

제2절 TBM 커터헤드 제작기술의 개발

1. TBM 커터헤드 핵심 제작기술 조사

커터헤드 제작기술은 커터헤드의 설계기술과 마찬가지로 각 TBM 제작사별로 핵심 제작기술을 공개하고 있지 않으며, 독자적인 노하우로서 보유·활용하고 있다.

본 절에서는 본 연구과제에서 자체적으로 조사한 결과와 독일 H사에서 약 200여개의 TBM의 설계·제작 경험을 보유한 Dr. Ulrich Rehm이 CEO인 독일 Tunnelling Consultant GmbH로부터의 기술컨설팅 결과를 정리하였다. 이와 같은 분석결과를 이후의 절에 기술한 커터헤드 제작 관련 자체 조사·분석결과와 함께 종합적으로 판단하여 커터헤드 제작에 활용하였다.

커터헤드의 크기(size) 측면에서 커터헤드 구조는 1) 커터헤드 제작에 사용되는 강재의 품질, 2) 커터헤드의 기계 제작과정 및 3) 실제 현장까지의 분할 운반조건 등에 의해 가장 큰 영향을 받는다.

또한 커터헤드의 설계, 모델링 및 제작 과정은 높은 수준의 품질관리를 만족하여야 한다. 특히 커터헤드의 제작과정은 지반조건을 평가하고 그에 따라 요구되는 커터헤드의 구조적 특성을 정의한 후에 시작된다.

독일에서 사용하고 있는 커터헤드의 주 재료는 S355S355J2G3(St 52-3) 또는 S235JRG2(St 37-2)로서 항복강도는 약 240~360 MPa이다 (그림 2.1.1). 이는 우리나라의 강재인 SS400이나 SS490과 유사한 것으로 파악된다.



[그림 2.1.1] 커터헤드 제작에 사용되는 독일의 조강 재료(St 52-3)

특히 탄소함량과 관련된 원 강재의 구성은 용접 시의 작업성에 큰 영향을 미치기 때문에 용접 작업은 숙련된 작업자에 의해서 이루어져야 한다. 또한 다양하고 많은 용접 작업이 필요한 복잡한 커터헤드의 안정성을 유지하기 위해서 원 강재에 높은 수준의 품질관리가 요구되고 있

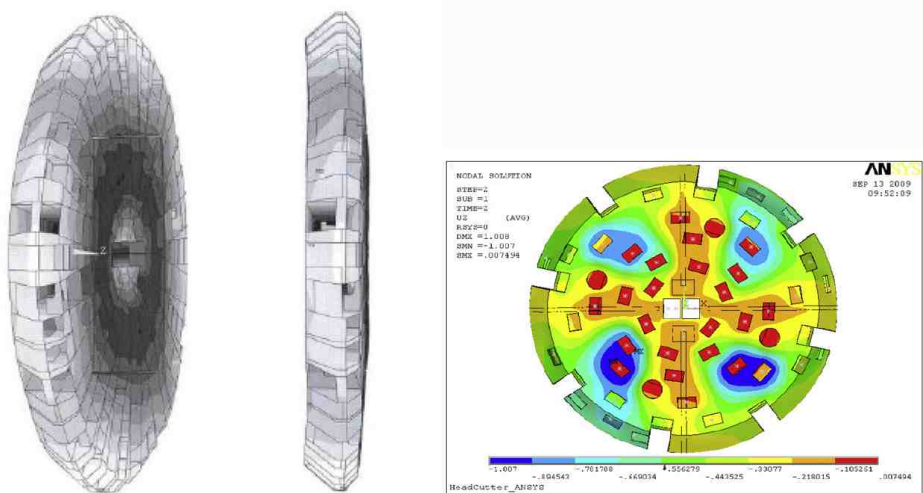
다.

커터헤드 제작 시에는 터널 기술자와 기계제작 기술자 간의 밀접한 협력이 필요하며, 또한 특수부품이나 재료들을 구매하는데 6개월 정도의 시간이 소요될 수 있으므로 자재 부서에 가능한 빨리 제작 계획을 알려야 한다.

커터헤드를 제작하기 위한 기본적인 단계들과 해당 작업 소요시간들을 요약하면 다음과 같다.

- 센터부(center piece) 강철 제품 제작: 약 30~35일
- 외주부(outer piece) 강철 제품 제작: 약 35~40일 (약 4개)
- 예열(pre-heating) 작업: 약 3~5일
- 센터부 샌드 블라스팅(sand blasting): 약 1일
- 센터부 기계 가공: 약 7일
- 외주부 세그먼트 기계 가공: 약 8일 (약 4개)
- 마모 방지, 커버 플레이트(cover plate), 굴착도구 설치(tool installation), 기타 배선: 약 12~15일
- 최종 기계 가공: 약 7~10일

커터헤드 플레이트의 두께와 용접 설계 시에는 굴착대상 지반조건에 따라 TBM에 작용하는 높은 수준의 동하중(dynamic load)을 고려하여야 한다. 이러한 설계 시에는 미소균열(micro-crack)들의 근원인 임계 변형량(critical deformation)을 결정하기 위하여 FEM 해석을 일반적으로 실시한다 (그림 2.1.2).



[그림 2.1.2] 커터헤드의 임계변형량과 인장발생 영역을 파악하기 위한 FEM 해석(예)

이상과 같이 FEM 등에 의해서 커터헤드에 대한 정적 해석을 실시하는 목적은 다음과 같다.

- 충분한 안정성 확보를 위한 메인베어링의 보호 대책 수립

- 커터헤드의 변형성 확인을 통한 하중조건에 대한 커터헤드의 사용성 평가

커터헤드의 설계목적은 버력처리를 위한 버킷(bucket), 맨홀, 커터 하우징 등에 대한 개구부(opening)를 고려하면서도 가장 강성이 크도록 커터헤드를 설계하는 것이다.

커터헤드의 arm의 최소 개수에 대해서는 다음과 같이 TBM의 직경에 따라서 경험적인 범위를 적용하고 있다 (그림 2.1.3).

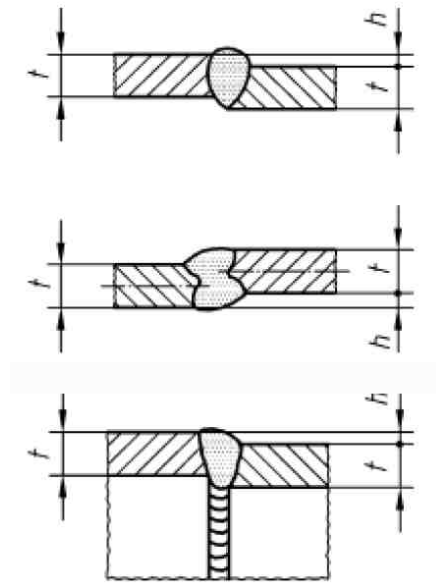
- 직경 5 m 미만의 TBM: 4개
- 직경 5 m 이상의 TBM: 6개

그러나 스트러트(strut)나 스티프너(stiffner)를 어떠한 방법으로 어디에 설치할지에 대한 일반적인 방법은 없으며, 지반조건, 디스크커터 하우징의 위치, 맨홀의 위치 등에 따라 좌우된다. 단, 경험적으로 커터헤드의 적절한 강성을 확보하기 위하여 스티프너 플레이트는 최소 25~30 cm의 간격을 가져야 한다.



[그림 2.1.3] 복합지반용 커터헤드 arm의 개수(예) (좌: 5 m미만, 우: 5 m이상)

커터헤드의 제작에서 가장 중요한 공정인 용접과 관련하여, 심 용접(seam welding)의 품질을 1) 육안과 2) 비파괴시험 모두에 의해 확인하여야 한다. 용접시에 오프셋(offset)이 발생하면 추가적인 한계 모멘트를 야기하여, 연결부의 심각한 손상과 구조적 파괴가 발생할 수 있다(그림 2.1.4).



[그림 2.1.4] 잘못된 심 용접에 의한 오프셋 발생

기계 제작과정 중에 표면과 보어홀(borehole)에 대해 완결성과 품질(거칠기 등)을 확인하여 제어하여야 한다.

절삭도구의 조립 시에 적절한 간격과 정밀한 허용오차를 달성하기 위해서, 커터헤드 상부에 형판(template)을 부착한다 (그림 2.1.5). 형판이 잘못 설치될 경우 커터 하우징 설치 시에 복구할 수 없는 심각한 오차가 발생할 수 있기 때문에, 수평, 반경방향 및 중심방향으로 형판의 보정을 실시하고 확인하여야 한다.



[그림 2.1.5] 커터 하우징의 정확한 설치·제어를 위한 형판의 설치(예)

TBM의 운반과 조립을 위하여 커터헤드 구조를 몇 개의 세그먼트로 분할하여야 한다 (그림

2.1.6). 이때 편심력 발생을 방지하고 엄격한 조립조건을 만족할 수 있도록, 커터헤드 세그먼트를 대칭으로 분할하여야 한다.



[그림 2.1.6] 현장으로의 운반과 조립을 위한 커터헤드의 대칭 분할(예)

이와 같이 현장으로 운반된 커터헤드의 각 부분들은 현장에서 나사로 조여지고 용접된다 (그림 2.1.7). 이때 용접작업의 조건은 공장 조건과 유사하여야 한다. 즉, 용접부를 건조하게 하고 비나 눈으로부터 보호하여야 한다. 또한 용접의 품질은 전체 강 구조의 품질을 좌우하기 때문에 국제적인 표준이나 추가적인 내부 품질기준을 만족하여야 한다. 작업 시의 온도는 적어도 10℃이상이 되어야 한다.



[그림 2.1.7] 현장에서의 커터헤드 보호작업 (좌: 용접을 위한 보호, 우: 나사조임)

커터헤드의 용접 품질과 관련하여 독일에서 적용하고 있는 기준들은 다음과 같다.

- 작업: DIN EN ISO 14731

- 조사: DIN EN ISO 15607
- 결과보고서, DIN EN ISO 15614-1, DIN EN 287-1, DIN EN 1418

용접에 사용되는 필러(filler) 재료, 플럭스 분말(flux powder), 실드가스(shielding gas) 등도 적절한 관련 표준들을 따라야 하고 적용되는 커터헤드의 원 금속에 적합하여야 한다 (그림 2.1.8).



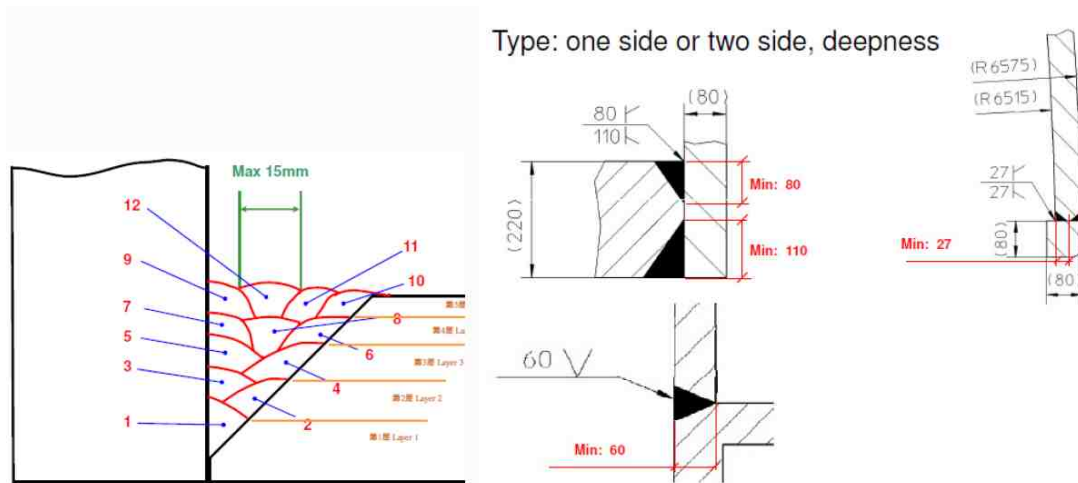
[그림 2.1.8] 커터헤드 강구조의 용접작업(예)

유사한 종류의 금속으로 용접해야 함을 주지하여야 한다. 용접부의 품질은 모재의 품질에 적절하여야 한다. 또한 용접 시방에 따라서 적절한 용접 변수들과 예열 온도를 선정하여야 한다.

