

Kick Motor 시험장 충격파 전파 예측

옥호남*·김인선**

Prediction of the Blast Wave Propagation Over a Kick Motor Test Facility

Honam Ok* and Insun Kim**

Key Words : KM(Kick Motor), 폭발(Explosion), 충격파(Blast Wave), 축대칭(Axisymmetry), 해석(Prediction)

Abstract(Times New Roman 10pt bold)

A test facility to measure the performance of a KM(Kick Motor) is constructed, and prediction of blast wave propagation over the facility is performed to check if the safety of test personnel in MCC(Main Control Center) can be guaranteed even for the most severe explosion. Assuming that the initial explosion energy is contained in a sphere under the pressure of 500, 1000, 1500 psi, respectively, the radius of the sphere is determined for each pressure to set the mass of contained explosion gas to 35 kg. The material properties of explosion gas are set to be the ones of KM propellant combustion gas under normal condition. To reduce the effort and time required for a complex three-dimensional modeling, the flowfield is approximated to axisymmetry. Calculations are performed for all three initial pressure conditions, and the analysis of the result is given for 1500 psi which is expected to be the worst case. The maximum pressure is 3.5 psig while the minimum pressure is -1.2 psig on the outer wall of MCC, and the maximum pressure difference between the inner and outer walls of protection wall amounts to 3.0 psi.

1. 서론

고체 연료를 사용하는 발사체 상단용 추진기관인 KM(Kick Motor)의 성능을 측정하기 위한 시험 설비의 건설에 있어서, 예상되는 최악의 사태에서도 시험 인력들이 작업 중인 통제동(MCC, Main Control Center) 내부에서는 피해가 발생하지 않도록 충분한 대비가 필요하다. 현재 MCC는 일반적인 폭발 안전 기준을 적용하여 철재와 토사로 구성된 1차 방호벽, 그리고 MCC 건물 바깥에 설치된 2차 강철 보호대로 충격파에 의한 피해를 방지하도록 설계되어 있다. 그러나 일반적인 안전 기준이 아닌 폭발에 따르는 충격파의 전파를 좀 더 상세히 예측하여 설계된 보호 시설들이 충분한지의 여부를 다시 한 번 검증해 볼 필요성이 있으며, 본 논문에서는 이에 대한 해석 결과를 기술하고자 한다. 엄청난 노력과 시간을 요하는 3차원 비정상 충격파 전파를 직접 해석하기 보다는 단시간에 결과를 얻을 수 있도록 축대칭 형상으로 모델링하였다. 계산 결과 외에도 추후 유사한 문제를 해석함에 있어서 참고가 될 수 있도록 초기 조건 설정의 문제점 및 계산 기법 등에 대하여도 기술해 두고자 한다.

2. 계산 조건 및 형상

KM의 추진제는 약 1,600 kg으로 추진제 전부가 한꺼번에 연소될 경우 그 폭발 에너지는 TNT 125 kg과 같은 것으로 추산되고 있다. TNT의 단위 질량당 폭발 에너지가 약 4.18×10^6 Joule이므로 KM 추진제 전체의 폭발 에너지(E_0)는 5.225×10^8 Joule이 된다. 폭발 시 생긴 연소 가스는 구(Sphere) 모양을 형성한다고 가정하며, 이때 구의 반경(R_0), 내부 압력(P_0) 및 온도(T_0), 연소 가스의 비열비(Specific Heat Ratio, γ) 및 분자량(Molecular Weight)의 값이 주어져야 한다. 먼저 구 내부의 압력을 1,000 psi로 가정해 보았으며, 이는 KM 정상 작동 시의 연소실 압력에 해당하므로 그 때의 가스 물성치와 연소 조건을 사용하면 온도 3,465 K, 밀도(ρ_0) 6.8135 kg/m³, 분자량 28.049 kg/kmole, 비열비 1.1327, 정압 비열(C_p) 3819.9 Joule/kg-K가 된다. 물성치는 온도 및 압력에 따라 달라져야 하나 정확한 자료가 부족하므로 일정하다고 가정하였으며, 이것이 보수적인 결과를 가져올지 아닐지는 검토가 필요한 것으로 보인다.

