

## 영종대교 현수교 주탑의 그라우트 주입 실험



길홍배\*

### 1. 서론

영종도에 건설중인 인천국제공항과 서울 도심  
을 연결하게 될 신공항 고속도로가 현재 건설 중  
에 있다. 자정식 현수교를 포함한 영종대교는 총  
연장 4,420m으로서 신공항 고속도로의 핵심이  
될 것이다. 영종대교는 자정식 현수교, 트러스교,  
및 강상형교로 구성되어 있으며, 이중 현수교 구  
간과 트러스교 구간은 복층식(double-deck) 교  
량으로서, 위층(upper deck)인 상로 도로에는 6  
차선의 고속도로가 위치하고 하층(lower deck)  
에는 복선의 전철과 4차선의 고속도로가 위치하  
게 된다.

현수교는 3경간 연속 자정식으로서 그림 1  
과 같이 300m의 중앙 경간과 250m (2x125m)  
의 측경간을 갖는다. 주 케이블의 장력이  
Anchorage를 통하여 지반으로 전달되는 일반

적인 타정식 현수교(Earth-anchored Suspension  
Bridge)와는 달리 자정식 현수교(Self-anchored  
Suspension Bridge)는 주 케이블의 장력이  
현수교 보강형(Stiffening Girder)으로 전달  
된다. 장력의 수평성분은 보강형에 압축력으  
로 작용하고, 수직성분은 상향력(Uplift)으로  
작용하게 된다. 이 상향력(Uplift)은 Link  
Shoe를 통하여 교각으로 전달되어 보강형의  
부상을 방지하게 된다. 현재, 자정식 현수교  
로는 일본의 오사카에 위치한 此化大橋와 독  
일에 소규모의 교량이 있을 뿐이다. 영종대교  
현수교는 세계최초의 철도-도로 병용식 자정  
식 현수교가 될 것이다.

영종대교 현수교의 또 다른 특징은 주 케이  
블의 배치에 있다. 일반적인 2차원 현수교는  
두 개의 주 케이블이 평행하게 배치된다. 영  
종대교 현수교는 그림 1에 있는 것과 같이 주

\* 한국도로공사 인천국제공항건설사업소 책임연구원

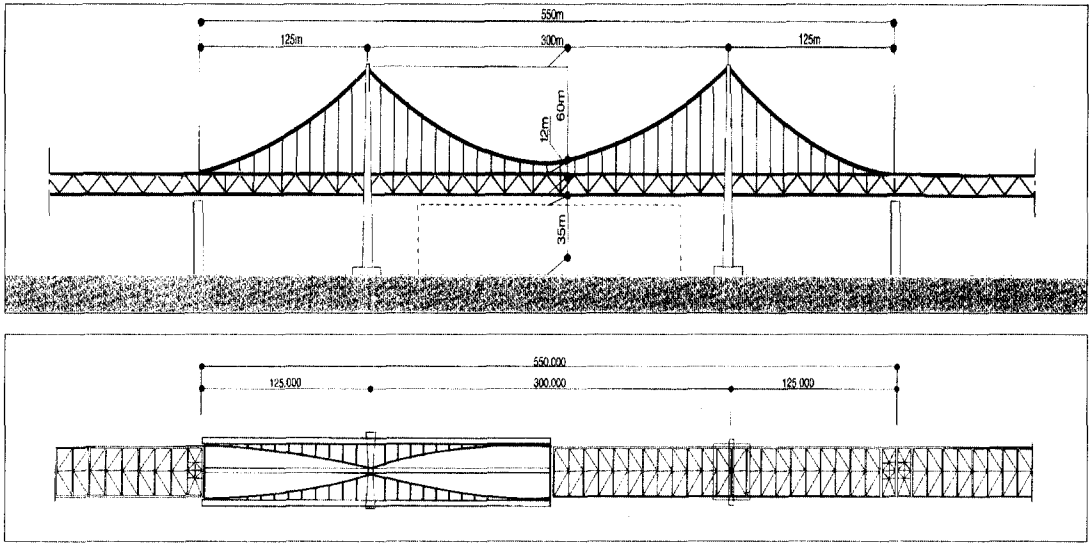


그림 1 영종대교 현수교의 전경

탑의 탑정(塔頂) Saddle에서 멀어질수록 주 Cable들 사이의 거리가 벌어지는 3차원 형상을 갖는다. 3차원 형상을 갖는 현수교의 가장 큰 특징중의 하나는 가설시와 완성계의 cable 형상의 차이에 있다. 가설시에 중앙 경간의 주 케이블들은 평행하게 가설되나, Hanger를 통하여 보강형과 연결되면서 3차원 형상을 갖게된다. 이로 인하여 Hanger들은 교축직각방향으로 경사를 갖는다.

