

# 高强度 空氣連行 콘크리트

(High Strength Air-Entrained Concrete)

Richard D. Gaynor

翻譯：李 利 衡

〈漢陽大 建築工學科 教授〉

## 序

本書는 National Ready Mixed Concrete Association의 기술부와 National Sand and Gravel Association에서 레미콘 생산자와 사용자를 대상으로 정보를 제공하고자 발간한 것이다. 本書에서의 實驗은 兩協會의 찬조아래 Maryland 대학에서 수행 되었으며, 주로 空氣量과 시멘트量 그리고 骨材의 영향에 따른 제작가능한 壓縮強度의 최대수준에 대하여 다루고 있다.

현대 콘크리트 과학의 기초가 되고있는 물시멘트비說과 시멘트공극비說에 따라, 고강도콘크리트의 제작은 단순히 시멘트량을 증대시킴에 따라 구현될 수 있는 것으로 믿어져 왔다. 그러나 本實驗結果에 의하면 시멘트량이 증대됨에 따라 所要 슬럼프를 얻기 위한 水量도 급격히 증대 되므로 강도상의 증진을 기대 할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 최대 유효량 이상의 시멘트 사용은 낭비를 뜻할 뿐이다.

특히 고강도콘크리트의 제작이나, 높은 공기량을 갖는 콘크리트에서는 강도를 발현시키기 어렵다는 점을 감안할 때, 레미콘 제조자는 配合, 試驗등 製造時의 모든 분야에 각별한 주의를 기울여야할 것이다.

## 高强度 空氣連行 콘크리트

최근 많은 논문<sup>1, 2, 3</sup>에서 10000~15000psi의

강도를 갖는 콘크리트의 가능성에 대하여 연구하고 있다. 또한 몇몇 주립 고속도로 당국에서는 교량테크의 스케일링 문제를 해결하기 위하여 높은 공기량을 갖는 콘크리트의 제작에 관심을 기울이고 있다. 이에따라 콘크리트의 공기량은 통상적인 범위라 할 수 있는 3~6%로부터 10%까지 증대된 경우를 찾아볼 수 있다.

레미콘 제조업자들에게 空氣連行을 시키지 않은 경우에는 5000psi의 강도를 갖는 콘크리트의 제조는 비교적 용이하다. 만약 문제가 발생한다면 주로 여름철에 생기는 것으로, 이 경우 콘크리트가 연행 공기를 함유하면 그 어려움은 더욱 가중된다. 그러나 몇몇 실험을 통하여 확인한 바와 같이 空氣連行 콘크리트에서 3500~4000psi의 강도를 얻기는 힘든것으로 나타났다.

고강도 콘크리트는 특수타설과 밀실한 다짐이 가능한 低 slump 또는 No-slump의 프리캐스트 콘크리트 분야에서 주로 제작되어왔다. 그러나 현장 타설 콘크리트에서는 형상이 복잡하고 약한 거푸집이 사용될 때가 많으므로 밀실한 다짐이 허용되지 않는 경우가 많으며, 재료 분리등 기타 부수적인 문제로 인하여 可塑性을 지닌 workable한 콘크리트가 사용되어야 하는 경우가 대부분이므로 고강도 콘크리트의 적용은 상대적으로 어려웠다.

이하의 실험을 통하여 통상의 슬럼프 하에서는 최대 유효시멘트량 및 최대강도가 일반적인 범위 내에서 존재함을 확인 하였다. 아울러 兩

最大値 모두 空氣量の 증가와 함께 현저히 감소하는것으로 나타났다. 本 論文의 후반부에는 설계기준강도에 맞추기 위한 Overdesign에 관한 사항 및 더운 기후의 영향, 배합, 운반, 시험등 생산과정상의 실무적인 몇가지 문제에 관하여 논의 하였다.

## I. 實驗研究

### 1. 範圍 및 方法

제작된 시료의 강도범위를 확대 시키기 위하여 잔骨材 및 굵은 骨材는 모두 3種으로 하였다. 굵은 骨材의 최대치수는 3/4inch로 하였으며, 모래는 체로걸러 사용하였다. 1입방야드당 4, 5½, 7, 8½포의 단위시멘트량과 공기량 1.5 (Non-AE), 4.5, 7.5, 10.5%에 대하여 슬럼프 4~5인치를 목표로 각각의 骨材를 혼합하였다. 사용된 믹서는 용량 3½입방 피트의 Tilting Mixer로서, 강제모울드를 사용하여 콘크리트 1Batch當 6개의 6×12 inch의 실린더형 공시체를 제작하였다. 그 중 4개의 공시체는 붓 다짐 후 재령7일과 28일에 각각 2개씩 강도를 측정하였으며, 나머지 2개의 공시체는 진동기를 사용한 내부진동을 통하여 다진 다음 재령 28일에 강도를 측정하였다.

사용시멘트는 시중에서 구입한 5개사의 Type 1시멘트를 同量으로 혼합한 것으로 하였다. 사용된 시멘트의 강도는 재령 7일에서 약 3700psi, 28일에서 약 5020psi였다. 空氣連行劑는 中化 빈줄레진계의 것을 사용하였다. 모든 Non-AE 콘크리트에는 시멘트 1포당 1cc의 비율로 消泡劑(air-deteraining agent)가 첨가 되었다.

### 2. 實驗結果

Table 1은 사용骨材의 특성을, Table 2는 Fresh Concrete의 특성 및 강도시험결과치를 요약한 것이다.

#### ○ 물시멘트비와 강도의 관계

Fig.1은 Non-AE콘크리트에서 물시멘트비와 강도의 관계를 나타낸것이다. 예상했던 바와 같이 동일한 시멘트를 사용하여도 使用骨材가 다를경우 (본 실험에서는 3種의 骨材를 사용)에는 물시멘트비와 강도의 관계가 서로 상이하게 나타났다. No.3骨材 사용시의 곡선은 위로 오목한형으로, Abrams의 물시멘트 법칙의 일반식 ( $S=A/B^x$  S는 강도, A와 B는 주어진 재료 하에서의 정수, X는 물시멘트비)과 일치하였다. No.1,2 骨材의 곡선은 상기한 형태와 다르며, 낮은 물시멘트비에서 최대강도에 접근하는것으로 나타났다.

