



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주 서남부 연안 환경친화형 해상풍력 연계
해저송전선로 보호방안에 대한 연구

濟州大學校 産業大學院

풍 력 공 학 과

李 俊 遠

2015 年 8 月

제주 서남부 연안 환경친화형 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안에 대한 연구

指導教授 李秉杰

李俊遠

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 8 月

李俊遠의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 産業大學院

2015 年 8 月

Research of Undersea Transmission Line
Protection Scheme for Environment-friendly
Offshore Wind Farm in Southwestern Coast of
Jeju Island

Jun-Won Lee

(Supervised by professor Byung-Gul, Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

2015. 8.

Department of Wind Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	.....	iii
LIST OF TABLES	.....	v
SUMMERY	.....	vii
I. 서 론	.....	1
1. 연구 배경	.....	1
2. 연구 목적	.....	3
II. 제주 서남부 연안 해양환경 특성	.....	5
1. 지형 특성	.....	5
1) 지형 및 지질	.....	5
2) 수심 및 해저지형	.....	6
2. 해양기상 특성	.....	7
1) 기상 특성	.....	7
2) 태 풍	.....	8
3. 해양물리 특성	.....	9
1) 조위 및 조석	.....	9
2) 조 류	.....	9
3) 파 량	.....	10
III. 해저송전선로 보호공법	.....	11
1. 해저송전선로 일반사항	.....	11
1) 개 요	.....	11
2) 해저케이블	.....	11
3) 해저송전선로 위해요소	.....	12

2. 해저송전선로 보호공법 사례	13
1) 국내 사례	13
2) 해외 사례	16
3) 국내 해상풍력 유사사례	18
3. 해저송전선로 보호공법 종류	19
1) 해저송전선로 보호공법 종류	19
2) 해저송전선로 보호공법 특징 분석	20
IV. 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 연구	25
1. 해저송전선로 보호방안 일반설계기준	25
1) 국내외 설계기준	25
2) 해저송전선로 보호공법 선정기준 사례	26
2. 해저송전선로 보호방안 지역특성	27
1) 제주 서남부지역 민원 유발 요인	27
2) 제주 서남부 연안 해양환경 특성	31
3) 제주 서남부 연안 문화재 분포 특성	34
3. 해저송전선로 보호방안 검토	35
1) 해저송전선로 보호방안 기준	35
2) 해저송전선로 보호방안 적용성	37
3) 해저송전선로 보호방안 적용성 검토결과	41
4. 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 연구	42
1) 해저송전선로 보호방안 수리모형실험	42
2) 해저송전선로 보호방안 수리모형실험 결과 및 분석	49
3) 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법 연구결과	53
V. 결 론	56
참고문헌	58

LIST OF FIGURES

Fig 1. Global cumulative offshore wind capacity in 2014	1
Fig 2. Long-term offshore wind farm development scenarios (~2035)	2
Fig 3. Offshore wind power system	3
Fig 4. Geological distribution in Moseulpo to Hallym area (2000)	6
Fig 5. Offshore wind available zones according to the depth	6
Fig 6. Major route of Typoons	8
Fig 7. Deep sea design wave	10
Fig 8. Submarine cable structure	11
Fig 9. Analysis of the causes of accidents submarine cable (Kordahi and Shapiro, 2004)	12
Fig 10. HVDC line between Jeju and land	14
Fig 11. The location of Woljeong offshore wind demonstration	18
Fig 12. The trenching method of Woljeong offshore wind	18
Fig 13. The onshore connetion of Woljeong offshore wind	18
Fig 14. Undersea transmission line protection method type	19
Fig 15. Burying (cable plough)	20
Fig 16. Water jet equipment	20
Fig 17. Cast steel pipe	21
Fig 18. Uraduct (UP Pipe)	21
Fig 19. Rock berm equipment	21
Fig 20. Side stone dumping	21
Fig 21. ACM	22
Fig 22. FCM	22
Fig 23. Concrete Mattress	23
Fig 24. W-Mattress	23
Fig 25. Stone bag	23
Fig 26. Concrete bag	23

Fig 27. A-duct	24
Fig 28. U-duct	24
Fig 29. Utility pole mattress	24
Fig 30. Utility ploe – artificial reefs	24
Fig 31. The artificial reefs area in southwestern coast of Jeju Island	28
Fig 32. Status of town fisheries in southwestern coast of Jeju Island	29
Fig 33. Distribution drawings of onshore fish farms of Jeju Island	30
Fig 34. Depth of water in southwestern coast of Jeju Island	31
Fig 35. National wind maps	32
Fig 36. The annual maximum wind speed of typoons in Korea	32
Fig 37. The distribution map of cultural property remains in southwestern coast of Jeju	34
Fig 38. The selection criteria of the submarine cable protection methods	35
Fig 39. The flow chart of the submarine cable protection methods	37
Fig 40. The procedure of hydraulic model tests	42
Fig 41. The facility of hydraulic model tests	43
Fig 42. Estimated grid point position of deep sea design wave	45
Fig 43. The tide and wave cycle in southwestern coast of Jeju (50 year)	45
Fig 44. The traget area of hydraulic model tests	46
Fig 45. Interval setting by water depth (7EA)	46
Fig 46. Standard cross-section of rock berm	47
Fig 47. Rock berm model	47
Fig 48. Standard cross-section of FCM	47
Fig 49. FCM model	47
Fig 50. Standard cross-section of stone bag	48
Fig 51. Stone bag model	48
Fig 52. The distribution of the wave height	49

LIST OF TABLES

Table 1. Offshore wind power projects in the pipeline in Japan	1
Table 2. Offshore wind farm development scenarios (unit : MW)	2
Table 3. Offshore wind development plan in Jeju Island	2
Table 4. Local wind resource estimation results in Jeju island (84M)	3
Table 5. Weather overview in southwestern coast of Jeju Island [Seogwipo, 1982~2011]	7
Table 6. The monthly wind speeds in southwestern coast of Jeju Island (unit : m/s)	7
Table 7. The status of major tyoons in Korea (2000~2012)	8
Table 8. The tide of southwestern coast of Jeju Island (Moseulpo)	9
Table 9. The wave direction of southwestern coast of Jeju Island	9
Table 10. The wave height and cycle in 50years frequency	10
Table 11. Damage factors of submarine cable	12
Table 12. The submarine cable protection methods of HVDC Line-1	13
Table 13. The submarine cable protection methods of HVDC Line-2	14
Table 14. The submarine cable protection methods	15
Table 15. The submarine cable protection methods (Heukildo and Masakdo)	15
Table 16. The examples of international submarine cable construction	16
Table 17. The submarine cable protection methods (International)	17
Table 18. Burying and trenching methods	20
Table 19. Cable wrapping methods	21
Table 20. Stone dumping methods	21
Table 21. Flexible mattress methods	22
Table 22. Tight mattress methods	22
Table 23. Bag type methods	23
Table 24. Reinforced concrete structure methods	24
Table 25. Protection methods (etc)	24

Table 26. The domestic standards	25
Table 27. The foreign standards	25
Table 28. Selection criteria of protection methods (KEPCO, 2012)	26
Table 29. The status of fishing boats in southwestern region of Jeju [Seogwipo Statistics, 2013.12]	27
Table 30. The status of town fisheries in southwestern coast of Jeju Island [Seogwipo Statistics, 2012]	28
Table 31. The status of onshore fish farms in Jeju Island (2014)	29
Table 32. The speeds of current in southwestern coast of Jeju Island ..	33
Table 33. The output of application to burying methods	38
Table 34. The comparison of burying methods	38
Table 35. The output of application to the first protection methods	39
Table 36. The comparison of the first protection methods	39
Table 37. The output of application to the second protection methods ...	40
Table 38. The comparison of the second protection methods	40
Table 39. Summary of wave transformation experiments	44
Table 40. The conditon of the joining tides by hydraulic model tests ...	45
Table 41. The specifications of rock berm model	47
Table 42. The specifications of FCM model	47
Table 43. The specifications of stone bag model	48
Table 44. The Case of hydraulic model tests	48
Table 45. Maximum wave height and significant wave height by position ...	50
Table 46. Maximum and minimum wave speeds by position	50
Table 47. The results of each case	51
Table 48. The dropout rates of protection methods by each case (%) ...	52

SUMMARY

The purpose of this study to derive the best protection method of the undersea transmission line from offshore wind farm in southwestern coast of Jeju Island. The undersea transmission line is laid on the seabed surface from the offshore wind farm to the land.

Since the transmission lines are placed on the seafloor, it is difficult to determine with the naked eye and it may result in damage to submarine cables due to a variety of reasons such as fishing boat, anchor, marine construction, natural disasters, etc. For this reason, the protection methods of undersea transmission line is very important factors to prevent from damaging to submarine cables. The protection methods of undersea transmission lines can be divided into three types : burying methods, direct cable protection methods and indirect cable protection methods.

The results are as follows. First, it is advisable to apply the protection methods of burying and digging when water depth is up to DL(-)3.7m. Second, direct cable protection methods are suitable for applying the steel pipe in all sector regardless of burying and digging. Third, under the condition of no burying and digging, there are three methods of indirect cable protection depending on the water depth. When the water depth is shallower than DL(-)10.0m, it is fit to apply Stone bag(12ton, two line and triangle binding). At the water depth between DL(-)10.0m and DL(-)20.0m, it is recommended to use FCM or smaller Stone bag than the Stone bag of 12ton. When the water depth is deeper than DL(-)20.0m, it is a good choice to apply Rock berm for the submarine cable protection methods

I. 서론

1. 연구 배경

지속된 전 세계적 경기침체에도 불구하고 해상풍력발전(Offshore wind Farm)은 Fig 1과 같이 매년 꾸준한 성장세를 보이고 있다. 지난 2014년에는 1,713MW의 설비가 신규 설치되어 총 8,759MW 용량의 해상풍력발전기가 가동되고 있으며, 이 중 91%(8,045MW)가 유럽지역에 설치되어 있고, 유럽의 경우 향후 2020년까지 현재의 3배정도 설비용량인 23.5GW가 설치될 예정이다.

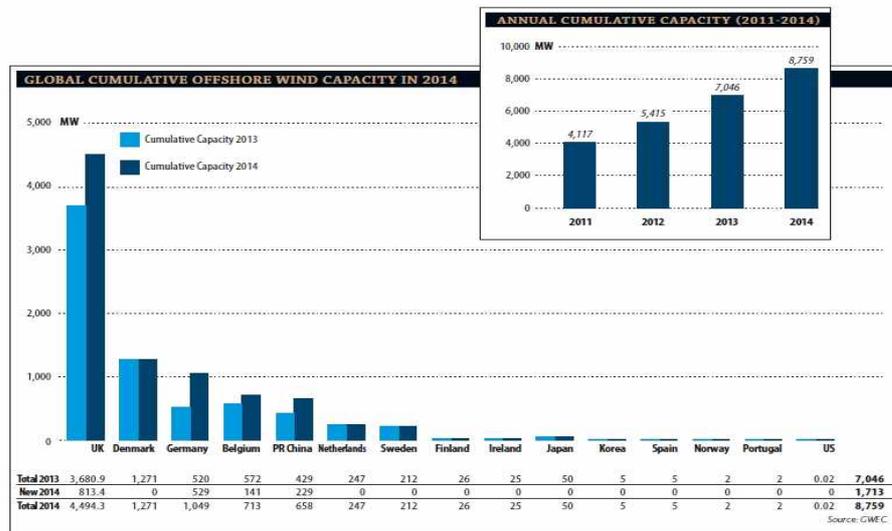


Fig 1. Global cumulative offshore wind capacity in 2014.

아시아에서는 중국이 2014년 12월 말 기준 658MW 용량의 해상풍력이 설치완료 하여 시장을 주도하고 있으며, 일본은 현재 45.6MW의 고정식 해상풍력과 4MW의 부유식 해상풍력 설비를 설치하여 총 49.6MW 용량의 해상풍력이 설치되어 있고, Table 1에서 보다시피 2020년경에 504MW 규모의 6개 프로젝트를 착수할 예정이다. [1]

Table 1. Offshore wind power projects in the pipeline in Japan

Project name	Location	Output (MW)	Wind turbines (MW)
Fukushima FORWARD	Fukushima	14	5-7
Kashima Port No.1	Ibaraki	125	5
Kashima Port No.2	Ibaraki	125	5
Yasuoka	Shimonoseki	60	4
Ishikarishinko	Hokkaido	100	2.5-5
Mutsuogawara	Aomori	80	2.5

우리나라는 2014년 9월 제4차 신·재생에너지 기본계획을 통해 2035년까지 신재생에너지를 1차에너지 대비 11%(전체 전력량 대비 13.4%) 공급목표를 설정하였으며, 이중 해상풍력은 Table 2, Fig 2와 같이 10.5GW 보급을 목표로 하고 있다. [2]

Table 2. Offshore wind farm development scenarios (unit : MW)

구 분	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035
누적규모	17	469	1,453	2,699	3,854	5,001	6,089	7,209	8,334	9,447	10,569

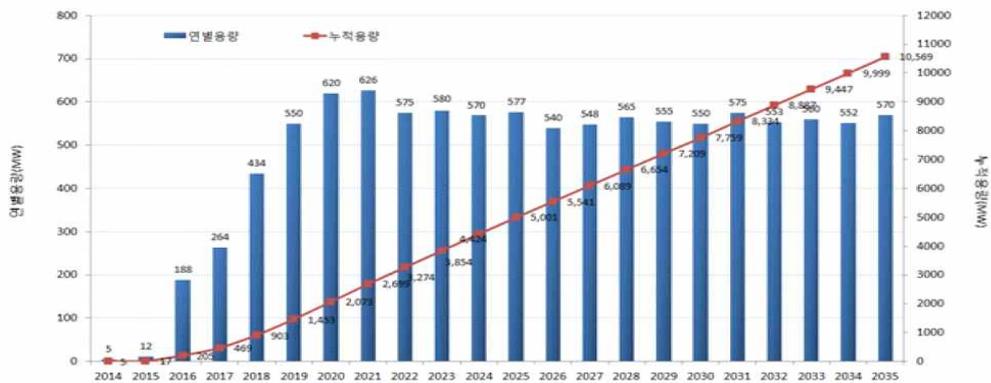
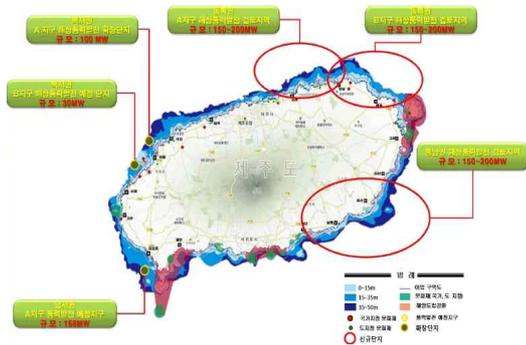


Fig 2. Long-term offshore wind farm development scenarios (~2035).

국내 가장 우수한 풍황자원을 확보하고 있는 제주도는 지난 2011년 『Carbon Free Island Jeju By 2030』 비전을 설정하고 2030년까지 Table 3과 같이 2GW 해상풍력 정책을 적극 추진하고 있다. 제주특별자치도 풍력발전 종합관리계획(2012)에 의거 현재 2개의 시범사업(한림, 대정)과 1개 사업(탐라)을 추진 중에 있으나, 주민수용성 부족 및 복잡한 인허가 등의 사유로 현재 까지도 결실을 맺지 못하고 난항을 겪고 있는 실정이다. [3]

Table 3. Offshore wind development plan in Jeju Island

구역	단지	개수 (EA)	용량 (MW)	합계 (MW)
1구역 (북동부)	1단지	46	230	580
	2단지	40	200	
	3단지	30	150	
2구역 (북서부)	1단지	26	130	460
	2단지	55	275	
	3단지	37	185	
3구역 (남서부)	1단지	40	200	430
	2단지	46	230	
4구역 (남동부)	2단지	52	260	400
	3단지	28	140	
합계		400	2,000	2,000



2. 연구 목적

해상풍력발전으로 전기를 생산해 내는 과정은 아래 그림 Fig.3와 같다. 먼저 해상에 설치된 해상풍력발전기에서 전기를 생산하면 풍력발전기와 육지간 연결된 해저송전선로(해저케이블)을 거쳐 육상 변전소에 연결되어 최종적으로 계통에 연계된다. 대부분 해상풍력에 대한 연구는 터빈 및 블레이드 등 풍력발전기 기자재 혹은 풍력발전기 하부구조에 국한되는 경우가 많다. 그러나 국내 해상풍력 추진시 민원 등 현실적인 문제를 야기시키고 있는 사항이 바로 해상풍력발전기와 육지간 계통연계임을 깊이 고민해 보아야 한다.

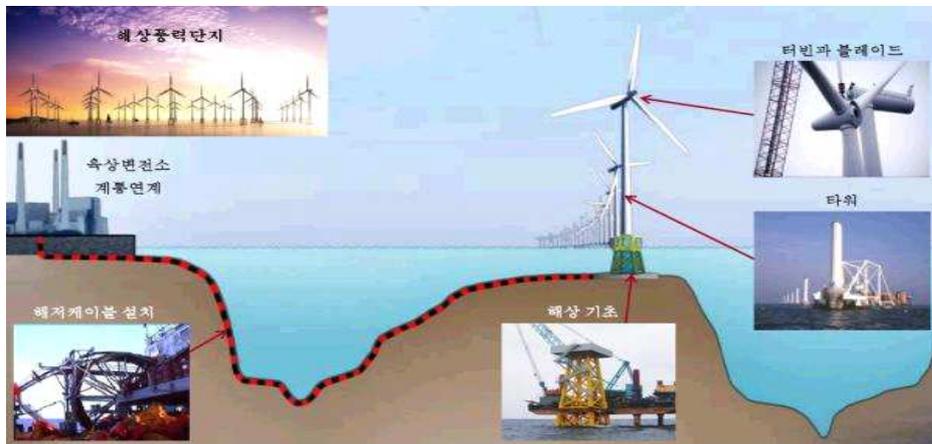


Fig 3. Offshore wind power system.

본 연구는 Table 4에서 확인할 수 있는 것처럼 평균풍속 및 평균 풍력에너지 밀도 등 제주도내 풍황자원이 가장 풍부한 제주 서남부 연안 환경친화형 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안에 대해 연구내용이다. [4]

Table 4. Local wind resource estimation results in Jeju island (84M)

측정 및 분석 요소	구 좌	한 립	대 정	표 선
연 평균풍속(m/sec)	8.40	7.70	8.7	8.01
평균 풍력에너지 밀도(W/m ²)	691.0	506.0	775.0	531.0
주 풍향(평균풍속/빈도)	WNW (20.6%)	E (29.8%)	N (23.5%)	N (61.2%)
Weibull 분포 C(m/sec)	9.4	8.7	9.8	9.0
Weibull 분포 K	1.89	2.03	1.92	2.21

먼저 제주 서남부 지역의 해양환경 특성을 조사·분석 하고자 한다. 일반적으로 해상풍력발전단지가 들어서기 위한 입지조건을 고려해 보면 풍황자원이 풍부하고, 해저면이 평탄해야 하며, 해저질은 주로 암반이 형성되어 해상풍력 하부구조물 설치가 용이 해야 한다. 또한 수심이 얕고 조류가 약하고 각종 간섭사항이 최소인 지역이 최적 조건을 갖춘 지역이다. 제주 서남부 지역은 풍부한 풍황자원이 확보되어 있기에 지형 특성 및 해양기상 특성, 해양물리 특성 등 해양환경 특성을 조사·분석을 통해 해상풍력 발전단지 입지여건을 분석하고자 한다.

다음으로 본 연구에서 주로 다루고 있는 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법에 대해 사례 및 자료를 중점적으로 하여 조사·분석 하고자 한다. 해저송전선로에 대한 주요 위해요소에 대해 알아보고, 이를 방지하기 위한 국내·외 해저송전선로 보호공법 적용사례를 조사하고자 한다. 이를 통해 해저송전선로 보호공법에 대해 1단계, 2단계, 3단계 보호방안으로 분류하여 그 종류 및 특징, 장·단점에 대해 분석을 수행하고자 한다.

