

충돌성능을 고려한 승용차 범퍼빔 단면의 최적화

Optimization of Bumper Beam Section for Crashworthiness

강 성 종*
S. J. Kang

ABSTRACT

Optimum design of bumper beam is investigated using nonlinear CAE structural analysis techniques.

In order to minimize its weight, while enhancing structural performances, bumper beam structural analyses were carried out to produce optimum section. Model is composed of bumper beam and stay. First, considering FMVSS safety standard, static strength and energy absorbing capability were estimated for several competitive bumpers through pendulum static analysis, and most promising section was chosen. Next, to ensure dynamic crashworthiness, performance for center pole impact was evaluated for the bumper beam with chosen section through pendulum static analysis, referring to IIHS bumper dynamic impact standard. Finally, 2.5 mph bumper beam was designed and its structural performance was estimated.

Through this investigation, an optimized bumper beam section with less weight of 20% while maintaining almost equal crashworthiness, compared with a conventional bumper beam section which proved its impact crashworthiness by experiments, was developed.

주요기술용어 : Bumper Beam(범퍼 빔), Pendulum Impact(펜듈럼 충돌), Pole Impact(폴 충돌), Collapse Strength(붕괴강도), Optimal Section(최적단면)

1. 서 론

최근 자동차의 안전에 관한 법규가 강화되고 있으며, 환경문제로 인해 연비향상 등을 위한 경량

화가 요구되고 있다. 강화되는 안전법규를 만족시키면서 동시에 경량화를 달성하기 위해서는 자동차 설계의 혁신적인 기술개발을 요구하고 있으며, 설계 초기단계부터 전산구조해석에 의한 자동차 부품의 구조최적화가 강력히 요구되고 있다.¹⁾ 범퍼(bumper)는 자동차의 가장 앞부분과 뒷부분에서

* 정회원, 대구효성가톨릭대학교 자동차공학부

차체에 장착되어 경미한 충돌시 충돌에너지를 최대한 흡수하여 차체의 변형을 막아주며, 과도한 충돌시에도 최대한의 강도와 에너지 흡수능력을 발휘하여 차체의 변형을 최소화 시켜주는 역할을 하는 중요한 자동차 외장부품이다²⁾ 범퍼는 범퍼 빔(bumper beam), 범퍼 스테이(bumper stay), 범퍼 페이스(bumper fascia)로 구성되며, 이중 강철제의 범퍼빔은 빔에 용접된 스테이를 통해 볼트로 차체 사이드 멤버(side member)에 장착되어 충돌시 대부분의 충돌에너지를 흡수하는 능력을 발휘하게 된다. 범퍼는 안전법규에서 요구하는 충돌 속도에 따라 5mph(mile per hour) 범퍼와 2.5mph 범퍼로 대별된다. 범퍼에 관한 대표적인 안전법규로는 미국 고속도로안전국에서 규정한 FMVSS part 581³⁾과 IIHS(Insurance Institute for Highway Safety)에서, 복구비용산출액을 근거로 소비자의 자동차 구매선택을 위한 정보제공을 위해, 자체적으로 실시하는 실험⁴⁾ 등이 있으며, 각 자동차 회사마다 보다 강화된 항목을 추가하여 설계목표로 삼고 있다. 이중 FMVSS part 581에서 규정한 5mph 펜듈럼 충돌(pendulum impact)과 IIHS의 범퍼충심에 대한 폴 충돌(pole impact)이 가장 대표적이라고 할 수 있다.

설계목표를 만족시키면서 동시에 경량화를 달성하기 위해서는 설계초기단계부터 전산구조해석에 의한 범퍼부품의 구조최적화가 강력히 요구되고 있으나, 설계 초기단계에서는 범퍼페이스 및 폼의 형태 및 물성치에 대한 데이터가 없을 뿐만 아니라, 주어진 시간이 짧아 모든 범퍼 구성물을 포함하는 범퍼시스템 전체의 해석이 곤란하고, 범퍼빔과 스테이가 충돌시 가장 중요한 역할을 수행하므로, 범퍼빔과 범퍼스테이만을 대상으로 하여 최적의 범퍼형상과 스테이형상을 산출하는 것이 범퍼의 충돌특성을 극대화하면서 경량화 목표를 달성할 수 있는 가장 타당하고 효율적인 방법이다. 아울러, 법규와 설계목표에서 요구하는 여러 종류의 설계기준을 모두 모사하여 해석하는 것은 많은 일량과 인력, 경비와 시간을 요구하므로 현실적으로 불가능하고 비능률적이므로 법규와 설계목표에 대한 면밀한 연구를 통해 해석, 평가 방법을 되도록 단순화하여 최적단면을 산출하는 것이 매우 중요하다.

이러한 사항을 고찰하여 본 연구에서는 자동차

의 중량, 차량스타일링 디자인에서 결정된 범퍼빔의 곡률에 대해 탄소성 대변형 정적해석과 동적충돌해석을 수행하면서, 효율적으로 설계초기단계에서 범퍼의 구조최적화를 수행하기 위한 해석모델과 해석수준을 고안하였으며 범퍼빔 단면 최적화 해석을 수행하여 최적단면을 연구개발하여 제시하였다.

2. 범퍼의 구조적 특성

범퍼는 크게 범퍼빔이 플라스틱로 된 플라스틱 범퍼와 범퍼빔이 강재(steel)로 된 스틸 범퍼로 대별되며, 플라스틱 범퍼는 경량화가 가능하나 소재가 비싼 반면, 스틸 범퍼는 소재는 저렴하나 무게가 많이 나가는 특징을 갖고 있다. 최근 치열해지고 있는 자동차 시장에서의 경쟁을 위해 원가절감 차원에서 스틸범퍼에 대한 관심이 고조되고 컴퓨터 성능의 발전과 구조해석에 의한 충돌해석기술의 진보에 따라 구조최적화에 의한 스틸 범퍼빔의 경량화가 시도되고 있다.

Fig.1은 본 연구의 충돌해석을 위해 작성된 해석모델로 범퍼빔의 단면형상과 스테이 장착상태 그리고 펜듈럼을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 프레스로 제작되는 일반적인 스틸 범퍼빔은 내부 레일(inner rail : rail 2)과 외부레일(outer rail : rail 1)의 두 개의 레일을 각각 프레스로 성형한 후, 필요에 따라 가운데에 보강재를 끼운후 점용접을 통해 결합시켜 제작한다. 다음에 여기에 별도로 제작된 오른쪽, 왼쪽 두 개의 스테이를 CO₂ 용접해 붙인다.

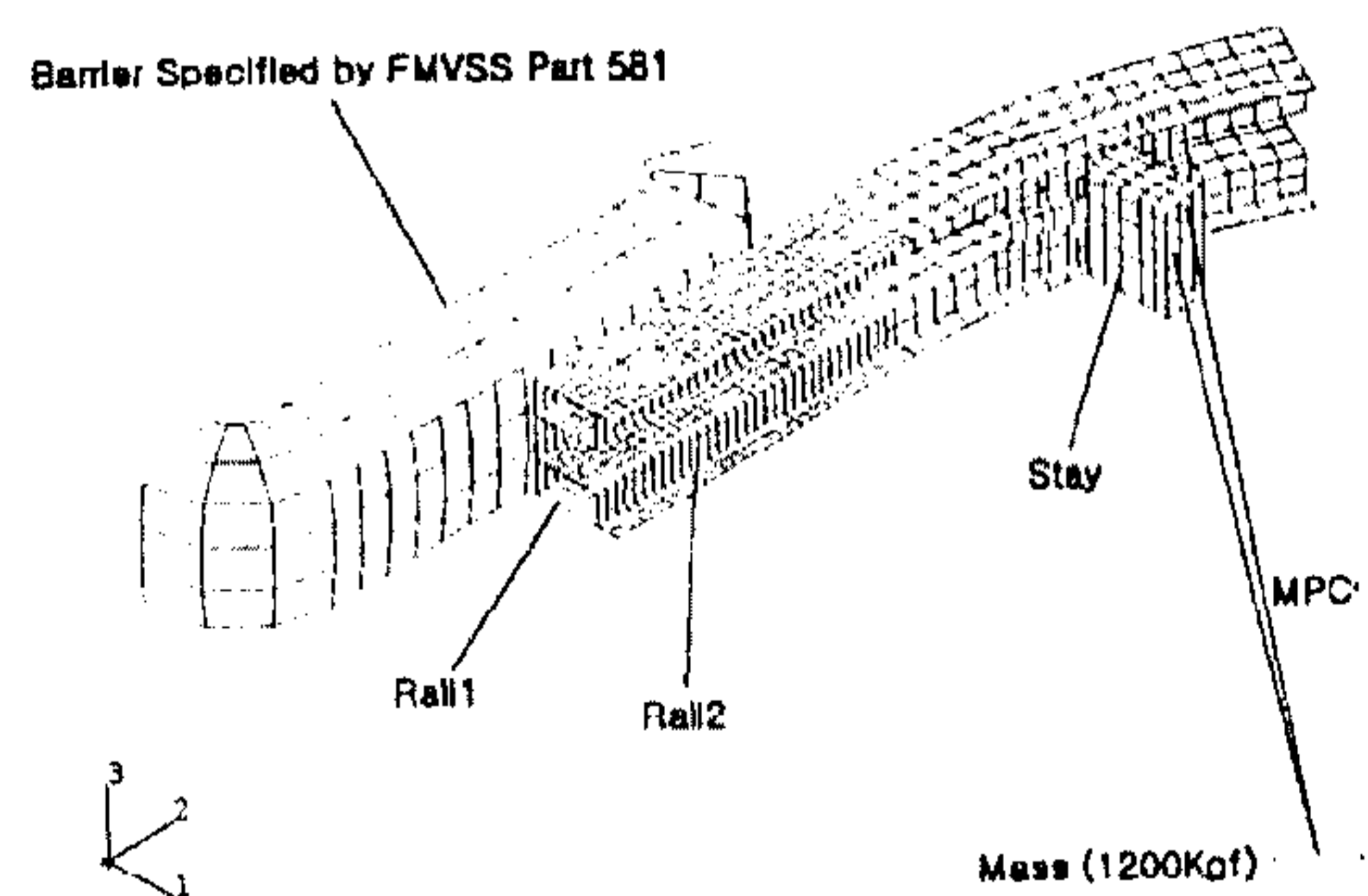


Fig.1 5mph 정적해석 모델

범퍼페시아(bumper fascia)는 플라스틱 재료로 만들어지며, 라디에타 홀(radiator hole)등 차량의 스타일링에 맞추어 외관을 주요시 할 뿐 충돌에 대한 구조적인 역할은 거의 없다. 또한, 우레탄으로 된 스티로폼은 범퍼 페시아와 범퍼빔 사이에 존재하여 주로 외부에 가해진 충돌력을 빔에 전달하는 역할과 함께 약간의 충돌에너지도 흡수하는 완충역할을 한다. 범퍼 빔은 외부에서 가해진 충돌력을 최대한 흡수하여 차체의 변형을 막는 중요한 구조적 역할을 수행하는 부품으로, 범퍼는 범퍼빔의 오른쪽과 왼쪽에 각각 용접되어 있는 강재의 스테이를 통해 차체 사이드멤버에 볼트로 결합되어 지지된다.

