

高强度 콘크리트의 特性

李 利 衡

〈漢陽大學校 建築工學科 教授〉

尹 顯 道

〈漢陽大學校 建築工學科 大學院〉

目 次

1. 머리말	3.2.1 압축강도와 인장강도
2. 고강도 콘크리트의 정의 및 연구동향	3.2.2 압축강도와 부착강도
2.1 고강도 콘크리트의 정의 및 분류	3.2.3 할열 인장강도
2.2 고강도 콘크리트의 시대적 요청	3.2.4 휨강도
2.3 고강도 콘크리트의 국내외 연구동향	3.2.5 피로강도
3. 고강도 콘크리트의 특성	3.2.6 재령에 따른 강도
3.1 응력도 - 변형도 특성	3.3 탄성계수
3.1.1 일축 재하시의 거동	3.4 포아송비
3.1.2 다축 재하시의 거동	3.5 수축
3.1.3 횡방향으로 구속된 콘크리트의 거동	3.6 크리이프
3.2 강도 특성	3.7 내구성
	3.8 내화성
	3.9 건조양생 효과
	3.10 수화반응에 따른 열방출
	4. 맺음말
	참고문헌

1. 머리말

고강도 콘크리트는 비교적 새로운 재료라고 인식되어 왔지만 고강도 콘크리트의 개발역사는 수십년에 걸쳐 점진적으로 조금씩 이루어져 왔다. 또한, 개발이 계속됨에 따라 콘크리트의 '고강도' 개념도 조금씩 변화

되어 1950년대에는 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ (5,000psi)의 강도를 가진 콘크리트를 고강도라 일컬었으며 '60년대에는 $420\sim 520\text{kg}/\text{cm}^2$ (6,000~7,500psi), '70년대에는 $630\text{kg}/\text{cm}^2$ (9000psi), '80년대에는 $1100\text{kg}/\text{cm}^2$ (16,000psi)로 점차 증가하여 왔으며, '90년대에 들어서면서 Russell¹⁾ 등은 콘크리트 강도를 최고 1,725~3,045kg/

cm² (24, 650~43, 500 psi) 까지 증가시킬 수 있으리라 예상하고 있다. 이러한 고강도 콘크리트가 현장타설콘크리트 빌딩과 P.S콘크리트부재에 응용되어 적용되고 있는 것이 세계적인 추세이다. 콘크리트가 점차 고강도 되어가고 있는 세계적 추세에도 불구하고, 국내에서 고강도 콘크리트가 각광을 받지 못하고 있는 이유는 고강도 콘크리트 품질에 대한 불확실성 즉, 기본재료인 시멘트, 혼화제, 혼화제의 품질과 현장에서 이용시 Q. A, Q. C문제, 시공후의 크리프, 수축, 내구성 등에 대한 이해와 확신이 부족하고 고강도 콘크리트를 이용한 부재설계 및 구조해석시 고강도 콘크리트의 장·단기적 강도 및 역학적 특성에 관한 설계상수(탄성계수, 포아송 비, 응력도 - 변형도 관계)와 부재의 설계방법에 대한 자료와 규정이 확정되지 못하였기 때문이다.

필자는 이러한 문제점을 다소나마 해결하기 위해 본고에서는 고강도 콘크리트의 정의와 최근 연구동향 장·단기적 강도특성 및 역학적 특성에 관한 설계상수 등에 주안점을 두어 기술하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트의 정의 및 연구동향

2.1 고강도 콘크리트의 정의 및 분류

1) 고강도 콘크리트의 정의

고강도 콘크리트(High Strength Concrete)의 정의는 상대적인 것으로 이는 고강도 콘크리트의 의미가 국가나 지역에 따라 다르며, 콘크리트를 사용하는 기술자나, 제품 생산업체에 따라서도 달라질 수 있기 때문이다. 고강도 콘크리트는 일부 선진외국에서 지난 20여년 간에 걸쳐 급속히 발전하여 왔으며, 현재 고강도 콘크리트를 건축물에 가장 많이 쓰고 있는 미국에서도 1950년대에는 350kg/cm² 이상이면 고강도로 간주되었으며, 아직도 미국내 일부에서는 350kg/cm²이

상이 물리적으로나 심리적 한계로 여겨지고 있다. 그후 1960년대에는 420kg/cm²에서 520kg/cm²정도가 상업용으로 이용되어 왔으며, 1970년대 초에는 630kg/cm²의 콘크리트가 Chicago지역을 중심으로 생산되어 왔다. 1980년대에 들어와서는 770kg/cm²의 콘크리트를 사용한 건축물(Chicago Merchantile Exchange)이 1982년 완공되었다.²⁾

이에 미국 콘크리트학회(American Concrete Institute) 고강도 콘크리트 분과위원회(Committee 363)는 1984년 보고서를 통해 이의 제조에 관한 주의사항과 함께 보통 중량 콘크리트(Normal Weight Concrete)는 420kg/cm², 경량 콘크리트(Light Weight Concrete)는 280kg/cm² 이상을 고강도로 정의하고 있다. 국내에서는 건설부 시행령에 따라 보통 중량 콘크리트는 270kg/cm² 이상의 콘크리트를, 그리고 경량 콘크리트는 240kg/cm² 이상을 고강도 콘크리트로 간주하고 있으나, 이는 KS에서 프리캐스트 콘크리트에 대하여 400~500kg/cm²의 강도를 요구하고 있어 국내에서도 고강도 콘크리트의 정의가 달라져야 함을 알 수 있다. 필자 개인의 의견으로서는 대개 420kg/cm² 이상의 콘크리트를 고강도로 보아도 무방할 것 같다.

2) 고강도 콘크리트의 분류

고강도 콘크리트의 생산 재료적인 측면에서 보면 그림 2.1과 같이 일반 건설재료에 고성능 감수제를 사용한 낮은 물 - 시멘트 비의 고강도 콘크리트와 특수한 재료나 기술을 사용하여 생산하는 고강도 콘크리트로 구별할 수 있다.

이러한 분류로써 제작되는 고강도 콘크리트는 생산하고자 하는 콘크리트의 설계기준 강도에 따라 생산시에 요구되는 재료 및 배합비의 범위를 추정할 수 있으며 주로 600kg/cm² 이하에서는 고성능 감수제만을 사용하여 생산 가능하며 그 이상의 강도가 요구될때는 특수재료나 기술이 필요하게 된다.

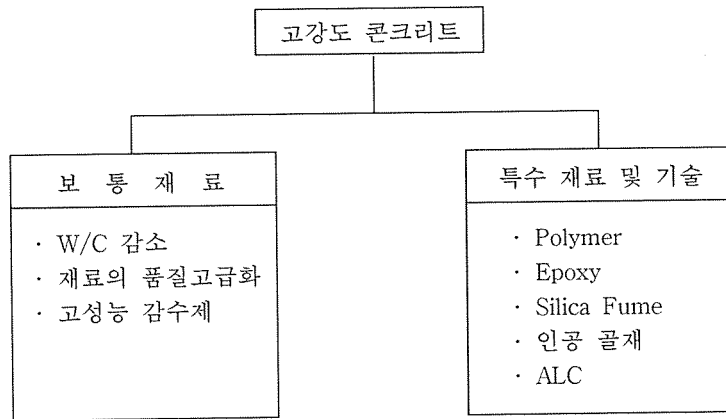


그림 2.1 고강도 콘크리트의 재료적 분류

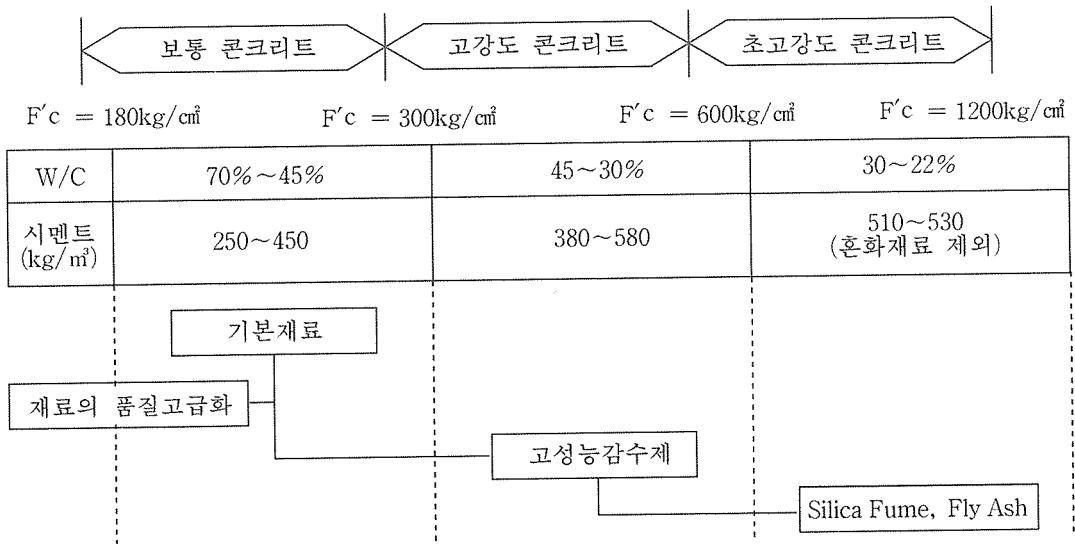


그림 2.2 고강도 콘크리트의 제조환경 분류

다. 따라서 그림 2.2와 같이 제조환경에 따른 분류가 가능하다.