이를 바탕으로 제주 서남부 연안 환경친화형 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안을 도출하기 위해 해저송전선로 보호방안 일반설계기준 및 제주 서남부 연안 지역특성을 고려한 보호방안 기준을 선정하고, 이를 적용하여 1단계, 2단계, 3단계 보호공법에 대한 적용성을 분석하고자 한다. 이렇게 선정된 적정 보호공법에 대해 최종적으로 수리학적 상사법칙에 의거 수리모형실험을 시행하여 세부적인 수심별 적정 해저송전선로 보호방안에 대한 최적 결과를 도출하여, 최종적으로 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안에 대한 적정 방안을 제안하고자 한다.

II. 제주 서남부 연안 해양환경 특성

1. 지형특성

1) 지형 및 지질

제주도의 지형은 신생대 제3기 플라이오세(Pliocene Epoch) 말부터 역사 시대에 걸쳐 활동한 화산분출물로 형성되었다. 따라서 제주도의 수계, 산계 및 해안 지형은 제주도를 형성한 화산의 활동시기 및 활동양상과 관련되어 다양한 특징이 나타내고 있다. 세부적으로 보면 해안저지대에 발달한 용암대지, 중앙부의 한라산 순상화산(楕狀火山) 및 그 위에 발달한 단성화산(單成火山)으로 크게 구분된다. 한라산의 정상부에는 장경 550m, 단경 375m인 산정분화구(백록담)가 있고, 섬의 장축 방향에는 약 360여 개의 단성화산이 산재하여 제주도의 전체 지형 및 경관을 지배하고 있다. 특히, 해안 주변에는 수성화산활동이 일어나 응회구 및 응회환이 분포하며, 이들은 해수의 침식작용으로 독특한 해안 지형을 보이고 있다. 이중 제주 서남부 지역은 해안을 따라 완만한 경사를 갖는 저지대가 형성되었으며, 전체적으로 완만하고 일부 오름들이 산재한 지역은 기복이 다소 있다. 지형경사는 동측의 한라산 쪽에서 서측으로 완만한 경사를 보인다.

제주도의 지질은 주로 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산 폭발에 의해 형성된 화산쇄설암, 퇴적층(암)이 존재한다. 용암 분출에 의해 형성된 암석은 성분으로 현무암, 조면현무암, 현무암질조면 안산암, 조면안산암 및 조면암 등으로 분류되고, 화산쇄설암은 수성화산분출과 스트롬볼리분출에 의해 형성된 것으로 구분된다. 또한 퇴적층은 용암과 용암 사이에 협재한 황적색 혹은 회색의 소규모 스킨리아성 니질퇴적암, 역암, 각력상 역암으로 주로 분류되고 있다. 제주 서남부 지역의 지질은 Fig 4의 모슬포·한림도폭(1:50,000)을 참고하면 주로 용암 분출에 의해 형성된 광해악현무암이 분포되는 것으로 확인되고 있으며, 일부 군산, 단산, 송악산, 당산봉, 수월봉 등은 수성화산분출에 의해 형성된 응회암으로 구성되어 있음이 확인되고 있다. [5]

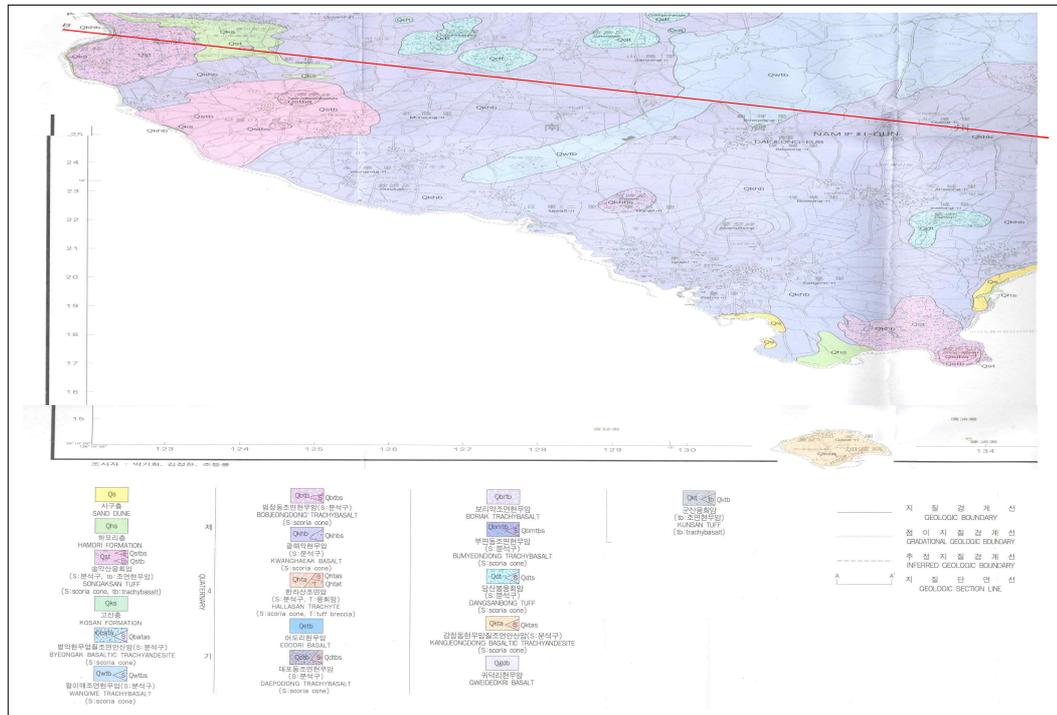


Fig 4. Geological distribution in Moseulpo to Hallym area (2000).

2) 수심 및 해저지형

제주도는 한라산을 중심으로 해안선에서 4~5km만 이격되면 수심이 50m 이상 급격히 증가한다. 현재 50m 이상 수심의 해상에서는 현실적으로 대규모 고정식 해상풍력발전단지 개발이 불가능하다. 이로 인하여 제주도는 풍황자원이 풍부함에도 불구하고 Fig 5를 보면 상당히 제한적으로 해상풍력단지 개발이 불가피한 실정이다.



Fig 5. Offshore wind available zones according to the depth. [6]

2. 해양기상 특성

1) 기상 특성

제주 서남부 연안에 대한 기상정보에 대한 신뢰도 확보를 위해 기상청 기상 연보 서귀포 지역 최근 30년간(1982~2011) 기상통계자료를 정리·분석하였다. [7] 아래 Table 5, 6을 보면 제주 서남부 지역의 기상 특성은 연평균 기온 16.7℃, 최고기온 35.6℃, 최저기온 -4.2℃, 연평균 풍속 2.9m/s, 최대풍속 26.2m/s(NNW), 강수량 연평균 1,932.9mm, 1일 최대강수량 365.5mm, 안개일수 20.6일, 폭풍일수(13.9m/s이상) 1.7일로 분석 되었다.

Table 5. Weather overview in southwestern coast of Jeju Island [Seogwipo, 1982~2011]

구 분			단위	제원	구 분		제원
바 램	최대 풍속	풍 속	m/s	26.2	현상 일수 (일)	맑 음	65.6
		풍 향		NNW		흐 립	123.2
	순간최대 풍속	풍 속	m/s	44.0		안 개	20.6
		풍 향		NNE		강 수	45.5
평균풍속			m/s	2.9		강 설	8.0
기 온	연 평 균		℃	16.7		결 빙	22.8
	최 고			35.6		뇌 전	14.2
	최 저			-4.2		폭 풍	1.7
강수량	연 평 균		mm	1,932.9		기 온	-
	일 최 다			365.5			

Table 6. The monthly wind speeds in southwestern coast of Jeju Island (unit : m/s)

구분	월별	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	전년
	평 균 풍 속		2.8	2.9	3.2	3.0	2.7	2.7	2.7	3.0	3.2	2.9	2.8	2.7	2.9
최 대 풍 속		15.0	14.3	15.7	15.0	14.7	17.0	19.3	26.2	16.7	15.3	14.7	13.3	26.2
		SW	N	ENE	NNE	N	ENE	ENE	NNW	NNE	NE	SSE	NNW	NNW
순 간 최 대 풍 속		31.4	25.0	27.8	29.0	26.8	25.9	28.7	44.0	36.8	24.7	27.6	25.4	44.0
		NE	NE	ENE	WNW	N	ENE	ENE	NNE	WNW	W	S	SSE	NNE

2) 태 풍

우리나라에 영향을 주는 태풍은 북태평양 해역에서 주로 발생하며 해마다 발생수는 다르지만 평균적으로 년 25개가 발생하여 Ta 그 중 2~3개가 주로 7~9월 사이에 우리나라에 영향을 미친다. 한반도에 영향을 미친 주요 태풍 자료는 Table 7과 같다. 거의 대부분 제주지역 인근을 거쳐 한반도로 이동하며 세력이 점차 약해지는 경향이 있다. 태풍 통계를 보면 남해를 거쳐 동해로 빠지는 태풍이 가장 위력적임을 확인할 수 있다. Fig 6에서는 한반도에 영향을 미치는 태풍의 주요경로를 확인할 수 있다.

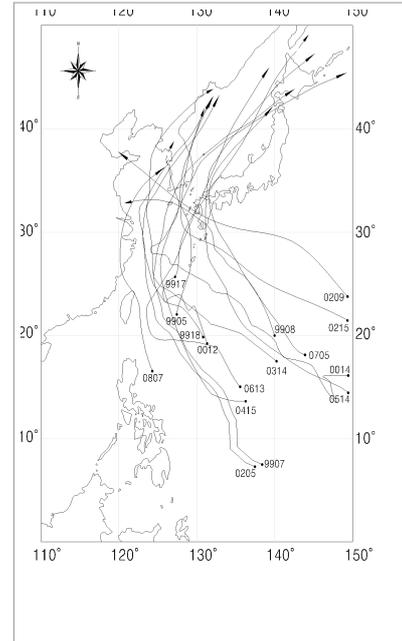


Fig 6. Major route of tyoons.

Table 7. The status of major tyoons in Korea (2000~2012)

태풍 번호	태풍명	발생일	발생위치		중심최저 기압(hPa)	중심최대 풍속(knot)	영향기간	피해지역
			북위	동경				
0012	PRALROON	2000.8.27	19.0	130.6	965	35	8.27~9.1	전국
0014	SAOMAI	2000.9.3	16.2	150.0	925	48	9.3~9.16	전국
0205	RAMMASUN	2002.7.2	9.6	138.2	945	88	7.4~7.6	전국
0209	FENGSHEN	2002.7.26	10.25	137.9	920	51	7.26~7.27	전남,제주
0215	RUSA	2002.8.26	13.28	140.5	950	41	8.30~9.1	전국
0314	MAEMI	2003.9.10	13.27	144.5	940	46	9.12~9.13	전국
0415	MEGI	2004.8.16	12.0	148.6	970	33	8.17~8.19	전국
0514	NABI	2005.8.22	15.0	147.5	925	49	9.6~9.7	제주,동남해안
0613	SHANSHAN	2006.9.10	15.6	134.8	925	52	9.17~9. 18	남부,동해
0705	USAGI	2007.7.29	18.2	142.7	945	45	8.3~8.4	제주,동남해안
0807	KALMAEGI	2008.7.15	16.7	124.5	960	39	7.19~7.20	경기,충청,강원
1004	DIANMU	2010.8.08	23.6	125.1	980	31	8.08~8.12	남부지방
1007	KOMPASU	2010.8.29	21.2	134.4	960	80	9.1~9.2	전국
1009	MALOU	2010.9.03	23.2	130.9	985	50	9.6~9.7	남부지방
1109	MUIFA	2011.7.28	12.1	135.2	930	50	8.7~8.8	남서해안
1112	TALAS	2011.8.25	26.4	137.9	965	38	8.30~9.2	동해안
1207	KHANUN	2012.7.16	28.9	126.9	988	25	7.17~7.18	서해안
1214	TEMBIN	2012.8.19	21.2	125.4	945	45	8.20~8.23	남해안
1215	BOLAVEN	2012.8.20	25.9	128.9	920	53	8.24~8.26	남서해안
1216	SANBA	2012.9.11	19.1	129.8	910	56	9.14~9.15	남동해안
1217	JELAWAT	2012.9.21	19.1	125.4	910	57	9.25~9.27	동해안

3. 해양물리 특성

1) 조위 및 조석

제주 서남부 연안에 위치한 모슬포 검조소 장기 관측결과(Table 8)를 인용하면 모슬포항 기준으로 조석은 반일주조가 우세한 혼합조형으로, 대조차는 209.0cm, 평균조차는 147.2cm, 소조차는 85.4cm를 나타내고 있다.

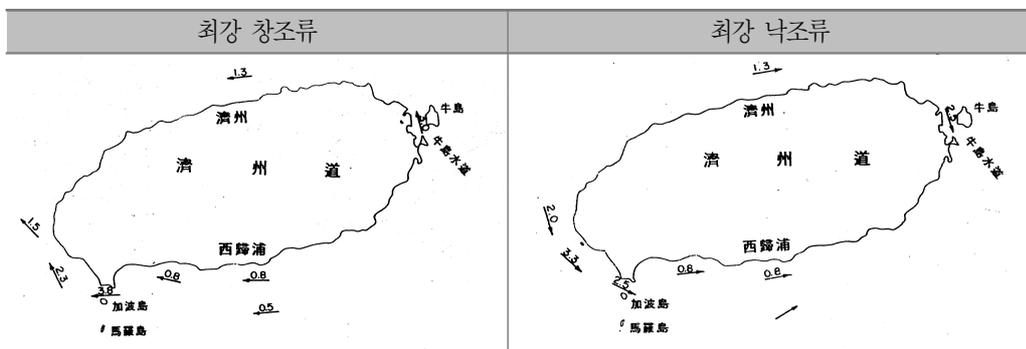
Table 8. The tide of southwestern coast of Jeju Island (Moseulpo)

비 조 화 상 수	조 위 (cm)	조 위 도(모슬포항)
약최고고조위(Approx.H.H.W)	(+) 294.0	
대조평균고조위(H.W.O.S.T)	(+) 251.5	
평균 고조위(H.W.O.M.T)	(+) 220.6	
소조평균고조위(H.W.O.N.T)	(+) 189.7	
평균 해면(M. S. L)	(+) 147.0	
소조평균저조위(L.W.O.N.T)	(+) 104.3	
평균저조위(L.W.O.M.T)	(+) 73.4	
대조평균저조위(L.W.O.S.T)	(+) 42.5	
약최저저조위(Approx.L.L.W)	(±) 0.0	

2) 조 류

제주 서남부 연안 조류는 정확한 측정치는 없으나, 국립해양조사원에서 조사한 자료에 의하면 아래 표와 같이 해역에 2.3knot 창조류(밀물)는 북서·북북서방향으로, 낙조류(썰물)는 남동·남남동방향으로 3.3knot 흐름값을 나타냈다.

Table 9. The wave direction of southwestern coast of Jeju Island



3) 파 랑

제주 서남부 연안 파랑분포는 별도의 장기 실측자료가 없는 관계로 한국해양연구원의 개정 심해설계파 자료를 참고하여 추정할 수 있다. 제주 서남부 연안에 가장 인접한 격자점 87번(격자 055137, 위도 33.15, 경도 126.00), 88번(격자 056138, 위도 33.01, 경도 126.17) 위치(Fig 7)에서의 최종 설계파 추산결과는 Table 10과 같다.

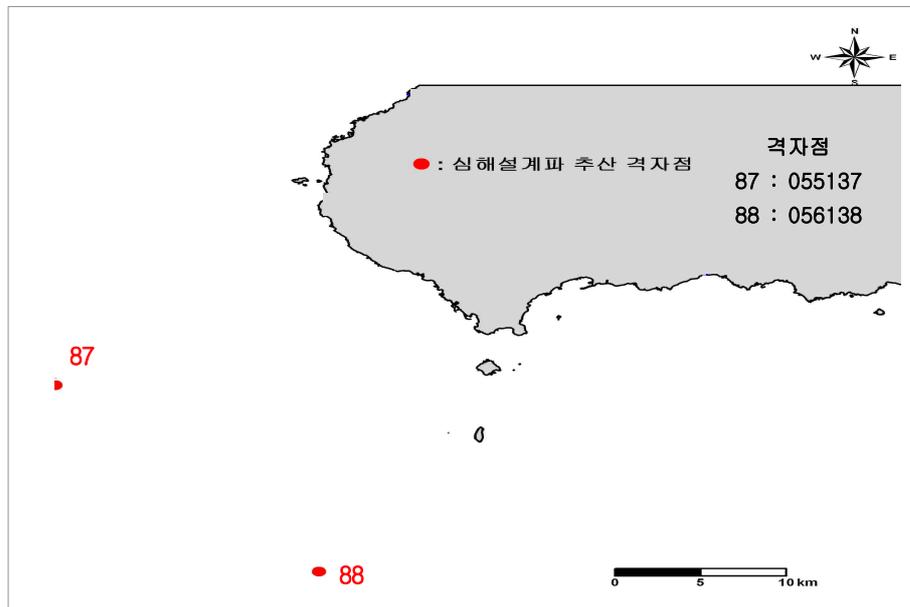


Fig 7. Deep sea design wave.

제주 서남부 50년 빈도 심해설계파는 87, 88번 격자점 기준시 SSE~ESE 파향의 파랑이 내습할 때 설계파고는 11.28~11.67m, 이때 주기는 14.29~14.54sec로 나타났다. 이는 해상풍력 단지와의 이격거리가 최소 10km 이상 이어서 이에 대한 보정은 필요하다. [8]

Table 10. The wave height and cycle in 50years frequency

NO	구 분	파 향															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
87	설계파고	7.8	8.54	10.18	10.27	10.31	10.98	11.22	11.28	10.70	8.69	6.84	5.18	6.34	7.54	8.67	8.67
	주 기	12.13	12.72	14.33	14.43	14.05	14.18	14.30	14.29	13.98	12.81	11.60	9.88	11.01	12.09	12.94	12.65
88	설계파고	7.15	9.23	10.48	10.36	10.98	11.67	11.53	11.21	10.72	8.77	6.60	5.80	5.88	7.51	8.62	6.19
	주 기	12.02	13.95	14.99	14.60	14.42	14.54	14.48	14.31	14.02	12.86	11.43	10.42	10.60	12.09	12.90	10.71

Ⅲ. 해저송전선로 보호공법

1. 해저송전선로 일반사항

1) 개요

제주 연안에서는 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 검토시 일반적인 해저송전선로에 비해서 많은 제약조건이 존재한다. 먼저, 제주도는 세계 7대 자연경관으로 자연환경을 훼손할 수 있는 해저면 굴착이 쉽지 않다. 또한, 마을 어장과 해녀, 양식장 등이 제주도 전 지역에 산재해 있으며, 해저면 굴착시 부유물 발생 등으로 인한 민원이 예상된다. 이외에도 제주도는 태풍이 지나가는 길목으로 해저송전선로의 안정성 확보에 영향을 줄 수 있다.

2) 해저케이블

해저케이블은 Fig 8과 같은 구조로 기본적으로 HVAC(High voltage alternating current)와 HVDC(High voltage direct current)로 나뉘며, 절연방식은 함침지유절연과 압출플라스틱(XLPE 등) 절연으로 대별된다. HVAC는 3상의 각 도체에 교류를 전송하는 방식이며, HVDC는 주 도체와 귀로도체 또는 해수귀로를 이용하여 직류로 전력을 전송하는 방식이다. 케이블의 직경은 최대 300mm에 달하며, 주로 허용전류용량과 케이블외장의 크기에 따라 결정된다.



