



#### 공학석사 학위논문

## 흐름 중 스포일러를 장착한 해저배관의 자가 매설에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Self-Burial of Pipeline with Spoiler in Current



2015년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

강 민 준

## 본 논문을 강민준의 공학석사 학위논문으로 인준함.





한국해양대학교 대학원



### 목 차

List of Tables		iii
List of Figures	••••••	iv
Abstract		/iii

#### 1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적	••••••	
1.2 최근 연구동향		
1.3 연구내용		
. 국부 세굴 및 스포일리	서의 원리	

# 2. 국부 세굴 및 스포일러의 원리

21	ㅎ르 주 배과 주벼이 구브 세국	11
2.1	으님 8 배신 [ 인거 하 계 2	ΤT
2.2	해저배관 아래 흐름으로 인한 터널형 침식	12
2.3	2차원 세굴	13
2.4	세굴영향인자의 매개변수	14
2.5	스포일러의 원리	17

#### 3. 스포일러를 장착한 배관 주변의 세굴 실험

3.1	실험	방법	••••	•••••	 20
3.2	실험	모형	및	조건	 23

#### 4. 연구 결과 및 고찰

4.1	스포일러 높이와 위치에 따른 세굴 양상	27
4.2	스포일러에 의한 해저배관의 자가 매설 영향	37
4.3	지반 특성에 따른 세굴 양상	44
4.4	유속에 따른 세굴심의 변화 및 자가 매설 영향	51
4.5	Keldsen 경험식과 실험결과의 비교 및 분석	60
4.6	Reynolds 수와 상대세굴심의 상관관계	62
4.7	고찰	63

#### 5. 결론 및 향후과제

5.1 결론		
5.2 향후과제 …		64
Reference	<u>s</u>	
Bibliography		
접자의 글		



#### List of Tables

Table 2.1 Seabed and flow condition for optimal spoiler performance ..... 19 Table 3.2 Experimental condition for scour around submarine pipeline spoiler \*with Included angle 30° ------ 26 

 Table 4.2 Time phase of onset of scour around 0.3 D spoiler pipe

 ..... 30 

 Table 4.3 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe

 ••••• 31 Table 4.4 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with Table 4.5 Time phase of onset of scour around 0.3 D spoiler pipe inducing Table 4.6 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with inducing incident flow heading angle 60° ······· 35 Table 4.7 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with spoiler included angle 30° inducing incident flow heading angle 60° ··· 36 Table 4.8 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.0 D ..... 40 Table 4.9 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.3 D ..... 41 Table 4.10 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D ..... 42 Table 4.11 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D\* ..... 43 Table 4.12 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.3 D, Sand diameter 0.012 cm ...... 47 Table 4.13 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.3 D, Sand diameter 0.028 cm ...... 48 Table 4.14 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D, Sand Table 4.15 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D, Sand diameter 0.028 cm ..... 50



#### List of Figures

Fig 1.1 Burying pipeline by trenching & backfilling methodology of Rockdumping organization ----- 3 Fig 1.2 Covering a concrete mattress on pipeline by Pipe-shield and Deepwater company ····· 4 Fig 1.4 A box type concrete cover by Pipe-shield company ...... 5 Fig 1.6 A track of Hangzhou bay pipline crorssing project ...... 7 Fig 1.7 Spoilers strapped on pipeline at stern of lay-barge, just before entrance to stinger by SPS company ...... 8 Fig 1.8 View of pipeline at shore approach during low tide at Hangzhou bay Fig 2.1 Three vortices induced disturbed flow around pipeline ..... 11 Fig 2.2 Piping into sand bed by onset of scour around pipeline ..... 12 Fig 2.3 Phenomenon of tunnel erosion underneath pipeline ...... 13 Fig 2.4 Expanding scour hole to span shoulder ..... 13 Fig 2.5 Developing scour depth by time history in current condition: Flow velocity 0.45 m/s, Pipe diameter 5 cm, Reynolds number 22500 ..... 14 Fig 2.6 Difference of flow pattern around a pipe with spoiler and a plain pipe: a) Pipe with a spoiler, b) Plain pipe ..... 17 Fig 2.7 Schematic of self-burial of pipeline with spoiler ...... 18 Fig 3.1 Two-dimensional flow generating basin at OSEL ..... 20 Fig 3.2 Grid for measuring scour depth ..... 21 Fig 3.3 A current generating motor ..... 21 Fig 3.4 Computer program of current generator control unit ..... 22



Fig 3.5 Acoustic Doppler Velocimeter 22 Fig 3.6 Schematic of flume experiment of scour around pipeline with spoiler

Fig 3.7 Schematic of soil distribution at Hangzhou bay ...... 24 Fig 3.8 Models of submarine pipeline spoiler, pipe diameter 0.05 m: a) No spoiler, b)  $0.3 \times Pipe$  diameter, c)  $0.5 \times Pipe$  diameter, d)  $0.5 \times Pipe$  diameter with included angle 30 ° ······ 25 Fig 4.1 Developing scour depth in time history: Fixed pipe, Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028 cm Incident steady flow heading angle  $90^{\circ}$ , Velocity 0.45 m/s ------ 28 Fig 4.2 Developing scour depth in time history: Fixed pipe, Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028 cm Incident steady flow heading angle  $60^{\circ}$ . Velocity 0.45 m/s ······· 33 Fig 4.3 Developing scour depth in time history: Free pipe, Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028cm Incident steady flow heading angle 90°, Velocity 0.45 m/s, Spoiler height 0.0 D, 0.3 D, and 0.5 D(included angle 30° for 0.5 D spoiler only) 38 Fig 4.4 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Spoiler height 0.0 D, 0.3 D, and 0.5 D(included angle 30° for 0.5 D spoiler only) ------ 40 Fig 4.5 Scour around pipe with 0.3 D height of spoiler on erodible sand bed: Sand diameter 0.012 cm, 0.028 cm ...... 45 Fig 4.6 Scour around pipe with 0.3 D height of spoiler on erodible sand bed: Sand diameter 0.012 cm, 0.028 cm ..... 46 Fig 4.7 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height; Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter; 0.012 cm ..... 52 Fig 4.8 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height; Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.028 cm ..... 53

Fig 4.9 Scour depth underneath three pipe models with different spoiler height; Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.012 cm ..... 54 Fig 4.10 Scour depth underneath three pipe models with different spoiler height; Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.028 cm ..... 55 Fig 4.11 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand diameter 0.012 cm ...... 56 Fig 4.12 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand diameter 0.028 cm ...... 57 Fig 4.13 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand diameter 0.012 cm ------ 58 Fig 4.14 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand Fig 4.15 Comparison of values of scour depth by experiment and Kjeldsen's Fig 4.16 Comparison of values of scour depth by experiment and Kjeldsen's calculation; Sand diameter 0.028 cm, No spoiler case ..... 61 



## An Experimental Study on Self-Burial of Pipeline with Spoiler in Current

Kang, Min Joon

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Pipeline executes an important role in transporting chemically stable substance in the form of liquid and gas types. Pipeline is universally applicable to diversely geological features such river, ocean and on the ground for various industrial purposes. Especially field of petroleum development, pipeline is useful for transporting crude oil and gas even if it raises the efficiency of petroleum development where oil field exists at marine environment. Pipeline transporting conducts over long distances from producing area to onshore where resources consume after securing refined oil and gas at chemical plants.

Submarine pipeline is adversely affected by marine environment, especially current condition, the flow velocity is relatively high at the shallow water where pipeline installation and operation is expected. Flow around submarine pipeline makes transforming sand bed according to local

scour induced vortex shedding that results additional static or dynamic loads on pipeline to be exposed sectionally structural damage. Due to the fact that special regard will be paid to design pipeline maintenance which is fully able to accomplish coastal process during onset of scour.

