

# 연료탱크내 액체연료와 고체입자의 혼합 수치해석 연구

김명호\*<sup>†</sup> · 유경원\* · 민성기\* · 황기영\*

## A Numerical Study on Mixing of Liquid Fuel and Solid Particles in a Fuel Tank

Myungho Kim\*<sup>†</sup> · Gyongwon Ryu\* · Seongki Min\* · Kiyong Hwang\*<sup>†</sup>

### ABSTRACT

Two-dimensional liquid-solid multiphase fluid dynamics was used to analyze the suspension and mix of liquid fuel and solid particles in fuel tank installed mixing impeller. In this paper, the multiphase flow was modeled using Eulerian Granular Multiphase model. Experimental measurements of the axial distribution of solids concentration in stirred tanks under 12vol% solid loading were used for comparison with the CFD simulation. Four cases for the impeller location and flow pumping direction also were reviewed under 10.5% solids loading and 700rpm in fuel mix tank. The result of quality of suspension was compared with each cases and the impeller location and operation of mixing fuel tank was established.

### 초 록

혼합용 임펠러를 장착한 연료탱크의 액체연료와 미세 고체입자의 부유, 혼합 현상을 분석하고자 2차원 혼합 유동 수치해석을 수행하였다. 다상 유동해석은 Eulerian Granular Multiphase 기법을 사용하였고, 해석기법을 12vol% 고체 혼합 조건 실험의 축방향 고체 농도 분포와 비교하여 확인하였다. 해석용 연료탱크는 10.5vol% 고체입자를 액체연료와 혼합하는 것으로 회전수 700rpm 조건에서 4가지 경우의 임펠러 위치와 유속 조건으로 해석을 수행하였다. 각 경우에 대한 Quality of Suspension 결과를 비교하여 적합한 임펠러 위치와 속도방향을 확인하였다.

Key Words: Stirred Tank(교반탱크), Fuel Tank(연료탱크), Solid-Liquid Mix(고체-액체 혼합)

### 1. 서 론

혼합은 액체와 액체, 액체와 고체로 이루어진

두가지 이상의 물질을 고르게 섞는 과정으로 이러한 기능을 가진 장치를 혼합장치 또는 믹서(Mixer)라고 한다. 혼합분야는 화학공학, 제약, 식품 등 다방면에 응용되어 연구되고 있다. 혼합 과정은 섞는 방식에 따라 혼합 추출식(Jet Mixing Eductor) 또는 순환형과 임펠러 형식의

\* 국방과학연구소 1기술연구본부-5부

† 교신저자, E-mail: aerokim@dreamwiz.com

혼합형으로 크게 분류할 수 있다. 순환형은 주로 액체의 혼합, 반응, 희석, 침전 방식을 목적으로 탱크 내 Eductor가 설치되어 흡입된 유체를 순환펌프를 통해 Eductor로 분사하여 혼합을 촉진시킨다. 혼합형은 구동모터로 임펠러를 회전시켜 탱크 내 두가지 이상의 물질을 혼합하는 방법으로 회전축을 기준 대칭적으로 고르게 분산시킬 수 있다.

혼합형 믹서에 관한 연구는 주로 화학분야에서 활발히 진행되고 있다. 특히 액체-고체 혼합 분야는 고체 입자의 크기와 함유 비율 등에 따라 유체의 속도, 혼합 특성 등의 물리적 이해를 실험적 또는 수치적으로 수행하였다.[1-4] 실험기법으로는 레이저 가시화 및 전기장을 활용한 Tomography[5] 기법으로 속도 벡터 또는 체적 분율(Volume Fraction)을 측정한다.[2, 5] 수치적으로는 액체와 고체의 다상유동(Multiphase)으로 전산유체 해석을 수행하며, Lagrangian 기법과 Eulerian 기법을 사용한다. 일반적으로 고밀도 고체입자 유동해석은 Eulerian 기법으로 해석하며, Eulerian Granular Multiphase(EGM) Model[6]을 적용한다.

