

단순한 디자인 방법을 이용한 덴팅 영향인자에 관한 연구

정 동 원*

(2001년 2월 17일 접수, 2001년 9월 11일 심사완료)

A Parametric Study of Denting Using a Simplified Design Approach

Dong-Won Jung

Key Words: Denting(덴팅), Stiffness(강성), Oil Canning(오일캐닝), Design(디자인), Panel(판넬)

Abstract

In order to improve automotive fuel economy, vehicle weight should be reduced. Achieving significant weight reductions will normally require reducing the panel thickness or using alternative materials such as aluminum alloy sheet. These changes will affect the dent resistance of the panel. In this study, the correlation between panel size, curvature, thickness, material properties and dent resistance is investigated. A parametric approach is adopted, utilizing a "design software" tool incorporating empirical equations to predict denting and panel stiffness for simplified panels. The most effective period to optimize an automotive body panel is early in its development. The developed design program can be used to minimize panel thickness or compare different materials, while maintaining adequate panel performance.

1. 서 론

강성, 덴팅에너지, 버클링 하중들에 대한 예측은 차체 설계에 있어 빠뜨릴 수 없는 아주 중요한 부분으로 차체 외판에 있어 아주 중요한 설계기준이 된다. 차체 판넬의 성능은 여러 가지 인자들에 의해 평가되어지고 이 인자들은 서로 상호 영향을 준다. 최근 세계적 추세는 차량 경량화에 대한 요구가 증가하여 설계, 재료, 두께 그리고 모든 차체 외판의 공정이 최적화 될 필요가 있다.^(1~3)

충분한 강성과 적당한 덴팅 저항은 자동차 차체 판넬설계에 있어 중요한 요구사항인데 이러한 것들은 과거에는 경험적인 설계에 의해 크게 의존되어 왔지만 알루미늄과 같은 새로운 재료들이 소개되고 설계도 무게가 좀더 가벼운 경량화가

요구됨에 따라 판재 기초 연구에 대한 보다 깊은 이해가 절실히 필요로 하고 있다. 이것은 판재 성능 연구의 주제가 되어 오고 있지만 문제의 복잡성 때문에 완전한 이해는 아직도 계속 추구하고 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 디자인 해석프로그램을 개발하여 곡률진 사각판넬에 적용하여 강성, 덴팅 에너지 그리고 임계 버클링하중을 쉽고 빠르게 구하여 판재성능연구에 도움이 되고자 한다.

차체 판넬에 대한 데이터의 부족으로 철^(4,5)과 알루미늄^(6~8) 판넬의 강성과 덴팅 저항에 관한 실험적 연구가 진행되어 왔으며 Vadhavkar⁽⁹⁾과 Mahmood⁽¹⁰⁾는 덴팅 현상들을 예측하는데 이런 실험 결과에서 나온 식들을 이용하기 시작했다. 판넬 강성과 덴팅 저항에 대한 보다 나은 예측을 위한 많은 노력이 유한요소 해석과 실험적 접근^(11,12)에 집중되어지고 있다. 최근의 연구들은 Shi⁽¹³⁾에 의해서 철판의 정적, 동적 덴팅특성에 관한 연구로 두각을 나타내었다. 알루미늄 판넬의 정적, 동적 덴팅의 실험적 연구는 Thorburn⁽¹⁴⁾에 의해 연구되었다.

* 회원, 제주대학교 기계에너지생산공학부

E-mail : jdwcheju@cheju.cheju.ac.kr

TEL : (064)754-3625 FAX : (064)-756-3886

덴팅 응답의 유한요소 모델링은 Chavali와 Song⁽¹⁵⁾의 성형 데이터의 제한된 remapping을 구현한 연구를 포함한 다양한 정적 테스트 경우들이 발견될 수 있다. 동적 덴팅 모델링에서의 연구는 참고문헌^(16,17)에서 찾을 수 있으며 Ekstrand와 Asnafi⁽¹⁸⁾는 어느 정도 범위에서 구조적 지지 경계조건들의 덴팅 저항에 대한 영향들을 계량화하기 위해 연구하고 있다.

