

공학석사 학위논문

초속경시멘트 콘크리트의 기초적
특성에 관한 실험적 연구

지도교수 김 명 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



부경대학교 대학원

토목공학과

정 해 동

정해동의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학석사 김 종 수



위 원 공학박사 이 종 출



위 원 공학박사 김 명 식



목 차

Abstract	i
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구목적 및 내용	2
1.3 연구범위	3
2. 문헌 고찰	5
2.1 초속경 시멘트의 특성	5
2.1.1 화학성분과 광물조성	6
2.1.2 물리적 특성	7
2.1.3 초속경 시멘트의 수화특성	8
2.2 초속경시멘트를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 특성	10
2.2.1 콘크리트의 경과시간에 따른 응결변화	10
2.2.2 콘크리트 배합시 단위수량과 슬럼프의 관계	11
2.2.3 시간경과에 따른 콘크리트의 슬럼프 손실	11
2.2.4 블리딩(Bleeding)	12
2.3 초속경 시멘트를 사용한 경화 콘크리트의 성질	13
2.3.1 압축강도	13
2.3.2 건조수축	13
2.3.3 탄성계수	14
2.3.4 동결융해 저항성	14
2.3.5 내마모성	14
2.3.6 화학저항성	15
3. 실험	16
3.1 실험계획	16
3.2 사용재료	17

3.2.1 시멘트	17
3.2.2 골재	18
3.2.3 혼화제	18
3.3 배합설계	19
3.4 실험방법	19
3.4.1 콘크리트 배합	19
3.4.2 슬럼프 시험	21
3.4.3 압축강도 시험	21
4. 실험결과 및 고찰	22
4.1 실험결과	22
4.2 굳지 않은 콘크리트의 배합특성	23
4.3 경화된 콘크리트의 강도특성	25
4.3.1 물-시멘트비와 압축강도	25
4.3.2 재령과 압축강도	30
5. 결론	41
참 고 문 헌	43

An Experimental Study on the Fundamental Characteristics of Rapid-Set Cement Concrete

Jeong, Hae-Dong

*Department of Civil Engineering
Graduate School Pukyong National University*

Abstract

Due to the industrial development and the merit of the reduction of construction period, the rapid-set cement which develops the usable compressive strength within 1~2 hours is developing in our country. Because the properties of rapid-set cement are very short in setting time, proper quantities of the retarder and water reducer should be used in concrete.

The purpose of this study is to investigate experimentally the workability and compressive strength properties of rapid-set concrete with various mixture. Test variables are cement content, water content, retarder quantities. The slump and the compressive strength for 2 hours, 6 hours, 1 day, 3 day, 7 days and 28 days were tested.

As result, it was shown that the workability of the concrete can be obtained at around 45% of W/C, and the high strength at early stage was obtained by mix design of cement ; 420kg/m³, water content ; 150kg/m³,

retarder quantities ; 0.1~0.3% of cement.

Keyword : rapid-set concrete ; mix design ; workability ; cement content
water content ; retarder quantities ; compressive strength

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

영국의 J. Aspidin이 1824년 포틀랜드시멘트를 개발한 이후 170여년이 지난 현재까지도 시멘트는 구조재료로서 확고한 위치를 지키고 있다. 또한, 산업구조가 발달함에 따른 토목, 건축구조물의 대형화, 특수화로 인해 시멘트콘크리트 분야에서도 품질의 다양화 및 고강도화가 요구되는 추세에 있다.

특히, 산업이 고속화되면서 시멘트콘크리트 분야에서도 도로보수 등 급속시공에 따른 콘크리트의 조강화 요구에 부응하기 위한 연구가 활발히 진행되어 1960년대에는 초조강 시멘트가 개발되었으며, 1968년 미국 포틀랜드시멘트협회(PCA) 연구소의 Greening에 의해 초조강성을 지니며, 응결시간을 조절할 수 있는 Regulated Set Cement가 개발됨으로서 시멘트 산업에 혁신을 가져오게 되었다.

한편, 우찌가와 등의 보고에 의하면 일본은 Regulated Set Cement의 기본기술을 도입한 후 독자적인 연구를 추진해 왔으며, 1971년 10월 오노다 및 스미토모 시멘트사 공동연구의 결과로서 “Jet Cement”라는 명칭의 초속경시멘트가 상품화되기 시작하였다.

초속경시멘트는 물과 혼합한 후 2~4 시간만에 초조강시멘트의 1일 강도를 발현하여 “1 hour cement”라고도 불리우며, 알루미나 시멘트에 비하여 우수한 조강성과 장기강도 발현성을 갖는 획기적인 시멘트로서 일본에서는 1972년 개발된 이후 시멘트 분야에서 확고한 위치를 점유하고 있다.

반면, 국내에서는 1970년대 초 기초적 연구가 있었으며, 본격적으

로 연구가 시작된 것은 1986년 이후로서, 꾸준한 연구결과 1988년부터 제품생산에 성공하여 판매되고 있으나 아직도 널리 알려져 있지 못한 실정이다.

초속경시멘트는 조강성이 시급히 요구되는 긴급공사, 한중공사 및 도로구조물의 보수공사용, 프리캐스트 판넬, 블록 등의 콘크리트 2차 제품용 등에 광범위하게 응용되고 있으며, 시멘트 아스팔트계 Grout 용, Shotcrete 용, 지수용 등에도 응용확대를 위한 연구가 진행중에 있으나, 초속경시멘트에 대한 인식이 부족하여 아직 본격화되지 못했을 뿐만 아니라 시공지침안 등이 정해져 있지 않은 상태에 있어 이에 대한 대책이 시급한 실정이라 하겠다.

1.2 연구내용

일반적으로, 시멘트콘크리트 포장, 교량 접합부 등의 도로구조물은 교통량 증가에 따른 과다한 차량하중으로 인해 조기열화현상이 발생하여 보수공사가 현저히 필요할 뿐만 아니라 시공기간의 제약을 받는 단점이 있어 보수부위의 내용년한에 불리한 점이 많다. 초속경콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 단시간에 실용강도를 발현하는 장점을 지니고 있어 이러한 도로보수의 한계점을 극복할 수 있는 우수한 보수재료일 뿐만 아니라 긴급 기계기초공사, 활주로 보수공사, 일반 토목건축공사 등에도 널리 사용되고 있다.

그러나, 초속경콘크리트는 초기강도발현이 크기 때문에 초기강도가 요구되는 긴급공사 또는 강도발현시 발생하는 수화열을 이용한 한중공사 등에 적합한 구조재료인 반면, 초기수화열이 보통 콘크리트에 비하여 크기 때문에 비교적 대형구조물의 시공시 발열에 의한 온도균열의

발생에 주의를 할 필요가 있다.

초속경콘크리트를 양호한 작업성(workability)을 유지하면서 비빔 후 단시간에 소요강도를 얻기 위해서는 시험배합을 통하여 응결지연제를 정확히 첨가할 필요가 있다. 초속경콘크리트의 작업시간부족이나 경화불량의 원인은 대부분이 응결지연제 첨가량의 부족 또는 과다에 기인한 것으로서 초속경시멘트의 배합관리차원에서 응결지연제나 기타 다른 혼화제 첨가량의 적절량에 대해서는 충분한 연구가 뒤 따라야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 초속경콘크리트의 기초적 특성을 규명하기 위한 연구의 일환으로 단위시멘트량, 단위수량 및 응결지연제 첨가량을 실험인자로 선정하여, 굳지 않은 콘크리트의 성질과 초기재령에서의 강도특성을 알아보기 위하여 2시간, 6시간 및 1일 압축강도를 3일, 7일 및 28일 압축강도와 병행하여 측정하였다.

1.3 연구범위

본 논문은 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 연구내용과 범위는 다음과 같다.

1장 서론에서는 본 연구의 배경 및 목적, 연구내용과 범위를 서술하였다.

2장 초속경시멘트의 전반적인 특성에 대해 고찰하였다. 초속경시멘트의 광물조성, 물리적 성질, 수화특성에 대해 살펴보고, 굳지 않은 콘크리트와 경화한 콘크리트의 성질에 대해서도 고찰하였

다.

3장 실험에서는 본 실험의 개요와 실험에 사용된 재료를 나타내었으며, 배합표와 시험체 제작 및 실험방법 등을 정리하였다.

4장 실험결과 및 고찰에서는 초속경콘크리트의 성질 및 강도특성 등을 실험변수에 따라 비교·고찰하였다.

5장 결론에서는 본 연구를 통하여 도출된 결론 및 향후 연구과제를 서술하였다.

2. 문헌 고찰

2.1 초속경시멘트의 특성

초속경시멘트는 넓은 의미로 포틀랜드시멘트에 속하며, 보통포틀랜드시멘트는 광물조성이 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 로 구성되어 있으나 초속경시멘트는 새로운 광물인 $C_{11}A_7CaF_2$ 가 보통포틀랜드시멘트의 C_3A 광물과 대체되어 구성되고 있다.

$C_{11}A_7CaF_2$ 광물은 물과 급격히 반응하므로 sulfate ion이 존재하지 않으면 급결(flash setting)이 발생하게 된다. 초속경시멘트가 물과 접촉하면 $C_{11}A_7CaF_2$ 광물이 물에 곧 용해되어 calcium silicate 광물에서 용해된 $Ca(OH)_2$ 와 곧바로 반응하여 수십초 내에 calcium aluminate 수화물 및 aluminate 수화물을 생성한 후 다시 수분내에 첨가된 석고와 반응하여 ettringite($C_3A_3CaSO_4H_{32}$)를 생성하여 조기강도를 발현하게 되어 속경성을 나타내게 된다.

그런데 ettringite를 형성하기 위한 sulfate ion과의 반응은 매우 급격하여, 석고가 적당한 sulfate ion 공급을 유지하기에는 빨리 용해되지 않으므로 석고만으로는 응결지연을 조절하기 어려워 유기응결지연제와 감수 및 작업성 개선을 위하여 감수제를 함께 사용하고 있다.

장기강도의 발현은 보통포틀랜드시멘트에서와 같이 calcium silicate의 수화반응에 의한 것으로서 높은 강도를 유지해 주어 장기재령에서도 높고 안정된 강도를 발현하게 한다.

2.1.1 화학성분과 조성광물

초속경시멘트의 화학성분 및 조성광물은 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

표 2.1 초속경시멘트의 화학성분(%)

구분	No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	F	Cl
초속경 시멘트	1	13.48	12.37	2.31	57.86	1.47	6.80	1.00	0.64	0.78	0.06
	2	14.71	8.99	2.37	58.52	1.52	6.57	1.20	0.90	0.74	
	3	14.25	10.09	1.71	58.57	0.97	10.86	0.40	0.45	1.40	
	4	17.10	10.40	0.90	60.90	1.00	6.00	0.16	0.62		
	5	15.00	10.20	2.10	58.10	1.90	6.20	0.98	0.44		
	6	13.70	10.80	1.70	58.60	0.70	11.00	0.40	0.60	0.60	0.90
	7	13.90	11.00	1.70	58.90	0.80	11.10	0.40	0.60	1.00	
보통시멘트		22.00	5.20	3.20	65.50	1.30	1.70	-	-	-	-

표 2.2 초속경 시멘트의 조성광물(%)

시멘트 조성광물	초속경시멘트	보통시멘트
C ₃ S	60	50
C ₂ S	< 5	25
C ₄ AF	5	8
C ₃ A	-	12
C ₄ A ₃ S	-	-
C ₁₁ A ₇ CaF ₂	20	-
Total SO ₃	10	3

화학성분 분석결과, 초속경시멘트가 보통포틀랜드시멘트보다 SO₃양이 다소 많은 이유는 C₁₁A₇CaF₂광물이 ettringite (C₃A₃CaSO₄H₃₂)로 전이하기 위해 더 많은 SO₃양을 필요로 하기 때문이라고 생각된다.