This paper deals with the mechanism of spoiler which induces scouring around pipeline. The design methodology taken to apply spoiler for accelerate pipeline being self-burial into the sand-bed by approaching experimental analysis. The experimental study is conducted to investigate self-burial ability of submarine pipeline on two different sand diameter consisting two sand-beds, 0.012 cm and 0.028 cm. Different heights of spoiler attached on top of pipeline by each case. Flume test is conducted with diameter 5 cm of PVC(Polyvinyl Chloride) pipe model applied the spoiler height 0.0 cm, 1.7 cm and 2.5 cm in steady current velocity about 0.2 m/s, 0.4 m/s, and 0.55 m/s. Models and flow velocity are reduced by scale factor( $\lambda$ ) as 15, according to geometric and kinematic similarity. Performed 54 cases of experiment to compare differences of scour depth underneath a pipe and extent of self-burial in time history. Measuring scour depth of all cases are suspended until maximum scour depth approaches within 20 to 40 minutes. As result of experimental study, the deepest scour depth appeared by 2.5 cm of spoiler height and the most effective self-burial ability is disclosed at 1.7 cm of spoiler height. Figured out the relationship between the relative scour depth and spoiler height through applying different conditions of flow velocity and sand diameter. Conducted analysis of scour depth by using Reynolds number. Compared of both experimental and calculated values of scour depth according to Kjeldsen et al. (1974) and Bijker & Leeuwenstein (1984).

KEY WORDS: Spoiler 스포일러; Self-burial 자가 매설; Local scour 국부 세굴; Free-span 자유 경간; Maximum scour depth 최대 세굴심





#### 제1장 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

빠른 속도로 고갈되고 있는 육상 자원과 달리 다양한 생물군, 석유, 가스, 희 귀 금속류 그리고 골재 등과 같은 해양 자원은 미래에 개발 가능한 부존량이 무궁무진하며 지속적인 기술의 진보로 개발이 활발히 이루어지고 있다. 최근 석 유개발 산업이 해양으로 이동함에 따라 해저 유전에서 채굴한 원유나 가스를 해상 또는 육상의 원유 처리 시설까지 이송하는 중추적인 수단으로 해저배관은 핵심적인 기자재이다. 또한 해양개발에 필요한 전력공급 및 통신 시스템, 상하 수 시설에 이르기까지 해저배관은 광범위하게 사용되고 있으며 그 규모가 점진 적으로 증가하고 있다.

육상과 달리 해양환경에 노출되어 있는 배관은 파도, 조류와 같은 외력이 작 용할 경우에 안정적인 자원 수송기능을 발휘하도록 설계되어야 한다. 또한 설 치해역의 외력환경을 토대로 배관을 설계하여도 불안정한 지질특성으로 인한 침식은 배관의 국부적인 손상을 일으키는 원인이 된다. 해저배관의 파손 시, 연 속적인 자원생산 작업의 중단으로 경제적인 피해는 물론, 원유의 유출로 오염 된 해양환경을 복구하기 위해서는 막대한 시간과 비용이 소요된다. 따라서 해 저배관에 국부적인 손상을 유발하는 주변 유동, 지질 특성 등을 면밀히 검토하 여 안정적인 해양자원 개발이 이루어질 수 있도록 설계수명을 유지할 수 있는 배관을 설계해야 한다. (오현식, 2011)

특히 해저배관의 설계과정에서 고려해야할 중요한 환경인자로는 세굴(scour) 현상이 있으며 해저지반에 착저한 배관 주변으로 빠른 조류로 인한 와류 (vortex)가 발생하여 지반의 국부적인 침식을 야기한다. 배관 전면부에 발생하는 와류는 토사를 굴착시켜 배관 아래 긴 자유 경간(free span)을 생성하고 배관의



쳐짐으로 인한 과도한 전단응력은 버클링(buckling)과 같은 구조적 손상을 일으 킨다. 비단 해저배관 뿐만 아니라 호안, 제방 및 방파제 등의 해안보전 시설에 도 세굴현상으로 인한 피해가 발생한다. (김성덕 등, 2009)

최근 해저배관의 손상을 최소화하기 위한 다양한 세굴방지공법(scour protection) 중 크게 배관 매설식과 비매설식이 있다. 대표적인 매설방식으로 Fig. 1.1에서 나타 내는 트렌칭과 백필링(trenching and backfilling)이 있으며 이는 배관의 부설저면에 분포하는 장애물을 제거하고 지반에 홈을 파는 트렌쳐(trencher)나 해수를 지반에 분사하는 제팅(jetting)장비로 선로를 굴착한 후 배관을 설치하여 토사를 매립하는 방식이다. 트렌칭과 백필링 방식은 해류 및 조류에 의한 세굴 발생이 염려되는 경우 배관을 해저면 아래 깊이 매설하기 위한 목적으로 사용된다. 안정적인 배관의 설치 및 매설작업을 위해 해양의 위험요소들을 피해야 하므로 작업을 수행할 적절한 해 양환경을 선정하는 것이 중요하다. 또한 작업에 동원하고자 하는 선박과 중장비에

배관을 설치하고자 하는 지반이 응집력이 강한 토사나 단단한 암반으로 구성 되어 있는 경우 비매설 방식을 채택한다. 배관이 연속하여 해저면에 착저되야 하므로 지반이 평탄하도록 전석, 노출암 등 장애물을 제거하거나 선로를 변경 하는 방식으로 배관의 부설저면을 우선적으로 확보한다. 배관을 선로에 따라 종단형상으로 지반에 충분히 접지되도록 하며 조류 또는 지반의 경사로 인해 배관이 부설저면으로부터 이탈할 우려가 있는 경우, Fig. 1.2와 같이 콘크리트 매트리스(concrete mattress)나 Fig. 1.3의 보호블럭(saddle block) 또는 Fig. 1.4의 콘크리트 커버(concrete cover) 등 배관의 위치를 유지할 수 있도록 충분한 무 게를 갖는 피복형 세굴방지공법을 적용한다. 비매설 방식은 배관이 지반 위에 노출되어 있으므로 조류에 의한 영향 외에 파랑하중으로 큰 압력이 작용하기 때문에 실측 혹은 모형실험을 통하여 설계외력을 검토해야 한다. 또한 해양외 력 뿐만 아니라 배관 주변의 국부 세굴로 인하여 자유 경간이 발생하는 경우, 공진으로 인한 배관의 형상변화 및 파손을 야기할 수 있다. 따라서 피복형 세 굴방지공법을 채택하는 경우, 배관을 설치하는 방식을 충분히 고려해야한다. (김경호와 오현식, 2011)





Fig. 1.1 Burying pipeline by trenching & backfilling methodology of Rockdumping organization





Fig. 1.2 Covering a concrete mattress on pipeline by Pipe-shield and Deepwater company





Fig. 1.3 Saddle block tunnel by Fish-safe company



Fig. 1.4 A box type concrete cover by Pipe-shield company

앞서 언급한 인위적인 배관 매설방식은 선박과 중장비의 거동이 적은 작업환 경에서 안전하게 배관을 설치·매설해야하므로 시간과 공간적 제약을 받는다. 또한 지속적인 파랑하중이 무거운 피복형 구조물이 설치된 지반에 작용하여 배 관의 부설저면이 붕괴할 우려가 있어 추가적인 유지보수 작업이 요구된다.





Fig. 1.5 Spoiler details by Submarine Pipeline Spoiler(SPS) company

스포일러 방식은 배관 상부에 핀(fin)을 설치하는 것으로 흐름 중 배관 주변 에서 발생하는 세굴현상을 촉진시키는 역할을 한다. 배관이 부설저면에 착저하 면 스포일러로 인해 배관의 상·하부를 지나는 흐름의 방향과 압력에 변화가 발생하여 와류가 토사를 단시간에 굴착한다. 배관 아래 토사의 굴착이 이루어 지면 일시적으로 국부적인 세굴공이 형성되는데 지속적인 흐름이 자유 경간의 폭을 확장시켜 해저배관이 토사가 빈 공간으로 침하한다. 시간이 지남에 따라 세굴공으로 토사의 매립이 이루어지는 자가 매설(self-burial) 현상이 나타난다.

