

부유식 교량 또는 부유식 터널 어떻게 넓고 깊은 피오르드를 건널 것인가?



신윤섭

Norwegian
Geotechnical Institute
yus@ngi.no

1. 일반사항

2019년 유럽, 유라시아 및 지중해 지역의 전략적 대규모 인프라 프로젝트 100가지를 순서대로 나열한 보고서가 있다 (CG/LA Intrastructure, 2019). 그 중 상위 20개 프로젝트는 다음 표 1과 같으며, 여기에 노르웨이 프로젝트가 2개를 차지하고 있다. 그 중 가장 전략적 대규모 프로젝트로 주목을 받고 있는 프로젝트가 E39 피오르드 크로싱 프로젝트이다.

최근 국내에서도 관심이 많은 노르웨이 E39 피오르드 크로싱 프로젝트의 궁극적인 목적은 Kristiansand와 Trondheim 사이의 8개의 구간을 페리를 타고 건너는 대신 부유식 터널이나 부유식 또는 고정식 교량을 건설하여 피오르드를 건너고자 하는 것이다. 노르웨이 공공 도로 관리국 서부 지부(Western Region of the Norwegian Public Roads Administration)는 매우 깊고 넓은 피오르드 지역에 터널이나 교량 건설의 타당성 검토를 수행하기 위해 일련의 연구 개발을 수행하는 과정에서, 송내 피오르드(Sognefjord) 현장을 타당성 검토 구역으로 선정하였다. 이 현장의 수심은 1300미터, 거리는 3700미터이다.

이는 매우 도전적인 현장을 선택하여 프로젝트를 진행하고 있는 것이며, 노르웨이 해상 유전 개발 기술과 경험을 바탕으로 터널 또는 교량을 이용하여 피오르드를 크로싱하는데 많은 문제가 해결되기를 바라고 있다. 이 연구의 최종 목표는 피오르드를 크로싱 하기 위한 방법으로 부유식 교량 또는 부유식 터널에 대한 개략적인 컨셉을 확보하는 것이다.

이 타당성 조사의 첫 번째 과제로 핵심 기관들이 참여한 가운데 두 차례 “Think Tank” 세미나를 개최하였다. 이 세미나에서는 부유식 터널, 부유식 교량, 현수교 및 이러한 대안의 조합들에 대해서 논의 되었고, 이 작업은 2010년 여름에

완료되었다. 세미나를 통하여 제안된 대안과 다른 새로운 아이디어에 대해 프로젝트 그룹이 구성되었고, 설계 세부 사항 및 시공 조건에 대한 논의도 현재 진행되고 있다.

본 기술기사는 타당성 조사에서 수행했던 내용을 요약하였으며, 향후 프로젝트가 진행되는데 있어서 필요한 향후 연구사항 및 권고사항 등을 정리하였다.

〈표 1〉 유럽, 유라시아 및 지중해 지역 전략적 탑 20 인프라 프로젝트(CG/LA Infrastructure, 2019)

