

고강도 콘크리트의 동해저항에 관한 기포조직의 영향

Effect of air void organization to frost-resistance in high-strength concrete

김 생 빈* 홍 찬 흠**
Kim, Saeng Bin Hong, Chan Heum

ABSTRACT

This study was performed to find out the effect about the spacing factor and durability factor to evaluate the durability of concrete in high-strength concrete with freezing and thawing as following each condition,

- 1) unit cement content : 500kg/m³, 550kg/m³
- 2) water/cement ratio : 25%, 30%, 35%
- 3) air content : below 1.5%, 1.6~3.5%, 4~6%, over 7%.

From the results tested, a variation of air content was more effective to the durability of concrete than that of water/cement ratio and unit cement content.

1. 서론

최근에 와서 구조물이 대형화함에 따라 높은 강도의 콘크리트가 요구되고 있다. 콘크리트를 고강도화하게 되면 부재의 단면을 감소시킬 수 있으므로 자중이 감소되어 구조물을 경량화하고 고층화하는 등 장점이 있다. 고강도 콘크리트에 대해서는 선진 외국에서 이미 실용화되고 있으며 우리나라에서도 이에 대한 많은 연구실적을 갖고있다. 한국콘크리트학회에서는 고강도 콘크리트의 실용화를 위한 연구결과로 "고강도 콘크리트 시공지도서"와 "고강도 콘크리트 구조설계 지도서"를 제정한 바 있어 이것들을 바탕으로 고강도 콘크리트의 생산이 더욱 효율적으로 이루어지리라 본다. 콘크리트의 동해는 콘크리트 내부의 공극에 있는 물이 동결하여 체적팽창을 일으킴에 그 원인이 있다. 물의 팽창압은 상당히 크며 보통 콘크리트는 이 팽창압을 완전히 지지하기란 곤란하다. 이와 같은 압력을 완화하기 위해서는 콘크리트 내에 적당량의 공기포가 존재해야 한다. 보통 콘크리트에서와 같이 고강도 콘크리트에서도 적절한 내구성과 강도를 갖는 공기량을 얻을 수 있으며 이에 대한 간격계수가 어떤 영향을 받는가에 대해 세심한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 고성능감수제사

용과 수증양생을 하여 생산하였고 보통콘크리트의 내구성에 영향을 주는 요소가 고강도 콘크리트에서 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 단위시멘트량, 물-시멘트비 및 공기량에 변화를 주어 동결융해를 입은 고강도콘크리트의 내구성을 판단하는 내구성지수와 간격계수에 대한 각 인자의 작용관계를 알아보았다.

2. 기포의 역할

콘크리트의 동결융해손상에서 가장 일반적인 형태는 시멘트풀의 분리로 인한 골재입자의 노출이다. 손상의 주요 원인은 임계포화점보다 높은 포화도를 나타낼 때 혹은 동결융해를 반복해서 받는 곳에 놓여있을 때 발생한다. 물이 동결하면 약 9%의 체적증가를 일으키는데 이때 증가분에 대응한 공간이 시멘트풀 내부에 존재하지 않는다면 압력이 발생하여 콘크리트의 내구성에 영향을 준다. 동결융해를 받는 콘크리트에서 AE제의 사용은 여러 실험을 통하여 우수한 저항성을 지닌다는 것이 입증되었으며 작은 크기의 공기포를 적당히 함유하고 있는 AE제를 사용한 콘크리트는 AE제를 사용하지 않은 콘크리트보다 동결융해에 대해 몇 배의 저항성을 가진다.

T. C. Powers의 수압설에 의하면 동결시 gel공극은 매우 작아서 gel공극내의 물이 얼기 위해서는 -78°C 이하가 되어야 하므로 실제에는 얼음이 형성되지 않는다. 모세관공극 속의 물은 0°C 부근에서 동결하며 체적팽창

* 동국대학교 토목공학과 교수
** 동국대학교 토목공학과 조교

에 상당하는 물이 gel공극을 통하여 공기포로 이동하게 된다. 이때 초과수의 양에 대응한 공기포를 포함하고 있다면 물의 이동을 용이하게 하여 수압은 파괴작용을 일으키지 않고 완화되지만 이동이 제한되거나 이동거리가 길어지면 높은 수압이 발생하여 그 점에서의 압력이 시멘트풀의 인장강도를 초과하게 된다. 이 경우에는 콘크리트 내부의 시멘트 gel간의 결합력이 약화되어 콘크리트의 열화 및 강도의 저하를 일으킨다.

