

碩士學位論文

거푸집 양생 조건에 따른 콘크리트의
압축강도 특성

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

沈 載 龍

2010年 2月

거푸집 양생 조건에 따른 콘크리트의 압축강도 특성

指導教授 朴 相 烈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010 年 2 月

濟州大學校 産業大學院
建設環境工學科 土木工學專攻

沈 載 龍

沈載龍의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

2010 年 2 月

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

Characteristics of Compressive Strength of Concrete in Form Curing Conditions

Jae-Yong Shim

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the
degree of Master of Engineering

2010. 2.

This thesis has been examined and approved

Master committee : Sang-Jin Kim, Prof. of Civil Engineering

Master committee : Dong-Wook Lee, Prof. of Civil Engineering

Master committee : Sang-Yeol Park, Prof. of Civil Engineering

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

- 목 차 -

표 목차
그림 목차
요 약 문

I. 서 론	1
1.1. 연구배경 및 목적	1
1.2. 연구내용 및 범위	3
1.2.1. 연구내용	3
1.2.2. 연구범위	3
II. 기존 연구 고찰	5
2.1. 수화반응의 이론적 고찰	5
2.1.1. 시멘트 화합물의 수화	5
2.1.2. 시멘트의 응결과 경화	10
2.2. 양생의 이론적 고찰	10
2.2.1. 양생의 목적	10
2.2.2. 강도 발현에 영향을 주는 양생 조건	11
2.2.3. 양생에 관한 기존 연구	14
2.3. 거푸집 탈형과 양생	17
2.3.1. 거푸집의 역할	17
2.3.2. 거푸집의 탈형시기 규정	17
2.4. 양생규정과 공사현장 관리에 이용되는 양생의 특성	19
2.4.1. 양생에 관한 콘크리트 시방서 규정	19
2.4.2. 공사현장 관리에 이용되는 양생의 특징	21
2.4.3. 콘크리트 압축강도 시험방법(KS F 2405) 규정	23
III. 실험 계획 및 방법	25
3.1. 실험개요	25
3.2. 시험체 제원	25
3.3. 시험변수 및 제작	25
3.3.1. 시험변수	26

3.3.2. 사용재료	27
3.4. 시험체 관리	30
3.5. 시험방법	33
3.5.1. 시험기기	33
3.5.2. 데이터 수집	34
IV. 시험결과 및 분석	36
4.1. 시험 결과	36
4.2. 시험 분석	38
4.2.1. 일반사항	38
4.2.2. 수조양생과 거푸집 탈형 시기가 다른 공시체의 비교	39
4.2.3. 기건 공시체로 압축강도를 추정할 경우의 결과분석	43
V. 결 론	45
VI. 참고문헌	47

표 목 차

표 2.1	포틀랜드 시멘트클링커의 조성 및 무게 비율	5
표 2.2	주요화합물의 수화반응 성질 요약	8
표 2.3	콘크리트의 압축강도를 시험할 경우	18
표 2.4	콘크리트의 압축강도를 시험하지 않을 경우	19
표 2.5	현장 양생방법과 특징	22
표 3.1	실험체 시험변수	26
표 3.2	공시체에 사용된 레디믹스 콘크리트의 물성치	28
표 3.3	양생 일자별 온도와 습도	32
표 3.4	만능 재료 시험기 제원	33
표 3.5	공시체의 형상 및 치수와 압축강도와의 관계	34
표 4.1	압축강도 측정 값	36
표 4.2	15 × 30 원주형 공시체 강도비로 환산	37
표 4.3	습윤 공시체와 기건 공시체의 강도 비교	44

그림 목 차

그림 1.1 콘크리트의 조성	1
그림 1.2 콘크리트의 타설 전경	2
그림 2.1 시멘트 주요 성분의 수화반응 속도	7
그림 2.2 포틀랜드시멘트의 수화발열 곡선	9
그림 2.3 상대습도가 콘크리트의 수분손실에 미치는 영향	12
그림 2.4 대기 및 콘크리트 온도가 콘크리트의 수분손실에 미치는 영향	12
그림 2.5 풍속이 수분에 미치는 영향	12
그림 2.6 콘크리트와 대기의 온도 차가 수분손실에 미치는 영향	12
그림 2.7 양생온도와 강도의 관계	13
그림 2.8 양생온도와 강도의 관계	13
그림 2.9 1.밀봉양생 조건과 공시체의 수축 측정 결과	15
그림 2.10 2.수중양생6일 후 기건양생 한 공시체의 수축 측정 결과	15
그림 2.11 3.기건양생 조건공시체의 수축 측정 결과	15
그림 2.12 4.밀봉양생 7일 후 기건양생한 공시체의 수축 측정 결과	15
그림 2.13 전기간 습윤양생과 탈형전 습윤양생 후 대기에 노출한 공시체의 비교	16
그림 3.1 사각 공시체 단면도	25
그림 3.2 거푸집 제작 전경	27
그림 3.3 타설 온도23℃~25℃, 상대습도 60%~65%	28
그림 3.4 실험용 공시체 콘크리트 타설 전경	29
그림 3.5 기건 양생 공시체 관리 전경	30
그림 3.6 수중양생 공시체 관리와 온도 체크 전경	31
그림 3.7 공시체 모따기 처리	31
그림 3.8 만능 재료 시험기	33
그림 3.9 압축강도 측정을 위한 시험체 설치 전경	34
그림 3.10 압축강도 측정 및 공시체 파괴	35
그림 4.1 변수별 압축강도 측정	38
그림 4.2 수조 양생과 12시간 후 탈형 한 공시체의 강도 발현	39
그림 4.3 수조 양생 기준 12시간 후 탈형 한 공시체의 강도 비교	40
그림 4.4 수조 양생과 3일 후 탈형 한 공시체의 강도 발현	40
그림 4.5 수조 양생 기준 3일 후 탈형 공시체의 강도 비교	41
그림 4.6 수조 양생과 7일 후 탈형 한 공시체의 강도 발현	41
그림 4.7 수조 양생 기준 7일 후 탈형 공시체의 강도 비교	42
그림 4.8 수조 양생과 28일 후 탈형 한 공시체의 강도 발현	42
그림 4.9 수조 양생 기준 28일 후 탈형 공시체의 강도 비교	43
그림 4.10 습윤, 기건 공시체 강도 측정 및 내부 포화 상태 확인	44

요 약 문

콘크리트의 압축강도는 수화반응에 의해 발현되며, 양생방법 및 양생조건은 콘크리트의 강도 발현에 대단히 중요한 영향을 미친다. 공사현장에서는 공기부족, 시공여건 및 기타 사유로 거푸집을 조기 탈형하거나, 양생 규정을 무시하기도 한다. 이는 콘크리트 구조체의 강도 뿐 아니라 내구성에도 악 영향을 줄 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 콘크리트 타설 후 열악한 환경에 노출 시킨(기중 봉함 후 대기 노출) 공시체의 단, 장기 강도 특성을 파악하기 위해 수조 양생한 공시체의 압축강도와 거푸집 탈형 시기만(12시간, 3일, 7일, 28일) 달리하여 비교한 결과 압축강도의 발현은 수조양생 > 28일 탈형 대기노출 > 7일 탈형 대기노출 > 3일 탈형 대기노출 > 12시간 후 거푸집 탈형 대기노출 순이며 수조양생 28일 강도의 93%, 86%, 81%, 64%이었고, 90일 강도는 더 많은 차이를 보였다. 이것은 거푸집을 빨리 탈형한 공시체 일수록 내부 수분의 증발이 빨라 수화반응이 둔화하여 강도발현이 어려운 것이고, 거푸집을 장기 존치하여도 내부 수분의 한계로 인하여 더 이상 강도발현을 하지 않는 것으로 판단되었다. 거푸집의 존치는 장기적일수록 강도 발현에 도움이 되나, 구조체의 중요성에 따라 탈형 시기를 결정 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트는 필러(filler)와 바인더(binder)로 구성된 혼합물이다. 바인더(cement paste)는 필러를 함께 “접착하여” 집성체를 형성하는데, 바인더로 사용되는 요소는 시멘트와 물이며, 필러의 소요는 세골재(fine aggregate) 혹은 조골재(coarse aggregate)로 시멘트와 물의 수화 반응에 의하여 응결, 경화 되는 특성을 가지고 있다. 콘크리트의 조성은 아래 그림 1.1과 같으며 골재(70%) 시멘트(10%) 물(15%) 공극(5%)으로 이루어 졌다.

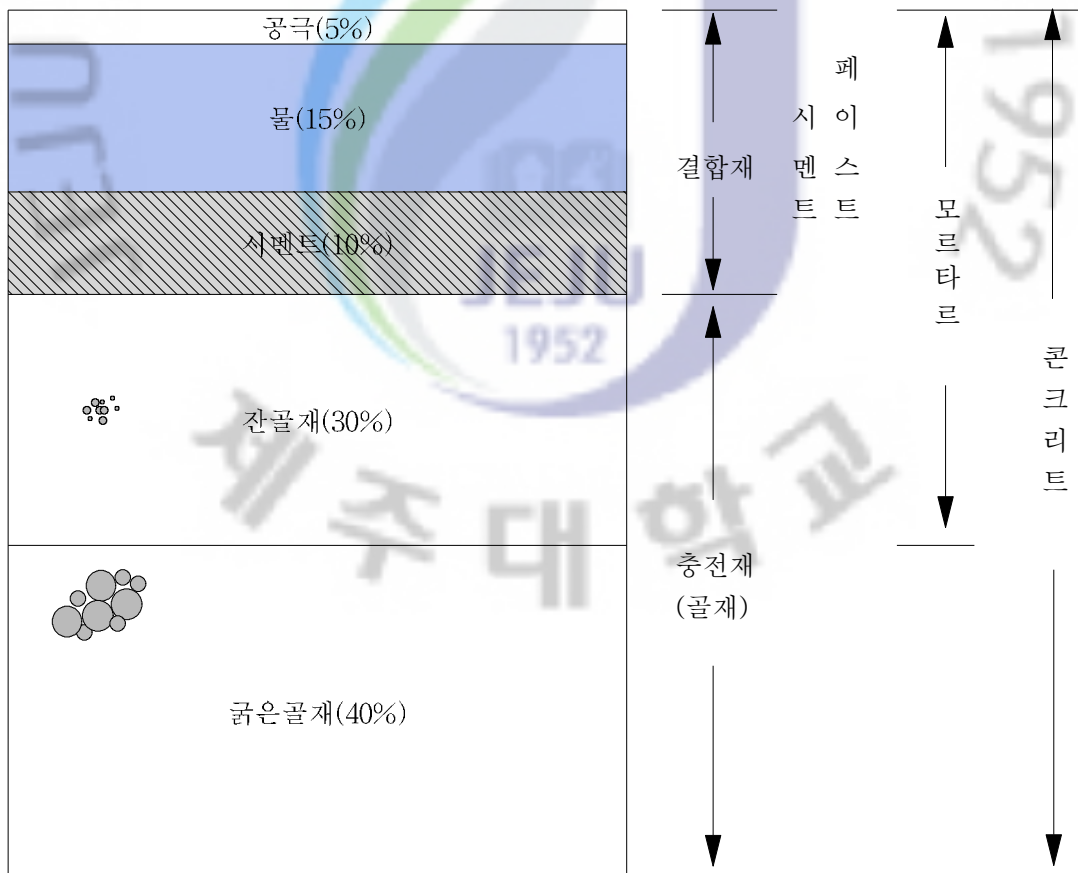


그림 1.1 콘크리트의 조성

질 좋은 콘크리트를 만들려면 사용재료(시멘트, 골재, 물 등)는 콘크리트의 성질, 품질에 영향을 미치므로 재료의 선정 시 충분한 고려가 필요하며, 각 재료를 설계 비율에 맞게 배합(물시멘트비, 단위시멘트량 등)하여야 강도 이외에 내구성, 시공성이 좋아져 좋은 콘크리트의 여건을 갖출 수 있다. 최근 레미콘이나 콘크리트 펌프공법이 보급됨에 따라 콘크리트 공사가 분업화되어, 콘크리트 제조업자 외에는 사용 재료와 배합설계를 충분히 이해하지 못한 채 사용하고 있는 것이 현실이다. 그림 1.2는 레미콘 제조회사에서 생산한 생콘크리트를 레미콘차로 운송하여 여러 가지 방법으로 콘크리트를 타설하는 전경이다.



그림 1.2 콘크리트 타설 전경

물론 우리나라에서 생산되는 시멘트의 경우 석회석은 CaCO_3 함량이 85% 이상, MgO 함량이 3% 이하의 좋은 품질이며 레미콘을 생산하는 제조업체의 품질 또한 상당히 좋은 편이지만 각 재료의 성질과 콘크리트의 특성을 충분히 이해하고 있어야 취급, 타설 및 양생이 올바르게 행하여져서 콘크리트의 특성을 최적화할 수 있을 것이다. 시멘트는 수경성 무기질 바인더이며 충분한 수화반응을 촉진시키기 위한 조치로써 좋은 콘크리트를 얻기 위해서는 배합 설계된 콘크리트를 타설한 후 경화의 초기단계에 적절한 환경 즉 습도, 온도, 풍량 등에 의해 피해 받지 않도록 보호 양생하여야 물로 채워져 있던 공간이 시멘트의 수화 생성물로 소요의 정도로 채워져 수축균열을 적게 하고 강도도 충분히 발현할 수 있을

것이다. 콘크리트가 굳을 때의 강도는 물시멘트비(W/C)에 의하여 지배되며, 이 비가 작은 만큼 경화체의 강도는 커진다. 물시멘트비가 작은 콘크리트를 만들었다 하더라도 습도나 온도의 조건 즉 양생 조건이 부적당 하다면, 원하는 강도나 내구성을 갖는 콘크리트를 얻을 수 없을 것이다. 콘크리트의 생명은 타설 후 양생에 있다 하여도 과언이 아니지만, 현장에서는 아직도 공사기간의 문제나 인식부족으로 타설 후 후속 조치에 미온적이며 심지어는 경화 초기 단계에서 조금하게 거푸집을 탈형하여 구조물에 악영향을 주고 있는바, 콘크리트 타설 후 P.E필름으로 봉함(콘크리트 표면으로 발산되는 수분을 막기 위한 조치)한 공시체를 거푸집 탈형 후 기건 상태로 실험실에서 관리한 콘크리트 공시체와 습윤 양생한 콘크리트 공시체는 과연 압축 강도에서 얼마의 차이를 보이는지를 알아보고 양생 조건을 달리한 구조체의 강도 발현에 대하여 비교하여 현장의 콘크리트 품질관리에 필요한 자료를 제공하고자 이 연구를 수행 하였다.

