

폭발현상 해석을 위한 적응적 요소망 생성

전용태[†] · 이민형

세종대학교 기계공학과

Adaptive Mesh Refinement for Dealing with Shock Wave Analysis

Yongtae Jun[†] and Minhyung Lee

Department of Mechanical Engineering, Sejong University

Received 15 July, 2013; received in revised form 31 October, 2013; accepted 4 November, 2013

ABSTRACT

Computer simulation with FEM is very useful to analyze hypervelocity impact phenomena that are tremendously expensive or otherwise too impractical to analyze experimentally. Shock physics can be efficiently handled by mesh adaptation which allows finite element mesh to be locally optimized to resolve moving shock wave in explosion. In this paper, an adaptive meshing technique based upon quadtree data structure was applied to resolve ballistic impact phenomena. The technique can adaptively refine a mesh in the neighborhood of a shock and coarsen the mesh for the smooth flow behind the shock according to a criterion. The criterion for refinement and coarsening is based upon the standard deviation of the gradient of shock pressure on the associated field. Shock simulation starts with the rough mesh of the pressure field and mesh density is increased locally under the criterion at each time step. The results show that the mesh adaptation enables to minimize the global computation error of FEM and to increase storage and computational saving compared to the fixed resolution of the conventional static mesh approach.

Key Words: Adaptive mesh refinement, FEM (finite element method), Shock wave

1. 서 론

최근 들어 탄두에서 화약의 역할은 기존의 폭발력을 키우는 역할뿐만 아니라 기폭방법의 변화를 통한 탄두의 지능화 등 매우 다양화되고 있다^[1]. 탄두의 화약이 폭발하면 Fig. 1과 같이 주변 매질은 충격파(shock wave)라고 불리는 강한 폭발압력을 받게 되며, 이러한 충격파는 매질의 압력, 밀

도, 온도를 급격히 상승시키면서 매우 빠르게 방사(radial) 방향으로 전파된다. 충격파의 속도는 폭발력에 비례하여 음속보다 빠르며 크기는 폭발원점으로부터 거리의 제곱에 반비례하는데, 충격파는 주변 매질의 성질을 변화시키므로 화약의 물리적 성질 및 파괴력 연구에 중요한 자료가 된다^[2].

폭발연구를 위해서는 폭발원점 주변에 발생되는 강한 충격파의 움직임과 충격파로 인한 인접물질의 거동을 해석할 수 있어야 한다. 이를 위하여 고속으로 충돌하는 물질의 거동해석을 위한 유체역학 코드기반의 유한요소법(FEM)이 현재 널리

[†]Corresponding Author, ytjun@sejong.ac.kr
©2013 Society of CAD/CAM Engineers



Fig. 1 Shock waves carry energy through the medium

리 쓰이고 있다¹³⁻¹⁵. 폭발의 물리적 성질을 해석하기 위해서는 충격파로 인한 인접 물질의 거동이 규명되어야 하므로 화약의 상태방정식(EOS; equation of state), 반응속도 모델, 폭발에너지 등 고압모델 준비가 필수적이다. 또한, 계산의 정확도를 높이기 위하여 FEM 해석영역(field)을 작은 요소(element)들로 나누어 각 요소가 받는 충격압력, 밀도, 변위, 변형률 등을 계산해야 한다¹⁶.

FEM 해석 결과값은 사용되는 요소의 종류와 크기에 매우 큰 영향을 받으므로 효율적인 요소망 생성기술은 매우 중요하다. 따라서, 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 폭발 충격파의 최대값(peak value) 주변처럼 압력이 급변하거나 속도변화가 큰 영역은 조밀한 요소망을 생성해야 한다. 요소망이 필요한 만큼 조밀하지 않으면 계산 중에 물성치의 급격한 변화를 해석 프로그램이 제대로 인식하지 못하고 실제 폭발거동과 다른 결과를 낼 수 있기 때문이다. 그렇다고 해석영역 전체의 요소망을 처음부터 모두 조밀하게 하는 방법도 피해야 한다. 왜냐하면 과도한 요소 수는 계산시간을 크게 증가시킬 뿐만 아니라 서버(server) 메모리 용량을 초과하여 프로그램이 실행 도중에 중단될 수도 있기 때문이다.

