

## 해양누유 현장소각 기술에 대한 소고

성홍근<sup>(1)</sup>

### A Note on *In-Situ* Burning of Marine Oil Spills

by  
H.G. Sung<sup>(1)</sup>

#### 요 약

해양 누유사고시의 방제대책은 오일펜스와 스키머를 사용하는 기계적 방법과 유화제를 사용하는 화학적 방법 그리고 현장에서 누출유를 소각하는 현장소각 방법으로 대별된다. 본 논고는 최근에 들어 관심이 집중되고 있는 해양누유 현장소각 기술에 대한 문헌 조사를 기초로 하여 작성된 것으로서, 해양누유 현장소각 기술의 특징, 역사, 현황, 장단점 그리고 실험적 연구 및 향후 적용가능성 등에 대하여 간략히 기술하였다.

#### Abstract

Responses to marine oil spills can be classified into categories; 1) mechanical treatment using booms and skimmers, 2) chemical one utilizing dispersants, 3) controlled *in-situ* burning of spilled oils. In the present paper, characteristics, history, present issues, advantages and disadvantages, and future applicability of *in-situ* burning technology which is nowadays winning much attention are summarized on the basis of a survey of related papers and other resources.

Keywords: 해양 누유사고(marine oil spill), 현장소각(*in-situ* burning)

#### I. 서 론

해상에 소량의 기름이 유출되면 자연적 풍화과정을 거쳐 소멸되어 해양 및 주변 생태계에 미치는 영향은 미소하다. 그러나 다량의 기름이 일시에 유출되면 해양생태계에 미치는 영향은 막대하므로, 이를 최소화하기 위하여 누출유에 대한 방제작업을 시행하여야 한다. 예를 들어 1989년 Exxon Valdez호 사고에 의한 기름유출은 주변 생태계에 미친 영향이 실로 엄청난 재앙이었고, 이 사고는

해양 누유사고에 대한 정부 및 해당 산업계가 해양누유 방제대책(oil spill response)을 어떻게 준비하여야 하고 어떻게 시행하여야 하는 지에 대한 새로운 계기를 마련해 주었다

(<http://library.hinkquest.org/10867/>).

해양 누유사고에 대한 방제대책은 크게 보아 다음의 범주로 분류될 수 있다.

1) 기계적 방제법 : 오일펜스와 스키머를 이용하여 누유의 확산을 차단한 후 수거

2) 화학적 방제법 : 유처리제(dispersant)를 이용하여 유막을 작은 유적으로 분해하여 풍화작용 및

(1) 정희원, KRISO, hgsung@kriso.re.kr

생물학적 작용을 가속화

3) 현장소각 방제법 : 적절하게 제어된 조건과 상태에서 누출유를 현장에서 소각(controlled burning) 위의 3가지 방법은 Exxon Valdez호 사고시에도 적용된 방법이다. 기계적인 방제법은 문헌 및 실제에 있어서 가장 선호되고 있는 방법으로, 기계적 방제법의 효율은 오일펜스와 스키머의 성능, 방제요원들의 숙달정도 등에 따라 달라진다. 기름 유출량이 많은 경우 비교적 짧은 시간에 유층의 확산면적이 수 평방 마일에 걸쳐게 되는데, 투입해야 하는 오일펜스의 길이가 너무 길어지고 다수의 유회수선이 필요해지는 단점과 함께 스키머로 수거한 해수-기름의 혼합물을 저장하는 공간의 부족에도 직면하게 된다. 또한 이에 따라 너무 많은 방제인력이 요구되고, 저장공간 때문에 수심에 대한 일정정도의 제약이 가해지며, 저장된 회수유의 이송에 대해서도 별도의 수단을 강구하여야 한다.