구 내부 가스의 물성치와 연소 조건이 설정되었으므로, 구 내부에 포함된 에너지의 양이 앞에서 기술한 폭발 에너지와 같아지도록 하여 구의 반경을 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

* 한국항공우주연구원, honam@kari.re.kr

** 한국항공우주연구원, iskim@kari.re.kr

$$E_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rho_0 c_v T_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rho_0 \gamma c_p T_0 \quad (1)$$

이 식에 따르면 구의 반경은 약 1.07 m가 되며, 이 경우 총 체적이 5.13 m³이므로 연소 가스의 밀도를 곱해 주면 구 내부에 포함된 물질의 총중량이 약 35 kg이 된다. 앞에서 구 내부에 포함된 가스는 추진제 전체가 연소된 것으로 하되 그 에너지는 등가 TNT 중량에서 구하였으며, 내부의 유동 조건은 압력을 일단 1,000 psi로 가정하고 이에 상응하는 온도 및 물성치 등을 설정하였다. 그런데 이 과정에서 설정한 가정이나 조건 등이 서로 불일치되면서 구 내부에 포함된 물질이 그 질량이 추진제 중량은 차치하고라도 고성능 폭약인 TNT 125 kg보다도 작은, 즉 TNT 보다 약 3.6배 에너지 집적도가 높은 것으로 되어 버렸다. 따라서 추진제의 폭발 조건을 설정하는 위의 과정은 전반적으로 재검토하여 더욱 정확한 초기 조건을 설정할 필요성이 있음은 확실하다. 그럼에도 불구하고 추진제의 폭발과 관련한 물리적 현상의 불확실성, 그리고 등가 TNT 중량 추정에 사용된 엄청난 보수적 가정들을 고려할 때 더 이상의 정확한 초기 조건의 설정이 현재로서는 어려운 것으로 보인다. 이러한 상황을 고려하여 앞에서 말한 모순에도 불구하고 현재까지 설정된 값들을 계산의 초기 조건으로 설정할 필요성이 있다는 결정을 내렸다. 따라서 본 계산은 이상의 초기 조건을 그대로 사용하되 충격파의 전파 및 강도에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 초기 압력의 값을 변화 시켜 보기로 하였다. 단 구 내부에 포함된 초기 에너지의 값은 일정하게 유지해야 하므로 식 (1)에 따라 압력을 높일 경우 구의 반경을 줄였다. 이때 온도는 일정하게 유지되는 것으로 가정하였으며, 이에 따라 밀도가 높아지므로 체적 감소에도 불구하고 내부에 포함된 물질의 중량을 줄어들지 않는다. 표 1에 나타낸 바와 같이 압력 1,000 psi인 조건을 기준으로 하여 각각 500 psi씩 압력이 높고 낮은 두 가지 조건에 대하여 추가로 계산을 수행하며, 이때 구 내부의 물질의 중량과 에너지는 각각 35 kg과 5.38×10⁸ Joule로 일정하다.

Table 1 Initial Conditions in the Sphere

	Pressure (psi)	Temperature (K)	Density (kg/m ³)	Radius (m)
Nominal	1000	3465	6.8135	1.070
High Pr.	1500	3465	10.22025	0.935
Low Pr.	500	3465	3.40675	1.349

KM 시험장은 KM의 폭발에 대비한 방호벽 및 그 외곽에 위치한 통제동(Main Control Center, MCC)로 되어 있으며, MCC는 충격파에 의한 직접적인 영향으로부터 건물을 보호하기 위해 강철 구조물로 된 보호대가 세워져 있다. 따라서 그 형상은 3차원적 특성을 강하게 지니고 있으나, 본 계산에서는 그림 1과 같이 축대칭 형상으로 가정하고 계산을 수행하였다. 축대칭 계산이 3차원 계산에 비하여 좀 더 보수적인 결과를 나타낼 것이라고 추정되나 확실한

근거를 가진 것은 아니다. 그럼에도 불구하고 비정상 유동 해석에 따르는 엄청난 계산 노력 및 시간을 줄이기 위해 우선적으로 예비 계산의 성격으로 축대칭 계산을 수행하였으며, 오차의 범위를 고려하여 위험 수준의 충격파가 MCC에 작용할 경우 정밀 3차원 계산을 수행할 계획이다.

