

플라이애쉬 치환율이 높은 콘크리트의 압축강도 발현 특성

The Characteristic of Strength Development of High Volume Fly-Ash Concrete

박찬규*

Park, Chan-Kyu

이승훈*

Lee, Seung-Hoon

김한준**

Kim Han-Jun

Abstract

In this study, the characteristic of strength development of high volume fly ash concrete(HVFAC) was experimentally investigated. The production of one ton of portland cement releases about 0.87ton of CO₂ into the atmosphere. HVFAC is an emerging material technology and is environmentally friendly because of its reduced use of portland cement, reduced CO₂ emissions.

For this purpose, two levels of W/B were selected. Seven levels of fly ash replacement ratios and two levels of silica fume replacement ratios were adopted. In the concrete mix, the water content of 125kg/m³ was used, which is less than that of usual water content.

As a result, it was observed that the slump of concrete was increased with the increasing fly ash replacement ratio and when the silica fume was incorporated into the concrete, the slump was significantly decreased at the same condition. It appeared that the compressive strength gradually decreased with increasing fly ash replacement ratio at the early age, but the difference of strength up to replacement ratio of 50% was little at the age of 91 days because of the pozzolanic reaction of fly ash.

키워드 : 플라이애쉬, 실리카흙, 콘크리트, 압축강도, 인장강도

Keywords : Fly ash, High volume fly ash concrete, silica fume, Compressive strength, tensile strength

1. 서론

현재 대부분의 건설현장에서 사용되는 콘크리트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고 있다. 포틀랜드 시멘트는 제조 과정에서 대기 중에 많은 양의 이산화탄소를 배출하며, 시멘트 1톤을 생산할 때 약 870kg의 이산화탄소가 배출된다. 전 세계적으로 시멘트의 제조량은 해마다 3%씩 증가하고 있으며, 대기 중에 배출되는 전 세계 온실 가스 배출량(이산화탄소 80%)의 약 7%를 차지하고 있다.

지난 1992년 브라질 리우데자네이루에서 열린 유엔환경개발 회의에서 154개국이 기후변화협약을 체결하였다. 이를 구체화하기 위하여 1997년 일본 교토에서 선진 38개국이 “교토의정서”를 채택하였다. 의정서에 서명한 36개국은 2008년부터 2012년까지 이산화탄소 배출량을 의무적으로 줄여야 한다. 우리나라는 의정서 체결 당시 개발도상국으로 분류돼 이산화탄소 할당량을 부여받지 않았지만, 2004년 기준으로 5.9억톤을 배출하는 것으로 나타났고 이는 세계 열 번째인 것으로 나타났다. 그 결과 우리나라도 2013년부터 의무감축국에 포함될 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 환경 변화는 건설 환경에도 큰 영향을 미치게 될 것이며, 이산화탄소 배출량이 적은 건설재료 및 공법의 개발이 필요하다고 판단된다.

이에 대한 노력으로 국내·외에서는 산업부산물인 플라이애쉬를 이용하여 이산화탄소 배출량이 적은 콘크리트를 생산하는 방안에 대하여 연구^{1)~4)}를 수행해오고 있다. 특히 일반적으로 사용되는 플라이애쉬 치환율 25% 이하보다 2배 정도로 치환율이 높은 HVFAC(High Volume Fly-Ash Concrete)가 장래에 큰 각광을 받을 것으로 판단된다²⁾. 이에 본 연구에서는 플라이애쉬가 다량 치환된 콘크리트의 압축강도 및 인장강도 발현 특성에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

표 1. 실험변수

W/B(%)	FA 치환율(%)	실리카흙 치환율(%)	측정항목
26.6	0, 20, 30, 40, 50, 60, 70	0, 5	슬럼프 (슬럼프플로우)
29.8			공기량 압축강도 인장강도

표 1은 실험계획을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 물-결합재비는 2수준을 선택하였고, 실리카흙의 치환량은 총결

* 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원, 정희원

** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 전임연구원, 정희원

합재 대비 0, 5% 치환하는 것으로 하였다. 그리고 플라이애쉬 치환량은 총 7수준을 선택하였다.