현수교의 주 케이블로부터 전달되는 10,000ton이상의 연직 반력을 기초(基礎)에 전달하는 현수교 주탑(그림 2)은 다이아몬드 형상을 갖고, 강(鋼)을 이용하여 제작된다. 주탑은 케이블을 지지하는 탑정(塔頂)의 Saddle, 주탑 본체, 및 Baseplate 등으로 구성되어 있으며, Anchor Bolt를 이용하여 기초와 연결된다. Baseplate는 그림 3에 있는 것과 같이 탑기부(塔基部)위에 위치하며 주탑의 하부에서 주탑 하중을 기초에 전달한다. 하중에 의해 탑기부에서 콘크리트의 지압 파괴가 일어나지 않도록 하기 위하여 Baseplate로는 일반적으로 100mm 이상의 후판(厚板)이 이용되며, 영종대교 현수교 주탑의 Baseplate는 130mm의 두께를 갖는다.

Baseplate를 탑기부(塔基部)에 접합하는 공법<sup>1), 2), 3)</sup>으로는 연마 공법(研磨工法)과 그

라우트 주입공법(注入工法)이 일반적으로 외국에서 사용되어 왔다. 연마공법에서는 탑기부에 여분의 콘크리트를 타설한 후, 이를 수차례에 걸쳐 그라인더를 이용하여 정밀하게 연마(研磨)하고, 연마된 콘크리트면 위에 Baseplate를 설치한다. 일본의 시모쓰이세토

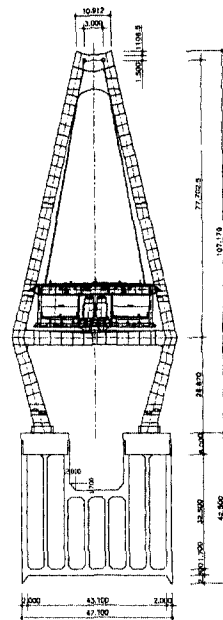


그림 2 주탑 단면

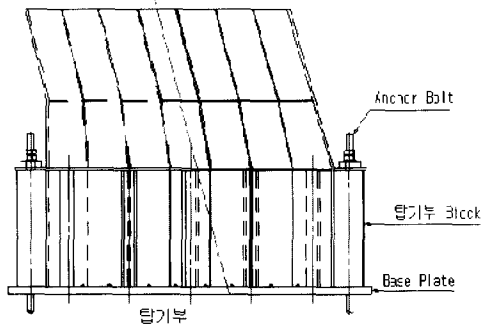


그림 3 주탑 기초부

대교(下津井瀬戸大橋), 아카시대교(明石大橋) 등에서 활용된 공법이다. 이 공법은 절삭된 면의 정도(精度)와 콘크리트의 충전(充鎮) 효과를 확인할 수 있는 장점이 있으나, 콘크리트의 연마에 상당한 시간을 요하는 단점이 있다. 그라우트 주입공법에서는 Baseplate와 타기부(塔基部) 콘크리트 사이에 적당한 간격(7cm - 9cm)을 설정한 후에, 그 사이를 유동성이 높은 무수축 그라우트로 채워 넣는다. 장대교 주탑 Baseplate의 규모가 일반적으로 크기 때문에, Baseplate의 하부공간을 일시에 주입하지 않고, Bag pipe나 Air hose 등의 隔壁(간막이)을 이용하여 수 개의 Cell로 나누어 순차적으로 주입한다. 이 공법은 일본의 Rainbow교 등의 시공에서 적용된 공법으로, Baseplate와 주입된 그라우트 사이의 부착성이 좋고, 공사기간의 단축 등을 유도할 수 있는 공법이다. 그러나 그라우트의 충전상태를 확인할 수 없는 단점이 있다.