스포일러를 장착한 해저배관의 경우, 콘크리트 매트리스나 보호 블럭 등 추 가적인 방지공법의 사용이 없어 작업이 간편하고 배관이 단시간에 지반 아래로 가라앉음으로써 친환경적인 피복효과와 유지보수에 따른 시간과 비용을 절약할 수 있다. 급격한 조류의 발달로 고속의 흐름장이 분포하는 해양환경에서 배관 을 설치·매설할 경우 스포일러가 다른 세굴방지공법에 비해 유리하다. 스포일 러가 처음으로 소개된 것은 1989년, 북해의 송유관 공사로 Delft Hydraulics Laboratories에서 연구한 결과를 바탕으로 Submarine Pipeline Spoiler(SPS)사에 서 스포일러를 개발하였다. (Hulsbergen, 1986)





Fig. 1.6 A track of Hangzhou bay pipeline crossing project

최근 스포일러 방식을 적용한 해양 배관 공사의 사례로는 China Petroleum and Chemical Corporation(SINOPEC)에서 수행한 Hangzhou bay pipeline crossing project가 있다. 중국 항저우 만의 환경 특성상 양방향으로 발달하는 조류로 인해 유속이 빠른 흐름장이 분포하고 모래와 실트(silt)의 입자 간격이 느슨한 점성토(cohesive soil)로 지반이 형성되어 있기 때문에 스포일러를 장착한 해저배관 주변에 세굴이 발생할 시 토사의 빠른 침식과 퇴적으로 해저배관의 자가 매설이 이루어지기 쉽다. (Xia 등, 2004)

본 논문에서는 수조실험을 통하여 지질 특성이 다른 두 가지의 지반에서 한 방향 흐름 중 높이가 각각 다른 스포일러를 장착한 해저배관 모형 주변의 세굴 양상 및 자가 매설에 대한 결과를 분석하였다. 또한 세굴과 관련된 무차원수들 과 국부 세굴의 상관관계를 분석하였으며 기존에 연구된 세굴 경험식과 실험결 과를 비교 및 검토하였다. 본 연구를 바탕으로 스포일러로 인한 배관 주변의 국부 세굴 특성을 파악하고 해저배관의 자가 매설을 촉진하는 스포일러를 설계 함에 있어 국내 기초자료를 확보하는 것에 목적을 두었다.



Fig. 1.7 Spoilers strapped on pipeline at stern of laybarge, just before entrance to stinger by SPS company



Fig. 1.8 View of pipeline at shore approach during low tide at Hangzhou bay



#### 1.2 최근 연구동향

스포일러는 해저면에 놓이는 파이프라인의 안정성 향상과 자가 매설을 촉진 시키기 위해 설계되었으며 와류로 인한 배관의 진동(Vortex-Induced Vibration, VIV)을 감소시키고 세굴로 인한 자유 경간의 소멸 시간을 단축하여 배관에 작 용하는 응력을 줄여준다. 또한 파도와 조류의 방향이 시시각각 변화하는 해양 환경에서 배관의 설치 작업에 소요되는 시간을 최소화하기 위해 스포일러의 배 열 방향을 각기 다르게 하기도 한다. (Edfeldt, 2005)

해저배관 주변에 세굴을 발생시키는 외력 인자에 관한 연구로 크게 조류 (current)와 파도(wave)의 영향으로 구분할 수 있다. 최근에 이루어진 스포일러 와 흐름 중 발생하는 배관 주변의 세굴현상에 관한 연구는 다음과 같다.

Hulsbergen (1986)은 스포일러를 장착한 배관의 자가 매설에 대한 수조실험을 수행하였다. Zhao et al. (2009)은 Computering Fluid Dynamics(CFD)를 활용하여 배 관 주변에서 세굴을 발생시키는 다양한 주요 인자를 해석하였다. Kjeldsen et al. (1974)은 해저면에 착저한 배관 주변의 국부적인 세굴심을 측정하기 위한 실험을 수행하였으며 평형세굴심의 계산식을 제시하였다. Mao (1986)와 Sumer (1990)는 흐름과 파의 영향이 세굴을 발생시키는 원인이라는 결론을 내렸다. Mao (1988)는 Bearman과 Zdravkovich (1978)의 압력계수분포를 이용하여 배관 상·하를 지나는 흐름의 압력차가 터널형 침식의 원인이 된다는 결론을 내렸다. Chiew et al. (1990) 은 관공현상(piping)이 초기 배관 아래의 세굴공을 형성하는 주요인자라는 결론을 내렸다. Gocke et al. (1991)은 파랑 중 배관의 자가 매설 실험을 수행하였으며 스 포일러를 적용하였다. Sumer et al. (2001)은 파와 흐름에 의한 배관의 자가 매설에 관한 실험을 수행하였으며 관경이 클수록, 흐름이 빠를수록 세굴심이 증가한다는 것을 밝혔다. 오현식 (2006)은 관경의 크기와 유속으로 인한 세굴폭의 변화를 차원 해석 기법을 적용하여 분석하였다. 김성덕 외 (2009)는 레이놀즈 수(Reynolds number), 프루드 수(Froude number), 쉴즈 수(Shields number)와 상대세굴심의 관 계를 분석하였다.



#### 1.3 연구내용

세굴현상은 해류나 조류와 같은 흐름의 영향이 크게 작용한다. 흐름이 끊이 지 않고 해저지반이 연약하여 유동에 의한 토사의 침식과 퇴적작용이 빈번한 해양환경에서 해저배관이 장시간동안 안정적인 수송기능을 발휘하기 위해서는 배관의 고정 정착 여부를 판단해야하며 이에 따른 배관의 설치방법을 고려하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 모래성분이 많은 사질토와 실트가 다량으로 함유된 점성토로 구성된 두 가지의 지반에서 배관의 매설방식을 고려한 수조실험을 수행하였으 며 스포일러를 장착한 해저배관 주변의 국부 세굴 특성과 해저배관 자가 매설 정도를 비교·분석하였다.

수조실험을 통해 유속이 균일한 흐름상태에서 위치가 고정된 배관과 거동이 자유 로운 배관 아래 세굴심의 변화를 시간에 따라 측정하였다. 세굴영향인자로 스포일러 의 높이 (*h<sub>s</sub>*)와 모래의 중앙입경 (*d<sub>50</sub>*)을 달리 하였다. 또한, 횡방향으로 작용하는 흐름에 의한 세굴현상을 연구대상으로 흐름의 입사각(incident steady flow heading angle)에 변화를 주었다.

실험결과를 바탕으로 시간에 따라 변화하는 세굴심과 세굴영향인자들의 상관관 계를 분석하고자 세굴과 관련된 매개변수인 상대세굴심 (relative scour depth, *S*/*D*) 과 Reynolds 수(*Re*)를 산출하였다.



#### 제 2 장 국부 세굴 및 스포일러 원리

#### 2.1 흐름 중 해저배관 주변의 국부 세굴

초기 흐름장이 지반에 착저한 배관과 접촉할 경우, 교란이 발생하여 배관 주 변으로 세 종류의 와류(vortex)가 형성된다. (Mao ,1988)

Bijker와 Leeuwenstein (1984)은 흐름 중 해저배관 주변의 침식에 대하여 기 본적인 형태를 분류하였으며 Luff erosion, Lee erosion, Tunnel erosion으로 나 뉜다. Luff erosion은 흐름장의 교란에 의해 가장 먼저 형성된 와류로 배관의 전면 하단에서 발생한다. Lee erosion의 경우, 배관의 양측면 하단에서 발생하 며 배관 아래를 지나는 난류로 인해 발생한다.



Fig. 2.1 Three vortices induced disturbed flow around pipeline

흐름장의 교란에 의해 배관 주변에 형성되는 세 종류의 와류 위치는 Fig. 2.1 과 같다. 해저배관 주변에서 토사를 이동시키는 와류(vortex) A와 B의 이동방향 은 서로 반대이다. 뒤에서부터 배관 쪽으로 토사를 이동시키는 와류 C는 와류 B로 인해 토사의 이동거리가 제한된다. 와류와 배관 아래를 지나려는 흐름의 복합적인 작용으로 인해 많은 양의 토사가 침식되고 결국 배관 아래에 국부적



인 세굴공이 형성된다. 배관 아래로 흐르는 유량이 증가함에 따라 배관 상부의 와류는 소멸하게 되고 배관의 상·하부를 지나는 흐름의 유속이 같아진다. 빠 른 유속으로 인한 세굴공이 배관의 길이방향으로 확장되며 터널형 침식(tunnel erosion)의 원인이 된다.

