

자동차 충돌해석용 프로그램 개발(II)

Development of Finite Element Program for Automobile Crashworthiness(II)

채수원, 최형연, 민동균
S. W. Chae, H. Y. Choi, D. K. Min



채수원
· 1955년 10월생
· 정회원
· 고려대학교 기계공학과
· 유한요소모델링 및 해석



최형연
· 1963년 11월생
· 정회원
· 홍익대학교
· 충돌해석 및 승객거동



민동균
· 1961년 5월생
· 정회원
· 한국기술교육대학교 생산기계공학과
· 소성가공 및 금형설계

인 곡면 및 블렌딩(blending) 곡면상에서의 사각형 요소망 자동생성 기법과 프로그램을 개발하였다. 또한 차체를 구성하고 있는 여러 가지 재료들의 변형거동을 모델링하여 개발중인 충돌 해석 전용 프로그램인 AutoCrash의 모듈로서 완성하였다. 이들은 변형률속도의 영향이 고려된 탄소성 재료, 강재 재료, 포움 재료 및 이방성 재료등으로 정면충돌 해석 및 측면충돌 해석에 필요하다. 한편 접촉처리 모듈에서 접촉탐색법으로는 주종탐색법과 HITA 알고리즘을 병행하여 사용할 수 있도록 프로그래밍하였으며, 불침투 조건의 처리는 벌칙함 수법을 이용하였다.

2. 유한요소 모델링

유한요소법을 포함한 해석기능은 일반적으로 설계된 성능을 검증하기 위하여 설계과정의 마지막 단계에 사용되어 왔다. 그러나 오늘날의 동시공학적인 환경은 해석기능이 설계를 최적화하기 위한 지침으로 사용되도록 요구하고 있다. 특히 주어진 시간안에 여러 가지 설계방안을 검토하기 위해서는 해석에 소

1. 개요

본 연구에서는 차체의 충돌해석 및 모델링을 위하여 판/셸 요소의 자동생성 모듈을 개발하고 재료의 변형특성 모델링 모듈 및 접촉처리 모듈을 개발하였다. 충돌해석용 전처리기능으로는 평면, 실린더 곡면, B-스플라

요되는 시간이 매우 짧아야 한다. 이러한 과정에서 볼 때 유한요소해석에서 가장 많은 노력과 시간이 소요되는 모델링 기능을 보다 효율적으로 자동화시키는 일은 매우 중요한 일이다.

자동차 충돌 해석을 위하여 사용되는 차체 구조는 여러 가지 복잡한 자유곡면으로 구성되어 있다. 따라서 설계 및 해석에서는 3차원 자유곡면 상에서 사각형 판/셀 요소망을 자동적으로 생성하는 프로그램이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 3차원 곡면에서의 요소망 생성을 위하여 기존의 연구 결과¹⁾인 평면, 실린더 곡면, B-스플라인 곡면에서의 사각형 면요소망 생성 모듈을 토대로 자동차의 충돌 및 구조해석을 위한 모델링에 많이 사용되는 세개 또는 네개의 경계곡선으로 이루어진 자유곡면과 복합곡선으로 이루어진 자유곡면에서의 비균일한 요소망 및 균일한 사각형 요소망을 얻기 위한 기법과 프로그램을 개발하였다.

3차원 곡면에서의 요소망 생성은 기본적으로 곡면을 2차원 평면으로 변환시키고 이에 루핑 알고리즘(looping algorithm)을 기초로 한 사각분할법에 의해 요소망을 구성한 후, 3차원 곡면상으로 다시 변환시켜 얻는다.

2.1 블렌딩 곡면에서의 요소망 생성

본 연구에서 블렌딩(blending) 곡면이란 3차원 곡면이 세개 또는 네개의 경계 곡선으로 주어진 경우 경계곡선 내부를 부드러운 곡면으로 생성하는 것을 말한다. 이때 경계곡선이 네개로 이루어진 경우를 보통 Coons 곡면²⁾이라고 한다. 블렌딩 곡면에서의 요소망 생성은 먼저 블렌딩곡면을 평면으로 변환시킨 후 이 평면상에서 사각분할법을 사용하여 요소망을 생성하고 이를 다시 블렌딩곡면상으로 변환시키는 방법을 사용하였다. 이때

블렌딩곡면의 경계는 직선 및 cubic spline으로 정의할 수 있게 되어 있다. 요소망 생성을 위해서는 2차원 평면을 결정하여야 하며 본 연구에서는 네 꼭지점을 같은 평면에 투영시킨 뒤 각 꼭지점을 서로 연결해서 만든 변환 평면을 사용하는 방법을 사용하였다³⁾. 먼저 네개의 곡선으로 구성된 블렌딩곡면을 평면으로 변환시키기 위해서는 Fig.1에서와 같이 블렌딩 곡면의 투영면적이 가장 큰 평면을 사용하였다. 즉, 블렌딩 곡면의 네 꼭지점으로 네개의 삼각형을 만든 후 가장 넓은 면적의 삼각형을 포함하는 평면에 블렌딩 곡면의 네 꼭지점을 투영한다. 이후 투영된 평면에서 사각형 요소망을 생성한다. 이 투영평면 위의 요소망을 블렌딩 곡면으로 변환시키기 위해서 투영된 사각형을 블렌딩 곡면의 매개변수 평면으로 가정하고 생성된 요소망의 절점들의 좌표(x, y)를 해당되는 매개변수(u, v)의 값으로 바꾸며, 이는 식 (1)의 연립방정식을 풀어서 얻는다.

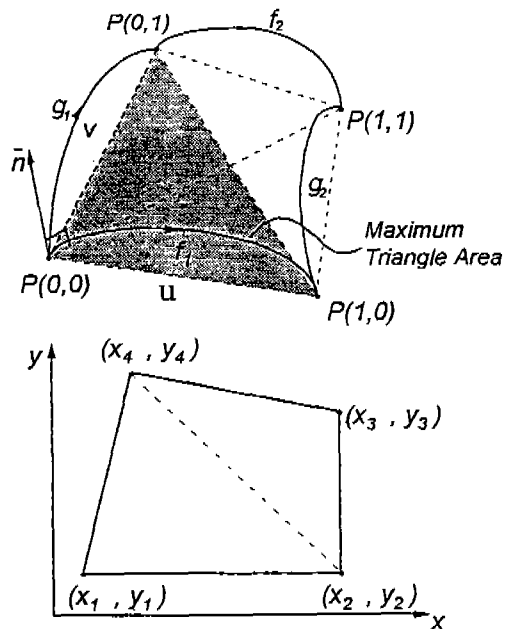


Fig.1 Projected area of a blending surface

$$\begin{aligned}
 x(u, v) &= (1-u)(1-v)x_1 + u(1-v)x_2 \\
 &\quad + (1-u)vx_3 + uvx_3 \\
 y(u, v) &= (1-u)(1-v)y_1 + u(1-v)y_2 \\
 &\quad + (1-u)vy_3 + uv y_3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 얻은 매개변수(u, v)를 사용하여 식 (2)에서의 블렌딩곡면 방정식에 대입하면 투영평면에서 얻은 각 절점들을 Fig. 2에서와 같이 블렌딩곡면상으로 변환시킬 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 P(u, v) &= (1-v)f_1(u) + vf_2(u) + (1-u) \\
 &\quad g_1(v) + ug_2(v) - (1-u) \\
 &\quad (1-v)P(0, 0) - u(1-v)P \\
 &\quad (1, 0) - (1-u)vP(0, 1) - u \\
 &\quad vP(1, 1) \quad (0u, v1) \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 식 (2)에서 경계곡선인 $f_1(u)$, $f_2(u)$, $g_1(v)$, $g_2(v)$ 가 각각 여러 개의 세그먼트(segment)의 조합인 3차 스플라인으로 이루어졌을 때 식 (1)에서 얻은 매개변수(u,

v)에 해당하는 $f_1(u)$, $f_2(u)$, $g_1(v)$, $g_2(v)$ 의 좌표값을 얻기 위해서는 다음과 같은 절차를 따른다. 우선 각각의 세그먼트길이를 계산한 후 이를 합쳐서 경계곡선의 전체길이를 구한다. 그 다음 전체길이를 기준으로 하여 매개변수값이 속해 있는 세그먼트를 찾고, 그 세그먼트에서의 국지(local) 매개변수로 변환한 뒤 이 매개변수를 세그먼트식에 대하여 $f_1(u)$, $f_2(u)$, $g_1(v)$, $g_2(v)$ 의 좌표값을 산출한다. 또 경계곡선인 $f_1(u)$, $f_2(u)$, $g_1(v)$, $g_2(v)$ 가 직선으로 이루어졌을 때는 매개변수값에 따라 비례적으로 해당 좌표값을 산출할 수 있다.

한편 세개의 곡선으로 둘러싸인 블렌딩 곡면은 Barnhill등⁴⁾이 제안한 방법에 의하여 다음과 같이 얻어진다. 이때 세개의 경계곡선은 각각 $f(u)$, $g(v)$, $h(w)$ 에 의해서 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 P(u, v, w) &= \frac{1}{2} \left[\frac{ug(v)}{1-v} + \frac{wh(1-v)}{1-v} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{vh(w)}{1-w} + \frac{uf(1-w)}{1-w} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{wf(u)}{1-u} + \frac{vg(u)}{1-u} \right. \\
 &\quad \left. - wf(0) - ug(0) - vh(0) \right] \\
 u + v + w &= 1 \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서 블렌딩 곡면을 곡선이 정의되는 세 꼭지점을 연결하는 삼각형 평면에 직접 투영시킨 후 삼각형 영역에서 사각분할법에 의해 요소망을 생성한다. 이 때 생성된 요소들의 절점(x, y)에 대한 매개변수(u, v, w)는 투영된 삼각형의 면적 좌표(area coordinates)를 사용하여 구할 수 있다. 즉, Fig.3에서 보는 바와 같이 절점p(x, y)의 면적 좌표 L_1 , L_2 , L_3 는 다음과 같이 얻어진다.

