제3절 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM의 설계·제작 및 현장시공

1. TEST-BED #1

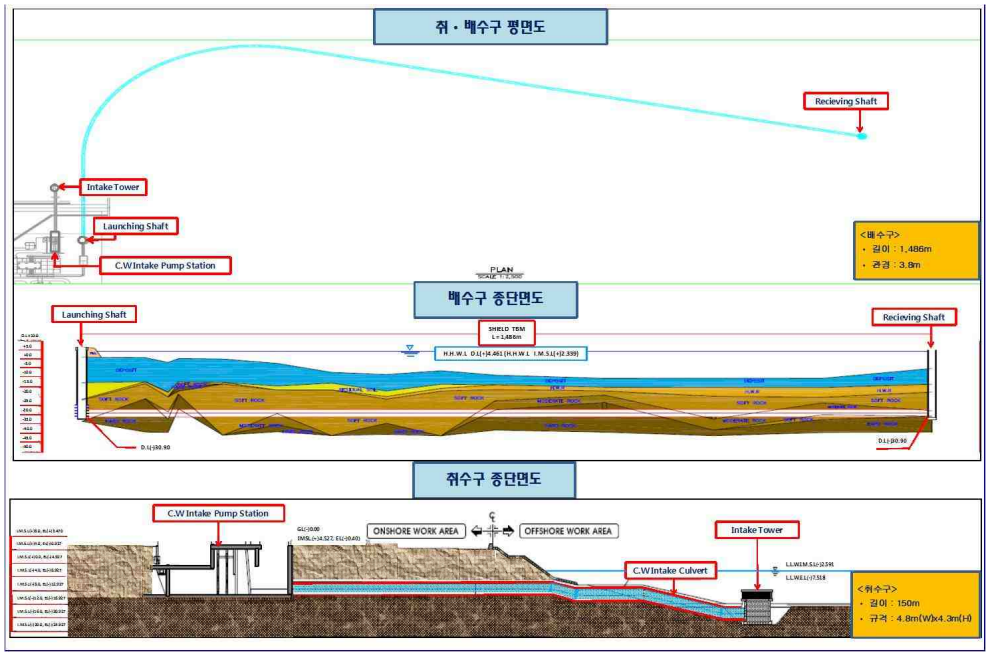
가. TEST-BED #1 대상 현장 개요

본 연구과제서는 첫 번째 TEST-BED로서 직경 3.5 m 이상의 국산 커터헤드를 설계·제작하여 이를 통해 기존 쉴드TBM을 재활용하고 실제 현장에 적용하였다. TEST-BED #1 현장은 전라남도 순천시 율촌1산업단지 해상 일원에 위치한 『율촌II복합화력발전소 냉각수 배출관로 건설공사』 현장으로서, 냉각수 배출관로 공사로 도달구가 해저구간에 위치한 해저터널이다.

해저터널의 내경은 3.8 m(쉴드TBM 외경 4.41 m), 총 연장 1,560 m이고 최대 곡선 반경은 250R이다 (그림 3.1.1). 세그먼트 라이닝의 외경은 4.2 m이며 두께는 0.2 m로 되어 있다. 해저터널의 공사기간은 2012년 4월부터 2014년 2월까지 총 20개월이며, 쉴드TBM 굴진은 2012년 12월부터 2013년 11월까지 약 12개월이었다. 해저터널의 최대 수심은 15.6 m이고 최소 토피고는 15 m이다 (그림 3.1.2)

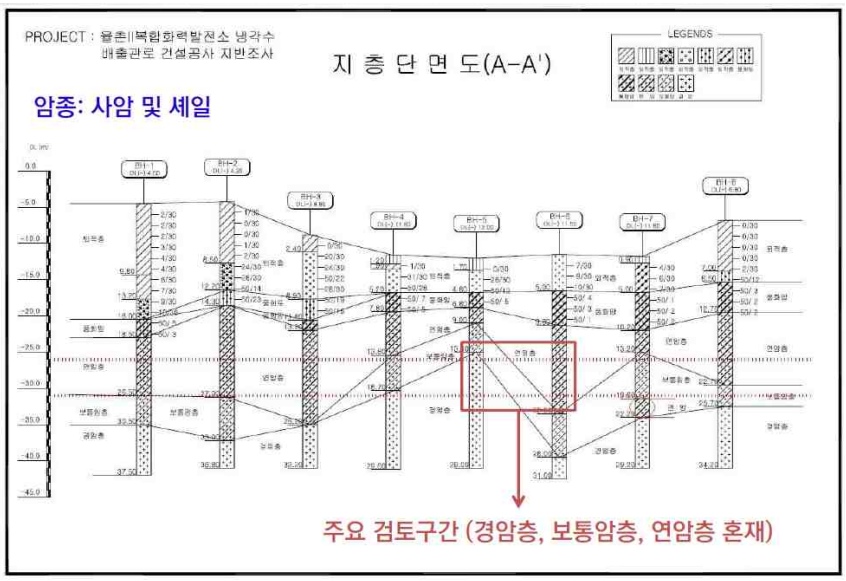


[그림 3.1.1] TEST-BED #1 현장의 위치도



[그림 3.1.2] TEST-BED #1 현장의 평면도 및 종단면도

굴착대상 해저지반의 주된 암종은 사암과 셰일이었으며, 터널의 해저지반 심도는 약 25~30 m이다. 해저 지반에 대한 조사결과, 쉴드TBM은 연암~경암층을 굴착하게 되며, 특히 시추조사 결과, BH-5와 BH-6 시추공 사이의 구간에서 경암층(압축강도 135.1 MPa), 보통암층(압축강도 90~98.8 MPa) 및 연암층(압축강도 35.2 MPa)이 혼재되어 나타날 것으로 예상되었다 (그림 3.1.3). 따라서 본 연구에서는 BH-5와 BH-6 시추공 사이의 구간에 대한 분석을 집중적으로 실시하였다 (표 3.1.1).



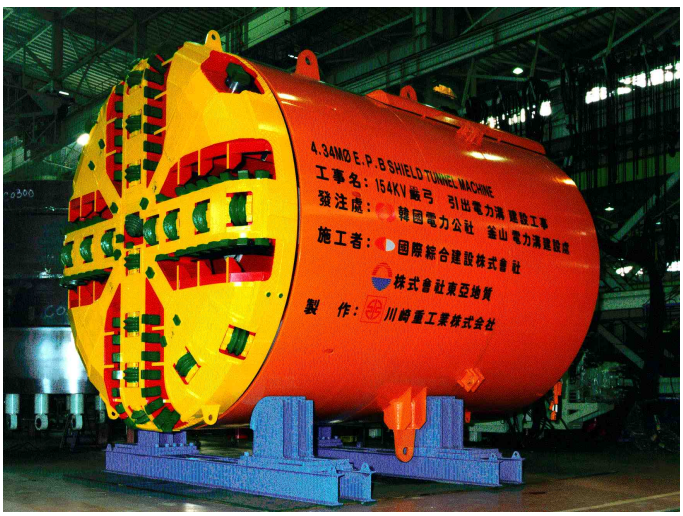
[그림 3.1.3] TEST-BED #1 현장의 지층단면도와 터널 계획심도

[표 3.1.1] TEST-BED #1 현장의 암석 시추코어에 대한 물리적·역학적 특성 측정결과

시추공번호	심도 (G.L., - m)	비중 (kN/m³)	흡수율 (%)	일축압축강도 (MPa)
BH-1	27.0~27.2	2.785	0.25	130.9
BH-1	32.3~32.5	2.763	0.28	110.6
BH-2	26.8~27.0	2.591	1.09	24.6
BH-2	30.5~30.8	2.68	0.67	34.8
BH-3	19.8~20.0	2.539	3.46	15.3
BH-3	26.7~26.9	2.851	0.3	64
BH-4	18.5~18.7	2.719	0.76	44.4
BH-4	23.2~23.5	2.68	0.56	119
BH-5	18.7~18.9	2.686	0.43	98.8
BH-5	20.0~20.2	2.674	0.61	135.1
BH-6	19.0~19.2	2.663	0.55	35.2
BH-6	24.2~24.3	2.684	0.49	90
BH-7	18.6~18.8	2.65	0.53	46.2
BH-7	23.8~24.1	2.637	0.62	60.9
BH-8	23.6~23.8	2.641	0.39	50.4
BH-8	27.4~27.6	2.629	0.44	55

나. TEST-BED #1 쉴드TBM의 핵심 사양 검토

본 연구에서는 TEST-BED #1 현장에 적용할 쉴드TBM의 굴착 외경(4.41 m), 기존 TBM(그림 3.1.4)의 최대 용량, 굴착대상 지반조건("가"절 참조) 등을 고려하여, 본 연구단에서 개발한 데이터베이스 기반의 모델로 TBM의 핵심 사양을 검토하였다.



[표 3.1.2] 데이터베이스 기반 설계모델로 도출된 TEST-BED #1용 쉴드TBM의 핵심 사양

예측항목	예측결과	기존 장비 용량
소요 디스크커터 개수	32개	-
디스크커터 평균 간격	80 mm	-
디스크커터 직경	388 mm (15인치)	-
TBM 최대 추력	18,324 kN	20,000 kN (+1,676)
TBM 최대 토크	2,717 kN·m	1,600 kN·m (-1,117)
TBM 최대 동력	977 kW	575 kW (-402)
TBM 최대 RPM	8 rev/min	4.3 rev/min (-3.7)

표 3.1.2의 검토 결과, 해당 조건에 적합한 디스크커터의 총 개수는 32개로 나타났으며, 이는 뒤이은 "다"절의 커터헤드 설계결과인 32개와 동일한 것이다. 또한 NTNU의 개략 추정모델을 활용할 경우에도 외경 4.4 m의 쉴드TBM에 직경 432 mm의 디스크커터를 적용하게 되면 이때 필요한 디스크커터의 소요 개수가 동일하게 30개로 나타났다.

본 연구단에서 구축한 데이터베이스의 분석 결과로부터 쉴드TBM 커터헤드의 개구율은 대부분은 20~40%에 분포하였으며, 특히 30%에 해당하는 자료들의 빈도가 가장 높게 나타나 본 연구에서도 커터헤드의 개구율을 30%로 설정하였다. 이러할 경우, 버킷과 개구부의 위치를 고려할 때 굴착외경을 기준으로 도출된 디스크커터의 평균 간격인 80 mm로 설계가 불가능하였다. 커터헤드 설계 시에 버킷을 포함한 개구부의 위치가 디스크커터의 배열보다 우선하기 때문에 개구율 30%를 만족시키기 위하여 페이스커터의 간격을 90 mm로 조정하였다.

또한 데이터베이스로부터 예측된 디스크커터의 적정 직경은 쉴드TBM의 직경을 고려하여 15인치(388 mm)가 적절한 것으로 나타났으나, TEST-BED #1 현장에서 압축강도가 130 MPa인 경암이 나타나기 때문에 디스크커터의 직경을 17인치로 증가시켜 경암에의 대응을 원활히 하고자 하였다.

TBM의 핵심 사양에 대한 분석 결과, 예측된 최대 추력보다 오히려 사용될 기존 쉴드TBM의 최대 추력이 약 1,700 kN 크게 나타났으나, 최대 토크는 낮은 것으로 예측되어 이로 인해 최대 동력까지 낮게 평가되었다. 일반적으로 TBM의 직경이 작을수록 커터헤드 최대 회전수를 크게 할 수 있으나, TEST-BED #1에 적용될 기존 쉴드TBM의 최대 회전수는 4.3 rev/min로 나타났다. 기존 쉴드TBM 사양의 적합성에 대해서는 본 절의 후반부에 상세하게 기술하였다.

또한 본 연구단에서 구축한 데이터베이스를 참고하고, 총 32개의 디스크커터를 평균 간격 90 mm로 균등 배치하는데 효과적인 스포크 8개의 형태로 커터헤드의 형상을 설계하였다.

이상과 같이 TEST-BED #1에 적용될 쉴드TBM의 최대 용량과 지반조건을 고려하여 조정된

디스크커터의 직경 및 간격 조건들을 정리하면 다음의 표 3.1.3과 같다.

[표 3.1.3] TEST-BED #1용 쉴드TBM에 대한 설계조건

구분	항목	값
TBM 최대 용량 (기존 TBM)	굴착 외경(쉴드 외경)	4.41 m
	최대 추력	20,000 kN
	최대 토크	1,600 kN·m
	최대 동력	575 kW
	최대 RPM	4.3 rpm (rev/min)
디스크커터	디스크커터 개수	32개
	디스크커터 직경	432 mm (17인치)
	디스크커터 최대 용량	272 kN
	디스크커터 tip너비	20 mm
	디스크커터의 간격(페이스커터)	90 mm
커터헤드	개구율	30%
	스포크수	8개
암석의 역학적 특성	일축압축강도	135.1MPa (BH-5, 경암)
	인장강도	13.5 MPa (가정)

앞선 "가"절에서 언급한 바와 같이, TEST-BED #1 현장에 대해 제시된 지반 특성은 일축압축강도가 유일하므로 KICT모델의 적용은 원천적으로 불가능하여 지반 특성으로 압축강도와 인장강도만을 사용하는 CSM모델에 의해 커터 작용력을 검토하였다.

본 연구단에서 개발한 TBM 핵심사양 및 커터헤드 기본설계 과정에 의해 산출된 TBM 커터헤드의 1회전당 커터 관입깊이는 표 3.1.4와 같이 7 mm/rev로 나타났다. 즉, 커터 관입깊이가 7 mm/rev일 때 CSM모델로 예측된 디스크커터의 연직 작용력은 269 kN로서 디스크커터의 최대 하중용량인 272 kN이하로 산출되었다. 반면, 커터 관입깊이가 8 mm/rev를 넘게 되면 디스크커터의 최대 하중용량 이상의 커터 연직 작용력이 작용하게 되어 굴진이 불가능한 것으로 나타났다.

표 3.1.4로부터 산출된 최대 커터 관입깊이인 7 mm/rev를 적용하고 TBM의 가동률과 작업시간(working time)을 각각 30% 및 150 hr/week로 가정하면, 월 굴진율은 226.8 m/month로 예측되었다. 또한 이러한 커터 관입깊이 조건에서는 TEST-BED #1에 적용할 토압식 쉴드TBM의 최대 추력, 토크 및 동력 용량을 모두 무난하게 만족하는 것으로 나타났다 (표 3.1.5).

앞선 1절에서 설명한 3차원 파괴 동적모델링에 의한 쉴드TBM의 설계 검토도 병행하고자, 굴착대상 지반 조건과 비슷한 일축압축강도의 사암·셰일 지층을 대상으로 수행되었던 지반물성 조사결과를 참고하여 표 3.1.6과 같은 지반 물성을 사용하여 해당 암석을 모델링 하였다.

[표 3.1.4] 본 연구에서 개발한 기본설계 과정에 의한 최대 커터 관입깊이의 산출

커터 관입깊이 (mm/rev)	CSM모델 (결정계수 0.780, Rostami 등, 1996)									
	커터연직 작용력 (kN)	커터 용량 검토	TBM 소요 추력 (kN)	추력 용량 검토	커터 회전 작용력 (kN)	TBM 소요 토크	토크 용량 검토	커터헤드 RPM (rev/min)	TBM 소요 동력	동력 용량 검토
15	388	N.G	12,402	O.K	74	3,112	N.G	3.00	978	N.G
14	375	N.G	12,008	O.K	69	2,907	N.G	3.00	913	N.G
13	362	N.G	11,597	O.K	64	2,703	N.G	3.00	849	N.G
12	349	N.G	11,167	O.K	59	2,497	N.G	3.00	785	N.G
11	335	N.G	10,716	O.K	54	2,292	N.G	3.00	720	N.G
10	320	N.G	10,240	O.K	49	2,085	N.G	3.00	655	N.G
9	304	N.G	9,736	O.K	44	1,879	N.G	3.00	590	N.G
8	287	N.G	9,199	O.K	39	1,672	N.G	3.00	525	O.K
7	**269**	**O.K**	**8,624**	**O.K**	**35**	**1,464**	**O.K**	**3.00**	**460**	**O.K**
6	250	O.K	8,002	O.K	30	1,256	O.K	3.00	395	O.K
5	229	O.K	7,321	O.K	25	1,048	O.K	3.00	329	O.K
4	205	O.K	6,562	O.K	20	839	O.K	3.00	264	O.K
3	178	O.K	5,695	O.K	15	630	O.K	3.00	198	O.K
2	146	O.K	4,660	O.K	10	421	O.K	3.00	132	O.K
1	103	O.K	3,303	O.K	5	210	O.K	3.00	66	O.K

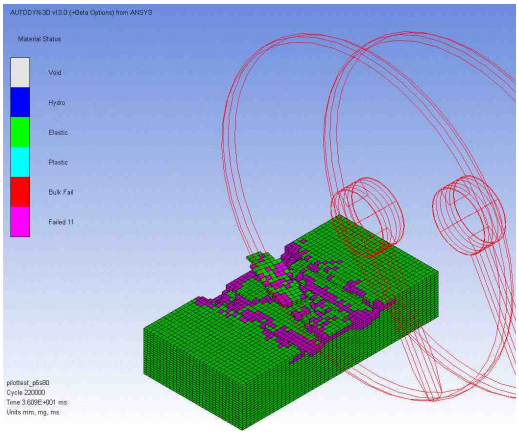
[표 3.1.5] 디스크커터의 관입깊이에 따른 굴진율 추정 및 TBM 최대용량 검토 결과

커터관입 깊이 (mm/rev)	커터헤드 RPM (rev/min)	굴진율				CSM모델에 의한 TBM의 최대용량 검토 결과			
		순굴진속도 (m/hr)	일굴진율 (m/day)	주굴진율 (m/week)	월굴진율 (m/month)	디스크 커터 용량 검토	추력 용량 검토	토크 용량 검토	동력 용량 검토
15	3.00	2.70	19.44	121.50	486.00	N.G	O.K	N.G	N.G
14	3.00	2.52	18.14	113.40	453.60	N.G	O.K	N.G	N.G
13	3.00	2.34	16.85	105.30	421.20	N.G	O.K	N.G	N.G
12	3.00	3.16	15.55	97.20	388.80	N.G	O.K	N.G	N.G
11	3.00	1.98	14.26	89.10	356.40	N.G	O.K	N.G	N.G
10	3.00	1.80	12.96	81.00	324.00	N.G	O.K	N.G	N.G
9	3.00	1.62	11.66	72.90	291.60	N.G	O.K	N.G	N.G
8	3.00	1.44	10.37	64.80	259.20	N.G	O.K	N.G	O.K
7	**3.00**	**1.26**	**9.07**	**56.70**	**226.80**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
6	3.00	1.08	7.78	48.60	194.40	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.00	0.90	6.48	40.50	162.00	O.K	O.K	O.K	O.K
4	3.00	0.72	5.18	32.40	129.60	O.K	O.K	O.K	O.K
3	3.00	0.54	3.89	24.30	97.20	O.K	O.K	O.K	O.K
2	3.00	0.36	2.59	16.20	64.80	O.K	O.K	O.K	O.K
1	3.00	0.18	1.30	8.10	32.40	O.K	O.K	O.K	O.K

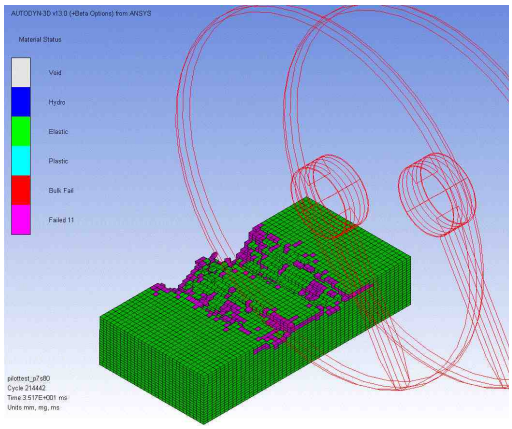
[표 3.1.6] TEST-BED #1 쉴드TBM의 설계검토를 위한 수치해석의 입력 물성

암종	밀도 (g/cm^3)	포아송 비	탄성계수 (GPa)	일축압축강도 (MPa)	간접인장강도 (MPa)
율촌 사암(셰일)	2.72	0.2	25.2	135.1	13.5

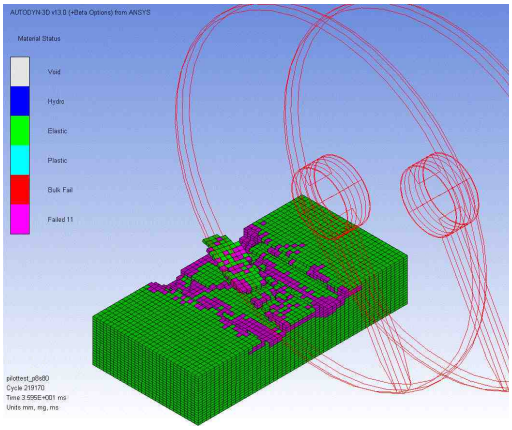
앞서 설명한 바와 같이 TEST-BED #1에 사용될 커터헤드에 대한 커터간격은 페이스커터를 기준으로 90 mm로 설계되었다. 따라서 커터간격(80 및 90 mm)과 커터헤드 1회전당 커터관입 깊이를 변화(6~11 mm)시켜 가며, TBM과 TBM 커터헤드의 사양검토를 위한 사전 해석을 수행하였다. 이때 1절에서 설명한 것과 동일한 수치해석 모델을 사용하였다. 그림 3.1.5와 그림 3.1.6은 각각 커터간격 80 mm와 90 mm를 적용하였을 때, TEST-BED #1 암반에 대한 디스크커터의 절삭결과이다. 이때 두 개의 디스크커터에 의한 암석 절삭현상을 상세히 나타내기 위하여 디스크커터는 외곽선만을 도시하였다.



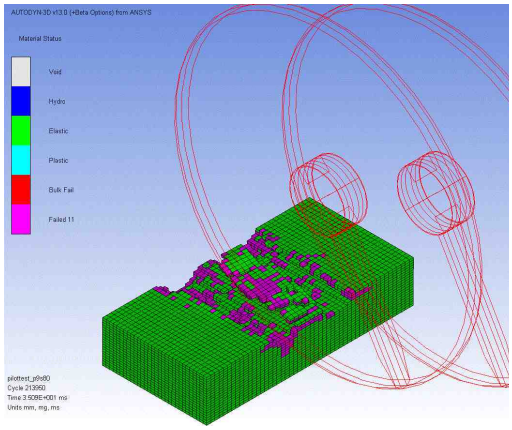
(a) 관입깊이 6 mm



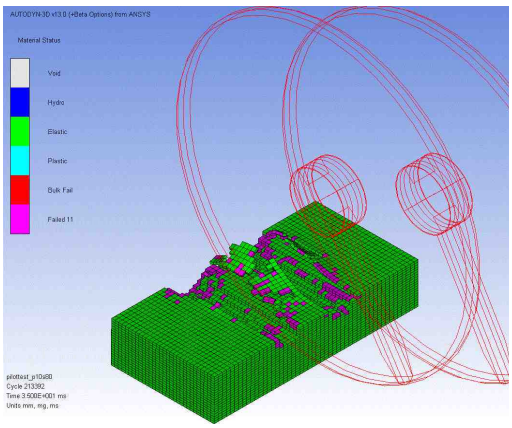
(b) 관입깊이 7 mm



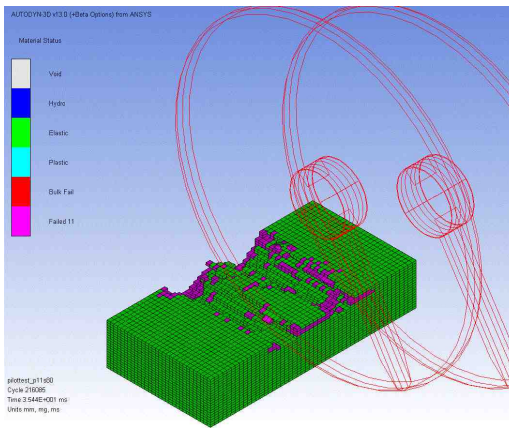
(c) 관입깊이 8 mm



(d) 관입깊이 9 mm

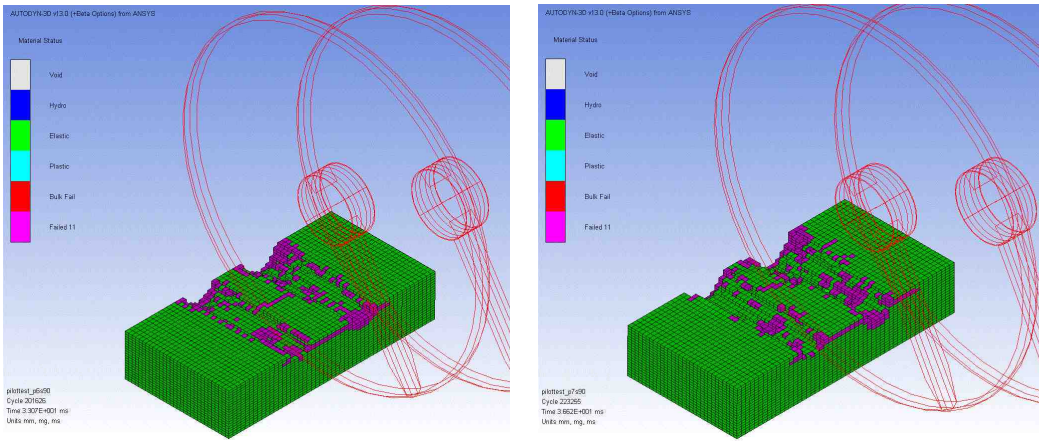


(e) 관입깊이 10 mm



(f) 관입깊이 11 mm

[그림 3.1.5] TEST-BED #1 암반에 대한 디스크커터의 절삭해석 결과 (커터간격 80 mm)



(a) 관입깊이 6 mm　　(b) 관입깊이 7 mm

(c) 관입깊이 8 mm　　(d) 관입깊이 9 mm

(e) 관입깊이 10 mm　　(f) 관입깊이 11 mm

[그림 3.1.6] TEST-BED #1 암반에 대한 디스크커터의 절삭해석 결과 (커터간격 90 mm)

표 3.1.7에는 TEST-BED #1에 대한 이상의 수치해석 결과들을 요약하였다. 절삭조건에 따른 디스크커터의 작용력과 비에너지를 산출한 결과, 디스크커터의 작용하중은 일정한 커터간격에서 커터 관입깊이가 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

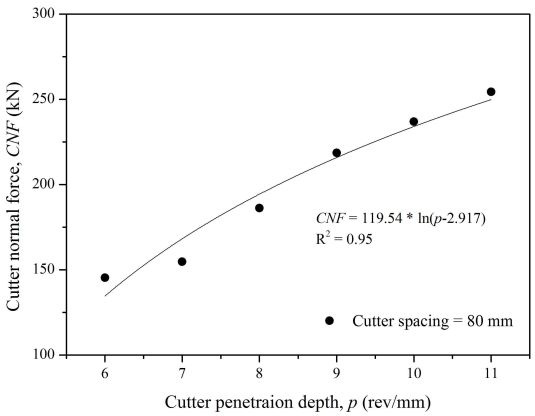
[표 3.1.7] TEST-BED #1 대상 지반에 대한 수치해석 결과

커터관입깊이 (mm)	커터간격 80 mm			커터간격 90 mm		
	연직 작용력 (kN)	회전 작용력 (kN)	비에너지 (MJ/m^3)	연직 작용력 (kN)	회전 작용력 (kN)	비에너지 (MJ/m^3)
6	145.3	18.9	39.4	149.7	19.2	35.5
7	154.7	21.0	37.4	168.3	23.6	37.5
8	186.2	23.0	35.8	193.4	25.3	35.0
9	218.6	27.2	37.8	223.0	29.7	36.6
10	236.9	30.1	37.6	248.8	33.0	36.6
11	254.3	35.6	40.5	268.6	39.5	39.9

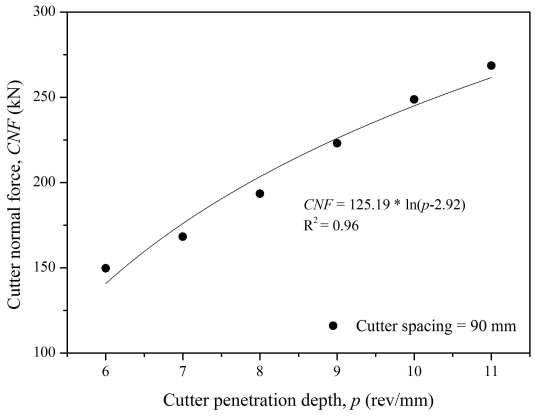
그림 3.1.7과 그림 3.1.8은 커터의 관입깊이에 따른 디스크커터의 연직 작용력과 회전 작용력의 변화 추이를 나타낸 그래프이다. 디스크커터의 관입깊이가 증가함에 따라 디스크커터의 연직하중은 로그함수(logarithmic function)의 형태로 증가하는 것으로 나타났으며, 반면 회전하중은 멱함수(power function)의 형태로 증가하였다. 따라서 고속굴진을 위하여 커터헤드 1회전당 관입깊이를 크게 설정할 경우 TBM의 토크의 증가폭을 보다 상세하게 검토하여야 할 것으로 나타났다.

또한 동일한 커터 관입깊이에서 커터간격과 80 mm와 커터간격 90 mm를 비교하였을 때, 디스크커터의 작용력은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 변화양상 또한 유사하게 나타났다 (그림 3.1.9). 연직 작용력의 경우 평균 4.7%가 증가하였으며 회전 작용력의 경우 평균 8.9% 증가하는 것으로 예측되었다. 한편 본 연구의 TEST-BED #1용 쉴드TBM에 장착되는 디스크커터의 최대 허용하중은 272 kN으로서 본 연구의 수치해석에서 대상으로 하였던 모든 절삭조건에 적용 가능한 것으로 나타났다 (그림 3.1.9(a) 참조). 단, 커터 관입깊이가 11 mm인 경우에는 연직 작용력이 디스크커터의 허용 하중과 비슷한 268.6 kN으로 나타났으므로 디스크커터의 허용 하중 측면에서는 기본 관입깊이를 10 mm이하로 설정하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.

이상과 같이 수치해석적 검토로부터 TEST-BED #1현장의 경암 구간에 대해서도 디스크커터의 최대 관입깊이를 10 mm까지 적용 가능한 것으로 산출되긴 하였으나, 앞선 커터 작용력 예측결과에 의하면 최대 관입깊이가 7 mm인 것으로 나타났다. 따라서 보수적인 설계 측면에서 본 연구에서는 커터의 최대 관입깊이를 7 mm로 설정하여 설계를 실시하였다.

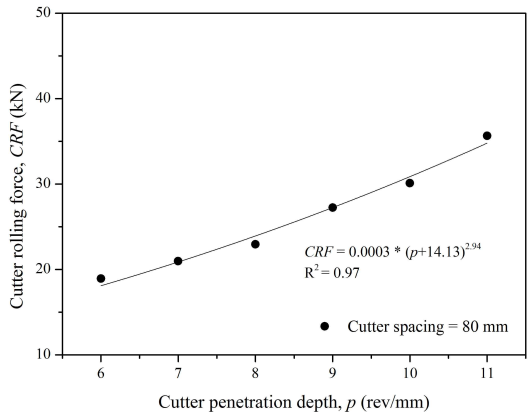


(a) 커터간격 80 mm

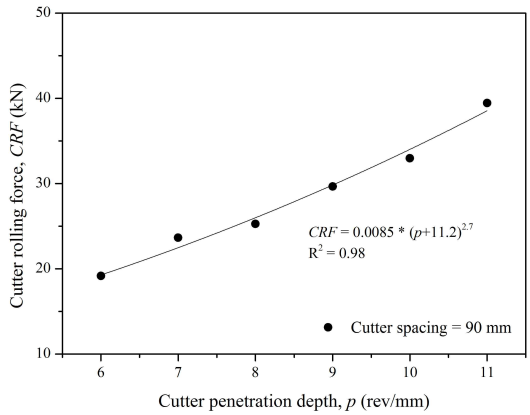


(b) 커터간격 90 mm

[그림 3.1.7] 수치해석으로부터 얻어진 디스크커터의 관입깊이와 연직 작용력의 관계

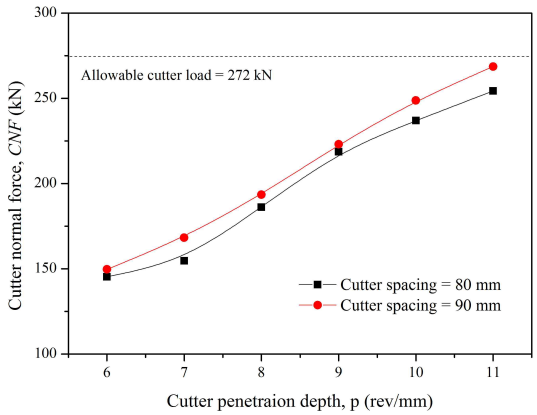


(a) 커터간격 80 mm

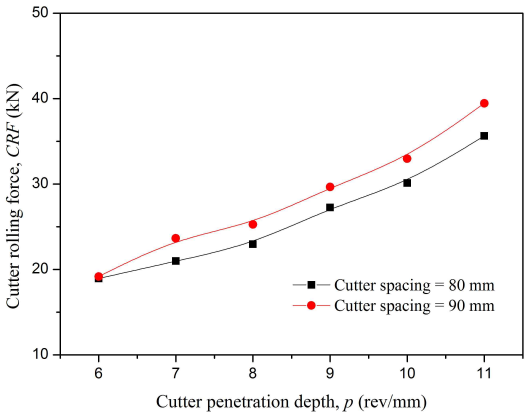


(b) 커터간격 90 mm

[그림 3.1.8] 수치해석으로부터 얻어진 디스크커터의 관입깊이와 회전 작용력의 관계



(a) 연직 작용력



(b) 회전 작용력

[그림 3.1.9] 수치해석으로부터 얻어진 커터간격별 디스크커터의 작용력 변화

다. TEST-BED #1 쉴드TBM의 커터헤드 설계

앞선 "나"절에서는 본 연구단에서 개발한 TBM의 최적 사양 설계모델(1절 참조)에 의해 TEST-BED #1 현장에 적용할 기존 쉴드TBM의 최대 용량, 최대 커터 관입깊이 등을 평가하였다.

이상의 결과를 바탕으로 TEST-BED #1에 적용할 쉴드TBM의 커터헤드를 설계하는데 필요한 설계조건들을 정리하면 다음의 표 3.1.8과 같다.

표 3.1.8의 설계조건에 부합되도록 8개의 스포크 형태로 설계된 디스크커터의 배열설계 결과는 그림 3.1.10과 같다. 페이스커터의 간격을 90 mm로 하여 게이지영역의 곡선반경과 커터 간격감소를 고려한 디스크커터의 총 설치개수는 32개로서 앞선 표 3.1.3에 정리된 바와 같이 D/B로 예측된 디스크커터의 총 개수와 일치하였다. 세부적으로는 센터커터가 4개, 페이스커터 14개 및 게이지커터 14개로 구성된다 (표 3.1.9). 이상과 같이 배열설계된 TEST-BED #1 현장용 쉴드TBM 커터헤드의 정면도와 측면도는 그림 3.1.10과 같다.

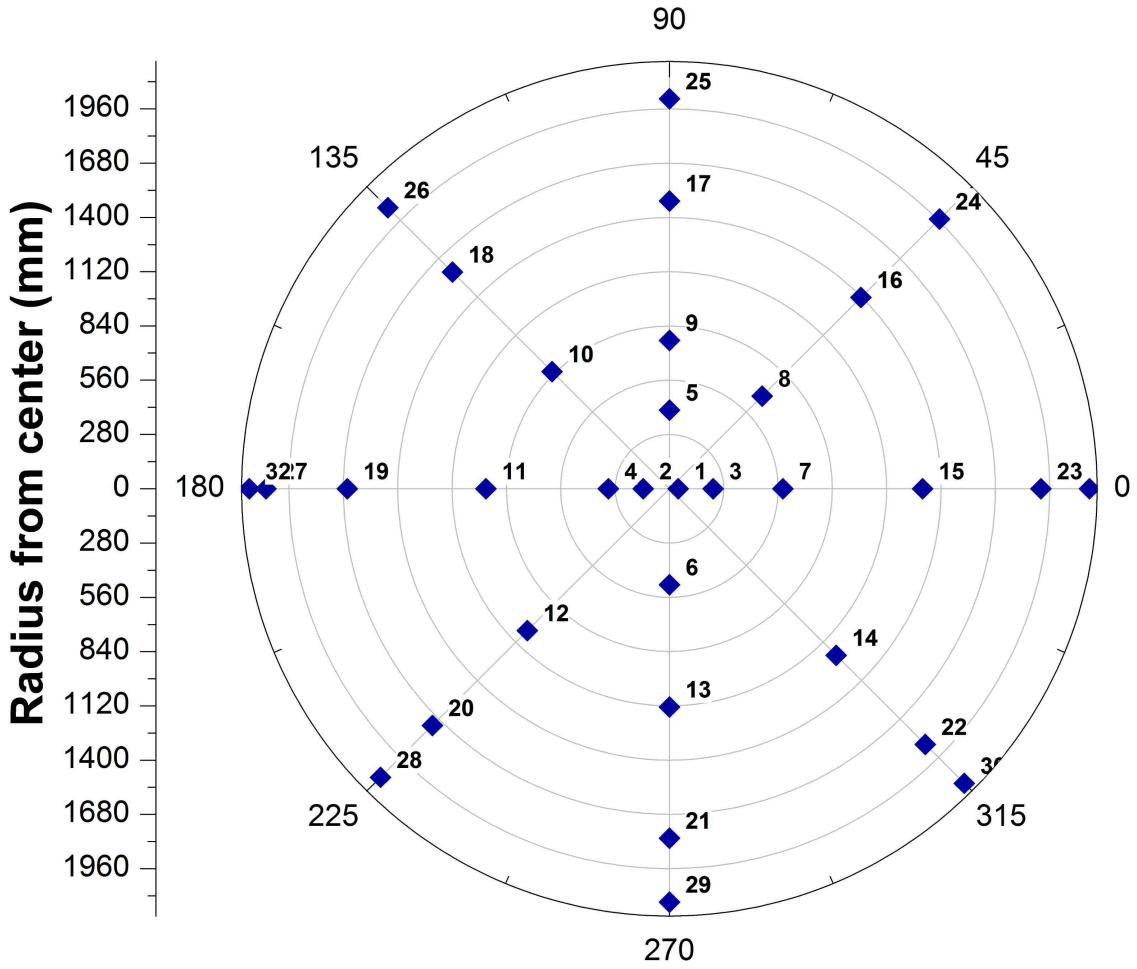
[표 3.1.8] 커터 배열설계를 위한 설계조건

항목	적용값	비고
쉴드TBM직경	4.41 m	기존 쉴드TBM
디스크커터 직경	432 mm (17 inches)	경암 대응
디스크커터 평균 간격	90 mm	페이스커터 간격
나선각(spiral angle)	45°	Spoke 8개(D/B 등 활용)
센터 커터 개수	4	TBM 직경 고려 및 D/B활용
게이지커터부 곡선반경	660 mm	기존 쉴드TBM의 곡선반경
게이지커터부 간격 감소치	- 5 mm/cutter	해외 전문가 자문결과
마지막 게이지커터의 각도	70°	일반적으로 65~70°
디스크커터 최대 관입깊이	7 mm/rev	TBM 및 커터 사양 검토 결과
커터헤드 평균 회전속도	3 rev/min	가정(동력 및 굴진율 산정시)

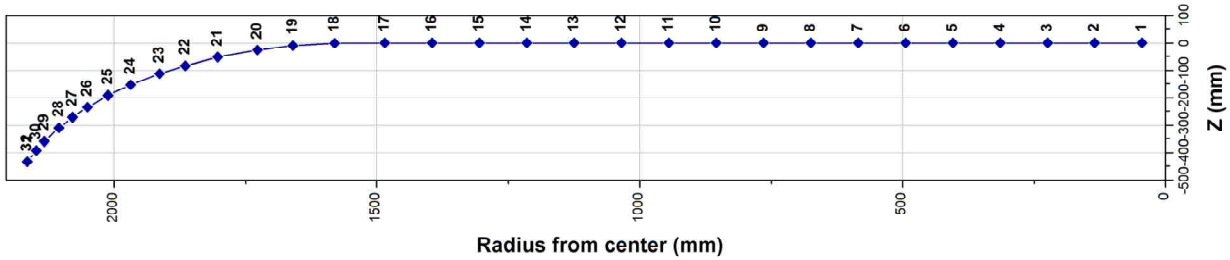
이상과 같이 설계된 커터헤드에 대해 앞선 1절에서 설명한 커터헤드 균형검토를 위하여 그림 3.1.3에서 기술한 중점 검토구간인 BH-5와 BH-6 시추공 사이의 구간에 대해 검토를 실시하였다. 특히, 굴진면이 BH-5와 BH-6 시추공 사이에 존재하는 경암으로만 구성되어 있을 경우뿐만 아니라 굴진면에 경암, 보통암 및 연암이 혼재되어 나타날 경우에 대한 커터헤드 균형검토도 실시하였다 (그림 3.1.11). 이때 경암, 보통암 및 연암의 순서 변화에 따른 커터헤드 균형검토도 함께 수행하였다. 복합지반 굴진면을 가정할 경우, 각 3개층의 높이를 동일하게 설정하였고 각 층에 대한 암석의 압축강도는 표 3.1.1의 지반조사 결과에 근거하여 경암, 보통암 및 연암에 대해 각각 135.1 MPa, 98.8 MPa 및 35.2 MPa을 적용하였다.

[표 3.1.9] TEST-BED #1 쉴드TBM 커터헤드의 커터 배열설계 결과

커터 번호	커터 방위각(°)	커터의 누적 반경(mm)	커터의 경사각(°)	커터간격 (mm)	커터 좌표		
					X (mm)	Y (mm)	Z(mm)
1	0	45	0	45	45	0	0
2	180	135	0	90	−135	0	0
3	0	225	0	90	225	0	0
4	180	315	0	90	−315	0	0
5	90	405	0	90	0	405	0
6	270	495	0	90	0	−495	0
7	0	585	0	90	585	0	0
8	45	675	0	90	477	477	0
9	90	765	0	90	0	765	0
10	135	855	0	90	−605	605	0
11	180	945	0	90	−945	0	0
12	225	1,035	0	90	−732	−732	0
13	270	1,125	0	90	0	−1,125	0
14	315	1,215	0	90	859	−859	0
15	0	1,305	0	90	1,305	0	0
16	45	1,395	0	90	986	986	0
17	90	1,485	0	90	0	1,485	0
18	135	1,580	3	90	−1,117	1,117	−1
19	180	1,660	10	81	−1,660	0	−10
20	225	1,727	16	77	−1,221	−1,221	−26
21	270	1,803	23	73	0	−1,803	−52
22	315	1,865	29	69	1,319	−1,319	−83
23	0	1,914	34	65	1,914	0	−113
24	45	1,969	40	62	1,392	1,392	−154
25	90	2,012	45	59	0	2,012	−193
26	135	2,051	50	56	−1,450	1,450	−236
27	180	2,079	54	53	−2,079	0	−272
28	225	2,105	58	50	−1,488	−1,488	−310
29	270	2,133	63	47	0	−2,133	−360
30	315	2,148	66	45	1,519	−1,519	−392
31	0	2,165	70	43	2,165	0	−434
32	180	2,165	70	43	−2,165	0	−434



(a) 정면도



(b) 측면도

[그림 3.1.10] TEST-BED #1 쉴드TBM 커터헤드의 커터 배열설계 도면



[그림 3.1.11] TEST-BED#1 쉴드TBM 커터헤드의 균형검토를 위한 굴진면 지반조건

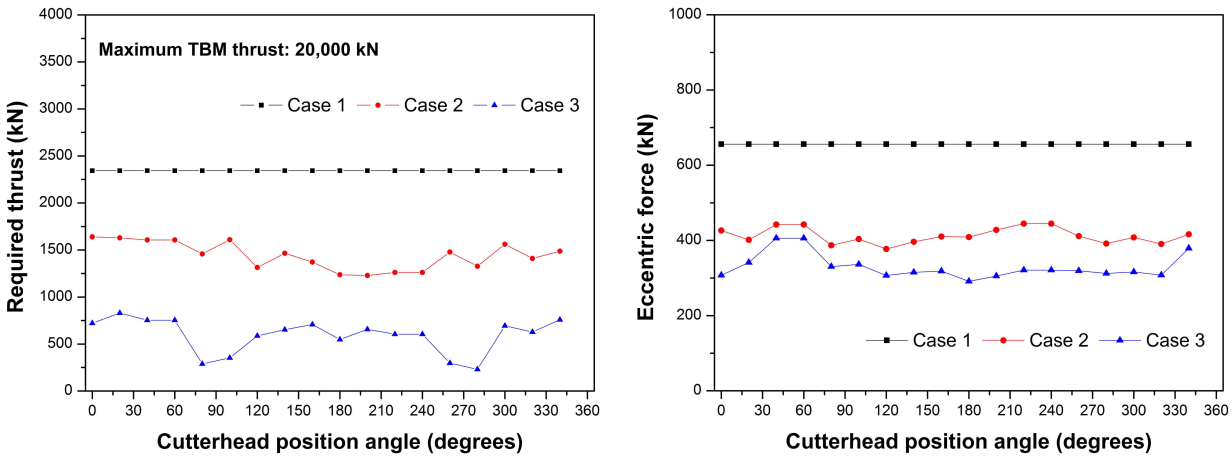
커터헤드의 균형 검토 시에는 공통적으로 “나”절에서 도출된 경암 구간에서의 커터 최대 관입깊이인 7 mm/rev과 3 rev/min의 커터헤드 구동 회전속도를 적용하였다. 이상과 같은 굴진면 지반조건에 따른 커터헤드 균형검토 결과는 표 3.1.10과 같다.

