

## 상수관로 파손으로 인한 지반함몰 발생메카니즘에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on Generating mechanism of The Ground Subsidence of Due to Damaged Waters supply Pipe.

김영호<sup>1</sup>, 김주봉<sup>2</sup>, 김도원<sup>3</sup>, 한중근<sup>4\*</sup>

Youngho Kim<sup>1</sup>, Joo-Bong Kim<sup>2</sup>, Dowon Kim<sup>3</sup>, Jung-Geun Han<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Nonmember, Master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nonmember, Master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

<sup>3</sup>Nonmember, Bachelor's course, School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Ground subsidence caused by damaged water pipe and sewer is recently increasing due to the aging of city and pipeline in many city. Although many recent studies have verified characteristics of ground subsidence due to wastewater pipe breakdown, research about characteristics of ground subsidence due to water pipe is insignificant. subsidence due to water pipe is insignificant. This study aims to identify the ground failure mechanism caused by water and sewer pipe breakdown. Accordingly, we conducted an indoor model experiment to verify characteristics of ground subsidence considering characteristics of ground and ground failure. The water pipe pressure and velocity head was considered to find out ground subsidence mechanism. Also comparative analysis is conducted by analyzing relative density and fine-grain content considering embedded condition of water pipe. When the relative density and seepage pressure is low, small scale ground subsidence can occur, but when the conditions are opposite, ground subsidence occur in large scale and expands to ground level over time. Furthermore, it is acknowledgeable that ground cavity that is formed after soil run off due to seepage in deep earth, maintains steady strength and stays on the ground level for long period.

#### 요 지

상수도관의 파손에 따라 발생하는 지반함몰은 최근 많은 도시에서 증가하고 있다. 이는 도시의 노후화에 따른 파이프라인의 노후화에 기인한다. 하수도의 파손에 따른 지반함몰특성은 최근 많은 연구들을 통해 밝혀지고 있지만, 상수도에 의한 지반함몰 특성 연구는 미진한 상태라 할 수 있다. 본 연구에서는 상수도관의 파손에 따른 매설관 상부지반의 지반함몰 발생메카니즘을 알아보기 위해 지반특성과 상수도관에서의 압력 및 속도수두에 따른 지반붕괴특성을 실내모형시험을 통해 고찰하였다. 상수도관의 매설상태를 고려하여 상대밀도와 세립토의 함유량에 따라 비교분석하였다. 상대밀도와 침투압이 작은 경우에는 소규모지반함몰이 발생할 수 있고, 반대인 경우에는 지중공동이 크게 발생하면서 일정시간이 지난 후 지표면으로 확대되어 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 지중 깊은 곳에서 침투압에 의한 토사유출이 발생한 이후 형성된 지반공동은 장시간동안 지표면 부근에서 일정한 강도를 유지하고, 지반공동이 장기간 유지될 수 있음을 알 수 있었다.

**Keywords** : Lab. test, Relative density, Seepage pressure, Ground Subsidence, Cavity, Water pipe.

Received 2 Jun. 2017, Revised 19 Jun. 2017, Accepted 21 Jun. 2017

\*Corresponding author

Tel: +82-2-820-5255; Fax: +82-2-816-4160

E-mail address: [jghan@cau.ac.kr](mailto:jghan@cau.ac.kr) (J. Han)

# 1. 서론

최근, 국내에서는 소규모의 지반함몰발생 규모를 넘어 대규모의 지반붕괴가 발생하는 등 도심지에서의 피해는 나날이 증가하고 있으며, 인명피해 뿐 아니라 잠재적 지반함몰에 따른 위험으로 불안은 더욱 증가하게 되었다. 이러한 도심지에서의 지반함몰은 산업화에 따른 도시화에 따라 근대도시로부터 최근 현대화되는 과정까지 짧은 시간에 확대되었고 21세기에는 도시의 노후화에 따른 도시재생과정이 필요불가결하게 되었다. 이와 함께 도심지에는 많은 상하수관로가 지반에 설치되었고, 특히 상하수도는 사람들의 생명줄과 같아 도시건물과 도로 지하에 거미줄처럼 연결되어 있지만 지반 내 위치하고 있어 노후화에 따른 파손의 위험성이 항상 잠재되고 있다. 최근 들어 세계적으로 도심에서는 상하수도 파손에 따른 지반함몰발생이 급속히 늘어나고 있다. 국내에서는 2014년 서울에서 발생한 대형 지반함몰 사건 이후 법정부적 차원의 조사와 대책 방법들에 대한 연구가 수행되어 오고 있다. 그러나 지반함몰의 발생규모는 대부분 소규모이며, 발생위치는 약 1.5m 내외에서 발생하고 있어서 깊은 심도로부터 지반연약화에 따른 지반함몰의 진행과정에 대해서는 연구가 부족한 실정이며 이에 대한 연구가 필요한 상황이다. 현재까지 시공되고 있는 복구기술의 경우도 지표로부터 토사를 뒤채움하거나 그라우팅공법에 의한 것이 대부분이다. 이러한 공법들도 다짐에 대한 불확실성, 재료분리, 그라우팅을 위한 플랜트 설치로 시간 및 작업시간 및 공간의 과다하게 소요되는 등 지반보강에 대한 불확실성 등과 같은 문제로 인하여 2차 지반함몰 피해가 발생할 가능성이 항상 존재하게 된다.

Fig. 1은 2016년 발생한 한국 및 일본의 상수도관 파손



(a) Case in Korea (b) Case in Japan

Fig. 1. Ground subsidence due to damaged water pipe (Korea and Japan)

에 의한 지반함몰 사례를 보여주고 있다. 상수도의 파손에 의해 주위지반이 연약화되어 지속적인 파괴로 발전하며 그림과 같이 대규모의 지반함몰이 발생하게 된다. 그러나 이러한 지반함몰의 발생메카니즘에 대해서도 아직 연구는 미진한 실정이라 할 수 있다.