Project	Project Sponsor	Country	Status	Sector	Value (USD \$M)
1 E39 Rogfast Sub-Sea Road-Tunnel (Coastal Highway)	Norwegian Public Roads Administration	Norway	Construction in Progress	Highways, Bridges & Tunnels	1,950
2 New Vasco da Gama Terminal, Port of Sines	Ports of Sines and the Algarve Authority	Portugal	Procurement	Ports & Logistics	706.4
3 Cargo Sous Terrain	Cargo Sous Terrain (CST)	Switzerland	Planning	Ports & Logistics	30,000
4 3.6 GW Dogger Bank Wind Farm	SSE Renewables, Equinor	United Kingdom	Awarded	Energy - Renewable	11,200
5 Madrid Nuevo Norte	BBVA	Spain	Planning	Urban	7,900
6 Fehmarn Belt Fixed Link	Ministry of Transport (Schleswig-Holstein)	Denmark, Germany	Planning	Highways, Bridges & Tunnels	7,400
7 Lower Thames Crossing	Highways England	United Kingdom	Feasibility	Highways, Bridges & Tunnels	6,830
8 Rail Baltica	Ministry of Economic Affairs and Communications (Estonia), Ministry of Transport (Latvia), Ministry of Transport and Communications (Lithuania)	Estonia, Latvia, Lithuania	Procurement	Rail	6,570
9 Expansion of Terminal XXI	Ports of Sines and the Algarve Authority	Portugal	Planning	Ports & Logistics	601.7
10 Istanbul Metro Project II	City of Istanbul	Turkey	Procurement	Urban Mass Transit	451.8
11 Sweden Eastlink Project	Swedish Transport Administration	Sweden	Planning	Rail - HSR	5,900
12 Port of Valencia Container Terminal 4	Valencia Port Authority (APV)	Spain	Procurement	Ports & Logistics	1,350
13 SuedOstLink	TenneT	Germany	Design	Energy - Transmission	1,100
14 Hegyeshalom-Bezenye Project	EON SE, FAKT AG	Hungary	Planning	Urban	1,000
15 Stockholm Arlanda Airport Pier G	Swedavia	Sweden	Design	Aviation	600
16 Pallas Nuclear Reactor	PALLAS	Netherlands	Design	Social Infrastructure	550.1
17 175MW Weesow-Willmersdorf Solar Park	EnBW	Germany	Planning	Energy - Renewable	350
18 Port Olvia Concession	The Ministry of Infrastructure and the Ukrainian Sea Port Authority	Ukraine	Procurement	Ports & Logistics	211.6
19 Jordan Schools Facilities Management PPP	Ministry of Education	Jordan	Planning	Social Infrastructure	45.9
20 Ringerike Line and E16 highway	Bane NOR, Norwegian Public Roads Administration	Norway	Procurement	Transport - Mixed	3,524

2. 부유식 교량

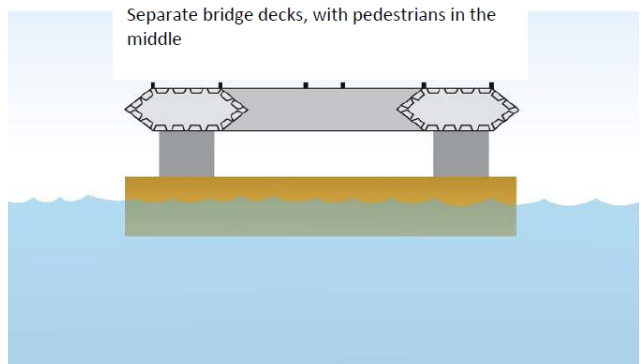
2.1 컨셉 스터디

1250미터 이상의 깊은 수심을 가진 송내 피오르드(Sognefjord)를 건너기 위한 고정식 기초구조물은 타당성이 없는 것으로 결정되었다. 3700미터 폭의 송내 피오르드(Sognefjord)를 가로지르는 교량의 경우 파도, 해류 및 바람으로부터 오는 외부 환경하중에 충분히 견딜 수 있는 수평 강도와 강성을 보장할 수 있어야 한다. 송내 피오르드 크로싱을 위한 가장 유망한 두 가지 대안은 다음과 같다.

2.1.1 부유식 교량(일반교량 형식)

이것은 폰툰 위에 교각을 설치한 형태의 교량이며, 교각의 높이가 해안선을 향하여 순차적으로 낮아지는 형태로 중심을 기준으로 곡선형태의 선형을 나타내는 구조이다. 일명 “Bucket handle”이라고도 불리는 이 구조는 중심부에서 선박 및 유람선의 이동에 필요한 공간을 제공한다.

이 방안은 아직 어느 곳에도 적용되지 않았지만 수평력에 대한 충분한 지지력을 가질 수 있을 것으로 예상된다. 시작점에서는 단일 폰툰으로 충분한 강성을 제공할 것으로 사료되며, 해안과 평행하게 배치 될 수록 해양 외력으로부터 최소한의 영향을 받을 것으로 예상된다. 대안으로는, 그림 1(우)와 같이 인도를 중앙에 설치하고 교량의 상판을 분리하는 방식을 도입하여 수평 강성을 증가시킬 수 있는 방안이 제안되었다.