범퍼의 역할은 충돌력으로부터 차체의 변형을 최소화하는 것이므로, 각종 충돌력에 대해 변형량을 최소화하는 것이 중요한 설계목표가 되며, 이를 달성하기 위해서는 범퍼에 가해지는 충돌력을 대부분 흡수하는 범퍼빔의 단면 형상이 가장 중요하며, 다음으로는 충돌력을 지지하는 스테이의 형상이 중요한 설계인자가 된다.

3. 해석내용

3.1 모델링 및 해석방법의 고찰

설계 초기단계에서는 모든 범퍼부품의 형태 및 물성치에 대한 데이터가 없고, 주어진 시간이 짧아 모든 범퍼구성물을 포함하는 범퍼 전체모델에 대한 해석이 현실적으로 어렵고 또한, 법규내용 등 모든 설계검토 항목을 고려하는 일련의 해석도 곤란하므로, 고찰과 합리적인 가정설정을 통해 충돌시 가장 중요한 역할을 수행하는 범퍼빔과 범퍼스테이만을 대상으로 하여 최적의 빔 단면형상과 스테이형상을 산출하는 목표와 해석내용을 설정하였다.

(1) 고찰 및 가정설정

- 범퍼빔과 스테이만을 고려하여 가혹조건에 대한 정적/동적충돌해석을 수행하여 범퍼 충돌 특성의 상대적인 비교평가에 적용한다.
- 5mph 프론트 범퍼빔(front bumper beam) 해석에서 충분한 강도의 단면을 산출하여 리어 범퍼빔에도 산출된 단면을 그대로 적용한다.

(2) 해석내용

- 시험을 통해 기존 모든 법규와 기준을 통과한 범퍼빔 단면(이하 C단면이라 함. 두께 1.4mm)를 그대로 적용한 경우를 기준으로 하여, 상대 비교해가며 구조적으로 우수한 성능을 나타면서 충분히 경량화된 단면을 산출한다.
- 정적해석을 통해 최적 단면형상을 결정한 다음, 대표적인 동적 충돌해석을 수행한다.
- 정적해석은 펜듈럼 하중에 의한 하중-변위 특성과 평균 붕괴강도를 관찰한다.
- IIHS에 의한 폴 충돌시험 평가기준이 FMVSS 581 펜듈럼 충돌법규에 비해 상대적으로 가혹하므로 실질적인 충돌특성 비교는 폴 충돌해석을 적용한다.

정적해석은 탄소성 대변형해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하고 충돌해석인 경우는 ABAQUS/explicit을 사용하였으며, 모델링 및 결과처리를 위한 전후처리 프로그램은 PATRAN을 사용하였다.

3.2 5mph 범퍼빔 정적해석

정적해석은 펜듈럼 하중에 의한 하중-변위 특성과 평균 붕괴강도를 관찰하였으며, 펜듈럼 충돌 하중을 대상으로 하였다. 펜듈럼 충돌 법규에는 펜듈럼 좌우 길이방향의 중심을 범퍼의 좌우길이 중심선을 기준으로 어느 곳에 일치시키느냐에 따라 0/L(범퍼 중심선에 일치)과 300/L(범퍼 중심으로부터 좌측 혹은 우측으로 300mm 떨어진 곳에 펜듈럼 중심선 일치)이 있으며, 또한 높이방향으로 펜듈럼의 높이방향 중심을 지상 몇 인치 높이에 맞추느냐에 따라 16" 충돌과 20" 충돌이 있다. 해석내용을 단순화시키기 위해 범퍼에 가해지는 충돌력을 고려하면, 0/L 충돌이 300/L 충돌에 비해 가혹하고, 또한 대상차량의 제원에 따라 범퍼 장착시의 범퍼 높이와 형상을 고려할 때 20" 높이 펜듈럼 충돌이 16" 펜듈럼 충돌에 비해 가혹함을 알 수 있었으므로, 대표적으로 0/L 20" 펜듈럼 충돌 하중에 의한 해석만을 수행하였다. 이러한 가정은 가장 가혹한 조건에 대한 기본적인 해석으로 고성능의 구조최적화가 달성되면 기타 충돌에 의해 큰 문제는 발생되지 않으며, 만약 문제가 생기더라도 이는 국부적인 문제로서 국부적인 형상 변경과 보

강 등으로 손쉽게 문제해결이 가능하기 때문이다.

3.2.1 모델구성 및 해석방법

기본 해석모델은 범퍼빔과 스테이(1.4mm)로 구성하였으며, 모두 셸 요소(shell element)로 모델링하였으며 범퍼와 하중의 대칭성을 고려하여 모든 모델에 대해 전체 범퍼의 반쪽만을 모델링하였다. 범퍼빔은 강판을 프레스에 의해 성형한 두개의 레일을 점용접(spot weld)하여 구성되며, 레일 사이에 점용접된 점들은 다중구속요소(multi points constraint)로 서로 같이 움직이도록 하는 구속조건을 주었으며, 용접피치는 55mm로 일정하게 하였다.

스테이와 범퍼빔과 사이드멤버(front side member)가 볼트결합되는 부위에 경계조건을 부과하기 위해 질량요소(mass element)를 만들고, 범퍼 자체의 질량분포는 별도로 고려하지 않고, 자동차의 총중량(global vehicle weight)의 반에 해당되는

질량을 질량요소 절점에 추가하였으며, 질량요소와 사이드멤버 볼팅(bolting) 부위간을 다중구속요소로 구속하였다.

질량요소를 완전구속(fixed)하여 경계조건을 부과하고 펜듈럼을 상체로 모델을 구성하여(Fig.1), 펜듈럼에 정적하중을 가하면서 펜듈럼 중심점의 하중-변위 특성을 조사하였다.

Fig.1은 해석 모델을 그리고 Fig.2와 Fig.3은 2,348kg 정하중시의 변형형상과 응력상태를 각각 나타낸다.

먼저 충돌성능의 비교기준이 되는 단면인 C단면(Fig.4)을 그대로 적용하여 하중-변위 곡선을 산출하여, 본 연구를 통해 산출하고자 하는 최적의 단면형상을 가진 범퍼빔의 정적붕괴특성 목표치로 설정한 다음, 가능하다고 생각되는 여러 단면형상을 고안하여 단면을 바꿔가며 최적 단면형상과 두께를 결정하였다.

3.2.2 해석결과 및 검토

본 연구에 앞서 수행한 연구로부터 단면의 기본적인 형상을 바꾸지 않는 한 두께증가 만으로는 강도증가에 한계가 있으므로, 여러 후보 단면형상에 대해 5mph 정적해석을 수행하여, 하중-변형거리 특성을 관찰하여 최적의 단면을 선정하였다.

범퍼빔의 하중-변형거리 특성곡선은 일반적으로 초기 좌굴(initial buckling)까지의 초기강성 영역과 초기좌굴 후의 붕괴거동 영역으로 크게 나눌 수가 있다. 초기좌굴은 종방향의 길이와 종방향 플랜지의 개수 증가에 따라 크게 좌우되며, 붕괴거동