최근에 신속하고 효과적인 누유제거를 위해서 기계적 방제방법에 대한 대안 중 하나로써 화학적 방제법이 제시되고 있다(IMO[1995], NOAA[2000]). 예를 들어 다량의 기름이 매우 넓은 지역에 걸쳐 확산한 이후에 유처리제(dispersant)의 사용은 매우 효과적인 방법이 될 수 있다는 것이다. 그러나 유처리제를 사용하기 위해서는 고속으로 항주가능한 선박, 헬기 혹은 비행기가 요구되는 단점이 있다. 또한 유층의 두께에 대한 제약과 엄청난 량의 유처리제(누출유와 유화제의 적정비가 탄화수소용제형인 경우 대략 20:1, 농축형인 경우 3:1정도)가 필요하고, 수심에 대한 제약도 따른다. 무엇보다도 중요한 것은 아직도 유처리제의 사용에 대한 논의가 일반적인 합의에 도달하지 못한 점도 유처리제 사용에 대한 중대한 제약이 되고 있는 실정이다. 이런 이유로 서구 선진국가에서는 유처리제의 사용에 대하여 제한적 조건을 부과해 놓고 있어 실제 사용사례는 흔치 않은 일이나, 우리 나라를 포함한 일부 국가에서는 사회문화적 특수성 때문에 해상누유의 방제방법으로서 유처리제 사용에 대한 의존도가 높다고 할 수 있다.

## 2. 누유 현장소각 기술

기계적 방제법의 또 다른 대안은 누유 현장소각

(*in-situ burning*)이다(Allen [2000]). 누유 현장소각이란 유출된 기름이 더 넓은 영역으로 확산되거나 해안선에 닿아 민감한 자원에 영향을 미치기 전에 적절한 방법으로 제어된 상태에서 소각(controlled burning)하는 것을 말한다. 사고에 의해서 유출된 기름이 점화된 경우에도 현장 소각기술을 이용하여 구조물과 인명을 화재로부터 보호할 수 있다.

### 2.1 누유 현장소각 기술의 역사

누유 현장소각 기술은 1958년 캐나다의 Mackenzie 강에서 처음 시도된 것으로 기록되어 있다(Fingas [1999]). 이 후에도 캐나다에서는 현장 소각기술이 수 차례 적용되었으나, 구체적인 기록이 남아 있지 않다. 그 이후로 현장 소각기술이 스웨덴과 핀란드에서 성공하면서 주변국들에서도 적용되기 시작했다. 영국에서는 1967년 Torrey Canyon호 사고때 유출된 기름의 현장소각을 시도하였지만 결과가 나쁘게 나왔기 때문에 그 이후로는 영국에서는 현장 소각기술이 최근에까지도 적용된 적이 없다.

최근에는 현장 소각기술에 대한 인식이 성숙되어 몇 개의 지역에서는 현장 소각기술이 방제대책의 하나로 채택되고 있다. 따라서 누출유의 현장소각은 이제 대부분의 서구국가에서는 관할 당국의 허가를 받아 적용할 수 있는 “승인된(approved)” 기술이 되었고, 캐나다와 미국의 석유생산지역에서는 광범위하게 사용되고 있는 실정이다.

### 2.2 누유 현장소각 기술의 구성요소

누유 현장소각 기술은 내화용 오일붐(fire-resistant boom 혹은 fire boom), 예인선, 점화장치 등의 장비로 필요로 한다. 내화용 오일붐은 Fig. 1에 보인 바와 같이 U자형으로 기름을 포획하고 U자형의 볼록한 부분에서 점화된 유막의 이탈을 막고 지속적인 소각이 가능하도록 해 주는 방제장비이다. 예인선은 내화용 오일붐과 함께 화염의 크기를 최대화하고 안전한 소각을 위해 절대적으로 필요하다. 일반적으로 예인선의 속도를 조절함으로써 화염의 크기를 제어할 수 있다고 한다. 점화장치는 방제요원이 손에 잡고 점화시키는 장치(hand-held igniter)와 헬기에서 점화시키는 장치(heli-torch)가 있다. “hand-held igniter”는 안전한 거리에서 점화

시킬 수 있는 적절한 길이가 확보되어야 한다. "heli-torch"는 헬기에서 케이블로 내려져서 프로판 가스에 의해서 점화시키는 장치이다. 현재 몇 군데 오염방제 관련회사에서 점화장치를 시판하고 있고 레이저를 이용한 점화장치도 설계 중에 있지만, 실제 현장소각에 사용된 점화방법은 오히려 너무나 단순하다. 예를 들어, Edgar Jordain 누유사고에서는 화장지에다 경유를 묻혀서 점화시켰으며, Exxon Valdez사고시의 시험소각에서는 겔화된 가솔린을 채운 "lunch baggie"를 이용하였다(Fingas [1999]). 이는 유막을 점화시키는 것이 얼마나 쉬운지를 보여주는 동시에 점화기법자체가 아직은 세련되지 못함을 보여준다.



