

시멘트의 종류에 따른 콘크리트 특성비교 연구

Comparative Study on the Properties of Concrete Using Several Types of Cement

송용순^{*}, 강석화^{**}, 한정호^{***},
Song, Yong soon Kang, Suck Hwa, Han, Chung Ho,
 구교준^{****}, 김상철^{*****}
 Koo, Kyo Joon, Kim, Sang Chel

ABSTRACT

The main object of this study is to examine the basic properties of fresh concrete as well as hardened concrete using several types of cement such as ordinary portland cement, sulphate resisting portland cement, blast furnace slag cement, ternary blended cement. In addition, effects of each cement on the durability including drying shrinkage, freeze-thawing resistance, resistance of chloride ion penetration, carbonation of concrete were investigated.

As the results of this study, it was proved that most of the properties of concrete using each cement were similar, but there were some differences in bleeding, setting time, resistance of chloride ion penetration and carbonation.

1. 서론

최근 구조물의 거대화, 고층화 추세로 콘크리트에 고강도, 고유동, 고내구성 등의 고기능화, 다기능화가 요구되는 이른바 재료의 고성능화가 촉진되고 있다. 이와같이 콘크리트의 품질에 대한 보다 고성능화 요구를 만족시키는 수단 가운데 특수한 기능을 가진 시멘트를 사용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이미 선진 외국에서는 범용 보통포틀랜드시멘트의 사용에 있어서 다기능화, 고기능화 달성의 한계를 발견하고 혼합계 시멘트와 같은 각종의 기능화된 특수시멘트가 개발되어 사용되고 있다.¹⁾ 그러나, 국내의 경우는 최근 대형 구조물의 증가로 매스콘크리트의 수화열 저감문제와 해양구조물의 내구성 향상문제, 또한 건설현장의 기능 인력 부족으로 인한 시공합리화 등이 절실히 요구되고 있으나 이에 대한 특수 시멘트의 대응은 아직 미약한 실정이다. 이에 본 연구에서는 구조물에 요구되는 성능을 만족하면서 고품질의 콘크리트를 제조하는데 필요한 각종 시멘트의 특성을 파악하고자 4 종류의 시멘트를 대상으로 콘크리트의 물성을 비교 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1. 실험내용 및 방법

본 실험에서는 포틀랜드시멘트로는 1종과 5종을, 혼합시멘트로는 고로슬래그시멘트, 3성분계 저발열시멘트(슬래그미분말과 플라이애쉬를 혼합)를 사용하였다.

각종 시멘트를 사용한 콘크리트의 물성 실험 항목 및 방법은 표 1과 같다.

- * 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 주임연구원
- ** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 팀장, 공박
- *** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 선임연구원
- **** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 연구원
- ***** 정회원, 동아건설산업(주) 광안대로지원팀, 차장, 공박

표 1. 시험항목 및 방법

항 목	시험 방법	콘크리트의 배합 조건
작업성	-KS F 2402, 2421	-
블리딩 및 응결	-블리딩 : KS F 2411 -응결 : KS F 2436	-콘크리트 배합강도 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ -슬럼프 15±2.5cm -공기량 4.5±1.5%
강도 및 탄성계수	-압축강도 : KS F 2405(3, 7, 28, 91일) -할렬인장강도 : KS F 2423(3, 7, 28, 91일) -탄성계수 : ASTM C 469-65(3, 7, 28, 91일)	
건조수축	-KS F 2424 -7일간 습포양생후, 20±10℃, RH 60±10%	
동결융해	-KS F 2456 -28일 수중양생후 -공시체 크기 : 10×10×40cm	
염소이온 침투저항성	-ASTM C 1202-91, AASHTO T 259	
축진 증성화	-온도 40℃, 상대습도 60%, CO ₂ 농도 10% -28일 수중양생후	

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

시험에 사용한 시멘트의 물리·화학 분석결과는 표 2와 같다.