기온이 동결점으로 떨어지면 가장 큰 모세관공극 내의 물에서부터 동결이 발생하여 얼음이 형성된다(그림 2.1 참조). 초과수는 모세관공극으로 부터 가까운 공기포로 빠져 나가는데 이동거리가 길어지면 높은 압력을 발생시켜 내구성에 손상을 줄 것이다. 압력은 공기포부터 모세관공극의 거리의 자승에 비례하여 증가하므로 거리의 감소는 파괴적인 수압의 발생을 억제할 수 있다.

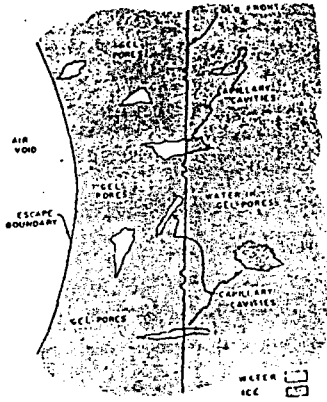


그림 2.1 시멘트풀의 구조

3. 시험방법

3.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료의 특성은 다음과 같다. 시멘트는 비중 3.15, 압축강도(σ_{28}) 312kg/cm², 인장강도(σ_{28}) 38kg/cm²이고 잔골재는 미사리산으로 비중 2.61, 흡수율 1.66, 조립률 3.29이며 굵은골재는 화강암 부순물로서 최대치수 25mm, 비중 2.61, 흡수율 0.45, 조립률 6.85이다. 혼화제는 표 3.1에 있다.

표 3.1 혼화제의 특성

품명	주요 성분	비중	상태	색상
SR-AE	리그닌 술폰산 염	1.20	액체	투명
Mighty -150	나프탈린 술폰산 염	1.20 ±0.02	액체	암갈색

3.2 배합설계

본 연구에서 고강도콘크리트의 배합설계는 "고강도 콘크리트 시공지도서"를 토대로 여러번의 시험비비기를 통한 시험배합설계에 의하여 압축강도를 450kg/cm²로 설계했다. 슬럼프는 5~13cm이며 굵은골재 최대치수는 25mm를 사용했다. 고강도콘크리트에서 공기량의 변화, 물-시멘트비의 변화 및 단위시멘트량의 변화에 대한 동결융해의 저항성을 알아보기 위해서 공시체의 종류는 단위시멘트량이 500kg/m³일 때 물-시멘트비를 25%, 30%, 35%로 변화시키면서 각각의 물-시멘트비마다 공기량이 1.5%이하, 1.6~3.5%, 4~6%와 7%이상을 포함한 4개의 유형을 제작했고, 단위시멘트량이 550kg/m³일 때는 단위시멘트량이 500kg/m³의 유형 중 물-시멘트비가 25% 일 때를 제외한 공시체를 제작하였다. 배합설계는 표 3.2와 같다.

표 3.2 배합설계표

	F/C	S/A	C ₁₀₀	시멘트	물	잔골재	굵은골재	고상농도	AE제	슬럼프	공기량
	(%)	(%)	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)	(cm)	(%)
A-35-1*	35	40	25	500	175	708	1067	2	0.00	5.0	0.5
A-35-2	35	40	25	500	175	648	1058	2	0.08	6.0	3.0
A-35-3	35	40	25	500	175	648	1058	2	0.15	7.0	3.5
A-35-4	35	40	25	500	175	708	1067	2	0.20	12.0	9.0
A-30-1	30	35	25	500	150	644	1196	4	0.00	6.0	0.6
A-30-2	30	37	25	500	150	655	1116	4	0.06	8.0	1.8
A-30-3	30	37	25	500	150	655	1116	4	0.16	8.5	5.0
A-30-4	30	35	25	500	150	644	1196	4	0.20	6.0	11.0
A-25-1	25	33	25	500	125	629	1278	6	0.00	6.5	0.9
A-25-2	25	33	25	500	125	629	1278	6	0.07	7.0	2.7
A-25-3	25	36	25	500	125	661	1175	6	0.11	8.5	5.6
A-25-4	25	36	25	500	125	661	1175	6	0.24	10.0	11.0
B-35-1	35	38	25	550	193	622	1050	2.2	0.00	8.0	0.8
B-35-2	35	38	25	550	193	616	1005	2.2	0.07	11.0	3.5
B-35-3	35	38	25	550	193	616	1005	2.2	0.11	12.0	5.5
B-35-4	35	38	25	550	193	622	1050	2.2	0.22	13.0	12.0
B-30-1	30	35	25	550	165	598	1150	4.4	0.00	6.5	0.6
B-30-2	30	37	25	550	165	626	1064	4.4	0.07	7.0	2.5
B-30-3	30	35	25	550	165	598	1150	4.4	0.17	7.5	4.0
B-30-4	30	37	25	550	165	626	1064	4.4	0.19	9.0	7.2