이와 같이 세계 곳곳에서 발생하는 지반함몰은 발생 원인에 따라 구분된다. 먼저, 싱크홀(sinkhole)은 강우에 의한 우수가 지반내로 침투하여 지하수로 합류하게 되어 지표아래의 석고층, 석회암 등으로 구성된 기반암이 물과의 접촉으로 인하여 용해되며 지반 내 공동을 형성하여 공동이 점차 확대됨에 따라 지표층이 침하되거나 함몰되는 현상을 말한다(Seoul city, 2015). 이와 같은 사례는 주로 해외에서 많이 발생되며, 국내 수도권은 대부분 화강암·편마암 지반으로 자연적 원인에 의한 싱크홀이 발생할 확률은 극히 드물다(Lee, 2014), 두 번째는 인위적 원인으로 인하여 발생하는 지반함몰로 규명하고 있다. 후자의 경우에 대한 발생 원인에 대해서 서울시(2015)에서는 Fig. 2에서와 같이 흙의 이동형태에 따라 (a)상하수관 유입형, (b) 매설관 하부 공간유입형, (c) 매립재 공간유입형 및 (d) 구조물·공사장 배면유입형으로 총 4가지로 분류하였다. 이와 더불어 2010년 이후 2014까지 지반함몰 발생 원인으로서는 하수관 손상 81.4%, 상수관 누수 1.8%, 굴착공사 등 16.8%로 보고되었고(Fig. 3 참조) 2010년 이후 2×2m이상의 도로함몰이 발생한 현황은 굴착공사 관련 57%, 상수관 29%, 하수관 14%로 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Fig. 4. 참조). 즉 하수관거에 비해 관로 내에 압력이 상시 존재하는 상수도관은 하수관거에 비하여 발생 빈도는 낮지만, 발생된 이후 지반에 끼치는 영향범위가 크다는 것을 알 수 있으며 노후 상수도관은 누수와 부식에 취약한 PVC

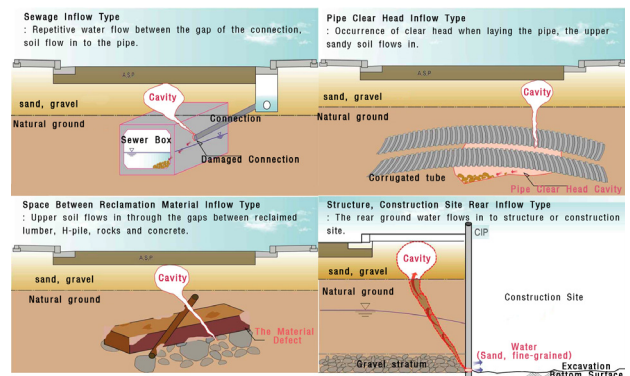


Fig. 2. Cause of ground subsidence in accordance to movement type of soil (Seoul City, 2015)

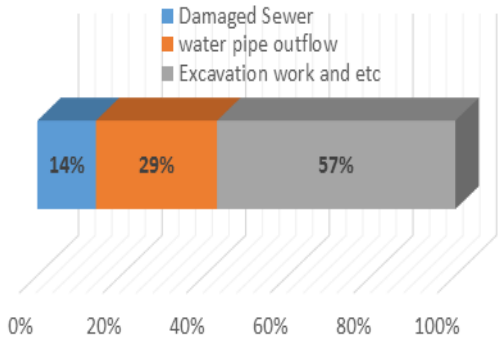


Fig. 3. Cause of ground subsidence classified by causes after 2010 (KIGMR (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2014)

관, 회주철관, 아연도강관 및 강관 등이 대부분으로 이루어져 있기 때문이다.

하수도관의 파손에 의한 지반함몰을 위한 연구는 다음과 같은 연구결과들이 제시되어 있다. Sato & Kuwano (2009)는 소형모형토조를 이용하여 육안으로 확인한 이완면적과 공동 공간, 배출토사량을 통하여 공동 및 이완영역의 확장에 대하여 분석하였고, Kuwano et al.(2010)는 공동 및 흡입자 이완양상과 정량적 평가를 위한 모형토조실험을 이용한 정수위 토사 유출실험, 이완영역 특성 파악을 위한 콘 관입시험을 진행하였다. 이러한 실험을 통하여 지반 내 공동 및 이완영역의 확대 주원인으로 포화도 상승에 따른 유효응력의 저하, 침투력에 의한 파괴, 세립분 유출, 공동 확대에 따른 지반의 불안정화로 분석한바 있다. Kweon et al.(2016)은 다양한 조건에서의 공동의 확장과정에 관한 기초모형실험을 실시하였으며, Oh(2016)는 표준사를 이용하여 사질토지반에서의 하수관거로 인한 공동 발생메커니즘 규명을 위한 실내 모형실험을 진행하였다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 상수도관에 의한 지반함몰은 하수도관에 의한 영향보다 비교적 급속하게 발생하는 것으로 판단될 수 있지만 상수도관의 파손 등에 기인한 지반함몰의 발생메커니즘은 아직까지 체계적으로 분석되지는 못한 실정이라 할 수 있다. 즉, 상수도관의 파손은 관내의 압력과 유수흐름속도에 따라 뒤채움된 지반의 연약화정도에 크게 영향을 미칠 뿐 아니라 이에 따라 지표면의 관의 파손과 동시에 혹은 일정시간이 지난 후 붕괴되는 특성을 보이게 되므로 이에 대한 지반특성을 고려한 상수도관 파손에 기인한 지반함몰메카니즘을 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 상수도관의 파손 및 기존 시공 상태에 따른 주변지반의 상태를 고려하고, 상수도관내의

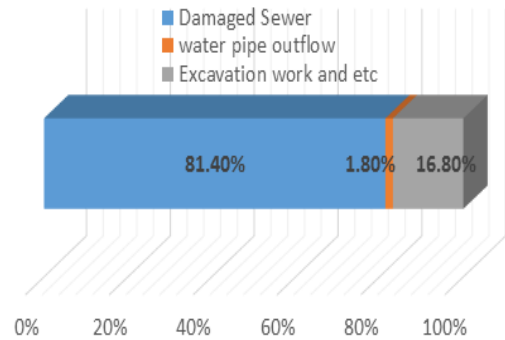


Fig. 4. Present condition of ground subsidence classified by causes greater than 2×2 m (KIGMR (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2014)

압력과 상수흐름의 속도를 고려한 수압의 영향을 고려하여 지반함몰발생 형상을 실내모형실험을 모사함으로써 규명해 보고자 한다.