다.

한편, 조성광물에서도 calcium silicate 광물이 보통시멘트에 비하여 다소 적으며, C_3A 광물이 $C_{11}A_7CaF_2$ 광물로 치환된 점이 특징이라 할 수 있다.

이러한 결과로서 화학성분에서도 SiO_2 와 Al_2O_3 함량이 보통포틀랜드 시멘트와 상호 차이를 나타내고 있다.

2.1.2 물리적 특성

초속경시멘트의 물리적 특성을 다른 시멘트와 비교한 결과는 표 2.3과 같다.

표 2.3 초속경시멘트 및 각종 시멘트의 물리적 성질

항목 종류	비중	분말도 (cm^2/g)	응결시간			압축강도(kgf/cm^2)						
			W/C (%)	초결 (min)	종결 (min)	2hrs	3hrs	6hrs	1d	3ds	7ds	28ds
초속경	3.04	5630	28.0	10	15	40	78	142	217	271	360	460
초조강	3.14	5950	30.3	75	115	-	-	-	205	311	372	480
조강	3.13	4340	28.2	128	195	-	-	-	100	237	351	478
보통	3.17	3220	27.0	142	200	-	-	-	44	133	228	415

표 2.3의 물리적 특성을 살펴보면 초속경시멘트의 응결시간은 초결과 종결시간의 차가 크지 않으며, 다른 시멘트에 비해서 10~15분 정도로 매우 빠르게 나타나고 있다.

양생온도에 따른 응결시간을 살펴보면, 양생온도가 높을수록 응결시간이 단축되고 너무 온도가 높으면 콘크리트 표면에 온도차에 의한 균열이 발생될 수 있으므로 주의를 할 필요가 있다.

2.1.3 수화특성

(1) 수화기구

초속경시멘트의 수화기구에 관한 연구는 그렇게 많지 않으나, 보통 포틀랜드시멘트의 수화반응과 거의 유사한 과정을 하는 것으로 알려져 있다. 그림 2.1은 초속경시멘트 수화반응의 개략적 메카니즘을 살펴본 것으로서, 초속경시멘트에 물이 가해지면 클링커 성분중 활성이 큰 $C_{11}A_7CaF_2$ 가 calcium silicate 상(C_3S 와 C_2S)에서 용해된 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 $Al(OH)_2F$, CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{19} 등 calcium aluminate 수화물을 생성하기 시작함을 알 수 있다.

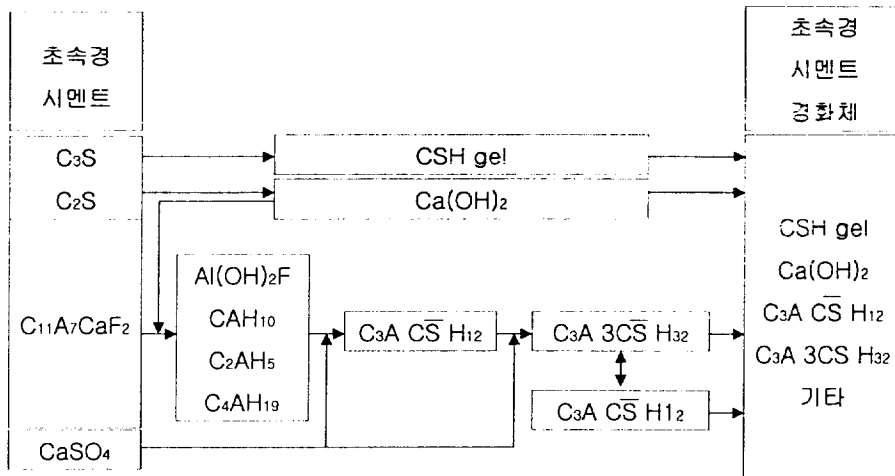
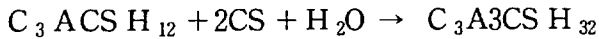
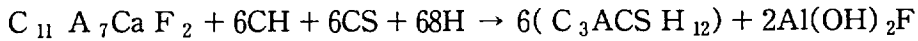


그림 2.1 초속경시멘트 수화반응과정 개략도

이 수화물은 무수석고의 용해분과 곧바로 다음 식과 같이 반응하여 초기의 석고 용해량이 적을 때는 calcium monosulfate 수화물 ($C_3A CSH_{12}$)이 생겨지나 석고 용해량이 많아지면 ettringite($C_3A_3CSH_{32}$)가 생성된다.



이러한 수화반응이 일어나는 시기는 초속경시멘트중의 $CaSO_4$ 의 농도 및 용해속도와 밀접한 관련이 있기 때문에 초속경시멘트에서의 강도발현속도를 적절히 조절하고 팽창 등의 이상현상이 나타나지 않게 하기 위하여 $CaSO_4/Al_2O_3$ 의 mole 비가 최적치가 되도록 석고를 첨가한다.

C_3S , C_2S , C_4AF 의 수화반응은 보통포틀랜드시멘트의 경우와 크게 다르지 않다.

(2) 수화열

초속경시멘트와 각종 시멘트간의 수화열을 비교한 결과가 표 2.4이다.

초속경시멘트의 수화열은 1일 이내에서는 보통시멘트에 비하여 훨씬 높지만, 1일 이후에서는 초조강시멘트와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. Hoff의 보고에 따르면, 초속경시멘트는 초기 수화열이 높아 동절기 저온에서의 동결피해방지를 위한 최소강도(critical strength)를 발현하는데 잇점이 있다고 한다. 동결피해방지를 위해 필요한 국가별 최소강도 요구조건은 표 2.5와 같다.

표 2.4 초속경시멘트 및 각종 시멘트의 수화열

항목 종류	수 화 열 (cal/g)						
	1시간	3시간	6시간	1일	3일	7일	28일
초속경 시멘트	16.9	39.3	57.9	65.1	82.0	87.3	96.5
초조강 시멘트	6.9	8.1	11.2	66.0	81.0	89.0	97.0
조강 시멘트	4.8	6.7	11.1	49.8	65.9	83.1	92.9
보통 시멘트	3.8	5.1	7.7	39.3	57.6	72.0	89.8

표 2.5 국가별 동결전 최소강도 요구수준

국 명	동결전 최소강도(lb/in ²)
스웨덴	350 ~ 640
캐나다	1000 ~ 1500
소 련	700 ~ 1280
미 국	500
일 본	850*
스위스	2100

* Takahashi & Hayashi

2.2 초속경시멘트를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 특성

2.2.1 콘크리트의 경과시간에 따른 응결변화

초속경시멘트를 실제로 사용하는 경우 시멘트 특성상 응결이 매우 빨라 유기카르복실산(organic carboxylic acid)을 주성분으로 하는 응결지연제가 사용되고 있다.

응결지연제의 첨가량을 증가시킴에 따라서 응결시간은 늦어짐과 동시에 초결과 종결의 간격도 길어 진다. 또한, 응결지연제가 시멘트 중

량에 대해 동일한 첨가비율인 경우에는 단위시멘트량에 큰 영향을 받아 단위시멘트량이 증가하면 응결시간은 빨라지는 경향이 있다. 일반적으로 초속경콘크리트의 응결 및 경화는 온도보다는 응결지연제 첨가량에 크게 좌우된다고 보고되고 있다.

2.2.2 콘크리트 배합시 단위수량과 슬럼프의 관계

초속경시멘트를 사용하는 경우 특수한 예를 제외하고 응결지연제를 사용하게 되는데, 첨가에 따라 약간의 감수효과를 나타내며, 그 효과는 응결지연제 첨가량 및 온도에 따라 달라진다.

소요 슬럼프를 얻기 위한 단위수량은 보통 콘크리트와 비교하여 응결지연제 첨가량이 적은 경우 이외는 거의 비슷하다고 하며, 응결지연제 첨가량이 적은 경우는 단위시멘트량에 따라 동일 슬럼프를 얻기 위한 단위수량은 달라진다. 즉, 단위시멘트량이 많아지면 단위수량은 증가하고 이 경향은 온도가 높아질수록 현저히 나타난다고 보고되고 있다.

2.2.3 시간경과에 따른 콘크리트의 슬럼프 손실

초속경콘크리트는 슬럼프값의 경시변화가 크고 응결지연제를 0.2% 사용한 경우에 있어서도 10분에 약 3cm 정도의 슬럼프 저하를 나타내고 있다. 따라서 콘크리트의 타설시간을 연장시키기 위해서는 외기온도와 사용조건에 따라서 적정량의 응결지연제를 첨가할 필요가 있다. 특히, 기온이 높을 때는 첨가량을 증가시키지 않으면 안된다.

한편, 초조강, 초속경시멘트 및 폴리에스텔 레진과 같은 보수재료와 보통시멘트간의 슬럼프 저하를 비교한 실험결과에서 초속경시멘트가

보통 시멘트, 초조강시멘트 보다는 슬럼프 저하가 크지만 폴리에스테르 레진 보다는 작은 경향을 나타내고 있다.

2.2.4 블리딩

굳지않은 콘크리트는 비중이나 크기가 다른 재료를 혼합한 것이므로 운반이나 타설 때 콘크리트의 유동에 따라 골재가 분리되거나 다짐시 진동 및 중력 작용에 의해 비중이 큰 골재나 시멘트는 아래로 침강하고 비중이 작은 물이나 모래의 미립분은 콘크리트 상부에 부유되는데 이 현상이 블리딩이다.

블리딩에 의해 발생된 레이턴스(Laitance)는 미세한 표면 물질층으로 콘크리트의 부착 특성을 현저히 저하 시키므로 반드시 제거하여야 하는데, 초속경콘크리트는 레이턴스가 전혀 발생되지 않아 접착특성이 매우 우수하며 침하현상이 없어 기계기초용 또는 앵커볼트 매립 등에 사용하면 효과가 좋다.

표 2.5는 시멘트 종류별 블리딩을 나타낸 것이다.

표 2.6 시멘트 종류별 블리딩

시멘트 (단위시멘트량 : 400kg/m ³)	슬럼프 (cm)	블리딩	
		양 (ml/cm ²)	물 (%)
보 통	8	0.17	2.94
초 조 강	8	tr.	tr.
초 속 경	8	전혀 발생안됨	

2.3 초속경시멘트를 사용한 경화된 콘크리트의 성질

2.3.1 압축강도

초속경콘크리트는 초기나 장기 어느 재령에 있어서도 다른 종류의 포틀랜드시멘트보다 훨씬 고강도를 나타내고 있다.

비빔 및 양생온도를 변화시켰을 때 콘크리트의 강도발현정도를 보면, 응결시간이 대략 40분 정도가 되도록 응결지연제 첨가량을 조절하여, 5℃ 경우는 무첨가, 10℃, 20℃, 30℃의 경우는 각각 단위시멘트량의 0.1%, 0.2%, 0.3% 첨가한 실험결과로부터 저온에서 고온에 이르는 넓은 온도범위에서 양호한 강도를 발현하고 있음을 알 수 있다. 한편, 속경성 보수공사용 재료로 많이 사용되고 있는 폴리에스텔수지콘크리트와 초속경콘크리트와의 강도발현을 비교한 연구결과, 초속경콘크리트는 재령 3시간 정도에서 압축강도가 200kgf/cm² 수준에 도달하고 있으며, 재령 12시간까지의 강도증가는 폴리에스텔수지콘크리트에는 미치지 못하지만 시공의 용이성, 경제적 측면에서 초속경콘크리트는 유망한 보수재료라고 보고되고 있다.