1.2 연구내용 및 범위

1.2.1 연구내용

본 연구는 거푸집 탈형 시기와 양생 조건이 콘크리트의 압축 강도에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 시험체를 만들어서 습윤 양생 조건과 기건 양생 조건으로 나누고 기건 양생인 경우 내부에서 거푸집 탈형 전까지는 P.E필름으로 상부를 봉함하여 콘크리트 자체 습기가 대기로 증발하는 것을 막아 주도록 관리하다가 거푸집 탈형 후 대기에 노출하여 습윤 양생한 공시체와 봉함 후 대기에 노출한 공시체의 상대적인 강도를 비교하고, 설계 강도와는 어떤 차이를 보이는지 분석하였다.

1.2.2 연구범위

본 연구의 수행은 콘크리트 강도 변화에 가장 큰 영향을 주는 양생인자인 온도, 습도, 바람, 햇빛 등의 기상상태를 감안하여 습윤 양생인 경우는 수조에서 온도 제어 양생을 실시하여 압축강도 측정의 표준으로 삼았고, 기건 상태로 노출한 공시체의 경우는 데이터 수집의 편차와 변수를 줄이기 위해 거푸집 탈형 전까지 P.E필름으로 봉합하여 수분 증발에 의한 건조를 방지하고 바람과 직사광선은 차단된 실내에서 관리하여 빛과 바람에 의한 영향은 최소화 시켰으며 온도나 습도의 경우는 사실상 조절하기가 어려웠으나 전형적 가을 날씨의 형태를 보여 온도는 $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 범위에서 습도는 35% ~ 80% 범위 내에서 관리되어 특수 환경 조건인 서중이나 한중 콘크리트의 조건 이내로 강도 발현에 비교적 좋은 환경적 조건이 형성 되어 실험 범위에서 서중과 한중 콘크리트의 경우를 배제 시켰다. 콘크리트의 강도는 압축, 인장, 휨, 전단, 부작, 피로 등 여러 가지항목이 있으나 압축강도가 제일 크고 부재 설계 시 가장 유효하게 사용되며 시험방법도 간단한 편이어서 본 시험에서는 압축강도만 분석하는 것으로 제한, 콘크리트의 균열 발생에 대한 내용도 본 연구에서는 제외 하였다. 그리고 압축 강도를 측정하기 위하여 만든 공시체는 우리나라에서 표준으로 삼고 있는 원주형 공시체(15×30)가 아닌 영국에서 표준으로 삼고 있는 정육면체인 사각($15 \times 15 \times 15$) 공시체를 사용하였다. 실험을 하기 위하여 만드는 시편이 너무 많아 동시 제작의 한계가 있어 사각 공시체로 정하여 실험하였다.

2. 기존 연구의 고찰

2.1 수화반응의 이론적 고찰

2.1.1 시멘트 화합물의 수화(hydration)

시멘트는 물과 반응하여 수화물을 생성하고 응결, 경화한다. 그러므로 수화와 경화는 밀접한 관계가 있다. 시멘트의 주성분은 C(석회:CaO), A(알루미나:Al₂O₃), S(실리카:SiO₂), F(산화철:Fe₂O₃)의 4가지 성분의 조합에 의한 C₃S(규산삼석회), C₂S(규산이석회), C₃A(알루미늄산삼석회), C₄AF(철화합물)로 구성된다.

표 2.1은 포틀랜드 시멘트클링커의 조성과 무게 비율표이다.

표 2.1 포틀랜드 시멘트클링커의 조성 및 무게 비율

시멘트클링커 조성 (Cement Compound)	무게비율(Weight Percentage)	주요화학조성
알라이트(alite) 주요성분:규산삼석회(C ₃ S)	50%	3CaO.SiO ₂ Tricalcium silicate
벨라이트(belite) 주요성분:규산이석회(C ₂ S)	26%	2CaO.SiO ₂ Dicalcium silicate
알루미네이트(aluminate) 주요성분:알루미늄산삼석회(C ₃ A)	9%	3CaO.Al ₂ O ₃ Tricalcium aluminate
페라이트(ferrite) 주요성분:철화합물(C ₄ AF)	9%	4CAO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ Tettricalcium aluminoferrite
석고(Gypsum)	3 ~ 5%	CaSO ₂ .2H ₂ O Gypsum

시멘트는 콘크리트를 만드는데 쓰이는 한 요소이나 물과 직접적 반응을 하여 위 표의 시멘트클링커들을 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이나 규산칼슘 수화물(C-S-H),

에트링가이트, 칼슘페라이트 등의 수화물을 생성하고 응결, 경화 하는 것을 수화반응이라 하는데, 여기에 사용 되어지는 물은 콘크리트를 약화시키거나 수화를 방해하는 불순물이 없어야 하며 너무 많아서도 너무 적어서도 곤란하다. 물이 많으면 결합수가 많아지고 시멘트 겔의 체적도 커져 그만큼 치밀한 구조체가 얻어지기 어려워 콘크리트의 강도가 감소되는 반면, 너무 적으면 유동성(workability)이 없어서 여러 가지 형태(옹벽, 교량, 댐 등)로 만들기가 어렵기 때문이다. 콘크리트는 강하며(strong) 동시에 유동성이 있어야 하기 때문에 물시멘트비를 주의 깊게 맞출 필요가 있다. 콘크리트의 강도는 배합과 양생 조건이 일정할 경우 물시멘트비에 반비례하며, 일반적인 수화반응 속도는 물비가 높은 만큼 시멘트 입자가 작은 만큼, 온도가 높은 만큼 크다. 또한 시멘트 화합물도 순수한 화합물이 아니라, 약간의 다른 성분과 결합하여 이들의 수화반응은 더욱 복잡하고 수화속도도 큰 영향을 받는다. 시멘트클링커는 반응하여 수화물을 생성하는데, 각 클링커들의 수화 반응에 따른 강도 발현 과정과 양생이 강도 및 내구성에 어떠한 영향을 미치는지 간략하게 설명하면 다음과 같다.

1) 알라이트(alite)의 수화

시멘트 화합물 중에서 가장 많은 것으로 물과 반응하여 아래와 같이 화학 조성이 변하며 초기(7일) 강도에 영향을 준다. 수화반응 속도는 그림 2.1이며 알루미늄이트 > 알라이트 > 페라이트 > 벨라이트 순이다.

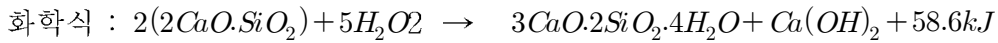
규산삼석회(C_3S) + 물 \rightarrow 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)+규산칼슘수화물(C-S-H)+열(heat)

화학식 : $2(3CaO.SiO_2)+7H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.4H_2O+3Ca(OH)_2+173.6kJ$

2) 벨라이트(belite)의 수화

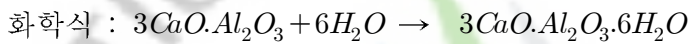
벨라이트의 주요성인 규산이석회(C_2S)는 대부분 β 형으로, 시멘트의 구성화합물 중 수화가 가장 느리다. 콘크리트의 장기 강도에 영향을 주며 생성 물질은 알라이트와 같다.

규산이석회(C_2S)+물 \rightarrow 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)+규산칼슘수화물(C-S-H)+열(heat)



3) 알루미네이트(aluminate)의 수화

알루미네이트의 주성분인 알루미늄산삼석회(C_3A)는 수화가 가장 빠르며, 석고가 존재하면 에트링가이트가 되고, 석고가 소비되고 나면 고허산염형인 에트링가이트와 C_3A 가 반응하여 저황산염형의 수화물이 된다. 만약 석고가 없다면 물과 빠른 반응으로 급결을 일으키므로, 적당량의 석고를 가하여 C_3A 와 물과의 반응을 조절한다.

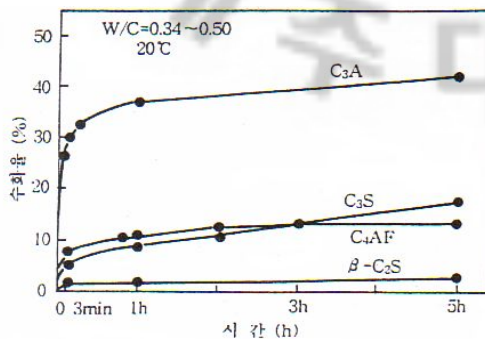


2.1.1.1 페라이트(ferrite)의 수화

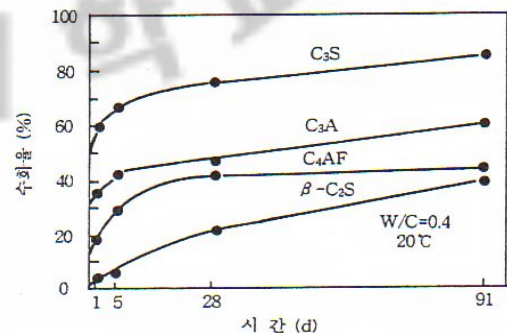
철 함량이 높을수록 반응은 느리다. 물과 반응하면 C_3AH_6 와 C_3FH_6 의 고용체 $C_3(CF)H_6$ 와 겔상의 칼슘페라이트 수화물이 생성된다. 표 2.2는 주요 화합물의 수화 반응에 따른 성질을 요약하여 보여 주고 있다.

4) 석고의 역할

일반적으로 포틀랜드시멘트의 응결을 늦추기 위해서는 C_3A 전부를 에트링가이트로 바꿔줄 필요가 있다. 수화 2 ~ 5시간 후에 시작하는 알라이트 등의 본격적인 수화 개시까지 계속 유지하면 좋다. 포틀랜드시멘트중 C_3A 는 8 ~ 9% 이므로 석고 첨가량은 SO_3 로서 1.8 ~ 2.0%, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 로서 3.8 ~ 4.3% 이면 충분하다. 포틀랜드시멘트에 첨가하는 석고는 응결을 지연시키는 것뿐만이 아니라 단기 강도를 높이고, 건조수축을 감소시키고, 화학적 저항성을 향상시키는 등의 효과가 있다.



(1) 수화반응 속도



(2) 수화반응 속도

그림 2.1 시멘트 주요 성분의 수화반응 속도

표 2.2 주요화합물의 수화반응 성질 요약

	알라이트 (alite)	벨라이트 (belite)	알루미네이트 (aluminate)	페라이트 (ferrite)
주요 화학조성	규산삼석회 (C_3S)	규산이석회 (C_2S)	알루미늄산삼석회 (C_3A)	철화합물 (C_4AF)
수화반응속도	빠름(수시간)	느림(수주간)	순간적	보통(수시간)
강도발현속도	빠름(수일)	느림(수주간)	아주빠름(1일)	보통(수일)
최종 강도	大	大	小	小
수화열	120cal/g	60cal/g	200cal/g	100cal/g
건조수축	中	小	大	小
화학적 저항력	中	大	小	大

5) 수화열(heat of hydration)과 수화 단계

시멘트의 수화에서는 열이 발산된다. 수화과정에서 화학적인 결합이 이루어지고 파괴되기 때문이다. 수화열은 시멘트가 응결, 경화하는 과정에서 발열하며 발열량은 시멘트의 종류, 화학조성, 분말도, 물시멘트비 등에 의하여 달라진다. 시멘트가 물과 반응하면 125cal/g 정도의 열이 발생한다. 이 수화열은 콘크리트 내부의 온도를 상승 시키므로 한중콘크리트 공사에 유효하지만 댐이나 매스 콘크리트 같이 단면이 큰 구조의 경우는 온도가 크게 상승하여 초기 경화가 끝나 냉각되면 내외의 온도차에 의하여 균열 발생의 원인이 된다. 그림 2.2은 수화 중 시멘트의 발열을 나타내고 있다.

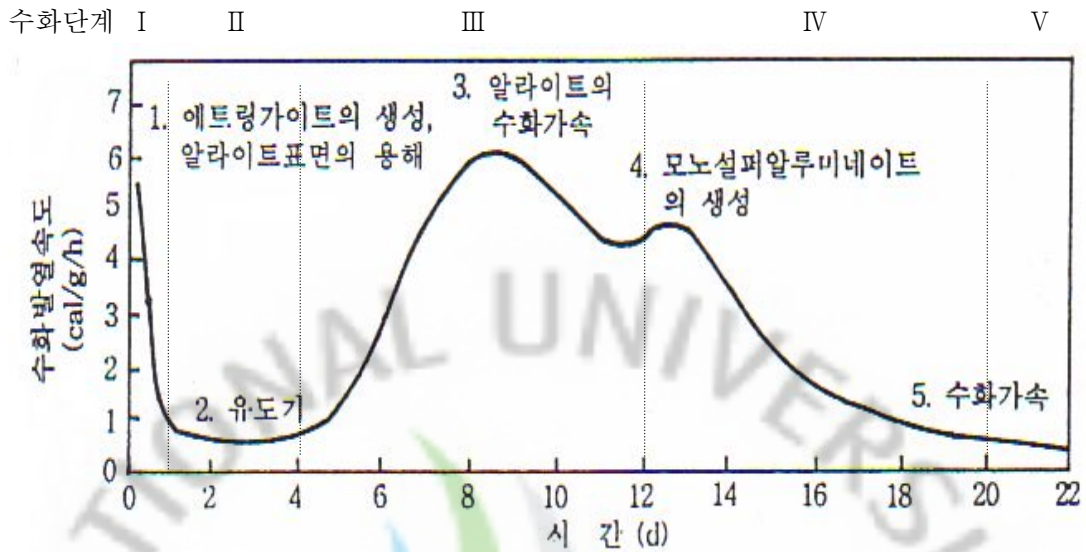


그림 2.2 포틀랜드시멘트의 수화발열 곡선

수화 초기 예리한 발열 피크는 가수분해가 일어나고 먼저 물에 용해된 석고가 클링커 광물 중에서 가장 활성이 큰 알루미네이트(aluminate)와 반응하여 생성된 에트링가이트의 생성열 및 알라이트(alite)의 표면 용해열에 원인이 있다고 알려져 있다. 만약 시멘트 중 Free - CaO가 있다면 그에 따른 수화열은 더 많아 질 것이다. 제 1 피크에서 제 2 피크 사이의 2 ~ 4시간은 유도기 또는 휴면기(dormancy period)로서 알루미네이트(aluminate) 입자 주위에 에트링가이트에 의해 덮여지고, 알라이트(alite) 주위에는 불용성의 규산칼슘수화물(C-S-H) 막으로 인해 덮여져 각각의 수화 반응을 억제하여 열의 발산도 현저하게 줄어든다. 액상 중에 Na^+ , K^+ 농도가 높아지면 제 2 피크의 시기가 앞당겨져 유도기가 짧아지는 경향이 있다. 제 2 피크는 덮여 있는 규산칼슘수화물(C-S-H) 막이 내부에서의 침투압 때문에 팽창 파괴되어 알라이트(alite)의 수화가 다시 활발해지는 시기이다. 제 3 피크는 알루미네이트 입자 둘레의 에트링가이트 막이 결정 팽창압으로 파괴되어, 다시 내부의 C_3A 가 수화를 시작하고 석고가 부족해 육각판상의 모노설퍼이트로 변화하는 동안의 발열이다. 수화의 단계는 I, II의 유도기, III의 가속기, IV, V의 감속기로 나누어 진다. 콘크리트는 초기 I, II 유도기에 응결(setting)하는데, I는 시작이고 II는 그 말기이다. III, IV의 단계에서 콘크리트가 굳기 시작하고, 주로 규산삼

석회(Tricalcium silicate)의 수화 때문에 열의 발산이 증가한다. 단계 V는 36시간 후에 도달하는데, 수화물(hydrate products)이 느리게 형성되며, 이것은 물과 미수화된 silicates가 존재하는 한 계속된다. 이들 단계의 길이는 시멘트의 종류, 조성, 입자크기, 물시멘트비 및 양생조건에 따라 크게 다르고, 강도 발현에 많은 영향을 미친다.

