

## 特輯論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(3), 194-201(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.3.194

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## EFD-CFD 비교워크샵 CASE 1 : 익형 풍동시험 및 해석결과 비교

조태환\*, 이영준\*\*, 사정환\*\*\*, 김철완\*\*\*\*, 김영태\*\*\*\*, 김인\*\*\*\*\*

## EFD-CFD comparison workshop case 1 : Airfoil

Taehwan Cho\*, Youngjun Lee\*\*, Jeonghwan Sa\*\*\*, Cheolwan Kim\*\*\*\*

Youngtae Kim\*\*\*\*\* and In Kim\*\*\*\*\*

Korea Aerospace Research Institute\*, ChungNam University\*\*

Korea Institute of Science and Technology Information\*\*\*

Korea Aerospace Research Institute\*\*\*\*, TaeSung ANSYS\*\*\*\*\*, CD-Adapco Korea\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

The KARI-11-180 airfoil was selected as a model for EFD-CFD comparison workshop case 1. Wind tunnel test for this model was conducted in KARI low speed wind tunnel with 0.6m x 3.0m model for the Reynolds number up to 3.0E6. The model configuration and wind tunnel test results including  $C_l$ ,  $C_d$  and  $C_p$  were released at the KSAS 2015 spring conference. The computational analysis results with KFLOW, FLUENT and STAR-CCM+ were present in the KSAS 2015 fall conference. These computational works were summarized in this paper and the comparison results with each others including the wind tunnel data were also summarized.

## 초 록

EFD-CFD 비교 워크샵 case 1의 모델로 한국항공우주연구원에서 개발된 KARI-11-180 익형이 선정되었다. 익형 풍동시험은 0.6m x 3.0m 모델을 사용하여 KARI LSWT에서 최대 레이놀즈수 3.0E6까지 수행되었다. 익형 형상 및  $C_l$ ,  $C_d$  그리고  $C_p$ 를 포함한 시험자료가 2015년 KSAS 춘계학술대회에서 공개되었으며, KFLOW, FLUENT 및 STAR-CCM+를 사용한 전산유체해석결과가 2015년 KSAS 추계학술대회에서 공개되었다. 본 논문에는 2015년 발표된 시험 및 전산해석결과를 요약하여 수록하였으며, 시험결과를 포함한 전산해석 결과들 간의 비교결과도 요약수록 하였다.

**Key Words** : Wind tunnel test(풍동시험), CFD(전산유체역학), Airfoil(익형)

## 1. 서 론

실험공기역학(이하 EFD)과 전산공기역학(이하 CFD)은 공기역학을 탐구하는 데 주요하게 사용되

는 연구기법이다. 항공우주공학회 공기역학부문위 회회에서 2015년부터 진행한 EFD-CFD 비교 workshop은 신뢰할 수 있는 시험자료를 기반으로 전산해석연구를 수행한 후, 시험결과와 해석결과

† Received : November 17, 2016      Revised : February 7, 2017      Accepted : February 27, 2017

\* Corresponding author, E-mail : thcho@kari.re.kr

를 비교분석함으로써 EFD 및 CFD로부터 도출된 결과가 갖는 물리적인 그리고 현상적인 의미와 한계를 이해하고 향후 보완되어야 할 연구방향을 공유하기 위해 추진되었다. 연구대상 모델을 선정함에 있어서 주요하게 고려된 사항은 해석대상이 공기역학적인 관점에서 유의미한 모델일 것, 신뢰할 수 있는 시험자료를 확보할 수 있을 것 그리고 형상 및 특성자료가 공개되어 있을 것 등이다. 우선 해석대상으로 익형 모델, 저속 전기체 모델, 고속 전기체 모델 3종이 선정되었다. 그 중 익형모델과 관련하여 2016년 상반기까지 진행된 연구결과를 본 논문에서 요약 정리하였다.

익형 모델과 관련된 실험자료로는 한국항공우주연구원에서 수행되었던 KARI-11-180 익형시험자료가 선정되었으며, 2015년 추계학술대회에서 5개의 전산해석결과가 발표되었으며, 2016년 춘계학술대회에서 5개의 해석결과가 발표되었다. 본 논문에서는 연구결과를 표기함에 있어서 실험결과는 'KARI Exp'로 표기하였으며, 전산해석결과는 해석도구와 연구자가 나타날 수 있도록 'Fluent\_김철완'과 같이 해석도구와 학술대회 발표자의 이름을 병기하는 방식으로 표기하였다.

## II. 본 론

### 2.1 EFD 자료

모델로 선정된 익형은 풍력발전기 블레이드에 적용하기 위해 KARI에서 설계 및 풍동시험이 진행된 KARI-11-180 익형으로 높은 양항비를 확보하기 위해 층류를 최대한 유지하도록 설계된 익형이다[1]. 익형의 두께비는 18%이며 개략적인 형상이 Fig. 1에 나타나 있다.

