

# 드릴쉽 건조 중 문풀 구조 수정 작업 및 구조적 안정성 검토

유인상<sup>1</sup>·손상용<sup>1</sup>·백승중<sup>1</sup>·최용락<sup>1</sup>·유해근<sup>1,†</sup>·윤기정<sup>1</sup>  
대우조선해양주<sup>1</sup>

## Repair Procedure and Structural Strength Analysis to Damage of Moon-Pool Structure for Drillship During Construction

In-Sang Yoo<sup>1</sup>·Sang-Young Sohn<sup>1</sup>·Seung-Jung Baek<sup>1</sup>·Young-Lack Choi<sup>1</sup>·Hae-Kun Yoo<sup>1,†</sup>·Ki-Jeong Yoon<sup>1</sup>  
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.<sup>1</sup>

### Abstract

During the shipbuilding construction, the repair works will be occurred by various reasons such as the natural disaster, mistakes of engineers or workers, defect of material, and so on. The one of the engineer's responsibilities is to design considering every possibility and to prevent the repair works due to the mistakes during construction stages, but actually it is very difficult and impossible to avoid every mistake. However, it is also the responsibility of engineers to find the best solution for the unavoidable mistakes which is to maintain the capacity of vessel and guarantee the safety for the repair works considering the construction schedules and economic cost. In this paper, it will be introduced the brief of repair works to the structural damage of the moon-pool structure in drillship which is built in our shipyard. For the verification of the structural strength, the fatigue analysis has been carried out based on the guide of Classification society. Furthermore, the modifications of structure design and welding procedure have been applied to avoid the stress concentration in the moon-pool structure.

**Keywords** : Repair works(수정 작업), Construction stages(건조 공정), Moon-pool structure(문풀 구조), Drillship(시추선), Fatigue analysis(피로 해석), Classification society(선급), Stress concentration(응력 집중)

## 1. 서론

자연 재해, 설계자에 의한 설계 오류, 작업자에 의한 공작상의 오류, 자재 결함 등 수많은 원인에 의해 선박 건조 과정 중에 수정 작업이 발생하게 된다. 이러한 수정 작업이 발생할 수 있는 원인을 예측하고 수정 작업이 발생하지 않도록 예방하는 것이 설계자의 의무이다. 그러나, 실제 건조 과정에 있어 모든 오류를 예방하는 것은 불가능하며 실제 현장 작업에서 다수의 수정 작업이 발생하고 있는 것이 현실이다. 최선의 노력에도 불구하고 발생한 오류에 대하여 선박의 기본 성능 유지, 작업자의 안전 사고 예방, 건조 일정 지연 방지, 합리적인 비용 등을 고려한 최적의 수정 방안을 제시하는 것 또한 중요한 설계자의 의무중 하나이다.

당사에서 건조 인도된 드릴쉽의 건조 과정에서 발생한 작업자에 의한 구조 손상 개요 및 수정 작업 방법의 개선, 직접 계산을 통한 구조 안정성 검토 과정 및 선주 대응 사례에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 수정 작업 발생 개요

드릴쉽에 있어, 문풀(moon-pool) 구조는 선체를 상부 갑판에서 선저까지 수직 방향으로 관통하며 시추 작업이 직접 이루어지는 구역이다. 이러한 이유로, 선체의 종방향 구조 연결성이 단절되어 높은 응력 집중 현상이 발생한다. 또한, 시추 작업에 반드시 필요한 문풀(moon-pool) 구조는 선박의 자항 시 조파 저항을 증가시키므로 이의 감소를 위한 플랩(flap) 구조를 가지게 되며, 위치는 아래 Fig. 1과 같다.

문풀(moon-pool) 구조의 상세 그림과 응력 집중 부위는 Fig. 2에 표현하였다. 문풀(moon-pool)의 모서리 부분은, 응력 집중을 최소화하고, 시추 작업을 위한 각종 파이프류의 손상을 방지하고자 적절한 곡률을 가지도록 설계되었다.