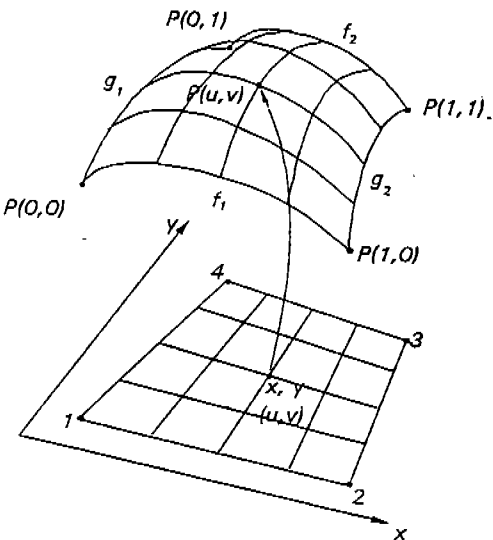


Fig.2 Mesh generation on a blending surface

$$L_1 = \frac{A_1}{A}; \quad L_2 = \frac{A_2}{A}; \quad L_3 = \frac{A_3}{A}$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = 1 \quad (4)$$

여기서 L_i 는 등변형을 삼각형(constant strain triangle) 요소의 보간함수 h_i 와 같으므로⁵⁾, 절점 $p(x, y)$ 에 대한 매개변수(u, v, w)는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = L_2, \quad v = L_3, \quad w = L_1 \quad (5)$$

식 (5)에서 얻은 매개변수(u, v, w)를 식 (3)의 방정식에 대입하면 블렌딩 곡면상으로 변환시킬 수 있다.

2.2 복합곡선(compound curve)으로 이루어진 블렌딩 곡면

복합곡선(compound curve)으로 이루어진 블렌딩 곡면은 네개 이상의 경계곡선으로 정의되는 경우에 사용한다. 여기서 복합곡선이

라 함은 곡면을 형성하기 위해 사용된 경계 곡선 중 두개 이상의 경계곡선이 연결된(me-rged)곡선을 말한다. 예를 들면 Fig.4에서 보는 바와 같이 surface-3은 다섯개의 경계 곡선으로 이루어진 자유곡면인데, 이때 edge-2와 edge-5가 하나의 복합곡선이 되는 것이다. 일반적으로 한 루프를 구성하는 경계 곡선의 수는 임의대로 지정할 수 있으나, 본

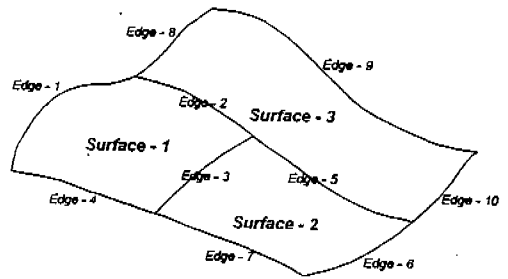


Fig.4 An example of adjoining surfaces which do not share common boundary curve

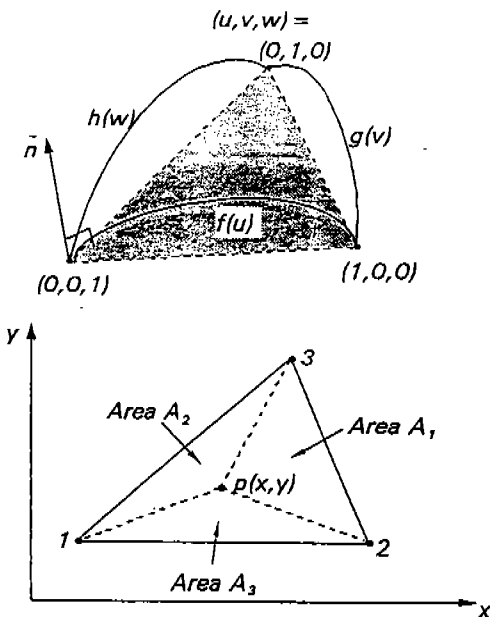


Fig.3 Projected area of a blending surface

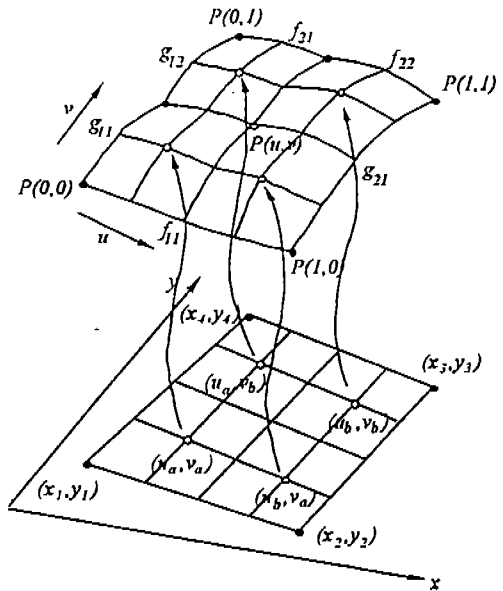


Fig.5 Mesh generating on a sculptured surface with six boundary curves

연구에서는 각 복합곡선이 두개까지의 경계 곡선으로 구성될 수 있게 되어 있으므로 총 여덟개까지의 경계곡선을 하나의 루프로 구성할 수 있게 된다⁶⁾. Fig.5는 두개의 복합곡선을 포함하여 총 여섯개의 경계곡선으로 하나의 루프가 구성된 예를 나타내고 있다. 이 곡면은 네개의 경계곡선으로 구성된 자유곡면에서와 같은 방법으로 변환시킨다. 이후 변환 평면에서 사각형 요소망을 생성한다. 이 변환 평면에서 생성된 요소망을 자유곡면으로 변환시키기 위해서는 요소망의 절점들의 좌표(x, y)를 이에 해당되는 매개변수(u, v)의 값으로 바꾸며, 이 매개변수(u, v)의 값을 식 (6)에 대입하면 매개변수 평면에서 얻은 각 절점들은 Fig.5에서와 같이 자유 곡면상으로 변환시킬 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 P(u,v) = & (1-v)f_{1i}(u) + vf_{2j}(u) + (1-u)g_{1k}(v) + ug_{2l}(v) - (1-u)(1-v)P(0,0) \\
 & - u(1-v)P(1,0) - (1-u)vP(0,1) - uvP(1,1) \\
 & (0 \leq u, v \leq 1; i, j, k, l=1 \text{ or } 2)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

식 (6)은 매개변수(u, v)에 따라 다른 경계곡선을 사용하는 곡면식이다. 여기서 아래첨자 1i, 2j는 매개변수 u방향의 복합곡선에 대한 해당 경계곡선을 나타내고, 아래첨자 1k, 2l은 매개변수 v방향의 복합곡선에 대한 해당 경계곡선을 나타낸다. 즉, 매개변수 u의 값에 따라 f₁₁ 또는 f₁₂와 f₂₁ 또는 f₂₂의 경계곡선을 사용하고, 마찬가지로 매개변수 v의 값에 따라 g₁₁ 또는 g₁₂와 g₂₁ 또는 g₂₂의 경계곡선을 사용한다. Fig.5에서와 같이 자유곡면상의 절점 P(u, v)는 매개변수(u, v)의 값에 따라 해당되는 경계곡선을 사용하고 있음을 나타내고 있다.

2.3 균일한 요소망의 생성

균일한 요소망은 Transfinite mapping에 의해 곡면을 각각 단위 변장의 정사각형 매핑함으로써 영역내 임의의 점의 좌표를 결정하는 방법이다⁷⁾. Transfinite mapping에 의하면 요소망의 경계선상에 있는 절점의 좌표가 실제의 곡면을 형성할 수 있다. 이는 Iso-parametric mapping과 유사한 점이 있으나, 곡선상의 절점수에 제한을 받지 않으며, 복잡하고 다양한 형상의 영역에 적용할 수 있다는 점에서 보다 효율적이다.

2.4 적용 사례

본 연구에서 개발한 요소망 생성 프로그램을 먼저 3차원 곡면으로 구성된 간단한 형태의 자동차 프레임과 외관 모델에 적용하여

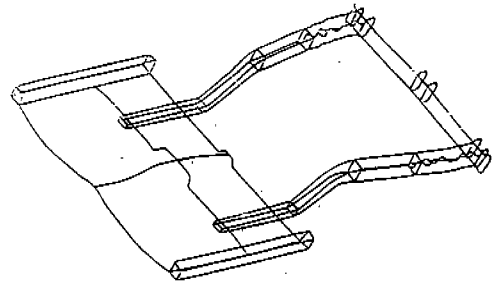


Fig.6 52 loops for mesh generation

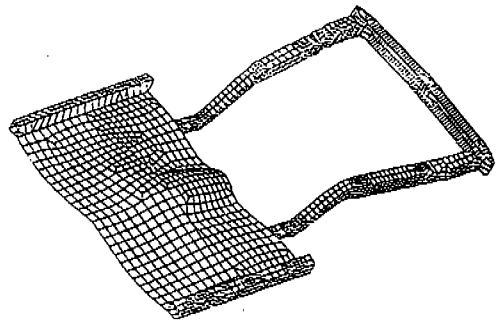


Fig.7 Constructed mesh for an automobile structure

보았다. Fig.6은 HyperMesh™에서 예제로서 제공하는 자동차 모델 중 차체외판과 엔진등을 제거하고 차체 좌우 레일(rail)과 범퍼(bumper)와 차체바닥(floor) 및 라커(rocker)만을 고려한 것이다. Fig.6에서 요소망의 생성을 위하여 구성된 루프의 수는 총 52개로서 좌우레일과 라커에 사용되는 평면 루프 25개, 좌우레일과 범퍼의 모델링에 사용되는 Coons곡면 루프 23개, 차체바닥의 모델에 필요한 point-net의 형태로 입력되는 B-spline루프 4개로 구성되어 있다. 여기서 요소망의 밀도 조절을 위한 주요절점을 적당히 배치한 결과 Fig.7과 같이 총 3,189개의 요소(3294절점)로된 요소망을 얻었다.