임펠러 형상과 탱크 내 3차원 유동을 고려해 볼 때, 3D Sliding Mesh 또는 Multiple Reference Frames 격자 기법을 활용한 비정상 다상유동 해석으로 정확도를 높일 수 있다. 하지만 다상유동의 비정상 해석과 Sliding Mesh 기법은 많은 격자와 시간이 소요되므로 다양한 경우에 대한 개념연구에서는 비효율적일 것으로 판단한다. 따라서 내재적 기법인 속도 벡터를 입력변수로 하는 2차원 혼합 유동을 수행하여 임펠러 위치, 유동방향 만을 고려한 혼합형 연료탱크의 개념설계에 적용하고자 한다.

## 2. 해석기법 검토

전산해석은 상용 CFD코드인 FLUENT 6.3 TM (Fluent Inc.)을 사용하였다. Multiphase 모델은 EGM 모델을 적용하였고, 세부적인 Viscosity와 Drag 기법은 Syamlal & O'Brien(1986)이 제안한

Grandular Viscosity 기법[7]과 Gidaspow가 제안한 Drag 기법[8]을 적용하였다. 난류모델은 k-standard 기반의 Dispersed 난류모델을 적용하였다. 유동장내 와류 효과를 반영하고자 2차원 축대칭 와류 보정 모델로 해석하였다. 격자계는 80×40으로 총 3200 개 셀로 구성하였고, 비정상 해석을 수행하였다.

Grandular Viscosity와 Drag 기법 및 난류모델, 2차원 해석기법의 적합성과 혼합용 연료탱크 수치해석 결과의 정확성을 검토하기 위해 Methyl Benzoate과 1,2 dichlorobenzene을 6:1로 희석된 액체와 유리분말을 12vol%로 혼합한 실험 결과와 비교하였다.[2] 실험용 탱크 규격과 액체, 고체의 물성은 Table 1과 Fig. 1와 같다.

Table 1. 탱크, 임펠러, 혼합물 물성

Tank Geometry	Properties	
T=H=0.154m D=T/3, C=T/5 N=1000, 1600rpm 임펠러=4PBT45°	Liquid	$\rho=1096 \text{ kg/m}^3$ $\mu=1.76\text{cp}$
	Solid	$\rho=1096 \text{ kg/m}^3$ $dp=231, 390\mu\text{m}$

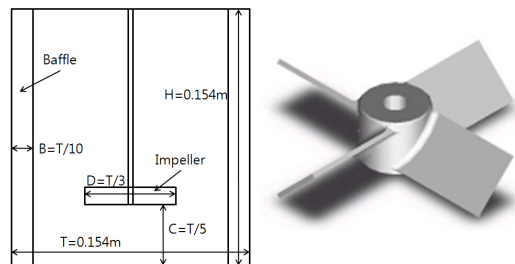


Fig. 1 탱크 Geometry 및 4PBT 45° 임펠러

내재적 기법 적용을 위해 4Blade 45° PBT의 속도 프로파일은 실험치와 3차원 Single-phase 유동 해석결과와 비교 검토 후 무차원화된 속도와 kinetic energy를 1000과 1600rpm으로 나누어 Fig. 2의 속도 프로파일로 사용하였다. 2차원 수치해석에서 3차원 형상인 Baffle의 영향을 감안하고자 Baffle 영역내 Tangential 속도성분을 0로 줄였다.

정량적인 분말입자의 분산 정도는 평균 고체

입자 농도(Solid Concentration)의 표준편차( $\sigma$ )로 평가하며,  $\sigma < 0.2$ 를 Uniform Suspension,  $0.2 < \sigma < 0.8$  Just-Suspended Condition,  $\sigma > 0.8$  Incomplete Suspension 상태이다.