Fig. 3에서는 문풀(moon-pool)의 개방 구조에 의해 선박 자항 시 발생하는 조파저항과 이를 감소시키기 위한 플랩(flap) 구조를 나타내었다.

<sup>†</sup> 교신저자 : HAEKUN@DSME.CO.KR, 055-680-7623

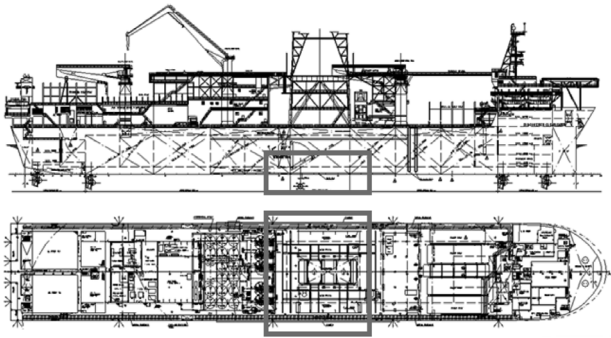


Fig. 1 Profile of drillship and location of moon-pool structure

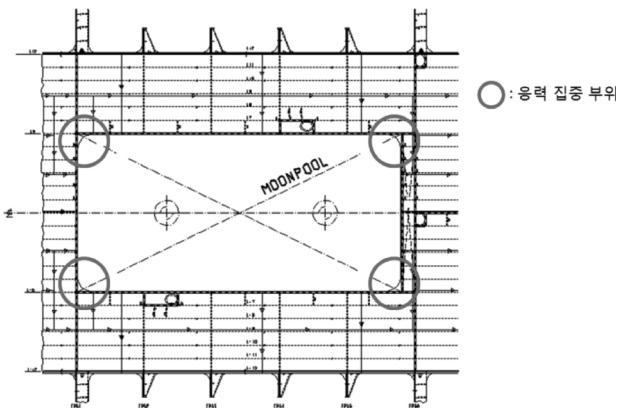


Fig. 2 Details of Moon-pool structures and locations of stress concentration

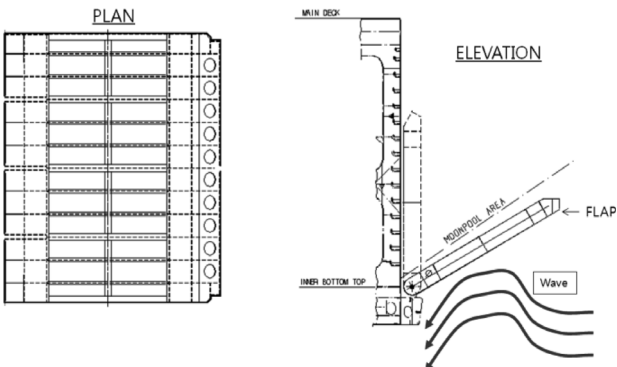


Fig. 3 Wave-making resistance and details of flap structures

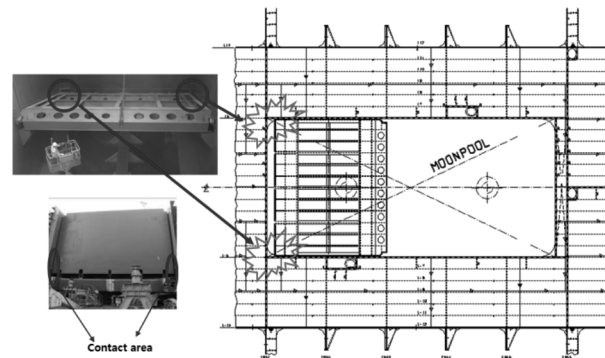


Fig. 4 Damage for moon-pool structure during the pre-election stage

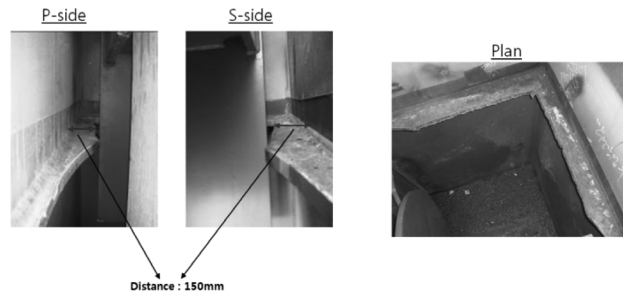


Fig. 5 Details of damage for moon-pool structure

플랩(flap)은 시추 시에는 장비와의 간섭을 피하기 위해 수직으로 들어올려져 고정되고, 선박의 자항 시에는 조파 저항 감소를 위해 일정한 경사를 가지고 고정 된다. 이러한 움직임이 가능하려면, 응력 집중이 가장 크게 일어나는 문폴(moon-pool)의 모서리 부분과 간섭되지 않도록 적절한 리세스(recess) 구조를 가져야 한다. 그러나, 플랩(flap)이 제작단계에서 이러한 구조 변경이 반영되지 않은 상태로 입고가 이루어졌으며, 탑재 과정 중에 설계 부서의 확인 없이 Fig. 4 & 5와 같이 현장 작업자에 의해 문폴(moon-pool)의 모서리 부분이 임의 절단되는 사례가 발생되었다.