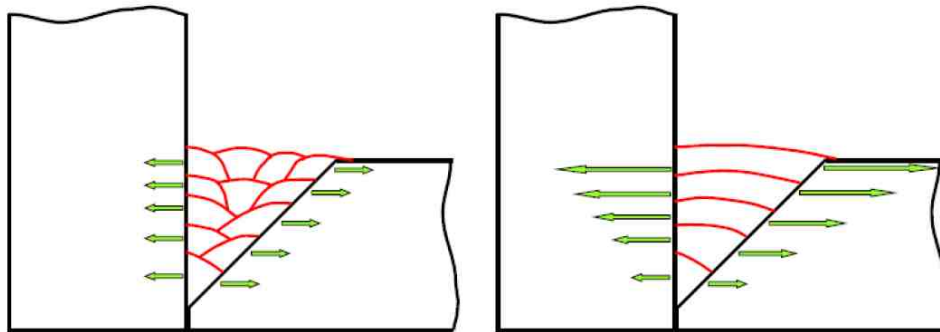
습윤환경이나 -10°C 이하의 조건에서 적절한 대책을 세우지 못한다면 용접을 금지하여야 한다. 또한 흠이나 단차가 있는 부분에 특히 주의하여 용접 부분의 모든 습기를 제거하여야 한다. 예열과 후열에 대해서도 주의를 기울여야 하는데, 일반적인 예열온도는 $50\sim 80^{\circ}\text{C}$ 이다.

용접 작업은 중단없이 연속적으로 이루어져야 한다. 가스아크(gas arc) 용접이 허용되는 경우, 용접부에 찬바람이 들어오지 않도록 대책을 세워야 한다. 실드 금속 아크 용접(Shielded Metal Arc Welding, SMAW)의 경우에는, 가열박스과 직접 연결된 전극만을 사용하여야 한다.

후속 층(layer)에 대해 용접을 하기 전에, 이전 용접층의 표면에서 슬래그(slag)를 제거하여야 한다. 균열, 구멍, 접합부족, 균열 등을 주의 깊게 파악하여야 한다. 양면(two-sided) 용접의 경우에는 ‘내부와 외부’ 또는 ‘좌측과 우측’형태로 용접을 실시하여야 한다 (그림 2.1.9 및 그림 2.1.10). 최소 용접심의 크기를 엄격히 준수하여야 하고, 가용접 길이는 최소 $40\sim 50\text{ mm}$ 가 되어야 한다.



[그림 2.1.9] 추천 용접방법과 최소 용접심 두께



[그림 2.1.10] 용접 절차에 따라 달리 발생한 용접심의 인장력

각 부분의 조립이전에 모든 흠들을 연마하고 깨끗이 하여야 한다. 가용접 시에도 앞서 설명했던 바와 같이 예열온도인 50~80℃를 준수하여야 한다. 냉각이나 인장에 의해 균열이 발생하지 않도록 가용접 심들의 길이는 30~40 mm로서 충분히 길어야 한다. 또한 점용접(spot welding)을 금지하여야 한다. 본 용접작업 이전에 균열이나 결함이 포함된 가용접 부분들을 연마하여야 한다.

이상과 같이 용접작업과 관련된 추가적인 독일의 기준들은 다음과 같다.

- 준비: DIN EN ISO 9692-1
- 허용수준: DIN EN ISO 5817
- 시험: DIN EN ISO 17635

세부적으로 용접과 관련된 시험항목들을 정리하면 다음과 같다.

- 육안시험(visual testing)
- 관입시험(penetration testing)
- 자기탐상시험(magnetic testing)
- 초음파시험(ultrasonic testing)
- 와류탐상시험(Eddy current testing)
- 복사선투과시험(radiographic testing)

커터헤드 제작과 관련된 모든 결함들에 대해서는 크기, 위치 등과 함께 기록으로 남기고 발주자의 품질관리 부서에 보고하여야 한다. 다음의 경우에는 TBM 발주의 승인을 통해 보수하여야 한다.

- 길이가 600 mm 이상 또는 $0.4 \times$ 심 단면적 이상의 깊이에서 길이 200 mm 이상인 보수
- 이전에 풀림된 (annealed) 부분

커터헤드에 사용되는 철판의 두께는 작용 하중조건, 구조 설계조건 등에 따라 다르며 단계별로 용접 및(또는) 나사로 조여진다 (그림 2.1.11).



[그림 2.1.11] 재하조건에 따른 다양한 철판 두께(예) (보통 30~40 mm)

커터헤드의 분할 제작과 관련하여, 직경이 약 2.5~3 m 미만인 커터헤드는 높은 강성 확보를 위해 단일 철판으로 제작한다. 이러한 경우를 제외한 커터헤드는 중앙 정사각형 부분과 4개의 외부 조각(banana piece)로 분리하는 것이 일반적이다 (그림 2.1.12).



(a) 직경 3 m 미만의 소구경 커터헤드 (단일 철판)



(b) 직경 3 m 이상의 일반적인 커터헤드 분할 (사각형 중앙부 및 4개의 외주부)

[그림 2.1.12] 커터헤드의 분할 제작방식

철판 원재료의 가공을 위해 플라즈마 절단기(약 30,000℃에 달하는 비활성 가스를 사용하는 플라즈마 토치)와 같은 고품질 설비를 이용하여야 한다 (그림 2.1.13). 강재 부분의 추가적인 가공과 제작은 CNC(Computerized Numerical Control) 공장기계와 일반적인 밀링 장비를 통해 이루어진다 (그림 2.1.14). 대형 실링 조인트(sealing joint) 등을 제작하기 위해서는 직경이 15 m까지 달하는 대형 carousel이 사용되고 있다.

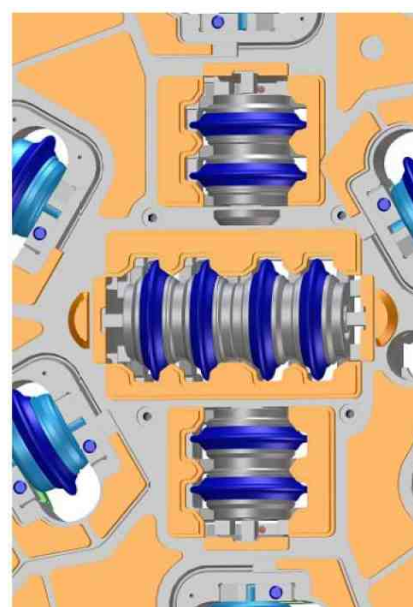
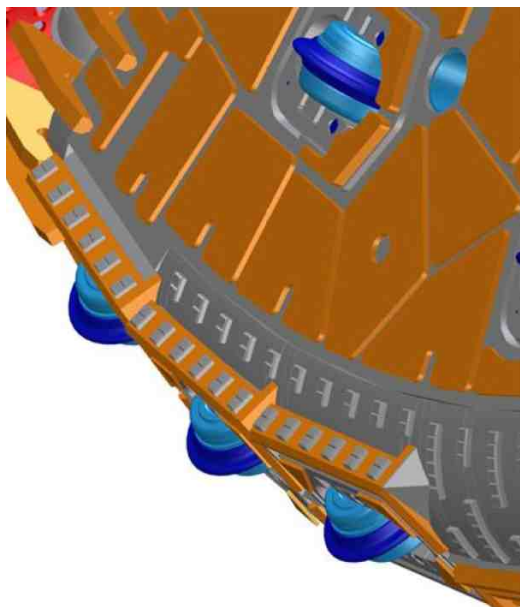
독일에서는 커터헤드의 마모를 방지하기 위하여, 커터헤드 구조에 Hardox와 Vaudit로 제작된 특수 마모방지 플레이트를 용접하여 제작하고 있다 (그림 2.1.15). Hardox는 스웨덴 SAAB에서 개발된 강재로서 마모가 심한 부분에 사용되는 재료이다.



[그림 2.1.13] 원 강판의 가공을 위한 플라즈마 절단기(최대 220 mm)



[그림 2.1.14] 밀링 장비에 의한 가공 작업(좌)과 CNC 공작기계(우)



[그림 2.1.15] 커터헤드에 용접되는 커터헤드의 마모방지 플레이트(예)

2. 연구단 보유 TBM에 대한 제작방식 분석

가. 조사개요

단기간 내에 설정된 연구목표를 달성하기 위해서는 해외 제작사의 커터헤드 설계 기술을 도입하는 것이 가장 빠르나, 수십년간 축적·활용되고 있는 비공개 노하우를 도입하기란 현실적으로 불가능한 일이다.

이에 본 연구과제에서는 국내에 기 도입된 커터헤드의 벤치마킹을 통하여, 커터헤드의 형태 및 디스크커터의 배열을 확인하고자 하였다. 또한 이를 통해 실제 제작 도면을 완성함으로써 실제 국산 커터헤드의 설계와 제작에 활용하였다.

나. 조사대상

조사대상 TBM은 $\varnothing 7.89$ m의 EPB(Earth Pressure Balanced) 쉘드TBM으로서 굴착경은 7,914mm인 일본 K社の 커터헤드이다. 커터헤드의 형태는 십자모양의 프레임을 기본으로 45° 각도에 십자 프레임을 걸친 Star형태이며, 측면에서 보았을 경우에는 Semi-Domed형태를 띤다.

디스크커터는 총 57개로서 17인치 센터커터(트윈커터)8개와 17인치 싱글커터 49개로 이루어져 있다.

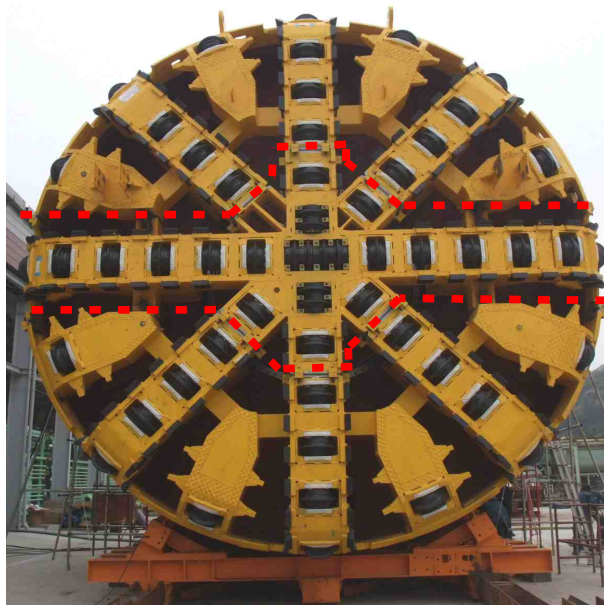
복합지반용 커터헤드로서 토사나 모래, 자갈층에도 적용이 가능하도록 스크래퍼 비트가 궤적을 따라 빈틈없이 채워져 있다. 커터헤드에 부착된 스크래퍼 비트는 총 3가지 종류로 외주부에 부착되는 A형 16개, 외주부 앞에 배열 되는 B형 8개, 그리고 일반형인 C형 104개가 부착되어 있다.

또한 윤반이 용이 하도록 3분할로 제작되어 있으며 (그림 2.2.1 및 2.2.2), 그림 2.2.1의 점선 부가 분할면을 표시하고 있다.