표 2. 시멘트 종류별 물리·화학분석 결과

시멘트 종 류	화학조성(%)							물리적 성질			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	비중	Blaine	응결(시:분)	
									비표면적(cm ² /g)	초결	종결
1종	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3438	3:08	5:18
5종	22.8	3.5	4.8	63.0	2.6	1.9	1.17	3.21	3492	3:48	8:13
슬래그	25.2	8.3	2.0	54.2	5.1	3.2	0.71	3.01	3928	3:40	7:30
저발열	35.7	12.4	3.3	39.8	4.4	2.4	1.1	2.77	4020	3:27	7:37

2.2.2 골재

콘크리트 물성시험에 사용한 골재의 물리적 성질은 표 3과 같이 잔골재는 세척사를, 굵은골재는 쇠석골재를 사용하였다.

표 3. 사용골재의 물리적 성질

항 목	잔골재	굵은골재(25mm)
비중	2.59	2.63
흡수율(%)	1.27	0.74
단위용적중량(kg/m ³)	1537	1469
조립율	2.64	6.83

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작업성

콘크리트의 배합은 단위수량 165±5kg, 물시멘트비(W/C) 40~55%에서 표준형 감수제를 0.3%로 고정 첨가하고, 소요 공기량을 얻을 수 있도록 AE제를 사용하여, 슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 조정하였으며, 그 결과는 표 4와 같다.

표준형 감수제 첨가량을 시멘트 중량의 0.3%로 고정 첨가하였을 때 동일한 작업성(슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5%)을 확보하는데 필요한 단위수량은 시멘트 종류에 상관없이 165~170kg/m³ 정도였으며,

표 4. 시멘트종류별 콘크리트 배합시험 결과

시멘트 종 류	단위수량 (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	AE제 (C×wt. %)	감수제	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/cm ²)				탄성계수(×10 ⁹ kgf/cm ²)	
								3	7	28	91	28	91
저발열	165	55.0	42.9	0.055	0.3	16.6	3.6	44	103	242	342	2.66	2.94
	165	50.0	42.0	0.050		16.2	3.5	56	117	271	380	2.65	3.03
	165	45.0	41.3	0.048		17.3	3.2	75	140	304	421	2.84	3.07
	156	40.0	40.9	0.055		14.7	3.6	76	155	324	449	2.86	3.10
슬래그	165	55.0	47.0	0.012		14.8	3.8	115	161	311	385	2.78	3.16
	165	50.0	44.5	0.015		12.3	3.6	130	193	358	459	2.79	3.20
	165	45.0	41.5	0.020		13.5	3.5	145	217	405	487	3.03	3.26
1종	165	55.0	47.0	0.010		16.2	4.8	142	217	303	347	2.77	3.06
	165	50.0	45.7	0.015		14.5	5.3	180	259	341	398	2.93	3.05
	165	45.0	44.5	0.017		14.4	5.1	209	289	379	449	2.89	3.22
	170	40.0	43.0	0.020		12.5	4.9	265	326	412	465	3.10	3.21
5종	165	55.0	48.0	0.007		18.0	5.3	124	198	304	396	2.80	3.37
	165	50.0	46.0	0.009		18.5	4.6	151	222	309	409	3.22	3.51
	165	45.0	47.0	0.007		17.0	4.5	186	275	387	480	3.02	3.42
	165	40.0	44.0	0.009		18.8	4.0	238	316	428	529	3.28	3.44

혼합시멘트계의 경우는 목표 공기량을 확보하기 위하여 AE제 첨가량이 1종, 5종시멘트에 비하여 2~3배 정도 증가하였지만 반죽질기는 전반적으로 크게 향상되었다. 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우, 동일한 작업성을 나타내기 위하여 잔골재율(S/A)이 다른 시멘트에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이와 같은 이유는 사용 혼화제와 5종 시멘트와의 상호적합성에 기인한 것으로 추측되며, 5종 시멘트의 경우는 사전에 사용혼화제와의 적합성 및 적정 첨가량을 파악할 필요가 있으며, 본 실험에서의 감수제 적정첨가량은 시멘트 중량의 0.15~0.25%인 것으로 판단되었다.