## 2. 모형실험을 이용한 지반함몰 모사 실험

### 2.1 모형실험 개요

본 논문에서는 상수도관로 내 수압이 지속적으로 작용하여 지반 내 모사지반의 토사 유실이 연속해서 발생하는 조건에서 지반함몰 발생단계 및 지중 내 발생하는 공동 및 이완영역 형상에 대해 알아보하고자 하였다. 실험을 위해 관로 뒤채움재 시공조건은 상대밀도를 고려하였으며 국토부(2016)에서 조사 제시한 지반침하가 상당수 발생한 다짐 불량 지반조건과 설계시 고려되고 있는 상수도공사 표준시방서(2014), 하수관거공사 표준시방서(2010) 등을 참고하여 시료조건을 선정하였다. 또한 상수도관 파손정도를 고려하기 위해 트랩도어 개방 폭을 최소 2mm부터 고려하였다.

### 2.2 실험조건

#### 2.2.1 사용시료 및 조건

상수관거 파손을 모사하기 위하여 실제 지반과 유사한 뒤채움재 조건을 모사하기 위하여 상수도공사 표준시방서(2014)와 하수관거공사 표준시방서(2010)를 참고하였다. 관로의 뒤채움재로는 현장에서는 일반적으로 발생현장도를 주로 사용한다. 즉, 되메우기 재료는 현장토가 다음 조건을 만족하는 양질토일 경우 사용이 가능 하도록 하고 있

다. ① 최대치수 100mm 이하, ② 4.75mm체 통과량 25~100%, ③ 0.075mm체 통과량 15% 이하, ④ 소성지수 10 이하, ⑤ 시방 다짐 실시한 흙 수정N치 10 이상.

따라서 이에 부합하는 시료를 인위적으로 모사하기 위해 주문진 표준사를 주재료로 사용하였다. 또한 세립분 경우 하수관거 굴착토사 되메움 조건 입경  $75\mu\text{m}$  15%이하를 통하여 기준 이하 및 기준치를 초과하는 황토를 10%, 20%를 각각 혼합하여 조성하였다. 지반의 다짐도는 상수도관로에 의한 지반함몰이 자주 발생하는 빈도의 상대밀도를 고려하여 느슨한 상태, 중간정도상태 및 조밀한 상태로 각각 구분하였으며 일반적인 시료의 함수상태가 건조상태인 0%~10%인 경우를 고려하여 최댓값인 10%를 초기함수비로 설정하였다.

하수관거공사 표준시방서(2010)에서는 관거공의 뒷채움재는 관주위의 경우 90% 이상, 관 상단 및 노반의 경우 95%이상 다짐을 원칙으로 하며 일반적으로 다짐도와 상대밀도( $D_r$ )는 다음과 같은 관계식을 갖도록 하고 있다.

$$R(\%) = 80 + 0.2D_r(\%)$$

상기 식을 적용하였을 때, 시방서 기준 관 상부 지반의

목표 다짐도( $R$ ) 95%는 상대밀도( $D_r$ ) 75%와 같다. 따라서 본 실험에서 모사한 지반의 상대밀도는 느슨, 보통, 조밀의 정도로 각각 25, 50, 75%로 설정하였다.

### 2.2.2 모형토조

모형실내실험을 위하여 Fig. 5와 같이 토조를 자체 제작하였으며, 실험에 사용된 토조의 크기는  $0.9(L) \times 0.15(W) \times 0.7(H)\text{m}$ 이며, 높이 0.6m까지 성토를 진행하였다. 상수관거 파손부의 확장성 고려 혹은 지중내 공동의 꼬리부 확장을 모사하기 위하여 Fig. 6과 같이 토조하부에 설치된 트랩도어는 최대 20mm까지 연속적으로 조절이 가능하도록 제작하였다. 더불어 전·후면 강화유리로 제작하여 발생된 공동의 형상을 육안관찰 및 영상으로 남길 수 있도록 제작하였다.

한편, 모형토조는 토조 하부 트랩도어로 물이 유입되어 지반을 이완시키는 상·하수관거 파손의 모사형태에 의한 지반함몰을 모사할 수 있다.

본 연구를 위해 도심지 도로하부 1.5m내외에 설치되어 있는 상수도관을 고려하여야 하며 대부분은 건조한 상태로 지반은 존재하게 된다. 따라서 토조 하부 트랩도어를