2.2 고강도 콘크리트의 시대적 요청

세계 1차대전 당시만 하더라도 건축물에서의 콘크리트 강도는 일반적으로 140kg/cm²

정도였다. 전쟁중에 시멘트, 경량골재, 그리고 진동기에 대한 연구는 보다 낮은 자중을 가진 콘크리트에서 보다 높은 강도를 가질 수 있게 만들었다. 그 후 Transit Mixer의 개발은 상업용 콘크리트에 크게 기여해 왔으며, 근래에는 도시건축의 초고층화,

거대한 해양구조물, 장스팬 교량 그리고 특수 구조물(원자력 발전소, 철도 침목 등)의 출현으로 그의 사용범위는 더욱 다양해지고 있다. 콘크리트의 사용량은 부피로 56%에 달하여 목재 42.5%, 철재 1.5%인 것을 비추어 볼 때 그의 점유 비율이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 이렇게 많이 사용되는 콘크리트 재료의 큰 결점은 무게에 대한 낮은 강도(Low Strength-to-Weight Ratio), 낮은 연성(Low Ductility), 그리고 높은 취성(High Brittleness) 등으로 이에 따라 기본적인 구조재료로서 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 자중감소, 구조부재의 축소화 및 그의 취약점 보완은 근대건설에 있어서 최대 관심사임과 동시에 건축재료 및 구조분야의 과제이며, 이에 부합되는 콘크리트 제품의 고강도화와 그의 제반 역학적 취약점의 개선이 절실히 요구되고 있다.

2.3 고강도 콘크리트의 국내외 연구 동향

중량에 비해 강도가 낮다는 콘크리트의 기본적인 문제점을 개선하고 현대 구조물이 고층화 및 특수화됨에 따른 품질개선을 위해 근래 외국에서는 집중투자를 통하여 이 분야에 대한 괄목할 만한 성과를 얻었다. 고강도 콘크리트는 주로 고층건물에서 압축을 받는 부재에 많이 사용되고 있는데 이는 고강도 콘크리트의 높은 압축강도로 부재단면이 축소됨에 따라 자중이 감소되는 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

미국에서의 고강도 콘크리트는 주로 시카고를 중심으로 발전하여 왔다. 1986년에 완공된 Michigan Annex 건물에서는 770kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용하였고 2개의 실험기둥에 980kg/cm²의 초고강도 콘크리트를 사용하였는데 이는 현재까지 사용된 콘크리트중 가장 높은 압축강도를 보이고 있다.

이외에도 세계 최고층의 철근 콘크리트조 건물인 Water Tower Palace(압축강도 630kg/cm²)를 비롯하여 420kg/cm²이상의 고강도 콘크리트를 사용한 고층건물은 20여개에 달하고 있다. 이들 건물은 보통강도 콘크리트의 2~3배의 압축강도를 가진 콘크리트를 사용하고 있어 초고층 건물이 이러한 고강도 또는 초고강도 콘크리트를 사용하지 않고는 불가능했음을 잘 보여주고 있다.

서독에서는 고층건물에 유동화 콘크리트를 사용하거나 원자력 발전소 등에 500kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용한 실적이 있다. 영국에서는 서독과 같이 유동화 콘크리트가 주로 사용되고 있고 바닥판이나 거대한 기초등에는 현장타설 콘크리트의 40%정도를 프리캐스트 콘크리트로 사용하고 있다. 특히, 세계 최대의 니니안 석유 Plant Form에서는 22개의 P.C. 단위 개체에 고강도 콘크리트가 사용되었다.

일본에서는 프리캐스트 슬래브에 고강도 및 유동화 콘크리트를 사용하고 있는데 이는 높은 압축강도 이외에도 시공성의 개선, 즉 끝손질 시기, 작업시간, 외관등에 효과적이기 때문이다. 근래에 들어 고강도 콘크리트가 25층이상의 고층건물에 많이 이용되고 있으며 이러한 추세는 계속될 것으로 보인다.

국내에서는 건축공사 표준시방서에 의하면 보통중량 콘크리트의 경우 압축강도가 270~360kg/cm², 경량 콘크리트의 경우는 240kg/cm²이상일때를 고강도 콘크리트로 간주하고 있다. 그러나, KS에서는 프리스트레스트 콘크리트(P.S.C)의 경우 400~550kg/cm²의 콘크리트를 요구하고 있어 아직 고강도 콘크리트의 정의조차 불분명한 상태에 있다. 대개 350kg/cm²이상의 고강도 콘크리트를 사용한 경우로는 원효대교, 올림픽대교외에 원자력 발전소 등이 있으나 아직 건축물에서의 사용은 럭키 Twin Building(콘크리트 압축강도 280kg/cm²)외에 이렇다할 사례

가 없는 실정이다. 그러나, 국내에서도 기존 자원의 고갈 이외에도 건축물의 초고층화(아파트, 상가, 사무소 등)에 대비하여 건축재료의 고품질화가 절실히 요구되고 있으며 이에 대한 방안의 하나로 재료단가가 비싼 철강재(콘크리트의 3~5배) 보다는 가장 보편적인 콘크리트를 고강도화함으로써 보다 경제적인 초고층 건물을 생산할 수 있을 것이다. 이러한 경향은 전술한 바와 같이 미국, 일본 등 외국에서 이미 입증되고 있으며, 더우기 주택난 해소를 위해 초고층 아파트의 건설이 절실히 요구되고 있는 국내 상황에 비추어 볼 때 이 분야에 대한 연구가 적극적으로 시도되어야 할 시점에 와 있다고 하겠다. 지금까지 고강도 콘크리트를 건축물 및 교량에 적용한 예는 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

3. 고강도 콘크리트의 특성

고강도 콘크리트는 보통 콘크리트와는 다른 특성과 공학적 성질들을 갖고 있으며 장·단기 지속하중과 외부 환경요인에 의해 발생하는 내부변화의 파악을 통하여 제작된 구조물의 안전성과 사용성에 대한 예측이 가능하게 된다. 현재까지 알려진 외국의 연구결과(ACI363)에 의하면 부착(Bond), 정착(Anchorage) 등에 대한 상세한 설계자료는 새로 추가된 바 없지만 기존의 보통콘크리트에 대한 설계규정을 사용하더라도 매우 안전한(Conservative) 결과를 얻게 된다. 그러나 전단, 사인장, 비틀림과 같은 항목의 경우 보통강도 콘크리트 규정의 사용은 고강도 콘크리트와의 파괴특성 차이 때문에 반듯이 안전하다고 할 수 있는 것은 아니다. 따라서, 고강도 콘크리트를 실용화 하기 위해서는 구조물로서 적용이 필수불가결한 요소이므로 이를 위해 파악되어야 하는 것들은 강도의 함수로 되어 있는 응력 변형도 관계(Stress-Strain Relationship), 탄성계수

(Modulus of Elasticity), 인장강도(Tensile Strength), 전단강도(Shear Strength), 부착강도(Bond Strength) 등과 같은 역학적 특성으로 요약된다. 본 절에서는 이러한 고강도 콘크리트의 제반 역학적 특성과 관계식에 대해서 기술한다.

3.1 응력도 - 변형도 특성

3.1.1 일축 재하시의 거동

콘크리트의 응력도 - 변형도 관계는 구조물 해석 및 설계에 있어서 아주 중요한 토대가 되며, 이에 대한 정확한 실험자료와 이를 근거로 한 수학적 모델의 개발은 아주 중요한 의미를 갖게 된다.