2.1.2 시멘트의 응결과 경화

콘크리트가 굳을 때의 강도는 물시멘트비(W/C)에 의해 지배되며, 그 비가 작은 만큼 경화체의 강도는 커진다. 포틀랜드시멘트가 완전히 수화했을 때의 수분은 결합수가 25%, 겔(Gel)공극 중에 포함된 수분이 15%로 전체 40% 정도로 알려져 있다. 타설 직 후 콘크리트는 물기가 많고 유동성이 큰 상태에서 표면에 물기가 없어지면서 유동성도 없어지고 고체 상태로 변한다. 이 변화의 과정을 「응결」이라고 하고 그 이후의 강도발현 과정을 「경화」과정이라 한다. 그리고 그러한 응결과 과정에서 대략 3일 정도까지를 초기재령이라 한다. 이 초기재령 동안에 콘크리트는 블리딩, 침하, 용적변화(수축), 및 수화발열에 따른 온도상승도 나타난다. 이러한 초기 재령에서의 각종 현상은 경화 후 콘크리트의 장기적 물성 즉 강도, 수밀성, 내구성 등에 큰 영향을 미치므로 충분한 주의가 필요하다. 경화페이스트에서 겔 사이의 공극 중에 있는 수분은 제오라이트수(결정수)로 증발하기는 어려우나 모세관 공간 중에 수분은 건조에 의해 저감되어 건조수축율을 높여 균열이 발생하거나 강도 발현에도 영향을 미친다.

2.2 양생의 이론적 고찰

2.2.1 양생의 목적

양생(보양)이란 콘크리트의 수화작용을 촉진시키는 조치이다. 굳지 않은 생콘크리트(fresh concrete) 상태에서 수화 생성물 사이의 공극이 물로 차있다고 가정하고(모세관수) 모세관(액체)이동이 계속되어 수화가 진행됨에 따라 그 공극을 수화 생성물로 가득 채울 수 있도록 적당한 온도를 유지하면서 정지(靜置)하고, 마르지 않도록 습윤상태를 유지하는 조치이다. 공극 재료내의 수분의 역할은 수화물 안에서 화학적으로 결합하거나 겔공극 안에 고정되고, 점차 수화열에 의하여 낮은 온도 쪽의 미수화 시멘트입자를 혼합하여 수화를 진행시킨다. 모세관수는 서로 사슬처럼 연결되어 있으므로 건조 등에 의해 이 사슬이 끊어지면 미수화 시멘트입자는 물에 접할 수 없게 되어 더 이상 수화는 진행될 수 없게 된다. 따라서 소기의 목적대로 콘크리트의 성질이 발현될 수 있도록 내부의 공극을 최소화 하므로써 충분한 수화가 이루어질 수 있도록 조치하는 것이 양생의 목적이라 하겠다.

2.2.2 강도 발현에 영향을 주는 양생 조건

특수한 경우가 아니라면 콘크리트에 사용되는 골재는 시멘트페이스트보다 강하다. 그러므로 콘크리트의 강도는 시멘트페이스트가 좌우하게 되며 이는 시멘트의 수화작용에 관계 된다. 특히 초기 양생조건은 강도에 큰 영향을 미치므로 대단히 중요하며 중요 양생인자는 습도, 온도, 재령 등이다.

1) 강도에 영향을 미치는 습도

콘크리트 양생 시 습윤 상태로 유지시키는 것은 자유수의 건조를 막는 것과 동시에 수화에 필요한 물을 공급하는데 목적이 있다. 건조되지 않도록 봉함하여 두는 경우 구조체 내부의 자유수가 사용되어 강도는 조금 늘지만, 그만큼 내부가 건조한 상태가 되므로 한계가 있다. 상대습도 100% 인 경우 표면장력에 의하여 큰 모세관 공극 속에 갇혀 있는 자유수가 페이스트로 확산되어 수화가 계속 된다. 그러나 상대습도가 낮으면 공극 중에 모세관수가 없어지고, 모세관 사슬이 끊겨 물흐름을 방해한다. 만약 상대습도가 80% 이하로 떨어지면 시멘트는 수화를 중단할 것이고, 미수화된 결정이 구조체 내에 많이 존재할 수록 그 구조체의 강도 발

현은 더 이상 기대하기 어려울 것 이다. 상대습도는 초기재령에서 강도증진에 가장 큰 영향력을 가진다. 그러므로 초기에 햇빛과 바람, 높은 온도에 의해 콘크리트가 수분손실을 받지 않도록 조치하여야 한다. 기건 상태에서 양생하다가 습윤 상태로 다시 두면 어느 정도 강도를 회복하지만 콘크리트 타설 직 후 콘크리트를 방치하면 수분이 빠져나가 유효 물시멘트비가 작아지고 계속 방치하면 수분 손실의 진행으로 최상의 양생은 기대할 수 없다. 아래의 그림2.3 ~ 2.6은 수분손실의 영향을 그래프로 보여준 것이다.

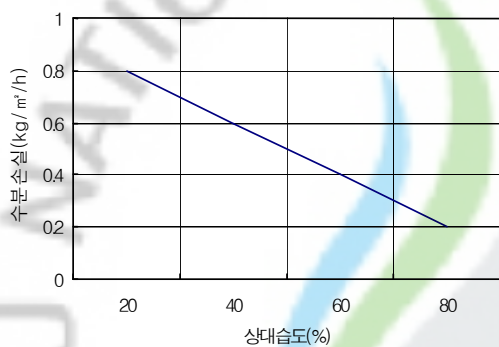


그림 2.3 상대습도가 콘크리트의 수분손실에 미치는 영향

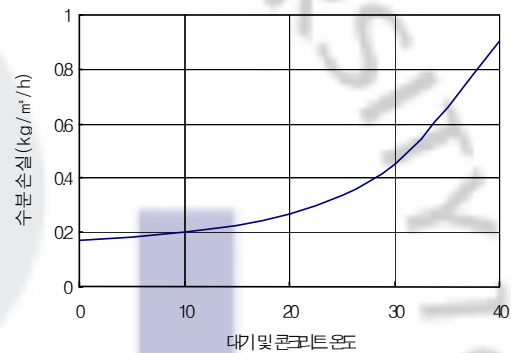


그림 2.4 대기 및 콘크리트 온도가 콘크리트의 수분손실에 미치는 영향

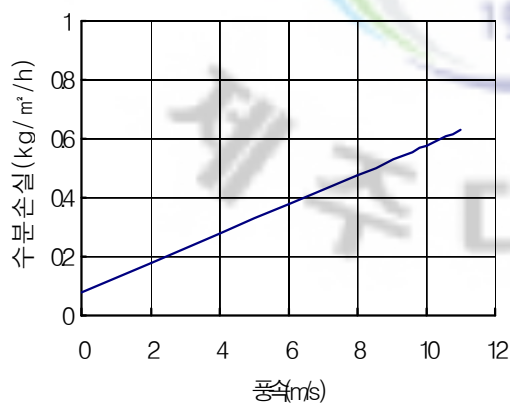


그림 2.5 풍속이 수분에 미치는 영향

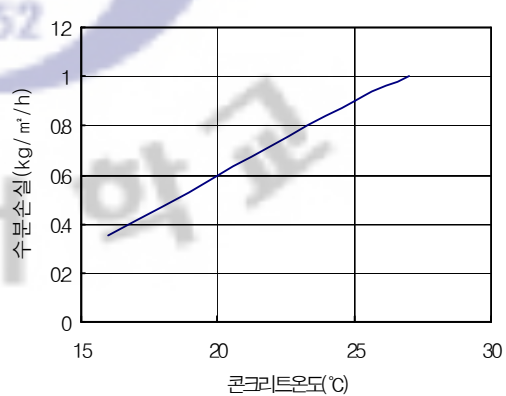


그림 2.6 콘크리트와 대기의 온도 차가 수분손실에 미치는 영향

2) 강도에 영향을 미치는 온도와 재령

콘크리트의 수화반응은 저온일수록 반응 속도가 늦어지고 고온일수록 빨라져 재령 28일까지는 강도가 높게 나타난다. 그러나 그 이후는 양생온도가 높으면 강도가 오히려 낮아지는 경향을 보인다. 그림 2.7과 그림 2.8은 양생온도와 압축강도의 관계를 Mc. Danie가 실험에 의해 결과를 작성한 그래프이다.

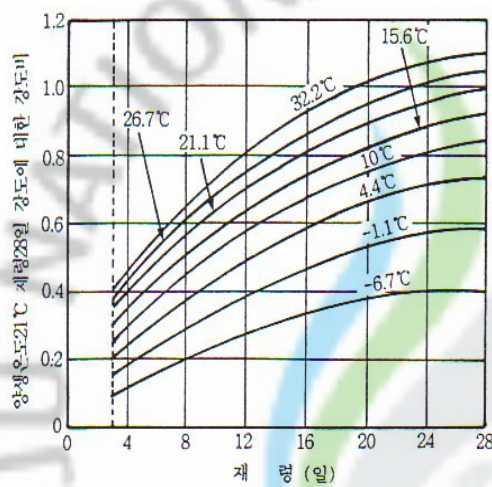


그림 2.7 양생온도와 강도의 관계

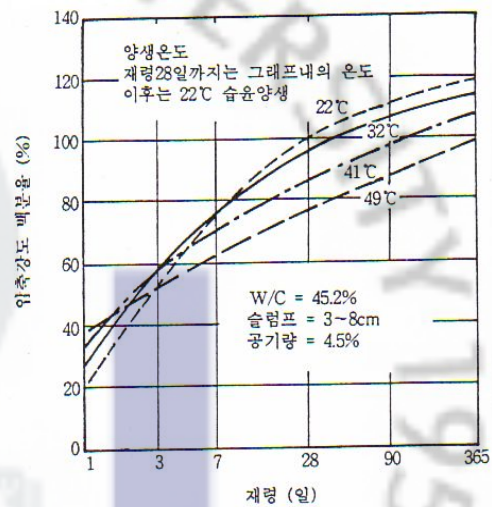


그림 2.8 양생온도와 강도의 관계

콘크리트 강도에 영향을 주는 온도 못지않게 중요한 요소가 재령이다. 강도를 재령과 온도와의 함수로써 표시한 총화를 적산온도라고하여 콘크리트 표준 시방서에서는 다음 식으로 표시되어 있다.

$$M = \sum_0^t (\Theta + A) \Delta t$$

여기서, M : 적산온도(°D · D(일(day))과 °C · D)

Θ : Δt 시간중의 콘크리트의 일평균 양생온도(°C)

A : 정수로서 일반적으로 10°C가 사용된다.

Δt : 시간(일(day))

이 공식은 -10°C 이하의 온도에서는 강도증진이 일어나지 않는다는 가정하에

만든 것으로 양생온도별 강도 증진 상태를 추정할 수 있다. 양생온도가 4℃ 이하가 되면 강도의 증진이 급속히 둔화되므로 거푸집의 존치기간은 양생과 더불어 중요한 의미를 갖게 된다.

2.2.3 양생에 관한 기존 연구

박승완(2009)은 구조체의 내부 환경 조건을 양생 조건으로 적용한 양생방법을 적용하여 고강도콘크리트의 강도 발현 특성을 파악하여 구조체 콘크리트의 강도에 가장 근접하는 공시체 양생방법을 제안 한 실험에서 양생 방법과 환경조건에 따라 압축강도 발현에 차이를 보이고 그 차이는 표준수중양생 > 기중봉함양생, 구조체 온도 봉함양생 > 기중양생의 순이며 구조체 온도 봉함 양생이 구조체의 압축강도를 추정하기 위한 방안으로 다른 양생방법에 비하여 정확한 시험 방법으로 판단하였다.

이건철(2009)의 연구 논문에서는 콘크리트는 타설 후 양생 방법의 소홀로 인해 콘크리트가 직사광선, 통풍 등의 환경조건에 노출 될 경우 수축 균열 강도 저하 내구성 등의 피해를 초래할 수 있어 이러한 점에 초점을 두어 양생 방법의 종류가 시멘트모르타르의 습기 유지 특성에 미치는 영향에 대하여 검토 한 실험 결과 시트 양생의 경우 습기유지 성능이 우수하며, 피막 양생은 초기 습기 유지 성능은 우수하나 장기 성능은 감소하는 것으로 나타나 도포 방법의 변화 등 다양한 검토가 필요하다고 언급하였다.

박대오(2008)의 연구에서는 콘크리트의 타설 초기 온도를 달리하여 재령에 따른 콘크리트의 압축강도 및 SEM 관찰을 통하여 타설 초기온도에 따른 콘크리트 특성에 대한 품질관리의 기초적 자료를 콘크리트 배합시 5℃의 콘크리트를 제조하기 위하여 재료를 냉장보관하고, 20℃의 콘크리트를 제조하기 위하여 일정 온도의 온수를 사용하여, 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 및 응결시험을 굳은 콘크리트에서는 타설 초기온도 및 양생온도에 따른 압축강도를 재령1, 2, 3, 7, 14, 28일에 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 표준 양생시 재령3일 이전에는 콘크리트의 타설 초기 온도가 높은 배합의 압축강도가 높게 나타났으며 재령3일

에서 14일까지는 콘크리트의 온도가 낮은 배합의 압축강도가 높게 나타났다 재령 28일에서는 타설 초기온도에 따른 압축강도의 차가 미미한 것으로 나타나 양호한 양생조건에 서는 타설시의 온도에 의한 영향이 작은 것으로 확인되었다 그러나 기건 양생시에는 모든 재령에서 콘크리트의 타설 초기 온도가 5℃인 배합보다 20℃인 배합이 높은 강도를 나타내 타설시의 온도에 의한 영향이 큰 것으로 확인 되었다. SEM 관찰 결과 콘크리트의 타설 초기온도가 낮은 배합이 3일에서는 수화상들이 다소 적었으나 7일 이후에서는 초기 콘크리트 온도가 높은 배합보다 다 량 분포하는 것을 확인할 수 있었으며, 28일 이후에서는 초기 콘크리트의 온도에 따른 수화상들의 양에 큰 차이가 없음을 확인하였다.