### 3. 구조 손상부의 구조강도 검토 및 1차 수정 방안

피로 해석 절차(fatigue handbook-offshore steel structure and DNV-RP-C203)에 따라 손상부 및 구조 수정 방안에 대하여 구조 검증을 수행하였다. 구조 손상이 발생한 문폴(moon-pool) 모서리에 대하여, 손상 상태에서의 구조 강도를 검토한 결과는 Fig. 6 및 Table 1과 같다.

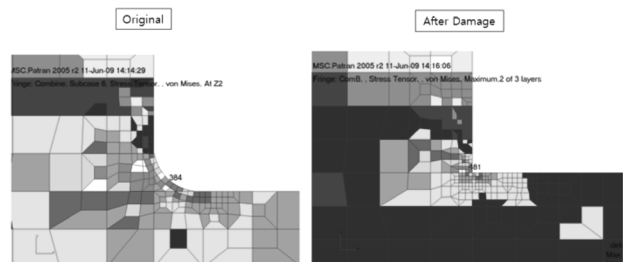


Fig. 6 Stress plots of original and damaged structures

Table 1 Results comparison with original structures and damaged structure

	Original	Damaged	Remark
Stress level (N/mm <sup>2</sup> )	384	481	

구조 손상으로 인해, 문폴(moon-pool) 모서리 부분의 응력 집중 계수는 약 1.253배 증가하였으며, 이는 S-N 커브에 따라 피

로 손상을 약 3.5배 증가하게 된다. 그 결과, 절단부의 피로 수명은 약 16.1년으로 설계 수명 25년을 만족하지 못한다. 따라서, 문물(moon-pool)의 모서리 부분은 구조 손상 전 설계와 같이 수정되거나, 최소한 동일한 구조 강도를 가지는 구조로 수정되어야 한다. 수정 작업에 의한 용접 영향을 최소화 할 수 있을 정도의 범위를 가지도록, 손상 전과 같이 판을 제작하여 삽입하는 것이 구조적 안정성 측면에서 가장 바람직한 방법이다. 그러나, 선박 제작 공정의 진행을 고려하면, 이미 설치된 종방향 거더(girder) 및 횡방향 플로어(floor)의 수정 작업을 위해서는 용접선을 제거하고 판을 삽입하여 재용접을 해야만 한다. 이 경우, 재용접에 의한 열영향부가 기존 구조물에 미치는 영향을 예측하기가 어렵다. 또, 협소한 밀폐 공간의 열악한 환경으로 인해 작업자의 안전 확보도 어렵다. 따라서, 수정 작업은 현재의 구조 배치 상태에 영향을 주지않고 이음판(gusset plate)를 추가함으로써 구조적 안정성, 제작 공정 및 작업자의 안전을 확보하고자 하였다. Fig. 7은 이런 개념을 반영한 1차 구조 수정 방안이다.