〈그림 1〉 일반교량 형식의 부유식 교량(좌) 및 분리덱 형태의 개념도(우)

2.1.2 부유식 교량(사장교 형식)

다른 대안으로는 부유식 교량이지만 육상부 인근에는 사장교 형태를 갖추고 있는 형식이다. 이 형식은 실제 노르웨이에 존재하는 교량의 형태로 노르웨이 서쪽 베르겐에 위치해 있는 Nordhordlands 교량이다. 이 교량의 1994년에 개통되어 현재까지 사용되고 있으며 총 연장 중 부유식 부분은 총 1614미터이고 육상 인근에서 해상으로 시작되는 첫번째 교대는 35미터 수심에 직접기초가 설치되었다.

그림 2(우)는 송내 피오르드를 건너는 부유식 교량 컨셉을 나타내고 있다. 교량을 설치한 후 이동하는 선박의 경로를 최대한 확보하기 위해서는 육상 일정부분의 암발파가 필요하고 첫 교각은 고정식 기초로 계획하고 있다.

한 가지 중요한 점은 다리의 기초를 배치할때 얼마나 깊고 경제적으로 시공이 가능한지, 수평 또는 수직 방향으로 필요한 앵커리지를 얼마나 줄 일 수 있는지가 중요한 포인트이다. 이 대안의 특징은 고정식 교량에서 부유식 교량 부분으로의 긴 램프구간이다. 필요한 경우 별도의 교량 데크를 사용하여 더 큰 수평 강성을 얻을 수 있는 것도 대안으로 제안되었다.

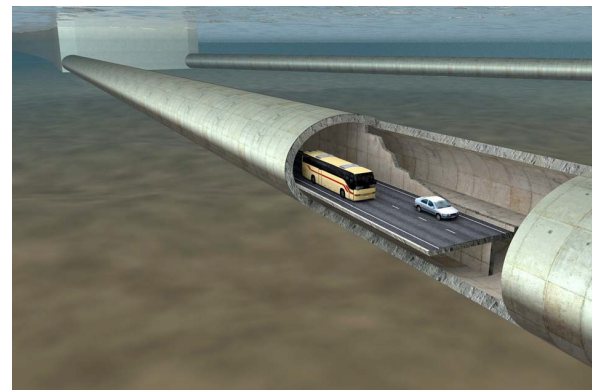


〈그림 2〉 사장교 형식 부유식 교량, Nordhordlands 교량(좌)과 사장교 타입의 부유식 교량 컨셉(우)

2.1.3 부유식 교량과 부유식 터널 조합 컨셉

이 컨셉은 부유식 교량과 부유식터널을 조합한 컨셉이다. 교량 중앙부에 큰 폰툰을 설치하여 부유식 교량에서 부유식 터널레벨로 내려 갔다가 다시 교량 레벨로 올라오는 독특한 형식을 취하고 있으며, 향후 추가적인 연구가 필요한 컨셉이다. 이 컨셉을 해안 근처에서도 적용할 수 있으며, 이 경우하나의 폰툰을 사용하고, 부유식 터널 레벨로 내려가서 지중 터널과 바로 연결되게 만드는 컨셉이다.

노르웨이 서해안 다른 피요르드의 경우 송네 피요르드 위치에 비해 연장이 짧고 수심이 얇은 지역들이 있다. 이 경우 최적의 교차점 위치는 곡선이 아닌 직선으로 교차할 수 있고, 얇은 깊이에서 고정식 기초를 설치하여 교량의 강성을 증가시킬 수 있다. 넓은 바다에 직접 노출 된 부유 교량은 강성에 있어 심각한 문제를 야기 할 수 있으므로 많은 연구가 필요하다. 따라서 다른 피요르드 지역의 경우 보다 양호한 조건에서 설계 검토가 가능하며, 각 지역의 특성에 맞는 설계 및 시공계획이 필요하다.



〈그림 3〉 부유식 교량 및 터널 복합 방식(좌), 중앙 교차부분 상세 개념도(우)

2.2 추후 연구 과제

아래 표 2는 부유식 교량과 관련하여 향후 관심을 가지고 연구해야 할 이슈로 논의된 사항을 정리하였다.