#### ○ 연행공기와 강도

Fig. 2는 동일한 물시멘트비 하에서 콘크리트 강도에 미치는 연행공기의 영향을 나타낸 것이다. 기존 연구결과<sup>(4, 5, 6)</sup>와 같이, 불충분한 다짐에 기인한 혼입공기나 연행공기 모두 동일한 물시멘트비하에서 콘크리트내의 공기량이 1% 증가함에 따라 강도는 약 5% 감소하는것으로 나타났다.

#### ○ 要求水量

Fig.3은 콘크리트의 要求水量을 나타낸것이다. Non-AE콘크리트에서 No.3骨材 사용시, 시멘트 4포에 대한 要求水量은 콘크리트용적 1입방야드당 14겔론으로서, No.2 骨材 사용시보다 크게 나타났다. 'Bloem과 Gaynor<sup>(7)</sup>, Wills<sup>(8)</sup> 등의 연구에 의하면, 이러한 要求水量의 큰 차이는 骨材의 粒形, 표면조직 등의 차이에 의한것으로 판단된다. 또한 이전의 연구에 의하면 최종 要求水量을 결정하는데 있어 모래의 형상 및 표면조직은 자갈보다 약 2배정도 큰 영향을 미친다고 보고한 바 있다.

要求水量에 대한 연행공기의 영향은 다음과 같이 요약 될 수 있다.

- 연행공기에 의한 要求水量의 감소효과는 빈 배합 콘크리트의 경우 더욱 커진다.
- 공기량을 계속 증대시켜도 이에 비례하여 用水量이 감소 되는것은 아니다.

TABLE 1. CHARACTERISTICS OF AGGREGATES (SERIES 187)

	Source 1		Source 2		Source 3	
	F.A.	C.A.	F.A.	C.A.	F.A.	C.A.
	Lot 4232	Lot 4233	Lot 4299	Lot 4300	Lot 4274	Lot 4275
Sieve analyses, % Pass.						
3/4 in.		100		100		100
1/2 in.		63		65		86
3/8 in.	100	39		34		31
No.4	97	0	100	0	100	3
No.8	82		90	0	91	
No.16	69		76		69	
No.30	53		58		44	
No.50	22		18		19	
No.100	4.2		2.9		7	
No.200	1.7		1.3		3.7	
Fineness Modulus	2.73	6.60	2.55	6.66	2.70	6.66
Gravity, Bulk dry	2.62	2.63	2.62	2.60	2.63	2.71
Absorption, %	0.6	0.4	1.1	2.0	2.3	1.4
Voids, (dry rodded), % (1)	—	35.9	—	36.1		42.2
Sand Void Index (2)	44.4	—	38.8	—	49.3	—

(1) Graded as used in concrete.

(2) Loose void content of a regraded sand sample—a measure of shape and surface texture.

- c. 공기량의 증대에 의한 감수효과는 입형 및 표면조직이 불량한 골재일수록 더욱 커진다.
- d. 연행공기 첨가시 결코 要求水量이 증대 되는 경우는 없다.  
또한 Fig.3으로 부터 要求水量에 대한 시멘트 량 증대의 영향을 알 수 있으며, 이를 요약하면 다음과 같다.
- a. 골재의 종류 및 공기량의 수준에 따라 同一水量에 대한 시멘트 첨가의 효과는 크게 영향을 받게 된다.
- b. Non-AE 콘크리트의 경우, 단위 시멘트량 4 포인 콘크리트(상대적으로 빈배합임)에 시멘트를 첨가하면 최소 要求水量에 도달 할 때까지 水量은 점진적으로 감소한다.
- c. 최소 要求水量에서의 단위 시멘트량은 공기량이 증대 할 수록 감소한다.
- d. 이 적정량(최소 要求水量에 상응하는 시멘트 량)을 초과하여 시멘트를 첨가하면 要求水量의 급격한 증대가 야기된다. 또한 시멘트 첨가에 따른 水量의 증대는 공기량이 높은 배합에서 더욱 커진다.

○ 물 시멘트비에 대한 시멘트량의 영향

Fig.4는 물시멘트비와 시멘트량 또는 연행공기의 관계를 나타낸 것이다. No.3골재로 만든 콘크리트의 경우, 공기량에 관계없이 시멘트량을 증대 시킬수록 물시멘트비는 커지는 경향을 나타내었다. 그러나 No.1,2골재 사용시에는 단위 시멘트량이 1입방야드당 7포를 초과하면 물시멘트비는 매우 미소한 감소를 나타내며, 8 1/2 포를 초과한 경우에는 더 이상 물시멘트비를 감소시키기 어려운 것으로 나타났다. (4~5inch 슬럼프를 유지시킬 경우)

○ 壓縮強度

재령 28일의 압축강도 시험 결과치를 Fig.5에 나타낸다. 그림 좌측상단의 Non-AE콘크리트와 우측하단의 공기량 10.5%의 콘크리트를 비교하면 몇가지 중요한 사실을 확인할 수 있다. Non-AE콘크리트에서는 사용골재에 따라 매우 다른 강도 수준을 나타낸다. 그러나 공기량 10.5%인 경우에는 골재종류에 따른 강도차이는 훨씬 감소하게 된다. 또한 단위 시멘트량 8 1/2포로서 높은 공기량을 갖는 배합에서는 골재의