Fig. 1 *In-situ* burning of spilled oils

### 2.2.1 기름 현장소각의 적용조건

현장소각의 효과는 유출된 기름의 물리화학적 특성, 점화시간에 있어서 유막의 두께, 공기 중에 노

출된 시간, 유상화 정도, 바람, 파도, 조류 등에 강하게 의존하는 것으로 알려져 있다. 현장소각을 이용하면 적절한 조건하에서 누출유 전체용적의 95~98%정도가 제거될 수 있다고 한다. 해상에 기름이 유출되면 휘발성분이 증발하고 점차로 유상화되기 때문에, 유막을 점화시키기 매우 어렵게 된다. 또한 유상화된 기름을 점화하여도 소각이후에 찌꺼기(residue)와 타지 않은 기름의 양이 증가하기 때문에 제거효율은 떨어지는 것이 보통이다. 풍화되고 유상화된 기름의 소각에 대한 실험적 연구는 Putori Jr. & Evans[1994]가 수행하였다. 아래에서 현장소각 기술의 적용이 용이한 제반 조건에 대하여 간략히 기술한다(Table 1).

점화가 가능한 유층의 두께는 원유인 경우 2~3mm, 경유 혹은 풍화된 원유는 3~5mm, 유상화된 기름 또는 중질유는 5~10mm두께이상이어야 한다 (지속적으로 소각이 이루어지기 위해 유막이 일정 두께이상이어야 하는 이유는 열전달에 있다. 충분한 양의 열량이 공급되어야만 소각을 지속시키기 위한 기름을 증발시키기 때문이다). 휘발성 물질은 30%미만으로 증발되어야 하는데, 이는 보통 바람과 파랑상태에서 24~48시간이내임을 뜻한다. 유상화 정도는 20%미만의 "water-in-oil emulsion"에서는 손쉽게 점화되나, 이보다 함수율이 더 높으면 점화시간이 길어지거나 점화자체가 불가능할 수도 있다. 바람은 20노트이하, 파랑은 단주기 풍파(short-period wind waves)에 대하여 파고 1m이하, 조류는 1노트이하가 바람직하다.

Table 1 Constraints on *in-situ* burning

제약항목	제약조건		비고
유층두께	원유	2~3mm이하	
	경유, 풍화된 원유	3~5mm이하	
	유상화된 기름, 중질유	5~10mm이하	
휘발성 물질	30%미만 증발		보통 바람과 파랑상태에서 24~48시간이내
유상화 정도	20%미만		
바람	20노트이하		
파랑	단주기 풍파에 대하여 1m이하		
조류	1노트이하		

## 2.2.2 내화용 오일붐

전술한 바와 같이 내화용 오일붐은 유출된 기름이 확산되고 유층이 얇아지는 것을 막음으로써 유층이 지속적으로 소각될 수 있도록 하기 위해서 현장소각 기술에서 반드시 필요한 방제장비이다. 이때, 안전을 위해서 모든 방제 인원과 방제선은 바람의 상류(바람이 불어오는 방향)에 배치하여야 한다.

내화용 오일붐은 일반적인 오일붐과 마찬가지로 우선 보통의 해상상태에서 기름 포획성을 가지고 있고 쉽게 전개할 수 있어야 하는 동시에, 누출유의 소각에 의해 발생하는 고온고열을 견딜 수 있는 내화성 재질로 제작되어야 한다. 특히 화염에 직접 노출되는 수면상부는 1000℃에서, 장시간 소각하는 경우는 1300℃까지의 고온에 견딜 수 있는 재질로 이루어져야 한다.

화염에 대한 저항성의에도 내화용 오일붐은 1) 파랑, 조류 및 예인에 의한 굽힘(bending), 비틀림(twisting), 장력에 견딜 수 있어야 하고, 2) 수면의 상승 및 하강에 의해서 신속히 냉각되어야 하며, 3) 큰 부유쓰레기에 의한 충격에도 지탱할 수 있어야 한다.

내화용 오일붐은 대체로 네 가지 형태로 구분할 수 있는데, 아래에서 각 내화용 오일붐의 특성에 대하여 고찰하고자 한다(Allen [2000]).