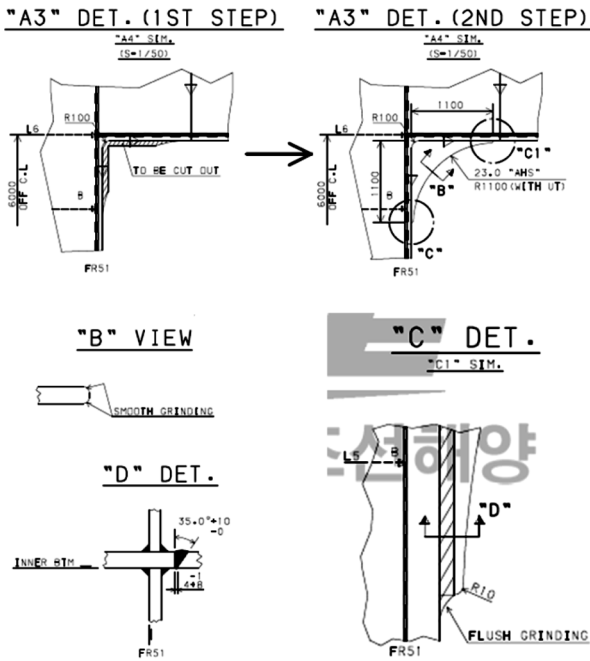


Fig. 7 1st Repair procedure for damaged structures

1차 구조 수정 방안에 대한 피로수명계산 결과 최대 응력 집중부의 피로 수명은 약 110년이며, 이음판(gusset plate) 끝단부의 응력집중계수는 최대응력 집중부 대비 약 0.53배로 S-N 커브를 통한 피로 손상을 약 0.15배 감소됨을 알 수있다. 이를 통하여 끝단부의 피로 수명은 약 1380년으로 계산되었고, 그 결과는 Fig. 8과 Table 2에 나타내었다.

추가되는 이음판(gusset plate) 끝단부의 구조적 불연속성을 제거하기 위해, Fig. 7과 같이 맞대기(butt) 용접부에 표면처리 및 끝단부 곡형상을 제안하였으나 선주 측은 기계적 결함이 발생할 가능성이 높은 끝부분에 대하여 불확실 요소의 완전한 제거를 요구하며 설계 원안과 동일한 구조를 가지는 판 삽입 형태의 수정 방안을 요구하였다.

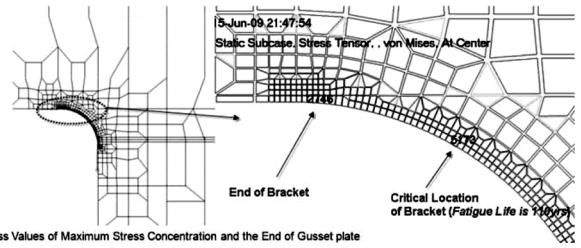


Fig. 8 Stress plots of 1st repair procedure for damaged structures

Table 2 Stress results of fatigue analysis for 1st repair procedure

	End of bracket	Critical location of bracket	Remark
Stress level (N/mm <sup>2</sup> )	2746	5173	

#### 4. 구조 손상부에 대한 2차 수정 방안 및 구조안정성 검토

“3. 손상부의 구조강도 검토 및 1차 구조 수정 방안”에서 선주가 요구한 판 삽입 형태의 수정 방안을 수행할 경우 다음과 같은 어려움이 발생할 수 있다.