따라서 실행도중에 국부적인 해석영역에 대한 요소의 수를 적응적으로 재조정할 수 있는 적응적 요소망 생성기술(adaptive mesh refinement)은 폭발현상 해석에 필수적이라 할 수 있다¹⁵⁻¹⁷. 적응적 요소망 생성기술은 일련의 동적 해석과정에서 이전 단계(time step)의 FEM 해석 결과값을 이용하여 요소망의 조밀도를 국부적으로 재조정한 뒤, 다음 단계의 요소망 입력조건으로 사용하는 기술이다. 이전 단계의 해석결과가 요소망 조밀도에 동

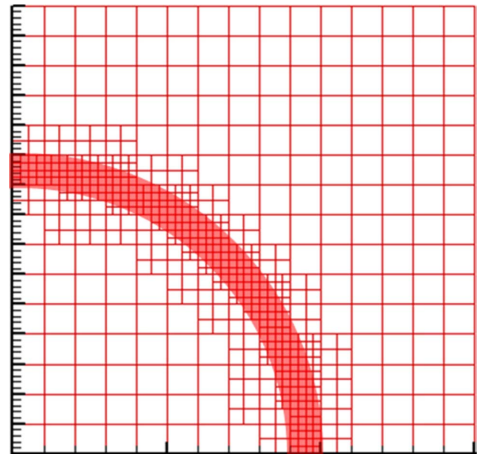


Fig. 2 Example of locally refined mesh

적으로 반영되므로 정확한 해석결과를 빠른 시간 내에 효과적으로 얻어낼 수 있게 된다. Fig. 2는 국부적으로 요소망 조밀도를 다르게 생성한 예를 보여주는데, 물성 값이 큰 부위의 요소크기를 작게 분할하여 계산의 정확도를 향상시킨다. 이와 같이 적응적으로 요소망을 생성하는 방법으로는 국부적으로 절점(node)의 위치를 이동시키거나, 요소망의 크기를 세분화하거나, 또는 모양함수의 차수를 증가시키는 방법이 있다(2.1절).

본 논문에서는 고압폭발 충격파를 해석하기 위한 적응적 요소망 구현방법과 그 적용 효과에 대하여 논하고자 한다.

2. 적응적 요소망 생성 방법

본 절에서는 폭발 충격파의 2차원 해석을 위한 적응적 요소망 기법의 데이터구조와 분할/통합 방법에 대하여 설명한다.

2.1 적응적 요소망 생성법의 종류

전통적인 적응적 요소망 생성법은 r -법, h -법, 그리고 p -법으로 나뉘어지는데¹⁸, r -, h -, p -법을 조합해서 쓰는 경우가 대부분이다. 절점이동 방법인 r -법은 요소 수와 모양함수(shape function)의 차수(degree) 변화 없이 Fig. 3a처럼 오차가 큰 요소의 크기를 줄이는 방향으로 절점의 위치를 이동시켜서 영역내의 오차분포를 균일하게 만드는 방법이다. 반면에 h -법은 Fig. 3b와 같이 오차가 큰 요소를 같은 종류의 작은 요소로 분할하여 오차를 줄

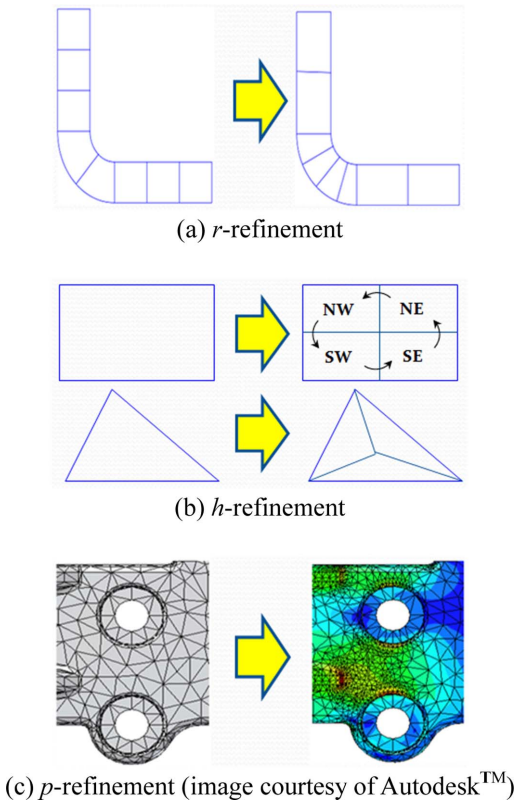


Fig. 3 Various mesh adaptation methods

이는 동시에 오차분포를 균일하게 하는 방법으로 모양함수 변화는 없으나 요소 수와 요소들의 연결 정보(connectivity)가 변경된다. p -법은 오차가 큰 요소의 모양함수 차수를 증가시켜 요소를 세분화 하는 방법으로 Fig. 3c의 예와 같다. 본 연구의 적응적 요소망 생성 법은 h -법에 기반을 두고 있으며, 2차원 사각요소를 분할하여 4개의 작은 요소(quadtree)로 파생시키며(Fig. 3b 참조), 3차원 육면체 요소는 8개의 요소(octree)로 분할된다.