3. 계산 기법 및 결과

계산을 수행하기에 앞서 먼저 본 문제의 물리적 특성을 알아보기 위해 몇 가지 간단한 특성값들을 차원 해석을 통해 알아보았다. 특성 길이(λ)의 경우 $(E_0/p_a)^{1/3}$ 으로 나타낼 수 있으며, 이 경우 약 17.446 m가 된다. 특성 속도(v_R)는 $\sqrt{E_0/m_0}$ 에 의해 얻을 수 있으며 그 값은 3,920 m/sec이다. 특성 길이를 특성 속도로 나눈으로써 특성 시간(τ)의 값은 4.45×10⁻³ sec이 되며, 비정상(Unsteady) 계산의 시간 간격을 10⁻⁵ sec로 할 경우 충분히 물리적으로 타당한 값이 될 것임을 알 수 있다.

그림 1에 Gridgen[1]으로 형성한 축대칭 계산 격자를 나타내었으며, 회전축이 수평이 아닌 수직 방향임에 유의해야 한다. Fluent[2]로 계산을 수행할 예정이므로 정렬 및 비정렬 격자를 혼합하여 사용할 수 있으며, 이에 의해 계산 영역을 몇 개의 단순한 영역으로 쪼개는데 어려움이 없다. 연소 가스가 포함된 구의 내부에는 전술한 물성치를 가진 연소 가스만이 들어 있으며, 그 외부에는 공기가 들어 있다. 공기 및 연소 가스의 2가지 가스가 혼합된 경우이므로 종(Species)의 질량 보존 방정식을 해석하였으며, 비점성 계산이므로 물리적으로 확산에 의한 두 가스의 섞임은 없어야 한다. 또한 초기 조건 설정의 편의를 위해 연소 가스가 포함된 구와 외부 유동장을 2개의 별개의 영역(Zone)으로 나누어 두었으며, 초기 조건 설정이 끝난 후에는 이 두 영역을 합하여 주었다. 처음부터 1개 영역으로 하고 구 내부만을 나타내는 어떤 함수를 정의하여 이에 따라 초기 조건을 주는 방법도 가능할 것으로 생각되나, 2개 영역으로의 분할이 더 단순한 과정으로 보이므로 이를 택하였다. 충격파의 전파는 전형적인 비정상(Unsteady) 유동 문제이므로, 2.5×10⁻³ sec 간격으로

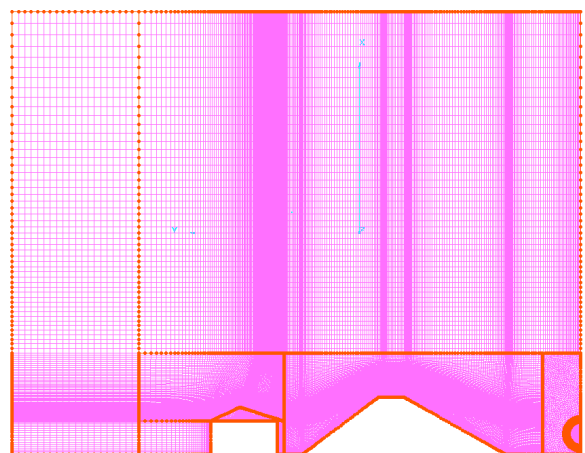


Fig. 1 Axisymmetry Model of the KM Test Facility

결과를 저장하도록 하여 이를 후처리 하였으며, 예비 계산에서 이 정도의 시간 간격이면 충분히 충격파가 MCC를 지나가는 과정을 나타낼 수 있는 것으로 나타났기 때문이다.