3.2 블리딩 및 응결

콘크리트의 블리딩 및 응결상태를 검토하기 위하여 표 5와 같이 슬럼프 15±2.5cm, 공기량 4.5±1.5% 및 설계기준강도 $\sigma_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ 를 만족하는 콘크리트를 제조하였으며, 그 결과는 각각 그림 1 및 2와 같다.

표 5. 시멘트종류별 설계기준강도 $\sigma_{ck}=210\text{ kgf/cm}^2(20\pm3^\circ\text{C})$ 콘크리트배합

시멘트 종 류	G_{max}	단위수량 (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m ³)			AE제 (C×wt.%)	감수제	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kgf/cm ²)			
					시멘트	잔골재	굵은골재					3일	7일	28일	91일
저발열	25 mm	165	55.0	42.9	300	757	1024	0.055	0.3	17.5	4.2	73	124	242	306
슬래그		165	62.0	44.8	266	817	1023	0.02		16.0	4.5	78	133	245	310
1종		171	60.0	46.9	284	847	973	0.009		15.0	5.0	113	184	249	286
5종		165	55.9	47.8	295	868	962	0.007		0.25	16.0	4.4	120	170	254

시험결과 콘크리트의 블리딩은 시험에 사용한 시멘트의 분말도 크기 순으로 나타나, 콘크리트 배합 차이보다는 시멘트의 분말도 특성에 따라 기인한 것으로 판단된다. 즉, 분말도가 큰 시멘트는 물과의 접촉면적이 커서 보수성이 높기때문에 블리딩율이 적게 나타난 것으로 판단된다.⁽²⁾ 또한, 응결시험결과를 보면 그림 2에서와 같이 저발열 및 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우가 1종 시멘트를 사용한 경우보다 초결 및 종결에서 각각 2.5, 4.5시간 정도 지연되는 것으로 나타났다. 이와같은 원인은 5종시멘트의 경우 시멘트 조성 광물중 초기에 수화반응이 활발히 일어나는 C₃A 함량이 다른 시멘트의 경우보다 작기 때문으로 생각되며, 저발열시멘트는 포졸란 물질이 다량함유되어 수화반응이 지연되었기 때문으로 사료된다.

3.3 강도 및 탄성계수

동일한 작업성에서 사용 시멘트에 따른 압축강도 및 정탄성계수 측정결과는 표 4와 같다.

3.3.1. 압축강도 발현율

표준 수중양생 재령 28일을 기준으로 한 콘크리트의 각 재령별 강도 발현율을 비교하면 그림 3과 같다.