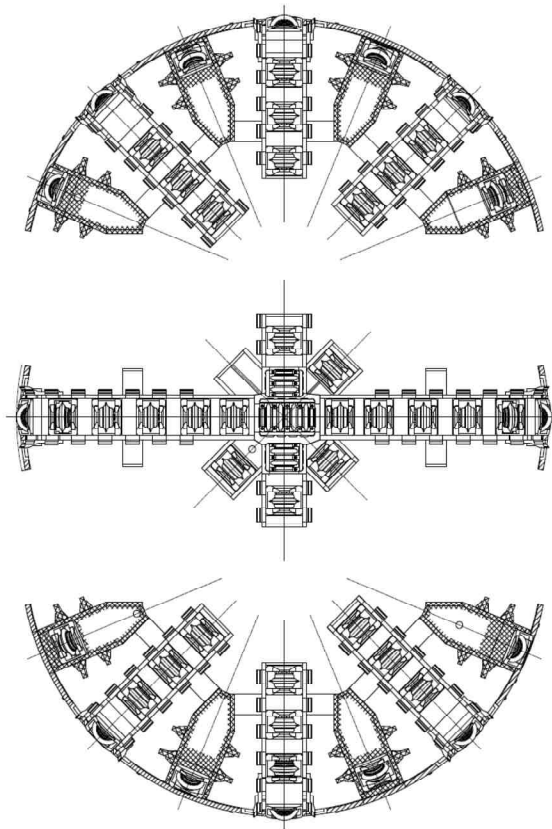
다. 조사결과

약 $\varnothing 3.0$ m 이하인 커터헤드의 경우 제작사마다 제작 방법이 상이하나, 크게 3가지 방법으로 나눌수 있다. 첫 번째는 원판을 직접 가공하여 커터헤드를 제작하는 방법과 두 번째 각부를 절단 후 가공하여 용접하는 방법, 그리고 세 번째 상기의 두 가지 방법을 병행하는 방법이 있다.

그러나 약 $\varnothing 3.0$ m 이상일 경우 상기의 제작 방법 중 첫 번째의 원판을 직접 가공하여 커터헤드를 제작하는 방법은 불가능하다. 이는 현실적으로 제작 가능한 규격의 원판을 구매하는데도 어려움이 있으며, 구매가 가능하다 하더라도 소재 구매 원가가 과다하게 소요되며, 필요 이상으로 낭비되는 부분이 많아지게 된다. 따라서 대구경 커터헤드의 경우에는 두 번째 방법인 각 부를 절단 후 가공하여 용접하는 방법과, 세 번째 방법인 일부는 원판을 가공하며 기타 부가적인 부분은 각 부를 절단 후 가공하여 용접하는 방법으로 제작을 할 수 있다.



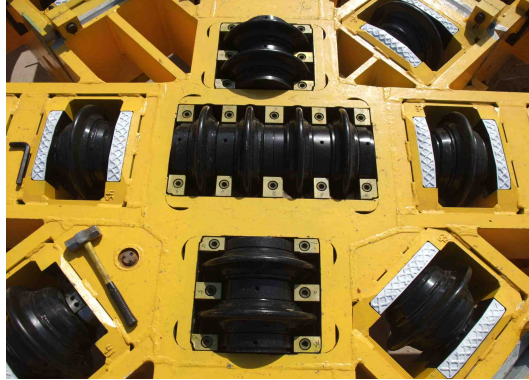
[그림 2.2.1] 직경 7.89 m의 EPB 쉴드TBM 커터헤드(점선부 분할면)



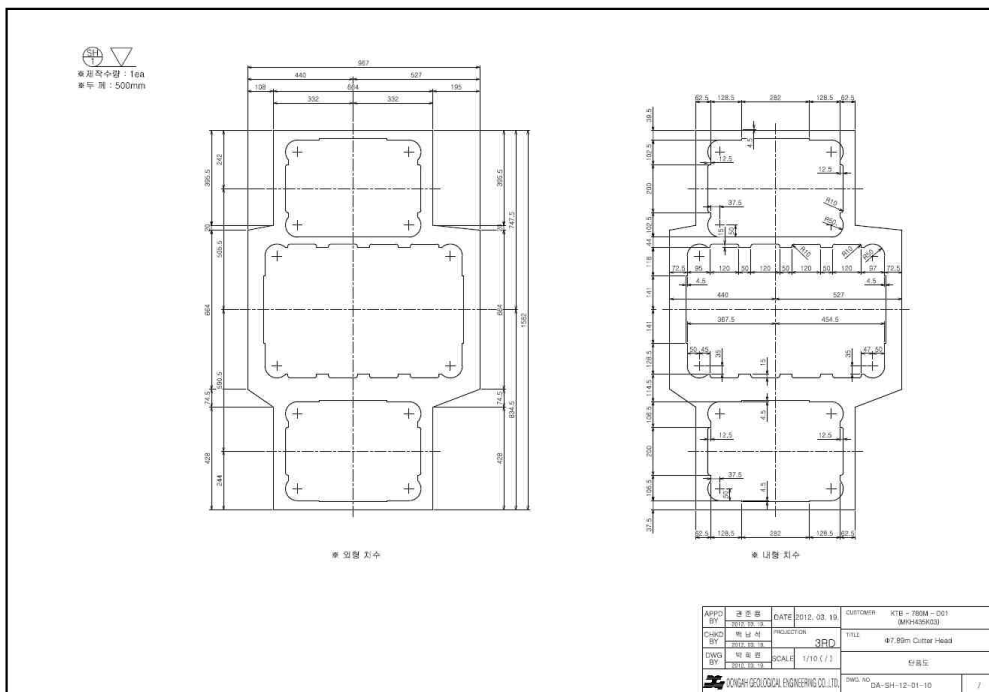
[그림 2.2.2] 본 연구에서 제작한 직경 7.89 m EPB 쉴드TBM 커터헤드 분할도
조사대상으로 선정된 일본 K社의 $\varnothing 7.89$ EPB Type의 커터헤드의 경우 세 번째의 방법으로
제작되어 있는 것을 파악하였다.

먼저 커터헤드의 중심부인 센터커터의 하우징이 조립되는 부분은 500 mm두께의 원판 전체
를 가공하여 센터커터 하우징 및 17인치 센터커터(트윈커터)가 조립될 수 있도록 제작되어 있
다.

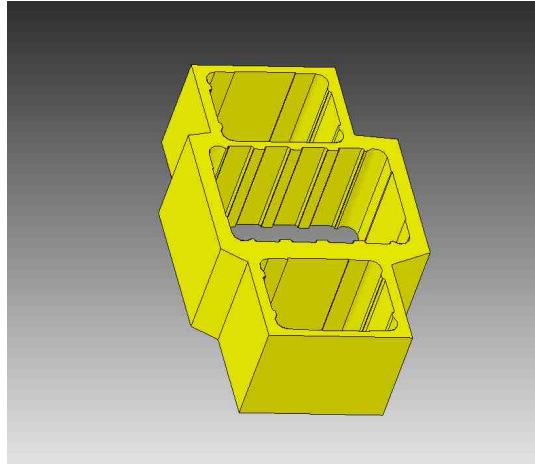
그림 2.2.3은 원판으로 제작된 커터헤드 센터부분의 사진을 나타내며, 그림 2.2.4는 작성된 커터헤드 센터부 제작도를 나타낸다. 또한 그림 2.2.5는 제작도를 바탕으로 작성된 모델링 그림이다.



[그림 2.2.3] 커터헤드 센터부



[그림 2.2.4] 본 연구에서 작성한 커터헤드 센터부 제작도

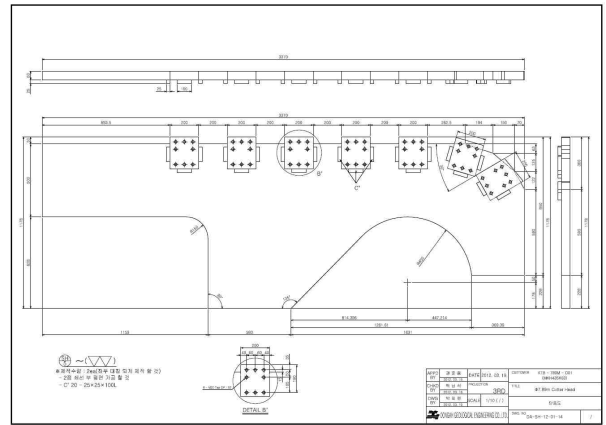
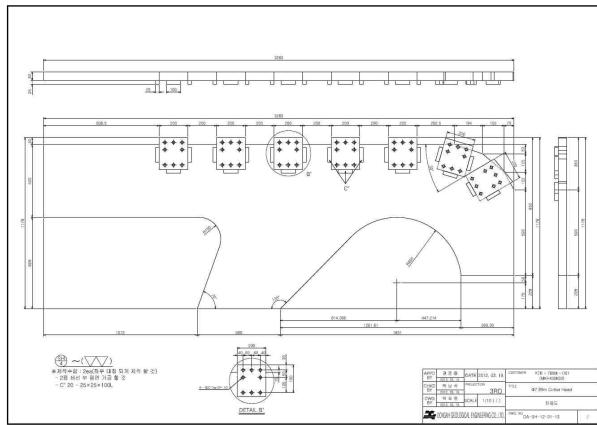
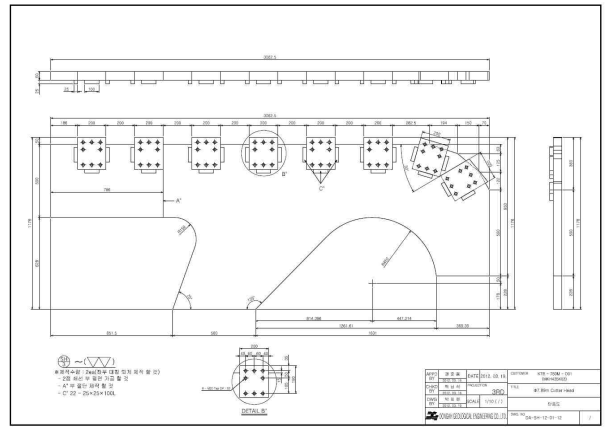
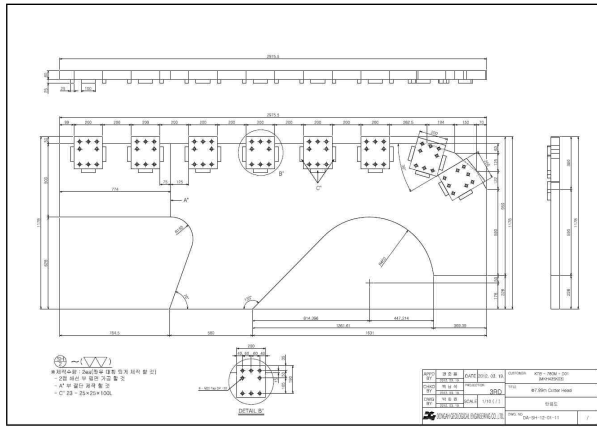


[그림 2.2.5] 커터헤드 센터부 모델링

이 때 제작된 센터부분이 커터헤드의 중심에 자리잡고 센터부를 중심으로 열십자 방향으로 메인프레임이 부착이 된다. 센터부에 조립되는 메인프레임에는 스크래퍼 비트가 볼트로 부착이 되며, 반대쪽 면에는 디스크커터 하우징이 용접이 되어 부착된다. 이후 센터부와 메인프레임은 용접으로 조립을 하게 된다. 이때 메인프레임 절단 후 스크래퍼 비트의 볼트 탭 가공 및 디스크 커터 하우징과 스크래퍼 비트가 부착되는 부분에는 평면가공작업을 선행한 후 센터부와 용접을 하여 조립이 되는데 이는 조립후 볼트 탭 가공 및 평면 가공에 어려움이 있기 때문이다. 또한 분할이 되는 면에 대해서는 분할 제작 후 볼트 연결 박스를 부착하여 제작 및 조립 시에 어긋남이 없도록 한다. 이러한 볼트 연결 박스는 투입현장에서 3분할을 조립한 후 풀 용접을 하는데 풀 용접 후에는 제거하여 준다. 그림 2.2.6은 분할면에 대한 연결 볼트 박스이며, 그림 2.2.7은 본 연구에서 작성한 메인프레임의 제작도이다.