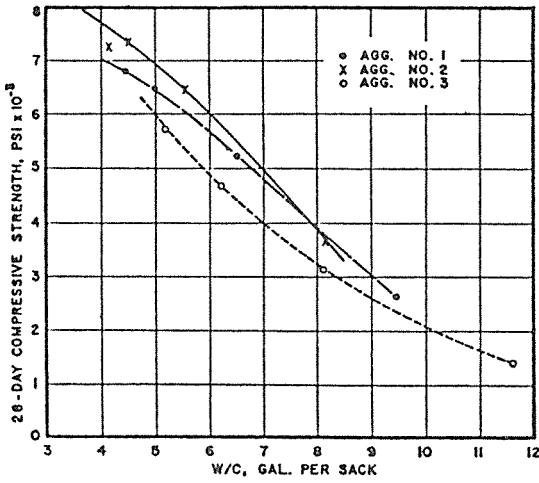


FIG. 1. RELATIONSHIPS OF STRENGTH TO WATER-CEMENT RATIO (SERIES 187)

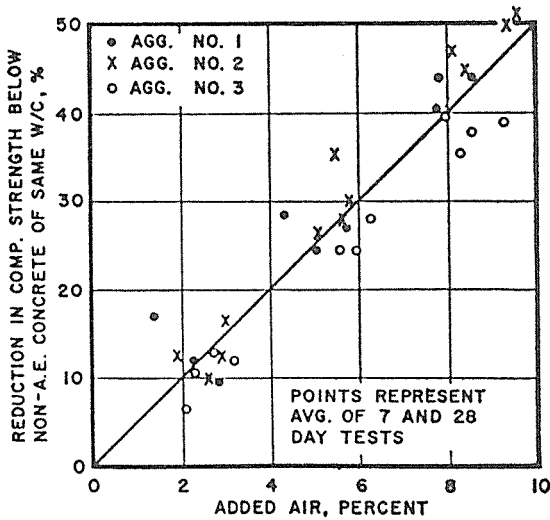


FIG. 2. STRENGTH REDUCTION BY AIR ENTRAINMENT (SERIES 187)

종류에 관계없이 거의 같은 강도를 나타낸다. 비교적 양호한 입형을 갖는 No.2골재를 Non-AE콘크리트에 사용하였을 경우, 1입방야드당 7~7½포를 초과한 시멘트 사용시에는 시멘트 량 증대에 따른 강도증가는 거의 없었다. 또한 이와같은 최대유효 시멘트량은 공기량의 증대

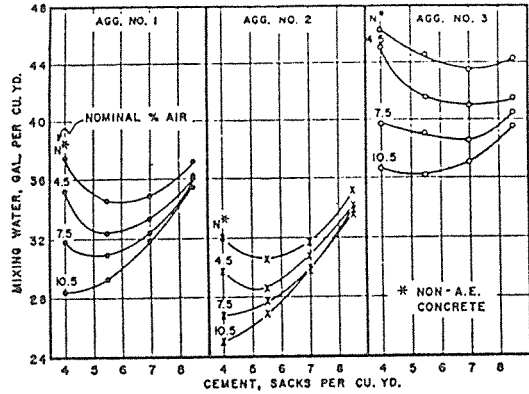


FIG. 3. RELATIONSHIPS OF MIXING WATER TO CEMENT AND AIR CONTENT (SERIES 187)

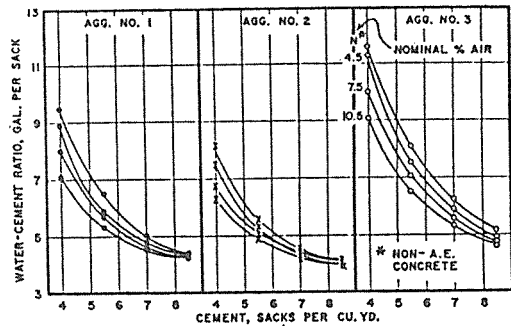


FIG. 4. COMPARISON OF WATER-CEMENT RATIOS FOR COMPARABLE CONCRETES WITH DIFFERENT AGGREGATES (SERIES 187)

와 함께 현격한 감소를 나타낸다. Fig.6에서 볼 수 있는바와 같이 No.1골재 사용시에는 거의 비슷한 강도를 나타내는데 반하여, No.3골재의 경우는 본 실험범위의 모든 공기량에서 시멘트의 첨가에 따라 강도가 증진된다.

Fig.6은 같은 자료를 조금 다른형태로 나타낸 것이다. 붕다집한 공시체의 7일 및 28일 강도 자료를 살펴보면 주어진 조건하에서 얻을 수 있는 최대강도는 연행공기에 영향을 받게 된다는 사실을 알 수 있다. 이전의 연구결과<sup>(7, 8)</sup>를 참조하면 No.3골재의 경우는 특이한 형태이며, 일반적으로 사용되는 골재는 No.1.2에 가까운 성질을 나타내리라고 생각된다. 따라서 현재 사용되고 있는 대부분의 골재에서는 (콘크리트의 강도발현에 있어) 최대유효시멘트량이 존재하며, 이 량은 공기량이 증대됨에 따라 급격히 감소

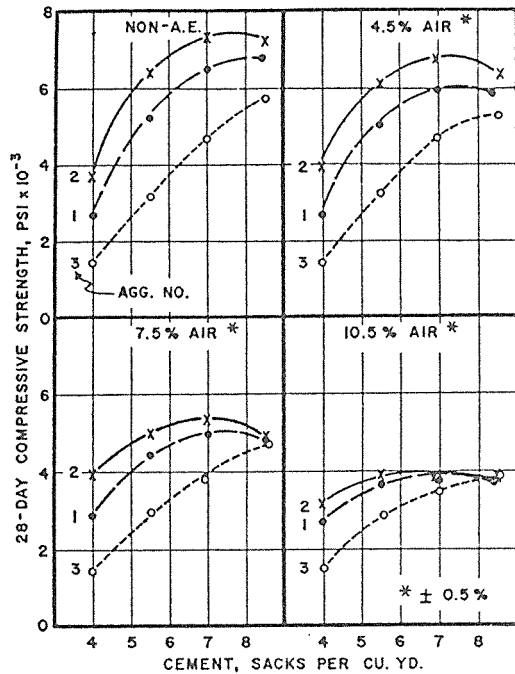


FIG. 5. RELATIONSHIPS OF STRENGTH TO CEMENT FACTOR (SERIES 187)

