

콘크리트의 압축강도에 공시체의 크기와 형상이 미치는 영향

양은익¹⁾ · 최중철²⁾ · 이성태^{3)*}

¹⁾강릉대학교 토목공학과 ²⁾(주)동성엔지니어링 구조부 ³⁾충청대학 토목공학과

(2003년 12월 20일 원고접수, 2004년 3월 5일 심사완료)

Effect of Specimen Sizes and Shapes on Compressive Strength of Concrete

Eun-Ik Yang¹⁾, Joong-Cheol Choi²⁾, and Seong-Tae Yi^{3)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea

²⁾Dept. of Structure, Dongsung Engineering Co., Ltd., Seoul, 138-842, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Chung Cheong College, Cheongwon, 363-792, Korea

(Received December 20, 2003, Accepted March 5, 2004)

ABSTRACT

The compressive strength of concrete is used as the most basic and important material property when reinforced concrete structures are designed. It has become a problem to use this value, however, because the control specimen sizes and shapes are different from every country.

In this study, the effect of specimen sizes and shapes on compressive strength of concrete specimens was experimentally investigated based on fracture mechanics. Experiments for the Mode I failure was carried out by using cylinder, cube, and prism specimens. The test results are curve fitted using least square method(LSM) to obtain the new parameters for the modified size effect law(MSEL). The analysis results show that the effect of specimen sizes and shapes on ultimate strength is apparent. In addition, correlations between compressive strengths with size, shape, and casting direction of the specimen are investigated. For cubes and prisms the effect of placing direction on the compressive strength was investigated.

Keywords : compressive strength, size effect, shape effect, casting direction

1. 서 론

어떠한 재료를 막론하고 그 재료에는 고유한 성질이 있으며 그것이 공시체의 크기나 형상, 그리고 기타의 요인과 무관할 때 이 성질을 재료적 특성이라 한다. 콘크리트도 하나의 합성재료로서 $\phi 150 \times 300$ mm 공시체의 압축강도(f_{cu})를 가장 기본적인 재료특성으로 간주하고 있다. 그러나 이 압축강도가 공시체나 구조물의 크기나 형상에 따라 달라진다면 재료적 특성이라고 보기에는 문제가 있다. 그런데 실제로 콘크리트 재료는 그 파괴특성으로 인해 이러한 현상을 보인다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도를 구하기 위해 어떤 크기와 형상의 공시체가 고려되었더라도 이를 우리가 기준으로 하는 공시체의 강도로 환산할 수 있는 모델식을 제시하고자 한다.

콘크리트의 압축강도를 결정하기 위한 공시체의 크기와 형상은 나라마다 서로 다른데 일반적으로 사용되는 공시

체의 형상으로는 원주공시체(cylinder, $\phi 150 \times 300$ mm)와 입방체(cube, 150 mm)의 두 가지가 있다. 원주공시체는 우리나라, 미국, 캐나다, 프랑스, 그리고 호주 등에서 사용되는 반면 입방체는 영국, 독일, 그리고 유럽의 각국에서 사용되고 있다. 또한, 원주공시체와 입방체가 같이 사용되는 나라(노르웨이의 경우, $\phi 150 \times 300$ mm의 원주공시체와 100 mm의 입방체가 같이 사용되고 있음)도 있다. 이들 공시체는 형상, 변장비(aspect ratio), 그리고 가력장치의 가압판에 의해서 발생하는 단부구속조건의 차이 때문에 동일한 배치에서 얻어진 원주공시체와 입방체라도 그 강도가 서로 다르게 나타나는데 이 경우, 입방체가 일반적으로 더 높은 강도를 보인다.

1925년부터 이 분야에 대한 연구¹⁾가 많이 수행되어 왔는데, 앞선 연구자들의 연구는 보통강도 콘크리트에서의 원주공시체와 입방체 사이의 강도관계 및 표준 크기와 다른 크기의 공시체 강도를 표준 크기의 공시체 강도로 변환시킬 수 있는 환산계수(conversion factor, CF)에 집중되어 왔으며, 일반적으로 보통강도의 콘크리트에서 원주공시체의 강도를 입방체의 강도로 환산하기 위해서는 1.2의

* Corresponding author

Tel : 043-230-2315 Fax : 043-230-2319

E-mail : yist@ok.ac.kr

계수를 곱해야 한다(BS 1881²⁾). 입방체의 경우, 원주공시체의 강도와 연계시키는 계수는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 1.2의 값으로부터 점점 감소한다. 즉, 고강도콘크리트의 경우에는 공시체의 형상에 의한 영향이 줄어든다. 고강도콘크리트에서 두 가지 형상 공시체의 등가강도에 대한 자료가 CEB-FIP Model Code³⁾에 나타나 있는데 입방체와 원주공시체의 강도비는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 점진적으로 감소하여 이 강도가 80MPa일 때 1.12의 값에 도달한다. 그러나 사용되고 있는 다양한 콘크리트의 강도수준에 있어서 원주공시체의 강도를 입방체의 강도로 혹은 입방체의 강도를 원주공시체의 강도로 변화시키는 것은 현재까지도 많은 논란의 대상이 되고 있다. 한편 Murdock과 Kesler⁴⁾의 연구에 따르면 이 환산계수는 콘크리트의 강도수준에 의존함을 알 수 있다. 이와 같이 환산계수에 대한 연구는 원주공시체와 입방체의 강도에 근거해서 개발된 해석적 혹은 실험적인 연구결과 간의 상호연계를 위해서라도 꼭 필요한 실정이다.