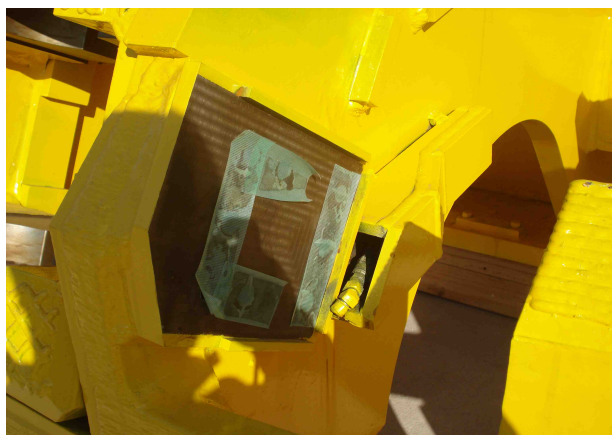


[그림 2.2.6] 분할면에 대한 연결 볼트 박스

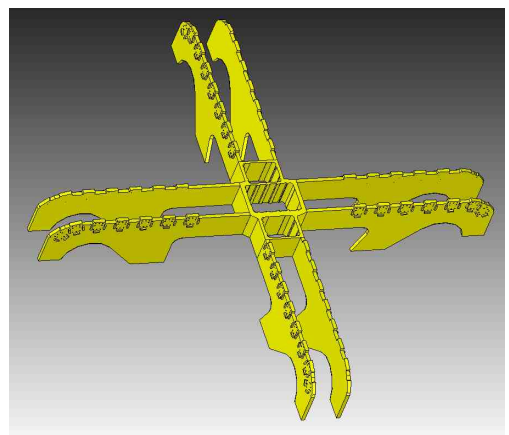


[그림 2.2.7] 본 연구에서 작성한 메인프레임 제작도

그림 2.2.8은 스크래퍼 비트를 부착하기 위한 홀 및 평면 가공 부분이며, 그림 2.2.9는 그림 2.2.4와 그림 2.2.7의 도면들로부터 센터부와 메인프레임을 결합한 모델링 결과이다.

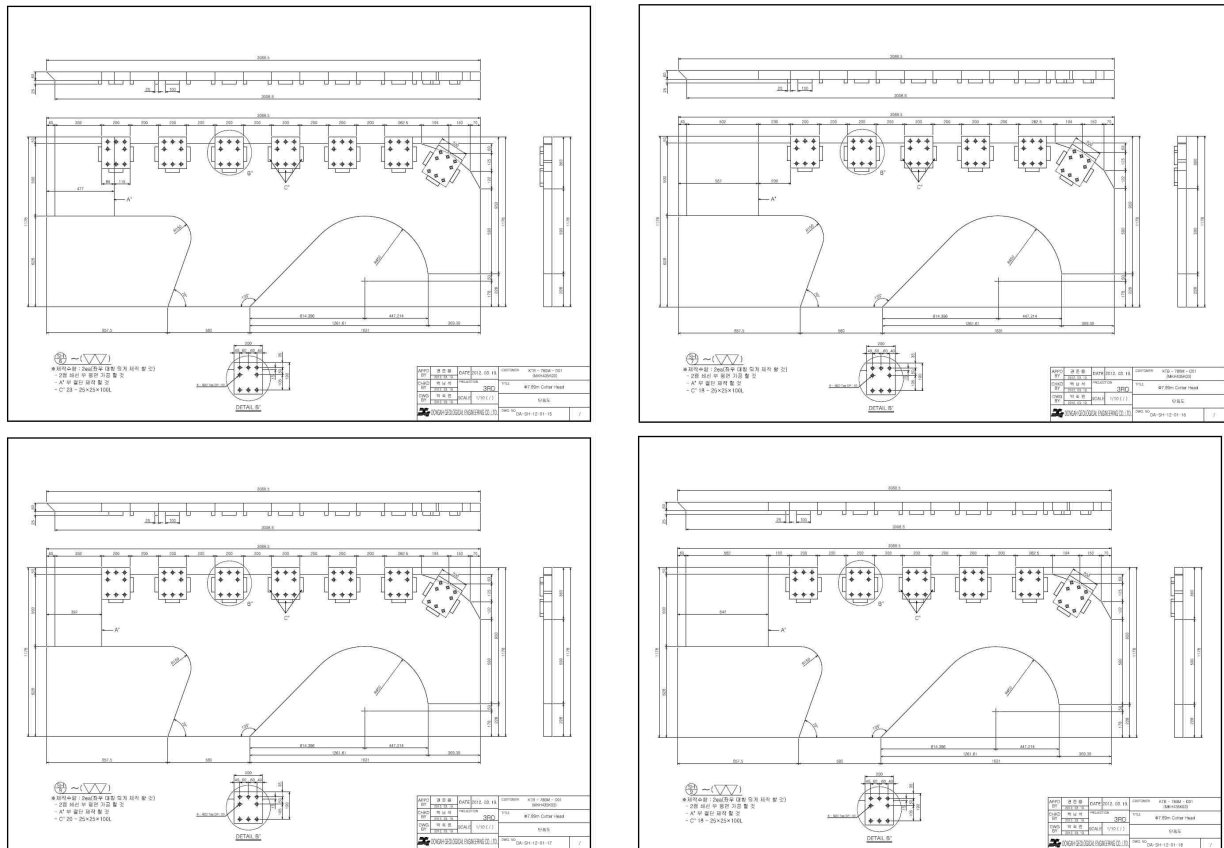


[그림 2.2.8] 스크래퍼 비트 부착용 홀 가공 및 평면가공 사진

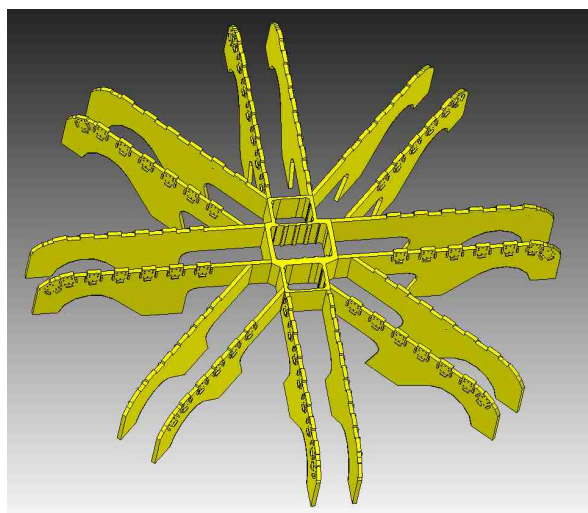


[그림 2.2.9] 센터부와 메인프레임 결합 모델링

이후에 45°각도에 메인프레임과 동일한 형태의 프레임이 조립이 된다. 이 프레임의 경우 메인프레임과 거의 유사한 형태를 가지게 되나 스크래퍼 비트의 조립 위치가 메인프레임 스크래퍼 비트 조립 위치의 사이 사이에 자리하게 되어 스크래퍼 비트 궤적에서 빈곳이 없게 된다 (그림 2.2.10 및 그림 2.2.11).



[그림 2.2.10] 45°각도에 부착되는 메인프레임 제작도



[그림 2.2.11] 45°각도에 메인프레임이 부착된 이후의 모델링 결과
센터부를 중심으로 45°간격으로 배치된 메인프레임 바닥 부분에는 커터헤드 드럼과 직접

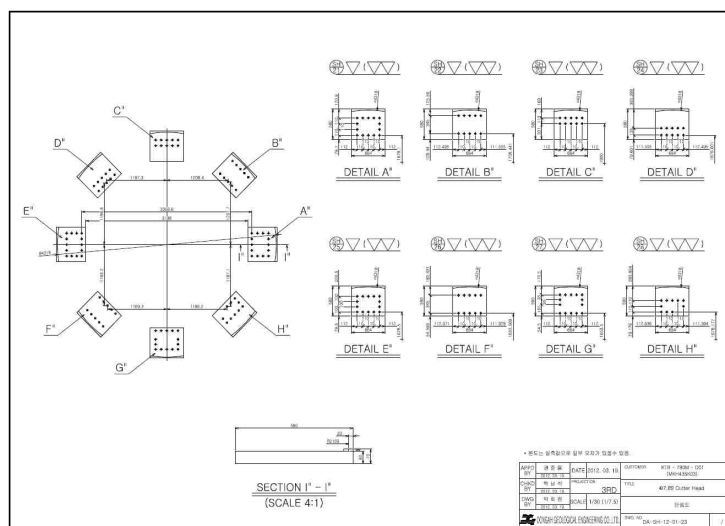
결합되는 플레이트가 부착이 된다. 그림 2.2.12는 커터헤드 드럼과 부착되는 플레이트의 사진이다. 커터헤드 드럼의 사진과 커터헤드 드럼과 결합되는 플레이트 부분의 도면화 작업 결과는 각각 그림 2.2.13 및 2.2.14와 같다.



[그림 2.2.12] 커터헤드 드럼과 결합되는 플레이트



[그림 2.2.13] 커터헤드 드럼



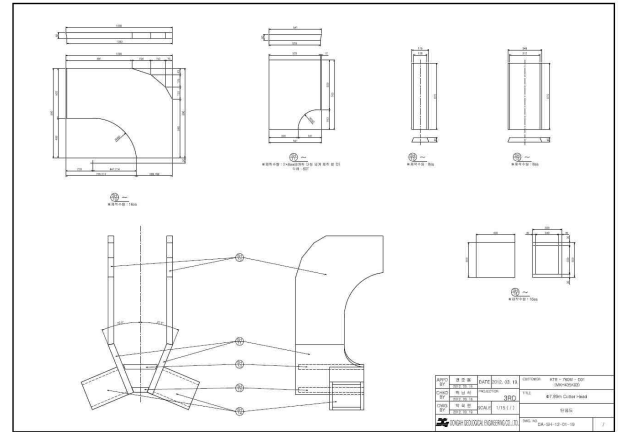
[그림 2.2.14] 커터헤드 드럼과 결합되는 플레이트 도면

45°간격으로 부착된 메인프레임 사이에는 보조프레임이 부착된다 (그림 2.2.15). 보조프레임의 역할은 단면이 넓은 대구경 커터헤드의 외각부에 대한 구조적인 안정성을 증가시키며, 개구

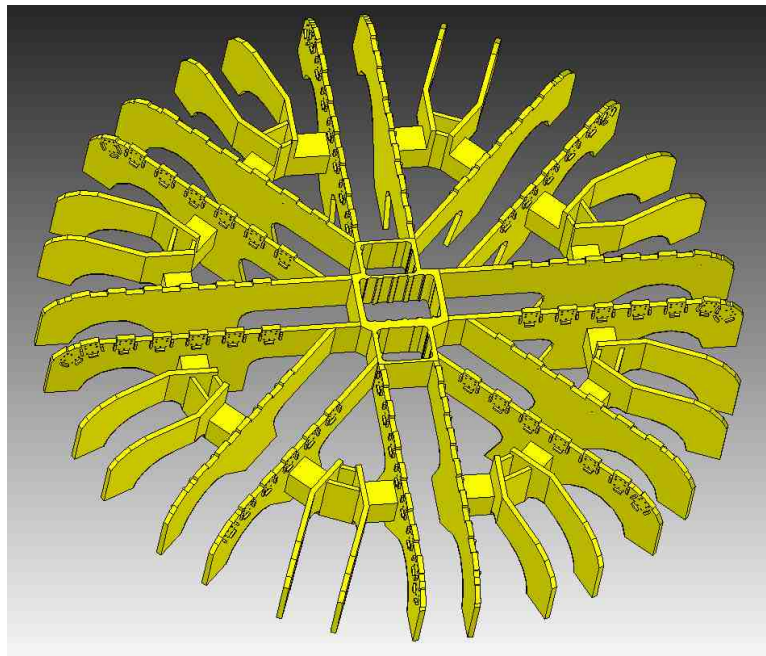
을을 조절하는 역할을 하게 된다. 또한 메인프레임만으로는 부족한 디스크커터의 배치 공간을 제공하여 일정한 궤적이 나오도록 하는 역할을 한다. 이와 같은 보조프레임의 도면화 작업결과는 그림 2.2.16과 같다. 앞선 그림 2.2.11의 모델링 결과에 보조프레임의 도면화 결과를 반영한 모델링 결과는 그림 2.2.17과 같다.