이광명(2006)의 논문은 다양한 양생 조건 하에서의 콘크리트체적 변화에 대한 이해를 돕고 적절한 양생 방법에 의한 콘크리트의 전체 수축 감소 방안으로 서로 다른 4가지의 양생조건을 정하여 각각의 양생 조건이 콘크리트의 체적 변화에 미치는 영향을 실험적으로 조사 실시하여 아래와 같은 그래프와 결과를 얻었다.

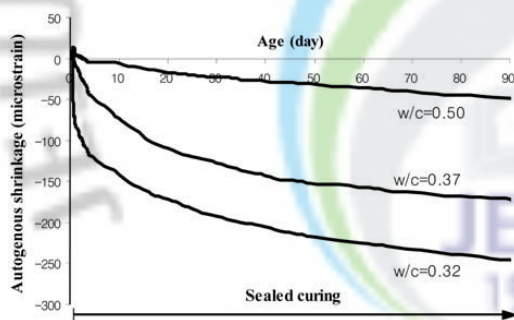


그림 2.9 I. 밀봉양생 조건
공시체의 수축 측정 결과

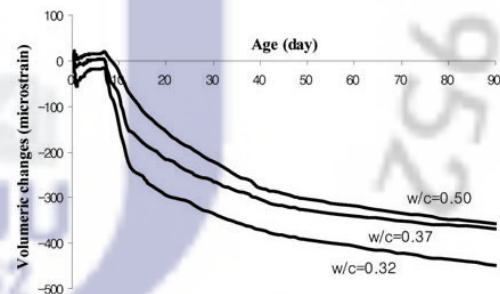


그림 2.10 II. 수중양생 6일 후
기건양생 한 공시체의 수축 측정 결과

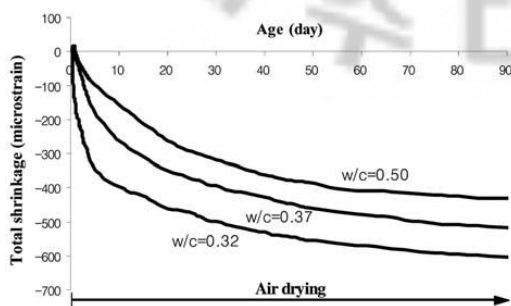


그림 2.11 III. 기건양생 조건
공시체의 수축 측정 결과

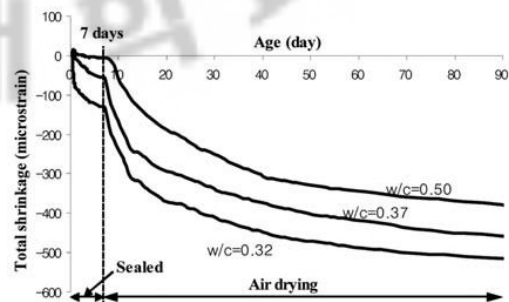


그림 2.12 IV. 밀봉양생 7일 후
기건양생한 공시체의 수축 측정 결과

W/C가 0.50인 콘크리트의 경우에는 재령 90일에서 전체 수축(양생 조건 III 기준)의 약 89% 정도가 건조수축임에 반해, W/C가 0.37, 0.32인 콘크리트의 경우에는 건조수축의 비율이 크게 감소하여 각각 67%, 59% 정도로 나타났다. W/C가 낮은 고강도 콘크리트의 경우, 수분 증발을 허용한 양생 방법 III에 비해 재령 초기에 6일간 수중 양생을 통하여 외부로부터 계속해서 수분이 공급된 양생 방법 II에서는 재령 90일을 기준으로 약 26 ~ 28% 정도의 전체수축이 감소하였고, 콘크리트를 일정 기간 밀봉하여 수분의 증발을 억제한 양생방법 IV에서는 약 12 ~ 15% 정도의 콘크리트의 전체수축이 감소하였으며, 수축 저감에는 양생방법 II가 가장 유리하게 나타났다. 전체 수축을 줄여 균열 발생 가능성을 낮추기 위해서는 타설 후 가능한 한 이른 시간 내에 습윤 양생을 실시하거나 최소한 수분 증발로부터 콘크리트를 보호해야 한다고 언급하였다.

그림 2.13은 ACI(1983) 위원회 보고자료 중 습윤양생한 콘크리트와 기건양생한 콘크리트를 비교한 그래프이다. 이 그래프에서 탈형 전까지(1, 3, 7일) 습윤상태로 관리하다가 대기에 노출시켜 단기 강도인 3일, 7일과 장기강도인 28일, 90일, 180일의 압축강도를 측정한 그래프 곡선으로 거푸집을 탈형하여 대기에 노출시키면 짧은 기간 안에 수화반응의 진행이 둔화되면서 상승하던 그래프 곡선이 거의 수평상태로 변하는 과정을 볼 수 있다. 반면 습윤양생조건을 계속 유지해 주면 장기적으로 갈수록 곡선의 기울기는 완만하지만 계속해서 증가하는 있음을 보여준다.

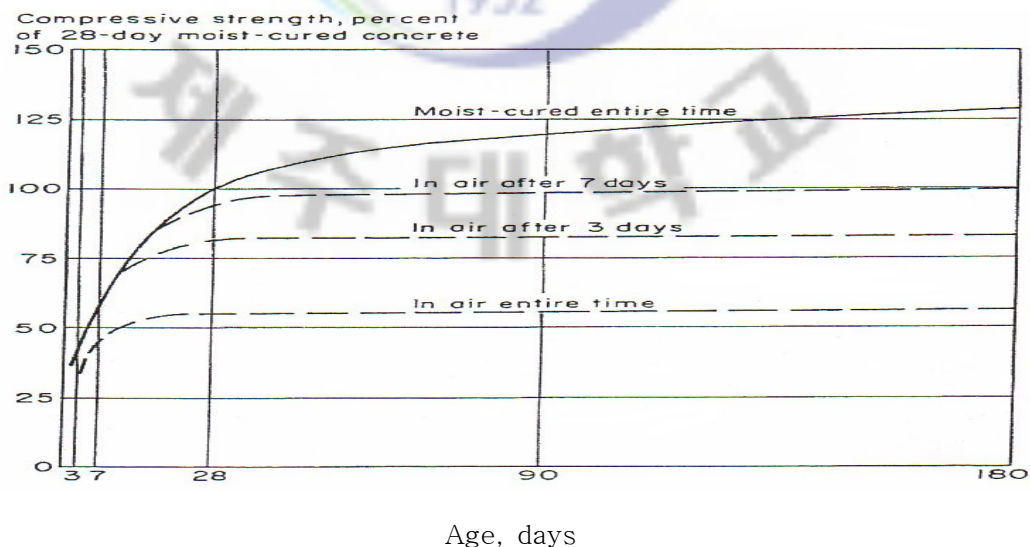


그림 2.13 전기간 습윤양생과 탈형전 습윤양생 후 대기에 노출한 공시체의 비교

2.3 거푸집 탈형과 양생

2.3.1 거푸집의 역할

거푸집이란 굳지 않은 콘크리트를 부어넣어 일정시간 경과 후 경화하여 자립할 수 있을 때까지 콘크리트의 형상을 유지하고 지지하기 위한 거푸집 널 및 지지틀 등의 가설 구조물을 총칭한다. 거푸집이 콘크리트의 품질에 관련한 역할은 다음과 같다.

- ① 콘크리트가 구조체로서의 강도를 발휘하기까지 요구하는 형상, 치수 및 위치 확보의 역할
- ② 콘크리트의 소성수축균열을 유발하는 바람과 낮은 습도를 막아주고 수화반응 중 수분이 외부로 유출되는 것을 막고 초기 동해 피해를 입지 않도록 보호하는 역할
- ③ 거푸집의 정밀한 시공은 구조체의 위치 확보로 구조체 정밀도를 높이는 역할
- ④ 각종 간격재와 더불어 철근의 피복두께를 일정하게 유지하는 역할
- ⑤ 콘크리트 표면 마무리 역할

이상과 같이 거푸집의 역할은 다양하지만 ①항만 관심을 두는 실정이며, ②항은 관심 밖의 사항으로 시방서나 품질관리 도서에서 정한 기준을 무시하고 조기에 탈형, 후속 작업을 실시한다면 분명히 콘크리트에 악영향을 줄 것은 분명하다. 또한 양생에 관한 계획이 수립되지 않은 상태에서 거푸집을 탈형하는 것은 바람직한 현장의 품질 관리라 보기엔 적합하지 않은 듯하다.

2.3.2 거푸집의 탈형 시기 규정

거푸집 및 동바리 존치기간에 대한 콘크리트 표준시방서의 규정은 다음과 같다.

- (1) 거푸집 및 동바리는 콘크리트가 자중 및 시공 중에 가해지는 하중에 충분히

- 견딜만한 강도를 가질 때까지 떼어내서는 안된다. 그러나 고정보, 라멘, 아치 등에서는 콘크리트의 크리프의 영향을 이용하면 구조물에 균열이 발생하는 것을 적게 할 수 있으므로 구조물의 콘크리트가 자중 및 시공하중을 지탱하기에 충분한 강도에 도달했을때 될 수 있는 한 빨리 거푸집 및 동바리를 제거한다.
- (2) 거푸집 및 동바리의 떼어내기 시기 및 순서는 시멘트의 성질, 콘크리트의 배합, 구조물의 종류와 중요도, 부재의 종류 및 크기, 부재가 받는 하중 콘크리트 내부의 온도와 표면온도의 차이 등의 요인에 따라 다르므로 거푸집 및 동바리의 해체시기는 이들을 고려하여 정하된 사전에 책임감리원의 승인받는다.
 - (3) 일반적으로 콘크리트를 지탱하지 않는 부위, 즉 보열, 기둥 벽 등의 축벽의 경우 10℃ 이상의 온도에서 24시간 이상 양생한 후에 콘크리트 압축강도가 5MPa이상 도달한 경우 거푸집널을 해체할 수 있다. (표 2.3 참조)다만, 거푸집널 존치기간중의 평균 기온이 10℃ 이상인 경우는 콘크리트 재령이 표 2.4에 주어진 재령이상 경과하면 압축강도시험을 하지 않고도 해체할 수 있다.
 - (4) 슬래브 및 보의 밑면, 아치 내면의 거푸집널 존치기간은 콘크리트의 압축강도 (f_{cu}) 시험에 의하여 설계기준강도(f_{ck})의 2/3 이상 값에 도달한 것이 확인되면 해체가 가능하다.(표 2.3참조), 다만 14MPa 이상이어야 한다.
 - (5) 보, 슬래브(slab) 및 아치(arch) 밑의 거푸집널은 원칙적으로 동바리를 해체한 후에 떼어낸다. 그러나 충분한 양의 동바리를 현상태대로 유지하도록 설계 시공된 경우 콘크리트를 10℃ 이상 온도에서 4일 이상 양생한 후 사전에 책임감리원의 승인을 받아 떼어낼 수 있다.
 - (6) 동바리 해체 후 해당 부재에 가해지는 하중이 구조계산서에서 제시한 그 부재의 설계하중을 상회하는 경우에는 전술한 존치기간에 관계없이 구조계산에 의하여 충분히 안전한 것을 확인한 후에 해체한다.

표 2.3 콘크리트의 압축강도를 시험할 경우

부재	콘크리트 압축강도(f_{cu})
확대기초, 보열, 기둥, 벽 등의 축벽	5MPa 이상
슬래브 및 보의 밑면, 아치 내면	설계기준강도×2/3 ($f_{cu} \geq 2/3f_{ck}$) 다만, 14MPa 이상

표 2.4 콘크리트의 압축강도를 시험하지 않을 경우
- 기초, 보열, 기둥 및 벽의 축벽

시멘트의 종류 평균 기온	조강포틀랜드시멘트	보통포틀랜드시멘트 고로슬래그시멘트(특급) 포틀랜드포졸란시멘트(A종) 플라이애시시멘트(A종)	고로슬래그시멘트 포틀랜드포졸란 시멘트(B종) 플라이애시시멘트 (B종)
20℃ 이상	2 일	4 일	5 일
20℃ 미만 10℃ 이상	3 일	6 일	8 일

한편 ACI에서는 “어떠한 경우에도 거푸집과 지주는 수평부재에 있어서 현장양생 공시체 또는 다른 방법으로 시험되어 압축강도가 설계기준강도의 적어도 70%가 되기 전에는 제거되어서는 안된다”라는 규정 이외에 양생온도와 양생기간에 따른 탈형시기를 정하고 있는데, “외기온도가 50F이상일 경우 벽, 기둥 및 보의 측면은 12시간 경과되면 제거할 수 있고, 조인트 거푸집은 폭 30인치를 기준으로 그 이하에서는 3일, 그 이상에서는 4일”을 규정하며, 하중과 부재에 따라 다른 규정을 별도로 두고 있다.

2.4 양생 규정과 공사현장 관리에 이용되는 양생의 특징

2.4.1 양생에 관한 콘크리트 시방서의 규정

1) 일반사항

콘크리트는 친 후 소요기간까지 경화에 필요한 온도, 습도조절을 유지하며, 유해한 작용의 영향을 받지 않도록 충분히 양생하여야 한다. 구체적인 방법이나 필요한 일수는 각각 해당하는 조항에 따라 구조물의 종류, 시공조건, 입지조건, 환경조건 등 각각의 상황에 따라 정한다.

2) 습윤양생

- ① 콘크리트는 친 후 경화를 시작할 때까지 직사광선이나 바람에 의해 수분이 증발하지 않도록 보호해야 한다.
- ② 콘크리트의 표면을 해치지 않고 작업이 될 수 있을 정도로 경화하면 콘크리트의 노출면은 양생용 매트, 가마니 등을 적셔서 덮거나 또는 살수를 하여 습윤상태로 보호해야 한다. 습윤상태의 보호기간은 보통 포틀랜드시멘트를 사용할 경우 5일간 이상, 조강포틀랜드시멘트를 사용한 경우 3일간 이상을 표준으로 한다. 중용열포틀랜드시멘트, 내황산염포틀랜드시멘트, 초조강포틀랜드시멘트, 플라이애시시멘트, 고로시멘트, 실리카시멘트 등을 사용할 경우에는 구조물의 종류, 위치, 노출되는 기상조건, 공사의 기간, 시공방법 등을 미리 충분히 검토하고 습윤양생 기간을 결정해야 한다.
- ③ 거푸집판이 건조할 염려가 있을 때에는 살수해야 한다.
- ④ 막양생을 할 경우에는 충분한 양의 막양생제를 적절한 시기에 균일하게 살포해야 한다. 막양생으로 수밀한 막을 만들기 위해서는 충분한 양의 막양생제를 적절한 시기에 살포할 필요가 있으므로 사용전에 살포량, 시공방법 등에 관해서 시험을 통하여 충분히 검토해야 한다. 막양생제는 콘크리트 표면의 물빛이 없어진 직후에 얼룩이 생기지 않도록 살포해야 한다. 살포는 방향을 바꾸어서 2회 이상 실시한다.