2.2 적응적 요소망 데이터 구조

폭발에 의한 충격파의 진행방향은 직선적이기 때문에 정렬(structured)된 사각요소 사용이 가능하다. 카테시안(Cartesian) 영역을 해석하는데 적합한 사각형 요소는 격자이용 효율이 매우 높고 이웃 요소 간의 연결정보가 상대적으로 간단하다. 본 연구에서는 폭발영역의 한 단면을 분석하기 위하여 2차원 해석모듈을 우선적으로 구현하므로 사각요소의 quadtree 데이터 구조를 채택하였다. Quadtree는 Fig. 4와 같이 레벨(level) 0인 루트(root)

요소로부터 시작되어 분할기준에 따라 하위레벨로 반복적으로 분할이 이루어지는 구조다. 분할이 반복되면, 다양한 크기의 사각요소들로 데이터 트리(tree)가 구성되어 임의 요소 주변의 이웃 요소를 탐색하기가 용이하다. 하지만, 요소가 필요 이상으로 너무 작게 분할되는 것을 방지하기 위하여 최대 분할횟수를 제한하거나 요소의 최소크기(minimum allowable size) 값을 제한해야 하는데, 본 연구에서는 분할이 레벨 3까지만 이루어지도록 하였다.

아래 코드는 quadtree 데이터 구조의 한 예를 보여준다.

```

class QuadTree {
    float pressure, mass, strain, ... ;
    float CenterX, CenterY;
    ...
    QuadTree* NorthWest;
    QuadTree* SouthWest;
    QuadTree* SouthEast;
    QuadTree* NorthEast;
};
QuadTree* Element;
    
```

요소가 분할되면, 네 자식요소의 연결순서는 NorthWest(NW)→South West(SW)→SouthEast(SE)

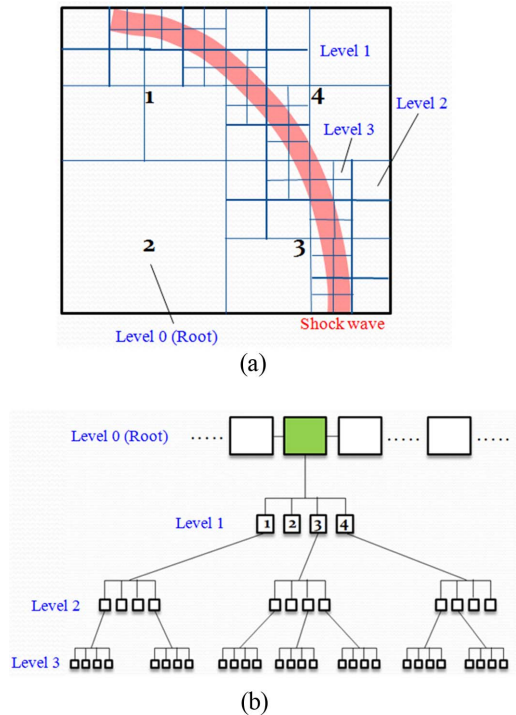


Fig. 4 Quadtree data structure

→ NorthEast(NE)와 같이 반 시계방향(CCW)을 따르도록 하였다(Fig. 3b 참조). 예를 들어, Fig. 4a와 같이 분할된 요소망의 전체 데이터 구조는 Fig. 4b의 트리 구조처럼 구성된다.

2.3 적응적 요소 분할

2.3.1 분할 알고리즘

적응적 요소망 분할은 아래와 같은 다섯 단계로 구성되며 분할 순서도는 Fig. 5와 같다.

(STEP 1) 폭발거동 해석영역이 결정되면 초기 요소망을 생성하고, 시간 t 에서 화약의 상태방정식, 반응속도 모델, 폭발에너지 등 고압모델을 활성화한다.

(STEP 2) 모든 개별요소의 폭발압력, 변위, 질량 등 필요한 물성 값들과 압력구배 값 P_i 를 계산하고, 전체 요소들의 압력구배의 표준편차(σ)를 구한다.

(STEP 3) 분할/통합 판정기준을 이용하여 요소를 분할하거나 분할되었던 요소를 통합한다.

(STEP 4) 새롭게 분할된 요소망은 다음 시간($t + \Delta t$)의 FEM 해석 모듈(solver)의 입력조건으로 적용시켜 해석을 수행한다. 즉, 이전 cycle의 해석 결과를 바탕으로 요소망의 조밀도를 국부적으로 재조정하여 다음 해석 cycle에 반영한다.

(STEP 5) 마지막으로, 위 STEP 2~4를 충격과파가 진행되는 주어진 각 cycle 또는 일정한 시간 간격(Δt)마다 적용시켜서 적응적 요소망을 생성한다.

2.3.2 요소분할 및 통합 임계값 (Threshold)

시간에 따라 폭발 충격과파가 진행된다면, 임의 시

간에 충격과파 주변에 위치한 요소들은 분할되어야 하고 충격과파가 지나가버린 위치의 분할요소들은 다시 자동으로 통합되어야 한다. 이를 위해서, 적절한 요소분할 및 요소통합 판정기준(criteria)이 필요한데, 본 연구에서는 분할/통합판정을 위해서 충격과파의 가장 중요한 물성 값인 개별 요소의 폭발압력 구배를 기준으로 삼았다.