익형 풍동시험은 한국항공우주연구원 중형아음속풍동에서 수행되었다. 시험형상은 Fig. 2에 나타나 있으며 상세한 시험환경은 참고문헌[2]에 기술되어 있다. 풍동시험에 사용된 익형모델의 코드길이는 0.6m, 스패ん길이는 3.0m이다. 시험모델 형상정밀도 확인을 위해 3차원 형상측정을 수행

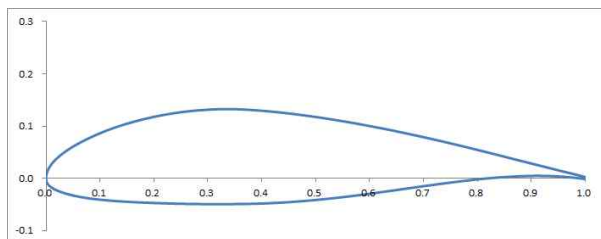


Fig. 1. KARI-11-180 airfoil



Fig. 2. Wind tunnel test in KARI LSWT

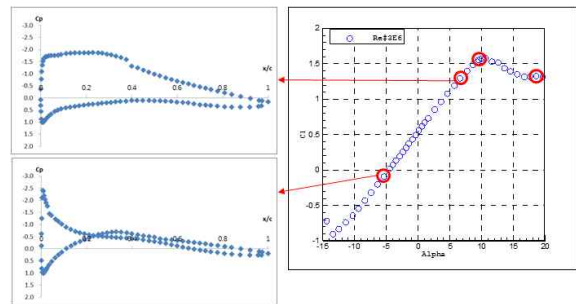


Fig. 3. Wind tunnel test results for KARI-11-180 airfoil

한 결과는 코드기준 0.02%이하로 나타났습니다.

익형의 양력특성은 표면에 120개의 압력공을 통해 측정된 표면압력을 적분하여 파악하였으며, 항력특성은 익형끝단으로부터 후방 1.7c에 위치한 rake를 통해 측정된 흐름압력손실을 적분하여 파악하였다. 풍동시험은 레이놀즈수 1E6, 2E6, 3E6에 대해 수행되었으며 이 중 레이놀즈수 3E6 시험결과를 주비교대상으로 선정하였다. Fig. 3과 같이 받음각에 대한 양력, 항력 및 표면압력 자료가 결과비교를 위해 공개되었다[3].

### 2.2 CFD 자료

익형 전산해석과 관련하여 2015년 춘계학술대회에서 충남대(이영준), 태성에스엔이(김영태), 한국과학기술정보연구원(사정환), 한국항공우주연구원(김철완), CD-adapco(김인)에서 해석결과를 발표하였다.

#### 2.2.1 FLUENT/EDISON\_이영준

이영준은 FLUENT v14.5와 EDISON을 이용한 전산해석결과를 발표하였다[4]. Fully turbulent 조건을 적용하여 레이놀즈수는 2.8E6에서 유동해석을 수행하였으며, 난류모델로는 k- $\omega$  SST 모델

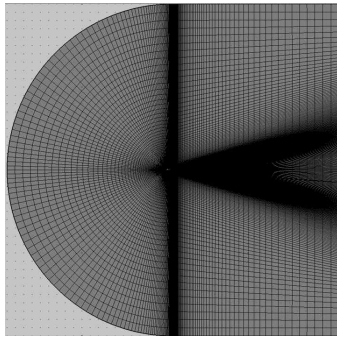


Fig. 4. Mesh used by Lee Y. J.

을 사용하였다. 2차원 비압축성 유동해석을 수행 하였으며 사용된 격자는 Fig. 4와 같이 총 96,000 개의 격자가 사용되었다.

익형 풍동시험은 난류도 0.1% 이하인 시험설 비에서 수행되었으나, 유동해석은 fully turbulent 조건에서 수행되었으므로 양자 간의 직접적인 비교는 무의미하다. 익형 풍동시험 자료중 익형오 염상태를 모사하기 위해 표면에 지그재그 테이프 를 부착한 상태에서 수행된 시험 결과를 비교자료 로 활용하였다. 두께 0.3mm, 폭 8mm 지그재 그 테이프를 익형 상하면 앞전 5%위치에 부착하여 시험이 수행되었다. Fig. 5와 Fig. 6에 표면이 매끈한 상태에서 수행된 시험자료(KARI Exp(clean)), 지그재그 테이프가 부착된 상태에서 수행된 시험자료(KARI\_Exp(taped))와 이영준이 수행한 유동해석자료(FLUENT\_이영준, EDISON\_이영준)가 비교되어 있다.

