



Orthogonal Lagrangian Formulation을 이용한 축대칭 형상의 초음속 흡입구 유동 해석 연구  
NUMERICAL SIMULATION FOR AXISYMMETRIC SUPERSONIC INLET USING ORTHOGONAL LAGRANGIAN FORMULATION

---

저자 (Authors)	이성욱, 민대호, 김은사, 김종암 S. Lee, D. Min, E. Kim, C. Kim
출처 (Source)	<a href="#">한국전산유체공학회 학술대회논문집</a> , 2016.7, 16-17 (2 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국전산유체공학회</a> Korean Society of Computational Fluids Engineering
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06717127">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06717127</a>
APA Style	이성욱, 민대호, 김은사, 김종암 (2016). Orthogonal Lagrangian Formulation을 이용한 축대칭 형상의 초음속 흡입구 유동 해석 연구. 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 16-17.
이용정보 (Accessed)	서울대학교 147.46.118.*** 2017/04/28 12:04 (KST)

---

**저작권 안내**

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

**Copyright Information**

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.



# Orthogonal Lagrangian Formulation을 이용한 축대칭 형상의 초음속 흡입구 유동 해석 연구

이성욱<sup>1</sup>, 민대호<sup>1</sup>, 김은사<sup>1</sup>, 김종임<sup>1,2\*</sup>

## NUMERICAL SIMULATION FOR AXISYMMETRIC SUPERSONIC INLET USING ORTHOGONAL LAGRANGIAN FORMULATION

S. Lee, D. Min, E. Kim and C. Kim

### 1. 서론

초음속 비행체에서는 공기 흡입구 내부 또는 외부에서 발생하는 충격파가 압축기의 역할을 대신한다. 그러나 충격파로 인해 전압력의 손실이 발생하고, 특히 충격파가 흡입구 외부에서 형성될 때 유량 손실도 추가로 발생한다. 때문에 이를 최소화하면서 감속 및 압축된 유동을 얻을 수 있도록 흡입구 형상을 최적화하는 연구가 이루어져 왔다[1,2]. 충격파에 의한 압축이 주요 물리 현상이기 때문에, 과거에는 충격파 관련 근사 이론을 접목하여 해를 구하고 최적 설계를 수행하였다[1]. 이에 반해 최근에는 컴퓨터 성능 및 수치기법이 발전하면서 CFD 해석을 기반으로 보다 정밀한 계산을 통한 최적설계 연구를 수행하고 있다. 하지만 예비 설계 단계에서는 빠른 시간 내에 결과를 예측하여 설계 방향 및 계획을 수립하는 것이 중요하기 때문에, 정확도 측면에서는 불만족스럽지만 계산 시간이 적은 근사 이론을 이용하기도 한다[2].

CFD를 이용한 유동 해석은 Eulerian 방식의 수치해석 방법이 일반적이며, Lagrangian 방식은 다양한 유동 문제에 적용하기 힘들기 때문에 널리 쓰이지는 않고 있다. 그러나 Lagrangian 방식은 유동 입자를 따라 유동장을 기술하는 특징으로 인해 contact을 정확하게 포착해낼 수 있으며 sub-cell splitting과 같은 기법을 적용하여 충격파를 정밀하게 계산할 수 있어, 연구가 지속되고 있는 분야이다[3-5].

본 연구에서는 Orthogonal Lagrangian Formulation (OLF) 기반의 유동 해석 방법을 초음속 흡입구 형상에 적용하는 연구

를 수행하였다.

### 2. 수치 기법

#### 2.1 Orthogonal Lagrangian Formulation

일반적인 2차원 축대칭 비점성 정상 유동에 대한 Euler 방정식에 Eq.(1)의 변환과 Eq.(2)의 유동 변수와 형상 변수 (geometrical variable)의 관계를 결정하는 조건을 적용하면 Eq.(3)과 같이 OLF으로 표현할 수 있다[3,4].

$$dx = \frac{\kappa u}{q} d\lambda + U d\xi, dy = \frac{\kappa v}{q} d\lambda + V d\xi \tag{1}$$

$$\frac{\partial(uU+vV)}{\partial\lambda} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial\lambda} \begin{pmatrix} K \\ KH \\ uU+vV \\ \tilde{K}u+pV \\ \tilde{K}v-pU \\ V \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial\xi} \kappa \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -p \sin\theta \\ p \cos\theta \\ -\sin\theta \end{pmatrix} = \frac{hKv}{y} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3}$$

with  $K = \rho(uV - vU), \theta = \arctan(v/u)$

일반적으로 Euler 방정식에 대한 정상해가 반복 계산을 통한 수렴해인 것과는 다르게, OLF는 공간 좌표인 Lagrangian distance,  $\lambda$  방향으로 유동이 나아가므로 별도의 수렴 과정 없이 각 단계에서의 1차원 플럭스 계산을 통해 다음  $\lambda$  위치의 유동 해를 구한다. 플럭스는 1-D Riemann problem의 엄밀해(exact solution)을 이용하여 계산하였으며[4], 고차 정확도를 위해 Sweby의 2nd-order TVD scheme을 적용하였다[5].

