

## 콘관입시험기를 이용한 다짐도 측정 및 지반정수 추출법 개발

임유진 · 이현승§

배재대학교 토목환경공학과, §(주) NIS 지반공학부

### 요 약

국내 건설현장에서는 성토다짐의 다짐도 확인을 위해 주로 평판재하시험(PBT)을 사용한다. 평판재하시험은 재하시험시 표층의 매우 잘 다져진 곳에 대한 지지력 계수를 획득하여 실다짐도를 과대 평가하는 결과를 초래할 수 있다. 이에 착안하여 응력도달 범위가 작은 평판재하시험을 지양하고 콘관입시험으로부터 획득되는 노상의 관입지수로부터 지반의 다짐도를 추정할 수 있는 콘관입시험기와 구동시스템 및 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 시스템은 다짐차량에 간편하게 부착하여 현장에서 직접 다짐도를 획득할 수 있으며 다짐도와 더불어 다져진 지반의 전단강도정수를 동시에 측정할 수 있다.

Lim, Yu-Jin Lee§, Hyeon-Seung Development of A System for Decision of Strength Parameters and of Degree of Compaction in Compacted Soil with Cone Penetrometer

### 1. 서 론

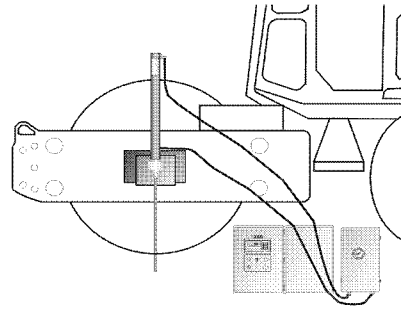
국내 도로공사 현장에서는 노상토 및 구조물 뒷채움부의 다짐관리를 위해 일반적으로 평판재하시험(PBT), 현장들밀도시험 또는 RI시험법을 시행한다. 가장 보편적으로 사용되고 있는 평판재하시험은 반력의 확보를 위해 중차량의 반입이 반드시 필요하고 시험절차가 번거로우며 시험자의 숙련도에 의해 결과가 좌우되는 단점이 있다. 통상 국내에서는 성토층의 1회 다짐층 두께를 20cm~30cm 정도로 규정하여 최대

다짐밀도를 확보하기 위한 시방규정이 있으나 대부분 현장에서는 잘 지켜지지 않고 있는 실정이며 오히려 근래에는 다짐장비의 효율이 커지는 추세를 고려하여 시공성을 높이고자 1회 다짐층의 두께를 50cm 이상으로 증가시키려는 연구가 진행 중에 있다. 반면 평판재하시험은 재하시험시 표층의 잘 다져진 곳에 대한 지지력 계수를 획득하여 실제 다짐도보다 더 큰 다짐도로 오판할 수 있는 가능성이 상존한다.

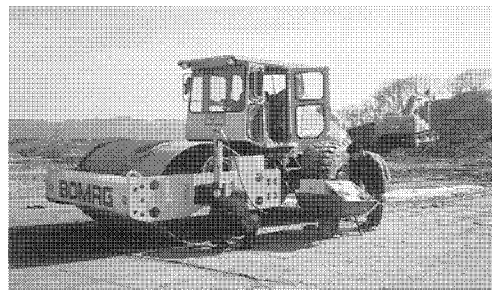
에너지효율이 증가된 다짐차량을 사용하

여 다짐횟수를 증가시키면 통상적인 판단과는 달리 다짐에너지가 표층에만 집중되어 동일단면 내의 해당 다짐층이 다짐이 잘된 상부층과 다짐이 불량한 하부층으로 뚜렷이 구분되어 다짐되며 이 때 상부층은 슬래브와 같은 거동을 보일 수 있다. 이는 PBT와 같은 기존의 다짐도 확인시험법으로는 다짐층 전체깊이에 대한 평균 다짐도 또는 표층의 다짐도만 확인하게 되는 결과를 초래할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 재하면적과 재하판의 응력도달 범위가 작은 평판재하시험의 단점을 개선하고자 콘관입시험기를 이용하여 다짐도층 전체 깊이에 걸쳐 실 다짐도를 파악할 수 있는 다짐도 관리시스템을 개발하였다. 개발된 콘관입 시험 시스템은 관입장치와 해석 프로그램으로 구성되며 부가 기능으로서 다짐도 측정된 시험 대상토층의 지반 전단강도 정수까지 아울러 추정할 수 있다. 다짐차량에 장착된 장비의 개요도는 그림 1.과 같다.