### (1) 기포와 물스프레이 시스템(Air bubble & water-spray system)

수면하에 잠긴 기포분사시스템을 이용하여 소각되는 기름의 확산을 차단하는 것이다. 이는 보편적인 “pneumatic barrier”의 개념을 그대로 사용하는 것으로, 시스템이 복잡하고 고유량의 압축공기가 필요하다. 기포분사시스템은 대체로 저속의 조류에도 기능을 상실하기가 쉽다. 외부 물스프레이 시스템(external water-spray system) 또한 복잡하며 고가의 제조비가 요구되고, 바람과 파 그리고 조류에 약하다. 이러한 약점을 보완하기 위하여 보편적인 오일붐과 함께 사용하는 경우가 있으나, 이 경우에도 하나의 노즐이 실패하면 빠져나간 화염이 붐에 닿게 되어 붐에 손상을 가하거나 붐의 냉각이 불가능하게 된다. 차단효율을 좋게 하기 위해서 유량을 과도하게 하면 가두어진 기름을 유산화시켜 소

각의 효율을 반감시킬 수 있다. 그러므로 본 시스템은 현재 사용 예를 찾아보기 힘들다.

### (2) 파이버붐(Fabric boom)

내화용 파이버붐은 Thermoglass, K.O. Wool, Nextel, Therमतex 등과 같이 고온에 저항력이 있는 재질을 이용한다. 지금까지 이러한 내화재질을 이용하여 고체부력재, 공기팽창식 부력실 그리고 자동팽창식 등의 내화용 오일붐이 제조되었다. 이들 중 부력재의 외부를 파이버(fabrics)로 도포하여 색상, 내마모성, 비침투성을 가지는 덮개로 혹은 화염에 노출되었을 때 타버리게 하는 “희생층(sacrificial layer)”으로 사용하는 경우도 있다.

기름 소각시 화염에 장시간 노출되는 외부 파이버는 점차적으로 약해지기 때문에 장시간 동안 부력을 잃지 않고 누출유를 차단할 수 있게 설계하여야 한다. 내화용 오일붐을 실제 적용할 때, 파이버붐의 수명을 연장하기 위해서 U자형의 정점(apex) 부분이 가장 온도가 높기 때문에 간헐적으로 이 지점을 앞뒤로 이동시키는 방법을 활용할 수도 있다.

### (3) 메탈붐(Metal boom)

고온에 저항력이 있는 금속을 이용하여 내화용 오일붐을 제작할 수 있으나, 과도한 중량으로 다루기 힘들고 연결부의 수밀작업에 어려움이 있다. 그리고 연결부의 응력파열(stress crack)과 과변형에 노출되기 쉽다. 또한 메탈붐은 제작비용이 고가이고, 다른 붐에 비하여 훨씬 큰 저장공간을 필요로 한다. 그러나 청소가 용이하고 재사용의 가능성이 상대적으로 높은 장점이 있다. 따라서 비용, 무게, 저장공간을 고려해 볼 때, 내화용 오일붐을 끄는 모양인 U자형의 정점부근에 제한적으로 사용할 수도 있다.

### (4) 수냉식 내화용 오일붐(Water-cooled fire boom)

수냉식 내화용 오일붐은 주위 해수를 이용해서 붐을 냉각시키는 방식을 채택한 내화용 오일붐이다. 근래에 들어서는 내부 냉각기법이 많이 사용되고 있는 것으로 보이는데, 내부로 끌어들인 물을 이용하여 외피(outer layer)를 냉각시킴으로써 필요한 물의 양을 줄이는 방식이다. 이렇게 함으로써 붐의 외피를 해수온도와 거의 같게 유지할 수 있다.

### 2.2.3 기름 소각에 의한 연소가스의 구성

현장 누유소각에서 부산물 중 가장 관심을 끌고 눈에 쉽게 띄며 우려스러운 부분이 바로 연소가스이다. 기름의 소각에 의해서 대기중으로 방출되는 연소가스는 탄화수소계 유기화합물의 연소에 의한 부산물로서 이산화탄소( $CO_2$ ), 수증기, 일산화탄소( $CO$ ), 이산화황( $SO_2$ ), 산화질소( $NO_x$ ) 등이 주종을 이룬다. 이 밖에도 다핵방향성탄화수소(Poly-nuclear Aromatic Hydrocarbon; PAH)와 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds; VOC)도 포함하고 있다. 현장소각의 주요산물은 이산화탄소와 수증기로써 90~95%를 차지한다. 매연(particulate)의 반은 유연(soot)으로 소각된 부피의 5~10%정도이다.