플럭스 계산과 함께 유동 변수와 형상 변수 ( $U, V$ ) 값을

1 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

2 정회원, 항공우주기술연구소

\* Corresponding author E-mail: chongam@snu.ac.kr



통해 다음  $\lambda$  위치의 격자점을 계산하여, 유동 해석을 수행하면서 격자를 생성하며, 격자가 유동 방향에 평행하게 형성되므로  $\xi$ 가 일정한 선이 곧 유선(streamline)이 된다. 이러한 특징으로 contact이 발생하는 경우, contact line이 셀 경계선과 일치하므로 기존의 해석자보다 contact을 더 정확하게 계산해 낼 수 있다. 또한 Eq.(2)로 인해 격자가 유동 방향에 수직하도록 생성되는데, 이로 인해 OLF는 기존의 generalized Lagrangian formulation과는 달리 전 유동영역이 초음속이면 해석이 가능하다[4].

3차원 Euler 방정식도 같은 방식으로 변환할 수 있으며, 2차원과 같은 특징을 지닌다.

**2.2 정체 유선(stagnation streamline) 포착**

초음속 흡입구 유동을 해석하기 위해서는 카울(cowl)과 만나는 셀을 기준으로 카울의 내부와 외부 영역으로 유동 영역을 나누어야 한다. 이때 카울 침점에 접하는 셀을 직접 분할하게 되면, 분할된 셀의 유동값을 정확하게 계산할 수 없어 충격파가 지나는 셀에서는 수치적 불안정성을 일으키며, 이는 전영역의 유동해에 영향을 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 OLF에서  $\xi$ 가 일정한 선이 유선이라는 것에 착안, 반복적인 계산을 통해 초기 격자점의 분포를 조절하여 격자점과 카울 침점이 일치하도록 하여 정체 유선을 찾도록 하였다.

**3. 유동 해석**

**3.1 초음속 흡입구 유동 해석**

Fig. 1은  $M=4$ 인 2차원 축대칭 초음속 흡입구의 내/외부 유동과  $M=3$ 인 3차원 초음속 흡입구의 내/외부 유동을 해석한 결과이다.

Fig. 1의 왼쪽 위 결과는 OLF 기반 유동 해석자를 이용하여 얻은 것이고, 왼쪽 아래 결과는 OLF를 통해 생성된 격자를 이용해 FVM 기반 유동 해석자로 얻은 것이다. 두 방법 모두 비슷한 수준의 정확도를 가지는 결과를 제공해주고 있다. 또한 계산 시간 측면에서 OLF가 FVM 방식에 비해 크게 줄어들음을 확인할 수 있었다.

**4. 결 론**

OLF 기반의 유동 해석 방법을 이용하여 초음속 흡입구에서의 유동을 해석하고자 하였다. 초음속 흡입구 형상의 특성상 카울의 내부와 외부로 계산 영역을 분리해야 했으며, 이를 위해 카울 침점과 만나는 정체 유선을 반복 계산을 통해 찾아 계산 영역을 분할하는 방법을 고안하였다. 그 결과 초

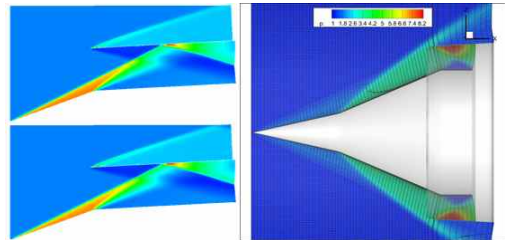


Fig. 1 Pressure contours (left top: 2-D OLF, left bottom: 2-D Euler, right: 3-D)

음속 흡입구에서 발생하는 압축성 유동 현상을 잘 해석해 낼 수 있었다. OLF 기반의 유동 해석 방법은 전처리 단계 없이 자동으로 직교성을 만족하는 최적의 격자를 얻고, 적은 계산 시간으로 2차원 유동 해를 계산한다는 점에서 매우 효율적이다. 따라서 본 연구에서 적용 및 개발한 OLF 기반의 초음속 흡입구 유동 해석자는 빠른 속도로 정확한 결과를 얻어야 하는 예비 설계를 위한 유동 해석자로 활용성이 높을 것으로 기대된다.

**후 기**

본 연구는 국방과학연구소의 개별기초 연구사업(0498-20150024)과 민•군협력 기술사업(Civil-Military Technology Cooperation Program)의 지원을 받아 작성되었습니다.

**참고문헌**

[1] 1999, Smart, M. K., "Optimization of Two-Dimensional SCRamjet Inlets," J. of Aircraft, Vol.36-2, pp.430-433.  
 [2] 2006, 정석영, "원추 유동 해와 최적화 기법을 이용한 축대칭 초음속 흡입구의 예비 설계," 한국항공우주학회지, 제34권, 9호, pp.11-19.  
 [3] 1990, C. Y. Loh and W. H. Hui, "A New Lagrangian Method for Steady Supersonic Flow Computation. I. Godunov Scheme," J. of Computational Physics, Vol.89, pp.207-240.  
 [4] 1994, Cheuk, K. L., "A Second Order Shock-Adaptive Godunov-Type Scheme Based on the Orthogonal Lagrangian Formulation," Master of Philosophy in Applied Mathematics Thesis, Hong Kong University of Science and Technology.  
 [5] 1992, W. H. Hui and C. Y. Loh, "A New Lagrangian Method for Steady Supersonic Flow Computation. II. Godunov Scheme," J. of Computational Physics, Vol.103, pp.465-471.