Fig 8. Submarine cable structure. [9]

3) 해저송전선로 위해요소

지난 2006년에는 해남~제주 HDVC 제1연계선 사고로 제주지역내 대규모 정전사태가 발생하였다. 사후조사에 따르면 사고 지점이 대형선박이 항행하는 횡간수로 구간이고, 케이블에 남아있는 외상으로 미루어 선박의 닻 등에 의한 외부손상으로 추정되어 지고 있다.[10]

Table 11. Damage factors of submarine cable

위 해 요 소	세 부 유형
어선의 조업형태	안강망 어선, 트롤 어선 등 조업에 의한 손상
선박의 닻	각종 선박의 닻(앵커)에 의한 손상 (상선, 어선, 바지선 등)
해상공사	준설, 매립 등 해상공사
자연재해	지진 및 해저면 단층 활동 등

일반적으로 해저케이블의 안전을 위협하는 위해요소로는 Table 11, Fig 9에서 알수 있듯 인위적인 어업활동에서 비롯되는 외부적인 환경요인이 우세하게 나타났으며, 트롤어선의 전개판이나 안강망 어선의 앵커와 같은 조업도구인 경우가 대부분이다. 또한 인간의 어업활동에 사용되는 나무말목이나 쇠말목의 설치와 대형 선박의 통항에 따른 앵커의 투하 충격 및 끌림, 태풍이나 계절풍으로 인한 파력 역시 해저케이블 위해요소로 작용하고 있다. [11]

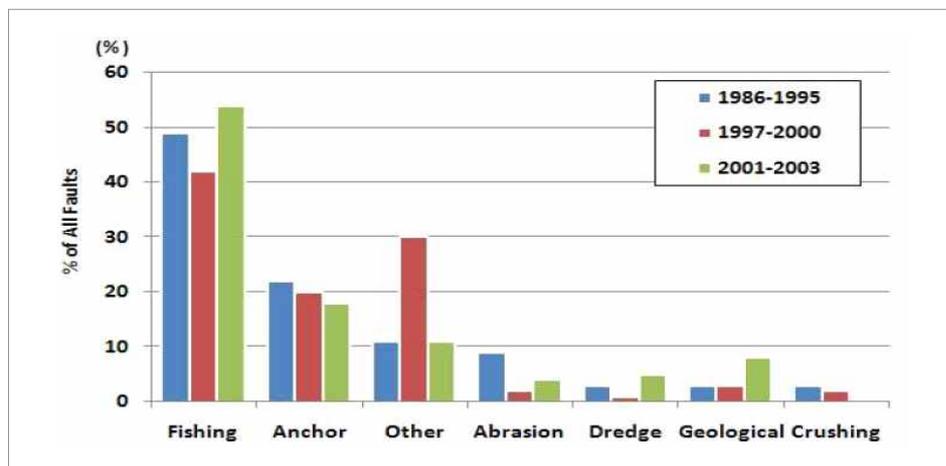


Fig 9. Analysis of the causes of accidents submarine cable (Kordahi and Shapiro, 2004).

2. 해저송전선로 보호공법 사례

1) 국내 사례

(1) 해남~제주 HVDC 해저케이블(제1연계선) 보호공법 사례

Fig 10의 해남~제주 HVDC 해저케이블(제 1연계선)은 먼저 해저지형의 특징 및 어장의 위치 등에 따라서 총 7구간으로 나누어진다. 해저케이블 보호공법으로는 일부구간 매설, 주철관과 같은 1차 보호공법 및 Concrete mattress 등의 2차 보호공법을 사용했다. 세부 구간에 따른 보호공법 적용은 Table 12와 같다. [12]

Table 12. The submarine cable protection methods of HVDC Line-1 [12]

구 분	해저질	굴착	수심 (m)	유속 (knot)	위해요인	보호공법
해 남 연안구간	실트 진흙	가능	0~5	0.9~ 1.1	소형 앵커에 의한 손상	매설(2.0m) + 주철관
해 남 근 해 양식구간	실트 모래 진흙	가능	5~30	1.2~ 1.4	나무, 쇠파이프에 의한 손상	매설(0.5m) + W-mattress
동 화 도 동쪽구간	단단한 토질	불가	22~27	1.8~ 2.4	나무, 쇠파이프에 의한 손상	주철관 + Electronic-mattress
황간수도 구 간	실트 모래 자갈	가능	25~40	2.8~ 4.2	대형 앵커에 의한 손상	매설(0.5m) + A-duct
소 안 도 양식구간	실트 모래 진흙	가능	16~40	2.0~ 2.4	나무, 쇠파이프에 의한 손상	매설(0.5m) + W-mattress
제주해협 구 간	실트 모래	가능 trench	40~135	1.6~ 2.2	안강망 어선등에 의한 손상	매설(0.5m) + 일부구간 Rock berm
제주연안	암반	가능 trench	15~40	1.4~ 1.6	소형 앵커에 의한 손상	trench (0.5m) + 주철관 + 사석 퇴메우기 + 전주 인공어초
	암반	가능 trench	0~15	1.4~ 1.6	파랑에너지에 의한 손상	trench (1.0m) + 주철관 + U-duct + Stone bag

(2) 진도~제주 HVDC 해저케이블(제2연계선) 보호공법 사례

진도~제주간 해저케이블에서 해저 지질이 기반암일 경우 적용되는 Rock berm이나 제주 연안에서 사용되는 U-Duct, Stone Bag 등은 해남~제주간 해저케이블과 크게 다르지 않다. 그러나 진도~제주간 해저케이블 사업에서는 과거 양식어장 구간에서 사용되었던 Concrete mattress보다 시공성, 안정성이 더욱 향상된 FCM, W-mattress 등이 적용되었고, 제주 연안에서 파력에 취약했던 U-Duct를 보완하여 인공어초가 적용되었다. 세부 구간에 따른 보호공법 적용은 Table

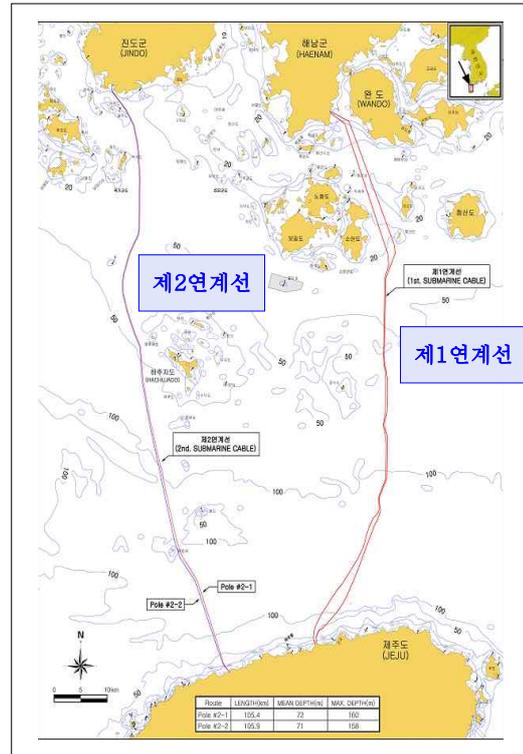


Fig 10. HVDC line between Jeju and land.

13와 같다. FCM은 철근콘크리트 셸을 매트리스 형태로 연결한 공법으로 앵커 2톤이상 충격 및 끌림에 우수하고 요철이 심한 지역에서도 시공할 수 있다. 양식어장 구간에서 주로 사용되며 공사비가 비교적 고가이다. W-mattress는 매트리스 연결부가 겹치도록 고안된 공법으로 안정성이 높으며 앵커와 쇠파이프에 의한 낙하충격에 우수하며 양식어장 구간이나 보수·보강 지점에서 주로 사용된다. [13]

Table 13. The submarine cable protection methods of HVDC Line-2 [13]

구 분	보 호 공 법
진도연안 0.7km 까지	우레탄보호관 + 2m 이상 매설 및 사석채움
양식구간	케이블 1m 이상 매설 + W-mattress
항로 및 제주해협 구간	퇴적층 5m 이상시 3m 이상 매설 매설심도 부족시 사석보호
제주연안	우레탄보호관 + 1m 이상 매설 + Stone Bag

(3) 기타 국내 해저케이블 보호공법 사례

국내 22.9kV 배전용 해저케이블의 보호는 지반 여건에 따라 다르지만 대체로 토사 구간인 경우 매설 공법을 주로 사용하는데, 매설깊이는 2m 정도이다. 지역에 따라서는 케이블을 매설하기 전에 먼저 주강관 등을 사용하여 1차 보강을 실시한다. 암반 구간은 1.5m 정도를 굴착하고 쇄석으로 되메움하거나, 1차 주강관으로 보호한 후 매설하는 방법을 적용하기도 하였다. 아래 Table 14는 배전용 해저케이블 보호공법 적용 사례이다.

Table 14. The submarine cable protection methods

구 분	보 호 공 법			길이
	토사구간	암반구간	양식장	
조약도 ~ 생일도	2m 매설 (뺨)	-	-	2.5km
육지도 ~ 연대도	2m 매설 (뺨)	1.5m 굴착+쇄석	-	1.5km
장고항 ~ 국화도	2m 매설 (뺨) + 주철관(자갈)	-	-	1.2km
완도 ~ 소안도	2m 매설 (뺨) + 주강관	1.5m 굴착 + 주강관 + 쇄석	2m 굴착 + 주강관	2.8km
노룩도 ~ 념도	2m 매설 (뺨) + 주철관(자갈)			0.98km

지난 2012년 태풍 블라벤으로 인한 손상을 입은 흑일도-마삭도 구간 해저케이블 보강공사에 적용된 보호공법은 아래 Table 15와 같다.

Table 15. The submarine cable protection methods (Heukildo and Masakdo)

구 분	쇄 과 대	천 해 부	모래 등
단면도			
구간높이	DL(-)2.0 ~ DL(-)6.0	DL(-)20.0 ~ DL(-)40.0	DL(-)8.0 ~ DL(-)35.0
구간연장/누계	34.0 / 3,440.0	2,484.0 / 2,716.0	488.0 / 3,204.0
지반조건	자갈	암	모래

2) 해외 사례

해저케이블 보호공법 해외 사례를 살펴보면, 해저케이블을 그대로 포설하는 경우가 있는데, 이는 이중개장 케이블을 사용하여 일차적으로 보호함과 동시에 순시선 운영과 Buoy 설치를 통해서 케이블을 보호한다. 또한, 매설하는 경우 깊이는 1.0~2.5m 정도이며, 수심에 따라서는 매설에 앞서 먼저 주철관 등으로 케이블을 보호하고 있다. 그러나 대규모의 연안 어장이 발달해 있어 해저케이블에 대한 위험요인이 상존하는 우리나라의 실정을 감안할 때 해외의 사례와는 많은 차이가 있다. Table 16, 17은 해외 사례를 정리한 자료이다. [14]

Table 16. The examples of international submarine cable construction

사 업 명	케이블 제원			기타 참고사항			비고
	전압 (kV)	용량 (MW)	도체 (mm ²)	길이 (km)	수심 (m)	포설선 제원	
Skagerrak Strait (Denmark-Norway)	250	500	800	125	570	C/S Skagerrak (10,000 ton)	DC
Canada-Vancouver	280	370	-	33	400	C/S Skagerrak	DC
	525	1200	1600	39	400		AC
Cross Channel (England-France)	270	2000	900	45 ×4 ×2	60	ITM Venturer	DC
Fenno-Skan (Sweden-Finland)	400	500	1200	200	117	C/S Skagerrak (10,000 ton)	DC
Long Island Sound (U.S.A)	345	750	2000	13 ×4 ×2	40	Giulio Verne	AC
Konti-Skan (Sweden-Denmark)	250	250	625	67	80	C/S Skagerrak and Goliat2	DC
SACOI (Sardinia-Corsica, Italy)	200	200	420	119	500	-	DC
Tsugaru Strait (Hokkaido - Honshu, Japan)	250	300	600	43	300	Hoshomaru (7,500 ton)	DC
Cook (Inlet-Anchorage)	250	600	520	39	255	Vibro-Hydrojet Cable Burying Sled	AC

Table 17. The submarine cable protection methods (International)

사 업 명	해저케이블 보호공법
Skagerrak Strait (Denmark-Norway)	<ul style="list-style-type: none"> □ 노출 포설 (이중개장 케이블) □ 순시선 운영 및 Buoy 설치
Canada-Vancouver	<ul style="list-style-type: none"> □ 0.5m 굴착 + Rock Dumping
Cross Channel (England-France)	<ul style="list-style-type: none"> □ 연안수심 4m 이하구간 □ 1.5m 매설, bore polyethylen pipe □ 전 구간 1.5m 매설 □ Hard material로 사전 굴착공법 사용
Fenno-Skan (Sweden-Finland)	<ul style="list-style-type: none"> □ 노출 포설 (이중개장 케이블) □ 0.5m 굴착 + Concrete mattress (빙하)
Long Island Sound (U.S.A)	<ul style="list-style-type: none"> □ 1m 매설(수심 11m 이하) □ 그 외 1.5m 매설
Konti-Skan (Sweden-Denmark)	<ul style="list-style-type: none"> □ 노출 포설(이중개장 케이블) □ 보강 : 0.7m 매설(Armour 두께 8mm)
SACOI (Sardinia-Corsica, Italy)	<ul style="list-style-type: none"> □ 노출 포설 □ 보강 : 50m간격 200ton 수중 구조물 설치
Tsugaru Strait (Hokkaido- Honshu, Japan)	<ul style="list-style-type: none"> □ 1.5~2m 매설+주철관(~45m) □ 주철관(수심 65m(Rock)) □ 해저부 : 1.5m 매설
Cook (Inlet-Anchorage)	<ul style="list-style-type: none"> □ 2.5m 매설(모래, 빨)

3) 국내 해상풍력 유사사례 (제주 월정)

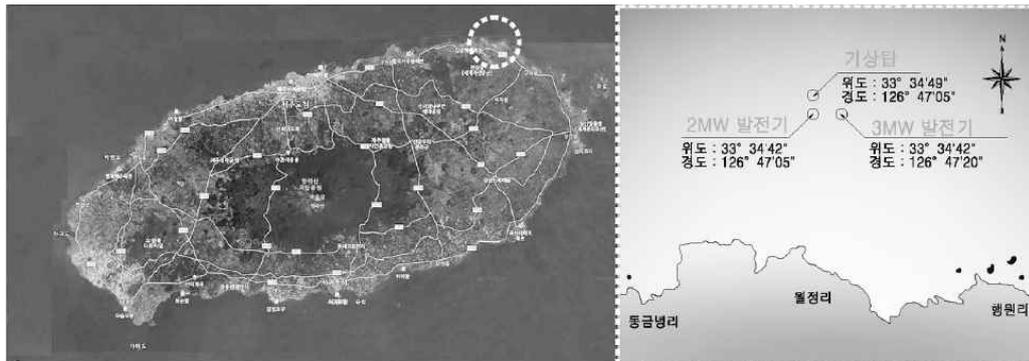


Fig 11. The location of Woljeong offshore wind demonstration. [15]

국내 해상풍력은 2015년 현재 Fig 11에서 제주도 월정 정면 해상에 설치된 2MW, 3MW 해상풍력발전 실증단지가 유일하다. 해당 실증단지는 해안가에서 약 1.3km 이격되어 있고 해저송전선로는 굴착 및 매설을 시행하였다.

월정해상풍력 실증단지과 연계되는 해저송전선로 구축시 Fig 13처럼 육상에서 부터 포크레인 등 장비를 활용하여 바지선이 접근 가능한 지역까지 굴착 후 원토 되메우기를 적용하였다. 해저부 매설작업은 Fig 12처럼 해저케이블 경로에 따라 쇄암봉을 활용하여 깊이 2m 이상 굴착을 시행 및 해저케이블 설치 완료 후 해저케이블 경로에 바지선을 고정시켜 해저면 상단 3~5m 높이에서 원토 되메우기를 진행하였다.



Fig 12. The trenching method of Woljeong offshore wind.



Fig 13. The onshore connection of Woljeong offshore wind.

3. 해저송전선로 보호공법 종류

1) 해저송전선로 보호공법 종류

해저송전선로 보호공법의 종류는 크게 ① 매설(굴착) 보호공법, ② 1차 보호공법(케이블 직접보호), ③ 2차 보호공법(케이블 간접보호)로 구분할 수 있으며 세부적인 공법은 아래의 그림과 같다.



Fig 14. Undersea transmission line protection method type.

먼저 매설하는 형태의 보호공법에는 매설기의 종류에 따라서 Burying (plough), Trenching(Water jetting), Trenching(Wheel cutter), Trenching (Chain cutter), Trenching(dredging) 등이 있고, 케이블을 감싸는 형태에는 주강관, Uraduct(UP Pipe) 등이 있다.

돌을 쌓는 형태의 보호공법에는 Rock berm, Side stone dumping 등이 있고, 유연한 mattress 형태에는 ACM (Articulated Concrete Mattress), FCM (Flexible Concrete Mattress), 전주-mattress, ASF(Artificial Seawood Fronds) 등이 있다. 또한 단단한 mattress 형태에는 Concrete mattress, W-mattress 등이 있고, Bag 구조의 보호공법에는 Stone bag, Concrete bag, Mortar bag 등이 있으며, 철근콘크리트 구조에는 A-duct, U-duct 등이 있으며, 기타 형태로는 전주-인공어초 구조물이 있다. [14]

2) 해저송전선로 보호공법 특징 분석

(1) 매설하는 형태의 보호공법 특징

Table 18. Burying and trenching methods [11]

구 분	형태 및 방법	장 점	단 점
Burying (Plough)	□ 쟁기식 매설기를 이용, 해저면에 포설된 케이블을 매설하는 공법	□ 안간망 어선의 앵커 끌림에 대한 보호 우수	□ 저질의 상태에 따라 매설이 불가능한 구역 존재(타 공법 적용 필요) □ 공사비용 고가
Trenching (Water Jetting)	□ 포설된 해저케이블을 Water Jet을 이용, 일정 깊이만큼 매설하는 공법	□ 소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수	□ 대형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 취약 □ 쇠파이프 투하에 대한 보호 취약 □ 공사비용 고가
Trenching (Wheel Cutter)	□ 포설된 해저케이블을 Wheel Cutter을 이용, 일정 깊이만큼 매설하는 공법	□ 소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □ 암반 지역에 대한 케이블 매설 능력 우수	□ 공사비용 고가
Trenching (Chain Cutter)	□ 포설된 해저케이블을 Chain Cutter을 이용, 일정 깊이만큼 매설하는 공법	□ 소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □ 암반 지역에 대한 케이블 매설 능력 우수	□ 공사비용 고가
Trenching (Dredging)	□ 해저케이블의 포설이 예정된 암반지역을 준설하는 공법(쇄암 등) □ 해저케이블 포설 후 준설시 조각난 암석을 이용하여 되메우기 실시	□ 소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □ 파력에 대한 안정성 우수	□ 파력에 의해 되메우기 될 우려 존재 □ 암반 지역을 설계에 맞게 준설하는 부분의 어려움 존재 □ 긴 공사 기간



Fig 15. Burying (cable plough). [16]



Fig 16. Water jet equipment. [16]

(2) 케이블을 감싸는 형태 보호공법 특징

Table 19. Cable wrapping methods [11]

구 분	형태 및 방법	장 점	단 점
주강관	<ul style="list-style-type: none"> □ 외부의 충격에 대한 방어막 형태 □ 다양한 소재로 제작 가능 □ 일정각도 회전 가능 	<ul style="list-style-type: none"> □ 소형 앵커 투하에 대한 보호 우수, 보호설비 설치 후 케이블 포설 가능 □ 여러 가닥의 케이블 보호 및 포설 가능 	<ul style="list-style-type: none"> □ 대형 앵커 투하 및 끌림에 대한 보호 취약 □ 쇠파이프 투하 보호 취약
Urduct (UP Pipe)	<ul style="list-style-type: none"> □ Polyurethane 계열 제품 □ 케이블 및 파이프를 감싸서 보호하는 형태 	<ul style="list-style-type: none"> □ 나무말목 투하 보호 우수 □ 조류에 의한 케이블 손상 보호 우수 	<ul style="list-style-type: none"> □ 앵커 끌림 및 투하에 대한 보호 취약 □ 쇠파이프 투하 보호 취약



