

## 거푸집 양생 조건에 따른 콘크리트의 압축강도 특성

김경남\* · 박상렬\*\* · 문경태\*\*\* · 심재용\*\*\*\*

Kim, Kyoungnam\* · Park, Sangyeol\*\* · Moon, Kyoungtae\*\*\* · Shim, Jaeyong\*\*\*\*

### Characteristics of Compressive Strength of Concrete due to Form Curing Condition

#### ABSTRACT

The time for form removal is an important factor for ensuring the safety and economical efficiency of concrete structures, because it affects the quality, period, and cost of construction. Although local specifications suggest the form curing time, there is a problem of low quality of concrete due to early removing of form. This is because they do not fully understand effect of curing condition, and they want to shorten construction period in the field. Therefore, this research evaluates the effect of curing condition according to the time for form removal by testing specimen. As a result, the concrete compressive strength at the age of 28 days decreased about 40% in the condition of form removal after 12 hours, while the strength in the condition of form removal after 28 days decreased about 7%. Finally, this paper suggests an estimating equation for the concrete compressive strength due to the time for form removal considering various curing temperatures as equivalent ages. The proposed equation can be used in the field for evaluating the strength after form removal.

**Key words :** Form, Form removal, Time for form removal, Curing condition, Compressive strength

#### 초 록

거푸집의 탈형 시기는 콘크리트 구조물의 품질과 공사기간, 공사비에 영향을 주는 직접적인 요인으로 콘크리트 구조물의 안전성과 경제성을 확보하는데 중요한 요소이다. 국내 규정에서 거푸집 존치에 대한 규정을 제시하고 있으나 조기에 거푸집을 해체하여 콘크리트의 품질이 저하되고 있다. 이는 양생조건에 대한 이해가 부족하고 공사기간이 단축되길 원하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 거푸집 탈형시기에 따른 양생조건이 압축강도에 미치는 영향을 시험을 통하여 평가하였다. 연구 결과 거푸집의 12시간 후 조기 탈형은 콘크리트의 28일 압축강도를 최대 약 40% 정도까지 저하시켰으며, 거푸집을 28일 동안 장기간 존치할 경우에는 28일 표준압축강도 대비 약 7%의 강도저하를 가져왔다. 결론으로 본 논문에서는 양생온도를 등가재령으로 고려하여 거푸집 해체 시기에 따른 콘크리트의 압축강도 추정식을 제안하였다. 이 제안식은 현장에서 거푸집 제거 후의 콘크리트 압축강도 평가에 활용될 수 있다.

**검색어 :** 거푸집, 탈형, 탈형시기, 양생조건, 압축강도

## 1. 서론

콘크리트 구조물은 거푸집을 이용하여 원하는 형상을 쉽게 만들 수 있다는 장점도 있으면서, 거푸집이 없이는 만들 수 없다는 제한도 있다. 거푸집이란 굳지 않은 콘크리트를 부어넣어 일정시간 경과 후 경화하여 자립할 수 있을 때까지 콘크리트 구조물의 형상을 유지하고

\* 제주특별자치도의회 자문위원 (Jeju Special Self-Governing Province Council · kkn3107@korea.kr)

\*\* 중신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Jeju National University · sypark@jejunu.ac.kr)

\*\*\* 중신회원 · 제주대학교 토목공학과 박사과정 (Jeju National University · ktmooon@jejunu.ac.kr)

\*\*\*\* 동남건설 부장 (Dongnam Construction Co. · sjy0119@naver.com)

Received September 22, 2017/ revised November 23, 2017/ accepted December 14, 2017

지지하기 위한 거푸집 널 및 지지틀 등의 가설구조물을 충칭한다. 이러한 거푸집은 첫째 콘크리트가 구조체로서의 강도를 발휘하기 까지 요구되는 형상, 치수 및 위치를 확보하는 역할을 하며, 둘째 콘크리트의 소성수축균열을 유발하는 바람과 낮은 습도를 막아주고 수화반응 중 수분이 외부로 유출되는 것을 막고 초기 동해 피해를 입지 않도록 보호하는 역할을 하고, 셋째 각종 간격재와 더불어 철근의 피복두께를 일정하게 유지하는 역할을 하며, 넷째 콘크리트 구조물의 표면 마무리 역할을 한다. 따라서 거푸집은 콘크리트 품질에 큰 영향을 미치며 특히 거푸집 탈형시기는 콘크리트 양생조건으로서 콘크리트 압축강도에 큰 영향을 미치고 있다.

거푸집 탈형시기는 콘크리트 구조체의 품질과 공사기간, 공사비 등에 영향을 주는 직접적인 요인으로 구조물의 안전성을 확보하면서 경제적으로 공사를 수행하기 위해서는 적절한 시기에 거푸집을 탈형해야 한다. 거푸집은 양생기간을 늘리기 위해 가능한 한 오래 두는 것이 좋다. 그러나 필요한 안전성이 확보된다면 공사기간에 따른 경제성을 고려할 때 가급적 빨리 제거하는 것이 필요하다. 현행 콘크리트 거푸집 손처리에 관한 규정은 콘크리트 표준시방서(MOLIT, 2016)와 건축공사 표준시방서(MOLIT, 2015)에서 구조부재의 종류와 하중조건, 양생조건에 따라 규정하고 있다. 그러나, 실무 건설현장에서의 거푸집 탈형시기에 관한 관리는 관련 규정에 대한 이해 부족 및 공사기간 단축, 강도시험 수행의 어려움 등으로 인해 콘크리트의 압축강도 확인이나 재령을 준수하지 않고 조기에 거푸집을 탈형하여 콘크리트 품질저하의 원인이 되고 있다(Yoon, 2002).

따라서 본 연구에서는 거푸집 탈형 시기에 따른 양생조건이 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해, 현장양생(기건양생)과 표준양생(습윤양생), 기건양생시 거푸집 탈형시기를 변수로 선정하여 실제 현장에서 사용하는 합판 거푸집을 사용하여 입방형 공시체를 제작하여 시험하고 그 결과를 분석하여 거푸집 탈형시기에 따른 28일 압축강도 추정식을 제안함으로써 현장에서의 콘크리트 품질관리에 활용할 수 있도록 하였다. 또한 현장의 다양한 온도 조건에서 재령에 따른 콘크리트의 강도를 쉽게 예측할 수 있도록 적산온도를 활용하여 등가재령 환산식을 제안하였으며, 기존의 등가재령식과 비교하여 정확성을 검증하였다.

