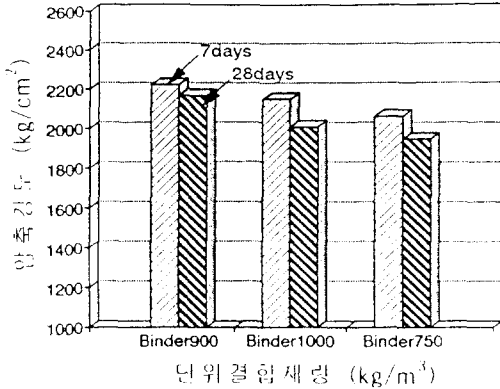


그림4 단위결합재량에 따른 압축강도의 변화

1000/m³의 콘크리트에서도 재령에 따른 강도의 증가는 거의 나타나지 않고 있는데 이러한 경향은 앞선 예비시험의 결과에서도 나타난 현상이므로 아직까지 이에 관한 원인은 명확하지 않으며, 좀 더 광범위하고 미시적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 실험에서 단위결합재량 900kg/m³의 공시체중 1개에서 목표강도인 2300kgf/cm²을 상회한 2357kgf/cm²의 초고강도 콘크리트를 제조하였으나 시험체의 편차가 심하여 평균강도는 목표치에 도달하지 못하였다.

2.4 물결합재비의 영향에 관한 실험

2.4.1 실험계획 및 방법

콘크리트의 강도에 가장 많은 영향을 주는 것은 물결합재비이다. 그러므로 제4차 예비실험

에서는 초고강도콘크리트의 제조에 가장 적합한 물결합재비의 수준을 알아 보고자 하였다.

실험계획을 나타낸 표4에서 알 수 있는 바와같이 물결합재비의 수준은 앞의 예비실험에서 채용한 0.18에서 0.02씩 감소시킨 4수준을 설정하였고, 단위결합재량은 제3차 예비실험에서 단위결합재량 900kg/m³에서 가장 높은 강도를 발휘하였으나, 물결합재비의 저하에 따른 수량의 감소를 고려하여 1000kg/m³을 선정하였다.

2.4.2 실험결과 및 고찰

실험결과를 나타낸 표4 및 그림5에서 알 수 있는 바와같이 고성능감수제 첨가율의 변화는 물결합재비가 낮아질수록 고성능감수제의 첨가율은 급속히 증가하는 것으로 나타나고 있고, 특히 물결합재비 0.14에서 0.12사이의 증가율이 큰 것으로 나타났다.

또한 물결합재비의 감소에 따라 콘크리트의 점성은 크게 증가하고 유동성이 저하하여 붐바이브레이터에 의한 진동다짐이 매우 어려웠다.

물결합재비에 따른 압축강도의 변화를 살펴보면, 물결합재비 0.14에서 재령 4일에 평균압축강도 2235kgf/cm²를 발휘하여 가장 높은 압축강도를 발휘하고 있다.

또한, 물결합재비 0.16의 경우 2개의 공시체간의 강도 차이가 약 400kgf/cm² 이상을 보이

표 4. 실험계획 및 압축강도 시험결과

물결합재비	골재의 최대입경	SP제 첨가율 (%)	단위수량 (kg/m³)	절대용적 (ℓ/m³)			단위중량 (kg/m³)			4일 압축강도 (kg/cm²)	
				C	SF	S	C	SF	S		
0.18	쇄사 2.5mm 이하	4.0	180	241	114	488	750	250	1264	2102	1975
0.16		4.5	160			508			1316	2102	1694
0.14		6.0	140			528			1368	2318	2152
0.12		8.5	120			548			1419	2127	2080

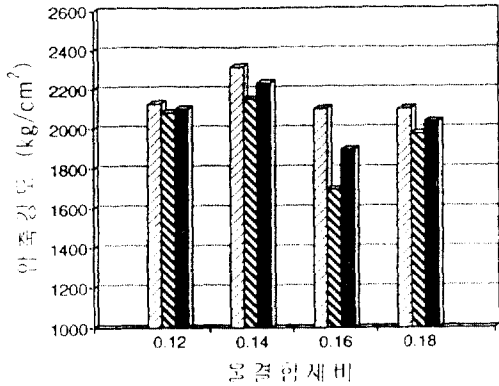


그림5 물결합재비에 따른 압축강도의 변화

고 있으며, 다른 경우에 있어서도 동일한 조건의 시험체간에 강도의 차이가 크게 나타나고 있어 공시체의 제조시 및 양생시에 각 공시체간의 편차를 줄이기 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

본 실험의 결과, 물결합재비가 저허환수축공시체의 제조에 많은 어려움이 있었으나 모든 물결합재비에서 압축강도 2000kgf/cm²를 상회하는 초고강도 영역 콘크리트의 제조가 가능하였으며, 각 시험체간의 편차를 줄이고 다짐을 좀 더 향상시킨다면 압축강도 2300 kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

압축강도 2300kgf/cm²의 초고강도콘크리트를 제조하기 위한 예비실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 골재의 종류에 따라서는 제염사를 사용하는 것보다 쉐사 및 쉐석을 사용하는 것이 좀 더 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 나타났으며, 양생온도에 따라서는 양생온도 40℃의 경우가 80℃의 경우보다 재령3일의 압축강도가 더 양호하게 나타났다.
- 2) 5mm 이하의 쉐석을 사용한 경우 골재의 크기에 따른 압축강도의 변화는 거의 나타

나지 않고 있으며, 양생방법에 따라서는 고온양생 후 건조하는 것에 비하여 고온수중 양생만을 한 콘크리트의 경우가 보다 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 나타나고 있다.

- 3) 단위결합재량 900kg/m³과 1000kg/m³에서 재령3일 및 재령7일에 2200~2400kg/cm²의 높은 압축강도를 발휘하고 있어 초고강도를 발휘하기 위한 단위결합재량의 수준은 900~1000kg/m³ 수준일 것으로 사료된다.
- 4) 물결합재비가 낮아질수록 고성능감수제의 첨가율은 급속히 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 물결합재비의 감소에 따라 콘크리트의 점성은 크게 증가하고 유동성이 저하하여 붕비이브레이터에 의한 진동다짐이 매우 어려웠으나, 물결합재비 0.14에서 재령 4일에 평균압축강도 2235kgf/cm²를 발휘하여 가장 높은 강도를 발휘하였다.
- 5) 본 예비실험 결과 재령의 증가에 따라서 압축강도가 저하하는 경향이 나타나고 있는데 이에 관하여는 포괄적이고 미시적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- 1) 김무한 외, 한국콘크리트학회 논문집, 압축강도 1800kg/cm²의 초고강도콘크리트의 개발에 관한 실험적 연구 (제1,2보) 1994. 11 제6권2호 pp.167~174
- 2) 콘크리트 壓縮強度 콘테스트 實行委員會, 超高強度 콘크리트 への 挑戰 -學生 による 콘크리트 壓縮強度 콘테스트-, 콘크리트 工學, Vol. 32, No. 7, 1994. 7 pp.51~55.
- 3) Novokshchenov, V., ; Factors Controlling in the range 100 to 150 MPa, High-Strength Concrete 1993, 20-24 June Vol.2 pp.863-873
- 4) Malhotra, V.M. and G.G.; Silica Fume Concrete Properties, Application and Limitations, Concrete International, Vol.5, May 1983, pp.40-46.
- 5) Yoyendran, Langan, Hague and Word, Silica-fume in High-Strength Concrete, Vol.84, No.1-6, ACI Materials Journal, 1987, pp.124-129.