[표 3.1.10] TEST-BED #1 쉴드TBM 커터헤드의 균형검토 결과

이상의 분석결과, 디스크커터의 최대 작용력은 경암에 의해 좌우되기 때문에 3가지의 굴진면 지반조건에 무관하게 공통적으로 173.7 kN로 예측되었으며 디스크커터 최대 허용하중 용량의 64%에 해당하였다. 커터헤드의 최대 편심력은 약 400~650 kN로서 커터헤드의 메인베어링 용량을 고려할 때, 무난한 수준으로 나타났다. TBM의 최대 추력은 굴진면이 경암으로만 구성될 경우에 가장 크게 나타났으나 최대 추력의 12% 수준에 불과하였다. TBM의 최대 토크와 최대 동력은 그림 3.1.11b의 복합지반 조건에서 가장 크게 나타났으나 각각 TBM 최대 용량의 40% 및 35%로서 문제가 없는 것을 확인하였다.

경암 및 복합지반 굴진면 조건에서 커터헤드 회전에 따른 소요 추력과 발생 편심력은 그림

3.1.12와 같다. 커터헤드 회전에 따른 소요 추력과 편심력의 발생 경향은 거의 일치하였으며, 앞서 분석한 바와 같이 굴진면이 경암으로만 구성될 때 가장 큰 추력과 편심력이 발생하였다.



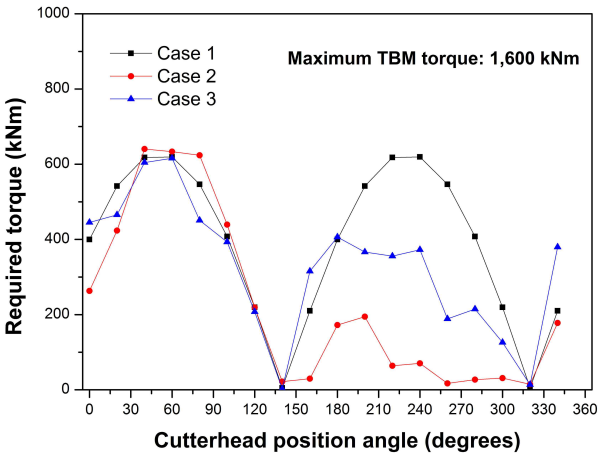
(a) 소요 추력 (b) 편심력

[그림 3.1.12] TEST-BED #1 쉴드TBM의 커터헤드 회전에 따른 소요 추력과 편심력 결과

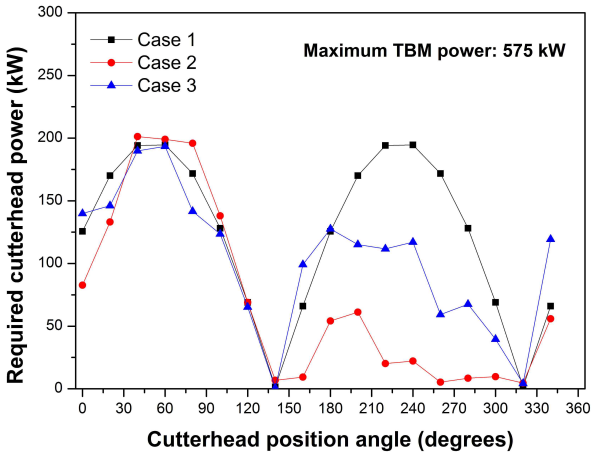
앞선 추력과 편심력의 관계와 마찬가지로 경암 및 복합지반 굴진면 조건에서 커터헤드 회전에 따른 소요 토크와 소요 동력은 그림 3.1.13과 같이 거의 동일하였다. 표 3.1.10의 결과처럼 Case 2의 복합지반 굴진면인 경우에서 소요 토크와 소요 동력이 가장 크게 산출되긴 하였으나, 다른 굴진면 조건과 비교할 때 큰 차이는 아니며 유사한 수준으로 판단되었다.

TEST-BED #1 현장의 전체 공기는 20개월이지만 쉴드TBM의 본 굴진공기는 12개월에 불과하여, 최종적으로 굴진율에 의한 공사기간 검토를 실시하였다. 디스크커터의 최대 관입깊이가 7 mm/rev인 조건에서 커터헤드의 구동 회전속도, 작업시간 및 TBM 가동률을 각각 3 rev/min, 150 hr/week 및 30%로 가정하면, 가장 최악의 조건인 경암으로만 구성된 지반조건에서도 최대 월 굴진율이 227 m/month로 산출되었다.

또한 본 굴진공기를 9개월로 가정하고 시공연장 1,560 m을 고려하여도, 쉴드TBM에 요구되는 최소 월 굴진율은 162 m/month, 즉 커터 관입깊이 5 mm/rev로 파악되었다 (표 3.1.11). 따라서 굴착대상 지반조건이 모두 경암으로 구성되었다고 가정했을 경우라도 커터 관입깊이를 5 mm/rev이상으로 관리하면 계획된 공사기간 내에 무난히 굴진을 완료할 수 있을 것으로 나타났다. 단, 트러블 저감 노력을 통해 가동률을 추가적으로 향상시킬 경우에는 공사기간 단축도 예상할 수 있는 것으로 나타났다.



(a) 소요 토크



(b) 소요 동력

[그림 3.1.13] TEST-BED #1 쉴드TBM 커터헤드의 회전에 따른 소요 추력과 소요 동력

[표 3.1.11] TEST-BED #1 현장의 쉴드TBM 굴진율 분석결과

관입깊이 (mm/rev)	순굴진속도 (m/hr)	일 굴진율 (m/day)	월 굴진율 (m/month)
7	1.26	9.1	227
6	1.08	7.8	194
5	0.90	6.5	162
4	0.72	5.2	130
3	0.54	3.9	97

라. TEST-BED #1 쉴드TBM의 커터헤드 제작

(1) 커터헤드 소재 선정

우리나라에서는 다양한 지층조건이 터널 구간에 출현하는 복합지층인 경우가 많고, 또한 국내 TBM 발주방식의 특성상 재활용의 범위가 타국가보다 빈번함에 따라 내마모나 강성을 고려한 커터헤드의 설계가 필요할 것으로 판단되었으며, 각 국가마다 생산되는 철강의 재질이나 규격이 상이하기 때문에 향후 자재수급이나 원가측면도 고려할 필요가 있었다.

하지만 TBM의 제작이 가능한 제작사는 전세계적으로 일부 제작사에 한정되어 있다. 대표적인 제작사로는 독일의 Herrenknecht社, 일본의 Mitsubishi社, Kawasaki社, Hitachi社 미국의 Robbins社등을 들 수 있다. 본 연구과제의 궁극적인 목표인 TBM커터헤드를 제작하기에 앞서서 다양한 지층을 통과하며 국내 실정에 적합한 커터헤드 제작을 위하여 각 제조사들의 커터헤드 재질을 분석하여 참고하고자 하였다.

이에 본 연구에서는 커터헤드 소재 선정과 관련하여 본 연구단의 연구기관인 동아지질에서 보유하고 있는 해외 제작사 쉴드TBM 2대(N社, K社)를 소재분석 대상으로 선정하고 시험편을 직접 절취하여 소재 분석 시험을 실시하였으며, 커터헤드 국내 제작에 대비하여 활용가능성이 높을 것으로 판단되는 국내생산 소재 4종류(SS400, SM490A, SCM440, POSTEN80)의 소재를 임의로 선정 인장시험, 경도시험, 화학성분분석시험 등을 통하여 비교 분석을 실시하였다.

외국 제작사의 사용재료를 파악한 결과, 각 제작사별로 독자적인 특수한 재질을 사용하기 보다는 각국에서 생산되는 수급이 용이한 재질을 사용하고 있는 것으로 파악되었다. 하지만 각국에서 생산되는 재질의 성분이 다르기 때문에 시험편 분석을 하였으며, 시험결과를 토대로 국내 생산되는 재질에서 가장 적용성이 뛰어난 소재를 선정하고자 하였다. 표 3.1.12 및 표 3.1.13은 본 연구에서 수행된 시험결과를 나타낸다. 시험 결과에서도 보이듯이 해외 제작사의 재질과 유사한 특징을 나타내는 국내 생산 소재는 SS400과 SM490YB인 것으로 나타났다.

그러나 커터헤드의 제작은 대부분 용접작업으로 진행됨에 따라 열변형에 대한 관리가 매우 중요하다. 따라서 본 연구단에서는 용접특성에 대한 추가 시험을 실시하였으며, 추가 시험은 위탁연구기관인 한국산업기술대학교에 의뢰하여 실시하였다.

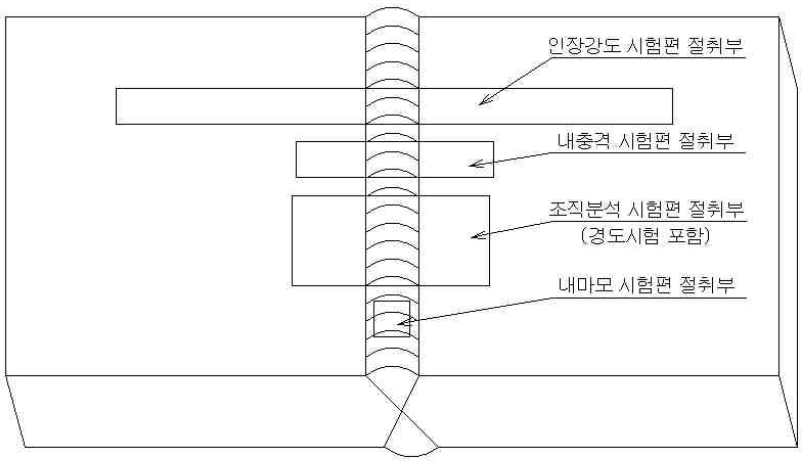
[표 3.1.12] 주요소재에 대한 인장, 경도 및 마모 시험 결과

시험편	인장강도 (N/㎟)	연신율 (%)	브리넬경도
N社 장비	447.5	34.5	128HBW10/3000
K社 장비 내부	429	37	120HBW10/3000
K社 장비 외주부	443	35.5	124HBW10/3000
SS400	550	15.5	159HBW10/3000
SCM440	940.5	16	282HBW10/3000
POSTEN 80	787.5	26.5	244HBW10/3000
SM490YB	569.5	33.5	163HBW10/3000

[표 3.1.13] 성분분석 시험 결과

시험편	화 학 성 분(wt. %)					
	C	Si	Mn	P	S	Others
N社 장비	0.191	0.001	0.709	0.019	0.228	
K社 장비 내부	0.161	0.004	0.969	0.018	0.142	
K社 장비 외주부	0.175	0.004	0.894	0.020	0.146	
SS400	0.231	0.006	0.443	0.017	0.275	
SCM440	0.403	0.001	0.685	0.010	0.242	Cr 1.053 Mo 0.182
POSTEN 80	0.104	0.001	0.731	0.006	0.259	Cr 0.490 Cu 0.224 Ni 0.983 Mo 0.441 V 0.40 B 0.002
SM490YB	0.158	0.001	1.542	0.008	0.407	

그림 3.1.14는 용접특성평가 시험을 위한 시험편을 제작하는 방법을 도식화한 그림이다. 그림 3.1.14와 같이 동일한 소재의 2개의 판을 맞대기 용접을 견고하게 실시한 후, 용접부위를 기준으로 각각의 시험편을 절취한다. 그림 3.1.15는 이상의 방법으로 완성된 시험편의 사진이다.



[그림 3.1.14] 용접특성평가 시험편의 제작 방법



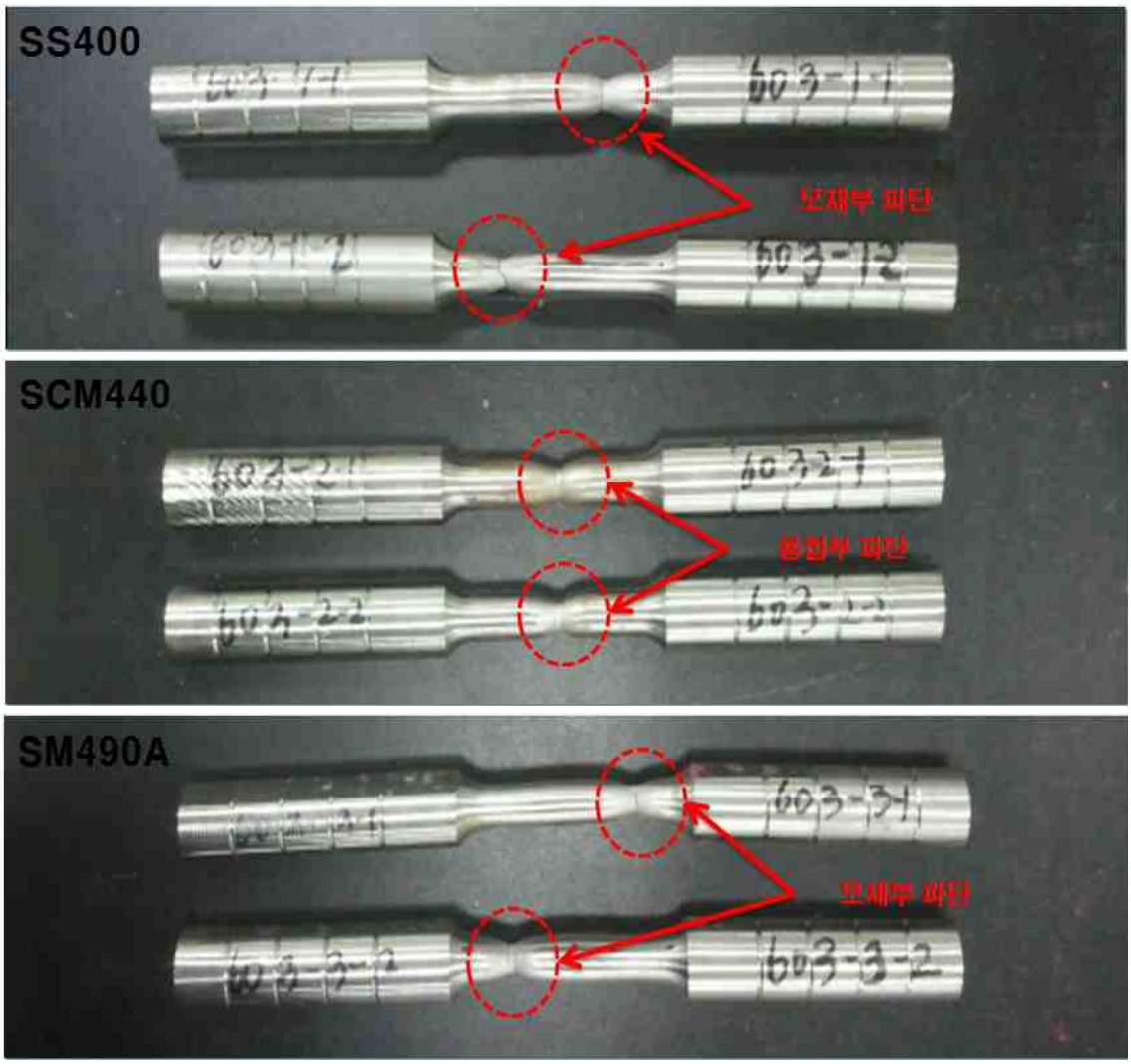
[그림 3.1.15] 완성된 용접특성평가 시험편

시험 소재는 SS400과 SM490A과 더불어 경도 및 인장강도가 앞의 두 가지 소재 보다 높은 SCM440를 포함한 총 3가지 소재에 대하여 시험을 실시하였다. 단, 예비로 SM490YB소재에 대하여 분석하였으나, 40T이상의 SM490YB 소재의 경우 시중에서 확보가 어렵고, 주문생산 방식으로 소재를 구하여야 함에 따라 국내 개발 시에 소재 확보에 대한 납기 문제와 원가측면에서 매우 불리한 측면이 있어 물성치와 화학성분 함량이 동일하고 용접성이 높으며 시중에서 확보하기 쉬운 SM490A소재로 변경하여 실제 효율성을 기하고자 하였다.

인장시험 결과, 그림 3.1.16과 같이 SS400과 SM490A에서는 모재에서 파단이 발생한 반면, SCM440에서는 용접부에서 파단이 일어났다. 이는 SCM440이 다른 두 소재와 비교하여 용접부 부위가 원재료 대비 취약한 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다 (표 3.1.14).

내충격시험 결과, 시험에 사용된 3가지 소재 모두에 대해 용접부에서의 파단은 발생하지 않았으며 평균 J값도 비슷하게 나타났다. 이와 같이 내충격시험에서는 3가지 소재에 따른 차이점은 없었다 (그림 3.1.17 및 표 3.1.15).

표 3.1.16과 그림 3.1.18의 내마모시험 결과, 3가지 소재 모두 손실 중량이 0.001g에 불과하며, 역시 3가지 소재 간의 차이는 없었다.



[그림 3.1.16] 인장시험 후의 시험편

[표 3.1.14] 인장시험 결과

시험편	항복점 (N/㎟)	인장강도 (N/㎟)	연신율 (%)	파단위치
SS400	392	555	26	모재부
	383	556	26	모재부
SCM440	501	636	15	용접부
	508	637	15	용접부
SM490A	374	557	25	모재부
	343	557	25	모재부



[그림 3.1.17] 내충격시험 후의 시험편

[표 3.1.15] 내충격시험 결과

시험편	각도	에너지(J)				평균(J)
		1차	2차	3차	4차	
SS400	143°	214.8	197.1	200.1	208.9	205.2
SCM440	143°	200.1	200.1	208.9	185.3	198.6
SM490A	143°	185.3	191.2	188.3	232.4	199.3



[그림 3.1.18] 내마모시험 후의 시험편

[표 3.1.16] 내마모시험 결과

시험편	마찰력 계수	실험 전 중량	실험 후 중량	손실 중량
SS400	0.449	51.761g	51.760g	0.001g
SCM440	0.414	49.993g	49.992g	0.001g
SM490A	0.403	57.679g	57.678g	0.001g

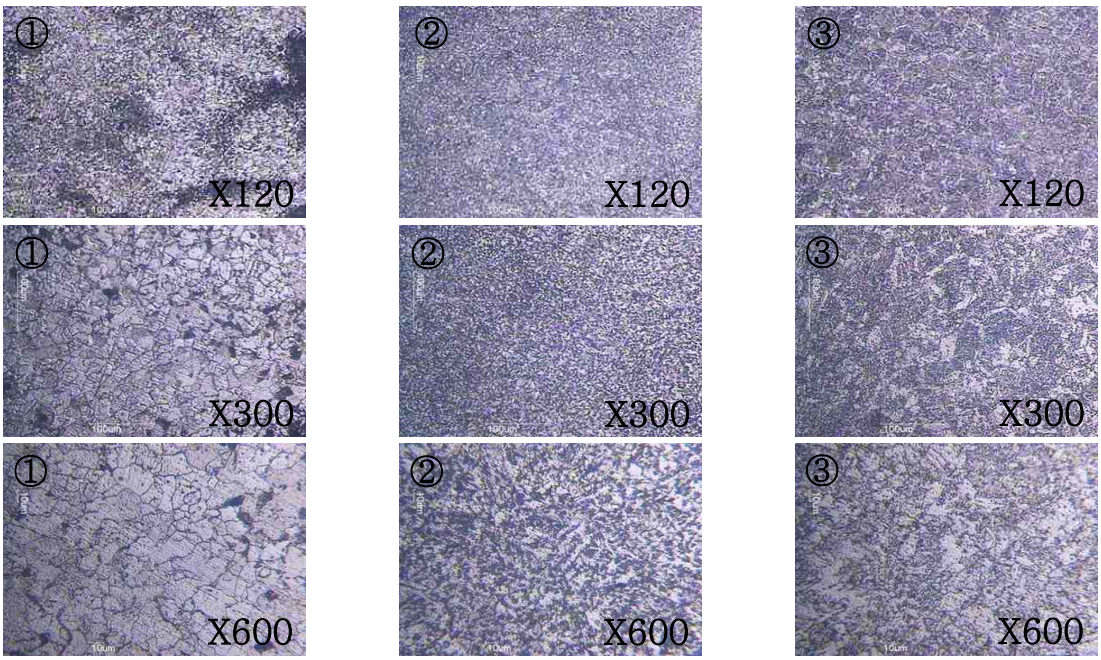
또한 광학현미경에 의해 상기 3가지 소재에 대해 조직분석을 실시하였다. 이때, 현미경으로 조직을 관찰하기 전 에칭을 실시하여야 한다. 에칭을 하는 이유는 시험편을 에칭을 하지 않으

면 금속이 빛을 반사하기 때문에 조직을 현미경으로 관찰하는 것이 불가능하기 때문이다. 본 시험에서는 질산(HNO_3) 1% 와 증류수에 5초간 에칭을 실시 하였다. 에칭을 실시한 결과 3가지 시험편에서 모두 용접부위가 나타났으며, 그 중 SCM440에서 확연하게 나타났다 (그림 3.1.19).

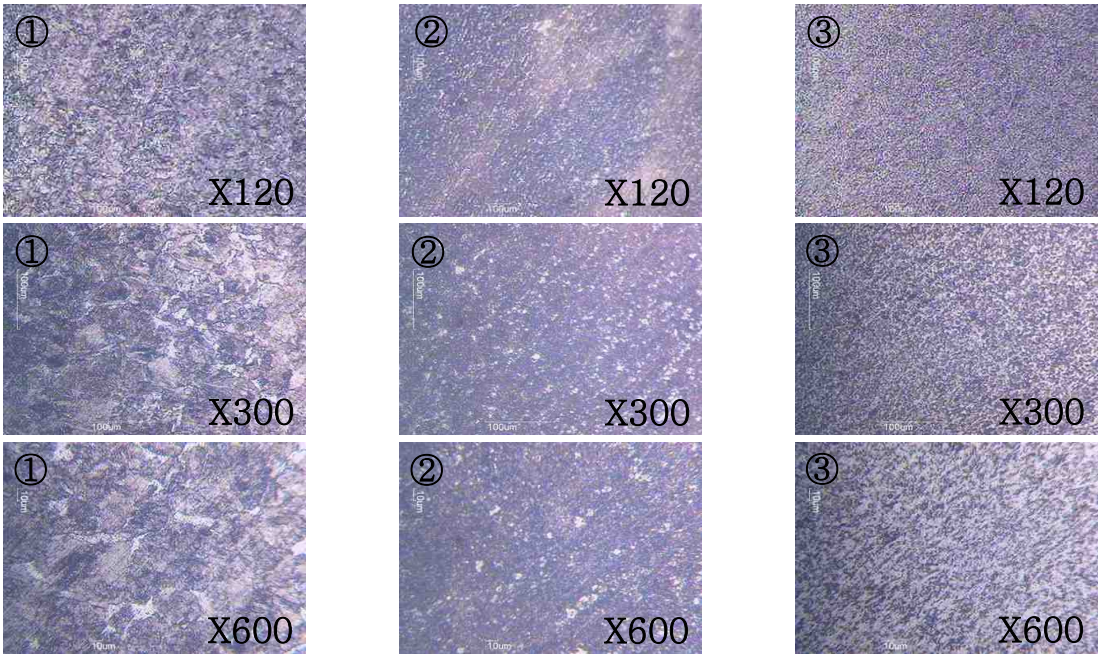


[그림 3.1.19] 조직분석 시편준비(에칭후 시편 외관 관찰)

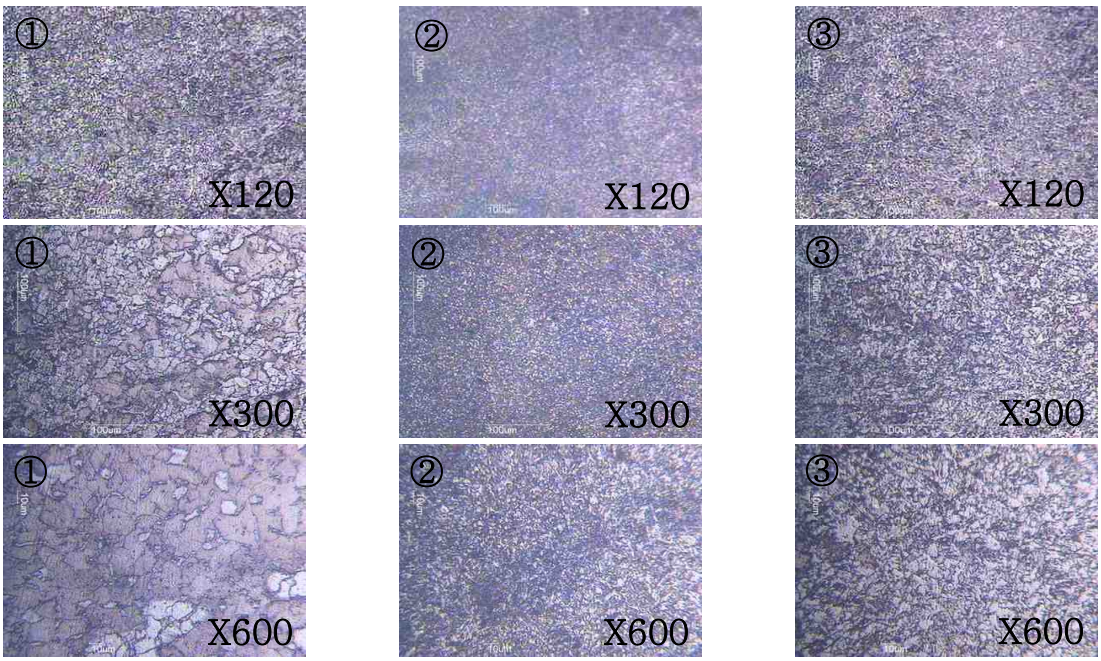
광학현미경으로 조직을 확대 관찰한 결과, SS400의 용접부위에서 육안상으로도 식별이 가능한 경계면조직이 발견되었다 (그림 3.1.20). 이는 용접부위의 유착상태가 좋지 않다는 것을 나타내고 있다. 또한 SCM440의 조직사진에서는 용접부위의 조직이 불균질한 것을 볼 수 있었다 (그림 3.1.21 및 3.1.22).



[그림 3.1.20] SS400 조직분석 결과



[그림 3.1.21] SCM440 조직분석 결과

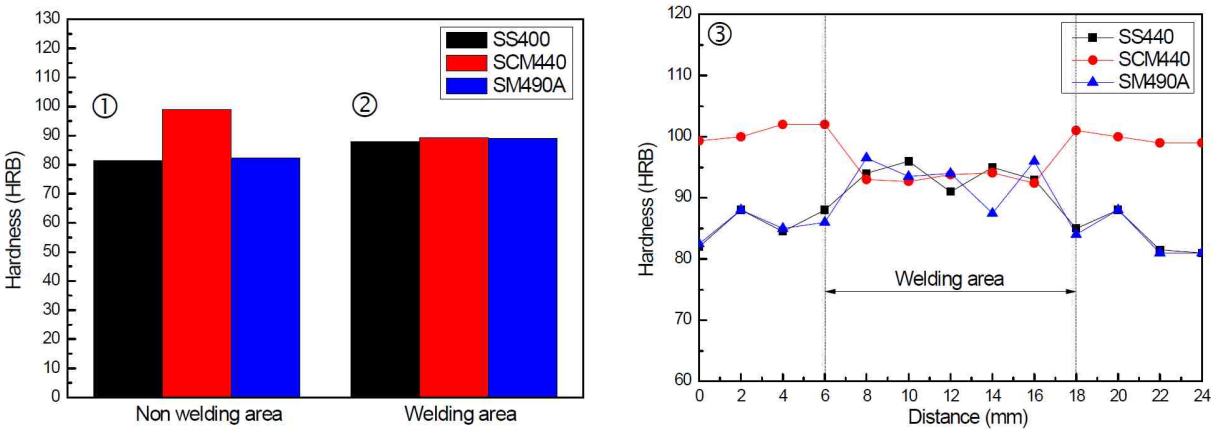


[그림 3.1.22] SM490A 조직분석 결과

경도시험은 2 mm 간격으로 모재→용접부→모재를 지나가는 경로로 측정을 하였다. 경도시험 결과, 용접부위에서는 거의 동일한 경도값을 나타내었으며, 모재의 경도는 SCM440 소재가 높은 것을 알 수 있었다 (그림 3.1.23).

이상의 시험결과들을 종합적으로 판단하면 SS400과 SM490A 소재는 매우 유사한 시험값을 나타내었다. 다만, 조직분석에서 SS400 소재의 경계면조직이 발견되어 용접작업에는 SM490A 소재가 유리하다는 것을 알 수 있었다. SCM440 소재는 다른 소재와 비교할 때 인장강도와 경

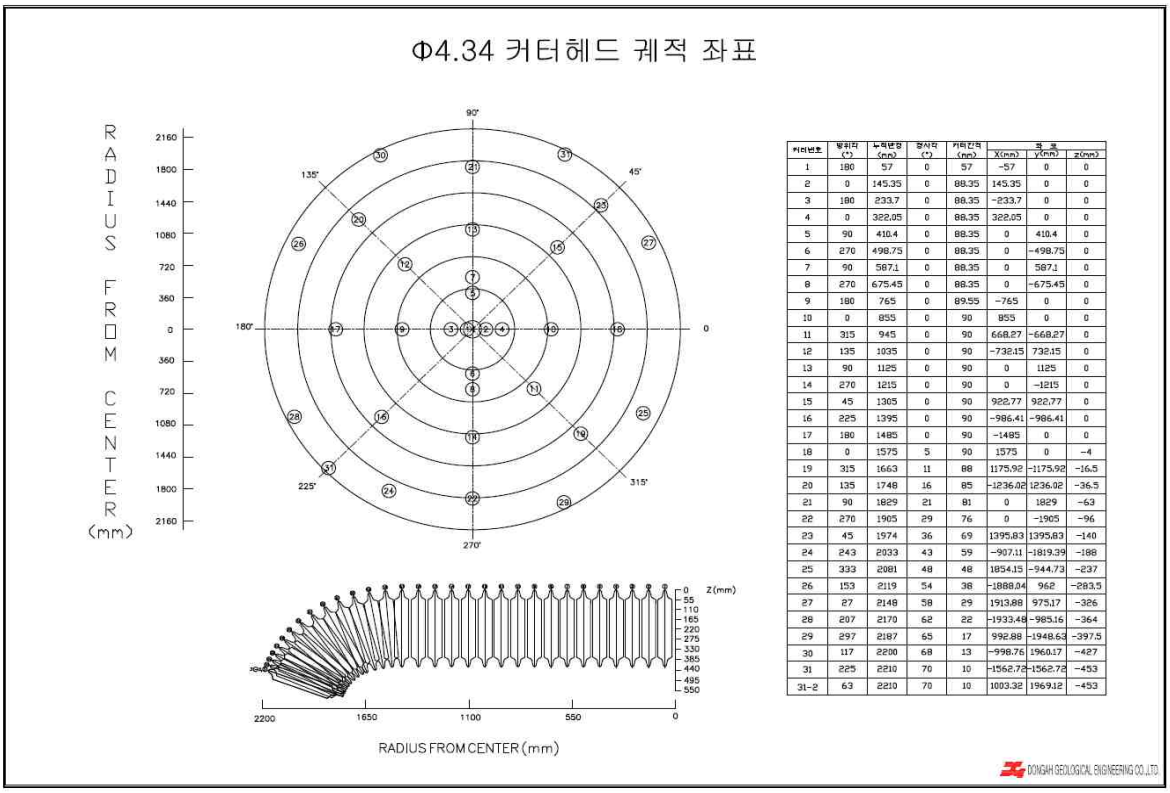
도는 높은 값을 보이나, 용접부위가 원재료 대비 취약한 특성을 나타내어 커터헤드를 만드는 소재로는 부적합하다고 판단되었다. 따라서 본 연구단에서는 커터헤드 소재로 SM490A 소재를 선정하여 커터헤드 제작에 활용하였다.



[그림 3.1.23] 로크웰경도시험 결과

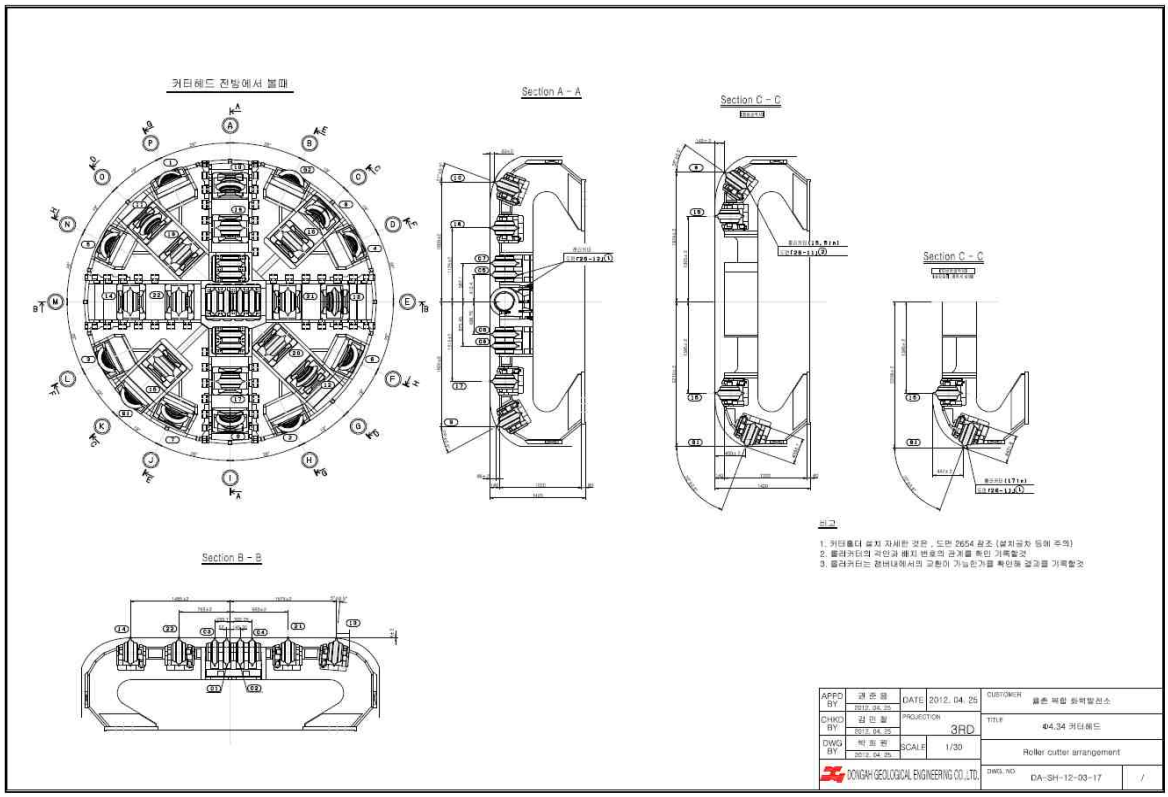
(2) 커터헤드 제작도면 작성 및 구조해석

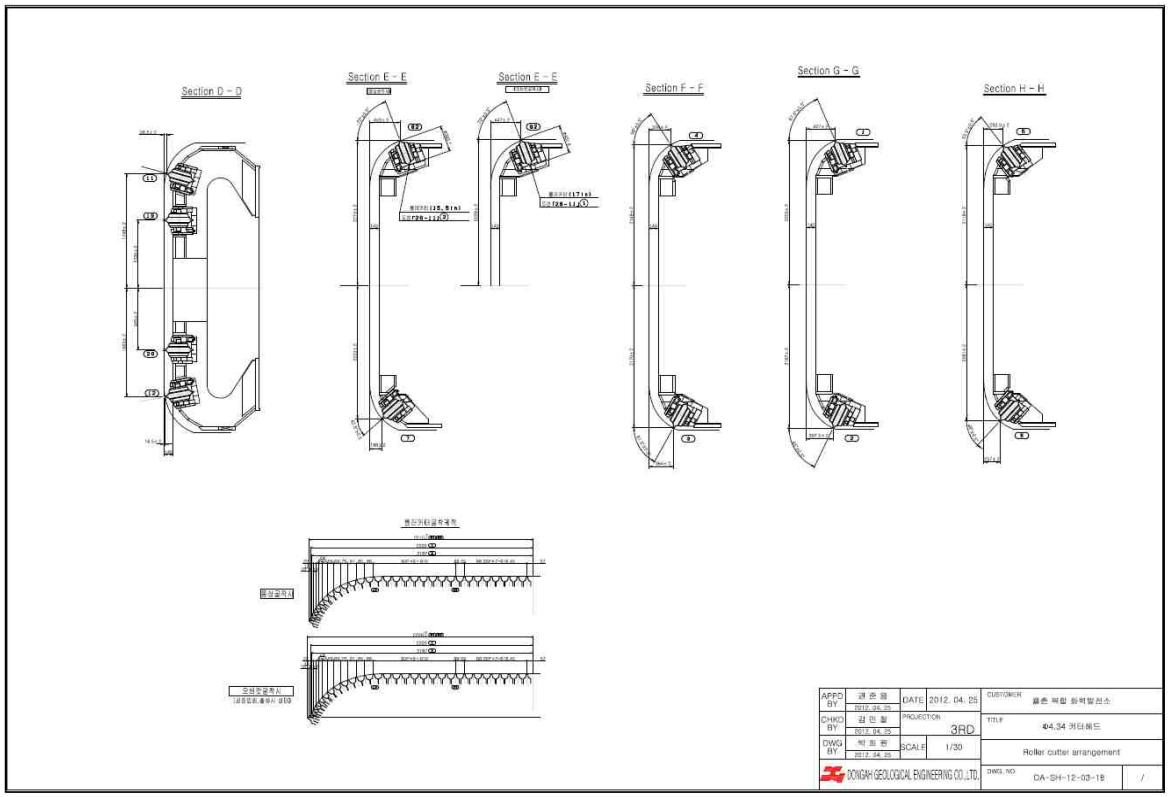
"다"절에서 작성된 커터헤드 설계도면은 설정된 스포크들을 따라서 기하학적으로 커터들이 자동으로 배열된 결과로서, 디스크커터 구조상의 간섭, 개구율, 커터비트, 디스크커터 하우징의 간섭, 제작상의 기계적인 요소 등 여러 요소들로 인하여 수작업으로 수정할 필요가 있다. 이는 개구율과 버킷을 위치를 고려한 커터배열의 자동 조정 알고리즘을 단순한 수학적 기반으로 계산할 수 없기 때문이다. 앞서 설명한 커터의 개수와 커터 간격에는 차이가 없이, 각 스포크 라인 사이의 영역에 게이지커터를 인위적으로 1개씩 배치하여 수정한 제작도면은 그림 3.1.24~3.1.28과 같다. 이때 1절에서 설명한 바와 같이 커터비트들은 각 스포크의 양 측면을 따라서 균등하게 배치하였다.