#### 2.2 해저배관 아래 흐름으로 인한 터널침식

Fig. 2.2는 지반과 접지된 해저배관에 유속이 빠른 흐름장이 접촉할 때 발생 하는 세굴의 초기 형상이며 배관을 지나는 흐름의 상·하 압력이 달라지는데 이는 지반에 침투하는 유동에 의한 관공현상(piping)이 원인이다. (Chiew 1990)



Fig. 2.2 Piping into sand bed by onset of scour around pipeline

세굴이 시작된 직후, 터널침식이 이루어지며 해저배관 아래 국부적으로 작은 세굴공이 형성된다. 관경에 비해 작은 세굴공으로 유량이 빠른 속도로 집중되 며 이는 지반에 작용하는 전단응력을 급격히 증가시킨다.

지반의 전단응력 증가는 아래의 식으로 정의한 증폭인자의 항으로 나타낸다.

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \tag{2.1}$$

τ는 바닥의 전단응력, τ∞는 흐름의 비교란 시 바닥의 전단응력이다.

Collection

배관 아래에서 전단응력이 증가할수록 토사의 이동 또한 증가하며 Fig. 2.3과 같이 배관 아래 토사의 양이 감소하고 터널침식이 시작된다.



Fig. 2.3 Phenomenon of tunnel erosion underneath pipeline

#### 2.3 2차원 세굴

해저배관 아래에서 발생하는 세굴은 3차원 형태를 이룬다. 앞서 언급한 바와 같이 세굴의 발달은 흐름장의 교란으로 나타나는 와류가 토사를 이동시키는 단 계이다. Fig. 2.4의 A-A처럼 형성된 세굴공이 배관의 폭과 길이방향으로 확장하 여 자유 경간(C-C)의 어깨부위(B-B)를 침식시킨다. 2차원 세굴의 발달은 배관의 측면에서 관찰한 평형세굴단면으로 고려할 수 있다.



Fig. 2.4 Expanding scour hole to span shoulder



#### 2.4 세굴영향인자의 매개변수

흐름장의 교란을 발생시키는 원인은 매우 다양하고 세굴현상의 조건과 형상 또한 광범위하다. 따라서 와류 이론에 근거한 수치해석 방법을 통해 세굴현상 을 예측하기 어려우므로 실험이나 실측의 결과로 세굴 관련 인자들의 매개변수 를 도출한다. Shields 수, Reynolds 수 등의 공식이 주로 사용된다.

시간이 경과하면서 해저지반에 착저한 배관 아래의 세굴심은 평형단계를 향 해 깊어진다. 세굴공이 더 이상 깊어지지 않고 완전히 발달한 상태의 깊이를 평형세굴심(equilibrium scour depth)이라 한다.



Fig. 2.5 Developing scour depth by time history in current condition: Flow velocity 0.45 m/s, Pipe diameter 5 cm, Reynolds number 22500



해저배관에 대한 세굴심의 매개변수는 관경이며 Reynolds 수에 관계된다. 관 경과 한 방향 흐름상태에서 해저배관 아래 평형세굴심과의 관계는 상대세굴심 (*S*/*D*)으로 나타낼 수 있다. 흐름 중 해저배관 주변의 세굴현상에 관한 연구로 Kjeldsen (1974)은 평형세굴심(*S*), 유속(*V*), 관경(*D*)의 관계를 확립하여 평형세 굴심에 대한 경험식을 제안하였다.

$$S = 0.972 \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{0.2} D^{0.8} \tag{2.2}$$

위의 동차방정식은  $9.84 \times 10^3 < Re < 2.05 \times 10^5$ 의 범위에서 적용되며 상대세굴심 이  $\theta^{0.2}$ 에 비례하는 관계를 나타낸다.

$$\frac{S}{D} \propto \theta^{0.2} \tag{2.3}$$

θ는 Shields 수를 나타내며 토사가 이동 중인 세굴 조건은 θ>θ<sub>c</sub> 이다. θ<sub>c</sub> 은 흐름의 교란 시 해저지반에 발생하는 초기세굴에 해당하는 Shields 수의 한계 값이다.

NRIME!

해저배관을 지나는 흐름은 배관의 관경(D), 배관의 정중앙 위치에서 교란되지 않은 흐름의 유속(V), 유체의 동점성계수(v), 배관의 표면조도(k<sub>s</sub>), 지반을 이루 는 토사의 중앙입경(d<sub>s</sub>)에 의해 결정된다. 차원해석으로부터 얻어진 상대세굴심 (S/D)의 무차원수는 아래의 매개변수들에 의해 결정된다.

$$\frac{S}{D} = f(Re, \theta, k^*) \tag{2.4}$$

ҝ<sup>\*</sup>는 상대조도를 나타내는 무차원수로 다음과 같다.

$$k^* = \frac{k_s}{D} \tag{2.5}$$



Reynolds 수는 점성에 대한 관성력의 비로 자연현상에서 점성의 힘이 지배적 일 때 수리학적 상사법칙을 적용하기 위해 사용하며 상대적으로 힘이 적은 표 면장력과 탄성력의 영향을 배제한다. (Warnock, 1950)

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$
(2.6)

Reynolds 수는 흐름 중 발생하는 와류와 원통형 구조물의 형상에 관련된 연구 에 주로 적용되며 세굴의 기본원리는 와류구조와 관련이 있으므로 Reynolds 함 수로 세굴심을 나타내기도 한다.

Shields 수는 토사의 이동여부를 판단하는 중요한 매개변수로 다음과 같다.

RIMF

$$\theta = \frac{U_f^2}{(\Delta - 1)gd_{50}}$$
(2.7)

 $U_f$ 는 흐름이 교란되지 않을 시 지반 바닥의 최대 전단속도, △는 토사 입자의 상대밀도, g는 중력가속도이다. 바닥 최대 전단속도는  $U_{f=}\sqrt{f/2} U_m$ 와 같이 계 산되며 Colebrook-White의 공식으로 흐름 상태에서 바닥 최대 전단속도를 다음 과 같이 나타낸다.

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = \frac{V}{U_f} = 8.6 + 2.5 \ln\left(\frac{D}{2k_b}\right) \tag{2.8}$$

V는 정상유동 중 배관 정중앙 위치에서의 유속,  $k_b$ 는 바닥조도로 2.5 $d_s$ 로 주어 진다. Shields 수는 수평에 가까운 지반에 적용되며 토사 입자의 이송에 대한 기본정보를 제시한다. Shield (1936)에 의하면 토사 입자의 크기에 따라 세굴이 진행되는 속도가 달라지며 같은 평행세굴심이라도 Shields 수에 따라 세굴과정 의 시간 축척이 다를 수 있다고 보고하였다.

Froude 수는 중력에 대한 관성력의 비를 나타내는 무차원수로 기하학적 상사 와 결합하여 수조모형실험에서 역학적 상사를 만족시키기 위한 필요조건을 제 공하는 중요한 매개변수이다.

본 연구에서는 수리학적 상사법칙을 만족시키기 위해 Froude 수를 적용하였고, 다음과 같이 나타낸다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$
(2.9)

$$\frac{V_{prototype}}{\sqrt{gL_{prototype}}} = \frac{V_{\text{model}}}{\sqrt{gL_{\text{model}}}}$$
(2.10)

V는 흐름의 유속, L은 대표 길이이다. 식 (2.10)에서는 실제현상과 모형의 Froude 수리모형을 나타낸다.

#### 2.5 스포일러의 원리

스포일러는 해저지반에 놓이는 배관의 자가 매설을 촉진시키기 위해 설계되 었으며 세굴로 인한 자유 경간의 소멸 시간을 단축하여 배관의 처짐으로 발생 하는 전단응력을 최소화한다. 지반 아래로 배관이 침하한 후 흐름에 의한 토사 의 매립이 단시간에 이루어진다. 스포일러는 파랑이 시시각각 변화하고 토사의 침식이 잦은 해양환경에서 배관의 설치작업에 소요되는 시간을 최소화하기 위 해 고안되었다. 흐름이 양방향으로 작용하는 만에서 스포일러 방식을 주로 사 용한다.