## 2. 거푸집 양생 조건에 대한 기존 연구 고찰

거푸집이나 공시체 몰드의 탈형에 따른 양생조건이 콘크리트의 강도 발현에 미치는 영향에 관련된 기존 연구를 정리하면 다음과 같다. Yoon et al.(2002)는 적절한 거푸집 탈형시기를 결정하기 위하여 압축강도 추정을 위해 적산온도를 사용하는 방법을 정리하고 슈미트 햄머의 반발도와 압축강도 사이의 관계를 실험결과를 통해 분석하고 콘크리트와 거푸집 간의 부착강도를 재령에 따라

정리하여 거푸집 탈형시기를 결정하기 위한 방안을 제안하였다. Han et al.(2002) 및 Han and Han(2004)도 보통 콘크리트 및 고강도 콘크리트의 배합비에 따라 거푸집과 콘크리트 사이의 부착강도와 슈미트햄머의 반발도와 압축강도 사이의 관계를 평가하므로 거푸집 탈형시기를 제안하였다. Cho and Jaung(2008), Park et al.(2009a), Park et al.(2009b)은 콘크리트의 양생방법에 따른 고강도 콘크리트의 강도발현 특성을 평가하고 구조체 콘크리트의 강도에 가장 근접하는 강도관리 기법을 제안하였다. Yoon et al. (2002) 및 Han et al.(2002), Han and Han(2004)는 콘크리트와 거푸집 사이의 부착강도 및 슈미트 햄머의 반발도를 기반으로 거푸집 탈형시의 콘크리트의 강도에 중점을 둔 연구이고, Cho and Jaung(2008) 및 Park et al.(2009a), Park et al.(2009b)은 고강도 콘크리트의 구조체와 유사한 강도발현 특성을 가지는 양생 방법을 제안하기 위한 연구로 거푸집을 조기에 탈형한 경우 재령에 따른 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향에 대해서는 평가하지 못하고 있다.

Gonnerman(1930)는 콘크리트 양생방법에 대한 연구에서 공시체 몰드를 사용하여 초기 습윤양생과 몰드 탈형 후 기건양생에 따른 압축강도는 공기 중 양생기간이 길수록 작아져 전 기간 기건양생일 경우 1년 후 강도는 습윤표준양생에 비해 약 50% 정도이며 13일동안 습윤양생 후 기건양생한 경우는 약 70%에 이르며, 또한 시험강도는 시험 시 공시체의 습윤상태에 따라 다르다고 하였다. 즉, 강도시험시 건조상태의 공시체가 습윤상태의 공시체보다 약 14-20% 높게 나타났다. Price(1951)도 콘크리트 강도에 영향을 미치는 요소에 대한 연구에서 Gonnerman의 양생조건에 대한 연구와 비슷하나 강도시험시 건조상태로 시험하여 28일 압축강도의 경우 초기 습윤양생 후 7일 이후 기건양생일 경우 오히려 전기간 표준 습윤양생의 경우보다 높게 나타나고 있다. Popovics(1986)는 콘크리트 강도에 미치는 양생방법과 최종 습윤조건에 영향을 연구에서 전 기간 표준습윤양생에 있어 강도시험시 건조된 상태의 28일 압축강도가 습윤된 상태에 비해 약 18% 높게 나타났다.

등가재령은 콘크리트가 임의의 온도에서 양생되었을 때의 재령을 기준온도로 양생했을 때와 동일한 적산온도를 나타내는 재령으로 정의한다. 등가재령은 1954년 Rastrup(1954)에 의해 처음 제안되었으며, 이후 아레니우스식(Arrhenius Equation)을 이용하여 등가재령을 산출하는 방법(이하, Arrhenius model)을 Hansen and Pedersen(1977)이 제안하여 이용되고 있다.

## 3. 시험계획

### 3.1 시험체 및 변수

우리나라에서는 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위한 표준공

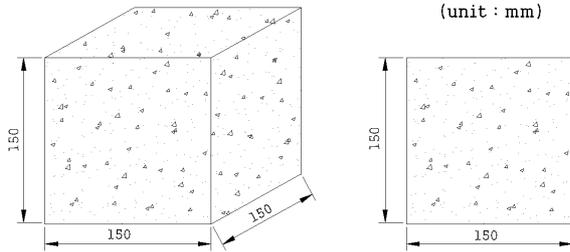


Fig. 1. Dimensions of Test Specimen

Table 1. Test Parameter

Parameter		UCS test (day)					No. of specimens
Curing condition	Removal of forms	1	3	7	28	90	
In air	After 12h	10	10	10	10	10	50
	After 3days		10	10	10	10	40
	After 7days			10	10	10	30
	After 28days				10	10	20
Moist-cured	After 24h	10	10	10	10	10	50
Total		20	30	40	50	50	190

시체로 원주형 공시체(150×300mm)를 사용하고 있으나, 현장에서 거푸집으로 가장 많이 사용되고 있는 코팅합판을 사용하고, 총 190개의 많은 시험체를 제작하기 위하여 Fig. 1에 나타난 것과 같이 영국규격(BS EN 12390)에서 제시하고 있는 150×150×150mm의 정육면체 공시체를 시험체로 선정하였다.

거푸집의 탈형시기와 양생조건이 재령별 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 변수를 Table 1과 같이 선정하여 19개의 타입을 정하였다. 시험체는 각 변수별 10개씩 제작하였으며, 총 190개의 시험체에 대하여 압축강도시험을 수행하였다.

### 3.2 사용재료

#### 3.2.1 거푸집

거푸집 제작에는 12mm 코팅합판을 사용하였으며, 치수에 맞게 재단하고 조립하여 시험체 5개가 한 조가 되도록 만들었으며, 이물 질 제거 후 박리제를 도포한 후 사용하였다.

#### 3.2.2 콘크리트

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계강도가 21MPa인 S사의 레디믹스콘크리트(Ready Mixed Concrete)를 사용하였으며, 배합비는 Table 2에 제시하였다. KS 규격에 따라 슬럼프 및 공기량, 염화물 함유량시험을 수행하였으며, 규격에서 제시하는 허용오차 범위 안에 있었고 콘크리트의 설계값과 시험결과를 Table 3에 정리하였다.