3) 온도제어 양생

- ① 콘크리트는 경화가 충분히 진행될 때까지 경화에 필요한 온도조건을 유지하여 저온, 고온, 급격한 온도변화 등에 의한 유해한 영향을 받지 않도록 해야 한다.
- ② 온도제어양생을 실시할 경우에는 온도제어방법 및 양생일수를 콘크리트의 종류 및 형상, 치수를 고려하여 적절히 정해야 한다.

4) 유해한 작용에 대한 보호

콘크리트는 양생기간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호해야 한다.

5) 촉진양생

중기양생, 기타의 촉진양생을 실시할 경우에는 콘크리트에 나쁜 영향을 미치지 않도록 양생을 개시하는 시기, 온도의 상승 및 하강속도, 양생온도 및 양생시간 등을 정해야 한다.

2.4.2 공사현장 관리에 이용되는 양생의 특징

1) 양생계획

양생계획은 타설시 및 타설 후 4주간까지의 평균기온, 온도, 풍량 등의 기상조건을 파악하고, 이들 조건이 변하는데 따른 조치와 인원과 비용을 미리 염두하여 두어야 한다.

2) 양생관리

양생의 작업기록을 작성하여, 작업의 경과를 나중에 되더라도 확실하게 알 수 있도록 하는 것이 중요하다. 또한 한중이나 서중의 공사일 경우 콘크리트의 온도를 측정하는 것이 바람직하다.

3) 공사현장의 양생방법과 특징

양생방법은 구조물의 형상과 사이즈에 따라 달라 질 수 있고 실시 가능한 방법을 선택하여 양생을 할 수 있는데 표 2.5는 현장에서 실시되고 있는 양생방법과 그 특징을 표시하고 있다.

표 2.5 현장 양생방법과 특징

분 류		양생방법과 특징	
습윤양생	분 무	직접 가수하면 표면에 흠이 질 경우 있음에 주의 물을 뿌려 표면의 건조를 막는다.	
	살 수	건조가 심하면 살수 효과가 고르지 못할 수 있다. 형식적인 살수가 되지 않도록 주의 스프링클러등의 자동적인 상시 살수가 좋다.	
	시트 덮기	콘크리트에 충분히 가수한 후 표면에 밀착하여 시트를 덮는다. 물의 공급은 상황에 따라 1일 1회 이상 한다.	
	젖은매트, 습포로덮기	젖은매트, 습포 등으로 콘크리트 표면을 덮는다. 그 위에 물을 뿌린다. 습도 유지의 가장 좋은 방법 단 살수가 부족하면 덮개가 콘크리트의 수분을 흡수 하므로 주의한다.	
	침 수	거푸집을 미리 높게하여 콘크리트 표면에 물이 피게 하는 방법이며 매우 효과적 이다. 수심 2-3cm정도이고, 동결의 위험이 있을 때는 수심을 깊게 한다.	
	거푸집의 살 수	기온이 높고 건조가 빠른 경우에는 거푸집에 물을 뿌린다.	
	피막양생	불투수성 시트덮기	수분 증발을 막는 방법으로 물이 없는 경우나 양생 효율 향상이 목적이다. 기온이 높으면 효과가 적다.
		막양생제 살포(도포)	콘크리트 표면 마무리가 끝난 후 빠른 시기에 막양생제를 살포하는 것이 효과 적이다. 초기 건조 방지에는 유효하며, 기온이 높을 때는 효과가 적다.
보온양생	시트 보온	콘크리트 노출면, 개구부, 거푸집의 외측을 덮는다. 외기 온도가 0℃ 이하에서 이용된다. 기온이 매우 낮으면 유지가 어렵다.	
	단열재 보온	콘크리트 표면에 단열매트를 깔거나 발포우레탄, 스티로폼 등의 단열재를 붙인 거푸집을 이용 외기온도가 0℃ 이상이고 부재 길이가 긴 경우 유효하다.	

2.4.3 콘크리트의 압축강도 시험방법(KS F 2405) 규정

1) 시험목적

- ① 임의 배합의 콘크리트가 소요 압축강도를 얻는데 적합한 배합을 선정하여 콘크리트의 품질관리에 이용 함.
- ② 재료(시멘트, 골재, 물, 혼화재료 등)가 소요의 압축강도를 얻는데 적합한가를 조사하고 소요의 제성질을 갖는 재료를 선정한다.
- ③ 압축강도를 파악하여 다른 제성질(역학, 물리적 성질)의 개략을 추정 한다.
- ④ 실제의 구조물에 시공된 콘크리트의 품질을 알고 설계에 가정한 압축강도, 기다의 성질을 갖는가를 조사한다. 또 거푸집 해체시기와 프리스트레스 도 입시기를 결정한다.
- ⑤ 콘크리트의 품질을 관리하기 위하여 행한다.

2) 시험방법

- ① 공시체의 지압면(支壓面, 상하 끝면) 및 상하의 가압판의 압축면을 청소하고, 공시체 아랫부분을 가압판 위에 올림.
- ② 공시체를 공시체 지름의 1% 이내의 오차에서 하중이 공시체의 단면 전체에 균일하게 전압되도록 공시체의 중심축이 가압판의 중심과 일치하도록 놓는다.
- ③ 가압판을 시료 위에 접촉(接觸)시킬 때는 손으로 가동부(可動部)를 조용히 회전시켜 고르게 접촉되도록 시험기의 가압판과 공시체의 끝면은 직접 밀착 시키고 그 사이에 쿠션재를 넣어서는 안 된다.
- ④ 하중은 공시체에 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 가하여야 한다. 하중을 가하는 속도는 압축 응력도의 증가율이 매초 $0.6 \pm 0.4 \text{MPa} (= \text{N}/\text{mm}^2)$ 가 되도록 한다.
- ⑤ 나선식 시험기에 있어서는 가압판이 매분 1.3mm의 속도로 움직이게 하고, 수압식(水壓式) 시험기는 매초 $1.5 \sim 3.5 \text{kgf}/\text{cm}^2$ 이내의 하중속도로 가하는 것을 표준으로 한다
- ⑥ 일반적으로 하중속도가 클수록 콘크리트 강도는 크다.
- ⑦ 공시체가 파괴(破壞)되기 직전에 갑자기 항복(降伏)하므로 공시체가 급격한 변형을 시작한 후에는 시험기의 하중을 가하는 속도 조정장치(調整裝置)의 조정을 중지하고 하중을 계속 가한다.
- ⑧ 하중은 공시체가 파괴될 때까지 가압하여 시험기가 나타내는 최대 하중 및

콘크리트의 파괴상태(破壞狀態)를 기록하여야 한다.

3) 주의사항

- ① 습윤양생 시료의 압축시험은 양생실에서 꺼낸 즉시 시험하여야 한다.
- ② 습윤양생실에서 시료를 꺼내어 시험할 때까지 젖은 모포로 덮어서 습기를 보호하여야 하며, 시험은 반드시 습윤상태에서 하여야 한다.



3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 개요

본 실험은 현장 양생 조건과 거푸집 탈형 시기를 달리한 공시체가 단기 및 장기에 거쳐 강도 발현이 어떻게 진행 되는지를 1일, 3일, 7일, 28일, 그리고 90일 압축 강도를 측정하여 알아보았다.

3.2 시험체 제원

우리나라에서는 표준 공시체로 (15×30)원주형 공시체를 사용하고 있으나 많은 시편을 동시에 제작하는 관계로 부득이 영국에서 표준 규격으로 많이 활용하는 150×150×150mm의 사각형의 단면 형태로 제작하였다. 양생 조건을 달리 하여 압축 강도 실험을 하기 위하여 각 변수별 시편을 제작하였는데 실험체는 사각형 거푸집 형틀을 만들고 그 안에 콘크리트를 타설하여 제작하였다. 그림 3.1은 실험체의 모습을 보여주고 있는 그림이다.

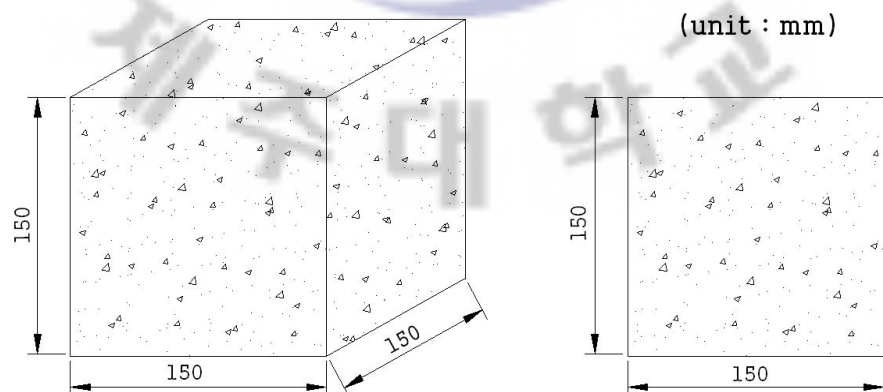


그림 3.1 사각 공시체 단면도

3.3 시험변수 및 제작

3.3.1 시험변수

본 논문에서 실험 연구로 선택된 실험 변수는 양생 조건을 달리한 정육면의 공시체로 총 5가지 변수를 선택하여 총 190개의 시편을 제작하여 압축 강도 실험을 실시하였다. 표 3.1는 실험 변수를 나타내고 있는 표로 압축 강도 측정 횟수와 사용 갯수를 나타내고 있다.

표 3.1 실험체 시험변수

시험변수		압축강도 측정일					비 고
양생조건	거푸집 제거시기	1일	3일	7일	28일	90일	
기건양생	1일 (12시간 후)	10	10	10	10	10	50개
	3일 (72시간 후)		10	10	10	10	40개
	7일 (168시간 후)			10	10	10	30개
	28일 (672시간 후)				10	10	20개
습윤양생 (수조양생)	1일 (24시간 후)	10	10	10	10	10	50개
공시체 갯수		20	30	40	50	50	190개

3.3.2 사용재료

시험체 제작은 코팅합판을 150mm × 150mm로 규격에 맞게 제작하고 콘크리트를 타설하여 공시체를 만들었다. 공시체를 만드는데 사용한 거푸집과 레디믹스 콘크리트는 다음과 같다.

1) 거푸집

코팅 합판을 조립하여 사각 공시체 5개가 한 조가 되도록 형틀을 만들었고, 이 물질을 제거 후 박리제를 도포하고 24시간 말린 후 사용하였다. 그림 3.2는 거푸집을 제작하는 모습이다.



(1) 형틀 제작



(2) 치수 확인



(3) 형틀 내부 청소



(4) 박리제 도포

그림 3.2 거푸집 제작 전경

2) 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계 강도가 21MPa인 S사의 레디믹스 콘크리트 제품으로 사용 전 KS규정의 시험방법에 기준하여 슬럼프시험과 공기량시험 그리고 염화물함유량시험을 규정대로 실시 한 후 허용 오차 범위의 사용 가능한 재료인지를 확인하였다. 시편에 사용된 레디믹스 콘크리트 제품의 물성치는 표 3.2와 같다.

표 3.2 공시체에 사용된 레디믹스 콘크리트 물성치

호칭 방법에 따른 구분	설계값(28일)	측정값(28일)
설계강도(MPa)	21	21이상
슬럼프(mm)	120	120
굵은 골재 최대 치수(mm)	25	25이하
시멘트 종류	1종보통포틀랜드 시멘트	1종보통포틀랜드 시멘트
공기량(%)	4.5±1.5	4.5
염화물량kg/m ³	0.30이하	0.28

그리고 콘크리트 타설 시기가 9월 초로 서중 콘크리트에 대한 대비가 필요하였으나 다행히 온도와 습도가 양호하였고 평균 풍속도 2.9m/s 이내로 양호한 타설 조건이라 별도의 조치는 하지 않았다. 그림 3.3은 타설시 온도와 습도를 체크한 모습이다.



그림 3.3 타설 온도 23°C ~ 25°C, 상대습도 60% ~ 65%

콘크리트 타설에 있어 최초 슈트에서 내려오는 시료(재료가 분리된 시료)는 사용하지 않았고 타설 시에도 재료 분리가 일어나지 않도록 형틀의 최대한 가까이서 콘크리트를 부어 타설하였다. 다짐은 봉다짐을 2층 각 15회씩 실시한 후 상부는 블리딩, 들뜬 골재, 콘크리트의 부분침하 등의 결함이 일어나지 않도록 콘크리트 응결 전 흠손질을 하여 기건 양생 중 탈형 시기가 3일, 7일, 28일인 공시체는 12시간 외부 환경에 노출 시켰다가 12시간 후 실내로 옮겨 탈형 전까지 기중 봉함 양생을 하였고, 12시간 후 탈형하는 공시체는 외부에 24시간 그대로 방치하였다가 압축강도를 측정하였다. 그리고 표준양생 공시체의 경우는 타설 2시간 후 부직포로 보양하여 24시간 동안 외부에서 표면이 마르지 않도록 조치하였다가 탈형 후 수조에서 습윤 양생 하였다. 그림 3.4는 콘크리트를 타설하고 양생하기 전까지의 모습을 보여주고 있다.



(1) 슬럼프, 공기량, 열화물 측정



(2) 타설 다짐



(3) 상부면 손보기



(4) 습윤 양생 조건 콘크리트 보양

그림 3.4 실험용 공시체 콘크리트 타설 전경

3.4 시험체의 관리

본 논문에서 실험 연구로 선택된 주요변수는 거푸집 탈형 시기와 양생 조건이다. 양생 조건은 수중 양생과 기건 양생의 2가지 변수를 계획하였고, 기건 양생 조건의 경우 거푸집 탈형 시기를 12시간, 3일, 7일, 28일 4가지 변수로 결정하였다. 기건 양생 조건은 외부에서 관리하면 햇빛, 바람, 그리고 습도 관리 등 여러 가지 예상하지 못한 오차가 있을 것으로 예상되어, 콘크리트 타설 12시간 후 시편들을 모두 실내로 이동 직사광선과 풍랑에 직접적으로 노출되지 못하도록 계획하였고, 거푸집 탈형 전까지 P.E필름으로 봉합하여 자체 습기가 대기로 증발하지 못하도록 하는 조치도 실험을 계획할 때 반영하였다. 사각 공시체이므로 모서리 부분에 응력이 집중 될 것으로 판단되어 강도 측정 전 모따기를 하여 강도 측정 시 부분적 파괴에 따른 잘못된 데이터 수집이 되지 않도록 감안하여, 계획한 변수 외의 경우를 최대한 배제하였다. 그림 3.5와 그림 3.6은 변수별 양생 조건으로 관리하는 공시체의 모습이다.