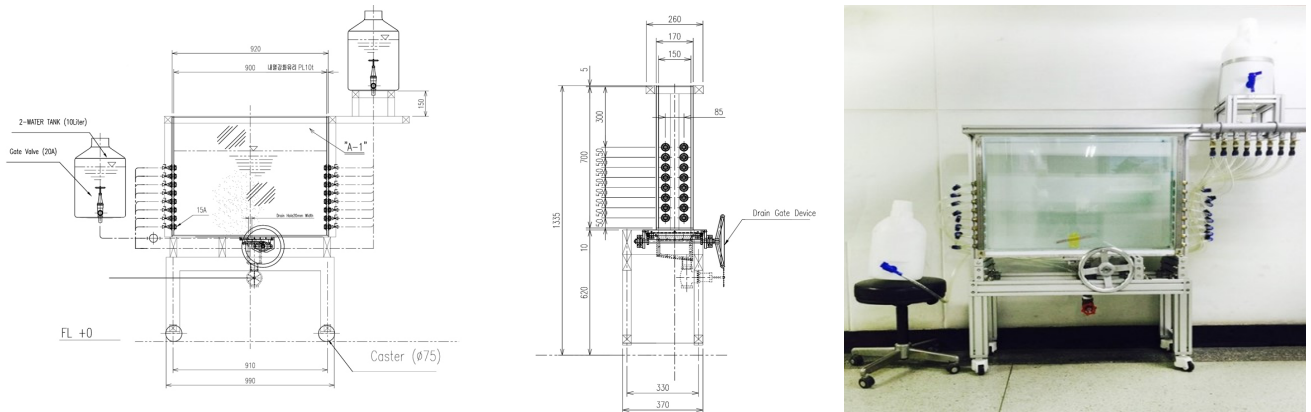


Fig. 5. Plan and picture of soil tank

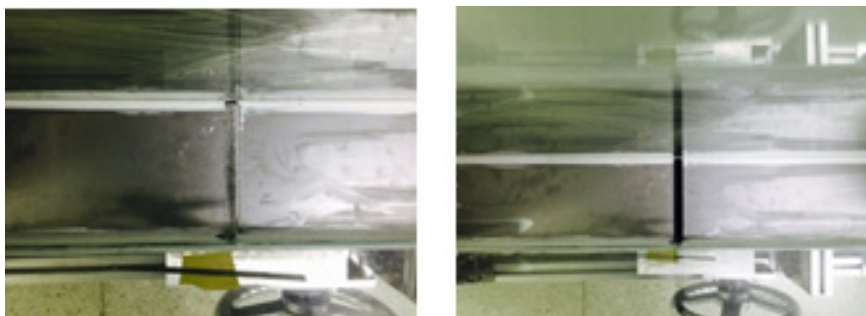


Fig. 6. Size control of the trapdoor (left 0 mm, right 20 mm)



통해 상부지반으로 물이 유입되는 조건을 고려하였으며 이에 의한 상수관거 파손상태를 모사하고 이에 의한 지반의 이완이 촉진되고 지표부분까지 이완부분이 확장되어 결국 지반함몰에 이르게 되는 실험을 진행하였다.

### 2.2.3 실험방법

실험은 Table 1과 같이 현장상태를 고려하여 조립분과 세립분을 일정량으로 세립분 함유량과 상대밀도에 따라 실내시험을 진행되었다. 모사지반의 조성은 Table 2의 물성치를 기준으로 성토 높이(0.6m)와 상대밀도에 따른 시료의 중량을 산정한 후, 일정높이에서 시료를 낙하시켜 5cm 두께로 다짐봉을 이용하여 층다짐을 반복 실시하였다. 또한 지반의 거동을 쉽게 관찰하기 위해 표준사를 색사로 사용하여 관찰이 용이하도록 하였으며 실험초기부터 종료 시까지 카메라로 촬영하여 동영상을 이용하여 분석하였다.

목표로 하는 상대밀도로 Table 1 및 Fig. 7과 같이 모사지반을 조성한 후, 트랩도어를 2mm로 확장 시켜 관로의 파손부위를 모사하였으며 토조 중앙부에 위치한 트랩도어 하부 토사받이를 통하여 물을 주입하였다. 이때 상향 주입되는 물의 관내유속을 3m/sec를 고려하였고 관내 압력은 최소 147kPa인 상태가 실내실험에서는 과다하게 평가될 수 있어 상수도관내 유속에 의한 속도수두 이상이 될 수 있고, 지반의 붕괴형상을 파악하기 위해 압력수두를 최소한으로 고려하여 전체수두는 0.6m를 고려하였다. 즉, 관내의 압력 및 속도수두를 고려하여 수두차 0.6m 조건으로 수두차에 의한 물의 이동이 없을 때까지 일정량의 물을 지

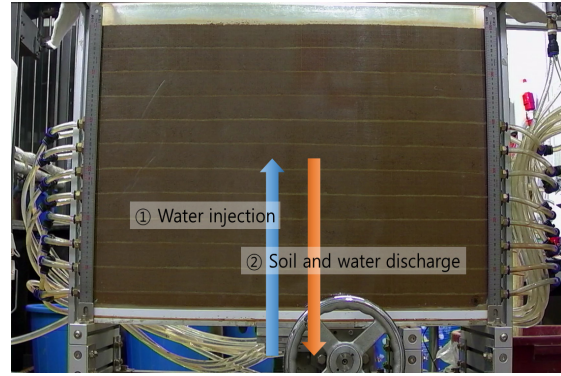


Fig. 7. Mimetic diagram of the experiment

반으로 주입하였으며 지반내 공동이 발생됨에 따라 일정량의 토사와 물이 트랩도어를 통하여 배출되고, 지반내 공동붕괴 후 일정시간동안 안정화 되는 상태를 반복하면서 유입되는 물의 양, 배출토사량, 지반내 공동의 발생 및 이완상태 등을 관찰하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 사용시료의 물리역학적 특성

본 실험에 사용된 시료는 세립분이 포함된 현장조건을 고려하여 표준사와 세립분(황토)을 배합하였으며 배합비는 표준사:세립분의 비율을 9:1, 8:2로 각각 조성하였고 다짐도에 따른 상대밀도는 Table 1과 같다. 사용된 시료는 통일분류법에 따라 실트질 모래(SP-SM, SM)로 구분되었으며 최소단위중량은 1.432~1.441t/m<sup>3</sup>, 최대단위중량은 1.694~1.792t/m<sup>3</sup>이었다. 또한, 조성된 상태에 따른 지반의 강도정

Table 1. Basic experimental condition

Fine-grained soil content (%)	Relative Density ( $D_r$ , %)	Loose ( $D_r < 35$ )	Regular ( $35 < D_r < 65$ )	Dense ( $65 < D_r$ )
		Case, 1	Case, 2	Case, 4
10				
20			Case, 3	

Table 2. Physical and mechanical Characteristics

Specimen	Gs	$\gamma_{dmin}$ ( $g/cm^3$ )	$\gamma_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	Direct shear test		USCS
				c ( $g/cm^2$ )	$\phi$ (°)	
Standard sand 90% + Fine-grained 10%	2.625	1.4315	1.694	0.0006~0.0074	35.21~40.8	SP - SM
Standard sand 80% + Fine-grained 20%	2.625	1.4407	1.792	0.0025~0.0089	28.74~32.45	SM

