

규칙파 실험에 의한 수중터널의 거동 및 동수역학적 특성 고찰

오상호* · 박우선** · 장세철*** · 김동현****

Oh, Sang-Ho*, Park, Woo Sun**, Jang, Se-Chul***, Kim, Dong Hyawn****

Investigation on the Behavioral and Hydrodynamic Characteristics of Submerged Floating Tunnel based on Regular Wave Experiments

ABSTRACT

In this study, physical experiments were performed in a two-dimensional wave flume to investigate the hydraulic and structural performance of a SFT model. The experiments were made by generating regular waves of different heights and periods under various conditions of buoyancy to weight ratio (BWR) and water depth as well. Through the analysis of the experimental data, it was clarified that the sway and heave motions of the tunnel body linearly increased with wave height and period. In contrast, the roll motion was rather insignificant unless wave height and period were comparatively large as the design wave. Similarly proportional relationship with respect to wave height and period was obtained in case of the maximum tensile force acting on the tension legs and the wave loads on the tunnel body. Regarding the change of water depth or BWR conditions, generally decreasing trend was obtained according to increase of water depth but decrease of BWR for both of the magnitudes of structural behaviors or wave loadings on the SFT structure.

Key words : Submerged floating tunnel, Tension leg, Hydrodynamics, Wave force, Physical experiment

초 록

이 연구에서는 2차원 조파수조에서 수리모형실험을 실시하여 수중터널 모형의 수리학적, 구조적 성능을 고찰하였다. 수심 및 부력 대 자중비를 다양하게 변화시킨 조건에서 파고 및 주기가 서로 다른 규칙파를 조파하여 실험을 수행하였다. 실험 자료의 분석을 통해서 연직방향 및 횡방향 동요가 파고 및 주기에 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다. 반면에, 회전 운동의 크기는 파고 및 주기가 설계파 정도로 커지지 않으면 별로 크게 나타나지 않았다. 마찬가지로, 계류장력 및 수중터널에 작용하는 파력도 파고 및 주기에 따라 선형적으로 증가하였다. 수심 및 부력 대 자중비의 변화와 관련해서는, 구조적 거동 및 수중터널에 작용하는 파력의 크기 모두 수심 증가 및 부력 대 자중비 감소에 따라서 전체적으로 감소하는 경향이 나타났다.

검색어 : 수중터널, 인장각, 동수역학, 파력, 수리모형실험

* 정희원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 책임연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Ocean Science & Technology · ohsangho@kiost.ac)

** 정희원 · 한국해양과학기술원 책임연구원 (wspark@kiost.ac)

*** 한국해양과학기술원 기술원 (scjang@kiost.ac)

**** 군산대학교 부교수 (welcomed@naver.com)

Received May 15, 2013/ revised July 3, 2013/ accepted August 6, 2013

1. 서론

잠수식 부유 터널(Submerged floating tunnel) 또는 수중터널(Underwater tunnel)은 부력에 의해 물속에 부유하거나 지지보가 자중을 부담하여 수중에 존재해 있는 터널을 의미한다. 이러한 터널 개념은 수심이 깊은 호수 또는 해협을 횡단하는 구조 형식으로서 제안되었으며(Grantz, 2010), 일찍이 노르웨이, 일본, 중국, 이탈리아 등의 국가를 중심으로 타당성 조사 및 관련 연구가 추진된 바 있다(FEHLR, 1996; Kanie, 2010, Mazzolani et al., 2010). 수중터널은 교량 또는 해저터널과 마찬가지로 바다 또는 호수로 분리된 육지 사이를 이동하는 교통 연결 수단으로 이용 가능하며, 튜브 모양으로 되어 있는 구조적 특징을 활용하여 각종 물질 및 에너지 수송, 발전소 방수로 시설, 수중 실험실, 기타 특수 목적 이용 시설 등으로의 활용도 고려할 수 있다.

전 세계적으로 수중터널의 적용 가능 지역은 다양하게 분포한다. 덴마크, 노르웨이, 스웨덴의 북유럽 3국에 분포하는 다수의 해협을 연결하는 스칸디나비아 링크 계획, 일본 대마도를 거쳐 한국과 일본을 연결하는 한일 해저/해중터널 계획을 비롯하여 베링 해협, 메시나 해협, 지브롤터 해협, 보스포루스 해협 등도 수중터널 적용의 주요 검토 대상 지역에 속한다. 특히, 일본에서는 1990년대 초부터 다년간의 연구를 수행하여 홋카이도의 훈카(Funka)만을 대상으로 비교적 구체적인 수중터널 건설을 계획한 바 있다(Society of submerged floating tunnel technology, 1997a; Kanie, 2010). 가까운 장래에는 위에서 언급한 지역들 중에서 지형 조건에 따라 전 구간 또는 일부 구간에 실제로 수중터널이 건설될 것으로 전망되고 있다(Ostlid, 2010).

수중터널의 실용화와 관련하여 계획 및 설계 시의 기본적인 검토 사항인 해양외력에 따른 터널 구조물의 동요 및 유체력 특성을 분석한 연구가 지속적으로 수행되어 왔으며(Hong and Ge, 2010; Jakobsen, 2010; Kunish, 2010), 최근, 수중터널에 대한 관심이 높아지면서 연구 범위도 넓어지고 있는 추세이다. 이러한 몇몇 연구로서 Lu et al.(2011)은 파랑 하중 하에서 수중터널의 계류선(tether)이 느슨해지는 현상(slack)에 대한 수치해석을 수행하고 이러한 현상이 발생하는 것을 방지할 수 있는 설계 개념을 제안하였다. 또한, Tariverdilo et al.(2011)은 동적하중에 따른 수중터널의 진동에 대하여 계류선의 강도(stiffness)를 증가시킴으로써 수중터널의 동적 변위를 제어할 수 있다고 보고하였다. 한편, Dong et al.(2012)은 수중터널에 비상상황이 발생하였을 경우 긴급하게 대피할 수 있는 장치가 설치될 경우의 동수역학적 영향을 수치모델링을 통해 고찰하였다. 국내에서도 최근 수중터널에 관한 연구가 본격적으로 추진되면서 연구 논문들이 점차 소개되고 있다. Park et al. (2012)은 해중터널에 작용하는 파랑 하중의 산정 방법에 대해서 비교 연구하였으며,