본 콘관입시험기는 미 육군공병단의 휴대형 콘 관입시험기를 기본모델로 하여 개발되었으나 콘의 각도와 길이를 달리하여 콘의 각도와 길이변화에 따른 영향을 규명하여 국내 토질특성에 적합한 최적 콘 각도 및 길이를 파악하고자 하였다. 아울러 데이터의 입출입과 시스템의 구동이 하나의 프로그램에서 이루어지도록 하여 현장 다짐시 즉석에서 다짐도와 전단강도를 확인할 수 있도록 하였다.



(a)



(b)

그림 1. 다짐관리용 콘관입시험기: (a) 콘의 차량탑재 개략도 및 데이터 입출입 장치, (b) 현장시험 모습

## 2. 콘관입시험기의 관입 모델 개발 및 적용

### 2.1 Rohani-Baladi(1981)의 콘관입 모델

일반적으로 콘의 저항치( $q_c$ )는 지반의 건조단위중량( $\gamma_d$ ), 상대밀도( $D_r$ ), CBR 등과 관련성이 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 콘 관입저항치는 건조단위중량에 비례하며 다짐작용 등 과압밀 효과에 의해 그 값이 크게 증가한다. Schmertman(1977)은 현장CBR과 콘관입저항치와의 상관성을 다음 식으로 제안한 바 있다(단위 tsf):

$$CBR = \frac{q_c}{3}$$

(1)

$$CI = \left( \frac{2 \tan \alpha (1 + \sin \phi) \bar{G}^m}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \gamma \tan^3 \phi} \right) \left[ \frac{3(\tan \alpha + \tan \phi)}{3 - \sin \phi} \right] \Omega - C \cot \phi$$

(2)

여기서,

$$\Omega = \frac{[C + \gamma(Z+L)\tan \phi]^{3-m} [C + \gamma(Z+L)\tan \phi + (2-m)\gamma L \tan \phi] (C + \gamma Z \tan \phi)^{2-m}}{(2-m)(3-m)}$$

및  $m = 4 \sin \phi / 3(1 + \sin \phi)$ 으로 정의된다.

한편 전단탄성계수( $G$ )는 Hardin과 Dmievich (1972)에 의해 모난 모래지반에 대해 식 (3)과 같이 제안된 바 있다:

$$G = 1230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^K \sigma'_o{}^{0.5}$$

(3)

다져진 표토는 과압밀상태이고 과압밀비(OCR)는 1.0에 가깝고 평균유효주응력( $\sigma'_o$ )

은 Rohani-Baladi(1981)는 정삼각의 내부압력 위의 콘 실험식에서 콘관입시험기 관입 모델의 관입 저항치를 산출함에 있어 관입시험기의 관입 저항치를 산출함에 있어 관입시험기를 제안하였으며 콘원추면상에 작용하는 수직응력( $\sigma_n$ )이 구형공동의 확장(그림 2.)에 필요한 내부압력과 같다고 가정하여 콘지수식을 흙의 전단강도 항으로 표시하였다. 콘지수(CI)는 콘관입력을 콘단면적으로 나눈 것이며 지반의 강도정수 및 강성(stiffness)과 직접 연관된다. 구형공동팽창모델과 구형공동주위의 응력평형식에 Mohr-Coulomb 파괴규준식과 경계조건 및 흙의 응력-변형률 조건식을 적용하고 풀면 식(2)와 같은 콘지수와 전단강도정수( $C, \phi$ ) 및 전단탄성계수( $G$ )사이의 상관식을 설정할 수 있다.