Fig. 2.6 Difference of flow pattern around a pipe with spoiler and a plain pipe: a) Pipe with a spoiler, b) Plain pipe



스포일러의 영향은 해저배관 주변의 와류 형상 및 토사의 침식 양상과 밀접 한 관계가 있다. 스포일러의 유무에 따라 해저배관 주변의 흐름패턴이 완전히 달라진다. 스포일러의 영향으로 해저배관 아래의 흐름 속도가 증가하여 터널침 식이 이루어지는 시간을 단축한다. 즉, 스포일러 존재의 유무에 따라 동시간대 에 배관 아래에 발생하는 세굴심의 차이가 생기게 되고 세굴심이 평형상태에 도달하는 시간 또한 달라진다. 해저배관 아래의 세굴심은 스포일러를 장착하였 을 때 더 깊어진다.

Fig. 2.6의 a)와 같이 스포일러를 장착한 해저배관 하부의 압력저하로 인해 배관 아래를 지나는 흐름의 방향이 상승하는 것을 볼 수 있으며 이에 따른 유 속의 증가를 확인할 수 있다. 유속이 빠를수록 흐름상태에서 굴착되는 토사의 양은 증가하게 된다.

양방향 흐름 상태에서 시간의 변화에 따라 스포일러를 장착한 해저배관의 자 가 매설이 이루어지는 단계를 Fig. 2.7과 같이 도시하였다.



Fig. 2.7 Schematic of self-burial of pipeline with spoiler



해저배관의 자가 매설은 배관이 지반에 착저한 a)상태에서 세굴에 의한 터널 침식 b)로 인해 세굴공이 발달하게 되고 평형세굴심에 도달하였을 때 해저배관 이 부분적으로 침하한다. 세굴공이 발달한 후에는 배관의 뒤쪽에서 와류가 발 생(vortex shedding)하고 이 때의 커다란 난류형 와류인 배후류(lee wake)로 인 해 배관 측면에서 발생하는 Lee erosion이 d)에서 나타난다. e)에서는 양방향 흐 름에 의해 배관의 양측면 지반에서 침식이 진행되어 배관 아래가 마루와 같이 솟아난 형태를 띤다. 이후 세굴에 의한 2차 터널침식이 발생하여 배관은 해저 지반 아래로 더욱 깊이 침하하며 유사수송에 따른 배관의 매설이 이루어진다.

스포일러를 장착한 해저배관의 효과적인 자가 매설을 위해서는 배관의 설치 공사가 이루어지기 적합한 해양환경을 선정하는 것이 관건이다. Table 2.1에서 는 실제 해저배관의 설치가 이루어진 항저우 만의 해저지반을 구성하는 토사 분포와 배관의 자가매설이 이루어지기 위한 흐름의 유속 조건을 나타낸다.

	Complete burial expected	Partial burial expected			
Seabed					
material	Sand+maximum of 10 % slit	Sand+maximum of 20 % silt			
	1945				
Current	Tidal current	Tidal current			
	more than 0.8 $m/s$	more than 0.4 $m/s$			

Table. 2.1 Seabed and flow condition for optimal spoiler performance



#### 제 3 장 스포일러를 장착한 배관 주변의 세굴 실험

#### 3.1 실험방법

한국해양대학교(KMOU, Korea Maritime and Ocean University) 해양시스템 연구실(OSEL, Ocean Systems Engineering Laboratory)의 해양공학수조에서 스 포일러를 장착한 배관 주변의 세굴현상과 자가 매설에 관한 실험적 연구를 수 행하였다. 지질의 특성과 스포일러 존재가 세굴에 미치는 영향을 검토하고자 해양공학 수조 내에 두 가지 지반을 구축한 후, 스포일러의 높이와 위치가 다 른 배관 모형을 설치하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 장비의 제원 및 실험 방법에 대한 세부사항은 다음과 같다.

(1) 2차원 해양공학수조

2차원 해양공학수조의 제원은 길이 25 m, 폭 1 m, 깊이 1.2 m이며, 피스톤 형식의 조파기가 설치되어 있다. 수심이 0.8 m일 때, 구현 가능한 최대 파고는 0.3 m, 주기는 0.5~3.0 sec이다. 또한, ISSC, ITTC, JONSWAP 스펙트럼 등 다양 한 불규칙파를 구현할 수 있으며, 양방향 흐름발생장치를 겸비하고 있다. 본 연 구에서 조파장치는 제외하고 흐름발생장치를 이용하여 실험을 수행하였다.



Fig. 3.1 Two-dimensional flow generating basin at OSEL



수조의 측벽은 내부를 볼 수 있도록 유리로 제작되었으며, 실험 조건에 따라 변화하는 세굴 양상과 세굴심의 깊이, 배관 모형의 자가 매설 정도를 측정하기 위해 실험 위치에 가로, 세로 1 cm 간격의 눈금을 표시하였다.



Fig. 3.2 Grid for measuring scour depth

(2) 흐름발생장치

흐름발생장치는 앞서 언급한 바와 같이 2차원 해양공학수조에 설치되어 있으 며, 수평 순환형 펌프방식으로 구동되고 밸브를 통해 흐름 방향을 제어할 수 있다. 유속은 최대 0.6 m/s까지 생성할 수 있으며, 펌프 회전수를 제어함으로써 유속을 조정할 수 있다.



Fig. 3.3 A current generating motor



(3) 흐름제어프로그램

흐름제어프로그램은 실험에 적용하기 위한 유속 조건을 조정할 수 있는 제어 장치로 신호입력을 위한 컴퓨터와 모터의 회전수를 조정하는 인버터 등으로 구 성되어있다.



Fig. 3.4 Computer program of current generator

control unit

(4) 음향 도플러 유속계

Collection

유속 측정을 위해 사용된 음향 도플러 유속계는 1 mm/sec ~ 2.5 m/sec 범위 내에서 측정이 가능하고, 오차 범위는 ±1 %이다. 이 유속계는 Fig. 3.5에 보이 는 바와 같이 검출부에 3개의 발이 있고, 유속 계측은 검출부에서 5 cm아래 지 점부터 가능하기 때문에 수면 주변의 속도를 측정하는데 어려움이 있다. 그러 나 다른 유속계에 비해 데이터의 정확도가 높기 때문에 널리 사용되고 있다.



Fig. 3.5 Acoustic Doppler Velocimetry



#### 3.2 실험 모형 및 실험 조건

흐름에 의한 세굴 및 해저배관의 자가 매설에 대한 실험환경으로 Fig. 3.6과 같이 높이 0.2 m, 폭 1 m의 지반을 구축하였으며 균일한 흐름이 배관에 작용 하는지 확인하기 위해 배관으로부터 흐름의 입사방향 쪽으로 2 m 떨어진 위치 에 음향 도플러 유속계(acoustic doppler velocimeter, ADV) 를 설치하였다. 음 향 도플러 유속계의 탐색 반경은 15 cm이며 관경의 정중앙부 위치에서 유속을 측정해야한다. 따라서 유속계는 지반으로부터 17.5 cm 떨어진 높이에 위치해 있다.



Fig. 3.6 Schematic of flume experiment of scour around pipeline with spoiler

본 실험에서는 실해역에 설치된 배관과 스포일러에 대한 모형의 축척비를 1:15 (λ=15)로 적용하였으며 토사 입자 크기에 대한 기하학적 상사는 제외하였다. 이 는 배관 공사가 이루어진 항저우 만의 해저지반을 이루는 토사의 평균입경이 점 토(clay) 수준인 0.02 cm 미만으로, 1:15로 토사 입자의 크기를 축소하는 것이 매 우 어렵기 때문이다. 토사 입자의 기하학적 상사를 만족하더라도 항저우 만의 해 저지반을 이루는 토사 입자의 조도(roughness), 공극비(void ratio), 간극수압(pore water pressure) 그리고 강도(stiffness)와 같은 물성치가 실험대상으로 하는 토사 와 크게 달라지기 때문에 운동학적, 역학적 상사를 만족시키는 것이 불가능하다.

본 실험에서는 토사의 평균입경이 0.012 cm와 0.028 cm로 이루어진 두 가지 지반조건에서 흐름 중 스포일러의 높이 변화로 인해 발생하는 세굴 및 자가 매



설의 양상을 비교함으로써 스포일러를 장착한 배관이 놓인 지반의 세굴현상을 규명하고자 하였다.