(1) 거푸집 탈형 12시간 후 기중 양생



(2) 거푸집 탈형 3일 후 기중 양생



(3) 거푸집 탈형 7일 후 기중 양생



(4) 기중봉합양생/28일 탈형 예정공시체

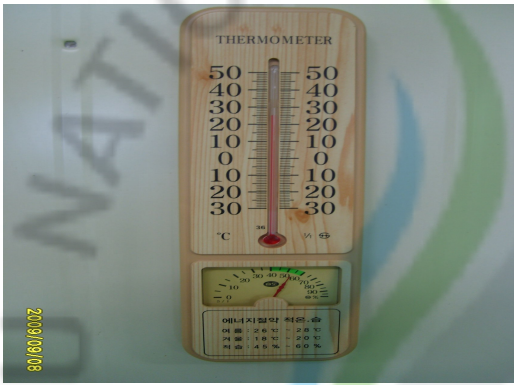
그림 3.5 기건 양생 공시체 관리 전경



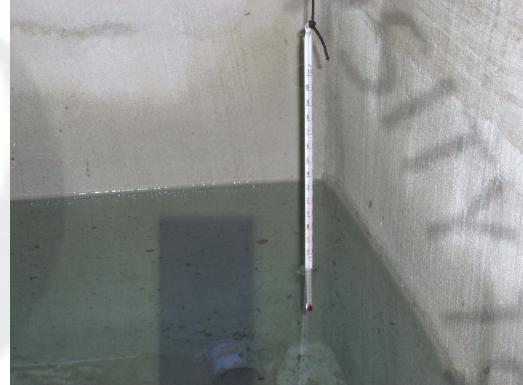
(1) 수중양생전 부직포 보양



(2) 수중양생 전경



(3) 실내 온도 및 습도 체크



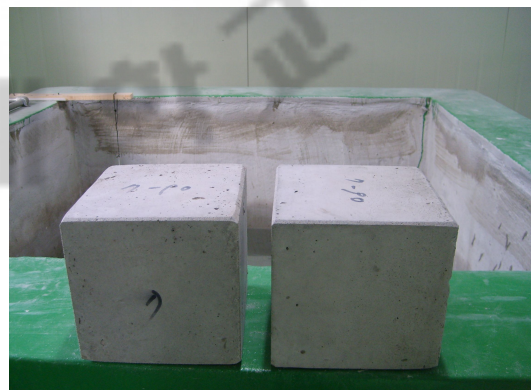
(4) 수조 온도 관리

그림 3.6 수중양생 공시체 관리와 온도 체크 전경

그림 3.7은 압축강도 측정 전 콘크리트 연마용 그라인더로 모서리를 약3mm정도 갈아 응력 집중 현상이 일어나지 않도록 조치하는 모습이다.



(1) 공시체 모따기 I



(2) 공시체 모따기 II

그림 3.7 공시체 모따기 처리

그리고 매일의 온도와 습도를 체크하여 실험하는 공시체에 영향을 받지 않도록 조치하였다. 표 3.3은 온도와 습도를 체크한 기록이다. 표와 같이 실내 온도는 8℃ ~ 26℃ 이내이고, 상대습도도 50% ~ 75%로 비교적 양호한 환경이었다. 수조양생의 경우는 타설 후 77일부터 90일까지 14일간만 온도에 대한 관리가 있었을 뿐이다.

표 3.3 양생 일자별 온도와 습도

Con'c 타설 후 경과 일자	평균기온 (℃)	평균습도 (%)	수조온도 (℃)	비고
1일	24	70	23	실외 온도, 습도
2일	26	60	21	실내 온도, 습도
3일	24	62	21	"
4일	25	62	21	"
5일	24	61	21	"
6일	24	67	21	"
7일	23	67	20	"
8~14일	23	62	20	"
15~21일	22	59	20	"
22~30일	23	74	20	"
30~45일	20	50	20	"
46~60일	19	52	20	"
61~76일	16	65	19	"
77~81일	8	57	18	- 기건양생공시체 별도 조치 취하지 않음 - 수중양생공시체 히터가동 (온도유지)
82~90일	12	55	18	- 기건양생공시체 별도 조치 취하지 않음 - 수중양생공시체 히터가동 (온도유지)

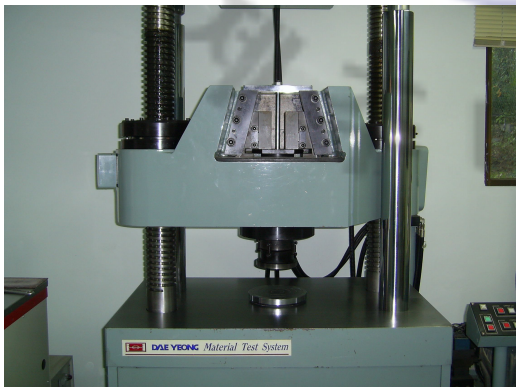
3.5 실험방법

3.5.1 실험기기

데이터 수집의 정확도를 높이기 위해 실험은 전문 기관에 의뢰하여 그 센터의 보유 실험기기인 만능 재료 시험기(Universal Testing Machine)로 압축 강도를 측정하였다. 표 3.4은 압축강도 실험기의 제원이며 그림 3.8은 그 실험기의 실제 모습이다.

표 3.4 만능 재료 시험기 제원

기 기 명	만능 재료 시험기(Universal Testing Machine)
규 격	1000kN(6단)
시 험 속 도	1 ~ 500mm / min
정 밀 도	within $\pm 0.5\%$
속 도 조 절	serve 제어
컴 퓨 터 사 양	I B M 호환가능
용 도	인장강도, 굽힘강도, 압축강도 등의 물성실험
시 험 품 목	콘크리트, 암석, 금속



(1) 만능 재료 시험기의 유압잭

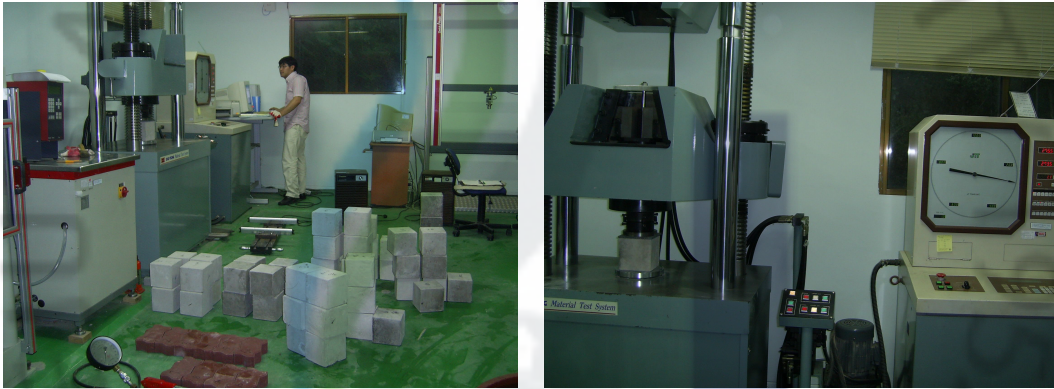


(2) 만능 재료 시험기의 디지털 눈금

그림 3.8 만능 재료 시험기

3.5.2 데이터 수집

그림 3.9는 만능 재료 시험기에 시험체를 설치한 모습이다. 유압 잭의 가압 판이 원(Φ180mm)형인 점을 감안하여 시험체 상부에 t=5mm 철판을 거치하여 하중이 한 쪽으로 편중되지 않도록 조치 후 압축강도 측정을 하였다. 각 시험에 10개씩 압축강도를 측정하여 상위 2개 하위 2개를 제외한 6개의 압축강도 수치를 평균한 값을 데이터의 자료로 활용하였다. 그리고 사각 공시체의 강도이므로 원형 공시체 강도로 환산하여 설계 강도와 비교 하였다. 표 3.5는 공시체의 형상 및 치수와 압축강도와의 관계를 나타내고 있다.



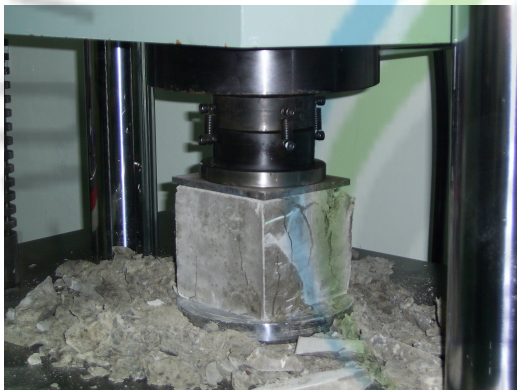
(1) 압축강도 측정 시험체 설치 I (2) 압축강도 측정 시험체 설치 II

그림 3.9 압축강도 측정을 위한 시험체 설치 전경

표 3.5 공시체의 형상 및 치수와 압축강도와의 관계

공시체의 형상	공시체의 치수	15-30의 원주 공시체 강도와의 비교	15-30의 원주 공시체 강도 환산값
원주형	10 X 20	1.03	0.97
	15 X 30	1.00	1.00
	25 X 50	0.95	1.05
입방체	10	1.33	0.75
	15	1.25	0.80
	20	1.20	0.83
	30	1.11	0.90
각주체	10 X 15 X 45	0.95	1.05
	20 X 20 X 60	0.95	1.05

압축강도의 측정 시 습윤양생을 한 공시체의 압축시험은 양생실에서 꺼낸 즉시 행하는 것이 규정이다. 기건상태의 콘크리트 공시체의 압축강도 시험값은 수중양생 직 후(포수상태)의 공시체의 압축강도 값보다 20 ~ 40% 정도 높아 진다. 그러한 이유로서는 1. 건조에 의해 수축한 페이스트의 밀도가 큰 것 2. 골재입자에 의해 페이스트 수축이 국부적으로 구속되는 것에 기인하는 인장응력에 의한 것 3. 페이스트 중의 수분이 정수압으로 상승하는 효과에 의한 것 등 이런 이유로 콘크리트로부터 떠낸 코어로부터 압축강도 시험을 할 때에는 40 ~ 48시간 수중(20±3℃)에 담가둔 후 시험에 사용하여야하므로 기건 상태의 공시체의 경우는 측정 이틀 전에 물 속에 담았다가 압축강도를 측정하여 데이터 자료를 수집하였다. 그림 3.10은 공시체의 파괴 모습을 보여주고 있으며, 주로 할렬파괴의 형태가 대부분 이었다.



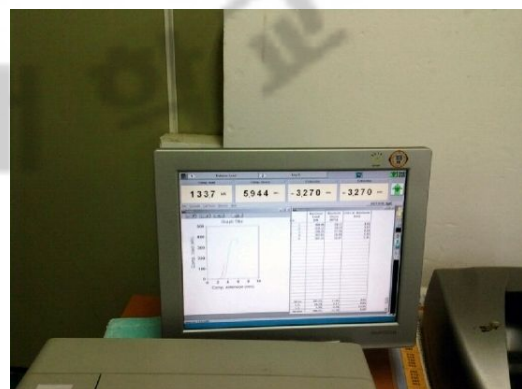
(1) 공시체 파괴(할렬파괴형태) I



(2) 공시체 파괴(할렬파괴형태) II



(3) 공시체 파괴 강도 측정



(4) 압축강도 데이터 수집

그림 3.10 압축강도 측정 및 공시체 파괴

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험 결과

표 4.1은 거푸집 탈형 시기 및 양생 조건에 따른 1일, 3일, 7일, 28일, 90일별 압축강도를 측정하여 얻어진 값이다.

표 4.1 압축강도 측정 값

시험변수	1일강도 MPa		3일강도 MPa		7일강도 MPa		28일강도 MPa		90일강도 MPa	
	측정	평균	측정	평균	측정	평균	측정	평균	측정	평균
12시간 탈형 기건 양생	9.7	9.7	12	11.9	16.9	16.7	18.3	18.3	18.5	18.5
	10		12.2		16.6		17.6		18.4	
	9.8		11.5		16.5		18.2		19.0	
	9.5		11.8		17		18.6		18.4	
	9.4		12.1		16.5		18.5		18.3	
	9.6		11.6		16.3		18.3		18.2	
	9.2		12		16.8		18.4		18.6	
	10.1		11.8		16.8		18.1		18.4	
	9.7		12.3		16.7		18.3		18.9	
	9.8		11.5		16.2		18.2		18.8	
3일 탈형 기건 양생		-	14.9	14.7	20.0	19.9	23.5	23.2	23.5	23.5
			14.6		20.1		22.8		23.6	
			14.8		19.6		22.6		23.4	
			14.3		19.8		23.4		23.3	
			15.1		19.9		23.1		23.2	
			15.0		20.0		23.3		23.5	
			14.6		19.3		23.6		23.5	
			14.5		19.5		23.4		23.4	
			14.3		20.0		23.0		23.4	
			14.8		20.0		23.1		23.6	
7일 탈형 기건 양생		-		-	21.1	20.9	25.1	24.7	24.9	25.0
			21.0		24.3		24.9			
			20.7		24.8		25.0			
			20.6		24.5		24.7			
			20.9		24.9		24.6			
			20.8		24.8		25.2			
			21.0		24.9		25.5			
			21.5		24.6		25.1			
			21.2		24.2		24.9			
	20.7	24.7	25.1							

표 4.1 압축강도 측정 값

시험변수	1일강도 MPa		3일강도 MPa		7일강도 MPa		28일강도 MPa		90일강도 MPa	
	측정	평균	측정	평균	측정	평균	측정	평균	측정	평균
28일 탈형 기건 양생							26.9		26.9	
							26.0		27.3	
							26.9		27.4	
							26.1		26.8	
							27.3	26.8	27.7	27.2
							27.5		27.4	
							26.6		27.1	
							26.6		27.1	
							26.9		27.2	
							26.9		27.3	
표준 양생	8.1	8.4	13.7	14.0	21.0	20.4	29.0	28.8	31.5	31.5
	8.3		13.6		20.5		27.9		32.5	
	8.7		14.3		20.4		28.7		31.8	
	8.1		14.6		20.1		28.7		33.0	
	8.4		14.2		20.0		28.5		31.4	
	8.5		14.1		20.8		29.2		31.2	
	8.2		13.9		20.2		29.0		31.6	
	8.7		14.2		20.2		29.4		30.8	
	8.3		13.8		20.5		28.7		31.4	
	8.6		13.5		20.7		28.8		31.5	

그리고 표 4.2는 위 표 4.1을 15 X 30 원주형 공시체로 강도를 환산하여 계산한 값을 나타내고 있다.