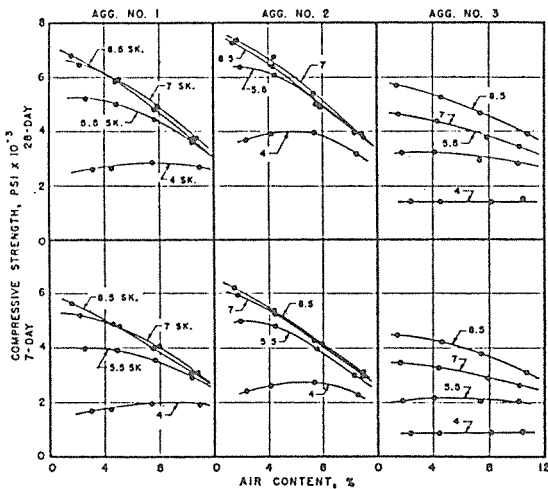


FIGURE 6. EFFECT OF AIR CONTENT ON COMPRESSIVE STRENGTH

한다고 결론지을 수 있다. 즉 단순히 적정량 이상의 시멘트를 추가하는 것으로 고강도 콘크리트를 만들 수 없는 것이다.

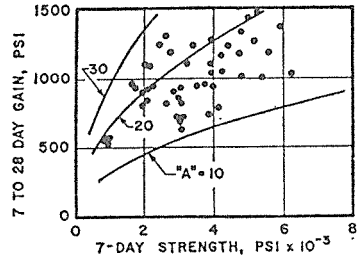


FIGURE 7. 7 TO 28 DAY STRENGTH GAIN vs. 7-DAY STRENGTH (SERIES 187)

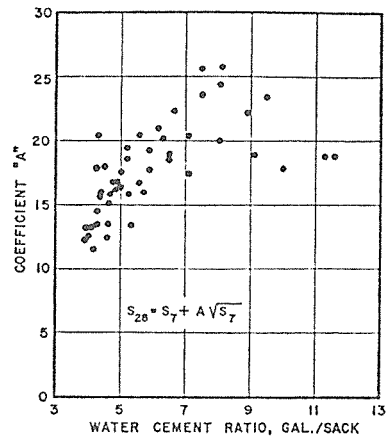


FIGURE 8. EFFECT OF WATER CEMENT RATIO ON "A" (SERIES 187)

○ 재령 7일에서 28일까지의 강도증진(以下 7-28증진이라 함).

Fig.7은 7일 압축강도와 7-28증진량의 관계를 나타낸것으로, 일반적으로 7일강도가 클수록 그 후의 강도증진폭도 커짐을 알 수 있다. 그러나 그 결과치가 분산되는 경향이 크고, 그 증진폭도 500~1500psi로서 광범위하다고 할 수 있다.

Slatter<sup>(14)</sup>는 7일 강도로부터 28일 강도의 추정식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$S_{28} = S_7 + A\sqrt{S_7}$$

여기서  $S_7$ : 7일 압축강도

$S_{28}$ : 28일 압축강도

A : 10~30사이의 상수

TABLE 2. CONCRETE CHARACTERISTICS AND RESULTS OF STRENGTH TESTS (SERIES 187)

Values averages from generally 3 batches mixed on different days (occasionally 2 or 4 batches). Strengths are averages of duplicate cylinders made from each of two to four batches mixed.

Cement Content, Sacks Per c.y.	Total Air, Percent	Mixing Water gal. Per C.y.	Water – Cement Ratio, gal./sk	Slump, in.	Sand, Percent Total Agg.	Compressive Strength, Psi		
						Rodded		Vibrated
						7-day	28-day	28-day
Aggregate No. 1								
3.95	3.1	37.4	9.47	4.9	44.6	1678	2639	2543
3.96	4.5	35.2	8.90	4.3	44.2	1716	2646	2743
3.98	7.4	31.8	7.98	4.3	42.3	1989	2884	3003
3.99	10.9	28.5	7.85	3.9	41.3	1934	2701	2942
5.47	2.6	34.6	6.52	4.3	40.7	3944	5221	5264
5.49	4.8	32.4	5.90	4.2	39.4	3929	5035	5318
5.49	7.6	31.0	5.68	4.8	37.6	3506	4442	4673
5.53	10.3	29.4	5.31	4.4	35.2	2945	3672	3977
6.99	2.1	34.9	5.00	4.4	36.8	5202	6471	6678
6.99	5.0	33.5	4.78	4.5	36.7	4775	5929	6187
7.01	7.8	32.4	4.62	4.1	32.1	4017	4949	5268
7.00	10.7	31.9	4.56	4.1	29.3	3061	3749	4254
8.42	1.5	37.2	4.41	4.5	33.0	5604	6798	6967
8.40	4.6	36.3	4.31	4.8	30.0	4832	5840	6109
8.49	7.6	36.1	4.26	4.5	26.8	3980	4810	5230
8.44	10.1	35.5	4.20	4.3	23.4	3120	3752	4294
Aggregate No.2								
3.95	2.3	32.1	8.13	4.2	42.0	2425	3690	3635
3.97	4.2	29.8	7.50	4.5	41.2	2610	3915	3990
3.98	7.4	26.7	6.71	4.2	39.6	2760	3945	4220
3.99	10.5	25.0	6.27	4.7	37.4	2230	3180	3560
5.51	1.9	30.6	5.55	4.2	37.8	5000	6440	6515
5.50	4.5	28.6	5.21	4.3	36.5	4790	6130	6260
5.50	7.5	27.6	5.03	4.7	34.2	3975	5005	5490
5.49	10.3	26.8	4.90	4.4	32.0	3020	3945	4460
7.00	1.6	31.7	4.52	4.3	34.6	5955	7340	7500
6.97	4.4	30.8	4.26	4.6	32.6	5260	6750	6925
6.97	7.3	29.8	4.27	4.0	30.1	4210	5370	5790
6.85	10.9	29.9	4.36	4.4	27.6	2990	3855	4395
8.55	1.4	35.2	4.12	4.7	30.8	6235	7275	7600
8.59	4.3	34.2	3.98	4.4	27.8	5400	6395	6925
8.51	7.8	34.0	4.00	4.4	24.5	4135	4915	5725
8.51	10.9	33.6	3.95	4.4	20.7	3115	3815	4620

