

고강도 콘크리트의 적정 단위시멘트량 선정 방안

A Study on the Optimum Cement Content of High Strength Concrete

이 장 화* 김 성 욱** 이 종 석***
Lee, Jang Hwa, Kim, Sung Wook Lee, Jong Suk

Abstract

Currently, in the mix design of high strength concrete, cement content depend on the target slump which is fixed with tests. However this cause high content cement use because it is based on the mix design of normal strength concrete. Also, comparatively high content cement might decrease the durability of the concrete. Therefore, in this study, we investigated proper cement content satisfying durability, workability, compressive strength, and reviewed use of admixtures, proper sand-aggregate ratio to the cement content. The results indicate that cement content ranging $370\sim 550\text{kg/m}^3$ did not affect the compressive strength. The field workers should consider durability, workability as well as compressive strength for determining the optimal cement content in the mix design of the high strength concrete.

Keywords : high strength concrete, cement content, durability, workability, compressive strength

요 지

실제 현장에서 사용하고 있는 고강도 콘크리트 배합의 단위시멘트량은 대부분의 경우 소요의 슬럼프를 확보하는데 필요한 양으로 결정된다. 이 방법은 보통 강도 콘크리트의 배합설계 개념을 적용한 것이기 때문에 필요 이상의 단위시멘트량을 사용하게 된다. 따라서 상대적으로 많은 양의 시멘트를 사용하게 되어 콘크리트의 내구성을 저하시키게 된다. 이에 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 내구성과 시공성 및 강도를 동시에 고려한 적정 단위시멘트량을 분석하였으며, 적정 단위시멘트량을 사용함에 따른 혼화제 첨가량 및 적정잔골재율에 대해 검토하였다. 실험 결과, 본 연구의 실험조건에서 단위시멘트량을 370kg/m^3 으로부터 550kg/m^3 까지 사용하더라도 압축강도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트의 배합시 소요의 설계강도뿐만 아니라 내구성과 시공성을 동시에 만족하는 최소의 단위시멘트량을 결정하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

핵심어 : 고강도콘크리트, 단위시멘트량, 내구성, 시공성, 압축강도

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

E-mail : jhlee@kict.re.kr 전화번호 031-910-0122

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

적정 품질의 콘크리트를 생산하기 위해서는 우선 구조물에 요구되는 강도, 내구성 및 시공성을 만족하도록 각 재료의 배합비율을 정해야 한다. 콘크리트는 강재와 같이 공장에서 그 품질이 결정되는 것이 아니기 때문에, 양질의 재료를 사용하더라도 적절한 배합설계와 품질관리가 이루어지지 않으면 소요품질의 콘크리트를 얻을 수 없게 된다.

기존의 배합은 강도 위주로 물-시멘트비를 결정한 다음 시공성 측면에서 단위시멘트량을 결정하였기 때문에 단위시멘트량이 필요 이상으로 많은 부배합의 콘크리트를 제조하게 되어 수화열 및 건조수축의 증가로 내구성이 떨어지는 결과를 초래하며, 이는 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있다.(김진근 등 1995, 1997, 문한영 등 1998, 김상철 등 1999) 이로 인해 현장에서는 단위시멘트량을 줄여서 사용하는 것이 바람직하지만 시공성 불량을 이유로 계속 부배합 콘크리트를 사용해 왔다.

실제 공사현장에서 설계기준강도 400kgf/cm² 정도의 고강도 콘크리트를 타설하는데 있어 베이스 콘크리트의 슬럼프를 확보하여 배합을 결정하는 방법을 주로 사용하고 있는 것으로 조사되었다(이장화, 김성욱 등, 1997). 이 때 물-시멘트비의 증가 없이 소요의 베이스 슬럼프를 확보하기 위하여 단위시멘트량(단위수량)을 증가시키거나 혼화제를 첨가하는데, 후자의 경우보다는 전자의 경우를 택하고 있어 부배합의 콘크리트가 만들어지게 된다. 이와 같이 우리나라의 콘크리트 공사현장의 실태를 조사 분석한 결과 내구성과 시공성 및 강도를 모두 만족시키는 적정 단위시멘트량에 대한 연구가 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 자주 사용되고 있는 설계기준강도 400kgf/cm² 수준의 고강도 콘크리트를 대상으로 하여 단위시멘트량의 변화에 따른 압축강도

와 시공성 요인을 분석하여 내구성을 동시에 확보할 수 있는 방안을 검토하고자 하였다.