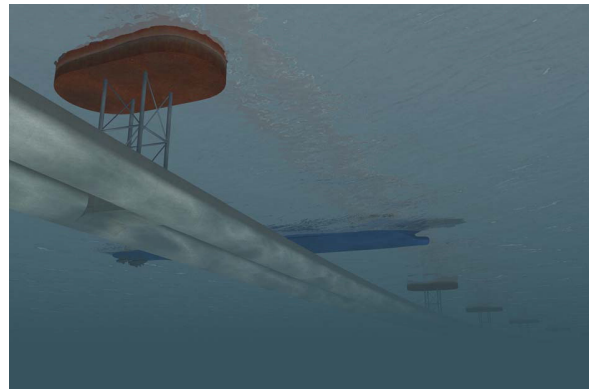
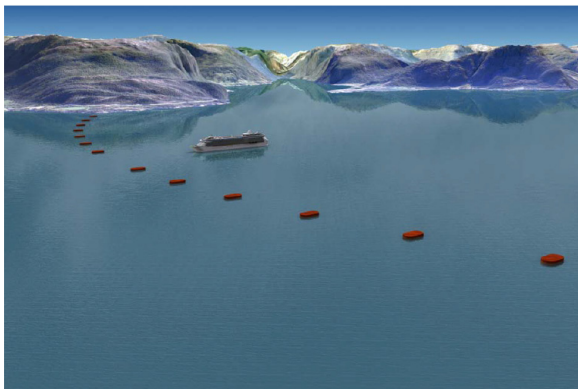
〈표 2〉 부유식 교량과 관련하여 향후 연구사항

Themes	Actions
Safety	Acceptable risk of: - Loss of lives - Loss of construction - Loss of ships Which extreme load situations should be considered Impact of climatic changes
Road standards etc.	Separate pedestrian/cyclist lanes Height of sailing clearance Studies of pontoon road spiral and movable floating sections
Special studies	Ship impact studies and ship sailing paths
Special studies	Statistical and dynamic analysis and preliminary design to check for constructability and main dimensions
Special studies	Overall construction and installation methods

3. 부유식 터널

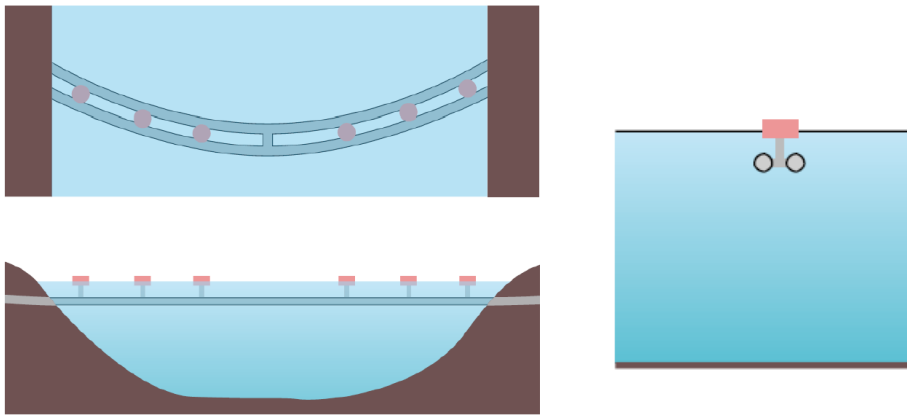
3.1 컨셉스터디

송내 피오르드의 수심은 1250~1300미터에 달하므로 고정식 앵커를 사용하는 것은 비효율, 비경제적이다. 피오르드 폭은 3700미터이므로 부유식 터널로 크로싱 하기 위해서는 충분한 수평강성이 확보되어야 하며 변형을 최소화 하기 위해서 특별한 설계가 필요하다. 그 중 대안이 될 수 있는 컨셉은 아래 그림과 같이 수평강성을 증가시키고 터널 탈출 시설을 확보하기 위해 그림 4와 같이 폰톤과 교차 터널을 사용하고, 곡선을 이루는 이중 터널을 설치하는 것이다.