Table 2. Mixture Proportion of Concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Remark
	W	C	F.A.	C.A.	AD	
59.5	168	282	969	943	2.26	Superplasticizer

Table 3. Properties of Concrete

	Design	Test result
Type of cement	Portland (Type 1)	
Max. aggregate size (mm)	25	24.6
Slump (mm)	120	119.6
Air content (%)	4.5±1.5	4.15
Chloride content (kg/m <sup>3</sup> )	below 0.3	0.28
Compressive strength (MPa)	21	23.99

Table 4. Temperature and Humidity by Date

Date after concrete placing (day)	Mean temp. (°C)	Mean relative humidity (%)	Temp. in water tank (°C)	Remark
1	26	70	23	
2	24	60	21	
3	24	62	21	
4	25	62	21	
5	24	61	21	
6	24	67	21	
7	23	67	20	
8~14	23	62	20	
15~21	22	59	20	
22~30	23	70	20	
30~45	20	50	20	
46~60	19	52	20	
61~76	16	65	19	
77~81	14	57	18	
82~90	12	55	18	

### 3.3 콘크리트 타설 및 양생

콘크리트 타설시 재료분리가 일어나지 않도록 거푸집에 근접하여 콘크리트를 부어 거푸집에 채워넣었으며, 2층으로 각 25회씩 붓다짐하였다. 기건양생 시험체는 타설 후 탈형 전까지 PE 필름으로 봉합하여 자체 습기가 대기로 증발하지 못하도록 처리하여 양생하였다. 표준양생 시험체는 타설 후 충분한 습윤상태의 부직포로 보양하여 24시간 후 탈형하여 수조에서 습윤 양생하였다.

Table 4는 양생기간 동안의 기온과 습도를 정리한 것으로 기건양생시 공기 온도는 26~12°C, 표준양생시 수조내 물의 온도는 23~18°C, 공기의 상대습도는 70~50% 범위의 분포를 나타내었다.

Table 5. Specification of Testing Machine

Model	Material Test System
Max. capacity	1000kN
Rate of loading	1 ~ 500mm/min
Measuring accuracy	within ± 0.5%
Control type	Servo Valve Type
Load method	Hydraulic Servo Type
Product company	Dae Yeong



Fig. 2. Test Set-up

### 3.4 시험방법 및 장치

시험은 콘크리트 압축 강도 시험방법(KS F 2405, BS EN 12390)을 참조하여 수행하였다(Korean Standard, 2010).

데이터의 정확도를 높이기 위해 시험전문기관에 의뢰하여 시험 하였으며, 각 시험체의 최대 압축강도를 측정, 수집하였다. 시험에 사용된 만능재료시험기의 제원을 Table 5에 정리하였으며, Fig. 2는 시험 장비에 시험체를 설치한 시험모습을 나타낸 것이다.

## 4. 실험결과 및 분석

거푸집 탈형시기와 양생조건이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 거푸집 탈형시기와 양생조건을 변수로 하여 일축압축시험을 수행하였으며, Table 6과 같은 결과를 얻었다. 본 시험에 사용한 시험체는 영국규격에서 제시한 입방형 공시체 (150×150×150mm)로 KS규격에서 표준으로 제시하는 직경 150×300mm의 원주형 공시체와 압축강도 결과값에 차이가 있어, 보통 강도의 콘크리트에서 원주형 공시체의 강도를 입방형 공시체의 강도로 환산하기 위해서는 1.2의 계수를 곱해야 한다는 BS 1881 (British Standard, 1983)에 따라 환산하여 결과를 분석하였다.

Table 6. Test Results

Curing cond.	Removal of forms	Compressive strength of cylindrical concrete (MPa)				
		1day	3day	7day	28day	90day
	12h	8.1	10.0	14.1	15.3	15.4
		8.3	10.2	13.8	14.7	15.3
		8.2	9.6	13.8	15.2	15.8
		7.9	9.8	14.2	15.5	15.3
		7.8	10.1	13.8	15.4	15.3
		8.0	9.7	13.6	15.3	15.2
		7.7	10.0	14.0	15.3	15.5
		8.4	9.8	14.0	15.1	15.3
		8.1	10.3	13.9	15.3	15.8
		8.2	9.6	13.5	15.2	15.7
Average		8.07	9.90	13.86	15.21	15.46
CoV (%)		2.79	2.41	1.55	1.49	1.44
	72h (3days)		12.4	16.7	19.6	19.6
			12.2	16.8	19.0	19.7
			12.3	16.3	18.8	19.5
			11.9	16.5	19.5	19.4
			12.6	16.6	19.3	19.3
			12.5	16.7	19.4	19.6
			12.2	16.1	19.7	19.6
			12.1	16.3	19.5	19.5
			11.9	16.7	19.2	19.5
			12.3	16.7	19.3	19.7
Average		12.24	16.52	19.32	19.53	
CoV (%)		1.88	1.34	1.38	0.54	
	168h (7days)			17.6	20.9	20.8
				17.5	20.3	20.8
				17.3	20.7	20.8
				17.2	20.4	20.6
				17.4	20.8	20.5
				17.3	20.7	21.0
				17.5	20.8	21.3
				17.9	20.5	20.9
				17.7	20.2	20.8
				17.3	20.6	20.9
Average			17.46	20.57	20.83	
CoV (%)			1.30	1.14	1.02	
	672 (28days)				22.4	22.4
					21.7	22.8
					22.4	22.8
					21.8	22.3
			22.8	23.1		

Table 6. Test Results (Continue)

Curing cond.	Removal of forms	Compressive strength of cylindrical concrete (MPa)				
		1day	3day	7day	28day	90day
In air	672 (28days)				22.9	22.8
					22.2	22.6
					22.2	22.6
					22.4	22.7
					22.4	22.8
	Average				22.31	22.68
	CoV (%)				1.75	0.96
Moist -cured	24h	6.8	11.4	17.5	24.2	26.3
		6.9	11.3	17.1	23.3	27.1
		7.3	11.9	17.0	23.9	26.5
		6.8	12.2	16.8	23.9	27.5
		7.0	11.8	16.7	23.8	26.2
		7.1	11.8	17.3	24.3	26.0
		6.8	11.6	16.8	24.2	26.3
		7.3	11.8	16.8	24.5	25.7
		6.9	11.5	17.1	23.9	26.2
		7.2	11.3	17.3	24.0	26.3
		Average	6.99	11.66	17.03	23.99
	CoV (%)	2.72	2.49	1.58	1.43	2.01