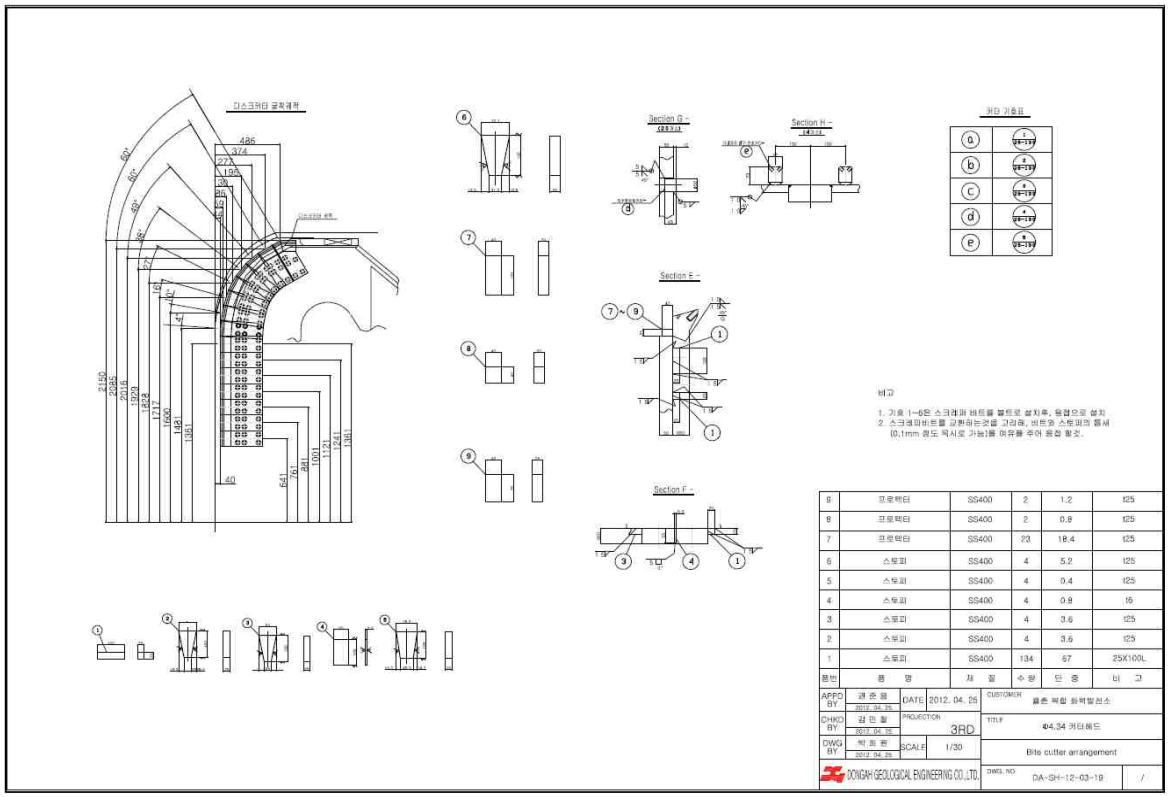
커터번호	방위각 (°)	노력반경 (mm)	경사각 (°)	커터간격 (mm)	좌표 X(mm)	좌표 Y(mm)	좌표 Z(mm)
1	180	57	0	57	-57	0	0
2	0	145.35	0	88.35	145.35	0	0
3	180	233.7	0	88.35	-233.7	0	0
4	0	322.05	0	88.35	322.05	0	0
5	90	410.4	0	88.35	0	410.4	0
6	270	498.75	0	88.35	0	-498.75	0
7	90	587.1	0	88.35	0	587.1	0
8	270	675.45	0	88.35	0	-675.45	0
9	180	765	0	89.55	-765	0	0
10	0	855	0	90	855	0	0
11	315	945	0	90	668.27	-668.27	0
12	135	1035	0	90	-732.15	732.15	0
13	90	1125	0	90	0	1125	0
14	270	1215	0	90	0	-1215	0
15	45	1305	0	90	922.77	922.77	0
16	225	1395	0	90	-986.41	-986.41	0
17	180	1485	0	90	-1485	0	0
18	0	1575	5	90	1575	0	-4
19	315	1663	11	88	1175.92	-1175.92	-16.5
20	135	1748	16	85	-1236.02	1236.02	-36.5
21	90	1829	21	81	0	1829	-63
22	270	1905	29	76	0	-1905	-96
23	45	1974	36	69	1395.83	1395.83	-140
24	243	2033	43	59	-907.11	-1819.39	-188
25	333	2081	48	48	1854.15	-944.73	-237
26	153	2119	54	38	-1888.04	962	-283.5
27	27	2148	58	29	1913.88	975.17	-326
28	207	2170	62	22	-1933.48	-985.16	-364
29	297	2187	65	17	992.88	-1948.63	-397.5
30	117	2200	68	13	-998.76	1960.17	-427
31	225	2210	70	10	-1562.72	-1562.72	-453
31-2	63	2210	70	10	1003.32	1969.12	-453

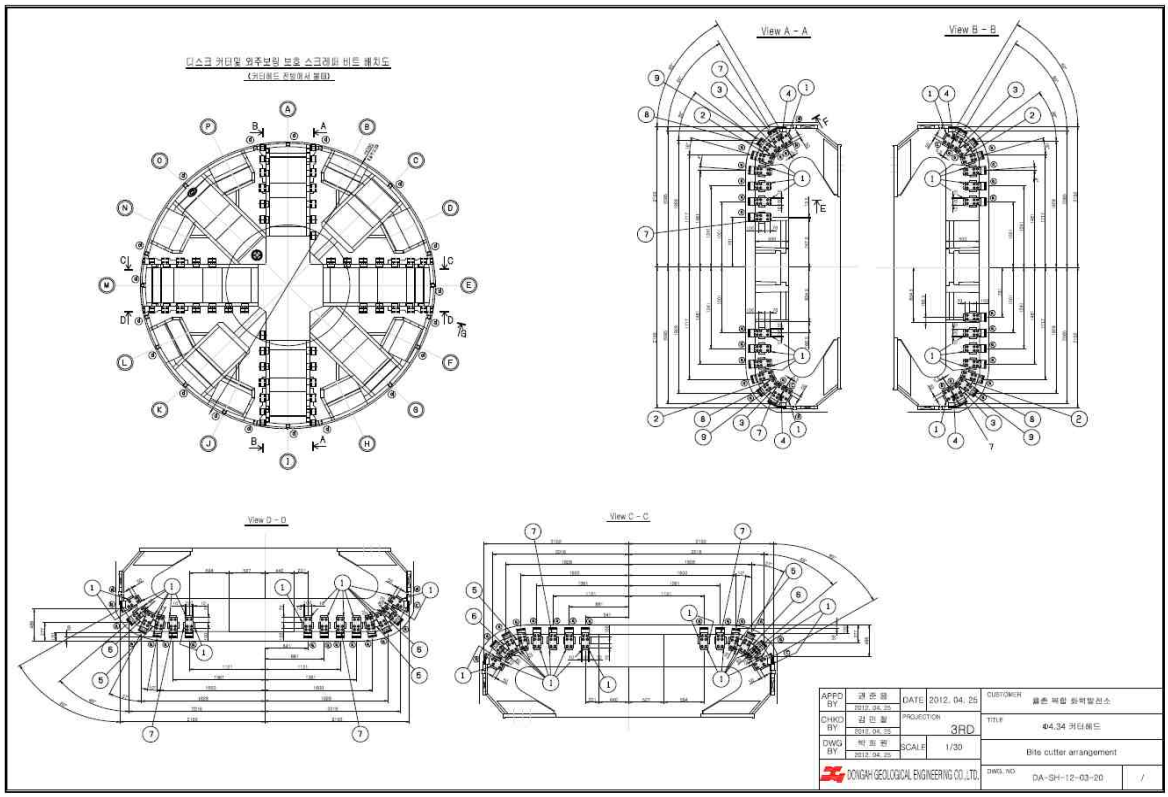
[그림 3.1.24] 설계결과에 근거한 커터헤드 궤적 좌표



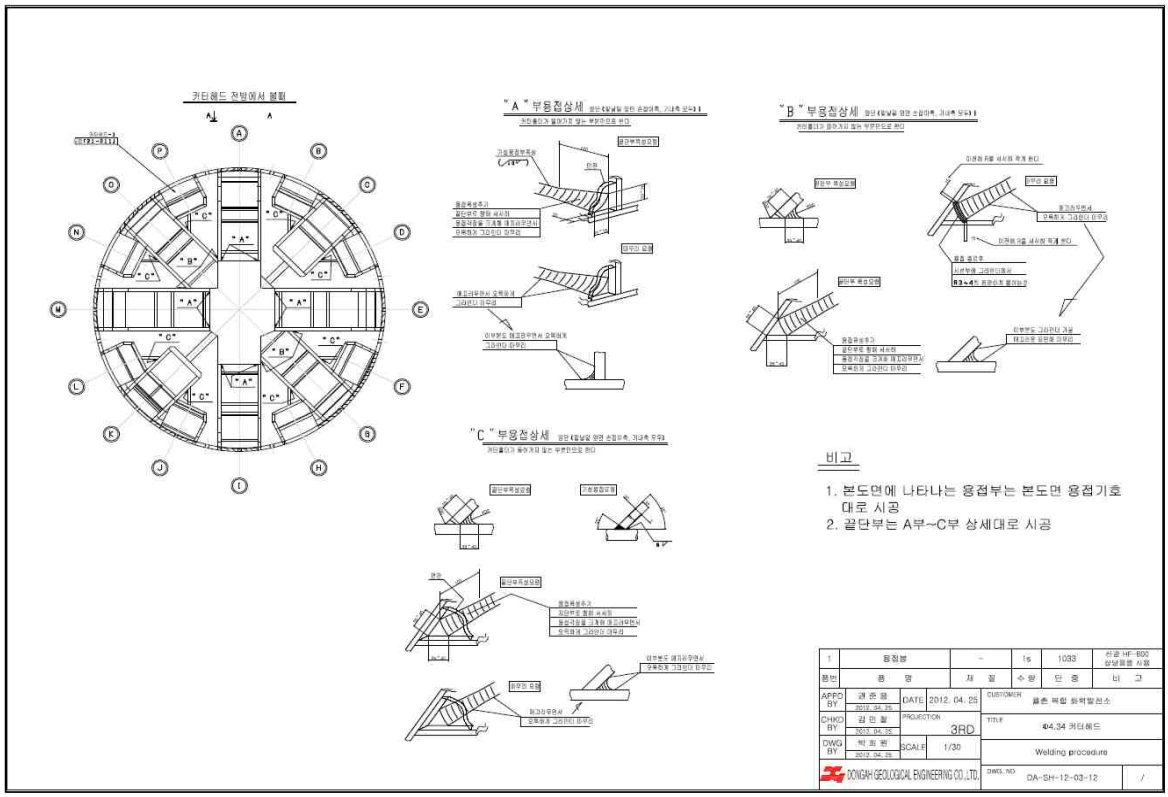


[그림 3.1.25] 디스크커터 배치도

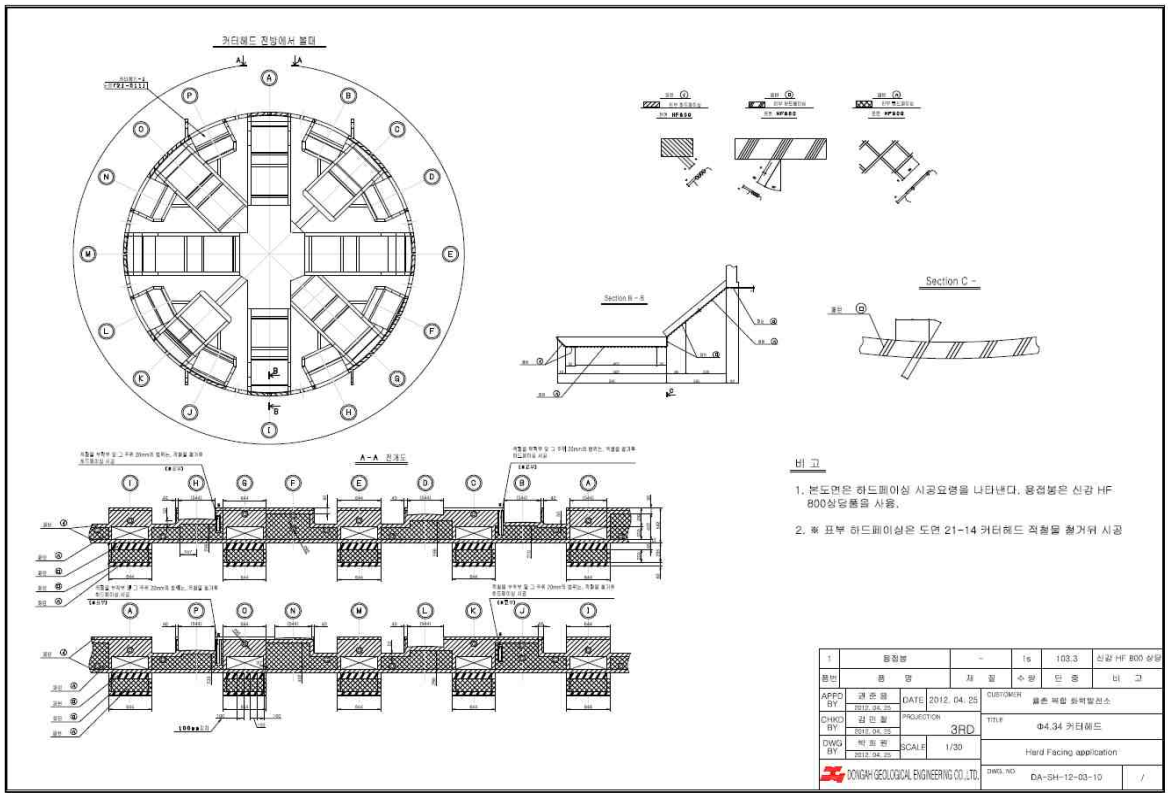




[그림 3.1.26] 커터비트 배치도



[그림 3.1.27] 커터헤드 용접 순서



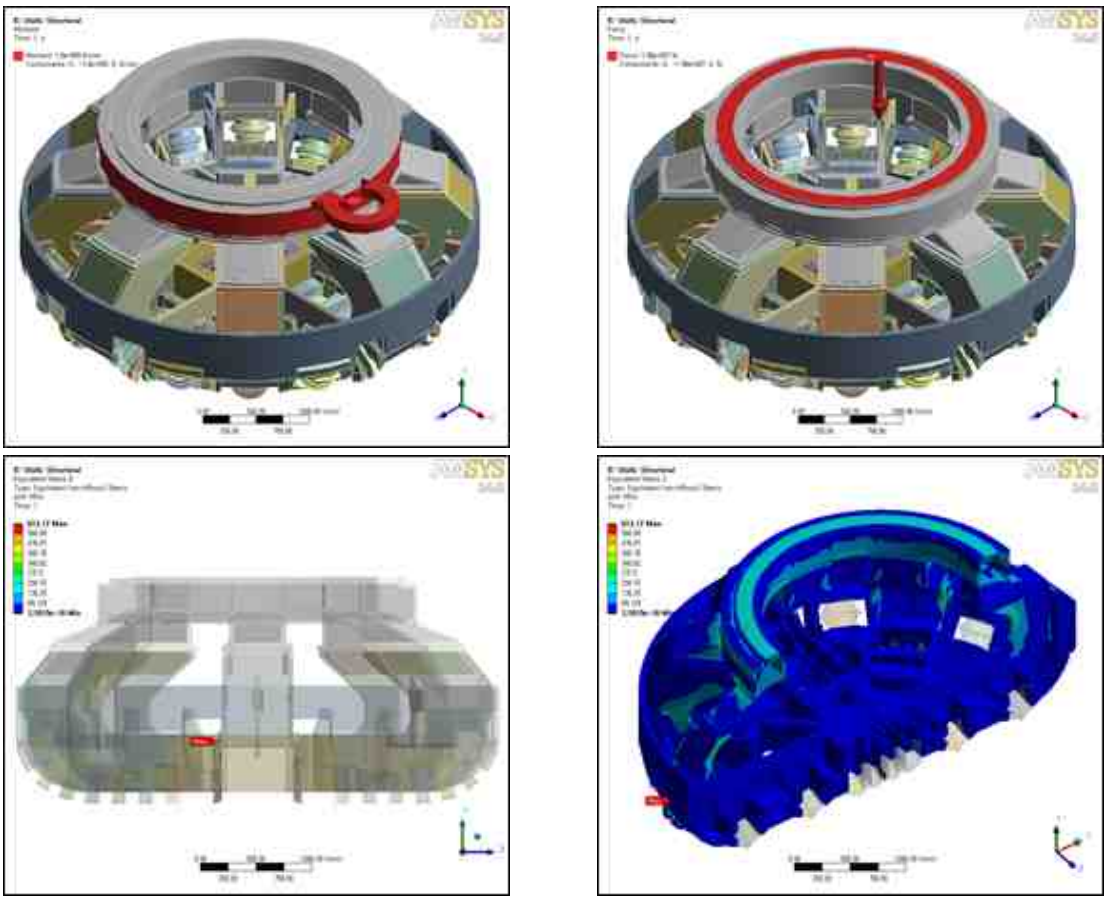
[그림 3.1.28] 하드페이싱 적용 방법

앞서 선정된 소재와 완성된 커터헤드 제작도를 바탕으로 3D 모델링 및 시뮬레이션을 통한 구조검토를 실시하였다.

그림 3.1.29는 커터헤드 제작도를 바탕으로 3D 모델링을 실시한 그림이다. 모델링을 바탕으로 실제 쉴드TBM의 커터헤드에 작용되는 1,600 kN·m의 모멘트와 20,000 kN의 추력 및 SM490A 소재의 물성치를 적용했을 때의 커터헤드 변형량 및 응력 분포 시뮬레이션을 실시하였다. ANSYS에 의한 구조해석 시뮬레이션 결과, 커터헤드에 작용하는 응력은 재료의 항복강도인 379 MPa 이내로 나타나 기계 구조적인 안정성을 확인하였다 (그림 3.1.30).



[그림 3.1.29] 커터헤드 3D 모델링



[그림 3.1.30] 커터헤드 구조해석 시뮬레이션

(3) 커터헤드의 제작

모든 금속재료는 열에 대하여 팽창 및 압축을 하는 성질을 가지고 있다. 앞선 소재선정 시험결과를 바탕으로 선정된 소재 SM490A에 대해서도 용접 시의 변형량에 대한 검증이 필요하였

다. 따라서 커터헤드 제작 시에 사용되는 소재와 동일한 두께의 철판을 실제 커터헤드 제작 시와 동일한 방법으로 용접하여 용접으로 인해 발생하는 변형량을 측정하였다.

그림 3.1.31은 용접 변형량 측정 시험을 실시한 사진이다. 시험 결과, 용접 수축량은 1~2 mm 이내로 측정되었다. 앞선 (2)절의 커터헤드 제작도면 작성 시에도 이러한 용접 수축량을 고려하여 +4 mm 공차로 제작도면을 작성하였다. 따라서 소재의 용접 변형량 측정 결과, 수축량을 감안하여도 제작하는데 문제가 없다는 것을 확인하였다.



[그림 3.1.31] SM490A 소재에 대한 용접 변형량 측정

커터헤드 제작은 크게 10개 파트로 나누어 분할 제작후 조립(용접)하게 되며, 이 후 커터 하우징 등의 액세서리를 조립하는 과정으로 이루어진다. 10개의 파트는 각각 다음과 같이 이루어진다. 첫 번째로 센터커터가 자리하며 커터헤드의 중앙에 위치하는 센터부, 커터헤드의 외경을 결정하며 사이드 스크레퍼가 위치하는 외주부, 궤적에 맞추어 디스크커터가 배치되며 센터부와 외주부를 연결하며, 커터헤드 드럼과 연결되는 호환부가 부착되어 커터헤드의 뼈대가 되는 메인프레임부(4개소), 메인프레임부와 동일하게 궤적에 맞추어 디스크커터가 배치되며 커터헤드 드럼과 연결되는 호환부가 부착되고 메인프레임부와 45°각도로 위치하여 커터헤드의 뼈대를 더욱 견고하게 해주는 보조프레임부(4개소)로 이루어져 있다.

그림 3.1.32는 제작도에 맞추어 절단된 소재 사진이다. 절단된 소재는 앞서 설명한 10개의 파트로 분할 제작이 되는데 그림 3.1.33은 각 파트별로 분할 제작되고 있는 사진이다.




[그림 3.1.32] 도면에 따라 절단된 SM490A 소재










[그림 3.1.33] 커터헤드 파트별 제작 사진

그림 3.1.33과 같이 커터헤드 파트 부분을 제작할 때 용접 수축 팽창에 의한 용접 변형 현상이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구단에서는 커터헤드 파트 제작 및 커터헤드의 정밀성 향상을

위하여 그림 3.1.34와 같은 변형 예방장치를 설치하여 제작을 실시하였다.



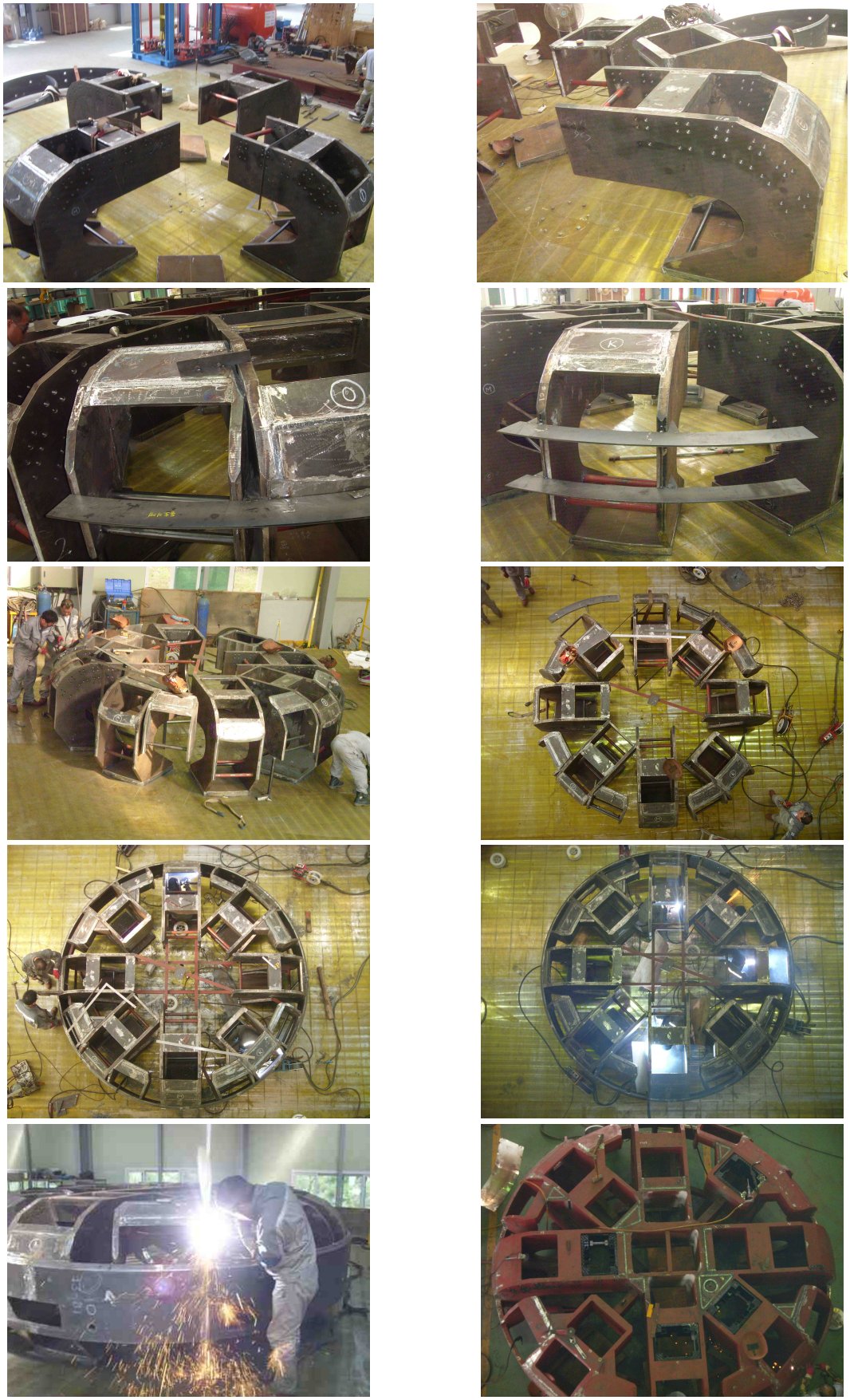
[그림 3.1.34] 용접으로 인한 변형 방지 장치

완성된 각 파트는 본 연구단에서 구축한 커터헤드 제작용 부속설비에서 조립작업을 실시하였다. 이 때 부속설비 위에 각 파트의 배치도를 스케치하였다. 이는 제작 시의 변형 및 뒤틀림을 최대한 방지하기위한 부가적인 장치로서, 커터헤드 조립 과정에서 변형이 생길 경우 즉각적으로 변형을 확인할 수 있는 기준이 된다 (그림 3.1.35).



[그림 3.1.35] 각 파트 배치도 스케치 사진

배치도의 작성이 완료되면 만들어진 각각의 파트들을 배치도 위에 위치시키고 전체 조립을 하게 된다. 그림 3.1.36은 전체 조립 사진이다.



[그림 3.1.36] 커터헤드 파트 조립 사진

커터헤드는 쉴드TBM의 본체와 달리 굴진시 계속해서 회전을 하게 된다. 따라서 외주부의 진원도는 커터헤드 제작에서 중요한 부분이다. 본 연구단에서는 커터헤드 각 파트의 용접 작업

완료 후 커터헤드 외주부에 대한 전체 가공을 실시하였다 (그림 3.1.37).



[그림 3.1.37] 외주부 가공 및 공차 확인

그 다음으로 커터헤드 호환부에 대한 검토를 실시하였다. 커터헤드 호환부는 커터헤드 본체와 결합되는 부분으로서 커터헤드 드럼을 탈착하여 실제 조립을 하였다. 그림 3.1.38은 커터헤드 호환부의 확인 작업을 실시한 사진이다.



[그림 3.1.38] 커터헤드 호환부 확인

커터헤드의 제작 특성상 용접 작업이 연속으로 이루어지므로 용접부위에 대한 검증이 필요하다. 커터헤드 센터부 및 각각의 파트가 조립된 후 용접부위에 대한 비파괴 검사를 실시하였다. 비파괴 검사는 자분탐상검사와 초음파탐상검사 두 가지 방법으로 검증하였다 (그림 3.1.39 및 그림 3.1.40).

이상과 같은 외주부 공차 확인, 호환부 검토 및 비파괴 검사를 모두 통과한 후에 최종적으로 커터헤드에 부착 되는 각종 액세서리를 조립하였다 (그림 3.1.41).





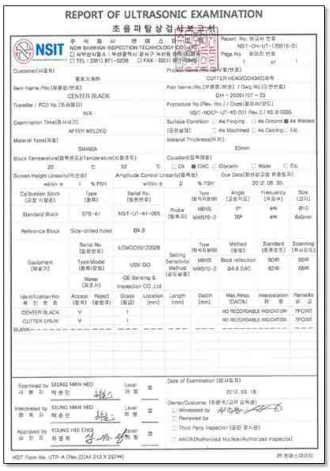





REPORT OF MAGNETIC PARTICLE EXAMINATION

자분탐상검사보고서

[그림 3.1.39] 자분탐상검사

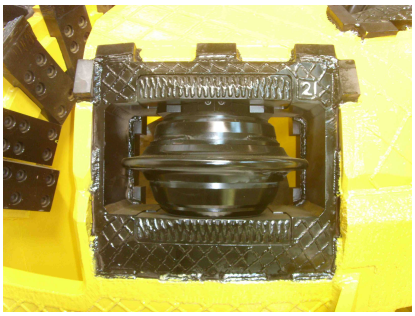

REPORT OF ULTRASONIC EXAMINATION

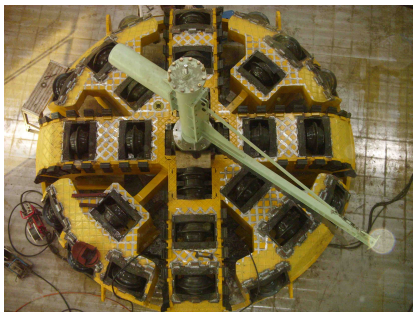
초음파탐상검사보고서

[그림 3.1.40] 초음파탐상검사









[그림 3.1.41] 커터헤드 액세서리 조립

그림 3.1.42는 상기의 순서에 따라 완성된 커터헤드 사진이다. 또한 그림 3.1.43은 최종 완성된 커터헤드의 궤적을 커터헤드 제작용 부속설비를 이용하여 측정하고 있는 사진이다.

그림 3.1.44는 2012년 11월 1일에 동아지질 이천공장에서 개최된 국산 커터헤드 장착 Φ4.4 m 쉴드TBM 성과발표회 장면이다. 성과발표회에는 국토해양부, 국토교통과학기술진흥원, 기자단 등 100여명의 내외부 인사가 참가하였다.



[그림 3.1.42] 제작 완료된 커터헤드



[그림 3.1.43] 커터헤드 궤적의 검측 장면



(a) 성과발표회 전경



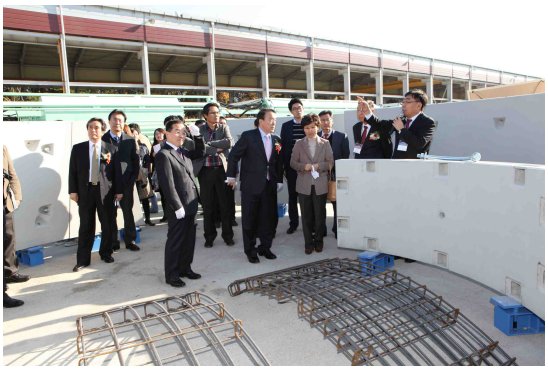
(b) 쉴드TBM 공개행사



(c) 쉴드TBM 공개행사



(d) 쉴드TBM 공개행사



(e) 고성능 세그먼트 시작품 소개



(f) 고성능 디스크커터 시작품 소개



(g) TBM 전방 조사시스템 소개



(h) 시추공 영상화 장비 소개

[그림 3.1.44] 국산 커터헤드 장착 Φ4.4 m 쉴드TBM 성과발표회

(2013.11.1, 동아지질 이천공장)

마. TEST-BED #1 쉴드TBM의 현장적용 및 굴진성능 평가

(1) TEST-BED #1 쉴드TBM의 현장투입

TEST-BED #1 현장에 실제 투입된 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM은 2012년 11월 1일 연구단 성과발표회 행사에서 공개된 이후, 2012년 11월 28일에 현장으로 운반 및 도착되었다.

현장 도착 후, 발진 수직구에서 쉴드TBM의 현장 조립을 2012년 12월 중에 실시 및 완료하였다 (그림 3.1.44~그림 3.1.51).



[그림 3.1.44] 쉴드TBM의 현장반입



[그림 3.1.45] 전통부 전도



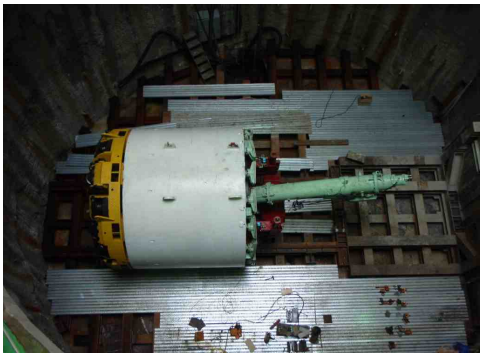


[그림 3.1.46] 전통부의 추진대 거치





[그림 3.1.47] 커터헤드의 거치



[그림 3.1.48] 스크루컨베이어/이렉터 조립



[그림 3.1.49] 후통부 조립





[그림 3.1.50] 커터헤드와 커터헤드 드럼 연결부의 용접



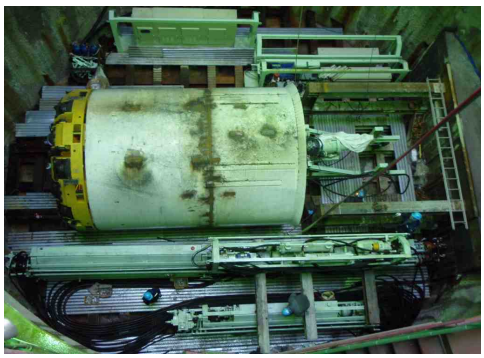


[그림 3.1.51] 전통부와 후통부의 연결 용접

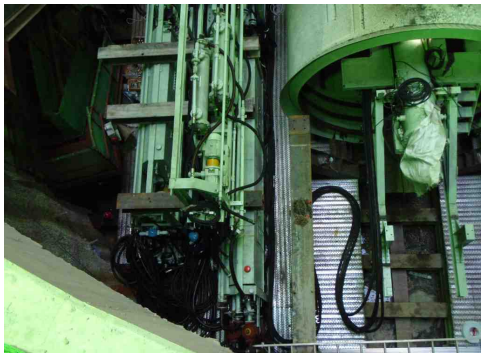
쉴드TBM의 조립 작업과 동시에 초기굴진 준비 작업이 이루어졌다. 초기굴진을 위한 준비 작업은 그림 3.1.52~그림 3.1.58과 같다.



[그림 3.1.52] 세그먼트 호이스트 레일 설치



[그림 3.1.53] 후방대차 배치

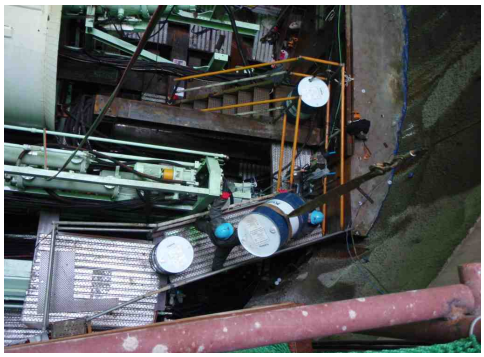




[그림 3.1.54] 유압 및 전기 라인 연결



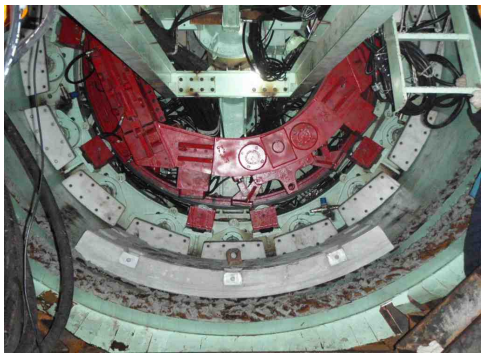
[그림 3.1.55] 초기굴진용 롤링 스토퍼



[그림 3.1.56] 유압유 주입



[그림 3.1.57] 테일씰 주입



[그림 3.1.58] 가설세그먼트 조립

이상과 같은 순서로 초기굴진을 위한 준비작업을 완료하였으며, 본 Test-Bed #1 현장에서는 2012년 12월 26일에 초기굴진 준비를 완료하여 12월 27일부터 초기 굴진을 실시하였다. 쉴드 TBM의 시험구동을 위한 2013년 1월 20일까지의 초기굴진 동안 일평균 3 ring(= 2.7m = 0.9 m/ring X3 ring)을 굴진하였으며, 60 ring 지점에서 초기굴진을 종료하고 본 굴진을 준비 하였다.

초기굴진을 성공적으로 완료하고 제반 시공결과들을 분석한 후, 2013년 2월 4일부터 본 굴진을 실시하여 2013년 11월 11일에 굴진이 완료되어 터널이 관통되었고 2013년 12월 25일에 통수를 개시하였다 (그림 3.1.59).



(a) 쉴드TBM 굴진장면



(b) 세그먼트 라이닝 설치 후



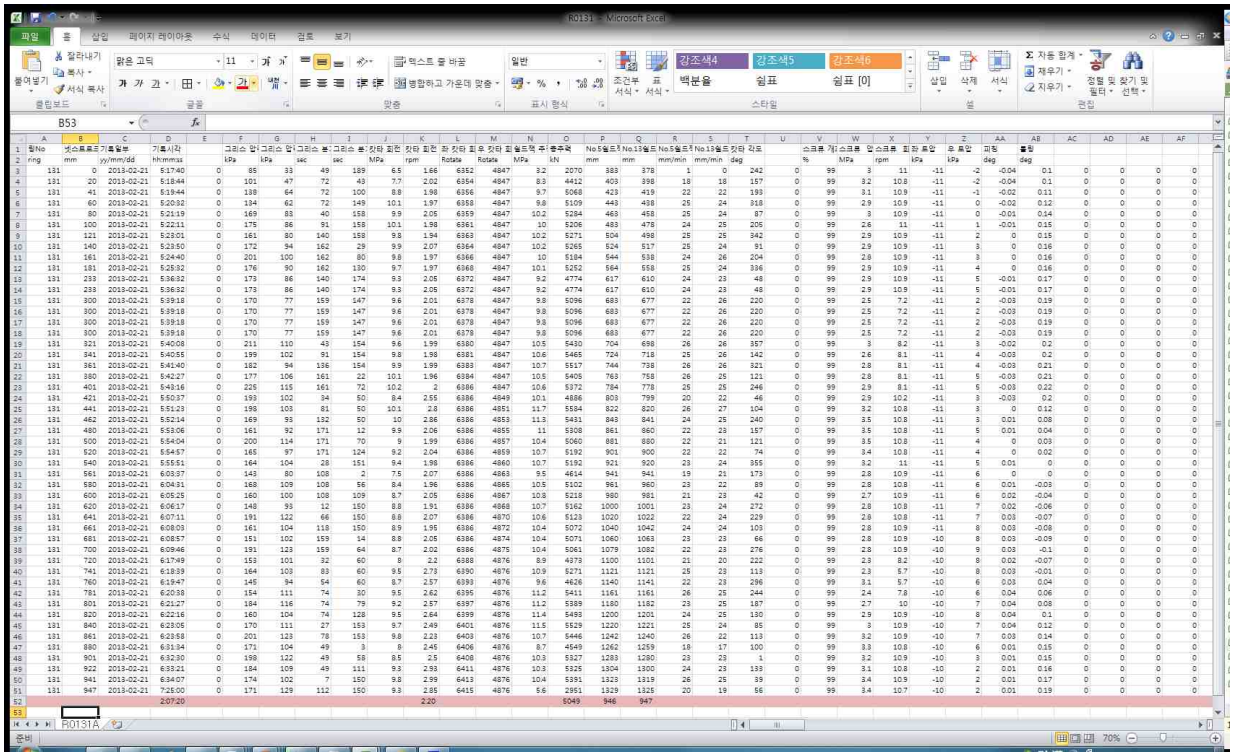


[그림 3.1.59] 쉴드TBM의

본 연구단에서 설계·제작한 국산 커터헤드 장착
림 3.1.60과 같이 매 굴착작업별로 자동저장되는 쉴
저장되는 쉴드TBM의 굴진자료에는 링 번호, 쉴드
TBM 토크, 커터 회전압력, 커터헤드 회전속도(RPM
등이 포함된다. 본 연구에서는 커터헤드와 직접적인
속도), 쉴드TBM의 추력, 토크 및 회전속도를 주
절에서 검토한 경암에서의 최대 커터 관입깊이와
으로 비교하기 위하여, 장수호 등(2011)이 제안한
들에 의해 커터 관입깊이와 커터 작용력으로 변환

$$F_r = \frac{T_q}{0.3 \cdot D \cdot N} \tag{3.1.3}$$

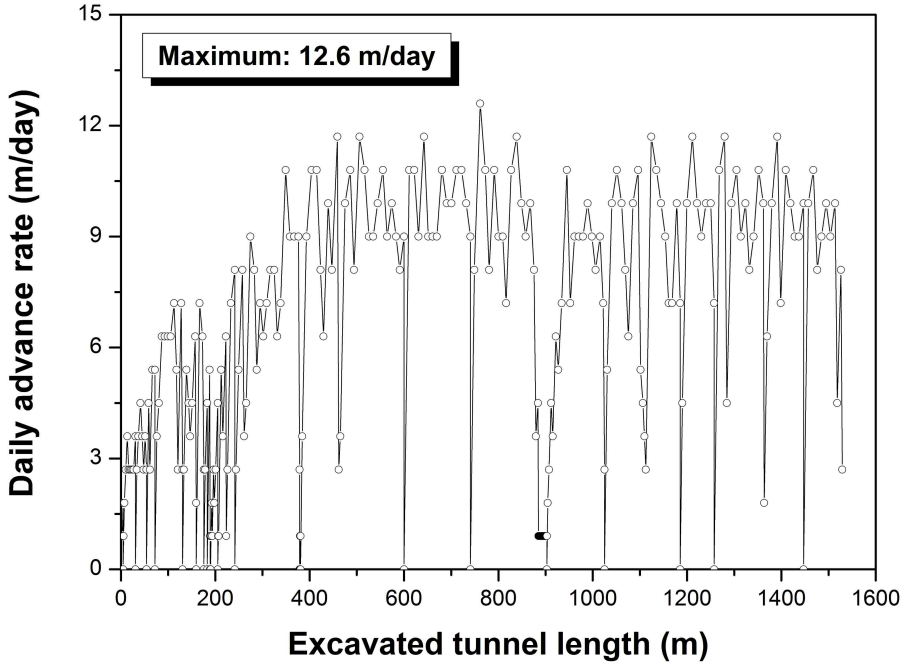
여기서 P는 커터헤드 1회전당 커터 관입깊이(mm/rev), PR은 TBM의 순굴착속도(m/hr), RPM은 커터헤드의 1분당 회전속도(rev/min), T_h와 T_q는 각각 TBM의 추력(kN)과 토크(kNm), F_n과 F_r은 커터 연직 및 회전 작용력(kN), D는 TBM의 직경(m), 그리고 N은 커터헤드에 장착된 디스크커터의 개수이다.



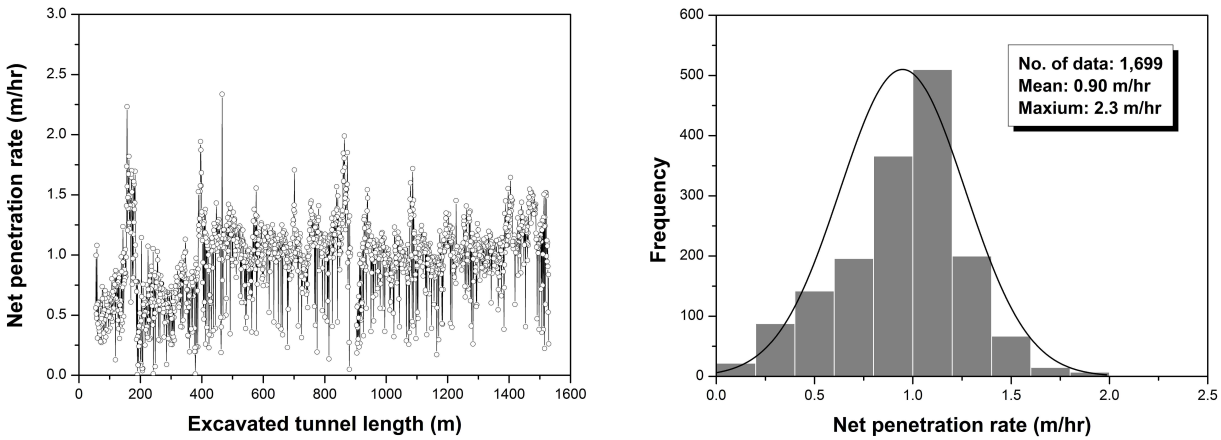
[그림 3.1.60] 쉴드TBM의 자동저장 굴진자료의 예(Ring # 131)

(2) TEST-BED #1 쉴드TBM의 굴진율 및 가동율 분석

총 연장 1.5 km의 굴진 연장별로 분석된 1일 굴진율의 결과를 정리하면 그림 3.1.61과 같다. 굴진거리 300 m까지 이루어진 초기굴진 구간과 굴진 중에 발생한 일부 트러블, 장비 정비 등을 제외하고 평균적으로 9~12 m/day를 기록하였으며 최대 굴진율은 12.6 m/day로서 성공적으로 굴착공사를 완료하였다. 평균 순굴진속도와 최대 순굴진속도 역시 각각 0.9 m/hr 및 2.3 m/hr로 기록되었다 (그림 3.1.62).



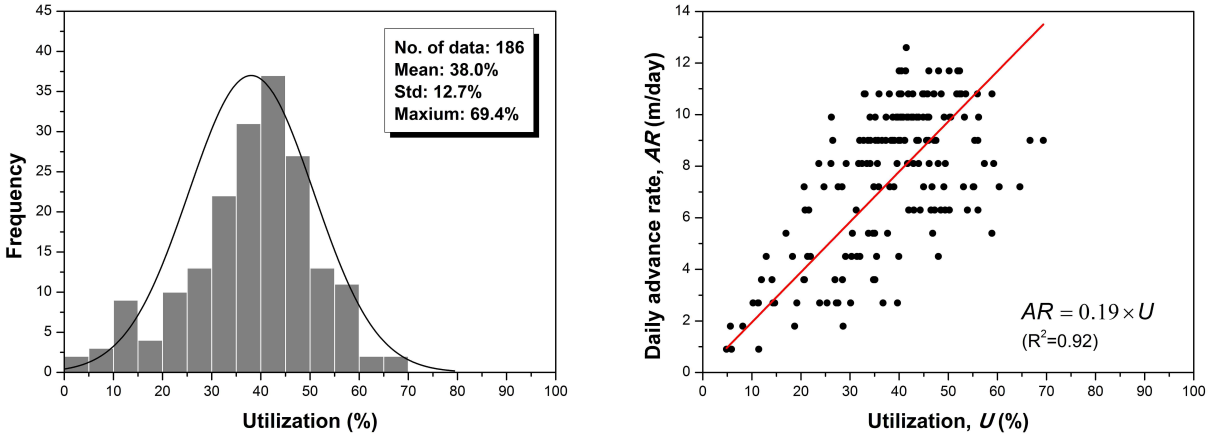
[그림 3.1.61] TEST-BED #1 현장의 굴진거리별 1일 굴진율



(a) 굴진거리별 순굴진속도 (b) 순굴진속도의 히스토그램

[그림 3.1.62] TEST-BED #1 현장의 순굴진속도 분석결과

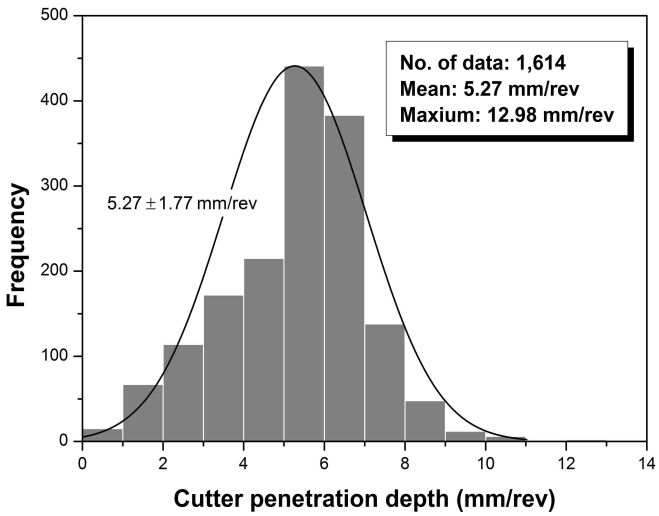
굴진율을 좌우하는 가동율(utilization)은 평균 38.0% 및 최대 69.4%로서 굴진이 원활하게 이루어졌음을 알 수 있으며, 특히 히스토그램 상에서 가장 빈도수가 높은 가동율의 범위는 35~50% 사이임을 확인할 수 있다(그림 3.1.63a). 또한 자료의 편차는 다소 크지만, 1일 굴진율과 가동율 사이에는 선형적인 비례관계가 존재함을 확인하였다(그림 3.1.63b).



(a) 가동율의 히스토그램 (b) 가동율과 1일 굴진율의 상관관계

[그림 3.1.63] TEST-BED #1 현장의 가동율 분석결과

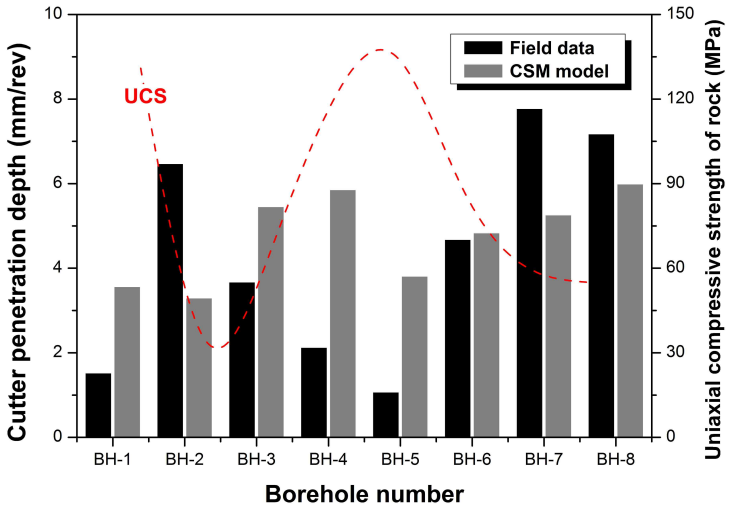
앞선 식 (3.1.1)의 상관관계를 이용한 커터헤드 1회전당 디스크커터의 관입깊이를 분석한 결과, TEST-BED #1 현장의 디스크커터 최대 관입깊이는 12.98 mm/rev이었으나, 95% 신뢰수준에서 현장의 관입깊이는 5.27±1.77 mm/rev로서 앞선 2.3절에서 예측한 바와 같이 압축강도가 가장 큰 BH-5 시추공 조건에 대한 최대 관입깊이 7 mm/rev 이내로 굴진관리가 이루어졌음을 알 수 있다(그림 3.1.64).



[그림 3.1.64] TEST-BED #1 현장의 커터 관입깊이에 대한 통계 분포

반면, 앞선 식 (3.1.2)의 TBM 추력과 커터 연직력과의 상관관계를 이용하여 현장에서 기록된 추력으로부터 커터 연직력을 구한 후, 이를 다시 CSM모델에 의한 커터 작용력 예측식들에 적용하여 구한 예측 커터 관입깊이를 시추공별로 그림 3.1.65와 같이 분석하였다. 그러나 이와 같이 분석한 예측 커터 관입깊이는 실제 현장의 커터 관입깊이와 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 적용한 CSM모델에는 현장의 불연속면 등의 영향이 고려되지 않으며, 커터 관

입깊이는 실제 현장에서 다양한 시공조건에 대한 TBM의 굴진 관리에 좌우되는 인자이기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 실제 현장에서 적용된 커터 관입깊이는 대체로 암석의 일축압축강도와 반비례하게 적용된 것으로 나타났다(그림 3.1.65).