Fig 17. Cast steel pipe. [16]



Fig 18. Urduct (UP Pipe). [16]

(3) 돌을 쌓는 형태의 보호공법 특징

Table 20. Stone dumping methods [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
Rock berm	<ul style="list-style-type: none"> □ 포설 혹은 매설되어 있는 해저케이블 상단에 일정한 단면을 가지도록 돌을 쌓는 형태 	<ul style="list-style-type: none"> □ 앵커 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □ 안강망 앵커 끌림에 대한 보호 우수 	<ul style="list-style-type: none"> □ 쇠파이프 투하 보호 취약 □ 공사비용 고가 □ 해저지형고 변형, 허가요
Side Stone Dumping	<ul style="list-style-type: none"> □ 해저케이블 상단부의 양측면에 돌을 쌓는 형태 	<ul style="list-style-type: none"> □ 앵커의 끌림에 대한 보호 우수 	<ul style="list-style-type: none"> □ 앵커 투하 보호 취약 □ 설치폭 확보 필요 □ 해저지형고 변형, 허가요 □ 공사비용 고가

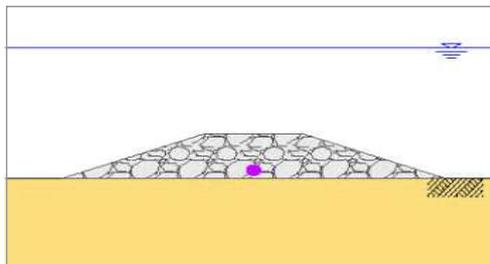


Fig 19. Rock berm equipment. [16]



Fig 20. Side stone dumping. [14]

(4) 유연한 Mattress 형태의 보호공법 특징

Table 21. Flexible mattress methods [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
ACM	□ 여러 가지 모양의 콘크리트 셀을 연결한 형태	□ 케이블이 매설되어 있는 경우 앵커 투하 및 끌림에 대한 보호 우수	□ 쇠파널 투하 보호 취약 □ 케이블 기 포설된 경우 앵커투하 보호 취약
FCM	□ 정방향의 철근콘크리트 셀을 틈이 없도록 배치하여 연결한 형태	□ 케이블이 매설되어 있는 경우 앵커 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □ 요철 심한지역 및 보호설비 겹침 부분 시공용이	□ 쇠파널 투하 보호 취약 □ 케이블 기 포설된 경우 앵커투하 보호 취약
전주-Mattress	□ 매트리스를 감싸는 형태 □ 연결부를 겹쳐지게 설계, 기존의 매트리스 구간을 보강	□ 앵커 및 쇠파널의 투하에 대한 보호 우수 □ 공사비용이 저렴하며 친환경적	□ 케이블 기 포설된 경우 앵커 끌림 보호 취약 □ 해저지형고 변형, 허가요
ASF	□ 인공해조류가 부착된 매트리스를 세굴 가능성이 있는 지역에 설치	□ 세굴 방지 효과 높음 □ 인공어초의 역할도 수행	□ 낙하물로부터 케이블 보호 능력 없음 □ 앵커 끌림 보호능력 없음



Fig 21. ACM. [16]



Fig 22. FCM.

(5) 단단한 Mattress 형태의 보호공법 특징

Table 22. Tight mattress methods [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
Concrete mattress	□ 해저케이블 상단에 연속된 Concrete mattress를 설치하는 형태	□ 나무말목 투하에 대한 보호 우수	□ 쇠파널 투하 보호 취약 □ 앵커 투하 및 끌림에 대한 보호 취약
W-mattress	□ 매트리스를 감싸는 형태 □ 연결부를 겹쳐지게 설계하여 안정성 확보	□ 앵커와 쇠파널 투하에 대한 보호 우수 □ 케이블이 매설되어 있는 경우 앵커 끌림에 대한 보호 우수	□ 해저지형고 변형, 허가요 □ 케이블이 기 포설된 경우 앵커 끌림 보호 취약

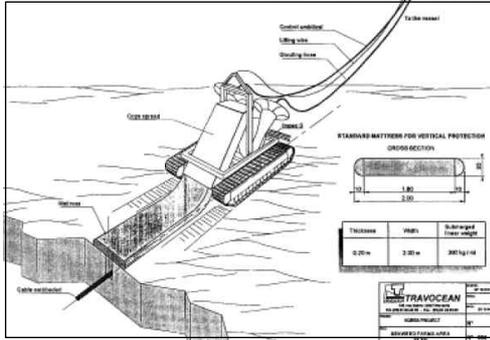


Fig 23. Concrete mattress. [14]



Fig 24. W-mattress. [16]

(6) Bag 구조 보호공법 특징

Table 23. Bag type methods [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
Stone bag	□ 쇠석을 폴리에스터 재질의 망에 담아서 케이블 상단에 설치하는 형태 (서로 겹치게 시공)	□ 앵커 투하 보호 우수 □ 해저지형의 요철에 대한 대응력 우수 □ 추가 보강공법으로 적용 가능하며 복구성 우수	□ 쇠말목 투하 보호 취약 □ 앵커의 끌림 보호 취약 □ 해저지형고 변형, 허가요
Concrete bag	□ 마대 자루에 콘크리트(시멘트+모래+자갈)을 넣고 섞은 후 수중에 설치하는 형태	□ 재료 구입 용이 □ 해저지형 변화에 맞게 시공 가능	□ 쇠말목 투하 보호 취약 □ 공사비용 고가
Mortar bag	□ 마대자루에 모르타르(시멘트+모래)를 넣고 섞은 후 수중에 설치하는 형태	□ 재료 구입 용이 □ 해저지형 변화에 맞게 시공 가능	□ 나무말목 및 쇠말목 투하 보호 취약 □ 공사비용 고가



Fig 25. Stone bag. [16]



Fig 26. Concrete bag. [16]

(7) 철근콘크리트 구조 보호공법 특징

Table 24. Reinforced concrete structure methods [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
A-duct	□ 프리캐스트콘크리트 구조물의 한 종류로서 아치 형태의 구조물	□ 앵커의 투하 끌림에 대한 보호 우수 □ 나무말목 및 쇠말목 투하에 대한 보호 우수 □ 직접적인 충격전달 방지	□ 큰 중량으로 구조물의 폭이 커 운반이 어려움 □ 해저지형고 변형, 허가요
U-duct	□ 프리캐스트콘크리트 구조물의 한 종류로서 이음부가 요철 형태인 구조물	□ 소형 앵커 투하에 대한 보호 우수 □ 시공 간편	□ 대형앵커 끌림 보호 취약 □ 얇은 수심 내에서 파력에 의한 전도 가능성 높음 □ 해저지형고 변형, 허가요



Fig 27. A-duct. [16]

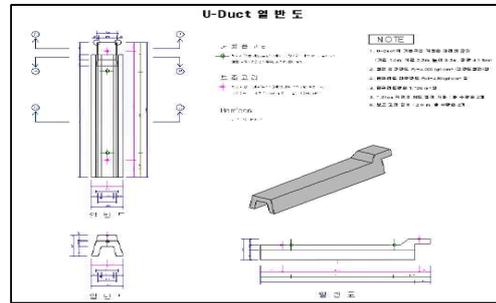


Fig 28. U-duct. [16]

(8) 기타 형태 보호공법

Table 25. Protection methods (etc) [11]

보호공법	형태 및 방법	장 점	단 점
전주-인공어초	□ 주철관과 U-duct가 파력에 의한 전도 방지 □ 해저케이블 보호와 인공어초 역할을 동시에 수행	□ 파력으로 인한 전도 가능성이 낮은 구조 (태구조) □ 소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수	□ 암반지역에 시공할 경우 바닥고르기 작업 필요 □ 설치폭 확보 필요 □ 공사비용 고가



Fig 29. Utility pole mattress. [16]



Fig 30. Utility ploe - artificial reefs. [12]

IV. 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 연구

1. 해저송전선로 보호방안 일반설계기준

1) 국내외 설계기준

국내에서는 해상풍력이 초기단계인 만큼 현재 해상풍력 연계 해저송전선로 설계에 대한 기준이 마련되어 있지 않다. 다만 1979년 전남 신안군 해저 전력케이블 설치공사 이후 꾸준히 해저송전선로가 구축됨에 따라 유사기준을 적용하여 해상풍력 연계 송전선로 설계가 가능하며, 유사 적용 가능한 국내외 주요 설계기준은 Table 26, 27과 같다.

Table 26. The domestic standards

관련 시방서 및 기준서	발행기관	발행년도	적용분야
항만 및 어항 설계기준·해설 항만 및 어항공사 표준시방서 항만 및 어항공사 전문시방서 항만건설공사 설계실무요령	해양수산부 국토해양부 해양수산부 해양수산부	2014, 2005 2012 2014 2014	항만시설
콘크리트 구조설계기준해설 콘크리트 표준시방서 구조물 기초 설계기준	건설교통부 국토해양부 국토교통부	2003 2009 2014	공 통
한국산업규격(KS CODE)	-	-	공 통
송배전 해저케이블 건설 절차서(잠정) 배전 해저케이블 유지보수업무 절차서 배전 해저케이블 긴급복구 절차서 배전 해저케이블 시설기준(잠정) 배전 설계기준(DS-5001)	한국전력공사 한국전력공사 한국전력공사 한국전력공사 한국전력공사	2011 2014 2014 2008 2011	전기 및 공 통
정부제정 각종 시방서 및 기준 기타관련법규, 규정, 지침, 기준 등	- -	- -	공 통

Table 27. The foreign standards

관련 법 규	관련부처	발행년도	적용분야
SHORE PROTECTION MANUAL-VOL I, II	U.S ARMY	1984	항만시설
Coastal Engineering Manual	U.S ARMY	2008	
항만시설 기술상의 기준 동해설	일본항만협회	2007	
Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications(DNV-RP-J301)	DET NORSKE VERITAS AS (DNV)	2014	전기시설

2) 해저송전선로 보호공법 선정기준 사례

국내 전력계통 해저송전선로 구축을 담당하는 한국전력공사의 “송·배전 해저케이블 건설 절차서[16]”를 보면 아래 Table 28과 같이 해저케이블 보호공법 선정기준이 있으나 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저케이블 보호방안 적용성 검토 기준이 아니므로 본 연구에서는 제주 서남부 지역 특성을 고려한 별도의 검토기준을 수립코자 한다.

Table 28. Selection criteria of protection methods (KEPCO, 2012)

4.3.2 보호공법 선정기준

4.3.2.1 천해부 구간(수심 40m 이하)은 보호판 취부 및 매설을 원칙으로 하며, 경과지 선정용역 결과에 따라 Rock berm, 보호구조물 등 다른 보호공법 적용을 검토한다. 단, 외상 고장의 우려가 없다고 판단되는 경우 보호판 취부를 생략할 수 있다.

4.3.2.2 심해부구간(수심 40m 초과)은 퇴적층이 두꺼워 일정깊이의 매설심도 확보가 가능한 경우 매설을 원칙으로 하며, 매설심도 확보가 불가능한 경우는 Rock berm 등 기타 보호공법을 검토한다.

4.3.2.3 각종 위험요소에 충분히 해저케이블이 안전할 수 있는 보호공법을 선정하여야 하며, 실증 시험이나 기존 데이터를 통해 보호공법의 신뢰성을 입증하여야 한다.

4.3.2.4 안정성을 만족하는 보호공법에 대해 시공성, 유지관리 비용 등 경제성을 고려하여야 한다.

4.3.2.5 보호공법 선정은 장비 사용 가능여부를 고려해야 한다. 즉, 매설공법이나 Rock berm공법을 선정할 경우 해당지역 수심과 해양환경을 고려하여 시공 가능한 장비(매설기, 선박)가 없거나 제한적이면 공사에 투입할 수가 없다. 이 경우 대안으로 다른 보호공법도 고려해 보아야 한다.

4.3.2.6 연장인근의 보호공법 재료 취득가능 여부를 고려하여야 한다. 즉, 원하는 사석이 없거나 공급장소가 멀어서 공사에 영향을 미칠 경우 보호공법 변경을 검토해 보아야 한다. 반대로 A-duct나 U-duct 같은 콘크리트 구조물일 경우 제작장소, 시간 등의 제약이 발생하고 인근에서 사석 공급이 가능할 경우, 사석을 사용한 보호공법을 적용하는 것도 검토해 보아야한다.

4.3.2.7 보호공법은 일회성 보호를 기준으로 설계되는 경우가 대부분이고, 이미 파손된 보호공법은 추가적인 위해요소에 의해 불안정하기 때문에 유지보수성을 고려해야 한다. 즉, 앵커의 투묘 또는 주묘에 의해 U-duct나 사석이 변형되거나 손상이 되었을 경우, 추가적인 위해요소에 취약하기 때문이다.

2. 해저송전선로 보호방안 지역특성

1) 제주 서남부지역 민원 유발 요인

제주특별자치도는 지난 2011년 10월 12일 『제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정 등에 관한 조례[17]』 및 2011년 12월 1일 『제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정에 관한 세부 적용기준[18]』을 통해 제주도에서 해상풍력 추진시 적용해야 되는 기준으로 풍력자원, 전력계통, 환경·경관·문화재 이외에도 주민 수용성 기준을 명시하고 있다. 현재 제주도 내 추진중인 해상풍력 사업(탐라, 한림, 대정 등)이 계획대비 상당기간 지연되고 있는 이유로 꼽을 수 있다. 아래는 제주 서남부지역의 민원 유발 요인에 대한 분석결과이다.

(1) 다수의 소형어선

제주 서남부 연안에서 조업하는 선박은 Table 29와 같이 대부분 10톤 미만의 소형 연안어선으로 주요 조업어종으로는 방어, 한치, 삼치, 자리돔, 돌돔, 갈치 등 다양한 어종을 대상으로 이루어지고 있다. 해상풍력 추진 시 가장 큰 문제점 중 하나는 소형 연안어선의 조업장소와 해상풍력 사업 구역이 일부 겹치는데 있다. 해당 구역의 간섭으로 인한 피해는 어업피해조사를 통한 손실보상이 가능하나 각종 불확실성으로 인해 사업주·민원인간 협의 기간이 많이 소요되거나, 혹은 마찰이 생길 가능성이 다분하다.

Table 29. The status of fishing boats in southwestern region of Jeju
[Seogwipo Statistics, 2013.12]

구 분	대 정 읍				안 덕 면			
	5톤미만	5~10톤	10톤이상	계	5톤미만	5~10톤	10톤이상	계
선박수	81	81	6	168	39	11	2	52

제주 서남부 지역에서 활동하는 소형 연안어선이 포획하는 어종은 주로 수심 50m 이내에 서식하는 종으로 해당지역에는 수산자원 보호·배양 및 어민 소득증진을 위한 Fig 31과 같이 인공어초가 광범위하게 설치되어 있다. [19]

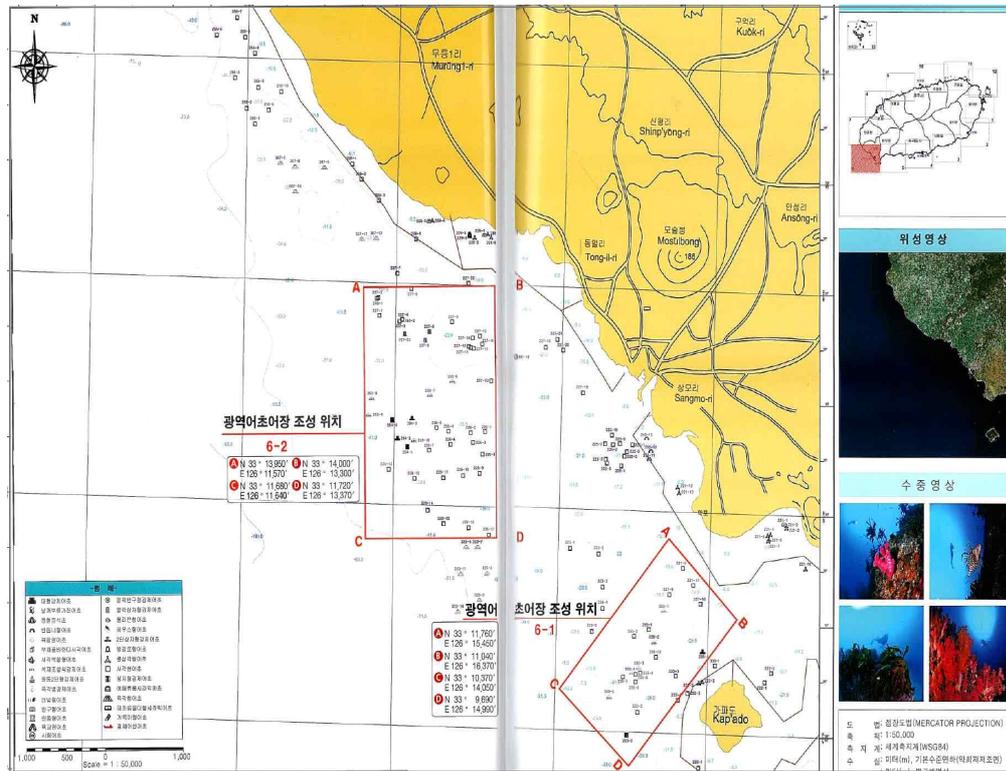


Fig 31. The artificial reefs area in southwestern coast of Jeju Island. [19]

(2) 해녀 및 마을 공동어장

제주도 해안지역에는 지역 어민(어촌계이 수산업법 제8조에 의거 마을어업 면허를 취득 후 해산물을 채취·판매 등 소득사업을 시행하고 있다. 제주 서남부 해안지역도 Table 30, Fig 32와 같이 마을 공동어장이 다수 형성되어 있으며, 주로 해녀(잠수어업인)들이 마을 어촌계에 소속되어 있다. 또한 마을 공동어장은 법적 보호를 받는 배타적인 권리가 부여된 구역으로 해상공사 수행시 협의가 필요하다.

Table 30. The status of town fisheries in southwestern coast of Jeju Island
[Seogwipo Statistics, 2012]

구 분	신도리	무릉리	영락리	일파1,2리	동일리	하모리	상모리	가파리
면 적(m ²)	909,540	695,150	1,310,850	1,816,000	789,900	299,270	2,342,530	3,038,000
해상기점 최대거리(m)	650	350	1,050	1,050	670	600	820	400

※ 해상기점 최대거리의는 마을어장 육상기점에서 부터의 이격거리를 의미함

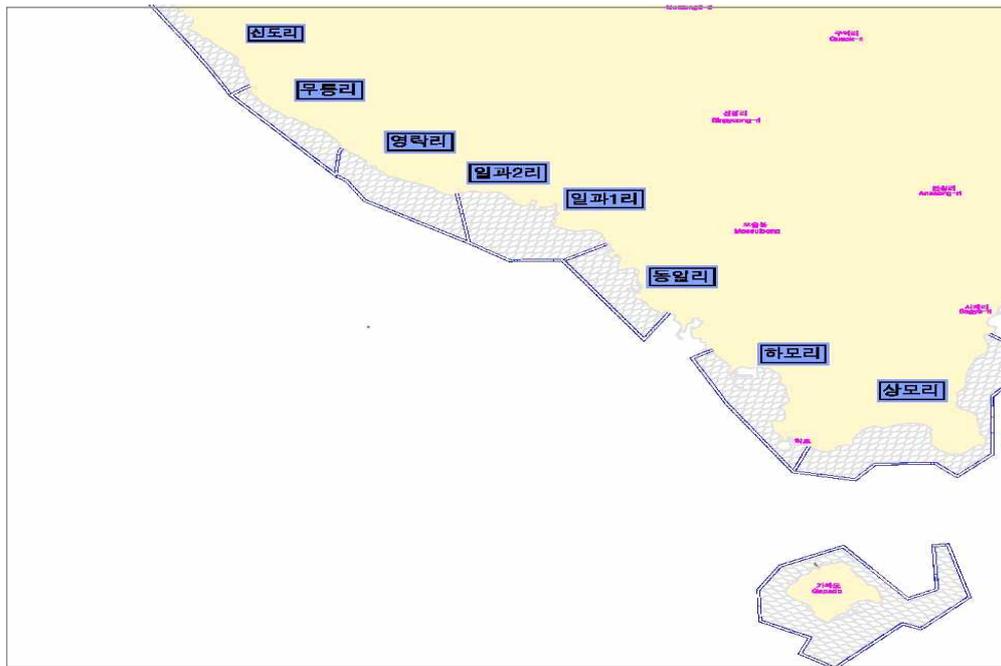


Fig 32. Status of town fisheries in southwestern coast of Jeju Island.