먼저 최악의 경우에 해당하는 구 내부 압력이 1,500 psi인 경우에 대한 해석 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림은 측정압(절대압-대기압)의 크기를 psi 단위로 나타낸 것으로 -1.0(푸른색)부터 4.0(붉은색) psi의 값이 20 단계의 등압 선도로 표시되어 있다. 그림 (a)에서 푸른 저압으로 표시된 구 모양은 초기의 고압 영역을 나타내며 충격파의 반경 방향 전파와 함께 이미 초기 고압 영역이 저압으로 팽창되어 버렸음을 나타낸다. 이 시점에서 초기의 구에서 퍼져 나온 충격파가 지면과 만나 복잡한 유동 현상을 나타내며, 그림 (b)의 다음 순간에서는 저압 영역이 확장되어 지면과 만나게 됨을 알 수 있다. 여기까지 발생하는 현상이 물리적으로 가장 복잡하며, 실제로 이 순간까지가 계산의 수렴에 어려움을 나타내기도 하였다. 다음으로 그림 (b), (c), 그리고 (d)에서 볼 수 있듯이 충격파의 전면(Front)이 방호벽을 따라 넘어 가고 있으며 전면의 표면적이 넓어짐에 따라 충격파의 강도도 급격히 약화되고 있음을 알 수 있다. 특히 충격파 전면이 방호벽의 MCC 측 벽면을 따라 넘으면서 팽창되어 그 강도가 약해지나 (e)에서 (h)까지에서 볼 수 있듯이 보호대를 만나면서 그 영역에서 다시 압축됨을 알 수 있다. 특히 보호대에 부딪친 충격파의 전면은 반사되어 나가면서 (h)에서 보듯이 더 강한 충격파로 변하게 된다. (f)에서 알 수 있듯이 폭발 후 0.0475초 전 후에 충격파가 보호대에 도착하게 되며 (i)의 0.0500초 후에 보호대를 완전히 지나가게 된다. (k)에서는 0.0675초 후에 충격파가 MCC의 외벽을 지나게 되며 이때 보호대와 MCC 사이에 다소 강한 압력이 형성됨을 알 수 있다. (l)에는 충격파가 MCC를 완전히 지나간 후의 모습을 나타내었으며, 보호대 앞면에는 팽창 영역이, 뒷면에는 고압 영역이 형성되어 이 순간에는 보호대에 충격파의 진행과 반대 방향으로 힘이 작용하게 됨을 알 수 있다. 충격파가 완전히 지나갈 때 까지 보호대 및 MCC 외벽에 작용하는 압력의 최대값은 3.0 psig를 넘지 않음을 알 수 있으며, 부압의 경우 약 -2.0 psig의 값을 나타내기도 한다.

그림 3에는 그림 2 (m)에 표시한 지점에서의 시간에 따른 초과 압력(Over Pressure), 즉 절대압에서 대기압을 뺀 값을 psi 단위로 나타내었다. 점 1과 3은 보호대 외벽이며 2와 4는 같은 지점에서의 보호대 내벽을 나타낸다. 전술한 바와 같이 점 1 영역에서는 충격파가 반사되어 나가면서 강한 팽창파가 형성됨을 알 수 있으며, 이에 따라 점 1과 2의 압력차는 $t=0.08$ sec 부근에서 최대 약 3.0 psi 정도가 될 수 있음을 알 수 있다. 점 3과 4의 압력차는 점 1과 2에서 만큼 크지는 않으며, 보호대와 MCC 사이의 공간에 해당하는 점 2와 5, 그리고 점 4와 6에서는 동일한 압력을 각각 나타낸다. MCC 외벽에서는 최대 압력 1.5 psig, 최소 압력 -1.2 psi 정도가 작용한다.

여기에 나타내지는 않았으나 표 1의 나머지 두 경우에 대해서도 해석을 수행하였으며, 그림 3과 비교해 보면, 충격파의 도달 시간, 최대 및 최소 압력 등이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 계산 결과가 많지 않아 이로부터 어떤 명확한 결론을 이끌어 내기는 어려우나, 이상의 결과들은 어느 지점에서의 폭발에 의한 충격파 및 팽창파의 전파에 따른 최대 혹은 최소 압력의 크기는 폭발 에너지의 양이 같으면 초기 조건으로 설정하는 압력의 값에는 크게 영향을 받지 않은 것을 의미하는 것으로 보인다. 그렇다면 본 계산에 앞서 가졌던 의문들, 특히 초기 조건의 불확실성에 따르는 계산 결과의 신뢰도 문제는 어느 정도 해소 될 가능성이 있을 것이다.