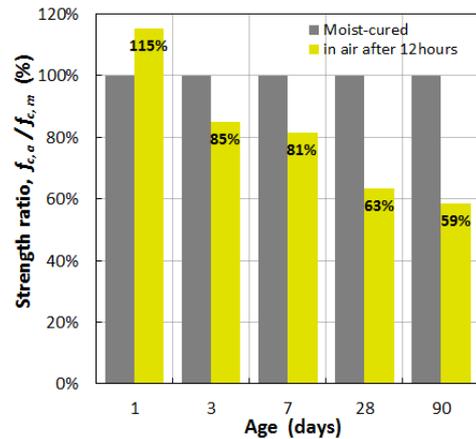


Fig. 3. Strength Ratio of Concrete in Air after 12hours to Moist-Cured Concrete

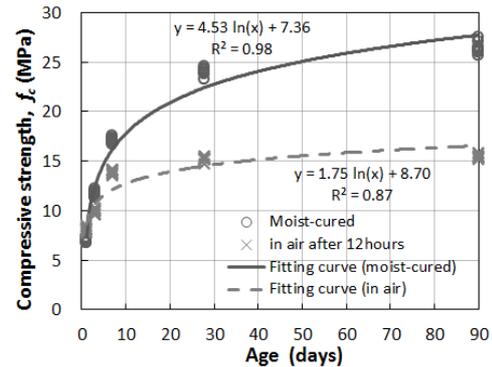


Fig. 4. Compressive Strength of Concrete in Air after 12hours and Moist-Cured Concrete

### 4.1 거푸집 탈형 시기에 따른 콘크리트의 압축강도

#### 4.1.1 12시간 후 탈형 시험체

Fig. 3은 습윤양생 시험체의 평균압축강도 대비 12시간 후 탈형한 시험체의 평균압축강도비를 재령별로 나타낸 것이고, Fig. 4는 습윤양생 시험체와 12시간 후 탈형한 시험체의 압축강도 발현양상을 재령별로 추세선과 함께 도식한 것이다.

콘크리트 타설 후 12시간 뒤 거푸집을 탈형하여 대기중에 양생시킨 시험체의 경우 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 1일 강도는 표준양생한 시험체 보다 약 15% 크게 나타났으며, 3일 강도비는 85%, 7일은 81%, 28일은 63%, 90일은 59%를 나타내어 재령이 증가함에 따라 강도의 차이가 크게 나타났다. 거푸집을 조기 탈형한 시험체의 1일 강도가 습윤양생한 시험체보다 높게 나타난 것은 양생초기의 연약한 상태에서 대기의 온도가 표준양생의 수조 온도보다 높고, 시험시 시험체가 거푸집 탈형에 의해 건조하게 되어 건조한 상태의 콘크리트가 습윤상태의 콘크리트보다 강도가 높게 나타나는 현상으로 판단된다(Bartlett and MacGregor, 1994). 그러나 거푸집 탈형 후 대기 노출에 의해 수분 증발이 빨라져서 수화반응이 충분이 이루어지기 전에 내부 수분을 상실하여 콘크리트의 경화가 조기에 끝나며, 7일 이후로 강도 발현량이 크게 감소하였다. 결과적으로

최종적인 콘크리트의 28일 압축성능은 습윤양생 대비 약 60% 수준에 그치게 되어 조기 탈형에 의해 콘크리트 강도가 크게 저하되었다.

#### 4.1.2 3일 후 탈형 시험체

Fig. 5는 습윤양생 시험체의 평균압축강도 대비 3일 후 탈형한 시험체의 평균압축강도비를 도식한 것이고, Fig. 6은 재령에 따른 압축강도 발현양상을 나타낸 것이다. 타설 후 3일 뒤에 거푸집을 탈형하여 대기양생시킨 시험체도 12시간 후 탈형한 공시체와 비슷한 양상을 보이고 있다. 탈형 전까지 거푸집이 수화반응에 필요한 수분을 상당히 유지시키길 수 있었으며, 거푸집이 수화열의 발산을 차단하여 습윤양생보다 높은 온도에서 경화되고, 거푸집에서 양생된 시험체가 탈형시 습윤양생된 시험체보다 건조된 상태로 건조상태 공시체가 습윤상태 공시체보다 강도가 높게 나오는 현상인 약 5%정도 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 탈형 이후에는 수분의 증발에 의하여 수화작용이 충분이 이루어지지 못하여

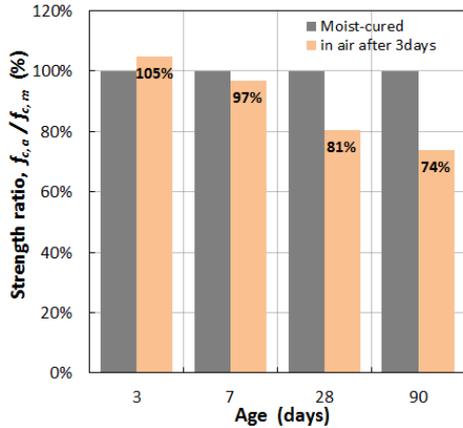


Fig. 5. Strength Ratio of Concrete in Air after 3days to Moist-Cured Concrete

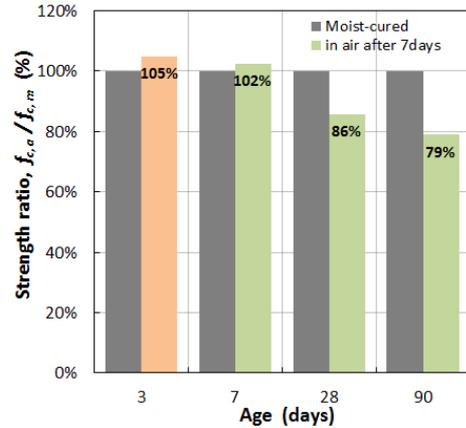


Fig. 7. Strength Ratio of Concrete in Air after 7days to Moist-Cured Concrete

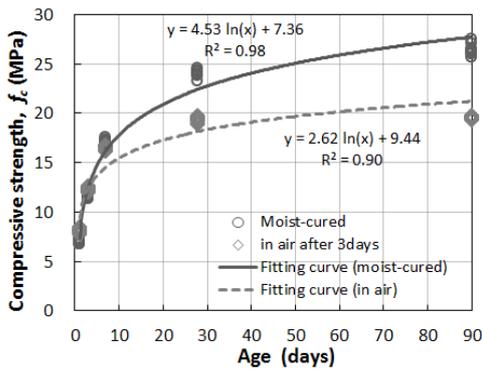


Fig. 6. Compressive Strength of Concrete in Air after 3days and Moist-Cured Concrete