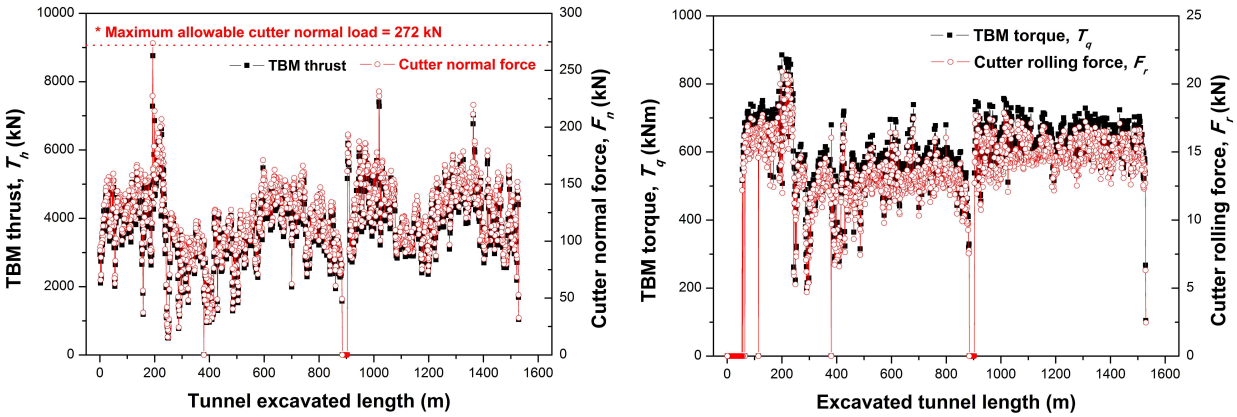
[그림 3.1.65] 현장의 커터 관입깊이와 CSM모델 예측결과의 비교

(3) TEST-BED #1 쉴드TBM의 커터 작용력 분석

식 (3.1.2)와 (3.1.3)의 관계식을 활용하여 TBM의 추력 및 토크 자료로부터 각각 디스크커터의 연직력과 회전력을 산출하여 분석을 실시하였다. TBM 추력 자료로부터 환산된 커터 연직력은 "다"절에서 예측된 바와 같이 현장에 적용된 직경 432 mm 디스크커터의 최대 허용 하중인 272 kN 이내로 발생하였음을 알 수 있다(그림 3.1.66a). 마찬가지로 TBM의 소요 추력과 소요토크는 모두 TBM의 최대 용량 이내가 되도록 굴진이 이루어졌음을 확인할 수 있다(그림 3.1.66).

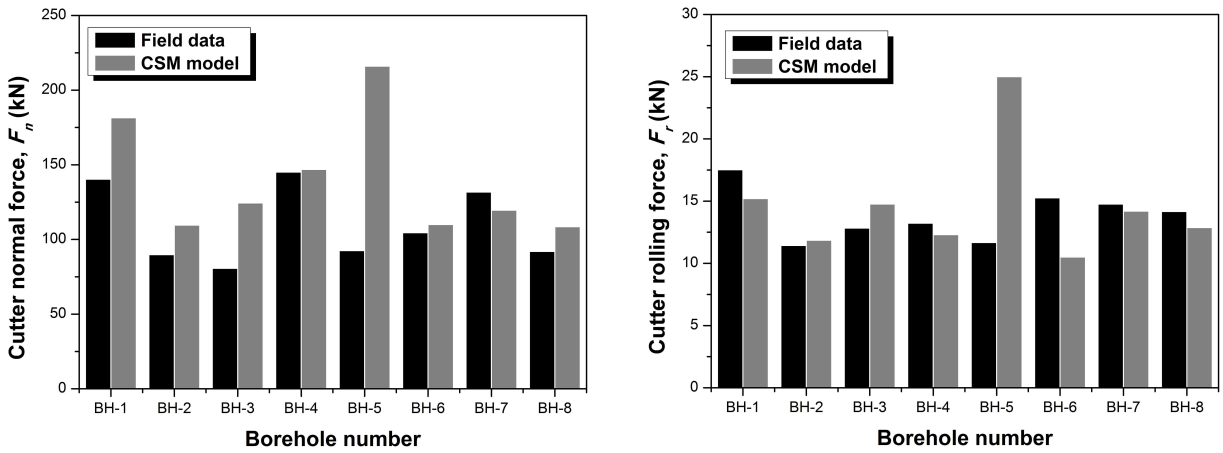
본 연구에서 적용된 CSM모델(Rostami et al., 1996)의 적용성을 확인하기 위하여, 각 시추공 구간별로 적용된 현장의 커터 평균 관입깊이, 암석의 강도, 디스크커터의 형상 등의 정보를 시추공별로 CSM모델식에 대입하여 CSM모델에 의해 커터 작용력을 산출하고 이를 실제 현장의 커터 작용력과 비교하였다(그림 3.1.67). 분석 결과, CSM모델로 산출된 커터 연직력은 BH-1, BH-3 및 BH-5 구간을 제외하고는 실제 현장에서 발생한 커터 연직력과 대체로 유사하였다. 특히, CSM모델로 산출된 커터 회전력은 BH-5 구간을 제외하고 실제 현장의 커터 회전력에 가깝게 산출되었다. 전반적으로 CSM모델로 예측된 커터 작용력은 실제 현장의 커터 작용력보다 다소 크게 나타났으며, 현장 자료를 기준으로 커터 연직력과 커터 회전력의 상대오차는 각각 +25.20% 및 +21.97%이었다(그림 3.1.68). 앞서 기술한 바와 같이 CSM모델에는 절리 등과 같은 불연속면의 영향이 고려되지 않기 때문에 CSM모델로 예측되는 커터 작용력이 다소 크게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 안전율 확보와 보수적인 설계 측면에서는 TBM의 설계단계에서

CSM모델을 활용하는 것이 적합할 수 있을 것으로 사료된다.



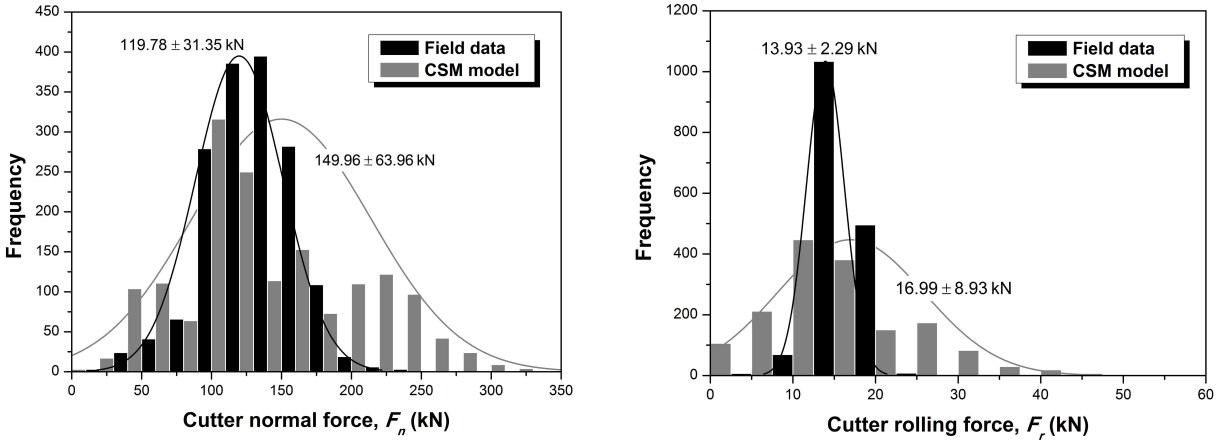
(a) 추력과 커터 연직력 (b) 토크와 커터 회전력

[그림 3.1.66] 현장에서 기록된 추력과 토크로부터 변환된 커터 작용력



(a) 커터 연직력 (b) 커터 회전력

[그림 3.1.67] 현장의 커터 작용력과 CSM모델 예측결과의 비교



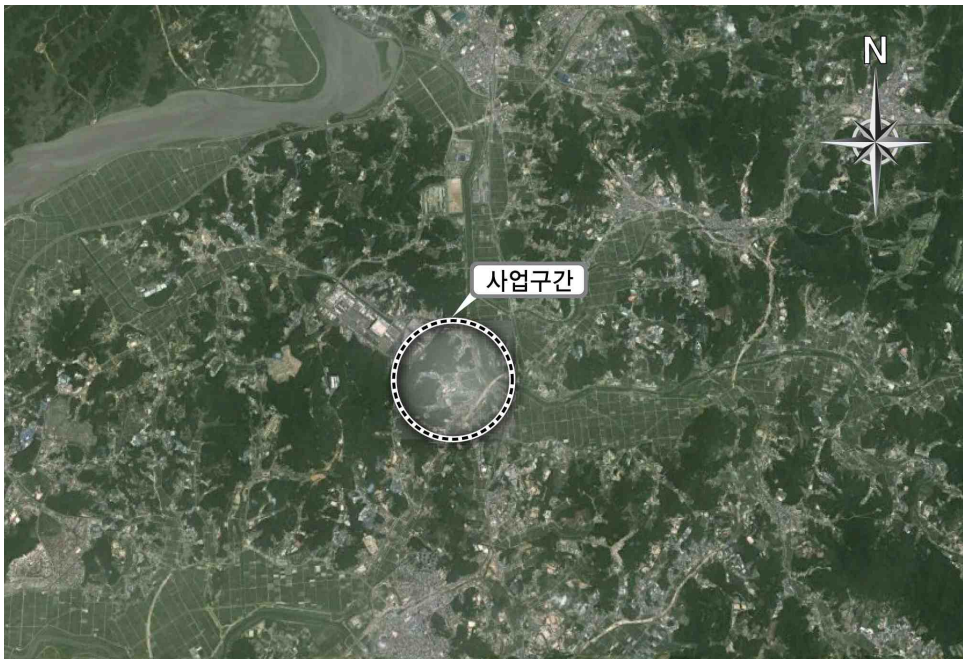
(a) 커터 연직력 (b) 커터 회전력

[그림 3.1.68] 현장의 커터 작용력과 CSM모델 예측결과의 통계 분포

2. TEST-BED #2

가. TEST-BED #2 현장개요

본 연구과제의 두 번째 TEST-BED 현장은 경기도 파주시 월롱면에 소재한 「장문천연가스발전소 송전선로 지중화공사」 현장으로서 장문천연가스 변전소 신설을 위한 케이블 설치용 쉴드TBM터널 공사현장이다 (그림 3.2.1).



[그림 3.2.1] TEST-BED #2 현장의 항공사진

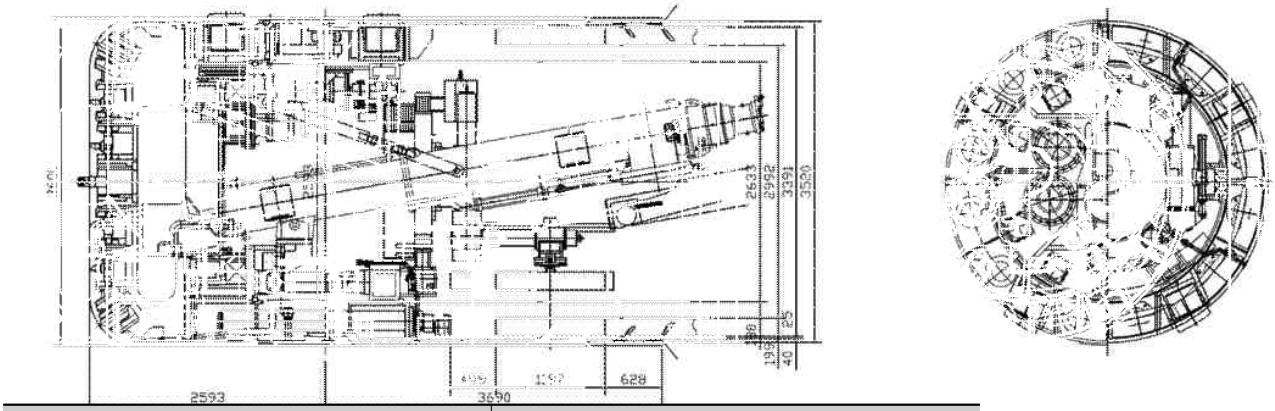
본 연구과제에서 설계·제작한 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM은 굴착 외경이 3.6 m인 토압식 쉴드TBM으로서 종래에 일본 Kawasaki중공업에서 제작한 토압식 쉴드TBM을 재활용 제작한 것이다 (그림 3.2.2 및 표 3.2.1). 터널 단면 크기를 결정하는 세그먼트의 외경과 내경은 각각 3.4 m 및 3 m이며 길이는 1.2 m에 5분할로 설계되었다 (그림 3.2.3).

시공연장과 곡선반경은 각각 1,275 m 및 300 m이며 (그림 3.2.4), 발진구 수직구 심도는 26 m에서 도달구 수직구의 심도가 20 m로 변하는 종단경사 2.24%의 상향구배 굴착조건이다 (그림 3.2.5).

굴착대상 지반조건은 풍화암에서 경암이 존재하는 조건으로서, 지반조사 결과로부터 얻어진 암석의 최소, 평균 및 최대 일축압축강도는 각각 10, 65 및 149 MPa로 나타났다 (표 3.2.2). 지질적으로는 선캠브리아기 경기편마암복합체인 흑운모화강편마암이 기반암으로 분포하고, 흑운모편마암, 호상편마암, 편암, 규암, 석회질편암, 대리암, 석회규산염암 등으로 구성된 퇴적기원의 변성암이 협재되어 있는 특징을 가진다. 특히, 현미경 관찰결과, 규암의 경우 석영의 함유량

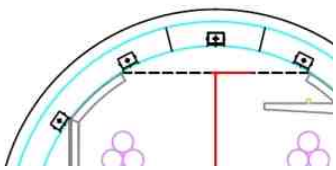
이 약 85%로 나났다.

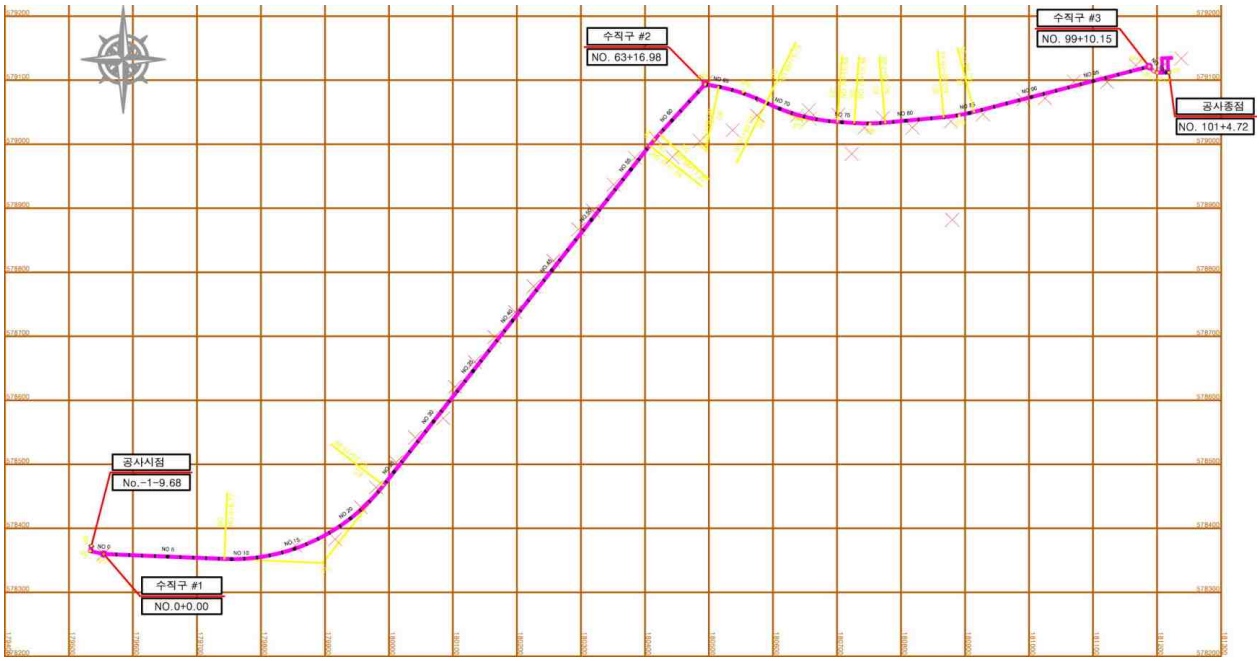
쉴드TBM의 공사기간은 2014년 9월부터 2015년 6월까지 약 9개월로서 천연가스발전소의 운영 개시를 위해 절대 공기가 준수되어야 하는 급속시공이 요구되는 조건이다.



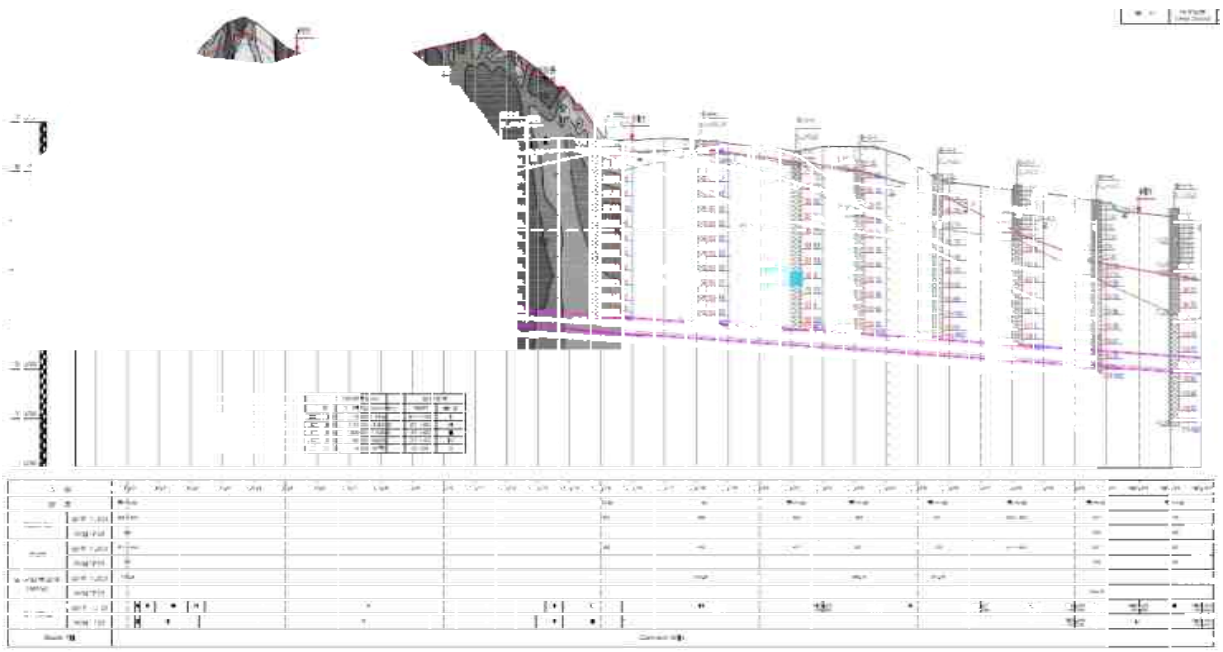
[그림 3.2.2] 재활용 대상 기존 토압식 쉴드TBM (일본 Kawasaki 제작)

[표 3.2.1] 재활용 대상 기존 토압식 쉴드TBM의 제작 사양 (일본 Kawasaki 제작)





[그림 3.2.4] TEST-BED #2 현장의 횡단면도



[표 3.2.2] TEST-BED #2 현장의 시추공별 암석의 일축압축강도 측정결과

Borehole No.	Excavated length (m)	Uniaxial compressive strength, S_c (MPa)
NX-2-16	207.52	41.4
NX-2-15	247.52	10
NX-2-14	307.52	69.9
NX-2-13	347.52	71.8
NX-2-12	407.52	19.7
NX-2-11	447.52	28.8
NX-2-10	487.52	73.4
NX-2-9	547.52	133.8
NX-2-8	607.52	68.9
NX-1-3	647.52	33.3
NX-2-7	707.52	106.3
NX-2-6	747.52	91.6
NX-2-5	807.52	88.8
NX-2-4	847.52	83.6
NX-2-3	907.52	24.9
NX-2-2	967.52	148.8
NX-2-1	1272.48	73.4

나. TEST-BED #2 국산 커터헤드의 설계

앞선 TEST-BED #1의 경우와 마찬가지로 본 연구과제에서 개발한 설계기술 및 설계시스템을 통해 TEST-BED #2에 적용할 국산 커터헤드를 설계하였다. 이때 TBM의 굴착외경과 D/B 검토결과를 고려하여, 디스크커터의 크기를 2조건(15인치 및 17인치), 그리고 디스크커터의 간격을 3조건(70, 80, 90 mm)의 총 6가지 조건에 대해 커터헤드 설계의 적합성을 검토하였다 (표 3.2.3). 이때 17인치와 15인치 디스크커터의 최대 연직 허용하중을 각각 245 kN 및 220 kN으로 적용하였다.

TBM의 외경과 앞선 표 3.2.2의 지반조사결과를 바탕으로 본 연구과제에서 개발한 D/B에 의한 TBM 적합 사양과 재활용 대상 토압식 쉴드TBM의 기존 사양을 비교한 결과는 표 3.2.4와 같다.

표 3.2.4의 결과에서 확인할 수 있듯이, D/B로 예측된 디스크커터의 개수의 상대오차는 7%에 불과하여 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 디스크커터의 크기 역시 상대오차가 2%로서 실질적으로 동일한 디스크커터의 직경을 산출하였다. 디스크커터의 평균 간격은 D/B에 의한 결과는 70 mm로서 기존의 80 mm와는 10 mm 차이를 보였지만 이 역시 큰 차이는 아니었다. 마지막으로 D/B로 예측된 TBM의 최대 사양은 실제 재활용 대상 TBM의 사양보다 크게 산출되었으

나, 뒤이어서 설명한 바와 같이 실제로 소요 추력, 토크, 동력 및 회전속도 등을 검토한 결과 모두 TBM의 최대 사양 이내로서 적용이 무난할 것으로 예측되었다.

[표 3.2.3] TEST-BED #2용 국산 커터헤드의 설계 검토조건

Case No.	Disc cutter size (inch/mm)	Cutter spacing, *S* (mm)
1-1	15 / 381	70
1-2	15 / 381	80
1-3	15 / 381	90
2-1	17 / 432	70
2-2	17 / 432	80
2-3	17 / 432	90

[표 3.2.4] D/B모델에 의한 TBM 주요 사양과 재활용 대상 TBM의 사양 비교

Specifications	D/B predictions	TBM specifications	Unit	Relative error
Number of disc cutters	27	29	EA	7%
Average disc cutter spacing	69	80	mm	14%
Disc cutter diameter	373	381	mm	2%
Maximum TBM Thrust	12,794	9,600	kN	-
Maximum TBM Torque	1,785	1,250	kN·m	-
Maximum TBM Power	706	630	kW	-
Maximum TBM RPM	9.8	9	rev/min	-

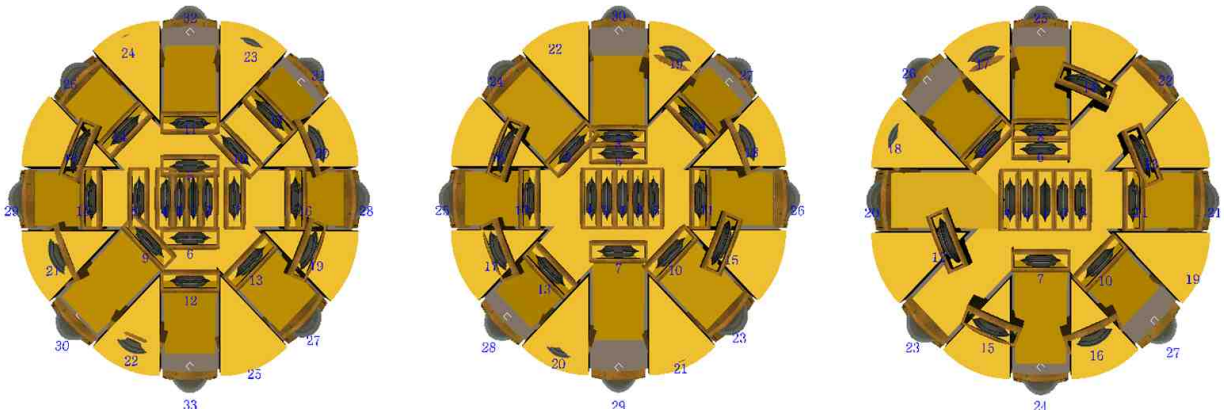
앞선 표 3.2.2의 지반조사 결과와 같이 TEST-BED #2 현장에서는 NTNU시험과 암석의 인장강도시험이 이루어지지 못하고 암석의 일축압축강도만이 측정되어, TEST-BED #1의 경우와 마찬가지로 암석의 일축압축강도를 활용하는 CSM모델을 사용하여 설계 검토를 실시하였다. 이때 게이지커터의 개수는 TBM의 외경을 고려하여 2개로 동일하게 설정하였다. 또한 본 연구에서 구축한 DB 자료들을 바탕으로 도출된 TEST-BED #2 커터헤드의 주요 설계조건들은 다음의 표 3.2.5와 같다.

이상의 지반조사 결과 및 주요 설계조건들을 바탕으로 표 3.2.3의 6가지 설계조건 가운데 디스크커터의 직경이 15인치인 Case 1-1~Case 1-3에 대한 3차원 커터헤드 설계결과는 다음의 그림 3.2.6과 같다. 디스크커터의 간격이 90 mm일 경우에는 70 mm일 경우와 비교하여 커터 간격이 넓기 때문에 설계된 디스크커터의 소요 개수가 5개 감소하는 것으로 나타났다. 디스크커

터의 직경이 17인치인 Case 2-1~Case 2-3의 경우에는 디스크커터의 직경에만 차이가 있으므로 그림 3.2.6의 커터헤드 배열설계 결과와 거의 동일하다고 할 수 있다.

[표 3.2.5] TEST-BED #2용 국산 커터헤드의 설계조건

Design parameters	Design value	Design parameters	Design value
Spoke angle	45°	Number of Spokes	8 EA
Number of center cutters	5 EA	Number of gage cutters	2 EA
Gage radius	620 mm	Angle of the last gage cutter	68°



(a) *S* = 70 mm (N = 31 EA)　(b) *S* = 80 mm (N = 29 EA)　(c) *S* = 90 mm (N = 26 EA)

[그림 3.2.6] TEST-BED #2 현장에 대한 3차원 커터헤드 설계결과 (커터 직경 = 15인치)

이상의 설계조건에 따른 표 3.2.6의 검토결과에 따르면, 디스크커터의 직경이 15인치일 경우 최대 압축강도 조건(150 MPa)에서 적용 가능한 디스크커터의 최대 관입깊이는 4 mm/rev로 나타났으며, 커터 직경이 17인치일 경우에는 커터 간격이 70 mm으로 좁은 Case 2-1의 경우에는 최대 관입깊이가 8 mm/rev이었으나 커터 간격이 80~90 mm일 때는 7 mm/rev로 동일하게 나타났다. 이는 디스크커터의 직경이 클수록 최대로 적용이 가능한 허용 연직력이 커지기 때문에 최대 굴진율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이와 반대로 디스크커터 간격이 커질수록 디스크커터 1개가 굴착해야 하는 양(burden)이 증가하므로 굴진율은 감소하는 것으로 예측되었다.

암석의 최대 압축강도 조건에서 KICT모델로 예측된 커터헤드의 회전속도와 CSM모델로 검토된 디스크커터의 최대 관입깊이로부터 계산된 TBM의 최대 굴진속도를 추정한 결과, 디스크커터 직경이 15인치 및 17인치일 경우 각각 7.17 m/day 및 11.04~12.05 m/day가 예상되었다 (표 3.2.6). 이때 TBM의 가동률과 작업시간을 각각 30% 및 120 hr/week로 가정하였다. 또한 각각의 설계검토 조건별로 커터의 최대 관입깊이를 적용하더라도 소요 추력, 토크 및 동력이 재활용

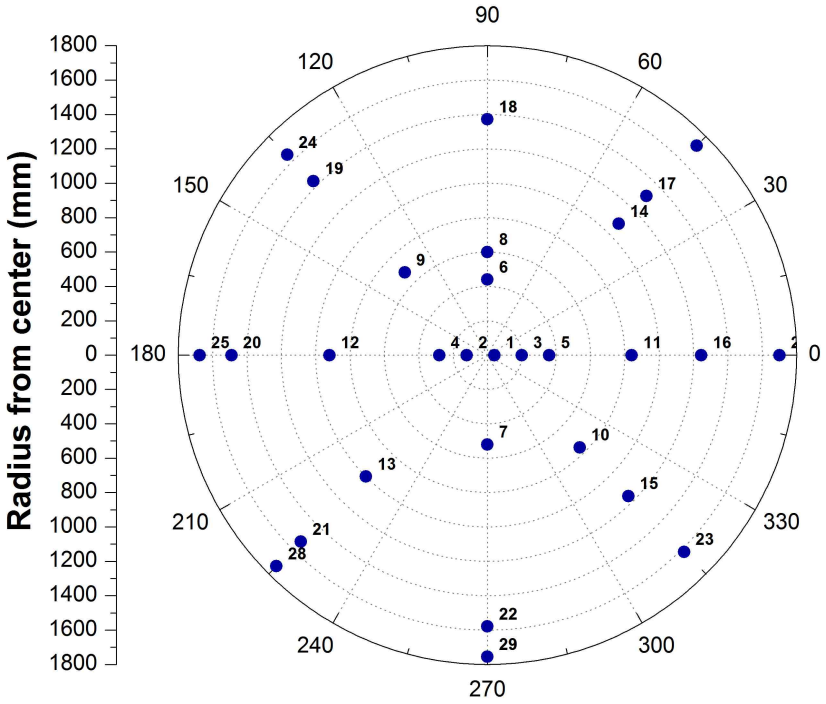
대상 TBM의 최대 용량의 각각 73.4%, 80.1% 및 59.4% 이내로 만족함을 확인하였다 (표 3.2.6).

[표 3.2.6] 커터헤드 최적 설계를 위한 디스크커터의 크기와 간격별 TBM 굴진성능 예측결과

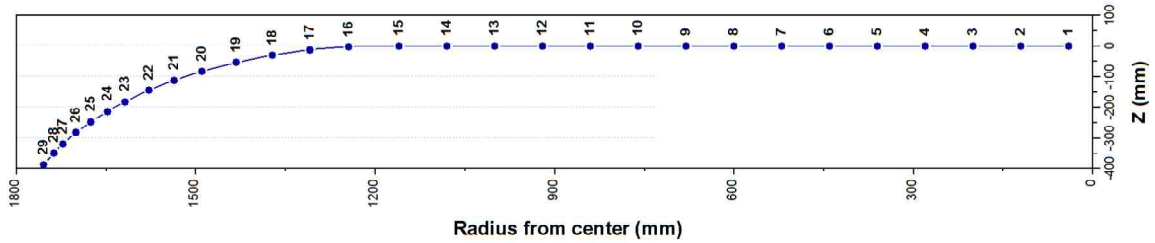
Case No.	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
Max. penetration depth (mm)	4	4	4	8	7	7
Cutter normal force (kN)	201	211	219	233	232	243
Cutter rolling force (kN)	21	22	23	32	30	31
Cutterhead RPM (rev/min)	4.15	4.15	4.15	3.49	3.65	3.65
Required TBM thrust (kN)	5,837 (O.K)	6,126 (O.K)	6,358 (O.K)	6,744 (O.K)	6,721 (O.K)	7,047 (O.K)
Required TBM torque (kN·m)	649 (O.K)	682 (O.K)	707 (O.K)	1,001 (O.K)	932 (O.K)	977 (O.K)
Required TBM power (kW)	282 (O.K)	296 (O.K)	307 (O.K)	365 (O.K)	356 (O.K)	374 (O.K)
Max. daily advance rate (m/day)	7.17	7.17	7.17	12.05	11.04	11.04

표 3.2.6의 예측결과 상으로만 본다면, 직경 17인치의 디스크커터를 70 mm 간격으로 배치하는 것이 굴착성능 면에서는 가장 바람직할 수 있다. 하지만 앞선 표 3.2.4의 D/B 예측결과에 따르면 직경 3.6 m의 TBM 커터헤드의 크기를 고려한다면 직경 15인치의 디스크커터를 사용하는 것이 바람직하며, 디스크커터의 직경이 동일할 때 디스크커터 간격에 따른 최대 굴진율의 차이는 최대 약 1 m/day(직경 17인치 디스크커터의 분석 결과)에 불과한 것으로 나타났다. 따라서 TEST-BED #1의 경우와 마찬가지로 커터헤드 제작 시에 디스크커터 하우징 간의 간섭을 사전에 배제하고 적용될 TBM 직경에 적합한 디스크커터의 직경을 결정하고자 하였다. 즉, 표 3.2.3의 6개 검토조건들 가운데 직경 15인치 디스크커터를 평균 간격 80 mm로 배치하는 Case 1-2를 실제 제작을 위한 최적 설계조건으로 설정하였다.

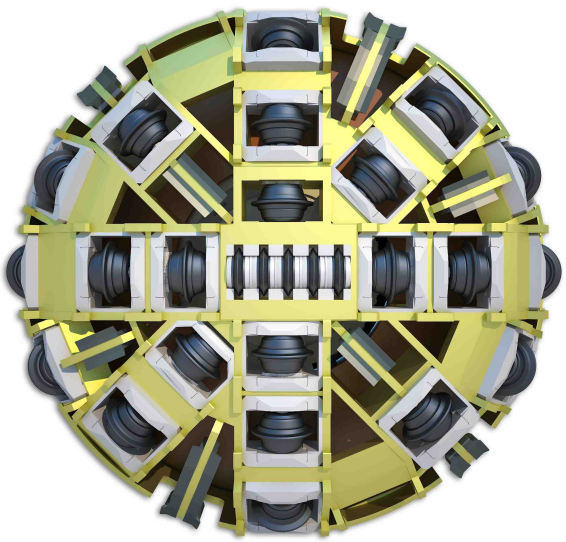
이상과 같이 설계된 커터헤드의 설계도는 다음의 그림 3.2.7 및 표 3.2.7과 같다. 8개의 스포크에 디스크커터를 배치하되 보조스포크에 1개씩 디스크커터를 배치하는 것으로 하여 2개의 게이지커터를 포함하여 총 29개의 디스크커터를 배열 설계하였다. 이를 바탕으로 제작된 커터헤드의 제작도면은 그림 3.2.8과 같다.



(a) 정면도



(b) 측면도

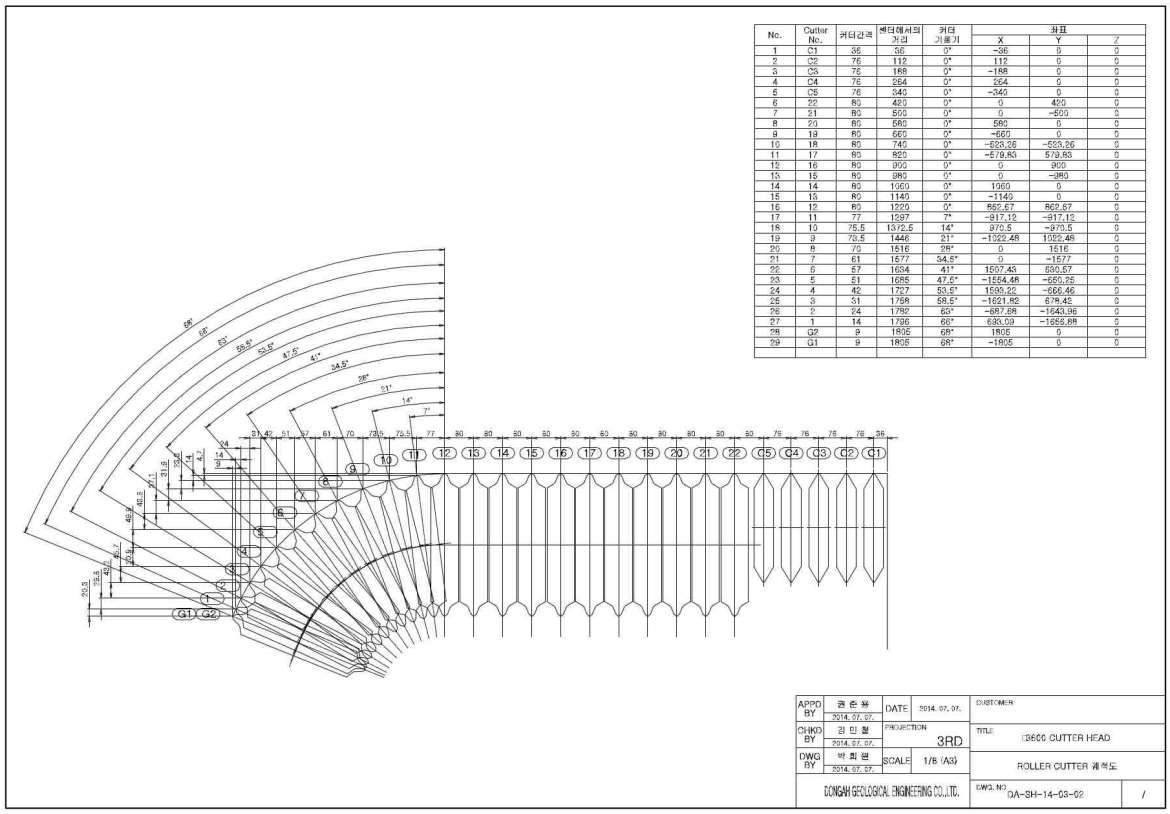


(c) 3차원 모델링도

[그림 3.2.7] TEST-BED #2용 국산 커터헤드의 설계결과

[표 3.2.7] TEST-BED #2 쉴드TBM 커터헤드의 디스크커터 배열설계 결과

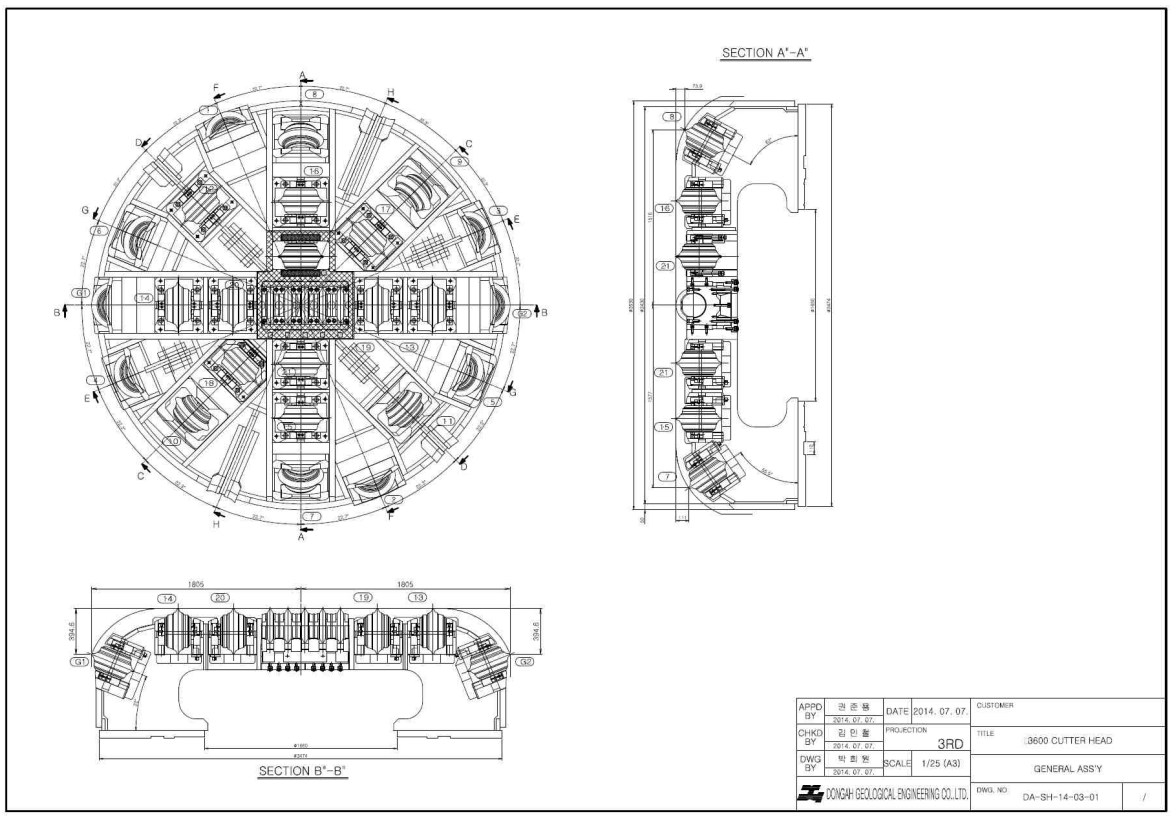
Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Cutter Position (3D coordinates)		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0	40	0	40	40	0	0
2	180	120	0	80	-120	0	0
3	0	200	0	80	200	0	0
4	180	280	0	80	-280	0	0
5	0	360	0	80	360	0	0
6	90	440	0	80	0	440	0
7	270	520	0	80	-0.0005098	-520	0
8	90	600	0	80	0	600	0
9	135	680	0	80	-480.8325	480.8327	0
10	315	760	0	80	537.401	-537.4013	0
11	0	840	0	80	840	0	0
12	180	920	0	80	-920	0	0
13	225	1000	0	80	-707.1074	-707.1062	0
14	45	1080	0	80	763.6761	763.6746	0
15	315	1160	0	80	1071.7	-443.914	0
16	0	1244.808	6	80	-1150.052	476.3673	-3.396423
17	45	1308.905	12	71.29089	-1209.271	-500.8962	-13.54852
18	90	1371.591	18	67.2986	1267.185	524.8846	-30.34503
19	135	1432.177	24	63.52988	548.071	1323.159	-53.60187
20	180	1490	30	59.9722	-570.1993	-1376.58	-83.06433
21	225	1535.617	35	56.61376	587.6542	-1418.726	-112.1258
22	270	1578.528	40	53.44339	-604.0753	1458.371	-145.0526
23	315	1618.406	45	50.45056	1144.385	-1144.387	-181.5938
24	135	1647.92	49	47.62533	-1165.255	1165.255	-213.2435
25	180	1675.154	53	44.95831	-1675.154	0	-246.8747
26	0	1699.976	57	42.44064	1699.976	0	-282.3239
27	45	1722.264	61	40.06397	1217.825	1217.824	-319.4179
28	225	1737.252	64	37.82038	-1228.424	-1228.422	-348.2099
29	270	1754.854	68	35.70244	0	-1754.854	-387.744



No.	Cutter No.	커터간격	센터에서의 거리	커터 기울기	좌표		
					X	Y	Z
1	C1	36	36	0°	-36	0	0
2	C2	76	112	0°	112	0	0
3	C3	76	188	0°	-188	0	0
4	C4	76	264	0°	264	0	0
5	C5	76	340	0°	-340	0	0
6	22	80	420	0°	0	420	0
7	21	80	500	0°	0	-500	0
8	20	80	580	0°	580	0	0
9	19	80	660	0°	-660	0	0
10	18	80	740	0°	-523.26	-523.26	0
11	17	80	820	0°	-579.83	579.83	0
12	16	80	900	0°	0	900	0
13	15	80	980	0°	0	-980	0
14	14	80	1060	0°	1060	0	0
15	13	80	1140	0°	-1140	0	0
16	12	80	1220	0°	862.67	862.67	0
17	11	77	1297	7°	-917.12	-917.12	0
18	10	75.5	1372.5	14°	970.5	-970.5	0
19	9	73.5	1446	21°	-1022.48	1022.48	0
20	8	70	1516	28°	0	1516	0
21	7	61	1577	34.5°	0	-1577	0
22	6	57	1634	41°	1507.45	590.57	0
23	5	51	1685	47.5°	-1564.46	-669.26	0
24	4	42	1727	53.5°	1593.22	-666.46	0
25	3	31	1758	58.5°	-1621.82	678.42	0
26	2	24	1782	63°	-687.68	-1643.96	0
27	1	14	1796	66°	695.09	-1656.88	0
28	G2	9	1805	68°	1805	0	0
29	G1	9	1805	68°	-1805	0	0

APPD BY	권 준 용 2014. 07. 07.	DATE	2014. 07. 07.	CUSTOMER
CHKD BY	김 민 철 2014. 07. 07.	PROJECTION	3RD	TITLE □3600 CUTTER HEAD
DWG BY	박 희 원 2014. 07. 07.	SCALE	1/6 (A3)	ROLLER CUTTER 궤적도
DONGAH GEOLOGICAL ENGINEERING CO.,LTD.		DWG. NO	DA-SH-14-03-02	/

(a) 디스크커터의 궤적도

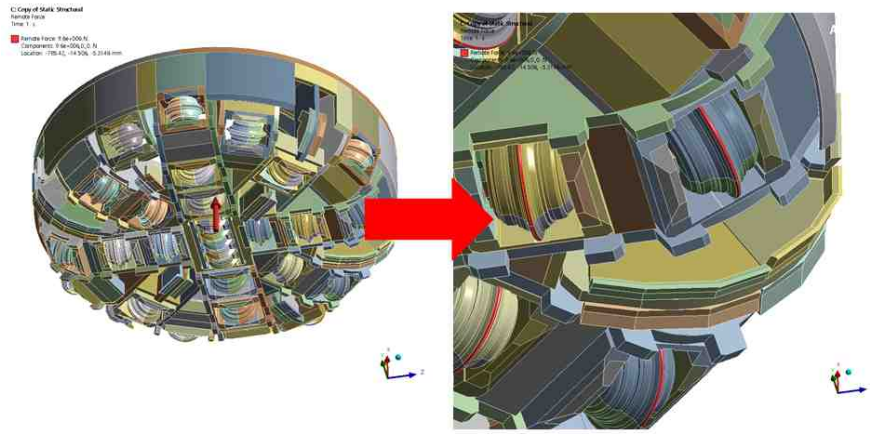


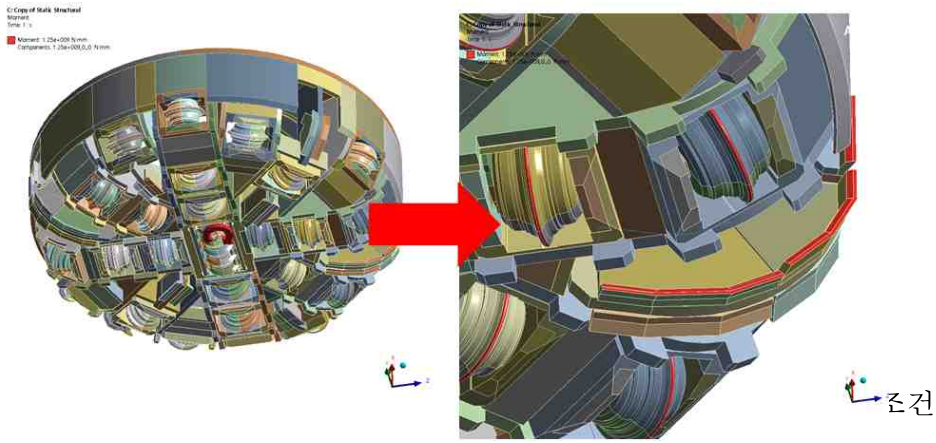
APPD BY	권 준 용 2014. 07. 07.	DATE	2014. 07. 07.	CUSTOMER
CHKD BY	김 민 철 2014. 07. 07.	PROJECTION	3RD	TITLE □3600 CUTTER HEAD
DWG BY	박 희 원 2014. 07. 07.	SCALE	1/25 (A3)	GENERAL ASS'Y
DONGAH GEOLOGICAL ENGINEERING CO.,LTD.		DWG. NO	DA-SH-14-03-01	/

(b) 정면도 및 측면도

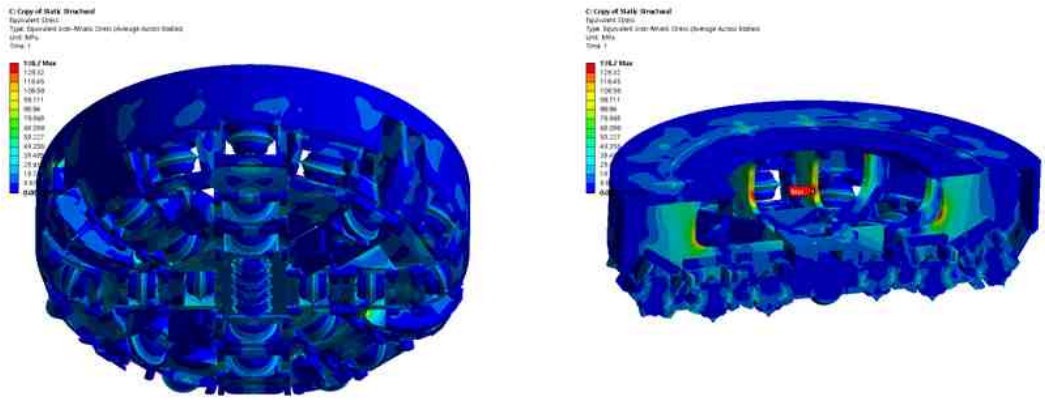
[그림 3.2.8] TEST-BED #2 국산 커터헤드의 제작도면

TBM의 최대 용량 조건(최대 추력 및 최대 토크 조건)에서 이상과 같이 설계된 커터헤드의 구조적 안정성을 앞선 TEST-BED #1의 경우와 마찬가지로 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 평가 결과, 설계된 커터헤드는 최대 추력과 토크 조건에서도 안정성을 확보하는 것으로 나타났다 (그림 3.2.9)



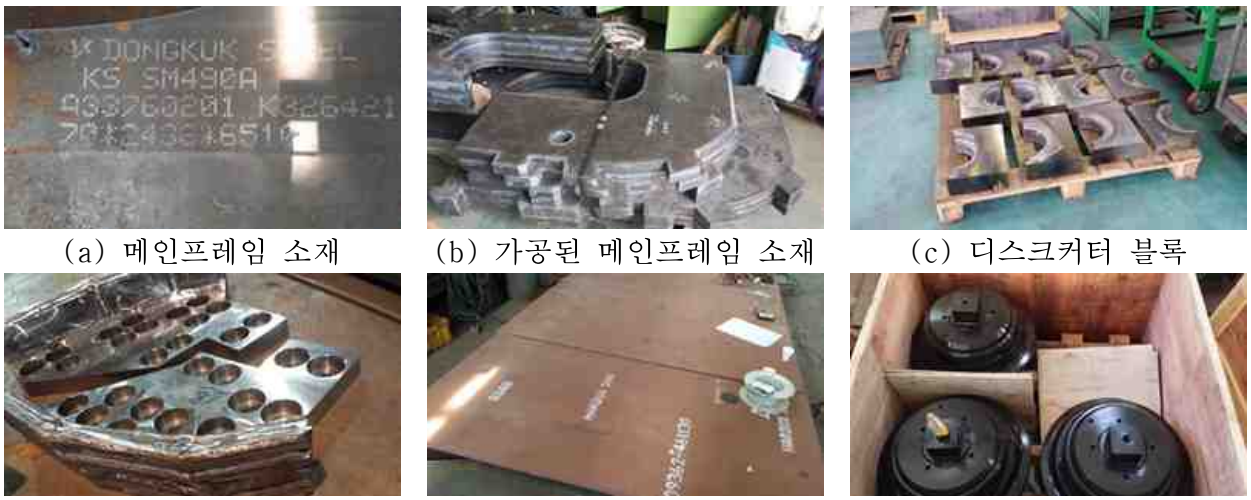


조건



다. TEST-BED #2 국산 커터헤드의 제작

앞선 TEST-BED #1의 실적을 바탕으로 동일한 과정으로 커터헤드를 제작하였다. 특히, 소재의 경우도 TEST-BED #1과 동일한 SM490A를 적용하여 가공하였으며, 마모 방지를 위한 Hardox500을 적용하였다 (그림 3.2.10). 특히, TEST-BED #2에는 본 연구과제에서 개발한 고성능 디스크커터 29개를 1 SET로 적용하였으며, 그 결과를 다음의 4절에 정리하였다.