Fig. 3.7에서는 중국 항저우 만의 지질 자료를 나타낸 것으로 배관 공사가 이루 어진 실해역의 지반이 실트와 모래로 구성된 것을 볼 수 있다. 연구대상으로 하 는 두 가지 토사는 입자의 크기가 작고 부드러운 모래와 실트로 구성된 점성토 와 실트에 비해 모래가 다량으로 함유된 사질토로 분류되며 Table 2.1과 같이 항 저우 만의 해저지반을 이루는 토사의 배합 비율을 조절하여 지반을 형성하였다.



Fig. 3.7 Schematic of soil distribution at Hangzhou Bay

스포일러의 높이에 따른 세굴특성을 알아보기 위해 Fig. 3.8과 같이 5 cm 관경의 1/2과 1/3 높이의 스포일러를 장착한 모형을 제작하였다. 또한 횡방향 흐름에 의한 세굴영향을 파악하고자 배관 모형과 스포일러의 위치에 변화를 주어 흐름의 입사 각이 90°와 60°일 때 발달한 세굴심과 배관 모형의 자가 매설 정도를 비교·분석 하였다. Table 3.1에서는 PVC(polyvinyl chloride) 재질의 배관 모형과 실제 현장에 서 사용되는 강관(steel pipe)의 물성치를 나타낸다.

	Pipe model	Prototype
Density $[kgf/m^3]$	1450	7800
Pipe Diameter [m]	0.05	0.76
Mass per Length $[kg/m]$	0.8	262

Table. 3.1 Pipe model and prototype data



Fig. 3.8 Models of submarine pipeline spoiler, pipe diameter 0.05 m:
a) No spoiler, b) 0.3×Pipe diameter, c) 0.5×Pipe diameter,
d) 0.5×Pipe diameter with included angle 30°

수조실험에서 고정 정착된 배관 주변에 발생하는 2차원 세굴과 배관의 조건 에 따라 발생하는 세굴심의 차이를 측정하기 위해 흐름으로 인한 해저배관의 거동이 없도록 수조 양 측벽에 배관 모형을 고정하여 실험하였다. 또한 배관 모형이 지반 아래로 자가 매설되는 것을 구현하기 위해 배관 모형에 와이어를 관통시켜 배관 모형의 X, Y축 직선·회전운동 및 Z축 회전운동을 최소화하고 Z 축 직선방향으로 배관 모형이 자유로이 거동하도록 실험을 수행하였다.


실험을 통해 얻은 세굴심 측정값들을 Kjeldsen (1974)과 Bijker와 Leeuwenstein (1984)의 평형세굴심 계산값과 비교 및 분석하였다. 또한 상대세굴심(*S/D*)과 Reynolds 수의 상관관계를 분석하여 유속이 세굴심에 미치는 영향을 파악하였으 며 스포일러 존재에 따른 배관의 자가 매설에 대해 고찰하였다. 실험조건은 Table 3.2에서 다음과 같이 나타낸다.

Table. 3.2 Experimental condition for scour around submarine pipeline spoiler \* with Included angle between spoilers, 30 °

Case No.				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Scour condition				
Spoiler height [cm]	0	1.7	2.5	2.5*
Spoiler height/	0.3		0.5	0.5*
Pipe diameter [D]				
Pipe diameter [cm]	5			
Sand diameter [cm]	0.012 & 0.028			
Water depth [cm]	1945 30			
Steady flow velocity	0.2, 0.4, 0.55			
[m/s]				
Incident steady flow	60 °& 90 °			
heading angle [Degree]				
Set up pipe	Free & Fixed			



### 제 4 장 연구결과 및 고찰

#### 4.1 스포일러 높이와 위치에 따른 세굴 양상

본 연구에서 흐름 중 스포일러의 높이와 위치에 따라 변화하는 세굴공의 발 달 과정 및 세굴심을 시간 별로 비교·분석하였다.

토사의 평균입경이 0.028 cm인 평탄한 지반 위에 배관을 놓아 수조 양 측벽 에 고정하여 입사각이 90°와 60°인 흐름을 생성하였다. 실험에 적용한 모형으 로는 스포일러를 장착하지 않은 배관, 스포일러의 높이가 관경의 1/2, 1/3인 배 관 그리고 스포일러 면 사이의 각이 30°인 배관이 있다.

모든 실험 케이스에서 0.4 m/s의 흐름이 배관에 작용한지 30초 만에 터널형 침식에 기인한 국부적인 세굴이 발생하였다. 시간이 지남에 따라 배관 아래 세 굴심이 점차 증가하였다. 세굴이 시작된 지 1분 만에 관경 절반 이상 깊이의 세굴심이 형성되었다. 배관 아래의 토사가 흐름방향으로 이동하여 배관 뒤쪽에 모래 언덕을 형성하였다. 배관 아래의 세굴공이 깊어질수록 유속이 감소하여 최종적으로 평형세굴심에 도달하였다.

스포일러를 부착하지 않은 배관의 경우, 터널형 침식 이후에는 토사가 이동 하는 양이 적어 배관 아래로 비교적 얕은 평형세굴심을 형성한다. 스포일러를 장착한 배관의 경우, 배관의 길이 방향으로 발달한 자유경간과 배관 뒤쪽의 모 래 언덕이 빠른 속도로 침식되어 스포일러를 장착하지 않은 배관보다 깊은 평 형세굴심을 형성한다.

결과적으로 스포일러 높이가 관경의 1/2인 실험케이스에서 세굴심이 가장 깊 게 나타났으며, 최대 세굴심(maximum scour depth)은 유속(V)과 관경(D)이 일 정할 때 스포일러 높이(h<sub>s</sub>)에 따라 증가하는 것으로 분석되었다.







Fig. 4.1 Developing scour depth in time history: Fixed pipe, Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028 cm Incident steady flow heading angle 90°, Velocity 0.45 m/s



Table. 4.1 Time phase of onset of scour around no spoiler pipe





Table. 4.2 Time phase of onset of scour around 0.3 D spoiler pipe





Table. 4.3 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe



Table. 4.4 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with spoiler included angle 30  $^{\circ}$ 





흐름의 입사각(incident flow heading angle)은 90°를 기준으로 하였다. 스포 일러 면 사잇각이 30°이고 높이가 관경의 1/2일 경우, 스포일러 면 사잇각이 없고 스포일러의 높이가 관경의 1/3일 때보다 세굴심이 얕게 나타났다. 이는 스 포일러 면의 사잇각 영향으로 배관 아래보다 양측면에 세굴이 발생하여 다른 실험조건보다 세굴공이 천천히 발달하는 것으로 보인다.

흐름의 입사각이 60°이며 스포일러의 높이가 관경의 1/2, 1/3인 배관에 대해 실험한 결과, 흐름의 입사각이 90°일 때 보다 세굴심이 전체적으로 얕게 나타 났다. 그러나 스포일러가 높을수록 세굴심이 증가하는 양상은 흐름의 입사각이 60°와 90°에서 실험한 결과가 모두 유사하였다.



Fig. 4.2 Developing scour depth in time history: Fixed pipe,Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028 cmIncident steady flow heading angle 60°, Velocity 0.45 m/s



Table. 4.5 Time phase of onset of scour around 0.3 D spoiler pipe inducing incident flow heading angle 60  $^\circ$ 





Table. 4.6 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with inducing incident flow heading angle 60  $^\circ$ 





Set up Incident current Height of spoiler(cm) Sand diameter(cm) pipe heading angle(°) Fixed 2.5 (included angle 30°) 0.028 60 Time phase 15 sec Time phase 120 sec Time phase 2400 sec

Table. 4.7 Time phase of onset of scour around 0.5 D spoiler pipe with spoiler included angle 30  $^{\circ}$  inducing incident flow heading angle 60  $^{\circ}$ 



#### 4.2 스포일러에 의한 해저배관의 자가 매설 영향

흐름의 입사각이 90°이고 유속이 0.4 m/s일 때, 스포일러 조건이 서로 다른 네 개의 배관을 이용하여 자가 매설의 양상을 분석하였다.

흐름이 배관에 작용한지 15 초 이내에 터널형 침식이 발생하여 배관이 침하 하였다. 이후 연속적인 흐름에 기인한 2차 터널침식이 일어나 지반의 침식과 퇴적 작용이 반복되어 시간이 지날수록 세굴심이 증가하였다. 이 단계에서 지 속적인 토사의 이동으로 인해 이미 평행세굴심에 도달한 배관 주변에 경간이 또다시 발생하게 되고 국부적인 세굴공이 배관 양 끝단에서 발달하게 된다. 시 간이 지남에 따라 국부적으로 발생한 세굴공과 배관 주변으로 토사이동이 이루 어져 자가 매설이 진행된다.