2. 실험적 검토

2.1 사용재료

1) 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2) 골재

잔골재는 S1, S2, S3의 3종류로서 S1은 공주지역의 잔골재를 입도 조절한 것이며, S2는 구미지역 가산지구의 모래, S3는 구미지역 초곡지구의 잔골재이다. 굵은골재는 쇄석으로서 최대치수 19mm의 골재를 사용하였다. 잔골재와 굵은골재에 대한 물리적 특성과 입도분포는 Table 2, Table 3 및 Fig. 1에 나타내었다.

Table 2 Physical properties of aggregates

구 분	비중	흡수율 (%)	조립률	단위용적 중량(t/m ³)	5mm체 잔류(%)	마모율(%)	
잔골재	S1	2.60	1.27	2.64	1.537	1.8	-
	S2	2.58	1.63	2.60	1.522	3.0	
	S3	2.57	1.69	3.20	1.596	3.0	
굵은골재	2.68	0.45	6.69	1.560	-	16.8	

Table 3 Properties of admixtures

혼화제	색상	주성분	비중	고형분 (%)
AE제	연황색	계면활성제	1.12	-
고성능 감수제	암갈색	나프탈렌 설론산	1.21	43.5

Table 1 Physical properties of cement

비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(분)		수화열 (cal/g)				시멘트강도(kgf/cm ²)		
		초결	종결	1h	24h	48h	72h	3일	7일	28일
3.15	3,227	178	329	4.3	47.9	58.1	62.8	184	304	372

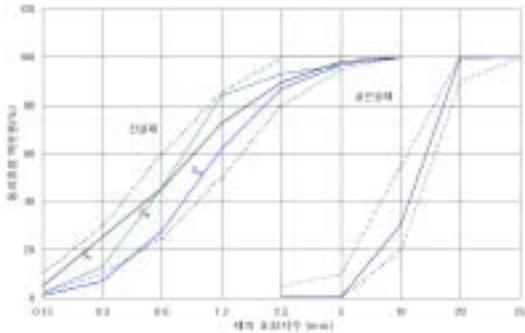


Fig. 1 Gradation of aggregates

3) 혼화제

혼화제는 K사 제품의 AE제 및 고성능 감수제를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다.

2.2 단위시멘트량의 변화에 따른 강도 분석

콘크리트 공사 현장에서 우려하는 문제 중의 하나가 동일 물-시멘트비라 할지라도 단위시멘트량을 줄이면 압축강도가 줄어들게 되어 설계기준강도를 밑도는 경우가 발생하지 않을까 하는 것이다. 따라서 정확한 분석 없이 대체로 단위시멘트량을 높여 안전율을 확보하는 것이 일반적이며 여기에 대한 기준은 불명확하다.

이러한 문제점 해결을 위해 본 실험에서는 현장 콘크리트에 적용되는 배합설계를 중심으로 동일 물-시멘트비에서 단위시멘트량(단위수량)에 따른 압축강도의 변화를 검토하였다.

2.2.1 실험방법

본 실험에서는 설계기준강도 400kgf/cm²(배합강도 460kgf/cm²)을 얻기 위해 동일한 물-시멘트비(35%)에서 단위시멘트량을 370~550kg/m³까지 변화시켜 재령 7일과 28일의 압축강도를 측정하였다. 본 실험에 사용된 배합표는 Table 4와 같으며, 잔골재는 S1을 사용하였다.