Han(2012)은 수중터널의 건설과 운영 시에 발생할 수 있는 재해 위험요소를 도출하고 퍼지 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법으로 각 위험요소의 수준을 정량화하는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 일본 홋카이도 훈카만을 대상으로 수행된 선행연구(Society of submerged floating tunnel technology, 1997a; 1997b)에 제시되어 있는 수중터널 안을 대상으로 규칙과 수리모형실험을 수행하였다. 비록 수중터널의 단면 형상은 동일하지만 파랑조건과 수심 및 부력 대자중비(BWR: Buoyancy Weight Ratio)를 다양하게 변화시키면서 수중터널의 거동 및 수리특성을 분석하였다. 특히, 비디오 촬영 및 영상 분석을 통해 수중터널의 거동을 정밀하게 평가하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형 설치

수리모형실험은 길이 53 m, 높이 1.25 m, 폭 1 m인 2차원 조파수조에서 이루어졌다. 수중터널 실험 모형은 총 연장 30 km의 훈카만 연결 교동로 중에서 수중터널 형식으로 제안된 7 km 구간의 설계안(Type A)을 대상으로 제작되었다. 터널 본체는 직경 23 m인 원형 단면이며, 해저면에 고정된 연직 방향의 계류선(tension leg)을 통해 수중 외력에 대한 터널의 거동을 구속하는 구조 형식이다. Fig. 1에는 수중터널의 개념도 및 주요한 파라미터에 대한 정의를 나타내었다.

실험 모형은 수조의 제원을 고려하여 원형의 1/100 규모로 제작되었으며, 수중터널 모형의 길이는 98 cm로 하였다. 수밀이 잘 되도록 터널 모형을 제작하여 물이 내부로 침투하는 것을 방지하였으며, 수중터널 내부에 추(weight)를 설치하여 자중을 조절할 수 있도록 하였다. 일본 수중조사연구회(Society of submerged floating tunnel technology)에서 고려한 수중터널 구조 형식과 최대한 비슷

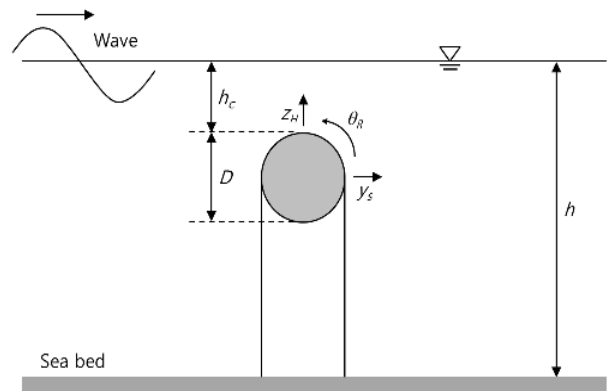


Fig. 1. Schematic Diagram and Definition of the Parameters of the SFT

하계 터널 모형을 재현하기 위해서 계류선을 터널 모형의 바깥쪽 면을 둘러서 설치하고 계류선이 수중터널로부터 이탈되지 않도록 모형의 위쪽 반원 단면을 따라서 고정하였다. Fig. 2에는 수조 내에 실험 모형을 설치한 사진을 제시하였다. 계류선의 양쪽 끝은 수조 바닥에 설치된 도르래를 통과하여 장력을 계측하기 위하여 설치된 로드셀에 연결하였다. 수중터널을 따라서 횡방향으로 2지점에 계류선을 설치하였으며, 그 사이 간격은 50 cm로 하였다. 따라서 Fig. 2에 보인 것처럼 총 4개의 로드셀을 수조 바닥에 설치하였다. 또한, 부착식 파압계 8개를 터널 모형 중앙 단면을 따라서 설치하여 수중터널에 작용하는 파압을 측정하였다. Fig. 3에 파압계 및 로드셀의 배치도를 제시하였다. 한편, 수중터널의 거동 특성은 모형의 한쪽 측면(유리면)에 2개의 표식자를 붙이고 실험 중 비디오 촬영을 실시한 후 영상처리 기법을 통해 분석함으로써 평가하였다. 이러한 방법을 채택함으로써 수중터널의 자연스러운 움직임에 영향을 미칠 수 있는 별도의 계측장치를 설치하지 않고 수중터널의 거동 특성을 효과적으로 파악하는 것이 가능하였다.