그라우트 주입공법이 시공상의 편의와 장비 및 공기를 감안하여 영종대교에서 채용되었다. 그라

우트 주입공법이 국내에서 최초로 시행되고, 시공된 Baseplate 아래의 그라우트 주입 상태를 확인할 수 없으므로 축소 모형 및 실물 모형식 등을 통하여 그라우트의 충전율(充填率), 압축강도 등을 확인하였다. 이 기사에서는 축소 및 실물 모형실험의 결과가 논의되었다.

## 2. 실험의 목적

영종대교 주탑의 Baseplate는 6800mm X 7500mm (두께: 130mm)의 넓이를 갖으며, 총 그라우트 주입량은 6 m<sup>3</sup> 이상이다. 많은 양의 그라우트를 일시에 주입하는 것이 힘들고, 품질 관리상에서도 문제가 있으므로 Bag pipe로 격벽을 형성하여 5개의 cell로 구분하여 주입한다.

축소 모형 주입실험에서는 3600mm X 1500mm의 강판(두께: 12mm)을 Baseplate로 이용하여 1개 Cell의 그라우트 주입에 사용하는 그라우트 주입 모형 실험을 행하였다. 이들 축소 모형 그라우트 주입 실험들을 통하여 영종대교 특별시방서<sup>51</sup>에 규정된 90% 이상의 충전율( 그라우트 주입 전면적-공극 면적) / 그라우트 주입 전면적)과 600 kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 확보하기 위한 그라우트 주입 공법, 공극(空隙)을 방지하기 위한 Overflow양, Consistency(반죽 질기) 등이 검증되었다.

실물 모형실험에서는 실제 주탑의 Baseplate를 이용하고, 소형모형실험을 통해서 결정된 Consistency, 주입공법들을 적용하여 모형실험을 수행하였다. 실제 그라우트의 주입과 같은 조

표 1 무수축 그라우트재의 재질

항 목	CRD C 621*	870 GK	시험방법
유동성 (Fluidity)	10 - 30 초	25.8 초	CRD C 611
응결시간	8 시간	7시간 30분	ASTM C 191
팽창율 (%), 28일	최대 0.4	0.12	CRD C 621
수축율 (%), 28일	없음	없음	CRD C 621
압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	7 일	176	ASTM C 109
	28 일	352	

- 시험 조건 : 1. 혼합된 그라우트의 온도: 20°C  
 2. 붓의 양: 4.6 l/25 kg  
 3. 그라우트의 양생온도: 23°C

\*: Specification for Nonshrinkage Concrete, Corps of Engineers

건하에서 수행된 실물모형실험에서는 Bag pipe와 Cell이 여러 개 있을 경우의 그라우트 주입과 작업 순서 등이 검토되었다.

### 3. 그라우트 주입 순서

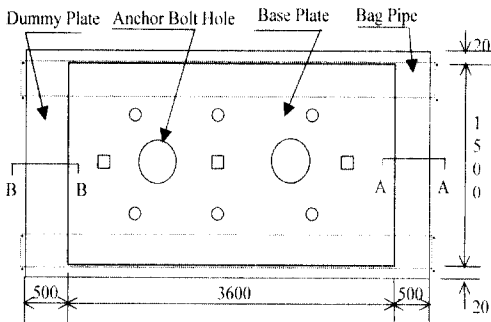
Bag pipe를 이용한 그라우트 주입공법에서는 일반적으로 다음과 같은 순서에 따라 그라우트를 주입한다.

1. 탐기부의 콘크리트 표면을 water jet 등을 이용하여 latex 등을 제거하고 건진한 면을 노출시키기 위한 면 처리.
2. Baseplate를 설치하고 level 조정.
3. Baseplate의 level과 맞추어 Dummy plate를 설치하고, 공기의 유입을 방지하기

4. Baseplate 하부의 콘크리트에 물을 뿌려 습윤.
5. Bag Pipe의 배치.
6. 그라우트를 혼합하여 consistency 측정 후, 그라우트를 bag pipe로 주입.
7. Bag pipe속의 그라우트가 어느 정도 경화한 후에 Bag pipe 사이의 Cell에 그라우트를 주입.
8. 그라우트의 양생 후, Dummy plate를 철거하여, Dummy plate 밑의 충전율을 계측.