2.2.2 실험결과 분석

Fig. 2는 단위시멘트량 370~550kg/m³의 범위에서 압축강도를 7일과 28일 강도로 나타낸 것이다. 모든 경우에서 설계기준강도를 확보하였으며 단위시멘트량을 줄인다고 해서 강도가 줄어들지 않는다는 것이 분명하게 나타났다. 따라서, 본 실험의 조건 즉, 동일한 물-시멘트비(35%)에서 단위시멘트량을 370kg/m³에서 550kg/m³까지 변화시키더라도 압축강도는 어느 정도 범위 안에 있음을 알 수 있다.

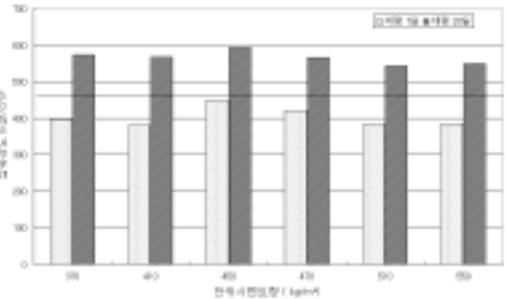


Fig. 2 Relationship between cement content and compressive strength

Table 4 Mix proportions and test results

W/C (%)	Unit content (kg/m ³)				AE제(%)	고성능감수제(%)	슬럼프(cm)	압축강도(kgf/cm ²)	
	W	C	S	G				7일	28일
35	130	370	901	970	0.030	1.4	10.0	396	573
	144	410	831		0.022	1.0	20.1	379	568
	158	450	761		0.018	0.8	17.8	448	593
	165	470	726		0.014	0.7	20.2	421	566
	179	510	657		0.014	0.5	18.0	383	543
	193	550	588		0.012	0.3	19.0	385	549

* 공기량은 4.5±0.5%

콘크리트의 배합에서 강도만을 고려한다면 본 실험에서 적용한 범위의 단위시멘트량은 모두 만족되지만 콘크리트는 강도 이외에 내구성과 시공성을 동시에 만족시켜야 한다. 시공성 요인으로서 타설시 작업성과 성형성 및 마감성, 내구성 요인으로서 투수성과 수화열 및 건조수축 등을 고려하여 적정 단위시멘트량을 결정해야 한다. 수화열이나 건조수축을 고려하여 최저 단위시멘트량인 370kg/m³을 택할 경우에는 작업성, 성형성, 마감성 등 시공성에 문제점이 발생할 수 있다. 시공성 측면에서 단위시멘트량을 550kg/m³으로 정할 경우에는 콘크리트의 시공성은 좋아지지만 단위시멘트량과 단위수량의 증가로 인해 수화열과 건조수축이 커져 구조물의 내구성에 문제가 발생하게 된다. 실제로 단위시멘트량이 많게 되면 수화열이 높아지며 콘크리트의 최고 온도는 물-시멘트비에 관계없이 단위시멘트량에 선형적으로 비례한다(유영찬 등 1992). 또한 혼화재료 등을 적절히 사용하면 압축강도의 저하 없이 단위시멘트량을 큰 폭으로 저감할 수도 있다(Nan Su et al, 2002). 따라서 콘크리트의 배합에 있어 단위시멘트량(단위수량)의 결정은 강도를 만족하는 범위에서 소요의 시공성을 확보할 수 있는 최소량으로 하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

2.3 혼화제 소요량

고강도 콘크리트에서 소요의 시공성을 만족시키기 위해서는 배합재료 즉, 물, 시멘트, 골재 등의 양이나 비율이 중요하지만, 정해진 배합에서 시공성을 향상시키기 위해서는 혼화제를 사용하며, 이를 사용하여 배합을 더욱 내구적이거나 경제적으로 설계할 수도 있다.

본 절에서는 물-시멘트비 35% 굵은골재량을 970kg/m³으로 하고 단위시멘트량을 370, 410, 450, 470, 510, 550kg/m³으로 각각 배합한 경우 기준 슬럼프 16±0.5cm와 기준 공기량 4.5±0.5%를 얻을 수 있는 혼화제의 양을 검토하였다. 또한, 혼화제의 소요량은 3회 측정하였으며, 매회 다른 날 다른 잔골재(S1, S2, S3)로 실시하였다.

