



지상식 LNG 저장탱크용 고강도 자기충전 콘크리트의 최적배합에 관한 연구

권영호^{1)*}

¹⁾동양대학교 건축소방행정학과

Optimum Mix Proportion of the High Strength and Self Compacting Concrete Used Above-Ground LNG Storage Tank

Yeong-Ho Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture and Fire Service Administration, Dong Yang University, Youngju 750-801, Korea

ABSTRACT This study is performed to find the optimum mix proportion of the high strength and self compacting concrete for the above-ground LNG storage tank construction and field application. If LNG storage tank wall thickness can be reduced, the construction cost and quality can be improved by using self-compacting high strength concrete with compressive strength 60~80 MPa. For this purpose, low heat cement (Type IV) and class F fly ash are used in concrete mix to control hydration heat, flowability, and viscosity. Mix design variables of unit water, fly ash replacement ratio, water-binder ratio, and fine aggregate ratio are selected and tested for material properties and manufacturing cost of the concrete. Also, fly ash replacement ratio is considered using confined water ratio test. The test results showed that the optimum mix proportion of the self-compacting high strength concrete characteristics are as follows. 1) In case of the concrete with specified compressive strength of 60 MPa, the optimum mix proportion is fly ash replacement ratio of 20% and water-binder ratio of 27~30%. 2) In case of the concrete with the strength of 80 MPa, the optimum mix proportion is fly ash replacement ratio of 10% and water-binder ratio 25%. But unit water and fine aggregate ratio are 165 kg/m³ and 51 ± 2%, respectively, regardless of the target concrete compressive strength range. Also, test results showed that concrete manufacturing cost of 60 MPa and 80 MPa concrete require additional costs of 14~22% and 33%, respectively, compared to the manufacturing cost of 40 MPa concrete. Therefore, application of the self-compacting high strength concrete has proven to be economical in the perspective of the material cost, quality control, and site management.

Keywords : high strength, self compacting, confined water ratio, fly ash, replacement ratio

1. 서 론

최근, 급증하고 있는 액화천연가스(이하, LNG)의 수요에 대응하기 위한 방안으로 지상식 LNG 저장탱크가 건설되고 있으며, 그 용량도 점차 증대되고 있다. 지금까지 인천 및 평택기지에 10만 k급, 평택 및 통영기지에 14만 k급 지상식 LNG 저장탱크가 건설되어 가동 중에 있으며, 최근에 와서 20만 k급 대용량을 갖춘 지상식 LNG 저장탱크가 평택 및 통영기지, 그리고 동해안에서 처음으로 삼척기지에 건설될 예정이다.¹⁾

20만 k급 대용량의 지상식 LNG 저장탱크를 기존의 방식으로 건설할 경우에는 막대한 공사비가 소요되기 때문에, 이를 절감하기 위하여 고강도 및 자기충전성을 갖는 콘크리트의 적용방안이 대두되고 있다.^{2,3)}

기존 10만~14만 k급 지상식 LNG 저장탱크에 적용한

설계기준강도 40 MPa의 콘크리트를 60 MPa 및 80 MPa 고강도 및 자기충전형 콘크리트로 적용하게 되면, 내벽 두께와 탱크자중의 감소에 따른 콘크리트의 타설량 및 지지말뚝의 타입수도 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트의 타설작업에 따른 인력절감과 경제성 확보, 그리고 품질관리의 효율성을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.^{4,5)}

따라서, 이 연구에서는 지상식 LNG 저장탱크에 적용할 60~80 MPa 고강도 자기충전 콘크리트의 최적배합 조건을 도출하기 위하여, 수화열 저감에 효과적인 저열 포틀랜드 시멘트 및 플라이애쉬(Class F)의 치환에 따른 배합요인별 특성실험을 실시하였으며, 이에 대한 유동성과 점성, 재령별 강도발현, 경제성 등을 분석하여 최적배합 조건을 제시하고자 한다.

2. 실험개요 및 배합조건

2.1 사용재료

지상식 LNG 저장탱크용 고강도 자기충전 콘크리트의

*Corresponding author E-mail: kyh00127@hanmail.net
 Received September 16, 2010, Revised December 2, 2010,
 Accepted December 2, 2010

Table 1 Material properties

Material		Properties	Remark
Cement	Belite cement (IV)	- Blaine (3,500 cm ² /g) - Density (3.22 g/cm ³) - Hydration heat (63.0 cal/g)	- C ₂ S 51.5%, C ₃ S 27.3% - C ₃ A 1.2%, SO ₃ 2.3%
	Coarse	- Fineness modulus (6.71) - Density (2.62 g/cm ³) - Absorption (0.67%)	- 19 mm (crushed stone)
Aggregate	Fine	- Fineness modulus (2.60) - Density (2.59 g/cm ³) - Absorption (1.16%)	- River sand
		- Blaine (3,150 cm ² /g) - Density (2.16 g/cm ³)	- Class F - Loss ignition (3.1%)
Fly ash		- Poly-carbone base - Solid (36.4%) - Specific gravity (1.2)	- Glenium SP-8L (HRWR)

변수별 특성 및 최적배합조건을 선정하기 위한 실험에 사용된 재료는 Table 1과 같다.

시멘트는 분말도 3,500 cm²/g, 밀도 3.22 g/cm³, C₂S 함유량 51.5%인 저열 포틀랜드 시멘트(type IV belite cement)를 사용하였으며, 굵은골재는 19 mm 쇄석을, 잔골재는 강모래를 사용하였다. 또한, 수화열 및 경시변화 특성을 고려하여 F급 플라이애쉬(이하 FA)와 액상형 폴리-카르본계 고성능 감수제(이하 HWRA)를 사용하였다.

2.2 요구성능 및 변수범위

이 연구에서 목표로 하는 고강도 자기충전 콘크리트의 요구성능은 Table 2와 같으며, 배합조건에 따른 변수범위는 Table 3에 나타난 바와 같다.⁶⁾

고강도 자기충전 콘크리트의 요구성능 및 시험방법은 지상식 LNG 저장탱크의 현장조건을 고려하여 일본토목학회 기준(JSCE)⁷⁾을 적용하였다. 또한 배합조건의 변수범위는 주로 물-결합재비(4Cases), 단위수량(4Cases) 및 플라이애쉬 치환율(6Cases)을 대상으로 Table 2의 요구성능에 만족하는지를 평가하여 최적배합조건을 도출하였다.