주) * : 물-시멘트비
 ** : 잔골재
 *** : 굵은골재 최대치수
 * : A-35-1

공기량(1: 1.5%이하, 2: 1.6~3.5%, 3: 4~6%, 4: 7%이하)
 물-시멘트비
 단위시멘트량(A: 500kg/m³, B: 550kg/m³)

3.3 동결융해 시험 및 기포조직 측정방법

동결융해 시험은 KS F-2456에 의거 공기중 급속동결 및 수중 급속융해시험법으로 하였으며 재령 14일에 시험을 하였다. 사이클이 500에 이르거나 그 전에 상대동탄성계수가 60이하이면 시험을 완료하였다. 콘크리트의 동탄성계수는 "초음파 속도에 의한 동탄성계수 시험법"에 의해서 전파시간을 측정하여 전파속도를 구하고 이것을 이용하여 동탄성계수를 계산하였다.

기포조직측정용 시험편은 ASTM C 457-82a "현미경에 의한 굳은콘크리트의 기포조직 및 공기량측정방법"에 따라 기포조직을 측정하였다.

4. 결과 고찰

고강도콘크리트의 시험에서 압축강도, 동결융해의 내구성 및 굳은콘크리트의 기포조직에 대하여 시험을 하였고 시험결과는 다음과 같다.

1. 압축강도 결과는 표 4.1에 나타나 있고 재령별 압축강도는 그림 4.1에 나타나 있다. 단위시멘트량의 증가는 압축강도의 증가를 나타내며 같은 설계강도를 기준으로 배합을 하여도 공기량이 증가할수록 압축강도가 감소되는 것을 보여준다. 이런 이유는 콘크리트 속의 공기량이 증가하므로 콘크리트의 치밀성을 감소시키기 때문이다. 또한 물-시멘트비가 증가할수록 압축강도의 감소를 보이는데 이것은 시멘트풀 속의 공기포 크기가 커지므로 강도를 저하시키기 때문이다.

2. 동결융해의 내구성 시험결과는 표 4.1에 나타나 있고 각 종류별 공기량에 대한 상대동탄성계수는 그림 4.2에 있다. 그림 4.2에서 보듯이 같은 물-시멘트비를 가진 조건에서 공기량의 증가는 콘크리트의 내구성을 상당히 증가시켜 준다. 그러나 그림 4.3의 같은 공기량을 가진 조건에서 물-시멘트비의 변화는 불규칙하게 나타나므로 물-시멘트비 감소로 인한 내구성의 증가보다는 공기량 증가로 인한 내구성의 증가가 더 크다는 것을 알 수 있다. 그림 4.5에서 공기량의 증가는 큰 내구성지수를 나타내며 공기량이 2.6~3.8%사이에서는 내구성지수가 약 50정도이다. 그러므로 내구성이 좋은 콘크리트를 얻기 위해서는 보통콘크리트나 고강도콘크리트에서 4%이상 공기량이 요구된다는 것을 알 수 있다.

3. 표 4.1에서 공기량 변화에 대한 강도와 내구성지수의 관계를 알아보기 위해 공기량이 1.5%이하를 기준으로 할 때, 공기량이 1.6~3.5%인 경우는 강도의 감

소가 적은 반면에 내구성지수가 허용치 이하이고 공기량이 4~6%인 경우는 20%의 강도감소가 있으나 내구성지수는 8배정도 증가한다. 그리고 7%이상에서는 내구성지수가 10배정도 증가하나 강도감소가 40%정도 일어나므로 이상적인 내구성과 강도를 가진 고강도콘크리트 생산에서는 4~6%정도 공기량을 함유하여야 한다.