한편 1단계 연구 목표인 자동차 정면 충돌 해석용 모델을 10,000개 이내의 조악한(coarse) 요소망으로 생성하였다. Fig.8은 간단한 정면충돌 해석을 위하여 임의로 구성된 자동차 모델중 차체 외판과 주요 프레임 및 범퍼 등을 고려한 것으로 대칭조건을 이용하여 반쪽모델(half car model)을 사용한 것이다. Fig.8에서 요소망 생성을 위하여 구성된 루프의 수는 총 150개로서 평면루프가 102개, 블렌딩 곡면 루프가 48개가 사용되어 왔으며, 비균일한 요소망을 생성하는 free mesh기능은 67개의 루프에 적용하였고, 균일한 요소망을 생성하는 mapped mesh기능은 83개의 루프에 적용하였다. 자동차 충돌시 대부분의 하중을 받는 차체 앞부분에 중점을

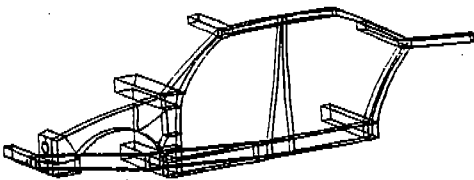


Fig.8 Half car model for mesh generation

두어 모델을 구성하였고, 각 루프별 요소망의 밀도는 기존의 모델을 참조하여 주요절점을 적절히 배치하였다. 이와 같이하여 얻은 모델을 대칭성을 이용하여 전체 모델(full car model)로 구성하면 Fig.9에서와 같이 7,952개의 4절점 요소(7,851개의 절점)로 구성된 비교적 합리적인 요소망을 얻게 된다. 국부적으로 요소가 크게 찌그러짐이 없이 만족할 만한 결과를 보여준다.

3. 재료의 변형거동 모델링

차체는 주로 스틸 등의 금속재료로 이루어져 있으며 따라서 차체를 해석하는 충돌전용 프로그램은 스틸의 변형거동을 정확히 해석할 수 있어야 한다. 금속재료의 거동은 크게 탄성거동과 소성거동으로 나뉘며 금속재료는 변형률속도에 따라 항복점 및 경화특성이 변하게 된다. 또한 엔진 등과 같이 차체에 비하여 강성이 월등히 큰 부분은 계산의 효율성을 위하여 강체로서 모델링한다. 그리고 압축변형시 많은 에너지를 흡수하며 또한 경량화에도 매우 효과적인 성질을 가진 폼폼재는 범퍼, 도어⁹⁾등의 차체에 충돌에너지 흡수용으로 활용되고 있다. 또한 측면충돌로부터 승객을 보호하기 위한 내장 패딩이나, 측면충돌시험에 사용되는 이중충돌벽(MDB)에도 폼폼재료가 사용되고 있으며 따라서 이러한 재료의 모델링이 차체의 해석에 있어 중요한

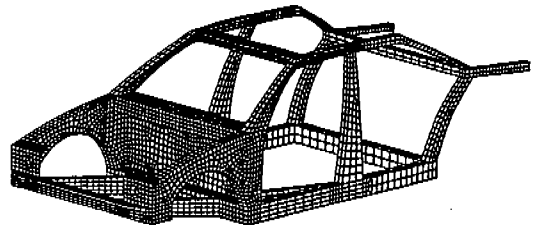


Fig.9 Constructed mesh for automobile structure

변수로 대두되어다. 본 연구에서는 이러한 재료들의 변형특성을 모델링 하기 위하여 여러 형태의 구성방정식을 제안하였으며, 이를 바탕으로 충돌해석 전용 코드, AutoCrash에 프로그래밍 하였다.

최근 들어 차체 경량화를 위하여 엔지니어링 플라스틱이나 알루미늄 합금 등이 기존의 스틸재료를 대체하여 외판 및 프레임 등에 적용되는 사례가 늘고있다. 엔지니어링 플라스틱의 경우, 유리 또는 탄소 섬유 등을 폴리에스터와 같은 고분자 기지재에 보강재로 삽입한 복합재료의 형태로 사용되고 있다. 이러한 섬유강화 플라스틱은 보강섬유의 형태에 따라서 기계적인 물성이 크게 영향을 받게 된다. 후드나 힌더 등에 주로 적용되는 SMC(Sheet Molding Compound)는 단섬유를 불규칙적으로 분포시킨 형태이며, 최근 들어 사용량이 늘고 있는 복합재료 직물(Fabric)은 일방향의 장섬유를 직조하여 만들며, 필요에 따라 이를 여러장 적층하여 구조물에 적용한다. 단섬유 강화플라스틱의 경우 등방성의 변형특성을 보이나, 장섬유 강화플라스틱은 섬유방향과 그에 수직한 방향의 변형특성이 다른 이방성을 띤다. 본 연구에서는 이러한 이방성재료의 변형특성도 위에서 언급한 등방성 재료들과 같이 모델링 및 프로그래밍 하였다.

3.1 탄성-비선형 경화 재료의 모델링

탄소성 재료의 변형거동은 Fig.10에서와 같이 slider와 spring의 직렬 및 병렬조합으로 모델링 될 수 있다. 이때 spring clip과 같은 마찰 slider는 재료의 소성변형 부분을, 그리고 선형 spring은 탄성변형 부분을 각각 표현하게 된다.

3.1.1 변형률 속도 영향 모델링

열간에서 압연된 연강의 경우 변형률속도

에 항복거동이 매우 민감한 것으로 알려지고 있으며, 이에 대하여 Cowper와 Symonds는 다음의 실험식 (7)를 제안하였다^{10),11)}.

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (7)$$

여기서 σ_y 과 σ_s 는 각각 동적유동응력과 정적항복응력이고, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도, C, p는 실험상수이다. 실험식 (7)에 포함되어 있는 상수 C와 p는 재료의 종류, 변형률의 정도 등에 따라 결정된다. 예를 들어, 재료의 종류에 따라 그 값들은 Table 1에 나타나 있다.

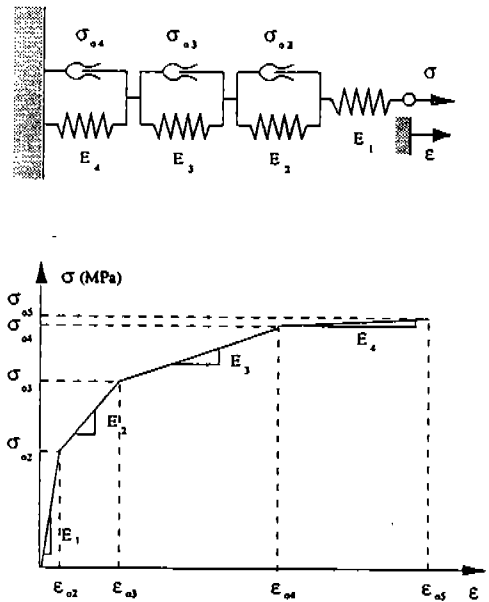


Fig.10 Theological model and stress-strain curve for the elastic-nonlinear hardening materials

Table 1 Strain Rate Coefficients for Various Materials

Aluminium Alloy	C=6,500	p= 4
Alpha-Titanium(Ti-50A)	C= 120	p= 9
304 Stainless Steel	C= 100	p=10

한편, 단축응력을 받는 연강의 경우 변형률속도가 증가함에 따라, 항복후 경화정도가 줄어들면서 응력-변형률 곡선이 점점 수평에 가깝게 된다. 또한 파괴가 일어나는 변형률(fracture strain)도 줄어든다(Fig.11 참조). Fig.11에서 보듯이 1% 변형률에서는 변형률속도($\dot{\epsilon}$ 가 0.0001에서 40으로 증가함에 따라 항복응력이 약 2배로 증가한다. 반면 5% 변형률에서는 그 증가폭이 약 50%로 줄어들게 되며, 따라서 실험식 (7)에 포함되어 있는 상수 C와 p는 변형률의 정도에 영향을 받게 된다. 위에서 제안된 C=40.4와 p=5는 실제로 변형률의 크기가 0.05정도까지 사용되며 이외의 경우는 Table 2와 같이 제안되고 있다.

탄소성 비선형 경화모델에서의 기울기는 응력-변형률 곡선에서의 중요 점들의 값을 Table화하여 점들 사이의 값을 선형 보간 하게 하였다.

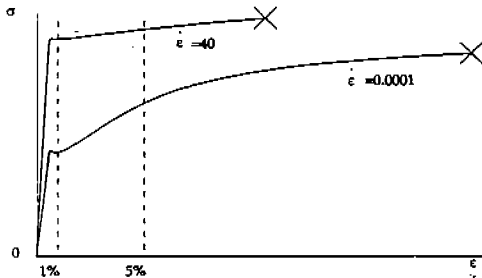


Fig.11 Typical stress-strain curves for the two different strain rates

Table 2 Strain Rate Coefficients for mild Steel with Different Percentages of Strain

변형률 범위	실험상수	
	C	P
~ 0.05	40.4	5
0.05 ~ 0.1	1,300(300)	5(2.5)
0.1 ~ 0.5	50,000	2.5

3.1.2 S자형 스틸 구조물의 해석

충돌하중을 받는 평면 S자형 box beam이며, 이는 승용차의 토우크박스를 이상화한 형태로 자동차 측면부재의 충돌해석에 많이 사용되고 있다. 주요제원과 하중 및 경계조건은 Fig.12에서 보여주는 것과 같이 초기속도가 5m/sec이고 무게는 500kg인 강체벽으로 길이가 753.6mm이고 가로 세로가 100mm, 두께가 1mm인 토우크박스를 정면 충돌했을 때를 모델링 하였다. 이때 사용된 재료의 물성치는 Table 3과 같다.