특히, 일축하중에 대한 거동은 구조설계에 가장 근간이 되는 기본 자료로 된다. 그림 3.1은 압축강도 증가에 따른 전형적인 압축응력도 - 변형도 관계 곡선의 변화 양상을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 강도가 증가함에 따라 응력도 - 변형도 곡선의 상승 부분의 초기 경사도(탄성계수)는 급한 기울기를 나타내고, 최대 응력점(압축강도)에서의 변형도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 임의의 강도 및 최대 응력점에서의 변형도는 Gravel Concrete에서 크게 나타나고 있다. 압축강도 $630\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 고강도 콘크리트의 또 한가지 특징은 최대 응력에 이를때까지 거의 직선변화를 하며 압축강도에 이른 후 하강 응력도는 콘크리트 강도가 증가될수록 그에 비례하여 급격한 응력 저하를 가져온다. 다시말해, 일반적으로 콘크리트의 압축강도가 커지면 커질수록 에너지 흡수능력이 적어지는 취성적인 성질을 갖게 된다. 이것은 콘크리트 강도가 커질수록 부차균열의 발생이 적으며 재료 자체가 균질해지는 경향을 보이고 있음을 말해 주고 있는 것이다. 강도가 커질수록 취성화 된다는 사실은 실제 설계시에 고려되어야 할 아주 중요한 사항이다. 고강

표 2.1 고강도 콘크리트를 사용한 건축물

건축물 명칭	건축지	시공년	층수	설계기준강도 (kg/cm ²)
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	527
One Shell Plaza	Houston	1968	52	420(경량)
Midcontinental Plaza	Chicago	1972	50	633
Frontier Towers	Chicago	1973	55	633
推名町 A. P. T.	東京	1974	18	300
Royal Bank Plaza	Toronto	1975	43	619
Water Tower Plaza	Chicago	1975	79	633
River Plaza	Chicago	1976	56	633
Helmsley palace Hotel	New York	1978	53	562
Richmond-Adelaide Center	Toronto	1978	33	619
One Union Square Building	Seattle	1979	38	527
Larimer Place Condominium	Denver	1980	31	562
Sun City-G	東京	1980	25	360
Texas Commerce Tower	Texas	1981	75	527
City Center Project	Minneapolis	1981	52	562
Petrocanada Building	Calgary	1982	34	510
Skyline Tower Building	Seattle	1982	26	492
Chicago Mercantile Exchange	Chicago	1982	40	633
S. E. Financia Center	Miami	1982	53	492
Columbia Center	Seattle	1983	76	665
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	700
Onterie Center	Chicago	1984	60	598
相模原 Building	東京	1984	25	360
Bethesada Metro Center	Washington D. C.	1985	18	562
Century Square	Seattle	1986	30	700
芝浦4丁目市街住宅	東京	1986	24	420
TMD計劃	大阪	1986	19	360
Bell Park City	大阪	1986	36	360
Park City 第3街高層住宅	神泰川	1987	30	360
G. H. 光丘A Block 第3期9住宅	東京	1987	25	420
千舟Riverside Vila	大阪	1987	19	420
MKO 計劃	大阪	1989	40	420
Two Union Square	Seattle	1989	58	980
225 West Wacker Drive	Chicago	1989	31	980
Pacific First Center	Seattle	1989	46	980
311 South Wacker Building	Chicago	1990	65	840
Bourke Place		1990	55	612
530 Collins Street		1990	39	665
Melbourne Central		1991	55	612

도 콘크리트는 같은 변형도에서 내부의 미세균열이 보통콘크리트보다 작으므로, 그림 3.2에서 알 수 있듯이 보통강도 콘크리트보

다 횡방향 변형이 작다.

일반적으로 콘크리트의 응력도 - 변형도 관계는 허용 응력도 설계법에서는 그다지

표 2.2 고강도 콘크리트를 이용한 교량

Brdge	Location	Year	Maximum span, m	Maximum design concrete strength, psi
Willows Bridge	Toronto	1967	45.72	6,000
Houston Ship Canal	Texas	1981	228.60	6,000
San Diego to Coronado	California	1969	42.67	6,000L*
Linn Cove Viaduct	North Carolina	1979	54.86	6,000
Pasco-Kennewick Intercity	Washington	1978	299.01	6,000
Coweman River Bridges	Washington		44.50	7,000
Huntington to Proctorville	W. Va. to Ohio	1984	274.32	8,000
Nitta Highway Bridge	Japan	1968	29.87	8,500
Kaminoshima Highway Bridge	Japan	1970	85.95	8,500
Fukamitsu Highway Bridge	Japan	1974	25.91	10,000
Ootanabe Railway Bridge	Japan	1973	24.08	11,400
Akkagawa Railway Bridge	Japan	1976	45.72	11,400

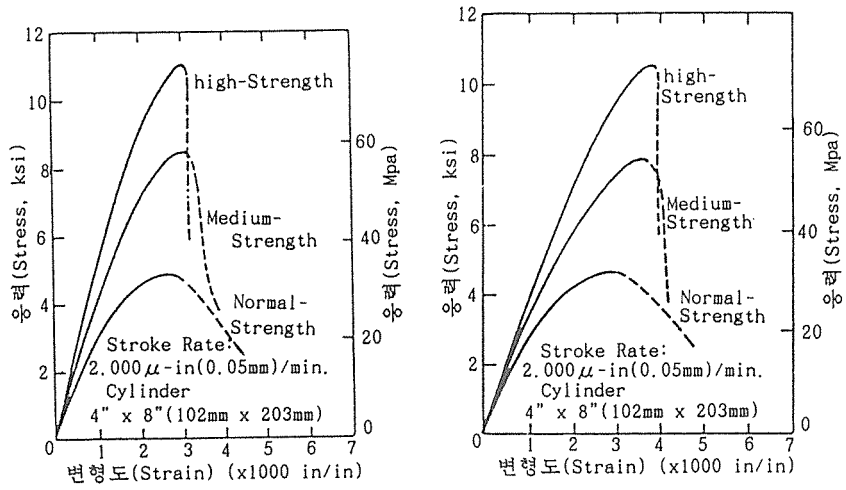
* Lightweight concrete.

Metric equivalent : 1000 psi = 70.30kg/cm²

중요하지 않다. 그러나 극한강도 설계법에서는 응력도 - 변형도 관계가 설계하는데 상당한 변수로 작용하기 때문에 많은 연구자들에 의해 제안식이나 가정이 나와 있다.

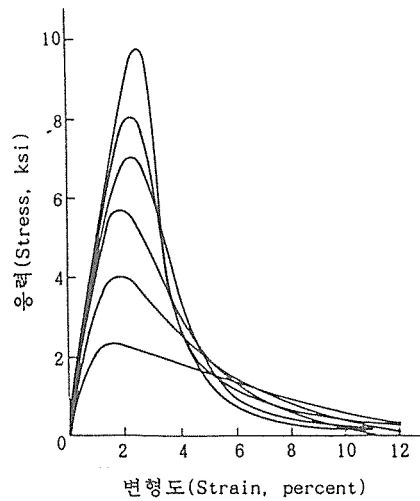
그 대표적인 것으로는 1942년 C. S. Whitney의 포물선 응력도 - 변형도 곡선, Hazime Umemura의 e-function 곡선, 그리고 최대 응력도에서 부터 변형도가 0.38%이고, 최대 응력도의 0.85배인 위치까지 직선으로 연결하여 단순화 시킬 Hognestard의 응력도 - 변형도 곡선 등이 있다. 그러나 이 관계곡선식들은 대부분 보통 강도인

200kg/cm² 정도의 경우에만 해당된다. 이 때문에 정현수 박사 등은 800kg/cm² 정도의 고강도 콘크리트 응력도 - 변형도 관계를 정확히 나타내기 위해, 고강성 Steel Frame에 300ton의 오일잭을 부착시킨 시험기를 특수 제작해 실린더 시험을 실시하였는데, 이는 보통강도의 경우는 용이하게 응력도 - 변형도 곡선을 얻을 수 있지만, 콘크리트의 강도가 커질수록 최대 응력도 이후의 하강곡선은 취성 파괴 특성 때문에, 용이하게 곡선을 얻기가 어려울 것으로 사료된다. 비슷한 예로 P. T. Wang의 응력도 - 변형도 곡선은



(a) Limestone Concretes

(b) Gravel Concretes



(c) Complete Curves (1 ksi=70.3 kg/cm²)

그림 3.1 콘크리트의 강도에 따른 응력도 - 변형도 관계

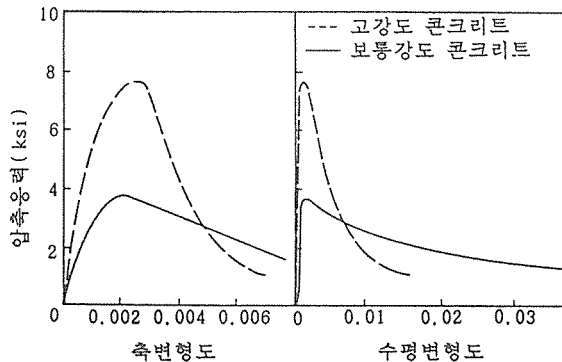


그림 3.2 콘크리트의 응력과 축방향 변형과 횡방향 변형관계

실린더를 아주 작게 7.5cm 직경 15cm높이로 제작하여 실험하기도 하였다.