[그림 2.2.15] 보조프레임 사진

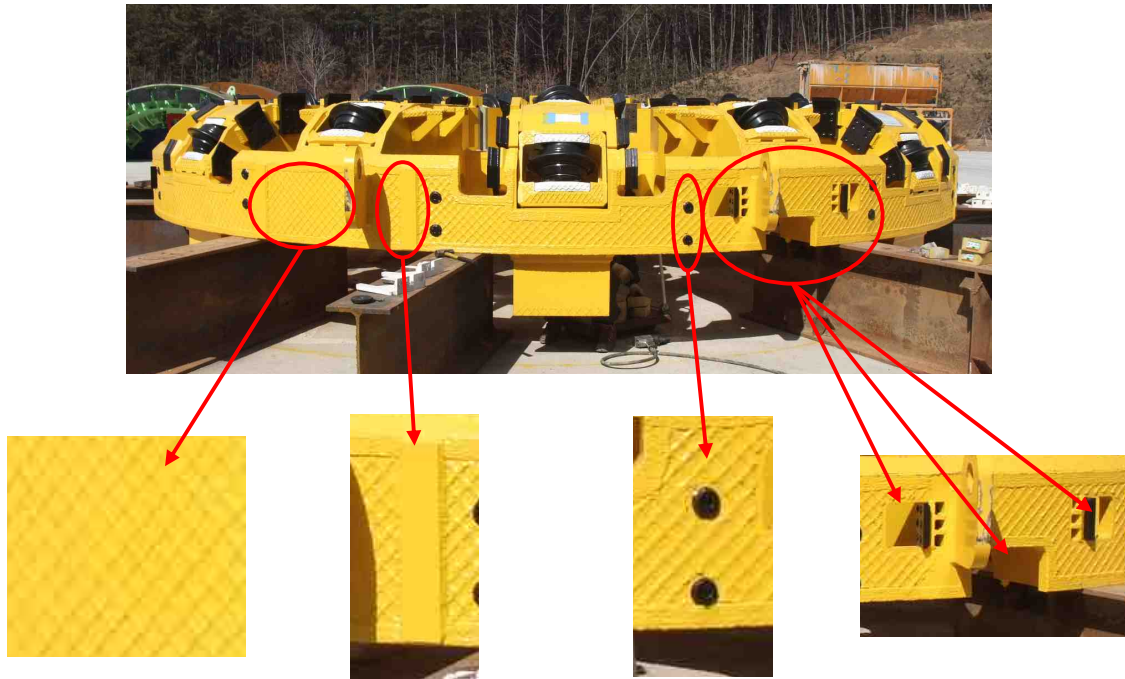


[그림 2.2.16] 보조프레임 도면화



[그림 2.2.17] 커터헤드 메인프레임과 보조프레임이 부착된 모델링

커터헤드의 외주부는 커터헤드에서 면판부와 비교하여 마모현상이 많이 발생하는 부분이다. 따라서 면판부의 철판 두께가 60T인 반면 외주부의 철판 두께는 80T이며, 부가적으로 마모현상을 줄이기 위한 여러 가지 장치가 부착되어 있다 (그림 2.2.18).



[그림 2.2.18] 커터헤드 외주부 및 마모 방지 장치

그림 2.2.18의 첫 번째 확대 사진은 커터헤드 전체에 용접되어 있는 하드페이싱 용접에 대한 사진이다. 이는 커터헤드 본 소재의 마모를 방지하고자 커터헤드 전체에 기본적으로 행하여지는 마모 방지 방법이다. 커터헤드 면판에 대해서는 하드페이싱 용접 외에도 디스크커터의 궤적과 스크래퍼 비트 궤적으로 인하여 면판에 대한 마모현상은 어느 정도 방지가 된다. 그러나 외주부는 디스크커터의 궤적과 스크래퍼 비트의 궤적의 사각지대이다. 따라서 하드페이싱 용접만으로는 본 소재의 마모현상을 방지하는데 한계가 있다. 그림 2.1.19는 이러한 외주부의 마모 사례이다.

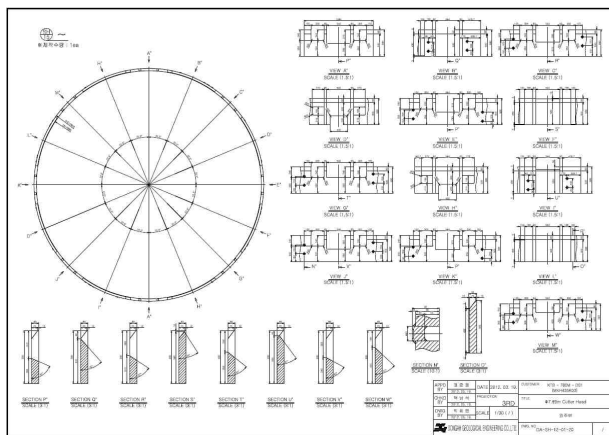
그림 2.2.19와 같이, 커터헤드의 외주부는 하드페이싱 용접만으로는 마모현상을 방지하는데 한계가 있다. 따라서 다른 부가적인 마모방지 방법을 고안하게 되는데, 그림 2.2.18의 두 번째와 세 번째 확대사진이 그것이다. 두 번째 확대 사진은 HARDOX재질로 추정되는 내마모 및 경도에 뛰어난 재질을 외주부에 덧붙인 사진이다. 그리고 세 번째 사진은 초경매입비트를 커터헤드 일정한 궤적을 따라 커터헤드 각 부분에 심어 놓은 사진이다. 초경매입비트는 커터헤드가 회전을 하게 되면 일정한 궤적을 만들며, 이 때 본 커터헤드 소재의 마모현상을 방지하게 된다. 그러나 초경 매입 비트는 이러한 마모 방지 역할 외에도 커터헤드 외주부의 마모가 얼마나 진행되었는지를 알려주는 기준이 되기도 한다. 이는 공사를 끝낸 커터헤드의 재활용 가능 여부를 확인하는 중요한 기준이 된다. 이번 조사대상인 직경 7.89 m인 TBM 커터헤드 외주부에는 총 32개의 초경매입비트가 부착되어 있다.



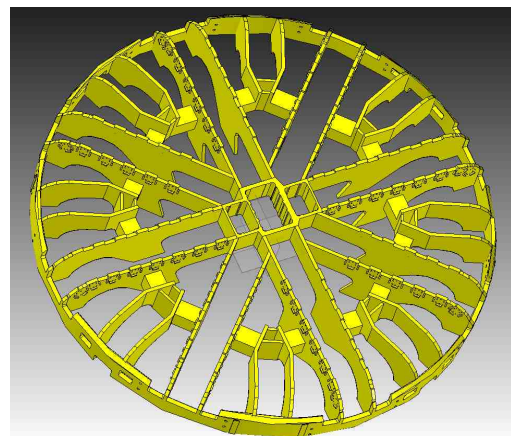
[그림 2.2.19] 커터헤드 외주부의 마모 사례

그림 2.2.18의 네 번째 확대 사진은 면판의 개구부와는 별개로 외주부에 개구부를 만들어 놓은 사진이다. 외주부의 개구부는 단순히 계산이나 TBM 굴착 시뮬레이션을 통하여 만들어진 것이 아니라, 일본 K社의 오랜 현장 적용 경험의 결과물로서 상당부분 효과가 있는 것으로 파악된다.

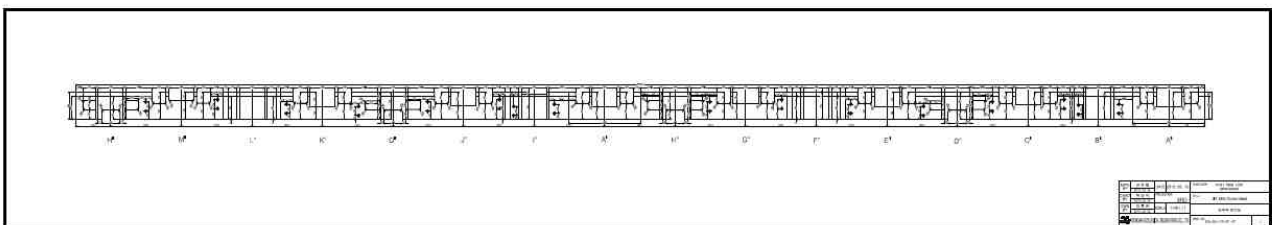
그림 2.2.20은 커터헤드 외주부에 대하여 본 연구에서 작성한 제작도이다. 또한 그림 2.2.21은 외주부가 부착된 전체 모델링 결과이며, 그림 2.2.22는 커터헤드 외주부의 전개도이다.