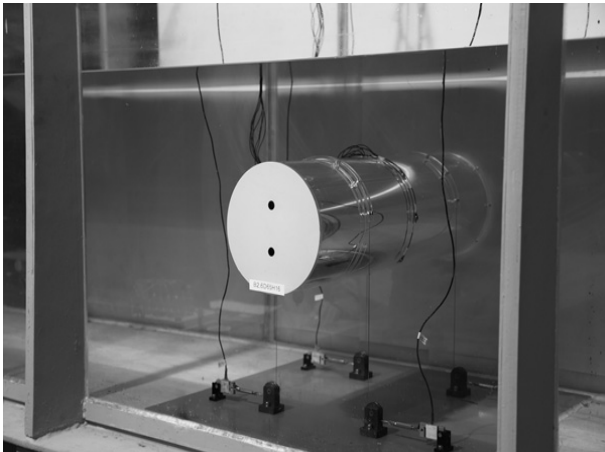


Fig. 2. General View of the Experimental Setup

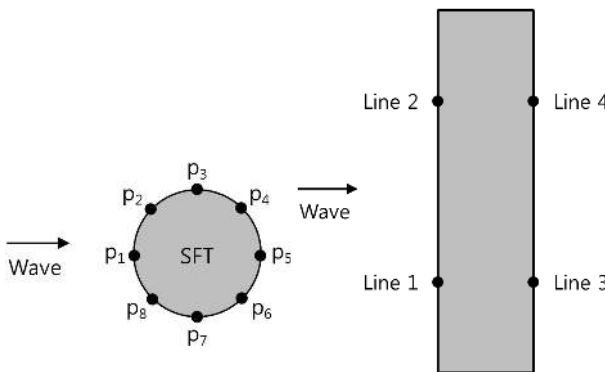


Fig. 3. Notations of the Pressure Gauges and Tether Lines

2.2 실험조건 및 방법

터널 모형은 터널 상단면이 수조 바닥으로부터 50 cm에 위치하도록 설치하였으며, 수심(h)은 65, 80, 95 cm의 3가지로 변화시켰다. 이에 따라 정지수면으로부터 터널 상단면까지의 여유고(h_c)는 각각 15, 30, 45 cm가 되었다. 한편, 부력과 자중의 비(BWR: Buoyancy Weight Ratio)는 터널 원형(prototype)을 기준으로 1.1, 1.3, 1.5의 3가지 조건을 채택하였다. 이러한 조건에 대하여 주기 및 파형경사를 각각 4가지로 변화시킨 서로 다른 총 16개의 규칙파를 1분간 조파하여 계측을 수행하였다. 파형경사는 파고와 파장의 비로 정의되며, 주기가 커질수록 파장이 커지게 되므로 파고는 주기별로 일정한 것이 아니라 서로 다른 값을 가지게 된다. 즉, 동일한 파형경사의 실험파 조건이라고 하더라도 주기가 클수록 그에 해당하는 파고의 값도 크다. Table 1에는 이상의 실험 조건을 실험 축척을 고려하여 환산된 현장값 기준으로 제시하였다.

Table 1. Summary of the Test Conditions

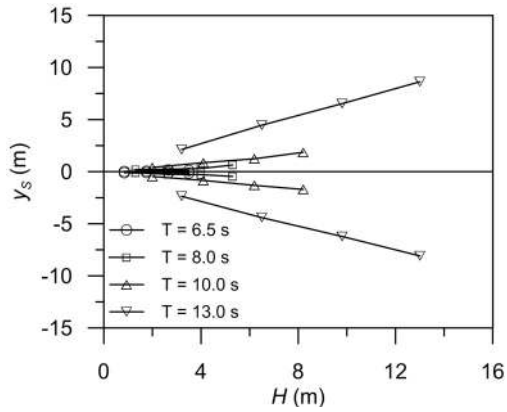
	Values	Remarks
Diameter of SFT (m)	$D = 23$	
Water depth (m)	$h = 65, 80, 95$	$h_c = 15, 30, 45$
Buoyancy-Weight Ratio	BWR = 1.1, 1.3, 1.5	
Wave period (s)	$T = 6.5, 8.0, 10.0, 13.0$	
Wave steepness	$s = 0.013, 0.027, 0.040, 0.053$	$H = 0.85 \sim 13 \text{ m}$

3. 실험 결과

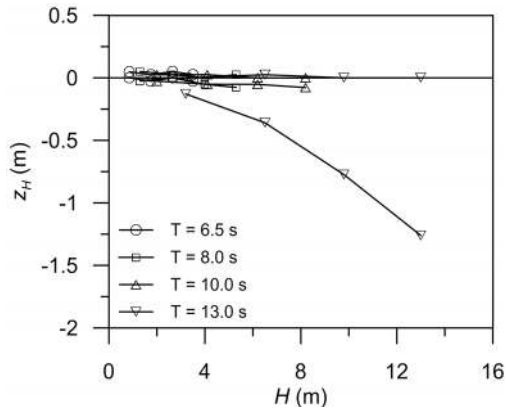
3.1 수중터널의 거동 특성

수중터널의 변위 및 회전 운동은 터널 모형 측면에 부착된 표식자의 비디오 촬영 영상을 Jeong et al.(2008)과 유사한 방법으로 분석하여 계산하였다. 즉, 촬영된 길다 영상을 영상처리기법을 사용하여 흑백 영상으로 변환한 후 두 개 표식자의 중심위치를 각각 추출함으로써 터널 모형의 변위 및 회전각을 계산하였다. 그리고 계산 결과를 실험 축척을 고려하여 현장 환산값으로 변환하였으며, 본 논문에서는 모든 계측 결과를 현장값 기준으로 제시하였다.

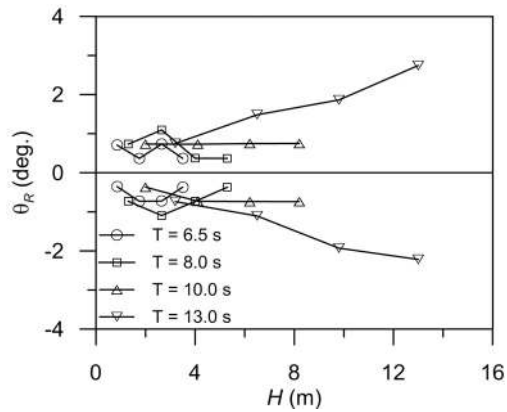
Fig. 4에는 수심이 80 cm이고 BWR=1.3인 경우에 모든 실험파 조건에 대하여 수중터널 모형의 횡방향 동요(sway), 연직방향 동요(heave) 및 회전운동(roll)의 최대값과 최소값을 제시하였다. 이 그림으로부터 파고가 증가할수록 횡방향 동요(y_s)가 대체로 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 횡방향 동요의 최대값 및 최소값은 거의 일치하였는데, 이것은 파 작용에 따라서 수중터널이 파 진행 방향의 앞뒤로 규칙적인 주기 운동을 나타내었기 때문이다. Fig. 4에 보인 것처럼 수중터널의 횡방향 동요가 비교적 크게