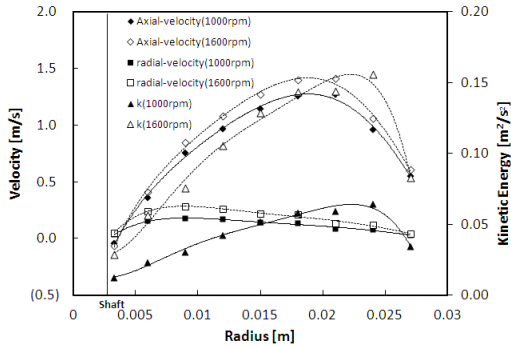


Fig. 2 4PBT 45° 임펠러 출구 속도 및 k 프로파일

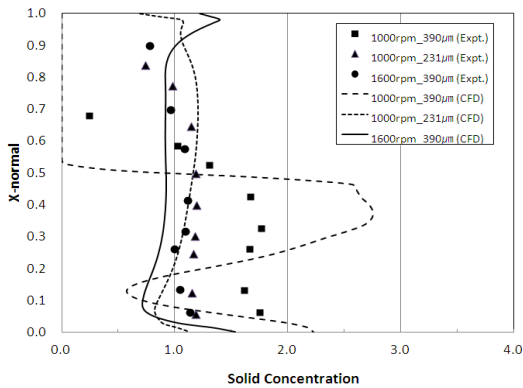


Fig. 3 축방향 고체 체적분율(Solid Concentration) 분포

Fig. 3은 임펠러와 탱크 중간위치의 축방향 체적분율 분포를 실험 결과와 비교한 것이다. 해석 검증 결과, 입자 390 $\mu\text{m}$ @1000rpm 조건을 제외한 231 $\mu\text{m}$ @1000rpm, 390 $\mu\text{m}$ @1600rpm 경우에서 부유 높이(Cloud Height)와 Solid Concentration이 유사한 검증 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 입자 390 $\mu\text{m}$ @1000rpm 조건에서 더 나은 검증 결과를 얻기 위해선 Grandular Viscosity와 Drag, 난류 모델에 대한 추가적인 검토가 필요하며, 특히 액체-고체의 경계면에서 확산 효과를 정확히 예측할 수 있는 수치모델 우선 필요할 것이다. 본 연

구 해석용 혼합탱크는 30 $\mu\text{m}$ 의 미세 알루미늄 입자와 탱크 직경 대비 임펠러 직경이 크고 유속이 빠른 조건이므로 보다 나은 평가가 가능할 것으로 판단한다.

입자가 작고, 임펠러 회전수가 높은 상태에서는 Cloud Height가 높은 Uniform Suspension에 가까운 결과를 나타냈다. Table 2는 3가지 경우에 대한 Quality of Suspension( $\sigma$ ) 계산 결과이다.

Table 2. Quality of Suspension

	Quality of Suspension
1000rpm_390 $\mu\text{m}$	1.05
1000rpm_231 $\mu\text{m}$	0.24
1600rpm_390 $\mu\text{m}$	0.30

### 3. 연료탱크 분말 혼합 결과

혼합형 연료탱크의 형상은 상부 분말 저장탱크 공간과 연료탱크 공간으로 구분된다. 연료탱크 직경(T)을 기준으로 각 탱크 형상과 임펠러 사양, 액체연료, 고체입자 물성은 아래와 Table 3와 같다. 임펠러 출구 속도 프로파일과 kinematic energy는 검증 모델에 사용한 4PBT45°의 프로파일을 사용하였으며, 혼합용 연료탱크 임펠러 회전수(700rpm)에 맞추어 보정하였다. 평균 분말 체적분율은 10.5vol%이며, 주어진 탱크 사이즈에 모터 임펠러 Clearance(0.2T, 0.4T)와 위(Up), 아래(Down) 유동방향 2가지 총 4가지 경우의 탱크 설계 모델을 해석하였다.