강성은 주어진 하중하에서 변형을 제한하는 정도로 정의되고 차량운행중 요동침(flutter)과 관계가 있어 중요한 차체판넬 특성이고 강성이 덴팅 정도에 주된 영향을 갖는다고 알려져 있기 때문에 덴팅과 연관해서 중요하게 고려된다. 이런 목적 때문에 주어진 하중점에서 하중-변형곡선의 기울기나 또는 원점에서부터 주어진 하중-변형곡선상의 점까지의 직선의 기울기로 강성을 정의하는 것은 매우 의미가 있으며 후자를 secant stiffness라고 부른다. 덴팅은 정적 또는 동적 하중에 의한 판넬의 영구변형으로 정의된다. 정적 덴팅은 물체가 펜더(fender)에 압력을 가하거나 후드(hood)에 놓여 있을 때 처럼 차체 판넬에 천천히 가해지는 힘과 관련이 있다. 반면 동적 덴팅은 이를테면 우박이나 쇼핑 카트와의 충돌 같은 충격하중에 의해 발생한다.

본질적으로 다른 점은 동적 덴팅은 주어진 충격에너지와 관련이 있는 반면, 정적 덴팅은 천천히 가해지는 힘이나 변형과 관련이 있다. 자동차 생산업체들 중에 덴팅을 정의하거나 허용할 수 있는 덴팅성능을 정해 놓은 곳은 아직 없다. 판넬에서 강성, 덴팅, 그리고 오일캐닝(oil canning)의 연구를 위해 디자인해석 프로그램을 개발하여 해석하였다. 판넬들은 곡률진 사각판넬들로 실제 차체 판넬과 비교하여 아주 단순화하였지만, 강성과 덴팅에 영향을 준다고 생각되어지는 인자들의 변화는 허용하였다. 자동차 차체 판넬에서 특징적인 3가지 두께의 판 재료는 성형공정 동안 얇아짐이 없었다는 가정으로 디자인 해석을 수행하였다. 두가지 크기의 사각판넬들이 고려되었고 외각면들이 고정되었고 작은 곡률반경(R=100mm)부터 평면까지 수직한 두방향으로 조합되어 있다. 모든 판넬은 AA6111합금으로 가정하였다. 정적하중하의 처짐인 강성과 동적 덴팅에너지, 임계 버클링하중들이 개발된 디자인 해석소프트웨어를 사용하여 해석되었다.

2. 이론 해석

설계기준을 계산하는데 이용 가능한 다양한 방법들이 있다. 그런 방법들 중의 하나가 유한요소 해석이다. 실제 설계업무단계에서 유한요소법의 적용은 많은 계산시간, 미지의 경계조건들과 금형 데이터 준비를 위한 시간 소모 등으로 인해 아직까지는 쉽지 않다. 기준에 맞추기 위한 반복적인 공정과정에서 유한요소해석으로는 큰 도움이 될 수 없고 원하는 결과들도 빨리 구할 수 없다. 사용되어질 수 있는 다른 방법들은 수많은 차체 판넬들로부터 오랜 경험으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 유도된 경험식과 구면 셸 이론(spherical shell theory)을 이용하는 방법이 판넬들의 덴팅현상을 예측하는데 이용되어질 수 있으므로 본연구에서는 이를 이용하여 프로그램을 개발하였다.

2.1 강성

강성은 대부분의 외부차체 판넬설계시의 주 관심사이다. 판넬이 강성이 크면 클수록 하중을 받거나 자신의 무게 하에서 덜 휘어질 수 있다. 또한 강성은 차가 험한 도로를 달릴 때 판넬의 요동침을 방지할 수 있다. 이론적인 셸 강성의 표현은 아래의 형태로 기술되어질 수 있다.^(9,19)

$$K = \frac{9.237Et^2H_c\pi^2}{kL_tL_t\sqrt{1-\nu^2}} \quad (1)$$

여기서 H_c 는 전체 크라운 높이, k 는 구면 셸 계수, E 는 영의 계수(Young's modulus), t 는 두께, ν 는 푸아송 비, L_t 는 세로길이 그리고 L_t 는 가로길이를 나타내며, 구면 셸 계수 k 에 대한 경험적인 표현은 아래와 같다.^(9,19)

$$k \begin{cases} = 8.06 - 0.088 \frac{H_c}{t} & \text{for } \frac{H_c}{t} < 20 \\ = 6.3 & \text{for } 20 \leq \frac{H_c}{t} \end{cases} \quad (2)$$

재료 특성은 영의 계수와 푸아송 비로 결정되고 크라운 높이가 다음 식으로 부터 계산되어질

수 있다.

$$H_c = \frac{L_l^2}{8R_l} + \frac{L_t^2}{8R_t} \quad (3)$$

여기서 R_l 은 세로방향 반경, R_t 은 가로방향 반경이다.