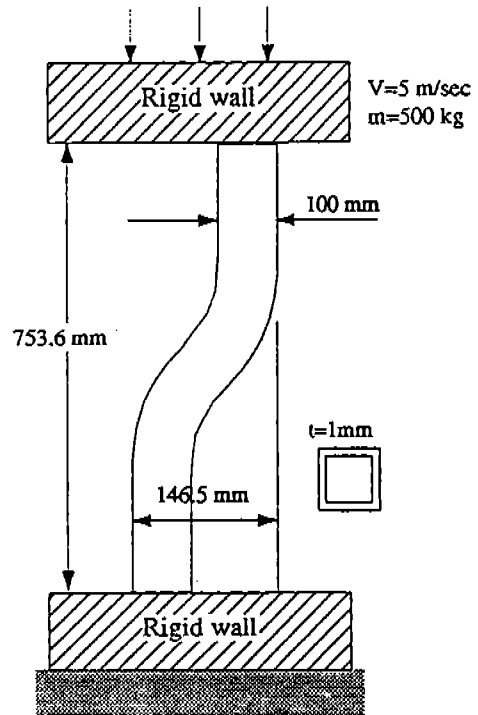


Fig.12 Torque box model

Table 3 Input Data for Tabulated Elastic-plastic Material

E_1 (GPa)	206.85	σ_{02} (MPa)	248.22	ϵ_{02}	0.0012
E_2	15.17	σ_{03}	279.24	ϵ_{03}	0.0032
E_3	0.45	σ_{04}	324.75	ϵ_{04}	0.1047
E_4	2.84	σ_{05}	337.17	ϵ_{05}	4.474

Fig.13은 식 (7)에 포함된 실험상수 C와 p를 변화시켜 계산한 S자형 box beam의 충돌해석결과이다. 이로부터 충돌하중-변위 곡선이 실험상수에 따라 크게 변화됨을 알 수 있었다. 따라서 충돌하중-변위 곡선이 실제 수치모델에 변형률 속도의 영향을 고려하여야만 보다 정확한 충돌해석을 할 수 있는 반면에, 이와 같이 제안된 상수들은 비교 분석을 할 수 있는 신뢰성 있는 실험결과와의 부족 등으로 실제의 차체충돌수치모델에 적용되지 않고 있는 실정이다. 그러므로 이에 대한 보다 많은 연구가 요구되고 있다.

3.2 강체의 모델링

임의의 물체에 작용되는 힘들의 효과중 하나는 그 물체의 크기와 모양을 변화시키는 것이다. 그러나, 어떤 물체에 대한 변형은 때로는 충분히 작아서 변형이 힘의 분석에서 무시될 수도 있다. 엔진 등과 같이 다른 부위보다 월등히 높은 강성을 갖는 부품은 강체로서 모델링하여 계산의 효율을 높인다. 본 프로그램에서 강체로 모델링된 요소는 변형하지는 않으나, 직선운동과 회전을 자유로이 할 수 있으며 변형하는 다른 요소와의 접촉을 허용하고 있다. 이때 고려해야 될 점은 다음과 같다.

- 1) 두개 이상의 근접한 강체가 node를 공유할 수 없으며 만약 1개 이상의 공유 node가 있을 경우 두개의 강체는 한개의 강체로 merge되어야 한다.(이때 강체간 slide surface가 정의된 경우는 제외)
- 2) 강체로 정의되는 요소군의 material number들은 별도로 선언되며, 또한 서로 인접하여야 한다. 만약 떨어져 있는 두 강체를 같은 material number로 선언하게 되면 강체의 관성(6D.O.F.)에 관한 내부계산결과가 부정확하게 된다.
- 3) 강체의 관성은 강체요소의 기하학적인 모양과 material control card에서 정의되는 밀도로부터 계산되어진다. 또는 강체의 초기속도등을 직접 선언할 수도 있다.
- 4) 강체가 접촉면으로 작용할 경우 강체의 탄성계수와 포아송비는 정확한 값(realistic value)을 사용하여야 한다.

3.2.1 강체 블럭과 평판의 접촉해석 강체와 탄성-비선형경화재료로 각각 모델

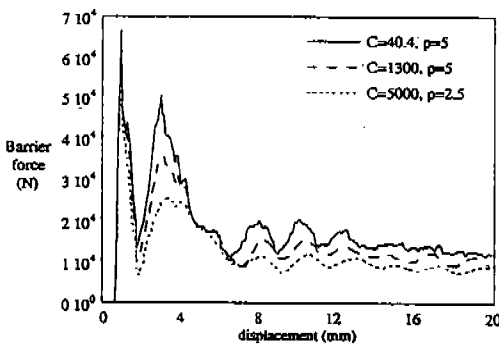


Fig.13 Barrier forces vs. displacement due to the crash loads

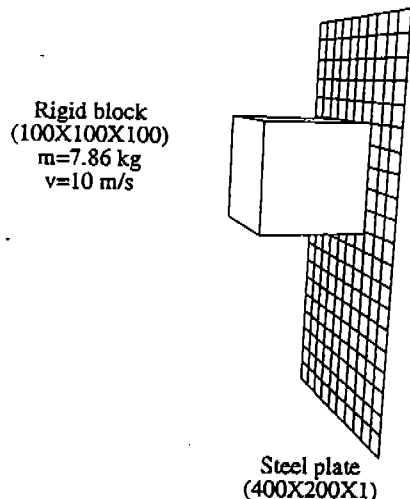


Fig.14 Impact of rigid block and steel plate

링된 블록(block)과 평판의 접촉해석용 모델이며 주요재원과 하중 및 경계조건은 Fig.14에서 보여주는 것과 같이 질량 7.86kg, 속도는 10m/sec 정육면체 rigid box(100×100×100)로 steel plate(400×200×1)에 충돌시켜 그 변형모양을 보았다. 이때 평판의 물성치는 S자형 box beam과 같으며 강체의 물성치는 $E=206.85\text{GPa}$, $\nu=0.3$ 이다.

Fig.15는 강체로 모델링 된 block이 스틸 평판에 충돌한 후, 시간에 따라 변형하는 스틸 평판과 충돌한 후에도 변형하지 않고 처음의 모습을 유지하는 강체 block의 모습을 볼 수 있다.

3.3 포옴 재료의 유한요소 모델링

3.3.1 포옴재료의 거동 특성

포옴재료의 기계적인 특성은 주로 압축하

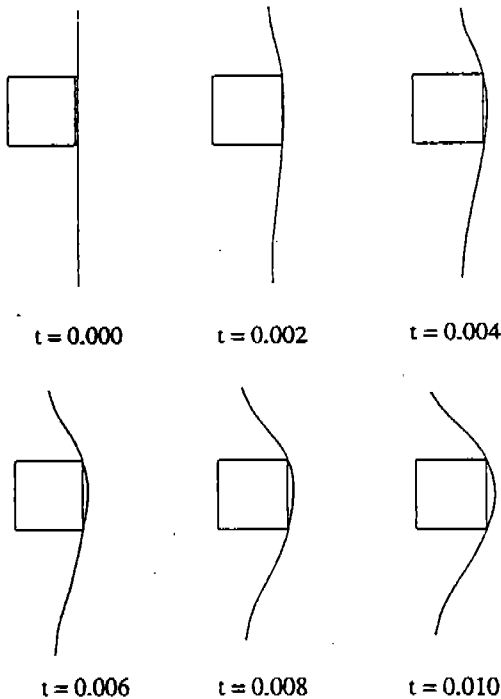
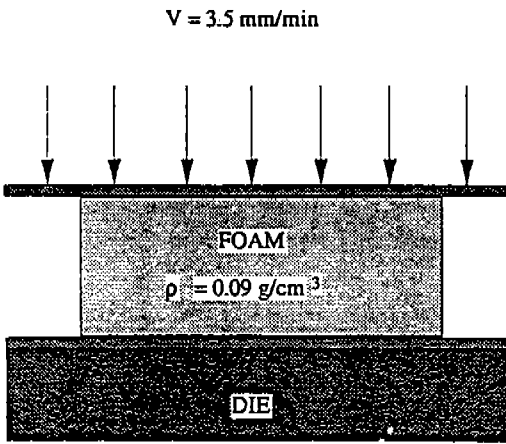


Fig.15 Deformations of steel due to the impact of rigid block

중하에서의 강성, 강도 등으로 표현되며, 이는 포옴의 재질과 밀도에 따라 변한다¹³⁾. 일반 금속재료에 비해서 상대적으로 저밀도($\rho=0.09\text{g/cm}^3$)인 포옴은 초기의 5%정도 변형률까지는 선형, 탄성 변형을 하며 항복 후 약 50%의 변형률까지 일정한 하중하에서 압축된다. 50%이후의 변형률부터는 저항응력의 크기가 급격히 증가하며, 70~80% 정도의 변형률에 이르러서는 더 이상 압축하기가 힘들게 된다. 이 저밀도 포옴 재료는 압축과 수직인 방향으로의 변형이 매우 작으며($\nu=0.01\sim0.07$), 하중을 제거한 후에는 압축비에 따라서 40%정도까지의 영구 변형률을 갖는다¹⁴⁾. 또한 압축에 따른 하중-변위곡선은 하중의 속도, 즉 변형률속도에 영향을 받으나¹⁵⁾ 어느 정도 이상의 변형률속도에서는 그 영향이 감소함을 실험으로부터 알 수 있었다. 이 변형률속도 영향계수 Cowper-Symonds, Johnson-Cook, 및 Jones 등이 제안한 식이 있으나, 그들의 식은 포옴재료의 변형률속도 영향에 따른 제대로 표현하지 못하였고 비교적 많은 실험 상수가 요구되어진다¹⁶⁾.