2.3 시험방법

콘크리트의 유동성 및 재령별 압축강도 시험방법은 KS

Table 2 Required performances and specifications

Slump flow (mm)	Slump flow 500 mm time (sec)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)
650±50	7±3	4±1	60.0 and 80.0

Table 3 Test range of mix design factors

W/B (%)	Unit water (/m ³)	S/a (%)	Replacement ratio of fly ash (%)	HRWR (B×%)	Remark
25~33	159~168	44~55	0~30	0.8~1.2	-

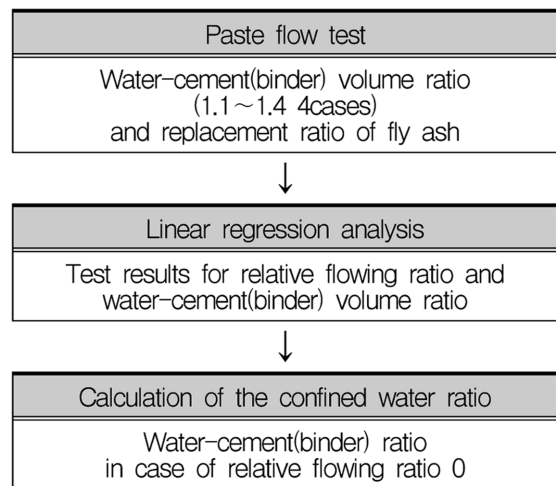


Fig. 1 Confined water ratio test for cement (binder)

및 JSCE기준에 따라 실시하였으며, 플라이애쉬의 치환율에 따른 구속수비(β_p) 평가시험은 Fig. 1과 같다.

여기서, 페이스트의 플로우 시험은 KS R 5201에 준용하지만, 플로우 판에 낙하운동을 가하지 않고 플로우 콘을 제거한 후, 페이스트의 변형이 종료된 시점에서 2방향의 직경을 측정하였다. 고강도 자기충전 콘크리트의 배합방법 및 배합시간은 Fig. 2와 같다

콘크리트의 배합은 40 rpm인 100 l용량의 강제식 믹서로 실시하였으며, 건-비빔단계를 제외한 실제 콘크리트의 배합시간은 120초이다.

2.4 콘크리트의 기본배합

고강도 자기충전 콘크리트의 변수별 특성시험을 위한



Fig. 2 Mixing method and mixing time for concrete

Table 4 The fundamental concrete mix design

W/C (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					HWRA (B×%)
		Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel	
27.0	52.0	165	550	61	830	775	1.0

기본 배합조건은 Table 4와 같다.

기본 배합조건은 단위수량 165 kg/m³, 플라이애쉬의 치환율 10% 및 물-시멘트비 27%를 대상으로 하였다. 이러한 기본 배합조건을 바탕으로 단위수량(W), 플라이애쉬의 치환율(FA) 및 물-결합재비(W/B)에 대한 요구성능을 각각 실험적으로 검토하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 플라이애쉬 치환율에 따른 구속수비 평가

Fig. 3은 벨라이트 시멘트의 중량비로 플라이애쉬 치환율에 따른 구속수비의 실험 결과를 나타낸 것이다.

실험 결과, 플라이애쉬의 치환율 10%까지는 구속수비가 감소하지만, 15~20%에서는 약간 증가하는 경향을 보였다. 여기서, 구속수비가 크다는 것은 시멘트-페이스트의 유동성에 기여하지 못하고 시멘트 입자에 흡착되는 수량이 큰 것을 의미한다. 반면에 Table 5에 나타난 바와 같이 변형계수는 10%까지 증가하지만 15~20%에서는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 유동성 개선 및 구속수비의 저감을 기대할 수 있는 플라이애쉬의 치환율은 10% 범위가 가장 적합할 것으로 사료된다.⁸⁾

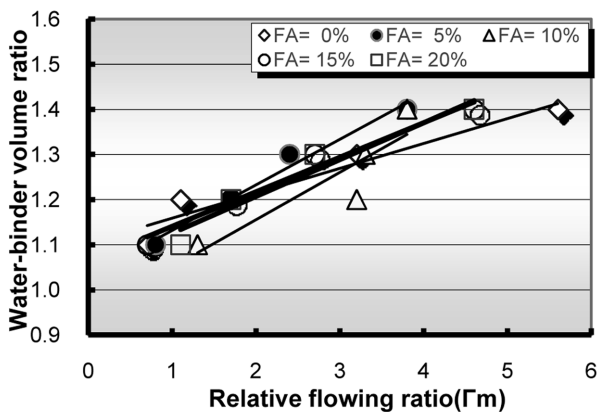


Fig. 3 Confined water ratio-replacement ratio (FA)

Table 5 Confined water ratio for using fly ash

Test results	Replacement ratio of fly ash (belite cement, %)				
	0	5	10	15	20
Confined water ratio	1.104	1.031	0.945	1.042	1.065
Deformation coefficient	0.055	0.101	0.105	0.082	0.076

3.2 단위수량에 따른 실험 결과 분석

고강도 자기충전 콘크리트의 단위수량에 대한 영향을 평가하기 위하여, 단위수량 159~168 kg/m³을 4단계로 나누어 실험을 실시하였다. 이때, 구속수비 실험 결과를 고려하여 플라이애쉬의 치환율 10% 및 물-결합재비에 따른 단위수량별 배합조건은 Table 6과 같다.

여기서, W00-FA00는 단위수량 및 플라이애쉬의 치환율을 각각 의미한다. 일반적으로 물-결합재비와 플라이애쉬의 치환율이 동일한 조건에서 단위수량이 증가되면, 단위 시멘트량이 증가하기 때문에 전체적으로 시멘트-페이스트 부분이 증가하게 된다.

따라서, 단위 시멘트량의 증가에 따른 수화과정에서의 수화열 및 재료단가의 상승도 고려해야 한다.

Figs. 4 및 5는 단위수량에 따른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간의 결과를 각각 나타낸 것이다.