Fig. 4.3과 Fig. 4.4에서는 스포일러 높이에 따른 세굴심의 깊이와 배관 주변 의 자가 매설로 인한 토사의 퇴적 여부를 확인할 수 있다. 스포일러 높이가 관 경의 1/2인 경우 세굴심이 가장 깊게 나타났으며 배관 주위로 자가 매설이 이 루어진 것을 확인할 수 있다. 반면 스포일러가 없는 배관의 경우, 배관이 가장 얕게 침하하였으며 자가 매설 현상 또한 가장 미미하게 발생하였다. 자가 매설 이 가장 원활히 이루어진 케이스는 스포일러의 높이가 관경의 1/2인 배관인 것 으로 나타났다.

Table 4.9의 평형세굴단면에서 볼 수 있듯이 시간이 경과할수록 경간 어깨에 지지되어있는 배관은 세굴로 인해 경간이 확장됨에 따라 점차 아래로 침하하게 되고, 국부적인 세굴공 없이 배관 상부에 토사가 고루 매설된 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4.3에서는 세굴로 인해 배관의 침하가 2 분 동안 급격히 이루어지는 것 을 볼 수 있다. 이 후, 침하한 배관 주변 경간이 발달하면서 토사의 매립이 추 가적으로 이루어지고, 최대 세굴심이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 배관과 경 간 사이의 공간이 소멸하게 되면 배관의 침하 깊이는 평형상태를 유지하게 되 고, 지반에 노출된 배관상부에서 토사의 침식과 퇴적이 반복된다.

d Collection



Fig. 4.3 Developing scour depth in time history: Free pipe, Pipe diameter 5 cm, Sand diameter 0.028 cm Incident steady flow heading angle 90°, Velocity 0.45 m/s, Spoiler height 0.0 D, 0.3 D, and 0.5 D(included angle 30° for 0.5 D spoiler only)



Fig. 4.4 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Spoiler height 0.0 D, 0.3 D, and 0.5 D(included angle  $30^{\circ}$  for 0.5 D spoiler only)





Table. 4.8 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.0 D





Table. 4.9 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.3 D





### Table. 4.10 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D





Table. 4.11 Time phase of self-burial pipe: Spoiler height 0.5 D\*



#### 4.3 지반 특성에 따른 세굴 양상

Shield's parameter에 따르면  $\theta$ 가 증가할수록 세굴심의 깊이도 증가하는데 이는 도사 입자가 작고 가벼울수록 흐름에 의한 도사의 이동이 활발히 이루어지 기 때문이다. 본 실험에서는 유속이 0.4 m/s인 흐름조건에서 도사의 평균입경이 0.028 cm인 사질토와 평균입경이 0.012 cm인 점성토 지반에서 발생하는 세굴 현상을 파악하고자 하였다. 지질 특성에 따른 세굴심의 차이를 분석하기 위해 스포일러를 장착한 배관을 사질토와 점성토로 구성된 두 지반에 두고 흐름 중 배관이 침하하는 정도를 파악하였다.

토사의 입자가 비교적 작고 가벼운 점성토 지반에서 유동에 의한 토사의 침 식이 사질토 보다 쉽게 발생하였고, 세굴심 또한 깊게 나타났다. 또한 지반을 구성하는 토사 입자의 크기와 상관없이 스포일러가 높을수록 세굴심이 증가하 는 것을 확인할 수 있었다.

실험에 적용한 두 종류의 지반에 대하여 배관 주변의 침하로 인해 발달한 세 굴공은 토사가 이동함에 따라 침식과 퇴적이 반복되었다. 사질토 지반에서는 배관이 침하한 뒤, 토사이동에 의한 자가 매설이 이루어졌다. 반면, 점성토 지 반에서는 토사의 침식으로 세굴심과 세굴폭의 확장이 진행 될 뿐 자가 매설이 이루어지지 않았다.

이와 같은 현상은 지반을 형성하는 토사의 성질이 서로 다르기 때문에 나타 난다. 점성토 지반은 모래가 작고 가벼우며 끈끈한 실트토를 다량으로 내포하 고 있다. 또한 상부의 지반과 유체의 하중으로 인해 지반이 깊어질수록 토사 입자들 사이의 엇물림(interlocking)이 견고해진다. 점성토 지반 표면에 전단력이 집중적으로 작용하여 깊고 넓은 세굴공을 형성하지만, 지반의 깊이가 낮아질수 록 토사의 퇴적 빈도가 낮아 자가 매설이 이루어지기 어렵게 된다. 반면, 사질 토 지반의 공극률(porosity)은 점성토 지반보다 크기 때문에 유동이 지반으로 침 투하기 쉽고, 토사의 퇴적작용이 원활하게 일어나면서 자가 매설이 이루어진다.



Collection



Fig. 4.5 Scour around pipe with 0.3 D height of spoiler on erodible sand bed: Sand diameter 0.012 cm, 0.028 cm





Fig. 4.6 Scour around pipe with 0.3 D height of spoiler on erodible sand bed: Sand diameter 0.012 cm, 0.028 cm





## Table. 4.12 Time phase of self-burial pipe:Spoiler height 0.3 D, Sand diameter 0.012 cm





Table. 4.13 Time phase of self-burial pipe:Spoiler height 0.3 D, Sand diameter 0.028 cm





# Table. 4.14 Time phase of self-burial pipe:Spoiler height 0.5 D, Sand diameter 0.012 cm





# Table. 4.15 Time phase of self-burial pipe:Spoiler height 0.5 D, Sand diameter 0.028 cm



### 4.4 유속에 따른 세굴심의 변화 및 자가 매설 영향

본 절에서는 서로 다른 유속 조건에서 세굴심의 차이를 비교하고자 배관 주 변에 발달한 최대 세굴심을 시간 변화에 따라 그래프로 도시하였다. 스포일러 의 높이가 다른 세 개의 배관을 토사 입자의 크기가 다른 두 지반에 놓아 유속 이 0.2 m/s와 0.55 m/s인 흐름 조건에서 세굴심의 차이를 분석하였다.

유속 조건이 다를 때에도 스포일러가 높을수록 세굴심이 증가하는 양상이 유 사하였다. 유속이 빠르고 스포일러가 높은 배관의 경우 세굴심이 깊게 나타났 고, 반대로 유속이 느리고 스포일러가 없는 배관의 경우 세굴심이 가장 얕았다.

Fig. 4.7 ~ Fig. 4.14를 분석하면, 토사의 평균입경이 0.012 cm인 점성토 지반 에서 세굴로 인한 지반의 침식작용이 사질토 지반보다 활발히 이루어져 세굴공 이 깊고 넓게 발달한 것을 확인할 수 있다. 이는 토사 입자의 질량에 따라 흐 름으로 인해 이동하는 토사의 양이 다른 것에 기인한다.

배관 모형의 자가 매설에 관한 경우, 토사의 평균입경이 0.028 cm인 지반에 서 자가 매설이 나타난 것을 볼 수 있다. 유속이 0.2 m/s인 경우, 배관 모형 주 위에 발달한 세굴심과 세굴폭이 0.55 m/s 유속 조건에 비해 낮게 나타났다. 그 리고 유속 조건이 0.55 m/s일 때, 관경보다 크게 형성된 세굴심으로 인해 배관 이 지반 아래로 침하하는 경우가 발생하였다.

유사수송이 가장 활발히 이루어지는 유속 조건인 0.55 m/s에서는 스포일러의 높이가 관경의 1/3인 경우, 배관 주위로 토사가 가장 고르게 매립된 것을 볼 수 있다.