(a)



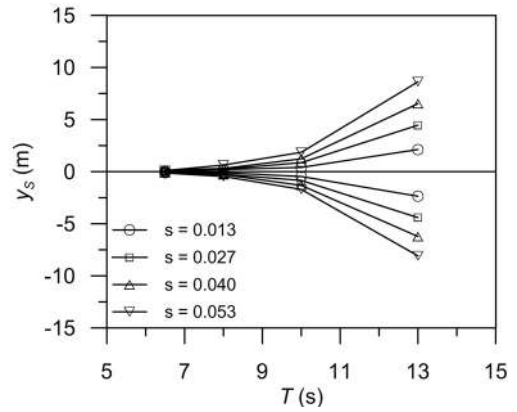
(b)



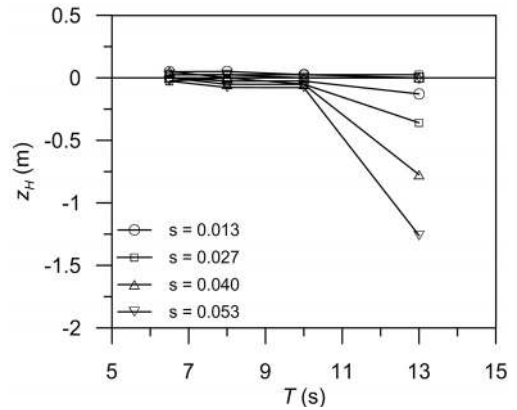
(c)

Fig. 4. Sway, Heave, and Roll Motions of the SFT as a Function of Wave Height

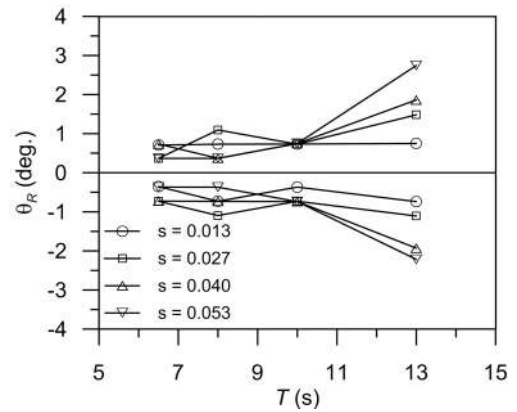
발생한 이유는, 이 경우 인장각(引張脚, tension leg)이 수중터널을 연직방향으로만 구속하고 있기 때문에 구조 형식 상 횡방향 하중에 대해서는 취약하기 때문이다. 한편, 연직방향 동요(z_H)의 경우에는 횡방향 동요처럼 최대값과 최소값이 대칭적으로 나타나는 것이 아니라, 최소값만 크게 나타났는데, 이것은 수중터널의 연직 상방향



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Sway, Heave, and Roll Motions of the SFT as a Function of Wave Period

으로의 이동이 인장각의 구속에 의해 제약되어 있기 때문이다. 터널 모형의 회전운동(θ_P)의 경우에도 파고 증가에 따라서 값이 커지는 경향을 나타내었으며, 대체로 횡방향 동요와 유사하게 최대 값 및 최소값의 크기가 비슷한 대칭적인 경향을 나타내었다.

한편, Fig. 5에는 Fig. 4에 보인 동일한 실험 결과를 주기에

대하여 나타내었다. 횡방향 동요는 주기가 증가함에 따라서 그 크기가 지속적으로 증가하며, 파형경사(s) 증가에 따라서 동요량이 커지는 경향이 나타났다. 반면에, 연직방향 동요의 경우에는 주기 10 s 미만일 때에는 의미 있는 변위가 발생하지 않았으나(0.3 m 미만), 주기 13 s인 경우에는 연직 하방으로 매우 큰 동요가 발생하였으며, 파형경사가 클수록 동요량이 컸다. 회전각의 경우에도 주기 10 s 미만인 실험과 조건에서는 $\pm 1^\circ$ 이내였으나, 주기 13 s일 때에는 그 값이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있었다. 비록 Figs. 4 and 5에는 수심 80 m, BWR=1.3인 경우의 실험 결과만 제시하였지만 수심 및 BWR이 다른 경우에도 유사한 실험 결과를 얻었다.

본 연구에서 수행된 수리모형실험에서 사용한 총 16개 실험과 조건 중에서 주기 13 s, 파형경사 0.04인 조건은 일본 수중터널조사연구회(Society of Submerged Floating Tunnel Technology, 1997b)에서 채택한 100년 빈도 설계과 조건(주기 13 s, 유의파고 9.3 m)에 대응된다. 이러한 점을 고려하여 Fig. 6에는 이 실험과에 대해서 수심 및 BWR 조건이 각각 다른 경우 수중터널의 세 가지 운동 모드를 나타내어 수심 및 BWR 조건에 따라서 수중터널의 운동특성이 어떻게 달라지는지 고찰하였다. 우선 횡방향 동요의 경우 대체로 수심이 증가할수록, BWR의 값이 감소할수록 그 크기가 감소하게 됨을 알 수 있다. 일본 수중터널조사연구회에서 제시된 설계단면에 대하여 수행된 선형 수치모델링 연구 결과(Kanie et al., 1997)도 Fig. 6a에 함께 비교하여 나타내었으며, 횡방향 동요의 크기 및 수심에 따른 경향성이 본 연구와 유사함을 확인할 수 있다. Kanie et al.(1997)의 수치해석은 BWR=1.49인 조건에서 이루어졌는데, 본 수리모형실험에서 BWR=1.5인 조건의 결과와 비교해보면 전체적인 경향은 유사하지만 동요량의 크기는 상대적으로 Kanie et al.(1997)의 가 더 작음을 알 수 있다. 이러한 차이는 Kanie et al.(1997)에서 수치계산 시 적용한 계수(부가질량계수, 구조감소계수 등) 및 재료 특성(인장각의 단면적 및 강도, 탄성계수 등)의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 연직방향 동요의 경우 연직 하방 변위만 의미 있는 값을 나타냈으며, 횡방향 동요와 마찬가지로 수심이 증가하고 BWR이 감소할수록 동요량이 줄어드는 경향이 나타났다. Kanie et al.(1997)에는 연직 상방 변위에 대한 결과만 제시하고 있는데, Fig. 6b에 보인 것처럼 본 실험 결과와 동일하게 동요량이 거의 없었다. 회전각의 경우도 수심 및 BWR에 따른 경향성은 횡방향 및 연직방향 동요와 유사하게 나타났으며, 이와 관련된 결과는 Kanie et al.(1997)에 제시되어 있지 않다.