환경호르몬의 일종으로 분류되는 PAH는 연소과정에 의해서 만들어지는 양보다 파괴되는 양이 더 많은 것으로 알려져 있다. 최근 연구에 의하면 VOC는 148개나 채집된 적이 있는데, 원유와 경우에 있어서 비슷한 농도를 가진다고 한다. VOC의 농도는 화염에서 아주 가까운 곳에서도 인체한계치(human health limit) 이하로 나타났다. 기름소각에 의해서 알데히드(aldehydes)와 케톤(ketone)이 만들어지기는 하지만, 인체에 미치는 영향은 미미하다(Fingas[1999]).

이산화탄소는 연소의 최종산물인데, 화염근처에서 농도가 증가하는 경향을 보인다. 보통대기에서 이산화탄소의 농도는 300ppm인데, 화염근처에서는 대략 500ppm이다. 화염의 1m높이 위에서 가장 높고, 4m높이 위에서는 보통상태로 줄어드는 것을 측정할 실험결과가 있다. 일산화탄소는 감지하기 어려울 정도의 농도를 보이므로 인체에는 유해하지 않은 것으로 보인다(Fingas[1999]).

결론적으로 누유 현장소각에 의해서 발생하는 연기는 주저지로부터 멀리 떨어진 곳에서 현장소각을 실시한다면, 인체에 미치는 영향은 미소한 것으로 판단된다.

### 3. 누유 현장소각 기술의 장단점 요약

누유 현장소각 기술의 장점으로서는 1) 높은 제거율, 2) 고효율, 3) 최소 수거 및 저장, 4) 최소 처리 및

청소, 5) 범용성(versatility), 6) 야간작업 가능, 7) 최소 방제장비 및 방제인원, 8) 최소 수심제약, 9) 제어용이, 10) 저비용, 11) 다른 방제작업과 병용 가능, 12) 최소 환경피해 등으로 요약된다(Allen[2000], Fingas[1999], Buist[1999]).

(1) 높은 제거율 : 원유의 경우 대략  $0.17 m^3/hr/m^2$ 의 제거율을 보인다. 150m 짜리 내화용 오일붐을 이용하여  $560 m^2$ 의 화염을 봉쇄할 수 있으므로,  $95 m^3/hr$ 을 제거할 수 있다. 대부분의 유층은  $3\sim 4 mm/min$ 의 속도로 소각된다는 자료도 찾아 볼 수 있다.

(2) 고효율 : 대체로 95~98%정도인데, 유출된 기름의 특성과 유상화된 정도 등에 따라 다르다.

(3) 최소 수거 및 저장 : 거의 대부분의 누유가 소각되기 때문에, 찌꺼기와 타지 못한 기름의 수거 및 저장은 최소화된다.

(4) 최소 처리 및 청소 : 수거된 찌꺼기 및 잔유의 양이 적으므로 처리해야 하는 양도 최소화된다.

(5) 범용성(versatility) : 현장소각 기술은 청수 및 해수에 공히 적용할 수 있으며, 열대 및 극지역에서 적용할 수 있는 범용성을 가지고 있다.

(6) 야간작업 가능 : 다른 방제방법에 비하여 야간작업이 용이하다.

(7) 최소 방제장비 및 방제인원 : 현장소각 기술을 적용하기 위해서 요구되는 방제장비의 수 및 방제인원수는 다른 방제방법에 비하여 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다.

(8) 최소 수심제약 : 내화용 오일붐과 방제선의 투입이 가능한 수심이면 현장소각을 적용할 수 있다.

(9) 제어용이 : 방제선의 예인속도를 조절함으로써 화염의 크기를 쉽게 조절할 수 있다.

(10) 저비용 : 최소 수거 및 저장과 최소 처리 및 청소가 가능하기 때문에, 결과적으로 다른 방제방법에 비하여 20~30%정도의 비용밖에 들지 않는다.

(11) 다른 방제작업과 병용 가능 : 현장소각 기술을 올바르게 적용한다면, 다른 방법의 방제수단과 함께 사용할 수 있다. 이 때 가장 유의해야 할 것은 안전문제인 것으로 판단된다. 화염의 크기 및 방향을 적절히 제어함으로써 인접지역에서 다른 방제방법을 안전하게 수행할 수 있도록 하여야

한다.