Figure 5와 Fig. 6에서 fully turbulent 조건으 로 수행된 전산해석결과는 지그재그 테이프가 부 착된 시험결과와 더 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 양력계수의 선형성이 유지되는 받음각 6도 이하에서는 양력계수 및 항력계수 모두 시험결과 와 해석결과가 잘 일치하고 있다. 그러나 비선형

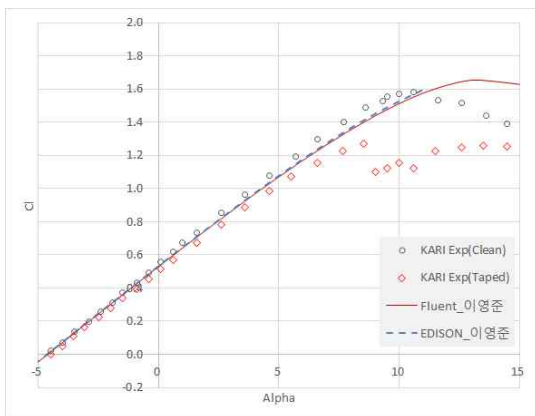


Fig. 5. CFD results by Lee. Y. J : Cl

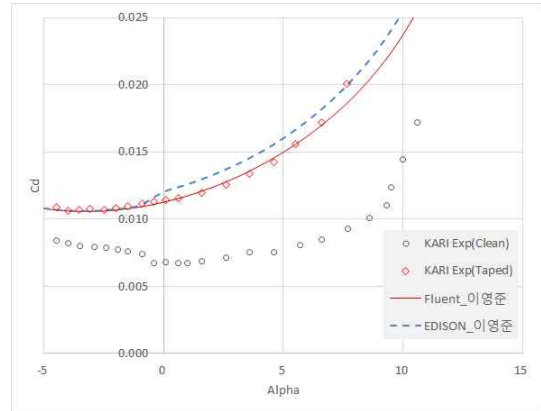


Fig. 6. CFD results by Lee. Y. J : Cd

성이 나타나는 8도 이상에서는 차이가 나타나며, 시험결과는 8.5도에서 실속이 관측되었으나 전산 해석결과는 13도에서 실속이 나타나고 있다.

### 2.2.2 KFLOW\_사정환

사정환은 KFLOW을 이용한 전산해석결과를 발표하였다[5].  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  천이모델과 RANS 해석을 사용하여 레이놀즈수 3.0E6에서 2차원 압축성 유동해석을 수행하였다. 사용된 격자는 Fig. 7과 같이 총 100,224개의 격자로 구성하였다.

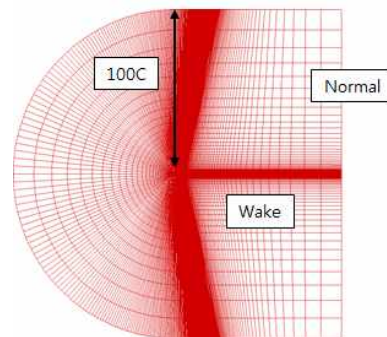


Fig. 7. Mesh used by Sa J. H.