실험 결과, 동일한 물-결합재비와 플라이애쉬 치환율의 조건에서 단위수량이 증가할수록 슬럼프플로우는 약간 증가하는 경향을 보였는데, 이는 단위수량이 낮을수록 전체 페이스트량이 감소하는 반면에, 골재량의 증대로 인한 점

Table 6 Mix design condition for unit water

Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					HWRA (B×%)
			Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel	
W159-FA10	25.0	49.0	159	572	64	780	821	1.3
	27.0	50.5		530	59	824	817	1.3
	30.0	53.5		477	53	874	816	1.2
	33.0	54.5		434	48	921	809	1.1
W162-FA10	25.0	49.0	162	582	65	771	812	1.3
	27.0	50.5		540	60	815	808	1.2
	30.0	53.5		486	54	865	808	1.1
	33.0	54.5		442	49	912	802	1.1
W165-FA10	25.0	50.5	165	594	66	785	779	1.0
	27.0	52.0		550	61	830	775	1.0
	30.0	53.5		495	55	882	775	1.0
	33.0	54.5		450	50	921	778	1.0
W168-FA10	25.0	50.0	168	605	67	769	778	1.0
	27.0	51.5		560	62	814	775	1.0
	30.0	53.0		504	56	865	776	1.0
	33.0	54.0		458	51	904	779	0.9

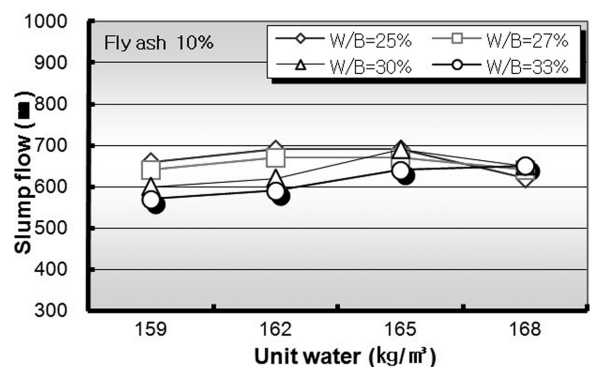


Fig. 4 Test results for unit water-slump flow (FA10)

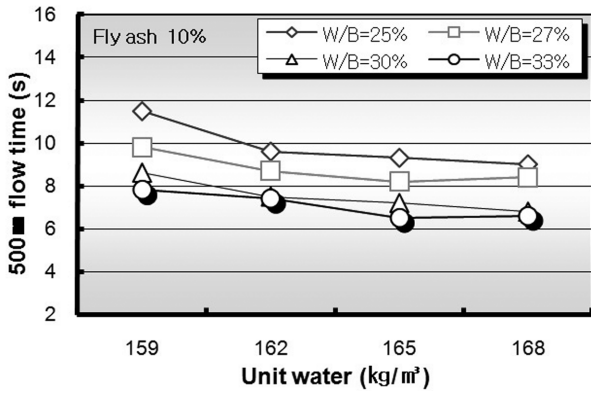


Fig. 5 Test results for unit water-500 mm flow time (FA10)

성저하 및 골재의 맞물림 저항에 의한 것으로 사료된다.

500 mm 플로우 도달시간의 결과를 보면, 단위수량이 증가할수록 유동성의 증대와 맞물림 저항의 감소로 도달시간이 감소하는 경향을 나타내었지만, 단위수량 162 kg/m³ 이상에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 6은 단위수량에 따른 재령 91일의 압축강도 결과를 나타낸 것이다.

단위수량에 따른 압축강도 결과, 단위수량 165 kg/m³일 경우가 물-결합재비에 관계없이 비교적 안정적인 강도발현 성상을 나타내었다.

3.3 플라이애쉬 치환율에 따른 실험 결과 분석

플라이애쉬는 일반적으로 높은 구형입자 비율로 인하여 유동성이 우수하고 블리딩을 저감할 수 있기 때문에, 고강도 자기충전 콘크리트의 성능개선에 매우 효과적이다. 특히, 지상식 LNG 저장탱크는 대용량 매스 구조물이기 때문에 수화열에 의한 온도균열의 발생 가능성을 저감시키는 방안으로 적정한 플라이애쉬 치환율이 요구된다.⁹⁾

플라이애쉬 치환율에 따른 구속수비의 실험 결과를 고려하여, 고강도 자기충전 콘크리트에서 단위수량 165 kg/m³ 일 때, 플라이애쉬 치환율의 영향을 평가하기 위한 배합 조건은 Table 7과 같다.

Figs. 7 및 8은 플라이애쉬 치환율에 따른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간을 나타낸 것이다.

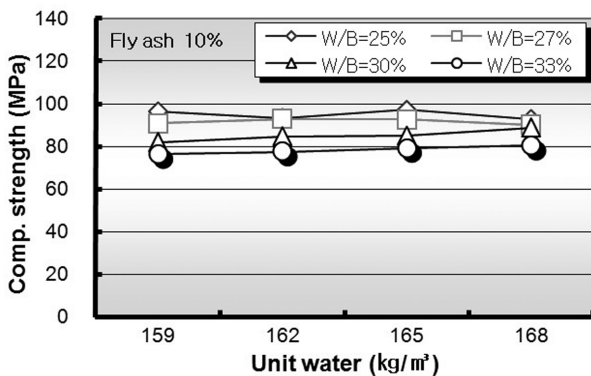


Fig. 6 Test results for unit water-compressive strength

Table 7 Mix design condition for replacement FA

Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					HWRA (B×%)
			Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel	
W165-FA00	25.0	49.0	165	660	0	774	815	1.1
	27.0	50.5		611	0	818	811	1.1
	30.0	52.0		550	0	868	810	1.1
	33.0	53.5		500	0	914	804	1.0
W165-FA10	25.0	50.5	165	594	66	785	779	1.1
	27.0	52.0		550	61	830	775	1.0
	30.0	53.5		495	55	882	775	1.0
	33.0	54.5		450	50	921	778	1.0
W165-FA15	25.0	50.0	165	561	99	772	780	1.1
	27.0	51.5		519	92	816	778	1.0
	30.0	52.5		468	83	867	778	1.0
	33.0	53.0		425	75	882	808	1.0
W165-FA20	25.0	49.5	165	528	132	758	782	1.1
	27.0	51.0		489	122	803	780	1.0
	30.0	52.5		440	110	854	782	1.0
	33.0	53.0		400	100	886	785	1.0
W165-FA30	25.0	49.0	165	462	198	738	777	1.1
	27.0	50.5		428	183	783	777	1.0
	30.0	52.0		385	165	836	780	1.0
	33.0	53.5		350	150	884	777	1.0