본 연구에서는 포옴재료의 압축변형특성을 준정적 및 충격실험을 통하여 구하였으며, 또한 유한요소 모델링하여 그를 이용한 유한요소해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 실험에는 밀도가 0.09g/cm^3 인 $45\times45\times30\text{mm}$ 크기의 직육면체 포옴에 대한 정적 및 동적압축실험이 Fig.16에서와 같이 Instron을 사용하여 수행되었다. 충격실험은 General Research사의 Dynatup 8250을 사용하였으며, Impactor의 무게와 속도를 달리 하여 포옴의 압축응력-변형률곡선과 Impactor의 속도 변화를 측정하였다. 이때 impactor의 무게는 6.507kg과 13.157kg을 사용하였고 속도는 2.20~4.03m/sec로써 변화를 주었으며, 실험장치의 구성도는 Fig.17과 같다. Fig.18은 네가지 다른 변형률 속도하에



- $\dot{\epsilon}_1 = 1.944E-3$
- $\dot{\epsilon}_2 = 1.111E-1$
- $\dot{\epsilon}_3 = 1.111E-0$
- $\dot{\epsilon}_4 = 1.111E+1$

Fig.16 Quasi-Static compression test of foam material

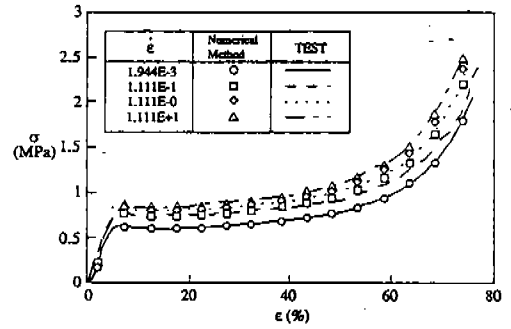


Fig.18 Stress-strain response of foam at four different strain rates

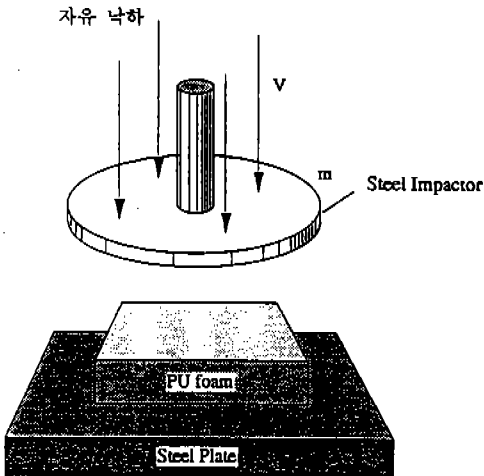
서 측정된 폼재료의 응력-변형을 곡선이 다. 변형률속도의 증가와 함께 압축응력의 크기도 증가하며, 이러한 특성을 모델링하기 위하여 식 (9)~(11)과 같은 폼재료의 구성방정식을 제안하였다.

$$\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i M(\dot{\epsilon}_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_i = f(\epsilon_i) \quad (10)$$

$$M(\dot{\epsilon}_i) = 1 + a \cdot \tan^{-1}(\log_{10}(\dot{\epsilon}_i/\dot{\epsilon}_0)/b) \quad (11)$$

수식 (10)의 함수 f 는 준 정적 단축 압축 실험으로부터 구한 응력과 변형률의 Tabulated Data와의 관계식을 의미하며, 수식 (11)에서 제안된 함수 M 은 변형률속도, $\dot{\epsilon}$ 의 영향을 고려한 영향계수이다. 수식 (11)에 포함된 a 와 b 는 실험상수(experimental constants)이며, 이들은 준정적 및 변형률속도를 달리한 동적 압축 시험으로 측정된 응력과 변형률곡선으로 구할 수 있다. 또한 식 (11)의 $\dot{\epsilon}_0$ 는 실험상수 a, b 등을 구하는데 기준이 되는 변형률 속도를 의미한다.



$m : 6.507 - 13.157 \text{ Kg}$
 $V : 2.20 - 4.03 \text{ m/sec}$

Fig.17 Impact Test of foam material

3.3.2 폼재료의 해석

Fig.19는 Impactor의 무게와 속도를 각각

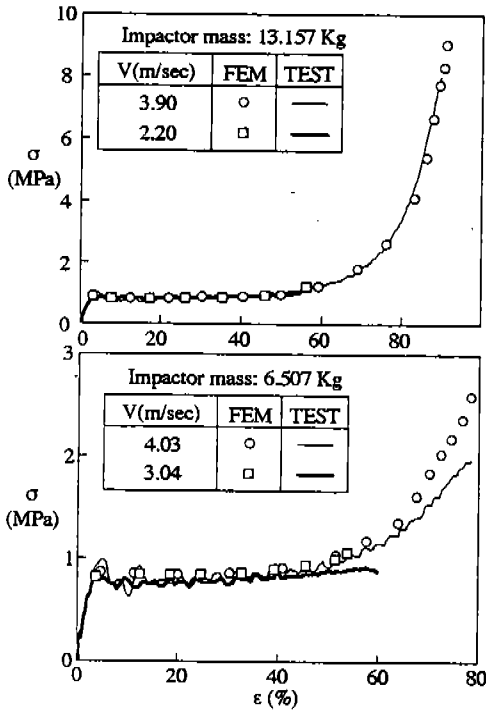


Fig.19 Stress-strain response of foam from the impact loading

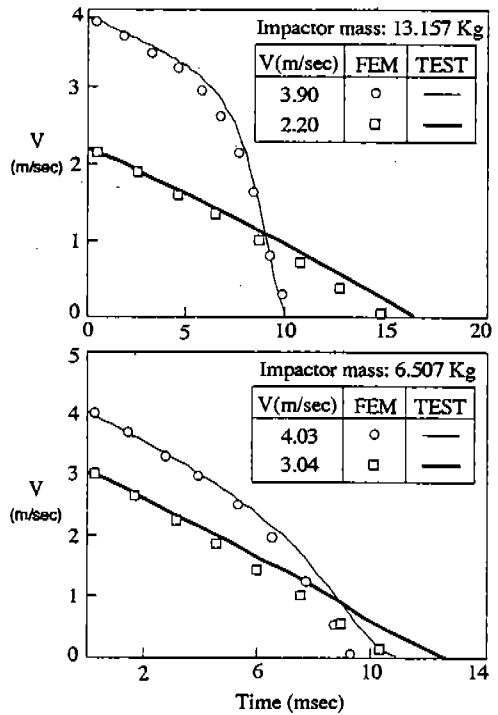


Fig.20 Impactor velocity changes during the impact loading

달리하여 측정된 폼재료의 응력-변형률 곡선을 유한요소해석 결과와 비교하여 보여 주고 있으며, 해석결과와 실험결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 충돌과정중의 Impactor의 속도변화는 Fig.20에 나타나 있으며, 여기서도 해석결과가 실험결과를 잘 예측함을 볼 수 있다. U-Shape의 형상에 대한 충돌하중에 의한 변형해석 결과는 Fig.21에서 볼 수 있으며 hourglass control(viscous damping=0.1)을 수행하지 않았을 때의 결과와 함께 보여주고 있다.

3.4 이방성(Orthotropic) 탄성재료의 모델링

이방성 변형특성중의 하나인 직교이방성 재료가 AutoCrash 프로그램의 8절점 brick

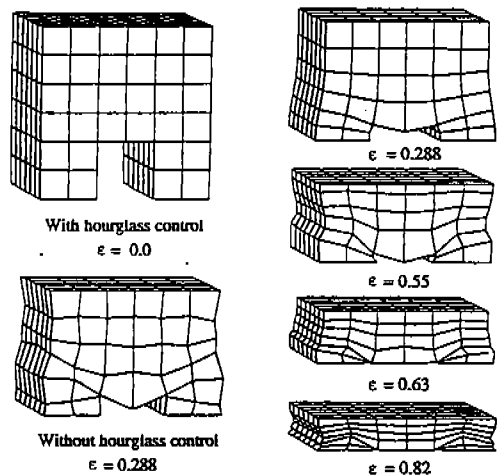


Fig.21 Deformed shapes of U-shape foam with and without hourglass control

요소와 4절점 shell 요소에 각각 유한요소 모델링되었다. 8절점 brick 요소에서의 이방성 재료축의 정의는 요소내의 절점을 이용하거나, 또는 전체 좌표상의 한 점과 요소내의 한 점이 구성하는 벡터를 이용하여 정의한다. 4절점 shell 요소에서는 요소평면의 수직벡터와 각 절점을 이용하여 이방성 재료축을 정의하며, 또한 Fig.22와 같이 여러장의 직교 이방성 재료가 적층된 형상의 구조도 모델링할 수 있도록 프로그래밍하였다. Fig.23은 유한요소해석과 고전적층판이론을 사용하여 구한 여러 가지 적층형상의 면내 강성도이다.

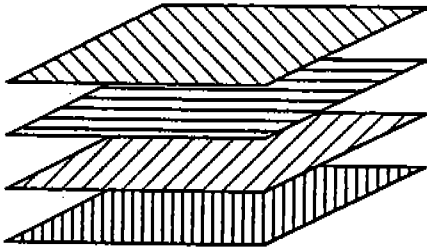


Fig.22 Laminated plate with unidirectional plies

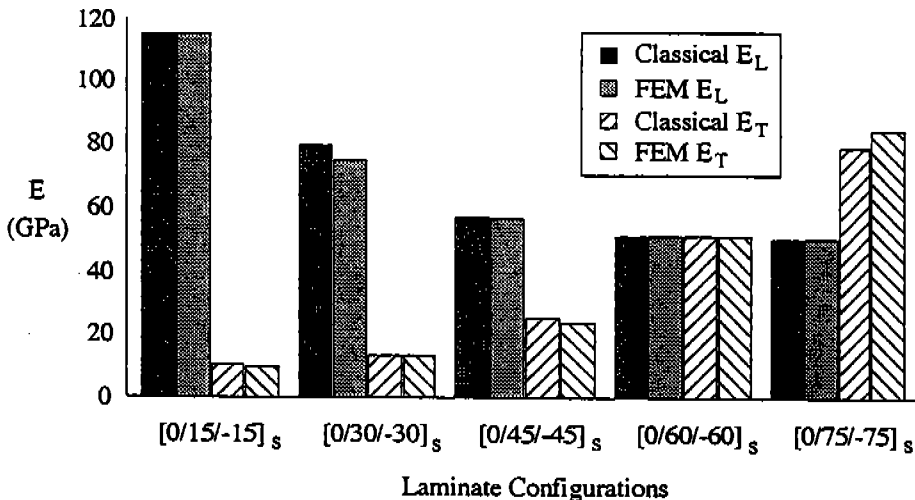


Fig.23 Comparisons of elastic modulus between FEM and CLT

4. 접촉 처리 알고리즘

접촉 문제의 해석은 여러가지 종류의 접촉이 발생할 수 있는 차체 충돌 시뮬레이션에 있어서 매우 중요한 부분이다. 접촉의 형태는 강체 벽면과의 접촉을 비롯하여 물체들간의 접촉, 차체의 부재 스스로의 접촉, 즉 좌굴시의 접힘 현상 등 매우 다양하게 발생할 수 있으며, 이들 대부분은 Fig.24와 같이 경계치 문제로 기술된다.

접촉은 다음의 2가지 조건을 고려하여야 한다. 첫째 조건은 기구학적 접촉 조건으로 두 접촉면에 존재하는 임의의 경계면상의 물질점들이 물체의 운동 서로 접촉하고 분리될 수 있다는 접촉 탐색에 관한 조건이며 두 번째 조건은 어떠한 배치에 대하여도 두 물체는 서로 관통할 수 없다는 불침투 조건이다.