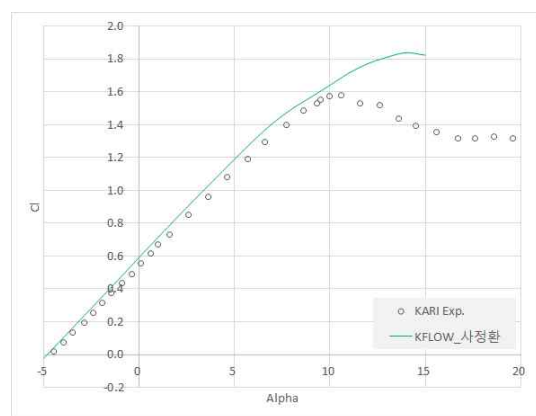


Fig. 8. CFD results by Sa J. H. : Cl

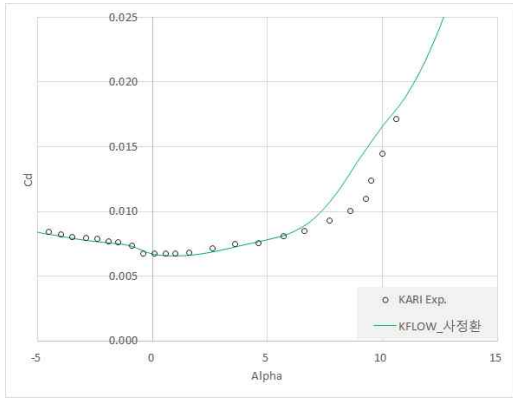


Fig. 9. CFD results by Sa J. H. : Cd

전산해석 결과를 풍동시험 결과와 비교하였을 때, 양력계수는 Fig. 8과 같이 시험값에 비해 약간 큰 값을 보이고 있다. 선형구간인 -2도~5도 범위에서 양력계수의 기울기는 시험자료 0.1173에 비해 전산해석자료는 0.1208로 약간 큰 값을 보이고 있다. 실속각도는 시험자료는 10.6도이며, 전산해석자료는 14도로 나타났다. Fig. 9의 항력계수의 경우 6.6도 이하 받음각에서는 전산해석결과와 시험결과는 매우 잘 일치하고 있으며, 7도 이상에서는 전산해석결과가 시험값에 비해 큰 값을 보이고 있다.

2.2.3 FLUENT\_김영태

김영태는 FLUENT v16.2를 이용한 전산해석결과를 발표하였다[6]. k- $\omega$  SST,  $\gamma$  SST 및  $\gamma$ -Re $_{\theta}$  SST와 같은 3종의 천이모델을 적용하였으며, curvature correction(CC), production limiter (PL), production Kato-Launder(K-L)과 같은 옵션을 해석에 적용하였다. 사용된 격자는 Fig. 10과 같이 총 380,000개의 격자로 구성하였다.

전산해석 결과중  $\gamma$ -Re $_{\theta}$  SST 천이모델에 CC, K-L옵션을 적용한 결과를 풍동시험 결과와 비교하였을 때, 양력계수는 Fig. 11과 같이 시험값에 비해 약간 큰 값으로, 받음각 0도에서 0.03 차이

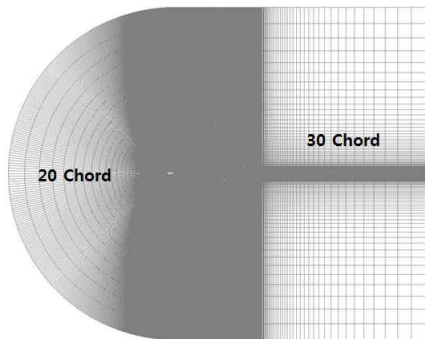


Fig. 10. Mesh used by Kim Y. T.

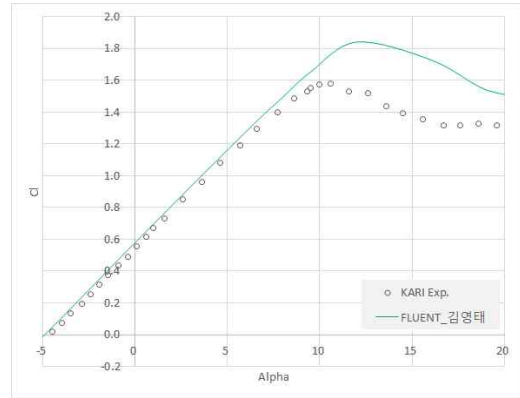


Fig. 11. CFD results by Kim Y. T. : Cl

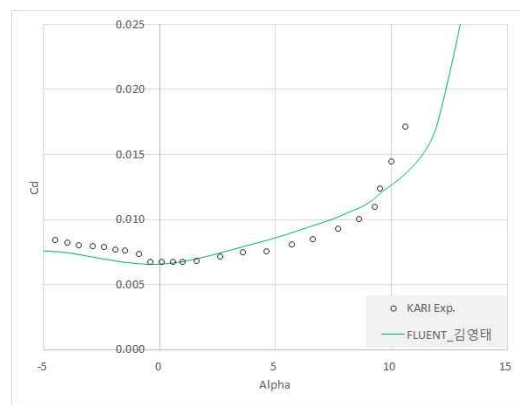


Fig. 12. CFD results by Kim, Y. T. : Cd

를 보이고 있다. 선형구간인 -2도~5도 범위에서 양력계수의 기울기는 시험자료 0.1173에 비해 전산해석자료는 0.1177로 유사한 값을 보이고 있다. 실속각도는 시험자료는 10.6도이며, 전산해석자료는 12도로 나타났다. Fig. 12의 항력계수의 경우 0도 이하 받음각에서는 전산해석결과가 시험값에 비해 0.001정도 작게 나타나고 있으며, 4도 이상에서는 전산해석결과가 큰 값을 보이고 있다.

2.2.4 FLUENT\_김철완

김철완은 FLUENT v13을 이용한 전산해석결과를 발표하였다[7].  $\gamma$ -Re $_{\theta}$  SST 천이모델을 적용하였으며, 시험부 벽면에 의한 영향을 모사하기 위해 far boundary 조건 뿐만 아니라 wind tunnel boundary 조건에 대해서도 해석을 수행하였다.