2.2 사용재료, 배합 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료의 물리·화학적 성질은 표 2에 나타낸 바와 같다. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트 비중은 3.15g/cm³이고 분말도는 3,267cm²/g이다. 사용된 플라이애쉬는 삼천포산이며, 그 특성으로서는 비중이 2.42g/cm³이고, 분말도는 2,653cm²/g, 그리고 강열감량은 4.4%이다. 그리고 사용된 실리카흙은 SiO₂가 91.7%, 비중 2.1, 분말도가 224,000cm²/g이다.

잔골재는 세척사, 굵은 골재는 최대골재크기 25mm의 쇄석, 그리고 고성능 감수제는 폴리카르본산계(고형분 20%)를 사용하였다.

콘크리트 배합에 있어서, 단위수량은 125kg/m³으로 고정하였으며, W/B 26.6%인 경우 잔골재율은 40%, W/B 29.8%인 경우에는 42.5%를 사용하였다. 이 때 W/B가 26.6%인 경우에는 단위결합재량이 470kg/m³, W/B가 29.8%인 경우에는 단위결합재량이 420kg/m³이다.

콘크리트의 압축강도 및 인장강도를 측정하기 위하여 ϕ 100×200mm 공시체를 제작하여 23℃에서 수중양생을 실시하였다. 그리고 재령 3, 7, 28, 56, 및 91일에 압축강도 및 인장강도 실험을 실시하였다.

표 2. 사용재료의 화학적 성분과 물리적 성질

구분	시멘트	플라이애쉬	실리카흙
SiO ₂	21.1	50.8	91.7
Fe ₂ O ₃	3.2	6.2	1.02
Al ₂ O ₃	5.4	18.3	0.48
TiO ₂	-	0.47	-
CaO	63.0	8.1	0.59
MgO	2.2	2.2	0.50
K ₂ O	1.1	1.6	1.17
Na ₂ O	0.1	1.1	0.26
SO ₃	1.8	0.8	0.35
강열감량(%)	1.8	4.4	3.58
분말도[브레인](cm ² /g)	3,267	2,653	224,000 (BET)
비중(g/cm ³)	3.15	2.42	2.1
45 μ m체잔분(%)	-	25	2.64

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

표 3은 각 실험변수별 굳지 않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 실리카흙을 사용하지 않은 콘크리트에 있어서 플라이애쉬 치환량이 증가할수록 고성능 감수제 사용량이 줄어들더라도 슬럼프 값이 약간 증가함을 알 수 있다. 그런데 실리카흙이 5% 치환된 경우에 이와 같은 경향이 나타난다고 판단하기는 어렵다. 결합재량이 470kg/m³인 경우에 플라이애쉬 치환량이 증가하면서 고성능 감수제의 사용량이 감소하더라도 슬럼프 값은 거의 일정하게 나타난 반면, 결합재량이 420kg/m³인 경우에는 슬럼프 값이 감소하는

것으로 나타났다.

그리고 실리카흙 치환량에 따른 슬럼프 값을 비교해보면, 동일한 고성능 감수제 사용량에 대해서 슬럼프 값은 실리카흙을 5% 치환한 경우가 적은 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 점성과 관계가 있는 것으로 판단된다. 점성 측정장치를 사용하여 정확한 점성을 측정하지는 않았지만, 실리카흙이 치환되지 않은 콘크리트의 경우에는 매우 점성이 높았고 이로 인하여 유동성이 매우 높은 것으로 나타났다. 그런데 실리카흙이 치환된 경우에는 점성이 크게 떨어지면서 유동성이 같이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실리카흙이 치환되면서 재료 사이의 수량이 상대적으로 증가하면서 점성이 감소하는 것으로 판단된다.