Baseplate 아래에서 균일하게 충전된 그라우트를 얻고, 공극의 발생을 억제하기 위하여 Dummy plate들이 Baseplate와 같은 높이로 Baseplate의 주변부에 설치된다. Dummy plate와 Baseplate의 접합부에는 공극을 유발할 수 있는 단차가 없어야 한다. 혼합된 그라우트의 Consistency(반죽 질기)는 일본도로공단의 규정을 따라 14mm J로드4) (상단내부 지름: 70mm, 하단내부 지름: 14mm, 높이: 395mm)를 이용하여 측정하고, 특별시방서의 반죽질기(Consistency) 규정( $7.5 \pm 0.5$ 초)과 비교하였다.

그라우트를 주입할 때, 그라우트를 유출측에서 "Overflow"시켜야 한다. Overflow는 필요한 양보다 많은 양의 그라우트를 주입하여, 공극을 제거하고 충전율을 향상하기 위한 것이다.



○: Level Bolt □: Piezo Meter

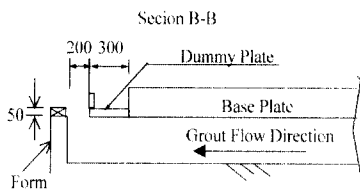
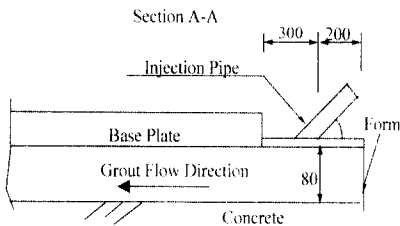


그림 4 축소모형 실험체 단면

### 4. 축소 모형 실험체 및 실험 재료

부수축 그라우트 (Nonshrinkage Grout)로는 M사의 870GK를 이용하였다. 이 그라우트 재의 관련 시방 규정과 870GK 사양은 표 1에 주어졌다. Cell을 형성하기 위한 隔壁(칸막이) 재료는 Bag Pipe라 불리는 나일론 섬유제의 망사 포대가 사용되었다.

주입 실험은 그림 4에 있는 것과 같은 모형 실험체를 이용하여 수행되었다. 그라우트재는 주입관(Injection pipe)를 통하여 주입되고, Baseplate와 콘크리트 표면 사이에는 80mm의 간격을 두었다. 모형 실험체의 Baseplate에는 본체를 모사하기 위한 주탑의 Anchor bolt 구

명, Baseplate의 평탄도를 조절하기 위한 Level bolt 등이 있다. 또한, 유동압을 측정하기 위한 Piezo meter와 그라우트에 내재되어 있는 공기를 배출하기 위한 Air hose등이 설치되었다. 실험체의 비주입측(非主入側) 양단에는 Bag pipe가 위치되었고, Baseplate 주변에 Dummy plate가 부착되었다. 그라우트 유출측(그림 4, Section B-B)에는 압력(Head압)을 높여 공극을 없애기 위하여 유출측의 거푸집에 50mm의 높이가 더 설정되었다.

#### 4. 그라우트 주입 공법

Baseplate의 하부공간에 그라우트를 주입하기 위한 방법으로는 중력에 의한 압력을 이용하는 자연주입(自然注入) 공법과 Pump의 기계압을 이용하는 Pump 주입공법이 있다. 자연주입 공법(그림 5)에서는 그라우트 믹서(Mixer)를 2-3M의 높이에 위치시키고, 믹서와 Baseplate의 위치차이에 의한 중력을 이용하여 그라우트를 주입한다. Pump 주입공법(그림 6)에서는 Screw pump나 Squeeze pump를 이용하여 믹서로부터의 그라우트를 강제적으로 Baseplate의 하부 공간으로 주입하는 공법이다. 두 가지 주입공법이 축소 모형실험에서 비교되었다.