실험 결과, 단위수량 165 kg/m³일 때, 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 슬럼프플로우가 증가하는 경향을 보

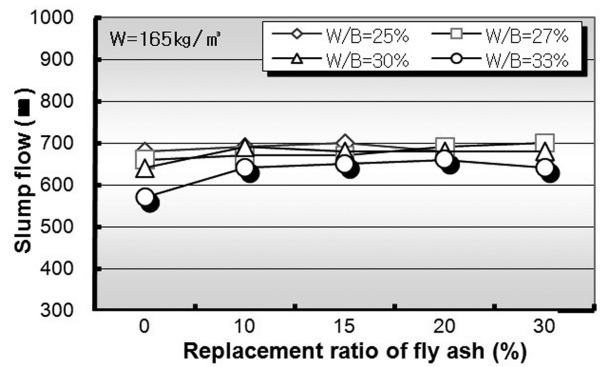


Fig. 7 Test results for replacement FA-slump flow

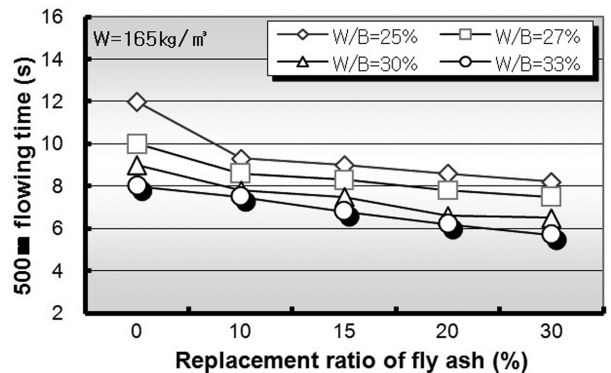


Fig. 8 Test results for replacement FA-500 mm flow time

였지만, 치환율 30%에서는 약간 저하되는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 8에서 보듯이 500 mm 플로우 도달시간은 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 물-결합재비에 따라서 약간의 차이는 있지만, 플라이애쉬의 사용으로 유동성의 증진 및 점성이 개선되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

따라서 굳지 않은 콘크리트의 성상에서 볼 때, 고강도 자기충전 콘크리트의 플라이애쉬 최적 치환율은 20% 이내가 바람직할 것으로 사료된다.

Fig. 9는 플라이애쉬 치환율에 따른 재령 91일의 압축강도를 나타낸 것이며, Figs. 10, 11 및 12는 플라이애쉬 치환율에 따른 재령별 압축강도를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 보듯이 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 플라이애쉬 치환율이 10%일 때, 물-결합재비에 관계없이 대부분 80 MPa 이상의 강도발현을 만족하였다. 그러나 현장에서의 강도 손실율의 최대값을 20%로 산정할 때, 설계기준강도 80 MPa를 만족하는 배합강도는 96 MPa로 산정되기 때문에 재령 28일 압축강도와 91일 압축강도의 발현성을 비교하여 평가하는 방안이 필요하다.

플라이애쉬를 사용하지 않은 배합의 경우에 재령 28일 압축강도는 91일 압축강도의 83~87%이며, 91일 강도에 대한 재령 28일 이후의 압축강도 증가율은 15~21% 범위에 있고 평균값은 18%였다.

Fig. 10에서 보면, 플라이애쉬 치환율이 10%일 때, 28일 압축강도는 91일 압축강도의 81~88%로 나타났으며,

재령 28일 이후의 강도증가율은 평균 19.5%였다.

따라서, 재령 28일 압축강도를 설계기준강도로 보고 이를 만족하는 배합조건을 선정하는 방안이 바람직할 것으로 사료된다. 플라이애쉬 치환율이 10%일 때, 설계기준강도 80 MPa를 만족하는 물-결합재비는 25~27%범위로 나타났다.

플라이애쉬 치환율이 15%인 Fig. 11에서 보면, 28일 압축강도가 91일 압축강도의 75~83%로 나타났으며, 재령 28일 이후의 강도증가율은 평균 25%로 매우 높게 나타났다. 그러나 28일 압축강도를 설계기준강도로 볼 때, 설계기준강도 80 MPa를 만족하는 배합조건은 없으며, 설계기준강도 60 MPa를 만족하는 배합조건은 물-결합재비 30%이하인 것으로 나타났다.

Fig. 12에서 보듯이 플라이애쉬 치환율이 20%일 때, 28일 압축강도가 91일 압축강도의 75~84%로 나타났으며, 재령 28일 이후의 강도증가율은 평균 20%로 나타났다. 따라서, 설계기준강도 60 MPa를 만족하는 배합조건은 물-결합재비 25~30%의 범위로 나타났다.

3.4 물-결합재비에 따른 실험 결과 분석

일반 콘크리트는 물-시멘트비(W/C)에 따른 압축강도 영향을 평가하지만, 플라이애쉬와 같은 혼화재를 분체로 사용하는 고강도 자기충전 콘크리트는 물-결합재비로 굳지 않은 콘크리트 및 압축강도의 영향을 평가해야 한다. 이를 위해 단위수량 165 kg/m³일 때, 각각의 플라이애쉬