최근에 Hong and Ge(2010)는 수리모형실험을 수행하여 BWR이 수중터널의 동요량에 미치는 영향을 고찰한 바 있다. 본 연구에서 수행된 실험 결과를 이 논문에 제시된 결과와 비교하기 위하여 Fig. 7에 보인 것처럼 수중터널의 횡방향 및 연직방향 동요를 터널의 직경(D)으로 나누어 무차원화한 후 Hong and Ge(2010)의 결과와 함께 비교하여 나타내었다. 비록 Hong and Ge(2010)의 실험에 대한 자세

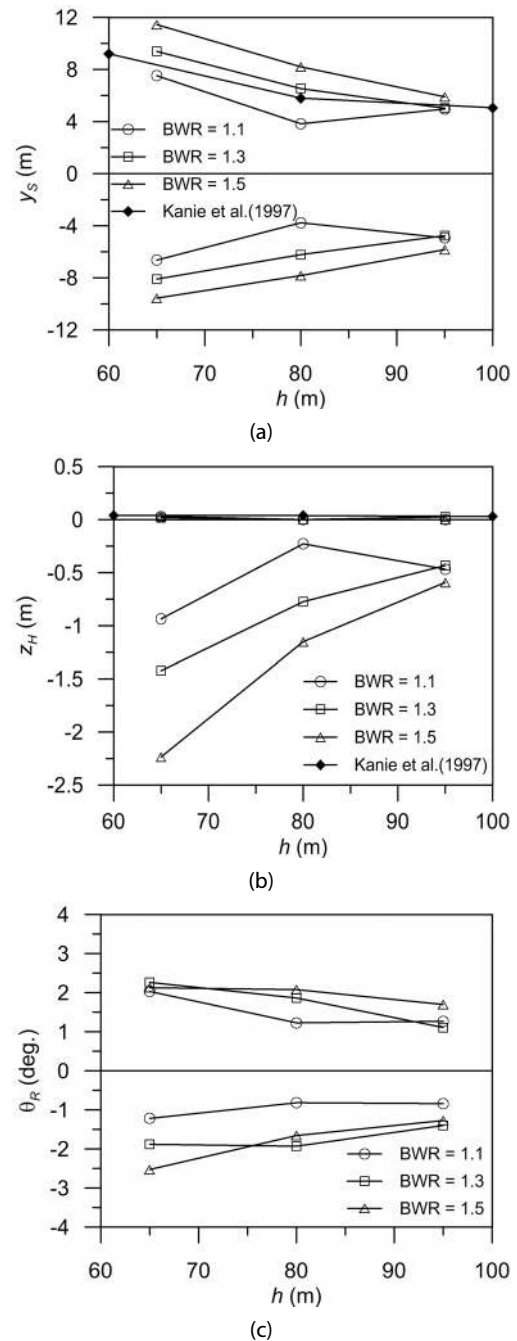
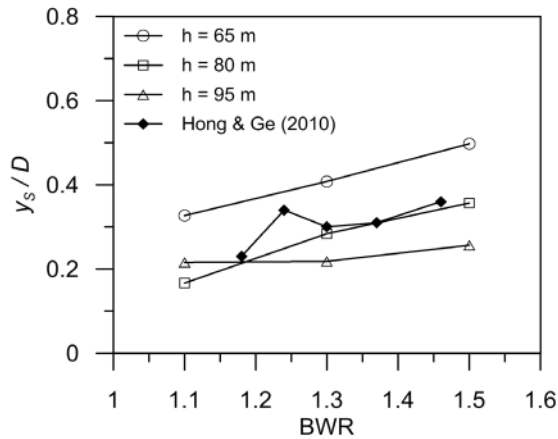
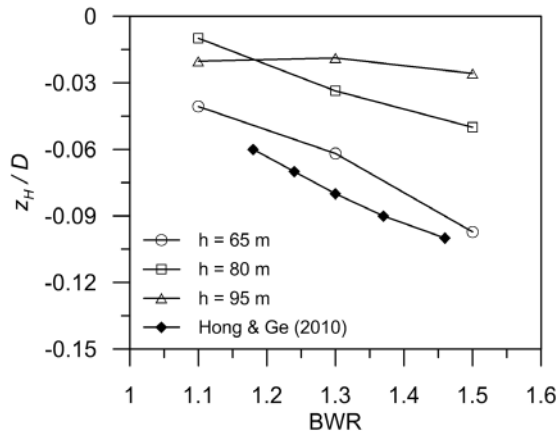


Fig. 6. Change in Sway, Heave, and Roll Motions According to Water Depth

한 정보가 해당 논문에 기술되어 있지는 않지만 BWR에 따른 경향 및 동요량의 크기가 전반적으로 본 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7로부터 수중터널의 횡방향 동요는 경우 터널 직경의 20~40% 범위 내에 분포하였으며, 연직방향 동요량은 터널 직경의 10% 미만임을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7. Change in Non-Dimensional Sway and Heave Motions According to BWR