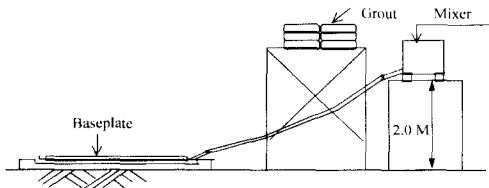


그림 5 자연주입 공법

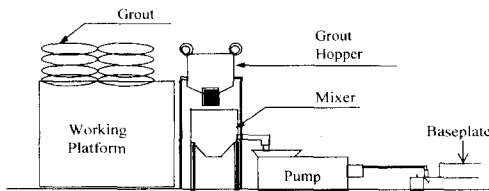


그림 6 Pump 주입공법

#### 5. 축소모형실험 결과

그라우트가 주입된 후, Baseplate위에 부직포를 설치하여 습윤 양생 시켰다. 그라우트 주입일로 부터 3일 후, 해체(baseplate의 탈형)하여 그라우트된 면의 상태를 관찰하였다. 우선, 표면의 공극(Air Hole) 분산 상태를 관측하고, 투명 Plastic을 콘크리트 표면에 부착하여 공극들을 기록하고, 이것을 이용하여 충전율을 계산하였다. 그라우트의 압축강도는 주입된 그라우트로부터 Core를 채취하여 측정하였다.

축소모형실험 결과가 표 2에 주어져 있다. 대체로 만족할 만한 수준이었으나, 2개의 실험이 주입실패로 끝나고, 한 개의 실험에서는 공극이 다량으로 발생하였다. 2번째 실험은 믹서와 주입구(Injection Hole) 사이의 주입 호스(Hose)에서 그라우트가 경화되어 실패로 끝났다. 이는 믹서와 주입구 사이가 너무 떨어져 있어 발생한 것으로 보인다. 5번째 실험에서는 Baseplate 하부에서의 그라우트 흐름을 관찰하기 위한 Carbon을 Pump에서 투입하다가 Pump의 작동 정지로 인하여 주입측에 다량의 공극이 발생하고, 주입이 실패로 끝났다. 상세한 실험 결과는 다음과 같다.

##### 5.1 반죽질기 (Consistency)

특별시방서<sup>5)</sup>는 반죽질기의 범위를 7초에서 8초 사이( $7.5 \pm 0.5$ 초)로 제한하고 있다. 표 2의 축소모형 실험의 결과가 충전율과 반죽질기 사이의 관계를 직접적으로 보여주고 있지 않으나, 7.5초에서 8초 사이의 반죽질기 값이 적합한 것으로 보인다.

##### 5.2 충전율 및 공극의 형상

총 8 차례의 축소 모형주입실험 중, 주입 실패로 끝나거나 공극이 다량 발생한 경우를 제외하고는 충전율이 98% 이상으로 특별시방서의 규정(90% 이상)을 만족한다. 그러나, 자연주입 공법을 이용한 초기 실험에서는 국부적으로 큰 공극이 발생



(유입측)

(유출측)

그림 7 공극의 발생 현황 (8차 실험)

하였다. Pump 주입공법을 이용한 후기 실험에서는 Bag pipe를 따라서 공극이 발생하거나 유출측에서 작은 공극이 많이 발생하였다. 특히 그림 7에 보여준 것과 같이, 그라우트의 유출측에서 작은 공극(air hole)들이 산재해서, 충전율을 국부적으로 96% 정도까지 낮추는 경우도 있었다.

Bag pipe를 따라서 발생한 공극은 Bag pipe에 국부적으로 요철이 있어 발생하였다. 이들 공극은 Bag pipe에 그라우트를 주입할 때 Bag pipe를 일직선으로 유지하여 방지 할 수 있었다. 그라우트의 유출측에 발생한 것과 같은 작은 공극들을 제거하기 위하여 Overflow양을 일정치(30%) 이상으로 하고, 혼합된 그라우트가 Mixer에서 Pump로 이송될 때 Chute를 이용하여 그라우트 속의 공기를 없앴다.

### 5.3 주입공법의 결정

서론에서 논의한 것과 같이 두 개의 주입공법

이 사용되어 왔다. 본 실험에서 자연주입 공법을 이용한 실험이 낙하고(落下高)를 변경하며 세 번 수행되었으나, 첫 번째 실험을 제외하고는 실패로 끝났다. 주된 이유는 그라우트 주입구에서의 압력을 높이기 위하여 Mixer를 높이 설치함에 따라, 주입 호스의 길이가 길어지고, 호스 내부의 그라우트가 유동성을 상실했기 때문이다. Screw Pump를 이용한 Pump 주입공법의 경우에는 Pump의 작동 불량에 의한 경우를 제외하고는 안정적이고 신뢰할 수 있는 결과를 주었다.