4. 굳은 콘크리트 기포조직 시험결과를 표 4.2에 있고 모든 조건에서 공기량의 증가는 간격계수의 감소를 나타낸다(그림 4.6 참조). 일반적으로 내구성지수가 60이상이면 내구성에 대해 만족할만한 콘크리트로 평가하는데 그림 4.4에서 내구성지수가 90정도 되는 부분을 임계내구성지수라 할 때, 이에 해당하는 간격계수 값이 물-시멘트비가 25%일 때 280 μ m, 30%일 때 250 μ m, 35%일 때 210 μ m로 차이를 나타내며 ASTM C 457에 규정된 보통콘크리트의 간격계수 200 μ m이하보다 크게 나타난다. 이것은 시멘트풀의 강도가 증가하여 수압에 저항할 수 있는 능력이 향상되었기 때문이며 임계내구성지수에 대응하는 간격계수는 물-시멘트비에 따라 변한다는 것을 알 수 있다.

5. 그림 4.5에서 임계내구성지수에 해당하는 공기량은 4.8~5.4%정도이다. 일반적으로 보통콘크리트의 내구성에 기여하는 공기량은 3~6%정도이고 굵은골재 최대치수 25mm일 때 5%정도로 시방서에 규정하고 있으므로 내구성에 알맞는 공기량은 보통콘크리트나 고강도콘크리트나 거의 같다. 결과적으로 그림 4.4와 4.6에서와 같이 공기량을 증가시키므로 해서 간격계수를 감소시킨다. 이로 인해 공기포간의 거리가 감소되어 콘크리트 내부에 손상을 주는 수압을 억제하므로 내구성을 좋게 해준다. 표 4.2에서 비표면적과 내구성지수는 불규칙하게 나타나므로 비표면적으로 내구성을 평가하기는 무리가 있다.

표 4.1 압축강도 및 내구성지수 결과표

	공기량 (%)	압축강도 ₉₁ (kg/cm ²)	압축강도 ₉₇ (kg/cm ²)	압축강도 ₉₇ (kg/cm ²)	초기동탄성계수 (kg/cm ²)	동도 사이클수	상대동탄성계수 (%)	내구성지수 (%)
A-35-1	0.5	225	329	433	52800	65	60	13
A-35-2	3.0	222	309	412	52200	210	60	42
A-35-3	5.5	201	271	365	47200	300	85	85
A-35-4	9.0	146	190	265	42300	300	97	97
A-30-1	0.6	251	356	458	54100	70	60	14
A-30-2	1.8	213	332	425	53400	90	60	18
A-30-3	5.0	208	287	378	48400	300	92	92
A-30-4	11.0	171	204	280	43900	300	101	101
A-25-1	0.9	319	412	515	54400	90	60	18
A-25-2	2.7	304	368	466	51700	230	60	46
A-25-3	5.6	274	310	392	49500	300	98	98
A-25-4	11.0	191	243	308	44900	300	102	102
B-35-1	0.8	306	403	485	54000	80	60	16
B-35-2	3.5	295	359	422	52500	250	60	50
B-35-3	5.5	238	309	386	45100	300	90	90
B-35-4	12.0	207	236	295	42900	300	99	99
B-30-1	0.6	374	429	523	55500	90	60	18
B-30-2	2.5	293	413	480	54300	270	60	54
B-30-3	4.0	233	339	424	50700	300	90	90
B-30-4	7.2	258	313	391	49200	300	98	98