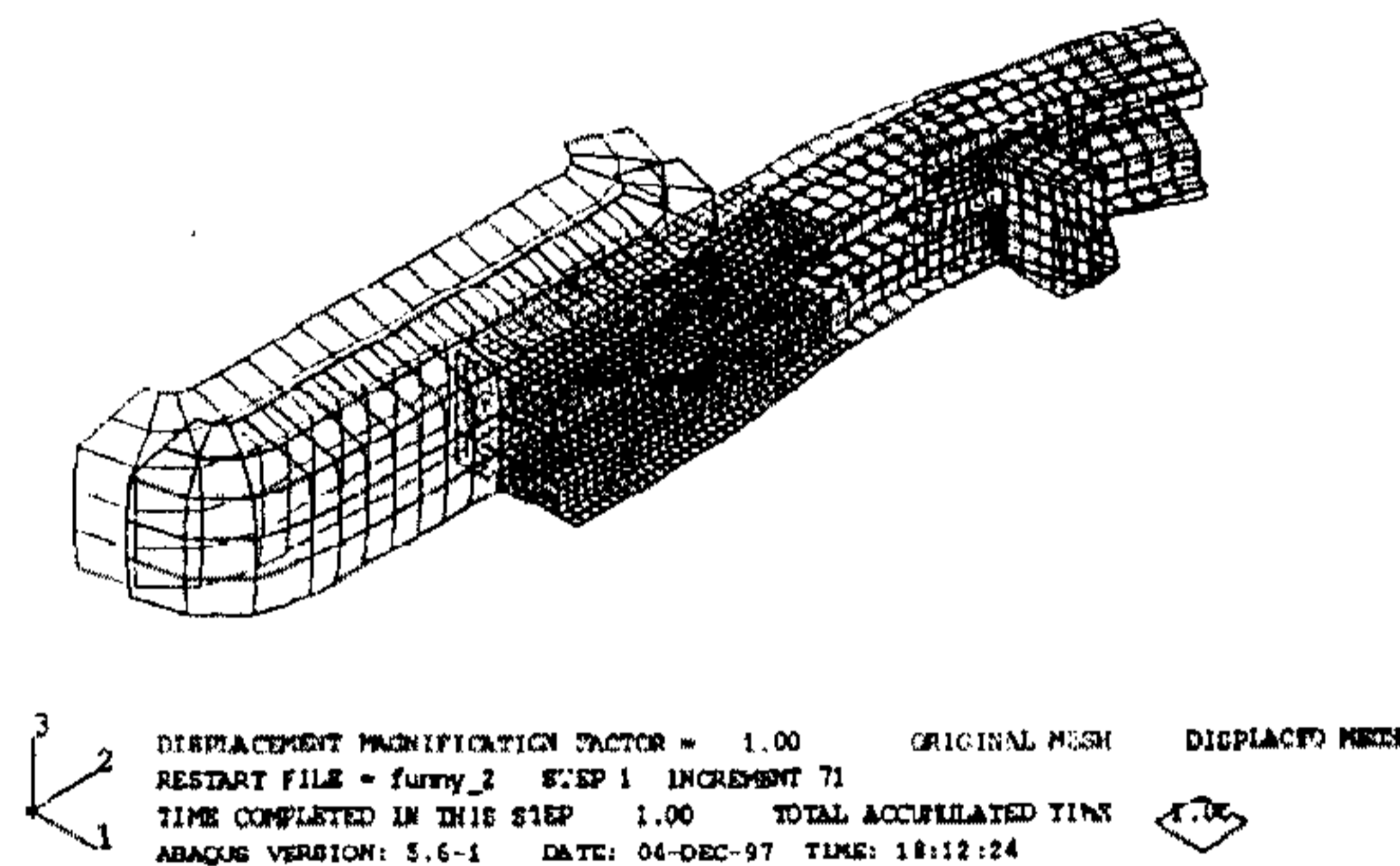


Fig.2 5mph 정적해석 변형모양(하중 2,348kgf)

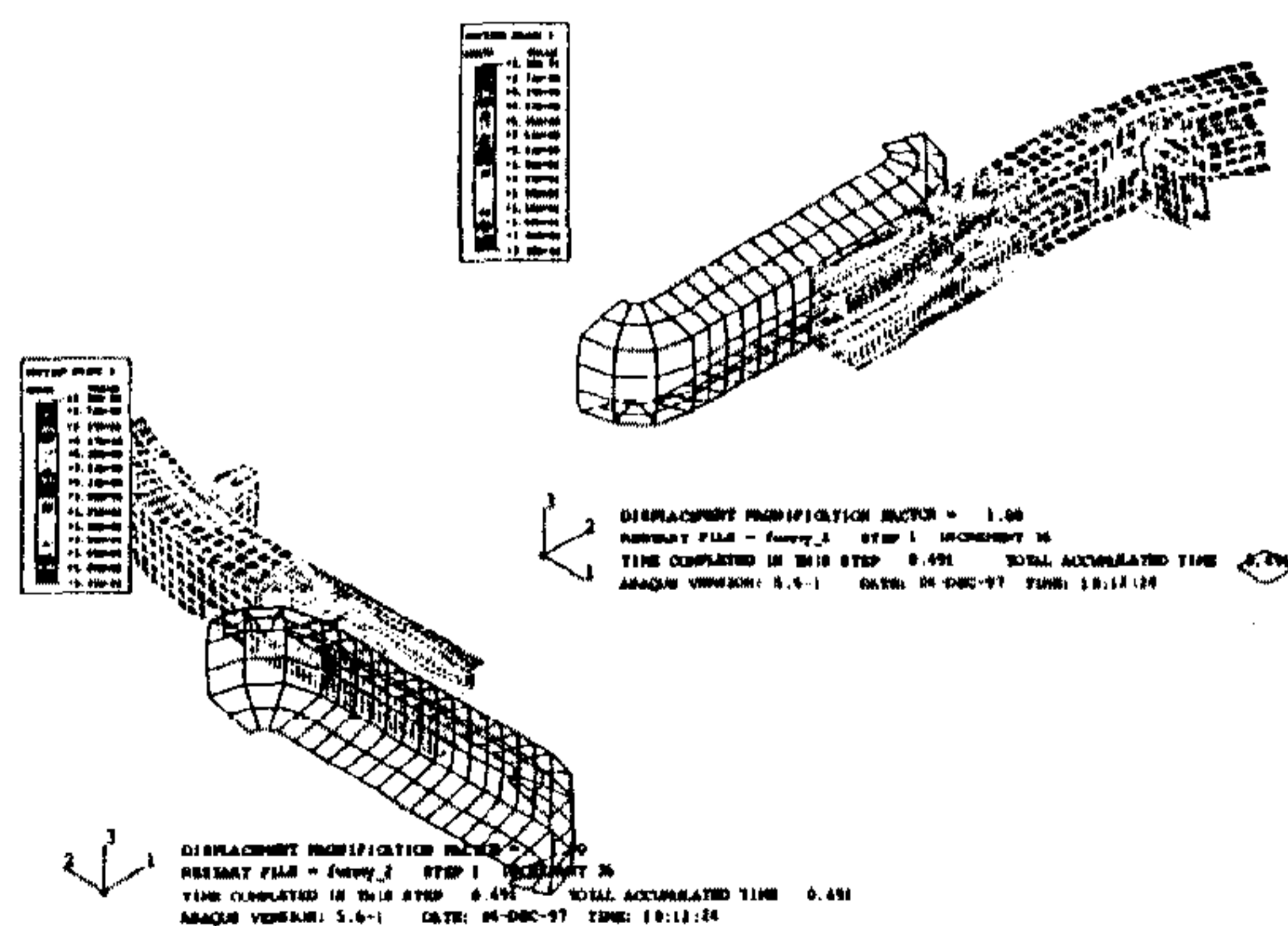


Fig.3 5mph 정적해석 응력분포(하중 2,348kgf)

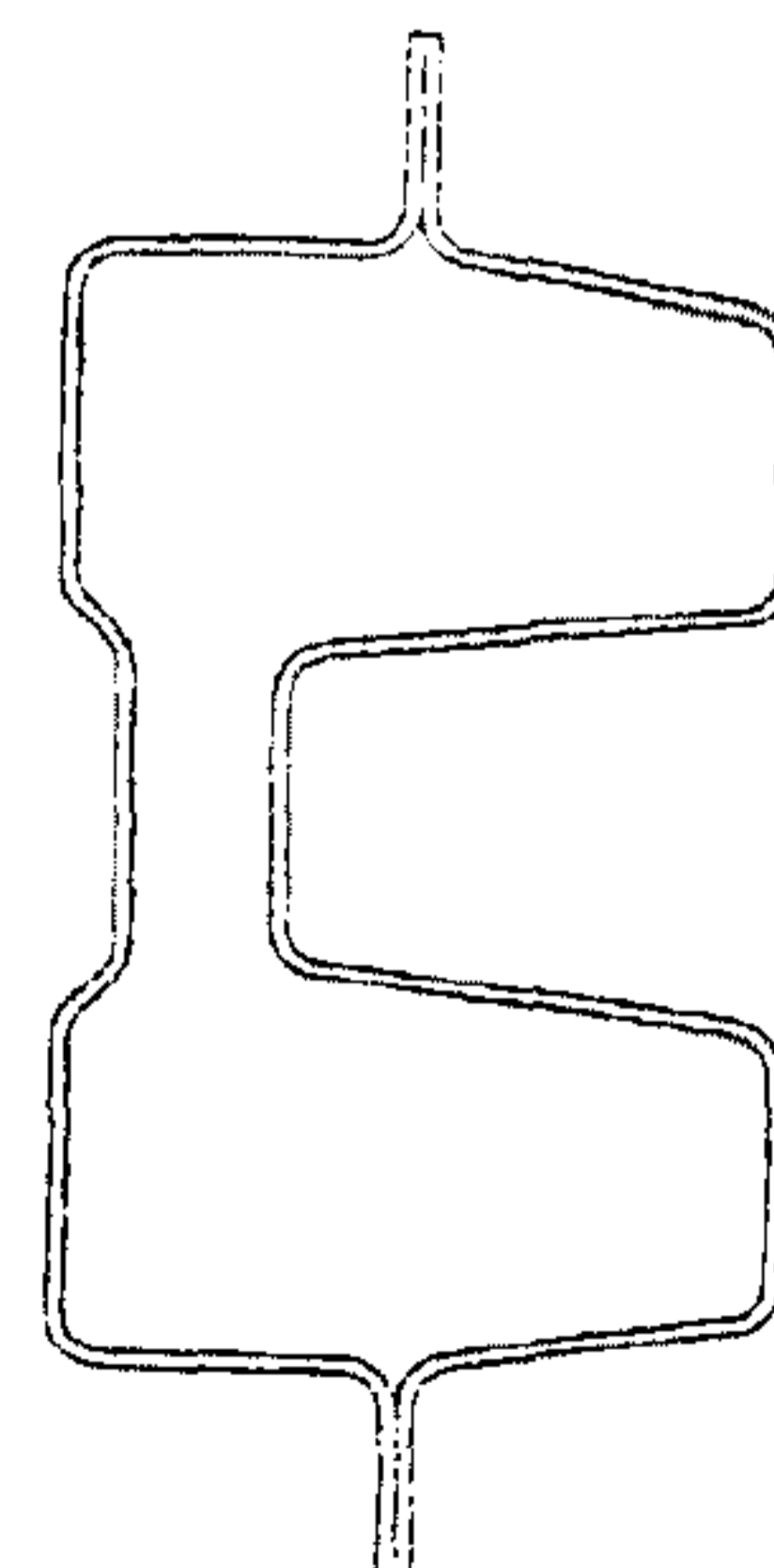


Fig.4 비교기준 범퍼빔 단면(C단면) : 두께 1.4mm

은 전체단면이 고르게 찌그러지는 형상 즉, 구조가 고르게 압축 소성변형되는 정도에 따라 좌우된다.^{5,6)}

여러 단면에 대한 붕괴거동과 하중-변형거리 특성곡선에 대한 분석을 통해 최적의 단면형상을 고안하였다.(Fig.5,6) 이 단면은 내부레일과 외부레일로 위, 아래 두개의 사각단면 형상을 만들고 가운데서 내부레일과 외부레일을 용접결합시켜, 정면 충돌시 레일간의 상호 미끄러짐을 최대한 억제시킴으로써 두 사각단면이 독자적으로 충분히 좌굴되면서 충돌에너지를 흡수하는 단면형상이다.(이하 D단면이라고 함) 그 단면 특성치는 각각 그림에서와 같다.