보통강도의 200kg/cm² 정도는 응력도 - 변형도 곡선이 다음과 같은 e-function 곡선으로 잘 표현된다.

$$\sigma = 1360(e^{-400E} - e^{-600E}) \dots\dots\dots (3.1)$$

단, σ = 콘크리트의 압축 응력도

E = 콘크리트의 압축 변형도 0.2%

그림 3.3에 나타낸 것은 응력도와 변형도를 나누어 무차원화한 것이다. X축의 $\xi = E/cE_B$ 이고, Y축의 $\eta = c\sigma_B$ 의 무차원 치수이다.

$$n = \frac{cB_B}{83 + 0.072 \cdot c\sigma_B} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\eta = \frac{\xi \cdot n}{(n - 1) + (\xi) n} \dots\dots\dots (3.3)$$

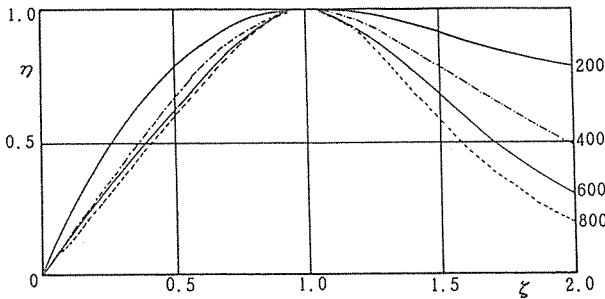


그림 3.3 $\eta - \xi$ 관계

여기에서 200씨리지는 완만한 곡선을 이루고 포락면적도 넓기 때문에 에너지 흡수 능력이 크다고 볼 수 있다. 그러나 나머지 400~800씨리지는 삼각형에 가깝고, 특히 800kg/cm²의 경우에는 응력이 떨어지는 구간에서도 삼각형에 가깝게 직선적으로 나타난다.

3.1.2 다축 재하시의 거동

다축 응력상태의 거동은 보 - 기둥 접합부, 프리스트레스 콘크리트의 정착부, 원자력 발전소의 원자로 용기, 또는 해양구조물 등의 설계 및 해석시에 필요한 중요사항이

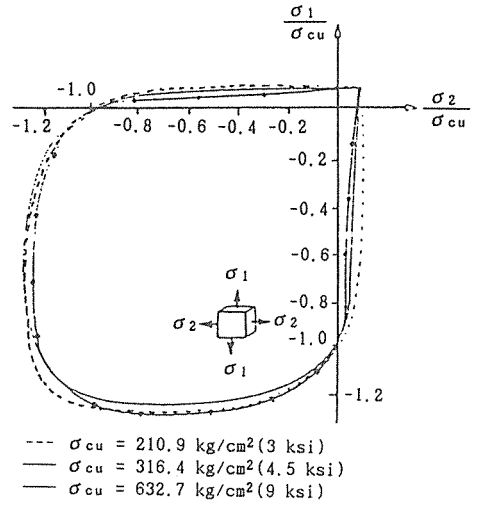


그림 3.4 콘크리트의 강도별 이축파괴포락선

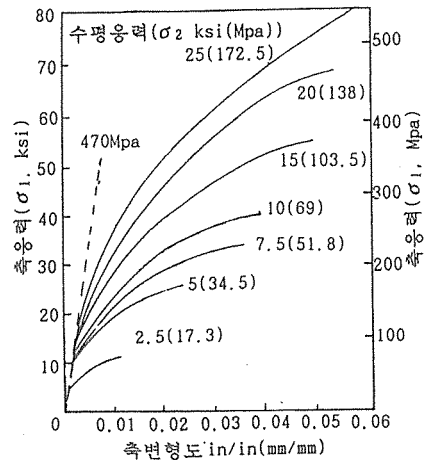


그림 3.5 삼축응력상태에서의 콘크리트의 응력 - 변형도 관계

된다. 다축 응력상태에서 콘크리트의 거동은 일축상태와는 상당히 다르게 거동한다. 따라서, 이러한 거동의 특성은 설계시 고려되어야 한다. 콘크리트가 이축압축을 받게 되면 일반적으로 파괴강도가 증가하게 되는데, 이는 횡방향 압축력에 의해 횡방향의 팽창이 저지되어 균열발생을 억제하기 때문이다. 그림 3.4는 이축 응력상태에서 콘크

리트 파괴포락선 (Failure Envelope)을 나타낸 것이다. 여기서 점선은 저강도 콘크리트, 실선은 보통강도 콘크리트, 굵은 실선은 고강도 콘크리트에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 이축 압축상태에서 보통콘크리트나 고강도 콘크리트나 거의 같은 거동을 보여 주고있는 반면, 이축 인장상태에서 압축강도에 대한 인장강도의 비가 고강도일수록 파괴강도는 감소하는 경향을 보이고 있다.

삼축 응력상태에서의 거동은 이축 응력상태의 경우보다 더욱 많은 변화를 보이고 있음을 그림 3.5에서 알 수 있다. 이 그림에 나타나 있듯이 횡방향 압축력이 증가함에 따라 콘크리트의 파괴강도가 크게 증가하며, 또한 콘크리트가 매우 연성적인 (Ductile) 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 삼축 응력상태에서 콘크리트는 강재 (Steel)와 비슷하게 소성거동 (Plastic Behavior)을 하는 것이 특징이다. 그림 3.6은 삼축 응력상태에서 콘크리트의 횡방향 압축응력과 축방향 압축파괴 강도관계를 나

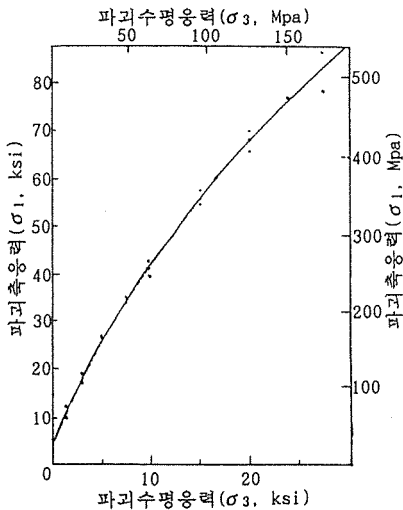


그림 3.6 파괴시 콘크리트의 각 강도별 축방향 강도와 횡방향 압축응력 관계

타낸 것으로 횡방향의 압축응력이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 크게 증가함을 알 수 있다.

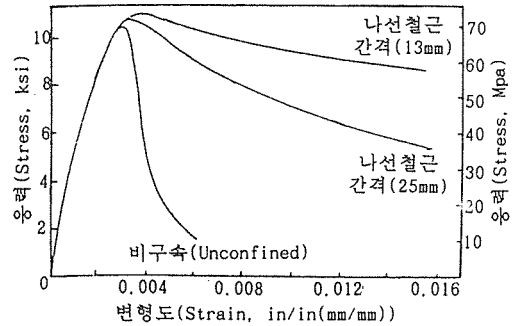


그림 3.7 구속된 콘크리트의 응력도 - 변형도 관계

3.1.3 횡방향으로 구속된 콘크리트의 거동

콘크리트는 최대응력 (압축강도)에 이른 후 변형이 증가하면서 응력은 감소하게 된다. 이것은 콘크리트가 하중을 받음에 따라서서히 균열이 발생하기 때문에 일어나는 현상으로 강재에서는 찾아볼 수 없는 특유한 현상이다. 이러한 현상은 콘크리트를 취성적인 (Brittle) 성질을 갖게하는 주요한 원인이다. 따라서 구조 설계시 콘크리트가 연성적 (Ductile)으로 거동하도록 해야하며, 이를 위해 사용되는 개념이 구속 콘크리트 (Confined Concrete)이다. 구속 콘크리트는 콘크리트 부재를 횡방향으로 구속하는 것으로 주로 나선철근을 사용하여 횡방향 팽창을 구속하는 것이다. 즉, 구속된 콘크리트는 축방향의 압축력을 받을때 일어나는 횡방향 팽창을 억제하며, 구속철근 (Confinement Steel)이 항복할때까지 상당한 변형이 발생한다. 그림 3.7은 고강도 콘크리트의 응력도 - 변형도 거동으로 횡방향 구속정도에 따른 거동이 다름을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 나선철근으로 횡방향

을 구속한 콘크리트는 최대응력에 이른 후 상당한 연성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 연성은 구조물이 갖추어야 할 중요한 기본성질로 특히 내진구조물에서 필수적인 요소가 된다.