전산해석 결과중 far-field boundary 조건을 적용한 결과를 풍동시험 결과와 비교하였을 때, 양력계수는 Fig. 15와 같이 시험값에 비해 약간 큰 값으로, 받음각 0도에서 0.04 차이를 보이고 있다. 선형구간인 -2도~5도 범위에서 양력계수의 기울기는 시험자료 0.1173에 비해 전산해석자

료는 0.1190으로 약간 큰 값을 보이고 있다. 실속 각도는 시험자료는 10.6도이며, 전산해석자료는

12도로 나타났다. Fig. 16의 항력계수의 경우 전산해석결과가 시험값에 비해 전반적으로 작게 나타나고 있다.

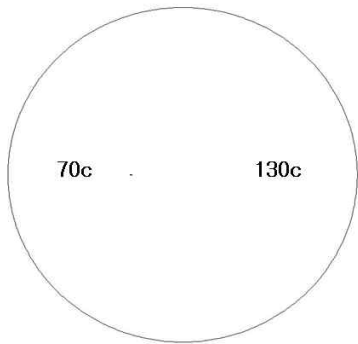


Fig. 13. Far boundary used by Kim C. W.

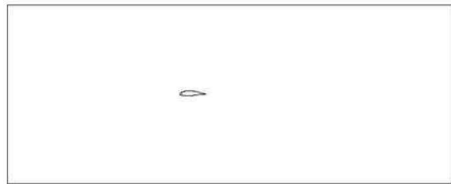


Fig. 14. Tunnel wall boundary used by Kim C. W.

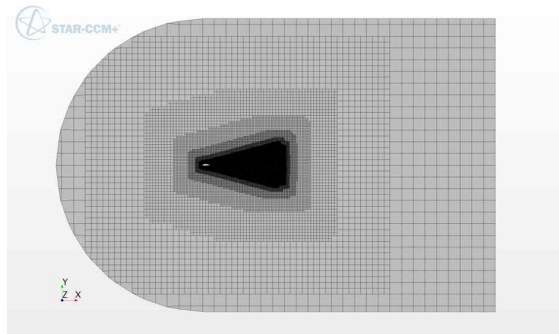


Fig. 17. Mesh used by Kim I.

