

PIV 계측과 CFD 해석을 통한 오일펜스 만곡부 단면에서의 유동장 특성

김태호* · 장덕중*** · 나선철**** · 배재현***** · 김대안**

*, ** 전남대학교 해양기술학부, *** 전남대학교 해양경찰학과, **** 해양환경관리공단, ***** (주) 금영

Characteristics of Flow Field at Curved Section of Oil Fence using PIV Measurements and CFD Simulations

Tae-Ho Kim* · Duck-Jong Jang*** · Sun-Chol Na**** · Jae-Hyun Bae***** · Dae-An Kim**

*, ** School of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam, 550-749, Korea

*** Department of Maritime Police Science, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam, 550-749, Korea

**** Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul, 135-870, Korea

***** Kum Young Co., Ltd, Seoul, 140-880, Korea

요 약 : 유속의 변화에 따른 오일펜스 만곡부 후면의 속도장과 압력장, 와도 및 난류 강도를 계측한 PIV 실험의 결과 유속이 증가함에 따라 유동 경계역의 후면부에서의 흐름 방향이 전면부의 흐름 방향에 가까워지는 현상이 나타났고, 압력 분포의 양상이 달라졌으며 난류도 더욱 불규칙적인 형태로 나타났다. PIV 실험과 동일 조건으로 수행한 CFD 해석 결과, 후류의 유동 패턴이 0.3 m/s 이하의 저속인 경우는 PIV 실험 결과와 유사하게 나타났으나, 유속이 0.4 m/s 일 때는 오일펜스 자체의 유연성으로 인해 다소 차이가 나타났고, 오일펜스 하단의 압력차로 인한 불규칙한 난류가 수면까지 영향을 주었다.

핵심용어 : 오일펜스, 유동장, PIV 계측, CFD 해석, 유동 패턴

Abstract : PIV measurements of the velocity field, pressure field, vorticity, and turbulent intensity in the rear of curved section of an oil fence with current speed showed that the flow directions in the rear of flow boundary area were similar to those in the front of it. As the current speed increased, the patterns of pressure distribution were changed, and the turbulent flow became more irregular. CFD simulations under the same conditions as the PIV tests showed that the flow patterns of the wake were similar to those by PIV tests in speed of 0.3 m/s and less, but were distinctively deviated from those in 0.4 m/s due to the flexibility of the oil fence, which was not properly taken care of in CFD modeling.

Key Words : Oil fence, Flow field, PIV measurements, CFD simulations, Flow patterns

1. 서 론

해상에 유출된 기름은 물리적인 특성으로 광범위하게 확산된 후 조류와 바람 및 파랑의 영향에 의해 이동하게 된다. 이 경우 기름은 조류의 속도와 바람의 세기 등에 의해 이동 속도가 결정되므로(Fannelop, 1983; Fang and Johnston, 2001a; 2001b), 사고 초기에 얼마나 신속하게 유출된 기름의 확산을 방지하느냐에 따라 방제 작업의 성공 여부가 결정된다. 즉, 기름 오염에 의한 피해를 줄이기 위해서는 기름의 확산을 차단하는 것이 중요하며, 기름의 확산을 차단하거나 일정한 장소로 가두기 위한 방안으로 오일펜스를 사용하는 것이 일반적

다. 그런데 오일펜스를 전개·예인하여 기름을 차단하기 위해서는 기름이 오일펜스 내에서 빠져나가지 않도록 오일펜스의 형상을 안정적으로 유지해야 한다. 특히 오일펜스는 매우 제한된 예인 속도나 해상 상태에서만 제 기능을 발휘하기 때문에 오일펜스의 예인 속도를 적절히 조종하는 것이 중요하다(Brown et al., 1996).

지금까지 오일펜스의 적정 예인 속도를 규명하기 위해 모형 실험과 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석이 주로 수행되었는데, Delvinge(1984)는 오일펜스의 임계 예인 속도는 0.14-0.2 m/s라고 하였다. 그리고 Goodman et al.(1997)과 Brown et al.(1996)은 유속이 0.2 m/s 이상이 되면 오일펜스 아래로 기름이 물과 함께 흘러나가 기름 포집이 불가능하다고 하였다. 또한, Oebius(1999)는 오일펜스에서 0.37 m/s 이상의 예인 속도는 무의미하다고 하였다. Kim et al.(2008)은 오일펜

* 대표저자 : 정희원, kimth@chonnam.ac.kr, 061-659-3121

† 교신저자 : 종신희원, jdj@chonnam.ac.kr, 061-659-3182

스를 대상으로 모형실험을 실시하여 그것의 성능 유지 측면에서의 예인 속도는 0.4m/s를 넘지 않아야 된다고 하였으며, 예인 속도가 0.6m/s에 도달하면 오일펜스 만곡부가 침강하거나 스킵트가 날리는 현상이 매우 두드러지게 발생한다고 하였다. 이와 같이 오일펜스의 경우 적정 예인 속도를 초과하는 경우에는 기름이 오일펜스 상부 및 하부를 통해 외부로 쉽게 새어나갈 수 있기 때문에 오일펜스의 적정 예인 속도를 규명하는 것은 매우 중요함에도 불구하고 PIV(Particle Image Velocimetry) 실험을 통한 오일펜스 주변에서의 유동장 측정을 조사한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 해상에서의 기름 유출 사고 시 오일펜스 설치 과정에서 문제점으로 지적되어온 유속에 따른 오일펜스의 유출유의 차단 효과를 파악하고 적정 예인 속도를 알아보기 위하여 PIV 실험을 수행하여 오일펜스 주변에서의 유동장 특성을 조사하였으며, 이들을 CFD 해석 결과들과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 PIV 실험

PIV 실험에 사용한 오일펜스는 Kim et al.(2009)이 제시한 모형법칙에 의거 실물의 1/20의 축척비로 제작한 모형 오일펜스로, 그것의 사양과 형상은 각각 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 오일펜스는 실물의 경우 부력체(Float), 스킵트(Skirt), 침강체(Sinker), 연결부(Connector), 장력 지지부 등으로 구성되며 주재질은 대부분 PU(Polyurethane)이나, 모형에서는 형상을 단순화하여 부력체, 스킵트 및 침강체로 구성하였고 재질은 방수 처리된 Nylon으로 하였다. 특히 부력체의 경우 실물에서는 공기 챔버 내에 스스로 펼쳐지는 스프링식의 호스가 설치되어 공기에 의해 공기 챔버가 팽창하는 방식 등이 있으나, 모형에서는 오일펜스의 전체 길이에 걸쳐 스킵트 상단에 지름이 0.03m인 챔버를 만들고 그 내부에 지름이 0.03m이고 길이가 1.5m인 발포 합성수지를 여러 개로 분할하여 부력체로 사용하였다.

실험에 사용된 수조는 국립수산과학원의 수직 순환형 회류 수조로서 본체의 크기는 길이가 25m이고 최대 폭이 5m이며 높이가 8.2m이다. 또한, 수조의 수량은 280톤이고 관측부의 크기는 길이가 8m, 폭이 2.8m, 높이가 1.8m, 수심이 1.4m이며, 유속의 범위는 약 0.1~3.0m/s이다.

Table 1. Specifications of model oil fences used in the PIV measurements

Skirt			Float				Ballast	
L (m)	H (m)	Mat.	L (m)	Dia. (m)	B (N)	Mat.	W (N)	Mat.
15	0.045	Nylon	15	0.03	30.06	EPS	14.41	Steel chain

L : Length, H : Height, Dia. : Diameter, B : Buoyancy, Mat. : Material, W : Weight in air

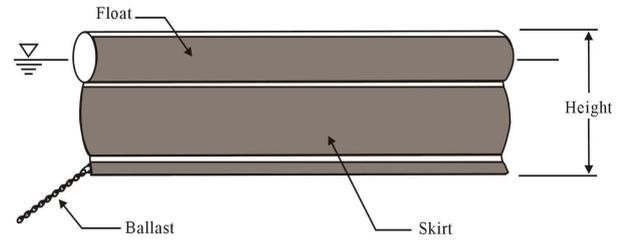


Fig. 1. Oil fence used in the experiments(Kim et al., 2008).

PIV 실험에 사용된 유동 가시화 장치로는 화상 발생 장치, 화상 저장 장치 및 화상 처리 장치로 나눌 수 있으며, 실험 장치 구성은 Fig. 2와 같고, 실험 조건은 Table 2와 같다.

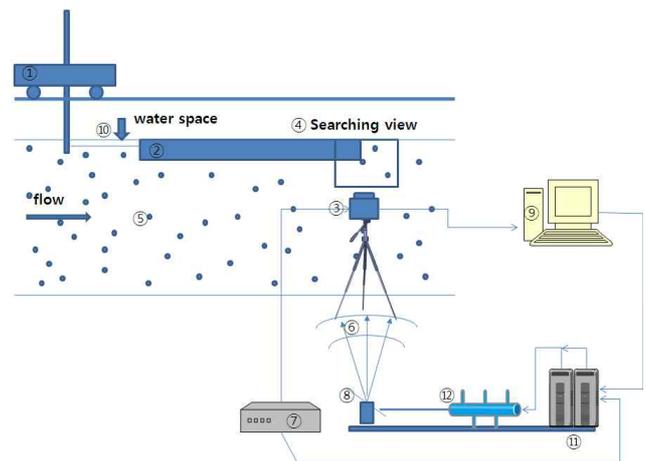


Fig. 2. Experimental setup of PIV system(① Work platform ② Oil boom model ③ CCD camera ④ Searching view ⑤ Particle ⑥ Laser sheet ⑦ Synchronizer ⑧ Reflector ⑨ Host computer and software ⑩ Water space ⑪ Neodym-YAG laser ⑫ Cylindrical lens).

Table 2. Experimental conditions of PIV system

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	Epix PIXCI D/D2X (2×2 k pixel)
	Light source	300 mJ, Nd : YAG Laser
	Light sheet	Cylindrical lens (width : 3 mm)
Measuring condition	Working fluid	Water
	Particle	Silver coated glass sphere(30 μm)
	Inlet velocity	0.2, 0.3, 0.4 m/s
	Input device	Kodak Es-4.0 (2×2 k pixel)
Image processing	Host computer	CPU speed : 2.0 GHz
	Number of time mean data	100 frames
	Identification	Two-frame gray-level cross correction algorithm

또한, 레이저 광은 회류 수조의 하단 관측 창에서 반사경을 통하여 오일펜스의 가운데 부분을 향하여 흐름 방향으로 2차원 광막을 형성하여 오일펜스 만곡부 단면에서의 유동장을 조사하였으며, 이 경우 카메라는 Fig. 3에서와 같이 수조의 측면에서 카메라로 오일펜스를 통과한 후류를 촬영하여 유동장을 분석하였다. 또한, 광원은 Neodym-YAG 이중 레이저를 사용하였고, 카메라의 촬영 시간은 동조기를 통해 제어되며 그 시간적 상관관계는 Fig. 4와 같다. 이것에서 보면 두 개의 레이저는 카메라의 조리개가 열려있을 때 조사되어야 하는데, 본 연구에 사용된 고속카메라가 두 장의 이미지를 취득할 수 있는 최소 시간은 10 μ s(Transfer Pulse Width, TPW)이다. 그리고 카메라가 연속적으로 두 장의 이미지를 캡처하기 위해서는 카메라의 조리개가 첫 번째 열린 시간 200 μ s(Transfer Pulse Delay, TPD) 내에 1번 레이저가 발사되어야 하고 TPW 이후에 2번 레이저가 발사되도록 설정하여야 한다. 따라서 본 실험에서는 기동 펄스폭을 100 μ s로 설정하였으며, 레이저의 기계적 지연이 175 μ s이므로 1번 레이저는 60 μ s, 2번 레이저는 560 μ s의 지연을 두어 두 레이저의 시간차가 500 μ s가 되도록 설정하였고, 이러한 사이클이 1초에 4회 반복되도록 하였다. 또한, 발사된 레이저광은 반사판을 이용하여 광막(光幕)을 형성하며 모형 오일펜스 만곡부 단면의 중심을 통과하도록 하였다.

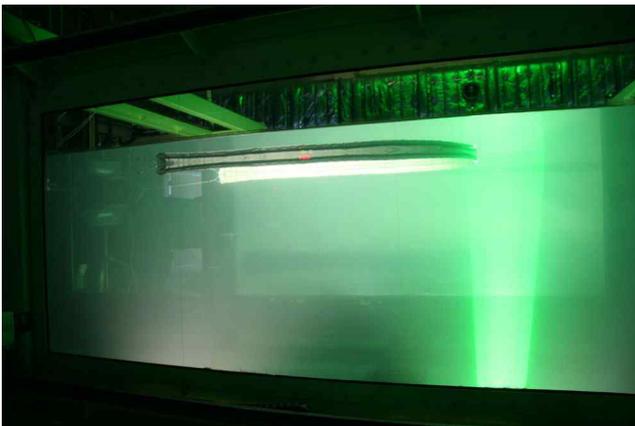


Fig. 3. The View of PIV measurements for oil fence.

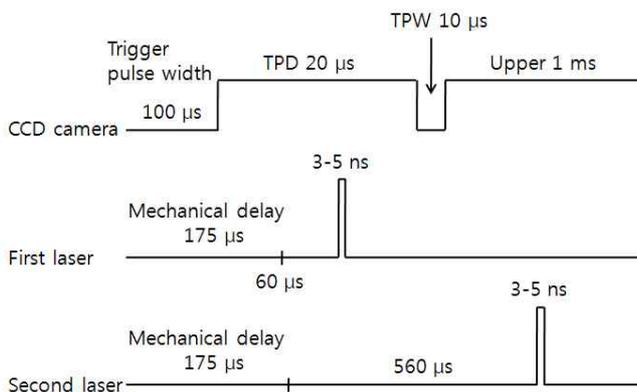


Fig. 4. Timing diagram for external triggering.

CCD 카메라(Kodak Es-4.0, 2×2k pixel)는 수평 방향으로 만들어진 광막을 잘 촬영할 수 있도록 회류 수조의 아래쪽에서 위쪽으로 향하도록 설치하였고 촬영 영역은 250×250 mm가 되도록 설정하였으며, 카메라에서 촬영된 2차원 영상은 1024×1024 pixel의 bmp파일로 저장하였다. 또한 화상 처리 장치의 경우 화상 캡처 보드(Epix PIXCI D/D2X)와 화상 캡처 소프트웨어(XCAP ver. 2.1) 및 화상 해석 소프트웨어(Visual PIV, Inteck systems)로 구성하였다. 이 중 화상 캡처 보드는 CCD 카메라를 통해 입력되는 아날로그 영상 신호를 256계조의 밝기 정보를 갖는 2차원 디지털 영상 정보로 바꾸어 컴퓨터에 저장하는 역할을 한다.

PIV의 계측 및 처리는 전체 촬영 구간을 미소 구간으로 구분한 뒤 집적인 상관 계수 계산으로부터 조사 구간의 평균 속도를 구하는 이중 화상 상호 상관법을 이용하였다. 즉, 미소 시간 간격을 두고 촬영한 두 개의 화상에서 첫 번째 화상과 두 번째 화상 중 일정 영역의 이미지를 마둑판처럼 이동하며 겹치면서 겹치는 부분에서의 두 개의 이미지의 상호 상관 함수를 계산하고, 그 값이 가장 큰 점을 평균 변위로 결정함으로써 이미지의 이동 속도를 구하였다.

실험을 하기 위해 우선 회류 수조 속에 레이저 광을 받아 빛이 산란되도록 지름이 30 μ m인 분말 소립자(Silver coated sphere) 900 g을 물속에 투입하였다. 그리고 오일펜스 모형을 수조 내에 설치한 후, 수조 전체를 암실로 만들고 펄스 레이저 광을 모형에 계속 주사한 후 가시화 실험을 행하였다. 실험 유속은 0.2 m/s, 0.3 m/s 및 0.4 m/s였으며, 이 경우 유속은 프로펠러 유속계(VOT-400-20, Kenek co.)로써 측정하였다. 실험에서는 유속 변화에 따른 오일펜스 중앙 만곡부 후류의 유동장 변화를 계측하고, 화상을 해석하였으며, 그 결과는 무차원화하여 원시 화상과 함께 유동 패턴을 중심으로 분석하였다.

2.2 CFD에 의한 오일펜스 중앙 만곡부에서의 유동장 해석

1) 해석 조건

이 연구에서는 오일펜스 주변에서의 유동장의 특성을 해석하기 위하여 유속에 따른 후류를 CFD를 통해 해석하였다. 이 경우 CFD를 위한 모델링은 SolidWorks 2007을 이용하여 3차원 모델로 설계하고 해석 프로그램은 Floworks 2007을 사용하였으며, 해석 조건은 Table 3과 같다. 해석에 사용한 모형은 PIV 실험에 사용한 것과 동일하며, 실험 모형의 형태는 PIV 실험에서 CCD 카메라로 촬영한 모형의 영상을 기준으로 유연체가 아닌 고형체로 간주하여 오일펜스 주변의 유동 변화를 해석하였다. 이때 오일펜스의 형태는 양쪽 끝에서는 수류의 흐름과 같은 방향으로 평행하며, 가운데 부분은 간격을 지름으로 한 원호로 가정하여 실험을 수행하였다. 그런데 PIV 실험에서는 수류의 흐름에 오일펜스가 일정한 각을 이루었지만, CFD 해석에서는 이를 무시하였다.

한편, 해석 영역은 실험 조건상의 경계 조건을 기준으로 결정하였으며, 물체 표면에서는 점착 조건과 표면 압력 구배가 0인 조건을 사용하였으며, 층류와 난류 유동에 관한 식

만 사용하였다. 격자계의 경우 정렬 격자계를 사용하여 총 셀 (Cell) 수는 22만개 정도이며, 결과는 해석 데이터를 이용하여 속도, 압력, 난류 강도, 와도 등으로 도식화하였다.

Table 3. Processing conditions of CFD

Item	Specification
Viscous	Standard $k-\epsilon$ turbulence model
Wall treatment	Standard Wall Functions
Medium	Water(fluid)
Equations	Flow/Turbulence
Reference pressure	101325 Pa
Fluid cells	226,644
Particle number	2,813
Flow speed	0.2, 0.3, 0.4 m/s
Material	Standard solid

2) 수치 해석 방정식

본 해석에 사용한 프로그램인 Flowworks 2007은 유한 체적법을 사용하는 것으로서 수치 해석의 기본 방정식은 속도와 압력을 시간 평균값과 변동 성분으로 분해한 레이놀즈 방정식을 Navier-stokes 방정식에 대입한 식(1), 식(2), 식(3)과 같은 유체의 질량, 운동량 및 에너지 보존 법칙을 사용한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_k} [(\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i] = S_k u_k + Q_H \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, u 는 유속, ρ 는 유체 밀도, S_i 는 단위 질량당 외체적력, E 는 단위 질량에 작용하는 총 에너지, P 는 총 압력, Q_H 는 단위 체적 당 열생성항(Source term), τ_{ik} 는 전단 응력, q_i 는 확산에 의한 x_i 방향의 열유속이다.

Boussinesq의 가정에 의하면, Reynolds의 응력은 $\tau_{ij}^R = -\rho u_i u_j$ 로 식(4)와 같이 정의되며, 뉴턴 유체에서는 전단 응력은 식(5)와 같이 정의된다.

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

여기서 $\mu = \mu_l + \mu_t$, δ_{ij} 는 Kronecker delta function($i = j$, $0(i \neq j)$), μ_l 는 동점성 계수, μ_t 는 난류와(Turbulent eddy) 점성 계수, k 는 난류 운동(Turbulent kinetic) 에너지이다. $k-\epsilon$ 모델 구조에서는 μ_t 는 난류 운동 에너지(k)와 그 소산율(ϵ)로 표현되며, 식(6)과 같다.

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

여기서, f_μ 는 난류 점성 값으로 식(7)과 같이 정의된다.

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025R_y)]^2 \left(1 + \frac{20.5}{R_T}\right) \quad (7)$$

여기서, $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \epsilon}$, $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l}$ 이고 y 는 외벽으로부터의 거리이다.

한편, 난류 운동 에너지와 그 소산율은 식(8)과 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k [(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_k}]) + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \epsilon [(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k}]) + S_\epsilon \quad (9)$$

식(8)과 식(9)에 사용된 생성항(Source term) S_k 와 S_ϵ 는 다음과 같다.

$$S_k = \tau_{ij}^R = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B \quad (10)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (11)$$

식(10) 및 식(11)에서 P_B 는 부력 때문에 생기는 난류이며, 본 해석에서는 이를 고려하지 않았다. 식(11)에서 f_1 과 f_2 는 각각 $f_1 = 1 + (\frac{0.05}{f_\mu})^3$, $f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$ 이다. 그리고 식(6), 식(8), 식(9) 및 식(11)에 사용된 C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$ 및 $C_{\epsilon 2}$ 는 모두 경험 상수로서 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$ 및 $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 를 각각 대입하였다(Launder and Spalding, 1974).

3. 결과 및 고찰

3.1 오일펜스 중앙 만곡부에서의 유동 변화

1) PIV에 의한 오일펜스 중앙 만곡부의 유동

Fig. 5는 PIV 실험에 의한 유속이 0.2m/s에서 오일펜스 중앙 만곡부에서의 속도장, 압력장, 난류 강도 및 와도를 나타낸 것이다. 먼저, 속도장을 보면 오일펜스를 지난 후류가 약 40°의 일정한 각을 지니고 아래쪽으로 향하다가 회복되고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 경계는 와도와 난류 강도를 보아도 알 수 있으며, 오일펜스 하단의 경계부에서는 난류 강도와 와도가 강하게 나타나다 점점 소멸되는 패턴이 잘 나타났다. 다만, 압력장은 불규칙적인 변화를 보여 주었으며, 이러한 현상은 오일펜스 예인 중 상하 진동을 하면서 발생하는 것으로 사료되며 Fig. 6에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있다. 한편, 유속이 증가함에 따라 오일펜스로 인한 유속 변화의 변위가 점점 줄어들어 유속이 0.4m/s에 이르면 Fig. 7과 같이 오일펜스 뒤쪽에 한정적인 영향만 주는 것을 알 수 있다. 이것은 레이놀즈수(Re)가 증가함에 따라 난류의 영향이 크게 나타나 상대적으로 점성의 영향이 작아지기에 발생하는 현상이라고 할 수 있다. 이러한 현상은 유속장과 와도, 난류 강도에서 잘 나타나고 있으며, 유속이 증가함에 따라 수류의 흐름과 수평한 방향으로 변화하는 것을 Fig. 5 및 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 또한 속도가 빨라짐에 따라 난류 강도와 와도의 불규칙성이 크게 나타났으며, 압력장의 변화도 상당히 크게 나타났다.

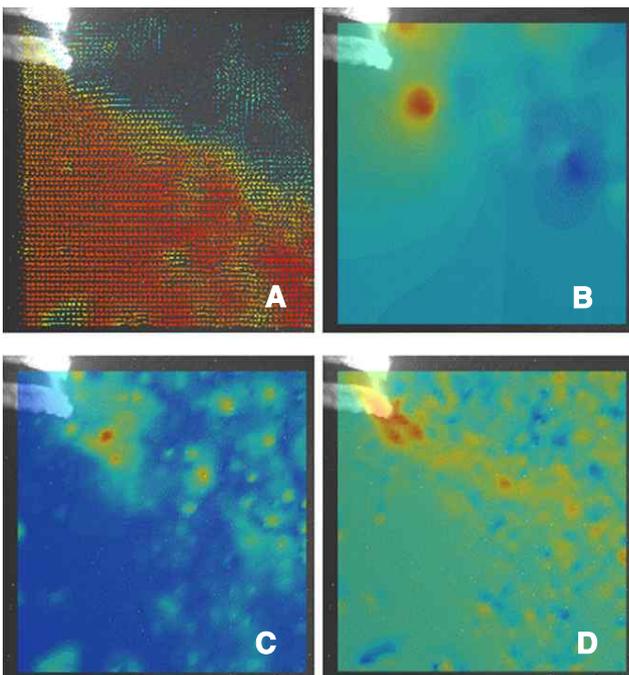


Fig. 5. Distribution of rear wake around oil fence at 0.2 m/s(A: Velocity vector, B: Pressure distribution, C: Turbulent kinetic intensity, D: Vorticity distribution).

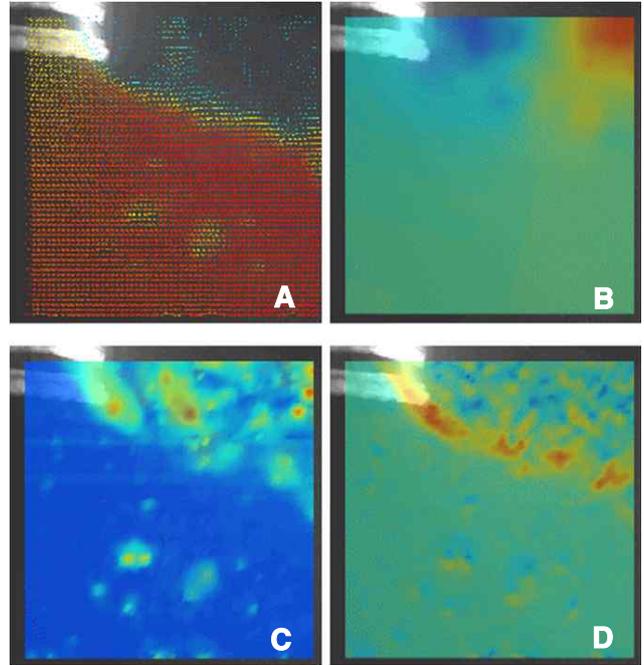


Fig. 6. Distribution of rear wake around oil fence at 0.3 m/s(A: Velocity vector, B: Pressure distribution, C: Turbulent kinetic intensity, D: Vorticity distribution).

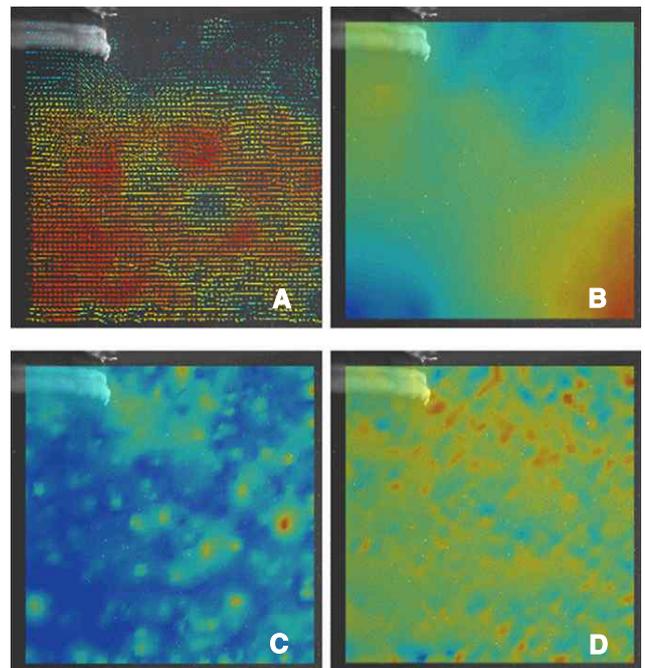
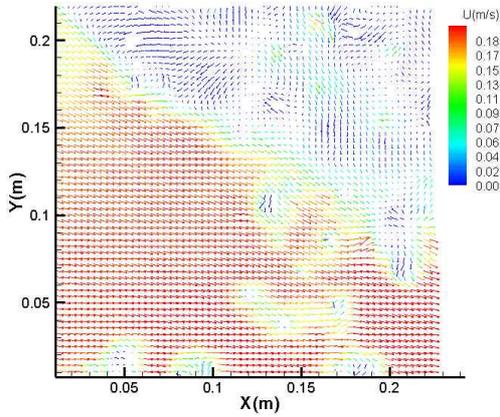
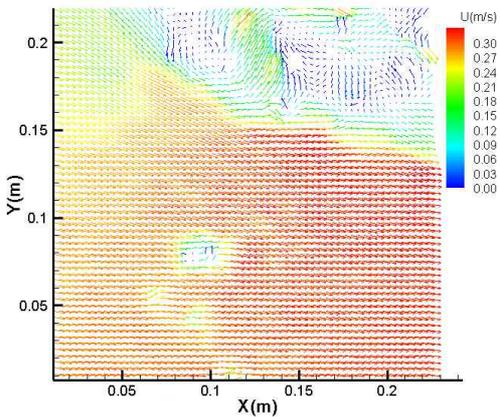


Fig. 7. Distribution of rear wake around oil fence at 0.4 m/s(A: Velocity vector, B: Pressure distribution, C: Turbulent kinetic intensity, D: Vorticity distribution).

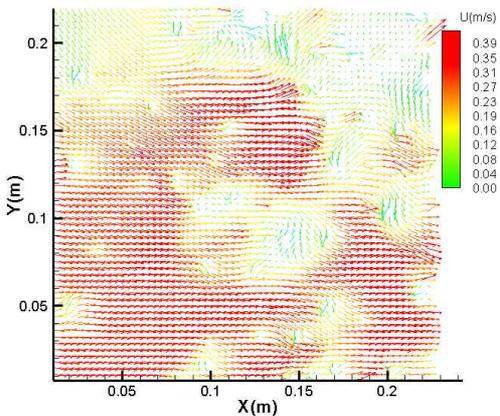
Fig. 8에서는 PIV 실험에 따른 속도장의 변화를 정량적으로 나타낸 것으로 평균 유속이 설정 유속과 거의 동일하게 나타났다.



(a) 0.2 m/s



(b) 0.3 m/s



(c) 0.4 m/s

Fig. 8. Distribution of velocity vector around oil fence.

2) CFD에 의한 오일펜스 중앙 만곡부의 유동

CFD 해석에서는 주로 정량적 분석을 실시하였으며, Fig. 9는 유속이 0.2 m/s에서 오일펜스 주변의 속도장을 3차원 해석한 것이다. 이것에서 보면, 오일펜스 내부의 흐름이 오일펜스를 통과하면서 일정한 각을 지니고 아래쪽으로 향하는 것을 잘 보여주고 있으며, 이는 유속이 0.2 m/s에서 오일펜스 중앙 만곡부의 속도장을 측정된 PIV 실험 결과와도 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

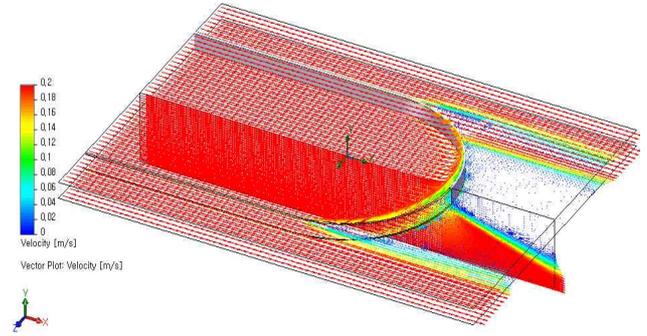
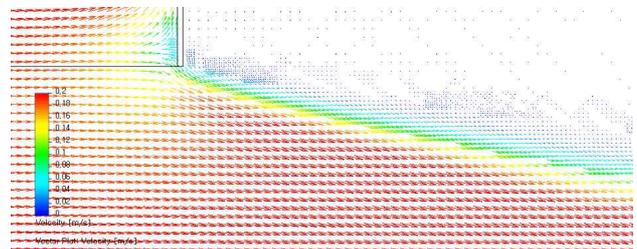


Fig. 9. Velocity vector at the center section of oil fence by CFD.

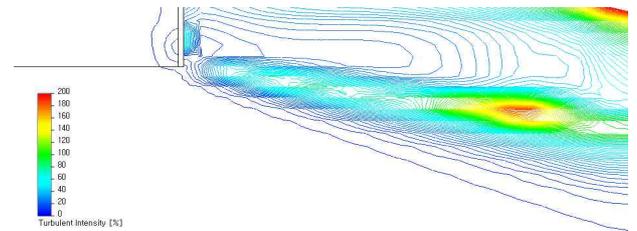
또한, Fig. 10은 유속이 0.2 m/s에서의 CFD 해석 결과로서, 이것을 보면 오일펜스 전면부에서 최대 압력은 101,346 Pa이고 후면부에서 최소 압력은 100,320 Pa로 나타났다. 또한 유속은



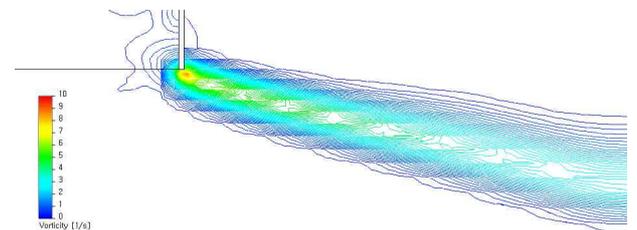
(a) Distribution of velocity vector



(b) Pressure distribution



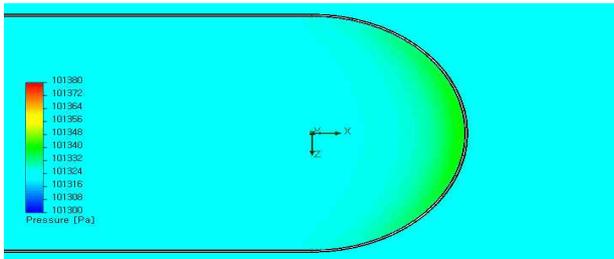
(c) Turbulent kinetic intensity



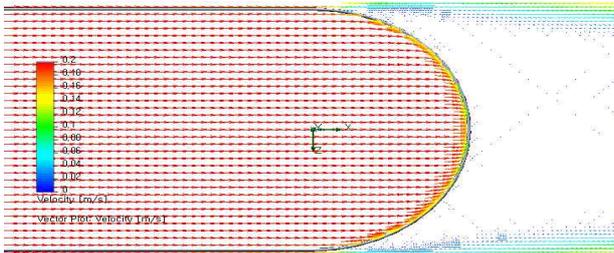
(d) Vorticity distribution.

Fig. 10. Distribution of rear wake around oil fence at 0.2 m/s.

최대 유속이 0.203 m/s로 오일펜스 하단부에서 일정한 각으로 영향을 주고 있는 패턴이 PIV 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 와도와 난류 강도 또한 유속이 거의 정지한 부분과 일정한 경계를 이루며 발달하고 있음을 알 수 있으며, PIV 실험 결과와 잘 일치하였다. Fig. 11은 유속이 0.2 m/s에서 수면과 평행한 x-y 평면상 수심 0.07 m에서 압력 분포와 속도 벡터를 나타낸 것으로 적절히 차단되고 있음을 알 수 있다.



(a) Pressure distribution

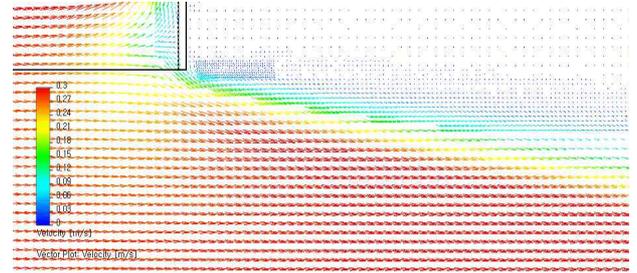


(b) Distribution of velocity vector

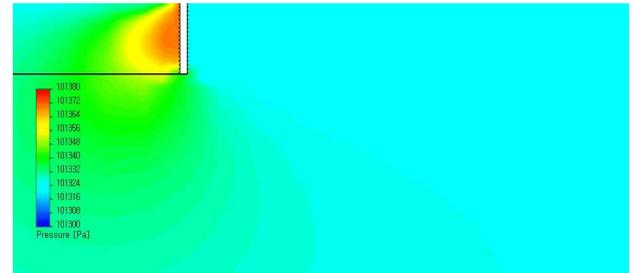
Fig. 11. Results observed in x-y plane of oil fence at 0.2 m/s.

Fig. 12는 유속 0.3 m/s에서의 CFD 해석 결과이다. 이것에서 보면 오일펜스 전면부에서 최대 압력은 101,382 Pa이고 후면부에서 최소 압력은 100,305 Pa로 나타났다. 그런데 0.2 m/s에서의 해석 결과에 비해 압력차가 크기 때문에 전체적인 저항이 커지고 있음을 알 수 있으며, 최대 유속이 0.314 m/s로 압력 구배로 인해 오일펜스 하단 부분에 가속 구간이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 오일펜스 전면부 하단에는 압력이 높은 구간이 크게 생성되었으며 하단부의 뒤쪽으로 갈수록 압력차로 인한 와(Vortex)의 발생을 확인할 수 있었으나, 0.2 m/s에 비해 오일펜스로 인한 후류 정체 구간과 흐름 구간의 경계역의 경사가 완만해 지면서 흐름에 따르고 있는 것을 알 수 있다. 또한 난류 강도와 와도는 전체적인 유속이 빨라짐에 따라 상대적으로 하단 부위에 붙어서 강하게 발생하였으며, 유속의 흐름에 따라 발생 영역도 흐름의 수평 방향으로 이동하고 그 크기도 작아졌다. 이러한 유동 패턴은 PIV 실험 결과와도 잘 일치하였다.

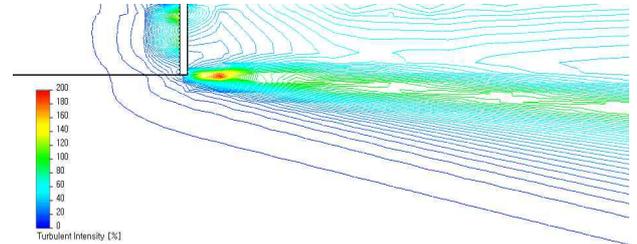
Fig. 13은 유속 0.3 m/s에서 수면과 평행한 x-y 평면상 수심 0.07 m에서 압력 분포와 속도 벡터를 나타낸 것으로 오일펜스가 만곡이 진행되는 부분에서부터 일부 차단 효과가 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 전면부와 후면부의 압력차를 유동이 매우기 위하여 이동하는 현상으로 상대적으로 오일펜



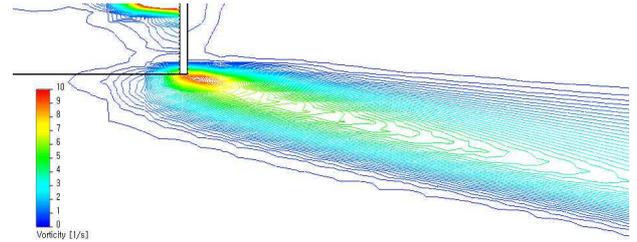
(a) Distribution of velocity vector



(b) Pressure distribution



(c) Turbulent kinetic intensity



(d) Vorticity distribution

Fig. 12. Distribution of rear wake around oil fence at 0.3 m/s.

스 하단보다는 양쪽 만곡 부위에서 먼저 유동이 발생하는 것으로 파악할 수 있다.

Fig. 14는 유속 0.4 m/s에서의 CFD 해석 결과이다. 이것에서 보면 오일펜스 전면부에서 최대 압력은 101,410 Pa이고 후면부에서의 최소 압력은 101,296 Pa로 나타났다. 이것에서도 0.3 m/s의 결과에서와 같이 유속이 증가함에 따라 압력차가 커져서 전체적인 저항이 커진 것을 알 수 있다. 또한, 최대 유속이 0.434 m/s로 심한 압력 구배로 인해 오일펜스 하단 부분에 상당한 가속 구간이 발생하고 있다. 이것은 오일펜스 후면부의 수면까지 영향을 주어 파동이 발생하는 원인이 됨을 알 수 있으며, CFD 해석에서는 수면을 고정된 가상 면으로 처리함에 따라 파동이 나타나지 않고, 압력장의 변화만 확인되었으나, PIV 수조 실험에서는 이와 같은 압력 변화로 인한 파동

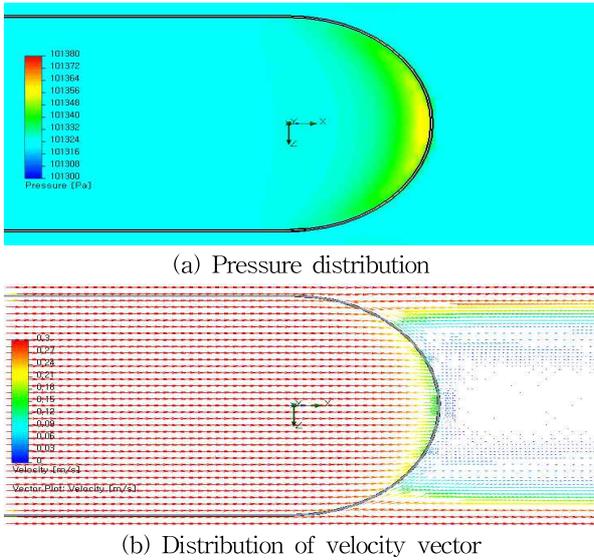


Fig. 13. Results observed x-y plane of oil fence at 0.3 m/s.

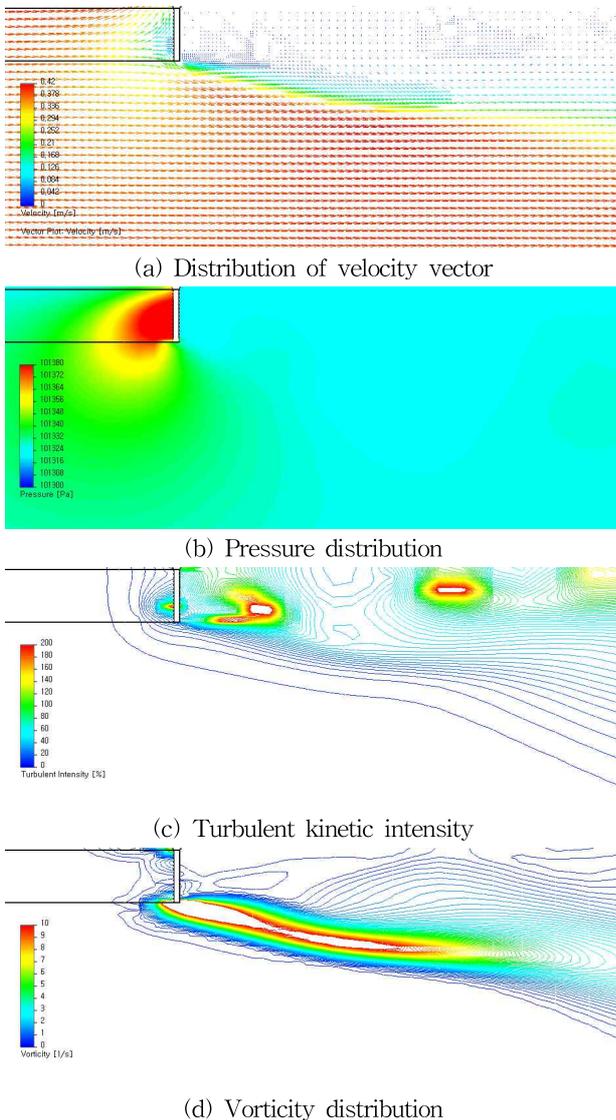


Fig. 14. Distribution of rear wake around oil fence at 0.4 m/s.

이 수면에 확인되었다.

한편, 오일펜스 전면부 하단에는 압력이 높은 구간이 크게 성장하였으며, 불규칙한 와도와 압력 분포가 발생하여 불안정한 와류가 발달하는 것으로 나타났다. 또한 느린 유속과는 달리 오일펜스로 인한 후류 정체 구간과 흐름 구간의 경계 역에서 불규칙한 흐름이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 난류 강도와 와도는 전체적인 유속이 빨라짐에 따라 상대적으로 하단 부위에 붙어서 강하게 발생하였으며, 유속의 흐름에 따라 발생 영역도 흐름의 수평 방향으로 이동하였다. 난류 강도의 경우 오일펜스 후면 부 뒤로 일정한 간격을 두고 강하게 나타났을 뿐만 아니라 불규칙한 후류 특성도 보였다.

Fig. 15는 유속 0.4 m/s에서 수면과 평행한 x-y 평면상 중심 0.07 m에서 압력 분포와 속도 벡터를 나타낸 것으로 오일펜스의 후면부에서 불규칙한 와가 발생하는 것을 볼 수 있다.

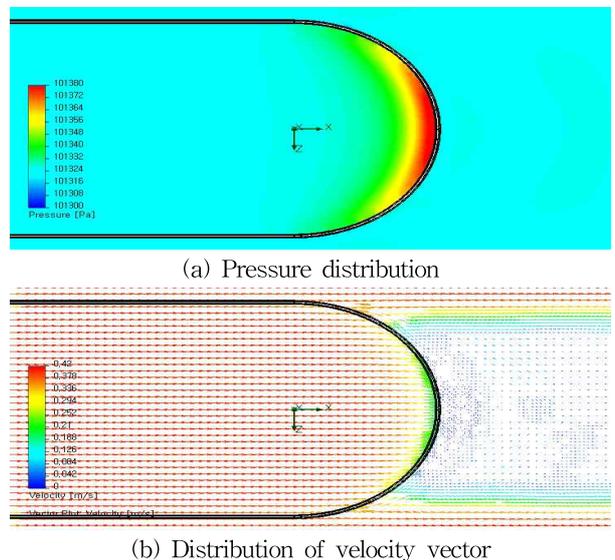


Fig. 15. Results observed x-y plane of oil fence at 0.4 m/s.

3.2 PIV 계측과 CFD 해석에 의한 유동장 특성 비교

CFD 해석과 PIV 실험 결과를 비교해 보면 유속이 느린 구간에서는 오일펜스 만곡부 단면에서의 유동 패턴이 대체적으로 잘 일치하고 있으나, 유속이 0.4 m/s에서는 전면부에서부터 심한 와동과 압력 구배로 인한 불규칙한 후류의 영향으로 다소 차이가 났다. 이와 같은 차이는 PIV 실험과 달리 CFD 해석의 경우 압력장 계산 시 경계층 박리와 재순환에 의하여 크거나 작은 와동의 생성과 소멸이 반복되기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

따라서 얇은 막으로 구성된 오일펜스의 경우에는 CFD 해석 결과와 PIV 실험 결과를 정량적으로 직접 비교하는 것은 다소 무리가 될 수 있으나, 유속 변화에 따른 유동장의 변화가 비교적 유사하게 나타났기 때문에 CFD 해석이 적용 가능할 것으로 판단된다. 한편, 오일펜스의 기능적 특성을 고려할 경우, 수면과 맞닿는 오일펜스 전면부와 후면부 주변의 유동 특성이 가장 중요하다고 할 수 있다. 따라서 PIV 실험과 CFD

결과를 비교해 보면, 실험 유속이 0.3m/s 이상인 경우에는 오일펜스 전면부 상단에서 와의 발생과 압력장이 강하게 나타나는 것으로 보아 수두가 발생할 가능성이 높았으며, 이것은 오일펜스의 기능적 한계의 기준이 될 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 유속이 0.4m/s에서는 상하 요동뿐만 아니라 불규칙한 후류 현상이 명확하게 나타났으므로 향후 추가 실험 등을 통한 검증이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 유속 변화에 따른 모형 오일펜스 만곡부 단면에서의 유동장의 변화를 규명하기 위하여 PIV 실험과 CFD 해석을 수행하였다. 먼저 유속의 변화에 따른 오일펜스 만곡부 후면의 속도장, 압력장, 와도 및 난류 강도를 계측한 PIV 실험의 결과, 유속이 증가함에 따라 유동 경계역 후면부에서의 흐름 방향이 전면부의 흐름 방향에 가까워지는 현상이 나타났고, 압력 분포의 양상이 달라졌으며 난류도 더욱 불규칙적인 형태로 나타났다. 이에 비해 CFD 해석의 결과, 오일펜스를 통과한 후류의 유동 패턴이 0.3m/s 이하의 저속인 경우는 PIV 실험 결과와 유사하게 나타났으나, 유속이 0.4m/s인 경우에는 오일펜스 자체의 유연성으로 인해 다소 차이가 나타났고, 오일펜스 하단의 압력차로 인해 불규칙한 난류가 수면까지 영향을 주었다. 따라서 오일펜스의 예인 속도는 0.3m/s 이하가 적정하다. 또한 오일펜스와 같이 얇은 막으로 구성된 유연체를 대상으로 수행한 PIV 실험과 CFD 해석을 통해 흐름이 있는 수면 아래의 운동에 대해서도 비교적 신뢰성 있는 결과가 도출되었고, 이와 같은 결과는 유체 역학적 특성을 고려한 오일펜스 개발에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2006년 전남대학교 수산과학연구소 Inovation 06 사업에 의해 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Brown, H. M., R. H. Goodman, C. F. An and J. Bittner(1996), Boom failure mechanism : Comparison of channel experiments with computer modelling results. Spill Sci. Tech. Bull., Vol. 3, No. 4, pp. 217-220.
- [2] Delvigne, G. A. L.(1983b), Laboratory experiments on oil spill protection of a water intake, Proc., Oil and Freshwater Conf., pp. 446-458.
- [3] Fang, F. and A. J. Johnston(2001a), Oil containment by boom in waves and wind I : Numerical model, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., pp. 222-227.
- [4] Fang, F. and A. J. Johnston(2001b), Oil containment by boom in waves and wind II : Waves, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., pp. 228-233.
- [5] Fannelop, T. H.(1983), Loss rates and operational limits for booms used as barriers, Appl. Ocean Res., Vol. 5, No. 2, p. 80.
- [6] Goodman, R. H., H. M. Brown, C. F. An and R. D. Rowe(1997), Dynamic modeling of oil boom failure using computational fluid dynamics, Proc., 20th Arctic and Marine Oil Spill Program(AMOP) Tech. Seminar, pp. 437-455.
- [7] Kim, T. H., D. J. Jang, K. U. Yang, S. C. Na and D. A. Kim(2008), Efficiency of model oil fences for one vessel using a physical experiment and numerical calculation, J. Kor. Fish. Soc., Vol. 41, No. 2, pp. 143-172.
- [8] Kim, T. H., D. J. Jang, K. U. Yang, S. C. Na and D. A. Kim(2009), Comparison between full-scale and model experiments of oil fence, China Ocean Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 657-668.
- [9] Launder, B. E. and D. B. Spalding(1974), The numerical computation of turbulent flow's computer methods in applied mechanics and engineering,3, pp. 269-289.
- [10] Oebius, H. U.(1999), Physical properties and processes that influence the cleanup of oil spills in the marine environment, Spill Sci. Tech. Bull., Vol. 5, pp. 177-289.

원고접수일 : 2011년 01월 31일

원고수정일 : 2011년 03월 18일 (1차)

: 2011년 03월 21일 (2차)

게재확정일 : 2011년 03월 24일