선정된 D단면을 기준으로 하여 두께를 1.4mm, 1.2mm, 1.0mm로 변경하면서 해석하여 하중-변형거리 특성을 관찰하였으며 C단면을 그대로 적용했을 때의 결과와 비교하여 검토 분석하였으며, 다음과 같은 사실을 확인하였다.(Fig.7)

- 그림에서 알 수 있듯 D단면에 기존 C단면과 같은 두께 1.4mm를 사용하는 경우 2.5mph 충돌에 영향이 큰 초기 강성은 물론(약 2배), 5mph 펜들럼 충돌과 풀 충돌 등에 있어 큰 영향을 끼치는 약 15mm이후의 평균 정적붕괴 강도도 전범위에 걸쳐 평균적으로 C단면 보다 상당히 향상됨을 알 수 있다.(L단면 적용시

약 1,800kgf서 D단면 적용시 약 2,700kgf로 향상됨)

- 붕괴강도를 약간 낮추고, 경량화를 달성하기 위해 D단면을 1.2mm와 1.0mm로 하여 정적해석을 수행한 결과, 초기강성은 큰 변화가 없으며, 15mm 이후의 평균붕괴강도는 두께 1.2mm 경우 약 2,200kgf, 두께 1.0mm의 경우 약 1,800kgf로 나타나 두께를 1.0mm로 하여도 정적강도상에 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 이때, C단면의 단면적은 676.9mm²이고, 단면(두께 1.0mm)의 단면적은 532.5mm²로 C단면 대비 경량화율은 단순히 단면적 비교로 21.3%에 달한다.

3.3 5mph 범퍼빔 충돌해석

3.3.1 모델구성 및 해석방법

C단면 적용모델과 최적 D단면 모델에 대해 가장 가혹한 충돌평가 항목인 5mph 풀 충돌해석을 수행하여 동적충돌특성의 결과와 상대적으로 비교하여 D단면의 충돌특성을 검증하였다.

범퍼자체의 질량분포에 의한 관성력효과를 무시하여 범퍼모델은 정적해석 모델을 그대로 사용하였으며 풀은 강체로 모델링 하였다.(풀 직경: 130mm) 경계조건으로는 풀의 기준절점(reference node)

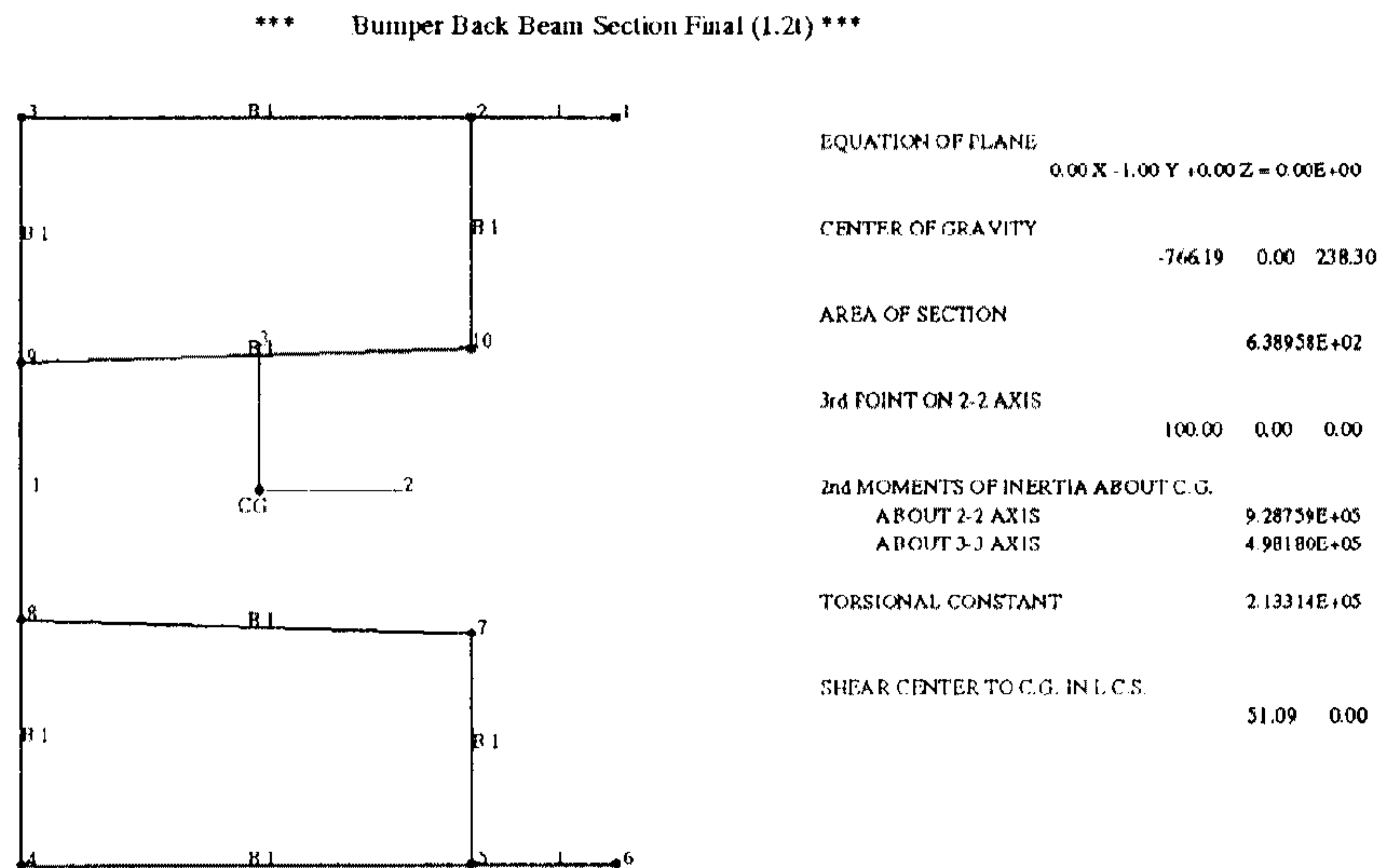
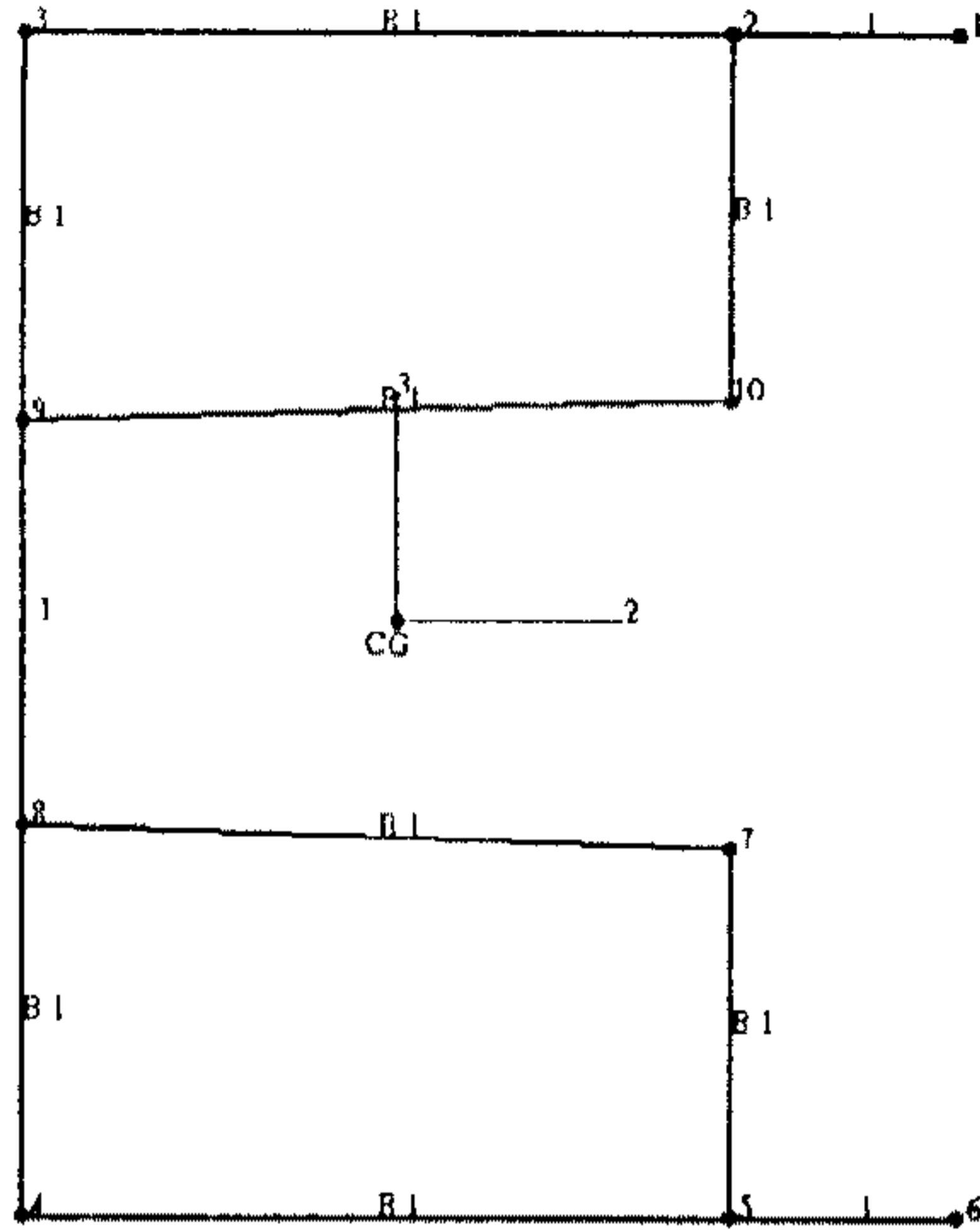