2.2 동적 덴팅 에너지

외부 차체 판넬에서 고려되어질 또 다른 기준은 덴팅 저항이다. 빈약한 덴팅 성능은 자동차가 우박을 맞을 동안 영구적인 변형을 야기할 수 있다. 자동차 택리드(Deck lid)와 후드는 충격에 쉽게 변형이 생겨 찌그러질 수 있다. 날아오는 돌맹이나 쓰레기 등도 외부 차체 판넬에 변형을 야기시킬 수 있다. 임계 덴팅 저항을 계산하는데 이용 가능한 몇 가지 방법들이 있다. 현 연구에서 이용되는 방법은 경험식들을 사용하여 프로그램을 개발하여 덴팅 에너지를 예측하였다.^(9,20) 아래식은 판넬들의 상대적인 덴팅 저항을 계산한다. 덴팅에너지값이 커질수록 판넬의 덴팅 저항은 더 커지게 된다. 경험에 의해 구해진 덴팅 에너지에 관한 식은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.^(9,10)

$$W \propto \frac{\sigma_y^2 t^4}{K} \quad (4)$$

여기서, σ_y 는 항복 응력, K 는 강성, 그리고 t 는 두께를 나타낸다.

$$W = C_1 \frac{\sigma_y^2 t^4}{K} \quad (5)$$

여기서 C_1 은 상수이다.

이 식의 사용으로 C_1 의 값에 관계없이 한 판넬의 덴팅 저항이 다른 판넬과 비교되어질 수 있다. 윗식은 판넬에서의 0.001인치의 영구 변형을 덴팅이 생긴 것으로 정의하여 기준으로 삼았다. 종종 강성 K 는 판넬의 크기가 아주 작을 때를 제외하고는 덴팅 저항을 작게 하는 경향이 있다.

2.3 오일캐닝(oil canning)

오일캐닝은 외부 차체 판넬에서 고려되어져야

할 또 다른 중요한 기준이다. 오일캐닝 하중은 강성이나 덴팅 저항보다 판넬 설계에 더 많은 영향을 미친다. 현재 이용가능한 오일캐닝의 해석식의 형태는 오직 한가지만이 이용가능하다.⁽¹⁹⁾ 주된 관심은 오일캐닝의 정도인데 이는 판넬이 찌그러지거나 역곡률이 될 때의 임계 버클링 하중 P_{cr} 과 판넬 버클링 가능성을 결정하는 변수 λ 를 결정 짓는다. 오일캐닝은 루프(roof) 판넬들처럼 차체의 정확한 외형을 유지하는 판넬 성능으로서 중요하다. 오일캐닝은 판넬의 기하학적 형상 때문에 재료의 탄성 영역안에서 비선형 변형으로 정의되어진다.

오일캐닝의 인자 λ 는

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{L_l L_t}{t} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{R_l R_t}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

λ 의 값이 작을수록 판넬의 버클링 가능성은 적어진다. 임계 오일캐닝 하중^(8,19)은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{cr} = \frac{C_2 R_{cr} \pi^2 E t^4}{L_l L_t (1-\mu^2)} \quad (7)$$

R_{cr} 은 다음으로 부터 구할 수 있다.

$$R_{cr} = 45.929 - 34.183\lambda + 6.397\lambda^2 \quad (8)$$

C_2 는 다음으로 부터 구할 수 있다.

$$C_2 = 0.645 - 0.0005L_l L_t \text{ (in inch units)} \quad (9)$$

$(L_l L_t) > 1290 \text{in}^2$ 이면 $C_2 < 0.0$ 이므로 임계 버클링 하중은 1290in^2 보다 큰 판넬에 대해서는 계산되어질 수 없다. 설계자는 요구되어지는 최소한의 임계 오일캐닝 하중을 결정해야 한다. 오일캐닝은 기하학적 형상과 탄성계수에 의해 주로 영향을 받기 때문에 고강도 철을 사용하는 것이 장점이 아님을 알 수 있다. 그러나 고강도는 큰 변형하에서도 탄성 거동을 유지시키므로 탄성복원이 발생하기 쉽다.