표 4.2 기포조직 결과표

	비표면적 a (mm ² /mm ³)	공기량* A (%)	시멘트 물 비 p (x)	p/A	간격계수 L (μm)	내구성 지 수 (%)
A-35-1	18.78	1.38	32.92	23.86	494	13
A-35-2	21.20	2.47	33.80	13.70	343	42
A-35-3	22.33	5.18	33.80	6.53	234	85
A-35-4	24.38	8.23	32.92	4.00	164	97
A-30-1	17.50	1.51	30.46	20.14	492	14
A-30-2	17.10	1.91	31.27	16.39	461	18
A-30-3	19.30	5.04	31.27	6.21	264	92
A-30-4	17.90	9.18	30.46	3.32	185	101
A-25-1	15.09	1.67	27.97	16.73	526	18
A-25-2	18.51	2.39	27.97	11.70	367	46
A-25-3	21.01	4.89	28.74	5.87	237	98
A-25-4	21.39	8.80	28.74	3.26	153	102
B-35-1	22.93	1.21	36.46	30.23	445	16
B-35-2	23.66	2.44	37.18	15.21	322	50
B-35-3	20.22	4.75	37.18	7.83	280	90
B-35-4	24.29	11.70	36.46	3.12	128	99
B-30-1	20.55	1.17	33.65	28.82	487	18
B-30-2	26.97	2.03	34.40	16.94	296	54
B-30-3	25.87	3.78	33.65	8.90	232	90
B-30-4	23.15	6.59	34.40	5.22	204	98

주) * : 굵은 콘크리트의 공기량

5. 결론

동결용해를 받는 고강도콘크리트에서 단위시멘트량, 물-시멘트비 그리고 공기량의 변화가 내구성을 평가하는 내구성지수와 간격계수에 미치는 영향에 대하여 시험한 결과들로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고강도콘크리트에서의 공기량의 증가는 내구성을 증가시키지만 강도면에서는 불리하다. 내구성에 대해 우수한 값을 가지는 임계내구성지수에 해당하는 공기량은 4.8~5.2정도임을 알 수 있다(그림 4.5 참조). 또한 공기량이 1.6~3.5%인 경우는 내구성이 허용치 이하이므로 4% 이상이 되는 공기량의 사용이 요구되어지며 7%이상의 공기를 가진 콘크리트는 강도의 감소가 크기 때문에 내구성에서는 좋으나 강도면에서는 바람직 하지 못하다.

2. 물-시멘트비의 감소보다는 공기량의 증가가 고강도콘크리트의 내구성에 더 영향을 주며, 내구성향상을 위한 알맞은 공기량은 고강도콘크리트나 보통콘크리트에 대해 거의 같다는 것을 알 수 있다.

3. 임계내구성지수에 해당하는 기포조직의 간격계수는 물-시멘트비에 따라 다르게 나타나는데 본 연구에서는 굵은골재 최대치수가 25mm인 경우, 물-시멘트비가 25~35%로 변화할 때 임계내구성지수에 대응한 간격계수는 210~280μm 정도의 값을 나타낸다. 따라서 공기포의 간격계수는 물-시멘트비에 따라 변화한다는 사실을 알 수 있다.

6. 참고문헌

1. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.41, No.4, 1945, pp.245-272
2. Powers, T.C. and Helmuth, R.A., "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing." Proceedings, Highway Research Board, Vol.32, 1953, pp.285-297
3. Cordon, N.A., "Freezing and Thawing of Concrete", ACI Monograph No.3, 1966, pp.5-15, 23-40, 51-53
4. Weston T.Hester, "High-Strength Concrete", 1990
5. A. M. Neville, "Property of concrete," Pitman, 3rd ed, 1981
6. Kennedy, H.L., "The Function of Entrained Air in Potland Cement", ACI Journal, Proceedings Vol.40, No.6, June, 1944, pp.515-517
7. Davis, Raymond E., "Entrained Air Beneficial in Freezing and Thawing Tests", ACI Journal, Proceedings Vol.40, No.6, June,1944, pp.522
8. Powers, T.C., "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste", J.Amer.Ceramic Soc., 41, Feb.1958, pp.1-6
9. Powers, T.C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", Proceedings, Highway Research Board, Vol.29, 1949, pp.184-211
10. 한국콘크리트학회, "고강도콘크리트 실용화 연구", 1991.1
11. 한국과학기술연구원, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구(Ⅲ)", 1990.6