[그림 2.2.20] 커터헤드 외주부 제작도



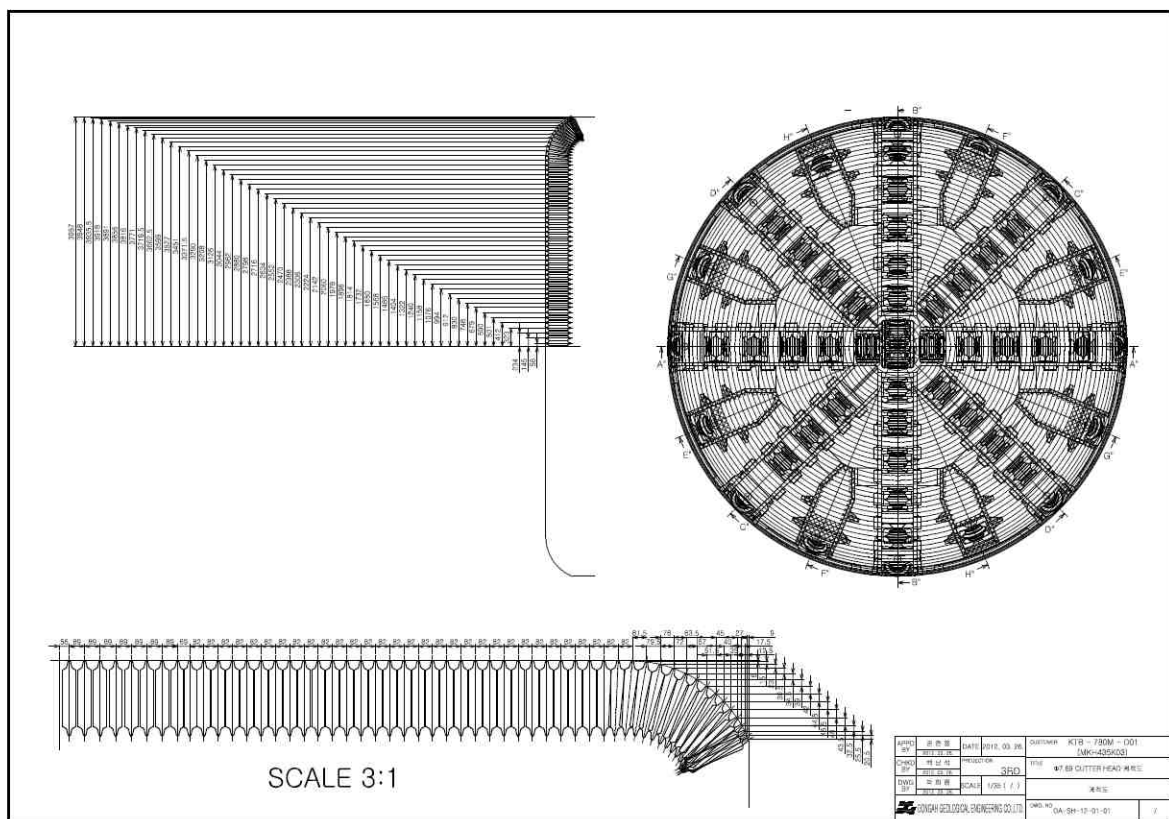
[그림 2.2.21] 외주부가 부착된 모델링



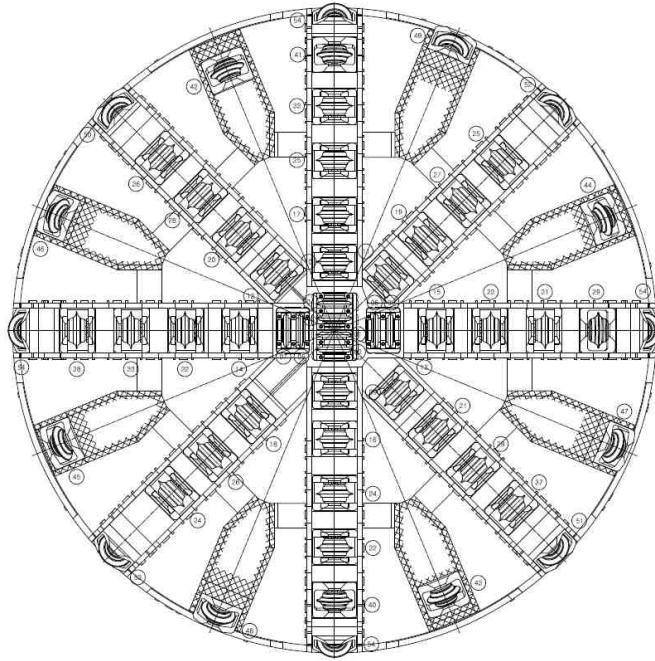
[그림 2.2.22] 커터헤드 외주부 전개도

그 다음으로 이상과 같이 제작된 커터헤드 프레임에 디스크커터와 스크레퍼 비트를 배치하게 된다. 스크레퍼 비트의 경우 메인프레임 제작 시에 선행작업으로 스크레퍼 비트의 자리에 볼트 탭 가공 및 평면가공이 완성되어 있어 조립을 하게 되면 궤적에 따라 스크레퍼 비트가 배치된다.

디스크커터의 경우에는 사전에 계산된 궤적을 바탕으로 배치를 하게 된다. 그림 2.2.23은 디스크커터의 궤적을 나타내는 도면이며, 그림 2.2.24는 디스크커터의 배치 위치를 나타내는 도면이다.



[그림 2.2.23] 디스크커터의 궤적 도면



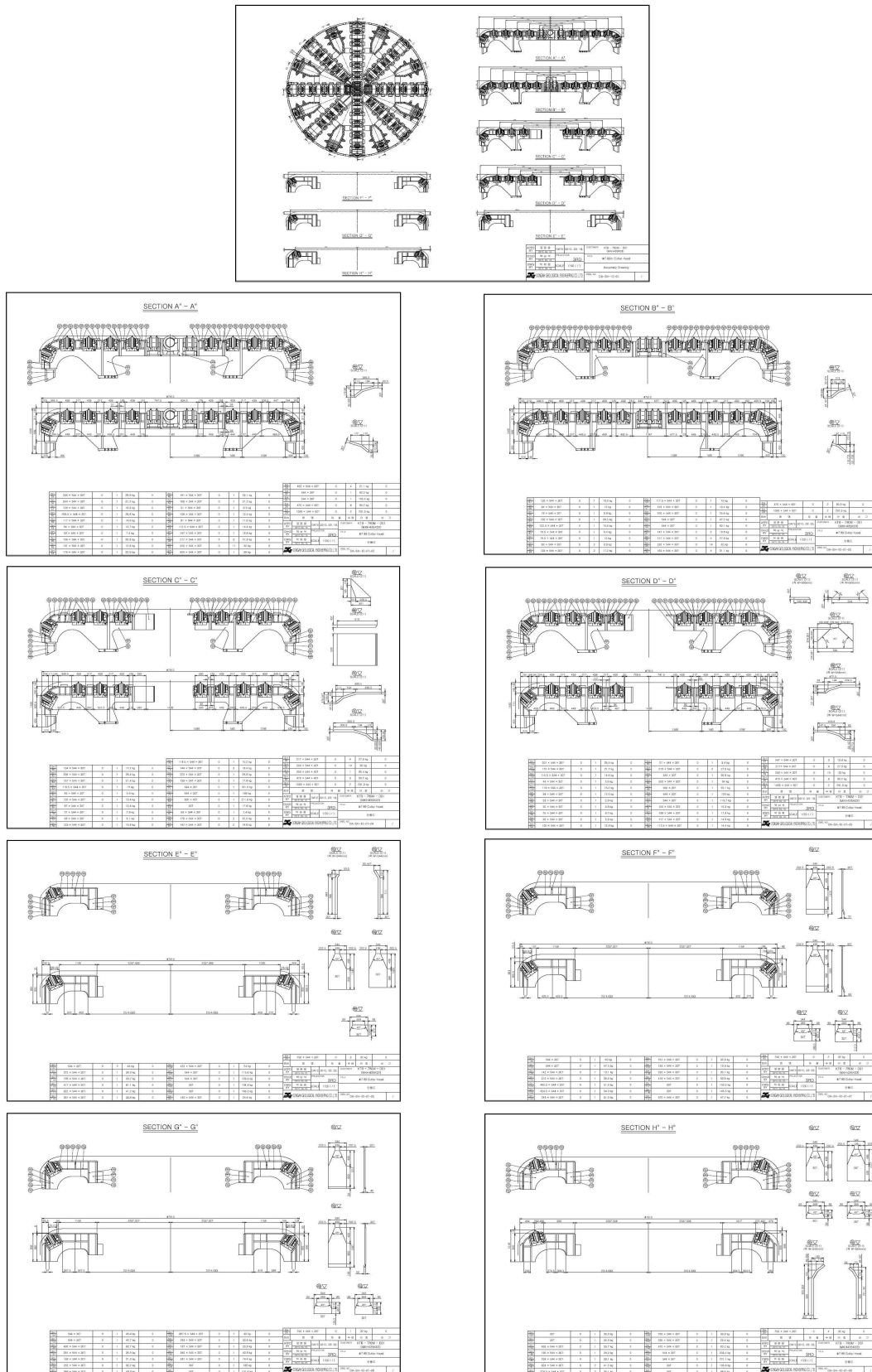
[그림 2.2.24] 디스크커터의 배열 도면(정면도)

그림 2.2.24와 같이 일정한 간격을 유지하여 디스크커터를 배치하게 되면, 디스크커터 홀더와 홀더 사이에 공간이 생기게 된다. 이때 빈 공간은 30T의 철판으로 채우게 되며, 프레임 사이의 구조적 안정성을 위하여 280mm 폭의 사각 박스로 제작이 되게 된다. 작업의 순서상 상기에 표현한 내용처럼 디스크커터를 선 배치 후 빈 공간을 채우게 되나, 다음과 같이 작업을 하게 될 경우 사각 박스 프레임의 용접에 용이치 않게 된다. 따라서 디스크커터의 배열이 결정되면, 빈 공간에 대한 수치를 CAD나 모델링을 통하여 먼저 계산하여 사각 박스를 제작 설치 후 디스크커터 홀더를 삽입 배치하게 된다. 그림 2.2.25는 프레임 사이의 구조적 안정성을 위하여 설치된 사각 박스의 사진이다.



[그림 2.2.25] 디스크커터 홀더 사이에 설치된 사각박스

이상과 같은 커터헤드 제작과 관련된 분석작업을 통해 최종적으로 작성된 분석대상의 커터헤드 조립·제작 도면은 다음의 그림 2.2.26과 같다.



3. 커터헤드 소재 선정

가. 소재 분석 개요

본 연구과제에서는 TBM의 커터헤드 설계기술, 고성능 디스크커터, TBM 설계·시공 리스크 최소화 등을 집대성하여 고가의 TBM을 재활용하는 것이 최종 연구목표 중의 하나이다.

세부적으로 TBM 재활용은 커터헤드를 제외한 TBM 및 후방설비는 개조 및 보수를 통하여 재사용하며, 커터헤드는 투입될 지층에 맞게 신규 제작 하는 것이라 할 수 있다.

현재까지 우리나라에서 직경 7 m급 이상의 TBM의 시공실적은 단 7건에 불과하다 (표 2.3.1 참조). 동일한 장비를 재사용하여 시공한 실적은 전무하며, 커터헤드의 제작 실적도 없는 상황이다. 또한 현재 국외 제조사들의 커터헤드 소재는 회사 기밀 사항으로 대외적으로 알려져 있는 사항이 없다. 따라서 커터헤드 제작 과정의 첫 번째 단계라 할 수 있는 소재의 선정에서부터 어려움이 있는 것이 사실이다.

따라서 본 연구의 목적은 국외 유명 제조사의 중·대단면 TBM 제조사의 커터헤드 소재를 분석하는 것이 첫 번째라 하겠으며, 분석한 자료를 통하여 대처 가능한 국내 소재를 찾는 것이 그 두 번째라 할 수 있다.

[표 2.3.1] 직경 7m 이상급 쉘드TBM의 국내 시공실적 및 보유현황

현장명	공사기간	시공자	장비유형	제원	보유현황
광주지하철1호선	1999.09~2003.02	성원건설 (경빈개발)	EPB형	Ø7.42m	동아지질 보유 (연구단)
부산지하철 230공구	1999.12~2002.04	두산건설 (경빈개발)	Slurry형	Ø7.8m	미보유
서울지하철 9호선 909공구	2004.08~2007.08	두산건설 (동아지질)	Slurry형	Ø7.81m	동아지질 보유 (연구단)
분당선 왕십리~선릉 복선전철 3공구	2004.07~2009.09	대우건설 (경빈개발)	EPB형	Ø7.98m	미보유
인천공항철도 2-5B공구	2004.04~2009.12	삼환 (동아지질)	EPB형	Ø7.93m	동아지질 보유 (연구단)
서울지하철 7호선 704공구	2005.09~2009.09	삼성건설 (동아지질)	EPB형	Ø7.32m	미보유
서울지하철 7호선 703공구	2005.09~2009.12	대우건설 (경빈개발)	EPB형	Ø7.37m	미보유

나. 분석대상

현재 TBM의 제작이 가능한 제작사는 전 세계적으로 일부 제작사에 한정되어 있다. 대표적인 제작사로는 독일의 Herrenknecht, 일본의 NKK, Kawasaki, 미국의 Robbins 등을 들 수 있다. 본 연구과제의 궁극적인 목표인 TBM 커터헤드를 제작하기에 앞서서 이러한 제조사들의 커터헤드 재질에 대한 분석이 필요하다.

만약 소재의 규격이나 기호를 알 수 있다면 그 규격이나 기호의 소재를 구매하여 시험이 가능하나, 앞서 언급하였듯이 대외적으로 알려져 있는 사항이 없는 상황이다.

따라서 현재 국내에서 보유하고 있는 커터헤드의 시편을 직접 절취하여 시험을 실시하였다. 현재 국내에서 분석이 가능한 직경 7 m 이상급 TBM은 표 2.3.1에 제시된 총 3대의 장비가 유일하며, 3대의 장비 모두 본 연구단의 연구기관인 (주)동아지질에서 보유하고 있다. 따라서 3대의 장비 중 동일한 제작사를 제외하고 2대의 장비에 대하여 시험을 실시하였다. 그림 2.3.1과 그림 2.3.2는 본 시험에서 커터헤드 소재 분석 대상으로 선정한 TBM의 사진이다.