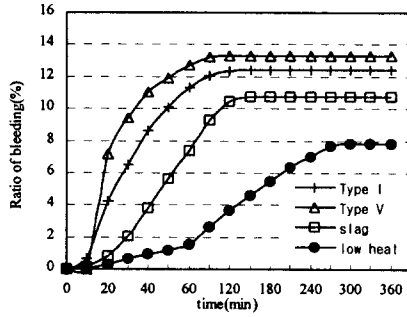


그림 1. 콘크리트 불리딩비교

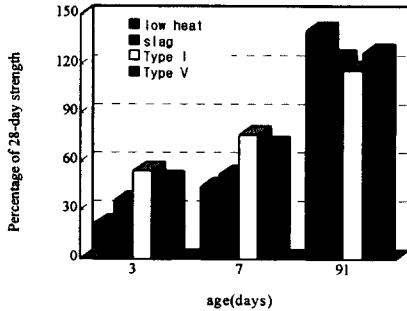


그림 3. 콘크리트 압축강도발현율 비교

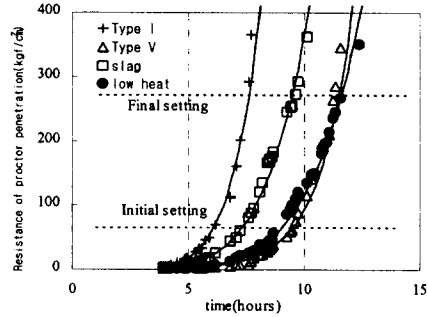


그림 2. 콘크리트 응결비교

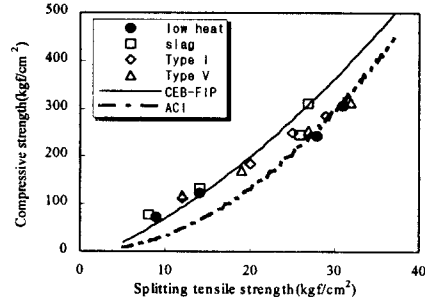


그림 4 압축강도와 인장강도 관계 비교

그림 3을 보면 저발열시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도 발현율은 수중양생 재령 28일을 100%로 했을 때 초기재령 3, 7일에서 각각 25~30%, 35~50%이지만, 91일 강도발현율은 135~140%로 나타나 혼합재의 잠재수경성에 의한 장기강도 발현율이 다른 시멘트에 비하여 상대적으로 상당히 높음을 알 수 있었다. 그러나, 슬래그시멘트의 경우는 수화반응이 촉진되어 재령 28일에서 타시멘트에 비하여 상당히 빠른 강도발현을 보이고 있는 반면 91일 재령의 강도발현율은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

3.3.2 인장강도 및 압축강도 관계

그림 4에서와 같이 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계는 시멘트의 종류에 상관없이 동일한 경향을 나타내었으며, ACI⁽³⁾ 및 CEB-FIP⁽⁴⁾의 관계식과 유사한 상관성을 보였다.

3.3.3. 정탄성계수

그림 5는 각종 시멘트를 사용한 콘크리트의 정탄성계수와 압축강도의 관계를 나타낸 것으로 시멘트의 종류에 따라서 약간의 편차를 보이고 있지만, 콘크리트 표준시방서⁽⁵⁾상의 강도와 탄성계수간의 관계식과는 매우 유사한 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.4. 건조수축

시멘트종류별 콘크리트 건조수축 길이변화 특성은 그림 6과 같다. 콘크리트의 건조수축변형은 일반적으로 물시멘트비가 클수록 커지는 것으로 알려져 있지만, 본 시험결과에서는 그러한 경향은 확인되지 않았다. 그 외에 단위시멘트량, 잔골재용 등 콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 인자들이 시멘트 종류에 따라서 약간의 차이가 있지만 동일한 작업성 및 설계기준을 만족하는 콘크리트 배합조건에서의 건조수축 길이변화량은 초기 재령에서 혼합시멘트계가 큰 반면 재령 6개월에서는 시멘트 종류에 상관없이 약 $4.5 \sim 5.2 \times 10^{-4}$ 로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.5. 동결융해저항성

콘크리트 동결융해저항성 측정결과는 그림 7, 8과 같다. 전체적으로 동결융해사이클이 진행됨에 따라 수

분의 침투로 인한 조직의 이완으로 콘크리트 표면이 열화되면서 중량 및 상대동탄성계수가 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 150 싸이클까지 혼합시멘트계가 1종 및 5종 포틀랜드시멘트의 경우보다 열화에 대한 저항성이 좋은 것으로 나타났다. 이는 혼합시멘트계속에 포함되어 있는 고로슬래그의 잠재수경성 반응과 플라이애쉬의 포졸란 반응에 의하여 콘크리트 경화체 조직이 치밀화 되었기 때문인 것으로 판단된다.⁽⁶⁾