Aggregate No. 3

3.99	2.4	46.2	11.60	4.7	47.8	882	1442	1469
4.00	4.5	45.1	11.28	4.2	47.1	862	1415	1509
3.97	8.2	39.7	10.00	4.6	46.2	890	1423	1590
4.04	10.4	36.6	9.08	4.4	44.5	962	1544	1741
5.51	1.8	44.6	8.10	4.8	44.1	2049	3149	3140
5.54	4.1	41.6	7.52	4.3	43.0	2136	3222	3361
5.54	7.4	39.1	7.07	4.8	41.1	2047	2964	3172
5.59	10.1	36.2	6.49	4.5	39.4	2036	2877	3061
7.00	1.6	43.5	6.22	4.2	40.2	3444	4677	4740
6.97	4.4	41.0	5.90	4.3	39.1	3264	4364	4546
6.92	7.9	38.6	5.58	4.3	37.2	2899	3798	4041
6.99	10.2	37.1	5.31	4.1	36.2	2661	3473	3642
8.54	1.4	44.3	5.18	5.0	36.4	4465	5708	5744
8.51	4.6	41.5	4.89	4.4	34.8	4219	5270	5482
8.57	7.4	40.6	4.74	4.9	31.7	3738	4702	4929
8.55	10.7	39.6	4.65	5.0	28.2	3044	3875	4193

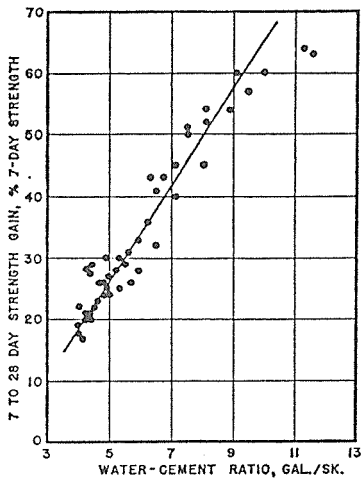


FIGURE 9. EFFECT OF W/C RATIO ON 7 TO 28 DAY STRENGTH GAIN (SERIES I87)

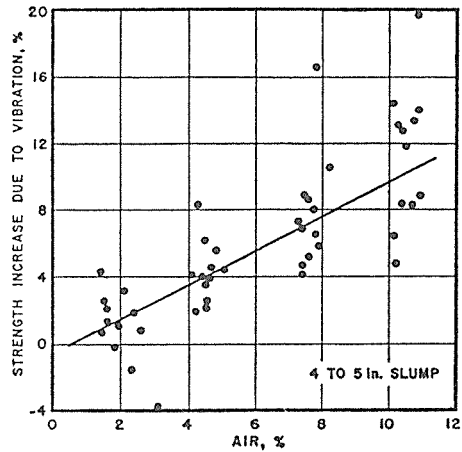


FIGURE 10. EFFECT OF CONSOLIDATION BY VIBRATION ON STRENGTH OF 6x12 in. CYLINDERS (SERIES I87)

즉, 일정 시멘트하에서의 강도증진특성은 주로 상수 A에 의하여, 오늘날 일반적인 시멘트의 A값은 주로 10~30사이에 존재한다.

Fig.7과 8에서와 같이 본 실험에 사용된 시멘트의 상수 "A"값은 11~25에 걸쳐 분포한다. 또한 일반적으로 A값은 물시멘트비가 증가할수록 커지나, 그 상관성은 그다지 좋지않다.

Fig.9는 7일 강도에 대한 7-28증진량의 백분비와 물시멘트의 관계를 나타낸것으로, 그 백분비는 물시멘트비가 커질수록 크게 증대됨을 알 수 있다.

○ 내부 진동다짐에 의한 영향

ASTMC31과 C192에서와 같이, 6x12inch실린

더 공시체의 현행 모올딩법은 slump 3inch 이하에서는 붓다짐 대신 바이브레이터를 사용한 내부진동다짐을 허용하고 있으며, slump 1inch 이하에서는 내부진동에 의한 다짐을 하도록 규정하고 있다. slump 3inch 이하에서는 진동다짐에 의하여 강도가 증진되는 것으로 보이며, 특히 배합일수록, 점성이 높을수록 더욱 그러한 것으로 보인다.

Fig.10은 진동다짐에 의한 강도증진과 공기량의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 공기량은 붓다짐한 ½입방피트의 Fresh Concrete를 ASTM C318의 중량 측정법으로 구한 것이다. 또한 Fig.10의 자료는 공기량 4수준을 3種골재 각각에 대하여 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 상당한 분산을 나타내기는 하지만, 진동다짐에 의하여 강도가 증진 된다는것은 확실하며, 그 효과는 공기량이 많은 배합일수록 커진다.

한편 No.3골재로 만든 콘크리트의 실험결과, 진동다짐에 의하여 공시체의 밀도가 높아짐이 확인 되었다. Fig.10에서 알 수 있는 바와 같이 공기량 10%일때, 진동다짐에 의하여 약 10%의 강도가 증진되고 있다. No.3골재를 사용한 콘크리트에서 나타나는 밀도증가현상은 진동의 근본목적이 공기량을 감소시키기 위한 것이며, 따라서 1%의 공기량이 감소함에 따라 약 5%의 강도가 증진된다는 기존 이론과 합치한다.