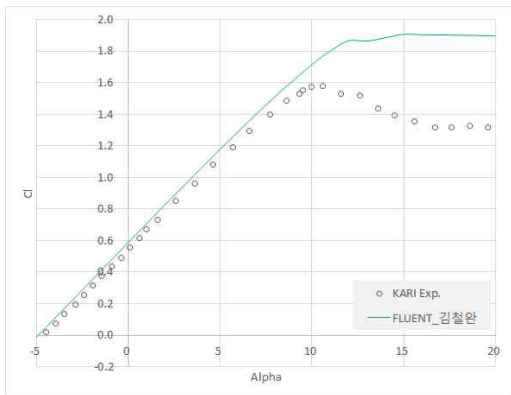


Fig. 15. CFD results by Kim C. W. : Cl

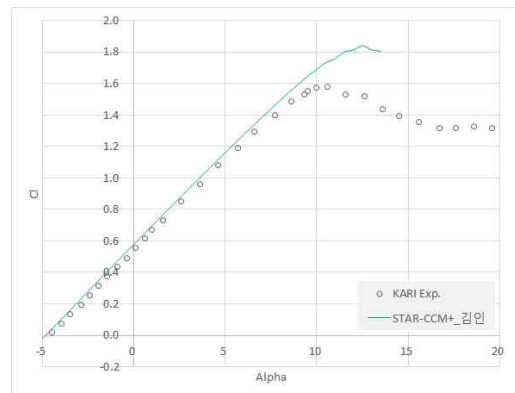


Fig. 18. CFD results by Kim I. : Cl

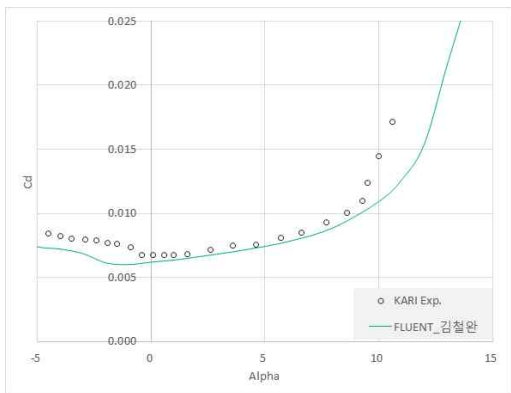


Fig. 16. CFD results by Kim C. W. : Cd

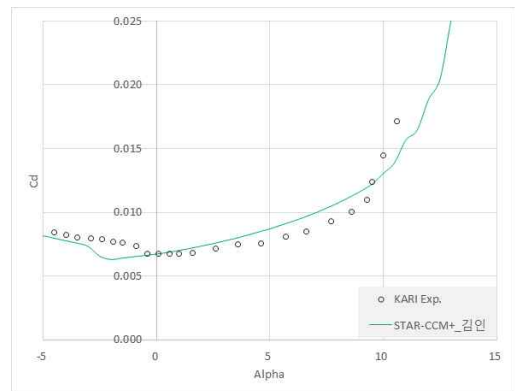


Fig. 19. CFD results by Kim I. : Cd

### 2.2.5 STAR-CCM\_김인

김인은 STAR-CCM+를 이용한 전산해석결과를 발표하였다.  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  SST 천이모델을 적용하였으며, Fig. 17과 같이 118,000개의 격자를 사용하였다. Far boundary는 30c를 적용하였다.

전산해석 결과를 풍동시험 결과와 비교하였을 때, 양력계수는 Fig. 18과 같이 시험값에 비해 약



간 큰 값을 보이며, 받음각 0도에서 0.03 차이를 보이고 있다. 선형구간인 -2도~5도 범위에서 양력계수의 기울기는 시험자료 0.1173에 비해 전산해석자료는 0.1177으로 유사한 값을 보이고 있다. 실속각도는 시험자료는 10.6도이며, 전산해석자료는 12.5도로 나타났다. Fig. 19의 항력계수의 경우 받음각 0도 이하에서는 전산해석결과가 시험값에 비해 작게 나타나며, 0도 이상에서는 전산해석결과가 시험값에 비해 큰 값을 보이고 있다.

**2.3 EFD-CFD 비교**

천이모델을 적용한 전산해석결과들과 시험결과를 비교한 결과가 Fig. 20, Fig. 21에 나타나 있다. 전산해석 결과들 간의 양력계수는 매우 유사한 값을 보이고 있으며, 시험값에 비해 0.03~0.04 큰 값을 보이고 있다. 실속각의 경우 시험자료는 10.6도이며, 전산해석 결과들은 12도~14도로 시험값에 비해 큰 값을 보이고 있다. 전반적으로 선형구간에서는 시험값과 전산해석이 유사한 값을 보이고 있으나 전산해석 결과들이 실속을 늦게 예측하고 있으며 이로 인해 더 큰 양