2.3.2 건조수축

초속경콘크리트의 건조수축이 보통콘크리트의 건조수축에 비하여 상당히 작다. 이것은 시멘트의 수화속도가 빠른 것과 건조에 의한 중량 감소율이 다소 작은 점 등 이외에 수화생성물이나 그 구조와의 관계에 따른 것으로 판단되고 있다.

2.3.3 탄성계수

수중양생한 경우의 정탄성계수와 압축강도에서 초속경콘크리트는 보통콘크리트의 경우와 큰 차이가 없는 것으로 알려지고 있다.

2.3.4 동결융해 저항성

초속경콘크리트는 경화체 구조가 매우 치밀하고 강도가 높을 뿐 아니라 흡수율이 낮아 동결융해 저항성이 보통콘크리트에 비해 매우 우수하여 내구성이 더욱 증진된다. 표 2.7은 초속경콘크리트의 동결융해 저항성을 나타낸 것이다.

표 2.7 초속경콘크리트의 동결융해 저항성

항목 시멘트	동 결 융 해 cycle 수							
	0	40	68	90	120	180	210	255
보 통	100	87.5	73.0	58.9	-	-	-	-
초속경	100	98.1	99.3	98.3	99.2	95.3	96.7	96.1

2.3.5 내마모성

모르터 및 콘크리트의 표면 내마모성은 구조체의 수명에 직접적인 영향을 주며, 초속경콘크리트의 내마모성 시험결과는 보통콘크리트에 비해 매우 우수하다. 표 2.8은 초속경시멘트를 사용한 모르터 시편의 마모에 따른 중량감소를 나타낸 것이다.

표 2.8 초속경콘크리트의 마모율

항목 시멘트	마 모 율 (%)			
	0	10,000회전	20,000회전	40,000회전
보 통	0	1.68	3.92	7.35
초속경	0	0.42	1.09	2.30

2.3.6 화학저항성

CaCl₂ 포화용액내에 침지한 콘크리트의 열화특성을 측정한 결과 초속경콘크리트는 보통콘크리트와 유사한 특성을 보이며 재령 4개월에서도 비교적 안정된 특성을 나타낸다. 따라서 동절기에 도로의 결빙을 방지하기 위해 CaCl₂를 살포하는 국내 도로환경에 대한 보수재료로서 매우 적합하다. 표 2.9은 초속경콘크리트의 내화학성을 나타낸 것이다.

표 2.9 초속경콘크리트의 내화학성

항목 시멘트	중 량 변 화 율 (%)				
	1주	2주	4주	8주	16주
보 통	+0.19	+0.24	+0.28	+0.33	+0.40
초속경	+0.22	+0.23	+0.36	+0.41	+0.45

항목 시멘트	압 축 강 도 비 (%)				
	1주	2주	4주	8주	16주
보 통	98.3	96.7	95.8	94.5	91.5
초속경	95.2	96.4	94.9	93.1	92.0

3. 실험

3.1 실험계획

본 연구에서는 콘크리트의 특성치(슬럼프, 압축강도)에 영향을 주는 콘크리트 배합의 실험인자 및 수준을 표 3.1과 3.2와 같이 정하여 실험을 실시하였다.

표 3.1 실험 I

실험인자	수준
단위시멘트량 (kg/m^3)	340, 380, 420
단위수량 (kg/m^3)	150, 160, 170
응결지연제량 (%)	$C \times 0.1, 0.3, 0.5$

표 3.2 실험 II

실험인자	수준
단위시멘트량 (kg/m^3)	400
단위수량 (kg/m^3)	160, 165, 170, 180
감수제 첨가량 (%)	$C \times 0, 0.5, 1.0, 1.5$
응결지연제량 (%)	$C \times 0.5$

표 3.1은 단위시멘트량을 340, 380, 420 kg/m^3 으로, 단위수량을 150, 160, 170 kg/m^3 으로 하여, 각 단위시멘트량과 단위수량에 대하여 응결지연제를 각각 시멘트 중량의 0.1, 0.3, 0.5%를 첨가하여 실험을 수행하였다.

표 3.2는 감수제 첨가량에 따른 콘크리트의 특성을 고찰하기 위하여

단위시멘트량을 400kg/m³으로 고정시키고, 단위수량을 160, 165, 170, 180kg/m³으로 변화시킨 물-시멘트 비에 감수제량을 각각 시멘트 중량의 0, 0.5, 1.0, 1.5% 첨가하여 실험을 수행하였다. 그리고 응결지연제량은 배합조건에 관계없이 시멘트 중량의 0.5%를 사용하였다.

3.2 사용재료

3.2.1 시멘트

본 연구에서 사용한 초속경시멘트는 국내 S사에서 생산되는 제품을 사용하였으며, 물리적 성질 및 화학성분은 표 3.3 및 표 3.4과 같다.

표 3.3 초속경시멘트의 물리적 성질

응결시간 (길모어시험)		압축강도 (kgf/cm ²)				분말도 (cm/g)	강열감량 (%)	44 μ m 잔사 (%)
초결 (분)	종결 (시간:분)	3시간	1일	7일	28일			
23	0:35	273	409	471	497	4,410	3.2	8.5

표 3.4 초속경시멘트의 화학성분

화학성분 (%)						조성광물 (%)				
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₁₁ A ₇ CaF ₂	C ₃ A	C ₄ AF
14.3	11.9	0.9	58.7	1.0	10.6	46.2	2.3	20.8	-	2.5

3.2.2 골재

본 연구에서 사용한 굵은골재는 경남 용원 석산에서 생산한 굵은골재 최대치수가 25mm인 부순자갈을 사용하였고, 잔골재는 전남 진도 앞 바다에서 채취한 바다모래를 상용수로 제염하여 사용하였다. 골재의 각종 특성은 표 3.5와 같다.

표 3.5 골재의 물리적 성질

종류 \ 항목	굵은골재 최대치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	조립률	단위중량 (kg/m ³)	조개껍질 함유량(%)	염화물함유량 ($\times 10^{-3}\%$)	
							NaCl	Cl ⁻
굵은골재	25	2.62	1.0	6.97	1520			
잔 골 재	-	2.58	1.80	2.75	1537	7.0	2.6	2.0

표 3.5에서 조개껍질함유량은 표준체 5mm체를 통과한 해사의 절건중량에 대한 백분율이고, 염화물함유량은 세척한 해사의 중량에 대한 백분율이다.

3.2.3 혼화제

초속경콘크리트 배합은 빠른 수화로 인하여 작업성이 불량하므로 적절한 작업성을 확보하기 위해서는 응결지연제 및 감수제 사용이 필수적이며 본 실험에서 사용한 혼화제는 표 3.6과 같다.

표 3.6 혼화제의 특성

종류 \ 항목	비중	주성분	상태
응결지연제	1.67	Hydroxy carboxylic acid	분말
감 수 제	0.97	나프탈렌 설폰산염	액상

3.3 배합설계

초속경콘크리트의 배합 및 기초적 특성을 알아보기 위해 표 3.1에서 정한 실험인자별 배합은 표 3.7과 같으며, 표 3.2와 같이 감수제 첨가량에 따른 압축강도 변화를 알아보기 위해 슬럼프 $9 \pm 1\text{cm}$ 에 고정시키고 실험한 배합은 표 3.8과 같다.

3.4 실험방법

3.4.1 콘크리트 배합

초속경콘크리트의 배합은 강제식 믹서(용량 : 50 ℓ)를 사용하여 다음과 같은 순서에 의해 시행하였다.

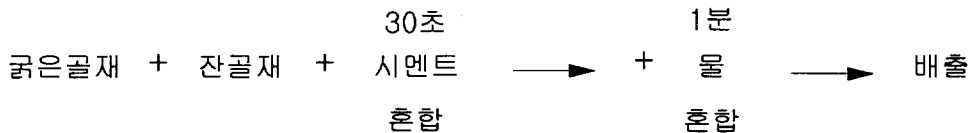


그림 3.1 초속경콘크리트의 배합순서

표 3.7 초속경 콘크리트의 배합 I

실험 번호	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m')					감수제
			W	C	S	G	지연제	
1	44	36	150	340	706	1192	0.34	6.8
2	44	36	150	340	706	1192	1.02	
3	44	36	150	340	706	1192	1.70	
4	47	36	160	340	696	1177	0.34	
5	47	36	160	340	696	1177	1.02	
6	47	36	160	340	696	1177	1.70	
7	50	36	170	340	687	1160	0.34	
8	50	36	170	340	687	1160	1.02	
9	50	36	170	340	687	1160	1.70	
10	39	36	150	380	693	1171	0.38	7.6
11	39	36	150	380	693	1171	1.14	
12	39	36	150	380	693	1171	1.90	
13	42	36	160	380	683	1155	0.38	
14	42	36	160	380	683	1155	1.14	
15	42	36	160	380	683	1155	1.90	
16	45	36	170	380	674	1139	0.38	
17	45	36	170	380	674	1139	1.14	
18	45	36	170	380	674	1139	1.90	
19	36	36	150	420	680	1150	0.42	8.4
20	36	36	150	420	680	1150	1.26	
21	36	36	150	420	680	1150	2.10	
22	38	36	160	420	671	1133	0.42	
23	38	36	160	420	671	1133	1.26	
24	38	36	160	420	671	1133	2.10	
25	40	36	170	420	661	1117	0.42	
26	40	36	170	420	661	1117	1.26	
27	40	36	170	420	661	1117	2.10	

표 3.8 초속경 콘크리트의 배합II

실험번호	슬럼프 (cm)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					응결지연제
			W	C	S	G	감수제 첨가량 (C×%)	
1	9±1	37	180	400	658	1112	0	2
2			170	400	668	1128	0.5	
3			165	400	672	1136	1.0	
4			160	400	677	1144	1.5	

3.4.2 슬럼프 시험

배합조건에 따른 워커빌리티 특성을 파악하고자 KS F 2402 규정에 의하여 혼합직후 슬럼프를 측정하였다.

3.4.3 압축강도 시험

압축강도 시험용 공시체는 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 몰드를 사용하였으며, KS F 2405에 준하여 각 배합조건에서 재령별로 3개씩의 공시체를 제작하여 기중에서 양생한 공시체의 재령 2시간, 6시간, 1일, 3일, 7일, 28일의 압축강도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

본 연구에서는 배합조건에 따른 초속경콘크리트의 기초적 특성을 파악하기 위해 단위시멘트량, 단위수량, 응결지연제 첨가량, 그리고 감수제 첨가량을 변화시켜 슬럼프 및 압축강도를 측정하여 표 4.1, 4.2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 4.1 초속경 콘크리트의 배합 I 의 실험결과

실험번호	슬럼프 (cm)	압축강도 (kgf/cm ²)					
		2시간	6시간	1일	3일	7일	28일
1	3.0	121	306	395	456	446	522
2	3.3	82	208	354	412	443	520
3	4.8	65	86	316	387	468	521
4	18.0	111	286	331	389	378	470
5	18.3	73	232	326	400	410	477
6	20.2	65	55	312	365	382	477
7	21.0	78	236	279	356	345	457
8	21.0	32	196	280	333	370	450
9	21.2	16	43	281	321	381	440
10	1.0	145	359	416	456	549	614
11	2.2	119	312	421	478	550	590
12	4.0	103	105	445	513	553	595
13	2.5	146	321	394	460	452	525
14	2.9	78	204	360	441	468	532
15	4.2	79	50	365	423	492	571

16	13.5	132	317	361	417	436	501
17	15.4	75	210	320	400	423	470
18	19.8	67	56	325	395	382	477
19	0.5	191	422	417	519	575	617
20	2.1	150	356	420	525	612	645
21	5.8	112	147	504	537	627	680
22	0.7	148	365	425	410	560	615
23	2	130	320	427	531	589	632
24	3.8	70	132	440	515	592	650
25	2	145	369	394	475	499	585
26	2.5	101	271	385	459	512	588
27	4	20	51	380	442	532	623

표 4.2 초속경 콘크리트의 배합II의 실험결과

실험번호	슬럼프 (cm)	압축강도 (kgf/cm ²)					
		2시간	6시간	1일	3일	7일	28일
1	8.1	57	293	310	369	427	501
2	9.1	66	340	377	418	491	542
3	10.0	75	351	406	455	521	565
4	9.0	91	372	414	455	540	588

4.2 굳지 않은 콘크리트의 배합특성

초속경콘크리트는 급결성을 갖고 있으므로 보통콘크리트와 유사한 작업성을 갖기 위해서는 일반적으로 응결지연제를 첨가하여 사용한다.