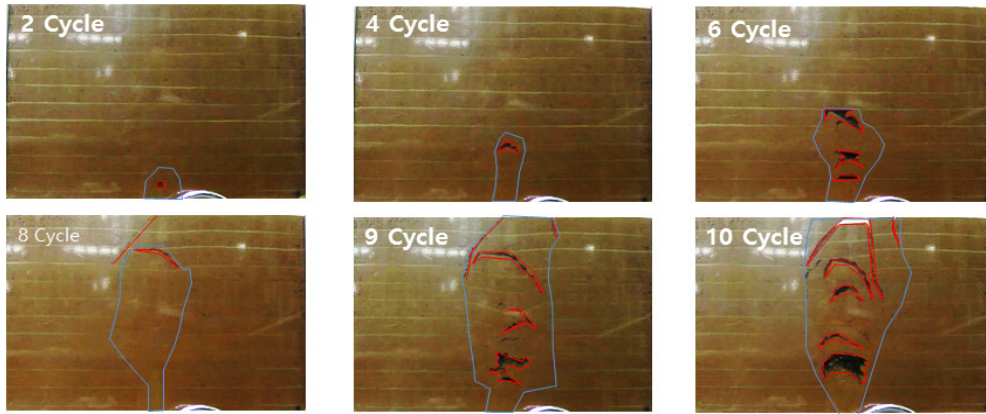


Fig. 8. Fine-grained 10% and loose ground condition

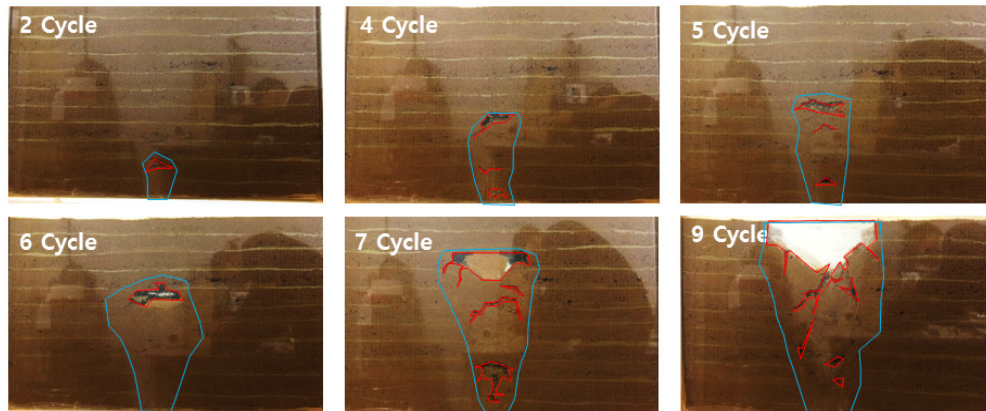


Fig. 9. Fine-grained 10% and regular ground condition

수는 Table 2에서 보는 바와 같이 내부마찰각은 세립분에 따라 각각  $35.21^{\circ}\sim 40.8^{\circ}$ ,  $28.74^{\circ}\sim 32.45^{\circ}$ 이었으며 점착력은 세립분에 따라 미소한 차이 값을 보였다. 이는 실트질 모래에서 대부분 모래성분으로 소성특성을 갖지 않기 때문으로 판단된다. 한편비중, 최소건조단위중량, 최대건조단위중량을 각각 KS F 2308(2016), KS F 2345(2016), KS F 2312(2016)에 의거하여 실험한 결과이다.

### 3.2 모형토조에 의한 실험 결과

현장지반에서 상수도관 매설 후 뒤채움재의 다짐상태를 고려하여 다짐이 느슨한 경우, 중간인 경우 및 조밀한 경우에 대해 각각 고려하였으며 이때 지반조건은 세립분이 10%, 20% 각각 혼합된 경우를 고려하였다. 또한, 언급된 바와 같이 상수도관의 파손에 따른 관내 압력 및 속도 수두를 고려하여 물의 유입과 토사의 유출상태를 반복하여 실험을 수행하였다. 단, 대부분 현장에서는 뒤채움재가 조밀하게 시공되어야 하지만 지반함몰이 발생하는 지반은

조밀상태이하의 다짐상태에서 주로 발생하는 조사결과를 반영하여 실험조건을 조정하였다.

#### 1) 느슨한 지반상태를 고려한 경우(Case 1)

느슨한 다짐상태를 고려한 표준사:세립분의 비율이 9:1인 경우로 지반의 상대밀도는 25.6%로 지반을 모사하였으며 초기함수비( $w_0$ )는 10%, 초기 트랩도어 개방 크기는 2mm, 수두차( $\Delta h$ )=600mm, 초기간극비( $e_0$ )=0.81에 대한 실험을 진행하였다.

Fig. 9는 실험 과정에 대한 스냅사진이며, 실험은 11사이클까지 진행되었고, 10사이클에서 함몰이 발생되었다. 4사이클 주입 시 토조 전, 후면에 아칭형태의 공동이 발생하였으며 공동은 점차 상부의 토사가 무너짐에 따라 점차 상향으로 이동하는 거동을 보였다. 타 실험과는 달리 공동이 상부까지 확장되어 함몰이 발생하지 않고, 8사이클 진행시 상부 10cm 지점에서 균열이 발생한 후, 함몰이 발생하였다. 또한, 본 모사지반상태에서는 지반공동이 확실히 발생하는 시기인 2사이클에 걸린시간은 0.6시간, 최종적

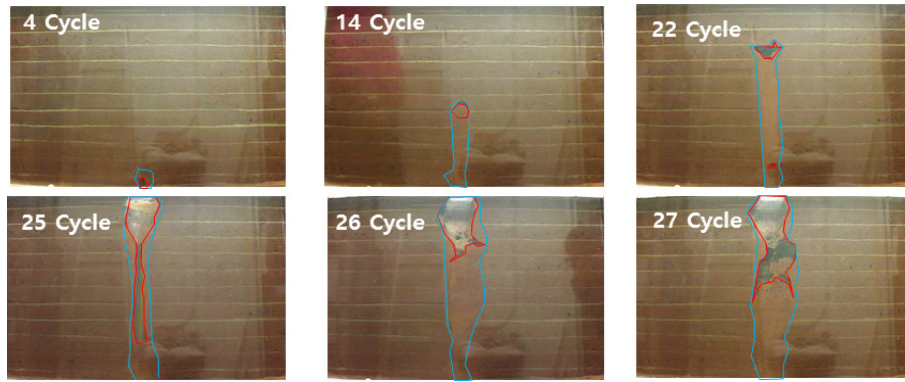


Fig. 10. Fine-grained 20% and regular ground condition

으로 지표면까지 파괴면이 확장되는 되는데 걸리는 시간은 2.6시간이었다.