표 3. 굳지 않은 콘크리트 특성

결합재량 (kg/m ³)	실리카흙 치환량 (%)	플라이애쉬 치환량 (%)	고성능 감수제 사용량 (%)	슬럼프 (플로우) (mm)	공기량 (%)
470	0	0	2.4	195	2.5
		20	2.4	230	3.2
		30	2.3	250	4.2
		40	2.2	250(570)	3.1
		50	2.1	240(520)	3.5
		60	2.1	255(650)	3.3
		70	2.0	250(620)	3.7
	5	0	2.4	200	3.0
		20	2.4	200	4.0
		30	2.3	210	4.4
		40	2.2	225	3.3
		50	2.1	215	3.7
		60	2.1	210	3.5
		70	2.1	210	4.0
420	0	0	2.2	225	3.6
		20	2.0	235	3.9
		30	2.0	255(610)	4.7
		40	1.9	240(510)	4.7
		50	1.9	240(470)	3.8
		60	1.9	245(560)	4.2
		70	1.8	230(480)	3.6
	5	0	2.2	105	4.6
		20	2.0	140	4.8
		30	2.0	100	4.7
		40	1.9	75	4.1
		50	-	-	-
		60	1.9	70	3.7
		70	1.8	50	4.2

3.2 콘크리트의 강도 특성 분석

그림 1과 그림 2는 플라이애쉬 치환율에 따른 압축강도를 재령별로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 재령 7일에서는 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 압축강도가 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그런데 재령 91일에서는 플라이애쉬를 사용하지 않은 경우에 비하여 강도가 증가하거나 감소폭이 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 그림 1과 2에서 알 수 있는 바와 같이 대체적으로 플라이애쉬 치환율이 50%까지는 치환율 0% 대비 재령 91일에서 큰 압축강도 차이가 나타나지 않음을 알 수 있으며, 그 이상에서 강도 감소폭이 증가하는 것으로 나타났다.

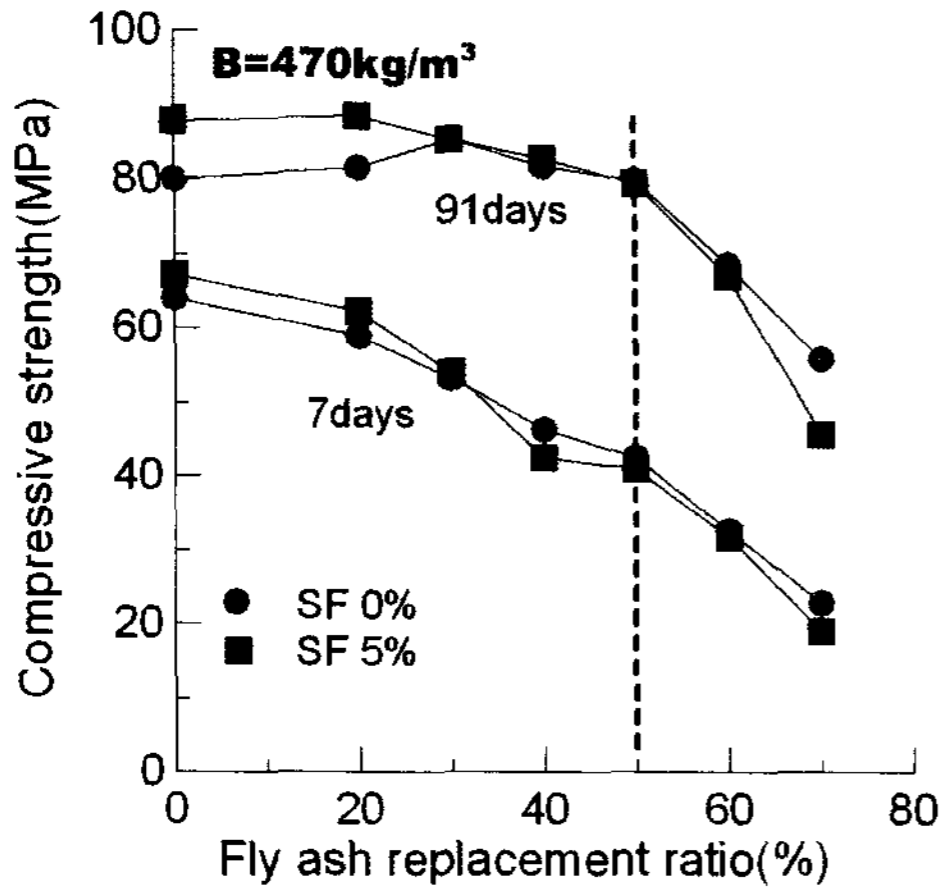


그림 1. 압축강도 발현 특성(B=470kg/m³)