Table 5에 단위시멘트량의 조건별 혼화제 사용량에 대한 실험결과를 나타내었다.

Table 5 Cement content and use of admixtures

W/C (%)	Unit content (kg/m ³)				사용 잔골재	고성능 감수제 (%)		AE제(%)	
	W	C	S	G		개별	평균	개별	평균
35	130	370	901	970	S1	1.8	1.63	0.030	0.024
					S2	1.5		0.025	
					S3	1.6		0.018	
	144	410	831		S1	1.1	0.97	0.022	0.020
					S2	0.9		0.022	
					S3	0.9		0.015	
	158	450	761		S1	0.9	0.80	0.018	0.016
					S2	0.8		0.017	
					S3	0.7		0.014	
	165	470	726		S1	0.8	0.73	0.014	0.014
					S2	0.7		0.015	
					S3	0.7		0.014	
	179	510	657		S1	0.7	0.57	0.014	0.013
					S2	0.6		0.014	
					S3	0.4		0.012	
	193	550	588		S1	0.5	0.40	0.012	0.012
					S2	0.4		0.012	
					S3	0.3		0.012	

* 혼화제의 사용량은 시멘트 중량비(%)로 나타냄

* 기준 슬럼프 16±0.5cm, 기준 공기량 4.5±0.5%

2.3.1 단위시멘트량에 따른 고성능 감수제 소요량

Fig. 3은 단위시멘트량의 변화에 따른 고성능 감수제 첨가량(3회 평균값)을 시멘트 중량비로 나타낸 것이다. 전반적으로 단위시멘트량이 증가할수록 동일 슬럼프를 위한 고성능 감수제 첨가량은 적어졌으며, 최저 0.3%에서 최고 1.8%까지 나타났다.

특히, 단위시멘트량이 370kg/m³과 410kg/m³의 경우에는 단위시멘트량이 40kg/m³의 차이임에도 불구하고, 첨가되는 고성능 감수제량은 단위시멘트량 370kg/m³의 경우 약 1.7배 정도로 급증하여 경제적이지 못한 배합이 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 고성능 감수제 첨가량의 측면에서 볼 때, 본 실험조건인 설계강도 400kgf/cm²인 고강도 콘크리트에서는 고성능 감수제가 비교적 적게 소요되는 최소 단위시멘트량은 410kg/m³정도로 판단된다.

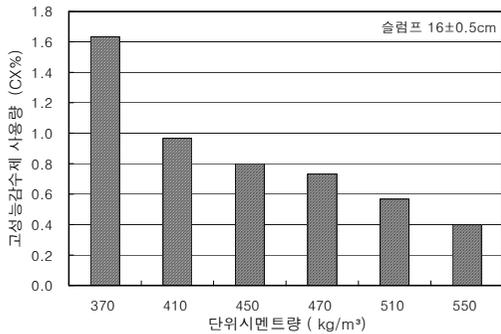


Fig. 3 Relationship between cement content and superplasticizer
2.3.2 단위시멘트량에 따른 AE제의 소요량

Fig. 4는 단위시멘트량에 따른 AE제 첨가량(3회 평균값)을 시멘트 중량비로 나타낸 것이다. 전반적으로 단위시멘트량이 증가할수록 소요의 공기를 연행하기 위한 AE제의 첨가량은 감소하였으나 고성능 감수제와 같이 급격히 감소하지는 않는 것으로 나타났다.

그림에서 볼 때 단위시멘트량 370kg/m³~450kg/m³의 범위에서는 시멘트량이 증가함에 따라 AE제 소요량이 비교적 급하게 감소되나 단위시멘트량 450kg/m³ 이상에서는 시멘트량의 증가에 따른 AE제 첨가량의 감소는 비교적 둔한 것으로 나타났다. 따라서, 단위시멘트량과 AE제 첨가량의 측면에서 볼 때, 본 실험조건인 설계강도 400kgf/cm²인 고강도 콘크리트에서 AE제가 비교적 적게 소요되는 최소 단위시멘트량은 450kg/m³ 정도로 판단된다.