〈그림 4〉 송내 피오르트 크로싱 부유식 터널 컨셉

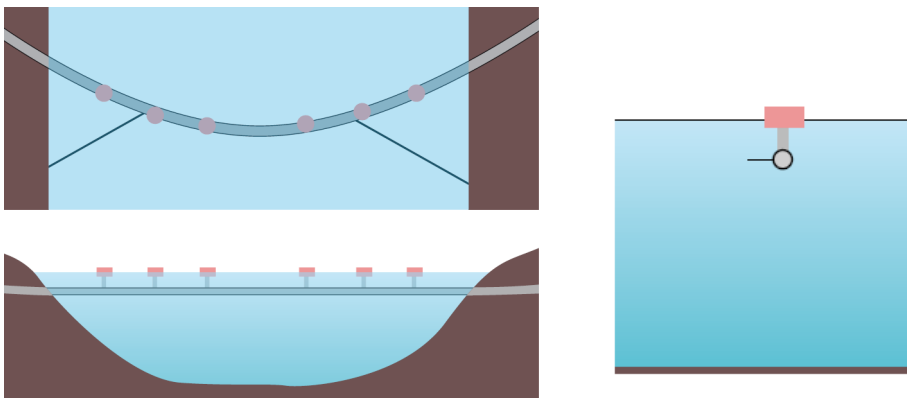
각 터널에는 2개의 레인이 있어 유지 보수 및 사고시 교통 흐름을 보장하고, 사고 대비를 위해 추가 레인이 필요한 경우 크로스 오버 터널을 이용할 수 있다. 대안으로 교통을 위한 하나의 큰 터널과 보행자와 자전거를 위한 작은 터널의 병렬구조도 생각해 볼 수 있다.



〈그림 5〉 폰툰과 교차 터널을 이용한 곡선형 이중 부유식 터널

터널과 폰툰사이의 이음부는 취약할 수 있으므로 안전한 연결 방식이 필요하다. 중요한 것은 바람, 파도 및 전류로부터 터의 하중 및 움직임을 견딜 수있는 충분한 강성 및 강도를 가지는 구조로 설계되어야 한다. 충분한 잠재력을 갖는 비교적 간단한 구조적 시스템이다.

다른 대안으로는 아래 그림 6과 같이 해안과 1/4지점에 폰툰과 수평 앵커를 설치하는 단일 부유식 터널 컨셉이 대안이 될 수 있다.

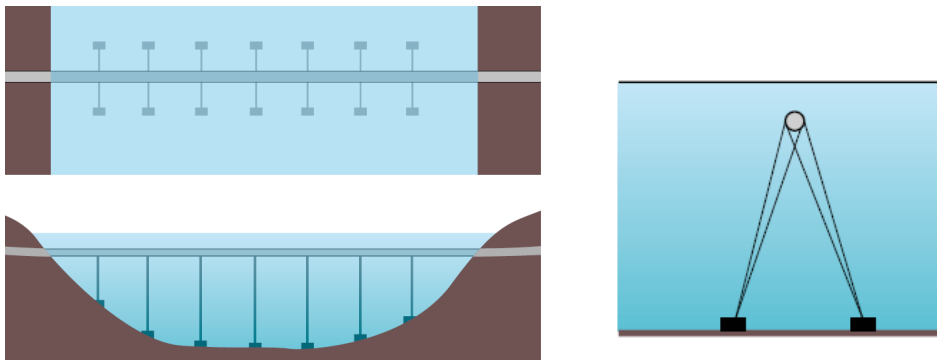


〈그림 6〉 수평 앵커를 설치한 단일 부유식 터널

단일 터널은 충분히 큰 폰툰으로부터 수직 방향 강성을 얻을 수 있고, 앵커케이블과 곡선의 형태에서 수평 강성을 얻을 수 있다. 경우에 따라서 터널의 양쪽에서 다른 구성의 케이블 사용이 요구될 수 있다. 모든 경우 사용하는 케이블은 장력을 유지해야 하고, 시간이 지남에 따라 조정 가능해야한다. 이 시스템은 최대 2000미터를 횡단하는 현실적인 대안이 될 수 있다.