### 3. 罾中 콘크리트에서 強度發現의 어려움

전술한바와 같이 罾中시에는 高強度콘크리트의 제조가 어렵게 되며, 특히 AE콘크리트의 경우에는 더욱 그러하다. Kleiger<sup>(9)</sup>, Bloem<sup>(10)</sup> 등은 콘크리트의 초기온도가 높을수록 要求水量이 증대되며 강도는 저하된다고 보고한 바 있다. 보다 더 중요한 사실은 Cook<sup>(11)</sup>와 Gayer<sup>(12)</sup> 등이 지적한 바와 같이 콘크리트의 온도가 올라갈수록 slump-loss率과 최초수준으로 slump를 유지시키기 위하여 소요되는 水量이 급격히 증대된다는 것이다. 고려되어야 할 또 하나의 요인은 실험의 質이다. 하절기에는 특히 양생과 최

초 24시간동안의 공시체 보존, 그리고 실험실에서 표준습윤상태로 조속히 공시체를 옮겨야 된다는 점 등이 매우 중요하게 된다.

이러한 세가지 요인으로 인하여 罾中콘크리트의 강도는 일반적으로 낮은 수준을 나타내는 것이다.<sup>(13)</sup> 그러나 이것만으로 레미콘 제작자들이 이야기하는 罾中市 7일과 28일 사이의 매우 낮은 강도진전에 대한 설명이 충분히 된다고 할 수 없다. 문헌을 살펴보면 90 °F 정도의 고온에서는 상온시 20정도이던 A의 평균값이 15 정도로 감소된다는 것을 찾아 볼 수 있다. 그러나 어떤 자료에서도 A가 10이하로 감소되는 경우는 찾아 볼 수 없다. 따라서 현장에서 보고되는 罾中時의 매우 낮은 강도증진에 관한 충분한 설명은 없는 것으로 보인다. 그러나 본 실험에서도 재령 7일과 28일 사이의 강도증진은 500~1000psi로 매우 낮게 나타났다. 실험을 통하여서도 알 수 있는 바와 같이 더운날씨, 촉진제의 사용, 비정상적인 양생조건, 또는 早強性의 시멘트 사용 등은 이후의 강도진전을 더욱 저해하는 것으로 나타났다.

### 4. 設計基準強度를 확보하기 위하여 要求되는 Overdesign

高強度콘크리트의 설계자나 레미콘 업자는 5000psi의 강도를 지닌 콘크리트가 요구될 때, 실제의 평균강도(配合強度)는 5500psi 이상이 되어야 하며, 所要値보다 낮은 강도가 과다하게 나오는 것을 방지하기 위해서는 6250psi 정도의 강도로 배합하여야 된다는 사실을 염두에 두어야 한다. ACI Building Code 318과 ASTM Specification C94에서는 구조설계법에 따라 2가지 방법의 Overdesign에 대하여 언급하고 있다. 허용응력법에 따라 설계된 콘크리트의 경우에는 강도시험치의 20% 이하에서 설계기준강도 이하의 값이 나타나는 것이 허용되며, 임의의 연속된 6개(ACI에서는 5개)의 강도시험 평균치가 설계기준강도 이상이 되어야 한다. 극한강도설계에 의한 구조 또는 PS구조의 경우, 설계기준강도 이하로 나타나는 결과의 허용치는 전체의 10%



TABLE A. REQUIRED OVERDESIGN

Coef. Variation %	Required Average Strength,% of Specified Strength f' c		Required Average Strength for 5000 psi Specified Strength	
	Working Stress 1 in 5 below f'c	Ultimate Strength 1 in 10 below f'c	Working Stress 1 in 5 below f'c	Ultimate Strength 1 in 10 below f'c
	10	109	115	5450
12	111	118	5550	5900
15	114	124	5700	6200
20	120	134	6000	6700

이며, 임의의 연속된 3개의 시험 평균치가 설계 기준강도 이상이 되어야 한다.

ACI 214-65에서는 이러한 경우, Overdesign을 위한 변화계수, 표준편차 및 기타 여러가지 사항에 대하여 기술하고 있다. 다음 표는 설계 강도 5000psi에 대한 변화계수 및 평균 요구강도를 나타낸 것이다.

허용응력법 또는 극한강도설계법으로 설계되는지 그 Overdesign의 차이는 매우 중요한 것이다. 예를 들자면, 고강도 콘크리트가 요구되는 구조에서는 주로 극한강도설계법이 채택되며, 따라서 Overdesign의 중요성은 더욱 커지는 것이다.

적당한 변화계수는 이전의 강도변화에 대한 자료의 분석을 통하여 알 수 있다. 그러나 변화계수를 선택하는데 있어 콘크리트의 균질성에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

Newlon<sup>(65)</sup>은 강도시험에서 예상되는 변수에 대한 자료분석을 통하여, 3500psi이상의 강도에서는 표준편차가 평균강도와 큰 관련이 없다는 결론에 도달하였다. (변화계수는 평균강도의 백분율로 나타낸 표준편차이다.) 이에 따라 Newlon은 3500psi이상의 평균강도를 갖는 콘크리트에서는 표준편차가 보통 550psi정도의 값을 갖는다고 제안하였다. 따라서 허용응력설계법에서는 평균강도가 설계강도를 약 460psi(550×1.282)를 초과하여야 하며, 극한강도 설계에서

는 약 700psi(550×1.282)를 초과하여야 한다.

많은 레미콘 제조자들은 고강도 콘크리트의 경우에는 변화계수가 보다 낮은 값이 되어야 하지 않을까 생각하고 있다. 이에 대한 A. M. Neville<sup>(66)</sup>은 변화계수는 일정한 값이어야 하며, 고강도콘크리트에서는 종종 낮은 변화계수가 얻어지지만 이는 고강도콘크리트의 제조에는 보다 주의가 주어지고 그 품질관리에 신경을 쓰기 때문인 것으로 판단하였다.

낮은 강도시험결과치가 과다하게 나오는 것을 방지하기 위해서는 설계기준강도보다 높은 평균강도를 갖는 콘크리트를 제작하여야 한다. 그러나 이러한 추가강도는 얻기 힘들다. 변화계수를 선택하는데 있어서는 작업환경 및 시험결과에 영향을 미치는 제반요인에 대한 평가가 이루어져야 할 것이며, 이에 따라 Overdesign이 요구되는 것이다.