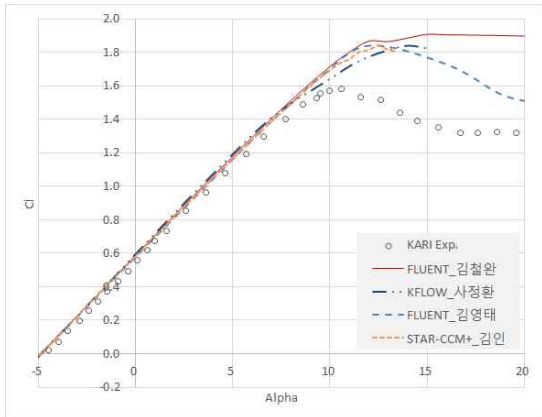


Fig. 20. EDF-CFD comparison results : Cl

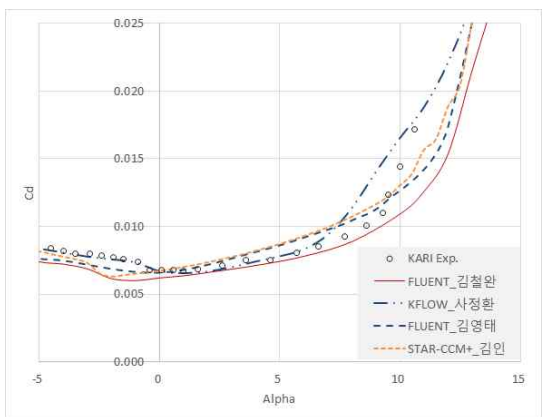


Fig. 21. EDF-CFD comparison results : Cd

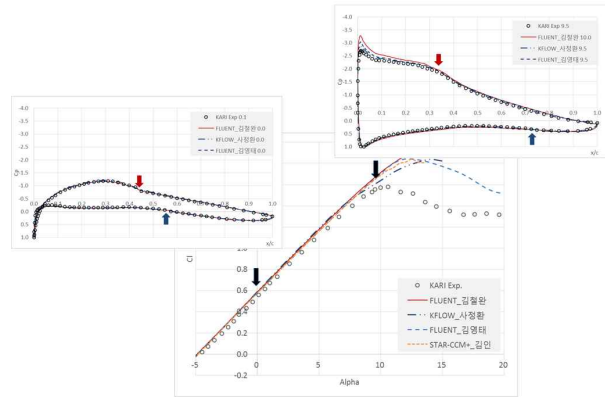


Fig. 22. Cp at AoA = 0.0 & 9.5

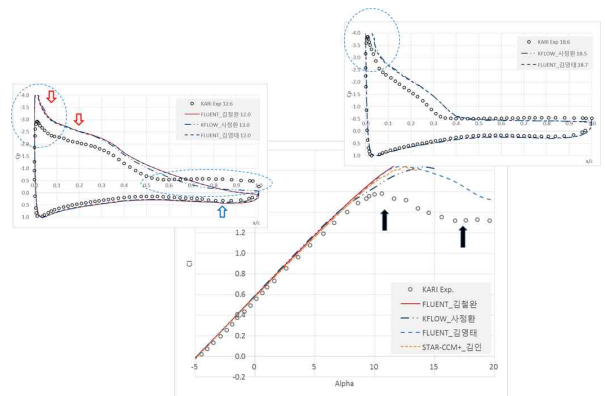


Fig. 23. Cp at AoA = 12.6 & 18.6

력계수를 예측하고 있다. 항력계수의 경우 전산해석 결과들 사이에 차이는 있으나 전반적인 경향은 유사하게 나타나고 있다. 선형구간에서 시험값과 전산해석 결과들은 0.002 이내의 차이를 보이고 있다.

받음각 0도 및 9.5도 조건에서 압력계수를 비교한 결과가 Fig. 22에 나타나 있다. 받음각 0도 조건 시험결과는 익형 아래면 55%, 윗면 43% 지점에서 압력계수가 급격하게 변하는 천이특성을 보이고 있다. 받음각 0도 조건에서 해석결과와 시험결과가 잘 일치하고 있다. 실속각 직전인 받음각 9.5도의 경우 전반적인 압력분포 형상은 해석결과와 시험결과가 일치하고 있으나, 윗면 suction peak 및 천이점(약 33%) 이전 영역에서 해석결과가 시험결과에 비해 큰 압력저하값을 보이고 있다. 받음각 9.5도에서 해석결과가 시험결과에 비해 큰 양력을 예측하는 것은 이러한 익형 윗면 압력피크값에 기인한 것으로 생각된다.

Figure 23에 실속각 이후인 받음각 12.6도 및 18.6도의 압력계수가 나타나 있다. 시험결과의 경우 받음각 12.6도에서 익형윗면 50% 이후에 실속으로 인한 압력특성이 나타나고 있으나, 해석

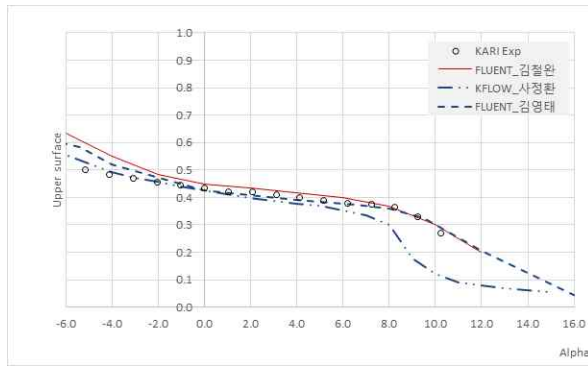


Fig. 24. Transition position : upper surface

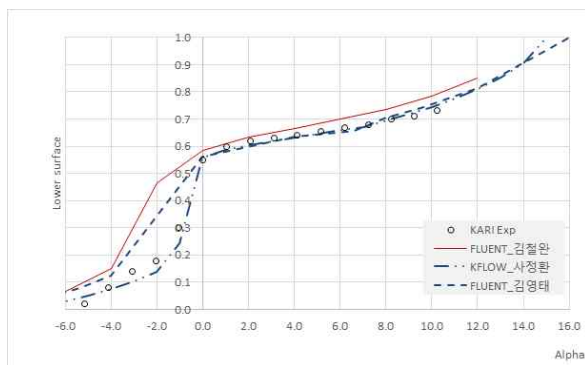


Fig. 25. Transition position : lower surface

결과의 경우 leading edge suction peak가 매우 강하게 나타나고 있으며 익형 전 영역에서 실속 특성이 나타나지 않고 있다. 받음각 18.6도의 경우 전산해석결과 및 시험결과 모두 실속특성이 나타나고 있다. 익형윗면의 경우 시험결과는 35% 이후에 실속특성이 보이고 있으며, 해석결과는 40% 이후에 실속특성이 보이고 있다. 40% 이전 영역에서 전산해석결과가 압력저하값을 크게 예측하고 있는 것은 이전 받음각과 동일한 경향이 다.