2.4 잔골재율에 따른 변화

1) 실험방법

잔골재율을 작게 하면 소요의 워커빌리티를 가지는 콘크리트를 얻기 위하여 필요한 단위수량이 감소되고, 이에 따라 단위시멘트량이 적어져서 경제적으로 된다. 따라서 잔골재율은 소요의 워커빌리티를 확보할 수 있는 범위 내에서 단위수량이 최소가 되도록 시험에 의하여 정해야 한다. 그러나 잔골재율을 어느 정도 이하로 하면 콘크리트는 거칠어지고, 재료 분리가 일어나 작업성이 좋은 콘크리트를 얻기 어렵게 된다. 고강도 콘크리트에서 시공성을 고려하여 높은 목표 슬럼프를 설정한 경우에는 적정 굵은골재량을 결정하고 이에 따

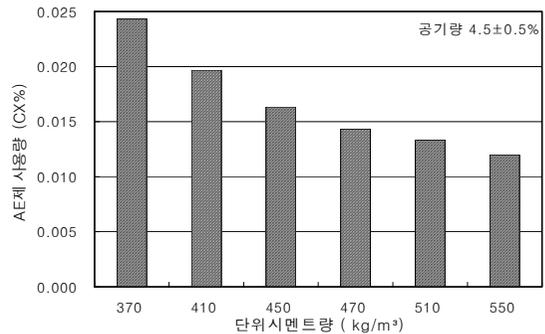


Fig. 4 Cement content and AE agent

른 적정 잔골재율을 도출하는 것이 필요하다.

따라서 본 실험에서는 물-시멘트비 35%, 단위시멘트량은 2.3절의 실험결과를 바탕으로 가장 경제적이면서 양호한 시공성을 확보할 수 있을 것으로 판단되는 단위시멘트량 450, 470kg/m³을 사용한 배합에 대해 잔골재율에 따른 슬럼프 변화를 시험하여 잔골재율이 미치는 영향을 검토하였으며, 잔골재는 S1을 사용하였다.

2) 실험결과

Table 6과 Fig. 5(a), 5(b)에 잔골재율의 변화에 따른 시험결과를 나타내었다. 그림에서 보면 동일한 배합에서 동일한 양의 혼화제를 첨가하였을 경우, 잔골재율이 커질수록 슬럼프는 작아지는 경향이 나타났으며, 공기량의 경우는 별다른 변화가 나타나지 않았다. 또한, 표에서 잔골재율이 커질수록 슬럼프는 작아지지만 육안 검사에 의한 콘크리트의 거칠기는 양호하였으며, 모든 경우에서 재료분리는 일어나지 않았다.

콘크리트의 배합에서 적정 잔골재율은 슬럼프의 손실률이 작고 콘크리트의 거칠기가 양호하며 재료분리가 일어나지 않는 즉, 양호한 워커빌리티가 확보될 수 있는 값으로 결정해야 한다. 따라서 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 단위시멘트량을 450kg/m³으로 사용하는 경우에는 잔골재율 42~44% 정도가, 단위시멘트량 470kg/m³에서는 41~42%의 잔골재율이 적절할 것으로 판단된다.