3.2 계류 장력

수중터널을 구속하고 있는 인장각 4개(Fig. 3참조)에 작용하는 인장력(F_T)을 평가하기 위하여 설치한 장력계 4개의 측정 결과를 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8에 제시된 결과는 수심 80 cm, BWR=1.3인 조건에 대한 것이며, 이 경우 각각의 인장각에 부과되는 초기 장력(F_{T0})은 6,260 tf/EA이다. 파랑 작용을 받게 됨에 따라서 각 인장각의 장력은 초기 장력을 기준으로 변화하게 되며, Fig. 8에 보인 것처럼 대체로 파고 증가에 따라서 선형적으로 증가하는 양상을 보였다. 인장각 4개의 최대 인장력은 대체로 동일하게 나타났으며, 최소 인장력은 인장각에 따라서 약간의 편차를 보였는데, 이것은 수중터널을 구속하는 인장각에 초기장력에 비해서 상대적으로 작은 장력이 걸리게 되는 경우 계류 시스템이 다소 느슨해지게 되는데, 이 때 장력이 소실되는 정도가 터널 모형의 미세한 위치 차이 등에 의해서 인장각 별로 순간적인 차이가 발생할 수 있기 때문인 것으로 추론할 수 있다. 한편, Fig. 8로부터 계류 시스템에

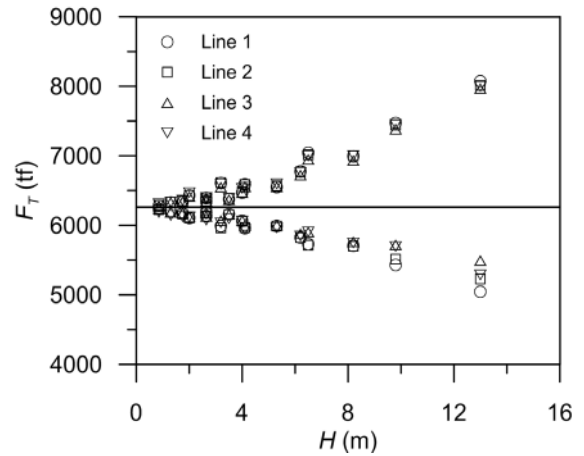


Fig. 8. Tensile forces on the four tether lines of the SFT

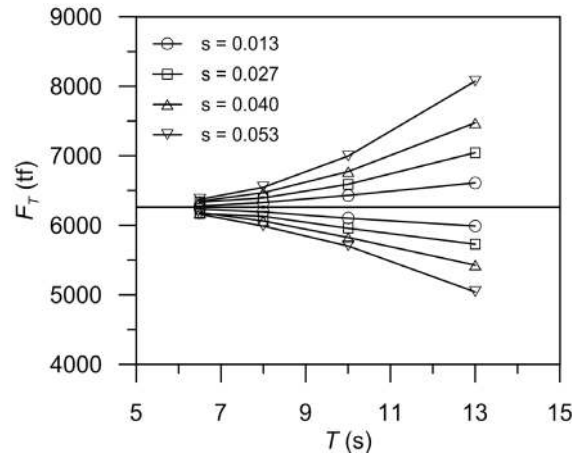


Fig. 9. Tensile Force on the Line 1 as a Function of Wave Period

작용하는 인장력의 최대값은 약 8,070 tf/EA이며, 따라서 이 경우 파 작용으로 인해 발생하는 부가적인 인장력은 초기 인장력의 약 30% 수준이었다. 일본 수중터널조사연구회의 설계자료에서는 연직 계류형 수중터널의 인장각 장력을 8,125 tf/EA로 설정하고 있으며, 이는 본 실험에서 계측된 결과에 상응하는 값이다.

한편, Fig. 9에는 계류 시스템에 작용하는 장력값을 주기의 함수로 나타내었으며, Fig. 8에 보인 것처럼 4개의 인장각에 걸리는 장력이 거의 유사하기 때문에 오직 Line 1 인장각에서 계측된 장력값에 대해서만 결과를 도시하였다. Fig. 9로부터 주기가 증가할수록 인장각의 최대 및 최소 장력이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 초기장력을 기준으로 삼았을 때 인장력의 최대 증가량 ($F_T^{\max} - F_{T0}$)이 최대 감소량($F_{T0} - F_T^{\min}$)에 비해서 상대적으로 그 크기가 더 컸다.

한편, 거동 특성에 대한 분석에서와 마찬가지로 일본 수중터널조사연구회에서 채택한 100년 빈도 설계파에 대응되는 실험파를 대상

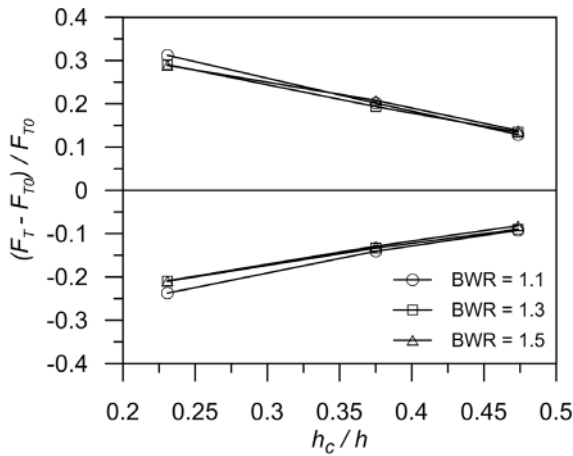


Fig. 10. Non-Dimensional Relative Tensile Forces on the Line 1

으로 수심 및 BWR이 서로 다른 경우의 실험 결과를 비교하여 보았다. 이 때 BWR에 따라서 초기 장력이 서로 다르기 때문에 이러한 점을 고려하여 Fig. 10에는 Line 1 인장각에 작용하는 동적 장력의 최대 및 최소값, 즉 초기 장력 대비 상대적인 장력 변화량의 최대 및 최소값을 상호 비교하였다. 또한 Fig. 10의 횡축도 수면으로부터 터널 모형 상단면까지의 여유고(h_c)를 수심(h)으로 나눈 무차원 여유고(h_c/h)에 대하여 표현하였다. 이와 같이 도시하였을 경우 Fig. 10에 보인 것처럼 인장각에 작용하는 장력의 상대 변화량은 BWR 값에 무관하게 거의 일치하는 경향을 나타내었다. Fig. 10으로부터 수심에 비해서 수중터널의 여유고가 작을수록 계류 시스템에 작용하는 장력 변화량이 커짐을 파악할 수 있다. 대체로 인장력의 상대 변화량은 초기장력의 30% 이내로 나타났다.