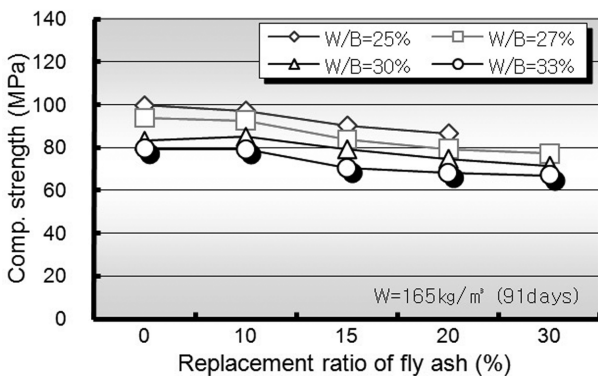


Fig. 9 Test results for FA(%)—compressive strength at 91days

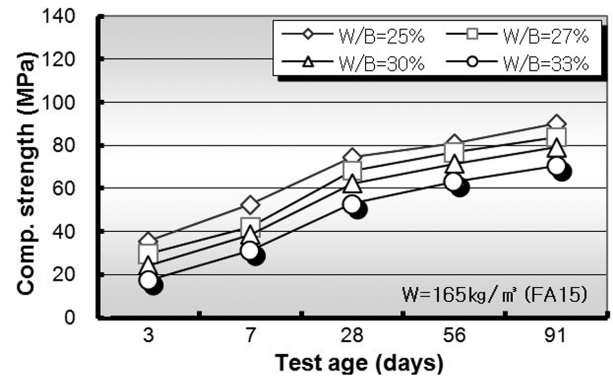


Fig. 11 Test results for FA(15%)—compressive strength at ages

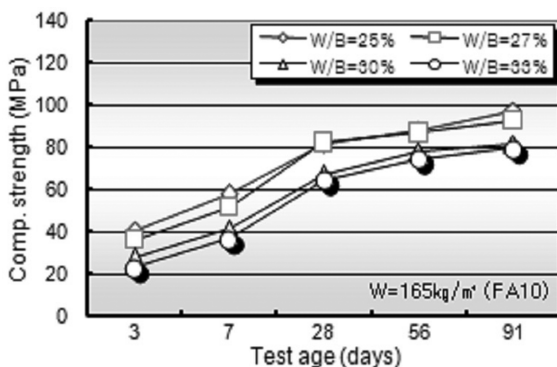


Fig. 10 Test results for FA(10%)—compressive strength at ages

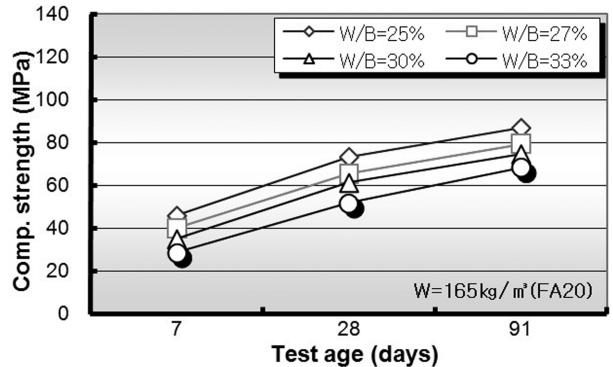


Fig. 12 Test results for FA(20%)—compressive strength at ages

치환율에 따른 물-결합재비의 영향을 분석하였다.

Figs. 13 및 14는 물-결합재비에 따른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간을 각각 나타낸 것이다.

슬럼프플로우는 물-결합재비 33%를 제외하면 거의 차이가 없는 것으로 나타났으나, Fig. 14에서 보듯이 500 mm 플로우 도달시간은 물-결합재비가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 물-결합재비가 증가할수록 점성이 감소되기 때문으로 사료된다.

Figs. 15, 16 및 17은 플라이애쉬의 치환율에 따른 물-결합재비와 압축강도 결과를 나타낸 것이다.

실험 결과, Fig. 15에서 보듯이 플라이애쉬 치환율이 10%일 때 물-결합재비가 증가할수록 재령별 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 설정한 설계기