[그림 2.3.1] NKK社 TBM Shield M/C



[그림 2.3.2] KAWASAKI社 TBM Shield M/C

또한 국산 커터헤드 제작에 대비하여 활용가능성이 높을 것으로 판단되는 4종류의 소재를 임의로 선정하였으며, 각각의 화학성분과 물성들을 다음의 표 2.3.2와 표 2.3.3에 정리하였다.

[표 2.3.2] 주요 국산 소재에 대한 화학성분 분석결과

품 명	화 학 성 분(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Others
SS400				0.050 이하	0.050 이하	
SM490YB	0.20 이하	0.55 이하	1.60 이하	0.035 이하	0.035 이하	
SCM440	0.38~0.43	0.15~0.35	0.60~0.85	0.030 이하	0.030 이하	Cr 0.90~1.20 Mo 0.15~0.30
POSTEN80	0.16 이하	0.15~0.35	1.20 이하	0.03 이하	0.03 이하	Cr 0.04~0.80 Cu 0.15~0.50 Ni 0.40~1.50 Mo 0.30~0.60 V 0.10 이하 B 0.006 이하

[표 2.3.3] 주요 국산 소재의 물성

품 명	물 성 치		
	항복점 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	신율 (%)
SS400	215 이하	400~510	23 이하
SM490YB	325 이하	490~610	21 이하
SCM440	834 이하	980.7 이하	12 이하
POSTEN80	680 이하	785~932	16 이하

다. 시편제작

소재 분석을 위한 시편 제작은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

첫 번째로 분석대상으로 선정한 TBM 2대의 커터헤드 일부분을 절단하였다. Kawasaki社 장비의 경우 내부와 외주부가 분할 제작 조립된 형태로 내부 소재와 외주부 소재가 상이할 수 있어 각 부에서 소재를 절취하였다. 그림 2.3.3과 2.3.4는 각각 일본 NKK사와 Kawasaki사에서 제작한 커터헤드에서 분석용 소재를 절취하는 장면이다.

또한 앞서 기술한 바와 같이 비교·분석에 활용하기 위하여 커터헤드 소재로 활용할 수 있을 것으로 예상되는 국산 소재 4종류(표 2.3.2 및 표 2.3.3 참조)를 구매·도입하였다.



[그림 2.3.3] NKK사 제작 TBM 커터헤드의 소재 절취



(a) 커터헤드 외주부

(b) 커터헤드 내부

(c) 절취된 소재

[그림 2.3.4] Kawasaki사 제작 TBM 커터헤드의 소재 절취

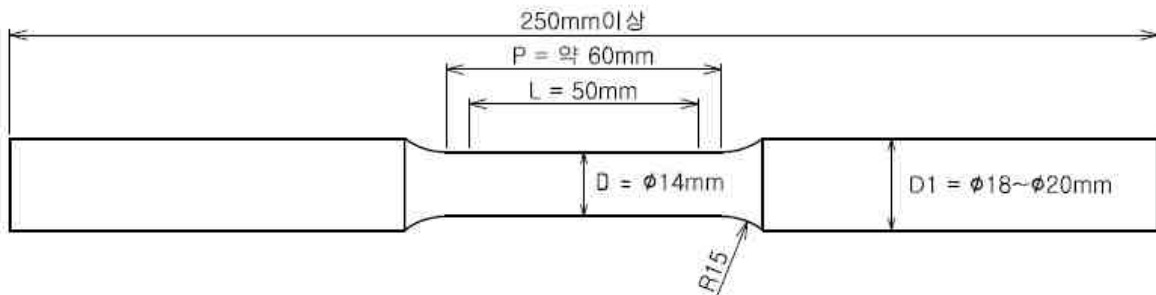
이상과 같이 커터헤드로부터 소재를 절취하기 위하여 부득이하게 산소 절단을 하였다. 산소 절단시에는 소재에 열이 가해지게 되어, 소재 고유의 성질을 변화시킬수도 있다. 따라서 소재의 절취 단계에서부터 이러한 가능성을 고려하여, 소재 절취 시에 시편 제작에 필요한 양보다

넓은 면적을 절취하여 시험에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하고자 하였다.

또한 각기 다른 크기로 구매된 국산소재 들을 시험편 제작에 용이하도록 절단을 하였다 (그림 2.3.5). 대표적으로 인장강도 시험편은 국내 시험편 규격인 KS 4호 규격에 맞추어 제작을 하였다 (그림 2.3.6).



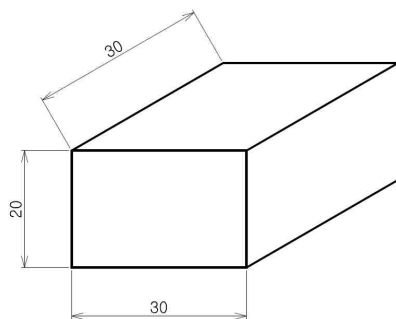
[그림 2.3.5] 시험편 제작을 위한 소재 절단 작업



[그림 2.3.6] 인장강도 시험편의 규격 (KS 4호)

경도시험 시험편, 성분분석 시험편 및 마모시험 시험편은 공인인증시험 기관인 (재)대구기계 부품연구원의 자문을 구하여 시험편을 제작하였다.

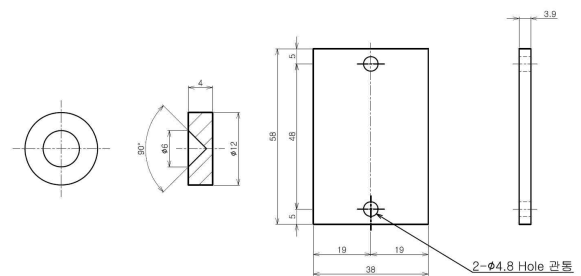
그림 2.3.7과 2.3.8은 경도시험, 성분분석 및 마모시험 시험편을 도식화한 것이며, 그림 2.3.9는 시험편 가공 장면, 그리고 그림 2.3.10~2.2.12는 제작된 시험편 사진이다.



[그림 2.3.7] 경도시험과 성분분석 시험편

상부시험편 (단위 : mm)

하부시험편 (단위 : mm)



[그림 2.3.8] 마모시험 시험편



[그림 2.3.9] 시험편 가공 장면



[그림 2.3.10] 가공된 인장강도 시험편



[그림 2.3.11] 경도시험과 성분분석 시험편



[그림 2.3.12] 마모시험 시험편

라. 시험방법

본 시험은 커터헤드 소재에 대한 전반적인 분석을 실시하여 외국에서 제작된 커터헤드의 소재와 국내에서 생산되고 있는 소재를 비교하여 국내에서 적용이 가능한 소재를 파악하는 것이 목적이다. 시험은 인장시험, 성분분석시험, 경도시험, 마모시험 총 4가지로 수행하였다.

첫 번째로 인장시험은 시험편에 일정한 거리에 타점(늘어난 길이를 측정하기 위한 점)을 찍고 시험편 양단에 인장하중을 서서히 충격 없이 가하면서 시험편이 파단 될 때까지의 변화를 관찰 하고 측정하는 시험이다. 인장시험은 다른 기계적 시험에 비해서 특히 좋은 것은 시험편의 횡단면에 힘의 분포가 가장 균일한 것이며, 파단 할 때 까지 충분히 변형시킬 수 있으며, 가장 많은 기계적 성질을 조사할 수가 있다. 또한 시험법으로는 비교적 간단한 것이다. 재료의 인장

시험에서 인장강도, 항복점, 변형률, 단면수축률, 탄성한계, 비례한계, 탄성계수 등을 측정할 수 있으며, 이번 시험에서는 인장강도, 항복점 및 연신율을 측정 하는데 활용한다.

두 번째로 금속 재료의 성분 분석은 그 재료에 포함된 화학성분의 양을 비교 분석하여 가장 유사한 국내 소재 선별과 재료성분의 특성 및 커터헤드 사용 특성을 고려하여 적합한 국내 소재를 선정하기 위한 시험이다. 금번 성분분석시험에서는 탄소유황분석과 일반성분분석의 2가지 시험을 실시하였다. 일반성분분석은 시험편 표면에 불꽃 방전을 일으켜 이때 나타나는 빛의 스펙트럼을 분광기를 통과한 후 디텍터를 통하여 광물에 존재하는 원소를 측정하는 방법이다. 반면, 탄소유황분석은 시료를 연소시켜 연소된 가스로부터 탄소와 유황을 측정하는 검출기를 통하여 탄소 및 유황을 측정하는 방법이다.



[그림 2.3.13] 인장시험 장면

세 번째로 경도 시험은 재료의 기계적 성질을 판정하는 방법으로 흔히 사용되나 인장 시험과 달리 수치를 비교하는 시험이다. 경도 시험에는 여러 가지 종류가 있으나 가장 보편적인 브리넬 경도(Brinell Hardness), 비커스 경도(Vickers Hardness), 로크웰 경도 (Rockwell Hardness) 등이 있다.



[그림 2.3.14] 브리넬 경도 시험기



[그림 2.3.15] 비커스 경도 시험기

두 종류의 물체가 서로 접촉을 하고 있는 상태에서 상대운동을 하게 되면 접촉면에서는 상

대운동에 대한 저항력이 발생한다. 이때의 저항력을 마찰력이라 하며, 마찰력과 상대운동의 결과 접촉하는 표면으로부터 재료가 이탈하는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 마모라고 한다. 본 연구과제에서 제작하고자 하는 커터헤드의 경우 지반 내에서 토사 및 암반에 접촉하여 회전을 하기 때문에 끊임없이 상대운동이 발생하게 된다. 또한 후방 쉴드잭에서 추력에 의해 계속 전방으로 TBM을 전진시키기 때문에 상대운동의 강도는 더욱 심해지며, 마모현상 또한 과도하게 일어나게 된다. 따라서 커터헤드 소재 선정에 있어서 마모에 대한 검증이 다른 물성치보다 중요하다고 할 수 있다.

마모 시험은 시험하고자 하는 재료를 동일한 시험편에 일정한 하중으로 누른 후 왕복 상대운동을 하게 된다. 이 때 발생하는 마찰력에 의하여 재료가 이탈하는 마모가 발생되는데 이때 마모량(재료의 중량)을 측정하여 서로 비교하여 나타낼 수 있다. 이는 절대적인 물성치가 아닌 상대적인 비교로 내마모성이 높은 소재를 알아 낼 수 있다.

본 연구과제에서는 시험하고자 하는 소재 7종류 외에 이 재료들과 맞대어 상대운동을 하는 상대물을 HARDOX 소재로 선정 하였다. HARDOX는 보통 내마모강으로 알려진 AR-Plate의 상품명 중 하나이다. HARDOX 소재의 특징은 높은 충격 저항성 및 인성을 가지고 극한의 경도와 인장강도, 항복점 등을 가지고 있다. 아래의 표 2.3.4는 HARDOX 소재의 화학성분을, 그리고 표 2.3.5는 HARDOX 소재의 물성치를 나타낸다.

[표 2.3.4] HARDOX의 화학성분

품 명	화 학 성 분(%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	B	Others
HARDOX	0.29	0.70	1.60	1.00	0.30	0.004	NI 0.50

[표 2.3.5] HARDOX의 물성치

품 명	물 성 치		
	항복점 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	연신율 (%)
HARDOX	1,300	1,550	8

라. 시험결과

앞서 설명한 네 가지 종류의 시험을 (재)대구기계부품연구원에 시험을 의뢰하였고 그 결과는 다음과 같다.

첫 번째로 인장시험은 7종류의 소재에 대해 시험체를 2개씩 제작하여 시험을 실시하였다. 그림 2.3.17은 시험전의 시험편을, 그림 2.3.18은 시험후의 시험편이다. 표 2.3.6은 인장시험 결과이다.