축소모형실험의 결과로부터 실물모형실험 및 본체의 그라우트 주입에는 Pump를 이용한 주입 공법이 선정되었다. 축소 주입실험에서는  $30 \text{ kg/cm}^2$ 의 최대압력 및  $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 작업량을 갖는 Pump와 Mixer (혼합량:  $0.5 \text{ m}^3$ , 회전속도: 90 RPM)가 사용되었다.

### 5.4 압축 강도

표 2 축소 모형 실험 결과

횟 수	주입공법	대기온도 (°C)	반죽질기 (sec)	충진율 (%)	압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )	비 고
1	자연주입 (낙하고: 2M)	16.2	7.0	98.83	624	
2	자연주입 (낙하고: 2M)	25.2	7.8	-	-	주입 실패
3	자연주입 (낙하고: 3M)	29.6	7.1	-	616	공극 다량발생
4	Pump주입	29.6	7.6	99.72	614	
5	Pump주입	26.5	6.8	-	-	주입 실패
6	Pump주입	20.0	7.8	99.66	617	
7	Pump주입	20.7	7.8	98.82	618	
8	Pump주입	22.1	7.4	99.45		

표 2에 주어진 압축강도는 Baseplate를 탈형(脫型)한 후, 실험체로부터 채취한 Core를 이용하여 측정된 28일 강도이다. Core의 압축강도는 특별시방서에 규정되어 있는  $600 \text{ kg/cm}^2$  (28일 강도)이상을 전부 만족시킨다. 동일한 그라우트의 Cube mold 압축강도는 평균적으로  $770 \text{ kg/cm}^2$  정도였다.

## 6. 실물(1:1) 모형 실험

축소모형실험의 결과를 토대로 주탑의 제작장인 삼성중공업에서 주탑의 Baseplate를 이용하여 실물모형실험(그림 8)이 수행되었다. 서론에서 논의한 것과 같이, 실제 그라우트 주입 후에는 Baseplate하부의 그라우트 충전상태를 확인하기가 불가능하므로 본체 주입과 같은 조건으로 실물 모형실험을 수행하고, 예상되는 문제점을 파악하고자 하였다. 실물 모형실험체는 그림 10에 있는 것과 같이 Baseplate와 Dummy plate아래의 하부공간을 4개의 Back pipe (Grouting Pack)을 이용하여 5개의 Cell로 나누었다. 그림



그림 8 실물모형실험 전경

10에서 원은 Anchor Bolt를 위한 구멍(hole)들을 나타내고, ①~⑤는 Cell의 번호를 나타내고 있다.

실물모형실험에서는 축소모형실험의 결과를 바탕으로 Pump 주입공법을 이용하였다. 그림 9에 있는 것과 같이 Hopper, 믹서와 Screw Pump를 각각 2개씩 준비하여 그라우트 주입시 예상되는 기계의 고장에 대비하였다. 그라우트는 Bag pipe의 주입 완료 후, 1시간 정도 경과 후에 ①, ⑤, ②, ③, ④의 순서로 주입되었다.

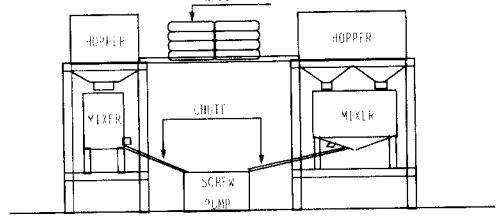


그림 9 실물모형실험에 이용된 장비

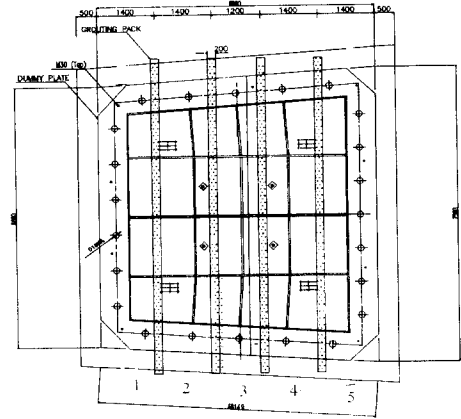


그림 10 실물모형 실험체

표 3 실물모형실험의 결과

Cell 번호	Consistency (sec)	압축강도 (7일) ( $\text{kg/cm}^2$ )		충전율 (%)	비 고
		Cube Mold	Core		
Bag Pipe	7.3	666	480	-	주입 중단
1	7.5	-	-	-	
2	7.8	677	472	99.58	
3	7.7	679	474	99.78	
4	7.8	686	482	99.77	
5	7.8	647	465	99.92	