4. 결론

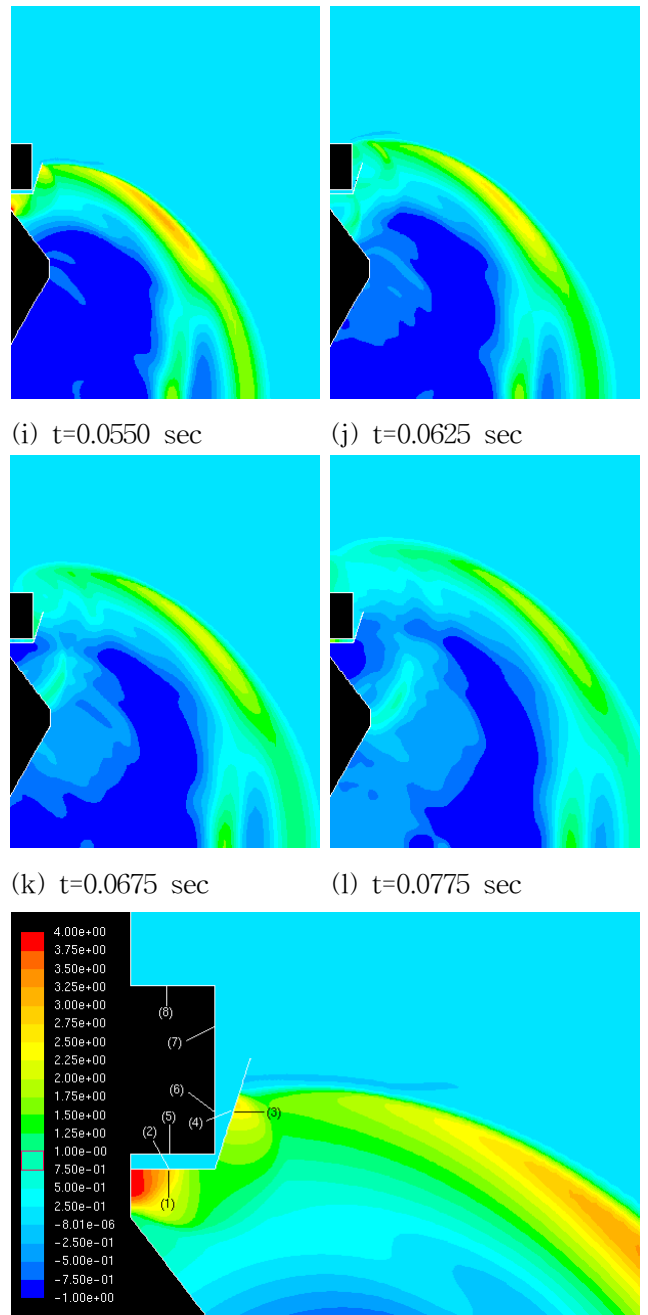
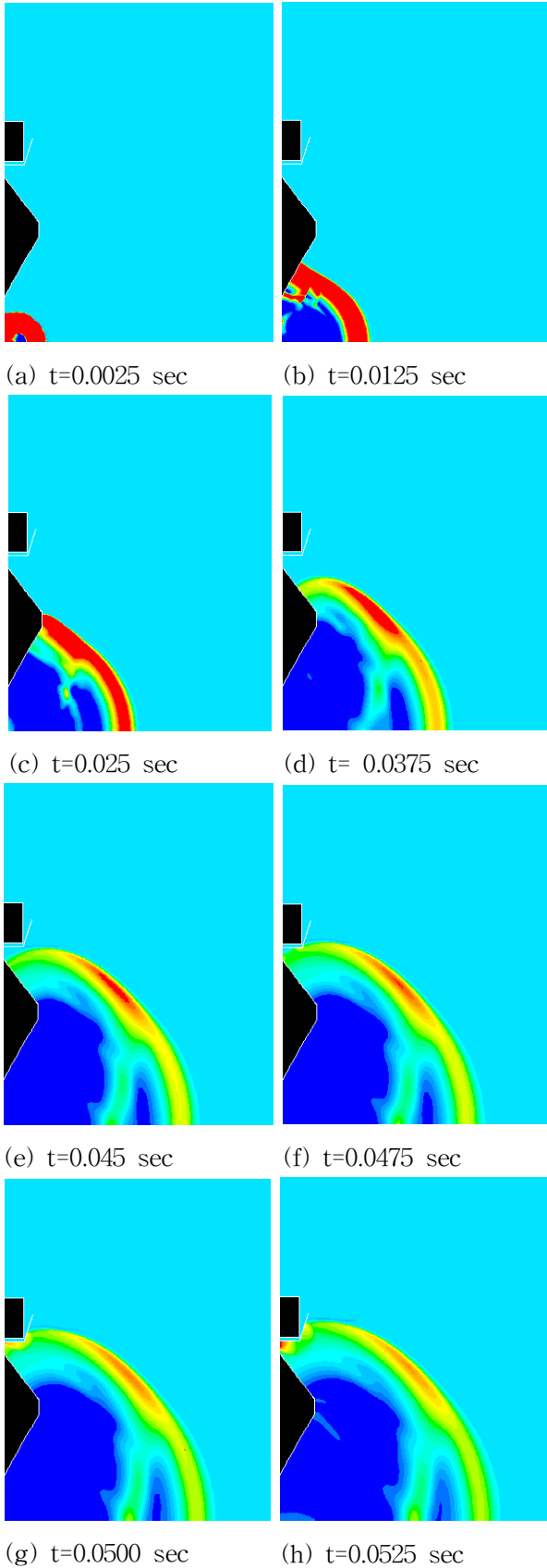
KM 성능 측정 시험 설비의 통제동(MCC, Main Control Center)이 예상되는 최악의 사태에서 내부에 있는 시험 수행 인력들의 안전을 보장할 수 있는지의 여부를 확인하기 위하여 충격파의 전파를 해석하였다. KM 추진제가 한꺼번에 연소될 경우 발생 에너지의 양이 TNT 125 kg에 해당한다는 전제하에 연소 가스의 온도를 3,465K라고 가정하였다. 폭발에 의한 연소 가스가 계산 초기에 구(Sphere) 내부에 모두 한정되어 있다고 가정하고, 이때 내부의 압력을 각각 500, 1000, 1500 psi로 할 경우 내부에 포함된 물질의 질량이 35 kg이 되도록 구의 반경을 결정하였다. 연소 가스의 물성치는 KM의 정상 연소 시 연소실에서의 값을 취하였다. 복잡한 3차원 형상이기는 하나 계산에 요구되는 엄청난 노력과 시간을 절감하기 위하여 축대칭으로 모델링하였다. 계산 결과 MCC 외벽에는 최대 압력 3.0 psig, 최소 압력 -1.2 psig 정도가 작용하는 것으로 나타났으며, 보호벽의 내외부 압력차는 최대 3.0 psi 정도가 될 수 있는 것으로 나타났다.