### 5. 最大強度水準을 向上시키는 기타 方法

본 연구에서 취급한 모든 콘크리트는 4~5inch의 슬럼프를 갖는 것으로, 강도를 증진시킬 수 있는 가장 유력한 방법은 슬럼프를 감소시키는 방법일 것이다. 그러나 대부분의 레미콘에서 이는 실행 가능한 수단이 될 수 없다. 만약 낮은 슬럼프가 가능하다면 잔골재량을 줄이고, 다소 된비빔으로 함으로써 강도를 증진시킬 수 있을 것이다. 그러나 높은 슬럼프값이 요구되는 대다수의 레미콘에서는 지나친 재료분리

및 블리이딩, 기타 문제를 피하기 위하여 평상 수준으로 잔골재량이 유지되어야 한다.

이외에도 강도를 증진시키는 수단으로서 본 실험에서 취급하지는 않았지만 감수제 또는 지연효과를 갖는 혼화재료를 첨가하는 방안을 들 수 있다.<sup>(18, 19, 20, 21)</sup>

한편, Non-AE콘크리트에서는 연행공기를 유발하는 혼화재료의 사용은 지양되어야 할 것이다. 몇몇 연구에서 지적된 바와 같이<sup>(18, 20)</sup> 특정 시멘트와 함께 감수제가 사용되면 급격한 slump-loss 현상이 일어날 수 있으며, 이를 조정하기 위하여 用水가 첨가되어야 한다.

몇몇 예에서는 제조사의 권장사용량의 2배까지 감수제를 사용하여 강도증진을 본 경우도 있다. 그러나 이 경우 지나친 응결지연현상이 일어날 수 있으며, 따라서 이러한 방안은 반드시 극도의 주의와 조정이 필요하다.

시멘트강도가 높아야 콘크리트의 강도도 높아진다는 점에서, 시멘트의 선택 역시 중요하다. 그러나 분말도가 높은 시멘트 사용시 要求水量이 증대 될 수 있으며<sup>(18)</sup>, 더운날씨에서는 급격한 응결이 초래 될 수 있다.

굵은 골재의 선택 또한 중요하다. 굵은 골재의 선택에 있어서는 형상, 표면조직, 성분 등이 고려되어야 할 것이다. 굵은 골재의 형상과 표면조직은 要求水量에 영향을 미친다. 또한 골재와 페이스트간의 부착력을 결정하는 굵은 골재의 특성- 골재의 광물학적 성분으로 추측됨-은 콘크리트의 최종강도에 큰 영향을 미친다. 한편 포틀랜드시멘트 클링커와 기타 특수골재 등이 특수한 초고강도콘크리트 제작에 사용된 바도 있다.<sup>(2, 19, 20)</sup>

본 연구에서 사용된 굵은골재의 최대치수는 3/4inch였다. 직접적인 비교는 할 수 없지만, No.2골재와 같이 입형이 양호한 골재 사용시에는 최대치수를 1/2inch이하로 할때 약간의 강도 증가가 생기는것으로 보인다.(참고문헌 19참조). 또한 No.3골재와 같이 다소 입형이 불량한 골재 사용시에는 최대치수를 조금 크게 함으로써 약간의 강도증대를 기대할 수 있다.

Waterways 실험소에서 행한 연구<sup>(18, 19)</sup>에 의하

면 고강도콘크리트 제조시에는 굵은 모래 (粗粒率이 약 3.00이며 No.50체를 통과하는 량이 최소인 골재)를 사용하는것이 바람직하다고 한다.

잔골재의 모난정도등 표면조직은 要求水量에 영향을 미친다는 점에서 중요하다.

잔골재와 페이스트의 부착력을 결정하는 잔골재의 성분 및 기타 요인은 잔골재의 경우 부착면적이 그만큼 크다는 점에서 그다지 중요하지 않다. 따라서 표준입도 범위내에서의 잔골재의 입도분포는 별로 중요하지 않으며, 조금 굵은 모래가 강도면에서 유리하다. 한편 운모나 진흙분을 많이 함유한 모래의 사용은 피해야 한다.

## 6. 高強度콘크리트의 제작 및 운송

성공적인 고강도콘크리트의 제작은 엔지니어, 레미콘 생산업자, 도급자, 실험기관등 모든 관련자간의 긴밀한 협조 및 노력을 요한다. 고강도콘크리트는 통상적인 과정으로는 만들수 없는 것이다. 고강도콘크리트의 제작에는 종종 특수한 타설, 다짐등의 생산과정이 요구된다.

레미콘 제조업자들은 배합과 혼합에 각별한 주의를 기울여야 할 것이며, 하절기에는 콘크리트의 온도를 저하시키는데 가능한 합리적 방법을 동원하여야 할 것이다.

엔지니어의 입장에서조차 작업지연은 없어야 되며, 타설작업이 일반적인 경우보다 느릴 경우에는 Batch의 크기를 축소 시켜야 할 때도 있다.

공기량, 슬럼프등은 세밀하게 다루어져야 하며, 부수적인 용수의 첨가는 피하여야 한다.

시험기관에서는 공시체의 Sampling, Moulding, 양생, 시험 등에 있어 표준방법에 의거, 실시하여야 한다. 가능하다면 판자모우드보다 재사용이 가능한 강제모우드 또는 1회용 합석모우드를 사용하여야 한다. Joint Research Lab.에서의 실험결과에 의하면, 판자모우드 사용시에는 강제모우드를 사용한 경우보다 강도가 2~3% 낮게 나왔으며, 어떤 경우에는 10~15%까지 낮은

강도치가 나온적도 있었다. 공시체가 모올딩 된 후, 최초 24시간은 조심스럽게 다루어져야 하며 신속히 실험실로 옮겨 정상적인 양생을 하여야 한다.