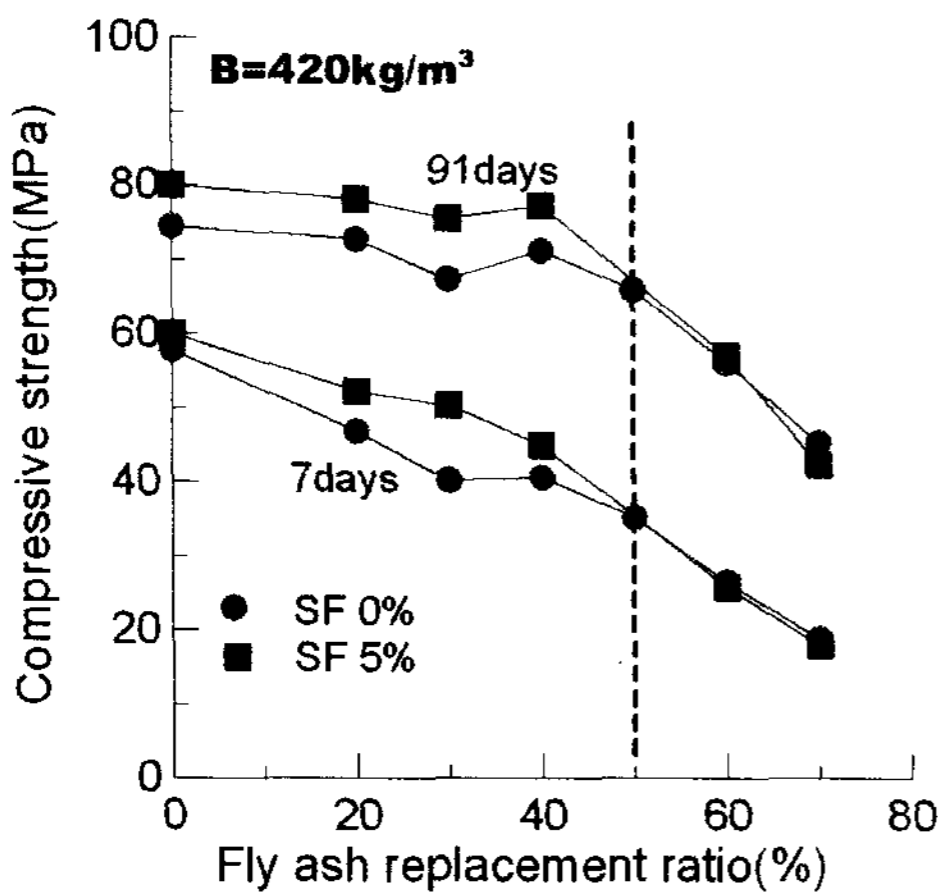


그림 2. 압축강도 발현 특성(B=420kg/m³)

이러한 현상은 실리카흙이 치환된 경우에도 비슷하게 나타났다. 그리고 동일한 재령에서 실리카흙이 치환된 콘크리트의 압축강도는 치환되지 않은 콘크리트에 비하여 플라이애쉬 치환량이 적을 때는 다소 압축강도가 높지만, 플라이애쉬 치환율이 높으면 강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 플라이애쉬 치환량이 작을 때는 실리카흙의 충전작용과 포졸란 반응에 의하여 강도가 증가한 반면, 플라이애쉬 치환량이 높을 때는 근본적으로 시멘트량이 적기 때문에 생성되는 수산화칼슘의 양이 적어 압축강도 발현에 불리하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 실리카흙 5% 정도의 치환으로는 압축강도에 큰 차이가 나타나지는 않았다.