응결지연제 첨가량에 따른 물-시멘트비와 슬럼프의 관계는 그림 4.1과 같다. 이 그림에서 물-시멘트비의 증가에 따른 슬럼프값의 변화는

응결지연제 첨가량 0.1, 0.3, 0.5% 모두 유사한 경향을 나타내고 있다. 물-시멘트비 36~44%의 범위에서는 유동성에 큰 변화가 없는 반면, 그 이후는 물-시멘트비 증가에 따른 슬럼프가 급격하게 증가하고 있어 일정 물-시멘트비 이상이 되어야 원활한 작업성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 초속경콘크리트가 초기에 급격한 에트링자이트를 생성함으로 인해 수화가 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

단위시멘트량, 단위수량 및 응결지연제 첨가량에 따른 슬럼프의 변화는 그림 4.2와 같다. 이 그림에서 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 응결지연제의 첨가량을 증가시키는 것보다 단위수량을 증가시키는 것이 더 효과적임을 알 수 있었다.

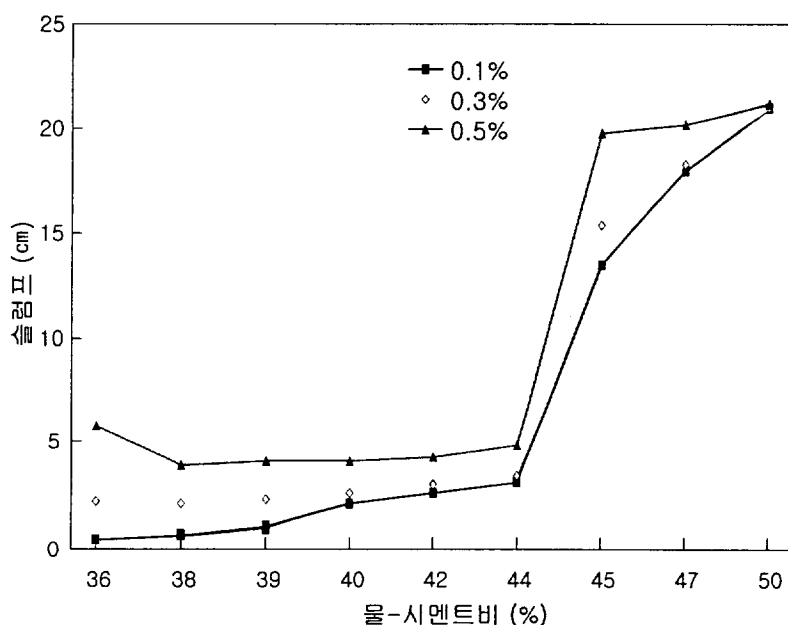


그림 4.1 응결지연제 첨가량에 따른 물-시멘트비와 슬럼프의 관계

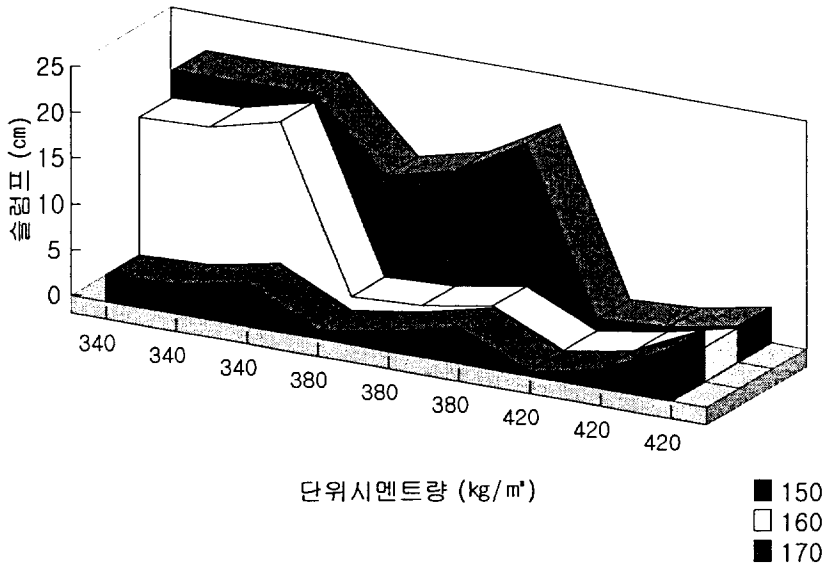


그림 4.2 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 슬럼프

4.3 경화된 콘크리트의 강도특성

4.3.1 물-시멘트비와 압축강도

콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 요인은 크게 재료의 품질, 배합조건, 양생온도 및 시공조건을 들 수 있는데, 이러한 요인 중에서 콘크리트 배합인자인 물-시멘트비는 일반적으로 압축강도와 선형관계를 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서의 물-시멘트비와 응결지연제 첨가량 변화에 따른 재령별 압축강도는 그림 4.3~4.8과 같다.

그림에서 알 수 있듯이 초속경콘크리트도 보통콘크리트와 같이 물-시멘트비와 압축강도와의 관계가 선형적임을 알 수 있었다. 그리고 초기재령에서는 물-시멘트비와 압축강도와의 관계의 기울기가 완만하게

나타나다가 재령이 증가할수록 물-시멘트비에 따른 압축강도의 차이가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

초기재령 2시간의 경우 응결지연제 첨가량 0.1%에서 보통콘크리트의 재령 3일 압축강도에 해당하는 약 190kgf/cm²를 얻을 수 있으므로 작업성을 만족시키는 범위내에서 단위수량을 가능한 감소시키는 것이 유리하다고 판단되었다.

표 3.8과 같이 감수제의 첨가량이 증가할수록 동일 슬럼프 9 ± 1 cm를 얻는데 소요되는 단위수량은 감소되므로 표 4.2와 같은 압축강도의 변화를 검토하여 그림 4.9와 같이 나타내었다.

그림 4.9에서 감수제 첨가량이 증가할수록 재령에 관계없이 압축강도가 증가하는데, 이것은 감수제 첨가량이 증가할수록 단위수량의 감소로 인하여 물-시멘트비가 상대적으로 감소했기 때문으로 판단된다. 또한, 재령 2~6시간사이에서 압축강도발현이 크게 나타나고 있고, 그 이후는 완만한 강도발현을 보이고 있으며, 그 경향은 재령이 증가할수록 감수제 첨가량의 변화에 따라 다소 큰 차이를 나타내고 있다.

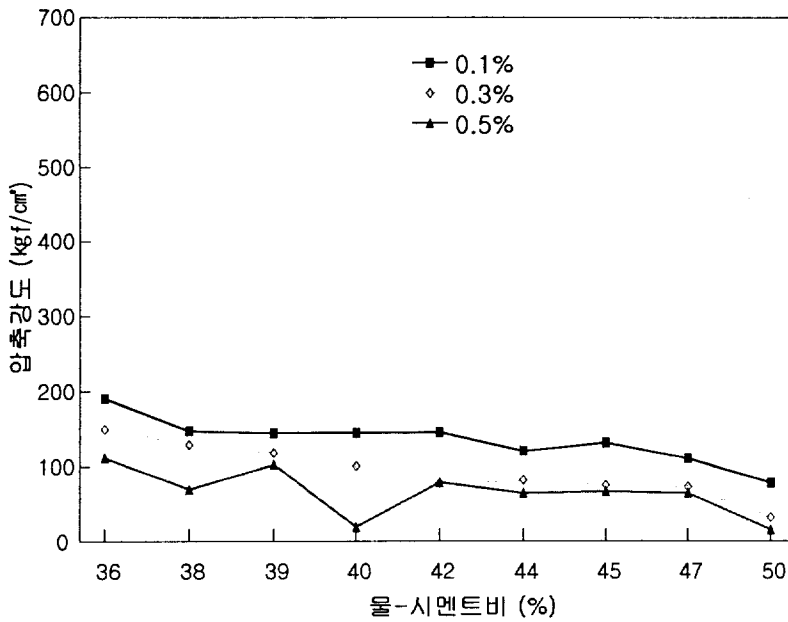


그림 4.3 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 2시간)

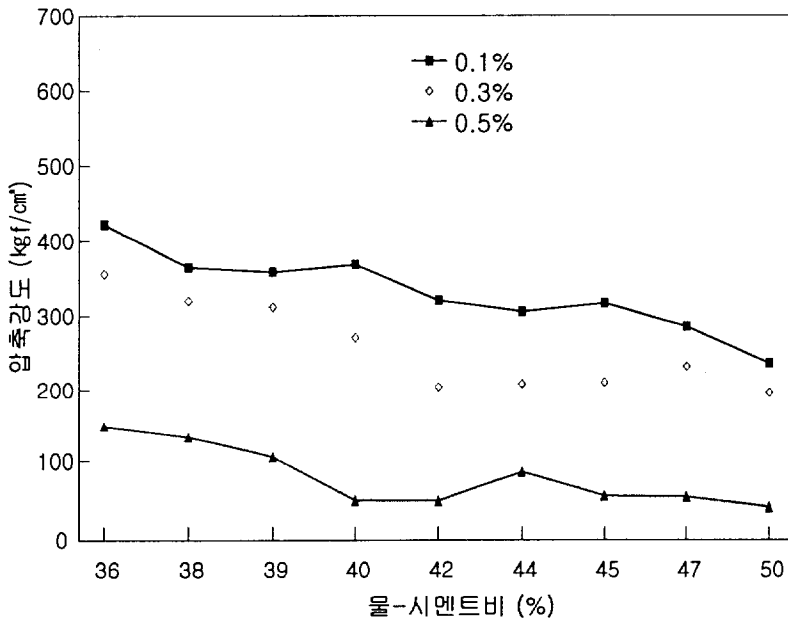


그림 4.4 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 6시간)