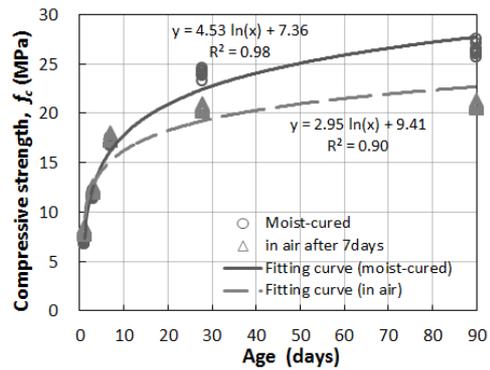


Fig. 8. Compressive Strength of Concrete in Air after 7days and Moist-Cured Concrete

강도의 증가량이 둔화되다가 28일 이후로 강도발현이 멈추게 되었다. 초기 수화작용에 필요한 수분을 유지하여서 12시간 만에 탈형한 시험체보다는 높은 강도값을 나타내었으나 28일 강도를 기준으로 표준시험체 대비 81%의 수준을 나타내었다.

#### 4.1.3 7일 후 탈형

Fig. 7은 습윤양생한 시험체와 7일 후 거푸집을 탈형한 시험체의 재령별 압축강도비를 나타낸 것이고, Fig. 8은 압축강도를 재령별로 도식한 것이다. 7일 후 탈형한 시험체의 경우 7일 강도부터 측정할 수 밖에 없으므로 3일 강도는 동일한 양생 조건으로 양생된 3일 후 탈형시험체의 3일 강도를 사용하여 경향을 분석하였다. 7일 후 탈형한 시험체의 압축강도가 표준양생된 시험체의 압축강도보다 오히려 2% 크게 나타난 것은 앞서 설명한 3일 후 탈형한 시험체와 같은 이유로 판단된다. 다만, 거푸집 양생 시험체가 습윤시험체보다 탈형시의 높은 강도의 정도가 탈형시기 증가에 따라 줄어드는 것은 양생조건(거푸집 양생, 습윤양생)에 의한 강도변화와 시험체

상태(건조상태, 습윤상태)에 의한 강도변화의 차이가 줄어들기 때문으로 판단된다. 28일 강도는 표준시험체 대비 86% 수준까지 강도가 발현되었으나 28일 이후로는 강도의 증가가 매우 미미하였다. 이는 앞 절에서 언급된 바와 같이 거푸집 탈형 후 수화반응에 필요한 수분이 대기 중으로 발산되었기 때문이다.

#### 4.1.4 28일 후 탈형

Fig. 9는 28일 후 거푸집을 탈형한 시험체의 압축강도를 습윤양생한 시험체의 재령별 압축강도와 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 10은 압축강도를 재령별로 나타낸 것이다. 28일 후 거푸집을 탈형한 시험체의 3, 7일 압축강도는 거푸집을 탈형한 후 바로 시험한 3일, 7일 탈형 시험체의 강도값을 사용하여 강도발현 양상을 도식하였다. 28일 후 탈형한 시험체의 28일 강도와 90일 강도는 표준양생된 시험체와 시험시 같은 습윤상태에서 비교하기 위해서 탈형한 공시체는 습윤상태로 만들어 시험하였다.

28일 후에 거푸집을 탈형한 시험체는 28일 강도가 표준시험체

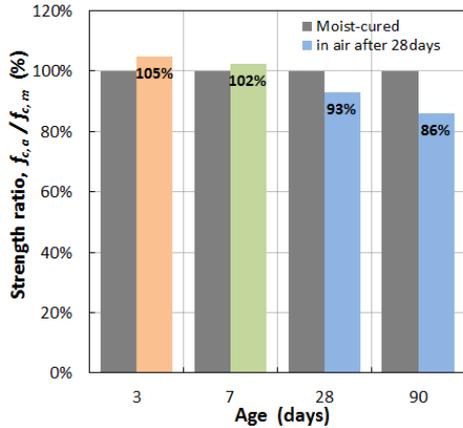


Fig. 9. Strength Ratio of Concrete in Air after 28days to Moist-Cured Concrete

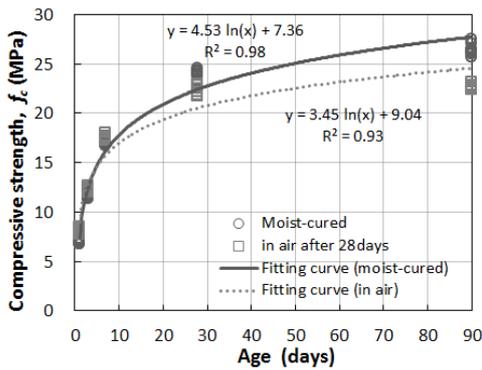


Fig. 10. Compressive Strength of Concrete in Air after 28days and Moist-Cured Concrete

대비 93%의 값을 나타내었다. 이후 탈형된 공시체는 남아있던 내부 수분이 대기 중으로 발산됨으로써 추가적인 강도증가는 나타나지 않았다. 반면, 표준시험체는 계속되는 수분공급으로 강도가 증가하여 28일 후 탈형한 시험체의 90일 강도는 습윤양생 대비 86% 수준을 나타냈다.