3.2 강도특성

3.2.1 압축강도와 인장강도

일반적으로 알려져 있는 것처럼 콘크리트의 강도란 압축강도를 말하게 되고, 인장강도는 설계시에도 사인장력을 제외하고는 거의 무시하는 실정이다. 다시 말해서, 인장강도는 압축강도의 약 1/10~1/14에 해당되기 때문에 부재단면의 설계에서 도움이 되지 않는다. 그림 3.8은 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계를 나타낸 것으로, 이 실험 데이터로 부터 회귀곡선을 구한 것이 다음식이다. 또한, 감수제나 양생방법에 따른 영향은 나타나지 않았다.

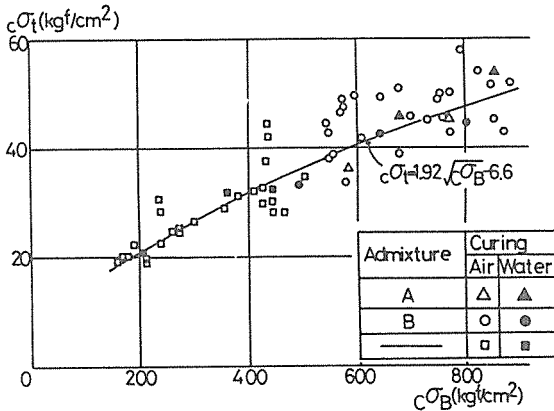


그림 3.8 압축강도와 인장강도 관계

$$\sigma_t = 1.92 \sigma_c - 6.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots (3.4)$$

이 식 역시 기존의 일반식과 거의 일치하며 고강도 콘크리트는 압축강도에서만 고강도일뿐 인장강도에는 큰 도움을 주지 못한

다는 것을 알 수 있고, 이와같은 문제를 해결하려고 Fiber, Glass 등 보강재를 섞어 인장강도를 높이는 방법이나, Polymer 함침 등으로 압축강도 뿐만 아니라 인장강도 역시 100kg/cm² 이상을 쉽게 발휘시키려는 노력을 계속하고 있는 실정이다.

3.2.2 압축강도와 부착강도

철근의 부착강도는 철근의 종류, 리브의 모양과 같이 철근에 의한 영향과 콘크리트 자체의 강도에 따라 영향을 받게 된다. 즉, 여기서는 콘크리트 압축강도가 부착응력에 얼마나 영향을 주는지를 알아보기 위해 ASTM C-234에 준한 부착 실험결과만을 언급하기로 한다. 실험은 콘크리트 강도가 커지면 부착강도가 높아질 것이 예상되므로, 철근이 콘크리트 속에서 빠져 나오기 전에 철근이 항복 내지는 파단되지 않게 하기 위하여 항복강도를 7,700kg/cm²의 고강도 철근을 사용했으며, 부착길이도 비닐 파이프로 15cm에서 10cm로 조절하였다. 또한, 이와 비교하기 위해 원형철근을 그림 3.9에 표시한 것처럼 R-type, 이형철근은 D-type과 스파이럴로 보강한 DS-type의 3종류로 하였다. 콘크리트 강도가 증대될수록 이형 철근의 D 및 DS-type의 최대 부착응력도(τ_{amax})는 커지나, 그 증가 비율은 인장강도나 탄성계수의 증가 비율과 거의 같은 정도였고, 小倉式과 거의 일치했다. 그러나 원형철근인 R-type의 경우는 콘크리트 강도가 부착응력도와의 관계를 쉽게 비교하기 위하여 그림 3.10에는 최대 부착응력도를 콘크리트 압축강도로 무차원한 $\tau_{amax}/c\sigma_B$ 값이 200 정도의 보통콘크리트가 0.2를 상회하나, 나머지 경우에는 0.1정도에 그쳤다. 이형철근의 경우는 콘크리트 강도가 커짐에 따라서 $\tau_{amax}/c\sigma_B$ 값이 적어지고 있다. 그러나, 콘크리트 강도가 800kg/cm²이라도 부착강도는 압축강도의 0.3배를 넘고 있음을 알 수 있다.

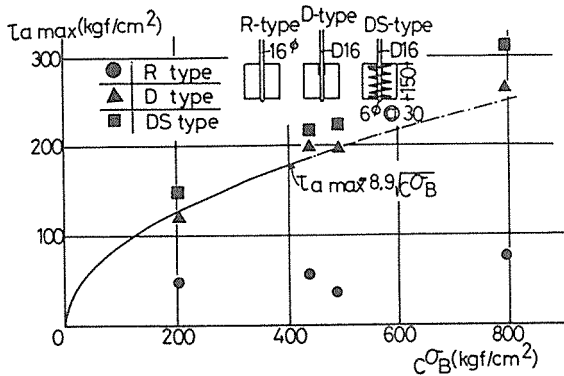


그림 3.9 τ_{max} 와 $c\sigma_B$ 관계

3. 2. 3 활열인장강도

Dewar³⁾는 28일 압축강도가 847kg/cm²(12, 105psi)에까지 이르는 콘크리트를 사용하여 간접적인 인장강도(실린더 활열인장강도)와 압축강도 사이의 관계를 밝혔다. 그의 연구에 의하면 낮은 강도에서 활열인장강도는 압축강도의 10%정도이고, 강도가 증가함에 따라 그 값은 5%로까지 감소함을 밝혀냈다. 또한, 인장 활열강도가 Gravel-Aggregate Concrete보다 Crushed-Rock-Aggregate에서 약 8%정도 더 높게 나타났고, 활열인장강도가 28일 휨강도의 약 70%였다는 것을 발견했다. Carrasquillo, Nilson, Slate⁴⁾ 등의 연구에 의하면 활열인장강도는 압축강도가 증가할지라도 그림 3. 11에서와 같이 큰 폭으로 변화하지 않으며, 압축강도가 증가하여도 일정한 상한치 내의 값을 갖게된다. 그림 3. 11은 여러 연구결과를 바탕으로 압축강도에 따른 활열인장강도의 관계를 나타낸 그림이다. 이러한 결과로부터 보통 중량 콘크리트에 대한 평균 활열인장강도 f_{sp}' 의 평균은 다음과 같은 식으로 할 수 있다.

$$f_{sp}' = 2.0 f_c' \text{ kg/cm}^2$$

for 210 kg/cm² < f_c' < 840kg/cm²

$$f_{sp}' = 7.4 f_c' \text{ psi} \dots\dots\dots (3.5)$$

for 3,000psi < f_c' < 12,000psi

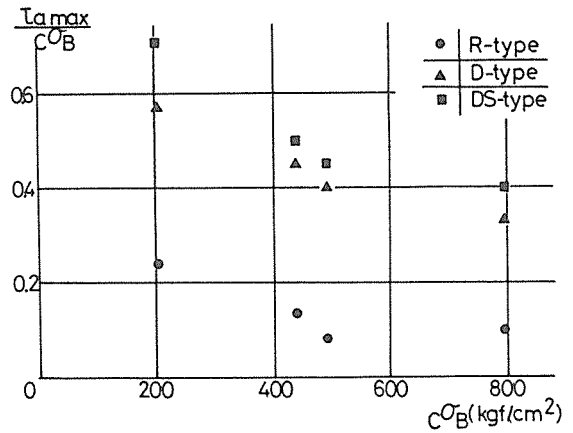


그림 3.10 $\tau_{max}/c\sigma_B$ 와 $c\sigma_B$ 관계

3. 2. 4 휨강도

경량, 보통 중량 고강도 콘크리트의 휨강도(파괴계수)는 여러 연구자들의 보고에 의하면 2.0 fc' ~ 3.2 fc' kg/cm²(7.5 fc' ~ 12 fc' psi)의 범위에 이르는 것으로 나타나 있다. 그림 3. 12는 압축강도와 휨인장강도의 관계를 보여주는 실험결과로써, 휨인장강도는 압축강도 fc'의 제곱 근에 비례하는 것으로 나타나 있다.