식 (1)과 같이 임의 i 번째 요소의 압력 값과 그 요소를 둘러싸고 있는 인접 요소들의 압력 값들의 구배를 비교하여 가장 큰 구배를 i 번째 요소의 P_i 로 정한다^[6,7].

$$P_i = l_i^{1/r} \max_{\text{faces}}(|\Delta q_i|) \tag{1}$$

여기서, Δq_i 는 경계 면에서 압력구배, l_i 는 경계 면의 크기, r 은 가중계수(weight)를 뜻하며 본 연구에서는 2를 사용한다. 또한, 전체 요소의 압력구배 표준편차는 식 (2)와 같은데, n 은 전체 요소의 수를 나타낸다.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2}}{n} \tag{2}$$

이로부터 요소분할 및 통합기준은 다음과 같다^[7].

$$\begin{cases} P_i \geq \sigma & \text{refinement} \\ 0.1\sigma \leq P_i < \sigma & \text{no change} \\ P_0, P_1, P_2, P_3 < 0.1\sigma & \text{coarsening} \end{cases} \tag{3}$$

즉, i 번째 요소의 압력구배 P_i 값이 표준편차 σ 보다 크면 해당요소를 분할(refinement) 하고, 만

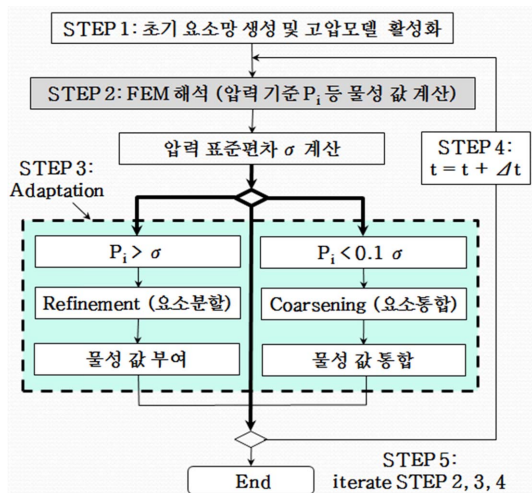


Fig. 5 Mesh adaptivity methodology

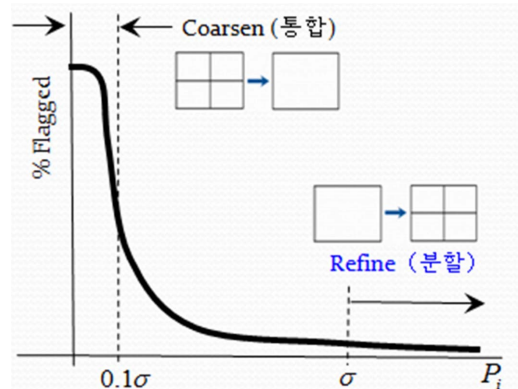


Fig. 6 Threshold for refinement and coarsening^[7]

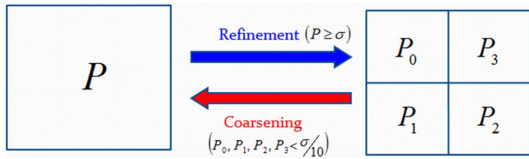


Fig. 7 Refinement and coarsening procedure

약 분할되었던 4개의 자식요소들의 압력구배(P_0, P_1, P_2, P_3) 모두가 σ 의 10% 보다 작은 경우에는 네 요소를 통합(coarsening)하였다^[7]. 위 두 조건에 해당되지 않는 요소들은 다음 cycle까지 변화 없이 그대로 유지시킨다. 이와 같은 분할 기준을 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. 단, 식 (3)의 요소 통합 상수 0.1은 화약재료 및 폭발특성에 따라 조정이 가능하다.

2.3.3 요소의 초기 물성 값(field values) 부여

Fig. 7과 같이 부모요소가 4 개의 자식요소로 분할되거나 역으로 통합되는 경우, 요소들 사이의 물성 값(압력, 온도, 질량, 밀도 등)도 그에 따라 적절히 배분되거나 통합되어야 한다.