Table 3. 연료탱크 형상 및 연료/알루미늄 분말 물성

Tank Geometry	Properties	
4PBT45°, H=1.18T D=0.37T, B=0.08T C=0.2T, 0.4T N=700rpm	Liquid	$\rho=808 \text{ kg/m}^3$
	(JetA1 @20°C)	$\mu=1.3\text{cp}$
	Solid	$\rho=2719 \text{ kg/m}^3$
	(Al 분말)	$dp= 30\mu\text{m}$

연료탱크 내 혼합 시간은 30초로 제한되어 있어 완전혼합에 도달하는 시간으로는 부족하다.

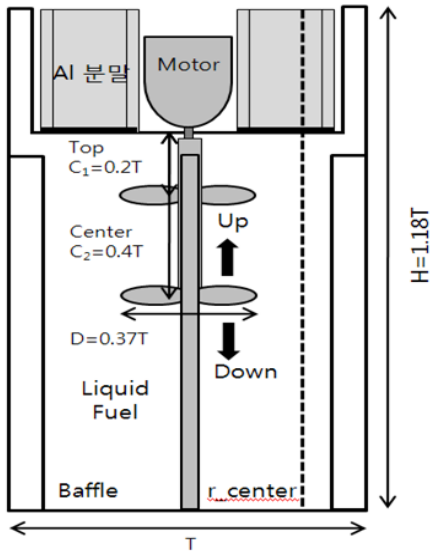


Fig. 4 해석용 연료탱크 Layout

Table 4. 해석 조건

	임펠러 위치	임펠러 출구방향
Case 1	C=0.2T(Top)	Down
Case 2	C=0.2T(Top)	Up
Case 3	C=0.4T(Center)	Down
Case 4	C=0.4T(Center)	Up

따라서 혼합시간 30초이내에서 혼합률이 높은 경우에 대한 고찰이 필요하다.

임펠러 위치와 관계없이 임펠러 출구 유속 방향이 아래로 형성되면 혼합 시간 10초 이후 구간은 전반적으로 평균 0.37로 Just-Suspend Condition으로 확인되었다. 또한 임펠러 중간 (C=0.4T)에서도 30초에만에 0.34의 Quality of Suspension 결과를 얻었다. 연료탱크 내 Al 분말의 농도 분포는 극부적으로 미소한 재순환 영역을 제외하고 분말이 고루게 분포하였다. 30초 운용 시간은 혼합의 정적상태는 아니지만, 연료탱크 구조가 복잡함을 감안할 때 Quality of Suspension 0.37은 우수한 혼합 특성을 보여주었다. Fig. 5, Fig. 6은 시간별 임펠러와 탱크벽 사이 중심(r\_center)에서 축방향 Al 분말 농도분포이며, 혼합 시간에 따라 위, 아래 분말농도가 균

일해지는 경향이 나타났다.

일반적으로 바닥면과 임펠러의 간격이 클수록 혼합 성능이 저하된다. 또한 탱크의 높이(H)가 길어지면 여러개의 임펠러를 축방향에 위치하여 혼합해야 된다. 하지만 설계용 연료탱크는 중심축에 구조물이 장착되어 회전용 임펠러 축과 간섭이 되고, 임펠러 회전축의 진동 등 정상 동작을 위해서는 임펠러와 상부 모터가 가까워야 하는 유체역학적 어려움을 극복해야 한다. 따라서 운용성 측면에서 구동모터에 가까운 C=0.2T 위치가 적합하며, 분말의 분산을 고루게 하기 위해선 Hydrofoil 임펠러와 같은 축방향 유속을 높이고, 효율이 좋은 임펠러를 적용해야 한다.