일반적으로 3차원 탄소성 유한요소해석에서 접촉 위치의 탐색을 위하여 사용되는 방법으로는 우선 접촉면을 Master면과 Slave면으로 분리 고찰하는 Hallquist 등^{15), 20)}이 제안한 주종탐색법(master-slave method)

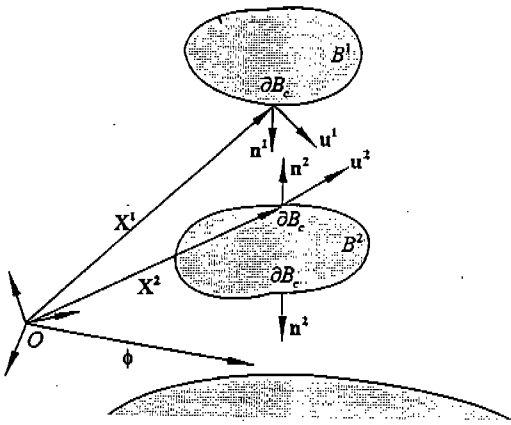


Fig.24 Bodies in contact

을 들 수 있으며, 또한 Belytschko 등이 제안한 접촉 부위를 강체구로 가정하여 접촉 위치를 찾는 Pin Ball Algorithm 등도 있고, 최근에 주종 탐색법을 개선하여 Zhong 등²¹⁾이 제안한 Hierarchy Territory Algorithm (HITA) 등의 방법도 발표된 바 있다.

불침투 조건으로 접촉의 처리 방법으로는 Lagrang multiplier법과 벌칙 함수법(penalty method)이 대표적으로 이용되고 있다. 그리고 이 두가지 방법의 조합인 Perturbed Lagrange Multiplier 방법과 이것의 변형된 형태인 Augmented Lagrange Multiplier 방법 등이 있다. 우선 벌칙 함수법은 두 접촉면의 구분이 필요 없고 프로그래밍 하기가 쉬우며, explicit 방식의 유한 요소법에 적합한 장점으로 인하여 현재까지 explicit 유한요소법의 접촉 처리에 많이 쓰여 왔다. 하지만 벌칙 상수값(penalty constant)이 해의 신뢰도나 수렴성에 매우 큰 영향을 끼치는 반면, 이 값을 자동적으로 생성해 내지 못하고 사용자가 지정해 주어야 하는 점과, 충돌이 지속되는 과도 기간동안의 전체 에너지가 일시적으로 감소하는 현상을 일으키는 점 등의 단점을 갖고 있다.

한편 Lagrange multiplier 방법은 그 정확성과 안전성 면에서 벌칙 함수법에 비하여 우수함을 나타내지만 explicit 프로그램으로서는 치명적인 연립 방정식의 해를 요구하는 단점을 갖는다. Zhong 등²⁰⁾은 이러한 Lagrang multiplier 방법의 단점을 극복하기 위하여 절점(node)-요소(segment) 사이의 접촉 문제를 몇 가지 가정을 통하여 절점-절점 접촉 문제로 근사화 시키는 Defence Node Algorithm(DENA)을 제안하였다.

본 연구에서는 접촉 탐색법으로 기존의 주종 탐색법과 HITA 알고리즘을 병행하여 사용할 수 있도록 프로그래밍 하였으며, 불침투 조건의 처리는 벌칙 함수법을 이용하고 있으며, 본고에서는 최근에 제안된 HITA 알고리즘을 이용한 접촉 탐색의 정식화 과정에 대하여 설명하고, 이를 인용하여 몇가지 예에 적용함으로써 그 효율성과 타당성을 기술하고자 한다.

4.1 HITA 알고리즘을 이용한 접촉 탐색

Hierarchy Territory Algorithm(HITA)는 1991년에 Zhong 등이 개발한 방법으로 접촉이 일어날 수 있는 계통을 미리 정해 놓고 이들을 순차적으로 검사하는 과정으로 접촉의 여부와 접촉 위치를 알아내는 방법이다. HITA에 대하여 상술하면 다음과 같다.

4.1.1 접촉 계통(Contact Hierarchy)

접촉 부위에서 다음과 같이 접촉 계통을 정의한다. 접촉 물체(contact body)는 물체의 전체 경계면을 나타내는 접촉 표면(contact surface) 들의 집합으로 정의되며, 또한 이 접촉 표면은 물체의 연결된 경계면을 나타내는 접촉 요소(contact segment) 들의 집합을 나타내고, 또 이 접촉 요소는 물체를 유한 요소로 모델링 하였을 때 물체의 경계면에 속하는 요소 요소의 면을 나타낸다. 아

올려 접촉변(contact edge)과 접촉 절점(contact node)은 각각 접촉 요소의 변과 정점을 나타낸다. 이들 사이의 접촉이 발생할 수 있는 계통은 Fig.25와 같으며, 접촉의 탐색은 맨 위에서부터 아래 쪽으로의 순차적인 검사를 통하여 진행하게 된다.

4.1.2 예비 접촉 탐색(Pre-Contact Search)

접촉 관계에 놓여 있지 않은 contact node와 primitive contact hierarchy 사이의 접촉 여부검색 과정을 예비 접촉 탐색(Pre-contact search)라 한다.

이 과정에서 접촉 검색을 효율적으로 수행하기 위하여 contact hierarchy를 정의하고, 상위 hierarchy에 대한 비교를 수행하였을 때 접촉이 일어나는 경우에 한하여 하위 hierarchy에 대한 비교를 수행하도록 한다. 또

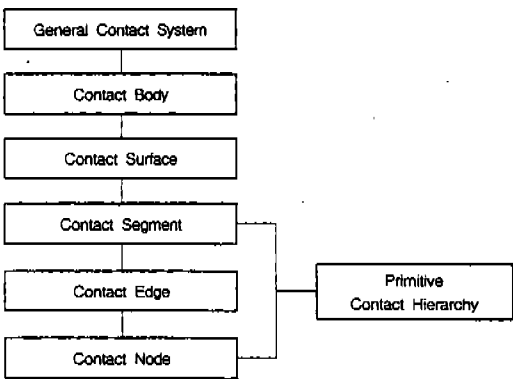


Fig.25 Contact hierarchy

한 contact territory 간의 비교에 앞서 hierarchy territory에 대한 비교를 먼저 수행하여 효율성을 더욱 향상시킨다. Hierarchy territory는 다음과 같이 정의된다.

Hierarchy Territory란 contact hierarchy를 포함하는 공간으로, 보통은 다음과 같은 직육면체 공간을 사용하며, 이를 그림으로 나타내면 Fig.26과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \{(x_1, x_2, x_3) : x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}\} \quad (12)$$

또한 Expanded Hierarchy Territory란 앞의 hierarchy territory를 약간 확장시킨 것으로서, contact hierarchy가 확장된 경우에 필요하다.(Fig.27 참조)

H , H^e 를 두개의 contact hierarchy라 하고, T^1 , T^2 가 이들에 대응하는 hierarchy territory인 경우 접촉 검색은 다음과 같다.

우선 두 expanded hierarchy territory T^1 , T^2 의 공유 공간 T 는 다음과 같이 계산된다.

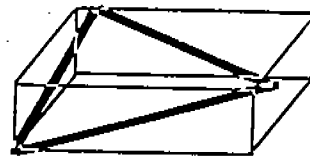


Fig.26 Hierarchy Territory

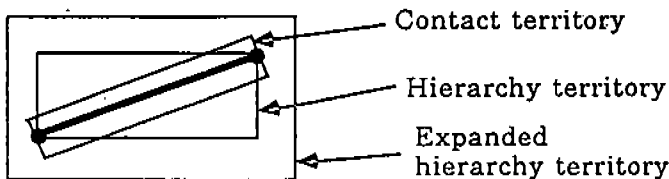


Fig.27 Expanded Hierarchy Territory

$T_1 = \{(x_1, x_2, x_3) : x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}\}$,
 $T_2 = \{(x_1, x_2, x_3) : x_{i_2}^{\min} \leq x_i \leq x_{i_2}^{\max}\}$ 일 때
 $T = \{(x_1, x_2, x_3) : \bar{x}_i^{\min} \leq x_i \leq \bar{x}_i^{\max}\}$ 가 된다.

여기에서 $\bar{x}_i^{\min} = \max(x_{i_1}^{\min}, x_{i_2}^{\min})$,
 $\bar{x}_i^{\max} = \min(x_{i_1}^{\max}, x_{i_2}^{\max})$ 이다.

만일 T 가 영 공간(null space)이면 두 contact hierarchy간의 접촉은 발생하지 않으며, T 가 공간이 아닌 경우는 공간 T 에 속하는 하위 hierarchy들에 대하여 검색이 수행된다.

이러한 검색이 순차적으로 진행되어 primitive hierarchy와 hitting node의 접촉 검색 단계에까지 이르르면 다음과 같은 이유로 보다 세심한 주의가 요구된다. 즉 Fig.28에서 보는 바와 같이 hitting node는 어느 segment에도 속하지 않는 결과가 되어 검색에서 나타나지 않게 되는 경우가 생긴다. 따라서 contact segment 이하에서는 segment와 접촉하지 않는 경우라도 반드시 그 하위 hierarchy인 contact edge에 대하여, 그리고 마찬가지로 contact node에 대해서도 검색을 수행하여야 한다.

Contact edge의 접촉 여부는 다음의 식으로 판단한다.

$$\begin{aligned}
 -D_p \leq D \leq D_c \quad 0 \leq P \leq R_L \\
 D = (\vec{x} - \vec{x}_1) \cdot \vec{N}_1 \\
 P = (\vec{x} - \vec{x}_1) \cdot \vec{N}_c
 \end{aligned} \tag{13}$$

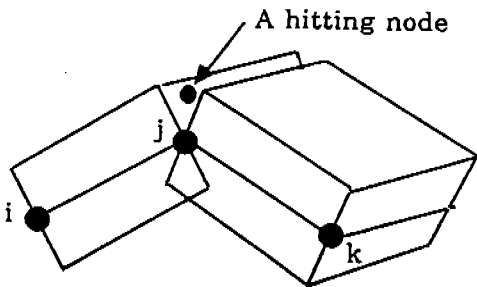


Fig.28 Contact Search between the Primitive Hierarchies and the Hitting node

여기에서 \vec{N}_k 는 unit tangential vector, \vec{N}_1 는 hitting node를 지나는 unit normal vector, R_L 은 edge의 길이, D_p, D_c 는 edge에 매우 가까운 hitting node를 접촉하는 것으로 간주하기 위한 작은 값이다. \vec{x} 는 hitting node를, \vec{x}_1 는 edge의 한 node를 가리키는 vector이다.