본 연구에서 사용한 압력(P), 온도(T), 질량(m), 밀도(ρ)에 대한 배분관계와 통합관계는 각각 식 (4), (5)와 같다(단, V 는 부피).

$$\begin{cases} P_{k(k=0,1,2,3)} = P \\ T_{k(k=0,1,2,3)} = T \\ m_{k(k=0,1,2,3)} = \frac{1}{4}m \\ \rho_{k(k=0,1,2,3)} \approx \rho \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 P_k \\ T = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 T_k \\ m = \sum_{k=0}^3 m_k \\ \rho = \frac{\sum m_k}{\sum V_k} \end{cases} \quad (5)$$

즉, 요소를 분할할 때 부모요소의 압력 값과 밀도 값을 그대로 각각의 자식요소에 부여하였으며 질량은 부모요소의 1/4씩 균등하게 배분하여 부여하였다. 이와 같이 부여된 요소의 물성 값은 다음

시간단계 초기값으로만 적용되고, 실제 FEM 해석 과정에서 정확한 값이 다시 계산된다(식 (4)). 반면에 요소를 통합하는 경우, 자식요소들의 압력 값과 밀도 값들을 평균하여 부모요소에 적용하였으며 부모요소의 질량 값은 자식요소들의 질량을 모두 합하여 부여되었다(식 (5)).

2.3.4 최대 분할 횟수 제한

n 을 요소분할 횟수, l_0 를 초기요소 길이라 할 때, 분할된 요소의 길이 l 은 식 (6)과 같다.

$$l = l_0 \times 2^{-n} \quad (6)$$

요소들이 필요이상으로 너무 작게 분할되는 것을 방지하기 위해서 최대 분할횟수를 제한하거나 최소 요소길이를 제한하였다.

3. 실행 조건

폭발 충격파 해석시 적응적 요소망의 효과를 검증하기 위하여 폭발 충격파에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 현재 본 연구팀에 의해 연속체기반 FEM 해석코드(solver)를 개발 중에 있으며, 개발이 완료되면 본 적응적 요소망 코드와 통합될 예정이다. 고압물성 FEM 해석코드는 고압충격 재료 모델과 화약기폭 모델에 대한 상태방정식으로 구성된 동적 재료모델링을 기반으로 폭발 시 물질의 운동 및 상태변화를 종합적으로 정량화한 전산 프로그램이다.

3.1 폭발 해석영역 및 고압 충격파 모델

일반적으로 폭발이 일어나면 충격파는 Fig. 8과 같이 폭발원점으로부터 방사방향으로 진행한다. 충격파는 모든 방향에 대하여 같은 패턴으로 대칭적으로 진행되므로 본 연구에서는 제 1 사분면(quadrant)에 국한시켜 해석한다. x 는 수평축, y 는 수직 축이며, r 은 원점으로부터 요소까지의 직선 거리를 나타낸다. 둥근 떠는 임의의 시간 t 에서의 폭발 충격파를 보여주며, 충격파 주위의 화살표는 충격파의 진행방향을 나타낸다.

실제로 정확한 FEM 해석을 위해서는 다양한 폭발 실험모델에 근거한 고압모델이 필수적이다. 현재 폭발압력 산정에 많이 사용되는 모델은 미국에서 개발한 CONWEP이다^[9]. CONWEP 프로그램

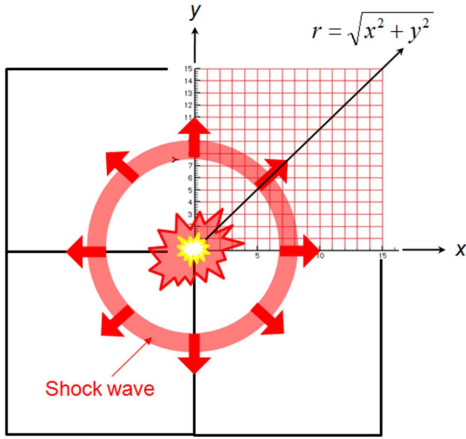


Fig. 8 Field for shock wave on the 1st quadrant

은 실험결과를 바탕으로 화약폭발 에너지를 동일한 TNT 에너지로 환산하여 최대 폭발압력, 충격량, 지속시간 등을 산출한다. 본 연구에서는 식 (7) 과 같이 폭발 충격과 모델로 지수함수 기반의 폭발압 공식을 사용하였다.

$$P(k) = \begin{cases} P_0 \times e^{r-k}, & r-k \leq 1 \\ 0, & r-k > 1 \end{cases} \quad (7)$$

where $\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ k = 0, 1, 2, \dots (\text{cycle 수}) \end{cases}$

여기서 P 는 압력, P_0 는 화약 및 폭발환경에 따라 결정되는 최고압력상수, r 은 폭발원점에서 임의 요소까지의 거리, k 는 계산 주기(cycle)를 나타낸다. 폭발압 지수함수 모델은 실제 폭발 압력구조와 잘 일치하는데, Fig. 9와 같은 모양을 갖는다.