고강도화 될수록 Capping은 강도측정에 있어 더욱 중요한 요인이 되므로 각별한 주의를 기울여야 한다. 이러한 경우에는 보통 유황컴파운드(보통 유황+Fly Ash)capping이 적합하다. 특히 capping의 두께가 3/4inch이상일 때에는 더욱 유황컴파운드 capping이 요구된다. 유황모르타 capping은 두께 1/8inch이하일 때 사용한다. 단 이때 한번 사용한 것의 재사용은 피하는 것이 좋다.

## 7. 結 論

일반적인 현장타설 시공시, 콘크리트의 최대 강도는 연행공기 및 소요슬럼프에 의하여 제한 받게 된다. 또한 보통골재 사용시, 공기량과 골재의 특성에 따라 최대유효시멘트량이 존재하며, 이 최대치를 초과하여 시멘트를 첨가하여도 강도의 증진은 기대할 수 없다.

일반적으로 슬럼프 4~5inch의 Non-AE콘크리트에서는 설계기준강도 5000psi의 달성은 가능하다. 또한 양호한 환경하에서는 상기한 조건으로 6500psi의 강도를 갖는 콘크리트의 제조도 가능할것이나, 이러한 슬럼프 수준으로는 7500~8000psi의 설계기준강도를 갖는 콘크리트의 제조는 기대하기 어려울 것이다. 6~8%의 공기량과 4~4.5inch 슬럼프를 갖는 콘크리트의 경우, 설계기준강도 3500psi의 달성은 가능할 것이다. 이경우 설계기준강도 4500psi의 달성도 경우에 따라 가능하겠으나, 가장 양호한 조건하에서도 이러한 배합으로는 설계강도 5000psi의 달성은 어려울것이다.

또한 전술한 강도수준중 비교적 낮은 강도의 콘크리트조차도 환경에 따라서는 그 제작이 어려울 수 있으며, 그 달성을 위해서는 제작, 타설, 시험등에 각별한 주의가 수반되어야 한다.

마찬가지로 보다 낮은 슬럼프에서 水量을 줄일 수 있고, 콘크리트가 신속히 타설되어 다져질

수 있다면 전술한 강도보다 더욱 높은 강도를 갖는 콘크리트의 제작도 가능할 것이다.

이러한 콘크리트의 속성상, 실험실에서 개발한 강도를 현장에서 달성하기란 매우 어렵다. 따라서 실험실에서 개발된 모든 Mix는 트럭믹서를 통한 실현장여건하에서의 실험을 거쳐야만 한다.

## List of References

1. Mather, B., "How Strong Can Concrete Be," ACI Journal, Nov. 1964, NL 1-2.
2. "Tentative Interim Report on High Strength Concrete," ACI Journal, Sept, 1967 (Proc. V. 64), PP. 556-567.
3. Nasser, G. D., "Bibliography on High Strength Concretes," ACI Journal, Oct.1967 (Proc.V.64), p. 690.
4. Bloem, Delmar L., "Air Entrainment in Concretes." Thesis, Iowa State College, June 1950.
5. Walker, S., and Bloem, D. L., "Design and Control of Air-Entraining Concrete," Publication No. 60, National Ready Mixed Concrete Association, Dec. 1955.
6. Kaplan, M. F., "Effects of Incomplete Consolidation on Compressive and Flexural Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete," ACI Journal, V. 31, N. 9, March 1960 (Proc. V. 56), pp. 853-867.
7. Bloem, D. L., and Gaynor, R. D., "Effects of Aggregate Properties on Strength of Concrete," ACI Journal, Oct. 1967 (Proc. V. 64), p. 690.
8. Wills, M. H., Jr., "How Aggregate Particle Shape Influences Concrete Mixing Water Requirements and Strength," ASTM Journal of Materials, V. 2, N. 4, June 1967, P.843.
9. Klieger, P., "Effect of Mixing and Curing

- 
- Temperature on Concrete Strength" ACI Journal, June 1958(Proc. v. 54),p.1063.
10. Bloem, D. L., "Effect of Curing Condition on Compressive Strength of Concrete Test Specimens," NRMCA Publication No. 53, Dec. 1954.
  11. Cook, Glenn C., "Effect of Time of Haul on Strength and Consistency of Ready Mixed Concrete," ACI Journal, April 1943, p. 413.
  12. Gaynor, R. D., "Effects of Prolonged Mixing on the Properties of Concrete," NRMCA Publication No. 111.June 1963.
  13. Wagner, W. K., "Effect of Sampling and Job Curing Procedures on Compressive Strength of Concrete," Materials Research and Standards, V. 3, No. 8, August 1963, P. 629.
  14. Slater, W. A., "Relation of 7-Day to 28-Day Compressive Strength of Mortar and Concrete," Proc. ACI, V. 22, 1926, P.437.
  15. Newlon, H., "Variability of Portland Cement Concrete," Proc. National Conference of Statistical Quality Control Methodology in Highway and Airfield Construction, May 1966, P. 259.
  16. Neville, A. M., "The Relationship Between Standard Deviation and Mean Strength on Concrete Test Cubes," Magazine of Concrete Research, V. 11, N. 32, July 1959.
  17. Li, Shu-t'ien, "Proposed Synthesis of Gap-Graded Shrinkage-Compensating Concrete," ACI Journal, Oct. 1967 (Proc. V. 64), P. 654.
  18. Smith E. F., Tynes, W.O., and Saucier, K. L., "High-Compressive Strength Concrete-Development of Concrete Mixtures," U.S. Army Waterways Experiment Station (WES) TDR-63-3114, Feb. 1964,p.41. (Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information No. AD 433 651.)
  19. Saucier, K. L., Tynes, W. O., and Smith, E. F., "High Compressive Strength Concrete," U. S. Army Waterways Experiment Station (WES)Teshnical Report NO. AFWL-TR-65-16,60 pp.(Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information No. AAD 622 445.)
  20. Gaynor, R. D.,"Tests of Water-Reducing Retarders," NRMCA Publication NO. 108, Aug. 1962.
  21. Mather, K., and Felts, A. L., Jr., "High Strength High Density Scientific," U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, C. E., Technical Report No. 6-635, Nov. 1963, 65 PP.