

오일펜스의 tip 형상이 후류유동에 미치는 영향에 관한 연구

고민석* · 이상준** · 이정묵** · 정상국***

Effect of tip configuration of an oil fence on wake structure behind the fence

Min-Seok Koh, Sang-Joon Lee, Choung-Mook Lee and Sang-Kook Chung

Key Words : Oil Fence(유벽), Tip Configuration(끝단형상), Shear Layer(전단층), Velocity Field(속도장), PIV(입자영상유속계), Oil Spill(기름유출)

Abstract

The flow structures of turbulent shear layer behind oil fences with different tip configurations were investigated experimentally using flow visualization and PIV velocity field measurement. An oil fence was installed in a circulating water channel and the flow structure around the fence tip was mainly analyzed in this experiment. The four tip configurations tested in this experiment are knife edge, semi-circle edge, circular edge and rectangular edge. The 300 instantaneous velocity fields were measured using the single-frame PIV system and they were ensemble averaged to give the mean velocity field and spatial distribution of turbulent statistics. Free stream velocity was fixed at 10ms/sec and the corresponding Reynolds number based on the fence height was $Re=4000$. As a result, for the oil fence with rectangular edge, the streamwise velocity component was decreased. On the other hand it was increased for the oil fence with circular edge. For all four fences tested in this study, general flow pattern of the lower shear layer is analogous but the upper layer shows difference depending on the tip configurations. The oil fence with circular edge has more diffusive upper shear layer than that of the others. The shear layer of the oil fence with rectangular edge has relatively thin thickness. The oil fence with circular edge was found to be proper shape for tandem fence.

1. 서론

해양에서의 기름유출과 확산에 따른 오염피해를 최소화하기 위해서 다양한 방제장비가 사용되고 있다. 오일은 유출 즉시 해면으로 확산되기 때문에 오일유출시 우선 확산을 방지시키는 것이 매우 중요하며 이를 위해 유벽, 표면활성제 등을 사용되어진다. 유벽(oil fence)은 일종의 부유 장애벽으로서 유출된 오일의 확산을 한정된 지역으로 막고 유막의 두께를 두껍게 하여 수거에 용이하도록 하는 기능을 가진다.

이러한 유벽의 끝단에서 박리되는 와류는 후류 유동장에 영향을 미치며, 박리전단층의 진행방향

과 확산정도에 따라 하류에서의 재부착점위치가 달라지게 된다. 전방유벽에서 박리된 전단층의 재부착 위치는 유류를 포획하기 위해 설치되는 이중유벽의 효율성과 관련하여 중요한 요소이다. 이러한 이중유벽의 설치에 따른 두 유벽사이에 유류를 포획하는 방안에 대해서 이정묵, 한동기^(1,2) 등에 의해 개괄적으로 연구가 수행된 바가 있으며, 도덕희⁽³⁾ 등은 Panoramic-PIV 계측시스템을 이용하여 유벽사이의 유동장내 작은 와구조 혹은 미세거동을 정량적으로 파악하였다.

본 연구에서는 유벽의 끝단 형상 변화가 전단층의 유동구조에 미치는 효과를 파악하기 위해서 4 가지 다른 모서리형상을 가진 펜스를 실험하였다. 본 연구의 목적은 유벽의 모서리 형상 변화가 전단층의 확산, 난류강도등의 유동특성에 미치는 영향을 해석함으로써 오일 유출시 활용할 실제 유벽에 적합한 유벽의 끝단 형상을 제시하고자 한다.

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

*** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

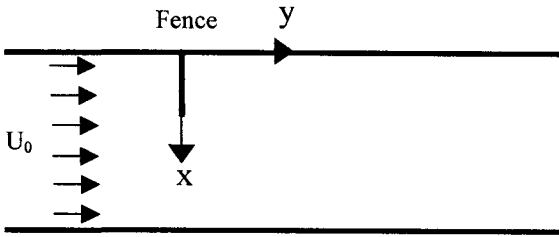


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and coordinate system

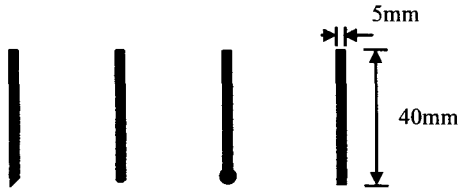


Fig. 2 Configuration of four fences

Table 1 Comparison between actual condition and experimental condition

	Actual condition	Experimental condition
Froude number	0.164	
Free stream velocity	0.514m/s	10cm/s
Fence height	1m	4cm

2. 실험장치 및 방법

2.1 유동가시화

서로 다른 tip 형상을 갖는 유벽주위의 유동구조를 정성적으로 관찰하기 위하여 회류수조에서 입자주입법 (tracer method)으로 유동을 가시화하였다. Fig.1 은 본 연구의 개념도와 좌표계를 나타내며, 유벽이 설치된 회류수조의 시험부 크기는 높이, 너비, 길이가 각각 25cm × 30cm × 120(cm)이다. 유속은 10cm/s 로 고정시켰고, 펜스 높이에 기준한 레이놀즈수와 프루드수는 각각 4000 과 0.164 이다. Table 1 은 실제 해상에서 사용되는 오일펜스와 본 실험에서 사용된 펜스 크기의 치수상관관계를 나타내었다. 유동가시화에 사용된 입자는 평균직경이 200 μm 인 폴리염화비닐(polyvinyl chloride)을 사용하였으며, 유적선을 가시화하기 위해서 수조 시험부 바닥으로부터 cold light sheet 로 조명하였다.

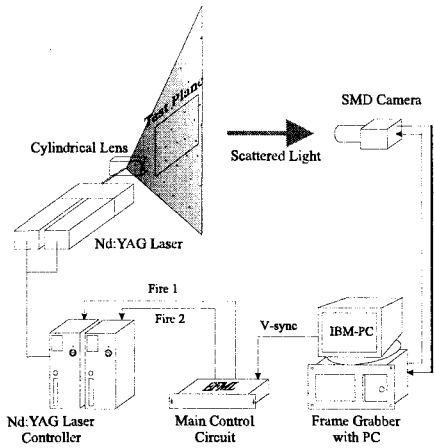


Fig. 3 Schematic diagram of the single-frame PIV velocity field measurement system.

Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 4 가지 다른 모서리의 형상으로 각각 날카로운(sharp-edge) 모서리, 반원형 모서리, 둥근형(round) 모서리, 직사각형 모서리형상을 갖고 있다. 사용된 펜스들의 높이는 4cm 이고, 폭은 30cm 이며 두께는 0.5cm 으로 펜스의 종횡비는 7.5 이고 형상비는 0.125 이다.

2.2 입자영상 유속계

유벽 주위유동의 속도장을 계측하기 위해 PIV 속도장 측정시스템을 이용하였는데, 그 개략도를 Fig. 3 에 나타내었다. 이 PIV 시스템은 Nd:YAG 레이저, CCD 카메라, 영상처리장치, 제어 및 계산용 컴퓨터, 동기화 장치 등으로 구성되어 있다.

2-head Nd:YAG 레이저는 레이저 펄스 당 약 25mJ 에너지를 방출한다. 해상도가 2K × 2K 인 CCD 카메라는 셀(cell) 충전율이 100%이고 영상편이(image shift) 기능이 카메라에 내장되어 있다. 카메라에서 나오는 영상신호(video signal)는 12 비트(bit)이며, 초당 4 장의 영상을 얻을 수 있다.

본 연구에서 사용한 싱글프레임 PIV 기법은 하나의 프레임에 이중 노출된 입자영상을 상호상관법(cross-correlation)으로 속도장을 추출하는 방식이다. 상호상관함수를 구하기 위해 사용되는 두 번째 미소조사구간(interrogation region)은 9픽셀 만큼 영상을 이동시켜 다른 위치에서 잡게 된다. 이 경우 상호상관함수는 속도방향을 나타내는 큰 상관값과 함께 상대적으로 작은 상관값이 반대위치에 나타나게 되어 방향모호성(directional ambiguity)문제를 해결할 수 있다. 싱글프레임 PIV 의 측정방법과 정확도에 대한 정보는 참고문헌⁽⁴⁻⁵⁾에 자세히 나와있다.

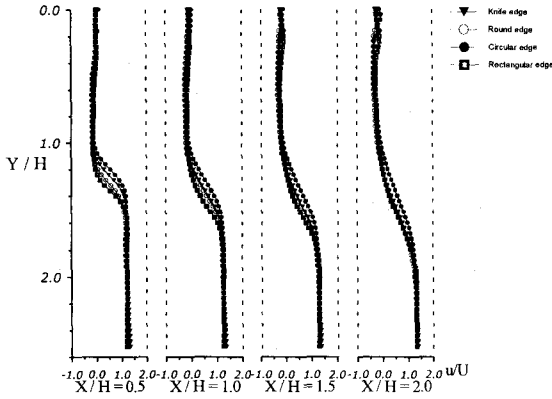


Fig. 4 Mean streamwise velocity profiles

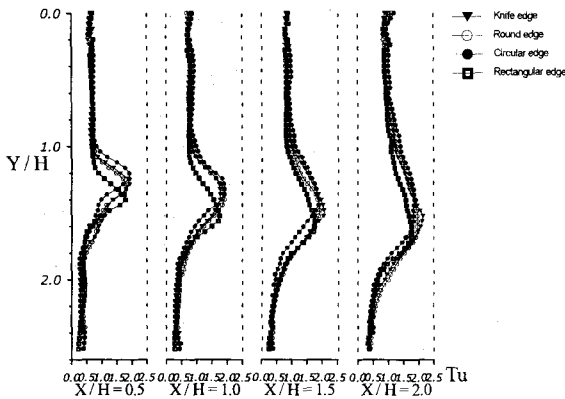


Fig. 5 Streamwise turbulent intensity profiles

전단층의 유동구조를 보다 상세히 보기 위해서 속도장 측정구간을 줄여 100mm × 100mm 로 하였으며, 미소조사구간은 영상이동량을 고려하여 64 × 64 픽셀로 설정하고, 50% 오버랩핑하였다. 산란입자로는 평균직경이 37 μ m 인 vestosint[®] 1118 입자를 사용하였다. 모든 난류 통계치들의 공간분포는 순간속도장 300 장을 앙상블 평균하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균 속도

Fig. 4 는 4 개의 유벽주위 유동의 주유동방향 평균 속도성분을 유벽의 높이와 자유흐름속도로 무차원화하여 나타낸 것이다. 유벽직후의 큰 속도구배는 유벽 끝단(tip)에서 박리되어 발달하는 난류전단층에 의한 것으로 하류로 나아갈수록 속도구배는 완만해진다. 유벽 후방으로 자유표면에 가까운 상부영역에서는 주유동방향과 반대방향의 역

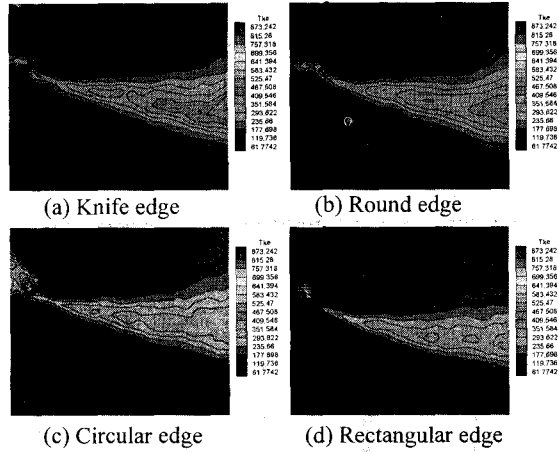


Fig. 6 Distributions of turbulent kinetic energy

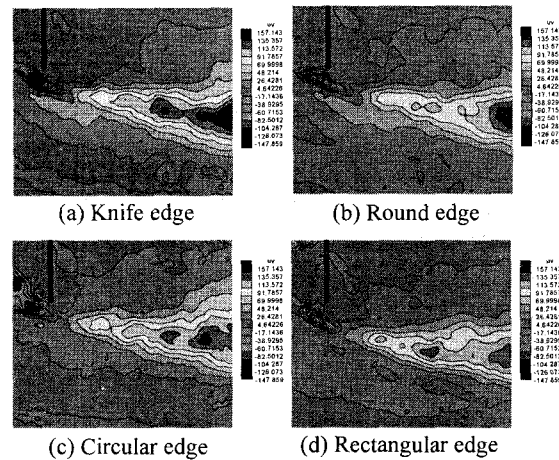


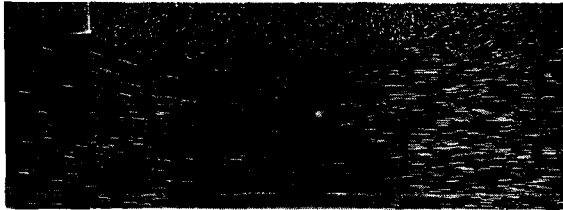
Fig. 7 Distributions of Reynolds shear stress

류를 관찰할 수가 있다. 이것은 박리전단층 내에서 와류들이 쌍을 이루거나 결합과정을 통해 점차 발달하게 되고 재부착 후에는 재순환 유동을 생성시켜 상류로 역류되어 오게되며 유벽 바로 뒷부분에서는 유동의 정체현상을 관찰할 수 있다. 4 개의 펜스중 전단층 내의 동일한 높이에서 평균속도가 동근 모서리를 갖은 펜스가 가장 크게 나타났고, 직사각형 모서리를 갖은 펜스가 가장 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 동근 모서리를 갖은 펜스처럼 펜스끝단에 곡률이 있는 경우에는 곡률이 없는 경우 보다 곡면을 따른 유동으로 전단층의 위치가 보다 높기때문이다.

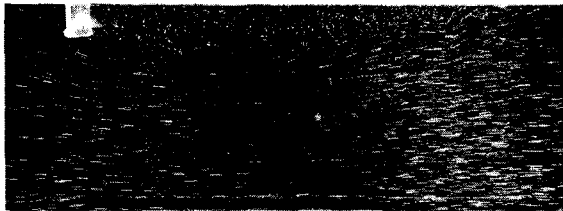
3.2 난류강도



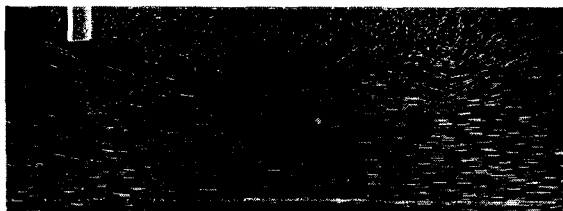
(a) Fence with knife edge



(b) Fence with round edge



(c) Fence with circular edge



(d) Fence with rectangular edge

Fig. 8 Flow visualization around oil fences

Fig. 5 은 4 개의 펜스에 대하여 하류위치 $X/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 에서의 주유동방향 속도성분의 난류강도분포를 나타내었다. 유벽후방 아랫부분에서 난류강도의 최대값이 국부적으로 나타났고, 하류로 감에 따라 최대값의 크기는 아래방향을 내려가며 난류강도구배는 완만해지고있다. Kiya & Sasaki⁽⁶⁾처럼 주유동방향 난류강도의 최대값 위치를 전단층의 중심으로 가정하면, 둥근모서리를 갖는 펜스의 경우, 전단층이 비교적 높은 부분에서 박리되었고, 직사각형 모서리를 갖는 펜스의 전단층이 가장 낮은 위치에서 유동이 박리됨을 확인할 수 있다. 이것은 둥근모서리의 유선곡률에 기인하여 전단층의 형성각이 더 작기 때문에 생각되어

진다.

3.3 난류운동에너지

Fig. 6 은 난류운동에너지분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 유벽 끝단 주위에서 강한 난류에너지를 가지며 박리 전단층의 점성확산으로 하류로 감에 따라 난류운동에너지가 약해짐을 알 수 있다. 본 연구에서 다른 4 가지 펜스 후방에 형성된 전단층의 하부 경계면에서의 경우 거의 비슷한 기울기로 확산되고 있다. 그러나 전단층의 상부의 확산경향을 보면 둥근모서리를 갖는 유벽의 경우 전단층이 상부로 강하게 확산되고 있으며, 직사각형 모서리의 경우 상대적으로 약하게 전단층이 위로 확산되는 것을 관찰할 수 있다. 이에 따라 직사각형 형상의 모서리가 다른 펜스에 비해 전단층의 두께가 얇게 나타나고 있다.

3.4 레이놀즈 전단응력

Fig. 7 은 레이놀즈 전단응력의 분포를 나타낸 것이다. 전단응력은 전단층의 중심을 따라 하류로 나아감에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 난류운동에너지분포에서처럼 레이놀즈 전단응력분포에서도 둥근모서리를 갖는 유벽은 전단층의 상부로 확산되는 경향이 크게 나타났다.

3.5 유동가시화

Fig. 8 는 4 개의 서로 다른 모서리를 가진 유벽에 대한 입자주입법을 사용하여 구한 유동가시화 결과이다. 난류강도분포와 유동가시화 결과를 비교하여보면 둥근모서리를 갖는 유벽의 경우, 유선곡률에 의해서 전단층의 박리되는 형성각이 작다. 반면에 직사각형과 날카로운 끝단을 갖는 유벽의 경우 전단층에서 박리되는 형성각이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 전단층 초기의 형성각의 차이는 유벽 후방의 전단층의 발달과정에 영향을 주게 된다. 둥근모서리를 갖는 유벽의 경우 전단층의 위치가 자유표면에 평평하게 수평으로 진행되는 경향이 강한 반면, 직사각형과 날카로운 끝단을 갖는 유벽의 경우, 전단층의 큰 형성각에 기인하여 전단층이 유벽 후방에서 아래방향을 향하여 확산되고 있다. 이러한 전단층의 진행방향은 전단층의 상대적 높이에도 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 싱글 프레임 PIV 기법을 이용하여 유벽의 끝단(tip) 형상에 따른 후류유동의 속도장 변화를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 주유동 방향의 평균속도분포는 유벽끝단 부근에서 큰 속도구배를 가지며 박리 난류전단층은 하류로 나아감에 따라 속도구배는 완만해진다. 둥근모서리를 갖는 팬스의 경우 동일 높이에서 가장 빠른 주유동 방향 속도를 가지며, 사각형 모서리를 갖는 팬스는 가장 낮은 속도값을 가진다.
- (2) 난류강도의 가장 큰 값을 갖는 위치는 하류로 나아갈수록 낮아지고, 난류강도구배는 전단층의 확산에 따라 완만해졌다. 둥근모서리를 갖는 유벽의 경우 가장 큰 난류강도값을 가지며, 직사각형 모서리를 갖는 유벽은 가장 작은 난류강도값을 나타냈다.
- (3) 난류운동에너지와 레이놀즈 전단응력분포에서 둥근 모서리를 갖는 유벽의 경우 전단층 상부로 확산되는 경향이 다른 유벽에 비해서 크게 나타났다. 직사각형 모서리에서 발달하는 전단층의 두께가 가장 얇게 나타났다.
- (4) 유선곡률을 가진 둥근모서리나 원형모서리를 갖는 유벽에서 박리되는 전단층이 다른 경우에 비해 전단층 형성각이 완만하였다.
- (5) 전단층의 형성 위치가 가장 높고, 전단층 상부로 확산되는 경향이 강한 둥근모서리를 갖는 유벽이 유출된 기름을 후방팬스로 가두는데 효과적이라고 생각되어진다.

후 기

본 연구에 사용되어진 장비 일부는 포항공대와 NRL 사업 지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이정목, 강관형, 1998, “조류중에 유벽의 보유 성능 해석,” 한국해양공학회 회지, 제 1 권, 1 호, 29~38.
- (2) 한동기, 1999, “조류 중 유벽의 보유성능에 대한 연구,” 석사학위논문, 포항공과대학교
- (3) 도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, 2000, “이중 유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동특성,” 국해양환경공학회지, 제 3 권, 제 1 호, pp25~34.
- (4) 이상준, 신대식, 2000, “고해상도 CCD 카메라를 이용한 Single-Frame PIV 속도장 측정기법

개발,” 대한기계학회논문집 B 권, 제 24 권 제 1 호, pp. 21~28.

- (5) 신대식, 이상준, 2000, “고해상도 PIV 기법을 이용한 타원형 제트의 근접 유동장 해석,” 대한기계학회논문집 B 권, 제 24 권 제 3 호, pp. 459~466.
- (6) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, “Structure of a Turbulent Separation Bubble,” *J.Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 83~113.