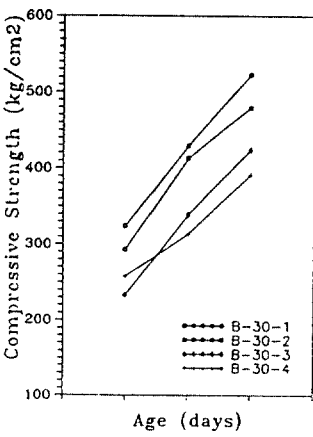
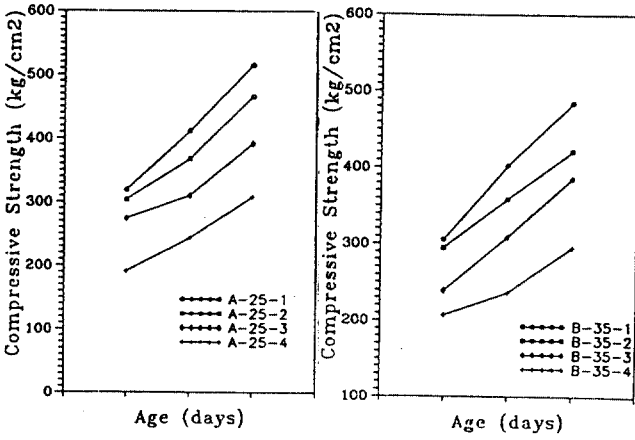
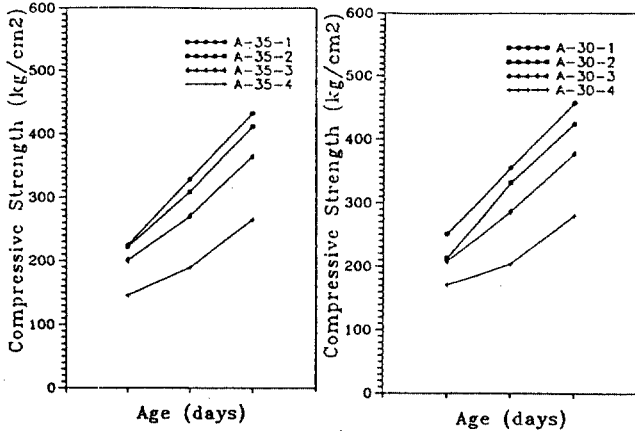


그림 4.1 각 종류별 압축강도

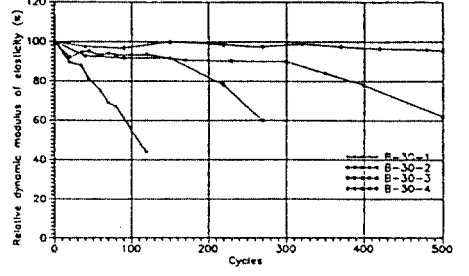
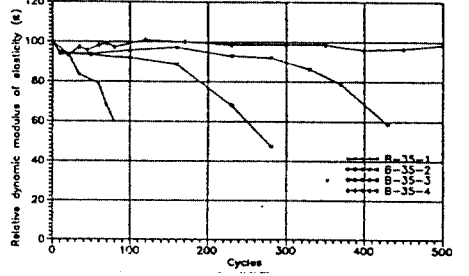
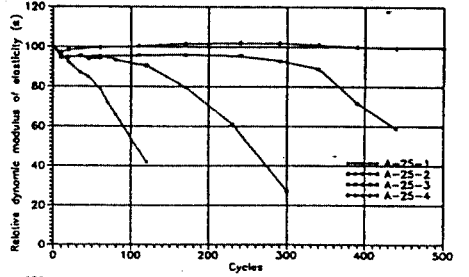
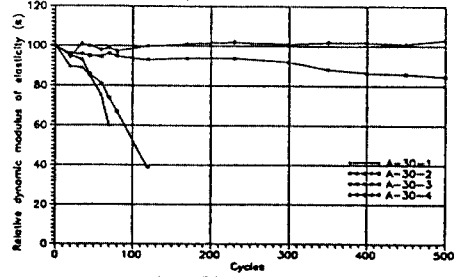
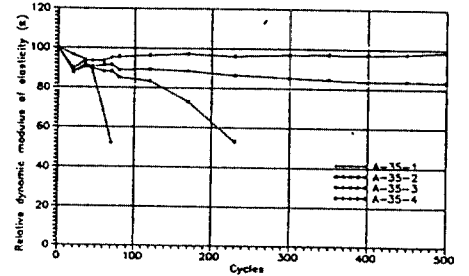