Fig.5 산출된 최적단면의 형상 및 단면특성(1.2t)

*** Bumper Back Beam Section Final (1.0t) ***



EQUATION OF PLANE	0.00 X -1.00 Y +0.00 Z = 0.00E+00
CENTER OF GRAVITY	-766.19 0.00 238.30
AREA OF SECTION	5.32465E+02
3rd POINT ON 2-2 AXIS	100.00 0.00 0.00
2nd MOMENTS OF INERTIA ABOUT C.G.	
ABOUT 2-2 AXIS	7.73966E+05
ABOUT 3-3 AXIS	4.15150E+05
TORSIONAL CONSTANT	1.77761E+05
SHEAR CENTER TO C.G. IN L.C.S.	51.09 0.00

Fig.6 산출된 최적단면의 형상 및 단면특성(1.0t)

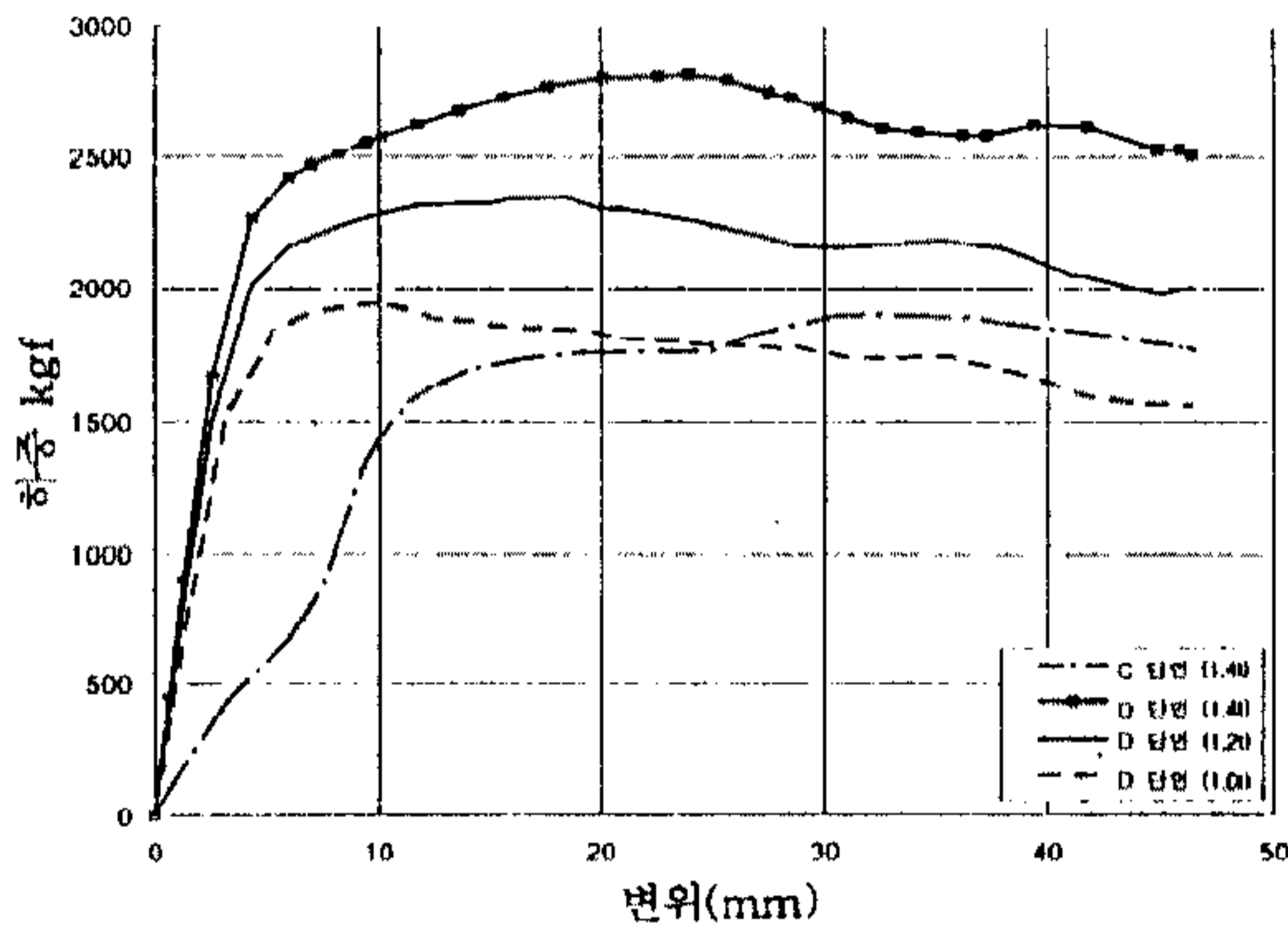


Fig.7 5mph 정적해석 결과(하중-변형거리 선도)

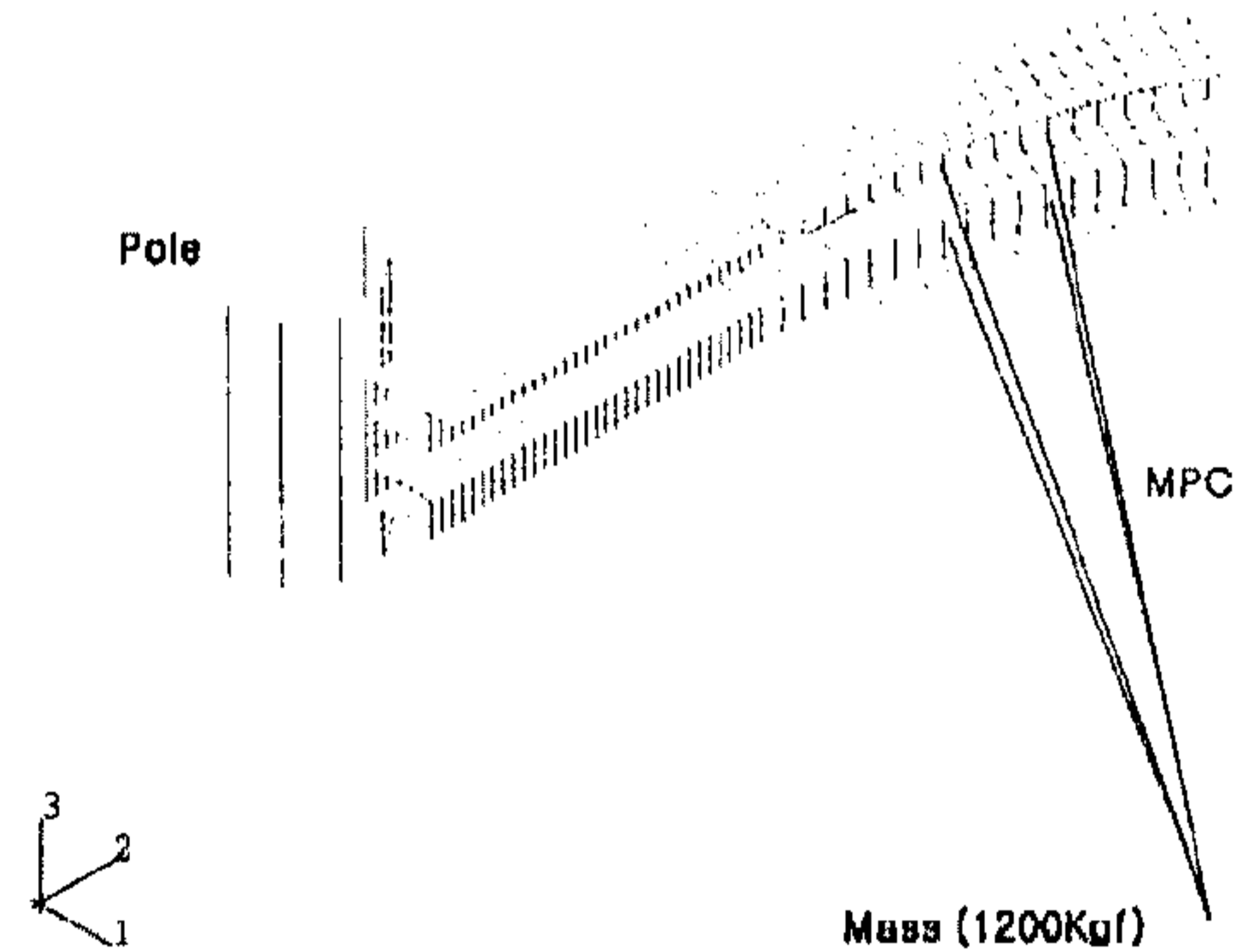


Fig.8 충돌해석(5mph pole impact) 모델

을 완전구속하였으며, 구속된 강체(rigid) 폴에 초기속도를 가진 범퍼모델이 충돌되는 것으로 하여 동적해석이 수행되었다.(Fig.8)

C단면을 적용한 해석결과와의 상대비교에 중점을 두고 있고, 범퍼페시아와 폼이 고려안된 레일과 스테이만의 모델이므로 근사적으로 범퍼페시아와 폼에 의해 전체 충돌에너지의 약 50%가 흡수된다고 추정하여 다음식에 의해 단순계산된 초기속도(3.54mph)를 질량요소(차량 총중량 1,200kg 부가)의 절점과 범퍼빔, 스테이 구조의 모든 절점에 부여하였다.(이러한 충돌속도의 가정은 상대적인 비교에 현 연구의 중심이 있으므로 충분히 타당성을 가짐)

$$\left(v' = \frac{5mph}{\sqrt{2}} = 3.54mph \right)$$

경계조건으로는 폴의 기준 절점을 완전구속 하였다.