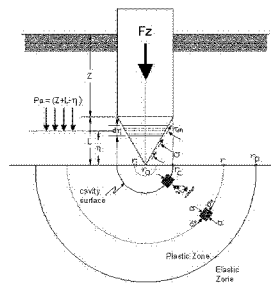


그림 2. Rohani-Baladi(1981)의 구형공동팽창 콘관입 모델

## 2.2 콘장비의 구성 및 작동

개발된 콘관입시험기는 유압펌프, 유압실린더, 컨트롤박스, 브라켓, 그리고 콘으로 구성된다. 콘은 로드와 하중계를 통하여 유압실린더에 연결되고 최대 관입깊이는 60cm이며 실린더 옆에 장착된 LVDT로 관입깊이를 실시간으로 측정한다. 장비를 운용하기 위한 지반조사용 차량은 별도로 필요 없으며 현장 다짐 장비에 그림 1 및 그림 3과 같이 브라켓을 이용해 견착하여 사용한다. 일반적으로 콘의 관입속도는 2cm/sec를 유지하며 1~3cm/sec 사이에서 변경이 가능하도록 하였다. 하중계와 변위계에서 측정된 아날로그 신호는 컨트롤박스의 Load indicator에 수치로 표시되며 동시에 노트북컴퓨터로 전송되어 실시간으로 저장된다. 컨트롤 박스 내부에는 A/D 컨버터 모듈과 RS-232C 통신모듈이 각 1개씩 설치되었다. 따라서 관입깊이에 따른 콘관입저항값 변화를 추적할 수 있다. 사용 가능한 콘은 모두 9종이며 표준 WES콘 1개(D=20.32mm, 정점각(2α)=30°)와 지름과 정점각이 다른 나머지 8개의 콘이 있다 (표 1. 참조).

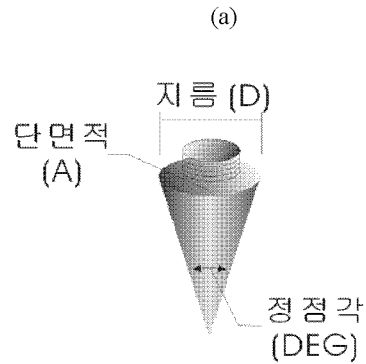
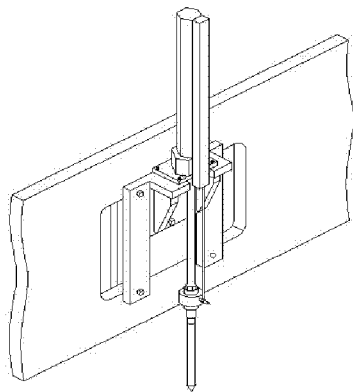


그림 3. 콘의 장착개념도(a) 및 콘의 형상(b)

표 1. 콘의 종류 및 구성

콘의 종류	지름(mm)	정점각(deg.)	단면적(mm <sup>2</sup> )
콘-1(大)-30°	28.74	30	648.73
콘-1(大)-45°	28.74	45	648.73
콘-1(大)-60°	28.74	60	648.73
콘-2(中)-30°	20.32	30	324.29
콘-2(中)-45°	20.32	45	324.29
콘-2(中)-60°	20.32	60	324.29
콘-3(小)-30°	14.36	30	161.96
콘-3(小)-45°	14.36	45	161.96
콘-3(小)-60°	14.36	60	161.96

\* 표시는 표준 WES 콘(2α = 30°)임.

## 3. 데이터의 획득 및 해석

전 관입깊이에 걸쳐 획득된 콘지수 변화는 층재료의 배 (b) 파 입도 등에 따라 다소 불규칙한 경향을 보인다. 이론상 이들은 깊이에 비례하여 단조증가하여야 하

므로 두 측정점 사이의 기울기를 구하여 음(negative)의 값이 나오면 그 지점의 데이터는 무시하고 인접한 두 점의 평균점을 연결하여 두 측정점 사이에서만 단조증가하도록 연결하였다. 또한 강도정수를 구하는데 사용되는 콘지수는 1) 7cm 및 15cm 깊이에서 획득된 값을 사용(Rohani-Baladi, 1981)하거나 2) 전깊이에 걸친 평균 콘지수 값(CI-avg) 또는 3) 임의 두 깊이에서 선택할 수 있다. 한 지역에서 여러 번의 콘관입시험을 실시함으로써 다수의 콘관입지수 변화 그래프를 얻게 된다. 이에 따라 평균콘지수(CI-mean) 및 평균변동계수(COV-avg)를 구하여 그 지반의 대표 CI값과 표 2.에 의하여 신뢰정도를 평가할 수 있다.