### 2) 중간정도의 다짐상태를 고려한 경우(Case 2, Case 3)

본 실험은 중간정도 다짐상태에서 세립분이 10% 및 20%인 경우에 대해 각각 상수도관의 파손에 따른 영향을 고려한 것으로 두 실험에 대한 실험시료의 상대밀도는 각각 52%와 53%로 모사하였고 두 경우 모두 초기함수비( $w_0$ )는 10%, 초기 트랩도어 개방 크기는 2mm, 수두차( $\Delta h$ )=600mm로 모사하였고, 초기간극비( $e_0$ )=0.77 및 0.62로 각각 모사되었다.

먼저, 세립분이 10%인 경우에 대한 실험결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같다. 실험은 9사이클까지 진행되었으며, 9사이클에서 함몰이 발생하였다. 초기에서는 주로 세립분이 유출되었으며, 물이 주입됨에 따라 토조 하부의 트랩도어 부근에서 아칭형상의 공동이 발생되었다. 물의 유출입에 의해 공동 상부 토사가 붕괴되어 점차 상향으로 이동하였다. 물의 유입이 중단되었을 때는 역삼각형 형태의 공동으로 변한 뒤, 점차 아칭형상으로 변했다. 본 실험에서 지반공동이 뚜렷하게 발생하는 시점은 5사이클이 진행된 1.3시간이 경과된 후였으며, 지반내 공동이 지반이 느슨한 경우보다 크게 발생하였다. 또한, 최종적으로 9사이클이 진행되어 지표면으로 공동이 확장되어 지표면의 함몰이 발생하는 시간은 3.3시간으로 느슨한 경우보다 긴 시간이 소요되었으며, 이완영역도 확산되며 지반내 공동이 크게 발생한 후 지표면으로 확대되어 최종적으로 함몰되는 경향을 보였고, 지반함몰 규모도 크게 확장되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 세립분이 20%인 경우 중간다짐정도의 상태를 모사한 지반에 대한 실험 과정을 나타내었다. 총 27사

이클까지 진행하였으며, 24사이클 진행시 토사의 거동이 변함이 없어 트랩도어를 2mm에서 4mm로 확장하였고, 25사이클에서 함몰이 발생하였다. 초기 사이클을 진행하는데 목표로 하는 물의 양만큼 주입이 되지 않았으며, 4사이클에서 토조 하부 중앙부 트랩도어 부근에서 아칭형상의 공동이 발생되었다. 공동은 수평방향으로 확장되지 않고, 수직방향으로 점차 성장해나갔으며, 공동의 하부에는 토사가 붕괴됨에 따라 이완영역을 형성하였다. 실험 후반부로 갈수록 공동 하부와 트랩도어 상부의 이완영역은 세립분이 배출된 조립질의 토사가 다수 존재하였다.

### 3) 조밀한 상대밀도의 경우(case 4)

조밀한 지반의 세립분 20%가 포함된 지반에 대한 모사 상태로 상대밀도 82%의 모사 지반을 형성하였으며, 초기 함수비( $w_0$ )는 10%, 초기 트랩도어 개방 크기는 2mm, 수두차( $\Delta h$ )=600mm, 초기간극비( $e_0$ )=0.52에 대한 실험을 진행하였으며 그 결과는 Fig. 11에서 보는 바와 같다.

총 55사이클 진행하였다. 본 실험에서 지표면에서는 함몰이 발생되지 않았으나, 토조하부에서는 광범위하게 공동이 확장되어 실험을 중단하였다. 실험 초기에는 지반의 밀도에 의해 물 주입이 제대로 형성되지 못하였고, 장기간이 지난후 주입된 물에 의해 토조 중앙부에서 공동이 발생하였다. 그 이후, 발생된 공동하부와 상부에서 동시에 붕괴가 발생하며 이완영역이 확산되었으나 초기 고려한 상수도관파손범위에서는 더 이상 붕괴가 발생하지 않았다.

따라서, 추가적인 상수도관 파손의 확대를 고려하여 트랩도어를 9mm까지 확장한 후 토사배출량이 많아지면서 지반 공동은 대규모의 타원형상으로 크게 확장되는 것을 알 수 있었다. 즉, 지반의 상대밀도와 상수도관의 파손정도에 따라 지반내 공동의 발생 및 크기가 영향을 받음을 알 수 있다.



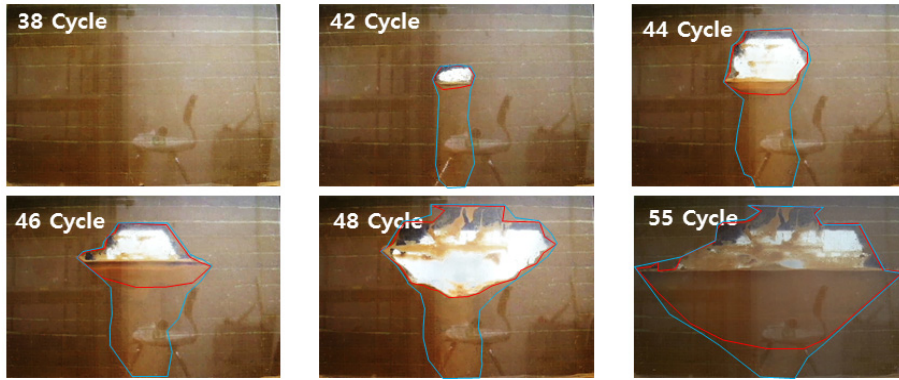


Fig. 11. Fine-grained 20% and dense ground condition

## 4. 모형실험 결과 비교·분석

### 4.1 지반의 상대밀도에 따른 파괴모드변화

상수도관 매설 뒤 뒤채움 된 지반의 상대밀도에 따른 지반파괴모드 변화를 고찰하여 보면 다음과 같다. 먼저, 세립분이 10% 포함되어 있는 경우, 뒤채움재의 다짐도를 고려한 경우를 비교하여 파괴모드의 변화를 고찰하여 보았다. Fig. 12에서 Case. 1과 Case. 2는 느슨한 정도와 중간 정도의 상대밀도를 나타낸 경우이다. 전자는 공동이 토조 하부로부터 중간 높이까지 확장 된 이후, 상부 균열이 발생하여 추후 균열을 따라 지반이 갑작스럽게 붕괴되는

형태를 보인 반면, 후자는 다른 케이스와 동일하게 공동이 점차 확장되어 지표까지 확장되는 형상을 볼 수 있다. 이는 상대밀도에 따른 전단강도의 차이로 인하여 공동상부의 토사가 연약한 상태로 공동 상부지반의 상대하중을 버티지 못하고 파괴된 것으로 판단된다.