3.3.2 해석결과 및 검토

정적해석을 통해 산출한 두께 1.2mm, 1.0mm의 D단면 범퍼빔에 대해 직경 130mm의 폴에 3.54mph의 속도로 차량을 충돌시키는 동적해석을 수행하였다. 또한, 같은 방법으로 C단면 범퍼빔에 대한 폴 충돌을 수행하여 그 결과를 비교하였다.(Fig.9, 10, 11) 해석결과 전체적으로 두께 1.2mm의 D단면 범퍼빔은 C단면 범퍼빔에 비해 변형거리가 20

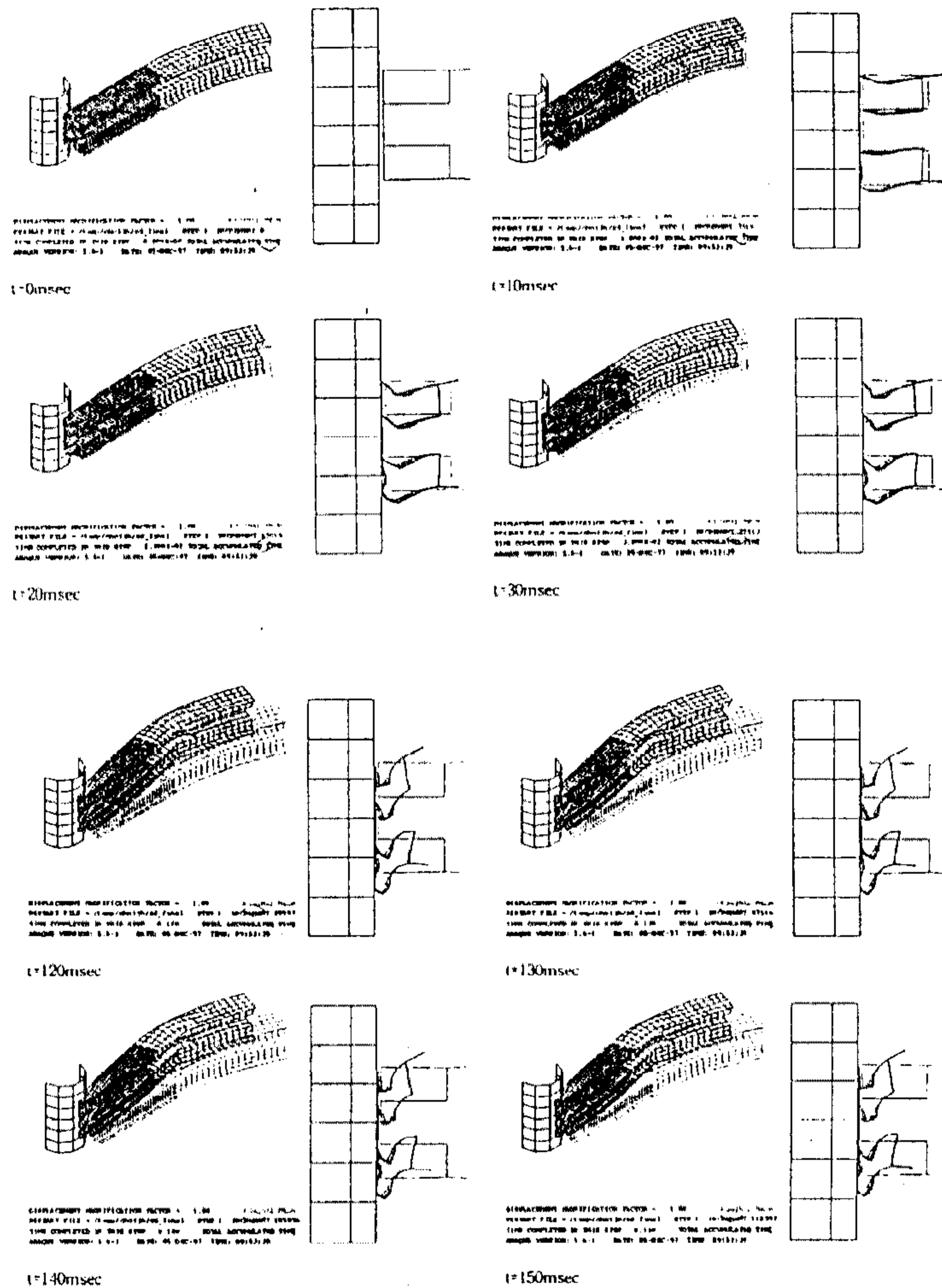
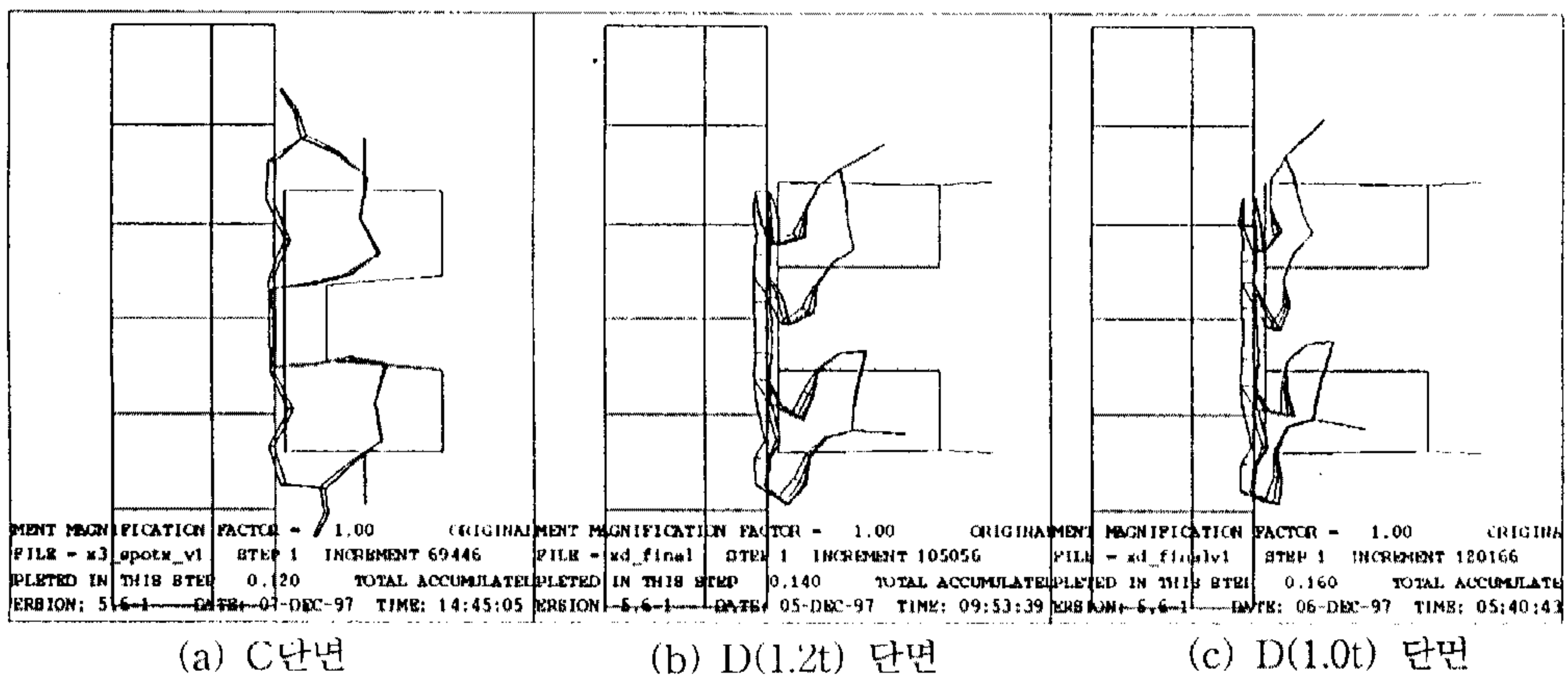


Fig.9 충돌해석(5mph pole impact) 결과 (시간별 변형모양)



(a) C단면

(b) D(1.2t) 단면

(c) D(1.0t) 단면

Fig.10 충돌해석(5mph pole impact) 결과 (최대변형)