한편 contact node에 대해서는 다음의 식을 적용한다.

$$\begin{aligned}
 -D_p \leq D \leq D_c \\
 D = (\vec{x} - \vec{x}_1) \cdot \vec{N}_1
 \end{aligned} \tag{14}$$

Contact segment의 경우 4절점 segment는 공간상에서 곡면을 형성할 수 있기때문에 다음과 같은 최소화 문제의 해를 수치 해석으로 계산하여 접촉점을 찾는다.

$$d = |\vec{x}^h - \vec{x}(\xi, \eta)| \tag{15}$$

여기에서 \vec{x}^h 는 hitting node를 $\vec{x}(\xi, \eta)$ 는 contact segment 위의 점을 나타낸다.

4.1.3 Territory 비교 빈도 결정

Fig.29에서 Contact territory와 expanded hierarchy territory 사이의 최단 거리를 E 라고 하고 $\Delta U_i (i=1, \dots, n)$ 는 n 스텝동안의 hitting node와 contact segment 사이의 상대 변위로 놓는다. Hitting node가 expanded hierarchy territory 바로 바깥 쪽에서부터 출발하여 contact hierarchy에 도달하기까지 n 스텝이 소요되었을 경우

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n \geq E \tag{16}$$

가 성립한다. $\Delta U_i \leq \Delta U$ 라고 하면 $n \Delta U_i \geq E$ 이므로

$$n = \text{int}(E/\Delta U) + 1 \tag{17}$$

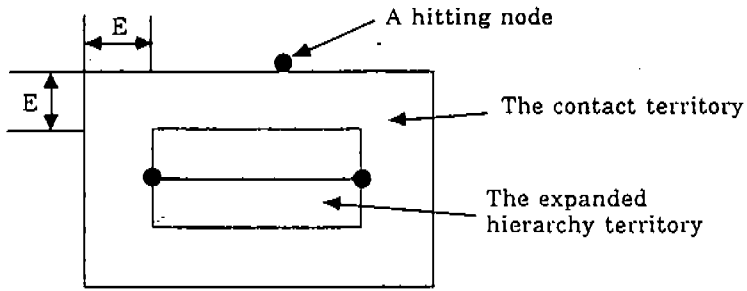


Fig.29 Determination of Frequency of territory Comparison

으로 계산되어, n 스텝마다 territory 비교를 수행하면 된다.

4.2 접촉 알고리즘의 기능 및 해석례

본 연구에서 개발중인 충돌해석 프로그램에서 처리할 수 있는 접촉의 형태는 다음의 세가지이다.

- (1) 두 물체간의 접촉과 분리가 일어날 수 있는 경우
- (2) 부재가 자기 자신과 접촉을 하는, 즉 좌굴시의 자기 접촉(self-contact)의 경우
- (3) 두 접촉 물체중 한쪽이 강체인 경우 등이다.

이들중 두번째의 자기접촉의 경우 앞의 접촉 탐색 단계에서 접촉 물체의 양측 모두를 중요소로 처리함으로써 가능하게 하였고 각 경우마다 접촉 탐색법으로 주종탐색법과 HI-TA 알고리즘을 선택할 수 있도록 하였다.

접촉 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 몇가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 첫번째 경우로서 두 평행판의 충돌 해석 모델에 대하여 테스트를 하였다. 두 판의 한쪽의 고정단으로 하였으며, 다른 쪽은 자유단으로 하여 충돌 질량과 속도를 가진 강체 벽과 충돌하는 것으로 하였다. 모델링에 소요된 절점은 492개이며, 요소는 400개의 4

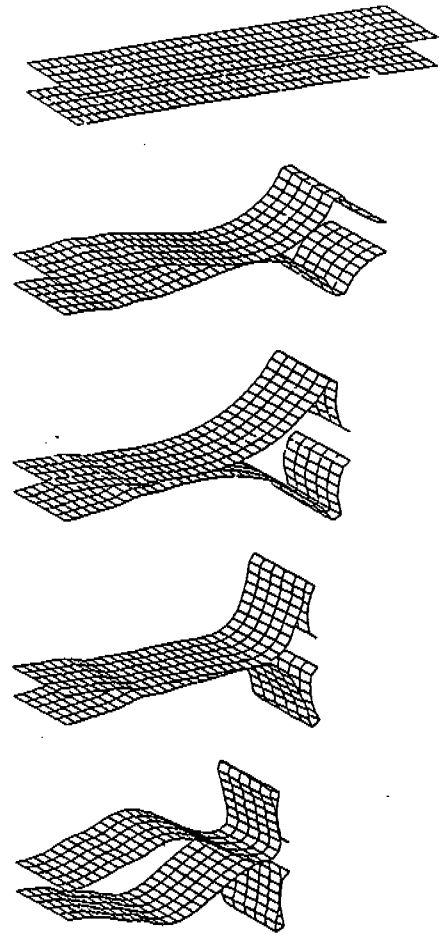


Fig.30 Impact between Two Parallel Plates

절점 셀 요소로, 재료는 두께 0.8mm인 연강 (mild steel) 판으로 가정하였다. 또한 강체 벽은 50kg이고 초기 속도는 10m/sec로 평행판의 자유단 부분과 충돌한다. 이 경우의 접촉 탐색 방법으로는 Master-Slave Algorithm을 사용하였다.

Fig.30은 시간의 진행에 따른 두 평행판의 변형 거동을 보여주고 있다. 그림에서도 볼 수 있듯이, 초기에는 두 평행판 사이의 접촉이 발생한 후, 다시 분리되는 Type 1의 Sliding with separation의 접촉 양상을 나타내고 있으며, 그후 각 판재는 자기 스스로 접촉을 일으키는 Type 2의 Self-contact를 기술하고 있다. 아울러 그림에는 나타나고 있지 않으나, 강체벽과 판재 사이의 접촉, 즉 Type 3의 One way algorithm도 잘 작동하고 있음을 알 수 있다.

두번째 경우로서 두개의 사각관의 충돌 해석을 수행하였다. 이 해석은 Type 1의 Sliding with separation의 접촉을 검증하기 위하여 수행하였으며, 해석 조건은 초기속도를 가진 두개의 사각관이 날아와 충돌하는 경우에 대한 해석으로 재료는 연강으로 가정하였다. 접촉 탐색 방법으로는 주종탐색법과 HITA 알고리즘 두가지 경우에 대하여 해석을 하고 이 두 결과를 비교하였다. Fig.31은 충돌의 초기 상태를, Fig.32와 Fig.33은 사각관이 최대로 변형하였을 때의 유효 변형률과 유효 응력의 등고선을 나타내고 있다. 이들 그림에서도 알 수 있듯이 두가지 접촉탐색법 모두 잘 작동하고 있으며, 또한 같은 해석 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

세번째 경우로서 강체로 된 물체와 변형체로 된 판재의 충돌 해석을 통하여 Type 3의 One Way Algorithm을 검증하였다. 이 경우도 역시 접촉 탐색 방법으로 주종탐색법과 HITA 알고리즘 두가지 경우에 대하여 해석을 하고 이 두 결과를 비교하였다. Fig.34는

초기 상태의 배치를 나타내고 있으며, Fig. 35와 Fig.36은 판재에 작용하는 유효 응력과 유효 변형률을 나타낸다.

이들 결과에서도 역시 매우 일치하는 해석 결과를 얻었으며, 이 해석에 소요된 해석 시간을 비교하면, HITA를 사용하였을 경우가 기존의 주종탐색법을 사용한 경우에 비하여 약 25%정도의 계산시간의 감소 효과를 얻을 수 있었다.

이상의 결과에서 현재까지의 접촉 해석 알고리즘의 정식화 과정을 통하여, 접촉 처리는 양호하게 작동하고 있음을 알 수 있다. 접촉 탐색법에서 주종탐색법과 HITA 알고리즘의 두 경우 모두 접촉의 위치를 비교적 정확하게 예측하는 것을 알 수 있으며, HITA 알고리즘을 사용한 해석이 계산 시간면에서 많은 시간 절감을 가져온다는 것을 확인하였다. 그러므로 HITA를 사용하는 것이 보다 효율적인 것으로 사료된다.

또한 접촉 처리법으로 사용한 벌칙 함수법은 본 연구에서 제시한 해석례와 같이 서로 비슷한 물성치를 가지는 접촉 물체들간의 접

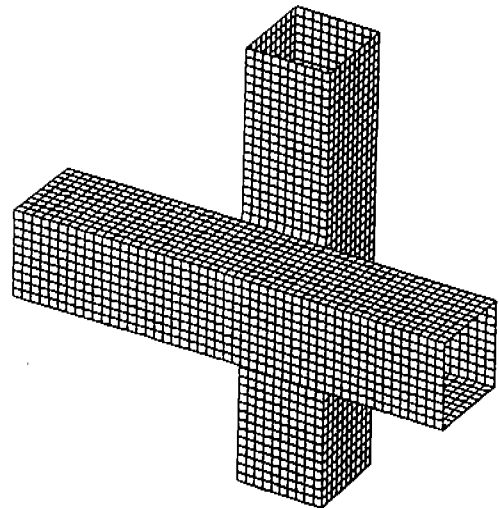
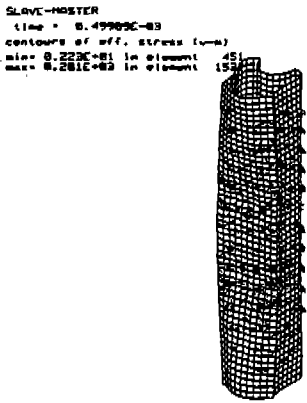
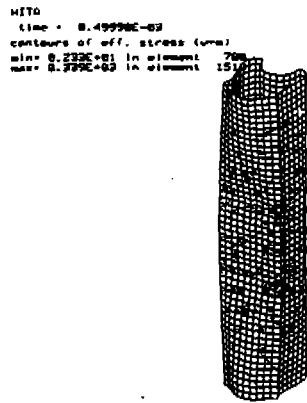