#### 4.2 탈형시기에 따른 재령별 압축강도

Fig. 11은 표준시험체(습윤양생, 재령 28일)와 재령별 압축강도의 비를 거푸집 탈형 시기로 구분하여 추세선과 함께 도식한 것으로 거푸집 시험체의 압축강도는 탈형 전까지 습윤양생과 비슷한 강도 발현을 보인다. 그러나 탈형 후에는 콘크리트의 내부수분이 대기 중으로 다 발산되기 전까지 습윤양생보다 증가속도가 낮게 강도가 증가되고, 그 이후로는 강도의 증가가 미미함을 알 수 있다. 즉, 탈형 후 시험체의 강도증가 속도는 재령에 따라 급속히 감소하여, 28일 이후에는 강도증가가 거의 없었다. 한편, 표준양생 시험체의 경우 28일 이후에도 충분한 수분공급으로 강도가 증가하여 90일

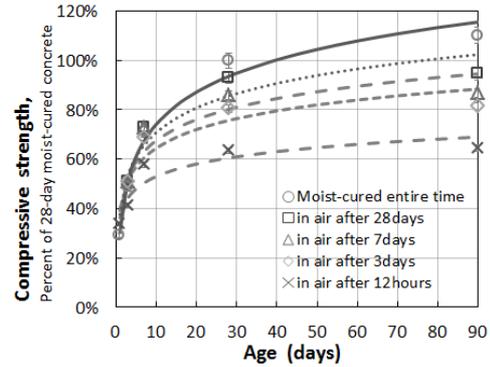


Fig. 11. Compressive Strength due to Curing Conditions with Fitting Curves

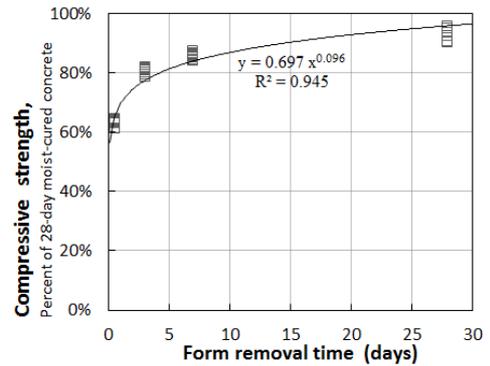


Fig. 12. Compressive Strength by Time for Form Removal

강도의 경우 28일 강도에 비해 약 10%의 증가를 나타내었다.

#### 4.3 탈형시기에 따른 콘크리트 압축성능 평가

거푸집을 탈형한 후 대기 중에 양생시킨 콘크리트의 경우 습윤양생한 콘크리트보다 압축성능이 낮게 나타났다. Fig. 12는 거푸집 탈형 시간에 따른 대기양생 콘크리트와 표준시험체의 28일 강도비를 도식한 것으로 거푸집을 조기에 탈형한 경우 압축성능이 매우 크게 떨어졌으며, 탈형시기를 늦출수록 강도비가 증가하는 양상을 나타내고 있으나 증가폭은 크게 둔화되고 있다. 특히 3일 이전에 거푸집을 탈형한 경우 콘크리트의 성능이 크게 저하되어 재령 초기 양생조건이 콘크리트의 강도에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. Eq (1)은 거푸집 탈형시기에 따른 28일 압축강도비를 회귀분석하여 추정된 예측식으로 거푸집 탈형 후 콘크리트의 압축강도를 예측하는데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

탈형시기에 따른 28일 콘크리트 압축강도 잔존률(R)은

$$R = \frac{f_c}{f_{ck}} = 0.697 t^{0.096} \quad (1)$$

여기서,  $f_c$  : 28일 압축강도(현장 대기양생, MPa)  
 $f_{ck}$  : 28일 압축강도(표준 습윤양생, MPa)  
 $t$  : 거푸집 탈형시기(days)

$f_{cm28}$  : 28일 압축강도(MPa)  
 $t$  : 재령(days)  
 $a, b$  : 시멘트종류 및 양생조건에 따른 상수

#### 4.4 양생온도에 따른 콘크리트 압축강도 추정

4.3절에서 제안한 거푸집 탈형시기에 따른 콘크리트의 압축강도 추정식은 양호한 조건에서 양생된 콘크리트에 대한 실험 결과를 통해 도출한 것이다. 반면 건설현장의 경우 공사 일정에 따라 혹서기 혹은 혹한기와 같이 열악한 상황에서 콘크리트를 타설할 수 있으며, 이러한 조건에서 콘크리트의 압축 성능을 예측할 수 있는 강도 예측식이 요구된다.

ACI Committee 209 (2008)에서는 재령에 따른 강도추정식을 Eq. (2)와 같이 제안하고 있으며, 상수  $a$ 와  $b$ 는 시멘트 종류와 양생조건에 따른 값이다. 보통포틀랜드시멘트이고, 표준양생인 경우  $a$ 는 4.0,  $b$ 는 0.85를 표준값으로 제안하고 있다. 이 추정식에 다양한 양생조건에서의 재령을 표준양생조건인 재령으로 환산한 등가재령(Equivalent age)을 적용하여 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있다. 따라서, 기존 연구결과를 토대로 등가재령환산식을 제안하고, 기존 등가재령환산식과 추정강도값을 비교하여 정확성을 검증하고자 한다.

$$f_{cmt} = \frac{t}{a+bt} f_{cm28} \quad (2)$$

여기서,  $f_{cmt}$  :  $t$ 일의 압축강도(MPa)

#### 4.4.1 등가재령 환산식 제안

Fig. 13은 Klieger(1958)에 의한 양생온도에 따른 압축강도 특성을 도식한 그래프이다. 이 연구결과와 ACI 강도추정식의 관계를 통해 최적 등가재령일을 도출하고, 적산온도에 따른 등가재령 환산식을 유도하였다. 적산온도에 대한 등가재령은 Eq. (3)과 같으며, 상수  $a$ 와  $b$ 는 양생온도에 따른 상수로, 양생온도에 따라 Table 7과 같다.

$$t_e = aM^b \quad (3)$$

여기서,  $t_e$  : 등가재령(days)  
 $M$  : 적산온도( $D \cdot ^\circ C$ )  
 $a, b$  : 양생온도( $T$ )에 따른 상수(Table 7)

#### 4.4.2 제안한 등가재령 환산식 평가

제안한 등가재령식의 적용성을 평가하기 위하여 Burg(1996)와 Moon(1999)의 실험결과를 사용하였고, 기존의 Rastrup(1954)의 등가재령과 Arrhenius model (Hansen and Pederson, 1977)로 도출한 추정값을 같이 비교하였다. Fig. 14는 Burg(1996)와 Moon(1999)의 실험결과와 등가재령에 의한 추정값을 양생온도별로 도식한 것으로, 표준온도 부근( $20 \sim 23^\circ C$ )에서는 모든 환산식이 재령