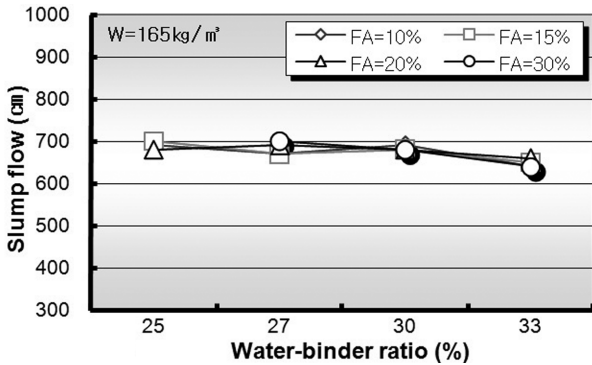


Fig. 13 Test results for water binder ratio-slump flow

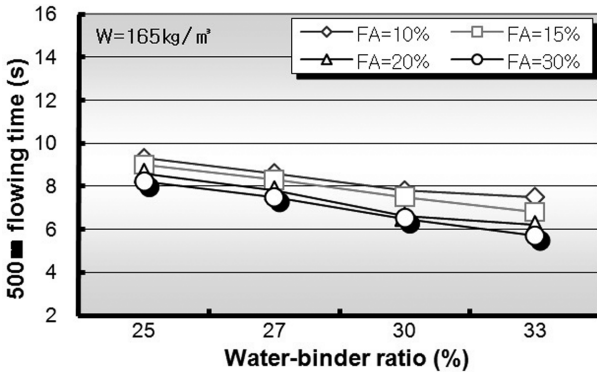


Fig. 14 Test results for water binder ratio-500 flow time

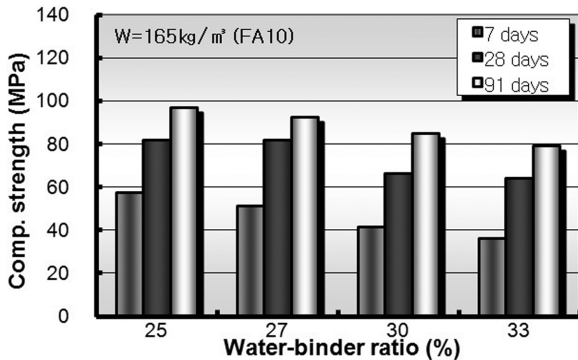


Fig. 15 Test results for W/B(%)-compressive strength at FA 10%

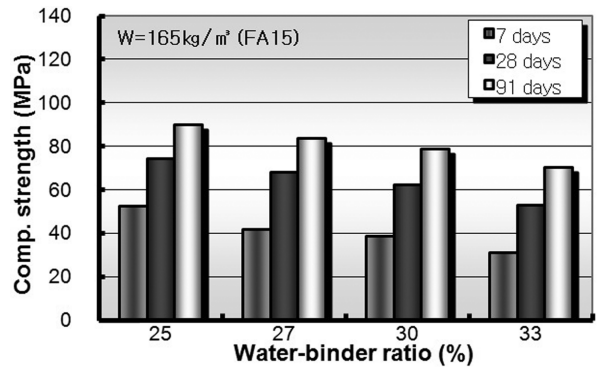


Fig. 16 Test results for W/B(%)-compressive strength at FA 15%

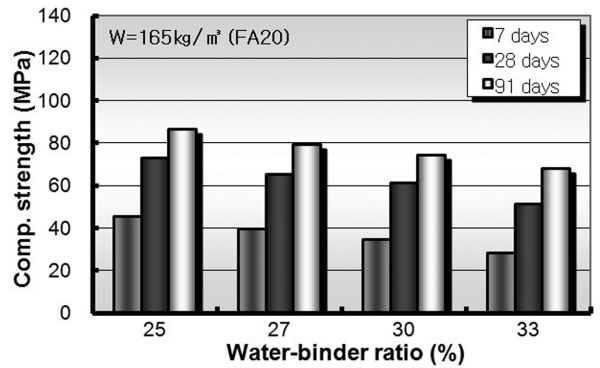


Fig. 17 Test results for W/B(%)-compressive strength at FA 20%

준강도 80 MPa의 고강도 자기충전 콘크리트를 만족하는 물-결합재비는 25~27%의 범위로 나타났다.

또한 Fig. 16에 나타난 바와 같이 플라이애쉬 치환율 15%일 때, 설계기준강도 80 MPa를 만족하는 물-결합재비는 없는 것으로 나타났다.

따라서, 플라이애쉬 치환율이 15%이상에서는 설계기준강도 60 MPa의 경제적 배합조건을 검토하는 것이 바람직하다.

Fig. 17에서 보듯이 플라이애쉬 치환율이 20%일 경우에도 물-결합재비가 증가할수록 재령별 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 설계기준강도 60 MPa를 만족하는 물-결합재비는 27~30%가 가장 경제적인 배합조건으로 사료된다. 참고로, 플라이애쉬 치환율이 30%의 경우에는 이 연구의 설계기준강도 조건을 만족하지 않았다.

3.5 잔골재율에 따른 실험 결과 분석

잔골재율(S/a)은 고강도 자기충전 콘크리트의 점성에 영향을 미치기 때문에, 변수별 특성실험에서 선정된 설계기준강도 60 및 80 MPa급 콘크리트에 대하여 Table 8과 같은 배합조건으로 잔골재율의 영향을 평가하였다.

이때, 단위수량은 165 kg/m³로 일정하며, 설계기준강도가 80 MPa인 경우에는 변수별 특성실험에서 가장 우수한 것으로 나타난 플라이애쉬 치환율 10% 및 물-결합재비 25%

Table 8 Mix design condition for S/a

Mix No.	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					HWRA (B×%)
			Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel	
W165-FA10 (80 MPa)	25	53.5	165	594	66	805	707	1.1
		51.4				773	739	1.1
		49.3				741	771	1.1
		47.3				711	802	1.1
		45.4				683	831	1.1
W165-FA20 (60 MPa)	27	51.8	165	488	122	789	742	1.1
		49.8				758	773	1.1
		47.8				728	804	1.1
		45.9				699	833	1.1
		44.0				670	782	1.1
W165-FA20 (60 MPa)	30	53.4	165	440	110	841	743	1.1
		51.3				808	776	1.1
		49.3				777	808	1.1
		47.3				745	840	1.1
		45.5				717	869	1.1

를 대상으로하고, 설계기준강도 60 MPa 경우에는 플라이애쉬 치환율이 20% 및 물-결합재비가 27%와 30%를 대상으로 각각 5단계로 잔골재율 범위를 정하여 영향을 평가하였다.

3.5.1 W165-FA10-W/B25(80 MPa)의 실험 결과

Figs. 18과 19는 설계기준강도 80 MPa의 잔골재율에 따른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간을 나타낸 것이다. 실험 결과, 슬럼프플로우는 잔골재율의 영향이 크지 않았지만, 500 mm 플로우 도달시간은 잔골재율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 즉, 잔골재율이 증가할수록 잔골재의 전체표면적이 증대되고 이를 감싸줄 결합재량이 많이 필요하기 때문에 골재의 입자간에 존재하는 잉여 페이스트량의 감소에 따른 콘크리트의 점성이 감소된 것으로 사료된다.¹⁰⁾

3.5.2 W165-FA20-W/B27(60 MPa)의 실험 결과

Figs. 20 및 21은 설계기준강도 60 MPa의 잔골재율에

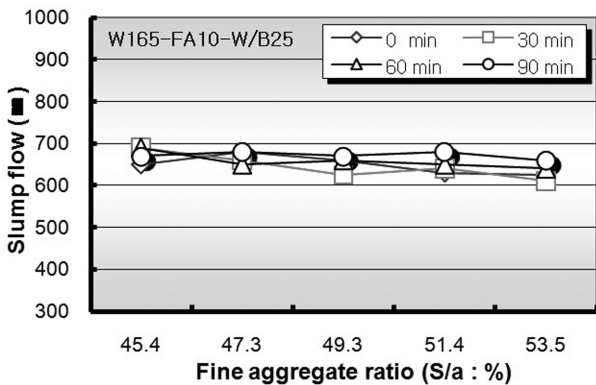


Fig. 18 Test results for slump flow-S/a (W/B25-80 MPa)

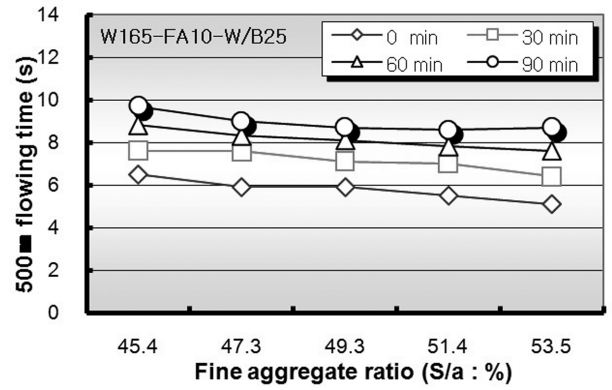


Fig. 19 Test results for 500 mm flow time-S/a (W/B25-80 MPa)

다른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간을 나타낸 것이다.