(a) 메인프레임 소재 (b) 가공된 메인프레임 소재 (c) 디스크커터 블록

(d) 스크레퍼 (e) Hardox500 (f) 디스크커터

[그림 3.2.10] 커터헤드 제작용 소재

커터헤드 제작과정 역시 TEST-BED #1과 동일하며, 기본적으로 프레임 용접, 외주면 벤딩 작업, 분할제작된 소재들의 용접, 커터헤드 용접부 열처리 및 기존 TBM과의 호환부 제작의 순서로 제작을 실시하였다 (그림 3.2.11). 이때 본 연구과제에서 제작·구축한 커터헤드 제작용 부속설비를 활용하여 정밀한 제작을 도모하였으며, 특히 TEST-BED #1 커터헤드 제작에 적용한 기준과 동일하게 치수검사, 용접부 비파괴검사 및 자분탐사검사를 실시하여 제작된 커터헤드의 품질을 검증하였다.

이상과 같이 제작된 커터헤드에 대해서는 최종적으로 그림 3.2.12와 같이 디스크커터의 설계궤적과 일치하도록 제작되었는지를 확인하였다.

TEST-BED #1과 다른 점은 커터헤드 외주면의 마모를 최소화하고자 TEST-BED #1의 초경비트(bit) 대신에 전단면 초경을 배치하고 제작하였다는 점이다. 이는 그림 3.2.13과 같이, 초경이 설치되지 않은 부분에서 TEST-BED #1 커터헤드의 외주면 마모가 상당히 발생하였기 때문이다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 초경 비트 대신에 전단면 초경을 배치하여 커터헤드 외주면의 마모를 방지하고자 하였다.



(a) 프레임 용접



(b) 외주부 벤딩 작업



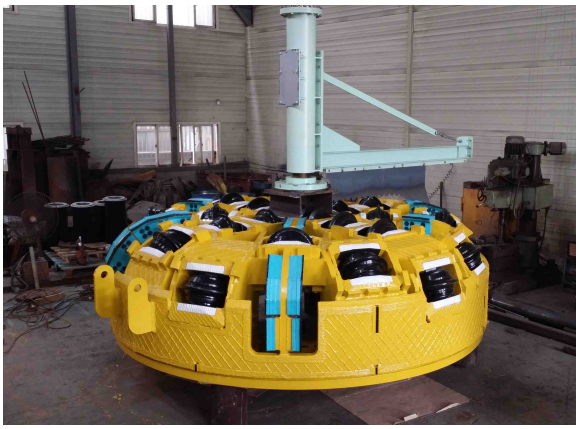
(c) 커터헤드 용접



(d) 커터헤드 용접 후 열처리



(e) TBM 호환부 제작



(f) 커터헤드 제작 완료

[그림 3.2.11] TEST-BED #2 커터헤드 제작 과정





[그림 3.2.12] 디스크커터의 궤적검사



(a) 치수검사



(b) 용접부 비파괴검사



Magnetic Particle Examination Report

(c) 자분탐상검사보고서

[그림 3.2.13] 디스크커터의 궤적검사

라. TEST-BED #2 현장적용 및 굴진성능 평가

이상과 같이 제작된 국산 커터헤드를 장착한 TEST-BED #2 토압식 쉴드TBM의 전경은 그림 3.2.14와 같다. 2014년 9월 19일에 현장에서 조립이 되어 투입된 이후로 2015년 6월 11일에 총 1,275 m을 굴진하고 터널을 관통하였다 (그림 3.2.15).



(a) 조립된 토압식 쉴드TBM



(b) 커터헤드의 운반



(c) 토압식 쉴드TBM의 현장 조립



(d) 초기 굴진



(e) 굴진 중 후방설비 부분



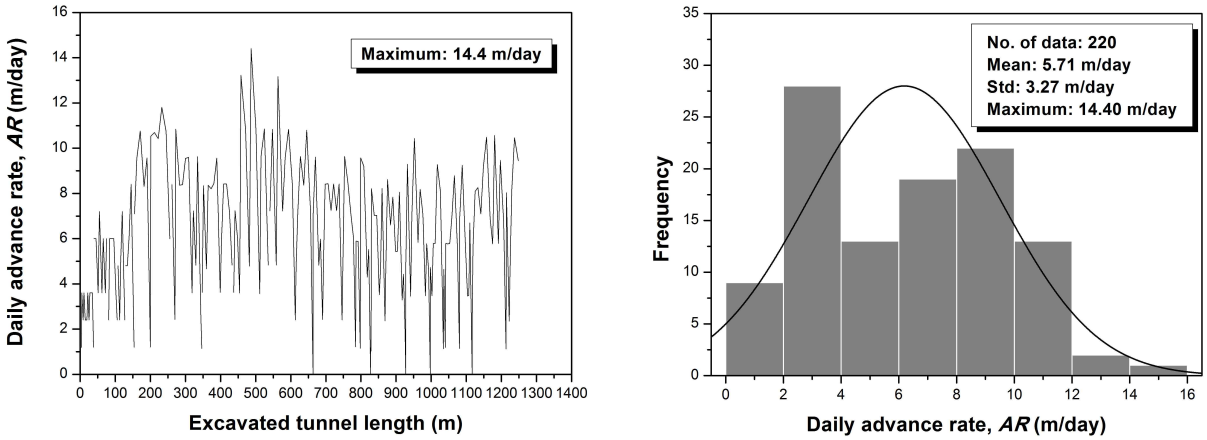
(f) 굴착시공된 쉴드터널 내부

[그림 3.2.14] 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM의 현장 운반·조립 및 굴착 시공장면(TEST-BED #2)



[그림 3.2.15] 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM의 관통장면(TEST-BED #2)

설계·제작된 쉴드TBM의 현장 굴진자료를 분석한 결과, 초기 굴진구간을 제외하고는 평균적으로 10 m/day 내외의 굴진속도를 나타내었다. 최대 굴진율은 14.4 m/day로서 TEST-BED #1의 기록을 상회하였으며, 전체 평균 굴진율은 5.72±3.27 m/day로 나타났다 (그림 3.2.16).



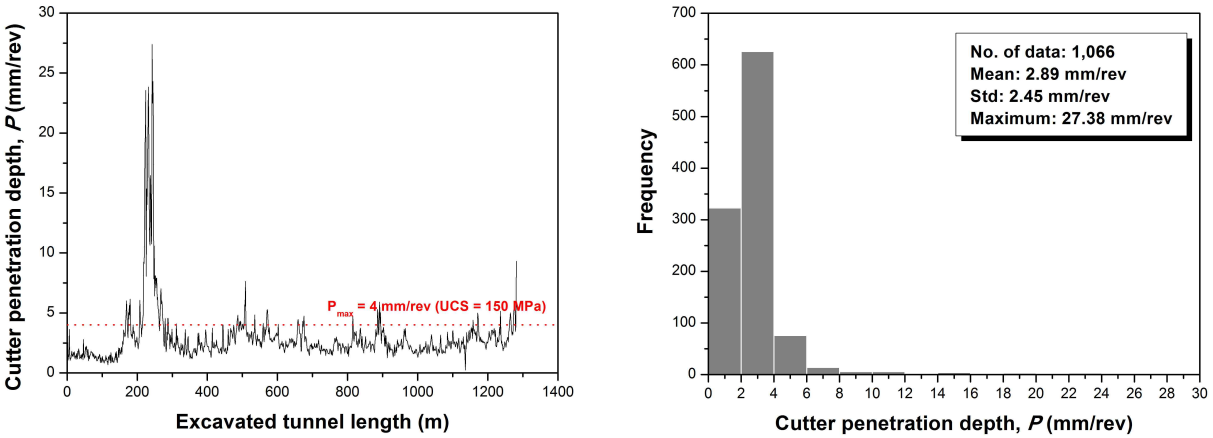
(a) 연장별 (b) 히스토그램

[그림 3.2.16] 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM의 1일 굴진율 분석결과(TEST-BED #2)

TEST-BED #1의 경우와 마찬가지로 디스크커터의 관입깊이를 분석한 결과, 약 250 m 지점에서 출현하였던 토사지반 조건을 제외하고는 거의 대부분의 데이터가 암석의 최대 일축압축강도 150 MPa에 대한 최대 관입깊이 조건이었던 4 mm/rev 내외로 굴진이 관리되었음을 확인하였다 (그림 3.2.17). 통계분석 결과에서도 디스크커터의 평균 관입깊이는 2.89±2.45 mm/rev으로 나타났으며, 대부분의 자료가 2~4 mm/rev에 집중되는 것으로 나타났다 (그림 3.2.17b).

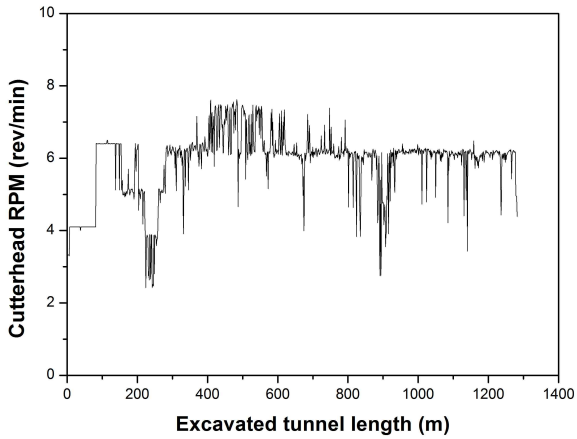
TBM의 RPM은 굴진율 분석결과에서 나타난 바와 같이 초기 굴진구간을 제외하고는 대체로 6 rev/min을 기준으로 TBM이 구동되었다 (그림 3.2.18).

TBM의 순굴진속도는 디스크커터의 관입깊이와 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 평균 순굴진속도는 0.88±0.50 m/hr로 나타나 대부분의 경우 세그먼트 1링(길이 1.2 m) 굴착에 1시간 내외가 소요되었음을 알 수 있다 (그림 3.2.19).

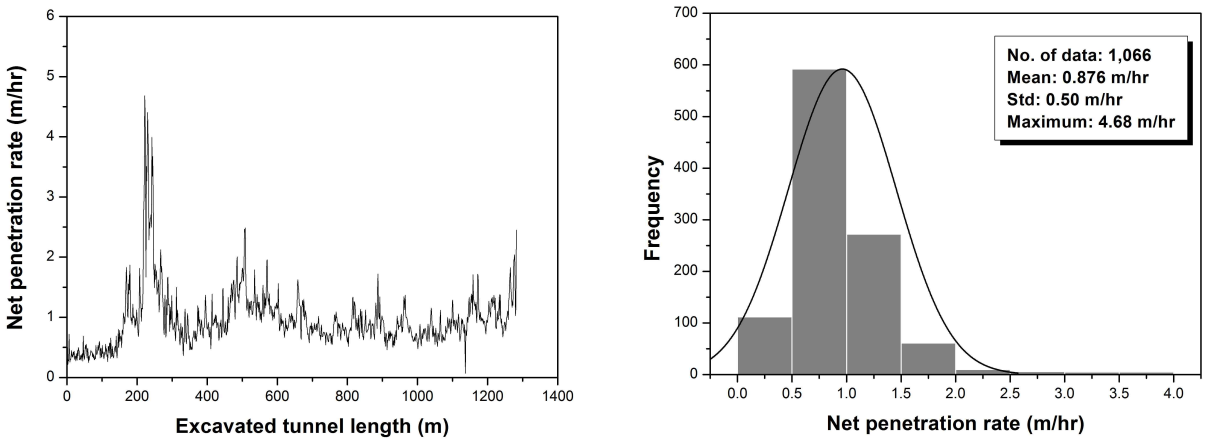


(a) 연장별 (b) 히스토그램

[그림 3.2.17] 시공 연장별 디스크커터 관입깊이의 분석결과(TEST-BED #2)



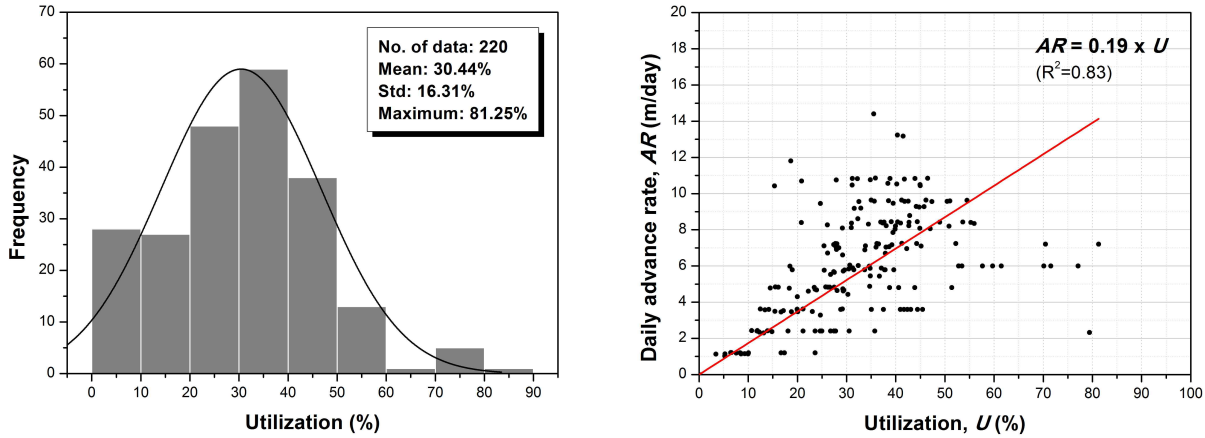
[그림 3.2.18] 시공 연장별 TBM 커터헤드의 회전속도(TEST-BED #2)



(a) 연장별 (b) 히스토그램

[그림 3.2.19] 시공 연장별 TBM의 순굴진속도 분석결과(TEST-BED #2)

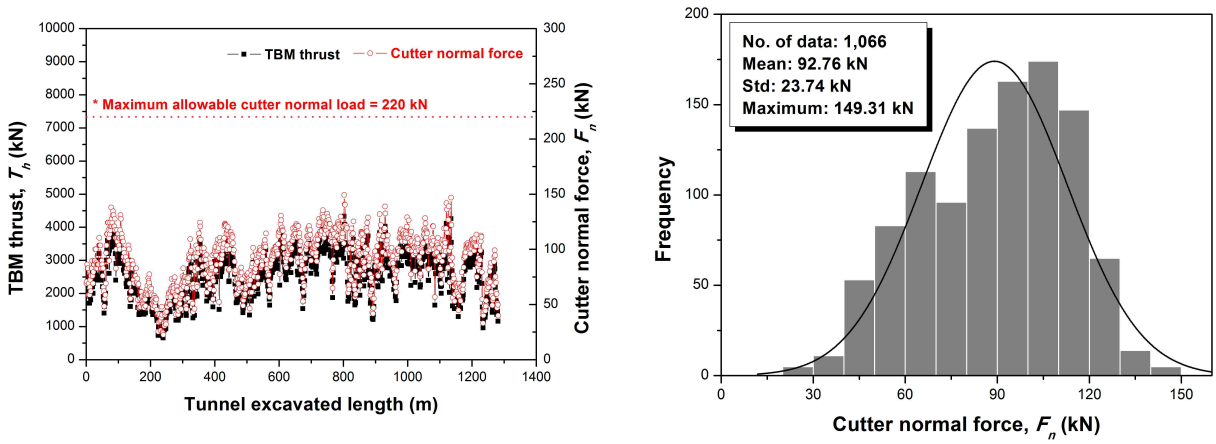
TBM의 평균 가동률은 30.44±16.31%이었으며 최대 가동률은 81.25%에 달하였다 (그림 3.2.20). TEST-BED #2 현장에서 TBM의 굴진율과 가동률을 분석한 결과, 자료의 분산은 큰 편이지만 그림 3.2.20(b)와 같이 굴진율과 가동률의 선형 비례관계를 확인할 수 있었다.



(a) 히스토그램 (b) 굴진율과 가동률의 상관관계

[그림 3.2.20] TBM 가동률의 통계분석 결과(TEST-BED #2)

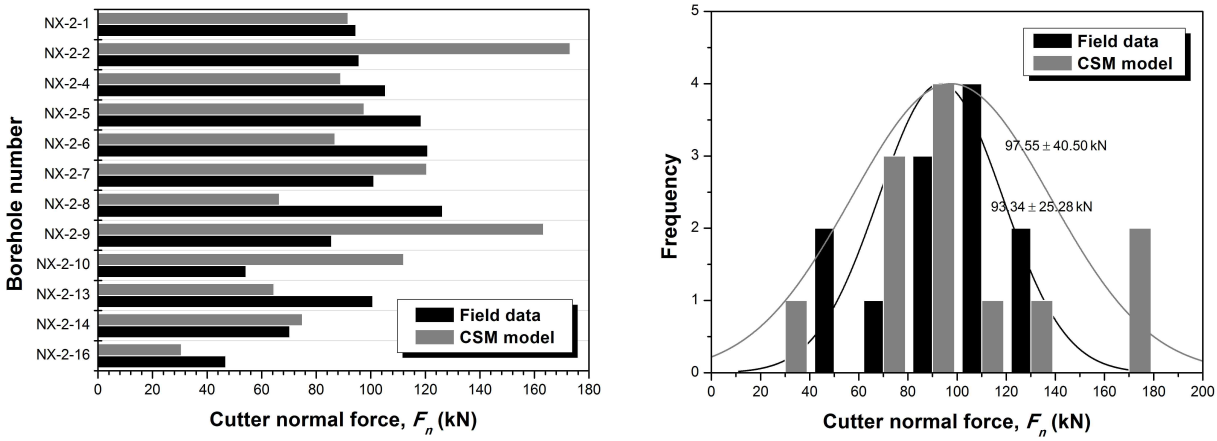
TEST-BED #2에 적용된 기존 토압식 쉴드TBM에는 토크 측정센서가 장착되지 않아서 토크를 분석하지는 못하였으나, TBM 구동 추력과 앞선 "3.1절"의 관계식들로부터 변환된 커터 연직력은 TBM의 최대 추력과 디스크커터의 최대 연직 허용하중 이하로 관리되었음을 확인하였다 (그림 3.2.21). 특히, TEST-BED #2 현장의 최대 연직 작용력은 149.31 kN로서 직경 15인치 디스크커터의 최대 허용 용량인 220 kN의 67.9%에 불과하였다.



(a) 연장별 TBM 추력 및 커터 연직 작용력 (b) 커터 연직작용력의 히스토그램

[그림 3.2.21] TBM 추력 및 커터 연직 작용력의 분석결과(TEST-BED #2)

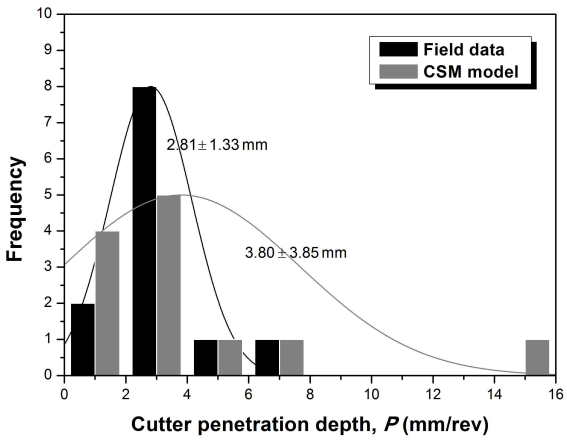
설계단계에서 수행된 표 3.2.2의 시추공 위치별로 CSM모델에 의해 커터 작용력을 분석한 결과, 암석의 압축강도가 30 MPa 이하일 경우에는 CSM모델에 의해 산출되는 커터 작용력이 음수(−)로 산출되었다. 이는 CSM모델의 도출에 사용되었던 자료들의 한계 때문인 것으로 판단되며, 향후에도 압축강도 30 MPa 이하의 연암 조건에 CSM모델을 적용하기가 어려울 것으로 사료된다. 따라서 압축강도가 30 MPa 이상으로 측정된 시추공들에 대해 CSM모델에 의한 커터 작용력의 예측결과와 실제 현장 굴진자료를 분석한 결과, 전체적인 통계 분포는 유사하였으나 NX−2−2, NX−2−8, NX−2−9 및 NX−10의 경우에는 CSM모델의 상대오차가 상당히 큰 것으로 나타났다 (그림 3.2.22).



(a) 시추공별 비교 (b) 히스토그램

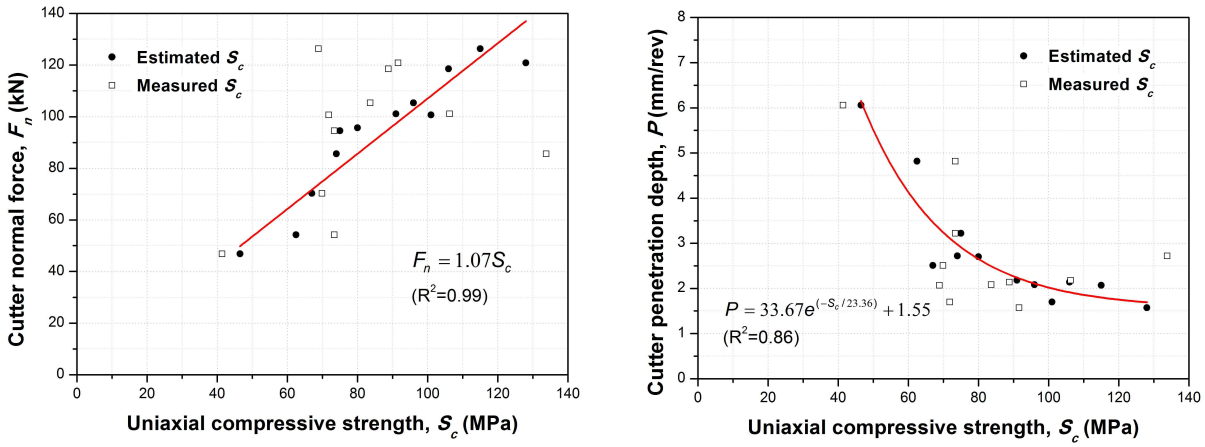
[그림 3.2.22] CSM모델에 의한 커터 작용력 예측결과와 현장 굴진자료의 비교 분석

CSM모델에 의한 디스크커터 관입깊이의 예측결과는 현장 굴진자료보다 다소 크게 산출되었다. 특히, 압축강도가 41.4 MPa인 NX−2−16 시추공의 경우 커터 관입깊이가 14.4 mm로 예측되어 실제보다 매우 큰 결과로 예측되었다 (그림 3.2.23). 이는 위의 커터 작용력 예측결과에서 언급한 바와 같이, 강도가 매우 낮은 연암 조건에서 CSM모델의 오차가 크기 때문인 것으로 사료된다.



[그림 3.2.23] CSM모델에 의한 커터 관입깊이 예측결과와 현장 굴진자료의 비교 분석

CSM모델에 사용되는 주요 입력변수인 압축강도가 예측결과에 미치는 영향도를 파악하고자, CSM모델에 의해 커터 작용력이 음수로 산정되지 않는 압축강도 30 MPa 이상의 시추공 조건별로 CSM모델로 역추정한 압축강도와 커터 연직 작용력 및 커터 관입깊이의 상관관계를 분석한 결과는 다음의 그림 3.2.24와 같다. 분석 결과, CSM모델로부터 추정된 압축강도와 커터 작용력은 뚜렷한 선형적인 상관관계를 나타내었으며, 커터 관입깊이와는 비교적 양호한 음지수 함수 관계를 나타내었다. 이상의 통계적인 상관관계들을 도출할 때 현장 굴진자료를 포함하지 않았으나, 회귀분석 이후에 현장 굴진자료들을 함께 도시한 결과들을 보면 편차는 있으나 통계적인 상관관계와 전반적으로 일치하는 경향이 나타났다. 따라서 그림 3.2.24의 상관관계들은 설계 단계에서 입력 자료가 제한적일 경우 간편 관계식들로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 단, CSM모델에는 디스크커터의 형상 치수와 간격이 입력변수로 사용되므로, 본 연구에서 적용한 직경 15인치의 디스크커터와 80 mm의 커터 간격과 유사한 조건에 국한되어 적용하는 것이 타당할 것이다.



(a) 커터 연직 작용력 (b) 커터 관입깊이

[그림 3.2.45] 암석의 일축압축강도와 커터 연직 작용력 및 커터 관입깊이의 상관관계

3. 직경 7 m 이상급 TBM 커터헤드 시작품 제작

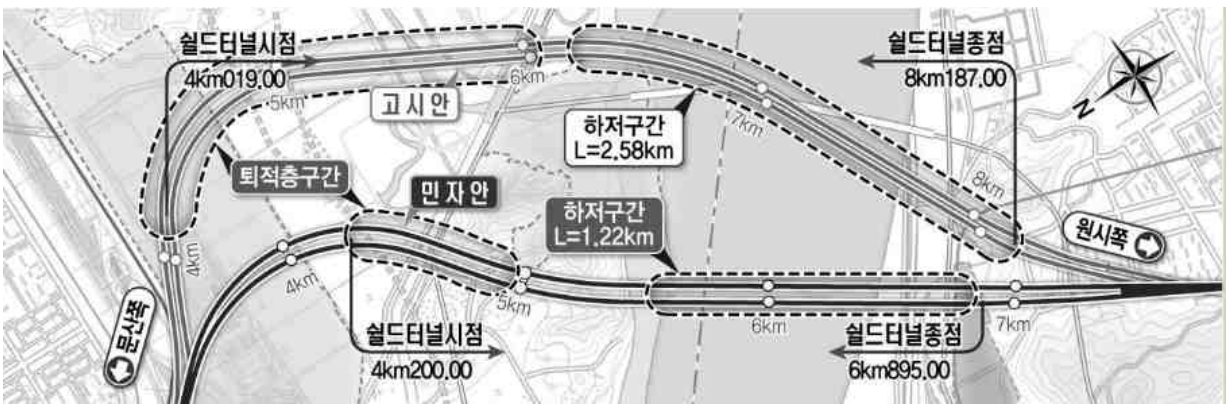
가. 제작대상 후보지의 검토 및 선정

본 연구과제에서는 개발된 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 활용하여, 실제로 직경 7 m 이상급의 커터헤드 시작품을 설계하고 제작하였다. 특히, 향후 적용이 유망한 후보지를 대상으로 직경 7 m 이상급의 TBM 커터헤드 시작품을 설계·제작할 필요가 있었다.

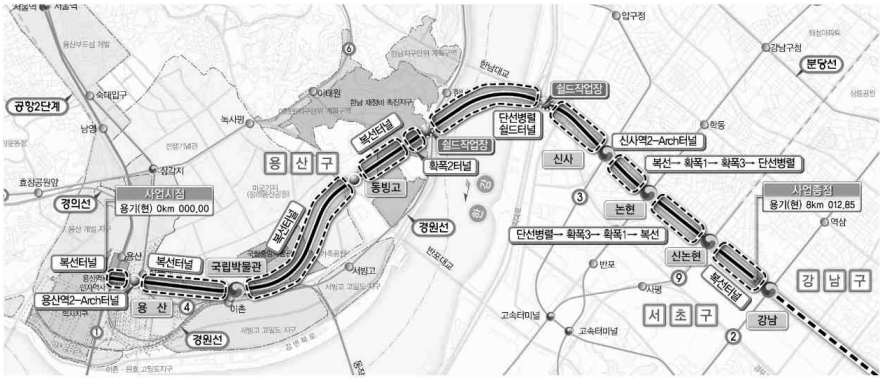
현재까지 우리나라에서 시공된 직경 7m 이상급 쉴드터널로는 서울시지하철9호선 1단계 909공구(국회의사당 통과구간), 분당선 왕십리~청담간 복선전철 3공구 하저터널(연장 1.7 km), 서울시지하철 7호선 703공구/704공구(연장 약 4.5 km), 인천국제공항철도 2-5B공구(연장 1.9 km), 서울시지하철9호선 3단계 919~921공구(연장 약 4.3 km) 등이 있다.

최근 들어 총 연장 32.6 km인 부전-마산 복선전철의 낙동강 하저터널(쉴드TBM 2대, 낙동간 하저 5 km 구간)과 총 연장 5.94 km인 인천국제공항 제2여객터미널 연결철도 건설공사의 제3활주로 하부 통과구간(연장 1.15 km)이 실시설계가 완료되어 착공되었다. 그러나 이들 현장은 각각 초연약지반 및 활주로 하부를 통과하는 구간으로서 외국산 신규 쉴드TBM의 도입이 기결정되었으며, 또한 점토 및 토사지반 구간으로서 본 연구과제에서 중점을 두고 있는 복합지반 조건에 해당하지 않는다.

따라서 현재 시점에서 직경 7 m 이상의 복합지반 쉴드TBM의 적용이 유망한 현장으로는 “대곡-소사 복선전철” 한강 하저터널 및 “신분당선 연장선” 한강 하저터널을 들 수 있다 (그림 3.3.1 및 그림 3.3.2).



[그림 3.3.1] 대곡-소사 복선전철 한강 하저구간 노선도



[그림 3.3.2] 신분당선 연장선(용산–강남 구간) 노선도

상기 2개 현장의 실시설계에 고려된 한강하저 구간 쉴드터널의 제원(굴착외경)과 시공연장은 표 3.3.1과 같이 거의 유사한 것을 알 수 있다.

[표 3.3.1] 대곡–소사 복선전철 및 신분당선 연장선 한강 하저터널의 제원

현장명	터널 외경(m)	터널 시공연장(km)
대곡–소사 복선전철	8.20	2.86
신분당선 연장선	8.21	3.00

동일한 한강 하저구간이라는 특성으로 인해, 상기 2개 현장의 지반조건 역시 편마암으로 구성되는 암반과 일부 토사지반이 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 본 연구과제에서 각 현장별로 채취된 시추코어(그림 3.3.3)에 대해 TBM 설계를 위해 실시한 시험결과는 다음의 표 3.3.2와 같다. 각 현장별로 측정된 암석의 최대 압축강도는 약 44 MPa의 차이를 나타내었으나, NTNU시험에 의한 DRI(Drilling Rate Index)의 차이는 5로서 비슷한 굴착저항성을 나타내었다. 그러나 석영함유량 등의 차이로 인해 CLI(Cutter Life Index)는 7정도의 차이를 보였다.



[그림 3.3.3] 대곡–소사 복선전철 및 신분당선 연장선 한강 하저구간의 시추코어

[표 3.3.2] 대곡-소사 복선전철 및 신분당선 연장선 시추코어의 역학적 특성

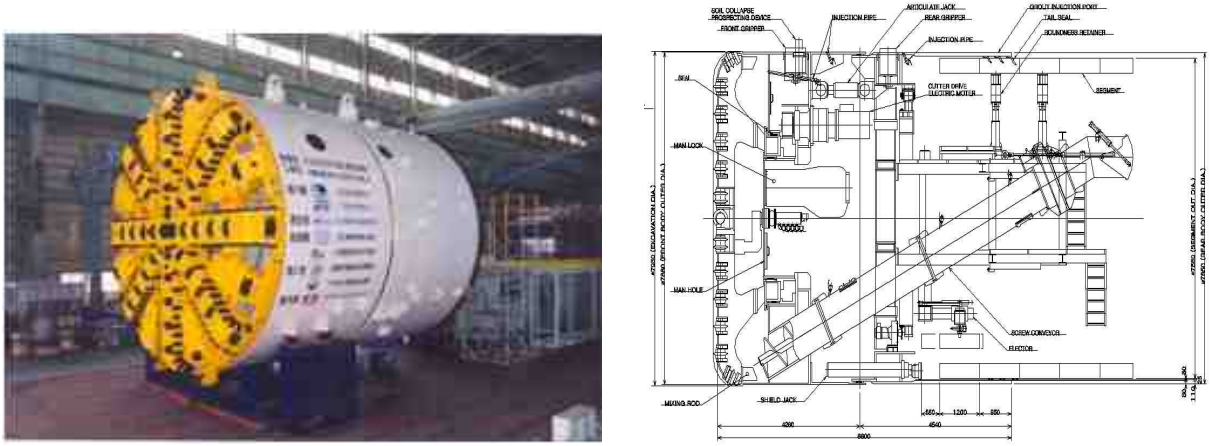
현장명	공번호	일축압축강도 (MPa)	간접인장강도 (MPa)	NTNU시험결과				
				S_{20}	SJ	AVS	DRI	CLI
대곡-소사 복선전철	STB-14	130.0	11.0	35.5	3.0	2.0	29.0	16.2
신분당선 연장선	TB-35	174.5	17.45	35.1	1.0	3.0	24.0	9.1
	TB-28	66.3	6.63	48.3	9.5	3.0	48.0	21.6

그러나 상기 2개 현장의 착공은 여러 가지 외부 요인들로 인하여 지연되고 있는 실정이다. 대곡-소사 복선전철은 국토교통부와 기획재정부간의 철도 운영형식과 예산에 대한 이견으로 인해 착공이 지연되고 있는 반면, 신분당선 연장선 용산-강남 구간은 용산 미군기지의 이전이 불투명한 관계로서 현재 강남 구간만 시공이 이루어지고 있다. 여러 관계자들의 의견을 종합할 때, 용산 미군기지의 이전이 더욱 불확실한 것으로 판단되어 본 연구과제에서는 대곡-소사 복선전철 한강 하저구간을 대상으로 TBM 커터헤드 시작품을 제작하기로 결정하였다. 그러나 굴착외경이나 지반조건의 유사성을 고려할 때 향후 신분당선 연장선 구간에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

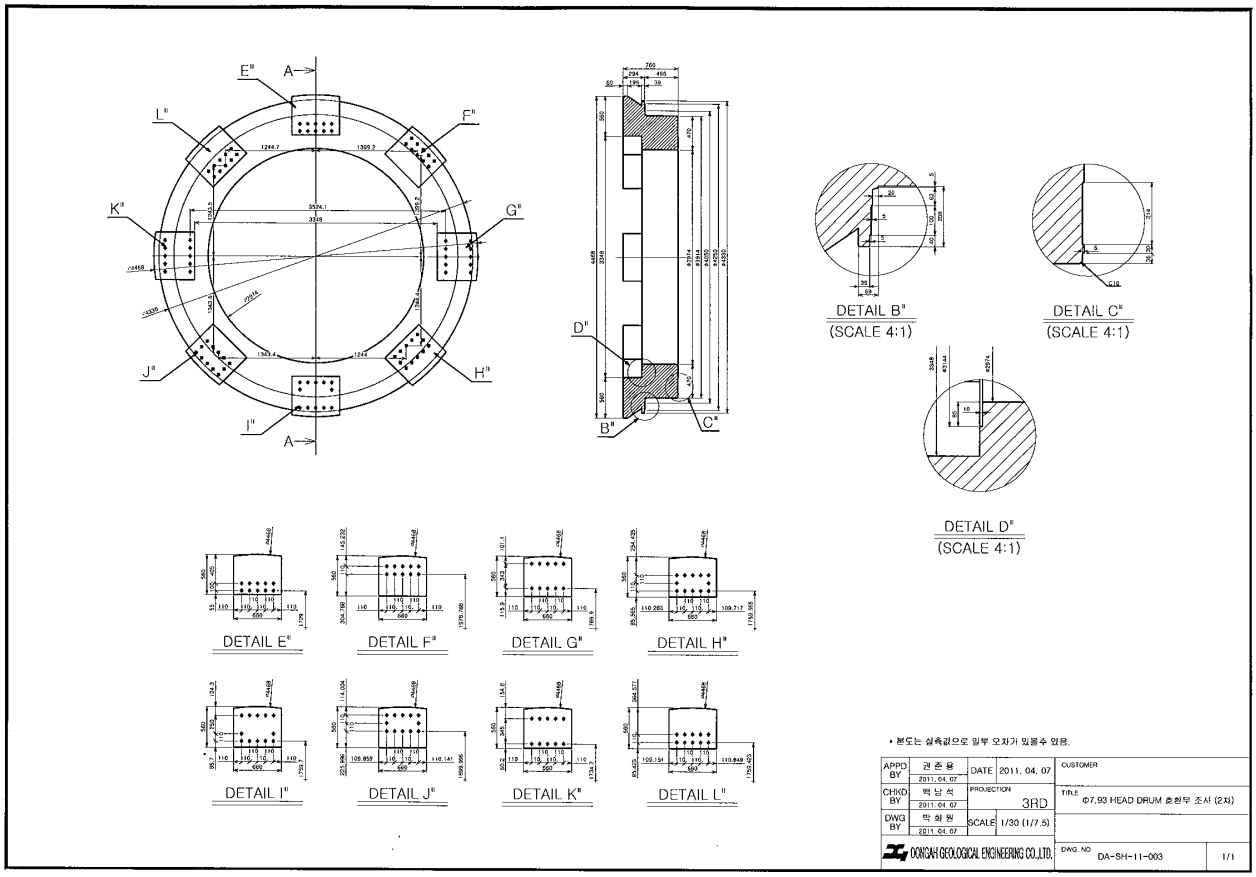
대곡-소사 복선전철 한강 하저터널을 대상으로 금번에 제작한 직경 8.2 m의 복합지반용 커터헤드는 향후 실제 적용을 위하여, 현재 서울시지하철3단계 건설공사의 920공구에 적용되고 있는 쉴드TBM의 재활용을 고려하였다. 서울시지하철 920공구에 사용되고 있는 쉴드TBM의 제원과 원 기본도면은 각각 표 3.3.3 및 그림 3.3.4와 같으며, 굴착외경은 0.27 cm가 차이가 나지만 쉴드 스킨 플레이트를 변경하여 재활용이 가능한 범위이다. 따라서 본 연구과제에서 사전에 조사한 쉴드TBM의 커터헤드 호환부(그림 3.3.5)에 적용될 수 있도록 커터헤드를 제작하였다. 이러한 사항을 고려한 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작 과정을 다음의 “다”절에서 기술하였다.

[표 3.3.3] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품이 장착될 재활용 대상 쉴드TBM의 제원

구분	제작사	외경	장비유형	장비길이	커터헤드 회전속도	최대 추력	최대 토크
제원	일본 Kawasaki	7.93 m	토압식	8.8 m	3 RPM	58,000 kN	9,500 kN·m



[그림 3.3.4] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 적용 대상 쉴드TBM의 기본 도면



[그림 3.3.5] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 적용 대상 쉴드TBM의 호환부 도면

나. 직경 8.2 m 쉴드TBM 커터헤드 시작품의 설계

(1) 설계검토 조건

앞선 "가"절에서 선정한 후보지인 대곡-소사 복선전철 한강 하저터널을 대상으로 본 연구과제 개발한 TBM 커터헤드 최적 설계시스템인 TARC-TOD를 활용하여 직경 8.2 m 복합지반용 쉴드TBM의 커터헤드를 설계하였다. 특히, 표 3.3.4와 같이 디스크커터의 직경(17인치 및 19인치)과 디스크커터의 간격(70 mm, 80 mm, 90 mm)으로 구분하여 6가지 조건에 대한 TBM 커터헤드 설계를 실시하였다. 디스크커터의 직경에 따른 최대 허용 하중은 17인치 디스크커터의 경우 245 kN, 그리고 19인치 디스크커터의 경우에는 300 kN으로 적용하여 설계 검토를 실시하였다. 이때 6가지 조건에 대해 D/B로부터 도출된 커터헤드의 설계조건은 표 3.3.5와 같다.

[표 3.3.4] 디스크커터의 직경과 디스크커터 간격에 따른 설계검토 조건

설계조건	디스크커터 직경 (inches / mm)	디스크커터 간격 (mm)
1-1	17 / 432	70
1-2	17 / 432	80
1-3	17 / 432	90
2-1	19 / 483	70
2-2	19 / 483	80
2-3	19 / 483	90

[표 3.3.5] 디스크커터의 직경과 디스크커터 간격에 따른 설계검토 조건

설계항목	적용값
스포크의 각도	45°
스포크의 폭	660 mm
게이지부의 선형 거리	0.2 m
페이스커터부의 선형 거리	3.9 m
커터비트의 폭 (Wc)	120 mm
커터비트의 높이 (Hc)	80 mm
커터비트의 두께 (Tc)	150 mm
개구율	37 %
디스크커터와 커터비트의 오프셋	40 mm

(2) 설계조건별 검토결과

기본적인 1차 검토사항인 디스크커터의 개수 및 디스크커터 간격은 TARC-TOD의 모듈로 탑재된 KICT 데이터베이스 모듈에 의하여 예측 산정하였다. 예측 결과, 디스크커터의 개수는 53개이며 디스크커터 간격은 80 mm로 예측되었다. 또한 커터헤드 단면의 개구율 입력 변수 사항은 마찬가지로 유사한 지반조건에 적용되었던 기존 TBM들의 데이터베이스 자료들을 분석한 결과, 후보지에 대한 최적의 개구율은 36.7%로 산정되었다. 이상과 같은 공통적인 설계정보들을 표 3.3.4에서 설정한 6개 설계조건에 대해 적용하여 설계검토를 실시하였으며 각 설계조건별로 얻어진 결과들은 다음과 같다.