본 문제의 해석에 있어서 다음 3가지의 어려움이 있었다. 첫째로 초기 조건 설정의 정확성에 관한 것이다. KM의 폭발에 의해 발생하는 에너지의 총량은 TNT 125 kg에 상응한다는 가정은 상당히 보수적이기는 하나 크게 무리는 없다. 반면 연소 가스가 포함된 구 내부의 초기 압력을 어느 정도로 설정해야 하는지는 불명확하다. 그런데 비록 제한된 계산 결과로부터의 추정이기도 하지만, 어느 지점에서의 폭발에 의한 압력 변화는 폭발 에너지의 양이 일정한 경우 초기 조건으로 설정한 압력의 크기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 다음으로 복잡한 3차원 형상을 축대칭으로 모델링한 기법이 보수적인 결과를 나타낼 수 있는가 하는 점이며, 명확한 물리적 근거는 없으나 축대칭 모델이 충분히 보수적이지는 않더라도 3차원 계산에 비해 크게 다른 결과를 나타내지는 않는 것으로 보인다. 마지막으로 상용 코드인 Fluent를 충격파 전파 문제의 해석에 사용함에 있어서 그 정확도를 검증하지 못했다는 점이다. 현재 코드를 검증하기 위한 시험 결과 내지는 이론적 혹은 해석적 결과들을 찾아보고 있으며, 이러한 문제점들이 모두 해결 되면 본 계산의 신뢰도가 한

층 높아질 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Gridgen User's Manual
- [2] Fluent User's Manual



(m) t=0.0525 sec (Around MCC)

Fig. 2 Pressure Contour Plots for Each Moment (20 Levels from -1.0 to 4.0 psi)

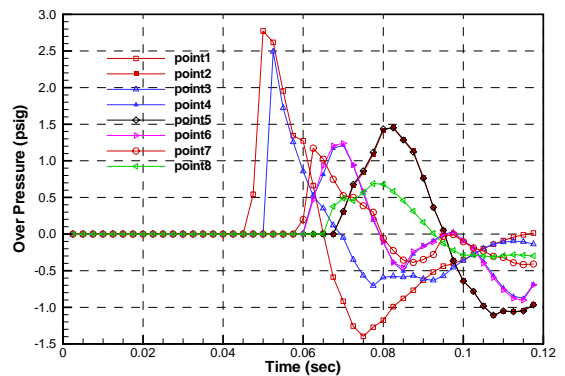


그림 3 주요 지점에서의 시간에 따른 압력 변화 (구 내부 초기 압력 1500 psi)