표 2. 측정콘지수의 분포상태

평균변동계수	콘지수 신뢰정도
10(%) 이하	아주 양호
10(%) ~ 15(%)	양호
15(%) ~ 20(%)	보통
20(%) 이상	불량

#### 4. 현장적용 및 다짐도 분석

##### 4.1 현장적용

제작된 콘관입시험기의 적용성을 검토하기 위하여 고속도로 성토부의 노상다짐이 이루어지는 2개 현장(A현장 및 B현장)을 선정하여 콘관입시험을 실시하였다. 각 현장에 반입된 흙재료의 토질특성은 표 3.과

같다. B현장의 흙은 매우 특이한 성질을 갖고 있어 다짐시 매우 쉽게 짓이겨 지는 특성이 있음을 확인하였다. 타 다짐 관리 시험법과의 비교평가를 위해 평판재하시험, 현장들밀도시험 및 RI시험을 실시하였다. 노상 다짐시 다짐정도 차이에 의한 지반반력계수( $k_{30}$ )와 전단강도정수 및 건조다짐중량의 상관성을 조사하기 위하여 해당 노상을 각각 10회 ~ 50(60)회까지 다짐차량의 주행횟수를 달리하여 다지고 평판재하시험을 실시하였다(표 4.).

표 3. 현장 노상재료의 토질특성

	A현장	B현장
비 중	2.7	2.65
액성 한계	21	33.7
소성 지수	N.P	N.P
USCS 분류기호	SP	SW
$\gamma_{d-max}$ (t/m <sup>3</sup> )	1.944	1.93
최적함수비( $\omega$ , %)	11	10.2

다짐 및 견착차량은 진동다짐롤러(A현장-BOMAG사 BW211D-3 모델 및 B현장-INGERSOLL-RAND사 SD-100 모델)를 이용하였으며 층다짐 실시 후 콘관입장비를 장착하여 일정 간격으로 이동하며 시험하였다. 그림 4. 및 그림 5.는 현장에서 획득한 콘관입 데이터를 이용하여 프로그램 상에서 지반의 전단강도 정수를 추정하는 절차의 일부분을 도시한 것이다.

표 4. 평판재하시험에 의한 지반반력계수( $k_{30}$ )

	A현장	B현장
차량반복횟수	지반반력계수( $k_{30}$ ) ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	
10	4.9	32.8
20	6.8	28.8
30	7.3	24
40	9.65	28
50	13.05	29.6
60	N/A	28

콘저항치와 과압밀된 모래지반의 탄성계수와의 상관성은 Lunne와 Christoffersen (1985)에 의해 아래와 같이 제안된 바 있다:

$$E = 5 q_c \text{ for } q_c = 50 \text{ MN/m}^2 \quad (4)$$

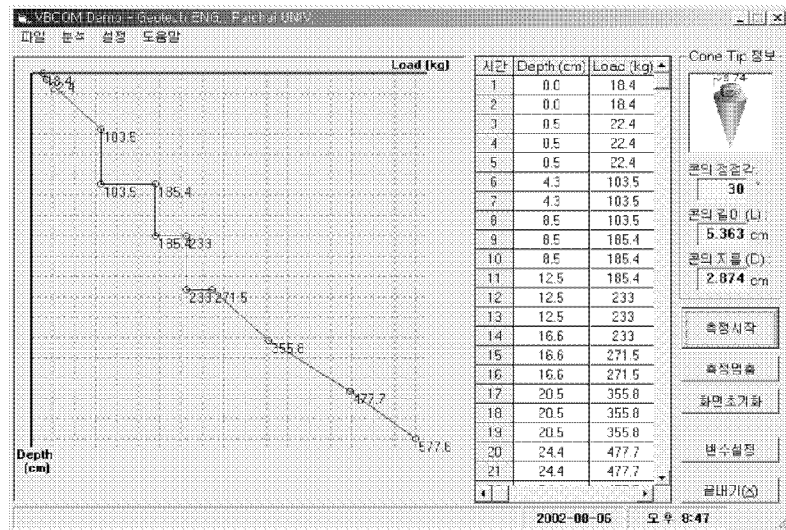


그림 4. 획득된 콘지수 데이터의 표시

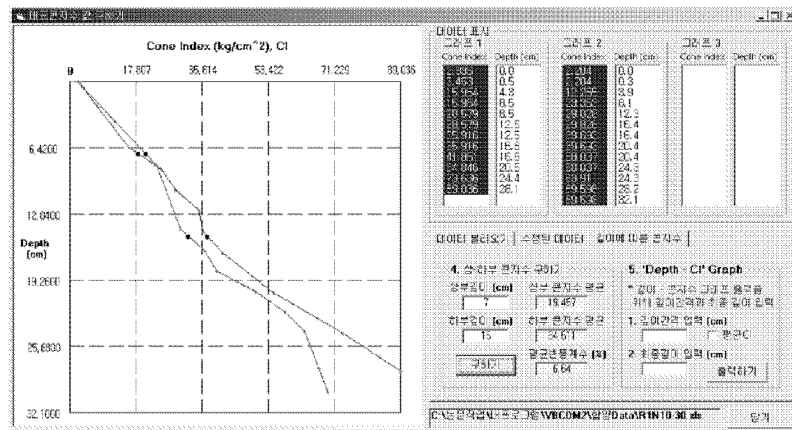


그림 5. 데이터의 단조증가 수정 및 평균변동계수 획득

탄성계수(E)와 전단탄성계수(G)와의 상관식( $E=2G(1+\nu)$ )을 이용하면 콘지수로부터 지반의 탄성계수를 계산할 수 있다. 이때 포아송비는 토질특성에 따라 가정하여 사용하였다. 다짐횟수를 달리하여 구한 대표 지반반력계수( $k_{30}$ ), 전단탄성계수(G) 및 탄성계수(E)의 상관식을 표 5. 및 그림 6. 과 같이 정리할 수 있었다. 프로그램으로

계산해 낸 전단강도 정수 중 내부마찰각은 표 6.과 같으며 전단시험결과 보다는 삼축 시험 결과에 근사한 값으로 나타났다. 반면 점착력은 매우 큰 오차를 보였으며 이는 실 지반의 모관현상에 의한 겉보기 점착력을 제대로 반영하지 못한 결과로 보이며 이를 보정하기 위해서 관입속도의 제검도가 필요할 것으로 판단된다.

표 5. 다짐횟수 차이별 계산된 물성치의 비교 (A현장)

물성치 \ 회수	10	20	30	40	50
$k_{30}B$ (kg/cm <sup>2</sup> )	147	204	219	289.5	391.5
G (kg/cm <sup>2</sup> )	351.4	476.1	490.9	559.6	628.8
$E_{\nu=0.5}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1054.1	1428.5	1472.8	1678.8	1886.3
$E_{\nu=0.3}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	913.6	1238	1276.4	1455	1634.8

Comparison between  $k(30)*B$  & E Calculated from CI

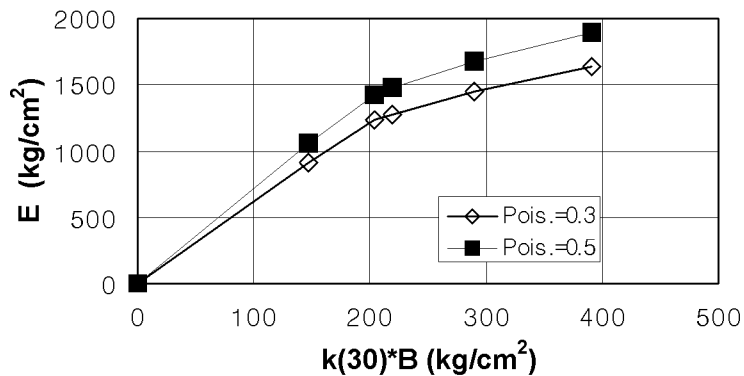
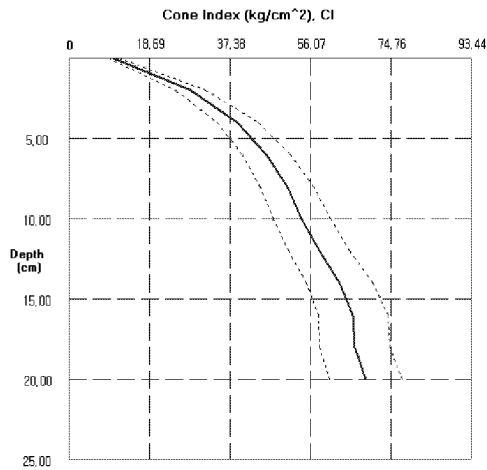