■ Case 1-1

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.6)

[표 3.3.6] 설계 입력자료(Case 1-1)

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**70**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**216**	mm	17″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. TBM 최대 사양의 검토

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.7 및 표 3.3.8에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 8 mm/rev로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 10 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.7] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	349	N.G	18513	O.K	24	3094	O.K	2.19	710	O.K
14	333	N.G	17653	O.K	22	2921	O.K	2.36	721	O.K
13	317	N.G	16794	O.K	21	2748	O.K	2.52	726	O.K
12	301	N.G	15935	O.K	20	2574	O.K	2.69	724	O.K
11	284	N.G	15075	O.K	18	2401	O.K	2.85	717	O.K
10	268	N.G	14216	O.K	17	2227	O.K	3.02	704	O.K
9	252	N.G	13356	O.K	16	2054	O.K	3.38	685	O.K
8	**236**	**O.K**	**12497**	**O.K**	**14**	**1881**	**O.K**	**3.35**	**659**	**O.K**
7	220	O.K	11638	O.K	13	1707	O.K	3.51	628	O.K
6	203	O.K	10778	O.K	12	1534	O.K	3.68	591	O.K
5	187	O.K	9919	O.K	10	1360	O.K	3.84	547	O.K
4	171	O.K	9059	O.K	9	1187	O.K	4.01	498	O.K
3	155	O.K	8200	O.K	8	1014	O.K	4.17	443	O.K
2	139	O.K	7341	O.K	6	840	O.K	4.34	382	O.K
1	122	O.K	6481	O.K	5	667	O.K	4.5	314	O.K

[표 3.3.8] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	289	N.G	15294	O.K	55	7136	N.G	2.19	1638	O.K
14	279	N.G	14787	O.K	51	6657	N.G	2.36	1643	O.K
13	269	N.G	14260	O.K	47	6179	N.G	2.52	1632	O.K
12	259	N.G	13712	O.K	44	5702	N.G	2.69	1605	O.K
11	248	N.G	13139	O.K	40	5224	N.G	2.85	1561	O.K
10	**237**	**O.K**	**12537**	**O.K**	**36**	**4748**	**O.K**	**3.02**	**1500**	**O.K**
9	225	O.K	11903	O.K	33	4271	O.K	3.38	1423	O.K
8	212	O.K	11231	O.K	29	3795	O.K	3.35	1330	O.K
7	198	O.K	10514	O.K	25	3319	O.K	3.51	1221	O.K
6	184	O.K	9742	O.K	22	2844	O.K	3.68	1095	O.K
5	168	O.K	8900	O.K	18	2369	O.K	3.84	953	O.K
4	150	O.K	7967	O.K	15	1895	O.K	4.01	795	O.K
3	130	O.K	6905	O.K	11	1420	O.K	4.17	621	O.K
2	106	O.K	5642	O.K	7	947	O.K	4.34	430	O.K
1	75	O.K	3993	O.K	4	473	O.K	4.5	223	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

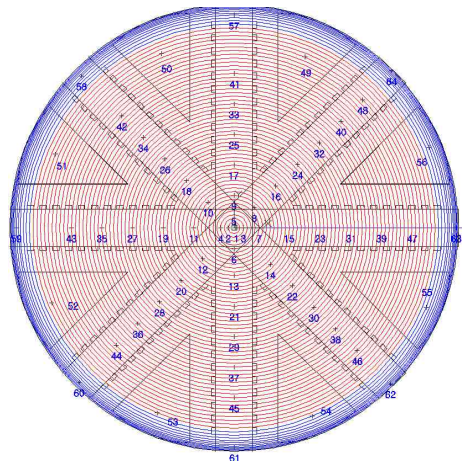
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.9와 같이 11.57 m/day로 산출되었다.

[표 3.3.9] 1일 굴진율 산출 결과(Case 1-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
15	2.19	1.97	14.21	88.79	355.17	N.G	O.K	O.K	O.K
14	2.36	1.98	14.26	89.11	356.44	N.G	O.K	O.K	O.K
13	2.52	1.97	14.17	88.54	354.14	N.G	O.K	O.K	O.K
12	2.69	1.93	13.93	87.07	348.29	N.G	O.K	O.K	O.K
11	2.85	1.88	13.55	84.72	338.87	N.G	O.K	O.K	O.K
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	N.G	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	N.G	O.K	O.K	O.K
8	**3.35**	**1.61**	**11.57**	**72.3**	**289.22**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K
2	4.34	0.52	3.75	23.42	93.69	O.K	O.K	O.K	O.K
1	4.5	0.27	1.95	12.16	48.63	O.K	O.K	O.K	O.K

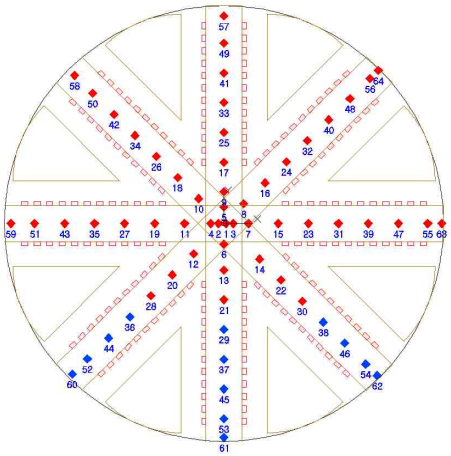
③ 디스크커터 배열 설계

본 연구과제에서 개발한 디스크커터 배열 설계방법에 의하여, 디스크커터들을 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열하는 방법의 두 가지 방법에 의해 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 설계결과, 주스포크만 사용한 배열설계 결과는 그림 3.3.6과 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.7에 해당한다. 특히 표 3.3.9는 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과값을 보여주고 있다.



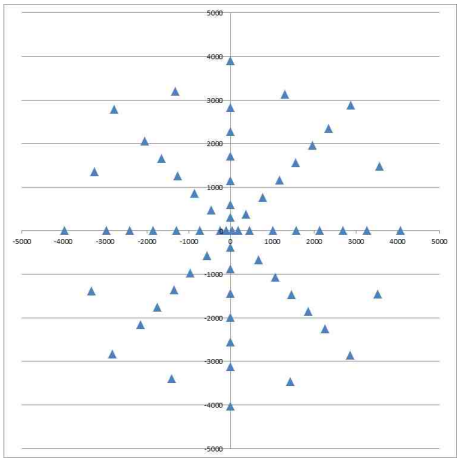
평면부
곡면부

(a) 디스크커터의 절삭궤적

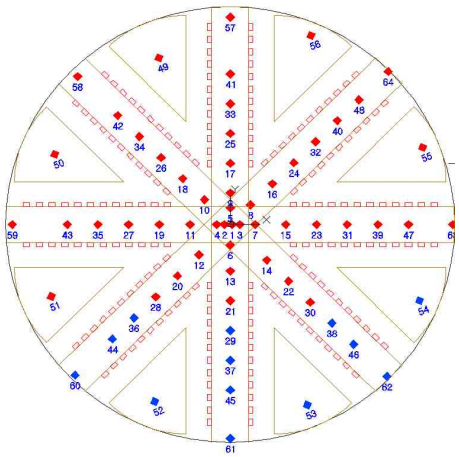


(b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.6] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 1-1)



(a) 디스크커터 배열 평면도



(b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.7] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 1-1)

[표 3.3.9] Case 1-1조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current(Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
49	90	3395	0	70	1299	3137	0
50	135	3465	0	70	-1326	3201	0
51	180	3535	0	70	-3266	1353	0
52	225	3605	0	70	-3331	-1380	0
53	270	3675	0	70	-1406	-3395	0
54	315	3742	6	70	1432	-3457	-2
55	0	3804	15	60	3514	-1456	-14
56	45	3856	23	56	3563	1476	-32
57	90	3906	31	52	0	3906	-57
58	135	3941	37	48	-2787	2787	-81
59	180	3978	44	45	-3978	0	-112
60	225	4006	50	41	-2833	-2833	-143
61	270	4028	55	39	0	-4028	-171
62	315	4046	60	36	2861	-2861	-200
63	0	4063	65	33	4063	0	-231
64	45	4076	70	31	2882	2882	-263

* 커터번호 49~56 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 56~64 : 주스포크에 배열

■ Case 1-2

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.10)

[표 3.3.10] 설계 입력자료(Case 1-2)

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**80**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**216**	mm	17″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. TBM 최대 사양의 검토

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.11 및 표 3.3.12에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 8 mm/rev 로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 9 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.11] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter nomal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
14	337	N.G	17844	O.K	23	2960	O.K	2.36	731	O.K
13	320	N.G	16985	O.K	21	2787	O.K	2.52	736	O.K
12	304	N.G	16125	O.K	20	2613	O.K	2.69	735	O.K
11	288	N.G	15266	O.K	19	2440	O.K	2.85	729	O.K
10	272	N.G	14407	O.K	17	2266	O.K	3.02	716	O.K
9	256	N.G	13547	O.K	16	2093	O.K	3.38	698	O.K
8	**239**	**O.K**	**12688**	**O.K**	**15**	**1920**	**O.K**	**3.35**	**673**	**O.K**
7	223	O.K	11828	O.K	13	1746	O.K	3.51	642	O.K
6	207	O.K	10969	O.K	12	1573	O.K	3.68	606	O.K
5	191	O.K	10110	O.K	11	1399	O.K	3.84	563	O.K
4	175	O.K	9250	O.K	9	1226	O.K	4.01	515	O.K
3	158	O.K	8391	O.K	8	1053	O.K	4.17	460	O.K
2	142	O.K	7532	O.K	7	879	O.K	4.34	399	O.K
1	126	O.K	6672	O.K	5	706	O.K	4.5	333	O.K

[표 3.3.12] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force(kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
14	299	N.G	15834	O.K	55	7129	N.G	2.36	1760	O.K
13	288	N.G	15271	O.K	51	6617	N.G	2.52	1748	O.K
12	277	N.G	14683	O.K	47	6106	N.G	2.69	1718	O.K
11	265	N.G	14069	O.K	43	5595	N.G	2.85	1671	O.K
10	253	N.G	13425	O.K	39	5084	N.G	3.02	1606	O.K
9	**240**	**O.K**	**12746**	**O.K**	**35**	**4574**	**O.K**	**3.38**	**1524**	**O.K**
8	227	O.K	12027	O.K	31	4064	O.K	3.35	1425	O.K
7	212	O.K	11259	O.K	27	3555	O.K	3.51	1307	O.K
6	197	O.K	10432	O.K	23	3046	O.K	3.68	1173	O.K
5	180	O.K	9531	O.K	19	2537	O.K	3.84	1021	O.K
4	161	O.K	8531	O.K	16	2029	O.K	4.01	851	O.K
3	140	O.K	7394	O.K	12	1521	O.K	4.17	665	O.K
2	114	O.K	6042	O.K	8	1014	O.K	4.34	460	O.K
1	81	O.K	4275	O.K	4	507	O.K	4.5	239	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

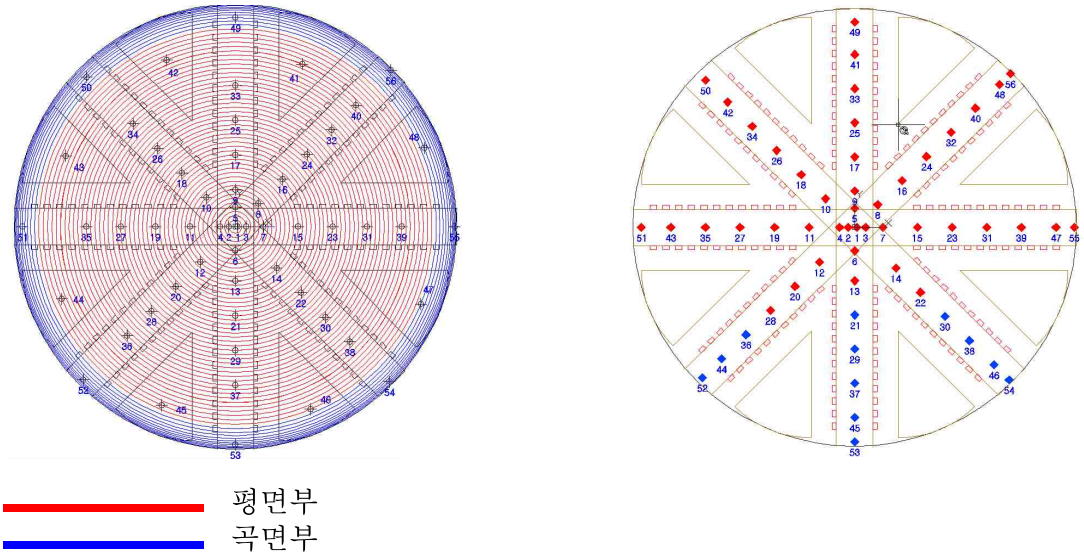
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.13과 같이 11.57 m/day로 산출되었다.

[표 3.3.13] 1일 굴진율 산출 결과(Case 1-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
13	2.52	1.97	14.17	88.54	354.14	N.G	O.K	O.K	O.K
12	2.69	1.93	13.93	87.07	348.29	N.G	O.K	O.K	O.K
11	2.85	1.88	13.55	84.72	338.87	N.G	O.K	O.K	O.K
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	N.G	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	N.G	O.K	O.K	O.K
8	**3.35**	**1.61**	**11.57**	**72.3**	**289.22**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K
2	4.34	0.52	3.75	23.42	93.69	O.K	O.K	O.K	O.K
1	4.5	0.27	1.95	12.16	48.63	O.K	O.K	O.K	O.K

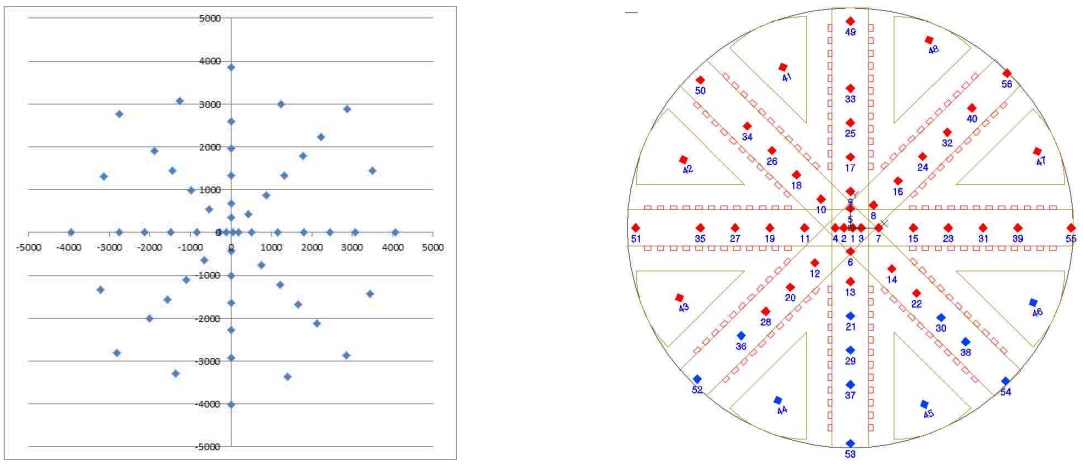
③ 디스크커터 배열 설계

본 연구과제에서 개발한 디스크커터 배열 설계방법에 의하여, 디스크커터들을 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열하는 방법의 두 가지 방법에 의해 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 설계결과, 주스포크만 사용한 배열설계 결과는 그림 3.3.8과 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.9에 해당한다. 특히 표 3.3.14는 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과값을 보여주고 있다.



(a) 디스크커터의 절삭궤적 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.8] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 1-2)



(a) 디스크커터 배열 평면도 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.9] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 1-2)

[표 3.2.14] Case 1-2조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
41	90	3240	0	80	1240	2993	0
42	135	3320	0	80	-1271	3067	0
43	180	3400	0	80	-3141	1301	0
44	225	3480	0	80	-3215	-1332	0
45	270	3560	0	80	-1362	-3289	0
46	315	3640	0	80	1393	-3363	0
47	0	3721	3	80	3438	-1424	-1
48	45	3790	13	68	3501	1450	-10
49	90	3850	22	63	0	3850	-29
50	135	3900	30	59	-2758	2758	-54
51	180	3946	38	54	-3946	0	-85
52	225	3983	45	50	-2816	-2816	-117
53	270	4015	52	46	0	-4015	-154
54	315	4039	58	43	2856	-2856	-188
55	0	4060	64	40	4060	0	-225
56	45	4073	69	37	2880	2880	-257

* 커터번호 41~48 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 49~56 : 주스포크에 배열

■ Case 1-3

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.15)

[표 3.3.15] 설계 입력자료(Case 1-3)

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**90**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**216**	mm	17″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. TBM 최대 사양의 검토

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.16 및 표 3.3.17에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 8 mm/rev 로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 8 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.16] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
14	340	N.G	18035	O.K	23	2999	O.K	2.36	740	O.K
13	324	N.G	17176	O.K	22	2826	O.K	2.52	746	O.K
12	308	N.G	16316	O.K	20	2652	O.K	2.69	746	O.K
11	292	N.G	15457	O.K	19	2479	O.K	2.85	740	O.K
10	275	N.G	14597	O.K	18	2306	O.K	3.02	729	O.K
9	259	N.G	13738	O.K	16	2132	O.K	3.38	711	O.K
8	**243**	**O.K**	**12879**	**O.K**	**15**	**1959**	**O.K**	**3.35**	**687**	**O.K**
7	227	O.K	12019	O.K	14	1785	O.K	3.51	657	O.K
6	211	O.K	11160	O.K	12	1612	O.K	3.68	621	O.K
5	194	O.K	10300	O.K	11	1439	O.K	3.84	579	O.K
4	178	O.K	9441	O.K	10	1265	O.K	4.01	531	O.K
3	162	O.K	8582	O.K	8	1092	O.K	4.17	477	O.K
2	146	O.K	7722	O.K	7	918	O.K	4.34	417	O.K
1	129	O.K	6863	O.K	6	745	O.K	4.5	351	O.K

[표 3.3.17] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 1-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
13	303	N.G	16079	O.K	53	6967	N.G	2.52	1840	N.G
12	292	N.G	15460	O.K	49	6429	N.G	2.69	1809	N.G
11	280	N.G	14814	O.K	45	5891	N.G	2.85	1760	O.K
10	267	N.G	14136	O.K	41	5353	N.G	3.02	1691	O.K
9	253	N.G	13421	O.K	37	4816	O.K	3.38	1605	O.K
8	**239**	**O.K**	**12663**	**O.K**	**33**	**4279**	**O.K**	**3.35**	**1500**	**O.K**
7	224	O.K	11855	O.K	29	3743	O.K	3.51	1377	O.K
6	207	O.K	10984	O.K	25	3207	O.K	3.68	1235	O.K
5	189	O.K	10035	O.K	20	2671	O.K	3.84	1075	O.K
4	169	O.K	8982	O.K	16	2136	O.K	4.01	896	O.K
3	147	O.K	7785	O.K	12	1602	O.K	4.17	700	O.K
2	120	O.K	6361	O.K	8	1067	O.K	4.34	485	O.K
1	85	O.K	4502	O.K	4	533	O.K	4.5	252	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

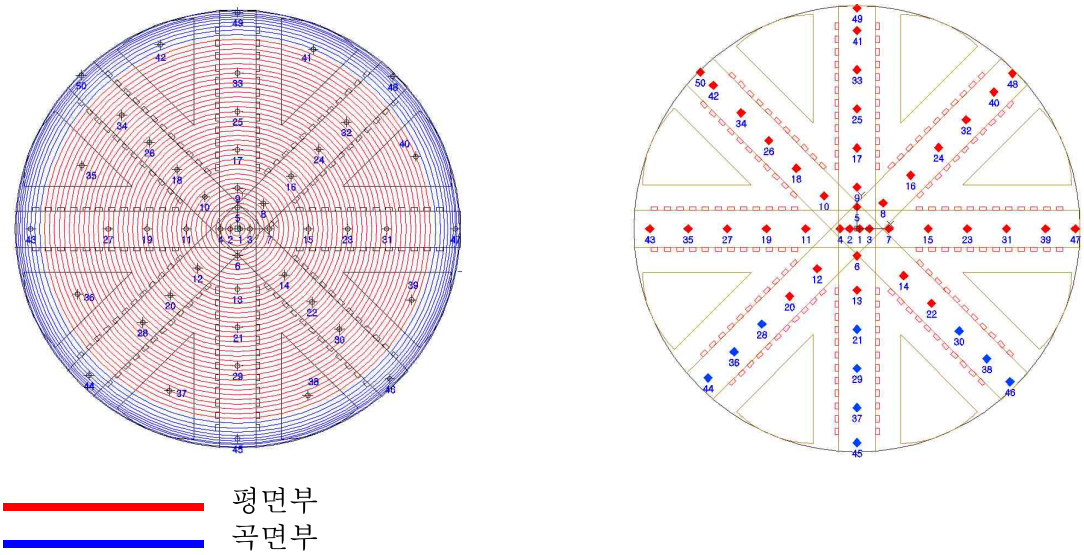
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.18과 같이 11.57 m/day로 산출되었다.

[표 3.3.18] 1일 굴진율 산출 결과(Case 1-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
11	2.85	1.88	13.55	84.72	338.87	N.G	O.K	O.K	O.K
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	N.G	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	N.G	O.K	O.K	O.K
8	**3.35**	**1.61**	**11.57**	**72.3**	**289.22**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K
2	4.34	0.52	3.75	23.42	93.69	O.K	O.K	O.K	O.K
1	4.5	0.27	1.95	12.16	48.63	O.K	O.K	O.K	O.K

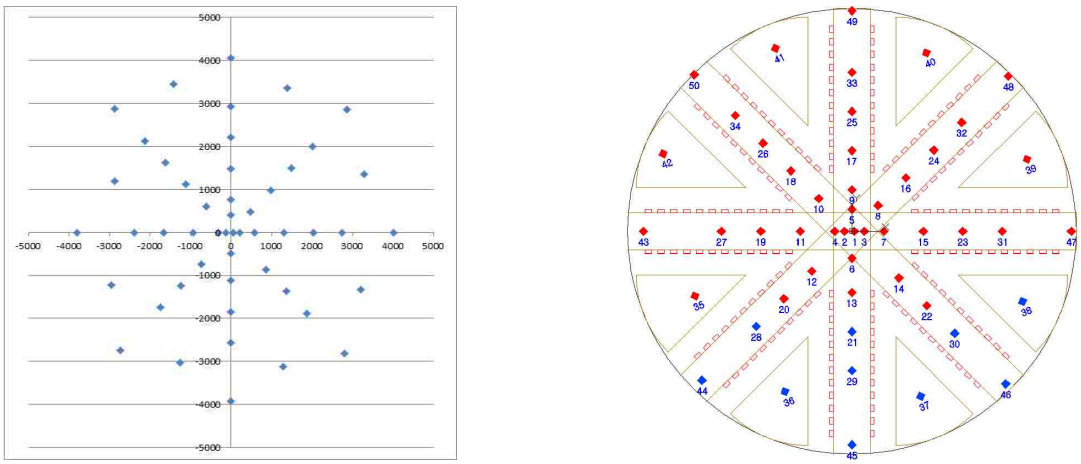
③ 디스크커터 배열 설계

본 연구과제에서 개발한 디스크커터 배열 설계방법에 의하여, 디스크커터들을 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열하는 방법의 두 가지 방법에 의해 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 설계결과, 주스포크만 사용한 배열설계 결과는 그림 3.3.10과 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.11에 해당한다. 특히 표 3.3.19는 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과값을 보여주고 있다.



(a) 디스크커터의 절삭궤적 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.10] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 1-3)



(a) 디스크커터 배열 평면도 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.11] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 1-3)

[표 3.3.19] Case 1-3조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
35	180	3105	0	90	-2869	1188	0
36	225	3195	0	90	-2952	-1223	0
37	270	3285	0	90	-1257	-3035	0
38	315	3375	0	90	1292	-3118	0
39	0	3465	0	90	3201	-1326	0
40	45	3555	0	90	3284	1360	0
41	90	3645	0	90	1395	3368	0
42	135	3735	5	90	-1429	3451	-2
43	180	3810	16	76	-3810	0	-15
44	225	3875	26	69	-2740	-2740	-40
45	270	3929	35	64	0	-3929	-72
46	315	3973	43	58	2809	-2809	-107
47	0	4011	51	54	4011	0	-148
48	45	4039	58	49	2856	2856	-188
49	90	4060	64	45	0	4060	-225
50	135	4076	70	41	-2882	2882	-263

* 커터번호 35~42 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 43~50: 주스포크에 배열

■ Case 2-1

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.20)

[표 3.3.20] Case 2-1 적용을 위한 설계 입력 자료

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**70**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**241**	mm	19″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. TBM 최대 사양의 검토

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.21 및 표 3.3.22에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 11 mm/rev 로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 15 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.21] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter nomal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
14	333	N.G	17653	O.K	22	2921	O.K	2.36	721	O.K
13	317	N.G	16794	O.K	21	2748	O.K	2.52	726	O.K
12	301	N.G	15935	O.K	20	2574	O.K	2.69	724	O.K
11	**284**	**O.K**	**15075**	**O.K**	**18**	**2401**	**O.K**	**2.85**	**717**	**O.K**
10	268	O.K	14216	O.K	17	2227	O.K	3.02	704	O.K
9	252	O.K	13356	O.K	16	2054	O.K	3.38	685	O.K
8	236	O.K	12497	O.K	14	1881	O.K	3.35	659	O.K
7	220	O.K	11638	O.K	13	1707	O.K	3.51	628	O.K
6	203	O.K	10778	O.K	12	1534	O.K	3.68	591	O.K
5	187	O.K	9919	O.K	10	1360	O.K	3.84	547	O.K
4	171	O.K	9059	O.K	9	1187	O.K	4.01	498	O.K
3	155	O.K	8200	O.K	8	1014	O.K	4.17	443	O.K
2	139	O.K	7341	O.K	6	840	O.K	4.34	382	O.K
1	122	O.K	6481	O.K	5	667	O.K	4.5	314	O.K

[표 3.3.22] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter nomal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	**205**	**O.K**	**10867**	**O.K**	**37**	**4786**	**O.K**	**2.19**	**1099**	**O.K**
14	198	O.K	10506	O.K	34	4465	O.K	2.36	1102	O.K
13	191	O.K	10131	O.K	32	4145	O.K	2.52	1095	O.K
12	184	O.K	9740	O.K	29	3825	O.K	2.69	1076	O.K
11	176	O.K	9332	O.K	27	3505	O.K	2.85	1047	O.K
10	168	O.K	8904	O.K	24	3185	O.K	3.02	1006	O.K
9	159	O.K	8453	O.K	22	2865	O.K	3.38	955	O.K
8	150	O.K	7976	O.K	20	2546	O.K	3.35	893	O.K
7	141	O.K	7466	O.K	17	2227	O.K	3.51	819	O.K
6	131	O.K	6917	O.K	15	1908	O.K	3.68	735	O.K
5	119	O.K	6319	O.K	12	1590	O.K	3.84	640	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

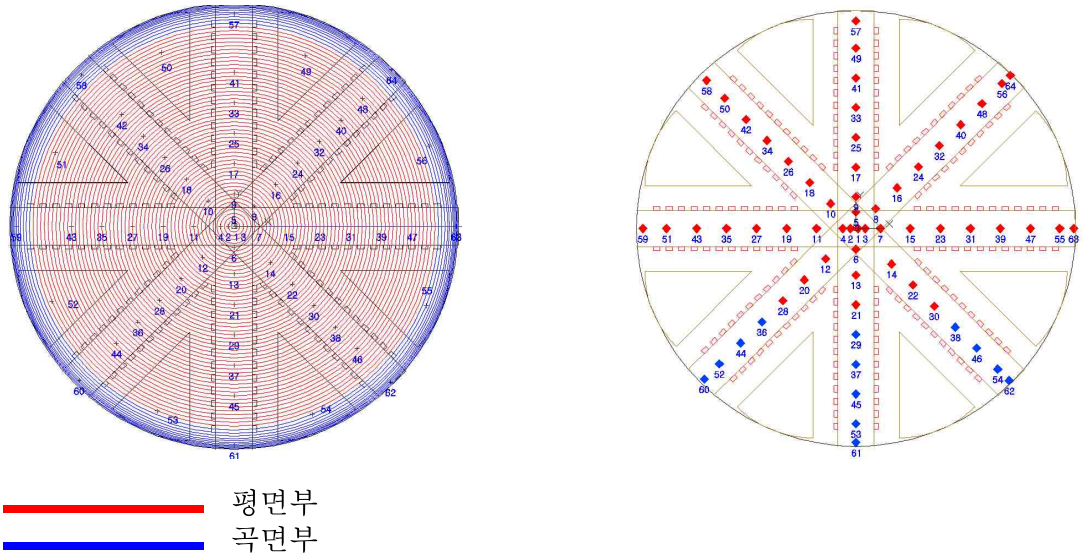
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.23과 같이 13.55 m/day로 산출되었다.

[표 3.3.23] 1일 굴진율 산출 결과(Case 2-1)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
13	2.52	1.97	14.17	88.54	354.14	N.G	O.K	O.K	O.K
12	2.69	1.93	13.93	87.07	348.29	N.G	O.K	O.K	O.K
11	**2.85**	**1.88**	**13.55**	**84.72**	**338.87**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	O.K	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	O.K	O.K	O.K	O.K
8	3.35	1.61	11.57	72.3	289.22	O.K	O.K	O.K	O.K
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K

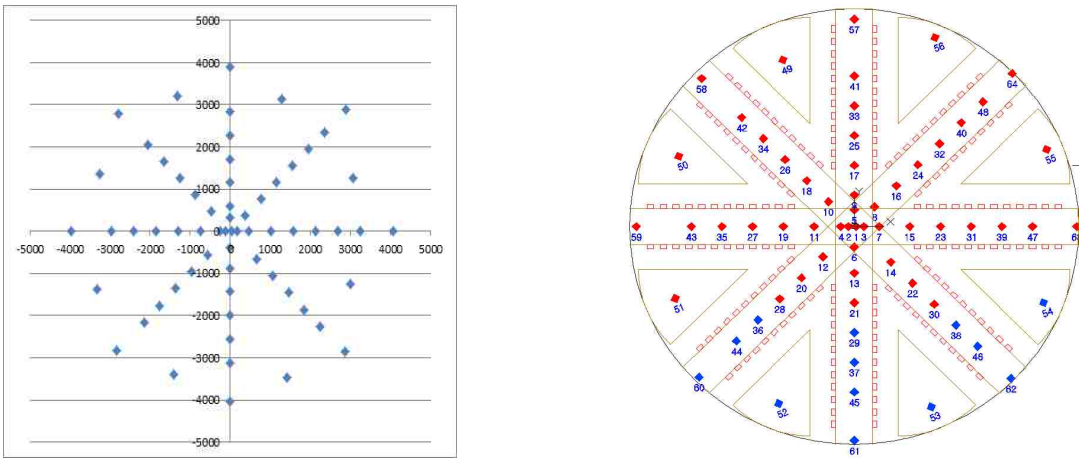
③ 디스크커터 배열 설계

TBM 커터헤드 상의 디스크커터 배열 설계를 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열한 방법 등 두 가지 방법에 의한 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 그 결과 주스포크만 사용한 경우에 해당하는 보조스포크 배열이 없는 경우는 그림 3.3.12와 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.13에 해당한다. 특히 표 3.3.24는 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과 값을 보여주고 있다.



(a) 디스크커터의 절삭궤적 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.12] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 2-1)



(a) 디스크커터 배열 평면도 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.13] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 2-1)

[표 3.3.24] Case 2-1조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
49	90	3395	0	70	3007	-1246	0
50	135	3465	0	70	3072	1272	0
51	180	3535	0	70	1299	3137	0
52	225	3605	0	70	-1326	3201	0
53	270	3675	0	70	-3266	1353	0
54	315	3742	6	70	-3331	-1380	-2
55	0	3804	15	60	-1406	-3395	-14
56	45	3856	23	56	1432	-3457	-32
57	90	3906	31	52	0	3906	-57
58	135	3941	37	48	-2787	2787	-81
59	180	3978	44	45	-3978	0	-112
60	225	4006	50	41	-2833	-2833	-143
61	270	4028	55	39	0	-4028	-171
62	315	4046	60	36	2861	-2861	-200
63	0	4063	65	33	4063	0	-231
64	45	4076	70	31	2882	2882	-263

* 커터번호 49~56 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 57~64 : 주스포크에 배열

■ Case 2-2

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.25)

[표 3.3.25] 설계 입력자료(Case 2-2)

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**80**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**241**	mm	19″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. TBM 최대 사양의 검토

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.26 및 표 3.3.27에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 11 mm/rev 로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 13 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.26] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	353	N.G	18704	O.K	24	3134	O.K	2.19	719	O.K
14	337	N.G	17844	O.K	23	2960	O.K	2.36	731	O.K
13	320	N.G	16985	O.K	21	2787	O.K	2.52	736	O.K
12	304	N.G	16125	O.K	20	2613	O.K	2.69	735	O.K
11	**288**	**O.K**	**15266**	**O.K**	**19**	**2440**	**O.K**	**2.85**	**729**	**O.K**
10	272	O.K	14407	O.K	17	2266	O.K	3.02	716	O.K
9	256	O.K	13547	O.K	16	2093	O.K	3.38	698	O.K
8	239	O.K	12688	O.K	15	1920	O.K	3.35	673	O.K
7	223	O.K	11828	O.K	13	1746	O.K	3.51	642	O.K
6	207	O.K	10969	O.K	12	1573	O.K	3.68	606	O.K
5	191	O.K	10110	O.K	11	1399	O.K	3.84	563	O.K
4	175	O.K	9250	O.K	9	1226	O.K	4.01	515	O.K
3	158	O.K	8391	O.K	8	1053	O.K	4.17	460	O.K
2	142	O.K	7532	O.K	7	879	O.K	4.34	399	O.K
1	126	O.K	6672	O.K	5	706	O.K	4.5	333	O.K

[표 3.3.27] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	227	O.K	12014	O.K	41	5291	N.G	2.19	1215	O.K
14	219	O.K	11615	O.K	38	4937	N.G	2.36	1219	O.K
13	**211**	**O.K**	**11200**	**O.K**	**35**	**4582**	**O.K**	**2.52**	**1210**	**O.K**
12	203	O.K	10769	O.K	32	4228	O.K	2.69	1190	O.K
11	195	O.K	10317	O.K	30	3875	O.K	2.85	1157	O.K
10	186	O.K	9844	O.K	27	3521	O.K	3.02	1113	O.K
9	176	O.K	9346	O.K	24	3168	O.K	3.38	1056	O.K
8	166	O.K	8817	O.K	22	2815	O.K	3.35	987	O.K
7	156	O.K	8254	O.K	19	2462	O.K	3.51	906	O.K
6	144	O.K	7647	O.K	16	2110	O.K	3.68	812	O.K
5	132	O.K	6985	O.K	13	1758	O.K	3.84	707	O.K
4	118	O.K	6252	O.K	11	1406	O.K	4.01	590	O.K
3	102	O.K	5418	O.K	8	1054	O.K	4.17	460	O.K
2	84	O.K	4427	O.K	5	702	O.K	4.34	319	O.K
1	59	O.K	3133	O.K	3	351	O.K	4.5	166	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

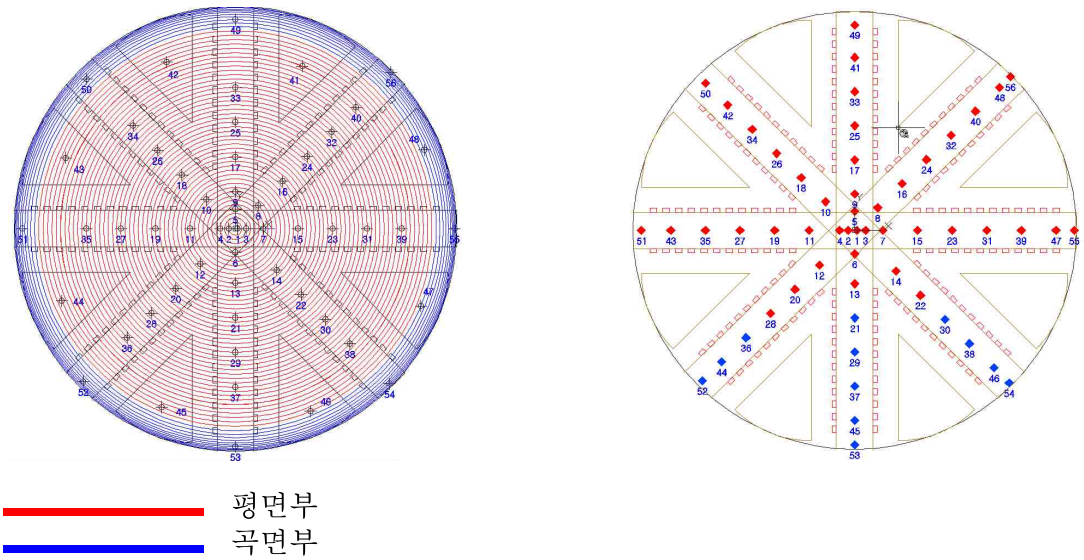
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.28과 같이 13.55 m/day로 산출되었다.

[표 3.2.28] 1일 굴진율 산출 결과(Case 2-2)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
13	2.52	1.97	14.17	88.54	354.14	N.G	O.K	O.K	O.K
12	2.69	1.93	13.93	87.07	348.29	N.G	O.K	O.K	O.K
11	**2.85**	**1.88**	**13.55**	**84.72**	**338.87**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	O.K	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	O.K	O.K	O.K	O.K
8	3.35	1.61	11.57	72.3	289.22	O.K	O.K	O.K	O.K
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K

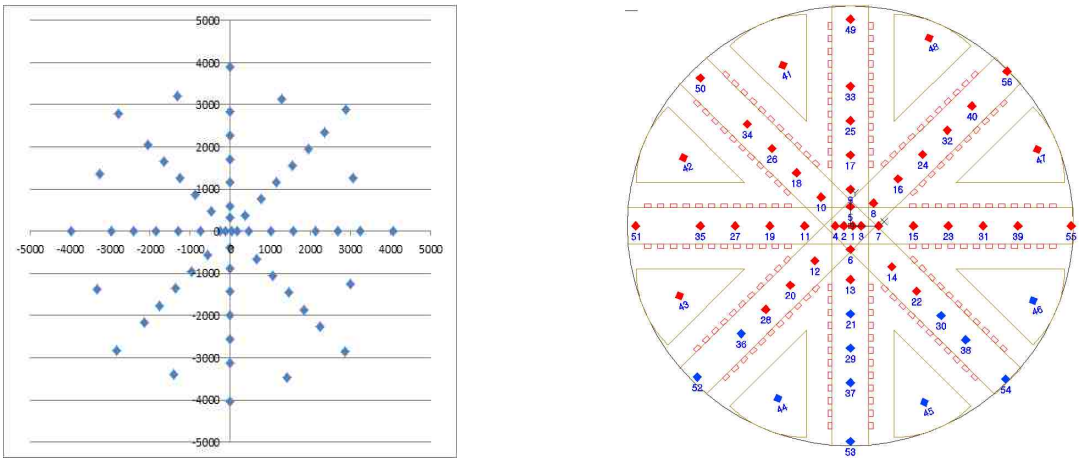
③ 디스크커터 배열 설계

본 연구과제에서 개발한 디스크커터 배열 설계방법에 의하여, 디스크커터들을 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열하는 방법의 두 가지 방법에 의해 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 설계결과, 주스포크만 사용한 배열설계 결과는 그림 3.3.14와 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.15에 해당한다. 특히 표 3.3.29은 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과값을 보여주고 있다.



(a) 디스크커터의 절삭궤적 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.14] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 2-2)



(a) 디스크커터 배열 평면도 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.15] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 2-2)

[표 3.3.29] Case 2-2조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
41	90	3240	0	80	1240	2993	0
42	135	3320	0	80	-1271	3067	0
43	180	3400	0	80	-3141	1301	0
44	225	3480	0	80	-3215	-1332	0
45	270	3560	0	80	-1362	-3289	0
46	315	3640	0	80	1393	-3363	0
47	0	3721	3	80	3438	-1424	-1
48	45	3790	13	68	3501	1450	-10
49	90	3850	22	63	0	3850	-29
50	135	3900	30	59	-2758	2758	-54
51	180	3946	38	54	-3946	0	-85
52	225	3983	45	50	-2816	-2816	-117
53	270	4015	52	46	0	-4015	-154
54	315	4039	58	43	2856	-2856	-188
55	0	4060	64	40	4060	0	-225
56	45	4073	69	37	2880	2880	-257

* 커터번호 41~48 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 49~56 : 주스포크에 배열

■ Case 2-3

① TBM 커터헤드 설계를 위한 입력 자료(표 3.3.30)

[표 3.3.30] 설계 입력자료(Case 2-3)

입력항목	입력값		비고
Diameter of cutter head	8200	mm	
Cutter spacing	**90**	mm	
No of center arrangement	4		
Spiral angle	45		
Gage radius	400	mm	
Angle of the last gate cutter	70		
Single or Double (1 or 2)	1		
Cutter radius	**241**	mm	19″
Cutter penetration	8	mm	
RPM	3.5		

② TBM 커터헤드 설계 결과 자료

가. Check of TBM maximum capacities

디스크커터의 최대허용 하중을 고려한 디스크커터의 최대 관입깊이는 표 3.3.31 및 표 3.3.32에서 보는 바와 같이 KICT 모델의 경우 11 mm/rev 로 예측되었으며 CSM 모델의 경우 12 mm/rev 로 예측되었다.

[표 3.3.31] KICT model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	356	N.G	18894	O.K	24	3173	O.K	2.19	728	O.K
14	340	N.G	18035	O.K	23	2999	O.K	2.36	740	O.K
13	324	N.G	17176	O.K	22	2826	O.K	2.52	746	O.K
12	308	N.G	16316	O.K	20	2652	O.K	2.69	746	O.K
11	**292**	**O.K**	**15457**	**O.K**	**19**	**2479**	**O.K**	**2.85**	**740**	**O.K**
10	275	O.K	14597	O.K	18	2306	O.K	3.02	729	O.K
9	259	O.K	13738	O.K	16	2132	O.K	3.38	711	O.K
8	243	O.K	12879	O.K	15	1959	O.K	3.35	687	O.K
7	227	O.K	12019	O.K	14	1785	O.K	3.51	657	O.K
6	211	O.K	11160	O.K	12	1612	O.K	3.68	621	O.K
5	194	O.K	10300	O.K	11	14397	O.K	3.84	579	O.K
4	178	O.K	9441	O.K	10	1265	O.K	4.01	531	O.K
3	162	O.K	8582	O.K	8	1092	O.K	4.17	477	O.K
2	146	O.K	7722	O.K	7	918	O.K	4.34	417	O.K
1	129	O.K	6863	O.K	6	745	O.K	4.5	351	O.K

[표 3.3.32] CSM model에 의한 디스크커터의 최대 관입깊이 산출(Case 2-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutter normal force (kN)	Check of cutter capacity	Required TBM thrust (kN)	Check of TBM thrust capacity	Cutter rolling force (kN)	Required TBM torque	Check of TBM torque capacity	Cutterhead RPM (rev/min)	Required TBM power	Check of TBM power capacity
15	244	O.K	12931	O.K	44	5695	N.G	2.19	1308	O.K
14	236	O.K	12502	O.K	41	5314	N.G	2.36	1312	O.K
13	227	O.K	12056	O.K	38	4932	N.G	2.52	1303	O.K
12	**219**	**O.K**	**11591**	**O.K**	**35**	**4551**	**O.K**	**2.69**	**1281**	**O.K**
11	210	O.K	11105	O.K	32	4171	O.K	2.85	1246	O.K
10	200	O.K	10596	O.K	29	3790	O.K	3.02	1198	O.K
9	190	O.K	10059	O.K	26	3410	O.K	3.38	1136	O.K
8	179	O.K	9491	O.K	23	3030	O.K	3.35	1062	O.K
7	168	O.K	8884	O.K	20	2650	O.K	3.51	975	O.K
6	155	O.K	8231	O.K	17	2271	O.K	3.68	875	O.K
5	142	O.K	7519	O.K	15	1892	O.K	3.84	761	O.K
4	127	O.K	6730	O.K	12	1513	O.K	4.01	635	O.K
3	110	O.K	5832	O.K	9	1134	O.K	4.17	496	O.K
2	90	O.K	4765	O.K	6	756	O.K	4.34	343	O.K
1	64	O.K	3372	O.K	3	378	O.K	4.5	178	O.K

나. TBM 굴진율의 예측

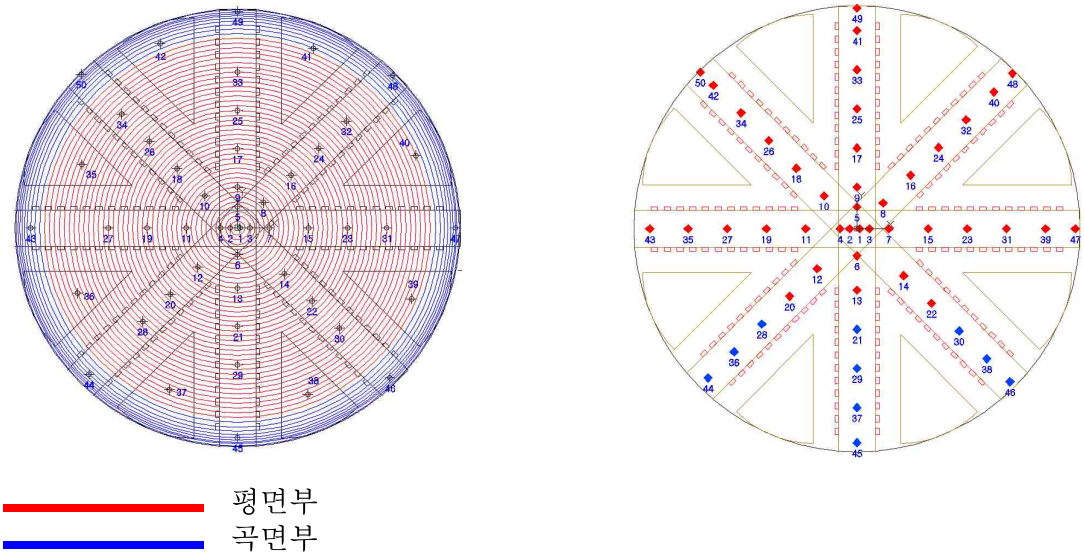
예측된 디스크커터의 최대 관입깊이 결과를 토대로 1일 굴진율을 산출한 결과는 표 3.3.33과 같이 13.55 m/day로 산출되었다.