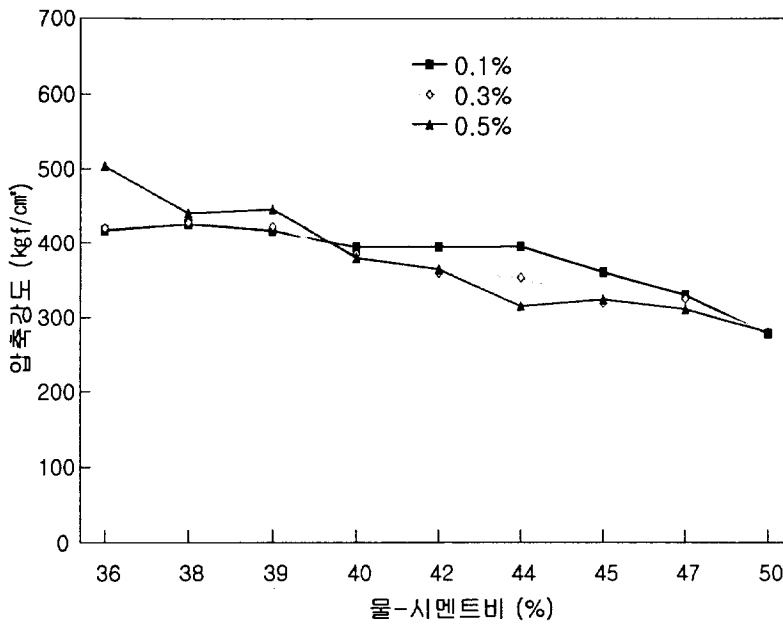


그림 4.5 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 1일)

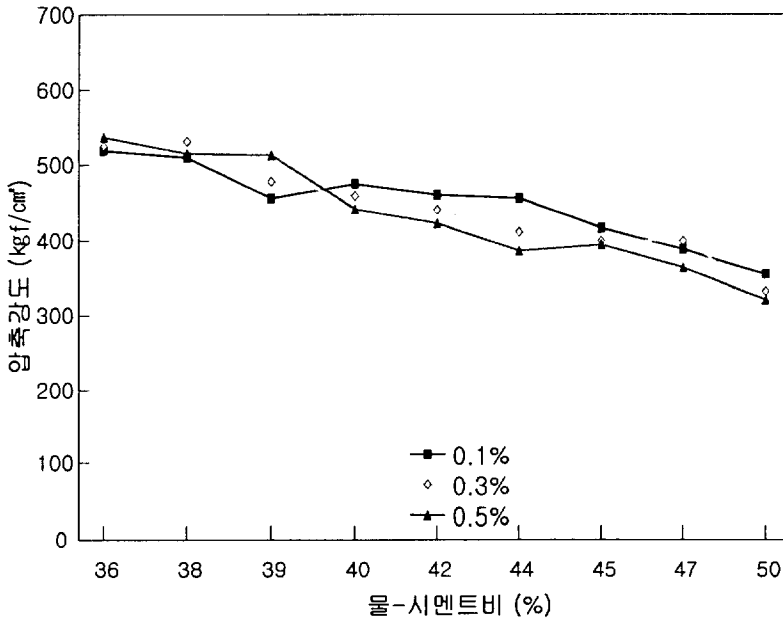


그림 4.6 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 3일)

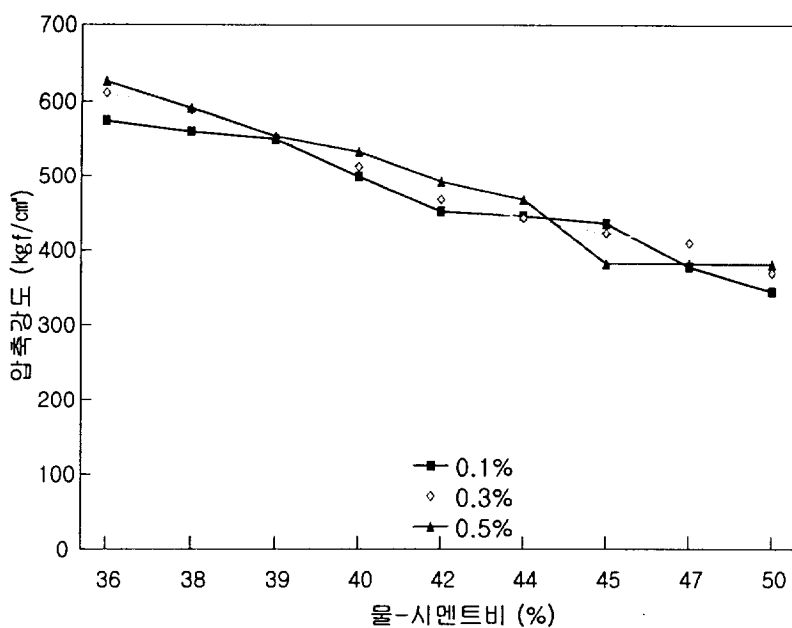


그림 4.7 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 7일)

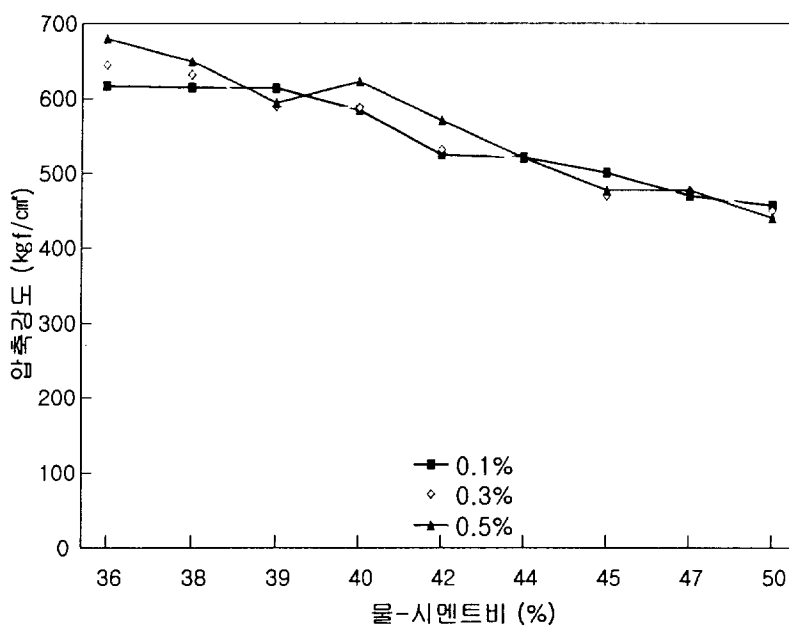


그림 4.8 물-시멘트비에 따른 압축강도 (재령 28일)

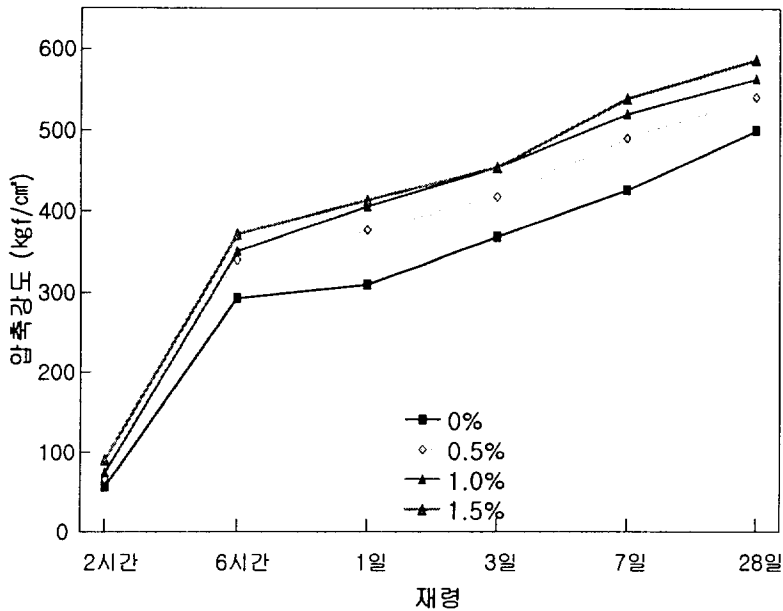


그림 4.9 감수제 첨가량에 따른 압축강도

4.3.2 재령과 압축강도

초속경콘크리트의 재령에 따른 압축강도는 4.3.1의 결과에서 알 수 있듯이 재령 2시간에서 보통콘크리트의 재령 3일 정도의 강도를 발현하고 있어 도로보수와 같이 긴급을 요하는 공사에 적절한 보수재료임을 알 수 있다.

그림 4.10~4.12는 초속경콘크리트의 응결지연제 첨가량을 중심으로 재령, 물-시멘트비에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 응결지연제를 0.1% 첨가한 경우에는 초기재령인 2~6시간에서 압축강도의 증가가 크게 나타나고 있고, 0.5%의 경우에는 2~6시간에서 압축강도의 증가가 작게 나타나다가, 6시간~1일 사이에 크게 증가하고 있는데, 이것은 응결지연제의 영향으로 초기재령에서 에트링자이트의 생성이

억제되었기 때문으로 판단된다. 그리고 재령 1일 이후에는 응결지연제의 첨가량에 관계없이 압축강도의 증가가 완만해 짐을 알 수 있었다.

그림 4.13~4.21은 물-시멘트비를 중심으로 재령, 응결지연제 첨가량에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 각 물-시멘트비에 따라 다소의 차이는 있으나 응결지연제의 첨가량을 증가시킴에 따라 초결(흙손마무리 최종가능시간)과 종결(경화개시 상태)이 지연되어 초기 압축강도 발현은 저하되나 재령 3일 이후에서는 오히려 압축강도가 다소 증가하였다.

그림 4.22~4.27은 재령을 중심으로 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 초기재령 2~6시간에서는 압축강도의 증감이 응결지연제의 영향을 많이 받음을 알 수 있고, 재령이 증가할수록 단위시멘트량 및 단위수량의 영향을 많이 받는 반면 응결지연제 첨가량의 영향이 감소하는 경향을 나타내고 있어 장기강도발현에 영향을 주는 요인은 단위시멘트량 및 단위수량임을 알 수 있었다. 따라서 초속경콘크리트가 단시간내에 조강성을 발휘하는 급결성 재료임을 고려한다면 작업성이 양호한 범위내에서 응결지연제 첨가량에 대한 단위시멘트량 및 단위수량의 최적배합을 통하여 양호한 초기 및 장기강도 발현을 기대할 수 있을것으로 판단된다.

이상의 실험결과를 참조하면 재령에 따라 다소 차이는 있지만 단위시멘트량은 420kg/m^3 , 단위수량은 150kg/m^3 , 응결지연제는 단위시멘트량의 0.1~0.3%에서 최고강도수준임을 알 수 있었다.