- 인접한 평형수(ballast) 탱크 도장 손상 범위의 증가
- 삽입 판의 크기에 의해 수정 불필요 구역까지의 과도한 화기 작업 발생으로 인한 품질 저하
- 열악한 작업 환경으로 인한 용접 불량 발생으로 인한 추가 수정 작업

따라서, 선박의 품질을 최대한 유지하며 최소한의 손상만 발생시키고, 선주의 요구를 만족시킬 수 있도록 1차 수정 방안에 대한 개선이 필요하다. 이러한 필요에 의해, Fig. 9와 같이 개선된 2차 수정 방안을 제시하였다.

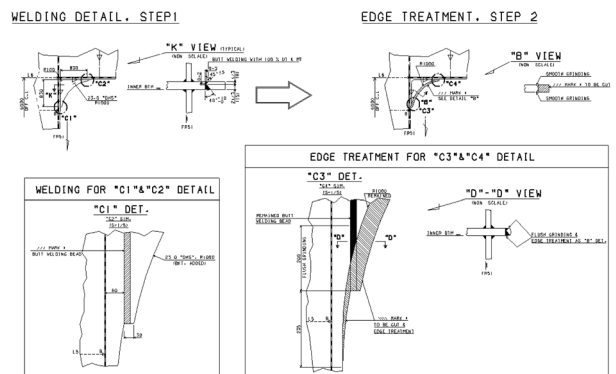
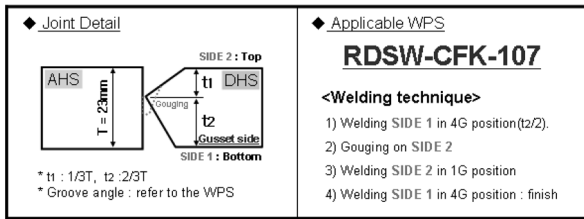


Fig. 9 2nd Repair procedure for damaged structures

또한, 이음판(gusset plate) 설치 과정 중 용접에 의한 잔류응력의 영향을 최소화하기 위한 예열 및 후열 처리에 대하여 Fig. 10과 같은 용접 절차를 마련하였다.

### Repair Welding Procedure of Gusset plate for Moonpool

#### 1. Joint detail and Applicable WPS



#### 2. Welding Sequences

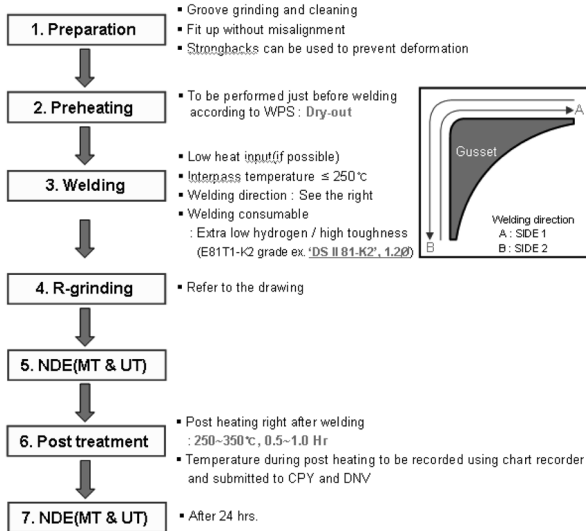


Fig. 10 Welding procedure for gusset plate for moon-pool structures

2차 수정 방안에서는, 선주가 제기한 용접부의 기계적 결함이 발생할 가능성이 있는 이음판(gusset plate) 끝단부를 절단하여 완전히 제거하고 Fig. 11과 같이 문풀(moon-pool) 모서리부에 새로운 곡률이 적용되도록 하였다.