(12) 최소 환경피해 : 현장소각에 의해서 해양 및 대기환경에 악영향을 미칠 수 있는 것은 연기, 가스, 열과 찌꺼기 등인데, 이는 매우 단기적이고 국지적으로 일어나는 일이기 때문에 환경에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다. 또한 방제인원과 주위 환경에 미치는 피해를 최소화할 수 있는 소각 위치와 시기를 결정하여 현장소각을 시행할 수 있다. 그리고 연소 부산물들이 대기 중에서 신속하게 희석되고 분산되기 때문에 현재까지는 현장소각으로 인한 장기간의 환경영향은 미소한 것으로 판단된다.

누유 현장소각 기술의 단점으로는 1) 기름의 상태 및 조건에 대한 제약, 2) 바람과 해상상태에 대한 제약조건, 3) 누유 확산차단의 필요성, 4) 적용가능성 제한, 5) 연기 축, 시각적 피해 및 충격, 6) 화재 발생 가능성, 7) 단기간 국지적 대기오염, (8) 찌꺼기(residue)의 발생 등으로 기술된다(Allen[2000]).

(1) 기름의 조건에 대한 제약 : 2.2.1에서 지적한 바와 같이 유층의 두께가 최소 2mm 이상이어야 하고, 20~30%미만의 물을 포함하고 있어야 한다. 또한 충분한 휘발성분을 가지고 있어야 한다.

(2) 바람과 해상조건에 대한 제약조건 : 휘발성분이 아주 많아서 넓은 면적에 걸쳐 점화가능한 경우가 아니라면, 20노트이하의 풍속에서 현장소각이 적용되기 용이하다. 단주기 풍파는 1m이하인 경우에 적절하다.

(3) 누유 확산차단의 필요성 : 유층의 두께에 대한 제약조건 때문에, 내화용 오일분을 이용하여 유층을 봉쇄한 후 소각과정동안 유층의 두께를 적절하게 유지시켜야 한다. 누유의 확산차단은 기계적 방제법에서도 요구된다.

(4) 적용가능성 제한 : 풍화작용과 유상화 때문에 소각은 누출 후 12~24시간 이내에 시행되어야 한다. 매우 고요한 바다에서는 48시간 혹은 그 이후까지도 가능하다. 매우 추운 지역에서는 유출 후 몇 달 혹은 몇 년 후에도 가능하다고 한다. 사실상 시간에 대한 제약은 다른 방제방법에서도 동일하게 적용된다.

(5) 연기 : 누유 현장소각에 의해 발생하는 연기

가 일반인에게 미치는 시각적, 심미적 피해를 고려하여, 주거지에 가까운 곳에서 누유 현장소각 기술을 시행하는 것은 바람직하지 않다.

(6) 화재 발생 가능성 : 인화성 물질을 탑재하고 있는 해양플랫폼, 선박 등의 구조물에서 멀리 떨어진 곳에서 현장소각 기술을 적용하여야 한다.

(7) 단기간 국지적 대기오염 : 단기간이고 국지적이기는 하지만 일정 정도의 대기오염을 유발한다.

(8) 찌꺼기 발생 : 현장소각이 성공적으로 이루어진 후에도 기름이 타고 남은 찌꺼기가 발생한다. 유상화가 어느 정도 진행된 유막의 경우, 기름소각 찌꺼기는 이 보다 더 두꺼워진다. 일반적으로 기름소각 찌꺼기는 반고형물이고 타르와 비슷한 층을 형성한다. 두께가 1~2cm인 유상화되지 않은 원유의 경우에도 찌꺼기의 두께는 1mm에 이른다고 한다(Buist[1999]). 더 두꺼운 중질원유의 경우에는 기름소각 찌꺼기가 해저로 가라앉는 문제점이 있다.

#### 4. 누유 현장소각 기술에 대한 실험적 연구

누유 현장소각 기술의 적용조건 및 적용기술을 개발하기 위해서는 누유 현장소각에 대한 실험적 연구가 절실하다. 미국에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology), NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), USCG(United States Coast Guard), MMS(Mineral Management Service) 등의 기관에서 누유 현장소각 기술에 대한 대규모 실험을 수행한 바 있다. Walton[1993]은 6m×6m 접시(pan)와 15m×15m 접시 위에서 Louisiana 원유를 소각한 실험을 수행하였으며, 소각율(burning rate), 연기량, 입자크기 분포, 수온변화, 지표층 이산화탄소 농도, 풍하(downwind) 연기레적 관측 등에 대한 자료를 제시하고 있다. 당 실험에 의하면 풍속이 평균 소각율에 미치는 영향은 미미하며, 두꺼운 두께의 Louisiana 원유 유층의 소각율은  $0.052 \pm 0.002 \text{ kg/s/m}^2$  이다. 90%이상의 원유가 소각되었으며, 탄화수소 농도의 증가는 연기에서만 관찰된다.