그림 3과 그림 4는 단위 결합재량에 따른 압축강도와 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실리카흙 치환량에 따른 압축강도와 인장강도와의 관계는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그리고 실험결과와 콘크리트 표준시방서의 예측식과 비교한 결과 예측 식은 낮은 압축강도 영역에서는 잘 예측하는 것으로 나타났지만, 압축강도가 높아질수록 과소평가하는 것으로 나타났다. 콘크리트 표준 시방서 5)의 식은 매스콘크리트의 인장강도 예측에 사용되는데, 그 결과 매스콘크리트의 초기재령 압축강도는 잘 예측하지만, 장기재령에 대한 인장강도는 과소평가한다고 볼 수 있다.

이에 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 인장강도 예측 식을

제안하면 식 (1)에 나타낸 바와 같다.

$$f_{sp} = 0.2 \cdot (f_{cu})^{0.75} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 인장강도는 압축강도의 0.75승에 비례하는 것으로 나타났으며, 모델식의 비교는 그림 5에 나타낸 바와 같다.

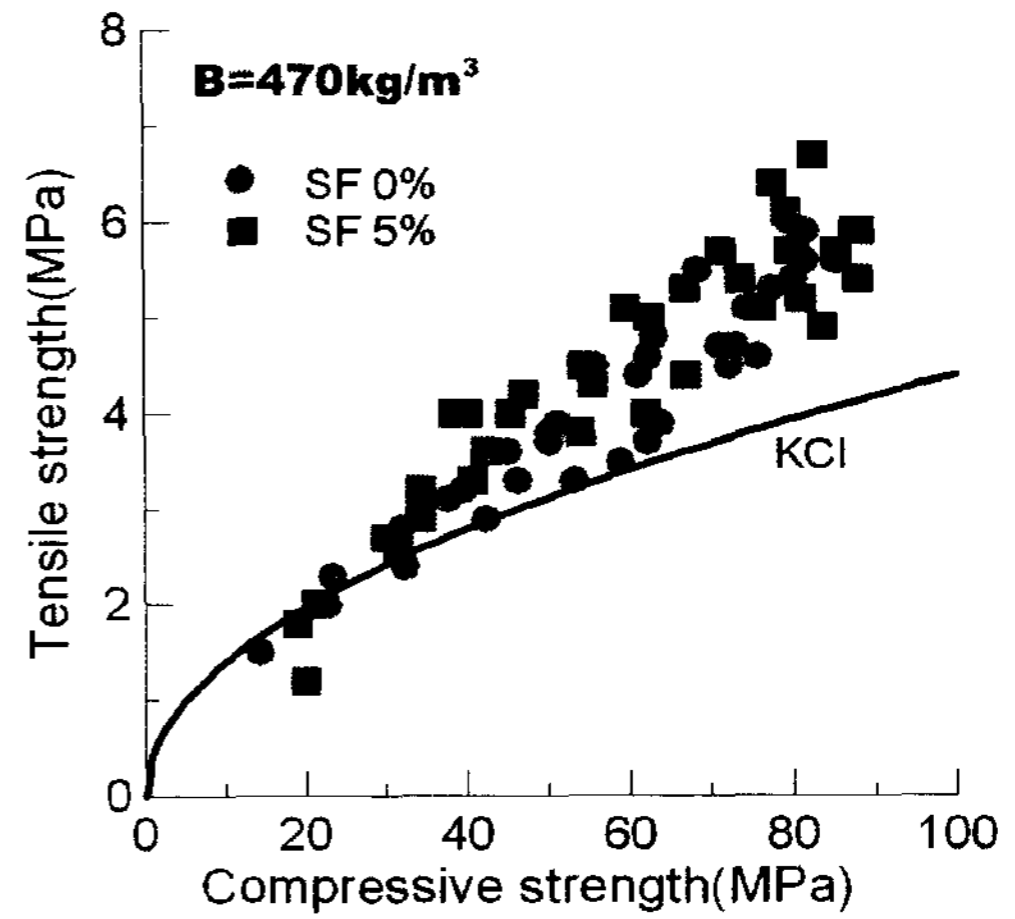


그림 3. 압축강도와 인장강도와의 관계(B=470kg/m³)