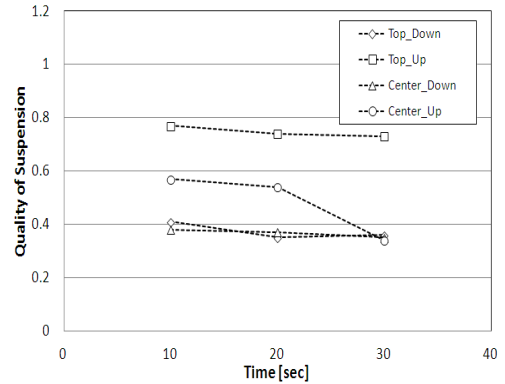


Fig. 5 해석 연료탱크 내 Quality of Suspension

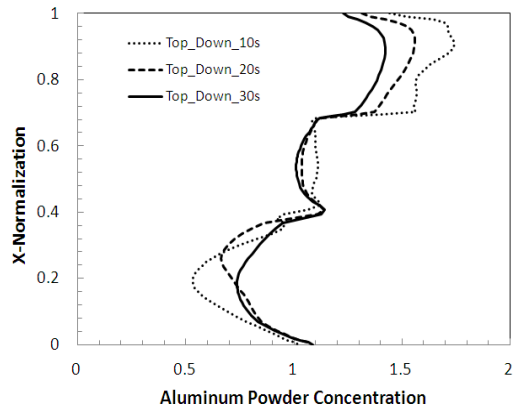


Fig. 6 축방향 Al 분말 체적분율(C=0.2T/Down)

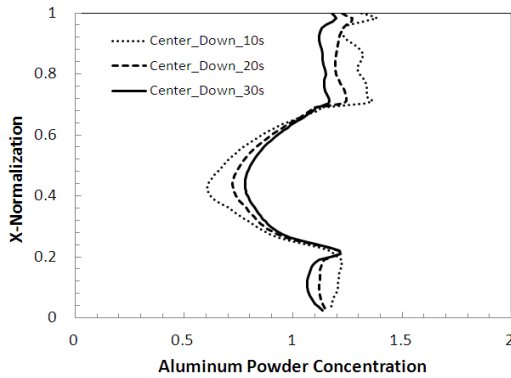


Fig. 7 축방향 AI 분말 체적분율(C=0.4T/Down)

#### 4. 결 론

1) 2차원 축방향 다상유동해석과 EGM 모델 적용에 따른 Granular Viscosity와 Drag 기법 및 난류모델의 적합성과 혼합용 연료탱크 수치 해석 결과의 정확성을 검토하였다.

2) 혼합용 연료탱크의 설계 회전수 조건에서 임펠러 위치와 유속방향 4가지 경우에 대한 혼합 정도를 비교하였다. 탱크의 구조와 운용성, 모터동작 시간을 고려해 볼 때, 구동모터와 가까운 위치에서 유속 방향을 아래로 혼합하는 경우 혼합형 연료탱크 설계에 적합할 것으로 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. P. Guiraud, J. Costes and J. Bertrand, "Local measurements of fluid and particle

velocities in a stirred suspension", Chem. Eng. J., 68 (1997), pp. 75-86.

2. J.C. Godfrey, Z.M. Zhu, "Measurement of particle-liquid profiles in agitated tanks," AIChE Symposium Series, 299 (1994) pp. 181-185.
3. W. Bujalski *et al.*, "Suspension and liquid homogenization in high solids concentration stirred chemical reactors", Trans IChemE., 77 (A) (1999), pp. 241-247.
4. Lanre M. Oshinowo, Andre Bakker, "CFD Modeling of Solids Suspensions in Stirred Tanks", Symposium on Computational Modeling of Metals, Minerals and Materials, Feb. 2002, pp.17-21
5. Seyed Hosseini, Dineshkumar Patel, Farhad Ein-Mozaffari, Mehrab Mehrvar, "Study of solid - liquid mixing in agitated tanks through electrical resistance", Chemical Engineering Science 65 (2010) pp. 1374 - 1384
6. Massah, H. and Oshinowo, L., "Super models," The Chemical Engineer, 2000, no. 10: pp. 20-22.
7. M. Syamlal and T.J. O'Brien, "MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide" (National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993), DOE/METC-9411004, NTIS/DE9400087
8. M. Gidaspow, D., Multiphase Flow and Fluidization, Continuum and Kinetic Theory Description, (Boston, MA: Academic Press Inc., 1993).