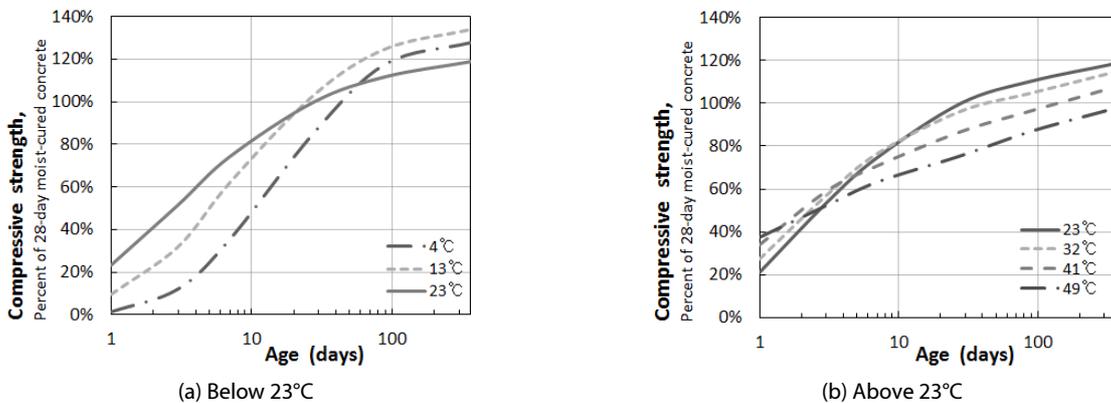


Fig. 13. Effect of Curing Temperature on Concrete Compressive Strength at Various Age(Klieger, 1958)

Table 7. Constants  $a, b$  by Curing Temperature

Curing temperature	$a$	$b$
$T \leq 20^\circ C$	$(1.73 \times 10^{-5}) T^{2.454}$	$3.109 T^{-0.369}$
$T > 20^\circ C$	$(3.71 \times 10^{-6}) T^{2.879}$	$-0.0144 T + 1.304$

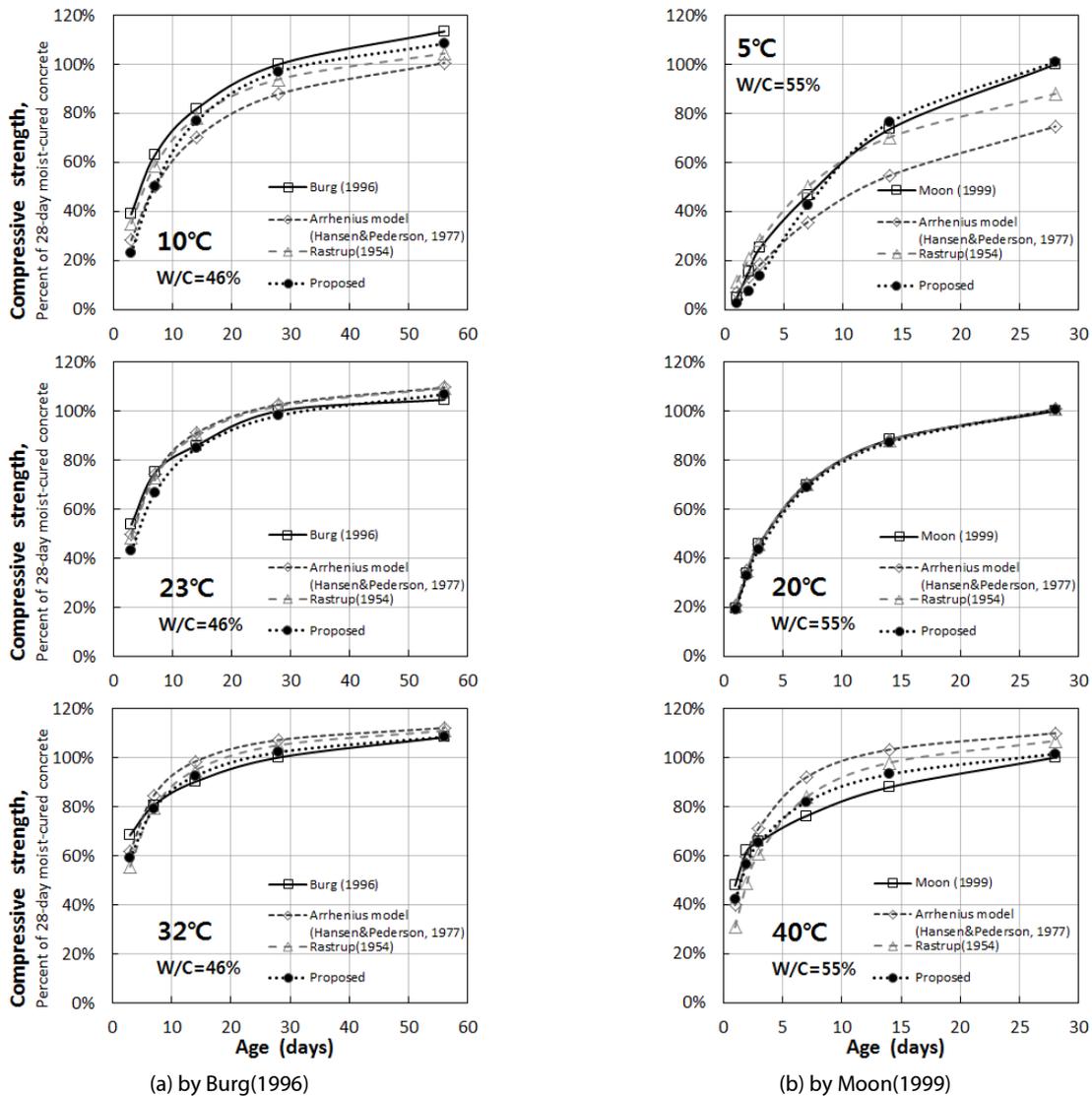


Fig. 14. Comparison of Test Results (Burg, 1996; Moon, 1999) and Predicted Values by Existing Models and Proposed Model

에 따른 압축강도비를 정확하게 추정하고 있다. 반면 양생온도가 낮은 경우(5~10°C), Arrhenius model (Hansen and Pederson, 1977)에 의한 값은 실험값 대비 약 10~25% 작게 추정하였다. Rastrup(1954)에 의한 값은 5°C일 때, 10일 이전에는 10~30% 크게, 10일 이후로는 5~10% 작게 추정하고, 10°C일 때는 5~10% 작게 추정하였다. 제안식의 경우 10일 이전에는 실험값보다 20~50% 작게 추정하여 큰 오차를 보이고 있으나 10일 이후로는 3~5%의 차이를 나타내어 매우 정확하게 추정하였다. 또한, 온도가 높은 경우(32~40°C), 추정식 모두 10일 이전에는 실험값보다 작게, 10일 이후에는 실험값보다 크게 추정하는 경향을 보였으며, Arrhenius model (Hansen and Pederson, 1977)에 의한 값이 편차가 가장 크고, 제안식에 의한 값이 가장 작게 나타냈다.