[표 3.3.33] 1일 굴진율 산출 결과(Case 2-3)

Cutter penetration rate (mm/rev)	Cutterhead RPM (rev/min, KICT model)	Advance rate				Summary of TBM maximum capacity check by KICT model			
		Advance rate (m/hr)	Daily advance rate (m/day)	Weekly advance rate (m/week)	Monthly advance rate (m/month)	Check of cutter capacity	Check of TBM thrust capacity	Check of TBM torque capacity	Check of TBM power capacity
15	2.19	1.97	14.21	88.79	355.17	N.G	O.K	O.K	O.K
14	2.36	1.98	14.26	89.11	356.44	N.G	O.K	O.K	O.K
13	2.52	1.97	14.17	88.54	354.14	N.G	O.K	O.K	O.K
12	2.69	1.93	13.93	87.07	348.29	N.G	O.K	O.K	O.K
11	**2.85**	**1.88**	**13.55**	**84.72**	**338.87**	**O.K**	**O.K**	**O.K**	**O.K**
10	3.02	1.81	13.04	81.47	325.88	O.K	O.K	O.K	O.K
9	3.38	1.72	12.37	77.33	309.33	O.K	O.K	O.K	O.K
8	3.35	1.61	11.57	72.3	289.22	O.K	O.K	O.K	O.K
7	3.51	1.48	10.62	66.38	265.54	O.K	O.K	O.K	O.K
6	3.68	1.32	9.53	59.57	238.3	O.K	O.K	O.K	O.K
5	3.84	1.15	8.3	51.87	207.49	O.K	O.K	O.K	O.K
4	4.01	0.96	6.92	43.28	173.32	O.K	O.K	O.K	O.K
3	4.17	0.75	5.41	33.8	135.19	O.K	O.K	O.K	O.K

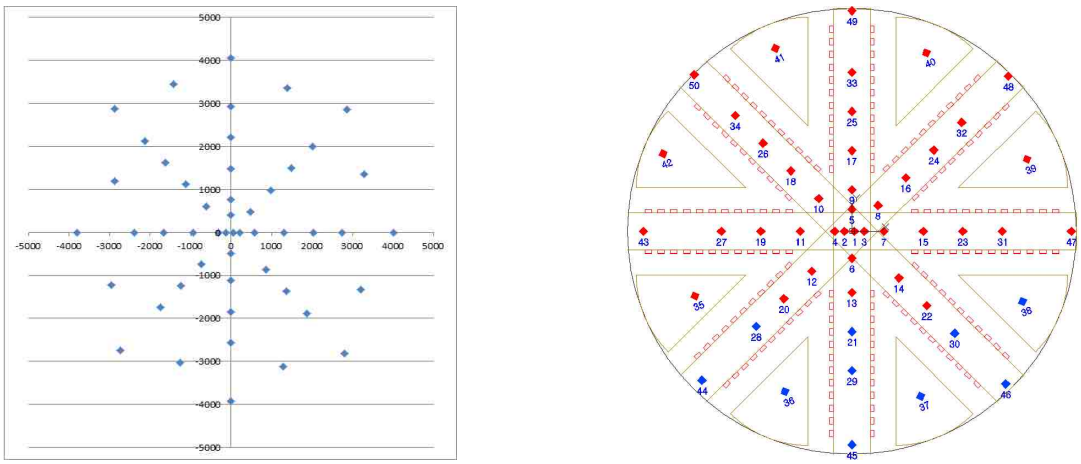
③ 디스크커터 배열 설계

본 연구과제에서 개발한 디스크커터 배열 설계방법에 의하여, 디스크커터들을 주스포크에만 배열하는 방법과 주스포크와 보조스포크에 혼합 배열하는 방법의 두 가지 방법에 의해 디스크커터 배열설계를 실시하였다. 설계결과, 주스포크만 사용한 배열설계 결과는 그림 3.3.16과 같고 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열을 적용한 경우는 그림 3.3.17에 해당한다. 특히 표 3.3.34는 주스포크와 보조스포크를 혼합 배열하였을 경우 보조스포크 상에 처음 배열되는 디스크커터의 배열 산정을 위하여 좌표 변환을 통한 결과값을 보여주고 있다.



(a) 디스크커터의 절삭궤적 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.16] 주스포크에만 배치한 커터헤드 설계결과(Case 2-3)



(a) 디스크커터 배열 평면도 (b) 커터헤드 설계도면(CAD)

[그림 3.3.17] 주스포크와 보조스포크에 혼합 배치된 커터헤드 설계결과(Case 2-3)

[표 3.3.34] Case 2-3조건의 디스크커터 좌표(보조스포크 배열 포함, 게이지부)

Cutter No	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
35	180	3105	0	90	-2869	1188	0
36	225	3195	0	90	-2952	-1223	0
37	270	3285	0	90	-1257	-3035	0
38	315	3375	0	90	1292	-3118	0
39	0	3465	0	90	3201	-1326	0
40	45	3555	0	90	3284	1360	0
41	90	3645	0	90	1395	3368	0
42	135	3735	5	90	-1429	3451	-2
43	180	3810	16	76	-3810	0	-15
44	225	3875	26	69	-2740	-2740	-40
45	270	3929	35	64	0	-3929	-72
46	315	3973	43	58	2809	-2809	-107
47	0	4011	51	54	4011	0	-148
48	45	4039	58	49	2856	2856	-188
49	90	4060	64	45	0	4060	-225
50	135	4076	70	41	-2882	2882	-263

* 커터번호 35~42 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 43~50 : 주스포크에 배열

(3) 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 설계결과 정리

대곡-소사 복선전철 한강 하저구간을 대상으로 직경 8.2m급 쉴드TBM 커터헤드를 설계하는데 있어서 앞서 분석한 바와 같이 표 3.3.35와 같이 디스크커터의 직경(2가지 조건)와 디스크커터 간격(3가지 조건)을 고려하여 총 6개의 설계 모델을 본 과제에서 개발한 TBM 커터헤드 최적 설계 시스템인 TARC-TOD를 통하여 비교 검토하였으며 표 3.3.36와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

[표 3.3.35] 기존 장비 및 설계 장비의 디스크커터 크기 및 간격에 따른 비교

Case No.	디스크커터 크기 (inch)	디스크커터 개수 (EA)	디스크커터 간격 (mm)	굴진율 (m/day)
1-1	17	64	70 mm	11.57
1-2	17	56	80 mm	11.57
1-3	17	50	90 mm	11.57
2-1	19	64	70 mm	13.55
2-2	19	56	80 mm	13.55
2-3	19	50	90 mm	13.55

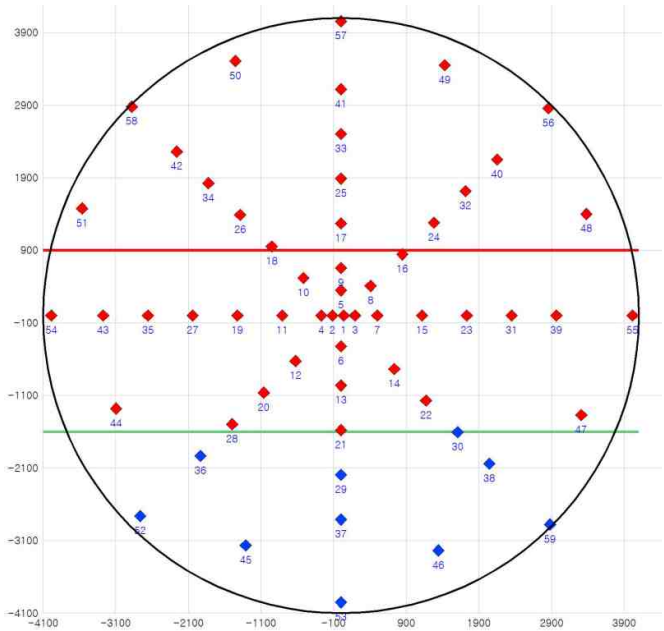
[표 3.3.36] 기존 장비 및 설계 장비의 디스크커터 크기 및 간격에 따른 비교

Case No.	굴진율 예측(KICT 모델)				굴진율 예측(CSM 모델)			
	Cutter penetration rate(mm/rev)	Cutter nomal force (kN)	Cutter rolling force (kN)	Cutterhead RPM (rev/min)	Cutter penetration rate(mm/rev)	Cutter nomal force (kN)	Cutter rolling force (kN)	Cutterhead RPM (rev/min)
1-1	8	236	14	3.35	10	237	36	3.02
1-2	8	239	15	3.35	9	240	35	3.38
1-3	8	243	15	3.35	8	239	33	3.35
2-1	11	284	18	2.85	15	205	37	2.19
2-2	11	288	19	2.85	13	211	35	2.52
2-3	11	292	19	2.85	12	219	35	2.69

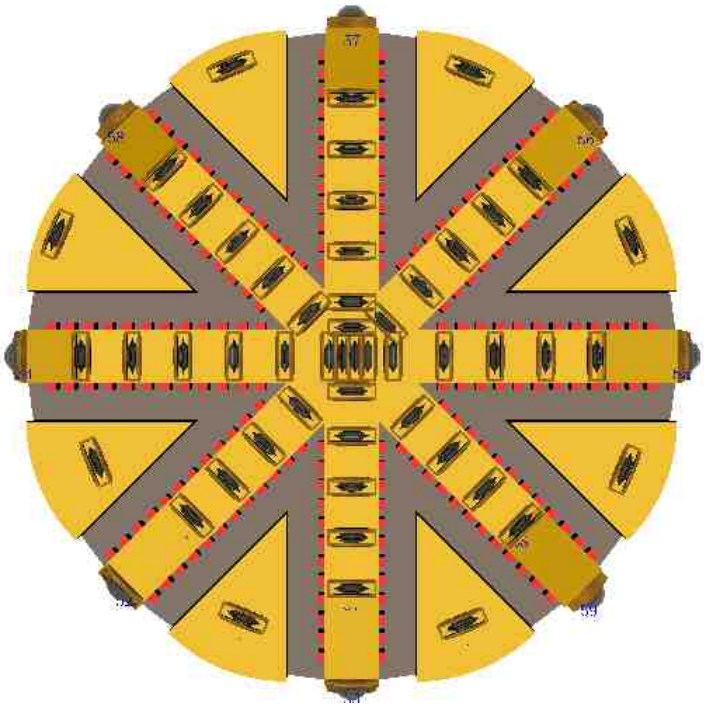
직경 17인치의 디스크커터를 커터간격 70, 80, 90 mm로 할 경우, KICT 모델에 의해 11.57 m/day의 굴진율이 예측되었고, 직경 19인치의 디스크커터를 커터간격 70, 80, 90mm로 할 경우, KICT 모델에 의해 13.55 m/day 의 굴진율이 예측되었다.

디스크커터 직경, 디스크커터 간격 및 디스크커터의 개수를 고려할 때, 디스크커터의 간격을 70 mm로 할 경우, 커터헤드에 배열되는 디스크커터의 개수가 많고 이에 따른 디스크커터의 하우징을 포함한 실질적인 디스크커터의 배치가 다소 어렵다. 또한 디스크커터의 간격을 90 mm로 할 경우의 최대 굴진율은 커터 간격이 80 mm일 때와 동일하게 나타나 커터 간격에 따

른 커터의 작용력 증가와 이에 따른 디스크커터의 교체주기 및 경제성을 고려할 때, 직경 17인치의 디스크커터를 적용하고 디스크커터의 간격을 80 mm로 최적 배열 설계하는 것이 적합할 것으로 판단되었다. 이와 같은 최적의 커터헤드 설계에 따른 전체 디스크커터의 좌표는 표 3.3.37과 같으며, 이에 해당하는 2차원 및 3차원 커터헤드 도면은 각각 다음의 그림 3.3.18 및 3.3.19와 같다.



[그림 3.3.18] 디스크커터의 최적 배열 설계에 따른 2차원 커터헤드 설계 결과



[그림 3.3.19] 디스크커터의 최적 배열 설계에 따른 3차원 커터헤드 설계 결과

[표 3.3.37] 최적 배열 설계에 따른 전체 디스크커터 좌표

Cutter No.	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0	40	0	40	40	0	0
2	180	120	0	80	-120	0	0
3	0	200	0	80	200	0	0
4	180	280	0	80	-280	0	0
5	90	360	0	80	0	360	0
6	270	440	0	80	0	-440	0
7	0	520	0	80	520	0	0
8	45	600	0	80	424	424	0
9	90	680	0	80	0	680	0
10	135	760	0	80	-537	537	0
11	180	840	0	80	-840	0	0
12	225	920	0	80	-651	-651	0
13	270	1000	0	80	0	-1000	0
14	315	1080	0	80	764	-764	0
15	0	1160	0	80	1160	0	0
16	45	1240	0	80	877	877	0
17	90	1320	0	80	0	1320	0
18	135	1400	0	80	-990	990	0
19	180	1480	0	80	-1480	0	0
20	225	1560	0	80	-1103	-1103	0
21	270	1640	0	80	0	-1640	0
22	315	1720	0	80	1216	-1216	0
23	0	1800	0	80	1800	0	0
24	45	1880	0	80	1329	1329	0
25	90	1960	0	80	0	1960	0
26	135	2040	0	80	-1442	1442	0
27	180	2120	0	80	-2120	0	0
28	225	2200	0	80	-1556	-1556	0
29	270	2280	0	80	0	-2280	0
30	315	2360	0	80	1669	-1669	0
31	0	2440	0	80	2440	0	0
32	45	2520	0	80	1782	1782	0
33	90	2600	0	80	0	2600	0
34	135	2680	0	80	-1895	1895	0
35	180	2760	0	80	-2760	0	0

Cutter No.	Azimuth (°)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Current (Relative) Position / Geometry		
					X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
36	225	2840	0	80	-2008	-2008	0
37	270	2920	0	80	0	-2920	0
38	315	3000	0	80	2121	-2121	0
39	0	3080	0	80	3080	0	0
40	45	3160	0	80	2234	2234	0
41	90	3240	0	80	1240	2993	0
42	135	3320	0	80	-1271	3067	0
43	180	3400	0	80	-3141	1301	0
44	225	3480	0	80	-3215	-1332	0
45	270	3560	0	80	-1362	-3289	0
46	315	3640	0	80	1393	-3363	0
47	0	3721	3	80	3438	-1424	-1
48	45	3790	13	68	3501	1450	-10
49	90	3850	22	63	0	3850	-29
50	135	3900	30	59	-2758	2758	-54
51	180	3946	38	54	-3946	0	-85
52	225	3983	45	50	-2816	-2816	-117
53	270	4015	52	46	0	-4015	-154
54	315	4039	58	43	2856	-2856	-188
55	0	4060	64	40	4060	0	-225
56	45	4073	69	37	2880	2880	-257

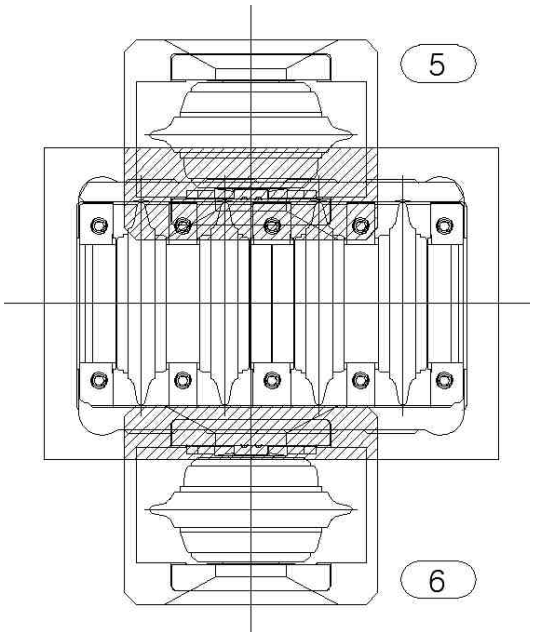
* 커터번호 41~48 : 보조스포크에 배열 / 커터번호 49~56 : 주스포크에 배열

다. 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작도 작성 및 구조해석

(1) 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작도 작성

앞선 “나”절에서 도출된 TARC-TOD를 이용한 커터헤드의 설계결과는 자동 알고리즘을 기반하여 도출된 결과로서, 실제 제작을 위한 도면 작성 시에는 디스크커터 하우징과 형상의 간섭 검토, 제작 공정 등을 함께 고려하여야 한다.

일례로 그림 3.3.20의 사례에서는 디스크커터 상호간의 간섭으로 인하여 배열이 어려운 것을 알 수 있다. 이에 “나”절에서 도출된 커터헤드 설계결과에 디스크커터 구조상의 특징, 디스크커터 하우징의 간섭, 제작상의 기계적인 요소 등을 고려하여 제작도면을 작성하였다.



[그림 3.3.20] 디스크커터의 간섭 예

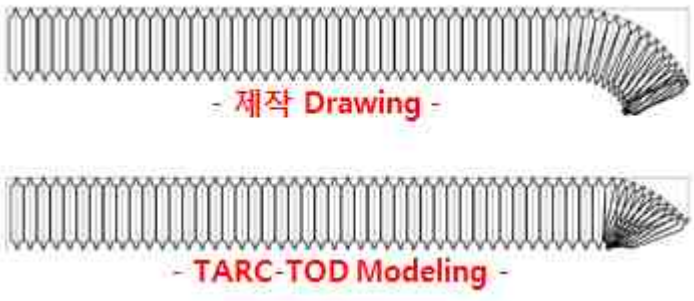
표 3.3.38은 이상과 같이 수정되어 배열된 디스크커터 좌표와 TARC-TOD의 설계 좌표의 비교표이다.

참고로 센터에서 디스크커터까지의 반지름은 TARC-TOD의 디스크커터 배열의 경우 디스크커터 중심이 기준이며, 실제 제작 디스크커터의 배열은 굴착시 굴착면에 닿는 디스크커터 끝부분을 기준으로 나온 수치이므로 차이를 보인다.

[표 3.3.38] TARC-TOD 설계결과와 수정 설계 좌표의 비교표

Cutter No.	TARC-TOD 설계결과			디스크커터 간섭을 고려한 수정 설계		
	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)	Accumtv. Radius (mm)	Tilt Angle (°)	Cutter Spacing (mm)
1	40	0	40	56	0	56
2	120	0	80	145	0	89
3	200	0	80	234	0	89
4	280	0	80	323	0	89
5	360	0	80	412	0	89
6	440	0	80	501	0	89
7	520	0	80	590	0	89
8	600	0	80	679	0	89
9	680	0	80	752	0	73
10	760	0	80	834	0	82
11	840	0	80	916	0	82
12	920	0	80	998	0	82
13	1000	0	80	1080	0	82
14	1080	0	80	1162	0	82
15	1160	0	80	1244	0	82
16	1240	0	80	1326	0	82
17	1320	0	80	1408	0	82
18	1400	0	80	1490	0	82
19	1480	0	80	1572	0	82
20	1560	0	80	1654	0	82
21	1640	0	80	1736	0	82
22	1720	0	80	1818	0	82
23	1800	0	80	1900	0	82
24	1880	0	80	1982	0	82
25	1960	0	80	2064	0	82
26	2040	0	80	2146	0	82
27	2120	0	80	2228	0	82
28	2200	0	80	2310	0	82
29	2280	0	80	2392	0	82
30	2360	0	80	2474	0	82
31	2440	0	80	2556	0	82
32	2520	0	80	2638	0	82
33	2600	0	80	2720	0	82
34	2680	0	80	2802	0	82
35	2760	0	80	2884	0	82
36	2840	0	80	2966	0	82
37	2920	0	80	3048	0	82
38	3000	0	80	3130	0	82
39	3080	0	80	3212	0	82
40	3160	0	80	3294	0	82
41	3240	0	80	3376	2.5	82
42	3320	0	80	3458	5.5	82
43	3400	0	80	3539.5	9	81.5
44	3480	0	80	3619	13	79.5
45	3560	0	80	3695	17	76
46	3640	0	80	3767	21	72
47	3721	3	80	3830.5	25	63.5
48	3790	13	68	3887.5	29	57
49	3850	22	63	3939	33	51.5
50	3900	30	59	3984	37	45
51	3946	38	54	4024	42	40
52	3983	45	50	4059	47	35
53	4015	52	46	4086	52	27
54	4039	58	43	4103.5	57	17.5
55	4060	64	40	4116	62	12.5
56	4073	69	37	4125	67	9

수정 설계된 디스크커터 배열을 보면 41번 디스크커터부터 곡선부가 시작되어 완만한 경사각을 준 반면, TARC-TOD 디스크커터 배열은 47번 디스크커터부터 곡선부가 시작되어 곡선부가 짧은 배열을 나타낸다. TARC-TOD 디스크커터 배열로 제작을 하게 되면 커터헤드의 높이가 낮아져 챔버의 체적이 작아지게 된다. 챔버의 체적이 작아짐으로써 굴착토의 배토가 용이해지고 챔버내 굴착토가 쌓여 엉켜붙어 굴착토의 배토가 원활하게 이루어지지 않는 현상을 방지할 수 있으나 디스크커터 하우징의 간섭으로 TARC-TOD 디스크커터 배열을 적용하기엔 어려움이 있다. 따라서 실제 제작 디스크커터 배열과 같이 41번 디스크커터부터 각도를 주어 디스크커터 하우징 간섭을 최소화하였으며, 원하는 곳에 디스크커터가 배열될 수 있도록 제작도를 설계하였다. 그림 3.3.21은 TARC-TOD 설계와 수정 설계의 디스크커터 배열을 비교하여 나타낸 그림이다.

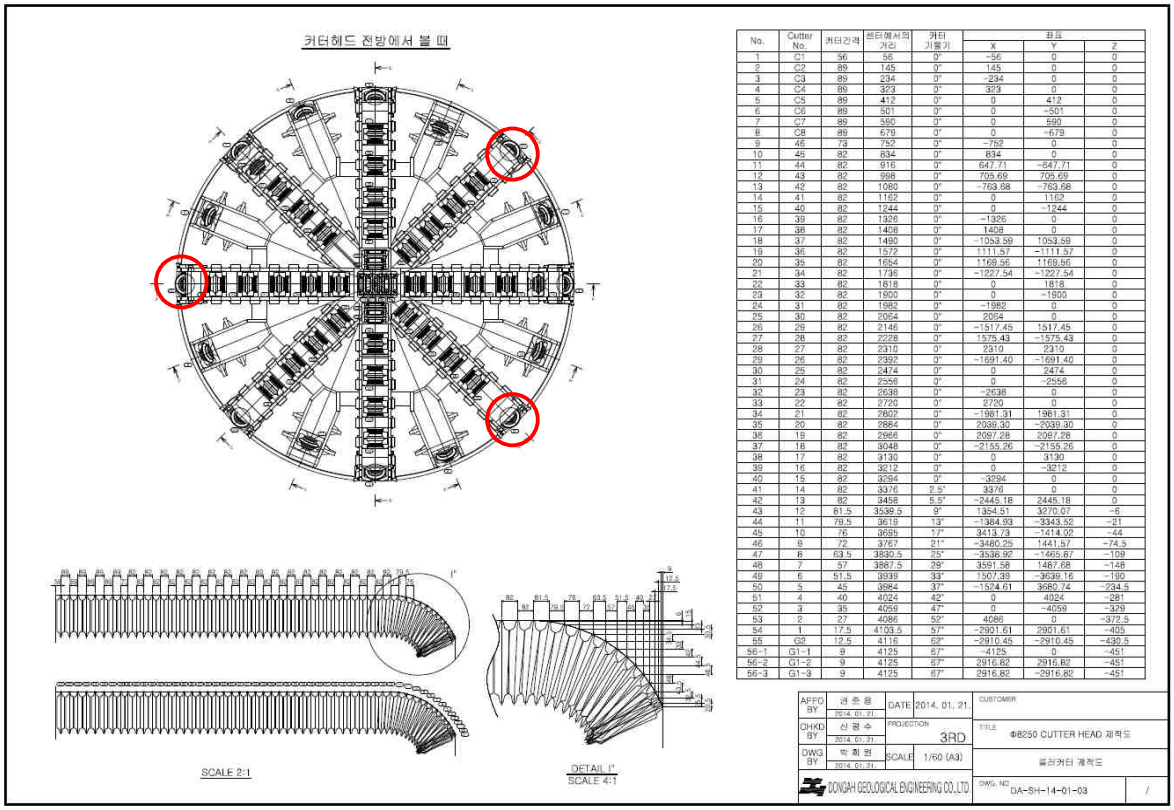


[그림 3.3.21] TARC-TOD 설계와 실제 제작 배열 비교

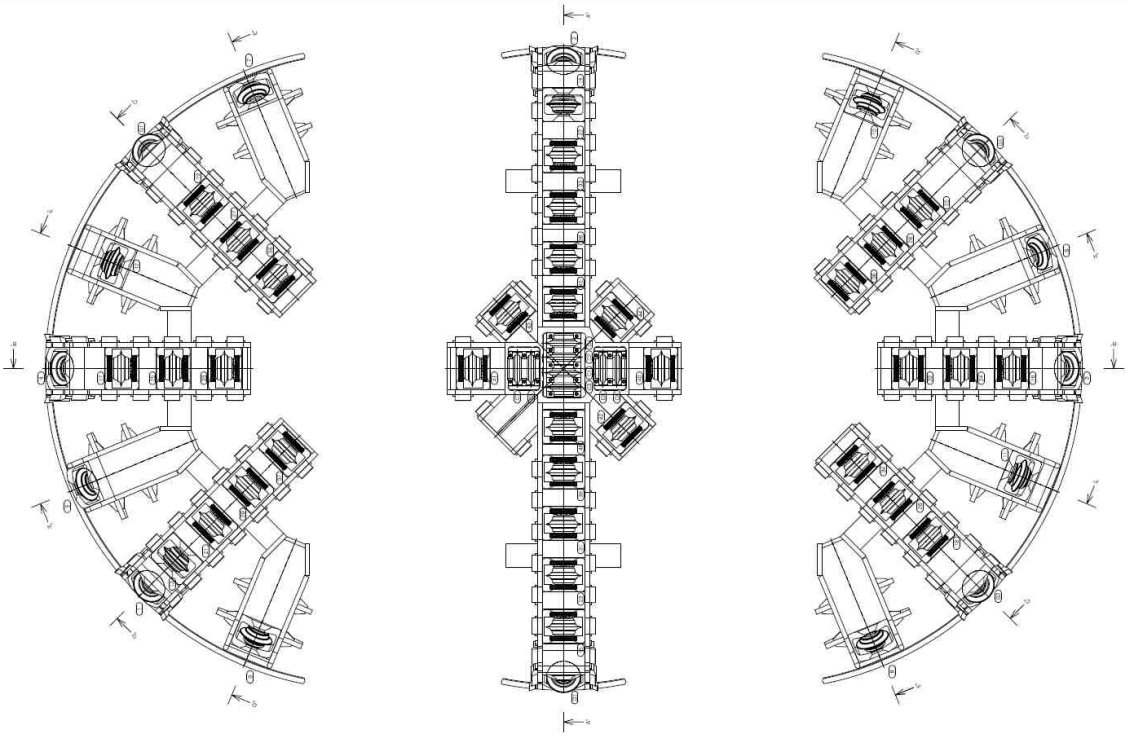
디스크커터 중 최외곽에 자리하는 디스크커터는 굴착시 굴착경을 결정하게 되므로 가장 중요하다. 본 연구단에서는 통상적으로 게이지커터라고 명명하는데 게이지커터가 심하게 마모되거나 손상이 발생할 경우 원하는 굴착경이 나오지 않아 굴진시 추력이 많이 발생하며, 심한 경우 TBM본체가 끼어 굴진이 불가하게 될 수도 있다. 또한, 디스크커터 중 가장 긴 궤적을 돌게 되며, 가장 많은 마모현상이 발생되는 부분이다.

이러한 게이지커터의 중요성 때문에 선진 TBM 제작사들도 2~4개소를 설치한다. 본 연구과제에서는 게이지커터의 중요성 및 커터헤드 전체 균형을 고려하여 3개의 게이지커터를 배치하였다 (그림 3.3.22 빨간색 원 부분) 또한, 커터헤드 제작도 설계 시 각 스포크에 디스크커터를 균등 배분하여 편심이 발생하지 않도록 하였다.

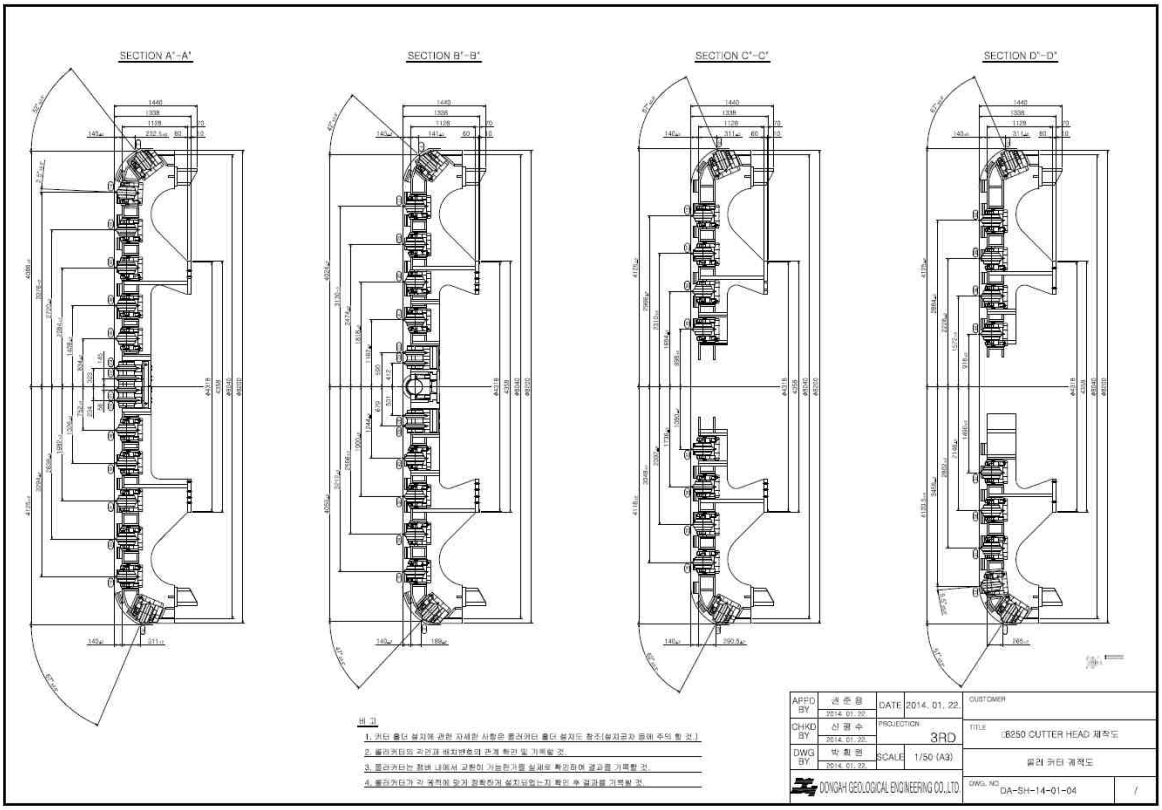
직경 8 m 이상의 대형 구조물인 커터헤드는 무게와 크기로 인하여 국내 도로에서 운반하기엔 어려움이 많다. 이에 제작도 설계부터 3분할로 제작하도록 설계하였으며, 현장 운반 후 조립이 되도록 설계 제작 되었다 (그림 3.3.23). 그림 3.3.24 ~ 그림 3.3.29은 상기의 조건들을 고려하여 작성된 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 상세 제작도이다.



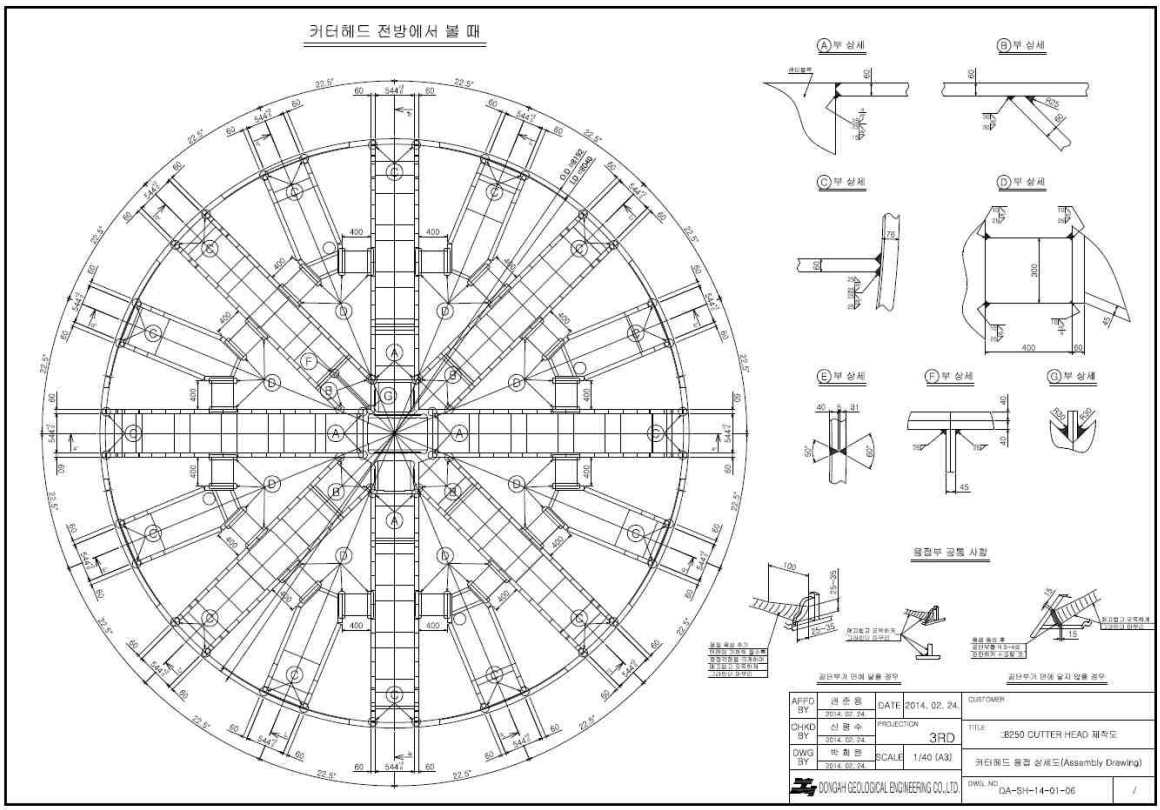
[그림 3.3.22] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 궤적도



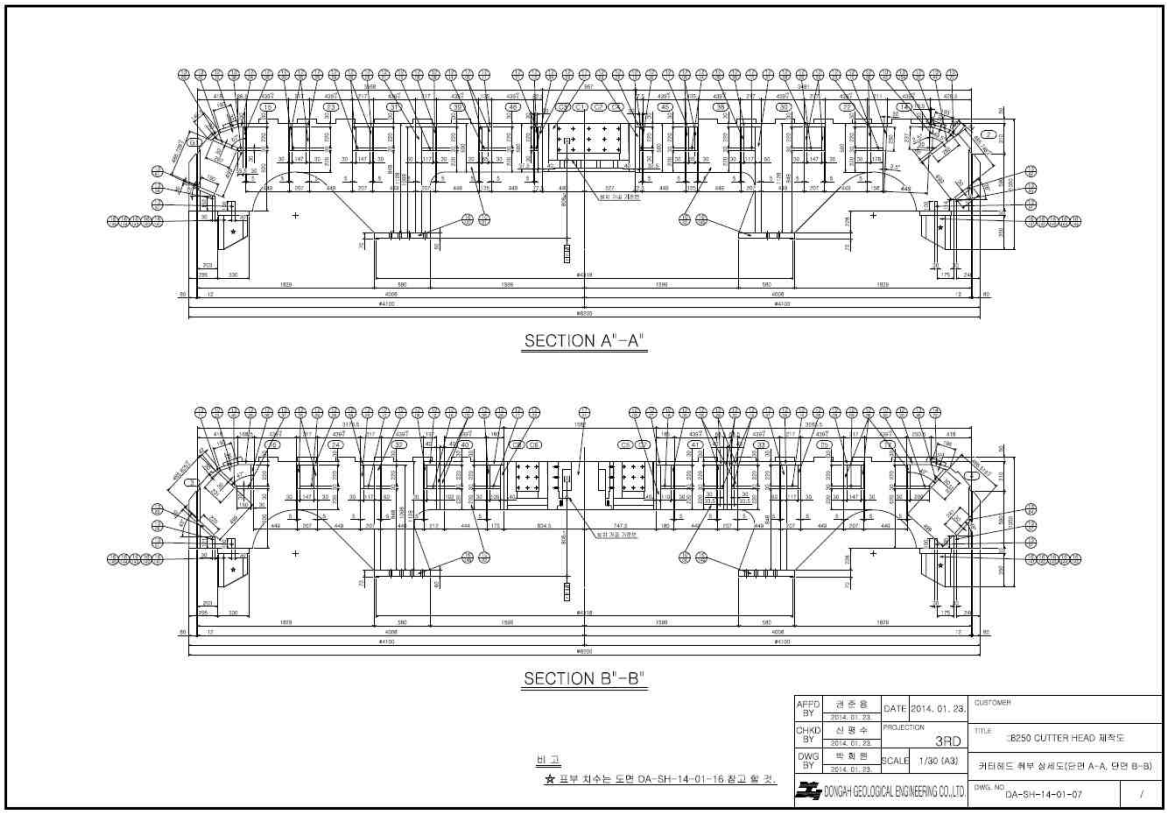
[그림 3.3.23] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 분할제작도



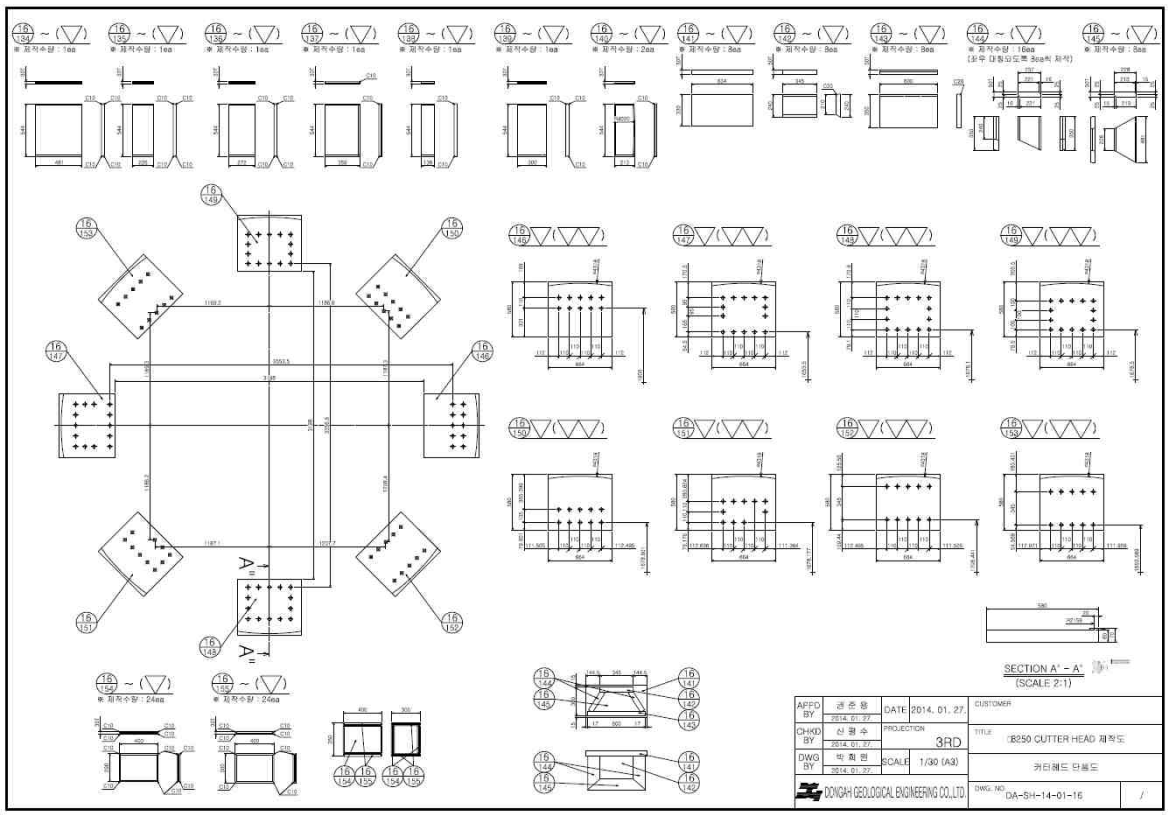
[그림 3.3.24] 디스크커터 궤적도



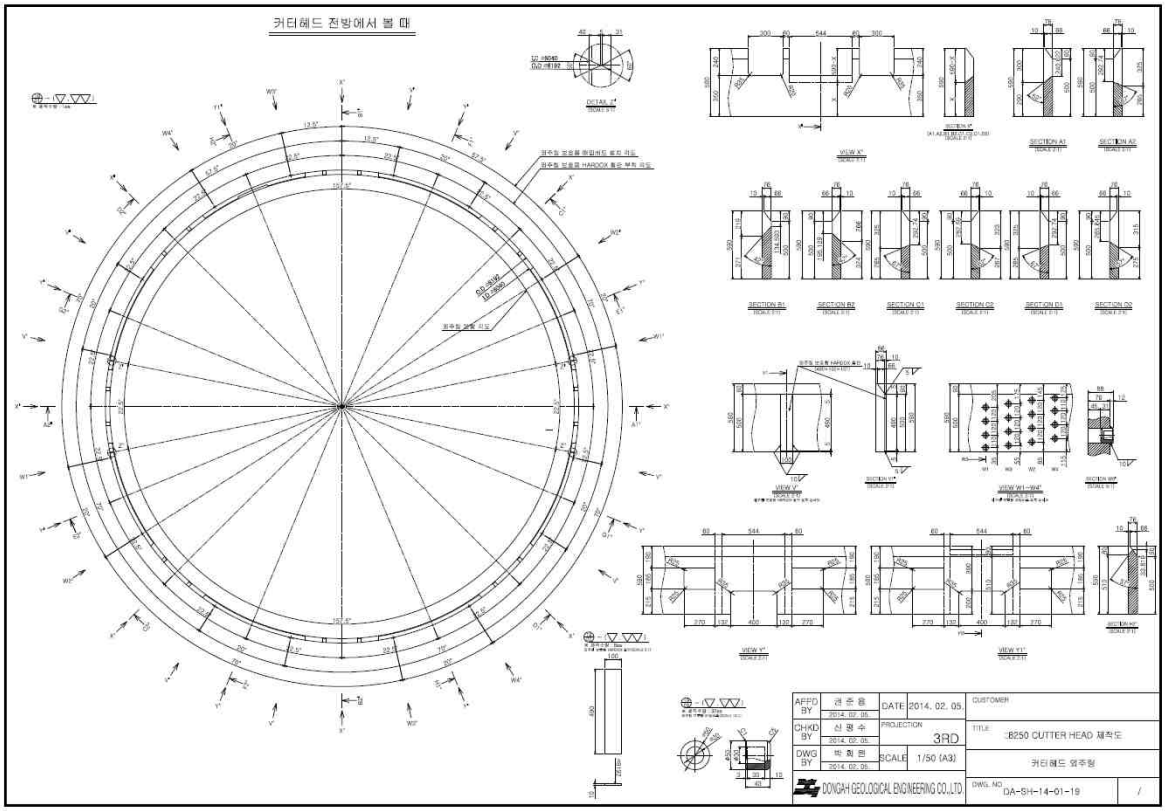
[그림 3.3.25] 커터헤드 용접 상세도



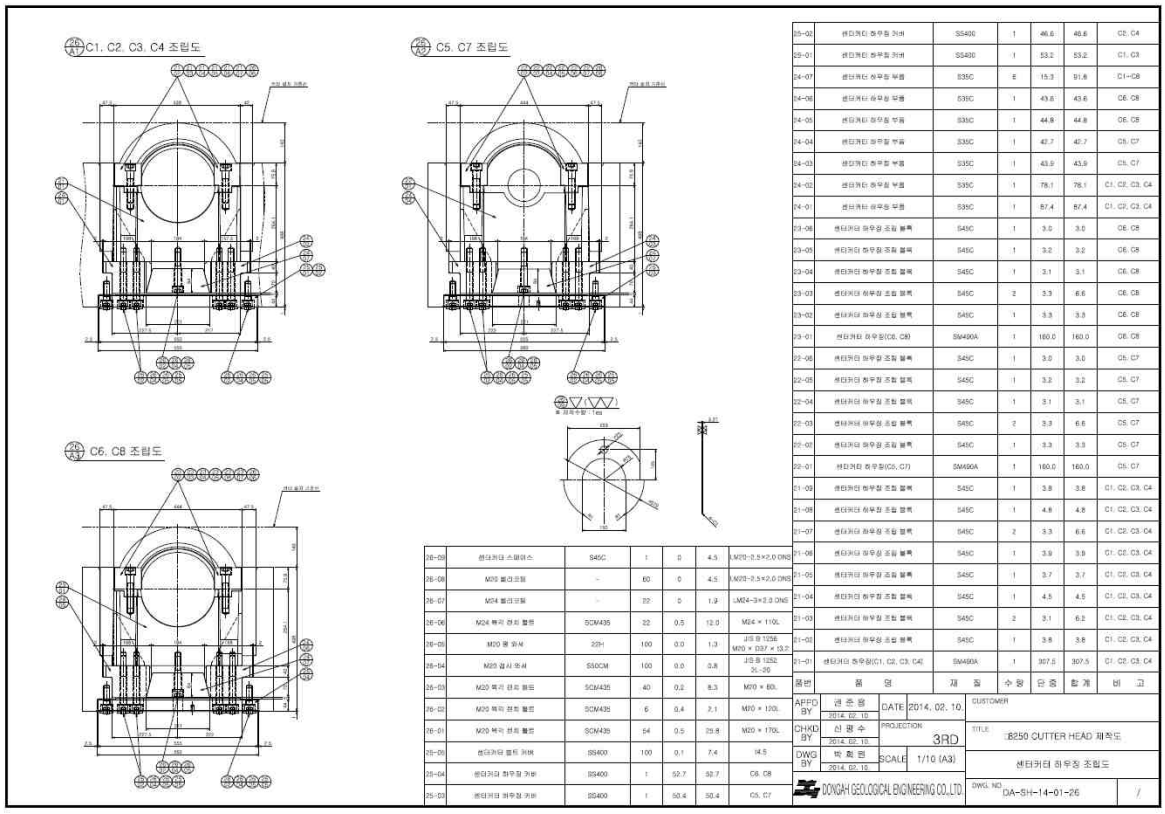
[그림 3.3.26] 커터헤드 취부 상세도



[그림 3.3.27] 커터헤드 단품도



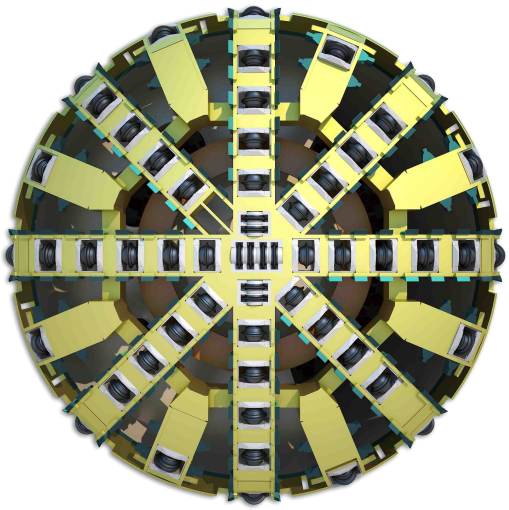
[그림 3.3.28] 커터헤드 외주링



[그림 3.3.29] 센터커터 하우징 조립도

(2) 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 구조해석

완성된 제작도를 바탕으로 구조해석을 위하여 3D 모델링을 실시하였다 (그림 3.3.30).