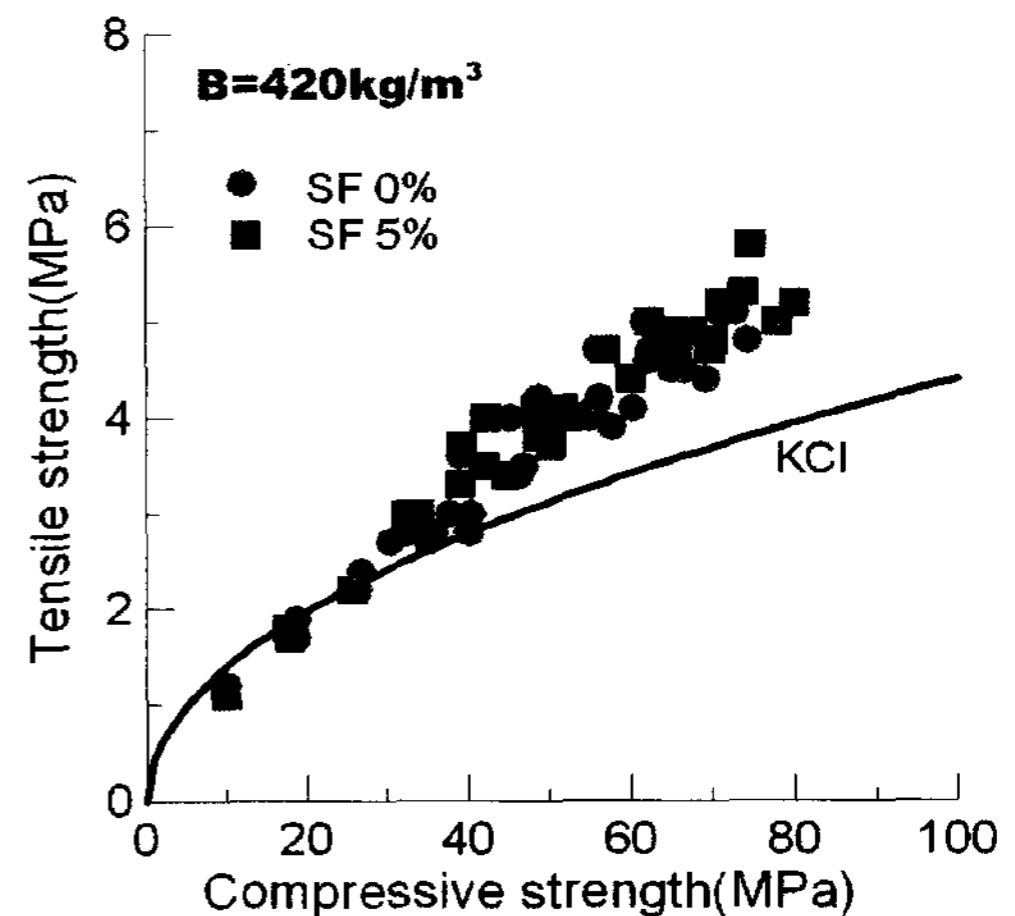


그림 4. 압축강도와 인장강도와의 관계(B=420kg/m³)