(3) 다수의 육상양식장

제주도 해안 주변에는 Table 31, Fig 33과 같이 넙치, 가자미, 돔 등을 사육하는 육상 수조식 양식장이 다수 분포되어 있다. 특히 수출품으로 각광을 받고 있는 제주 광어를 주로 양식하는 육상수조양식이 주를 이루고 있다. [20]

Table 31. The status of onshore fish farms in Jeju Island (2014)

구 분	해상가두리	육상수조양식	축제식	육상+축제	계
제 주 시	2	118		1	121
서귀포시	3	178	1		182
합 계	5	296	1	1	303

제주 서남부 지역에도 2011년 기준 20~30곳 이상의 육상 수조양식장이 위치하고 있으며, 대부분 육상에서 해상으로 취·배수 배관을 설치하여 취수한 해수를 활용해 양식을 시행한다. [21] 이런 이유로 육상양식장에서는 해수 오염이 예상되는 건설사업을 주로 반대하고, 해상풍력 또한 동일한 이유를 언급하고 있다.

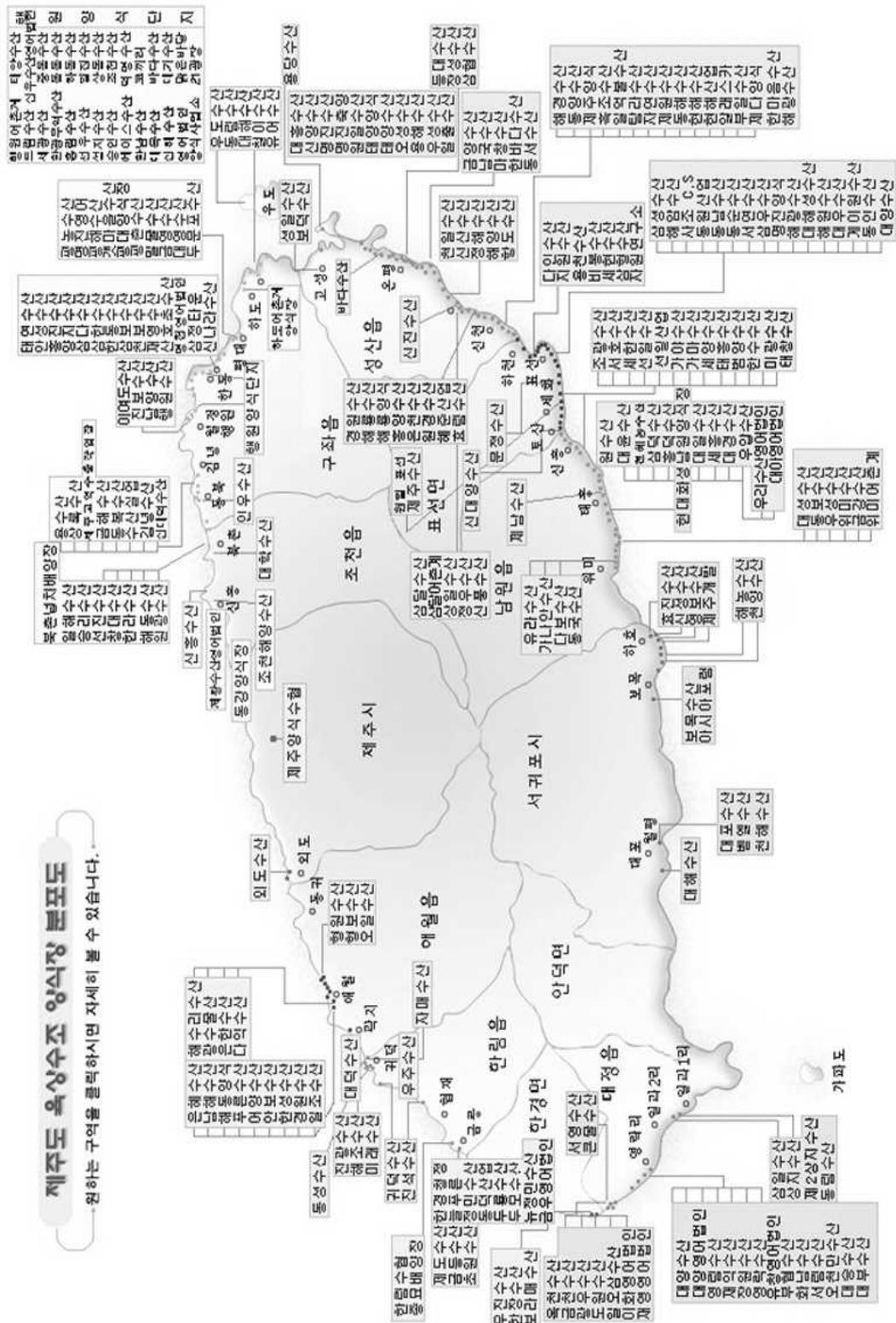


Fig 33. Distribution drawings of onshore fish farms of Jeju Island. [21]

2) 제주 서남부 연안 해양환경 특성

(1) 해저지형 및 수심

일반적으로 해상풍력단지는 수심이 50m 이내에 조성되어 모노파일, 자켓 등을 사용하고 있다. 해상풍력발전기에서 육지로 연계되는 해저송전선로 또한 최대 50m 이내의 수심에서 설치된다. Fig 34에서 제주 서남부 연안 해저지형 및 수심을 확인해 보면, 해안선에서 4~5km 이격시 수심이 50m 이상이 되어 해상풍력 설치 한계에 도달하게 되어, 해당 한계수심을 경계로 해상풍력단지 설치가 가능할 것으로 판단된다. 또한 시공성 및 경제성을 고려하여 아래 그림처럼 경사가 완만하고 수심이 낮은 지역으로 양육하는 것이 바람직하다.

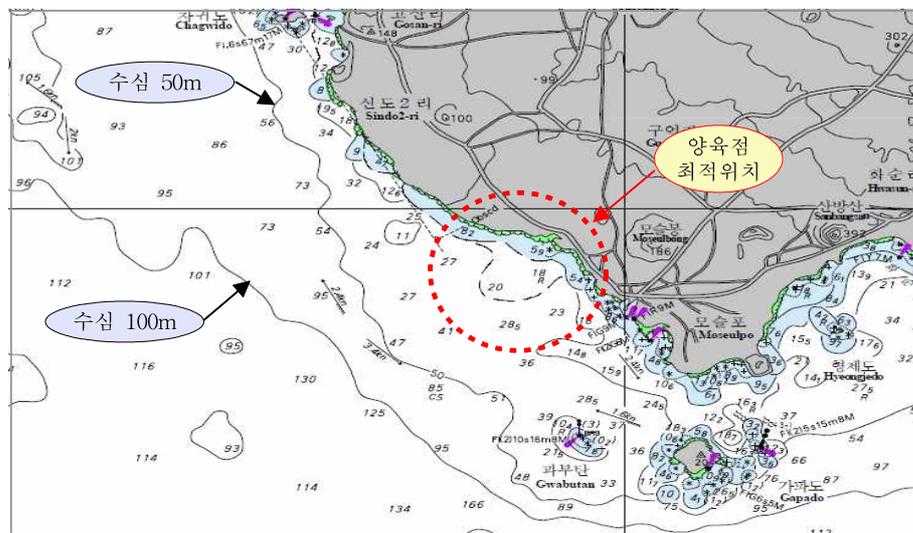


Fig 34. Depth of water in southwestern coast of Jeju Island. [22]

(2) 해상기상

해상풍력 사업의 사업성을 결정짓는 중요한 해상기상 조건은 풍황자원이 다. 제주 서남부 지역은 아래 Fig 35의 국가 바람지도를 보면 우리나라에서 풍황자원이 가장 풍부한 지역임을 알 수 있고, [23] Table 4를 보면 제주도내에서도 제주 서남부 지역이 풍황자원이 가장 풍부하다는 것을 확인할 수 있다.

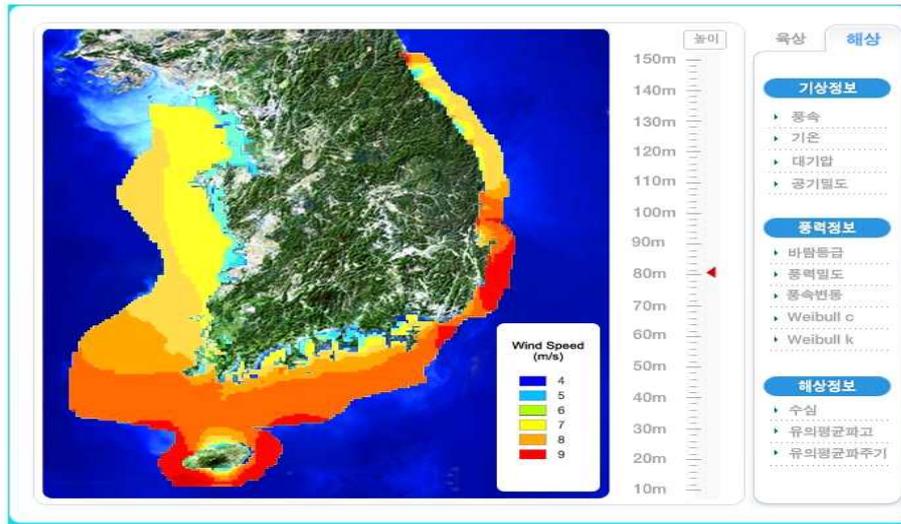


Fig 35. National wind maps. [23]

다음으로 해상풍력 설계시 중요한 해상기상 조건으로 태풍을 꼽을 수 있다. 여기서 깊이 고민해보아야 하는 것이 바로 지구온난화로 인한 기온상승과 해수온도 및 해수면 상승 등으로 인한 슈퍼태풍의 빈도 증가이다.

슈퍼태풍이란 미국 합동태풍경보센터(JTWC)의 태풍 분류 기준으로 최대풍속이 130knots(67m/s) 이상인 태풍을 말한다. 아래 그림 Fig 36은 지난 37년(1969~2005)간 한반도에 영향을 미친 태풍의 연간 최대 순간 풍속 관측 극값을 나타낸다. [24] 그림에서 보는 바와 같이 태풍의 연간 최대 순간풍속 관측 극값은 점진적으로 증가하는 것으로 나타나고 있다.

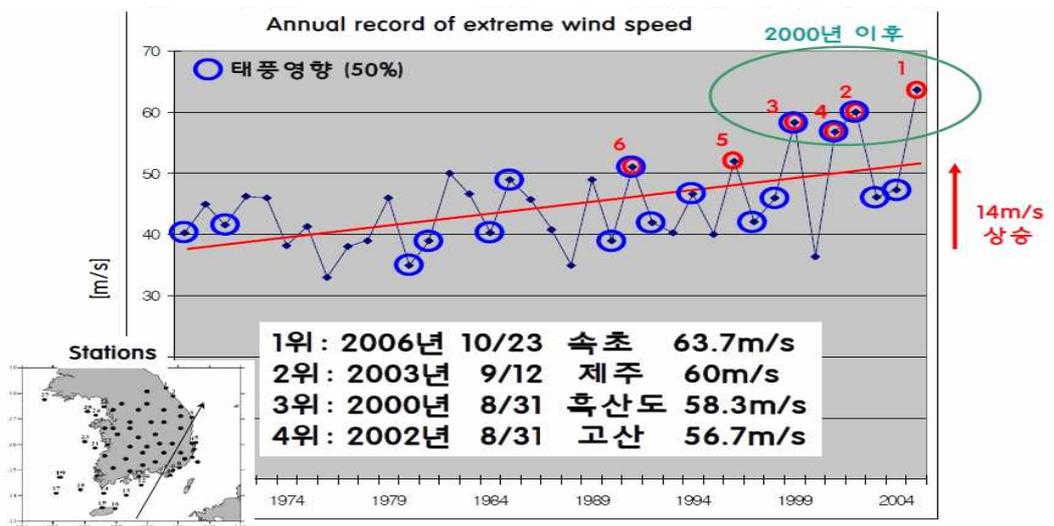


Fig 36. The annual maximum wind speed of typoons in Korea. [24]

또한 지난 37년간 태풍의 영향으로 인한 연간 최대순간풍속 관측값에서 상위 4위까지가 모두 2000년대 이후에 발생한 것으로 나타나고 있다. 특히 제주지역의 슈퍼태풍 접근 가능성은 더욱 증가할 것으로 전망된다. 제주지역에 슈퍼태풍의 상륙가능성에 대한 기후예측모델링을 이용한 전망 결과를 살펴보면, 제주도 주변해역의 해수면 상승률이 다른 지역보다 높고 또한 슈퍼태풍의 발생가능성 증가와 피해규모를 크게 하는 요인으로 작용할 수 있음을 시사하고 있다. [24]

(3) 해양물리

제주 서남부 연안의 조류속도는 해저송전선로 시공시 중요한 요소이다. 2010년도 제주 해역에 대한 조류속도 측정 결과 Table 32와 같이 제주 서남부 연안 가파도 주변에서는 최고 107.25 cm/s, 최저 17.50 cm/s의 조류속도를 확인할 수 있었다. 물론 상시 측정 데이터가 아니고, 상세 위치별 조류속도의 차이가 발생한다는 점은 감안해야 한다. [25]

Table 32. The speeds of current in southwestern coast of Jeju Island

구 분	최고(cm/s)	최저(cm/s)	비 고
가파도 주변	107.25	17.50	조류속도

※ 2010년 1월, 4월, 7월, 10월 각 1일자 데이터의 평균

또한 해상풍력 연계 해저송전선로 설계시 가장 중요한 설계요소는 대상 해역에서의 설계파랑 산정이다. 설계파 산정을 위해서는 실측 결과가 중요하나 별도의 장기 실측자료가 없는 관계로 한국해양연구원의 개정 심해설계파 자료를 참고하여 추정할 수 있다. 심해설계파 추정결과 결과 제주 서남부 연안 50년 빈도 심해설계파는 87번(격자 055137, 위도 33.15, 경도 126.00), 88번(격자 056138, 위도 33.01, 경도 126.17) 격자점 기준시 SSE~ESE 파향의 파랑이 내습할 때 설계파고는 11.28~11.67m, 이때 주기는 14.29~14.54sec로 나타났다. 이는 해상풍력 단지와의 이격거리가 최소 10km 이상 이어서 이에 대한 보정은 필요하다.

3) 제주 서남부 연안 문화재 분포 특성

일반 개발사업 뿐만 아니라 해상풍력사업에 있어서 사업예정지역에 분포하고 있는 문화유적에 대한 문화재지표조사는 필수적이다. 문화재 지표조사의 목적은 육상의 경우 기존에 조사된 유적을 확인하고, 조사에서 누락된 유적이거나 지상에 드러나지 않는 유적이 있는지 정밀 조사하여 문화유적의 훼손을 막고 학술적인 자료로 활용하고자 하는데 있다. 해상의 경우 해저면 및 그 이하에 분포하는 유적과 유물의 존재여부와 범위, 성격을 파악하여 보존 또는 발굴조사 여부를 결정하기 위함이다.

제주도에서 해상풍력사업을 추진하기 위해서는 지구지정 관련 조례[17] 및 세부 적용기준[18]에 명시된 대로 개발사업 시행 승인 시 관련 법령에 따라 심의를 득하는 과정, 즉 문화재 지표조사를 시행하고 문화재법에 저촉되지 않아야 한다. 문화재 간섭으로 보존 또는 발굴조사 필요시 사업지연 및 비용증가가 우려된다. 오른쪽 Fig 37는 제주 서남부 문화재유적 분포를 나타낸 지도이다. [26] 실제 해상구간에 대한 조사 결과 제주 서남부 지역에서는 6개의 이상체가 확인되었으나 이상체 3개소는 인공적으로 만들어진 것(인공어초)이며, 나머지 3개소는 자연적으로 형성된 이상체로 문화재와 관련된 이상체는 확인되지 않았다. [27]

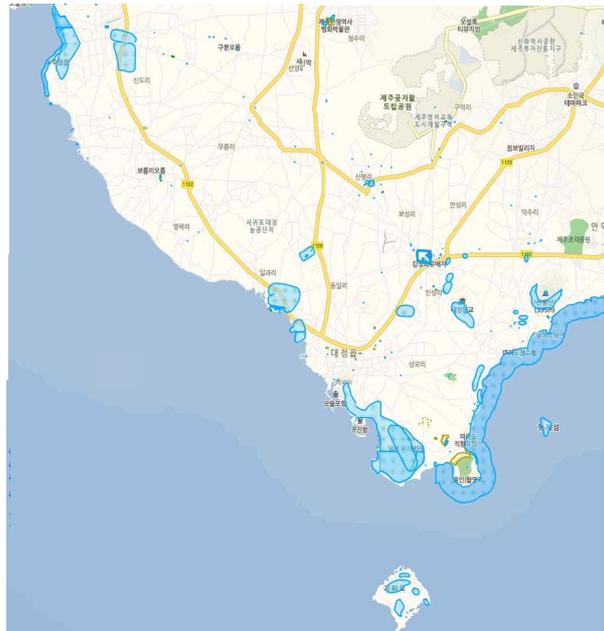


Fig 37. The distribution map of cultural property remains in southwestern coast of Jeju.

3. 해저송전선로 보호방안 검토

1) 해저송전선로 보호방안 기준

앞서 검토한 해저송전선로 일반설계기준 및 제주 서남부 연안 지역특성을 고려하여 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 검토기준을 아래와 같이 안정성, 경제성, 시공성, 장비사용성, 민원해소, 문화재 저촉해소 등 6가지로 구분하였다. 현재 제주도에서의 해상풍력 사업추진시 가장 중요한 고려사항은 바로 주민수용성 확보 즉, 민원해소이다.

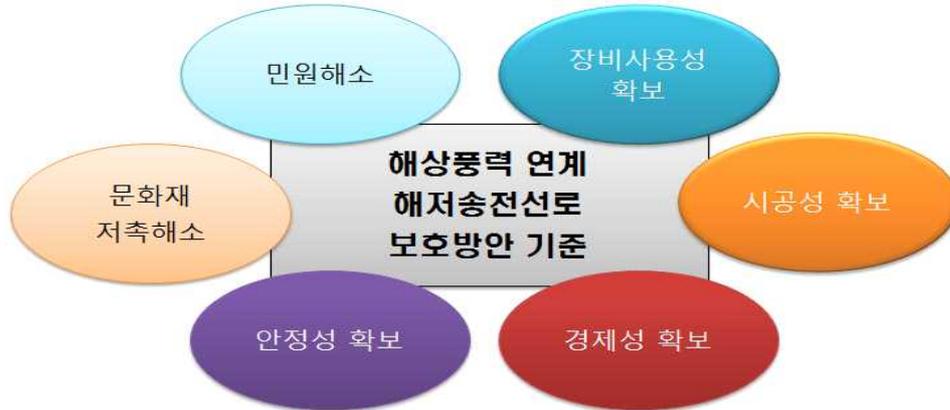


Fig 38. The selection criteria of the submarine cable protection methods.