[그림 3.3.30] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 3D 모델링

구조해석에 앞서 여러 경계조건들에 대한 정의가 필요하다. 커터헤드 제작에 사용될 소재로는 SM490A로 선정하여 SM490A 소재의 물성치를 커터헤드 구조해석에 적용하였다(표 3.3.39). 소재선정과 관련한 자세한 사항은 다음의 소재선정 부분에서 자세히 다루도록 하겠다.

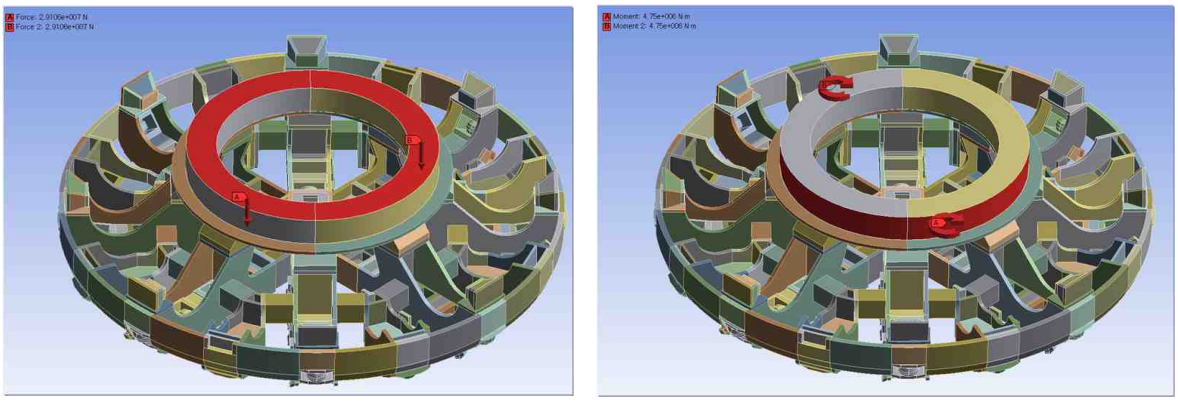
또한, 구조해석시 작용되는 경계조건에는 쉴드잭 인발시 발생되는 추력과 커터헤드가 회전시 발생되는 회전토크가 있다. 이러한 외력은 본 연구단에서 목표로 하였던 대상 현장의 지반조건과 비슷한 굴착경을 가지는 선진 TBM제작사의 TBM장비를 바탕으로 선정하였다.

본 연구단에서는 상기의 내용을 고려하여 64,000 kN의 추력과 12,540 kN·m의 토오크를 적용하여 구조해석을 실시하였다.

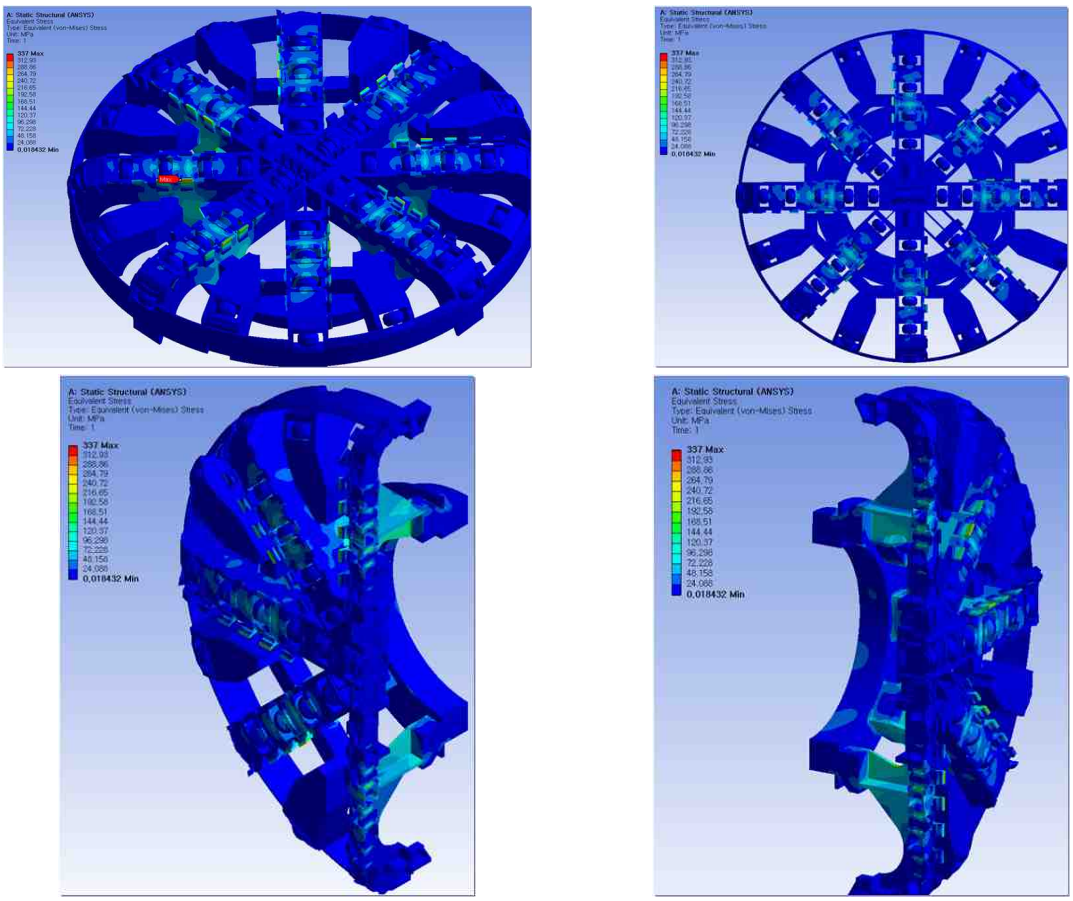
[표 3.3.2] SM490A의 물성치

재질	탄성계수 (GPa)	포아송비	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)
SM490A	205	0.28	517	379

해석 결과, 커터헤드에 작용된 최대 응력은 337 MPa이며, 위치는 스크레퍼비트의 바깥쪽의 구속면의 모서리에서 발생하였다. 이는 해석상의 응력 특이해로 판단되었으며, 이 응력을 정해로 판단하여도 해석 모델에 적용된 재료의 항복강도인 379 MPa을 초과하지 않았다. 응력 특이해로 판단되는 스크레퍼 비트의 바깥면을 제외한 부분에서는 전반적으로 150 MPa을 초과하지 않아 약 2.5 이상의 안전율을 확보하는 것을 알 수 있다 (그림 3.3.31 및 그림 3.3.32).



[그림 3.3.31] 직경 8.2 m 커터헤드의 외력 경계조건(좌:추력, 우:회전력)



[그림 3.3.32] 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 구조해석 결과

라. 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작

(1) 소재선정

본 연구과제에서는 앞선 제3.1절에서 검토하여 적용한 TEST-BED #1 커터헤드와 동일한 소재를 적용하였다.

본 연구과제에서는 커터헤드 제작도 작성 후 소재 구매를 실시하였다. 주문 제작은 납기 문제로 인하여 POSCO 및 동국제강 생산 소재를 수배하여 구매하였다 (그림 3.3.33 및 그림 3.3.34).



[그림 3.3.33] 커터헤드 제작용 SM490A 소재

ORIGINAL

검 사 증 명 서
MILL TEST CERTIFICATE

동국제강주식회사 DONGKUK STEEL MILL CO., LTD

주문번호/Order No. : P141400060
발주번호/PO No. :
품명/Commodity : STEEL PLATE
제품규격/Specification : KS D3515 SM490A

고객사/Supplier : 맥스틸(화전공장)
수요가/Customer : macsteel

검사증명서번호/Certificate No. : DP3-2-140124-025-001
발행일자/Date of issue : 2014-01-24

제품치수 Dimension 단위 Unit inch: ", mm: Space	제품번호 Product No	수량 Quantity	중량 Weight kg	제강번호 Heat No	Position	인장시험 Tensile Test GL	YP N/mm²	TS N/mm²	EL %	Division	화학성분(%) Chemical Composition C 2	Si 2	Mn 2	P 3	S 3	Remarks
100.00*2550*4800 Specimen No:DP07048519-a	A401570-02		9,608	LK483022	T	5	483	588	28	L	8	29	147	16	2	
	Sub Total (10)	1	9,608													
70.00*1850*8000 Specimen No:DP07194104-a	A421668-01		8,133	LK101221	T	5	466	565	25	L	8	29	146	14	3	
	Sub Total (30)	1	8,133													
70.00*1600*7300 Specimen No:DP07195902-a	A421641-01		6,418	LK678247	T	5	468	602	25	L	8	16	153	9	2	
	Sub Total (50)	1	6,418													
70.00*1500*4750 Specimen No:DP07195503-a	A421644-02		3,915	LK678248	T	5	482	602	25	L	8	17	154	9	2	
	Sub Total (60)	1	3,915													
70.00*1500*3700 Specimen No:DP07195503-a	A421644-03		3,050	LK678248	T	5	482	602	25	L	8	17	154	9	2	
	Sub Total (80)	1	3,050													
50.00*2250*5400 Specimen No:DP07111805-a	A425552-01		4,769	LK587333	T	1	377	588	25	L	12	18	51	8	1	
	Sub Total (90)	1	4,769													

* Tensile Test Direction-Transverse
* Supply Condition - As Rolled
* Chemical Composition Unit : 2-x100, 3-x1000, 4-x10000

We hereby certify that the material herein has been made and tested in accordance with above specification and also with the requirements called for by the above order. * Inspection documents : According to EN 10204 Type 3.1.

* Specimen No. : a-Tension
* Position : T-Top, M-Middle, B-Bottom
* Division : L-Ladle Analysis, P-Product Analysis
* Sub(Sub Size, Real Value, mm) : Blank-Full Size, 1-7.5*10, 2-5.0*10
* GL(Gauge Length, mm) : 1-200, 2-100, 3-80, 4-70, 5-50, 6-5.65√A, 7-5d, 8-4d, 9-8d
* T(S).Al : Total(Soluble) Al *Tr : Trace
* NRL Result : G-No Break, B-Break
* TTP(Through Thickness Position) : 1-Surface, 2-1/4T, 3-1/2T

본 주문품은 상기의 규격용도 외 타용도로 사용시 제품손상 및 안전상고등의 문제가 발생할 수 있으며, 본 검사증명서와 위조 또는 변조시 형사법에 의해 처벌될 수 있습니다.

원본검증 방법 : 동국제강 홈페이지 접속 (www.dongkuk.co.kr) → e비즈니스 클릭(홈페이지 하단) → 검사증명서 원본검증 클릭 → 정보입력후 검색

원본대조필

Surveyor to | Surveyor to | Surveyor to | Surveyor to | Chief of Quality Control Team

Dangjin Works. 25, Godaegongdan 1-gil, Songak-eup, Dangjin-si, Chungcheongnam-do, Republic of Korea/Quality Control Team, TEL. 041-351-4679 Page : 1/5

posco

Mill Test Certificate/검사증명서

Certificate No./증명서번호 : 131228-PPNE-046-0001
Date of Issue/발행일자 : Feb., 14, 2014

Order No./계약번호 : 0005991625
PO No./주문번호 : 13PP1210M1

Supplier /주문자 : DAE DONG STEEL CO., LTD.
Commodity /품명 : PLATE

Customer /고객사 : DAE DONG STEEL CO., LTD.
Spec & Type /규격 : JIS G3106 SM490A

Size/치수	Product No. /제품번호	Quantity /수량	Weight /중량 (kg)	Heat No. /제강번호	Position	Tensile Test /인장시험 YP (Mpa)	TS	EL (%)	Division	Chemical Composition/화학성분 (%) C -4	Si -3	Mn -3	P -4	S -4	CEQ -3
30x2438x6096	PC13248701	1	3,500	SB92953	T	366	529	30	L	1634	360	1457	145	38	430
*** Sub Total (100) ***		1	3,500 (kg)												
*** Grade Total***		1	3,500 (kg)												
*** Grand Total***		1	3,500 (kg)												

CEQ (F) = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + V/14 + Ni/40 + Mo/4

=== Last Item ===

* Position - T : Top, M : Middle, B : Bottom
* Tensile Test.Direction : Transversal, Gauge Length : 200mm(Rectangular),
* Division - L:Ladle Analysis
* Chemical Composition Unit: -2:x1/100, -3:x1/1000, -4:x1/10000, -5:x1/100000
* Supply Condition : As-Rolled unless otherwise Heat Treated.

We hereby certify that the material herein has been made in accordance with the order and above specification.
This material has been fully killed and made by basic oxygen process.
This material has been made by vacuum degassing process.
Test Certificate is issued according to EN10204 3.1.

원본대조필

* 본 검사증명서에 명기된 규격용도외 사용시 안전상 문제가 발생할 수 있으며, 검사증명서 위.변조시 사문서 위조(형법231조)로 불이익을 당하실 수 있습니다.

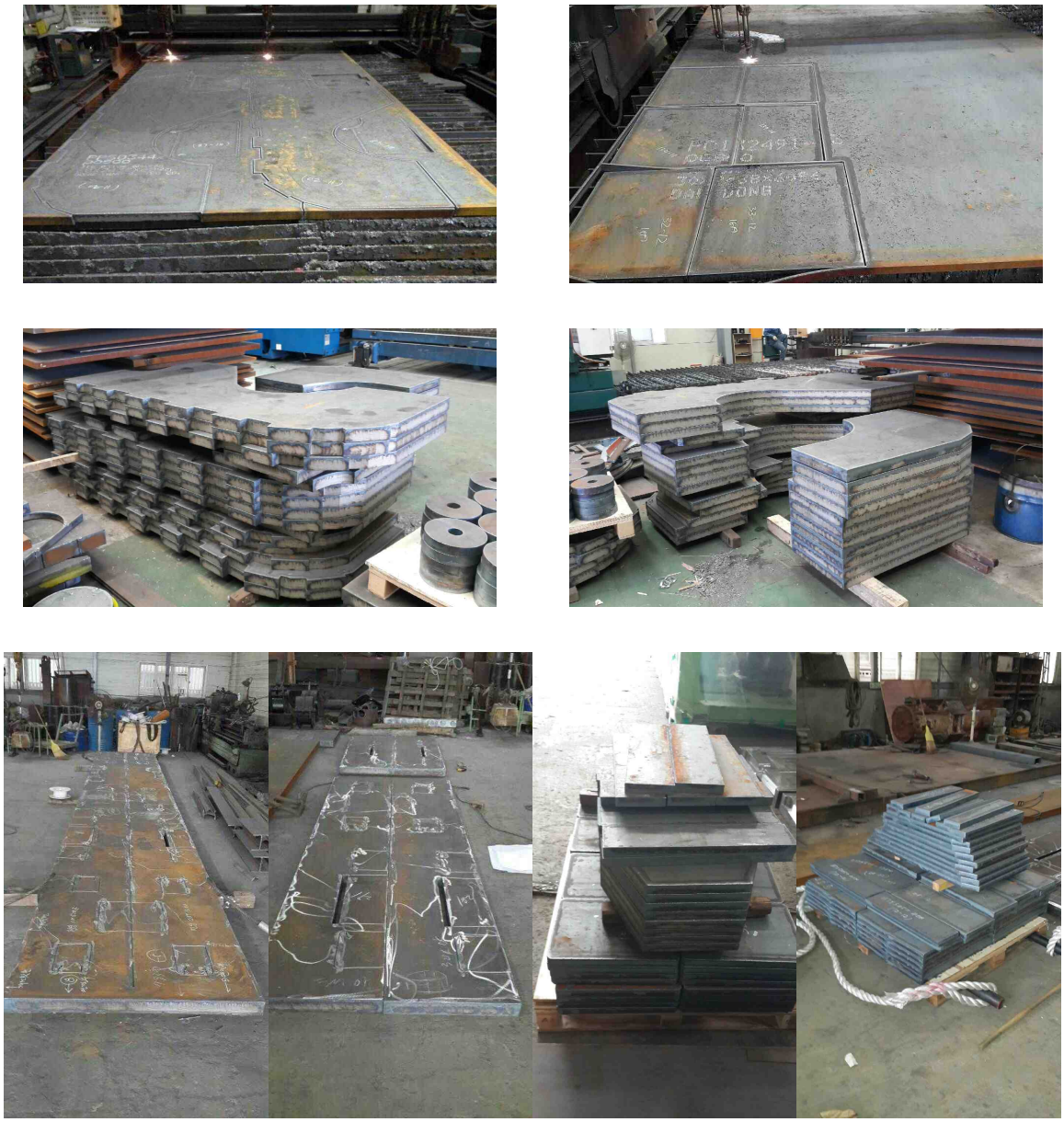
Surveyor To : M.S. JANG

POSCO Pohang Works, 6262, Donghaean-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, 790-785, Korea <PAGE : 1> Chief of material testing section Man Soo, Jang

[그림 3.3.34] SM490A MILL TEST CERTIFICATE

(2) 소재절단

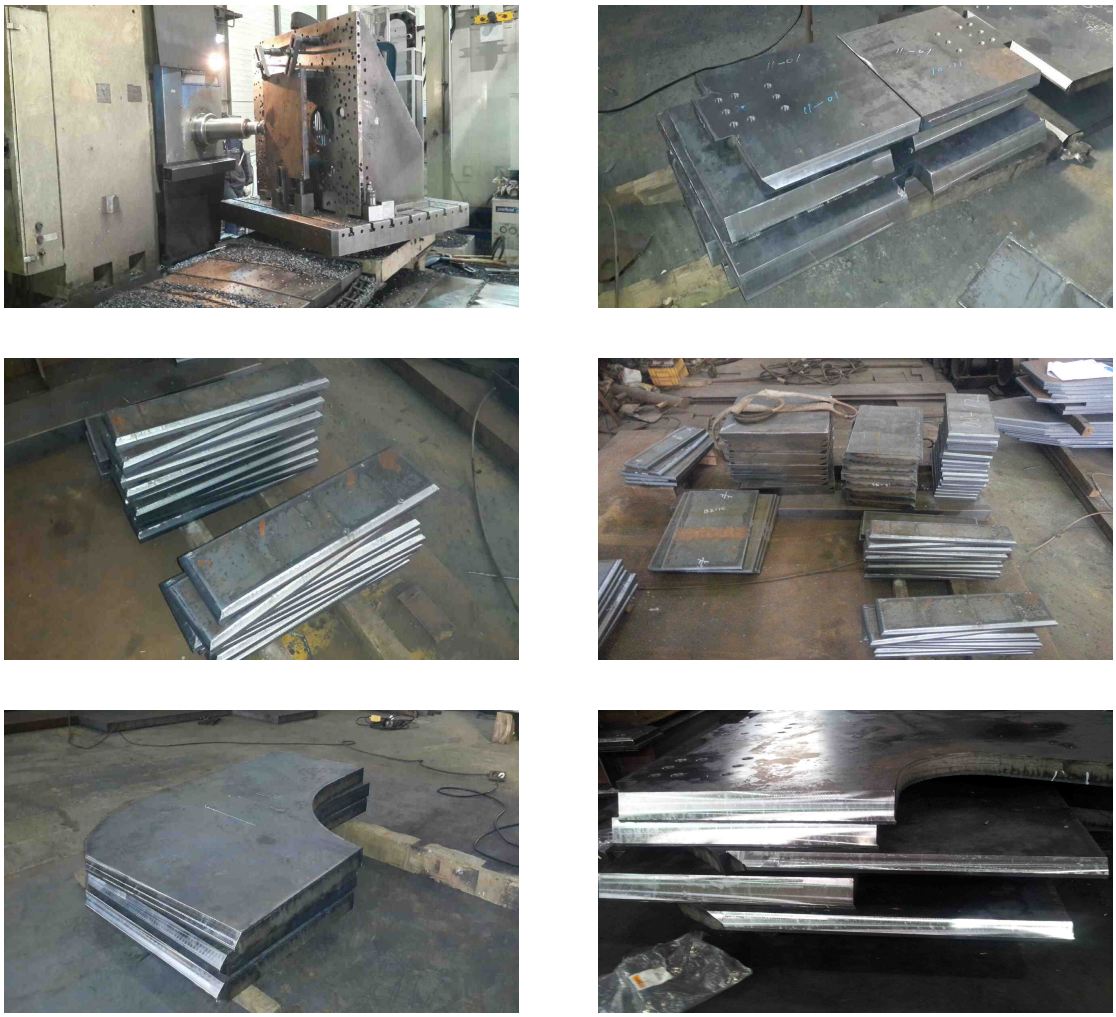
제작도에 작성된 단품도를 바탕으로 도입된 소재에 대해 자동 절단작업을 실시하였다. 절단된 소재는 작업의 효율성을 제고하기 위하여 1차 가공을 선 실시 하였다 (그림 3.3.35).



[그림 3.3.35] 커터헤드 소재 절단

(3) 소재 1차 가공

직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작 시에 정밀도 향상을 위하여 소재의 가로×세로부만 자동절단을 실시하는 것이 아니라 궤선부(용접부)도 자동 절단 및 가공을 실시하여 제품의 품질 및 정밀도 향상을 제고하였다 (그림 3.3.36).



[그림 3.3.36] 궤선 작업

외주링부는 바깥면으로 각종 외주링 마모방지장치가 설치되며, 안쪽면으로 프레임(스포크)과 견고하게 용접이 되어 커터헤드의 외경을 결정하게 된다. 또한, 굴착토의 챔배 내부로 원활할 이송을 위한 각 종 홀이 있으며, 디스크커터 하우징이 거치되는 부분도 있다. 상기와 같이 외주링부는 단순한 라운드가 아니라 각종 장치가 부착됨으로 절단 및 홀 가공 등의 작업이 필요하다 (그림 3.3.37).








[그림 3.3.37] 외주링 가공 사진

이러한 가공을 모두 실시한 후 밴딩을 실시하면 좋으나 상대적으로 짧은 폭과 길이로 인하여 밴딩시 외주링이 꺾일 우려가 있다. 이에 본 연구과제에서는 관련 제작업체 및 가공업체와의 수차례 미팅을 통하여 외주링부 가공에 관한 협의를 실시하였다. 협의 결과 밴딩전 길이 방향의 가공만 실시하며 밴딩 후 폭 방향의 가공을 실시하여 밴딩시 꺽임 현상을 사전에 예방하고자 하였다.

또한 상대적으로 길이가 짧은 분할부와 밴딩이 불가능한 끝단부는 일정한 간격으로 절곡을 시행하여 원하는 외주링의 치수가 나오도록 가공을 실시하였다.

스크레퍼 비트는 메인프레임 바깥면에 부착되며, 볼트로 조립이 되도록 되어 있다. 스크레퍼 비트의 경우 굴착시 굴착토를 긁어 주게 되는데 이 때 순간적인 부하로 스크레퍼 비트나 스크레퍼 비트 고정 볼트가 파손되기도 한다. 파손된 스크레퍼 비트나 고정볼트는 교환을 통하여

굴진 중에도 보수가 가능하다. 그러나 스크레퍼 비트를 고정하는 볼트 홀의 파손시에는 용접 외에는 방법이 없다. 만약 용접을 실시할 경우 차후 교체가 필요할 시 교체에 어려움이 많다. 이에 본 연구과제에서는 볼트 홀에 헬리코일을 설치하여 볼트 홀의 파손에 대비하였다 (그림 3.3.38). 이 외에도 가공이 필요한 단품들의 가공을 실시하였다 (그림 3.3.39).



[그림 3.3.38] 헬리코일 설치

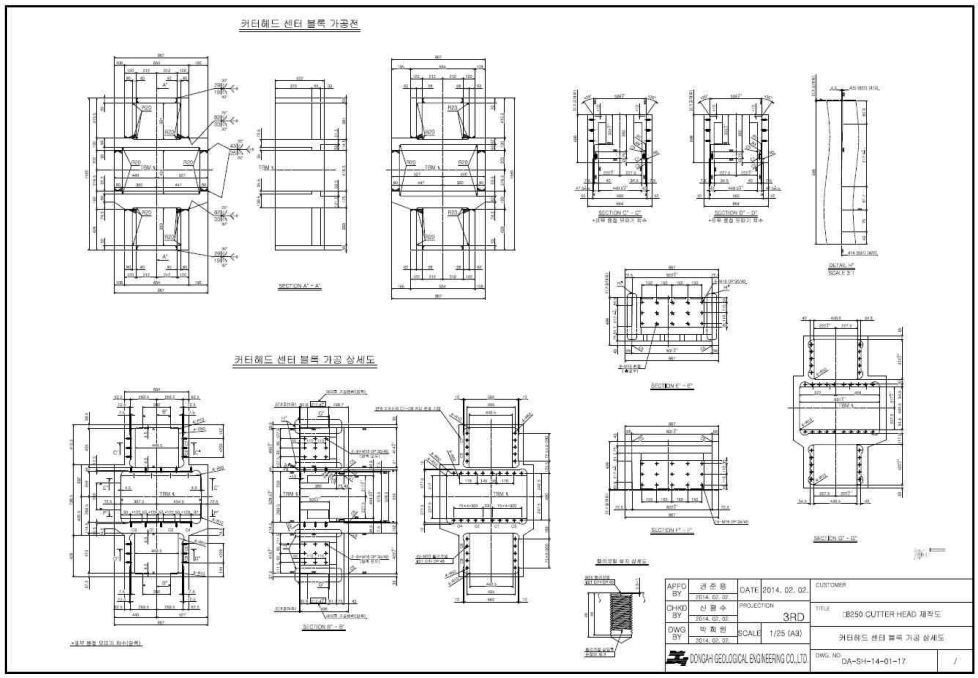


[그림 3.3.39] 기타 가공품

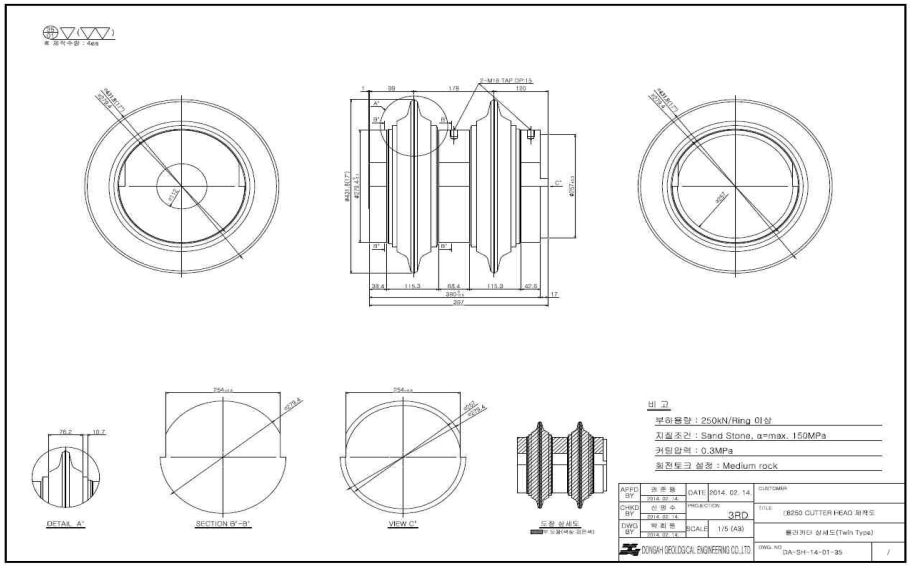
(4) 센터블록의 제작 및 검수

커터헤드 제작시 가장 중심에 위치하며, 제작의 중심이 되는 파트가 센터블록이다. 센터블록은 디스크커터의 궤적이 시작되는 위치이며, 센터커터의 궤적에 따라 이 후 페이스 커터의 궤적이 결정된다. 센터블록에는 일반적인 싱글 디스크커터가 아닌 더블 디스크커터나 트윈디스크커터가 부착되는데 이는 싱글 디스크커터 및 디스크커터 하우징의 배치로는 공간이 협소하여 원하는 궤적을 나타내는데 한계가 있기 때문이다.

본 연구과제에서도 이상과 같은 사항에 근거하여 트윈커터를 센터부에 적용하였다. 그림 3.3.40은 이렇게 적용된 센터블록의 가공 상세도이다. 트윈커터의 구조상 80 mm의 동일한 궤적을 적용하기엔 어려움이 있었다. 80 mm 궤적을 적용하기 위해선 기존의 트윈커터의 개조가 필요한데 이때 고려되어야 할 사항의 첫 번째가 베어링이다. 궤적이 좁아지는 만큼 베어링의 폭도 좁아져야하는 것이다. 현재 동일한 규격의 싱글 디스크커터와 트윈커터의 베어링을 비교하면 협소한 공간으로 인한 배치의 어려움으로 베어링의 규격이 싱글 디스크커터 베어링 규격보다 작다. 이 결과 트윈커터에 작용하는 하중과 베어링 수명이 싱글 디스크커터보다도 작은데 여기서 베어링의 규격을 더 작은 것으로 하기엔 위험 부담이 크며, 트윈커터의 수명 및 성능상의 문제가 발생될 소지가 많다. 따라서 본 연구과제에서는 89 mm 궤적을 적용하여 기존 제품의 성능과 수명을 보장할 수 있도록 제작을 실시하였다 (그림 3.3.40 및 그림 3.3.41).



[그림 3.3.40] 센터블록 가공도



[그림 3.3.41] 트윈커터 상세도

그림 3.3.42는 센터블록의 제작사진이다. 그림과 같이 1차 제작을 한 후 2차 가공을 실시하였다. 본 연구과제에서는 2차 가공 전에 UT검사를 통하여 용접부 결함 검사를 실시하였다 (그림 3.3.43).



[그림 3.3.42] 센터블록 제작



[그림 3.3.43] 센터블록 용접부 결함 검사(UT검사)

UT검사(초음파 탐상검사)는 초음파를 시험체내로 보내어 결함부로부터 반사되는 에너지량 및 결함부로부터 반사되어 되돌아올 때까지의 진행시간, 초음파가 시험체를 투과할 때 감쇠하는 양의 차이를 표준자료와 비교하여 용접부 결함을 검출하는 방법이다. 본 연구과제에서는 1차례 수정을 통하여 UT검사를 통과하였고 이 후 열처리(풀림)후 2차 가공을 실시하였다 (그림 3.3.44 및 그림 3.3.45).

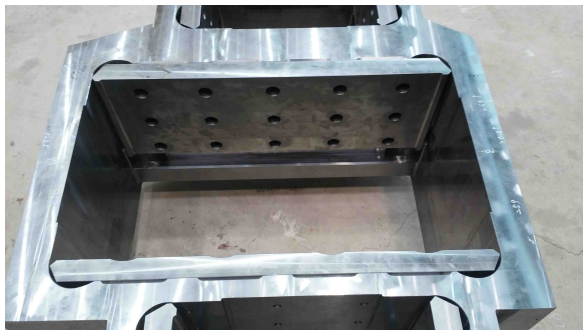


[그림 3.3.44] 열처리 후의 센터블록

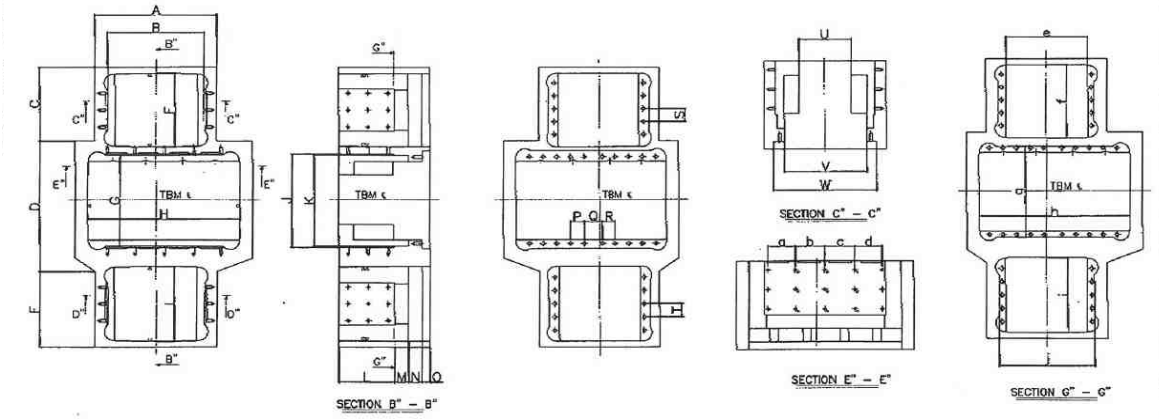



[그림 3.3.45] 센터블록의 2차 가공

가공이 완료된 센터블록은 중간검사를 실시하였다. 그림 3.3.46은 완성된 센터블록 및 중간검사 리포트 이다. 중간검사 결과 오차 범위가 허용오차 이내로 검사를 통과 하였다.

CENTER BLOCK DIMENSION



비 고	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
DWG DIM.	664	524	415.5	738.5	428	414	513.5	831	422	528.5	513.5	305	75	75	43	75	100
TOLERANCE										+0.1 −0.0							
ACTUAL	0	0	0	−1	0	−0.2	−0.1	−0.2	+0.1	+0.1	+0.1	0	0	0	0	0	0

비 고	R	S	T	U	V	W	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
DWG DIM.	75	72.5	75	282	449.5	560	150	160	160	150	449.5	414	513.5	831	422	524	
TOLERANCE					+0.1 −0.0						+0.1 −0.0	+0.1 −0.0	+0.1 −0.0	+0.1 −0.0	+0.1 −0.0	+0.1 −0.0	
ACTUAL	0	0	0	+1	+0.1	+0.1	0	0	0	0	0	+0.1	+0.1	0	0	+0.1	

2014. 3. 19

[그림 3.3.46] 센터블록 가공 완료 사진 및 중간 검사 Sheet

(5) 소조립 작업

직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작은 크게 18개 파트로 분할 제작 후 조립(용접)하여 전체를 완성하도록 설계하였다. 18개의 파트는 3.4.4절에 설명한 센터블록 파트, 센터블록에 +방향으로 조립되는 메인프레임 4개 파트, 메인프레임 사이 45°간격으로 ×방향으로 조립되는 메인프레임 4개 파트, 그리고 8개의 메인프레임 사이에 위치하는 보조프레임 8개 파트, 마지막으로 커터헤드의 외경을 결정하는 외주링 파트로 나눠진다. 상기의 18개 파트는 작업의 효율성을 위하여 각 각의 파트 별로 별도 제작되어 전체 조립을 하게 된다 (그림 3.3.47).



[그림 3.3.47] Ø8.20 커터헤드 단품 조립

(6) 용접 수축량 검사

모든 금속재료는 열에 대하여 팽창 및 압축을 하는 성질을 가지고 있다. 더욱이 커터헤드 제작은 용접작업의 연속으로 용접시 열에 의한 팽창 및 압축을 고려하지 않을 수 없다. 본 연구과제에서는 용접 수축에 따른 변형량 측정 검사를 실시하였고, 변형량 검사 결과 용접 수축량이 1~2 mm 이내로 측정되었다 (그림 3.3.48).



[그림 3.3.48] SM490A 소재의 용접 변형량 측정

앞선 3.1절에서 기술한 TEST-BED #1 쉴드TBM 커터헤드 제작시의 경험을 바탕으로 직경 8.2 m 커터헤드 시작품의 제작 시에도 변형량 발생이 예상되는 부분은 + 2 ~ 4 mm의 공차를 주어 제작도를 작성 하였다. 또한 용접 전에 충분히 예열을 실시하여 변형이 최소한으로 발생하고 저온균열이 발생하지 않도록 작업을 진행하였다 (그림 3.3.49).

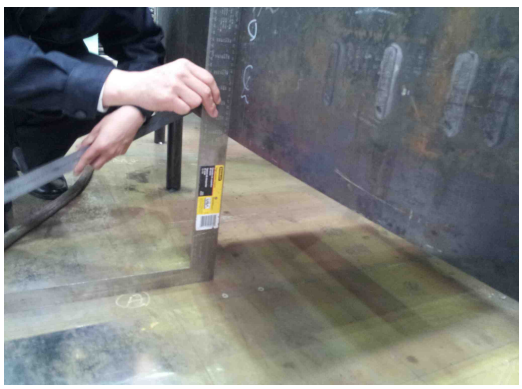
메인프레임의 용접 수축량 검사 결과 0 ~ 2 mm의 수축량을 보여 허용공차 4 mm이내에 들어오는 것을 볼 수 있었다 (그림 3.3.50). 또한, 작업이 진행 중에 있지만 현재까지의 외주링 용접 수축량 검사 결과는 0 ~ 1 mm 이내의 공차를 나타내 용접 수축량 허용 공차 이내의 수치를 보였다 (그림 3.3.51 및 그림 3.3.52).



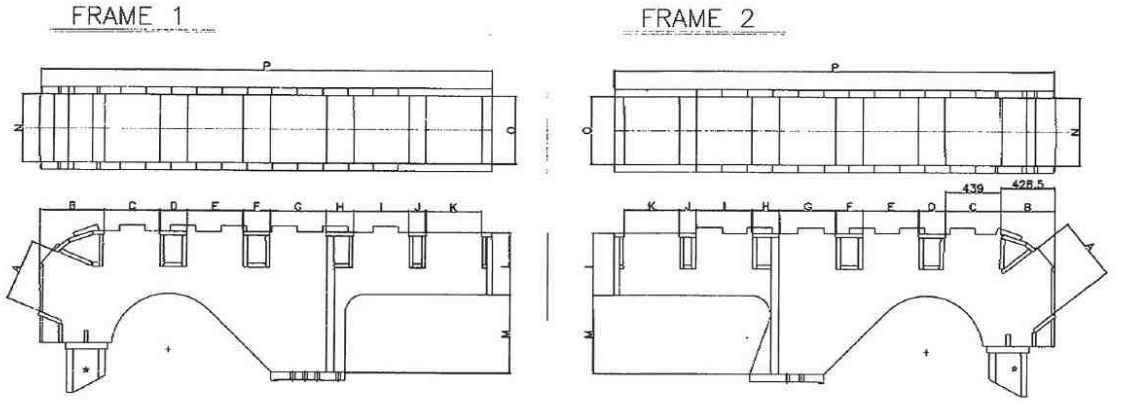

[그림 3.3.49] 용접전 예열




[그림 3.3.50] 메인 프레임 용접 수축량 검사

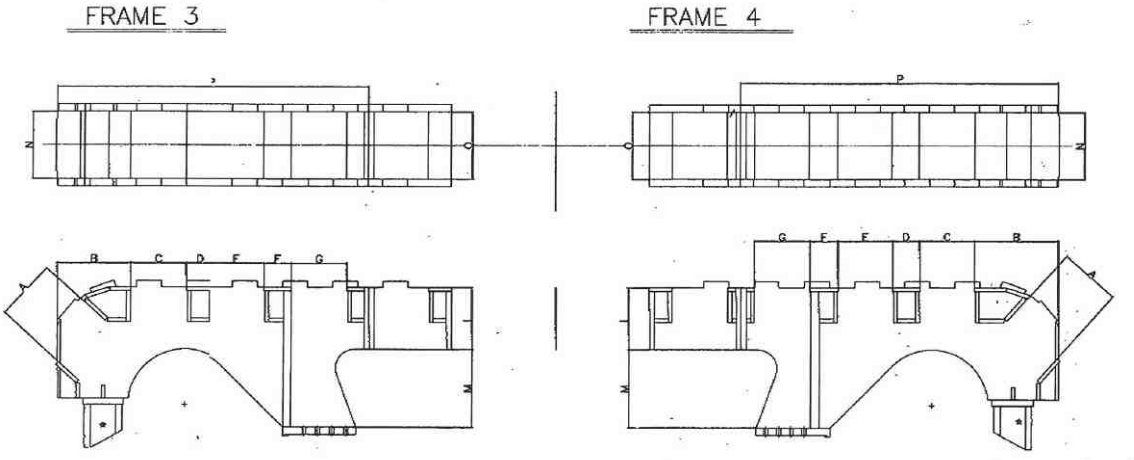



[그림 3.3.51] 외주링 용접 수축량 검사



비 고	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DWG DIM.	494	504.5	439	217	439	217	439	217	439	135	~~439~~	500	628	544	544	3568
TOLERANCE	+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0					
FRAME 1	+1	+1	0	0	−0	−2	+0.5	0	0	−1		0	0	−2	+1	0
DWG DIM.	494	428.5	439	211	439	217	439	217	439	135	~~439~~	500	628	544	544	3481
TOLERANCE	+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0					
FRAME 2	+1	−1	0	−1	−2	+1	0	+1	0	−1		0	0	−2	0	0

2014. 3. 8



비 고	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DWG DIM.	493.69	5865	439	217	439	217	439					500	628	544	544	2514.5
TOLERANCE	+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0									
FRAME 3	+1	−,	−1	0	−1	+1	−1					0	0	−1	−1	−1
DWG DIM.	494.4	6685	439	217	439	217	439					500	628	544	544	2528
TOLERANCE	+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0		+2.0 −0.0									
FRAME 4	0	−2	−1	0	−1	0	+1					0	−1	−2	0	+1

2014. 3. 8

[그림 3.3.52] 단품 치수 검사 및 용접 수축량 검사 Sheet

(7) 커터헤드 제작

이상과 같이 완성된 단품들을 본 연구과제에서 구축한 커터헤드 제작용 부속설비에서 전체 조립 공정을 실시하였다 (그림 3.3.53). 단, 단품 배치전 커터헤드 실물 크기의 도면을 부속설비에 작도하여 제작시 변위량을 즉각적으로 확인 하였다. 그림 3.3.54는 커터헤드 완성까지 수행한 작업 내용이다.



[그림 3.3.53] 부속설비에 실물 크기의 도면 작도



[그림 3.3.54] 직경 8.2 m 커터헤드의 완성