

기술보고

히팅카고 응고사고 분석
- 나일브렌드를 중심으로 -
김영모* · 이옥용**

An Analyse for Solidified Accident of Nile Blend Crude Oil

Young-Mo, Kim* · Ok-Yong, Lee**

<目 次>	
Abstract	3. 사고원인 분석
1. 서론	4. 결론
2. Case study	참고문헌

Abstract

A heating cargo is solidified by several reasons during carriage. This study is to analyse a cargo accident which 811,202 US barrels of Nile Blend crude oil remained solid in the tanks after discharge. There are some possibilities that low temperature of loading cargo below cloud point and wax appearance temperature at loading time, heating interruption during voyage or discharging, and prohibition of crude oil washing during discharging might influence the cargo solidified. But we concluded that the defect of heating system would most affect the heating cargo solidified locally, and which blocked drain hole of bottom transverse and web frame and they obstruct flow of heating cargo in the tanks.

1. 서론

원유 수송중에 일정한 온도 이하가 되면 유동성을 잃고 굳어버리는 히팅카고(heating cargo)는 탱커의 운송에서 경제성 면에서나 화물관리 측면에서 매우 주의를 요하는 화물이다. 아프리카 수단에서 생산되는 나일브렌드원유(Nile Blend crude oil)는 상품화된지

얼마 되지 않는 히팅카고로서 화물에 대한 정보가 부족하여 운송인이나 수화주측에서 화물의 응고로 분쟁이 종종 발생하고 있다. 본고는 나일브렌드 양하중에

*정회원, 한국해양수산연수원 교수

**정회원, 한국해양수산연수원 교수

화물의 응고로 인해 다량의 잔유(ROB oil)가 발생한 사고를 중심으로 그 원인을 분석하는데 있다.

2. Case study

2.1 히팅카고 사고 용어정의

히팅카고 사고분석과 관련한 몇 가지 용어의 개념을 정리하면 다음과 같다.

- 유동점(pour point): 석유제품이 특정한 표준상태에서 계속적인 유동성을 가질 수 있는 최저온도
- 점도(coefficient of viscosity): 점성률 · 점성도라고도 하며, 흐름방향 x축에 직각인 y축 방향에서 유속 v에 변화가 있을 때 x축에 평행인 면 안에 유체의 속도기울기에 비례하는 변형력 $X = \eta \partial v / \partial y$ 가 작용하는데, 이 때의 비례상수 η 를 의미
- Cloud point: 석유제품이 특정한 조건하에서 냉각될 때 액체 안에서 최초로 밀랍 결정체가 응집되기 시작하는 온도
- Wax appearance temperature(WAT): Cloud point와 같은 개념으로 사용하고 있으며, 어느 정도 이상의 연쇄지방족탄화수소(Chained aliphatic hydrocarbons)를 함유하고 있는 원유가 어느 정도 이하의 온도로 냉각되거나 압력이 낮아질 경우 왁스 침전물이 발생하는 온도
- Waxy crude oil sludge: 밀랍을 포함하는 원유가 고착물 또는 고착물에 가까운 상태로 되는 경우 가라앉는 물질에 붙여지는 용어

2.2 사고개요

유조선 "A"호는 2000년 2월 수단에 소재한 Marsa Bashayer Crude Oil Export Terminal에서 히팅카고인 Nile Blend crude oil 811,202 US barrel(60°F 기준)을 선적하였다. 수출자의 품질증명서에는 원유의 유동점(pour point)이 +30°C로 되어 있었으며, 선적당시 화물의 평균온도는 33.3°C(92°F)였다. 본선은 용선자로부터 운송중에 화물의 온도를 선적 당시의 온도를 유지하도록 요구받았으며, 출항후 5일 되는 시점에서 용선자는 양지 도착전까지 화물의 온도를 50°C(122°F)까지 상승시키라는 용선자의 지시에 따라 화물탱크에 가열을 시작하였다. 양하항에 도착할 때까지 화물의 온도는 최저 45°C(113°F)에서 최고 50°C(12

2°F)의 범위를 유지하였고, 양하항의 대기온도는 8.1°C, 해수온도는 12°C까지 하락하였다.