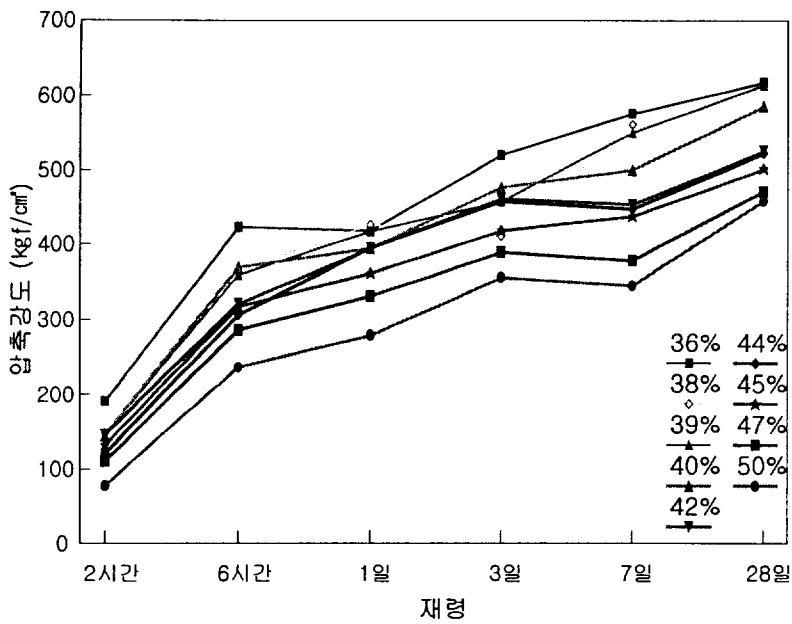


그림 4.10 재령에 따른 압축강도 (응결지연제 0.1%)

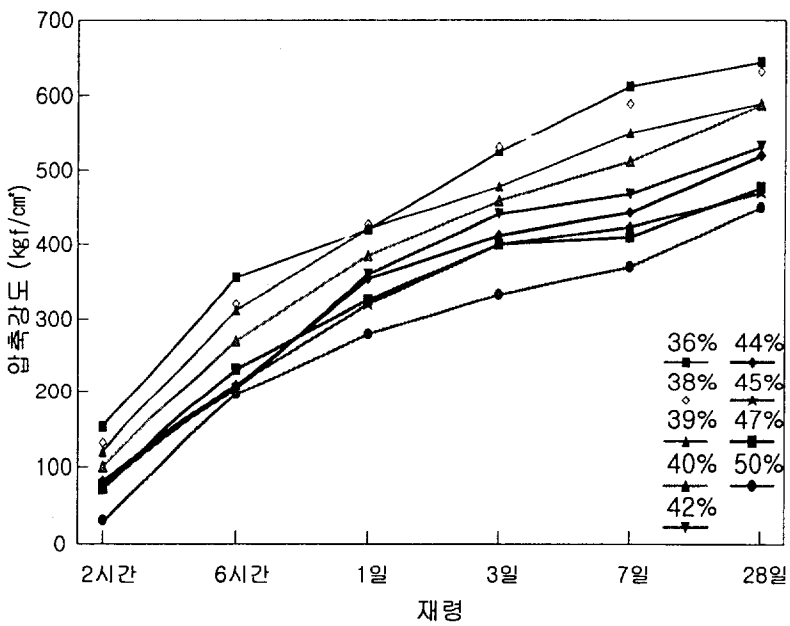


그림 4.11 재령에 따른 압축강도 (응결지연제 0.3%)

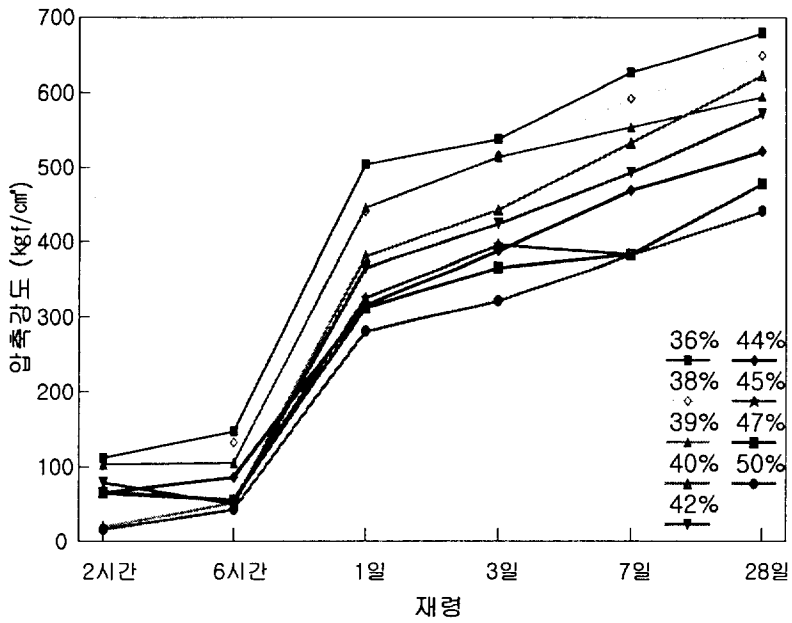


그림 4.12 재령에 따른 압축강도 (응결지연제 0.5%)

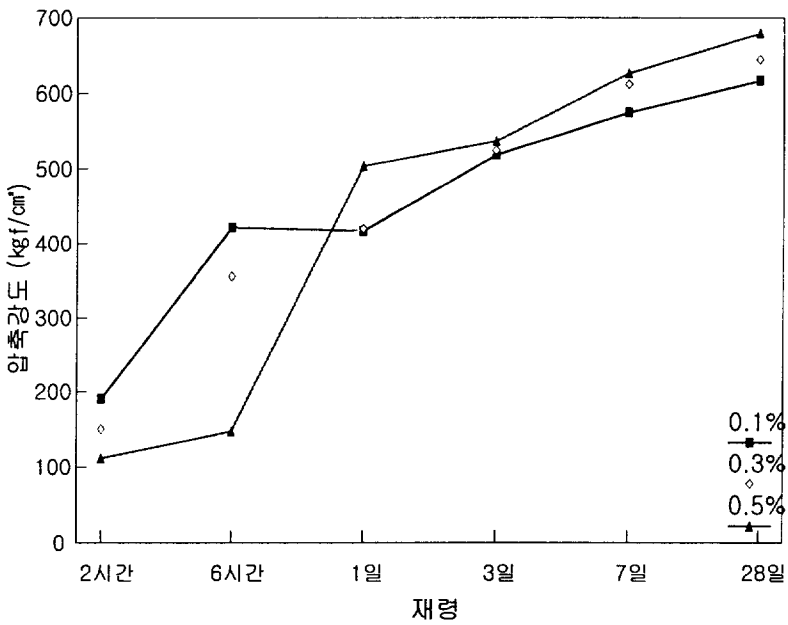


그림 4.13 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=36%)

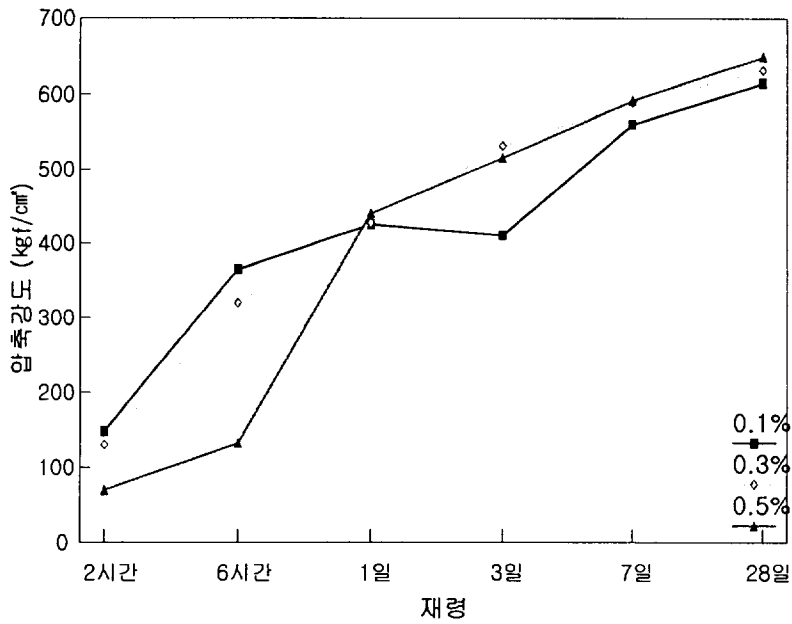


그림 4.14 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=38%)

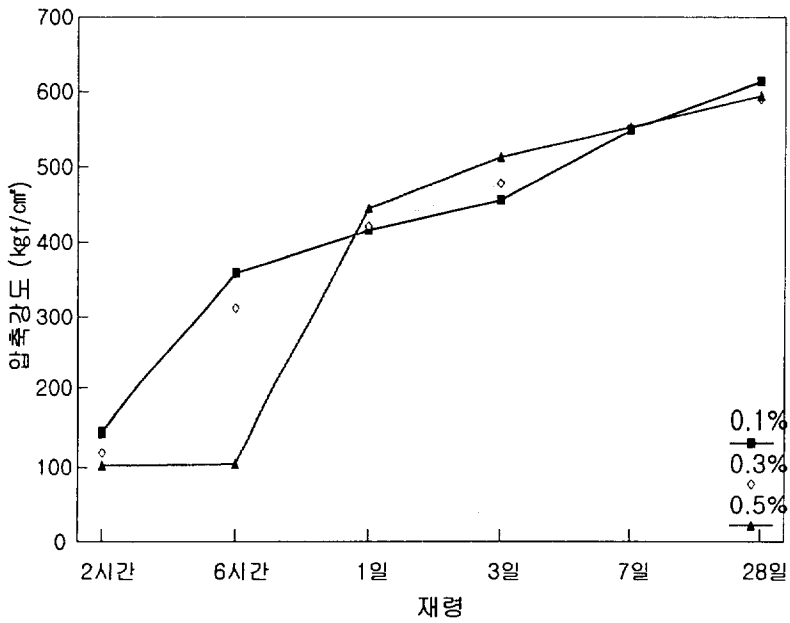


그림 4.15 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=39%)

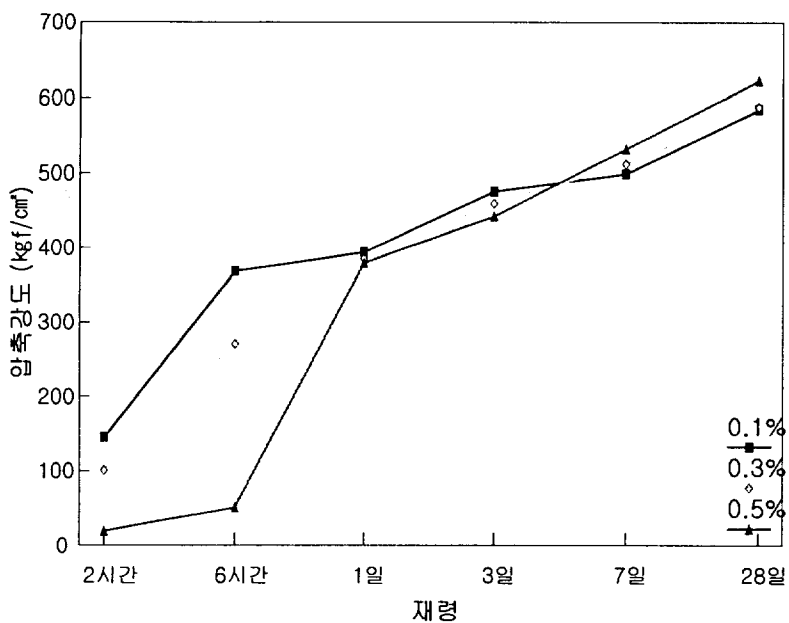


그림 4.16 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=40%)

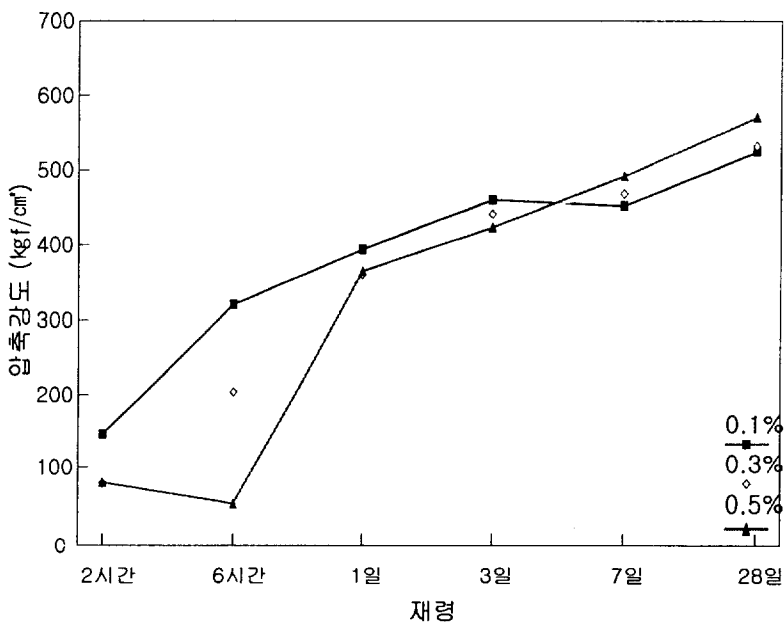


그림 4.17 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=42%)