또한, 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 원주공시체나 입방체의 파괴강도를 얻기 위해서는 보다 큰 용량의 가력기가 필요하게 된다. 따라서 고강도콘크리트에 대한 많은 연구는 보다 작은 크기의 공시체, 즉 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주공시체나 100 mm의 입방체에 대하여 실험이 수행되어 왔으며, 이 때문에 공시체에 크기에 대한 매개변수를 도입하게 되었다.

또 다른 상황은 기존의 구조물에 대한 현장콘크리트의 강도 평가 시에 발생할 수 있는데, 이 경우에 주로 채택하는 방법은 그 구조물로부터 콘크리트 코어(core)를 만들어 내는 것이다. 이때 이용되는 원주형 코어의 크기는 일반적으로 $\phi 100 \times 100$ mm인데, 이 코어를 가지고 압축실험을 수행하면 표준공시체와는 크기뿐만 아니라 변장비도 다르므로 결과의 보간이 상당히 어렵게 된다. 따라서 ASTM C 42⁵⁾와 BS 1881²⁾에서는 코어강도를 표준공시체의 강도로 환산할 수 있는 계수를 주고 있지만 이 계수는 보통강도 콘크리트에만 적용가능하다.

앞에서 설명한 바와 같이 각 나라마다 콘크리트 압축강도의 기준이 되는 공시체의 크기와 모양이 서로 다르므로 다른 나라의 기준(code)나 이 기준에 근거한 연구자료를 이용할 때는 종종 문제가 발생하게 된다. 따라서 그 동안 이 분야에 대한 해결책을 요구하는 목소리는 높았으나 국내에서는 현재까지도 이에 대한 연구가 부족한 실정이며, 외국에서도 원주공시체와 입방체 강도 사이의 직접적인 관계를 구명하려는 연구는 가끔 보고되고 있지만 이에 대한 체계적인 연구결과는 아직 발표되지 않고 있다.

한편, 콘크리트의 압축강도는 크게 축압축강도와 횡압축강도로 나눌 수 있는데, 이번 연구에서는 압축파괴 양상 중 축압축파괴만을 그 연구대상으로 하였으며 크기효과와 형상효과를 검토하여 콘크리트의 축압축파괴에 관한

특성을 구명하려 하였다. 즉, 본 연구의 목표는 문헌조사를 통한 이론적 연구와 실험을 통한 연구를 병행해서 공시체의 크기와 형상, 및 타설 방향에 따른 적절한 강도를 예측할 수 있는 모델식을 제시하는 것과 이들 사이의 상호관계를 구명하는데 있다.

또한, 구조물의 설계와 시공에서 사용되고 있는 대표적인 압축부재는 기둥인데, 덮개의 효과를 제외하면, 나선근으로 보강된 기둥은 그 형상이 원주공시체와 같지만 스테럽으로 보강된 기둥은 각주와 형상이 유사할 것이다. 본 논문에서 각주의 파괴역학적 거동을 검토해 본 것은 기둥의 실질적인 특성을 살펴보기 위해서이다.

2. 콘크리트의 압축파괴거동

Bazant의 크기효과법칙(size effect law, SEL)⁶⁾이 발표된 이후, 김진근 등⁷⁾은 부재의 크기와 무관한 항인 $\sigma_0 (= \alpha f'_c)$ 를 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우와 유사 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도를 예측할 수 있는 아래의 식(1)과 같은 수정된 크기효과법칙(modified size effect law, MSEL)을 제안하였다.

$$f_c(d) = \frac{Bf_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_a}}} + \alpha f_{cu} \quad (1)$$

여기서 f_c , f_{cu} , d 와 d_a 는 각각 임의의 공시체와 표준형 원주공시체($\phi 150 \times 300$ mm)에 대한 압축강도, 특성길이와 굵은 골재의 최대치수를 나타내며 B , λ_0 , α 는 실험상수를 나타낸다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주공시체⁸⁾와 횡압축력을 받는 C형 공시체^{9,10)}에 대한 연구결과가 이미 발표된 바 있다. λ_0 는 일반적으로 2.0~3.0의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며⁸⁻¹⁰⁾, 본 연구에서는 2.0의 값을 사용하였다.

김진근 등⁸⁾은 임의 크기의 원주공시체에 대하여 적용 가능한 일반화된 압축강도 예측식을 얻기 위해 문헌으로부터 얻은 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하였다. 수정된 크기효과 법칙(MSEL)을 이용하였으며, 파괴진행영역에 미치는 최대골재 크기의 영향을 고려하고 특성길이의 개념을 새로이 도입하여 다양한 직경과 높이/직경의 비를 가지는 콘크리트 원주공시체의 압축강도를 얻기 위한 다음의 식(2)를 제안하였다.

$$f_c(d) = \frac{0.4f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{(h-d_c)}{5}}} + 0.8f_{cu} \quad (2)$$

여기서, f_c 와 f_{cu} 은 식(1)에서의 정의와 같고, h 와 d_c 는 각각 원주공시체의 길이와 직경으로서 단위는 cm이다.