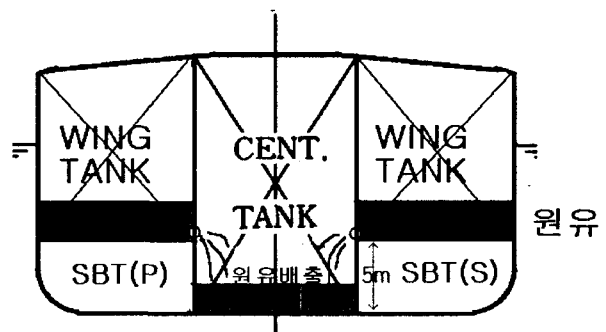
양하항에 도착하여 양하작업이 시작되었으나 터미널측의 요청에 따라 원유세정(crude oil washing; COW)은 시행되지 않았고, 양하도중에 다른 선박이 접안하는 관계로 1일 정도 하역작업이 중지된데다 본선의 발전기 고장으로 4시간 가량 화물가열이 중단되었다.

본선이 재접안하여 하역작업을 재개하였다. 그러나 양하 마지막 단계에서 어떤 이유로 화물탱크로부터 화물이 스트리핑이 되지 않았고, 결국은 탱크안의 화물은 고체화되어 5,307m³(33,381 US Barrel)의 기름이 양하불능 상태가 되었다.

2.3 본선 구조상의 특징

본선은 다음과 같은 구조상의 특징을 가지고 있다.

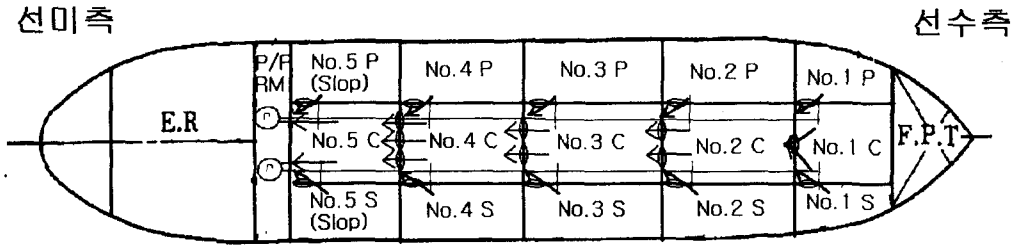
- ① 국제해양오염방지협약(MARPOL 73/78)¹⁾ 요건에 맞는 분리밸러스트탱크(Segregated ballast tank; SBT) 선박이나 중앙탱크는 단일선저(Single bottom) 탱크이고 양 현측 탱크(Wing tank) 하부에 5m 높이의 L자형 SBT가 존재한다.



[그림 1] M/T British Spirit 횡단면도와 Free flow

- ② 각 탱크의 잔유는 중력에 의해 5번 중앙탱크로 흘러가도록 설계되고(Free flow discharge system) 5번 탱크에서 잔유를 일괄적으로 양하하거나, 각 탱크별로 개별적으로 양하할 수 있는 배관구조를 갖추고 있다([그림 1] 및 [그림 2] 참조).

1) IMO(국제해사기구)가 기름에 의한 오염방지를 위해 제정한 국제협약으로 동 협약 부속서 1에 따라 1982년 6월 1일 이후 인도된 DWT 70,000 이상의 유조선은 분리밸러스트탱크(SBT)를 배치할 것을 요구하고 있다.



주: 화살표는 탱크내 원유가 밸브를 통해 다른 탱크로 흘러가는 모습을 표시함

[그림 2] Free flow discharge 시스템

- ③ 현측 탱크는 화물의 흐름을 좋게 하기 위하여 대부분의 구조물을 하부 벨러스트탱크에 배치한 반면, 중앙탱크는 선체의 강도를 유지하기 위한 각종 구조물을 상하, 좌우로 배치하고 있다.
- ④ 중앙탱크 하부에 탱크를 좌우로 가로지르는 횡방향 웹(Transverse webs)과 수평 프레임(Horizontal frames)에는 선수에서 선미방향으로 화물이 흘러갈 수 있도록 직경 20cm의 배수구(Drainage hole)가 선저에서 10cm 높이에 뚫어져 있다.
- ⑤ 각 화물탱크 바닥에는 가열화물을 운송하기 위해 다른 유조선과 마찬가지로 바닥에서 12cm 높이에 히팅코일(Heating coil)이 설치되어 있다.²⁾

2.4 사고원인의 추정

유조선 "A"호의 다량의 ROB 발생원인을 다음 5가지로 추정할 수 있다.