세립분이 20% 포함된 지반의 상대밀도가 보통인 경우와 조밀한 경우가 Case. 3과 Case. 4이다. 상대밀도가 보통인 Case 3인 경우 지표면의 지반함몰까지 25사이클이 소요된 반면, 뒤채움재의 상대밀도가 조밀한 경우인 Case. 4는 55사이클까지 진행하였지만 함몰된 형상까지는 확인이 불가하였다. 또한, 지반이 조밀한 다짐이 되어 있는 경우 초기에는 토조 내부로 물의 유입이 거의 이루어지지 않

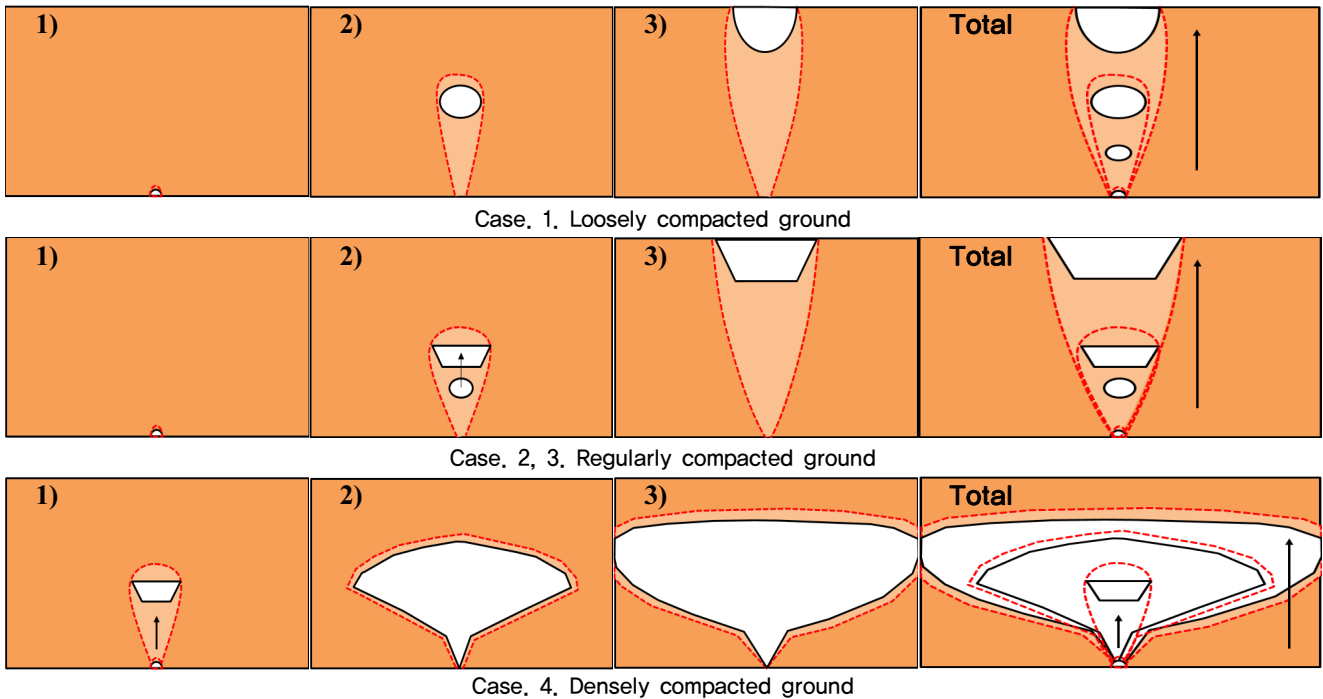


Fig. 12. Shape of ground subsidence according to experimental conditions in chronological order



아 약 20사이클 가량 주입과 배출이 지속됨에도 토사배출은 거의 관찰되지 않았다.

즉, 하수관거공사 표준시방서(2010)에 명시된 상대밀도 75%(다짐도 95%) 이상을 준수하여 관로 매설 후 뒤채움재를 시공하였을 경우 관로의 파손에도 불구하고 지반함몰이 발생하기까지는 많은 시간이 필요한 것으로 판단되며, 이 경우 GPR 탐사 등에 의한 지반조사결과를 바탕으로 지반함몰이 발생하기 이전에 보수, 보강할 수 있는 여유시간을 확보할 수 있게 될 것이다.

#### 4.2 세립분 함유량에 따른 파괴모드 변화

상대밀도가 느슨한 경우는 실제 현장에서 고려될 수 있는 상황이 아니므로 여기서는 중간정도 이상의 상대밀도를 갖는 지반에 대해서만 고찰하여 보았다.

세립분 10%와 20%로 함유하고 있지만 동일한 상대밀도를 갖는 지반을 모사한 경우인 Case. 2와 Case. 3은 각각 지반함몰이 발생되기까지 여러 사이클의 반복하중을 가하였지만, 발생하기까지 경과된 시간의 차이는 크지 않았고, 지중에서의 공동발생형상이 다소 차이는 있으나 Fig. 12와 같이 초기 발생 상태에서부터 최종 지표면에서 지반함몰이 발생하는 경향은 유사하게 나타났다. 다만, 세립분이 많은 경우는 초기 상수도관 파손부위로부터 초기에 물의 주입이 원활하지 않기 때문에 공동발생 시간이 다소 지연 발생하였다. 또한, 다짐도가 유사한 경우 세립분에 따라 수평, 수직방향의 침투율에 영향을 받는 것으로 보이며 이에 대한 경우는 추가적인 실험 등을 통해 지속적 관찰이 필요한 것으로 판단된다.