3. 실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 다양한 콘크리트의 강도수준에 대해서 공시체의 크기와 형상이 압축강도에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 즉, 원주공시체, 입방체, 및 각주 자체에 대한 크기효과를 살펴본 후, 이들 사이의 관계를 환산할 수 있는 계수를 제시하고자 한다. 또한 타설 방향이 크기효과에 미치는 영향과 강도수준이 형상효과에 미치는 영향도 살펴보고자 한다. 이때 실험에 사용되는 콘크리트의 압축강도는 200, 350, 550, 그리고 750 kgf/cm²의 네 가지로 하였다.

3.2 배합설계

고강도콘크리트는 저강도 콘크리트에 비해 더욱 취성적인 거동을 한다. 이것은 파괴진행영역(fracture process zone, FPZ)의 크기가 작고 크기효과가 크게 나타난다는 것을 의미한다. 이에 대한 검토는 4.5.2 절에 나타나 있다. 본 논문에서 공시체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 Table 1에 주어졌다. 시멘트로는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였으며, 실리카흙은 캐나다 E사의 제품을 사용하였다. 잔골재는 강릉시 연곡천의 강모래를 사용하였고 굵은골재는 강릉시 안인진리 골재채석장의 최대 치수(d_m) 13mm의 부순자갈을 사용하였다.

3.3 공시체의 제작, 크기 및 형상

공시체의 제작에 있어 사용한 믹서는 공칭용량 60리터의 팬형 강제식 믹서이며, 각 재료를 투입한 후 배합수를 투입하는 순간부터 3분간 비빔을 실시하였다. 그리고 미리 준비된 거푸집에 콘크리트의 치기를 하면서 진동대로 총당 20초간 다짐하며 공시체를 제작하였다. 모든 공시체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행 시까지 양생소에서 수중양생을 실시하였다. 공시체의 크기가 작아질수록 실험결과와 흠어짐이 커지므로 가장 작은 크기(한변 또는 지름이 50 mm)의 경우 6개의 공시체를 제작하였으며, 크기가 증가함에 따라 4개, 3개, 2개로 그 개수를 줄였다.

본 실험에서 사용한 공시체는 원주공시체와 입방체, 각주로서 이들의 크기는 Table 2에 나타나 있으며, 그 단위는 mm이다. Table 2 및 Table 3에서 Cy는 원주공시체의 약자이며, Cu와 Pr은 각각 타설 방향과 재하 방향이 서로 직각인 입방체와 각주의 약자이다. 또한, Cu,p와 Pr,p는 각각 타설 방향과 재하 방향이 서로 평행한 즉, 원주공시체와 재하 방향이 같은 입방체와 각주의 약자이다. 이 약자들은 본 연구를 통해 개발한 크기 및 형상에 따른 강도에 측정식 식(3)~식(7)에 사용되었다.

Table 1 Mixture proportions of concrete

w/c (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					S.P.* (%)
		W	C	S	G	Silica fume	
67	50	185	276	900	962	-	-
50	48	180	360	837	970	-	-
35	46	175	500	755	948	-	1.0
28	44	165	531	692	942	59	2.5

* Superplasticizer(ratio for cement weight)

Table 2 Shape and dimension of specimens

Shape	Dimension (mm)	Shape	Dimension (mm)	Shape	Dimension (mm)
Cylinder (Cy)	50×100	Cube (Cu, Cu,p)	50×50×50	Prism (Pr, Pr,p)	50×50×100
	100×200		100×100×100		100×100×200
	150×300		150×150×150		150×150×300
	200×400		200×200×200		200×200×400

3.4 실험절차

실험의 정확성과 효율성을 기하기 위해 총 3대(용량 ; 100 tonf, 250 tonf, 750 tonf)의 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)를 사용하였으며, 변위제어법에 의해 실험을 수행하였다. 제어속도는 0.003 mm/sec의 속도를 유지하였고, KS F 2405에 따른 실험을 통해 각 공시체에 가해진 압축강도(f_{cu})를 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

각 공시체에서 압축강도의 측정은 동일 재령에서 실시하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타나 있다. 이 Table에 주어진 값들 중, f_{cu} 는 재령 28일에서의 3개의 $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체에서 얻은 값들을 평균한 결과이며, 기호 “-”는 여러 가지 원인에 의해 실험자료가 생략된 공시체임을 의미하고 있다.

4.2 원주공시체에 대한 크기효과

원주공시체에 대한 실험결과와 MSEL을 이용하여 식(3)을 얻었다.

$$f_{cy}(d) = \frac{0.53f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{2 \times 1.3}}} + 0.76f_{cu} \quad (3)$$

여기서, $f_{cy}(d)$ 와 f_{cu} 는 각각 임의 크기의 원주공시체와 $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체의 압축강도를 나타내는데 단위는 kgf/cm²이다. 식(3)을 이용해 $f_{cy}(d)/f_{cu}$ 와 원주공시체