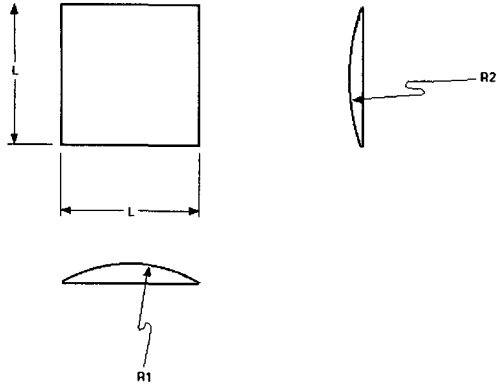


Fig. 1 Schematic panel geometry

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 모델과 재료 특성

Fig. 1은 고려되어진 판넬의 기하학적인 형상을 보여준다. 판넬들은 치수가 $200 \times 200\text{mm}^2$ 와 $600 \times 600\text{mm}^2$ 의 사각으로 되어 있으며, 이 두가지 치수를 선택한 이유는 일반적인 판넬 부품에서 박판의 지지되지 않는 크기범위를 포함하기 위한 의도이다. 또 평평한 평판을 포함하여 곡률 반경이 100, 150, 200, 400, 700, 1000, 4000mm인 곡률진 판넬들이 고려되어졌다. 완만한 곡률의 판넬은 후드가 좋은 예가 될 수 있겠고 급한 곡률의 판넬은 펜더가 대표적이다.

Fig. 2는 연구에 사용된 판재의 응력-변형률 데이터를 보여준다. 유효응력 대 소성변형률 곡선은 모델링된 재료의 단축(uniaxial) 인장 데이터로부터 생성되어진다. 예상대로 전변형률(pre-strain)의 증가는 T8X 조건에서 항복응력의 실질적인 증가를 가져온다. T8XP 조건에서의 인장 데이터는 단지 2%의 전변형률에 대해서만 얻을 수 있었다. 같은 전변형률에 대한 T8X와 T8XP의 유효응력곡선의 비교는 T8XP 재료의 항복응력 증가가 두드러짐을 보여준다. T4 조건은 단순히 비교 목적을 위하여 연성(soft) 재료의 기준선으로 사용되었다. Table 1은 현재 연구에서 사용된 재료의 조건들과 항복강도들을 도표화한 것이다. 나열된 항복응력 값이 2% offset 된 값들이 아니라, 단축 항복거동을 설명하기 위하여 사용된 입력 데이터에서 정의되는 비례한계(탄성

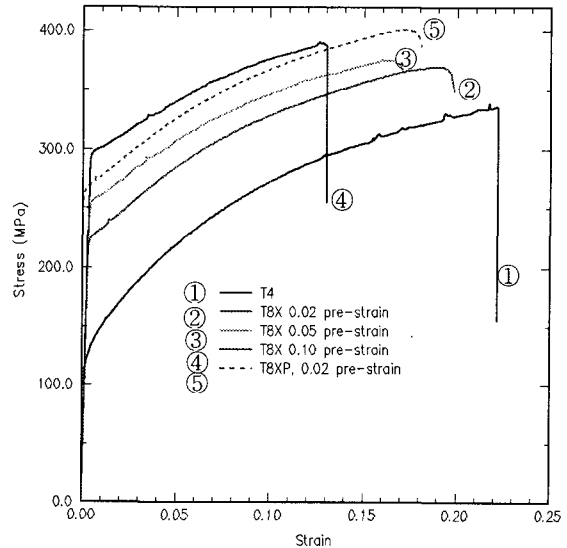


Fig. 2 Stress-strain curves adopted for the sheet material

Table 1 Yield strength data

Alloy/Temper Designation	Pre-strain (%)	Yield Strength (MPa)
6111-T4	0	127.
6111-T8X	2.	222.
6111-T8X	5.	252.
6111-T8X	10.	295.
6111-T8XP	2.	261.