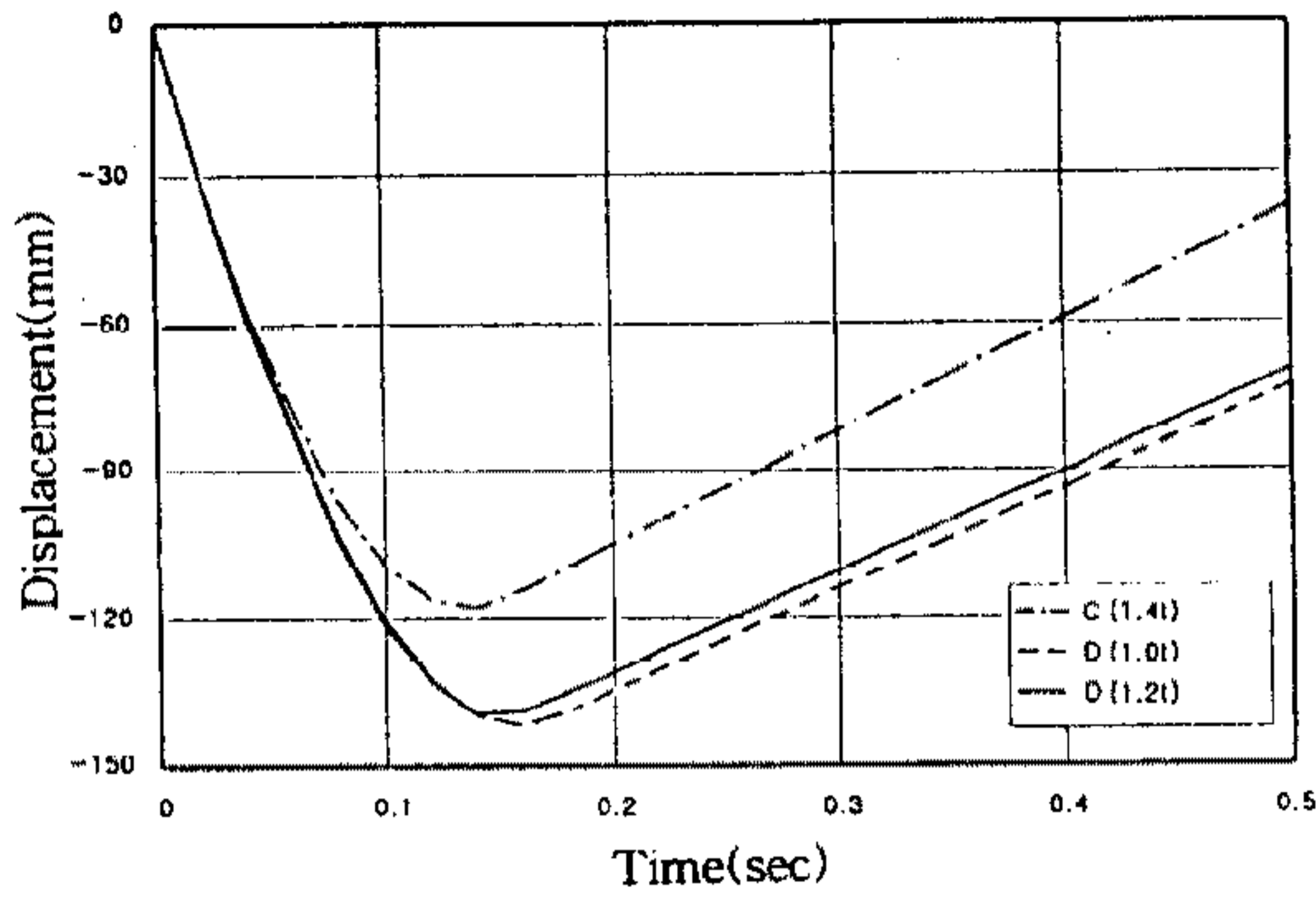


Fig.11 충돌해석(5mph pole impact) 결과
(시간-변형거리 선도)

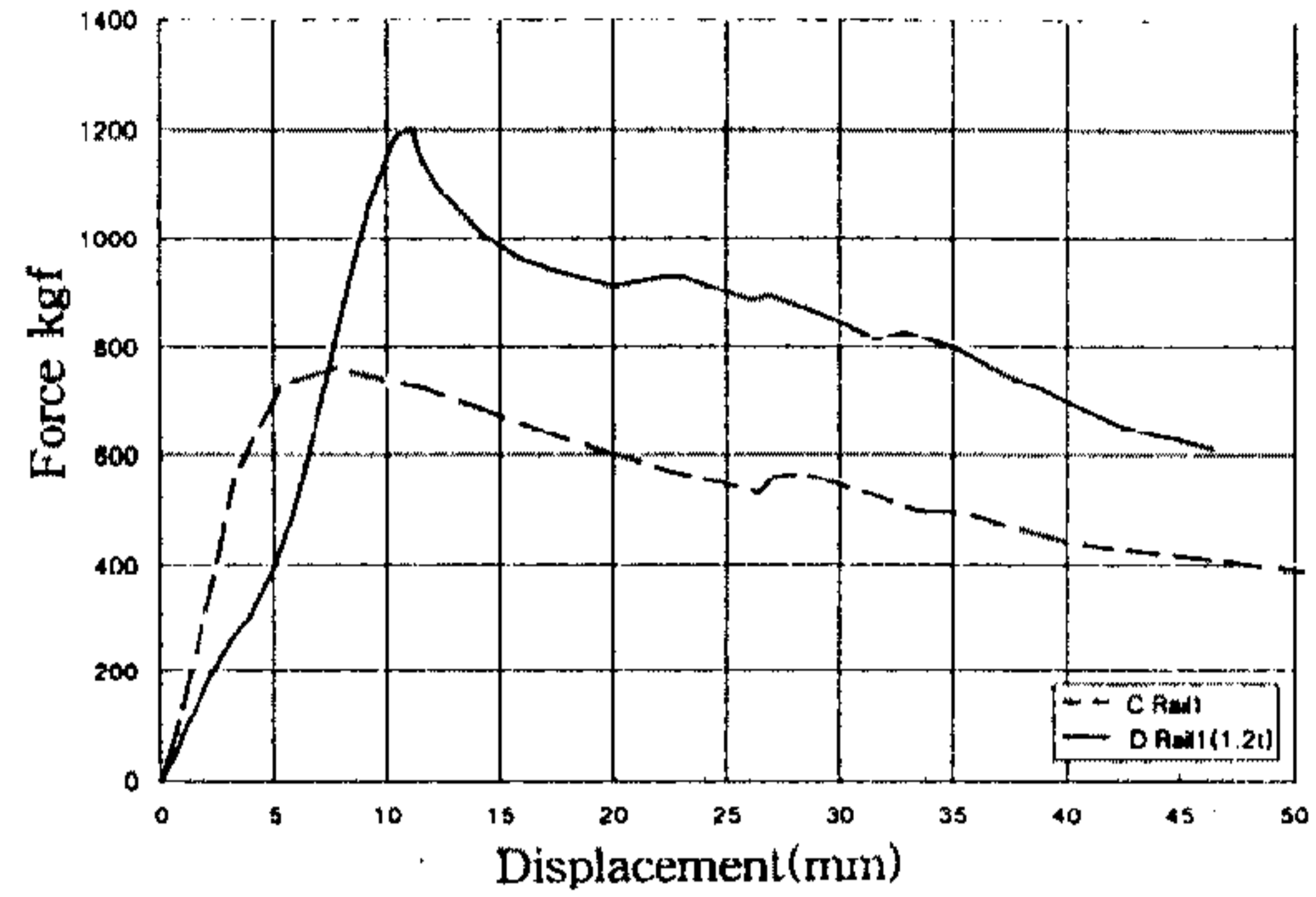
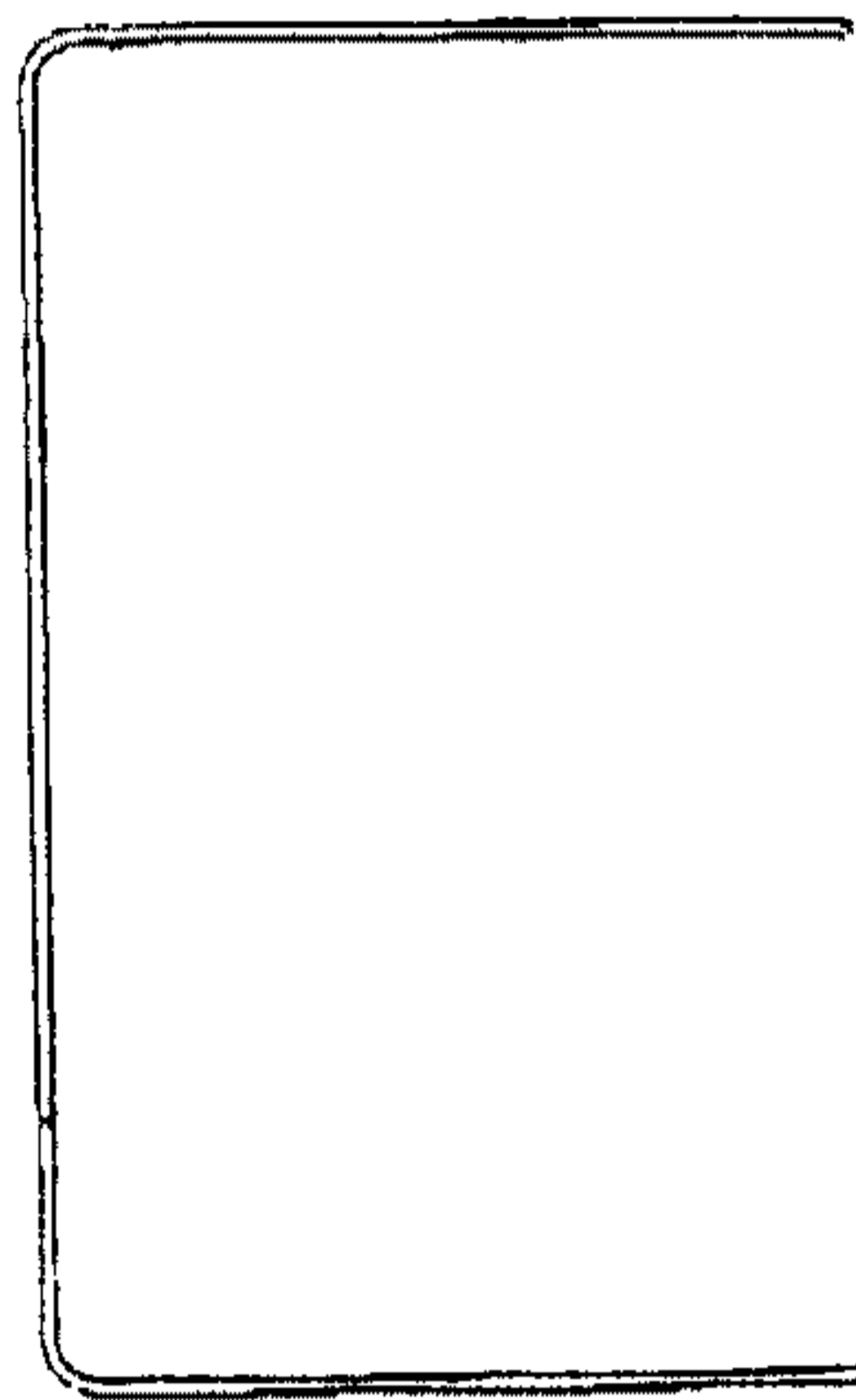
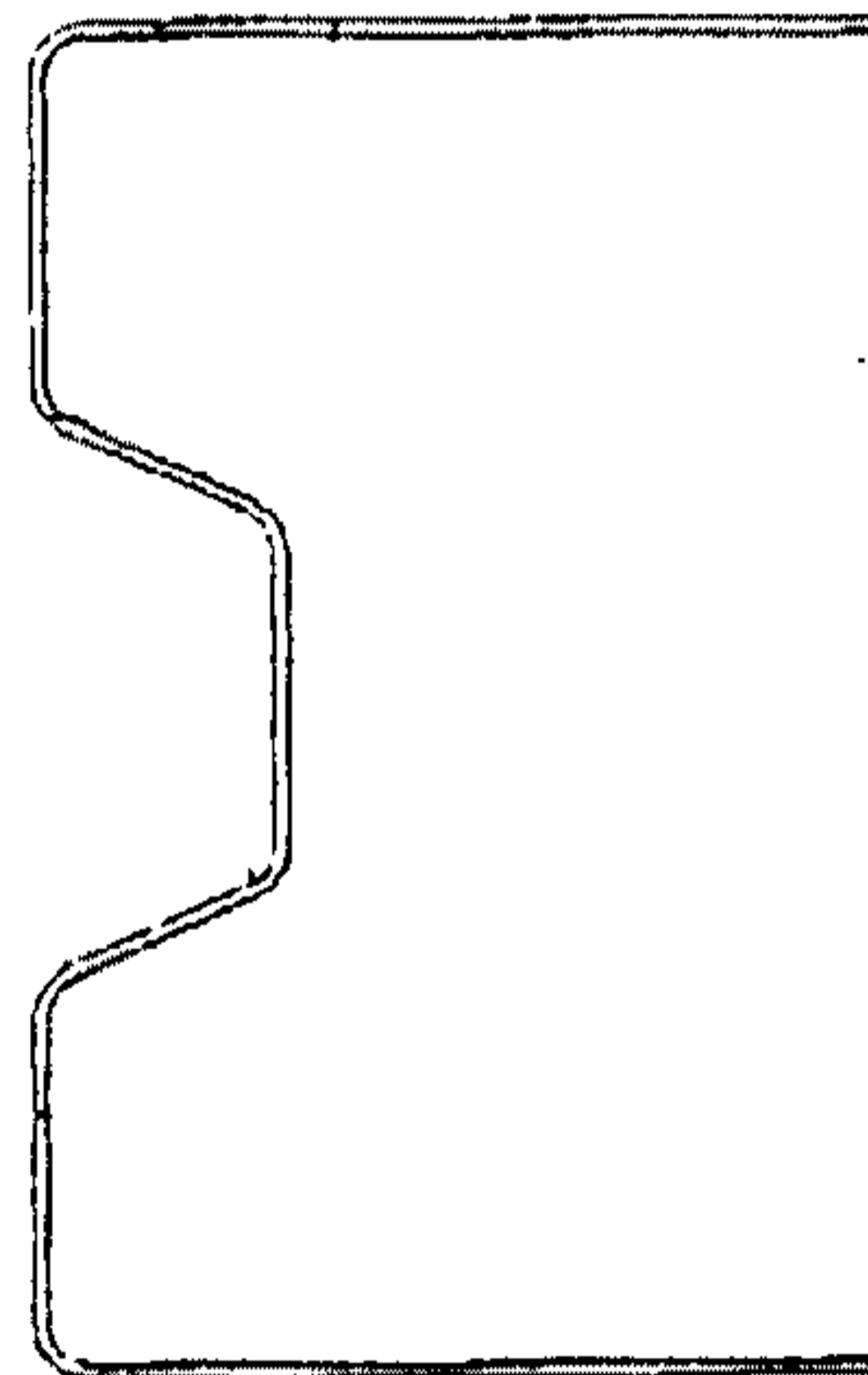