Table 3 Ultimate stresses obtained from this experiment

f_{ult} , kgf/cm ²																												f_{cu} kgf/cm ²
Cylinder								Cube								Prism												
Cy(5)	Cy(10)	Cy(15)	Cy(20)	Cu(5)	Cu(10)	Cu(15)	Cu(20)	Cu,p(5)	Cu,p(10)	Cu,p(15)	Cu,p(20)	Pr(5)	Pr(10)	Pr(15)	Pr(20)	Pr,p(5)	Pr,p(10)	Pr,p(15)	Pr,p(20)	Pr,p(5)	Pr,p(10)	Pr,p(15)	Pr,p(20)					
290	279	287	273	258	359	371	315	339	324	446	404	377	342	338	339	338	277	276	253	331	346	273	261	266	198			
283	276	281	277	248	332	382	326	346	303	403	413	354	357	334	304	346	289	269	270	317	331	266	261	266				
298	296	286	276		392	377	344	338		399	380	370	327		310	350	307	274		308	299	278	258					
		270					327					352					298					276						
514	467	490	451	445	629	633	520	466	471	677	676	530	442	515	525	545	456	377	443	517	542	465	379	452	360			
535	439	464	412	474	643	592	506	452	-	687	682	515	478	506	489	475	418	355	444	491	494	424	361	459				
450	481	447	450		628	662	457	445		730	667	527	496		488	503	444	401		522	525	418	377					
		461					536					523					432					422						
707	762	688	639	656	838	837	749	670	681	967	961	747	754	765	701	654	680	520	514	712	782	642	618	660	598			
725	743	679	676	678	785	-	762	718	661	851	926	758	725	737	702	663	699	545	603	694	718	656	647	610				
754	763	668	701		813	-	725	-		902	962	755	-		731	682	607	638		734	711	650	-					
		656					-					763					609					669						
997	942	774	816	727	968	975	828	773	581	1041	1116	877	934	735	834	886	757	576	614	939	919	750	849	664	729			
933	850	814	776	-	1019	913	821	-	-	1016	1035	878	818	691	926	736	694	701	602	884	947	709	805	678				
943	-	822	-		919	959	858	-		1023	1025	-	809		872	930	727	752		863	959	730	810					
		856					-					-					686					697						

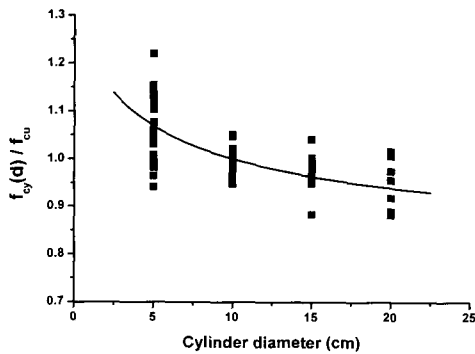


Fig. 1 Size effect for cylinder specimens

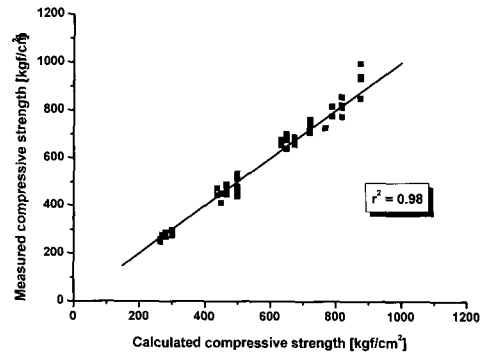


Fig. 2 Comparison of values calculated by Eq. (3) with measured compressive strengths

의 크기 d 의 관계 곡선을 그리면 Fig. 1과 같다. 또한, 식 (3)을 이용하여 구한 계산치와 실험에서 얻은 측정치 사이의 통계해석결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 그림의 세로축과 가로축은 각각 측정된 값과 계산된 값을 나타낸다.

여기서 상관계수(r^2)는 0.98로 실험치와 계산치 사이에 상관관계가 매우 높으며 모델식이 실험자료를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 가운데 실선은 $y = x$ 의 직선식을 나타내는데 계산된 값과 실험자료 사이에 직선관계가 성립함을 알 수 있다.

4.3 입방체에 대한 크기효과

식(4)는 입방체에 대한 실험결과와 MSEL을 이용하여 얻었다.

$$f_{cu}(d) = \frac{1.17f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{2 \times 1.3}}} + 0.58f_{cu} \quad (4)$$

여기서, $f_{cu}(d)$ 는 입방체의 크기에 따른 압축강도를 나타내는데 단위는 kgf/cm²이다.

$f_{cu}(d)/f_{cu}$ 와 입방체의 크기 d 의 관계 곡선을 그리면 Fig. 3과 같고, 이 그림으로부터 입방체의 압축강도에도 크기효과가 존재함을 알 수 있다. 식(4)의 모델식이 실험자료들을 잘 나타내고 있는지 통계해석을 한 결과, 상관계수가 0.95로 식(4)의 정확도가 높음을 알 수 있다.

4.4 각주에 대한 크기효과

식(5)는 각주에 대한 실험결과와 MSEL을 이용하여 얻었다.

$$f_{pr}(d) = \frac{1.00f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{2 \times 1.3}}} + 0.50f_{cu} \quad (5)$$

여기서, $f_{pr}(d)$: 각주의 크기에 따른 압축강도(kgf/cm²)

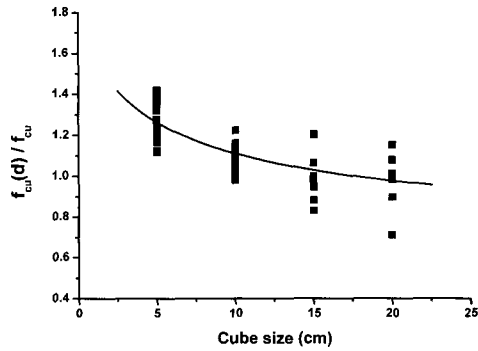


Fig. 3 Size effect for cube specimens

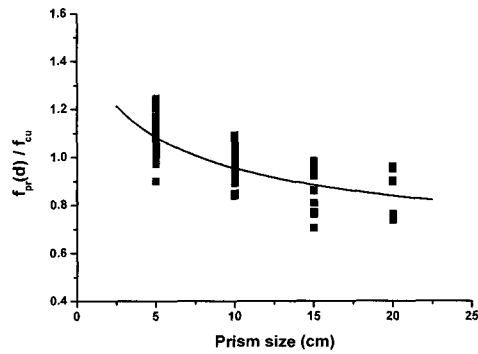


Fig. 4 Size effect for prism specimens

각주에 대한 모델식으로 부터의 계산된 값과 실험치 간의 상관계수는 0.92이었으며, 이 식의 정확도가 높음을 확인하였다. $f_{pr}(d)/f_{cu}$ 와 각주의 크기 d 의 관계 곡선을 그리면 Fig. 4와 같고, 이 그림으로부터 각주의 압축강도에 도 크기효과가 존재함을 알 수 있다. 식(3), 식(4), 및 식(5)의 비교에서, MSEL의 α 에 해당하는 값이 식(3), 식(4) 및 식(5)의 순서로 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 입방체의 경우, 모서리에 응력이 집중되며 각주의 경우는 이 응력집중현상과 길이효과 때문인 것으로 사료된다.

4.5 타설방향에 대한 크기효과

식(6)와 식(7)은 각각 타설방향과 가력방향이 같은 입방체와 각주에 대한 실험결과와 MSEL을 이용하여 얻었다.

$$f_{cu,p}(d) = \frac{1.43f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{2 \times 1.3}}} + 0.55f_{cu} \quad (6)$$

$$f_{pr,p}(d) = \frac{0.91f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{d}{2 \times 1.3}}} + 0.57f_{cu} \quad (7)$$

여기서, $f_{cu,p}(d)$ 와 $f_{pr,p}(d)$ 는 입방체와 각주의 압축강도

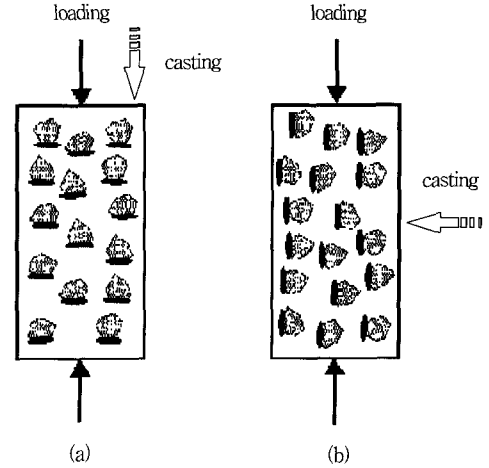


Fig. 5 Illustrations of loading direction and casting direction

이고 단위는 kgf/cm^2 이다. 식(6)과 식(7)의 계산치와 실험치 간의 상관계수는 각각 0.94와 0.96이었으며, 제안된 수식이 실험결과를 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 가력방향과 타설 방향에 대한 설명을 나타내고 있다. 즉, Fig. 5(a)는 타설 방향과 가력 방향이 평행한 상태를 나타내며 본 실험에서는 Cu,p 와 Pr,p 가 이에 해당된다. 또한, Fig. 5(b)는 타설 방향과 가력방향이 수직인 상태를 나타내며 Cu 와 Pr 이 이에 해당된다.

입방체와 각주의 타설 방향에 대한 크기효과를 비교하기 위해 식(4)와 식(6) 및 식(5)와 식(7)이 d 와 이루는 관계 곡선을 그리면 각각 Fig. 6, 7과 같고, 이 그림으로부터 입방체의 경우 타설 방향에 따른 크기효과 차이가 뚜렷이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이는 입방체의 파괴패턴이 각주와 달리 측면팽창에 의해 파괴가 일어나는 것이 아니라, 부숴짐(crushing)에 의해 파괴가 일어나며 측면팽창을 가압판과 공시체 사이의 마찰력이 구속하는 정도가 크기 때문으로 사료된다. 하지만, 각주의 경우 타설 방향과 가력 방향이 수직인 경우가 평행한 경우와 비교하여 크기효과가 크게 발생함을 알 수 있다. 이와 같이 각주에서 타설 방향에 따라 크기효과에 차이가 나타난 것은 하중이 가해지는 방향이 타설 방향과 다를 경우, 재료의 침하차이로 인하여 발생한 부재재료의 불균일성이 부재의 크기효과에 추가로 반영되기 때문이다.

4.5.1 강도수준에 따른 타설 방향이 압축강도에 미치는 영향

Fig. 8, 9는 강도수준에 따른 타설 방향이 압축강도에 미치는 영향을 파악하고자 입방체와 각주에 대한 실험결과를 보통강도와 고강도로 나누어 즉, 기준강도 200 과 350 kgf/cm^2 는 보통강도로 550과 750 kgf/cm^2 은 고강도로 분류하여 회귀분석한 결과를 그림으로 나타낸 것이다.

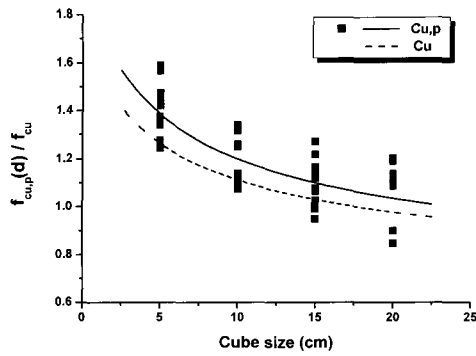


Fig. 6 Size effect with casting direction for cube specimens

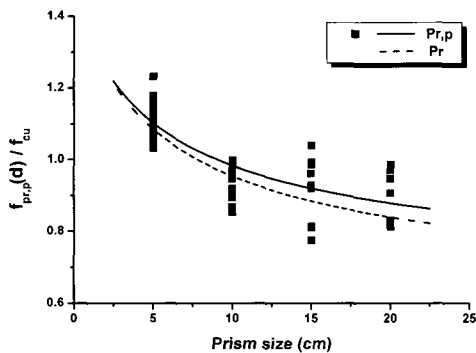


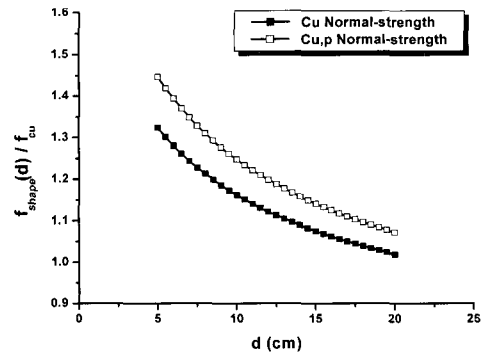
Fig. 7 Size effect with casting direction for prism specimens

(1) 입방체

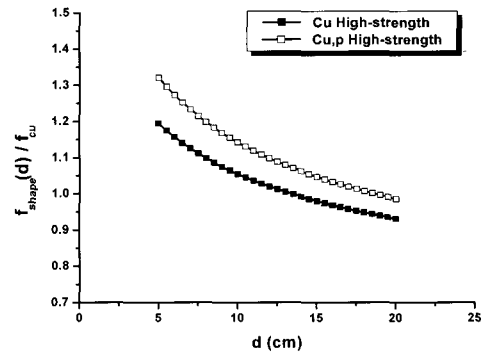
Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 입방체의 경우 보통강도와 고강도 모두 가력 방향과 타설 방향이 평행한 공시체의 압축강도가 더 크며, 타설 방향에 따른 크기효과의 차이가 뚜렷하지 않았다. 이와 같이 입방체에서 강도수준에 따른 크기효과가 뚜렷이 나타나지 않는 이유는 입방체의 경우 보통강도 콘크리트에서 발생하는 물의 이동에 의한 파괴메카니즘이 시험기 가압판의 단부 구속효과와 파괴패턴(부쉬짐에 의해 파괴가 일어남)으로 인해 변화하기 때문에 판단된다. 한편 고강도콘크리트에서는 물/시멘트비가 낮아서 이와 같은 현상은 더욱 뚜렷함을 알 수 있다.

(2) 각주

Chin 등¹¹⁾은 각주를 사용하여 타설 방향이 고강도콘크리트의 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 검토하였으며, 이들의 실험결과에 따르면 보통강도 콘크리트의 경우 타설 방향과 평행한 방향으로 하중이 가해진 공시체는 물의 이동으로 인해 굽은골재의 아래 부분에 불충분한 부착 및 공극이 발생하는데, 이 공극은 변형 및 국소전단파괴에 거의 저항을 하지 못하고, 파괴가 골재주위에서 발생하므로 타설 방향과 가력 방향이 직각인 공시체보다 낮은 강도를 나타낸다.

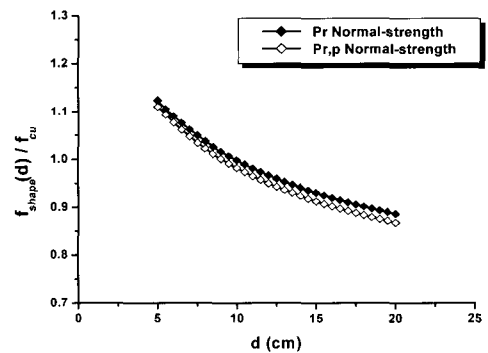


(a)

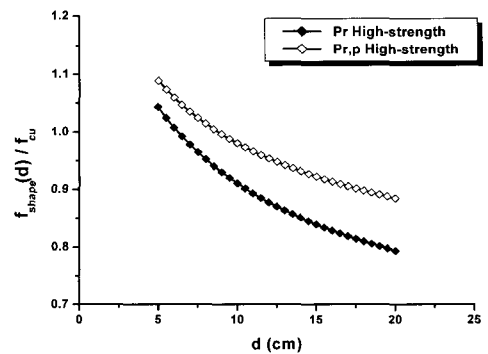


(b)

Fig. 8 Effect of casting direction on compressive strength of cube specimens



(a)



(b)

Fig. 9 Effect of casting direction on compressive strength of prism specimens

그러나, 고강도콘크리트에서는 보통강도 콘크리트에서의 이러한 파괴메카니즘의 원인이 상대적으로 낮은 물/시멘트비와 콘크리트 제작에 있어 사용한 광물질 혼화재로 인해 실질적으로 감소하여 타설 방향과 평행한 방향으로 하중이 가해진 공시체는 타설 방향이 가력방향과 수직인 공시체보다 더 큰 강도를 나타낸다고 보고하였다.