그림 6 평판재하시험에 의한  $k_{30}*B$ 와 CI에서 구한 E값의 상관관계도(A 현장)

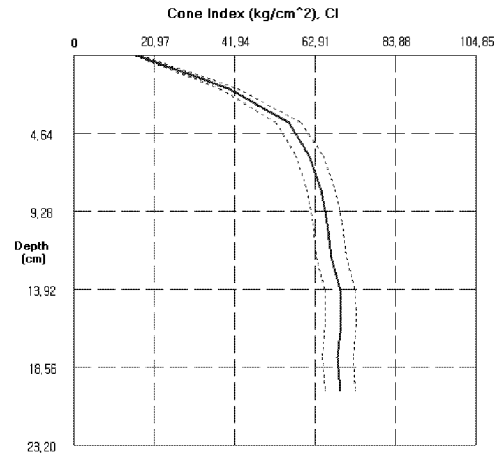
표 6. 콘시험해석 결과와 실내시험결과와의 비교: 전단강도 정수

내부마찰각 ( $\phi^\circ$ )-표준콘			
	콘시험해석	삼축시험	전단시험
A현장	44.8 ± 1.3	43.8	47.2

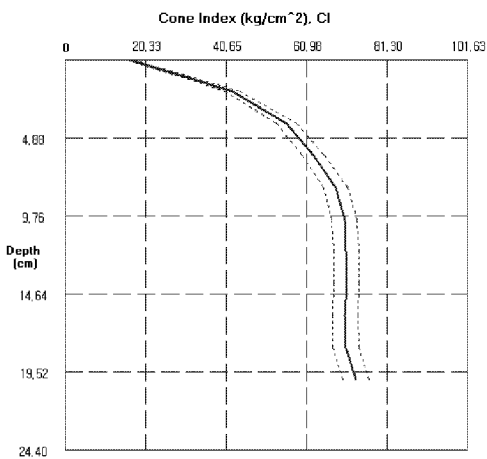
그림 7.은 B현장에 대한 콘관입시험 결과를 관입깊이에 따라 콘지수와 평균변동계수 변화를 대비하여 도시한 것이다. 10회와 60회를 제외하곤 평균변동계수 값이 크지 않음을 알 수 있다.



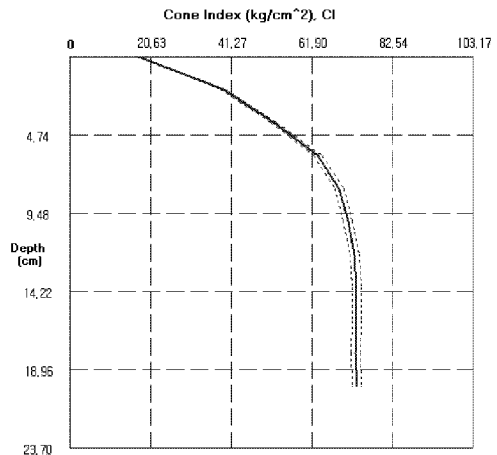
(a) 10회 다짐 (12.23% COV)



(b) 20회 다짐 (5.75% COV)

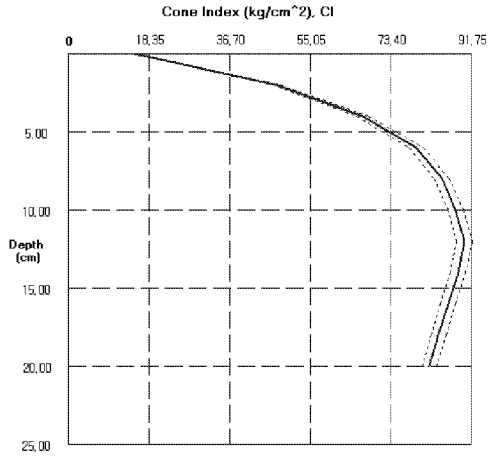


(c) 30회 다짐 (4.48% COV)