3.2 해석에 사용된 요소망 종류

폭발거동 해석영역을 가로와 세로 모두 10 m로 설정하였고, 폭발은 중심에서 일어난다고 가정하였다(Fig. 8 참조). 폭발 원점을 중심으로, 1 사분면 만을 해석하므로 실제 해석 영역은 5 m × 5 m

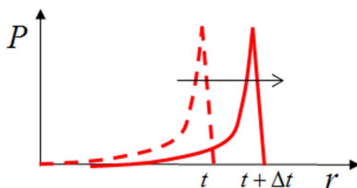


Fig. 9 Progressive shock wave model

Table 1 Various mesh types for comparison

	Type 1	Type 2	Type 3
요소 수	2,500 (50 × 50)	40,000 (200 × 200)	초기 2,500 (가변적)
요소길이 (cm)	10.0	2.5	2.5~10.0
요소길이 비율	1 (기준)	1/2 ²	1, 1/2, 1/2 ²

가 된다. 적응적 요소망 기법의 효과를 검증하기 위해서는 해석영역 전체를 같은 크기의 요소로 고르게 생성한 요소망과 비교해야 한다. 본 논문에서는 Table 1과 같이 세 종류의 요소망을 선정하여 계산의 효율성과 정확도를 서로 비교하였다.

Type 1과 Type 2는 해석영역 전체를 같은 크기의 요소로 고르게 생성하였다. Type 1은 길이 10 cm 인 초기 단위요소를 이용하였으며 요소 수는 2,500 개(50 × 50)로 고정이고, Type 2는 초기 요소보다 1/4 작은 요소(2.5 cm)들로 40,000개(200 × 200) 생성하였다. 반면, Type 3는 적응적으로 분할된 자동 요소망으로 분할 전 초기 요소망은 Type 2와 동일하게 2,500개의 초기 요소들로부터 시작하여 충격압력 값에 따라 요소분할이 국부적으로 이루어지도록 하였다.

Type 1, Type 2, Type 3에 대한 충격파를 충격파가 10 cm 진행할 때(cycle)마다 개별적으로 계산하였는데, 폭발시작 후 충격파가 발생되어 원점으로부터 4 m 위치를 지나가는 순간(cycle 수 = 40)의 압력을 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 요소망 분할

Fig. 10은 해석에 사용된 세 가지 요소망을 보여 주는데, 각 요소망 중간의 흐린 회색 사분원(quarter-circle)은 cycle 40에서의 충격파를 나타낸다. Type 1은 길이 10 cm의 상대적으로 큰 요소로 생성되고, Type 2는 요소의 크기가 작아서 구분이 명확하진 않지만 길이 2.5 cm의 작은 요소들로 구성되어 있다.

또한, Type 3의 작은 ‘확대’ 창으로부터 요소의 크기가 국부적으로 다르게 생성되었음을 확인할 수 있는데(Fig. 10c), 압력이 높은 충격파 주위에는 작은 요소들로 분할되고 그 밖의 영역은 큰 요

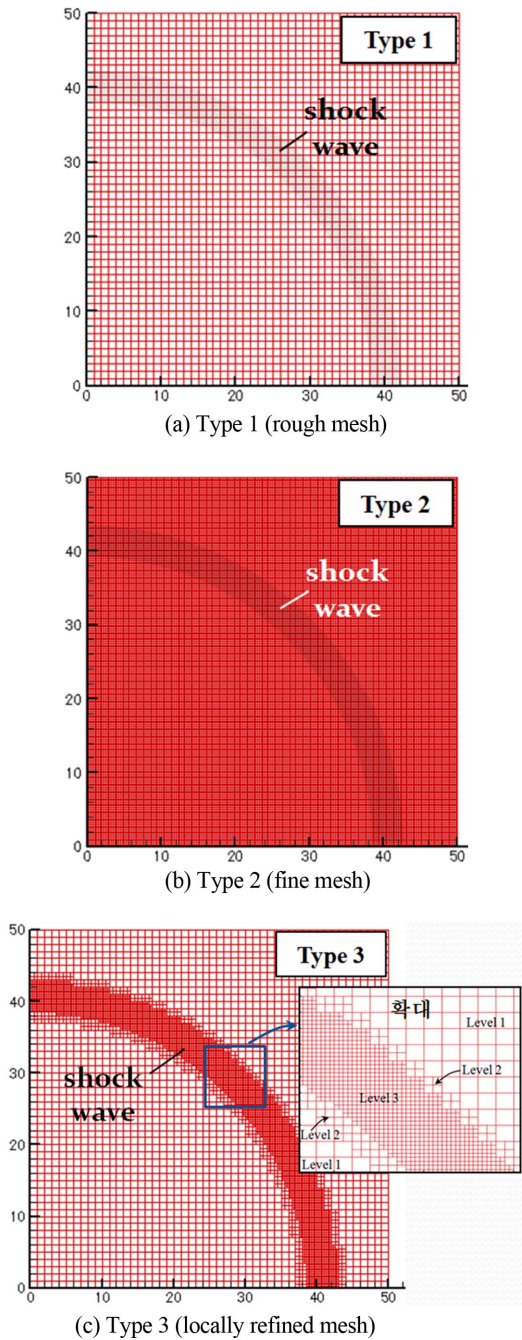


Fig. 10 Various mesh types using Techplot™

소로 이루어져 있음을 알 수 있다. 폭발 후, cycle 이 40까지 수행 되었을 때까지 많은 수의 요소가 분할되어, 처음 2,500개였던 요소 수가 7,249개로 증가하였다. 분할된 요소들은 초기요소와 크기가 같거나(level 1), 1/2 (level 2) 또는 1/4 (level 3)로 크기가 줄어든 요소들로 구성되었다.