저 받음각영역에서는 풍동시험결과 및 전산해석으로 구한 압력계수가 잘 일치하고 있으나, 받음각이 커짐에 따라 전산해석결과의 익형윗면 suction peak가 더 크게 나타나고 실속이 지연되는 경향을 보이고 있다.

익형윗면의 천이점 시험 및 해석결과가 Fig. 24에 나타나 있다. 풍동시험에서 천이점 측정은 층류경계층과 난류경계층 내부의 유동소음 차이를 이용하는 stethoscope 기법을 사용하여 측정하였다. 전산해석에서 천이점은 표면마찰력이 급격히 증가된 위치를 사용하였다. 받음각 -2도~6도 구간에서는 시험결과와 전산해석결과의 천이점이 잘 일치하고 있으나, KFLOW 해석결과는 천이점 위치의 급격한 변화를 좀 더 낮은 받

음각에서 예측하고 있으며, FLUENT 해석결과는 -2도 이하의 받음각에서 천이점 위치를 좀 더 후방으로 예측하고 있다.

Figure 25에 익형아래면의 천이점 비교결과가 나타나 있다. Fig. 21 항력계수 비교결과에서 시험 및 KFLOW 해석결과는 drag bucket으로 인해 -1도 부근에서 항력계수의 급격한 변화를 보이고 있으며, FLUENT 및 STAR-CCM+는 유사한 현상을 -2도 부근에서 보이고 있다. 익형아래면 천이점 비교결과는 풍동시험 및 KFLOW 해석 결과가 -1도 부근에서 천이점의 급격한 변화를 보이고 있으며, FLUENT 해석 결과는 유사한 현상을 -2도 부근에서 보이고 있다.

### III. 결 론

공기역학 분야의 기술발전을 위해 진행되고 있는 EFD-CFD 비교 workshop 주제 중 익형풍동시험 전산해석 비교와 관련하여 2015년에 수행된 연구결과를 정리하였다.

층류유동을 활용하도록 설계된 KARI-11-180 익형 풍동시험결과를 KFLOW, FLUENT, STAR-CCM+를 활용한 전산해석결과와 비교하였다. 양력계수 및 항력계수 뿐 만 아니라 익형표면압력계수와 천이점 위치에 대한 비교도 수행하였다. 양력의 선형이 유지되는 저 받음각 구간에서는 풍동시험과 전산해석이 잘 일치하고 있으나, 부분실속 또는 실속이 발생하면서 나타나는 현상은 양자 간에 차이가 존재한다. 익형의 공력특성을 정확히 예측하기 위해서는 고받음각에서 leading edge suction peak 및 천이현상에 대한 추가적인 연구 및 분석이 진행되어야 한다. 또한, 익형아래면의 천이점 위치 변화는 저 받음각 항력계수에 영향을 미치므로 이에 대한 추가적인 연구 및 분석도 수행될 필요가 있다. 이를 위해 천이점 위치를 포함한 천이현상에 대한 추가적인 시험자료가 확보될 필요가 있다.

### References

- 1) Lee, Y. K., Kim, C. W., "Prediction of aerodynamic characteristics for wind turbine airfoil with CFD", Journal of wind energy, Vol. 2 Num.2, 2011, pp. 43-47
- 2) Kim, C. W., Cho, T. H., "Wind tunnel test of the 2D airfoil turbine for the MW size wind turbine", Journal of wind energy, Vol. 2 Num. 2, 2011, pp. 38-42

3) Cho, T. H., Kim, C. W., Kim, Y. W., "EFD-CFD comparison workshop CASE 1 : wind tunnel test for the airfoil", Proceedings of KSAS 2015 Fall Conference, 2015, pp. 1-1.

4) Lee, Y. J., Lee, C. Y., Kim, Y. H., Nam, D. W., Kim, B. S., "Aerodynamic analysis of KARI-11-180 airfoil by using FLUENT and EDISON computational themal fluid system", Proceedings of KSAS 2015 Fall Conference, 2015, pp. 2-5.

5) Sa, J. H., Kim, K. R., Park, S. H., Cho, K. W., "A computational study on aerodynamics

of KARI-11-180 airfoil considering turbulent transition", Proceedings of KSAS 2015 Fall Conference, 2015, pp. 6-6.

6) Kim, Y. T., Lee, H. B., An, J. M., Kim, S. Y., Sim, J. W., "Validation of ANSYS Fluent Prediction with Wind Tunnel Test Results about 18% Thickness Airfoil", Proceedings of KSAS 2015 Fall Conference, 2015, pp. 7-7.

7) Kim, C. W., "Computational fluid dynamics Analysis of the airfoil with 18% thickness ratio with Fluent", Proceedings of KSAS 2015 Fall Conference, 2015, pp. 8-8.