Table 6 Mix proportion and test result according to sand-aggregate ratio

W/C (%)	단위량 (kg/m ³)				S/a (%)	AE제 (%)	공기량 (%)	고성능 감수제(%)	슬럼프 (cm)	콘크리트 거칠기	재료분리
	W	C	S	G							
35	158	450	652	1084	38	0.022	4.0	0.9	19.2	불량	없음
			686	1049	40		3.9		18.8	불량	
			720	1014	42		4.2		18.6	보통	
			755	979	44		4.6		18.1	양호	
			739	944	46		4.5		17.9	양호	
35	165	470	672	1027	40	0.016	4.9	0.5	12.6	불량	없음
			688	1010	41		4.9		11.7	보통	
			705	993	42		4.3		11.8	양호	
			722	976	43		4.8		10.6	양호	
			739	958	44		4.5		9.1	양호	

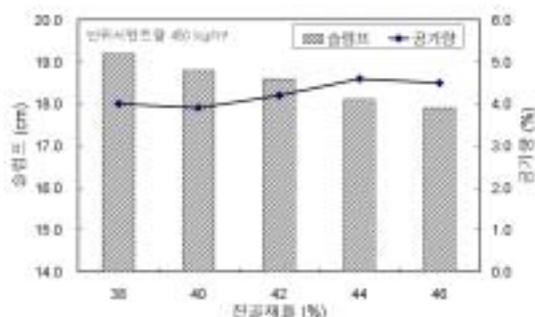


Fig. 5(a) S/a and slump, air content

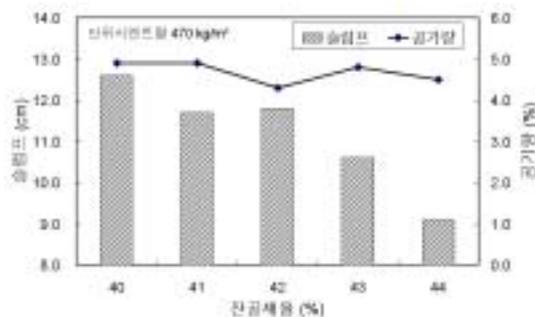


Fig. 5(b) S/a and slump, air content

따라서 고강도 콘크리트뿐만 아니라 모든 콘크리트에서 적절한 최소 잔골재율을 확보해야 단위시멘트량을 적절히 줄일 수 있으며 품질 좋은 콘크리트를 생산할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

1) 본 실험조건인 고강도 콘크리트는 단위시멘트량 370~550kg/m³의 범위에서 모든 경우 설계강도를 감안한 배합강도를 얻을 수 있으며, 단위시멘트량이 변하더라도 압축강도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 압축강도와 더불어 내구성과 시공성을 만족하는 범위에서 최소의 단위시멘트량을 결정하여 사용할 필요가 있다.

- 2) 단위시멘트량과 혼화제 소요량, 잔골재율 등의 상관관계를 바탕으로 분석한 결과 설계강도 400kgf/cm²인 고강도 콘크리트에서 강도와 내구성 및 시공성을 동시에 만족하는 단위시멘트량은 450~470kg/m³인 것으로 판단된다.
- 3) 고강도 콘크리트에서 단위시멘트량에 따른 최소한의 잔골재율을 확보하지 않은 경우 작업성이 떨어지는 것으로 나타났으며, 적절한 최소 잔골재율을 적용하여야 단위시멘트량을 적절하게 줄여서 사용할 수 있다.

참고문헌

1. 김진근, 이철성, "콘크리트의 부등 건조수축에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, Vol. 9, No2, 1997. 4, pp. 153-161.

-
2. 김상철, 강석화, 김진근, "매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가", 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 6호, 1999. 12, pp. 3-12.
 3. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, "시멘트 및 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 3호, 1995. 6, pp. 211-219.
 4. 이장화, 김성욱 "고속철도 공사용 고강도 및 PS콘크리트 장기특성치 측정을 위한 연구", 1997. 12.
 5. 문한영, 최연왕, "고강도용 콘크리트의 온도상승 억제를 위한 고로슬래그 미분말의 효과", 한국콘크리트학회지 1998. 8. Vol. 10, No. 4, pp. 195-204.
 6. 유영찬, 민병렬, 이장화, "고강도콘크리트의 실용성 향상을 위한 실험적 연구", 콘크리트학회지, 4권 2호, 1992. 6, pp. 88~92.
 7. Nan Su, Buquan Miao, "A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement with low cement content", Cement & Concrete Composites, 2002. 4.

(접수일자 : 2002년 10월 10일)