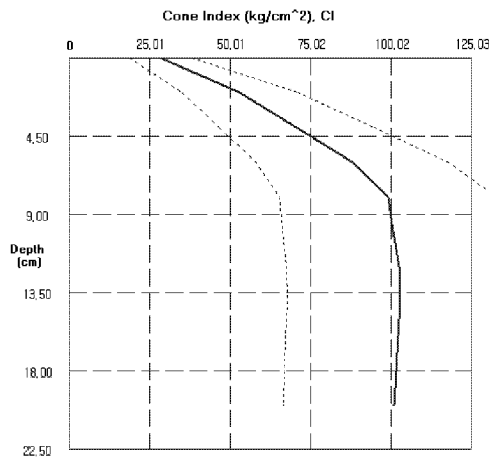


(d) 40회 다짐 (1.59% COV)





(e) 50회 다짐 (1.98% COV)



(f) 60회 다짐 (34.01% COV)

그림 7. 다짐횟수 증가에 따른 콘지수곡선 및 평균변동계수의 변화 콘-1(大) (콘의 정점각 30 deg.)

그림 8.은 A 현장에서 획득된 콘지수 결과 그래프로써 콘 정점각 30°일 때 다짐횟수의 증가에 따른 평균콘지수의 변화를 깊이 에 따라 도시한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 다짐횟수가 증가(다짐에너지 증가)함에 따라 평균콘지수값이 증가하지만 임의 깊이를 경계로 하여 증가정도가 확연히 다름을 알 수 있다. 이는 상대적으로 다짐횟수가 많이 소요되어야 하는 곳이거나 한 층의 다짐두께가 적정 두께 이상일 경우 기존의 평판재하시험에 의해서는 표층의 지지력에 의존하여 잘못된 다짐도를 산출할 수 있음을 의미한다. B현장의 경우 토질특성상 A현장과 일치하는 결과를 구하지는 못하였으나 10 - 50회 까지는 대체적으로 유사한 경향이 발견 됨을 알 수 있다.

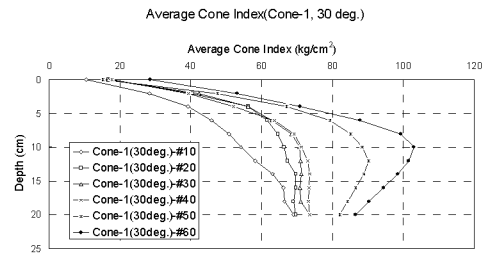


그림 8. 다짐횟수 증가에 따른 평균 콘지수변화 그래프

## 5. 결 론

현장 다짐차량에 간단히 견착하여 도로 노상토의 다짐도와 다짐 대상토층의 진단강도 정수를 파악할 수 있는 콘관입시험기와 구동 시스템 및 해석프로그램을 개발하였다. 개발된 시스템을 현장에 실 적용한 결과 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다:

- 1) 콘지수의 대표치를 측정하고 이를 이용해 해당 다짐토층의 강도정수와 강성도를 계산해 낼 수 있었으며 이로부터 상대적인 다짐정도를 파악할 수 있었다.
- 2) 콘관입 저항치로부터 해석된 진단강도 정수 중 흙재료의 내부마찰각은 실내시험결과중 삼축시험에 근접한 경향을 보였으며 진단시험결과보다는 작은 값을 보였다. 반면 점착성분에 대한 평가는 추가적인 시험과 관입속도에 대한 결과의 연관성을 규명할 필요가 있음을 확인하였다.
- 3) 기존 현장에서 널리 사용되는 평판재하시험에 의한 다짐도 평가는 노상의 층두께와 다짐횟수에 따라 크게 잘못된 결과를 도출할 수 있음을 확인하였으며 개발된 본 시험기를 사용할 경우 이와 같은 불합리 점을 완전히 극복할 수 있다.

## 참고문헌

1. 박영호 (1996), “지반-궤도차량의 상호작용에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울대학교

2. Rohani, B. and Baladi, G.Y.(1981) “Correlation of Mobility Cone Index with Fundamental Engineering Properties of Soil”, Technical Report SL-81-4, US Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS, USA
3. Hardin, B.O. and Drnevich, V. P. (1972) "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98, No. SM7, 667-691
4. Vesic, A.S.(1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Masses", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM3