

# FPSO의 예인 시 침로 안정성에 관한 수치적 연구

부경태, 홍춘범, 양희준, 김윤수, 신수철(삼성중공업(주) 조선해양연구소)

## 1. 서론

최근 부유식 생산 저장 하역선(Floating, Production, Storage and Offloading, FPSO)의 수주 증가와 더불어 그림1과 같이 FPSO를 건조지에서 운항 해역까지 예인선으로 운송하는데 따른 침로 안정성에 선주의 관심이 증대 하고 있다.

이 때문에 선박을 건조하는 조선소로서도 FPSO의 침로 안정성 설계에 대한 평가를 요구 받고 있는데, 이 경우 초기 계획 단계에서 안정성 여부를 평가할 수 있어야 하고 이를 위해서 경험과 시험적 그리고 계산적 평가 도구 등이 필요하다. 그러나 평가를 위한 경험이나 시험 방법, 또는 해석 도구 등이 미흡하여 대부분이 해외 수조를 활용한 모형 시험에 의존 하고 있다. 따라서 그 결과에 대한 신속

하고 유연한 대처가 곤란하다. 그러나 최근에는 국내에서도 모형 실험을 통해 시험 방법을 개발한 사례가 발표되고 있고, 해석 도구의 개발을 위해서 수치 해석을 이용한 FPSO의 예인 시 침로 안정성 평가 연구도 빈번히 수행 되고 있다. 본 고에서는 침로 안정성을 판단하기 위해 국내에서 이루어진 이들 모형 또는 수치 실험들 중 일부를 통해 FPSO에 설치되는 스케그(skag)의 영향과 FPSO의 선미부 형상이 침로 안정성에 미치는 영향을 소개 하고자 한다.

## 2. 침로 안정성 평가를 위한 실험

### 1) 예인 안정성 인자

침로 안정성에 영향을 미칠 수 있는 인자들은 다음과 같다.

- 피 예인선의 형상
- 예인선의 수 (= 예인선의 척수)
- 예인선의 길이
- 예인 속력
- 입사각 크기 및 방향

따라서 침로 안정성 평가를 위해 이들 인자들이 침로 안정성에 미치는 영향력을 실험을 통해 살펴 볼 수 있어야 한다. 국내에서 이루어진 바지(barge) 형태의 FPSO에 대한 모형 실험에서도 이들의 영향을 판단할 수 있다. 먼저 피 예인선의 선미 형상에 의해 안정성이 크게 영향을 받았고, 예인선(tow-line)의 길이가 길수록 안정성에 불리하고 예인선의 개

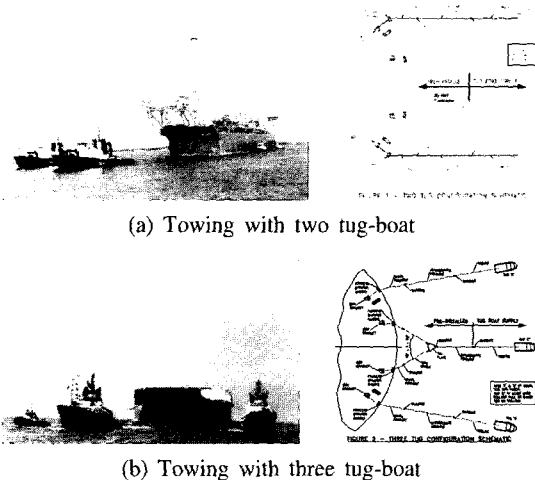


그림 1. Configuration view and schematic drawing

수가 많을 경우에는 빠른 선수 동요(Yaw)운동의 복원 능력을 보여 주었다. 그리고 예인 속력은 판별 결과에 크게 영향을 주지 않았으며 선수와 중에서 정수 중보다 안정적이고 추파 중에서 가장 불안정한 유동 안정성을 보였다. 이는 예인사의 강력과 파랑의 표류 방향과 관련되어 이해될 수 있다.

## 2) 모형 실험

본 절에서는 예인선에 의해 예인 되는 FPSO의 침로 안정성을 평가하기 위한 모형 시험 기법에 대하여 소개 한다. 이 모형 시험 방법은 MARIN에서 수행하고 있는 기법을 응용한 것이다.

예인 수조에서 그림1과 같은 예인 상황을 모델링 하기 위해서는 예인선과 피 예인선의 모형이 필요하다. 그러나 예인선의 경우 모형 제작 비용 및 크기의 제약이 있으므로 이를 위해 그림 2와 같은 개념의 예인 기구를 제작하여 예인선 모형을 상사시킬 수 있다. 그리고 예인선은 예인 되는 FPSO보다 질량이 매우 작으므로 FPSO의 운동에 크게 영향을 받는다. 그래서 예인사가 느슨해지면 예인선이 앞으로 이동하기도 하고 어떤 경우엔 예인사가 팽팽해지면서 FPSO쪽으로 이동할 수 있다. 따라서 예인선이 피 예인선의 운동에 따라 자유롭게 전후(surge) 운동을 할 수 있도록 그림 2와 같이 도르래와 추를 이용한 시스템으로 모델링 할 수 있다. 이때 이 예인 시스템은 예인사의 수만큼 제작 되는데, 예인사의 펼침 각을 조절할 수 있도록 이동식으로 제작되어 예인선에 의한 예인 작업을 모델링 할 수 있도록 해야 한다.

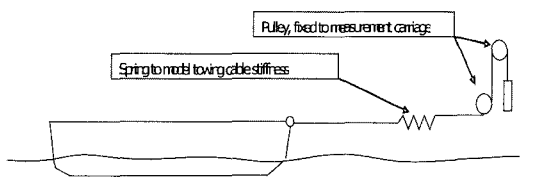


그림 2. The concept of towing device

한편 예인사는 자체적인 강성(stiffness)이 있으므로 장력을 받으면 늘어나는데 모형 시험에서 사용되는 라인은 실선 스케일에서 상당히 강성이 강하므로 이를 실제 예인사의 강성과 상사시켜야 한다. 이는 그림 3과 같이 모형 예인사에 코일 스프링을 추가하여 모델링 될 수 있다. 따라서 사용되는 코일 스프링은 실제 예인사의 강성과 상사되도록 시험 전에 교정 작업을 거쳐 그 값에 대한 확인 작업이 선행 되어야 한다.

그림 4는 침로 안정성 평가를 위해 예인 수조에서 이루어진 모형 시험의 개념도를 보여준다.

시험 방법은 전차를 이용해 정상 속도에 다다를 때까지 피 예인선을 잡고 가/감속 상태로 달리다 정상 상태에 도달하면 구속을 풀어준다. 이때 피 예인선의 안정성을 판단하기 위해 초기 교란을 주는 방법으로 피 예인선의 선수각을 30도 회전시키는 방법, 혹은 수평 변위를 예인 중심에서 폭의 2배만큼 옆으로 이동시키는 방법 등이 일반적으로 사용된다.

그림 5는 침로 안정성 시험 장면을 보이고 있는데 예인 전차 앞쪽에 예인 기구가 설치되어 있으며

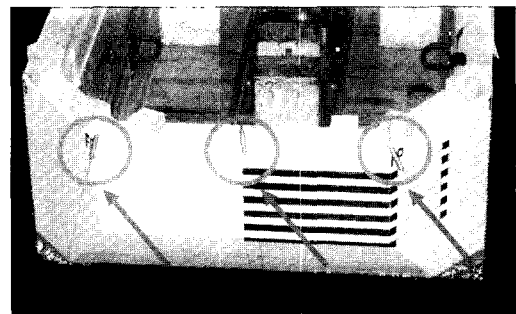


그림 3. Stiffness modeled by the coil-spring

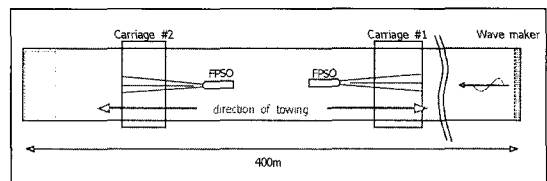


그림 4. Test scheme at Towing Tank

모형배를 확대한 아래 그림은 예인 기구에서 예인되고 있는 FPSO를 바라본 장면이다.

### 3) 수치 실험

선형의 미소 변화에 대한 모형 시험은 계속 오차가 존재하므로 CFD의 적용을 통해 선형 변화에 따른 조종 유체력의 변화를 정성적으로 보임으로써 이를 보완할 수 있다. 조종 유체력을 추정하는 경우 대부분의 유체력은 점성 유동에 의한 압력 손실로 발생 되고 조파 저항은 지배적이지 않다. 따라서 자유 수면 효과를 배제하고 수치 해석을 수행 하더라도 무방하다. 그러나 안정성 판별을 위해 수치 해석을 이용하여 자유 항주 시험을 모사 하기 위해서는 3차원적으로 거동하는 선체를 고려 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 동적 격자계(moving grid

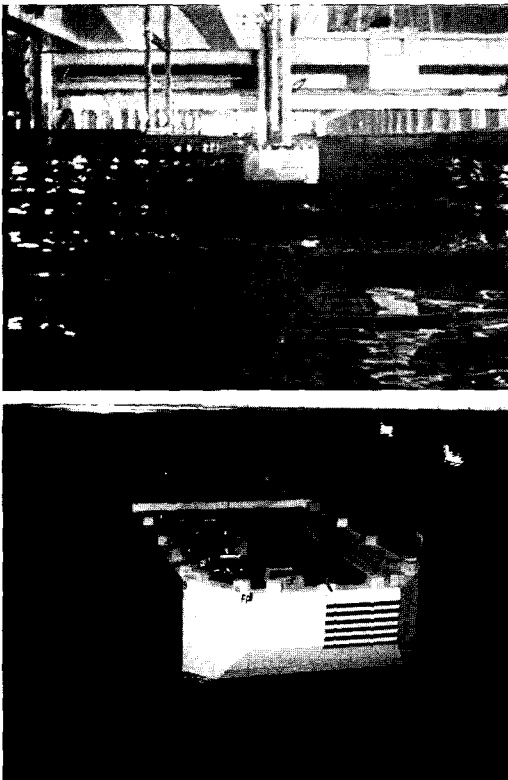


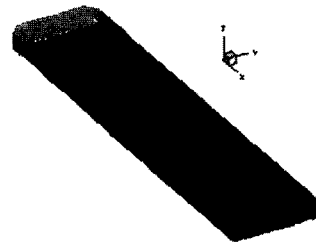
그림 5. View of the directional stability test in head waves, 3 tow-lines

system)의 사용과 선체의 운동 방정식을 함께 해석 하는 것이 필요한데 이렇게 할 경우 해석 비용과 시간 면에서 현재의 기술로는 무리가 많다. 따라서 본 고에서는 static drift에 대한 수치 해석이 소개되었고, 해석된 FPSO의 선수각에 대한 횡력과 모멘트의 기울기를 비교 하였다. 횡력의 기울기가 크고 모멘트의 기울기가 작을수록 안정하기 때문에 그 결과를 이용해 안정성을 판별할 수 있고 또한 실험 결과와의 비교를 통해서도 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

## 3. 안정성 평가

### 1) Skeg

FPSO의 선미에 부착되는 스케그는 계류(mooring) 상태에서 방향계(weather vane) 성능을 위한 역할 과 횡 동요(rolling) 운동을 감소시키는 역할을 할 뿐만 아니라 선박의 운송 단계에서 예인 안정성을 증가시키는 역할을 하고 있다. 본 고에서는 그림6 과 같이 바지 형태의 FPSO에 스케그가 없는 경우와 한 개 또는 두 개의 스케그가 설치된 경우에 대해 각 각의 성능을 소개 하였다. 한 개의 스케그를 설치한 경우는 선미 중앙에 부착되었고 두 개의 스



(a) Bare Hull



(b) Single skeg



(c) Twin skeg

그림 6. Skeg installed in stern of FPSO

케그를 설치한 경우는 수선면을 늘이는 효과를 기대하며 선 측에 인접하여 설치되었다.

그림 7은 수치 해석을 통해 얻어진 직진 상태의 FPSO 선미에서의 속도 분포를 비교 하고 있다. 그림에서 스케그를 하나만 설치한 경우는 설치 하지 않은 경우와 유사한 속도 분포를 보인다. 그러나 두 개의 스케그를 설치했을 때는 후류 영역에서 속도가 떨어지는 영역이 훨씬 넓어짐을 볼 수 있다.

이처럼 스케그를 설치 하지 않거나 하나만 설치

한 경우의 유사한 후류 분포는 단면의 압력 분포를 비교한 그림8에서 더욱 명확히 나타나서 두 경우의 압력장이 흐름 방향으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 왜냐하면 선저 면을 타고 오던 유동이 선미가 끝나는 곳에서 반류를 만드는데 이때 두 개의 보오텍스(vortex)가 생성 되기 때문이다. 이 경우 스케그를 선미 중앙에 설치하면 스케그의 위치가 두 개의 보오텍스 중심에 놓이게 되어 별다른 유체 역학적 변화가 일어나지 않는다. 따라서 침로 안정성 측면

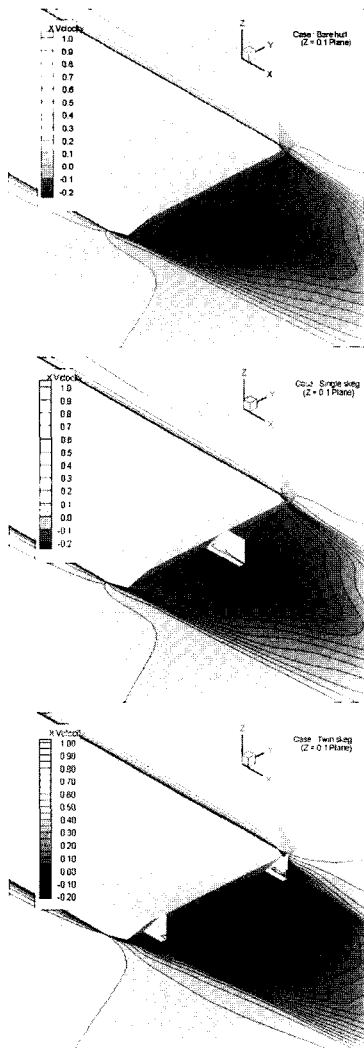


그림 7. Velocity contour of the flow direction

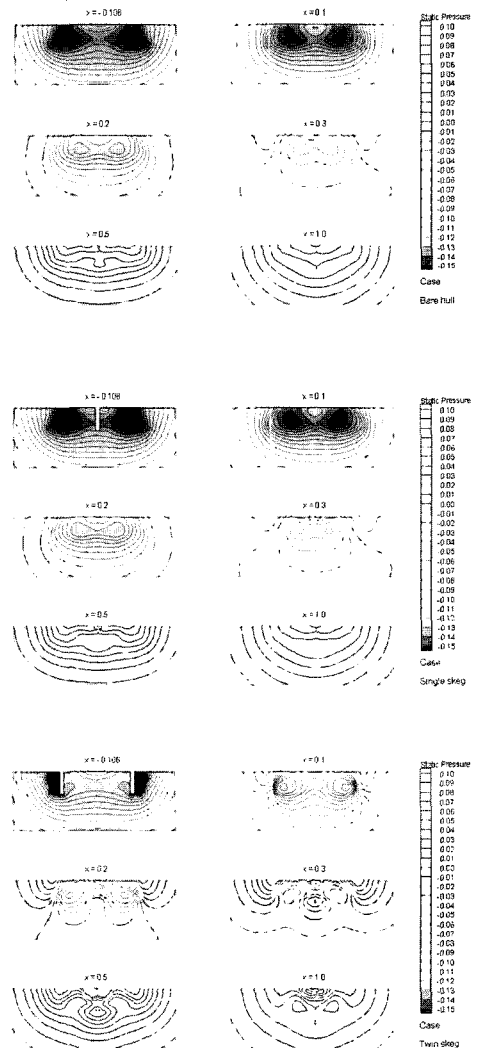


그림 8. Pressure contour in the rear of FPSO

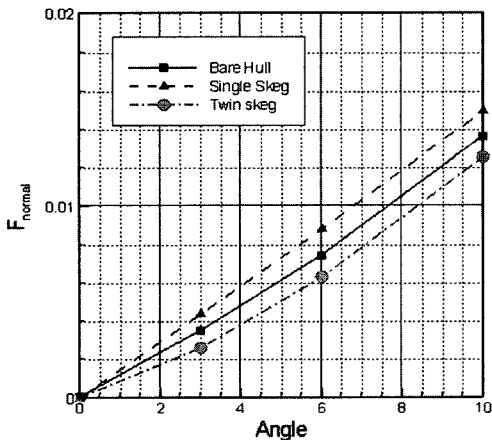
에서 하나의 스키프를 선미 중앙에 설치하는 것은 효과가 크지 않다.

모형 시험 결과에서도 스키프를 하나 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 예인 안정성의 차이는 적었고 스키프를 두 개 설치한 경우가 안정성이 가장 높았다. 두 개의 스키프를 설치한 경우가 효율적인 이유는 바지 형태의 FPSO는 선미부가 대단히 뭉툰한(Blunt) 형태를 가지고 있기 때문에 선미 반류(wake)가 매우 크고 스키프 면에 수평(tangential)한 방향으로 흐르는 유속을 얻을 수 있기 때문이다. 선 측에 인접하게 두 개의 스키프가 설치 하면 수선 길이를 연장시키는 효과가 생기고, 스키프 면에 수평한 방향으로 흐르는 유속을 얻을 수 있어 침로 안정성을 크게 개선시킬 수 있다. 이때 스키프는 크기가 작더라도 효과적으로 침로 안정성을 향상

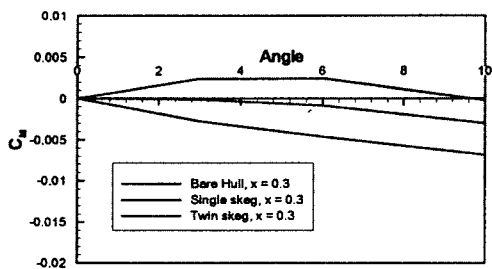
시켜 준다.

그림 9는 수치 해석을 통해 얻어진 양력과 모멘트 분포를 비교한 것이다. 그림 9 (a)에서 두 개의 스키프를 설치한 경우가 양력이 가장 작으므로 모형 실험과 마찬가지로 가장 안정적인 침로 안정성이 수치적으로 예측 된다.

그리고 그림 9 (b)의 모멘트 분포에서 양의 모멘트를 가진다는 것은 유동의 유입 각도를 줄이는 방향으로 선체에 모멘트가 작용한다는 뜻이다. 이럴 경우 유동과 평행한 방향으로 선체가 회전하므로 안정적인 예인이 이루어 진다. 그러나 모멘트가 음으로 커지면 선수각이 더욱 벌어지는 쪽으로 모멘트가 발생 하고 이 때문에 늘어난 선수각은 더욱 큰 음의 모멘트를 유도 하므로 원하는 방향으로 예인이 이루어 지지 않는다. 따라서 이 결과에서도 두 개의 스키프가 설치된 경우가 가장 안정적이다. 그리고 모든 경우에서 선수각의 증가는 음의 방향으로 모멘트를 증가시키므로 침로 안정성을 떨어뜨린다고 할 수 있는데 여기서 모멘트의 중심은 선수에서 30%의 위치에 가정 하였다. 이 위치가 선수 쪽으로 이동 되면 선체에 작용하는 횡력 중심과 멀어지면서 양의 모멘트가 더욱 커지므로 침로 안정성이 증가 된다.



(a) Normal force



(b) Moment

그림 9. Obtained results by CFD

## 2) 선미 형상

본 절에서는 선미 형상이 침로 안정성에 어떤 영향을 주는지를 모형과 수치 실험을 통해 소개 하였다.

그림 10에서 case A는 기본 선형에서 트랜섬

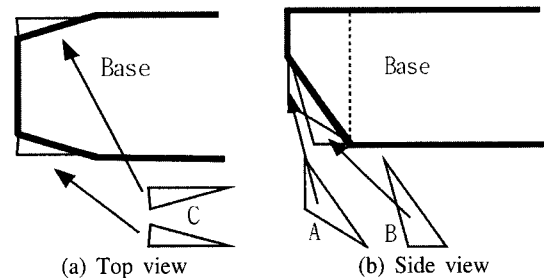


그림 10. Sketch of the hull forms

(transom) 경사를 50% 줄여 원활한 선저 유동을 유도한 선형이고 case B는 case A와 동일한 측면적을 가지면서 트랜섬 경사를 보다 급격히 변화시킨 선형이다. 그리고 case C는 수선 길이를 연장시키는 효과를 얻기 위해 설계된 선형이며 마지막으로 case D는 그림에서 보여지지 않았으나 case A와 case C를 조합하여 설계되었다.

그림 11과 12는 각각의 선형마다 선수각에 대한 횡력과 모멘트의 분포를 도시하고 있다. 이 값들은 선체 표면의 압력과 마찰력을 적분하여 얻어진 결과인데 앞에서 언급한 바와 같이 압력 저항이 지배적이므로 자유 수면을 고려하지 않고도 침로 안정성의 차이를 정성적으로 판단 할 수 있다. 일반적으로 횡력의 기울기가 크면 안정성이 우수해진다고

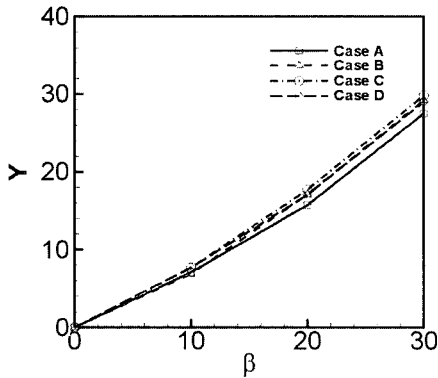


그림 11. Comparison of normal force

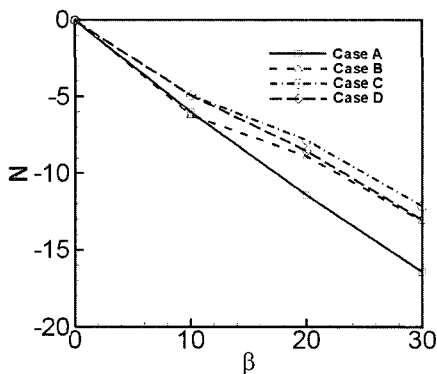
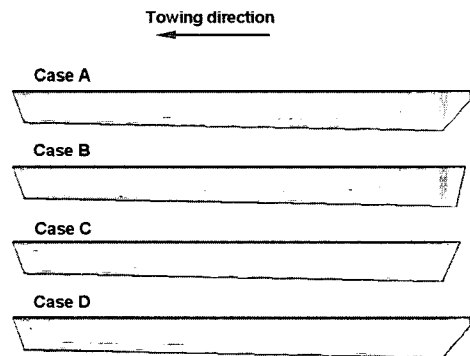


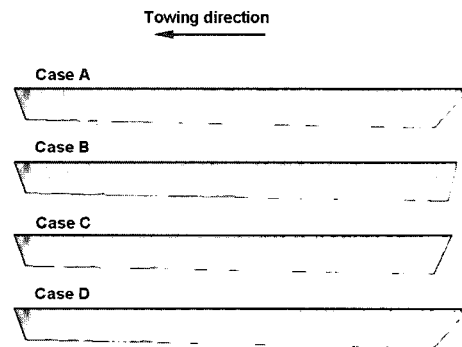
그림 12. Comparison of Moment

알려져 있는데 case A의 횡력이 가장 작고 그 기울기도 작게 나타나 침로 안정성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 case B와 D의 경우도 case A 보다는 침로 안정성이 우수하나 case C에 비교하면 안정성이 조금 떨어진다. 그리고 모멘트와 선수각을 나타낸 그림 12에서도 같은 성향을 볼 수 있다. Case B, C 그리고 D의 모멘트의 기울기는 case A에 비하여 완만하다. 이것은 case A의 침로 안정성이 다른 선형과 비교하여 우수하지 못하다는 것을 나타내고 있다. 따라서 트랜섬 경사를 줄여 원활한 선저 유동을 유도 하더라도 침로 안정성을 향상 시키지 못하고 선미 형상에 의해 수선면이 늘어난 경우가 더욱 효과적임을 알 수 있다.

그림 13은 선 측면에 발생하는 압력 분포를 보여 주는데 밝은 부분은 양 압력이고 어두운 부분은 음



(a) starboard



(b) port

그림 13. Pressure distribution

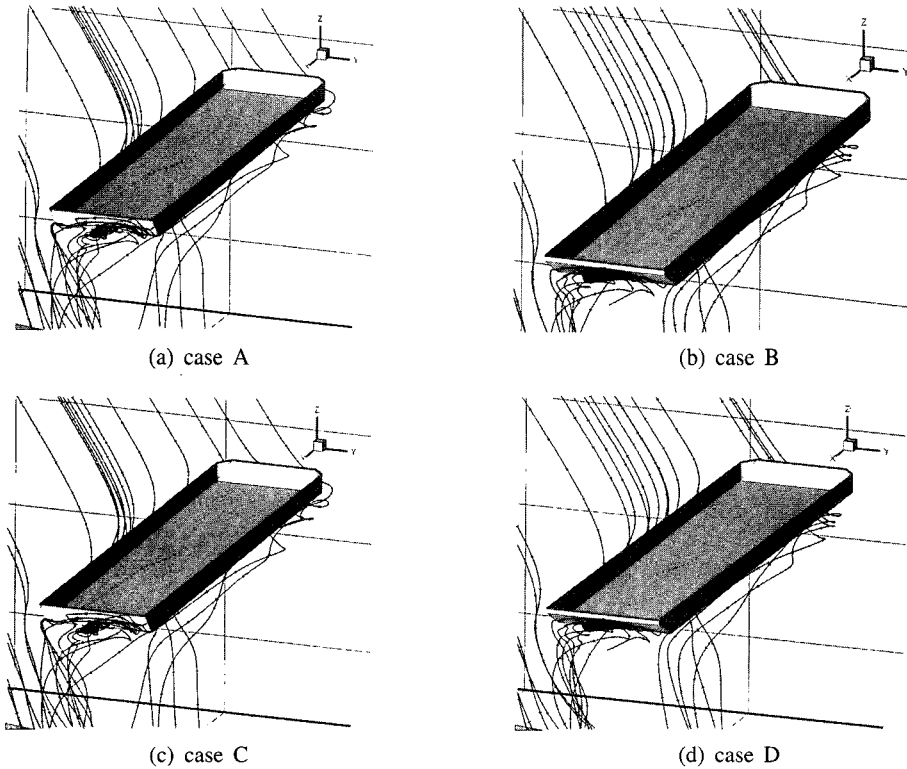


그림 14. Flow line pass by FPSO


압력을 나타낸다. 이 그림들에서 case A와 B 선형의 port쪽 선미 부에 음 압력이 발생 되는 것을 볼 수 있다. 이는 횡력을 작게 하고 모멘트를 크게 하여 침로 안정성을 악화시키는 요인으로 작용한다. 그러나 case B의 starboard쪽 선미에 발생하는 음 압력이 상대적으로 case A보다 크게 나타나 침로 안정 성능을 개선해 주는 것으로 해석 된다. 위의 그림들의 비교로 흘수선을 길게 연장한 선형의 침로 안정성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

참고로 그림 14는 유동장 내의 유선을 표시한 것으로 이는 향후 침로 안정 성능 개선을 위한 스케그 설계에 유용한 자료로 사용될 수 있다. 4 가지 선형 모두 폭 방향의 중심 축 주위에서는 반류 영역이 존재하여 이 부분에 스케그를 부착하더라도 선체에 발생하는 횡력은 미미할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

국내에서도 침로 안정성을 평가할 수 있는 모형 시험법과 수치 해석을 이용한 계산적 평가도구가 개발되어서, 이들 방법을 통해 침로 안정성을 고려한 연구가 성공적으로 이루어지고 있다. 그렇지만 모형 시험의 경우 모형선의 크기가 작으므로 계측 값의 크기를 고려한 계측 정밀도를 향상시키면서 많은 시험을 통한 경험의 축적이 필요하고 수치 해석 또한 정량적 결과를 얻기 위해 고정도의 수치 기법이 적용되어야 한다. 그러나 본 고에서 보인 예에서 알 수 있듯이 바지 형태의 FPSO의 침로 안정성을 모형 실험과 수치 해석을 이용해 판단할 수 있었다. 향후 국내에서도 수치 해석을 통해 유체 역학적 정보를 얻어내고 이를 모형 시험에 반영하여 침로 안정성을 고려한 선박을 설계할 수 있을 것으로 기대한다.

**참고문헌**

1. 양희준, 김윤수, 이동연, 2003, "FPSO의 예인시 침로 안정성에 대한 실험적 연구," 대한조선 학회 추계 학술대회 논문집 pp. 417-420.
2. Jochin E. Brix, 1992, "Manoeuvring technical manual," Seehafen Verlag, Hamburg
3. 손경호, 김용기, 이상갑, 최경식, 2000, "풍압력하에서 피예 항중인 손상선박의 침로안정성에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권 2호, pp. 46-56.
4. Strandhagen, A. G., Schoenherr, K. E., and Kobayashi, F. M., 1950, "The stability on course of towed ships," Transactions SNAME, pp. 32-56.
5. Abkowitz, M. A., 1972, "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles," MIT Press, Cambridge, Mass 

**부 경 태** | 삼성중공업(주) 조선해양연구소



- 1968년 12월생
- 1993년 2월 KAIST 석사
- 현 재: 삼성 중공업(주) 조선 해양 연구소 대덕 선박 연구 센터 책임 연구원
- 관심분야: 수치 유동 해석
- 연 락 처: 042-865-4733
- E-mail : kyungtae.boo@samsung.com

**홍 춘 범** | 삼성중공업(주) 조선해양연구소



- 1968년 12월생
- 2003년 9월 히로시마 대학교 박사
- 현 재: 삼성 중공업(주) 조선 해양 연구소 대덕 선박 연구 센터 책임 연구원
- 관심분야: 수치 유동 해석
- 연 락 처: 042-865-4782
- E-mail : cb.hong@samsung.com

**양 희 준** | 삼성중공업(주) 조선해양연구소



- 1968년 12월생
- 1998년 2월 서울 대학교 석사
- 현 재: 삼성 중공업(주) 조선 해양 연구소 대덕 선박 연구 센터 책임 연구원
- 관심분야: 조종/제어
- 연 락 처: 042-865-4743
- E-mail : yoon-soo.kim@samsung.com

**김 윤 수** | 삼성중공업(주) 조선해양연구소



- 1963년 2월생
- 1994년 3월 오사카 대학교 박사
- 현 재: 삼성 중공업(주) 조선 해양 연구소 동경 연구 분소 수석 연구원
- 관심분야: 운동/조종
- 연 락 처: +81-45-510-3324
- E-mail : yoon-soo.kim@samsung.com

**신 수 철** | 삼성중공업(주) 조선해양연구소



- 1954년 8월생
- 1997년 2월 부산 대학교 박사
- 현 재: 삼성 중공업(주) 조선 해양 연구소 대덕 선박 연구 센터 수석 연구원
- 관심분야: 선박 설계, 성능 해석
- 연 락 처: 042-865-4344
- E-mail : scshin1954@samsung.com