따라서, 온도가 낮은 경우, 재령 10일 이전에 대해서는 Rastrup (1954)의 등가재령을 사용하고, 10일 이후에는 제안식을 통해 추정하는 것이 가장 정확한 결과를 얻을 것으로 사료된다. 또한, 표준온도에서는 검토한 모든 등가재령이 실험값과 유사한 강도비를 추정하였으며, 높은 온도에서는 제안식을 통해 강도를 추정하는 것이 가장 정확할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

거푸집 탈형시기와 양생조건에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 입방형 공시체를 대상으로 시험하여 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 거푸집을 조기에 탈형하고 대기에 노출하면 탈형시(0.5~7일) 초기 강도는 표준양생보다 5~15% 높게 나타났으나, 장기 강도는 별현이 현저하게 둔화되어 탈형시기에 따라 28일 강도가 14~37% 낮게 나타났다. 탈형시 강도가 습윤양생에 비해 높게 나타난 것은 탈형된 시험체가 건조되어 건조된 시험체가 습윤상태의 시험체보다 압축강도가 높게 나오기 때문으로 판단된다. 한편, 장기 강도가 낮게 나타나는 것은 대기 노출에 의해 수분이 증발하고, 이로 인해 충분한 수화반응이 일어나지 못했기 때문으로 판단된다.
- (2) 거푸집 존치 기간을 오래 유지하여 콘크리트 자체의 수분이 빠르게 증발하지 못하도록 보양하였다하더라도 결국 일부가 증발되어 자체의 수분만으로는 충분한 수화작용에 부족하다. 거푸집을 28일간 존치하였어도 28일 강도는 습윤양생의 93%, 90일 강도는 86% 수준을 나타냈다. 따라서 콘크리트 양생시 보호매트나 비닐 등으로 보양하더라도 추가적으로 수분을 공급할 수 있는 환경을 조성할 필요가 있다.
- (3) 연구결과를 토대로 거푸집 탈형 시간에 따른 콘크리트의 강도 비 추정식을 제안하였으며, 제안식은 실험결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 이를 현장에서 콘크리트의 강도를 추정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 현장의 다양한 양생조건에서 콘크리트의 강도 예측에 도움이 되고자 양생온도에 따른 등가재령식을 제안하였으며, ACI에서 제안한 강도추정식을 통해 기존 등가재령과 제안식을 비교한 결과, 제안식이 보다 정확하게 콘크리트의 강도를 예측할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

## References

- ACI Committee 209 (2008). *Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete*, ACI 209.2R-08, American Concrete Institute, Michigan.
- Bartlett, F. M. and MacGregor, J. G. (1994). "Effect of moisture condition on concrete core strength." *ACI Materials Journal, American Concrete Institute*, Vol. 91, No. 3, pp. 227-236.
- British Standard (1983). *Testing concrete*, BS 1881, British Standards Institution, London.
- British Standard (2000). *Testing hardened concrete*, BS EN 12390, British Standards Institution, London.
- Burg, R. G. (1996). *The influence of casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete*, Research and Development Bulletin RD113, Portland Cement Association, Chicago.
- Cho, H. D. and Jaung, J. D. (2008). "A study on the strength properties of high-strength concrete under various curing conditions." *Proc. of 2008 Korea Concrete Institute Autumn Conference, KCI*, Goyang, Korea, pp. 965-968 (in Korean).
- Gonnerman, H.F. (1930). "Study of methods of curing concrete." *Journal of the American Concrete Institute-Proceedings, ACI*, Vol. 26, pp. 359-396.
- Han, C. G. and Han, M. C. (2004). "Determination of removal time of the side form in high strength concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 16, No. 3, pp. 327-334 (in Korean).
- Han, C. G., Hwang, Y. S. and Sin, B. H. (2002). "Determination of removal time of the forms according to the strength development of concrete at early age." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, AIOK*, Vol. 18, No. 9, pp. 157-162 (in Korean).
- Hansen, P. F. and Pedersen, E. J. (1977). "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", *Journal of the Nordic Concrete Federation*, No.1, pp.21-25 (in Danish).
- Klieger, P. (1958). Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength, Research Department Bulletin RX103, Portland Cement Association, Chicago.
- Korean Standard (2010). *Standard test method for compressive strength of concrete*, KS F 2405, Korean Standards Association (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2015). *Building construction standard specification*, Architectural Institute of Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Standard specification of concrete*, Korea Concrete Institute (in Korean).
- Moon, Y. H. (1999). *Prediction of concrete strength with different curing temperature and time*, Ph.D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology (in Korean).
- Park, S. W., Cho, H. D. and Jaung, J. D. (2009a). "A study on the strength properties of high-strength concrete under various curing conditions (2)." *Proc. of 2009 Korea Concrete Institute Spring Conference, KCI*, Busan, Korea, pp. 273-274 (in Korean).
- Park, S. W., Yu, M. H., Cho, H. D. and Jaung, J. D. (2009b). "A study on the strength properties of high-strength concrete under various curing conditions (3)." *Proc. of 2009 Korea Concrete Institute Autumn Conference, KCI*, Yongin, Korea, pp. 465-466 (in Korean).
- Popovics, S. (1986). "Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete." *ACI Journal, ACI*, Vol. 83, No. 4, pp. 650-657.
- Price, W. H. (1951). "Factors influencing concrete strength." *Journal of American Concrete Institute*, No. 47-31, pp. 417-432.
- Rastrup, E. (1954). "Heat of hydration in concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 6, No. 17, pp.79-92.
- Yoon, G. W., Lee, Y. E. and Baek, D. H. (2002). "Determination of removal time of form." *Proc. of 2002 Korea Concrete Institute Autumn Conference, KCI*, Seoul, Korea, pp. 101-116 (in Korean).