4.2 결과 분석 및 고찰

Type 1, Type 2, Type 3 요소 조건들로부터 구한 충격압력 최대값과 이론적으로 산출한 최대값의 크기를 각각 비교하여 적응적 요소망(Type 3)의 효과를 살펴보았다. 폭발압 공식에 사용된 계수 $P_o = 1 \text{ MN/m}^2$, cycle 수 $i = 40$ 일 때, 충격압력의 이론적 최대값은 2.718 MPa이다. Fig. 11은 요소 망 Type 1, Type 2, Type 3에 동일 폭발압 계수 값을 적용하여 검출된 폭발 충격파의 모양을 보여주며, Table 2는 해석을 통하여 구한 Type 별 결과값을 보여준다. 해석결과 Type 1, Type 2, Type 3 요소망의 충격압력 최대값은 각각 2.6323 MPa, 2.7171 MPa, 2.7008 MPa인데, 이론적 최대값과 비교하면 각각 96.8%, 99.9%, 99.3%의 정확도를 갖는다. 즉, 크기가 큰 요소들로 구성된 Type 1의 오차가 3.2%로 상대적으로 가장 컸고, 세밀한 요소들로 구성된 Type 2의 오차가 0.1%로 가장 작았다. 적응적 요소망 기법이 적용된 Type 3의 오차는 0.7%로 Type 2 보다 컸지만, 요소 수는 Type 2 요소 수의 18.1%로 크게 작았다. 요소 수의 감소는 저장용량의 절약뿐만 아니라 실행시간을 크게 줄일 수 있으므로, 결과적으로 요소적용의 효과를 확인할 수 있었다.

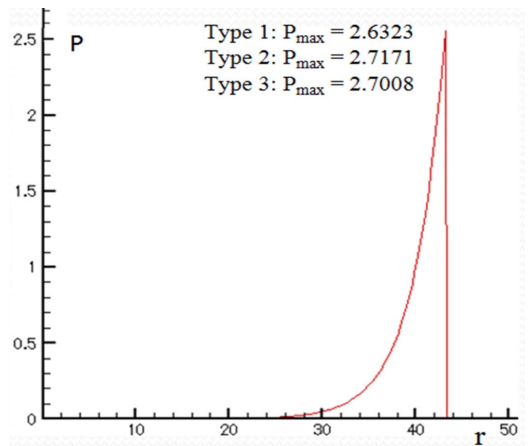


Fig. 11 Peak values of progressive shock waves

Table 2 Analysis results with mesh types

	Type 1	Type 2	Type 3
P_{max} (MPa)	2.6323	2.7171	2.7008
이론값 오차율	3.2%	0.1%	0.7%
요소 수	2,500	40,000	7,249
저장용량 비	1	16	2.9

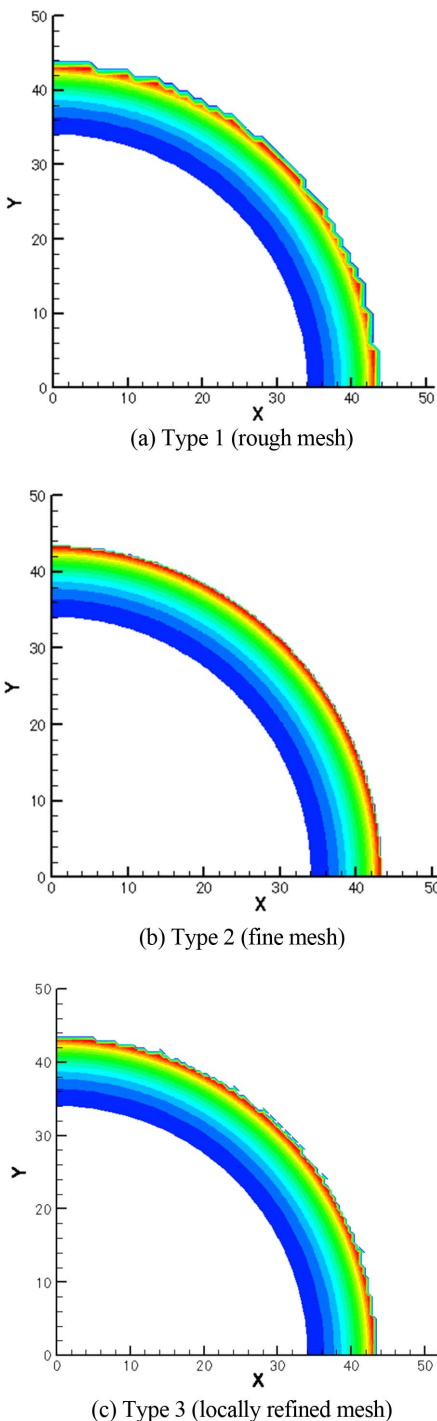


Fig. 12 Detected shock wave with various mesh types using Techplot™

Cycle이 40일 때, 요소 별 FEM해석 결과는 Fig. 12와 같으며, 충격파 외곽의 모양이 Type 별 요소의 조밀도에 따라서 Type 1은 거칠고, Type 2와

Type 3는 상대적으로 부드러움을 확인할 수 있다. 즉, 적응적 요소망 생성기법을 이용하면 적은 수의 요소만을 가지고도 충격압력의 최대값을 잘 포착할 수 있었다.

5. 결 론

고압충격 및 폭발현상 해석에 FEM을 이용하기 위해서는 적절한 요소의 종류와 요소망을 결정해야 하는데 이러한 입력조건은 해석결과의 정확도에 큰 영향을 미치기 때문이다. 본 연구에서는 적응적 요소망을 이용하여 고압충격/폭발에 의한 동적 충격파를 해석하였다. 적응적 요소망 생성은 이전 단계의 충격파의 해석결과를 이용하여 요소망을 국부적으로 수정한 후, 다음 단계 해석결과의 정확도와 계산 효율을 향상시키기 위하여 적용되었다. 적응적 요소망을 이용하여 2차원 폭발 충격력 해석에 적용한 결과, 균일하게 세분화된 요소망과 비교하여 상대적으로 적은 수의 요소망을 갖 고도 대등한 정확도를 갖는 결과를 얻을 수 있었다.

향후에는 고압충격 물성과 화약 기폭모델에 대한 동적 모델링 코드와 통합하여 3차원으로 요소망 분할기법을 확장할 예정이며, 요소의 물성 값을 통계 처리하여 요소분할 임계값을 자동 결정하는 알고리즘을 개발할 예정이다.

감사의 글

This work was supported by the Defense Research Laboratory Program of the Defense Acquisition Program Administration and the Agency for Defense Development of Republic of Korea (UD110089GD).

References

1. Kim, I. and Baek, M.S., 2006, Explosion Phenomenon and High Pressure Physics, *Physics and High Technology*, January/February, 15, pp.31-35.
2. Kim, Y.M., 2011, Dynamic Behavior Analysis of Tunnel Structure under Gas Explosion Load, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, 13(5), pp.413-430.
3. Youn, C. and Jeong, Y.C., 2005, Adaptive Generation for Dynamic Finite Element Analysis, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*,

- 25(6A), pp.989-998.
4. Berger, M.J., 1984, Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations, *Journal of Computational Physics*, 53, pp.484-512.
 5. Berger, M.J., 1989, Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics, *Journal of Computational Physics*, 82, pp.64-84.
 6. Jung, M.K. and Kwon, O.J., 2011, Development of a 2-dimensional Flow Solver using Hybrid Unstructured and Adaptive Cartesian Meshes, *Proceedings Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Jeju, Korea, pp.294-301.
 7. De Zeeuw, D.L., 1993, Topological Structures for Geometric Modeling A Quadtree-based Adaptively-Refined Cartesian-Grid Algorithm for Solution of the Euler Equations, *Ph.D. Thesis, University of Michigan*.
 8. Franke, D., Düster, A., Nübel, V. and Rank, E., 2010, A Comparison of the h -, p -, hp -, and rp -Version of the FEM for the Solution of the 2D Hertzian Contact Problem, *Computational Mechanics*, 45, pp.513-522.
 9. Department of the US Army, 1986, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, *Technical Manual*, TM 5-855-1.



전 용 태

1988년 한양대학교 정밀기계공학과 학사
 1990년 KAIST 생산공학과 석사
 1999년 영국 University of Warwick 박사
 1990년~2002년 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원
 2003년~현재 세종대학교 기계공학과 교수
 관심분야: Digital Geometry Processing, Modeling and Simulation, CAD/CAM/CG



이 민 형

1991년 서울대학교 기계공학과 학사, 석사
 1995년 The University of Texas at Austin 박사
 1996년~1998년 미국 해군대학원 연구 조교수
 1998년~현재 세종대학교 기계공학과 교수
 관심분야: Transient Analysis, Hydrocode Development, Impact/Explosion