한편, 지반의 다짐도가 커서 상대밀도가 조밀한 경우를 모사한 Case. 4의 경우는 정상적으로 상수도관을 매설한 후 뒤채움재가 정상적으로 다져진 경우이다. 이 경우는 Fig. 12에서 보는바와 같이 상수도관 파손이 소규모로 일부분 파손시 관내에서 유출되는 유량이 초기에는 거의 지반에 영향을 미치지 못하고 있고 유량이 지반을 연약화 되는데는 긴 시간이 소요되므로 초기 관측이 힘든 단점이 있지만 상수도관의 파손부위를 탐사 등을 통해 조사하고 보강할 수 있는 여유시간을 갖을 수 있는 장점도 있다.

또한, 상수도관의 파손이 확대되면서 관외로 유출된 물의 침투에 의한 지반공동은 확대되어 광범위하고 지표면 부근까지 발달하게 된다. 그러나 지반공동이 발생한 이후에도 공동상부지반이 지지층을 유지하고 있어 지반함몰을

억지하는 효과도 있게 된다. 이 경우 지중에 발생된 지반공동에 대해 지표로부터 보강할 수 있는 긴급보강공법의 적용이 필요하게 된다. 하지만, 다양한 지반함몰 위험지역 및 발생지역의 추가피해를 고려하였을 때 현장지반다짐도를 측정하는데 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에 대해 추후 진행 예정인 변위에 따른 공동 주변 이완영역 확인을 위한 추가실험을 진행하여 보수 및 보강을 위한 지표를 도출하여 현장 적용성을 높이고자 한다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 최근 도심에서 자주 발생하고 있는 상수도관로의 파손에 따른 지반함몰의 발생메카니즘을 규명하고자 하였다. 이를 위해 관로가 파손된 경우, 관로 내 수압이 지속적으로 작용하여 관외부로 유출되어 지반으로 침투가 발생하는 경우를 모사한 모형실험을 수행하였다. 또한, 모형실험에서는 상수도관로의 매설시 뒤채움된 지반의 상대밀도 및 세립분 함유율을 기반으로 하여 현장시공 상태를 반영하여 적용하였다. 이 과정을 통해 상수도관로의 파손에 따른 지반공동 및 지반함몰의 발생특성을 비교 분석하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 관로 내 압력 및 속도에 따른 수압이 지속적으로 작용하여 관 주변지반 내로 침투되는 경우 초기에 파손부에서 아칭형상의 공동이 발생하다가 지속적인 수압에 따라 발생한 지반공동은 상부로 확대되고, 주변으로 확산됨으로써 궁극적으로 지표면에서 지반함몰을 일으키는 과정을 실내모형실험을 통해 모사할 수 있었다.
- (2) 상대밀도가 유사한 지반일 경우 지반에 포함된 세립분의 함유량에 따라 초기침투력에 영향을 받은 것을 알 수 있었으며, 상수도관 파손시 상대밀도와 세립분함량에 따른 지반함몰모드가 예상 가능하였다.
- (3) 매설관로 주변에 뒤채움재의 다짐도에 따른 상대밀도 변화를 모사한 경우, 상대밀도가 느슨한 지반에서는 공동의 발생과 확산이 비교적 좁은 범위에서 발생하면서 상부로 공동발생이 전이되며, 중간정도의 상대밀도를 갖는 지반은 느슨한 상태와 유사한 거동을 보이거나 다소 공동발생범위는 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한, 상대밀도가 조밀한 경우에는 초기에 공동발생이 늦게 나타나며 지반공동이 확대, 확산되기는 하지만 지표까지 완벽하게 전이되는 경우는 어려운 것으로 나

타났다. 즉, 조밀한 지반특성의 경우 지표면의 붕괴까지는 지연시간을 갖는 것을 알 수 있었다.

따라서, 최근 발생하고 있는 상수도관 파손에 의한 지반함몰 등은 설계기준에서 제시하고 있는 다짐특성을 성실하게 유지하는 경우 급속한 붕괴보다는 지연특성을 갖게 되므로 탐사 등에 의한 사전보수, 보강방법 등을 적용함으로써 도심지에서 발생하는 지반함몰등과 같은 지반재해에 대처 가능함을 알 수 있었다.

## Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 16SCIP-B108153-02)

## References

1. Kweon, G. C., Kim, S. L., and Hong, S. W., (2016), "Basic Study on Mechanism of Cave-in in Road through Laboratory Model Tests" *Korean Society of Road Engineers*. Vol.18, No.5, pp11-19.
2. Seoul city (2015), "Seoul road sinking management policy and action manual", Seoul Road Management.

3. Oh, S. J, (2016), *Laboratory model test for identification of a rear cavity occurrence mechanism at sewage pipe in sandy ground*, Master's Thesis, Chonnam National University. pp.16-22.
4. Lee, D. Y (2014), "The down town area ground settlement, sinkhole", *Seoul Technology Story*, Vol.225, pp.1-6.
5. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2014), *Research on Causes and Policy Suggestions by Sinkhole Type*, Research report, pp.18-39.
6. Korea Ministry of land, infrastructure and transport, (2016), 2016 Occurrence of ground subsidence.
7. Korea Water and Wastewater works Association, (2010), Sewage Construction Standard Specification.
8. Korea Water and Wastewater works Association, (2014), Waterworks Construction Standard Specification.
9. KS F 2308 (2016), "Test method for density of soil particles", Korean Standards and Certifications.
10. KS F 2312 (2016), "Test method for soil compaction using a rammer", Korean Standards and Certifications.
11. KS F 2345 (2014), "Standard test method for relative density of cohesionless soils", Korean Standards and Certifications.
12. Mari SATO and Reiko KUWANO (2009), "Model tests for the simulation of ground cavity formation due to water inflow and outflow through a breakage in sewer pipe", *SEISAN KENKYU*, Vol.61, No.4, pp.678-681.
13. Reiko KUWANO, Mari SATO, Ryoko Sera, (2010), "Study on the detection of underground cavity and ground loosening for the prevention of ground cave-in accident", *Japanese Geotechnical Journal*, Vol.5, No.2, pp.219-229.