본 실험의 결과에서도 같은 현상이 나타났다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 보통강도에서는 가력 방향과 타설 방향이 평행한 공시체의 압축강도가 수직인 공시체보다 작았지만, 고강도에서는 반대의 결과가 나타났다.

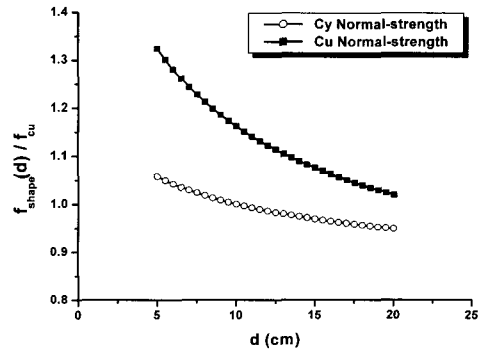
결국 보통강도 콘크리트에서 발생하는 물의 이동으로 인한 파괴메카니즘이 고강도콘크리트에서는 변화하며 이보다는 골재의 침하차이로 인해 생긴 좌우의 비대칭이 강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한, 보통강도 콘크리트에서는 타설 방향에 따른 강도차이가 크지 않지만, 고강도콘크리트에서는 타설 방향에 따른 강도차이가 더 큼을 알 수 있다. 그리고, 고강도콘크리트에서 가력 방향과 타설 방향이 직각을 이루면 평행할 때보다 크기효과가 더 크게 일어남을 두 곡선의 기울기로부터 알 수 있다.

4.5.2 강도수준이 압축강도의 형상효과에 미치는 영향

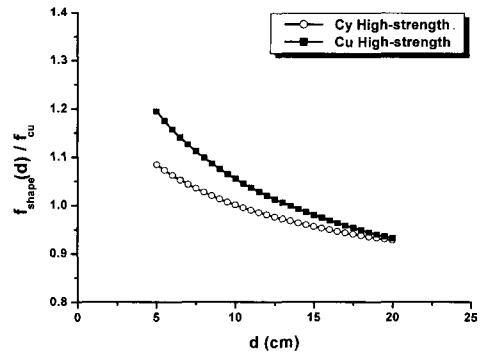
Fig. 10은 일반적으로 사용되고 있는 원주공시체와 가력 방향이 타설 방향과 수직인 입방체에 대한 실험결과를 보통강도와 고강도로 나누어 회귀분석한 후, 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 보통강도와 고강도콘크리트는 모두 공시체의 크기가 커짐에 따라 형상효과가 줄어드는데, 고강도콘크리트의 경우, 원주공시체와 입방체의 압축강도 차이가 보통강도 콘크리트에 비해 더 크게 줄어들음을 알 수 있다. 이는 콘크리트가 고강도가 될수록 파괴진행영역의 크기가 작아지고 원주공시체와 입방체에서 비슷하면서도 충분한 크기의 파괴진행영역이 공시체 내부에 확보되어 강도가 비슷해지기 때문이며, 이것은 CEB-FIP에서 제시하는 바와 같은 결과이다. 또한, 입방체는 원주공시체의 가력 방향과 달리 가력 방향과 타설 방향이 수직을 이루며 압축강도가 측정됨으로 골재침하의 차이로 인한 재료의 비대칭이 강도의 감소를 더 일으켰기 때문이다. 즉, 강도수준에 관계없이 입방체가 원주공시체에 비해 크기효과가 더 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

4.6 공시체의 크기, 형상, 및 타설 방향에 따른 크기 효과

Table 4에는 본 연구에서 제시한 압축강도 예측 모델을 근거로 하여 입의 크기와 형상을 가진 공시체의 압축강도를 특정 크기와 형상을 가진 공시체의 강도로 환산할 수 있는 환산계수를 $\phi 150 \times 300$ mm 원주공시체를 기준으로 할 때와 $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체를 기준으로 할 때로



(a)



(b)

Fig. 10 Effect of strength level on shape effect of compressive strength

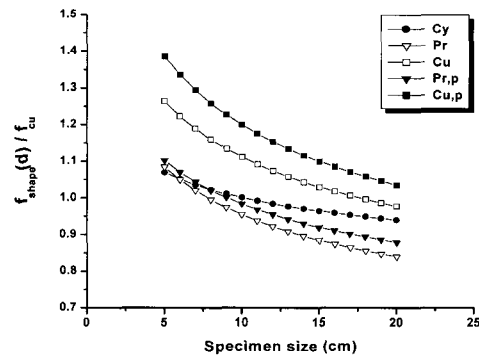


Fig. 11 Relationship between $f_{shape}(d)/f_{cu}$ and specimen size d

Table 4 Conversion factors with sizes and shapes of the specimen

Cylinder specimen's size and CF	d (cm)	Cy	Cu	Pr	Cu,p	Pr,p
Cy(10) CF=1.00	5	1.07	1.26	1.08	1.39	1.10
	10	1.00	1.11	0.95	1.20	0.98
	15	0.96	1.03	0.88	1.10	0.92
	20	0.94	0.98	0.84	1.04	0.88
Cy(15) CF=1.00	5	1.11	1.31	1.13	1.45	1.15
	10	1.04	1.16	0.99	1.25	1.02
	15	1.00	1.07	0.92	1.15	0.96
	20	0.98	1.02	0.88	1.08	0.92