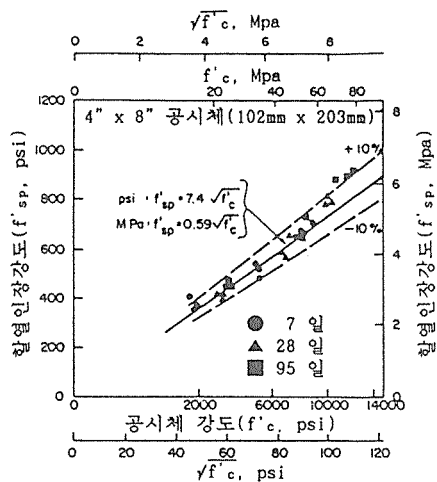


그림 3.11 콘크리트의 압축강도에 따른 활열인장강도

다음식은 일반적인 범위에서의 콘크리트 파괴계수 (Modulus of Rupture) 를 나타낸다.

$$f_r' = 3.1 f_c' \text{ kg/cm}^2$$

for 210 kg/cm² < f_c' < 840kg/cm²

$$f_r' = 11.7 f_c' \text{ psi} \dots\dots\dots (3.6)$$

for 3,000psi < f_c' < 12,000psi

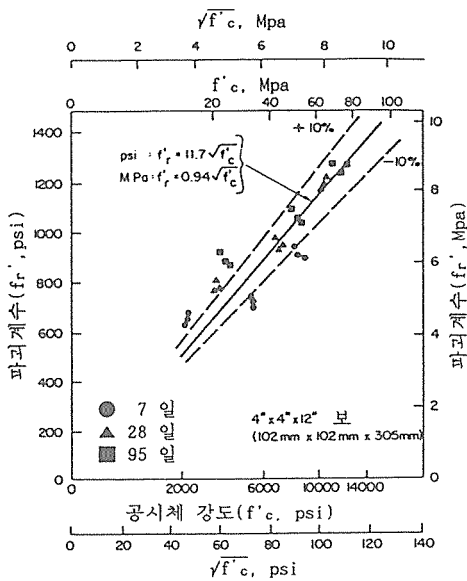


그림 3.12 콘크리트의 압축강도에 따른 휨인장강도

3.2.5 피로 강도

고강도 콘크리트의 피로 거동에 관한 연구는 그리 많지 않다. Bennett와 Muir⁵⁾ 등은 압축강도 780kg/cm² (11,155 psi) 의 고강도 콘크리트 시험체를 일축 압축 상태에서 피로 강도시험을 하였는데, 100만번 이상의 반복 하중을 받은 시험체의 피로강도는 최저응력 87.5kg/cm² (1,250 psi) 에 대한 정적 강도의 66~71% 사이에서 변화한다는 것을 밝혀냈다. 일반적으로, 고강도 콘크리트의 피로강도는 보통콘크리트와 비교해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2.6 재령에 따른 강도

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 초기재령에서 더 높은 강도발현을 보였지만 재령이 증가할수록 그 차이는 감소하게 된다(그림 3.13). Parrott⁶⁾ 등의 연구에 따르면 28일 강도에 대한 7일 강도의 비율이 고강도 콘크리트에 대해서는 0.8~0.9이고, 보통강도 콘크리트에서는 0.7~0.75가 된다고 한다. 반면, Carrasquillo, Nilson과 Slate⁴⁾는 95일 강도에 대한 7일 강도의 비율이 저강도 콘크리트에서는 0.60, 보통강도 콘크리트에서는 0.65 그리고 고강도 콘크리트에 대해서는 0.73이라는 것을 밝혔다. 초기경화에서 고강도 콘크리트의 강도가 높은 비율로 증가하는 현상은

- (1) 고강도 콘크리트의 높은 수화열에 의한 콘크리트 실린더 내부에서의 양생온도의 상승
- (2) 물 - 시멘트 비가 낮아짐에 따라 수화현상이 발생하는 입자간의 간격이 좁혀지는 것 등에 의해 초기에 높은 강도를 얻게 된다.

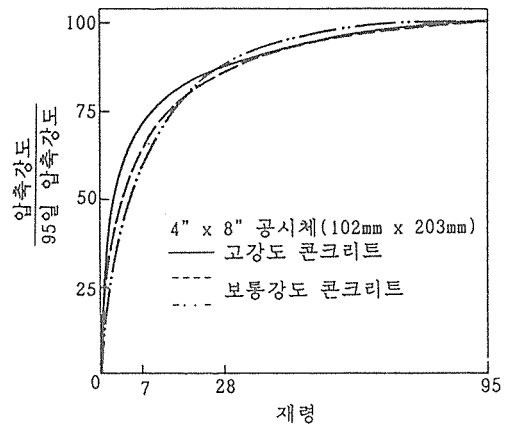


그림 3.13 습윤양생된 Limestone Concrete의 재령에 따른 강도

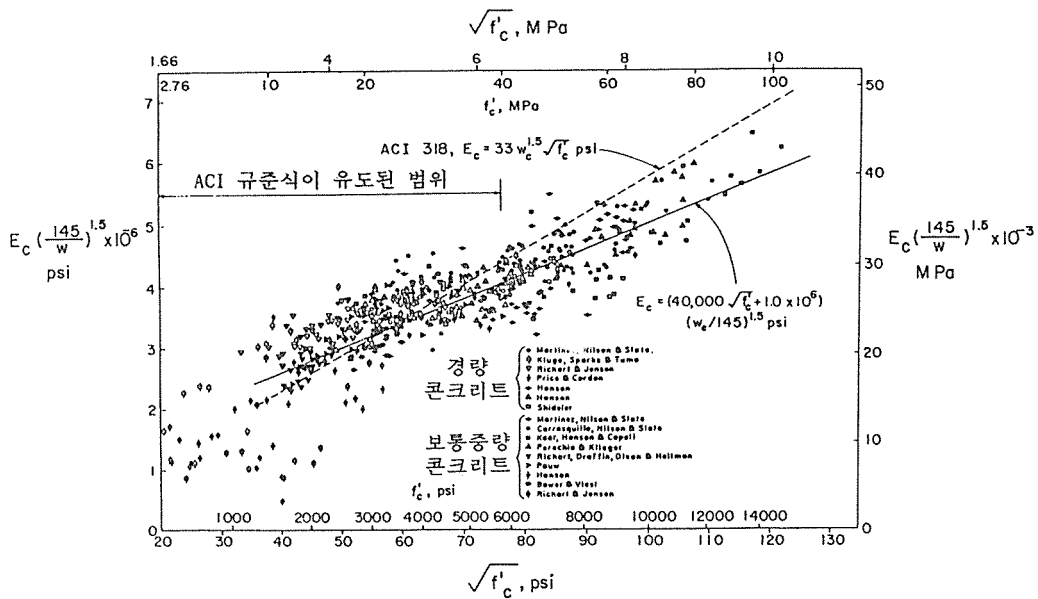


그림 3.14 콘크리트의 강도에 따른 탄성 계수의 변화

3.3 탄성계수

1934년 Thoman과 Rader는 콘크리트 압축강도 (10,000~11,000 psi)가 최대응력 (4.2×10⁶~5.2×10⁶psi)의 25%일때 일축 압축상태의 응력도-변형도 곡선상에서 접선기울기로서 결정된 탄성계수 값을 보고했다. 그후 많은 다른 연구자들이 계수 결정법에서 고강도 콘크리트 탄성계수 값을 3.16~4.57×10⁹kg/cm² (4.5×10⁶~6.5×10⁶ psi) 범위에 든다고 보고했다.

그림 3.14는 건조 단위 중량 2.346kg/cm³ (145 lb/ft³)을 가정한 고강도 콘크리트의 탄성계수와 보통강도 콘크리트 탄성계수의 실험치를 도시한 것이다. ACI318에서는 Pauw⁷⁾의 실험 데이터를 분석하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 E_c &= 15,100 f_c' \text{ kg/cm}^2 \\
 E_c &= 57,000 f_c' \text{ psi} \dots\dots\dots (3.7)
 \end{aligned}$$

그런데, 위의 식은 압축강도 420kg/cm² (6,000psi) 이상의 콘크리트에 대해서 탄성계수를 상당히 과대 평가하고 있다. 따라서, Martinez et.⁸⁾은 보통 중량 콘크리트에 대한 탄성계수 Ec와 압축강도 fc'의 관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

$$\begin{aligned}
 E_c &= 10,610 f_c' + 70,300 \text{ kg/cm}^2 \\
 &\text{for } 210 \text{ kg/cm}^2 < f_c' < 840 \text{ kg/cm}^2 \\
 E_c &= 40,000 f_c' + 1.0 \times 10^6 \text{ psi} \dots\dots (3.8) \\
 &\text{for } 3000 \text{ psi} < f_c' < 12,000 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

표 3.1은 압축강도 321~780 kg/cm² (4,570~11,100psi) 콘크리트에 대한 탄성계수의 실험치를 굵은 골재종류에 따라 나타낸 것이다. 예측된 값의 편차는 굵은 골재의 성질과 비율에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 예를들면 식(3.8)에 의한 예측값보다 큰 값은 Russell, Saucier, Pfeiffer 등의 연구에 의해 보고되었다. 이 같이 Gravel Concrete

의 탄성계수가 Limestone Concrete에 비해 상대적으로 작은 값을 갖는데, 이는 Gravel Concrete에서 몰탈과 골재간의 부착강도가 상대적으로 작고, 또한 콘크리트의 균질성이 떨어져 같은 강도에서 Gravel Concrete보다 많은 미세균열이 발생하기 때문이다.