표 4.2 15 X 30 원주형 공시체 강도비로 환산

시험변수	거푸집 탈형조건	압축강도(MPa)				
		1일강도	3일강도	7일강도	28일강도	90일강도
기건 양생 조건	12시간 후 탈형	7.76	9.52	13.36	14.64	14.80
	3일 후 탈형	-	11.76	15.92	18.56	18.80
	7일 후 탈형	-	-	16.72	19.76	20.00
	28일 후 탈형	-	-	-	21.44	21.76
수중양생	24시간 후 탈형	6.72	11.20	16.32	23.04	25.20

4.2 실험 분석

4.2.1 일반사항

양생의 유, 무는 압축강도에 영향을 준다는 것을 건설기술자라면 누구나 알고 있는 사실이다. 위의 실험을 통해 얻은 기건 양생 조건의 값은 실험실에서 관리하여 오차를 줄인 경우이고, 만약 외기에 노출하여 두었다면 양생인자가 복합적으로 작용하여 그 값을 추정하기란 쉽지 않았을 것이나 외기 노출 시 균열의 문제는 접어 두더라도 위의 결과 치 보다 낮은 강도 값이 나올 것 이란건 자명한 사실이다. 압축강도 측정 기준 “압축 강도의 측정은 양생실에서 꺼낸 즉시 행한다.” 는 규정을 위반하고 압축 강도를 측정하면 어떤 결과가 나오는지 4.2.4절에서 분석하기로 하고 우선은 그림 4.1 변수별 압축강도 측정 자료의 수조양생과 거푸집 탈형 시기가 다른 공시체의 압축강도를 분석하겠다.

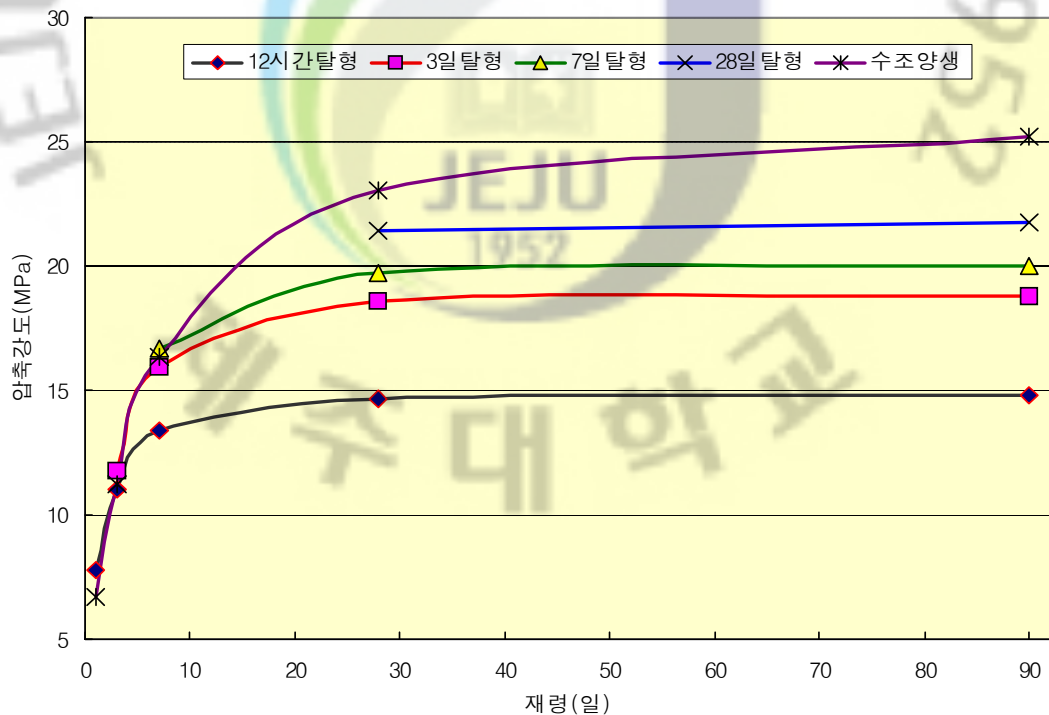


그림 4.1 변수별 압축강도 측정

4.2.2 수조 양생과 거푸집 탈형 시기가 다른 공시체의 비교

1) 12시간 거푸집 탈형하여 대기에 노출한 공시체

12시간 만에 거푸집을 조속히 탈형하여 대기에 노출한 공시체의 경우 1일 강도만 수조양생 공시체보다 15% 높은 강도를 보였을 뿐 3일 측정된 압축 강도에서는 수조양생의 85%, 7일은 82%, 28일은 64%, 90일은 59%로 장기 강도로 갈수록 그 편차가 점점 더 심한 것을 볼 수 있다. 단기 강도가 높은 것은 조기 거푸집 탈형에 의해 콘크리트 내부 수분의 이동이 자유롭고 외부 환경도 비교적 높은 온도와 적절한 습도 조건이 단기강도에 영향을 준 것으로 보여진다. 수분 증발이 빠르면 충분한 수화가 이루어지지 않는 가운데 경화가 끝나므로 장기강도는 현저하게 저하된 것을 볼 수 있는데, 28일 후 강도 발현은 거의 이루어지지 않아 90일에 측정된 압축강도와 28일 강도가 거의 비슷한 수준이며 거푸집 탈형 7일 후부터 28일까지는 강도발현이 둔화하다가 28일 이후는 수화반응이 거의 일어나지 않아 습윤 양생 환경이 장기강도에 큰 영향을 준 것을 볼 수 있다. 그림 4.2는 수조양생과 12시간 탈형한 공시체의 강도 발현 과정을 보여주는 그래프이고, 그림 4.3은 수조 양생 공시체의 재령별 강도 발현을 100%로 보았을 때 12시간 탈형 공시체의 비교 그래프이다.

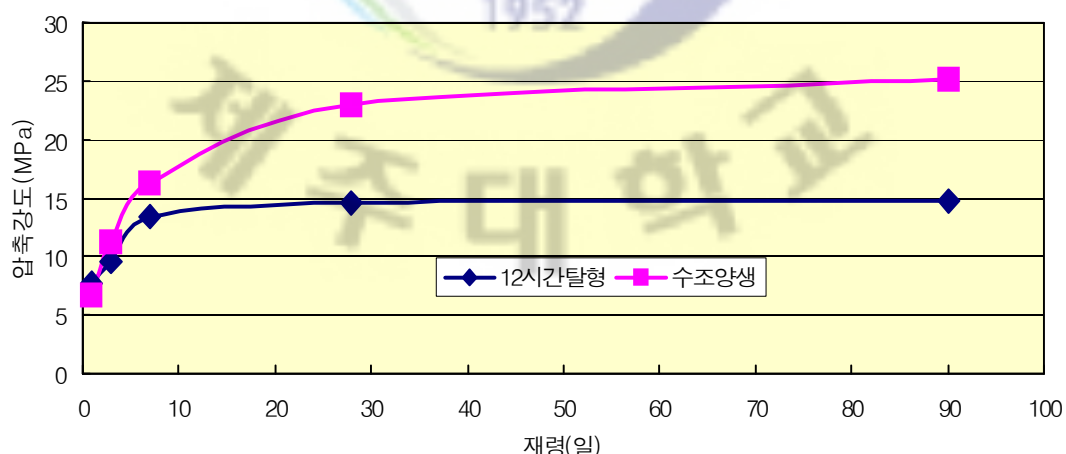


그림 4.2 수조 양생과 12시간 후 탈형 한 공시체의 강도 발현

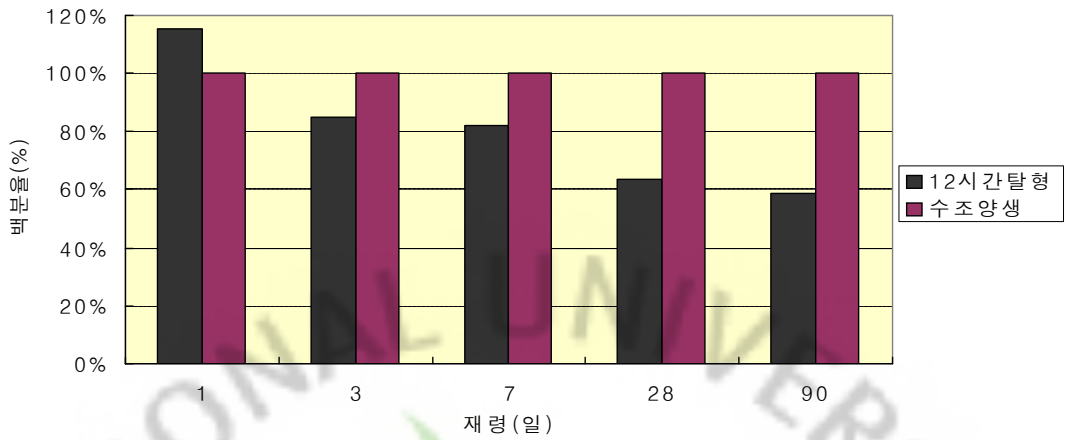


그림 4.3 수조 양생 기준 12시간 후 탈형 공시체의 강도 비교

2) 3일 후 탈형(기중봉함), 탈형 후 대기 노출 공시체

3일 후 거푸집을 탈형하여 대기 노출한 공시체도 비슷한 양상을 보이고 있다. 탈형 전까지 밀봉하여 자체 습기가 마르지 않도록 조치하였지만 수화반응은 충분히 이루어 지지 않아 3일 강도만 수중양생 보다 5% 높게 나왔을 뿐 나머지는 수중 양생 보다 7일 98%, 28일 81%, 90일은 75%로 낮은 값을 보였다. 그림 4.4는 수중양생과 3일 후 탈형한 공시체의 강도 발현 과정을 보여주는 그래프이고, 그림 4.5은 수중 양생 공시체의 재령별 강도 발현을 100%로 보았을 때 3일 탈형 공시체의 비교 그래프이다.

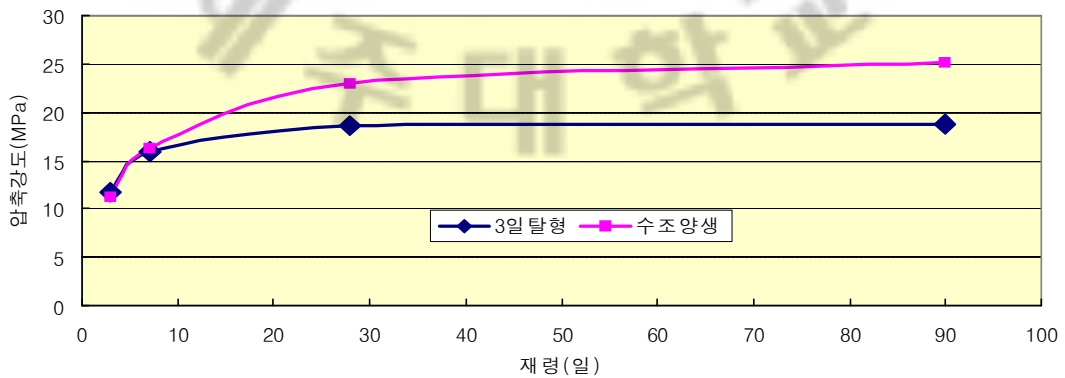


그림 4.4 수중 양생과 3시간 후 탈형 한 공시체의 강도 발현

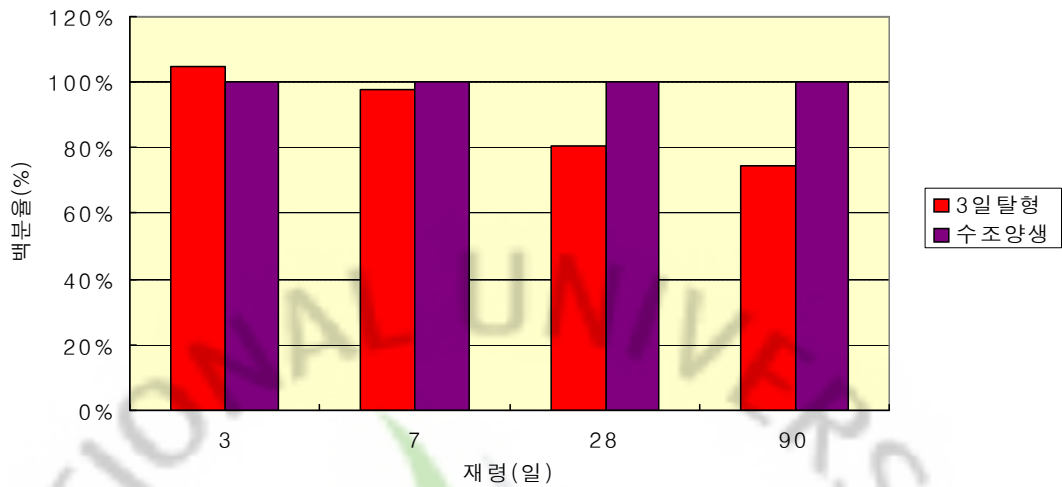


그림 4.5 수조 양생 기준 3일 후 탈형 공시체의 강도 비교

3) 7일 후 탈형(기중봉함), 탈형 후 대기 노출 공시체

7일 탈형 한 공시체도 초기 수화는 어느 정도 진행되어 수조 양생 보다 2% 높은 강도를 나타내었으나, 거푸집 탈형 후 수화가 미미하여 28일은 86%, 90일은 79%로 장기로 갈 수록 강도 발현 차이가 심해지며 더 이상의 강도 증진은 어려울 것으로 예상된다. 그림 4.6는 수조양생과 7일 후 탈형한 공시체의 강도 발현 과정을 보여주는 그래프이고, 그림 4.7은 수조 양생 공시체의 재령별 강도 발현을 100%로 보았을 때 7일 탈형 공시체의 비교 그래프이다.