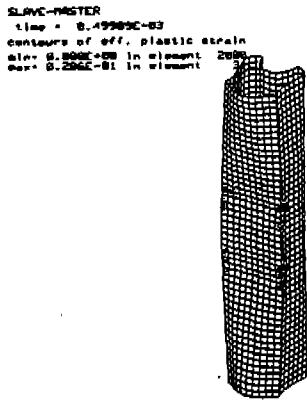
Fig.31 Impact between Two Square Tubes (Initial Configuration)



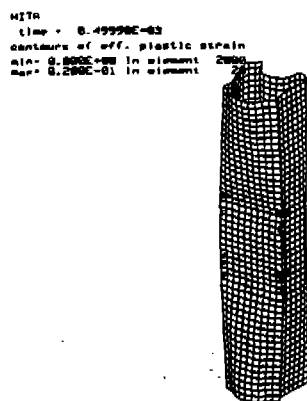
contour values
A= 1.90E+01
B= 3.97E+01
C= 6.04E+01
D= 8.11E+01
E= 1.02E+02
F= 1.23E+02
G= 1.43E+02
H= 1.64E+02
I= 1.85E+02



contour values
A= 3.80E+01
B= 6.36E+01
C= 8.91E+01
D= 1.14E+02
E= 1.39E+02
F= 1.64E+02
G= 1.89E+02
H= 2.14E+02
I= 2.39E+02



contour values
A= 2.40E-03
B= 5.37E-03
C= 8.34E-03
D= 1.13E-02
E= 1.42E-02
F= 1.72E-02
G= 2.02E-02
H= 2.32E-02
I= 2.62E-02



contour values
A= 2.40E-03
B= 5.37E-03
C= 8.34E-03
D= 1.14E-02
E= 1.44E-02
F= 1.74E-02
G= 2.04E-02
H= 2.34E-02
I= 2.64E-02

Fig.32 Impact between Two Square Tubes : Effective Stress and Effective Plastic Strain(by Master-Slave Algorithm)

Fig.33 Impact between Two Square Tubes : Effective Stress and Effective Plastic Strain(by Hierarchy Territory Algorithm)

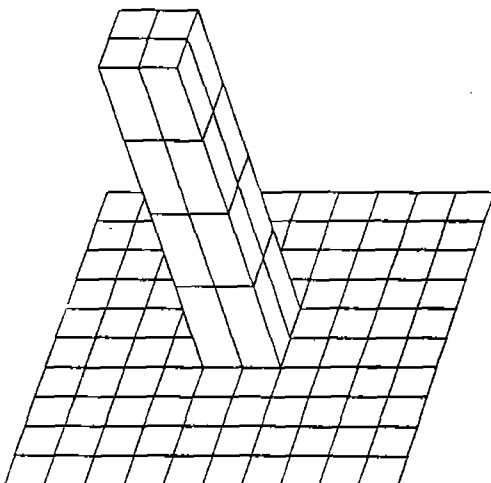
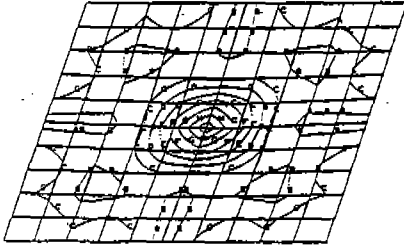


Fig.34 Impact between Rigid Block and Deformable Plate(Initial Configuration)

```

SLAVE-MASTER
time = 0.99649E-02
contours of eff. stress (um)
min= 0.973E+07 in element 78
max= 0.012E+09 in element 55

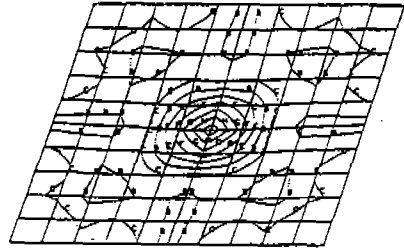
contour values
a= 1.53E+07
b= 2.37E+07
c= 3.05E+07
d= 3.81E+07
e= 4.33E+07
f= 4.88E+07
g= 5.44E+07
h= 6.79E+07
i= 7.53E+07
    
```



```

MIRA
time = 0.99649E-02
contours of eff. stress (um)
min= 0.974E+07 in element 23
max= 0.012E+09 in element 55

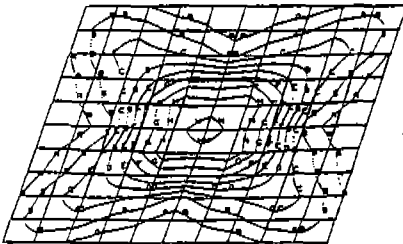
contour values
a= 1.53E+07
b= 2.37E+07
c= 3.01E+07
d= 4.33E+07
e= 5.38E+07
f= 6.04E+07
g= 6.79E+07
h= 7.53E+07
    
```



```

SLAVE-MASTER
time = 0.99649E-02
contours of eff. plastic strain
min= 0.000E+00 in element 39
max= 0.057E-02 in element 57

contour values
a= 7.45E-04
b= 1.07E-03
c= 2.59E-03
d= 5.31E-03
e= 4.42E-03
f= 5.36E-03
g= 6.20E-03
h= 7.20E-03
i= 0.12E-02
    
```



```

MIRA
time = 0.99649E-02
contours of eff. plastic strain
min= 0.000E+00 in element 56
max= 0.000E-02 in element 44

contour values
a= 7.45E-04
b= 1.07E-03
c= 2.59E-03
d= 3.52E-03
e= 4.44E-03
f= 5.36E-03
g= 6.29E-03
h= 7.21E-03
i= 0.12E-02
    
```

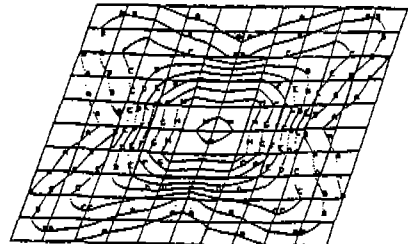


Fig.35 Impact between Rigid Block and Deformable Plate : Effective Stress and Effective Plastic Strain (by Master-Slave Algorithm)

Fig.36 Impact between Rigid Block and Deformable Plate : Effective Stress and Effective Plastic Strain (by Hierarchy Territory Algorithm)

축 처리에는 별다른 문제도 발생시키지 않으면서도 효율적으로 해석을 수행하는 것을 확인하였다. 그러나 물체의 물성치가 상당히 다른 물체들간의 접촉시에는 문제를 발생시킬 가능성이 있으므로, 향후에는 이에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 아울러 차량 전체의 충돌 해석을 위하여는 엄청나게 많은 요소와 절점들이 소요되며, 또한 접촉의 양상도 매우 복잡하게 되므로, 전체 충돌 해석 계산 시간중 접촉 처리에 너무 많은 시간을 요하게 된다. 그러므로 향후 과제로는 보다

정확하고 효율적인 접촉 탐색법과 접촉 처리 알고리즘의 도입을 통하여, 차량 전체의 충돌 해석 문제에 대비하고자 한다.

참 고 문 헌

1. S.W. Chae, B.S. Shin, J.K. Shin, J.K. Min, S.J.Park, "An Automatic Mesh Generation Scheme on 3D Surfaces", Computational Engineering, Proc. of the 1st PCCE '93, Elsevier Science Pub-

- lishers B.V., pp. 169~174. 1993.
2. S.A. Coons, "Surfaces for Computer Aided Design of Space Forms", Technical Report MAC-TR 44, MIT, Cambridge, MA, U.S.A., 1967.
 3. 박상준, 채수원, 고병천, "자유곡면에서 사각형 쉘요소의 자동생성", 한국자동차 공학회 논문집 제3권 제6호, pp. 145~153, 1995.
 4. R.E. Barnhill, G. Birkhoff and W.J. Gordon, "Smooth Interpolation in Triangle", J. Approx. Theory, Vol. 8, pp. 114~128, 1973.
 5. Klaus J. Bathe, 1996, "Finite Element Procedures", Prentice-Hall International Inc.
 6. 채수원, 최형연, 민동균, "자동차 충돌해석용 프로그램 개발-유한요소 모델링 및 재료의 변형특성 연구", 홍익대학교 과학기술연구소 연구보고서, 1995. 12.
 7. R. Haber and J.F. Abel, "Discrete Transfinite Mapping for the Description and Meshing of Three-Dimensional Surfaces Using Interactive Computer Graphics", Int. J. Num. Meth. in Engng., vol. 18, pp. 41~66, 1982.
 8. HyperMesh User's Manual, ver. 1.30, Altair computing, Inc., 1990.
 9. 김진, 이재원, 최형연, "복합재료를 사용한 경량 도어의 설계와 제작", 한국자동차 공학회, 차체 및 차량동역학 부분 학술강연초록집, pp. 20~25, 1995.
 10. Ni. C. M., "Impact Response of Curved Box Beam-Columns with Large Global and Local Deformations", 14th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA/ASME/SAE, AIAA Paper No. 73-401, 1973.
 11. Jones, N., Structural Aspects of Ship Collision, Structural Crashworthiness., Ed. N. Jones and T. Wierbicki, Butterworths, pp. 308, London, 1983.
 12. LS-DYNA3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.
 13. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, Designation: D 1621-73(Reapproved 1979), Annual book of ASTM standard, Vol. 08. 01.
 14. F. Chang, J. Hallquist. et al., "Finite Element Analysis of Low-Density High-Hysteresis Foam Materials and the Application in the Automotive industry", SAE 1994, Feb. 28~March 3, 1994, Detroit, MI. Paper No. 940908.
 15. J. Sherwood & C. Frost, "Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing polyurethane Foam Under Impact Loading", Polymer Engineering & Science, Aug. 1992, Vol. 32, No. 16, pp. 1138~1146.
 16. PAM-CRASHTM Theory Manual, released: June 1990, ESI/PSI
 17. DYNA3D Users Manual, John O. Hallquist(Originator), LLNL, 1991.
 18. Zhi-Hua Zhong, "Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems", Oxford University Press, 1993.