Fig. 4.7 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter; 0.012 cm





Fig. 4.8 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.028 cm



Fig. 4.9 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.012 cm





Fig. 4.10 Scour Depth underneath three pipe models with different spoiler height: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3, and 0.5 of pipe diameter Sand diameter 0.028 cm





Fig. 4.11 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand Diameter 0.012 cm





Fig. 4.12 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.2 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand Diameter 0.028 cm





Fig. 4.13 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand Diameter 0.012 cm





Fig. 4.14 Cross section of equilibrium scour depth and self-burial of pipe: Flow velocity 0.55 m/s, Spoiler height 0.0, 0.3 0.5 of pipe diameter, Sand Diameter 0.028 cm



### 4.5 Kjeldsen 경험식과 실험결과의 비교 및 분석

Fig. 4.15와 Fig. 4.16에서는 Kjeldsen (1974) 및 Bijker와 Leeuwenstein (1984)의 세굴심의 계산값을 실험값과 비교·분석한 것을 나타내었다. 그래프를 분석하면, 유속 0.4 m/s,와 0.55 m/s에서 실험값과 계산값이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 그리고 스포일러를 장착하지 않은 배관 아래의 세굴심과 흐름의 상관관계에서 유속이 빠를수록 세굴심이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 스포일러의 높이가 같은 경우에는 토사 입자의 크기에 따라 세굴심이 다르게 나타났으며 토사 입자 의 크기가 작을수록 세굴심이 깊게 나타난 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 4.15 Comparison of scour depth by experiment and Kjeldsen's calculation; Sand diameter 0.012 cm, No spoiler case





**Fig. 4.16** Comparing values of scour depth by experiment and Kjeldsen's calculation; Sand diameter 0.028 cm, No spoiler case

두 그래프에서 나타내는 계산값은 해저지반에 놓인 배관의 세굴심을 계산하 기 위한 Kjeldsen et al. (1974)의 경험식 (2.2)을 바탕으로 하였다. 이 때 흐름 중 배관에서 세굴심에 대한 매개변수는 관경이다.

Bijker와 Leeuwenstein (1984)는 Kjeldsen의 경험식을 추가적으로 연구하여 토사 입자 크기에 따른 세굴심 변화를 계산하기 위한 목적으로 다음과 같은 수 정된 식을 제안하였다.

$$S = 0.972 \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{0.2} D^{0.78} d_{50}^{-0.44} \tag{4.1}$$
#### 4.6 Reynolds 수와 수상대세굴심의 상관관계

실험을 통해 얻은 무차원수, 세굴공의 깊이와 배관 외경의 비를 나타내는 상 대세굴심 (*S*/*D*)과 점성에 대한 관성력의 비를 나타내는 Reynolds 수를 도입하 여 유속과 세굴심의 상관관계를 파악하고자 하였다.

Reynolds 수가 증가할수록 상대세굴심 또한 증가하는 것을 Fig 4.17에서와 같 이 확인하였다. 스포일러가 높을수록 세굴심이 증가하였으며, 토사 입자 크기가 작아지면 Shields 수는 증가하기 때문에 평균토사입경이 (*d*<sub>50</sub>) 0.012 cm로 이루 어진 지반에서 세굴심이 깊어지는 양상을 실험결과의 분석을 통해 확인할 수 있었다.



Fig. 4.17 Comparing the relative scour depth and Reynolds number



#### 4.7 고찰

스포일러가 높을수록 배관 아래 최대 세굴심은 시간에 지남에 따라 깊어지 며, 스포일러의 높이( $h_s$ )에 대한 관경(D)의 비가 1/3인 실험케이스에서 자가 매 설이 효과적인 것으로 나타났다.

흐름의 입사각이 60°보다 90°일 때 세굴심의 깊이가 큰 것으로 나타났다.

흐름에 의한 배관의 움직임을 구속하고 z축 방향의 상하운동만을 고려한 실 험케이스의 경우, 정상흐름의 입사각이 60°, 스포일러 면 사잇각이 30°인 경 우에서 세굴심이 가장 깊은 것으로 나타났다.

흐름 중 세굴심이 가장 깊게 나타나는 지반의 입자크기는 0.012 cm인 것을 확인할 수 있었다.

토사 입자의 크기가 0.012 cm, 0.028 cm인 두 지반에서 배관의 자가 매설 유 무를 비교하였을 때, 입자크기가 0.028 cm인 지반에서 스포일러 높이가 관경의 1/2, 1/3 인 경우, 자가 매설을 이루었다.

유속이 빠를수록 세굴심은 증가하며 토사 입자의 크기가 작고 가벼울수록 유 사수송이 더욱 활발하게 발생하였다.

배관주위에서의 토사매립은 토사 입자의 엇물림이 강할수록 이루어지기 어렵다.



## 제 5 장 결론 및 향후과제

#### 5.1 결론

스포일러의 높이와 토사 입자의 크기를 달리하는 지반의 종류, 흐름의 입사 각 그리고 유속 조건에 따라 배관이 매설되는 깊이 및 세굴 양상을 파악하고자 하였다.

토사의 침식·퇴적이 발생하기 쉬운 지반과 유속이 빠른 해양조건에서 배관 공사를 고려할 시, 스포일러 방식을 제안할 수 있다.

본 연구의 결과는 스포일러의 최적설계와 해저배관 공사에서 사용되는 세굴 방지공법에 대한 기본 자료로 활용할 수 있다.

#### 5.2 향후과제

본 연구의 결과를 바탕으로 향후 흐름과 파랑이 작용하는 해양환경에서 배관 주변에 발생하는 세굴양상에 관한 연구, 양방향 흐름에서 배관 주위에 발생하 는 세굴 양상에 관한 연구, 스포일러 간격에 따른 배관 주변 세굴현상 연구, 그 리고 PIV(particle image velocimetry)기법을 이용하여 스포일러를 장착한 배관 주변의 유동장 해석 연구 등의 수행을 통해 실해역에 적용할 수 있는 스포일러 의 최적화 설계를 위한 기초자료를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.



### Reference

- Chiew, Y.M. 1990. Mechanics of Local Scour around Submarine Pipeline, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 116, No 4, pp.515~520.
- Gocke, K. Tunc and Gunbak, A. Riza (1991). Self-burial and Stimulated Self-Burial of Pipelines by Waves, Middle East Tech. University, Ankara, Turkey, pp.308~314.
- Hulsbergen, C. H. 1986. Stimulated Self-Burial of Submarine Pipelines, Delft Hydraulic Laboratory, OTC pp.171~175.
- Mao, Y. 1988. Seabed Scour under Pipelines, Proc. 7th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering Conference, ASME, Houston, TX, pp.33~38.
- Hulsbergen, C. H. 1989. Effect of Spoilers Submarine Pipeline Stability, Delft Hydraulic Laboratory, OTC pp.337~349.
- Sumer, B. M., Truelsen, C., Sichmann, T., Fredsoe, J. 2001. Onset of Scour below Pipelines and Self-Burial, Coastal Engineering, Vol 42, No 4, pp.213~235.
- 김성덕, 안광국, 이호진, 이성민, 2009. 흐름에 의한 관로의 세굴특성. 한국지반 환경공학회 논문집, 10(7), pp.117~123
- 오현식, 2011. 천해역에서 파와 흐름에 기인한 해저관로 주변의 국부 세굴폭 특 성. 박사학위논문, 충북대학교

Collection

# Bibliography

- 박승범 저 2010. 최신 건설재료실험 문운당
- Hoffmans, G.J.C.M & Verheij 1997. Scour Manual, Balkema Rotterdam

Sumer B. Mutlu & Jorgen Fredsoe 1997. Hydrodynamics around cylindrical structures, World Scientific





## 감사의 글

본 연구를 위하여 학문적으로 아낌없는 조언과 실험에 많은 도움을 주셨 으며 연구자 이전에 한 사람으로서의 됨됨이를 갖추는 것이 무엇보다 중요 하다는 것을 깨닫게 해주신 조효제 지도 교수님, 황재혁 선배님, 한성훈 선 배, 지원이 형에게 진심으로 감사드립니다.

후배 나경원, 장민석, 김재희에게는 열심히 연구하여 본인이 이루고자 하 는 것을 성취하기 위한 뜻 깊은 시간을 보내란 말을 전합니다.

대학원 석사 학위를 수료하기 까지 물심양면으로 지원해 주시며 항상 무 궁한 사랑을 베푸시는 부모님, 오랜 승선 생활로 고생하고 있을 여동생 민 영, 그리고 곁에서 큰 힘이 되어준 지민에게 이 논문을 바칩니다.