3.6. 염소이온 침투저항성

ASTM C 1202-91⁽⁷⁾의 방법에 따라 염소이온침투시험을 실시한 결과는 그림 9와 같다. 염소이온 투과에 대한 저항성은 저발열시멘트>슬래그시멘트>1종 및 5종 시멘트순으로 높게 나타났다. 혼합시멘트계인 저발열시멘트 및 슬래그시멘트를 사용한 콘크리트는 혼합재의 포졸란 반응에 의하여 생성된 수화물이 경화체내 미세한 구조를 형성함으로써 골재와 시멘트 수화물사이의 연속공극을 차단함과 동시에 이온의 흡착효과⁽⁸⁾에 의하여 1종 및 5종시멘트를 사용한 경우에 비하여 약 1/6정도의 투과전하량을 나타내었다. 따라서, 혼합시멘트계인 저발열시멘트와 슬래그시멘트는 포틀랜드시멘트보다 염소이온의 침투 저항성이 크기 때문에 콘크리트의 내해수성이 크게 증가되어, 철근부식을 감소시켜 해안 구조물용 콘크리트 공사에 매우 적합할 것으로 판단된다.

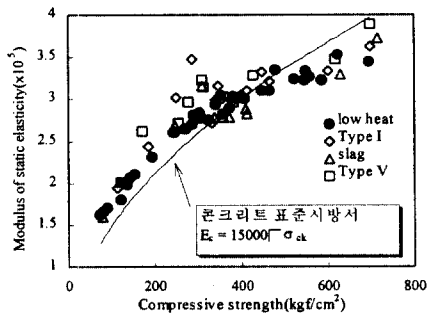


그림 5. 압축강도와 탄성계수 관계 비교

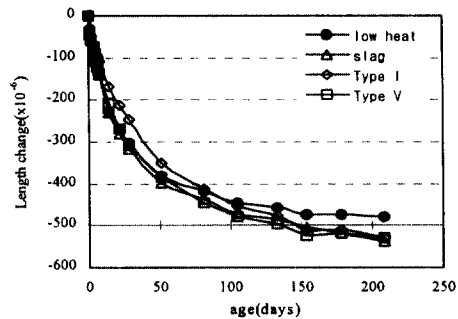


그림 6. 콘크리트 건조수축, 길이변화량 비교

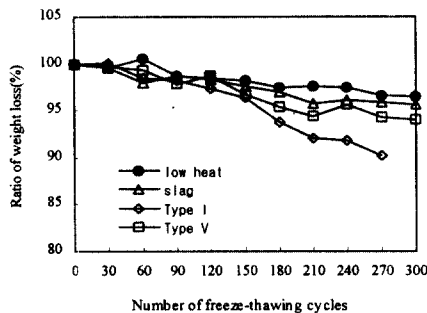
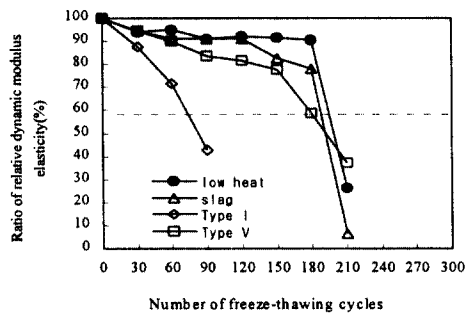


그림 7, 8 동결융해사이클에 따른 시멘트종류별 콘크리트의 중량변화율 및 동탄성계수비교



3.7. 중성화

축진 중성화시험을 실시한 결과 그림 10에서 나타낸바와 같이 혼합시멘트계인 저발열시멘트와 슬래그시멘트의 중성화깊이는 포틀랜드시멘트에 비하여 약 1.5배이상을 나타내었다. 1종 및 5종 포틀랜드시멘트는 포졸란을 사용하지 않으므로 콘크리트의 알칼리성이 장기적으로 안정하게 유지되는 것과는 달리 혼합재를 다량으로 사용한 혼합시멘트계의 경우 중성화속도가 빠른 것으로 나타났다. 따라서, 혼합재가 다량으로 사용된 혼합시멘트계를 사용할 경우 콘크리트 자체의 품질이 가능한 한 치밀, 견고하도록 물시멘트비, 공기량, 기공량이 낮게 되도록 하거나, 충분한 초기양생과 소요부분의 내구성을 감안하여 콘크리트의 피복두께를 크게 하고 타설시에는 콘크리트의 분리, 피복 콘크리트의 결손이 생기지 않도록 거푸집의 제작 및 다짐방법 등을 사용한다면 일반 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 중성화에 의한 열화를 최대한 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