한계)이다. 열처리와 전변형률의 효과는 AA6111합금에 대해 비교적 선형에 가까워서 그 효과들을 그냥 더해도 큰 무리가 없다. 이런 관측은 초기 전변형률후에 세가지 전변형률 조건들의 유사한 경화반응으로부터 관찰될 수 있다. 이런 작용은 도색-열처리 사이클동안 변형된 판넬들의 경화현상을 묘사하는데 비교적 단순한 모델이 사용될 수 있음을 시사한다.

3.2 해석결과

점토 모델을 제작하는 초기 개념설계 단계에서

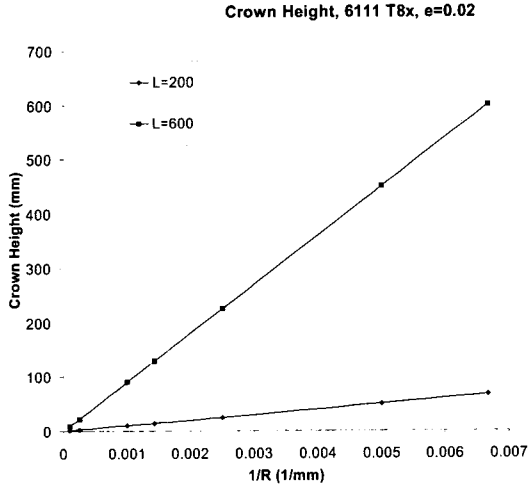


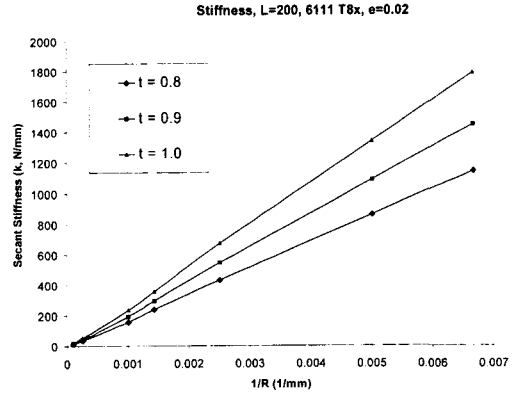
Fig. 3 Crown height as a function of curvature

전체 자동차의 설계 방향에 영향을 미칠 수 있는 판단이나 구상이 정립되어야 하기 때문에 초기 단계에서의 잘못된 판단은 공학적 결함을 피할 수 없게 된다. 자동차 차체 판넬을 최적화 하기에 가장 효과적인 시기는 개발 초기단계이다. 그러므로 해석기술은 초기단계의 제한된 데이터를 갖고 얼마나 빨리 계산하여 실무에 적용가능한지가 중요하다. 변수에 대한 해석은 단순 판넬에 대한 텐팅, 강성, 임계 버클링 하중을 예측하기 위해 경험식을 이용한 디자인 해석 방법이 채택되었고, 해석에 적용된 판넬의 제원은 다음과 같다.

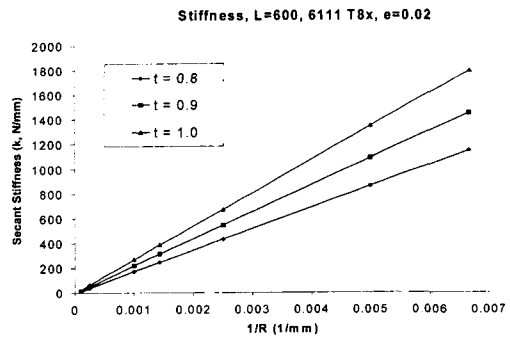
- 판넬 치수 : $200 \times 200 \text{ mm}^2$, $600 \times 600 \text{ mm}^2$
- 판넬 두께 : 0.8, 0.9, 그리고 1.0 mm의 판넬 두께
- 판넬의 곡률 반경 : 100, 150, 400, 700, 1000, 그리고 4000 mm

디자인 해석으로 부터, 크라운 높이, 동적 텐팅 에너지, secant stiffness 그리고 임계 버클링 하중이 한가지 강도, 모든 판넬 크기, 두께, 곡률에 대해 나타내었다.