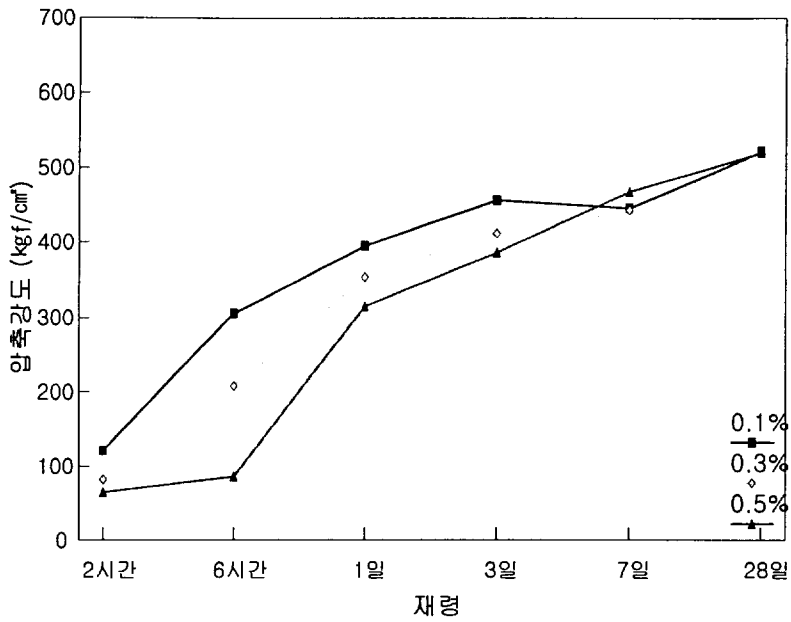


그림 4.18 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=44%)

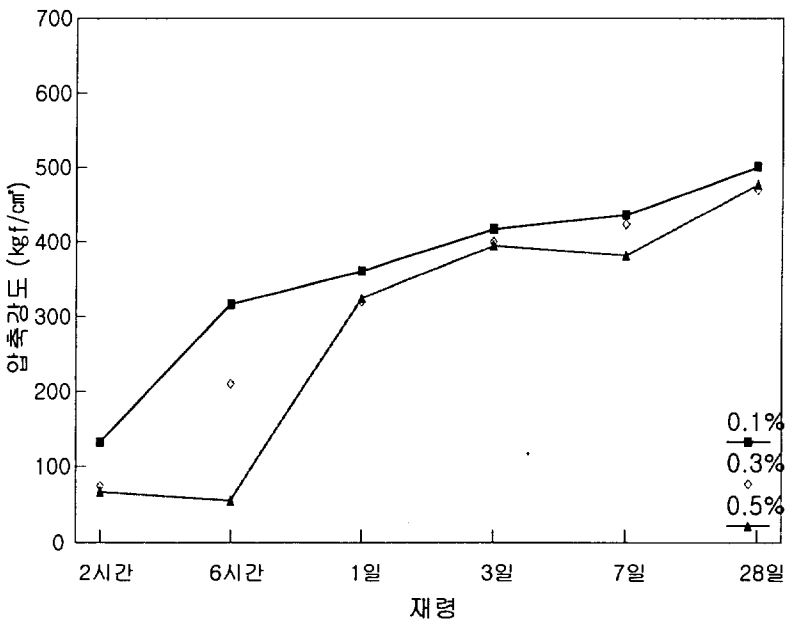


그림 4.19 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=45%)

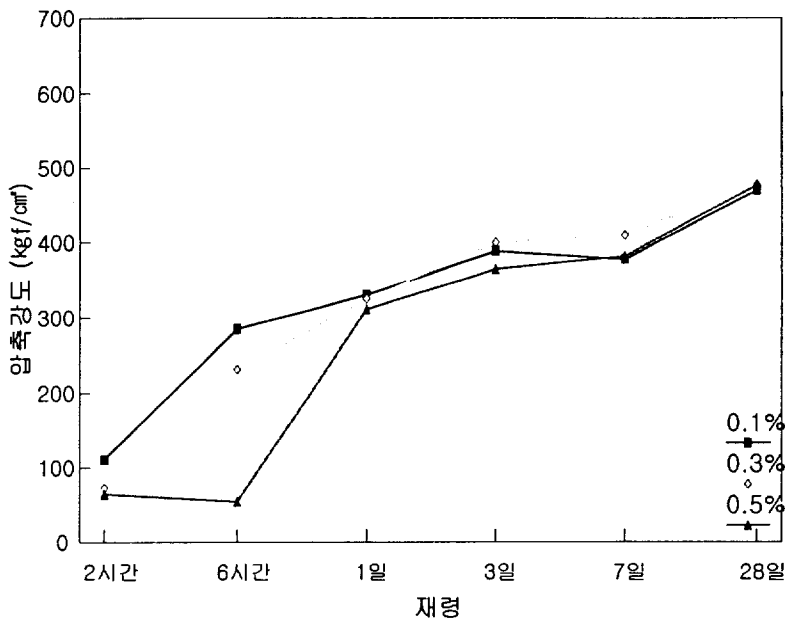


그림 4.20 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=47%)

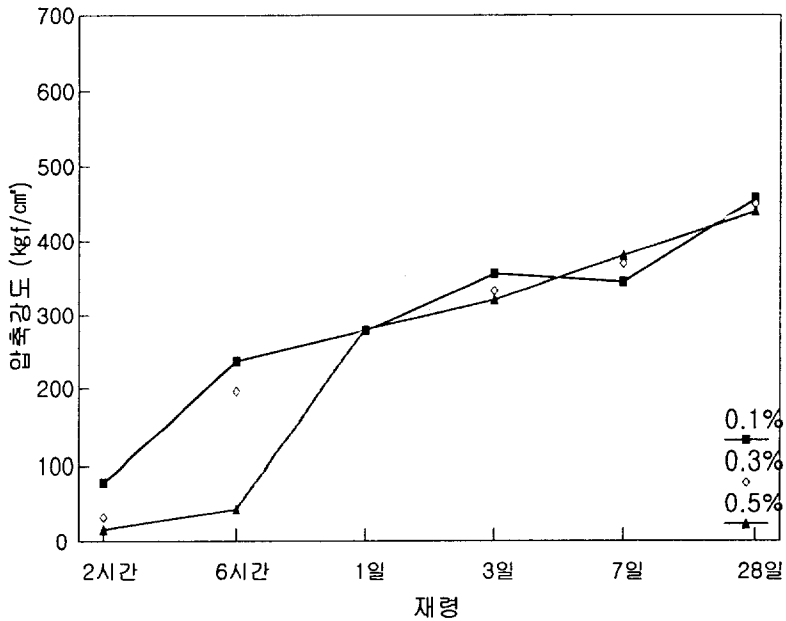


그림 4.21 응결지연제량에 따른 압축강도 (물-시멘트비=50%)

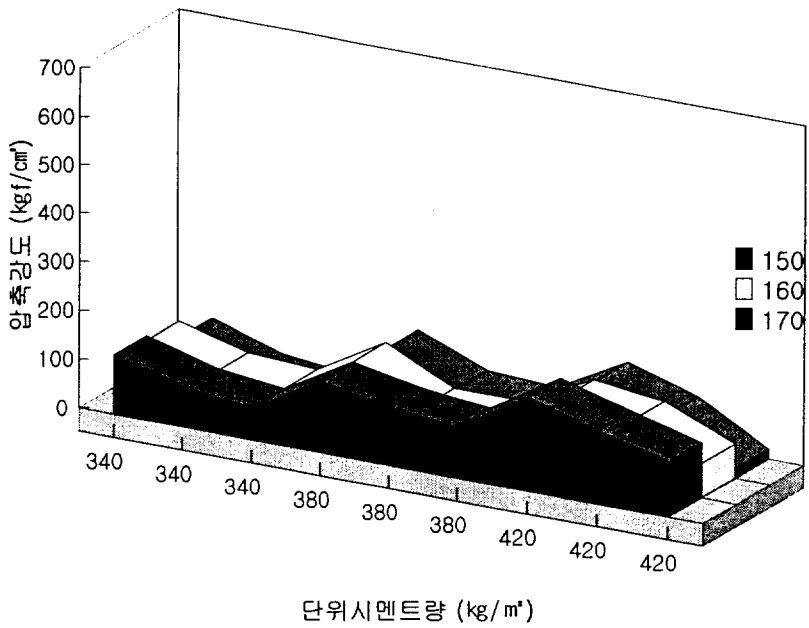


그림 4.22 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 2시간)

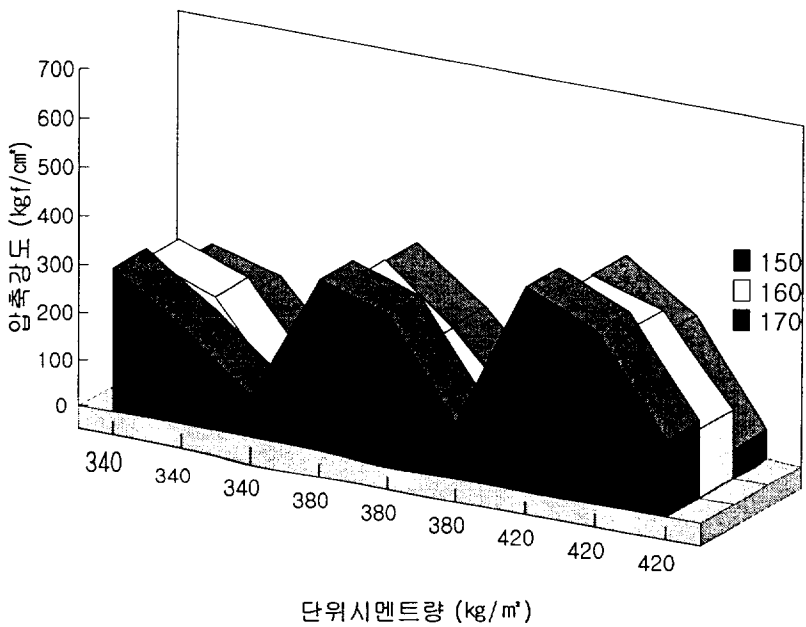


그림 4.23 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 6시간)

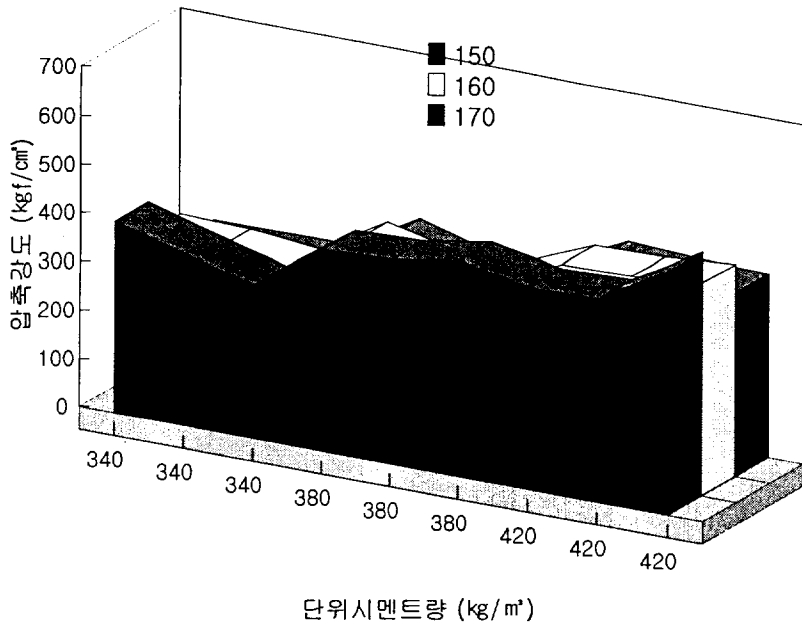


그림 4.24 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 1일)