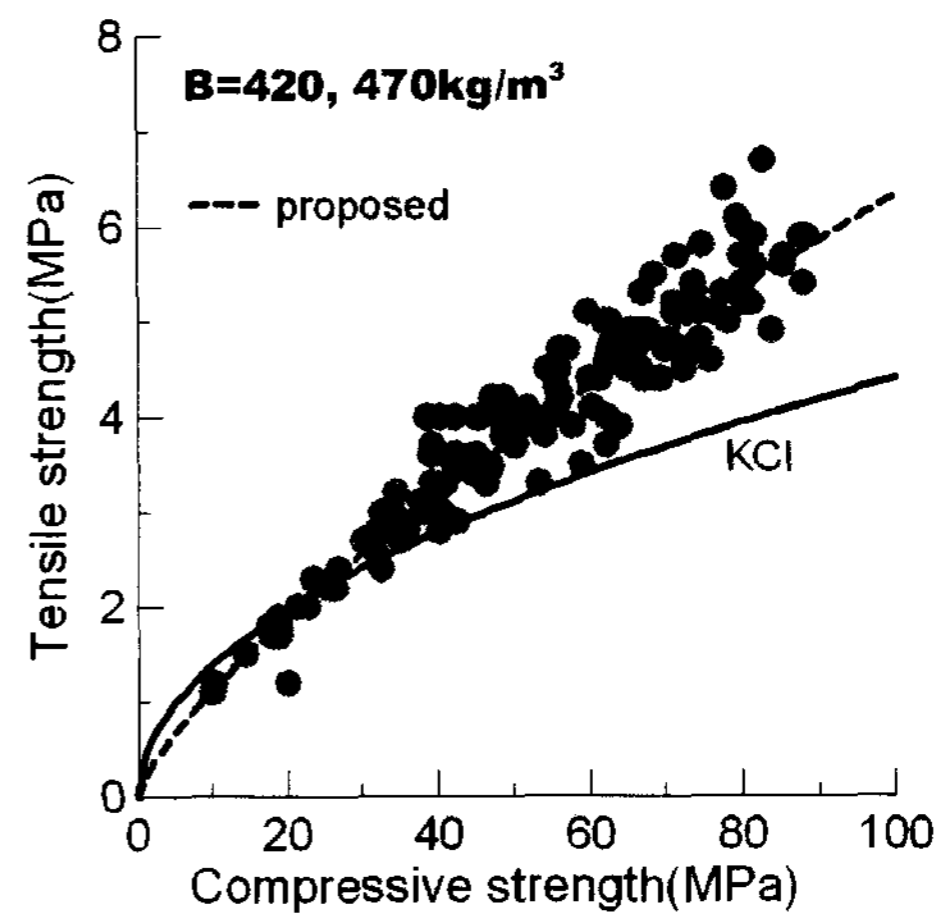


그림 5. 인장강도 예측식의 비교

4. 결 론

플라이애쉬가 다량 치환된 콘크리트의 압축강도 및 인장강도 특성을 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 조건에서 실리카흙이 5% 치환되면 유동성이 크게 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 91일까지의 압축강도 측정결과, 플라이애쉬 약 50%까지 치환하여도 플라이애쉬를 치환하지 않은 경우와 비슷한 강도가 발현되는 것으로 나타났다.
- 3) 실리카흙을 5% 치환한 결과, 플라이애쉬 치환율이 작은 경우에는 약간 개선된 반면, 높은 경우에는 강도가 같거나 떨어지는 경향이 나타났다.
- 4) 콘크리트 표준 시방서에 제시되어 있는 인장강도 예측식은 낮은 강도에서는 잘 예측하는 것으로 나타났지만, 압축강도가 높아질수록 과소평가하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 원종필, 신유길, 안태송, 다량의 플라이애쉬를 사용한 유동성 시멘트 복합체의 특성, 한국콘크리트학회, 가을학술발표회 논문집, 1998, pp. 105-110.
2. 이동하 외 5인, 플라이애쉬를 대량 사용한 고강도 콘크리트에 관한 연구, 한국콘크리트학회, 가을학술발표회 논문집, 2002, pp. 275-280.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 기문당, 1999.
4. V. M. Malhotra, High-Performance High-Volume Fly Ash concrete, Concrete International, July, 2002, pp. 30-34.
5. V. Sivasundaram, G. G. Carrette, and V. M. Malhotra, Selected Properties of High-Volume Fly Ash Concrete, Concrete International, October, 1990, pp. 47-49.