Fig. 3는 두께 1mm인 AA6111-T8X 판넬의 2가지 크기에 대해 디자인 해석으로 예측된 크라운 높이를 곡률의 함수로 나타낸 것이다. 600mm



(a)

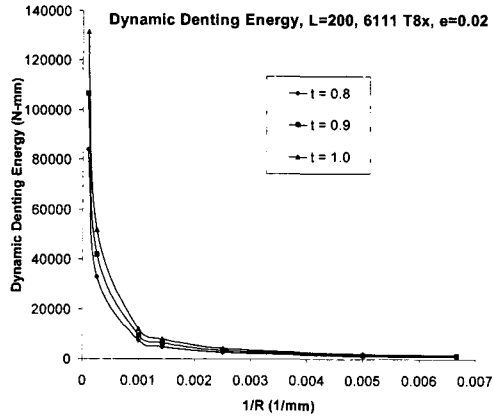


(b)

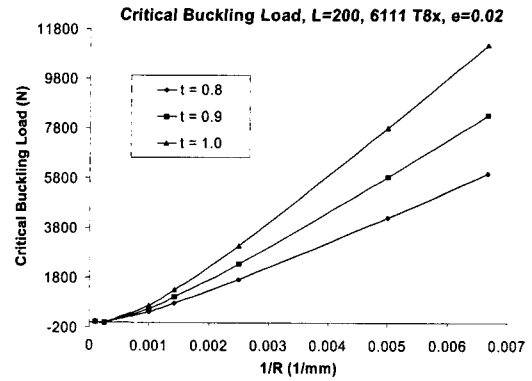
Fig. 4 Predicted secant stiffness(k) as a function of curvature by design analysis. A6111-T8x, 2% previous strain. (a)L=200 mm (b)L=600 mm

판넬이 200mm 판넬보다 훨씬 더 크라운 높이가 크다는 걸 비교를 통해 나타내고 있다. 크라운 높이는 곡률의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 디자인 해석으로부터 예측된 판넬 강성 값을 secant stiffness로 Fig. 4에 나타내었는데 앞에서의 식 (1)이 사용되었다.

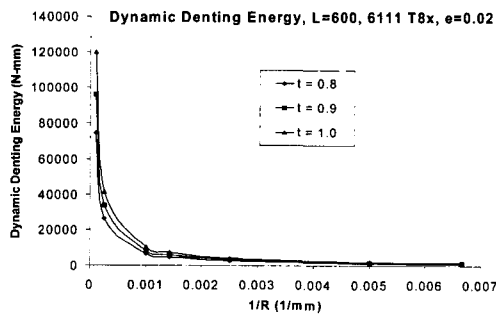
Fig. 5는 디자인 해석에 의한 동적 텐팅에너지와 곡률의 관계를 그래프로 나타내고 있다. 동적 텐팅에너지는 충격에너지를 흡수하는 판넬의 능력을 나타낸다고 할 수 있다. 높은 동적 텐팅에너지를 갖는 판넬은 탄성적으로 충격에너지를 더 잘 흡수할 수 있고, 텐팅의 소성변형에 대한 에너지를 적게 남긴다. 주어진 하중에 대한 판넬의 에너지흡수능력은 하중-변위 곡선의 아래 면적에



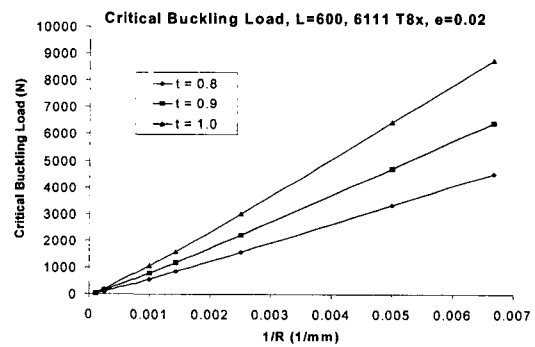
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Predicted dynamic denting energy as a function of curvature by design analysis. A6111-T8X, 2% pre-strain
(a) L=200 mm (b) L=600 mm

Fig. 6 Predicted critical buckling load as a function of curvature by design analysis. A6111_T8X, 2% pre-strain
(a) L=200 mm (b) L=600 mm