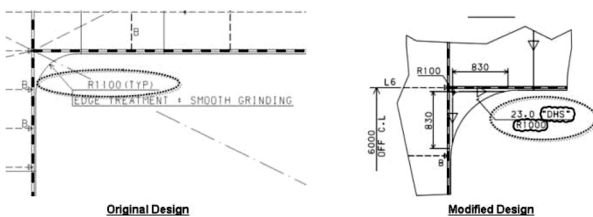


Fig. 11 Radius modification for 2<sup>nd</sup> repair procedure

2차 구조 수정 방안에서 제시된 곡률(R1000)에서의 최대응력 발생부의 응력 집중 계수는, 구조 손상전 곡률(R1100)에서의 응력 집중 계수의 약 1.032배 증가함을 알 수 있다. S-N 커브를 통한 피로 손상율은 약 1.1배 증가되며, 이를 통해 최대응력 집중부의 피로수명은 약 96.9년으로 계산되었다. 구조 손상전과 2차 수정안에 의한 구조에서의 최대 응력 집중부의 응력값을 Fig. 12와 Table 3에 나타내었다.

2차 구조 수정 방안에 대한 피로수명계산 결과 최대 응력 집중부의 피로 수명은 약 96.9년이며, 이음판(gusset plate) 끝단부의

응력집중계수는 최대응력 집중부 대비 약 0.52배이다. 끝단부의 맞대기(butt) 용접을 고려하여 S-N 커브 “D”를 적용하면, 피로 손상을 약 3.5배 증가됨을 알 수 있다. 이를 통하여 끝단부의 피로 수명은 약 60.4년임을 알 수 있고, 그 결과는 Fig. 13과 Table 4에 나타내었다.

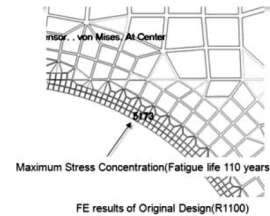


Fig. 12 Stress plots of original and 2<sup>nd</sup> repair procedure for damaged structures

Table 3 Results comparison original structures and 2<sup>nd</sup> repair procedure

	Original	2 <sup>nd</sup> procedure	Remark
Stress level (N/mm <sup>2</sup> )	5173	5343	

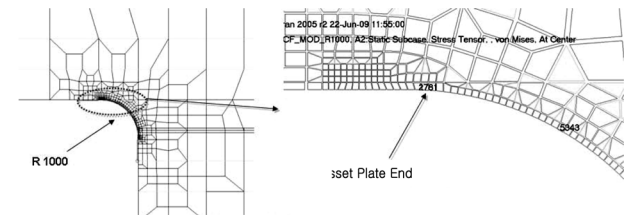


Fig. 13 Stress plots of 2<sup>nd</sup> repair procedure for damaged structures

Table 4 Stress results of fatigue analysis for 2<sup>nd</sup> repair procedure

	End of bracket	Critical location of bracket	Remark
Stress level (N/mm <sup>2</sup> )	2781	5343	

제안된 2차 수정안에 대하여, 선주 및 선급은 추가적인 요구 없이 승인하였다. 또한, 당사는 최소의 수정 비용과 작업자의 안전을 확보하면서 구조 수정 작업을 수행하여 선박의 구조적 안정성을 확보할 수 있었다.

## 5. 결론

불필요하고, 수행할 경우 선박의 품질에 악영향을 줄 수 있는 수정 작업에 대하여 구조 변경 및 구조 검증을 통하여 합리적인 수정 방향을 제시하여 선주 및 조선소의 피해를 최소화하고 품질을 만족하는 수정 설계 안의 도출 및 승인을 완료하여 실제 수정

작업을 수행 할 수 있었다.

원인을 예측하고 수정 작업이 발생치 않도록 예방하는 최적 설계뿐 아니라, 발생한 오류에 대하여 최적 수정 방안을 제시하는 것 또한 설계자의 몫이다. 더 나아가, 현장 작업자의 구조물에 대한 이해 증진 및 설명회 등을 통한 정보 공유로 통한 현장과 설계 조직 간의 유기적 협력 체계 강화 또한 설계자의 노력이 필요하다.

### 참 고 문 헌

- Det Norske Veritas, 2005. *Recommend Practice C203*.  
A. Almar-Naess, 1985. *Fatigue Handbook-Offshore Steel Structure*.



유인상



손상용



백승중



최용락



유해근



윤기정