나누어 제시하였다. 이와 같은 크기 및 형상에 따른 환산 계수를 이용하면 임의의 공시체의 강도를 원하는 크기와 형상을 가진 공시체의 강도로 환산할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 11은 각 공시체의 형상과 타설 방향에 따른 모델식(3)~(7)과 크기(d)와의 상관관계를 그림으로 나타낸 것이다. 이로부터 입방체와 원주공시체의 경우는 각주에 비하여 크기효과가 더욱 뚜렷이 발생하며, 각주에 비해 입방체가 타설 방향에 따른 압축강도 값의 차이가 큼을 알 수 있다.

4. 결 론

지금까지 수행된 대부분의 콘크리트 압축강도의 크기효과에 관한 연구들은 원주공시체에 대한 것이고 일부 입방체에 대한 것도 있었지만, 본 논문에서는 세 가지 형상에 대한 연구를 수행하여 보다 폭 넓은 검토를 하고자 했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세 가지 공시체 형상의 압축강도에 크기효과가 존재함을 확인했으며, 입방체와 각주의 경우 원주공시체에 비하여 크기효과가 더 뚜렷함을 확인하였다.
- 2) 공시체의 크기와 형상, 및 타설 방향에 따른 압축강도 예측모델식을 제시하였다. 이 모델식들을 이용한다면 특정한 공시체 크기, 형상, 및 타설 방향에 대한 압축강도를 임의의 공시체 크기, 형상, 및 타설 방향에 대한 압축강도로 환산할 수 있을 것이다.
- 3) 타설 방향과 가력방향이 수직인 경우와 평행인 경우, 입방체가 각주에 비해 더 적은 크기효과에서의 차이를 보였다.
- 4) 타설 방향이 압축강도에 미치는 영향에서 입방체는 강도수준에 따른 뚜렷한 효과를 보이지 않았다. 그러나, 각주는 강도수준에 따른 영향이 있음, 즉, 보통강도에서는 가력 방향이 타설 방향과 수직인 경우가 그리고 고강도에서는 가력 방향이 타설 방향이 평행한 경우가 더 큰 압축강도를 보임을 알 수 있었다.
- 5) 강도수준이 압축강도의 형상효과에 미치는 영향은 강도수준에 관계없이 공시체의 크기가 커짐에 따라 줄어들음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-002-D00324).

참고문헌

1. Gonneman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," *ASTM, Proc.*, Vol.25, 1925, pp.237~250.
2. British Standards Institution, "BS 1881: Method for Determination of the Compressive Strength of Cores," Part 120, BSI, London, 1983.
3. CEB-FIP Model Code 1990, "Comite Euro-International du Beton(CEB)," Bulletin D'Information No. 203/205, Lausanne, 1993, 437pp.
4. Murdock, J.W. and Kesler, C.E., "Effect of Length to Diameter Ratio of Specimen on the Apparent Compressive Strength of Concrete," *ASTM Bulletin*, No.221, 1957, pp.68~73.
5. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," Annual Book of ASTM Standards, (ASTM C 42-94), 1995, Section 4, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.24~27.
6. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.110, No.4, Apr. 1984, pp.518~535.
7. Kim, J.K. and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," *Magazine of Concrete Research*, Vol.42, No.153, Dec. 1990, pp. 233~238.
8. Kim, J.K., Yi, S.T., Park, C.K., and Eo, S.H., "Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced Concrete Cylinders," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.1, Jan.-Feb. 1999, pp.88~94.
9. Kim, J.K., Yi, S.T., and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens," *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.2, Mar.-Apr. 2000, pp.291~296.
10. Kim, J.K., Yi, S.T., and Kim, J.J.H., "Effect of Specimen Sizes on Flexural Compressive Strength of Concrete," *ACI Structural Journal*, May-Jun. 2001, pp.416~424.
11. Chin M.S., Mansur M.A. and Wee T.H., "Effects of Shape, Size, and Casting Direction of Specimens on Stress-Strain Curves of High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.3, May-Jun. 1997, pp.209~219.

요 약

콘크리트의 압축강도는 콘크리트 구조물의 설계 시에 재료상수로 사용되는데 이 값의 산정에 사용되는 공시체의 크기 및 형상이 각 나라마다 다르므로 현재까지도 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 공시체의 압축강도에 공시체의 크기와 형상이 미치는 영향을 파괴역학적 이론과 실험을 통하여 검토하였다. 콘크리트의 두 가지 파괴모드 중의 하나인 모드 I에 대한 실험이 원주공시체, 입방체, 그리고 각주를 이용하여 수행되었다. 먼저 원주공시체, 입방체와 각주 자체의 크기효과와 이들 사이의 형상효과를 살펴본 후, 공시체의 크기, 형상, 및 타설방향에 대한 압축강도의 상호관계에 대하여 검토하였다. 또한, 입방체와 각주에 대하여 타설방향이 압축강도에 미치는 영향을 검토하였다.

핵심용어 : 압축강도, 크기효과, 형상효과, 타설방향