해당된다. 정적 하중-변위곡선은 곡률반경이 작은 판넬일수록 더 큰 강성을 보이고 주어진 하중에 대해 보다 적은 에너지를 흡수한다는걸 보여준다. 따라서 가해진 충격에너지를 흡수하기 위하여 강성이 높은 패넬일수록 보다 큰 접촉력이 발생된다. 판넬이 더 큰 곡률반경을 가질수록 더 높은 동적 덴팅에너지가 예측된다. Fig. 5에 보여지는 것 처럼 큰 곡률반경 범위에서 덴팅에너지의 감소율은 아주 빠르다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 비교는 200mm 판넬의 덴팅 에너지가 작은 곡률 범위의 경우에서만 600mm 판넬보다 더 큰 값을 보여줌을 알 수 있는데 이는 600mm 판넬의 크라운 높이가 보다 크기 때문이다. 큰 곡률의 경우

크기와 두께의 변화가 Fig. 5에 보여지는데로 덴팅 에너지에 큰 영향을 줄 수는 없다.

Fig. 6은 디자인 해석에 의해 판넬의 곡률에 대한 임계 버클링하중을 보여준다. 작은 곡률반경, 보다 작은 판넬크기 그리고 보다 두꺼운 판넬은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 오일캐닝 현상으로부터 보다 안전함을 알 수 있다. 이로서 디자인 해석이 설계의 개념적 단계에서 유용한 데이터 즉 임계 버클링 하중, 동적 덴팅에너지, secant stiffness 을 빠르고 쉽게 제공한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 개발된 디자인 해석프로그램을 사용하여 재료의 두께, 판넬 크기, 곡률 등이 차체 판넬의 덴팅, 강성, 오일 케닝에 미치는 복잡한 상호 영향상태를 규명하였다. 판넬의 강성은 굽힘 응력이 작아지고 멤브레인 응력이 증가하며 접촉 하중이 증가하는 곡률증가에 따라 향상되어지고 동적 덴팅성능은 이와 반대 현상을 보여준다. 동적 덴팅저항은 판넬두께와 재료 항복응력이 증가함에 따라 개선되어짐을 보여준다.

높은 국부 곡률과 높은 강성의 판넬들은 정적 하중하에서는 비교적 원활히 잘 거동하지만 충돌하는 물체의 동적 에너지를 탄성적으로 잘 흡수하지 못하기 때문에 동적 하중하에서는 덴팅에 취약하다. 설계자들은 판넬 설계에서 이 상반된 현상을 잘 파악하여 업무에 실수가 없어야 한다. 게다가 현재의 디자인 해석프로그램을 확장하여 실제 지지점들을 가진 전체 대형판넬의 덴팅현상을 해석할 수 있는 유효요소 격자를 이용하는 덴팅 해석프로그램의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이런 모델들은 외부와 내부판넬 모두의 기하학적 형상을 고려하고 내부연결된 지지부와 부착점들을 모두 고려하여 해석을 수행하게 된다. 특히, 차체 판넬의 소성변형율과 잔류응력을 성형 해석으로부터 구하여 덴팅 해석에 고려하게 되면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 도색-열처리 반응에 대한 지식과 아울러 변형율 정보는 외부 판넬에서 국부 항복응력을 예측하는데 이용되어 질 수 있다. 이런 세부 정보들을 구하여 이용할 수 있으면 덴팅과 강성의 예측 능력을 크게 향상시켜서 설계의 채택, 판단은 물론 최적화와 판넬 두께 감소에도 크게 기여할 수 있을 것이다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 디자인 해석은 동적 덴팅에너지를 예측할 수 있다. 그리고 동적 덴팅에너지는 판넬의 충격 에너지를 흡수하는 능력을 나타낸다. 그래서 보다 큰 덴팅 에너지를 갖고 있는 판넬들은 보다 큰 충격 에너지를 탄성적으로 잘 흡수할 수 있고 덴팅의 소성변형에 대해 보다 적은 잔류 에너지를 남긴다.

(2) 디자인 해석은 작은 곡률의 경우에 판넬 크기효과를 예측할 수 없고 큰 곡률의 경우에 판넬 크기와 두께의 변화는 덴팅 에너지에 심각한 영

향을 줄 수 없다.

(3) 디자인 해석은 임계 버클링 하중을 예측할 수 있고 해석으로부터 보다 큰 곡률, 보다 작은 크기와 두꺼운 판넬들은 오일 케닝 현상으로부터 보다 안전함을 알 수 있다.