- ① 수출자의 품질보증서상 cloud point가 +30℃라고 되어 있고, 선적시점에서 화물온도가 cloud point인 33.3℃로 되어 있으나, 사고선박의 ROB에서 추출한 샘플의 cloud point인 33~36℃, WAT 33~68.9℃보다 하회하므로 선적하자마자 탱크안에서 밀랍침전물이 발생하였을 가능성
- ② 선적후 5일동안 화물가열을 실시하지 않음으로 인해 화물이 응고하여 화물탱크 바닥에 밀랍침전물이 발생하였을 가능성
- ③ 원유세정(COW)을 하지 않음으로써 바닥세정

(bottom wash)을 하지 않아 화물탱크 바닥에 밀랍침전물이 발생하였을 가능성

- ④ 정박중 발전기 고장으로 화물탱크내 일시적 가열중단이 화물을 응고시켰을 가능성
- ⑤ 히팅코일(heating coil)의 불량으로 화물탱크내의 화물이 균등하게 가열되지 않아 국부적으로 응고된 밀랍침전물이 화물흐름의 통로인 배출구(drain hole)를 차단시켜 화물이 고인 상태로 응고하였을 가능성

3. 사고원인 분석

3.1 선적시점의 화물온도 저하

Cloud point와 WAT가 밀랍침전물을 발생시키는 온도로 볼 때 Nile Blend 원유의 WAT인 49~54℃를 유지하지 않은 것이 ROB oil이 발생된 원인으로 볼 수 있다. 그러나 원유운송업체에서는 과거 오랜 동안 Cloud point와 WAT를 전혀 고려하지 않고 화물의 유동성 여부를 판단하는 기준으로 Pour point만을 이용하고 있다. 국제표준화기구(ISO)에서도³⁾ Cloud point는 단지 "비상 디젤엔진이나 구멍정 엔진에 사용되는 맑고 깨끗한 증류된 연료유(bright clear distillate fuels for emergency diesel and lifeboat engines)" 즉, 소위 DMX급 제품유에 대해서만 규정하고 있으며, 일반적으로 다양한 성분의 기름이 혼합되어 검은 색을 띠고 있는 원유에서는 일반적으로 적용되지 않는 온도이다.

<표 1>과 같이 ROB의 샘플에서 채취한 원유의 성분은 석유산업계에서 받아들이고 있는 "STANDARD

2) 히팅코일이 바닥에서 10~12cm 높이에 설치되어 있어 히팅코일 아래측에 화물이 응고될 수 있으나, 초기에 0.5~1일정도 서서히 가열하고 통상의 Heating up 개시시기를 2~3일 앞서 가열하면 대부분의 응고화물은 용해되고 완전히 소멸한다.

3) ISO Standard 8217:1996 Petroleum products - Fuels(class F) - Specifications of marine fuels"

<표 1> Nile blend 원유의 성상표

품질측정 척도	원산지 품질보증서	ROB 샘플 1	ROB 샘플 2
15℃에서 농도	0.8469	0.8491	0.8654
수분(water) %w	0.10	0.40	1.40
침전물(sediment)%wt	0.023	0.05	0.023
유동점(pour point) ℃	30	33	39
WAT ℃	-	33	68.9

TEST METHOD"에 따라 수출자가 제공한 원산지 품질보증서보다 신뢰성이 낮다고 볼 수 있다.

따라서 마치 Wax성분이 포함된 원유를 WAT 이하로 보관하거나 운송하면 필연적으로 다량의 잔존물이 발생되고, 일단 밀랍침전물이 발생하면 다시 녹일 수 없는 것이 아니라 일반적으로 일시적으로 응고점이 하로 응고된 화물이라 하더라도 충분한 가열을 하면 응고된 화물이 다시 용해되어 기름으로 환원될 수 있으므로, 선적시 화물이 샘플상의 WAT보다 낮은 것이 다량의 ROB 원인이 되었을 것으로 판단하기 어렵다.