노르웨이 서해안에 위치한 다른 피오르드의 경우는 송내 피오르트 크로싱과 지형 조건이 다르다. 피오르트 수심과 너비는 모두 더 양호할 것이며, 해저에 앵커를 설치하여 교차점을 구성하는 것이 더 간단한 컨셉이 될 수 있다. 넓은 바다에 직접 노출된 피오르트 교차로의 경우는 특별한 디자인 컨셉이 필요하다.

폰툰이 없는 부유식 터널 컨셉도 생각해 볼 수 있으며, 이 경우 수평 및 연직에 대한 적절한 강성을 보유하기 위한 테더와 이를 해저면에 고정 시킬 수 있는 앵커가 필요하다.



〈그림 7〉 텐더와 앵커를 사용한 단일 터널

터널은 항상 테더의 장력을 유지하기에 충분한 부력을 가져야하며 동시에 불필요한 힘을 가하지 않도록 이러한 힘의 균형을 유지시켜야 한다. 테더는 기초 앵커에 인발력을 발생시키며 인발력에 저항하기 위해 충분히 무거운 중량을 가진 일종의 케이슨을 사용해야한다. 대안이 될 수 있는 기초 앵커공법으로 석션앵커를 사용할 수 있다.

무거운 케이슨 앵커는 가장 단순하고 안전한 앵커로 사료된다. 이에 대한 타당성은 Høgsfjord Project에서 입증되었으며, 이 프로젝트를 통해 여러 가지 다양한 디자인에 대한 상세한 검토를 수행하였다. 최근 석션 앵커의 사용 범위가 넓어지면서 이러한 부유식 터널에도 석션앵커를 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 추후 연구 과제

아래 표 3은 부유식 터널과 관련하여 향후 관심을 가지고 연구해야 할 이슈사항들을 정리하였다.

〈표 3〉 부유식 터널 관련하여 향후 연구사항

Themes	Actions
Safety	Acceptable risk of: - Loss of lives - Loss of construction - Loss of ships Which extreme load situations should be considered Fire and explosions
Road standard etc.	Separate pedestrian/cyclist lane Width of ships passage Turn back possibility in single tunnels Accepted tunnel cross sections for single and double tunnel
Studies	Ship impact studies and ship sailing paths
Studies	Statistical and dynamic analysis and preliminary design to check for constructability and main dimensions
Studies	Overall construction and installation methods

4. 요약

E39 프로젝트 그룹은 초기 세미나 및 타당성 검토 결과는 통하여 송내 피오르드 크로싱을 위해 제안된 몇 가지 대안들에 대해서 기술적으로 긍정적인 평가를 내리고 있다. 향후 개발 단계에서 이를 검증하기 위한 설계 및 검증 과정이 필요하다.

프로젝트 그룹은 세 가지 주요 대안에 집중하고 있다. 가장 가능성 있는 컨셉은 사장교 형식의 부유식 교량이며, 일반 교 형식의 부유식 교량도 대안이 될 수 있다. 또한 부유식 터널구조는 아직 적용된 사례가 없으나 검증을 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

이렇게 송내 피오르드 크로싱에 대한 대안은 아래 표 4와 같이 크게 3가지 컨셉으로 정리 할 수 있으며 향후 해결해야 할 많은 기술적인 과제들을 갖고 있다.

〈표 4〉 송내 피오르드 크로싱 대안 정리

Bridge type	Alternative
Floating bridge	High level, on pontoons, shore anchored only, mid-fjord ships passage
Floating bridge	Shore anchored, high level bridge near shore for ships passage
Floating bridge	Combined with submerged floating tunnel as ships passage
Submerged floating tunnel	Two parallel cross connected tubes in horizontal curve with surface pontoons
Submerged floating tunnel	Single tube in horizontal curve with surface pontoons and horizontal anchor cables to shore
Suspension bridge type	Single span across the fjord
Suspension bridge type	Foundations on pontoons, shortening the span

참고문헌

1. Norwegian Public Roads Administration (2011), A feasibility study – How to cross the wide and deep Sognefjord, Norwegian Public Roads Administration – Western Region, March 2011.
2. CG/LA Infrastructure (2019), 2019 Top 100 Strategic Infrastructure Projects, Europe, Eurasia and the Southern & Eastern Mediterranean, CG/LA INFRASTRUCTURE | CG-LA.COM.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]