(4) 디자인 해석은 초기 개념적인 설계단계에서 보다 쉽고 빠르게 secant stiffness, 동적 덴팅 에너지 그리고 임계 버클링 하중 등의 유용한 데이터를 제공할 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-002-E00018)

참고문헌

- (1) Kim, Y.S. and Jung, D.W., 1998, "A Study on Deformation Characteristics of The Plane Strain Punch Stretching Test," *Int. J. of KSME*, Vol. 12, No. 4, pp. 544~552.
- (2) Jung, D.W., 2000, "A Study on Virtual Manufacturing for Total Auto-Body Panel Stamping Processes," *Trans. KSME (A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1499~1512 (in Korean).
- (3) Jung, D.W. and Lee, S.J., 2000, "The effect of the drawbead shape on the sheet metal forming process," *Trans. KSME (A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1624~1632 (in Korean).
- (4) Johnson, Jr. T.E. and Schaffnit, W.O., 1973, Dent Resistance of Cold-Rolled Low-Carbon Steel Sheet," SAE Paper No. 730528.
- (5) DiCello, J.A. and George, R.A., 1974, "Design Criteria for the Dent Resistance of Auto Body Panels," SAE Technical Paper No. 740081.
- (6) Burley, C.E. and Niemeier, B.A., 1977, Denting Properties of Aluminum Autobody Components," SAE Technical Paper No. 770199.
- (7) Neimeier, B.A. and Burley, C.E., 1978, Hailstone Response of Body Panels - Real and Simulated," SAE Paper No. 780398.
- (8) Swenson, Jr. W.E. and Traficante, R.J., 1982, The Influence of Aluminum Properties on the Design, Manufacturability and Economics of an

- Automotive Body Panel," SAE Paper No. 820385.
- (9) Vadhavkar, A.V., Fecek, M.G., Shah, V.C. and Swenson, W.E., 1981, "Panel Optimization Program (POP)," SAE Paper No. 810230.
- (10) Mahmood, H.F., 1981, "Dent Resistance of Surface Panel and Slam Area," SAE Technical Paper No. 810099.
- (11) Sakai, H., Saito, K. and Tsukada, H., 1983, "Stiffness and Dent Characteristics of Body Outer Surface Panel - Finite Element Analysis and Experiment," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 4, No. 1, pp. 13~22.
- (12) Chen, K.K. and Salamie, P.A., 1984, "A Mathematical Model for Calculating the Dent Initiation Loads at the Door Centers," SAE Paper No. 841201.
- (13) Shi, M.F., Brindza, J.A., Michel, P.F., Bucklin, P., Belanger, P.J. and Prencipe, Jr. J.M., 1997, "Static and Dynamic Dent Resistance Performance of Automotive Steel Body Panels," SAE Paper No. 970158.
- (14) Thorburn, H.J., 1994, "Comparitive Tests of Stiffness and Dent Resistance on Aluminum and Steel Fenders," *Proceedings IBEC 94, International Body Engineering Conference*, September 26~29, Detroit, Michigan pp. 105~112.
- (15) Chavali, R. and Song, W., 1996, "Coupling Forming and Denting Simulations for Automotive Closure Panels."
- (16) Vreede, P.T., Tamis, P.J. and Roelofsen, M.E., 1995, "The Influence of Material Properties and Geometry on Dynamic Dent Resistance : Experiments and Simulations," IBEC.
- (17) Thomas, D., Hodgins, R.B., Worswick, M.J., Oddy, A.S., Gong, K. and Finn, M., "FEM Technique for Static & Dynamic Dent Modelling of Aluminum," *Proceedings of Numisheet '99*, Gelin, J.C. and Picart, P. Eds., Vol. 1, pp. 367~372.
- (18) Ekstrand, G. and Asnafi, N., 1998, "On Testing of the Stiffness and the Dent Resistance of Autobody Panels," *Materials and Design*, 19.
- (19) Lohwasser, A.K. and Mahmood, H.F., 1979, "Surface Panel Oil Canning Anlysis Theoretical Development," Technical Memorandum, No. 9-611, Chrysler Corp.
- (20) Mahmood, H.F. and Malik, D., 1978, "Dent Resistance of Surface Panel and Slam Area," Technical Memorandum No. 8023, Chrysler Corp.