3.3 수중터널에 작용하는 파력

수중터널 중앙 단면을 따라서 설치된 8개 파압계에 작용하는 동적 파압(p)의 계측 결과는 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에 보인 결과는 수심 80 cm, BWR=1.3인 경우의 실험 결과이며, 수심 및 BWR 조건이 다른 경우에도 유사한 경향을 관찰할 수 있었다. 동적 파압의 경우에도 거동특성 및 인장각 장력과 마찬가지로 주기가 길수록 파압이 크게 작용하게 되므로 Fig. 11에는 실험 조건 중 가장 긴 주기인 $T=13$ s일 때의 4개 실험파에 해당하는 결과만을 나타내었다. 각 파압계에서 계측된 파압은 대체로 파고 증가에 따라서 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 실험 중 파형경사가 큰($s \geq 0.04$) 실험파 조건에서는 spilling 형태의 쇄파가 발생하는 것을 확인할 수 있었지만 이러한 쇄파 발생으로 인해서 파압의 크기가 의미있는 변화를 나타내지는 않았다. 한편, 파압계 설치 위치에 따라서 파압이 비교적 큰 차이를 나타내었는데 가장 큰 파압은 전면 우상방(45°) 위치에 설치한 파압계(p_2)에서 계측되

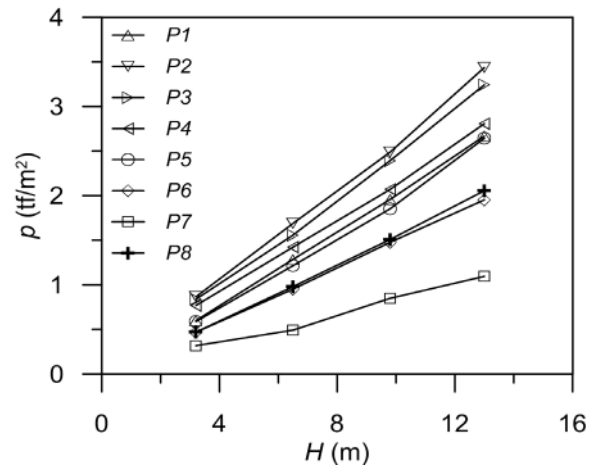


Fig. 11. Wave Pressure Measured at Eight Positions on the SFT

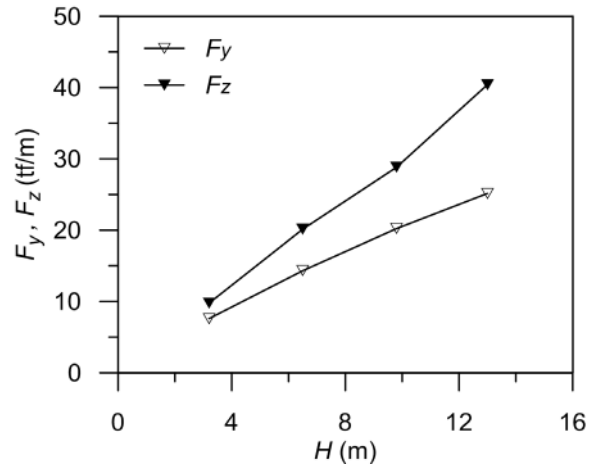


Fig. 12. Wave Forces Acting on the SFT as a Function of Wave Height

었고, 가장 작은 파압은 터널 하단에 위치한 파압계(p_7)에서 계측되었다.

한편, Fig. 12에는 이렇게 8개의 파압계에서 계측된 파압 자료를 이용하여 터널 모형에 작용하는 수평 및 연직 방향의 파력을 수중터널의 단위 폭에 대하여 적분하여 계산한 결과를 나타내었다. Fig. 11과 마찬가지로 수심 80 cm, BWR=1.3인 조건에 대하여 $T=13$ s인 실험파 4개에 대한 결과를 보인 것이다. Fig. 12로부터 수평 방향에 비해서 연직 방향의 파력이 더 크게 작용함을 확인할 수 있으며, 파압 계측결과와 마찬가지로 파고 증가에 따라서 파력이 대체로 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 13에는 이렇게 계산된 수평 및 연직 방향의 파력을 단위중량(w_0) 및 수중터널의 직경(D), 파고 값의 절반($H/2$)으로 나누어 무차원화한 결과를 제시하였다. 이 때 Fig. 13의 횡축은 Fig. 10과 유사하게 무차원 여유고(h_c/h)의 함수로 표현하였다. Fig. 13으로