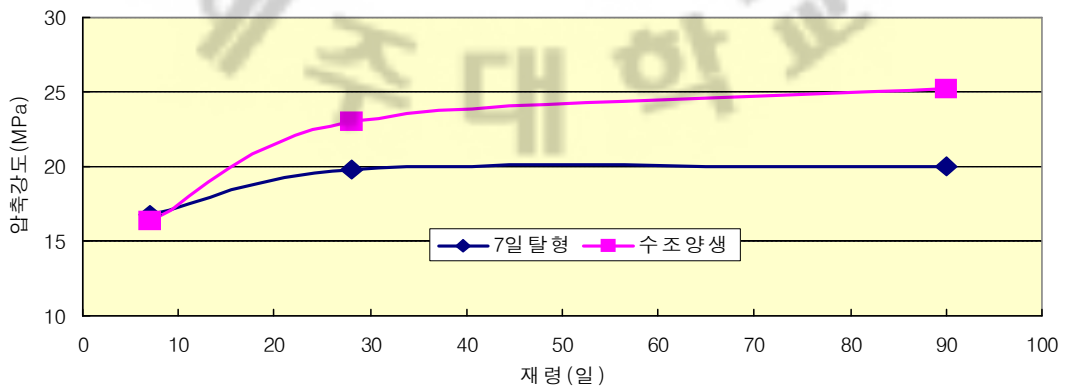


그림 4.6 수조 양생과 7일 후 탈형 한 공시체의 강도 발현

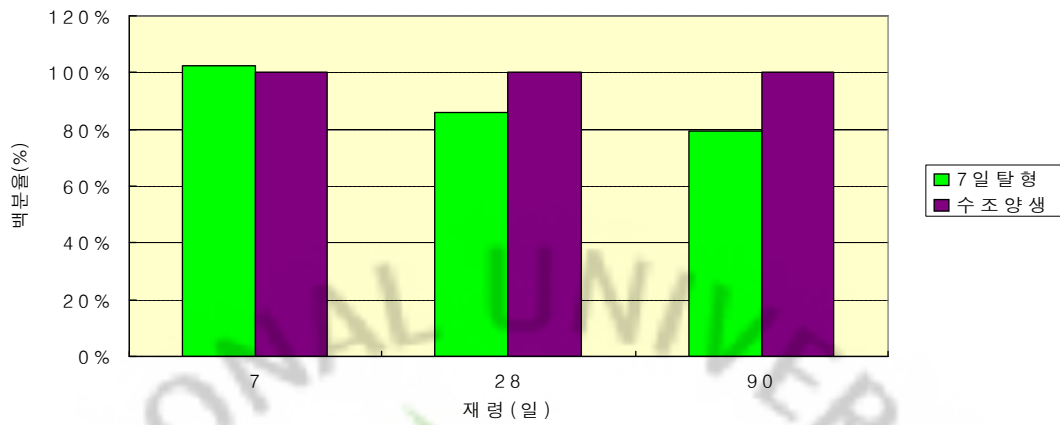


그림 4.7 수조 양생 기준 7일 후 탈형 공시체의 강도 비교

4) 28일 후 탈형(기중봉합), 탈형 후 대기 노출 공시체

28일간 밀봉한 후 거푸집을 탈형 한 경우는 밀봉의 효과로 인해 자체 습기로 수화반응이 상당히 이루어져 28일 강도의 경우 수조 양생보다 7% 낮은 정도로 비교적 만족할 만한 성과이나, 90일 장기적으로는 강도 발현이 수조 양생의 86%로 현저히 떨어져 큰 강도 증진을 보여주진 못하였다. 이후 더 이상의 수화반응에 따른 강도 증진을 기대하기는 어렵다고 판단되어 진다. 그림 4.8은 수조양생과 28일 후 탈형한 공시체의 강도 발현 과정을 보여주는 그래프이고, 그림 4.9은 수조 양생 공시체의 재령별 강도 발현을 100%로 보았을 때 28일 탈형 공시체의 비교 그래프이다.

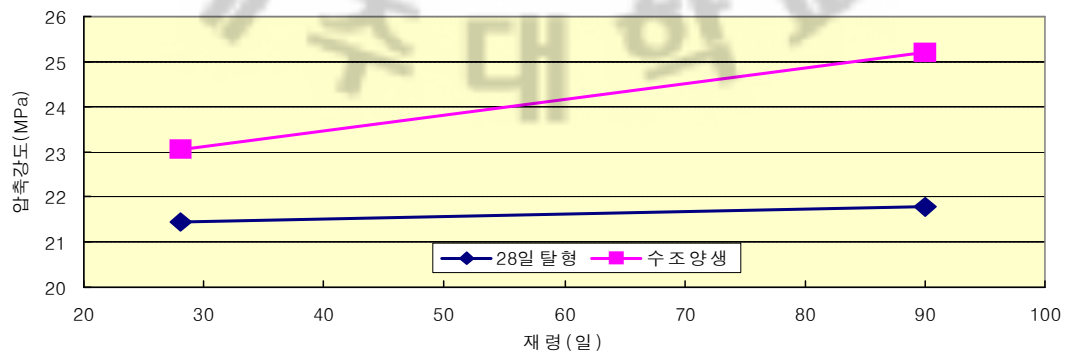


그림 4.8 수조 양생과 28일 후 탈형 한 공시체의 강도 발현

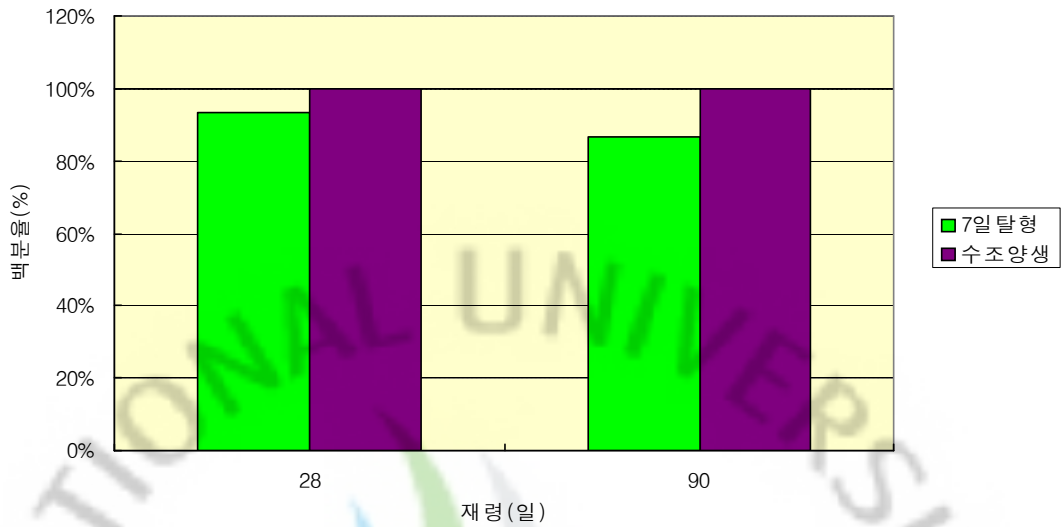


그림 4.9 수조 양생 기준 28일 후 탈형 공시체의 강도 비교

4.2.3 기건 공시체로 압축강도를 측정할 경우의 결과 분석

압축강도의 측정은 습윤 상태의 공시체를 양생실에서 꺼낸 즉시 행하여야 한다. 콘크리트 구조체에서 코어를 채취하여 압축강도를 측정할 경우 40 ~ 48시간 수중(20±2℃)에 담가둔 후 수중양생직후(포수상태)로 환원하여 시험에 사용하여야 하는 것 처럼 대기에 노출하였다가 측정하는 공시체도 동일한 조건으로 시험해야 하는 건 당연한 일이다. 그 이유는 3.5.2절 데이터 수집에서 언급한 내용처럼 기건 상태로 압축강도를 측정할 경우 수치가 수중양생직후보다 20 ~ 40%정도 높게 나오기 때문이다. 실제로 40시간 수중에 담가 두었다가 실험한 결과 기건공시체가 수중양생직후공시체보다 압축강도 값이 16.77% 정도 더 나오는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이 값은 두가지 변수(변수 당 3개의 공시체)만 가지고 실험한 데이터이고, 파괴된 공시체의 내부를 확인 한 결과 아직 건조한 부분이 많이 남아 있어서 완전히 포화될 경우 그 차이는 더 많이 나올 것으로 예상되었다. 정확한 측정 수치는 더 많은 실험을 통해 파악하여야 한다고 보여 지지만 기건 공시체가 수중양생직후 공시체보다 압축 강도 수치가 높게 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 표 4.3은 습윤 공시체와 기건 공시체의 압축강도 측정 결과와 비교한 표이고 그림

4.10은 압축강도를 측정하는 모습과 파괴 후 내부를 확인 한 모습이다.

표 4.3 습윤 공시체와 기건 공시체의 강도 비교

시험변수	번호	압축강도(MPa)		비고
		측정 값	평균	
습윤 공시체	1	16.8	16.7	기건 공시체가 습윤 공시체 보다 16.77% 높은 강도 값
	2	16.6		
	3	16.7		
기건 공시체	1	19.4	19.5	
	2	19.7		
	3	19.5		



(1) 습윤 공시체 압축강도 측정



(2) 기건 공시체 압축강도 측정



(3) 공시체 파괴 후 내부 포화 상태 확인

그림 4.10 습윤, 기건 공시체 강도 측정 및 내부 포화 상태 확인

V. 결 론

현장 양생 조건에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 실험체의 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 거푸집을 조급하게 탈형하고 대기에 노출하면 단기강도는 수조양생보다 최대 15%까지 높게 나왔으나, 장기적 강도발현이 현저하게 둔화되어 90일 강도에서 최저 41% 적게 나왔다. 그것은 단기적으론 공시체 내부의 수분 이동이 자유롭고 외부 습도도 적정하여 수화작용이 활발해졌기 때문이나, 장기적으론 수분이 모자라 더 이상 수화반응을 하지 않기 때문으로 판단된다.

2. 거푸집 존치 기간을 오래 유지하여 자체적 수분이 증발하지 못하도록 보양하였다하여도 자체의 수분만으로는 수화작용을 하기에는 부족하다. 거푸집을 28일간 존치하였어도 수분 유지를 해주지 않으면 장기(90일) 강도에서 수조 양생의 86% 밖에 강도 발현을 하지 못하였다. 매트나 비닐, 기타의 재료로 구조체를 덮더라도 반드시 수분이 유지 될 수 있도록 환경을 만들어 줄 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 초기 재령 중 양생은 콘크리트 강도 발현에 큰 영향을 미치므로 초기의 구조체 관리는 상당히 중요한 의미를 갖고 있다. 수조양생에서 7일 강도는 16.32MPa로 28일 강도의 71%까지 강도 증진이 되었고, 습윤 상태를 계속 유지한 결과 90일 강도에서는 28일 강도 보다 9.4% 증진 된 것을 확인 할 수 있었다. 양생조건 중 습윤 상태만이라도 유지하여 콘크리트 구조체가 수화작용을 할 수 있는 조건을 만들어 준다면 지속적인 수화작용에 따른 강도 발현을 기대하여도 좋을 것으로 판단된다.

4. 양생 방법과 거푸집 탈형 시기에 따라 압축강도 발현에 차이를 보이고 그 차이는 수조양생 > 기중봉함 후 28일 탈형 대기노출 > 기중봉함 후 7일 탈형 대

기노출 > 기중봉합 후 3일 탈형 대기노출 > 12시간 거푸집 탈형 대기 노출 순이며 수조 양생의 28일 강도를 기준으로 93%, 86%, 81%, 64%로 거푸집을 빨리 탈형 할 수 록 강도 발현의 차이가 심하게 나타났다. 거푸집의 존치는 장기적 일 수록 강도 발현에 도움이 되나, 구조체의 중요성에 따라 거푸집 탈형 시기를 결정 할 필요가 있다고 판단된다.

5. 압축강도 측정 규정 “압축 강도의 측정은 양생실에서 꺼낸 즉시 행한다.” 는 반드시 규정대로 준수하여야 한다. 실험에서 기건 공시체가 습윤 공시체보다 16.77 % 높은 강도 값이 나왔고, 내부 확인 결과 아직 포화가 덜 된 부분이 확인 되어 정확한 수치는 아니라 하더라도 기건 공시체의 압축강도 측정은 반드시 수중양생직후의 상태로 환원하여야 하며, 환원하는 시간도 40시간 이상 상위해야 할 것으로 판단된다.

VI. 참고문헌

- 건설교통부 제정, (2009) “콘크리트 표준시방서”
- 대한주택공사, (1993) “콘크리트 보양에 따른 강도변화 연구” pp. 5 ~ 29
- 박대오, (2008) “콘크리트 타설 초기온도가 압축강도에 미치는 영향” 봄학술발표회 논문집 pp. 642 ~ 644
- 박승완, (2009) “각종 양생방법에 따른 고강도 콘크리트의 강도발현 특성에 관한 연구” 봄학술대회 논문집 pp. 274
- 윤기원, (2002) “거푸집 탈형 시기의 결정” 한국콘크리트학회 연구위원회 발표집 pp. 102 ~ 103
- 정재동, (1996) “ 콘크리트 재료 공학” pp. 24 ~ 49 pp. 66 ~ 301
- 이건철, (2009) “양생방법별 시멘트 모르타르의 보습특성 검토” 봄학술대회 논문집 pp. 365 ~ 366
- 이광명, (2006) “양생조건이 콘크리트의 체적변화에 미치는 영향” 한국콘크리트 학회 논문집 제 18권 제3호 pp. 334 ~ 336
- 정재동, (1996) “ 콘크리트 재료 공학” pp. 24 ~ 49 pp. 66 ~ 301
- Design and control of Concrete Mixtures “ACI committee, (1983) 6 Report”
- CEB - FIP MODEL CODE 1990 pp. 34

감사의 글

논문을 마치면서 제가 여러분께 감사의 뜻을 표할 수 있어서 너무 행복합니다. 남자는 모름지기 다섯 수레에 실을 만큼의 책을 읽어야 한다는 옛말이 생각납니다. 반 수레도 안 되는 제 짧은 소견 때문에 논문을 준비하면서 시행착오와 포기하고 싶었던 심경, 이런 모든 것들을 진심어린 격려와 충고로 이끌어 주시고 지도해 주신 박상렬 교수님께 너무나도 감사하다는 말씀을 전합니다.

아울러 수업중 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사드립니다.

본 논문의 완성에 많은 시간과 노력을 기울여준 연구실 박사과정의 김창훈과 조교 좌용현에게도 고맙다는 말을 전합니다.

저와 대학원 생활을 같이 한 동기들과 선, 후배 여러분께도 감사를 포함합니다. 여러분의 응원이 큰 힘이 되었습니다.

바쁜 일정 속에서도 논문에 전념 할 수 있었던 건 같이 근무하는 동료들의 관심어린 독려와 모든 지원의 중심에 계신 고광민 사장님, 수업에 늦지 않도록 배려해주신 한국농어촌공사의 서영석 소장님 덕분입니다. 현재 옹포지구 농촌용수개발사업 현장에 근무하시는 모든 분들에게 감사하다는 말씀을 드립니다.

제가 이런 감사를 표할 수 있게 해준 것은 가족들의 사랑일 것입니다.

사랑하는 아내 애란과 아들 건보, 두 딸 윤희야 주희야 고맙다.

그리고 부모님, 당신들의 평생 주신 사랑을 제가 어찌 다 갚을 까요.

끝으로 성원하여 주신 모든 분들에게 다시 한번 머리 숙여 감사하다는 말씀을 드리며 건강하시고 행복하시길 빕니다.

2009년 12월 심재용 드림.