실험 결과, 슬럼프플로우는 잔골재율에 관계없이 관리기준(650 ± 50 mm)을 만족하였으며, 500 mm 플로우 도달시간은 잔골재율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

특히, 플라이애쉬 치환율은 20%로 유동성 증대로 인한 점성의 차이가 감소하는 것으로 나타났으며, 대부분의 500 mm 플로우 도달시간 실험 결과도 관리기준(7 ± 3 sec)을 만족하였다.

3.5.3 W165-FA20-W/B30(60 MPa)의 실험 결과

Figs. 22 및 23은 설계기준강도 60 MPa의 잔골재율에

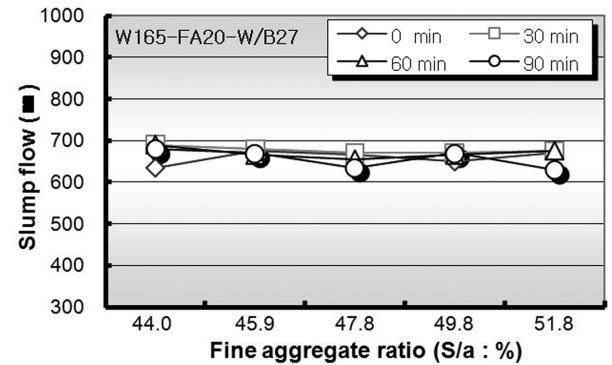


Fig. 20 Test results for slump flow-S/a (W/B27-60 MPa)

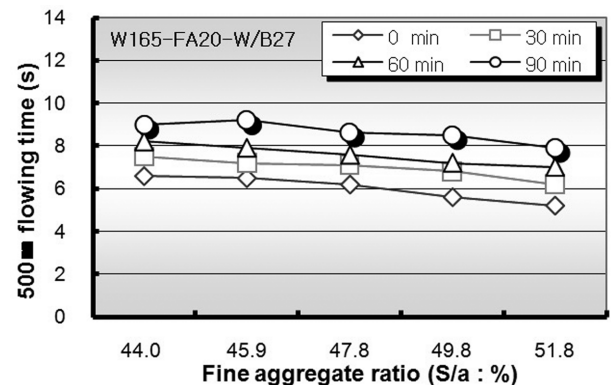


Fig. 21 Test results for 500 mm flow time-S/a (W/B27-60 MPa)

따른 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간을 나타낸 것이다.

실험 결과 물-결합재비가 30%인 경우에 잔골재율이 증가할수록 슬럼프플로우가 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나 500 mm 플로우 도달시간은 경시변화에 따라 점

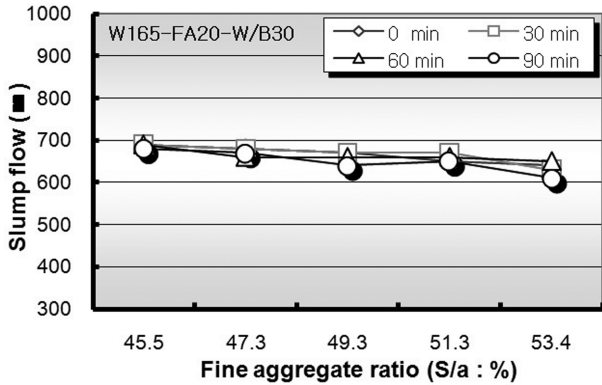


Fig. 22 Test results for slump flow-S/a (W/B30-60 MPa)

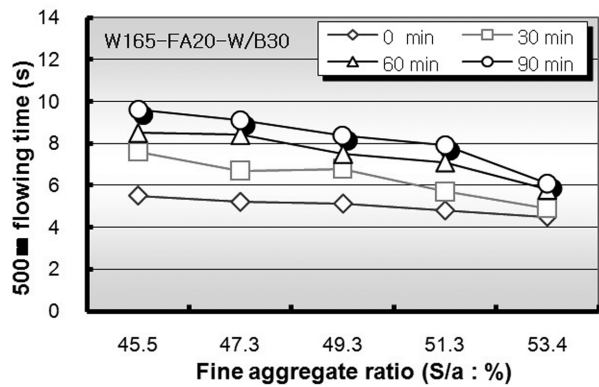


Fig. 23 Test results for 500 mm flow time-S/a (W/B30-60 MPa)

Table 9 Optimum mix design condition

Mix no.	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					H.W.R.A (B×%)	Remark (MPa)
			W	C	FA	S	G		
W165-FA10	25.0	50.5	165	594	66	785	779	1.1	80
W165-FA20	27.0	51.0	165	489	122	803	780	1.1	60
	30.0	52.5		440	110	854	782		

Table 10 Material cost comparison for strength

No.	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)						Total cost (won/m ³)
			W	C	FA	S	G	Ad	
W165-FA10 (80 MPa)	25.0	50.5	165	594	66	785	779	7.26	88,457 (133)
				51,042	2,719	12,155	8,021	14,520	
W165-FA20 (60 MPa)	27.0	51.0	165	489	122	803	780	6.72	80,951 (122)
				42,020	5,026	12,434	8,031	13,440	
	30.0	52.5	165	440	110	854	782	6.05	75,716 (114)
			37,809	4,532	13,223	8,052	12,100		
W164-FA15 (40 MPa)	37.0	44.3	164	377	66	736	940	5.09	66,369 (100)
				32,396	2,719	11,396	9,678	10,180	

성의 차이가 증가되는 현상을 나타내었다. 이는 동일한 단위수량에서 물-결합재비가 증가함에 따른 단위결합재의 감소와 잔골재율의 증가에 따른 골재표면적의 증대로 인하여 결합재-페이스트의 양이 감소되었기 때문으로 사료된다.

잔골재율에 따른 고강도 자기충전 콘크리트의 영향을 평가해 볼 때, 배합조건에 따라 차이는 있지만 일반적으로 잔골재율은 51 ± 2% 범위가 가장 적합할 것으로 사료된다.

따라서, 이 연구에서 제시하는 최적배합조건은 Table 9와 같이 설계기준강도 80 MPa의 최적 배합조건은 플라이애쉬 치환율 10%, 물-결합재비 25%이며, 60 MPa의 경우에는 플라이애쉬 치환율 20%, 물-결합재비 27~30%가 가장 적합한 것으로 나타났다.