누유 현장소각 기술의 핵심요소 중 하나인 내화용 오일분에 대한 연구로는 Walton[1998], Walton

et. al.[1998] 등이 있다. Walton[1998]은 내화용 오일분 성능평가 기법의 현황을 소개, 정리하였다. 또한 길이, 폭, 수심이  $30.5m \times 9.1m \times 1.5m$ 인 옥외수조에서 약 15m의 내화용 오일분을 원형으로 배치시킨 후 경유를 수면에 분포시켜 점화시킨 실험결과를 소개하였다(Fig. 2). 그에 의하면 이 정도 크기(직경 5m의 원형)의 화염은 실제 해상에서 적용하고자 하는 화염을 충분히 근사적으로 표현할 수 있다. Walton et. al.[1998]은 내화용 오일분의 성능평가 기준에 대한 심도 있는 논의를 제공하였다.

Wu et. al.[1997]은 누유 현장소각에 영향을 미치는 다양한 인자들을 보다 더 잘 이해하기 위해서 누유소각에 대하여 체계적인 실험방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해서 “Lateral Ignition and Flame Spread(LIFT) standard test method(AS-TM E-1321)”에 수정을 가하여 만든 시험 기법을 적용하였다.

한편 국내에서는 비교적 소규모의 시험설비를 이용하여 내화용 오일분의 내화성시험에 대한 시도가 있었다(Fig. 3). 국내에서는 미국 등 선진국에서와 같이 대규모 혹은 중측도의 실험조차도 불가능한 여건에 있기 때문에 현재 소규모 성능시험만 수행되었다. 저자의 의견으로는 대규모 및 중측도의 현장소각 실험을 수행하기 위해서는 법적인 가능성이 열려 있어야 하는데, 현장소각 실험은 현재 대기오염방지법상의 대기오염물질 배출규정이나 소방법에 저촉이 될 것으로 보인다. Fig. 3에서 보인 바와 같이  $1.5m \times 0.85m \times 1.2m$  크기의 작은 수조에서 실험한 것으로서 발생하는 불완전 연소가스의 대기배출을 최소화하기 위하여 별도의 흡

입장치와 재소각 설비를 설치하였다. 유정석 외[2000]에 따르면 이러한 구조의 시험설비로는 미국에서 수행한 Fig. 2와 같은 중측도 시험은 불가능할 것으로 판단된다.

해상누유 현장소각 기술을 실제 누유사고시에 적용하기 위해서는 앞으로 더 많은 실험적 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 특히 중측도 이상의 큰 실험을 수행할 필요가 있으며, 적용하고자 하는 해상상태에 적합한 효과적인 내화용 오일분의 개발이 요구된다. 한편 국내에서도 국내 해상여건에 적합한 내화용 오일분의 개발이 이루어진 적이 있다(유정석 외[2000]).

현장소각에 의해서 발생한 연기의 궤적을 추정하기 위하여 Evans et. al.[1992]는 LES(Large Eddy Simulation)기법을 이용하였는데, 미국 EPA에 의해서 승인된 SCREEN 모델과 상이한 결과를 제시하였다. 또한 Walton et. al.[1996]은 NIST에서 개발한 연기궤적 추정모델인 ALOFT-PC(A Large Open Fire plume Trajectory model)을 제시한 바 있다. 한편 Walton & Budnick[1997]은 화염의 수치 모델링 기법을 요약, 비교하였다. 그러나 누유 현장소각 기술에 이러한 수치해석기법을 적용하기에는 아직은 많은 문제점이 있는 것으로 보이므로, 현재는 실험적 기법에 의존할 수 밖에 없는 것으로 판단된다.