3.2 선적후 일정기간 화물가열 중단

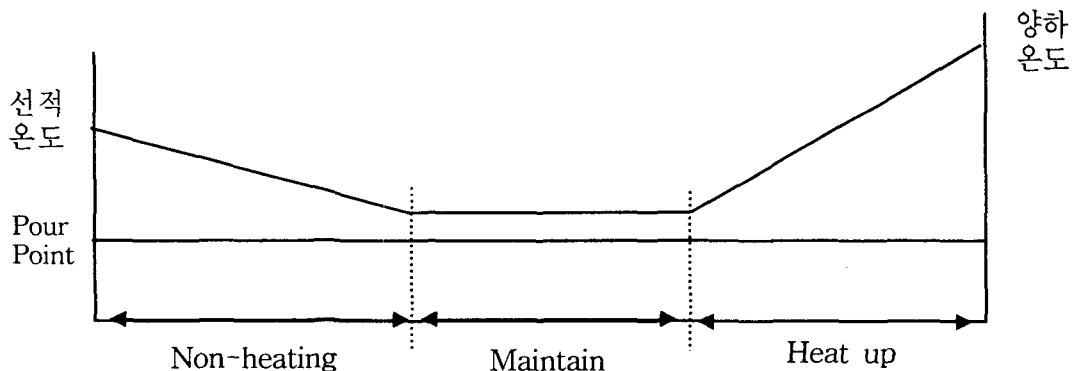
히팅카고를 적재하고 장기 항해시 높은 온도를 계속 유지하는 것은 지속적인 보일러의 가동으로 인하여 연료소모가 매우 크므로 수화주축의 특별한 지시가 없는 한 아래의 [그림 3]과 같은 Heating schedule에 따르는 것이 효율적이고 경제적인 히팅방법이다.⁴⁾

즉, 선적항 출항후 일정기간 동안은 히팅을 실시하지 않으며, 화물의 온도가 어느 정도 내려가면 화물의 응고를 방지할 목적으로 "Pour point + α"의 온도(혹

은 수하주가 요구하는 온도)를 유지하기 위해 히팅을 실시한다. 그리고 양하항 도착전 적당한 시기부터 본격적인 히팅을 시작하여 양하항 도착시 원유성상표상의 양하온도(혹은 수하주가 요구하는 온도)까지 올리게 된다.

이렇게 할 경우 항해 초기에는 평균적으로 유동점을 조금 상회하는 온도에서 화물을 운송하므로 화물 탱크내 특정 부위의 온도가 유동점을 하회하여 일부 응고된 화물층이 형성된다 해도 본격적인 히팅으로 양하 온도까지 가열하는 기간에 응고층이 완전히 용해될 뿐만 아니라 가열된 기름의 대류 현상으로 인하여 하부에 침전되어 있던 Wax 성분도 다시 섞이게 된다. 다만 왁스성분을 많이 함유하고 있는 고유동점(High pour point) 원유의 경우 다른 히팅카고에 비해 2~3일 정도 일찍 본격적인 히팅을 시작하는 것이 탱크 바닥부분의 응고된 기름을 확실하게 용해시키는 방법이다.

이상과 같은 히팅카고 운송방법에 비추어 볼 때 선적후 일정기간동안 선적시의 온도인 33.5℃ 정도를 유지하는 것은 업계의 관행에 따른 경제적인 화물가열 방법으로, 초기의 화물가열 중지가 다량의 ROB를 생



[그림 3] 원유운송중 heating schedule

4) 油槽船運航實務指針, 日本三光Line(株), 昭和 51年, 韓國版(天敬海運), 1984. 부속서 1, 12쪽

성시킨 결정적 원인이라고 보기는 어렵다.

3.3 원유세정 금지

IMO의 Standard COW Manual⁵⁾에 의하면 원유의 점도(粘度)가 600cSt.(mm²/sec)를 초과하지 않을 경우 화물온도를 Pour point보다 10℃ 이상 높이면 원유세정이 가능한 것으로 되어 있다. 그러나 유조선의 일반적인 운항실무에서는 특히 한냉지에서 Pour point가 상당히 높은 원유 양하중 COW를 실시하지 않는 것이 상례인데 그 이유는 첫째, COW를 실시한 후 탱크의 벽과 천장에 다량의 Heating 화물이 굳어서 들러붙게 되고, 둘째로는 Bottom washing시 COW가 중단되었을 때 Pipe line 내에서 원유가 응고함으로써 양하에 막대한 지장을 초래할 위험이 있기 때문이다.