(1) 안정성 확보

해저송전선로 안정성을 위협하는 위해요소에 대해 충분히 안정성을 확보할 수 있는 보호공법이 결정되어야 한다. 이를 위해 보호공법의 실증시험이나 기존 데이터를 통해 설계된 보호 단면도 보호공법의 신뢰성을 입증해야 한다.

(2) 경제성 확보

해저송전선로 보호공법 검토 시 경제성을 확보해야 한다. 민원해소 및 안정성 확보만을 고려하면 향후 사업성이 하락하여 문제를 야기시킬 수 있다. 또한 경제성 고려 시 시공비만 고려할 것이 아니라, 유지·관리 비용까지 고려한 LCC(Life Cycle Cost)을 검토해야 한다.

(3) 시공성 확보

경제성과 시공성이 서로 관련이 있지만, 같은 비용이 예상되어도 동원되는 장비에 따라 시공난이도가 달라질 수 있다. 시공성이 어려워지면 공사기간도 영향을 받을 수 있고 안전사고에 의한 위험성도 높아짐으로 가능하면 시공성이 좋은 공법을 선택하는 것이 바람직하다.

(4) 장비사용성 확보

보호공법이 효과적으로 선정되었어도 시공 할 수 있는 장비가 동원될 수 없으면 공기가 지연되는 경우가 발생한다. 또한 보호공법에 따라 적용해야 하는 장비가 상이해서 현장에 적합한 장비선정은 공기 뿐 아니라 공사비에도 상당한 영향을 끼치므로 장비사용성 확보가 가능한 공법을 선택하는 것이 바람직하다.

(5) 민원해소

제주 서남부 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 설계에 있어서 잠재민원(어선, 해녀 및 마을 공동어장, 육상양식장 등)에 대해 민원발생이 최소화 될 수 있는 보호공법 결정이 매우 중요하다. 대규모 해상장비가 투입되는 해상풍력 건설사업의 특성상 공사 중지가 발생하면 막대한 경제적 손실 및 사업지연이 불가피 하기 때문이다.

(6) 문화재 저촉해소

제주 서남부 지역 해상구간에 대한 문화재유적 분포 조사 결과 문화재와 관련된 이상체가 확인되지 않아서 해저송전선로 구축에는 지장이 없을 것으로 사료되나, 일부 해안지역에 문화재 유적이 분포되어 있어서 이에 대한 고려가 필요하다.

2) 해저송전선로 보호방안 적용성

제주 서남부 연안 해상풍력 사업 추진시 해저송전선로는 해상풍력 한계수심인 수심 50m 이내에서 포설될 것으로 예상된다. 일반적 해저송전선로 보호방안은 천해부 구간(수심 40m 이하, 제주 서남부 연안 해상풍력 설치수심과 거의 일치함)은 매설 및 필요에 따라 1, 2차 보호공법을 적용하는 것이 원칙적이나 매설시 부유물 및 오락수가 발생하게 되고, 이로 인하여 각종 민원이 발생할 수 있어서 이를 최소화 할 필요가 있다. 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 적용성 검토 시 특히 민원 유발 요인을 고려해야 한다.

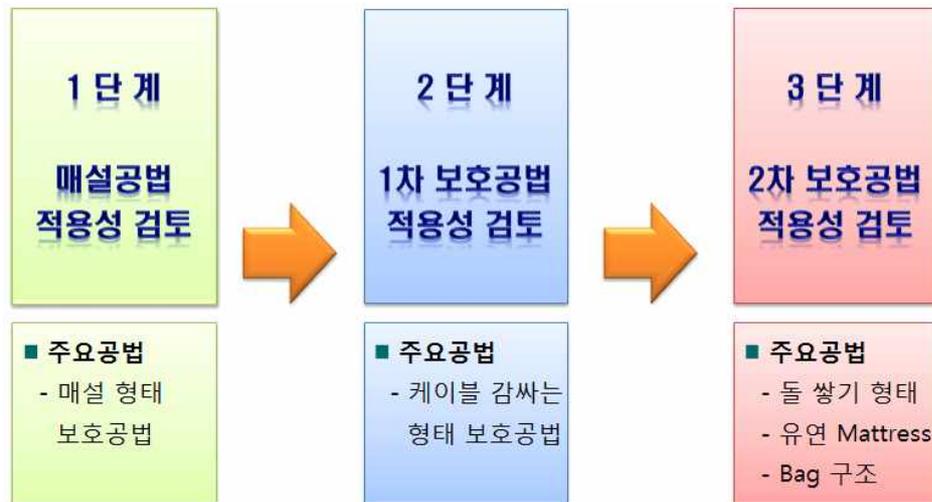


Fig 39. The flow chart of the submarine cable protection methods.

제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 검토 절차는 Fig 39와 같이 먼저 1단계로 매설공법 적용성을 검토하고, 2단계로 1차 보호공법(케이블을 감싸는 형태 보호공법) 적용성 검토 후, 3단계로 2차 보호공법(돌 쌓기 형태, 유연한 Mattress 형태, Bag 구조 등) 적용성을 검토하고자 한다.

각 공법에 대한 적용성은 상기 1)에서 고려한 6가지 해저송전선로 보호공법 검토기준인 안정성, 경제성, 시공성, 장비사용성, 민원해소, 문화재 저촉해소를 1~5까지 수치화 시켜서 각 공법별 적용 우선순위를 결정하여 최적 공법을 선정하고자 한다.

(1) 매설(굴착) 보호공법 적용성 검토

제주 서남부 연안 해저 지질은 주로 현무암이 분포되어 암반지역을 굴착하는 공법을 적용해야 하며, 여굴 및 여쇄를 최소화해야 한다. Table 33은 매설 보호공법에 대한 적용성을 분석한 결과이다.

Table 33. The output of application to burying methods

구 분	안정성 확 보	경제성 확 보	시공성 (암반)	장 비 사용성	민원해소 (부유물)	문 화 재 저축해소	합 계	검토결과 (우선순위)
Burying (Plough)	5	1	1	1	1	5	14	4
Trenching (Water Jetting)	5	1	1	3	2	5	17	3
Trenching (Wheel Cutter)	5	1	2	3	3	5	19	2
Trenching (Chain Cutter)	5	1	2	3	3	5	19	2
Trenching (Dredging)	5	5	4	4	2	5	25	1

적용성 검토 결과 Dredging(백호우, 디퍼, 쇄암 등)을 활용한 Trenching 공법 적용이 유리할 것으로 판단된다. 다만, 안정성, 경제성, 시공성, 장비사용성을 고려하여 장비가 직접 굴착할 수 있는 수심까지는 매설 보호공법을 적용하되 제주 서남부 지역 민원 유발요인인 소형어선, 해녀 및 마을어장, 육상 양식장의 민원을 고려하여 매설(굴착)을 최소화할 수 있도록 굴착범위 검토를 별도로 시행하는 것이 바람직하다. 상기 결과 우선순위에 대한 장단점 분석은 Table 34와 같다.

Table 34. The comparison of burying methods

보호공법	Trenching (Wheel Cutter)	Trenching (Chain Cutter)	Trenching (Dredging)
시공방식	□해저케이블을 Wheel Cutter를 이용, 일정 깊이 만큼 매설하는 공법	□해저케이블을 Chain Cutter를 이용, 일정 깊이 만큼 매설하는 공법	□해저케이블의 포설이 예정된 암반지역을 준설하는 공법(쇄암 등) □준설 시 조각난 암석을 이용하여 되메우기 실시
장 점	□소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □암반 지역에 대한 케이블 매설 능력 우수	□소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □암반 지역에 대한 케이블 매설 능력 우수	□소형 앵커의 투하 및 끌림에 대한 보호 우수 □파력에 대한 안정성 우수
단 점	□공사비용 고가	□공사비용 고가	□파력에 의한 되메우기 우려 □암반 지역 준설 어려움 □긴 공사 기간

(2) 1차 보호공법 적용성 검토

1차 보호공법이란 해저에 설치된 케이블이 어로행위 및 자연적 환경에서 발생하는 외력으로 인한 손상을 방지하는 용도 외에 돌, Bag 쌓기 등의 보호물로부터 해저케이블의 직접 손상을 방지하기 위해 보호재로 해저케이블을 감싸는 방식의 보호공법을 의미한다. Table 35는 1차 보호공법 적용성 검토 결과이다.

Table 35. The output of application to the first protection methods

구 분	안정성 확 보	경제성 확 보	시공성 (암반)	장 비 사용성	민원해소 (부유물)	문 화 재 저축해소	합 계	검토결과 (우선순위)
주 강 관	5	4	3	3	5	5	25	1
Urduct (UP Pipe)	3	3	4	3	4	5	22	2

1차 보호공법 적용성 검토 결과, 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저 송전선로 보호공법으로 주강관을 활용한 공법 적용이 유리할 것으로 판단되며, 두가지 공법에 대한 장단점을 Table 36과 같이 분석했다.

Table 36. The comparison of the first protection methods

구 분	제 1 안 : 주 강 관	제 2 안 : Urduct (UP Pipe)
시공방식	□ 주강관이 케이블을 직접 감싸는 형태로 분리된 주강관을 볼트와 너트로 체결하여 보호 (제품길이 0.5m, 무게 52kg/m)	□ 폴리우레탄(Polyurethane) 계열의 제품으로 해저케이블을 감싸는 형태로 밴드로 체결하여 보호 (제품길이 2.0m, 무게 15.1kg/m)
장 점	□ 강성구조체로 앵커 등의 낙하충격 및 외부충격에 의한 케이블 보호능력 비교적 우수 □ 주강관 자체 단위중량 확보로 인한 거동방지, 위치고정 및 중량확보 우수 • 철거시 고철로써 자원으로 재활용 가능	□ 탄성, 내부식성, 절연성 우수 □ 내마모성이 우수하여 해저면 마찰로 인한 손상방지 효과 □ 연성구조체로 유연성 우수하여 케이블보호 □ 작업시간 단축 가능하여 빠른시공성 확보 가능 □ 제품이 경량이라서 운반/작업이 용이함
단 점	□ 타공법보다 부식에 불리할 수 있으나, 내구연한 30년 적용으로 부식으로 교체 사례 없음. □ UP pipe에 비해 상대적으로 무거워 운반성 불리	□ 경량구조체로 인한 수중부에 중량이 타공법보다 거동 및 위치고정에 다소불리 □ 철거시 폐기물 발생 □ 국내 적용사례 보통
적용사례	□ 1980년부터 배전해저케이블에 주철관으로 사용하였으며, 2007년부터 주강관 사용함 □ 비금도, 서천 유부도, 여수 대경도, 흑일도~마삭도 등	□ #2 HVDC(진도-제주) □ 화원~안좌 해저케이블

(3) 2차 보호공법 적용성 검토

2차 보호공법이란 해저에 설치된 케이블이 조류 및 파랑 등의 해양환경 요인 및 해저송전선로 경과지 주변의 어로활동, 선박의 정박 및 기타 인위적인 요인으로 발생하는 외력으로 인한 해저케이블 손상을 예방하기 위해 1차 보호공법 위에 추가로 설치하는 방식의 보호공법을 의미한다. Table 37은 2차 보호공법에 대한 적용성을 수치화 시킨 결과이다.

Table 37. The output of application to the second protection methods

구 분		안정성 확 보	경제성 확 보	시공성 (압반)	장 비 사용성	민원해소 (부유물)	문 화 재 저축해소	합계	검토결과 (우선순위)
돌을 쌓는 형 태	Rock berm	4	5	5	5	3	5	27	1
	Side Stone Dumping	2	5	4	4	3	5	23	3
유연한 Mattress	ACM	4	3	4	3	5	5	24	2
	FCM	5	4	4	4	5	5	27	1
	전주-Mattress	3	5	4	3	3	5	23	3
단 단 한 Mattress	Concrete mattress	4	3	3	4	4	5	23	3
	W-mattress	5	3	3	3	4	5	23	3
Bag 구 조	Stone bag	5	4	4	5	4	5	27	1
	Concrete bag	4	3	4	4	4	5	24	2
	Mortar bag	3	3	4	4	4	5	23	3
철 근 콘크리트	A-duct	5	3	2	3	5	5	23	3
	U-duct	5	3	3	3	5	5	24	2

2차 보호공법 적용성 검토결과 Rock berm, FCM, Stone bag 공법 적용이 유리할 것으로 판단된다. 상기 공법의 특징 및 장단점은 Table 38와 같다.

Table 38. The comparison of the second protection methods

구 분	제1안 : Rock berm	제2안 : Stone bag	제3안 : FCM
특 징	<ul style="list-style-type: none"> □ 파랑영향에 의해 유실될 수 있으므로 적합한 규격 선정 □ 지형조건 제약 없음 	<ul style="list-style-type: none"> □ 망 파손시 사석이 유실될 수 있으며, 망 강도가 높은 경우에는 앵커 끝림에 다소 불리 	<ul style="list-style-type: none"> □ 조공구와 연결선이 많아 잠수사의 안전 유의 □ 설비 및 재료비가 고가
장 점	<ul style="list-style-type: none"> □ 재료수급이 용이하며 쉽게 적용가능 □ 대상지역 제약조건 없음 	<ul style="list-style-type: none"> □ 조류가 빠른 지역 작업시 상대적 용이 □ 재료수급 용이성 	<ul style="list-style-type: none"> □ 공장제작으로 제품의 신뢰성이 우수함 □ 콘크리트 제품으로 재료수급 우수 □ 공중 간단, 시공성 우수
단 점	<ul style="list-style-type: none"> □ 연약점토층 적용시 침하대책 필요 □ 사석, 피복석 등 공중이 다소 복잡 	<ul style="list-style-type: none"> □ 망이 닳에 의해 풀림과 끝림 발생가능 □ 망에 대한 추가적인 안정성 시험 필요 	<ul style="list-style-type: none"> □ 설비 및 재료비가 고가라서 경제성 불리 □ 닳 끝림에 대한 안정성 시험 필요

3) 해저송전선로 보호방안 적용성 검토결과

해저송전선로 보호방안 일반설계기준 및 제주 서남부 연안 지역특성을 고려한 6가지 해저송전선로 보호공법 검토기준(안정성, 경제성, 시공성, 장비사용성, 민원해소, 문화재 저촉해소)으로 판단한 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 적용성 검토 결과는 아래와 같다.

먼저, 매설(굴착) 보호공법은 Dredging(백호우, 디퍼, 쇄암) 등을 활용한 Trenching 공법 적용하는 것이 유리할 것으로 판단되나, 민원을 고려하여 굴착을 최소화 할 수 있도록 굴착범위 검토가 필요하다. 다만, 백호우, 디퍼 등의 장비가 직접 굴착할 수 있는 구간까지는 매설(굴착) 보호공법을 적용하는 것이 안정성, 경제성, 시공성, 장비 사용성을 고려할시 바람직하다고 판단된다.

1차 보호공법은 Uraduct(UP Pipe)에 비해 주강관 적용성이 유리한 것으로 판단되었고, 어로행위 및 자연적 환경에서 발생하는 외력으로 인한 노출, 변형을 방지하는 용도 외에 2차 보호물로부터 해저케이블 직접 손상을 방지하기 위해 해저송전선로 전 구간에 걸쳐 주강관을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2차 보호공법은 Rock berm, FCM, Stone bag 공법이 유사한 적용성으로 가장 유리할 것으로 판단되었다. 그러나 본 해저송전선로 검토기준에 의거 세가지 공법에 대한 세부 특성이 반영되기 어렵기 때문에 각 공법별 세부적인 적용성 검토가 별도 필요하다. 또한 제주 서남부 연안에서 해상풍력 사업을 추진하기 위해서는 가장먼저 앞서 검토한 민원 유발을 최소화하기 위해 본 2차 보호공법을 비굴착 상태에서 적용이 가능한지 여부를 검토하는 것이 매우 중요하다.

4. 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 연구

1) 해저송전선로 보호방안 수리모형실험

상기 3의 검토결과를 반영하여 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 중 비굴착 조건하에서 2차 보호공법 최적 적용성을 수리학적 상사법칙에 의거 수리모형실험을 통해 검증하고자 한다.

제주 서남부 연안 해양환경특성에 적합한 해저송전선로 보호공법에 대한 수리 역학적 안정성을 검토를 위해 수리모형실험을 시행하였다. 본 수리모형실험은 굴착 및 비굴착 조건에서 Stone bag, FCM, Rock berm 3가지 해저송전선로 보호공법에 대하여 상부를 통과하는 파랑의 변형을 계측하여 보호공법에 작용하는 전달파 및 쇄파에 대한 효과를 관측 및 계측하여 각 공법의 특성을 파악하는 것으로 진행하였다.

(1) 실험절차 및 실험설비

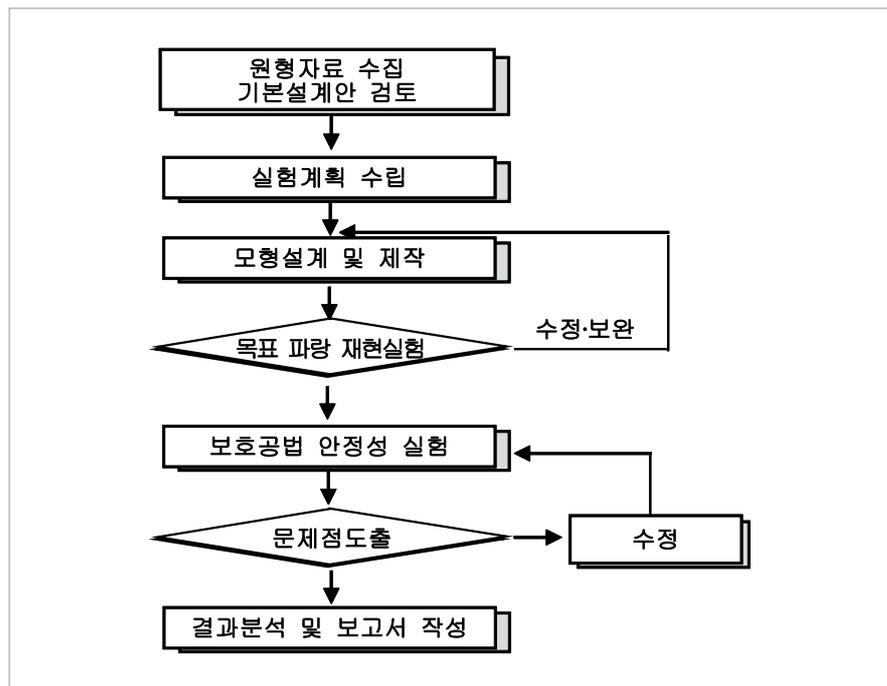


Fig 40. The procedure of hydraulic model tests.

해저송전선로 보호공법에 대한 수리모형실험은 기본설계안을 검토하여 수리학적 상사법칙에 의거 보호공법 모형 및 제주 서남부 연안 대표 지형을 설계·제작 후 목표 파랑에 따른 다양한 Case의 보호공법 안정성을 확인해 보는 순서로 실험을 진행한다.

이때 사용되는 실험설비는 Fig 41과 같으며, 2차원 단면 수리모형실험을 위해 사용한 조파수로의 총길이는 66m, 폭은 1.5m, 높이는 3.0m이다. 조파수로 폭은 0.75m 이다. 조파수로의 왼쪽 끝부분에는 피스톤 타입 조파기가 설치되어 있으며, 조파기 왼쪽 배후 및 오른쪽 수로 끝단에는 반사파를 최소화하기 위한 경사식 소파장치가 설치된다. 피스톤 타입 조파기는 전기서보식으로 최대 용량은 70마력이다.



Fig 41. The facility of hydraulic model tests.

(2) 실험모형 축척

실험모형의 축척은 모형과 원형의 상사법칙의 효율성을 만족할 수 있는 범위, 그리고 실험실 장비의 유량공급능력, 실험장의 크기 등과 같은 실험 시설의 규모 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 해안지역에서 파랑의 전파 및 변형은 관성력, 중력, 점성력 등이 작용하며 이때 관성력과 중력이 지배력이 된다. 수리모형실험은 원형과 같은 지배력이 흐름을 지배해야 한다. 따라서 모형의 축척은 점성력이 최소화되는 수심을 확보하여야 하고, 최소 축척 1/50 이내를 유지하여야 한다.