3.4 포아송 비

고강도 콘크리트에 대한 포아송 비의 실험데이터는 별로 많지 않다. Shideler⁹⁾와 Carrasquillo⁴⁾ 등은 28일 압축강도 730kg/cm² (10,570 psi)를 갖는 경량골재 고강도 콘크리트의 포아송비를 압축강도, 재령, 습윤상태와 무관하게 0.20정도로 보고했다. 한편, Perenchio와 Klieger는 압축강도 560~812kg/cm² (8,000~11,600psi)에 이르는 보통 중량고

강도 콘크리트의 포아송 비를 0.20~0.28정도로 보고하고, 물 - 시멘트 비가 증가함에 따라 포아송 비가 감소하는 경향이 있음을 밝혀냈다. 또한, Kaplan¹⁰⁾은 콘크리트의 동적 포아송 비는 압축강도 175~805kg/cm² (2,500~11,500 psi) 사이에서 압축강도, 재령, 습윤상태와 무관하게 0.23~0.32정도로 보고했다. 이러한 사실로부터 고강도 콘크리트의 포아송비는 보통강도 콘크리트와 큰 차이가 없이 0.20정도로 보아도 무방할 듯하다.

3.5 수축

고강도 콘크리트의 수축거동에 관해서 이용가능한 정보는 거의 없다. 초기 수축 비는 비교적 높은 것으로 보고 되었지만 180

표 3.1 콘크리트의 압축강도에 따른 역학적 특성치

조골재 종류	압축강도 kg/cm ² (psi)	최대응력시 변형도	탄성계수 x10 ⁵ (kg/cm ²)	포아송비
Crushed Lime- Stone	345 (4910)	0.0026	2.28	0.19
	331 (4710)	0.0023	2.92	0.22
	328 (4670)	0.0026	2.09	0.20
	599 (8520)	0.0030	3.02	0.21
	583 (8290)	0.0030	3.00	0.21
	602 (8570)	0.0028	2.96	0.24
	750 (10670)	0.0029	3.52	0.22
	777 (11050)	0.0030	3.73	0.21
	780 (11100)	0.0029	3.75	0.21
Gravel	345 (4910)	0.0031	2.25	0.19
	326 (4640)	0.0031	2.15	0.19
	321 (4570)	0.0029	2.12	0.19
	552 (7860)	0.0034	2.28	0.21
	499 (7100)	0.0029	2.40	0.20
	502 (7140)	0.0033	2.12	0.21
	653 (9290)	0.0028	2.85	0.21
	669 (9520)	0.0031	2.57	0.25
	666 (9500)	0.0030	2.60	0.21
	743 (10570)	0.0036	2.62	0.20

일 건조 후에는 돌로마이트 또는 석회석으로 만든 고강도와 보통강도 콘크리트 사이에 수축은 거의 차이가 없는 것으로 알려져 있다. 양생기간을 28일에서 7일로 감소 시키면 약간의 수축 증가현상이 발생했다. 수축은 물 - 시멘트 비에 영향을 받지 않았지만, 콘크리트 용적에 대한 물의 백분율에 거의 비례한다. 다른 실험연구와 현장 작업 연구로부터 고강도 콘크리트의 수축은 보통강도 콘크리트의 수축과 유사 하다는 것을 알았다. Nagataki와 Yonekura는 고성능 감수제 (High-Range Water Reducer)를 사용한 고강도 콘크리트의 수축이 보통강도 콘크리트의 수축보다 적다고 보고했다.

3.6 크리이프

Parrott는 종국강도의 30%에 해당하는 하중을 받고있는 밀봉 (Sealed)된 고강도 콘크리트에서 관찰되는 전체 변형은 단기 변형의 비로 표현될때 보통강도 콘크리트의 전체 변형과 동일하다고 발표했다. 건조상태에서 이 비율은 보통강도 콘크리트에 비해 25% 적은 값이다. 대기 및 수중양생한 고강도 콘크리트의 전체 장기변형은 비교적 유사한 응력 상태에 있는 보통강도 콘크리트의 전체 장기 변형에 비해 각각 15%와 65%정도 더 높은 값을 나타냈다. Ngab 등은 대기 및 수중양생 조건하에서 고강도 콘크리트 크리이프 사이에 차이가 거의 없다는 것을 발견했다. 물의 양을 극도로 줄여서 만든 고강도 콘크리트의 크리이프 변형은 상당히 감소되었다고 보고되었다. 최대 기준 크리이프는 똑같은 재령 시기에 재하된 보통강도 콘크리트에 비해 고강도 콘크리트가 더 적었다.

그 한 예는 그림 3.15와 같다. 그러나 고강도 콘크리트가 더 큰 응력을 받으므로 전체 크리이프는 어떤 콘크리트에 대해서도 동일한 양상을 보일것이다. 고강도 콘크리트

트로 시공된 기둥에서는 크리이프 변형으로 인한 문제점이 발견되지 않았다. 보통강도 콘크리트에서 나타난 양상과 마찬가지로, 재하일수가 증가함에 따라 크리이프 변형은 감소되고, 물 - 시멘트 비가 증가하면 기준 크리이프 변형도 증가하며, 또 적용된 응력과는 선형적인 관계가 성립 한다. 이러한 선형적 특성은 보통강도 콘크리트에 비해 더 높은 응력도 - 변형도 비로 확장된다.

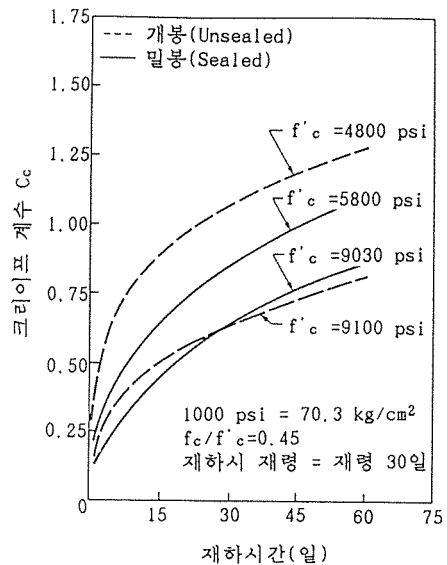


그림 3.15 재하시간과 크리이프계수의 관계

3.7 내구성

1) 동결융해작용에 대한 내구성

콘크리트의 동결융해 저항 특성은 공극의 체제와 굵은 골재의 건설성, 수화반응의 정도, 시멘트 페이스트의 정도 및 콘크리트의 함수 상태에 따라 달라지며, 혼화재료의 사용시 연행된 공기량에 유의해야 한다. 콘크리트가 연행한 공기량은 동결융해 현상을 받는 고강도 콘크리트의 압축강도를 감소시키는 효과를 갖기도 한다. 충분한 내력을 갖는데 필요한 공기량에 관한 정보는 서로

모순이 있다. 예를들면, Saucier, Tynes, 그리고 Smith는 가속 실험실에서 행한 동결-융해 시험으로부터 고강도 콘크리트가 습윤 상태에서 동결된다면, 공기 함유로 인한 강도 손실이 있지만, 공기가 함유된 콘크리트는 주시되어야 한다. 반대로, Perenchio와 Klieger는 공기가 함유 되었는지, 함유되어 있지 않은지에 대한 자신들의 연구에 사용한 모든 고강도 콘크리트의 동결-융해에 대한 우수한 저항을 얻었다. 그들은 이러한 저항 현상이 동결할 수 있는 물의 함량이 크게 감소되는 것과 고강도 콘크리트의 인장강도가 증가하는 것 때문이라고 결론지었다. 또한, 플라이 애쉬 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 동결융해저항 특성이 조금 떨어지는 것으로 보고되어 있으나, 플라이 애쉬 콘크리트의 강도가 어느 정도 이상 발현되면 크게 차이가 없다.

2) 화학작용에 대한 내구성

고강도 콘크리트는 조적이 밀실하기 때문에 화학적 작용에 대한 내구성, 내약품성 등이 우수하다는 것을 쉽게 이해할 수 있는 일이지만, 고강도 콘크리트의 역사가 짧기 때문에 이에 대한 보고서는 아주 적다.

그림 3.16은 염산 용액 속에서 콘크리트의 중량 변화를 조사한 것으로 정성적으로

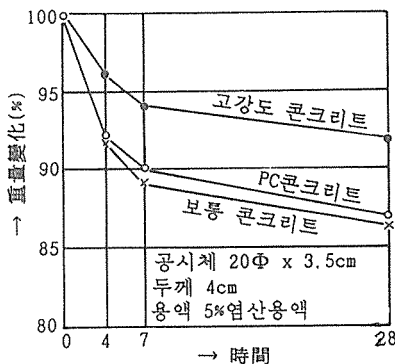


그림 3.16 내약품성 시험결과의 한 예

는 고강도 콘크리트가 보통 강도에 비해서 우수하다는 것이 명시되어 있다.