3.6 최적배합에 대한 경제성 분석

최적배합으로 제시된 설계기준강도 60 MPa과 80 MPa의 고강도 자기충전 콘크리트와 LNG 저장탱크 공사에 사용된 설계기준강도 40 MPa 고강도 콘크리트의 재료비를 비교한 결과는 Table 10에 나타내었다.

기준에 적용된 설계기준강도 40 MPa에 비해 60 MPa의 경우, 압축강도가 1.5배 증가한 반면에 콘크리트의 재료비는 1.14~1.22배 증가하였다. 또한, 설계기준강도 80 MPa의 경우에는 압축강도가 2.0배 증가한 반면에 재료비는 1.33배 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 재료비의 절감 외에도 현장에서 다짐작업을 하지 않기 때문에 발생하는 노무비 절감이나 현장 품질관리의 용이성 및 소음절감 등에 따른 경제적인 효과도 비교적 클 것으로 사료된다.

4. 결 론

지상식 LNG 저장탱크용 설계기준강도 60 및 80 MPa의 고강도 자기충전 콘크리트 최적배합에 대한 연구 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 플라이애쉬의 구속수비 실험 결과, 플라이애쉬 치환율이 10% 범위에서 유동성 개선에 가장 적합한 것으로 나타났다.
- 2) 단위수량 165 kg/m³의 범위에서 슬럼프플로우 및 500 mm 플로우 도달시간, 그리고 압축강도 발현이 안정적인 것으로 나타났다.
- 3) 고강도 자기충전 콘크리트의 유동성, 점성 및 압축강도를 고려하면, 설계기준강도 80 MPa는 플라이애쉬 치환율 10%, 설계기준강도 60 MPa의 경우에는 치환율 20%가 가장 적합한 것으로 나타났다.
- 4) 설계기준강도 80 MPa의 경우에는 최적 물-결합재비 25%, 60 MPa의 경우에는 27%와 30%가 적합한 것으로 나타났다. 또한, 고강도 자기충전 콘크리트의 잔골재율은 51 ± 2% 범위가 가장 우수한 것으로 나타났다.
- 5) 경제성 분석 결과, 기존의 설계기준강도 40 MPa에 비해 강도범위는 1.5~2.0배 상승하지만, 재료비는 1.14~1.33배 증가하였으며, 이 외에도 고강도 자기충전 콘크리트의 다짐작업 생략에 따른 노무비 절감, 품질관리 및 현장 소음절감 등의 효과가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 양인환, 이재양, 김양수, “지상식 LNG 저장탱크의 시공,”

- 콘크리트 학회지, 15권, 3호, 2003, pp. 24~30.
2. Nishizaki, T., et al., “Largest Above-Ground PC LNG Storage Tank in the World, Incorporating the Latest Technology-Construction Cost Reduction & Shortening of Work Period by Employing New Construction Methods,” *Proc., Thirteenth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas*, 2001, pp. PS64.1~PS64.4.11.
3. 名和豊春, 深谷泰文, 鈴木清孝, “高ビ-ライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリ-トに関する研究,” *コンクリ-ト工學年次論文報告集*, Vol. 15, No. 1, 1993, pp. 143~148.
4. Jeon, S. J., et al., “Basic Design for Large above-Ground Tank,” *Proc., GASEX*, 2002, pp. A3.4.1~A3.4.11.
5. Goto, S., Kamiya, A., and Tajima M., “LNG Technological Progress in Japan-Three Decades of Evolution,” *Proc., Thirteenth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas*, 2001, pp. PO-23.1~PO-23.9.
6. 최연왕, 정재권., “고유동 콘크리트의 개발과 활용,” *한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집*, 20권, 1호, 2008, pp. 1109~1112.
7. 日本土木學會, “高流動コンクリ-ト施工指針,” *93 콘크리-트 라이브러리*, 1998, 249 pp.
8. 한천구, 이정희, 윤기원, 김기철, 유호범., “플라이애쉬 치환율 변화에 따른 준고유동 콘크리트의 특성,” *한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집*, 10권, 2호, 1998, pp. 287~290.
9. 박찬규, 이승훈, 김한준, 김상준, 이태왕, “플라이애쉬 치환율이 높은 콘크리트의 강도발현 및 수화열 특성,” *한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집*, 20권, 1호, 2008, pp. 417~420.
10. 김성욱, 박정준, 강수태, 안정생, 김경원, 신운선, “잔골재율이 육상모래를 사용한 고강도 콘크리트 특성에 미치는 영향,” *한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집*, 20권, 2호, 2008, pp. 329~336.

요 약 이 연구는 대용량 지상식 LNG 저장탱크에 사용할 고강도 자기충전 콘크리트의 최적배합 조건을 도출하고, 현장적용을 위한 기본 자료를 제안하기 위한 것이다. 60~80 MPa 고강도 자기충전 콘크리트를 적용하면, 벽체두께의 감소와 자기충전성에 따른 인력절감 및 품질확보 등을 통하여 경제성을 확보할 것으로 예상된다. 시멘트 및 분체는 점성 증대 및 수화열 저감에 우수한 플라이애쉬와 저열 시멘트(벨라이트)를 사용하였다. 플라이애쉬의 치환율은 구속수비 및 배합변수 실험을 통해 정하였으며, 배합변수는 단위수량(W), 플라이애쉬 치환율(FA), 물-결합재비(W/B) 및 잔골재율(S/a)로 하여, 최적배합비 및 경제성 평가를 실시하였다. 실험 결과, 설계기준강도 60 MPa의 경우에는 단위수량 165 kg/m³, 플라이애쉬 치환율 20% 및 물-결합재비 27~30%로 나타났으며, 설계기준강도 80 MPa의 경우에는 단위수량 165 kg/m³, 플라이애쉬 치환율 10% 및 물-결합재비 25%로 나타났다. 또한, 기존의 설계기준강도 40 MPa와 비교해 볼 때, 압축강도 증가에 따른 재료비 상승은 60 MPa의 경우 14~22% 및 80 MPa의 경우 33%로 나타나, 현장관리 및 인력절감 등과 함께 매우 경제적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고강도, 자기충전성, 구속수비, 플라이애쉬, 치환율