그러나 일반적인 원유의 경우 이론적으로는 COW를 실시함으로써 탱크 하부의 잔존물을 줄이는데 기여를 할 수 있다. COW 작업은 일반적으로 상부세정(Top washing)과 하부세정(Bottom washing)으로 구분하여 실시하는데 탱크 하부측을 세정하는 작업이 소위 "Bottom washing"으로서 이 작업은 기름이 탱크바닥으로부터 20~30cm 가량 남아있을 때 실시하는 것이 상례이다. 왜냐 하면 하부세정은 탱크 하부의 원유찌꺼기(Sludge)를 줄이기 위하여 실시하는 것이므로, 탱크 하부에 기름이 어느 한도 이상 고이면 바닥에 쌓여있는 원유 찌꺼기의 제거효과가 떨어지기 때문이다.

그러나 <표 2>에서 보는 바와 같이 똑 같이 COW

를 하지 않은 탱크이면서도 구조물이 없는 좌우현 탱크보다 중앙탱크에 ROB가 많이 발생하였다는 것은 어떤 이유로 이미 중앙 화물탱크내의 구조물에 기름이 응고되어 배수구를 막았음을 뜻하는 것이며, 만일 배수구가 이미 막혔다면 COW를 실시한다 해도 바닥의 잔유를 제거하는데 아무런 도움이 되지 않을 뿐만 아니라 오히려 잔유를 더 많이 남길 위험마저 있다.

즉, Bottom washing 실시에 이상적인 20~30cm를 훨씬 초과하는 위치에서 이미 응고되었다면 아무리 COW를 하고 싶어도 할 수 없는 상태가 되고 만 것이며, 따라서 문제 선박의 경우 COW 미실시가 많은 양의 잔유를 응고시킨 원인이라고 보기 어렵다.

3.4 정박중 일시적인 히팅중단

본선이 양하하에 정박하여 양하작업을 하는 중 발전기 고장으로 4시간 이상 탱크내 화물에 대한 가열이 중단되었는데, 당시의 양하항 해수온도는 12℃, 대기온도는 8.1℃였으므로 고유동점원유에 대한 가열중단은 찬 해수와 접하는 탱크바닥에 상당량의 응고층을 발생시켰을 수 있다.

그러나 다량의 화물을 가지고 있는 탱크내에서 짧은 시간동안의 가열중단이 ROB를 대량으로 생성시킨 결정적인 원인으로 된 것 같지는 않다.

3.5 히팅코일 불량

원유선의 가열장치 기준에 대한 세계 석유 Major의 Standard requirement는 다음과 같다.⁶⁾

<표 2> 본 선박 각 탱크 ROB 현황

탱크	깊이(m)	입방미터	탱크	깊이(m)	입방미터
중앙 1번 탱크	1.153	753.1	좌현 1번 탱크	0.360	67.8
중앙 2번 탱크	1.290	1,151.0	우현 1번 탱크	0.460	86.0
중앙 3번 탱크	1.223	1,115.4	좌현 2번 탱크	0.410	94.0
중앙 4번 탱크	0.920	821.0	우현 2번 탱크	0.510	116.5
중앙 5번 탱크	0.650	561.0	좌현 3번 탱크	0.377	72.4
			우현 3번 탱크	0.600	114.3
			좌현 4번 탱크	0.330	63.5
			우현 4번 탱크	0.505	96.4
			좌현 5번 탱크	0.660	138.6
			우현 5번 탱크	0.267	56.2

5) Crude oil washing systems, IMO, p.34, 1983 edition, 1991 reprinted.

6) Digest of Charterers Requirements for Crude Carrier and Product Carriers, Shell International Marine Limited Revised May, 1987.

- ① 원유선의 가열장치는 85℃까지 가열할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.
- ② 가열장치의 설계기준은 해수온도 5℃, 대기온도 2℃에서 전체 화물을 다음 기간 내에 44℃에서 66℃까지 상승시킬 수 있어야 한다.
 - 정박중일 때는 4일 이내
 - 통상의 속력으로 항행중일 때는 4일 이내

이 기준에 따라 조선소에서 건조하는 원유선의 통상적인 가열능력은 상당히 엄격한 외부환경(해수온도 5℃, 대기온도 2℃) 하에서 1일 가열능력이 5.5℃가 되도록 가열장치가 설계됨을 알 수 있다.