## 5. 향후 적용가능성

앞에서 살펴본 바와 같이 해상누유의 현장소각 기술은 높은 제거율, 고효율, 저비용 등의 여러 가지



Fig. 2 Burning experiment(USCG, 1997)

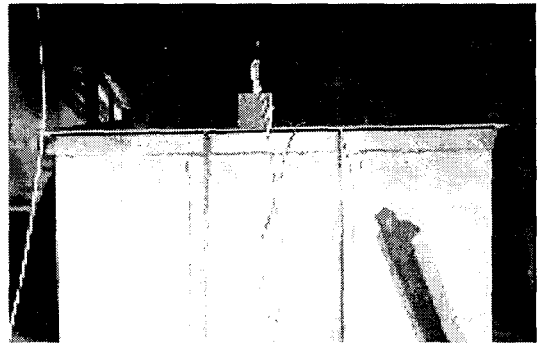


Fig. 3 Small scale experiment(유정석 외, 2000)

장점과 함께 몇 가지 단점도 가지고 있다. 하지만 우리 나라에서도 현장소각 기술을 적용가능한 방제수단의 일부로써 인식할 필요가 있다고 판단된다. 또한 실제 해상누유 사고시에 현장소각 기술을 적용하기 위해서는 지역 방제계획과 연관하여 구체적인 적용가능성을 검토해야 한다. 그리고 해당 해역에 적합한 내화용 오일폼의 개발이 선행되어야 함은 주지의 사실이다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 해상 누유사고시 방제대책중 하나인 현장소각 기술에 대하여 고찰하였다. 각종 문헌 조사를 바탕으로 현장소각 기술은 아주 효과적인 방제방법이 될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 향후 현장소각 기술의 적용가능성을 높이기 위해서는 구성 핵심장비인 내화용 오일폼의 개발이 필요하고, 이에 따라 중측도 이상의 실험을 광범위하게 수행해야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

[1] 유정석 외, 2000, "내화용 오일폼의 설계 및 성능평가 기법 개발", 2000, 위탁연구개발보고서, 한국해양연구소 선박해양공학분소

[2] A.A. Allen, 2000, "Controlled Burning of Offshore Oil Spills", <http://www.elastec.com/in-situ.html>.

[3] I. Buist, "Window of Opportunity for *In Situ* Burning", 1999, *In Situ* Burning of Oil Spills Workshop Proceedings.

[4] D.D. Evans, W.D. Walton, K.A. Notarianni & H.R. Baum, 1992, "Large Fires: Burning of Oil Spills", Proceedings of 12th Joint Panel Meeting of UJNR Panel on Fire Research and Safety.

[5] M.F. Fingas, 1999, "*In Situ* Burning of Oil Spills: A Historical Perspective", *In Situ* Burning of Oil Spills Workshop Proceedings.

[6] ISO, 1995, "IMO/UNEP Guidelines on Oil Spill Dispersant Application Including Environmental Considerations", 1995, International Maritime Organization.

[7] A.D. Putori, Jr. & D.D. Evans, 1994, "Ignition of Weathered and Emulsified Oils", Proceedings of 17th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vol. I.

[8] Office of Response and Restoration, National Ocean Service, NOAA, 2000, "Introduction to Coastal Habitats and Biological Resources for Spill Response", Revised April 4, 2000.

[9] W.D. Walton, "In Situ Burning of Oil Spills: Mesoscale Experiments", 1993, NISTIR 5192, National Institute of Standards and Technology.

[10] W.D. Walton, "Status of Fire Boom Performance Testing", 1998, Proceedings of In Situ Burning of Oil Spills Workshop.

[11] W.D. Walton & E.K. Budnick, "Deterministic Computer Models", 1997, Fire Protection Handbook, 18th Edition.

[12] W.D. Walton, K.B. McGrattan & J.V. Mullin, "ALOFT-PC A Smoke Plume Trajectory Model for Personal Computer", 1996, Proceedings of 19th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vol. II.

[13] W.D. Walton, W.H. Twilley, N.P. Bryner, L. DeLauter, R.R. Hiltabrand and J.V. Mullin, 1998, "Second Phase Evaluation of a Protocol for Testing a Fire-Resistant Oil Spill Containment Boom", Proceedings of In Situ Burning of Oil Spills Workshop.

[14] N. Wu, M. Baker, G. Kolb & J.L. Torero, "Ignition, Flame Spread and Mass Burning Characteristics of Liquid Fuels on a Water Bed", 1997, Proceedings of 20th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, Vol. II.

[15] "<http://library.thinkquest.org/10867/>", 2000, Prince William Sound: Paradise Lost? The Exxon Valdez Oil Spill.