Fig.12 2.5mph 정적해석 결과(하중-변형거리 선도)



(a) 해석 현재단면
(w/o center forming)



(b) 개선단면
(with center forming)

Fig.13 2.5mph 범퍼빔 최적단면(D단면)

~40% 적게 나타나며 두께 1.0mm의 경우도 C 단면 범퍼빔과 비슷한 충돌특성을 나타내고 있다.

3.4 2.5 mph 범퍼빔 정적해석

내부레일(rail 2)을 제거한 외부레일(rail 1)만의 2.5mph 모델에 5mph와 같은 하중, 경계조건을 적용하여 하중-변형거리를 산출하여 비교하였다. (Fig.12)

5mph 정적해석에서와 마찬가지로 두께 1.2mm의 D단면 범퍼빔이 거의 전 범위에 걸쳐 붕괴강도가 50% 가까이 크게 산출된다. 초기강도가 약간 적게 나타나나 저속충돌에 대한 폼의 충돌에너지 흡수역할을 기대할 때 이는 큰 문제가 되지 않음

리라 생각되며, 구조적으로는 Fig.13과 같이, 외부레일 전면에 약간의 구조포밍(structural forming)을 줌으로서 해결될 수 있으리라 생각된다.

4. 최적단면 검토

이상의 해석결과들을 검토할 때, 동급의 자동차에 있어 범퍼 안전성능을 고려한 목표성능을 확보하면서 동시에 충분한 경량화를 달성하기 위해서는, 본 연구를 통해 개발된 최적단면을 적용하고, 5mph 범퍼빔은 외부레일과 내부레일 모두 두께 1.0mm를, 2.5mph 범퍼빔은 전면부에 초기강도 확보를 위해 폼을 추가하여 두께 1.2mm로 제작하

는 것이 합리적인 단면이 되리라 생각된다.

이때, 5mph 범퍼레일의 최종단면적은

$$C\text{단면(두께 } 1.4\text{mm)}=676.9\text{mm}^2$$

$$D\text{단면(두께 } 1.0\text{mm)}=532.5\text{mm}^2$$

이 되어 기존 C단면에 비해서 약 21.3% 경량화되며,

2.5mph 범퍼레일의 최종단면적은

$$C\text{단면(두께 } 1.4\text{mm)}=287.0\text{mm}^2$$

$$D\text{단면(두께 } 1.2\text{mm)}=260.0\text{mm}^2$$

가 되어 기존 C단면에 비해서 약 9.4% 경량화된다.

5. 결론

- 1) 일련의 정적해석과 동적해석을 수행하여, 실험을 통해 이미 범퍼통과가 입증된 기존의 두께 1.4mm의 범퍼빔 단면에 대한 결과와 비교하면서, 범퍼빔 최적단면형상을 산출하였다.
- 2) 최적단면형상을 적용할 때, 5mph 범퍼빔의 경우 모든 레일에 두께 1.0mm로 설계가 가능하며, 이때 무게는 기존 범퍼빔 대비 약 21.3%나 경량화된다. 또한, 2.5mph 범퍼빔의 경우는 레일 두께를 1.2mm로 하여 약 9.4% 경량화시킬 수 있다.
- 3) 프레스 성형과 점용접이 아닌 순수 롤포밍(roll forming) 성형에 의해 플랜지와 점용접점을 없애는 경우, 플랜지의 제거로 초기 강도의 구조성능에 저하가 있을 수 있으나, 구조취약부인 점용접부가 없어지고 연속적

인 구조체를 확보할 수 있으므로, 강도 향상을 기대할 수 있다. 롤포밍에 의한 생산성의 이점을 살린 단면성형에 관한 연구는 향후 범퍼빔의 구조성능과 생산성의 관점에서 충분히 연구할 가치가 있다.

참고 문헌

1. Norman Jones and Tomasz Wierzbicki, "Structural Crashworthiness", Butterworths, 1985.
2. Isamu Nishimura, Toshiaki Sakurai, "Prediction of the Crashworthiness of Vehicle Body Aided Computer", SAE paper 912581, 1991.
3. Mounir M. Kamal and Joseph A. Wolf, Jr. "Modern Automotive Structural analysis", Van Nostrand Reinhold, pp. 81 ~ 82, 1982.
4. Insurance Institute of Highway Safety, Status Report, Vol. 30, No. 7, 1997.
5. A. Toyama, K. Hatano, E. Murakami, "Numerical Analysis of Frontal Crash Phenomena", SAE paper 920357, 1992.
6. Takao Mori, Hidemitsu Hamano, Koji Suzuki, "Structural Performance of Straight Beams with a Single Hat section", Autumn Conference of Japan Society of Automotive Engineers, JSAE 9305715, 1993.