[그림 2.3.17] 인장시험편(시험전)



[그림 2.3.18] 인장시험편(시험후)

[표 2.3.7] 인장시험 결과

시험편	인장강도(N/mm ²)			연신율(%)		
	1	2	평균값	1	2	평균값
NKK社 장비	447	448	447.5	33	36	34.5
Kawasaki社 장비 내부	431	427	429	34	40	37
Kawasaki社 장비 외주부	443	443	443	34	37	35.5
SS400	557	543	550	15	16	15.5
SCM440	942	939	940.5	16	16	16
POSTEN 80	786	789	787.5	27	26	26.5
SM490YB	577	562	569.5	33	34	33.5

먼저 NKK社에서 제작한 TBM 커터헤드의 소재를 살펴보면, 평균 인장강도가 447.5 N/mm²이었다. 이 값은 예상과는 다르게 비교 대상 국산 소재들보다도 작은 값으로서 어떠한 소재를 사용하더라도 인장강도는 충분하다. 그러나 연신율의 경우, NKK社의 재료는 평균 34.5%의 수치를 나타내는데 국산 소재들은 대부분이 여기에 미치지 못한다. 유일하게 SM490YB 소재만이 비슷한 수치를 보이고 있다.

Kawasaki社에서 제작한 TBM 커터헤드의 소재는 당초 내부 소재와 외주부 소재가 상이할 것이라고 예상하였으나, 인장강도와 연신율의 측정 결과들은 거의 유사하였다. 이와 같은 결과로부터 내부와 외주부의 소재는 같은 재질인 것으로 추정된다. 특히, NKK 커터헤드의 소재와도 유사한 결과가 나왔다. 앞선 NKK 소재의 경우와 마찬가지로, 인장강도는 국산 소재들보다도 작은 값을 가지며 연신율은 SM490YB만 유일하게 비슷한 연신율을 나타내었다.

다음의 그림 2.3.19는 성분분석 시험편이고 표 2.3.8은 성분분석 시험 결과표이다. 분석결과, 커터헤드의 원 소재가 특수할 것이라는 예상과는 다르게 보편적으로 사용되는 소재로 추정된다. 첫 번째로 화학성분시험 결과에 따르면, NKK社 소재와 Kawasaki社 소재의 화학성분은 함유량이 거의 비슷한 동일한 소재로 판단된다. 또한, 전반적으로 구성되어 있는 성분 C, Si, Mn, P, S외에는 다른 첨가물은 없는 것으로 나타났다. 이로부터 2개 커터헤드 재료는 보편적인 일반 재질의 소재라는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 국산소재와 비교해 보면 시험결과에서는

성분 함유량의 차이를 보이니 SS400의 표준 규격을 만족하는 것으로 나타났다.



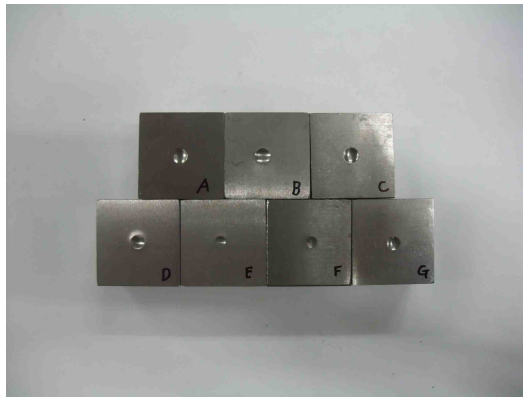
[그림 2.3.19] 성분분석 시험편(시험후)

[표 2.3.8] 화학성분분석 시험 결과

품 명	화 학 성 분(wt. %)					
	C	Si	Mn	P	S	Others
NKK社 장비	0.191	0.001	0.709	0.019	0.228	
Kawasaki社 장비 내부	0.161	0.004	0.969	0.018	0.142	
Kawasaki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	

경도시험은 브리넬 경도(Brinell Hardness) 시험을 실시하였다. 앞서도 언급하였듯이 측정결과
의 신뢰도가 높아 오래 전부터 사용되었던 측정 방법으로서, 강구압자로 소재의 표면에 정하중
을 가하여 하중을 제거한 후에 남는 압입 자국의 표면적으로 하중을 나눈 값이다. 그림 2.3.20
은 경도시험 시험편이며, 표 2.3.9는 경도 시험 시험 결과를 나타낸다.

그림 2.3.20을 보면, A,B,C 시험편이 다른 시험편과 비교하여 강구 압입 자국이 더 깊게 나타
난 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 브리넬 경도 시험 결과에 그대로 나타났다. NKK社와
Kawasaki社의 커터헤드 경도는 다른 국내 소재보다 수치가 낮은 것을 알 수 있다. 표 2.3.9를
보면 수치상으로도 다른 국산 소재에 비하여 무른 재질이라는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 시
험하였던 인장 시험과도 연관이 되는데 연신율에 직접적인 영향을 보여주는 것이 경도인데 인
장시험 결과와 유사한 결과를 나타낸다.



[그림 2.3.20] 경도시험 후의 시험편

[표 2.3.9] 브리넬경도시험 결과

시험편	브리넬경도
NKK社 장비 (A시험편)	128HBW10/3000
Kawasaki社 장비 내부 (B시험편)	120HBW10/3000
Kawasaki社 장비 외주부 (C시험편)	124HBW10/3000
SS400 (D시험편)	159HBW10/3000
SCM440 (E시험편)	282HBW10/3000
POSTEN 80 (F시험편)	244HBW10/3000
SM490YB (G시험편)	163HBW10/3000

마모시험은 경도시험과 마찬가지로 상대적인 비교를 위하여 행하여지는 시험이다. 본 마모시험에서는 높은 경도와 내마모성을 가지는 HARDOX재질의 소재에 7종류의 시험편을 동일한 힘으로 동일한 시간동안 왕복운동을 시켜 중량 변화량을 확인 하였다.

그림 2.3.21은 시험 종료 후의 마모시험 시험편 이며, 표 2.3.10은 마모시험 결과이다. 마모시험 결과에 따르면, NKK社 및 Kawasaki社의 커터헤드 내부 소재는 국산 소재 SS400보다 높은 마모율을 나타냈었다. 마모시험 결과에서도 커터헤드의 소재가 경도 및 내마모성이 향상된 특수한 소재가 아니라는 것을 보여 준다.

바. 소재분석 결론

이상과 같은 4가지 시험을 통해 NKK社 및 Kawasaki社의 소재의 특징을 파악하였다. 결과적으로 당초 시험 전에 예상했던 결과와는 상이한 결과가 나왔다. 당초에는 굴진시 지층에 맞대어져 끊임없이 회전을 하며, 쉴드잭에 의하여 부가적으로 추력을 받는 커터헤드 소재로 내마모성 및 경도가 높은 소재를 사용하였을 것으로 예상을 하였으나, 시험 결과에서 보이듯이 일반적인 재질의 소재를 사용한 것을 알 수 있다. 이는 소재 자체의 내구성을 높이기보다는 부가적인 설비를 설치하여 커터헤드의 내구성을 향상시킨 것으로 보인다.

예를 들어 커터헤드 전면에 하드페이싱 용접이 되어 있었으며, 초경매입비트를 삽입하거나

HARDOX재질의 철판을 덧붙이는 등의 방법을 활용하여 커터헤드 내구성을 향상시키는 것이다. 과거 일본 TBM제작사의 관계자에게 질의를 하였을 때 답변이 내마모성 및 경도가 높은 소재를 활용하는 것이 커터헤드의 마모방지에 직접적인 효과가 있겠으나, 부가적인 설비만으로도 충분한 효과를 나타낼 수 있다고 하였다. 또한 경제적인 측면이나 제작상의 측면에서 본다면 오히려 내마모성 및 경도가 높은 소재를 사용하는 것이 부적합하다고 하였다.

따라서 금번 시험 결과에서 파악하였듯이 커터헤드의 소재는 일반적인 재질의 SS400 혹은 SM490YB가 적합할 것으로 보이며, 커터헤드의 내구성을 높이기 위해서 다른 부가적인 장치를 부착하거나 열처리를 통하여 내구성을 높이는 것이 훨씬 좋은 효과를 나타낼 것으로 사료된다.



[그림 2.3.21] 마모시험 시험편(HARDOX 재질 - 왼쪽, 대상 시험편 - 오른쪽)

[표 2.3.10] 마모시험 결과

시험편	마모시험 (중량감소량)
NKK社 장비	0.0693g
Kawasaki社 장비 내부	0.0562g
Kawasaki社 장비 외주부	0.0280g
SS400	0.0367g
SCM440	0.4632g
POSTEN 80	0.2023g
SM490YB	0.0740g

4. 커터헤드 제작용 부속설비의 구축

제작공정이 대부분 기계가공, 열처리, 용접작업 등의 주 공정을 거쳐 제작이 되는 커터헤드는 대형 용접구조물에 속하는 구조물로서, 크기에 따른 제작설비 및 공정과 관련된 문제, 이동 및 운반, 조립 조건 등을 고려하지 않을 수 없기에 대부분 커터헤드는 분할형으로 제작이 되어 TBM현장에서 조립되는 방식으로 전체 과정이 이루어진다.

용접으로 제작되는 대형구조물의 경우, 특히 분할형태로 이루어지는 구조물에서는 조립 오차가 매우 중요한 관리요소가 되기 때문에 수평치수나 수직치수 등에 대하여 매우 정밀도 있는 작업이 필요하다.

국외의 TBM 전문제작사들은 정밀성을 가하기 위하여 자체적인 부속설비를 갖추고 정밀성과 작업효율성을 유지하도록 공정관리를 하고 있다. 그러나 국내의 경우에는 현재까지 대단면에 대한 TBM 커터헤드 제작 실적이 없는 관계로 인하여, 이와 같은 부속설비를 갖추고 있는 업체가 전무한 것으로 확인되었다.

따라서 국산 커터헤드를 제작하기 위해서는 정밀성과 작업 효율성을 확보할 수 있는 부속설비의 개발이 필요하게 되어 독자적인 연구를 통해 설계·제작하여 설비를 구축하였다.

국내에서는 TBM 전문 제작업체가 없어 커터헤드 제작용 부속설비 및 jig의 자료를 구하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구과제에서는 국외 TBM 전문 제작사의 부속설비를 벤치마킹하여 부속설비와 jig를 설계하였다. 그림 2.4.1은 일본 K社の 부속설비이며, 그림 2.4.2는 독일 H社の 부속설비 현황이다.

그림 2.4.1은 분할형으로 제작되는 공정에서 오차를 최소화하기 위하여 편차가 거의 없는 부속설비인 작업대 위에서 실제 제작물과 동일한 도면을 사전에 Marking한 후에 용접 및 조립작업을 시행함으로써 제작 오차를 최소화하고 작업시간 단축과 효율성을 향상시키고자 하는 목적을 알 수 있다. 그림 2.4.2는 커터헤드의 구성에서 매우 중요한 관리요소 중 하나인 디스크커터와 커터비트의 정확한 취부 작업을 위하여 각 구성요소의 위치를 시각적으로 효율성 있게 확인할 수 있는 회전형 측정장치 등과 같은 부속설비가 활용되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구과제에서는 하부의 베드(bed) 부분은 일본의 K社를, 그리고 디스크커터를 궤적에 따라 조립할 수 있는 장치는 독일 H社の 부속설비를 벤치마킹하였다. 다음의 그림 2.4.3과 그림 2.4.4는 이와 같은 내용을 바탕으로 작성된 부속설비의 제작도이다.

이상과 같이 국외의 설비 현황을 연구하여 효율성과 활용성에서 보다 개선되고 진보된 부속설비를 자체 개발·구축함으로써 (그림 2.4.5), 최대 직경 9 m까지 국산 커터헤드의 정밀 제작이 가능하게 되었다 (그림 2.4.6). 이와 같이 구축된 커터헤드 제작용 부속설비를 활용한 국산 커터헤드의 제작과정에 대해서는 다음의 3절에 기술하였다.



[그림 2.4.1] 일본 K社 부속설비



[그림 2.4.2] 독일 H社 부속설비



[그림 2.4.5] 커터헤드 제작용 부속설비 및 jig의 제작 과정



[그림 2.4.6] 제작 완료된 커터헤드 제작용 부속설비 및 jig 전경