그러나 본선의 경우는 대기온도는 26~28℃, 해수온도는 24~26℃ 범위의 비교적 양호한 외부환경 조건 하에서도 탱크내 화물 평균온도 35.07℃에서 50℃까지 올리는데 11일이 경과하여 화물온도 상승은 1일 평균 1.35℃에 불과하였다. 이 상승률은 통상적인 설계기준인 1일 평균 5.5℃에 비해 매우 낮은 가열율로서, 나중에 각 탱크별 온도편차가 출항시에는 1℃ 이내에서 양방향 도착시점에서는 16.5℃까지 벌어지고 있는 점으로 보아 각 탱크의 히팅코일에 동일한 열량이 공급되지 못하였음을 짐작할 수 있다. 결국 이 과정에서 선박 탱크 바닥에는 발전기 고장으로 발생한 얇은 응고층 위에 추가로 발생한 응고층이 선박바닥으로부터 10 cm높이에 위치하고 있는 배수구(Drain hole)를 막았을 것이며, 자연방류(Free flow discharge) 방식을 택하고 있는 사고 선박에서 배수구가 막힘으로써 기름의 흐름이 차단되었을 것으로 보인다.

3.6 원유선 열전달 현상 해석

(1) 응고량의 계산

원유선의 화물탱크 외관(선측 또는 선저)을 통하여 외부로 잃어버리는 방열손실은 화물의 온도와 해수 및 대기간의 온도차에 비례하면서 증가한다. 가열중단으로 화물탱크 바닥에 발생할 수 있는 응고량은 대략 다음과 같은 약산식에 의해 계산할 수 있다.

$$Q_R = kA(t_o - t_{sw})T \quad [Kcal] \quad (1)$$

$$Q_{PO} = mC_c (t_o - t_p) \quad [Kcal] \quad (2)$$

$$Q_P = Q_R - Q_{PO} \quad (3)$$

$$m_P = Q_P / \rho_P = \gamma A h \quad (4)$$

$$h = m_P / \gamma A \quad (5)$$

여기서, Q_R ; 방열된 열량 (Kcal)

k ; 열 전달율

A ; 해저와 닫는 선저면적

t_o ; 화물온도

t_{sw} ; 해수온도

T ; 방치시간

Q_{PO} ; 응고점에 이르기까지의 방열량 (Kcal)

m ; 화물량

C_c ; 화물의 비열

t_p ; 화물의 Pour point

Q_P ; 응고에 소요된 열량

m_P ; 응고된 화물량

ρ_P ; 응고잠열

h ; 응고층 두께

γ ; 비중

(2) 컴퓨터 시뮬레이션

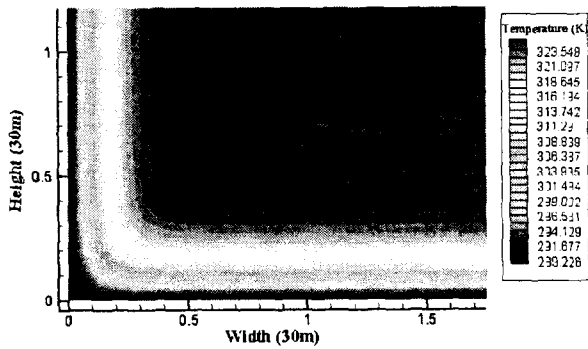
원유선에서 원유의 유동성을 확보하기 위한 히팅이 이루어지지 않았을 때의 현상을 설명하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 그 현상을 분석하였다.

① 원유선의 유조탱크를 직육면체로 본다.

② 수일간의 시간에 있어서 열변화는 매우 적게 일어나므로 원유선의 길이는 충분히 길다고 볼 수 있고, 따라서 폭 방향인 2차 평면의 변화만을 대상으로 열전달 현상을 해석한다.

③ 해수의 온도는 15℃, 원유선의 윗면은 충분히 단열되어 있다고 보고, 53℃를 유지하고 있다가 화물탱크 가열이 중단된 시점부터 3일간의 열전달 현상을 원유의 물성을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션한다.