그림 4.2 공기량 변화시 상대동탄성계수와의 관계

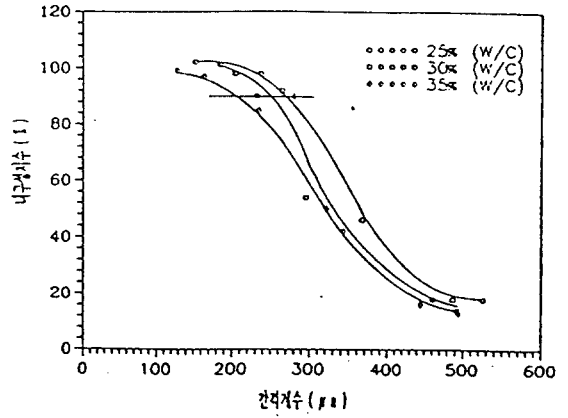
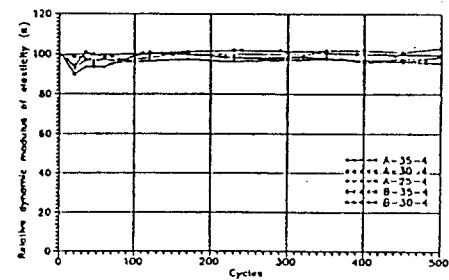
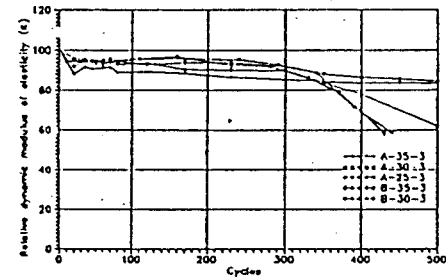
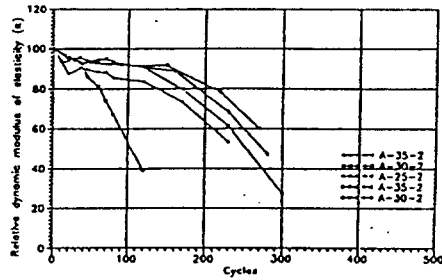
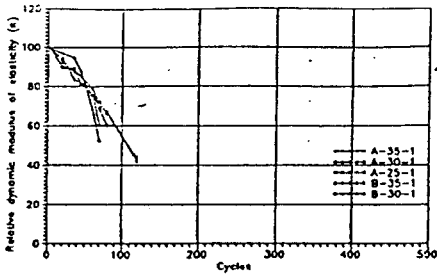


그림 4.4 간격계수와 내구성지수와의 관계

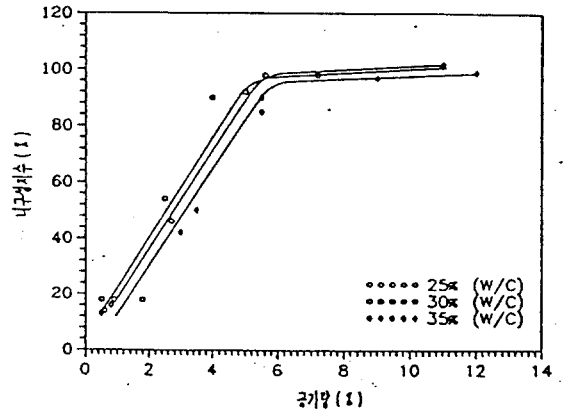


그림 4.5 공기량과 내구성지수와의 관계

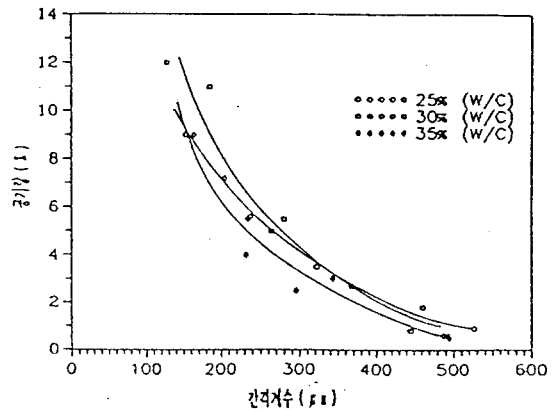


그림 4.6 간격계수와 공기량과의 관계

그림 4.3 물-시멘트비 변화시 상대동탄성계수와와의 관계