각 Cell별 그라우트 주입량은 약  $1.0 m^3$  정도로 20분에서 30분 정도의 시간이 소요되었으며, 총 실험 시간은 약 3시간 정도였다. 첫 번째 Cell의 주입 도중, 그라우트가 약 40%정도 주입되었을 때 전기 공급으로 인하여 Pump 작동이 중단되었다. Pump, 호스, 믹서등을 청소하는데 상당한 시간이 소요되어 그라우트의 주입을 중단하였다. 잔여 Cell의 주입은 문제없이 수행되었다.

실물모형실험의 결과가 표 3에 주어져 있다. Core를 채취해 측정한 7일 압축강도는 최소가  $465 kg/cm^2$ 으로 요구 압축강도( $600 kg/cm^2$  (28일 강도))의 77.5%이다. 일반적인 콘크리트의 7일 압축강도가 28일 압축강도의 70%정도이므로, Core의 28일 압축강도는  $600 kg/cm^2$ 을 만족할 것으로 기대된다.

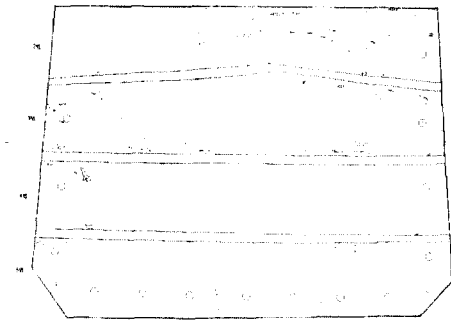


그림 11 실물 모형실험체의 공극 발생 현황

각 Cell별로 충전율을 계산한 결과, 충전율은 99%이상으로 특별시방서의 규정(90% 이상)을 만족한다. 그림 11은 주입이 중단된 ① Cell을 제외한 잔여 Cell들의 공극 분포현황을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이, 실험체를 해체한 결과 두 번째 Cell과 세 번째 Cell사이의 bag pip가 움직인 것으로 발견되었나, 충전율에는 큰 영향을 미치지 않았다. 공극은 주로 유입구 측(그림의 좌측)과 유출구 측(그림의 우측)에 분포있는 것을 알 수 있다.

## 7. 결론

현수교나 사장교 등의 장대교 주탑의 기부를 위한 그라우트 주입공법이 국내에서는 처음으로 영종대교에서 도입되었다. 실제 주입 전에 그라우트 주입 공법의 변수들을 검토하고 시공성을 확인하기 위한 그라우트 주입 축소모형실험과 실물 모형실험이 수행되었다. 축소모형실험에서는 주입 방법과 Consistency등의 그라우트 관련 물성치들이 검토되었고, 실물모형실험에서는 축소모형실험의 결과를 반영하여 실제 주입과 같은 상태에서 주입 실험을 수행하였다. 두 실험을 통하여  $600 kg/cm^2$  (28일 강도) 이상의 압축 강도와 90%이상의 충전율(充填率)을 확보할 수 있는 방법이 검증되었고, 실제 영종대교 주탑의 시공에 적용되었다. 유사한 국내의 교량 건설에 있어서도 본 기사에서 논의 한 것과 같은 절차를 걸쳐 그라우트 주입 공법이 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 8. 참고 문헌

- 1) 吊橋塔基部의 그라우트 주입 실험, 佐伯康二, 本四技報, 1978년 10월
- 2) 吊橋塔基部의 그라우트 주입 실험, 佐伯康二, 橋梁と基礎, 1980년 1월
- 3) 吊橋塔基部의 그라우트 주입 (首都高速12号線), 小川輝行, 橋梁と基礎, 1992년 8월
- 4) 無收縮モルタル品質管理試驗方法(KODAN 30-1976), 日本高速道路公團, 1976
- 5) 영종대교 특별시방서, 교통부/한국도로공사, 1994년