본 수리모형 축척은 1/25로 시행하였고, 이는 수리모형실험 모형과 원형의 상사법칙의 적정성을 보장할 수 있는 조건을 만족하며, 조파장치와 조파수로의 최대성능이 고려되어 적정하게 시행하였다.

(3) 입사파랑 조건

수리모형실험을 위한 입사파랑은 50년 빈도 설계파랑을 적용하였다. 또한 해저송전선로 보호공법의 안정성에 취약한 조건인 약최저저조위를 기준으로 계산된 설계파랑을 수리모형실험을 위한 입사파랑으로 채택하였다. 설계파랑 산정을 위한 Table 39와 같이 수치해석에서는 개정 심해설계과(한국해양연구원, 2005)를 이용하여 각 지점에서의 파고 및 주기를 계산하였다.

Table 39. Summary of wave transformation experiments

구 분		내 용
목 적		○○ 해상풍력 건설 해역의 설계파 산정
사용모델		다방향 불규칙파 모델인 SWAN Cycle III version 40.72e (네덜란드 Delft공대 개발)
기본방정식		파작용 평형방정식 $\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$
주파수 스펙트럼 형상		주파수 : JONSWAP 스펙트럼 적용 $S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]}$
격자 구성	계산 영역 격자수 격자 간격	38.0km × 38.4km 총 격자수 110,815개(380 × 384) 격자간격 100m인 정격자 체계
입사파		한국해양연구원의 50년 빈도 심해설계과
초기해수면		사업지구 해역의 약최고고조위 D.L.(+) 2.97m

태풍에 의해 발생하는 이상파의 경우에는 1951년부터 2003년까지 53년간 한반도에 영향을 미친 128개 태풍을 선정하여 3세대 모델인 WAM모델로 태풍의 중심이 파랑모델의 격자망 내에 있었던 기간에 대해 파랑을 산출하였다. 각 태풍별 매 시간 간격으로 산출한 파랑자료로부터 파향별 최대값을 구하였으며, 이를 극치분석하여 재현기간별 파향별 설계파를 산정하였다. Fig 42의 각 격자점에서 비태풍시와 태풍시의 2개의 산출값 중에서 큰 값을 선택하여 50년 빈도 파향별(16개 방향) 설계파를 결정하였다.

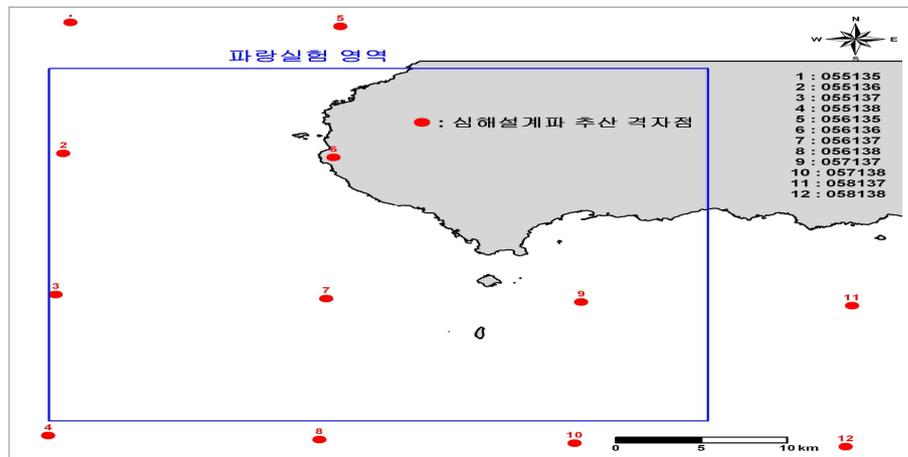


Fig 42. Estimated grid point position of deep sea design wave.

수치해석 결과 사업지구 내 출현하는 최대파고는 S 파향의 파랑이 내습할 때 10.98m로 나타났으며, 주기는 14.25sec로 나타났다. 이때 수리모형실험 대상구간은 Fig 43의 수심 20m 지점으로, 실험 대상으로 채택된 파랑의 유의파고는 $H_{1/3}=7.0m$, 유의주기는 $T_{1/3}=14.1sec$, 재현시간은 태풍이 통과하는 시간인 3시간으로 설정한다. Froude 상사법칙에 의거 모형에서의 유의파고는 7.0m, 유의주기는 2.82sec, 조파시간은 36분이 된다. Table 40은 원형과 모형에서의 수심, 파고, 주기, 조사시간이다.

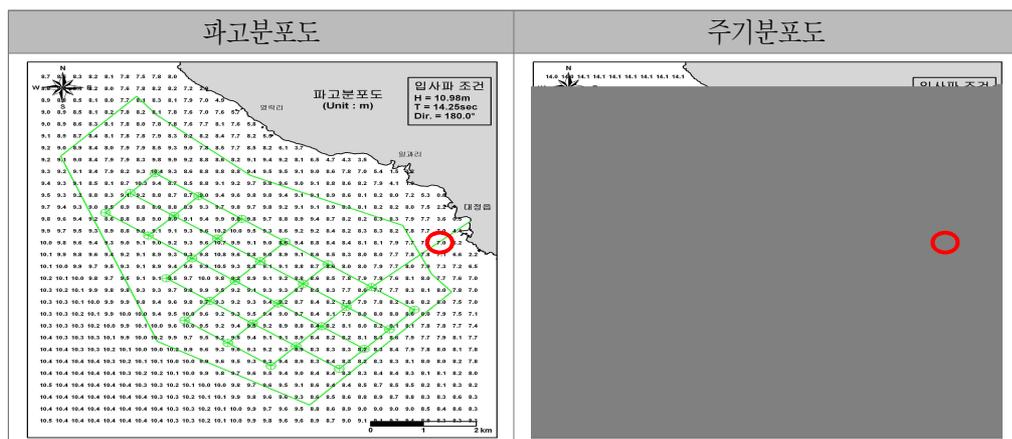


Fig 43. The tide and wave cycle in southwestern coast of Jeju (50 years).

Table 40. The condition of the joining tides by hydraulic model tests

구분	기준 수심	파고	파랑주기	조파시간
원형	20m	7.0m	14.1sec	3시간
모형	80cm	28cm	2.82sec	36분

(4) 대상지역 및 수심별 구간 설정

본 수리모형실험의 대상지역은 Fig 44와 같고 이때 수심은 20m 이내를 Fig 45와 같이 7개 구간으로 구분하였다.

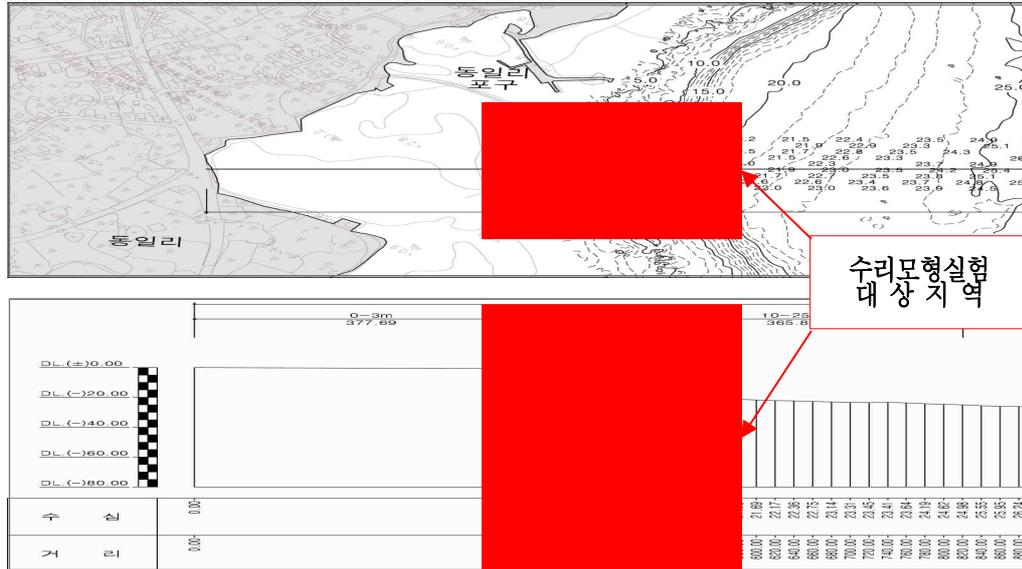


Fig 44. The target area of hydraulic model tests.

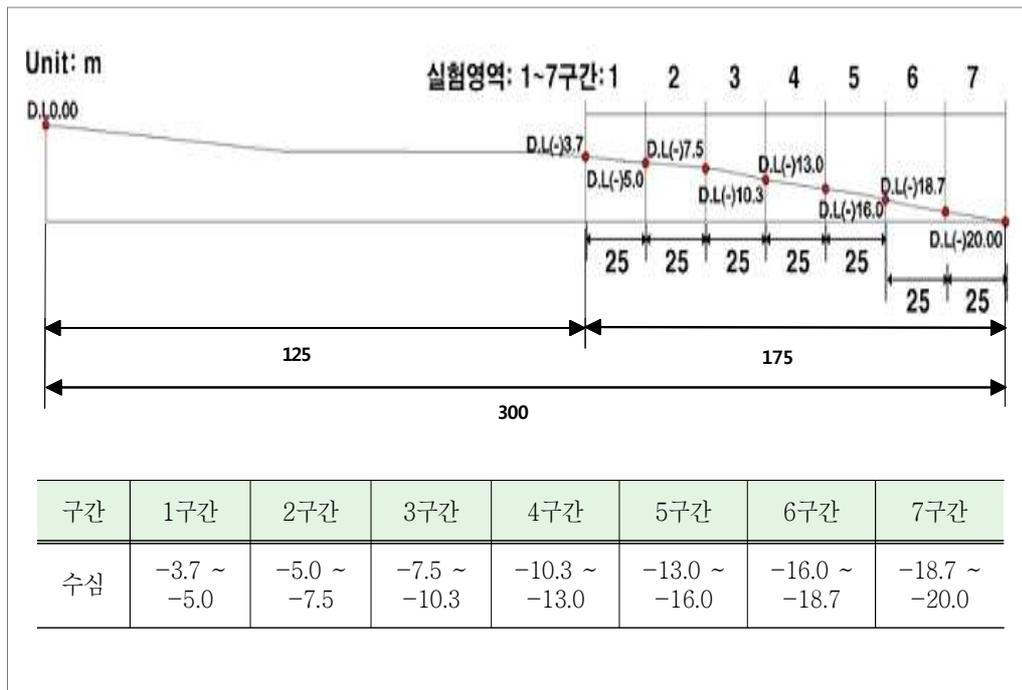


Fig 45. Interval setting by water depth (7EA).

(5) 모형 제작

본 수리모형실험에서 원형 및 모형의 규격은 Table 41~43과 같고, 모형에 대한 단면 및 사진은 Fig 46~51과 같다.

Table 41. The specifications of rock berm model

구 분	규 격	체 적	지 림	중 량
원 형	피복석(1.0m ³ /EA)	1.0m ³	1.24m	2.65ton
	사석(0.03m ³ /EA 이하)	0.03m ³	0.38m 이하	0.08ton 이하
모 형	피복석(1.0m ³ /EA)	64.0cm ³	4.96cm	171g
	사석(0.03m ³ /EA 이하)	1.92cm ³ 이하	1.4cm 이하	5g 이하

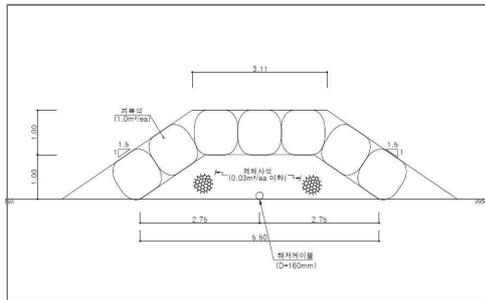


Fig 46. Standard cross-section of rock berm



Fig 47. Rock berm model.

Table 42. The specifications of FCM model

구 분	좌측블록 (14EA)	기본형상블록 (42EA)	우측블록 (14EA)	총 중량 (1Set)
실제품	110kg (0.5m×0.5m)	125kg (0.5m×0.5m)	110kg (0.5m×0.5m)	8,464kg (2.5m×7.0m)
모 형	0.7g (2cm×2cm)	0.8g (2cm×2cm)	0.7g (2cm×2cm)	528.5g (10cm×28cm)

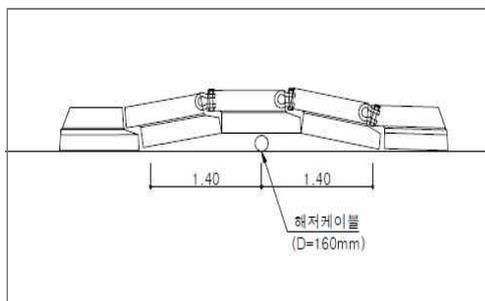


Fig 48. Standard cross-section of FCM

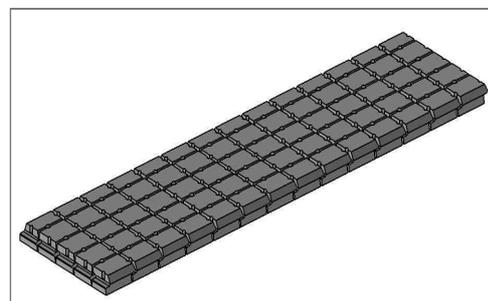


Fig 49. FCM model.

Table 43. The specifications of stone bag model

구 분	규 격	지 림	두 께	중 량
실제품	8TON/EA	3.0m	0.7m	8.0ton
	10TON/EA	3.2m	0.8m	10.0ton
	12TON/EA	3.3m	0.9m	12.0ton
모 형	8TON/EA	12.0cm	2.8cm	512g
	10TON/EA	12.8cm	3.2cm	640g
	12TON/EA	13.2cm	3.6cm	768g

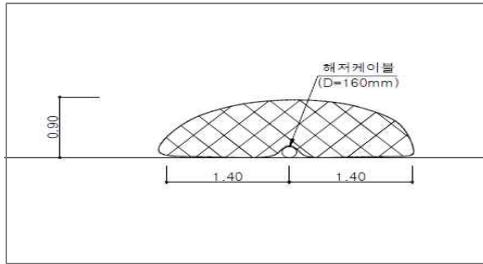


Fig 50. Standard cross-section of stone bag.



Fig 51. Stone bag model.

(6) 수리모형실험 Case

본 수리모형실험은 비굴착 및 굴착 조건에서 아래 Table 44와 같이 총 13가지 경우로 시행하였다. 일차적으로 비굴착 조건하에 2차 보호공법이 이탈이 발생하는지 여부를 고려하기 위해 Case-1 ~ Case-10까지 다양한 방법을 수행하였으며, 그 외 굴착 조건하에서도 이탈이 발생하는지 여부를 확인하기 위해 Case-11 ~ Case-13을 추가로 수행하였다.

Table 44. The case of hydraulic model tests

구 분	굴착여부	보호공법	설치 방식	중 량
Case-1	비굴착	Stone bag	1열 비결속	8 ton
Case-2				10 ton
Case-3				12 ton
Case-4			1열 결속	"
Case-5			2열 대각 결속	"
Case-6			2열 삼각 결속	"
Case-7		FCM	1열 비결속	8.3~8.4ton/m
Case-8			1열 결속	"
Case-9			2열 결속	16.6~16.8ton/m
Case-10			Rock berm	-	0.5~1.0m^{3}
Case-11	굴 착	Stone bag	1열 결속	12 ton
Case-12		FCM	"	8.3~8.4ton/m
Case-13		Rock Berm	-	0.5~1.0m ³

2) 해저송전선로 보호방안 수리모형실험 결과 및 분석

(1) 파고 계측 결과

아래 Fig 52의 붉은색은 유의파고($H_{1/3}$)를 나타내며, 푸른색은 최대파고(H_{max})를 나타낸다. Table 45의 파고계측 결과 유의파고는 7구간에서 약 23~25cm로 계측되었다. 그리고 수심이 낮아질수록 천수효과에 의해 파고가 증폭되어 3구간 [DL(-)7.5m ~ DL(-) 10.3m]에서 최대가 된다. 3구간에서 파고가 최대가 된 파랑은 이후 쇠퇴되어 2구간 및 1구간에서 파고가 크게 감소한다. 수리모형실험을 통해 계측된 최대파고는 3구간에서 유의파고($H_{1/3}$) 31.07cm, 최대파고(H_{max}) 39.68cm로 나타났다. 특히 2구간 및 3구간에서 Air hole 구조가 생기는 권파 형태의 쇠퇴파가 발생하여 해저지형에 매우 강한 충격력이 전달되었다.

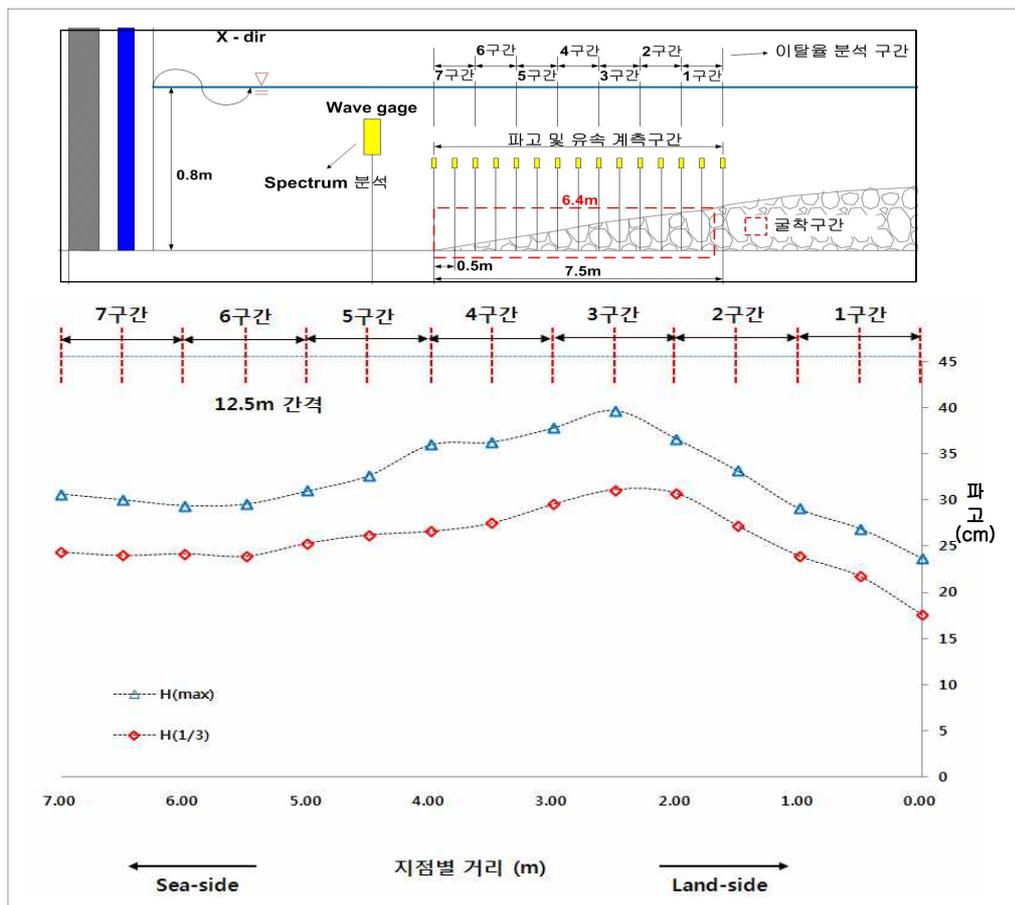


Fig 52. The distribution of the wave height.