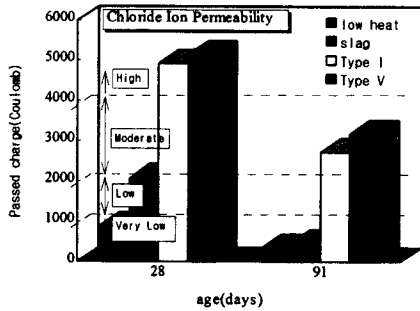


그림 9 콘크리트의 염소이온침투저항성 결과

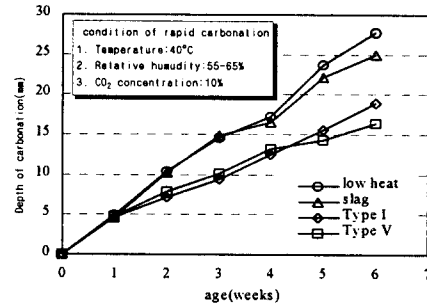


그림 10. 콘크리트의 중성화결과

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 시판되고 있는 1종 및 5종 포틀랜드시멘트와 슬래그 및 저발열 혼합시멘트를 사용한 콘크리트의 물성을 비교검토하기 위하여 각종 시험들을 수행하였다. 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 설계기준강도 $\sigma_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ 콘크리트에서의 불리딩율은 시멘트의 분말도가 큰 순으로 적게 나타났으며, 응결은 저발열 및 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우가 1종 시멘트를 사용한 경우보다 초결 및 종결에서 각각 2.5, 4.5시간 정도 지연되는 것으로 나타났다.
- (2) 혼합시멘트계를 사용한 콘크리트의 압축강도는 포틀랜드계 시멘트보다 초기재령에서는 낮게 나타나지만 혼합재의 잠재수경성에 의한 장기강도 발현율이 다른 시멘트에 비하여 상대적으로 상당히 높음을 알 수 있었다.
- (3) 동일한 작업성 및 설계기준을 만족하는 콘크리트 배합조성에서의 건조수축 길이변화량은 초기 재령에서 혼합시멘트계가 큰 반면 재령 6개월에서는 시멘트 종류에 상관없이 약 $4.5\sim 5.2 \times 10^{-4}$ 로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (4) 혼합시멘트계인 저발열시멘트와 슬래그시멘트가 혼합재의 포졸란 반응에 의한 경화체 조직의 치밀화로 포틀랜드계 시멘트의 경우보다 초기 싸이클에서 동결융해에 대한 열화정도가 심하지 않았으며, 저발열>슬래그>1종 및 5종 시멘트순으로 염소이온 투과에 대한 저항성이 높게 나타났다.

본 연구는 96년 건설교통부의 연구개발사업 일환으로 수행되었음을 알려드립니다.

참고문헌

- (1) 森山容州, “콘크리트材料としての最近のセメント”, 콘크리트工學, Vol.35, No.4, 97.4, pp.12~17
- (2) Neville, “Properties of concrete”, Pitman, Great Britain,, 1981, pp.224~225
- (3) ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318-89/318R-89)”, American Concrete Institute, Detroit, 1989, pp.353
- (4) “CEB-FIP Model Code for Concrete Structures”, Comit Euro-International du Beton, Paris, 1978, pp.348
- (5) 건설교통부, “콘크리트 표준 시방서”, 1996, pp.14~16
- (6) 최상훈, 한기성, 정재동, “염분환경하에서의 시멘트 경화체의 내구성”, 한양대학교 산업과학연구소, 91.9, pp.III-8~III-14.
- (7) ASTM C 1202-91, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”
- (8) 방완근, 김창은, 이승현, “혼합시멘트의 Permeability에 미치는 기공구조에 관한 연구”, 시멘트 심포지움, 제 25회, 97.7, pp.150~153