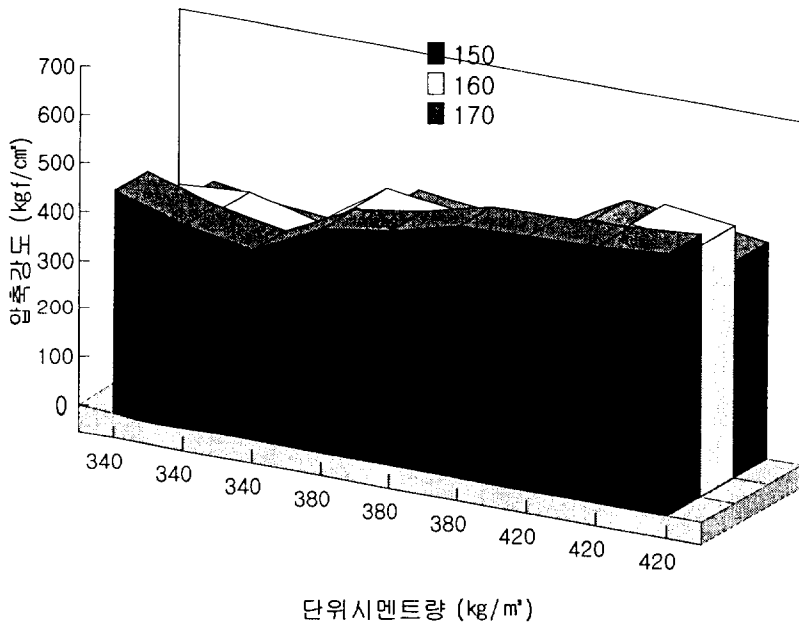


그림 4.25 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 3일)

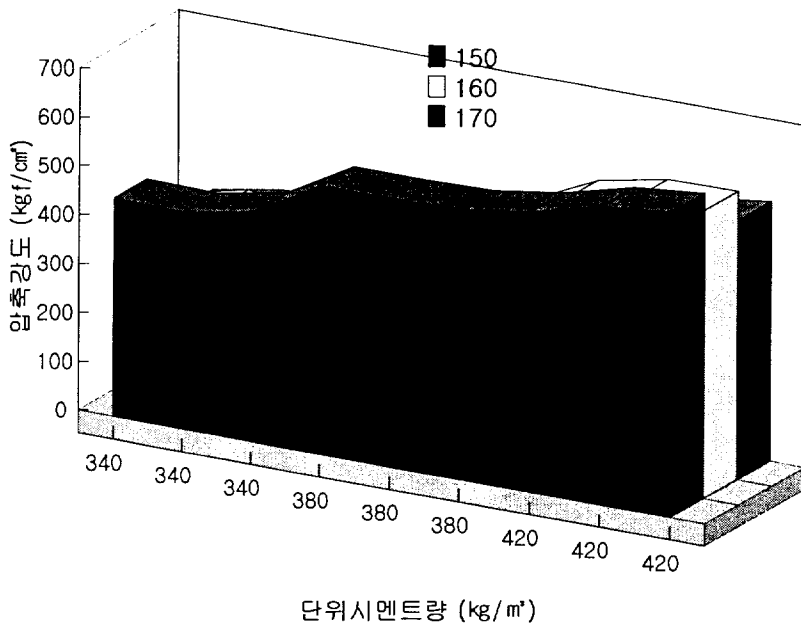


그림 4.26 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 7일)

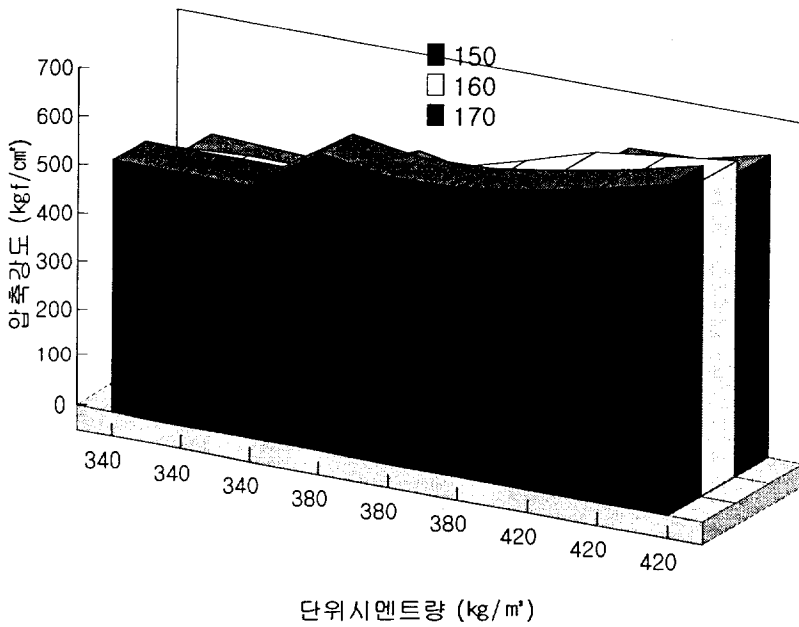


그림 4.27 단위시멘트량 및 단위수량에 따른 압축강도 (재령 28일)

5. 결론

본 연구에서는 초속경콘크리트의 실용화를 위한 기초자료를 얻기 위하여, 단위시멘트량, 단위수량 및 응결지연제 첨가량, 감수제 첨가량을 실험인자로 선정, 초속경 콘크리트의 기초적 특성을 검토하기 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 초속경 콘크리트의 작업성을 양호하게 하기 위해서는 시험배합을 통하여 응결지연제 첨가량에 따른 최적 물-시멘트비를 선정할 필요가 있으며, 본 실험범위내에서는 물-시멘트비 45%이상에서 작업성을 확보할 수 있었다. 그리고 동일한 슬럼프를 얻기 위해서는 응결지연제의 첨가량보다 단위수량을 증가시키는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 초속경콘크리트의 물-시멘트비와 압축강도와의 관계는 보통콘크리트와 마찬가지로 선형적인 관계를 보여주며, 초기재령에서는 물-시멘트비와 압축강도와의 기울기가 완만하게 나타나다가 재령이 증가할수록 차이가 크게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 초속경콘크리트는 재령 2시간 보통콘크리트의 재령 3일 정도의 강도를 발현하고 있어 도로보수와 같이 긴급을 요하는 공사에 적절한 보수재료임을 알 수 있었다.

(4) 감수제를 1.5% 첨가하는 것이 재령 2~6시간에서의 강도발현이 크게 나타났으며, 그 경향은 재령이 증가할수록 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다.

(5) 응결지연제를 0.1% 첨가한 경우에 재령 2~6시간에서는 압축강도 발현이 크고, 0.5%의 경우에는 압축강도 발현이 작게 나타나는데, 이것은 응결지연제의 영향으로 에트링자이트의 생성이 억제되었기 때문으로 판단된다.

(6) 재령 2~6시간에서는 압축강도의 증감이 응결지연제의 영향을 많이 받음을 알 수 있었고, 재령이 증가할수록 단위시멘트량 및 단위수량의 영향을 많이 받는 반면 응결지연제 첨가량의 영향이 감소하는 경향을 나타내고 있어 장기강도발현에 영향을 주는 요인은 단위시멘트량 및 단위수량임을 알 수 있었다.

(7) 본 실험에서는 재령에 따라 다소 차이는 있지만 단위시멘트량은 420kg/m^3 , 단위수량은 150kg/m^3 , 응결지연제는 단위시멘트량의 0.1~0.3%에서 최고강도수준임을 알 수 있었다.

향후, 초속경 콘크리트의 사용성을 높이기 위해서는 유동성의 개선, 초기수화열 억제, 내구성 등에 대한 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 정원경, “초속경시멘트를 이용한 라텍스 개질 콘크리트의 강도발현 및 투수특성”. 강원대학교 대학원, 2001. 2
2. 장세영, “초속경시멘트를 사용한 강섬유보강 콘크리트의 피로특성”. 강원 대학교 산업대학원, 1999. 8
3. (주)쌍용양회, ‘쌍용초속경시멘트 기술자료’
4. 한기성, 최상홀, 서일영, 한상목, “Studies on the Development of Super Rapid Hardening Cement”. 한국과학기술처 보고집, 1974
5. Mindess, S., Young, J.F., “Concrete” Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, p. 46~48
6. Ramachandran, V. S., Feldman, R. F. and Beaudoin, J.J., “Concrete Science”, Heyden & Son Ltd, 1981, p. 320~326
7. Hoff, G.C., et al, “Guide to Proportioning and Design of Jet Cement Concrete”, Central Research Lab, Onoda Cement Co., Ltd., Vol. 26, No. 91, 1974, p. 51~65
8. Jet Cement 기술자료집, Sumitoto Cement Co., Ltd

감사의 글

학문의 길로 조심스레 들어서는 출발점으로 여기며 대학원 생활을 시작한 지 어느덧 두 해가 흘렀습니다. 시작과 더불어 존재했던 많은 결실들이 지금은 한 점 아쉬운 마음으로 남아 있지만, 저와 제 논문의 미숙한 부분들을 부족하나마 잘 다듬을 수 있도록 많은 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 가득 담아 전하고자 합니다.

대학에 들어와 접해본 여러 학문 분야 중에 구조재료를 선택할 수 있도록 이끌어 주시고, 언제나 변함없는 관심과 질정으로 학문하는 자세를 보여주신 김명식 교수님께 머리숙여 큰 감사를 올립니다. 논문의 진행과 정에서 세심한 부분까지 신경을 써 주시고 부족함을 보완할 수 있도록 소중한 충고와 조언을 주신 김종수 교수님, 이종출 교수님께 깊이 감사드립니다. 아울러 학부시절부터 지도해 주신 토목공학과와 모든 교수님께도 감사드립니다.

부족함이 많은 후배를 늘 따뜻한 배려로 토닥거리 주시던 윤재범 선배님, 이상명 선배님 그리고 보다 나은 글이 되도록 살피주신 토목공학과 여러 선배님께도 감사의 마음을 전합니다. 논문의 시작부터 끝까지 자신의 일처럼 여기며 도와준 박세인, 정병훈 그리고 구조를 전공한 동기들, 특히 무더운 여름철에 논문실험을 별 무리 없이 진행할 수 있도록 도움을 준 건설재료실험실 동아리 후배들에게도 고마움을 전합니다.

논문을 준비하면서 바쁨을 핑계 삼아 연락도 자주 못했지만 너그러운 마음과 우정으로 지켜 보아준 친구들에게 미안한 마음과 아울러 감사드립니다.

끝으로, 보잘 것 없는 아들을 늘 자랑으로 여기시며 인내와 사랑으로 보살핌과 지원을 보내주신 부모님과, 멀리에서 따뜻한 정으로 함께 해준 매형, 누나에게 감사의 마음을 모아 이 작은 결실을 드립니다.