Table 45. Maximum wave height and significant wave height by position

구 분		최대파고(H_{max})		유의파고($H_{1/3}$)		비 고
		모형(cm)	원형(m)	모형(cm)	원형(m)	
1구간	0.0m	23.67	5.92	17.56	4.39	
	0.5m	26.87	6.72	21.68	5.42	
2구간	1.0m	29.06	7.26	23.91	5.98	
	1.5m	33.14	8.28	27.16	6.79	
3구간	2.0m	36.63	9.15	30.67	7.67	
	2.5m	39.68	9.92	31.07	7.77	
4구간	3.0m	37.82	9.45	29.50	7.38	
	3.5m	36.27	9.07	27.46	6.87	
5구간	4.0m	35.97	8.99	26.56	6.64	
	4.5m	32.65	8.16	26.20	6.55	
6구간	5.0m	30.98	7.74	25.30	6.33	
	5.5m	29.55	7.34	23.89	5.97	
7구간	6.0m	29.38	7.35	24.16	6.04	
	6.5m	30.01	7.50	23.96	5.99	

(2) 유속 계측 결과

유속 역시 해저송전선로 보호공법에 영향을 미치는 하나의 인자이다. 본 실험에서는 해저케이블 설치위치의 유속을 3차원 전자기식 유속계를 이용하여 계측하였다. Table 46의 유속계측 결과 x방향 유속은 2구간에서 최대 0.83m/s(원형 4.15m/s)로 나타났으며 z방향 유속은 1구간에서 최대 0.25m/s(원형 1.25m/s)로 관측되었다. 합성유속은 2구간에서 최대 0.83m/s(원형 4.15m/s)로 나타났다.

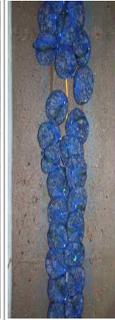
Table 46. Maximum and minimum wave speeds by position (cm/s)

구 분	1구간		2구간		3구간		4구간		5구간
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
x(min)	-31.87	-35.88	-37.52	-33.06	-35.11	-33.78	-33.78	-30.15	-25.25
x(max)	64.01	79.39	82.97	80.33	57.90	52.56	52.56	52.37	48.36
z(min)	-25.70	-14.21	-9.01	-5.28	-5.65	-5.23	-5.23	-4.46	-4.46
z(max)	24.99	17.26	13.14	10.73	9.83	5.32	5.32	5.33	5.85
합성유속	64.26	79.61	83.09	81.03	58.73	52.83	52.83	52.63	48.62

(3) 각 Case별 수리모형실험 결과 (2구간)

수리모형실험 결과 각 Case별 보호공법 이탈형상에 대한 결과는 아래 Table 47과 같다.

Table 47. The results of each case

실험안	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
보호공법	Stone bag	Stone bag	Stone bag	Stone bag	Stone bag	Stone bag	FCM
중 량	8 ton	10 ton	12 ton	12 ton	12 ton	12 ton	8.3~8.4 ton/m
설치형상	1열 설치	1열 설치	1열 설치	1열 결속	2열 대각 결속	2열 삼각 결속	1열 설치
지형조건	비굴착	비굴착	비굴착	비굴착	비굴착	비굴착	비굴착
2구간 실험결과							

실험안	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	비 고
보호공법	FCM	FCM	Rock Berm	Stone bag	FCM	Rock Berm	
중 량	8.3~8.4 ton/m	16.6~16.8 ton/m	0.5~1.0m ³	12 ton	8.3~8.4 ton/m	0.5~1.0m ³	
설치형상	1열 결속	2열 결속	-	1열 결속	1열 결속	-	
지형조건	비굴착	비굴착	비굴착	굴착	굴착	굴착	
2구간 실험결과							

(4) 수리모형실험 이탈율 분석

Table 48와 같이 수리모형실험 이탈율을 분석하여 정리한 결과, 비굴착 조건에서 1, 2 구간은 모든 Case에서 이탈 현상이 발생하였다. 다만 Case-6(비굴착, Stone bag 삼각결속)의 경우 이탈율이 2.1% 이내로 가장 안정적임이 확인되었다. 3구간에서는 일부 Case에서 이탈현상이 발생하였다. 4~7구간 같은 경우는 Rock berm 공법을 제외한 모든 공법이 안정적임이 확인되었다.

7구간에서는 모든 Case에서 이탈 현상이 발생하지 않은 것으로 추정컨대 7구간 보다 수심이 더 깊은 지역[수심 DL(-)20.0m 이상]에서는 굴착을 하지 않아도 Rock berm 공법 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 48. The dropout rates of protection methods by each case (%)

구 분			1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간	전구간	비고
Case-1	비 굴 착	S.B 1열 비결속	82.0	55.7	-	-	-	-	-	20.5	
Case-2		S.B "	38.7	61.2	-	-	-	-	-	15.0	
Case-3		S.B "	34.3	16.6	-	-	-	-	-	12.1	
Case-4		S.B 1열 결속	5.3	22.1	-	-	-	-	-	4.1	
Case-5		S.B 2열 대결속	3.2	5.8	-	-	-	-	-	1.4	안정
Case-6		S.B 2열 삼각결속	0.6	2.1	-	-	-	-	-	0.4	안정
Case-7		FCM 1열 비결속	100	100	50.0	-	-	-	-	37.6	
Case-8		FCM 1열 결속	33.3	22.0	-	-	-	-	-	8.2	
Case-9		FCM 2열 결속	7.5	5.5	-	-	-	-	-	1.9	안정
Case-10		Rock Berm	100	100	75.2	32.7	2.3	1.1	-	47.2	
Case-11		S.B 1열 결속	7.4	2.0	-	-	-	-	-	1.4	안정
Case-12		FCM "	9.6	5.4	-	-	-	-	-	2.2	안정
Case-13		Rock Berm	100	100	100	100	41.5	-	-	67.3	

3) 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법 연구결과

제주 서남부 연안의 민원 유발요인, 해양환경 특성 등을 고려한 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법 적용성 연구 및 수리모형실험 검증에 따른 최종 연구결과는 다음과 같다.

(1) 해저송전선로 보호방안 적용성 연구결과

① 매설(굴착) 보호공법 적용성 검토결과

해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안으로 먼저 매설(굴착) 보호공법 중 Dredging(백호우, 디퍼, 쇄암 등)을 활용한 Trenching 공법을 적용이 유리하다고 판단된다. 그러나, 제주 서남부 연안 민원 유발요인인 소형 어선, 해녀 및 마을 공동어장, 육상 양식장 등을 고려하여 굴착을 최소화 할 수 있도록 굴착범위 검토가 필요하다.

② 1차 보호공법(케이블 직접보호) 적용성 검토결과

해저송전선로 1차 보호공법은 케이블을 직접 감싸는 방식의 보호공법으로 과거에는 주철관(Cast Iron Pipe)이 주로 사용되었으나 현재는 주강관 및 Uraduct(UP Pipe)가 주로 사용된다. 제주 서남부 연안 해저송전선로 1차 보호공법 적용성 검토 결과, 주강관을 활용한 보호공법 적용이 유리할 것으로 판단되어 이를 우선적으로 적용하는 것을 추천한다. 이는 매설(굴착)여부에 관계없이 일괄 적용하는 것이 바람직하다.

③ 2차 보호공법(케이블 간접보호) 적용성 검토결과

해저송전선로 2차 보호공법은 1차 보호공법 위에 추가로 설치하는 보호공법으로 제주 서남해 연안 특성을 고려하여 각 보호공법에 대한 적용성 검토 결과, Rock berm, FCM, Stone bag 공법 적용이 유리할 것으로 판단된다. 다만, 수심에 따른 각 공법별 최적 적용을 검토하기 위해 수리모형실험을 시행하여 보완·검토하는 것이 바람직하다.

(2) 수리모형실험을 통한 해저송전선로 보호공법 검증결과

제주 서남부 연안의 민원 유발요인을 고려하여 비굴착시에도 안정적인 해저송전선로 보호공법 세부 적용성을 확인하기 위해 Rock berm, Stone bag, FCM으로 조합된 다양한 Case를 1/25 축척으로 수리학적상사법칙에 의거 수리모형실험을 시행하였다. 각 공법별 특성을 고려하여 Stone bag 및 FCM은 규격을 다양하게 적용하였다.

① 파고 및 유속

수리모형실험 결과 3구간에서 최대파고 39.68cm(원형에서 9.92m)로 나타났고, 2구간 및 3구간에서 Air hole 구조가 생기는 권파 형태의 쇄파가 발생하여 해저지형에 매우 강한 충격력이 전달되었다. 또한 최대유속은 2구간에서 최대 0.83m/s(원형 4.15m/s)로 나타났다.

이를 통해 2~3구간[수심 DL(-)5.0~DL(-)10.3]이 가장 쇄파의 영향이 큰 수심대임이 확인할 수 있었고, 해저송전선로 보호공법 검토시 해당 수심대에 대해 가장 극심한 조건으로 설계를 시행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

② 보호공법 이탈분석

비굴착 조건에서 1, 2 구간은 모든 Case에서 이탈 현상이 발생하였다. 다만 Case-6(비굴착, Stone bag 삼각결속)의 경우 이탈율이 2.1% 이내로 가장 안정적임이 확인되었다. 3구간에서는 일부 Case에서 이탈현상이 발생하였다.

4~7구간 같은 경우는 Rock berm 공법을 제외한 모든 공법이 안정적임이 확인되었다. 그리고 7구간에서는 모든 Case에서 이탈 현상이 발생하지 않은 것으로 추정컨대 7구간 보다 수심이 더 깊은 지역[수심 DL(-)20.0m 이상]에서는 굴착을 하지 않아도 Rock berm 공법 적용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

(3) 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법 연구결과

제주 서남부 연안의 민원 유발요인, 해양환경 특성 등을 고려한 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법 적용성 연구결과는 다음과 같다.

① 매설(굴착) 보호공법 적용

백호우, 디퍼 등의 장비 적용이 가능한 수심 구간[DL(-)3.7m 이내]까지는 가장 안정성이 뛰어난 매설(굴착) 보호공법을 적용하는 것이 유리하다. 해당 공법은 쇄암봉 Trenching 대비 정밀시공이 가능하여 부유사 발생 및 환경오염, 민원 유발을 최소화 할 수 있을 것으로 예상된다. 수심 DL(-)3.7m 이상 구간은 매설(굴착) 보호공법을 적용하지 않고, 1차 보호공법 및 2차 보호공법으로 추가 보강을 시행하는 것을 제안한다.

② 1차 보호공법(케이블 직접보호) 적용

제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 전구간에 대해 굴착 및 비굴착 조건과 관계없이 1차 보호공법으로 주강관을 적용하는 것을 제안한다.

③ 2차 보호공법(케이블 간접보호) 적용

수리모형실험 결과 파고 및 유속 고려시 DL(-)10.0m까지는 쇄파대 구간임이 확인되었다. 제주 서남부 연안의 민원유발요인을 고려하여 굴착을 시행하지 않는 조건하에 안정성을 확보할 수 있는 보호공법을 검토하였고, 비굴착시 수심 DL(-) 7.5m부터는 Case-7(FCM 1열 비결속, 8.3~8.4ton/m)를 제외한 Case가 모두 이탈율이 0%였으나, 안전율을 고려하여 DL(-)10.0m까지는 Stone bag(12ton, 2열 삼각결속)을 적용하는 것을 제안한다.

또한 수심 DL(-)10.0~DL(-)20.0m 구간 또한 굴착을 시행하지 않는 조건하에 Stone bag(12ton, 2열 삼각결속) 보다 작은 규모의 Stone bag 이나 FCM 보호공법 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 DL(-)20.0m 보다 깊은 구간에서는 비굴착 조건하에 Stone bag이나 FCM보다 경제성이 뛰어난 Rock berm을 적용하는 것을 제안한다.

V. 결 론

본 연구에서는 제주 서남부 지역 해상풍력 사업관련 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저 제주 서남부 지역 해양환경 특성을 조사하였다. 일반적으로 해상풍력 단지는 해안가에서 20~30km 떨어져 조성되는 경우가 많은데 그 이유는 해안가에서 20~30km 이격되어도 보통 수심이 30~40m 이내가 되어 해상풍력 단지 조성 시 큰 문제가 되지 않기 때문이다. 반면, 제주도 서남부 연안의 경우 해안선에서 4~5km만 이격되어도 수심이 50m 이상이 되어, 해상풍력 사업은 해안선에서 4~5km 이내에 계획되고 있으며, 이 경우 해상풍력단지에서 육상까지 약 5km 정도의 해저송전선로를 설치해야 되는 문제점이 있다.

해저송전선로는 해저면에 포설되어 해상풍력에서 육상 양육점까지 연결된다. 특히 해저송전선로는 육안으로 확인하기 어렵기 때문에 해저케이블 손상이 발생할 수 있다. 해저송전선로 대표적 위해요소를 보면 트롤어선 등의 조업형태, 대형선박의 앵커, 준설 등 해상 건설공사, 태풍 등 자연재해 등으로 구분할 수가 있다. 해저케이블 사고원인을 보면 70% 이상이 어선 조업형태 및 선박 앵커의 원인으로 해저송전선로 변형 및 파손이 발생함을 알 수 있다. 이러한 해저송전선로 손상을 방지하기 위해 바로 해저송전선로 보호방안이 고려되어야 한다.

해저송전선로 보호방안은 크게 매설(굴착) 보호공법, 1차 보호공법(케이블 직접보호), 2차 보호공법(케이블 간접보호)로 구분할 수 있다. 매설 보호공법은 해저면을 일정깊이로 굴착하고 케이블 매설 후 되메워서 케이블을 보호하는 방식을 의미하고, 1차 보호공법은 철이나 플라스틱 등의 보호재로 케이블을 직접 감싸 케이블을 보호하는 방식을 의미한다. 2차 보호공법은 매설 보호공법이나 1차 보호공법만으로 해저송전선로 안정성을 확보하기 어려울 경우 돌, 콘크리트 등 추가적인 재료로 케이블을 덮어서 외력으로부터 해저케이블 손상을 방지하기 위한 보호방식을 의미한다.

제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 연구를 위해 세 가지 지역특성을 분석하였다. 먼저 다수의 소형어선, 해녀 및 마을 공동어장, 다수의 육상양식장 등 해상 건설공사로 인한 민원 유발 요인을 분석하였고, 다음으로 해저지형 및 수심, 해상기상, 해양물리 분석 등 제주 서남부 연안의 해양환경특성을 분석하였고, 마지막으로 해상풍력 예정지역의 문화재 분포현황 조사 및 저촉여부를 분석하였다. 이를 토대로 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안 적용성 검토기준을 안정성, 경제성, 시공성, 장비사용성, 민원해소, 문화재 저촉해소 등 6가지 파라미터를 선정한 후 1, 2, 3단계 보호공법 적용성 검토를 통해 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호방안을 분석하였다.

1단계 매설(굴착) 보호공법 적용성 검토 결과, 제주 서남부 연안 해상풍력 사업추진의 가장 큰 저해요소인 민원을 고려하여 굴착 최소화가 필요하였고, 2단계 1차 보호공법 적용성 검토결과 주강관을 활용한 공법이 타당할 것으로 판단되었으며, 3단계 2차 보호공법 적용성 검토결과 Rock berm, FCM, Stone bag 공법 적용이 바람직할 것으로 판단되었다. 이에 대한 세부적용을 검증하기 위해 다양한 Case로 수리모형실험을 수행하였고 그 결과 제주 서남부 연안 해상풍력 연계 해저송전선로 보호공법에 대한 최종 연구결과는 아래와 같다.

매설(굴착) 보호공법은 백호우, 디퍼 등의 장비 적용이 가능한 수심 구간 [DL(-)3.7m 이내]에서 가장 안정성이 뛰어난 매설(굴착) 보호공법을 적용하고 이외 구간에서는 민원을 고려하여 굴착을 시행하지 않는 것이 유리할 것으로 사료되며, 1차 보호공법은 굴착, 비굴착 조건과 관계없이 주강관을 적용하는 것이 유리하다고 판단된다. 2차 보호공법은 비굴착 조건하에 수심 DL(-)10.0m 까지 Stone bag(12ton, 2열 삼각결속)을 적용하고, 수심 DL(-)10.0m~DL(-)20.0m 까지 작은 규모의 Stone bag 혹은 FCM을 적용하고, 수심 DL(-)20.0m보다 깊은 구간은 Stone bag이나 FCM보다 경제성이 뛰어난 Rock berm을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] GWEC, "Global Wind Report Annual Market Upadte 2014"
- [2] 산업통상자원부, 2014 "제4차 신·재생에너지 기본계획"
- [3] 제주특별자치도, 2014, "2030 해상풍력 2GW 개발 세부계획 수립 [제주특별자치도 풍력발전종합관리계획 점검·보완] 보고서"
- [4] 제주발전연구원, 2011, "제주지역 대규모 해상풍력발전 시범단지 조성방안 기초 연구"
- [5] 제주특별자치도 공고 2012-1114호, 2012, "대정해상풍력발전 시범지구 지정계획(안) 주민 열람공고"
- [6] 제주특별자치도, 2012, "제주특별자치도 풍력발전 종합관리계획"
- [7] 기상청, 1982~2011, "기상연보"
- [8] 한국해양연구원, 2005, "전해역 심해설계과 추정 보고서"
- [9] 손형수, 2012, "국내 해저케이블 건설의 현황과 전망", 전기저널 2012년 3월호(통권 제423호), 39-44 (6 pages)
- [10] 안승환, 유경석, 유황진, 황석범, 김창원, 김동선, 2011, "해상풍력단지 계통연결을 위한 해저케이블 보호 공법에 대한 기초 연구" 한국해양환경공학회 2011년도 추계학술대회 논문집
- [11] (주)한국해양기술, 2011, "해상풍력 발전을 위한 해저케이블 보호공법 개발" 최종 보고서, 한국해양과학기술진흥원
- [12] 안승환, 김동선, 2009, "해양환경특성에 따른 해저케이블 설치 및 보호방안", 해양환경안전학회지 제15권 제1호
- [13] 이종석, 문봉수, 송삼섭, 홍순영, 2009, "진도~제주간 HVDC 연계사업 해저케이블 보호공법 소개", 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [14] 하광수, 2010, "제주 연안 해저케이블 보호공법과 내파 안정성 검토에 관한 연구", 국민대학교 석사학위논문
- [15] 이경훈, 정용태, 강근목, 김대훈, 2010, "해상풍력 발전 타워 및 기초설계", 유신기술화보
- [16] 한국전력공사, 2012, "송·배전 해저케이블 건설 절차서(잠정)"

- [17] 제주특별자치도, 2011, “제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정 등에 관한 조례”
- [18] 제주특별자치도, 2011, “제주특별자치도 풍력발전사업 허가 및 지구 지정에 관한 세부 적용기준”
- [19] 제주특별자치도, 2013, “어업인과 함께하는 광역어초어장 정보도”
- [20] 수산정보포탈, 2015, “<http://www.fips.go.kr>”, 어류양식 통계
- [21] 김진옥, 강석규, 2011, “제주넙치 양식산업의 경제파급 효과분석” 수산경영론집, 42(1), 85~96, 2011
- [22] 국립해양조사원, 2003, “제주도 지형 및 수심도”, W235, 세계측지계 WGS-84
- [23] 한국에너지기술연구원, 2015, “<http://kredc.kier.re.kr>”, 신재생에너지 데이터센터
- [24] 제주발전연구원, 2013, “제주지역 슈퍼태풍의 접근 가능성과 대응방안 모색”, 제주발전연구원 포커스 제179호 2013년 12월 30일
- [25] 엄상근, 2011, “제주지역 해양에너지 개발 가능성 고찰”, 제주발전포럼 82~88
- [26] 문화재청, 2015, “<http://gis-heritage.go.kr>”, 문화재보존관리지도
- [27] (재)영해문화유산연구원, 2012, “제주 대정 해상풍력 건설사업지 내 문화재지표조사보고서”