그러나, 약품의 종류, 농도(pH) 등의 영향은 아직 확실치 않기 때문에 이 방향에 대해서는 향후 더 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.8 내화성 (내열특성)

그림 3.17은 고강도 콘크리트(증기양생한 것과 Auto Clave 양생한 것)를 JIS A1304에 의해 내화성 시험을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 그림에는 내화 시험 개시 전의 값에서 저하율을 백분율로 나타낸 것이지만, 강도, 동탄성 계수에 있어서 저감율이 현저하게 나타난다.

이상의 결과로 보아 이 성상은 골재의 종류나 기타의 요인에 의해 영향을 받게 되기 때문에 검토가 계속 되어지고 있고, 상당한 보강 효과도 보고되어지고 있다. 또한, 온도가 그다지 높지 않을 경우, 예를 들면 500℃정도까지라면 탄성계수의 저하는 방지하기 힘들어도, 강도적으로는 문제가 없다는 보고도 있음으로 향후 이 내구성에 관한 많은 연구가 기대된다.

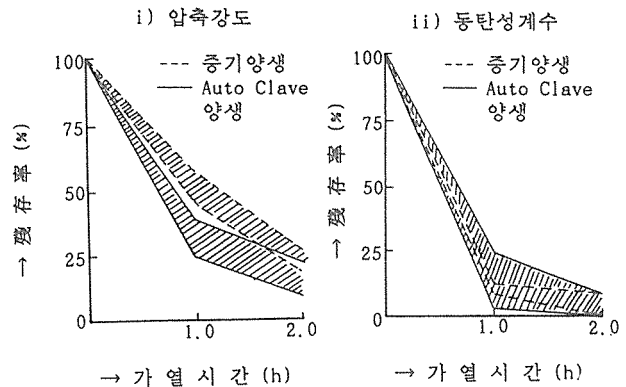


그림 3.17 고강도 콘크리트의 내화성

3.9 건조 양생효과(Drying effect)

양생이 완전히 끝나기 전에 건조한 환경에서 양생이 진행될 경우 압축강도의 감소 효과는 고강도 일수록 그 정도가 커지게 된다. 표 3.2는 두가지 건조상태에 따른 압축강도의 저하 효과를 나타낸 것이다. 즉, 처음 7일 동안은 습윤양생을 하고 재령 28일 강도를 측정할때까지 50%의 상대습도를 유지하게 한 경우와 28일 동안 습윤양생을 하고 재령 95일 강도를 측정할때까지 50% 정도의 상대습도를 유지하게 한 경우를 완전 습윤상태에서 양생한 콘크리트의 압축강도와 비교한 것이다. 첫번째 경우에서 고강도 콘크리트의 압축강도는 습윤양생된 콘크리트의 압축강도에 비해 평균 10% 정도의 강도 저하효과를 나타냈으며, 같은 조건에서의 보통강도 콘크리트는 4%정도 강도가 저하되었다. 두번째 경우에서도 고강도 콘크리트는 4% 정도의 강도 저하형상이 발생하였으며, 보통강도 콘크리트는 거의 습윤양생시와 같은 강도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

건조 양생시 휨강도의 저하효과는 현저하여 첫번째 양생조건에서 고강도 콘크리트는

대략 26% 정도의 강도저하 현상이 나타났다. 이러한 휨강도의 감소는 직접 인장과 건조수축에 따른 파괴양상에 그 원인을 찾을 수 있다.

3.10 수화반응에 따른 열방출

수화에 의해 콘크리트 내부에서 발생하는 온도상승은 시멘트 함량, 물 - 시멘트비, 부재의 치수, 주변온도, 환경등에 좌우된다. Freedman은 Saucier 등의 Data로부터 고강도 콘크리트의 온도상승은 대략 $11 \sim 15 \text{ }^\circ\text{F}/100 \text{ lb of cement/yd}^3$ (시멘트 $59\text{kg}/\text{m}^3$ 당 $6 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$) 라고 발표한 바 있다.

4. 맺음말

고강도 콘크리트의 특성은 미래의 연구결과에 따라 수정되어야 한다고 생각된다. 특히 전단, 사인장, 비틀림, 부착, 고정, 정착길이, 반복하중의 효과 등에 대한 자료가 부족한 형편이다. 현재 여러 연구자들은 이해해야 한다. 비록 고강도 콘크리트가 비교적 새로운 재료로 여겨지고 있지만, 북미의 많

표 3.2 건조양생에 따른 강도 저하

습윤 양생(일)	건조 주기(일)	실험시 재령(일)	건조양생후 강도			
			실험시까지 습윤양생후 강도			
			압축강도($f'c$)		파괴계수($f'r$)	
보통강도	고강도	보통강도	고강도			
0-7	8-28	28	0.98	0.91	0.83	0.74
0-7	8-28	28	0.94	0.89	0.86	0.74
0-7	8-28	28	0.95	0.88	0.88	0.74
0-28	29-95	95	0.99	0.95	0.97	0.91
0-28	29-95	95	1.01	0.96	0.96	0.93
0-28	29-95	95	0.99	0.96	0.99	0.91

보통강도 : $f'c = 234\text{kg}/\text{cm}^2$ @ 28일 : $f'c = 264\text{kg}/\text{cm}^2$ @ 95일

고강도 : $f'c = 718\text{kg}/\text{cm}^2$ @ 28일 : $f'c = 813\text{kg}/\text{cm}^2$ @ 95일

* 3회 실험의 평균치

은 지역에서 그 사용례를 보여 주는 바와 같이 신재료의 수요에 좋은 반응을 보이고 있고, 생산기술을 습득하고 있다. 신재료의 많은 발전과 더불어 그 발전을 보장해 줄 수 있는 연구자료 역시 많이 증가 되었다. 그러나 전술한 바와 같이 전단강도, 비틀림, 부착과 정착길이, 반복하중의 영향에 관한 분야에서는 여전히 많은 자료를 필요로 하여 몇몇 연구 계획들이 이러한 요구에 부응하기 위하여 추진되고 있다. 그러나 고강도 콘크리트의 이점을 최대한으로 활용하고, 그 성능을 증명하기 위해서는 보다 많은 연구가 진행될 필요가 있다.

참고문헌

- 1) Henry G. Russell, "Development in High Strength Concrete," 1990 ACI Seminar on High Strength Concrete in Korea, pp.1~7
- 2) ACI 363, "State of the Art Report on High Strength Concrete," ACI Report No. ACI 363 R-84, July/Aug. 1984
- 3) Dewar, J. D., "The Indirect Tensile Strength of Concrete of High Compressive Strength," Technical Report No. 42.337, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, Mar. 1964. 12pp
- 4) Carrasquillo, Ramon L., Nilson, Arthur H. and Slate, Floyd O., "Properties of High "Strength Concrete Subject to Short-Term Loading," ACI Jou., Proc. V.54, No. 4, Oct. 1957, pp. 299~329.
- 5) Bennett E.W., and Muir, S.E. St. J., "Some Fatigue Tests High Strength Concrete in Axial Compression," Magazine of Concrete Reach (London), V.19, No.59, June 1967, pp. 113~117
- 6) Parrot, L.J., "The Properties of High Strength Concrete," Technical Report No. 42.417, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, 1969, 12pp.
- 7) Pauw, Adrian, "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density," ACI Jou., Proc. V.57, No.6, Dec. 1960, pp.679~688
- 8) Martinez, S., Milson, Arthur H. and Slate, Floyd O., "Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns," Research Report No. 82~10, Department of Structure Engineering, Cornell Univ., Ithaca, Aug. 1982
- 9) Shideler, J.J., "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use," ACI Jou., Proc. V.54, No.4, Oct. 1957, pp. 171~178
- 10) Kaplan, M.F., "Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete made with Thirteen Different Coarse Aggregate," RILEM Bulletin (Paris), New Series No.1, Mar, 1959, pp. 58~73
- 11) 신성우, "건축물에서의 고강도 콘크리트(HSC) 이용에 관하여, "주택 제49호, 대한 주택공사, 1988.
- 12) 정현수, "고강도 철근콘크리트 구조, " 태림문화사, 1989.
- 13) 朴七林, "고강도 콘크리트의 실용화에 관한 국내외 연구동향", "콘크리트학회지, 제2권 3호, 1990. 9, pp27~36
- 14) 이리형, 오영훈, 윤현도, 최창식, "고강도 콘크리트를 사용한 R/C 전단벽의 강도와 변형능력", 한국콘크리트학회 학술발표논문집 제2권 제1호, 1990. 5
- 15) 한국콘크리트학회, "고강도 콘크리트 실용화연구", 1990. 12.