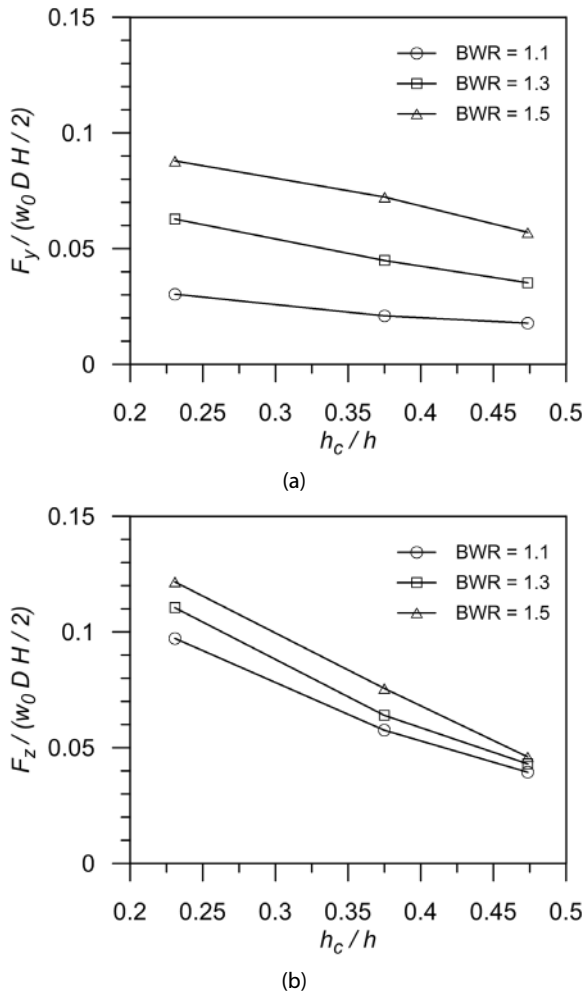


Fig. 13. Non-Dimensional Wave Forces Acting on the SFT

부터 상대 여유고(h_c)가 증가할수록 작용 파력이 감소하며, 그 감소율은 연직방향 파력의 경우가 더 현저함을 파악할 수 있다. 또한, BWR 값이 작을수록 전반적으로 파력이 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인장각으로 연직 계류된 수중터널의 거동 및 동수역학적 특성을 수리모형실험을 통하여 고찰하였다. 일본 수중터널조사연구회(Society of Submerged Floating Tunnel Technology, 1997b)에서 제시한 터널 단면을 기본 형상으로 하여 수심 및 부력대 자중비(BWR) 조건을 다양하게 변화시키면서 실험을 수행하였다. 특히 수중터널의 자연스러운 움직임에 영향을 미칠 수 있는 별도의 장치를 설치하지 않고 비디오 영상 분석 기법을 활용하여 수중터널의 거동 특성을 효과적으로 파악하였다. 취득된 자료를

분석한 결과 수중터널의 횡동요(sway), 연직동요(heave) 특성을 비롯하여 계류 시스템에 작용하는 인장력, 터널 본체에 작용하는 파력 계측값이 기존의 선행연구 결과들과 대체로 잘 일치함을 확인하였다. 이러한 주요 계측량들은 파고 및 주기가 증가함에 따라서 증가하였으며, 수심 및 BWR 조건에 따라서는 수심이 클수록 BWR값이 작을수록 대체적으로 그 값이 감소하는 경향을 보였다. 또한 주요한 계측량을 무차원 변수로 제시하여 실무 설계 및 향후 추가적인 연구에 도움이 되도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업 해중터널 실용화를 위한 핵심기술 개발(PE98941)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Dong, M.-S., Miao, G.-P., Yong, L.-C., Niu, Z.-R., Pang, H.-P. and Hou, C.-Q. (2012). "Effects of escape device for submerge floating tunnel (SFT) on hydrodynamic loads applied to SFT." *J. Hydro. Ser. B*, Vol. 24, No. 4, pp. 609-616.
- FEHRL (1996). *Analysis of the submerged floating tunnel concept*. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.
- Grantz, W. C. (2010). "Conceptual study for a deep water, long span, submerged floating tunnel (SFT) crossing." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 61-70.
- Han, S.-H. (2012). "Risk assessment of submerged floating tunnels based on fuzzy AHP." *J. Korean Acad.-Indust. Coop. Soc.*, Vol. 13, No. 7, pp. 3244-3251 (in Korean).
- Hong, Y. and Ge, F. (2010). "Dynamic response and structural integrity of submerged floating tunnel due to hydrodynamic load and accidental load." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 35-50.
- Jakobsen, B. (2010). "Design of the Submerged Floating Tunnel operating under various conditions." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 71-79.
- Jeong, S. T., Kim, J. D., Ko, D. H., Kim, D. H. and Park, W. S. (2008). "Wave reflection and transmission from buoyant flap typed storm surge barriers - hydraulic experiments." *J. Korean Soc. Coast. Oc. Engrs.*, Vol. 20, No. 2, pp. 238-245 (in Korean).
- Kanie, S., Mikami, T. and Kakuta, Y. (1997). "Dynamic characteristics of submerged floating tunnels due to wave force." *Proc. JSCE*, No. 556, pp. 159-168.
- Kanie, S. (2010). "Feasibility studies on various SFT in Japan and their technological evaluation." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 13-20.
- Kunish, H. (2010). "Evaluation of wave force acting on submerged floating tunnels." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 99-105.
- Lu, W., Ge, F., Wang, L., Wu, X. and Hong, Y. (2011). "On the

- slack phenomena and snap force in tethers of submerged floating tunnels under wave conditions." *Mar. Struct.*, Vol. 24, pp. 358-376.
- Mazzolani, F. M., Faggiano, B. and Martire, G. (2010). "Design aspects of the AB prototype in the Qingdao Lake." *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 21-33.
- Østlid, H. (2010). "When is SFT competitive?" *Proc. Engrg.*, Vol. 4, pp. 3-11.
- Park, W.-S., Oh, S.-H., Han, S.-H. and Baek, W.-D. (2012). "Wave forces acting on submerged floating tunnels." *Proc. Coast. Oc. Engrg. Korea*, pp. 138-141 (in Korean).
- Society of submerged floating tunnel technology (1997a). *Submerged floating tunnel - I. From planning to design and construction* (in Japanese).
- Society of submerged floating tunnel technology (1997b). *Submerged floating tunnel - II. Case Study* (in Japanese).
- Tariverdilo, S., Mirzapour, J., Shahmardani, M., Shabani, R. and Gheyretmand, C. (2011). "Vibration of submerged floating tunnels due to moving loads." *Appl. Math. Model.*, Vol. 35, pp. 5413-5425.