컴퓨터 시뮬레이션으로 3일 후 원유탱크내 온도분포와 유동점 이하로 되는 부피비율은 다음 [그림 4] 및 [그림 5]와 같다.



[그림 4] 화물탱크내 온도변화 추이

점(pour point)에 유사한 온도를 유지하여 탱크내에 약간의 밀랍침전물이 생긴다 하더라도 이후 적정온도 이상으로 화물을 가열할 경우 대부분의 밀랍침전물은 용해되어 원유속으로 환원되기 때문에 초기의 적재온도가 pour point보다 높은 cloud point나 wax appearance temperature 이하인 것이 탱크내에 다량의 ROB 원인으로 볼 수 없다. 원유세정(COW)도 바닥의 밀랍침전물을 줄이는데 일조는 할 수 있으나, 한 냉지역에서 히팅카고의 원유세정은 수반되는 부작용이 문제가 될 수 있고, 이미 탱크바닥의 원유가 응고되어 배수구가 막힌 상황에서의 원유세정은 의미가 없게 된다. 화물탱크의 일시적 가열증지는 그것이 장시간이 아닌 경우는 시뮬레이션 결과, 응고되는 화물량이 전체 부피 대비 1% 내외에 불과하기 때문에 일시적 가열증단이 다량의 ROB 생성에 결정적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

반면에 문제 선박의 화물가열 능력(1.35°C/일)은 동급의 다른 선박들(5.5°C/일)에 비해 매우 불량하여 항해중 탱크별 온도편차가 최대 16.5°C나 되었고, 화물의 가열불량으로 국부적으로 발생한 응고화물이 탱크 하부의 횡방향 보텀 트랜스버스나 웹프레임의 배수구를 막아 화물의 흐름을 차단시킴으로써 횡방향 구조물 사이에 화물이 갇히어 결정적으로 다량의 ROB oil가 발생한 원인으로 판단된다.

따라서 히팅카고를 운송하는 원유선은 다른 어떠한 요인보다도 양하중에 화물이 충분한 유동성을 유지할 수 있도록 규정온도를 유지하는 것이 매우 중요하므로, 이를 위해 히팅시스템(heating system)이 정상적으로 유지되고 사용될 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] 「Oil Tanker」, 한국해양수산연수원, 1999.
- [2] *Digest of Carriers Requirements for Crude Carriers and Product carriers*, Shell International Marine Ltd., 1987.
- [3] *Crude Oil Assay Report*, BP Amoco Group, Analytical Technology, Sunbury, 1999.
- [4] *Crude Oil Washing Systems*, IMO, 1983 edition, 1991 reprinted.
- [5] *International Safety Guide for Oil Tanker and Terminal*, 3rd edition, Witherby, London, 1991.

[그림 5] 3일간 시간에 따라 유동점(약 30°C) 이하로 냉각되는 부분의 부피 비율

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 3일 후 원유선 전체의 약 1%에 해당하는 부분이 유동점 이하로 냉각됨을 보이고 있다. 이 결과는 원유선의 내부로부터의 냉각효과 등과 같은 냉각조건을 완벽하게 고려하지 못하였으므로 절대값 차원보다는 경향성을 의미있게 보아야 할 것이다. 즉, 원유선 내부의 유동성 확보를 위한 히팅은 지속적으로 유지되어야 하며, 히팅이 중단된 시점부터 벽면으로부터 원유는 냉각되기 시작하고, 벽면 근처는 짧은 시간내에 유동점 이하로 냉각되어져서 그 두께는 지속적으로 커져가며, 수 % 수준의 ROB를 유발할 수 있다.

4. 결론

히팅카고는 운송과정에서 다양한 원인으로 응고될 수 있다. 본고는 통상의 수준을 넘는 다량의 ROB가 발생한 나일브랜드원유의 응고사고를 대상으로 사고의 원인과 원유의 응고과정을 분석하여 보았다.

히팅카고가 적재과정이나 초기 운송과정에서 유동

- [6] ISO Standard 8217:1996 Petroleum products - Fuels(class F) - Specifications of marine fuels"
- [7] 「わか國の輸入原油」, 石油聯盟内國調査部, 東京, 1975.
- [8] 「油槽船運航實務指針」, 日本三光Line(株), 昭和51年, 韓國版(天敬海運), 1984.