

판넬의 덴팅에 관한 연구

정 동 원*

A Study of Panel Denting

Jung Dong-Won*

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

Abstract

In the interest of improved automotive fuel economy, one solution is reducing vehicle weight. 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 developed design program can be used to minimize panel thickness or compare different materials, while maintaining adequate panel performance.

1. 서 론

충분한 강성과 적당한 덴팅 저항은 자동차 차체 판넬설계에 있어 중요한 요구사항이다. 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.⁽¹⁻¹⁶⁾ 이를 위하여 본 연구에서는 디자인 해석프로그램을 개발하여 곡률진 사각판넬에 적용하여 강성, 덴팅 에너지 그리고 임계 버클링하중을 쉽고 빠르게 구하여 판재성능연구에 도움이 되고자 한다.

강성은 주어진 하중하에서 변형을 제한하는 정

도로 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 정의되어진다. 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

* 제주대학교 기계에너지생산공학부

해석하였다. 판넬들은 곡률진 사각판넬들로 실제 차체 판넬과 비교하여 아주 단순화하였지만, 강성과 텐팅에 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($R=100\text{mm}$)부터 평면까지 수직한 두방향으로 곡률이 조합되어 있다. 모든 판넬은 AA6111합금으로 가정하였다. 정적하중하의 처짐인 강성과 동적 텐팅에너지, 임계 버클링하중들이 개발된 디자인해석 소프트웨어를 사용하여 해석되었다.

2. 이론 해석

설계기준을 계산하는데 이용 가능한 다양한 방법들이 있다. 그런 방법들 중의 하나가 유한요소해석이다. 실제 설계업무단계에서 유한요소법의 적용은 많은 계산시간, 미지의 경계조건들과 급형 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 방법은 수많은 차체 판넬들로부터 오랜 경험으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 유도된 경험식과 구면 쉘 이론(spherical shell theory)을 이용하는 방법이 판넬들의 텐팅현상을 빠르고 쉽게 예측하는데 이용되어질 수 있으므로 본연구에서는 이를 이용하여 프로그램을 개발하여 판넬의 텐팅예측에 적용하였다.

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 치수는 일반적인 판넬부품에서 박판의 지지되지 않는 크기범위를 포함하기 위한 의도이다. 또 평평한 평판을 포함하여 곡률 반경이 100, 150, 200, 400, 700, 1000, 4000mm인 곡률진 판넬들이 고려되어졌다.

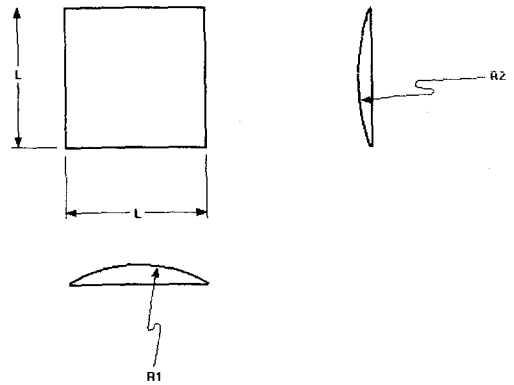


Fig. 1 Schematic panel geometry.

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

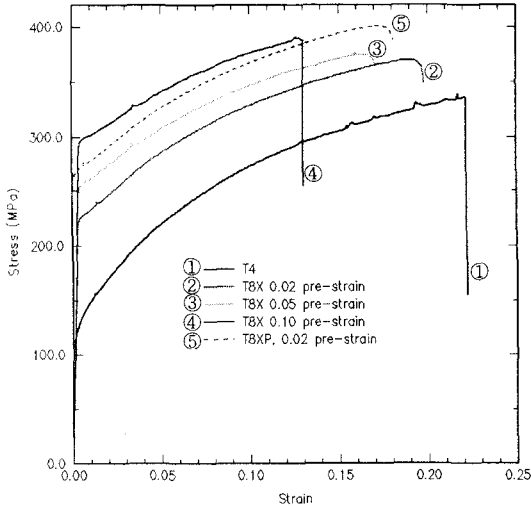


Fig. 2 Stress-strain curves adopted for the sheet materials.

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.

3.2 해석결과

점토 모델의 초기에 디자인의 개념적 단계에서 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 하기 위해 가장 효과적인 시기는 개발 초기단계이다. 그러므로 해석기술은 초기단계의 제한된 데이터를 갖고 얼마나 빨리 계산하여 실무에 적용가능한지가 중요하다. 본연구에서 변수에 대한 해석은 단순 판넬에 대한 텐딩, 강성, 임계 버클링 하중을 예측하기 위해 경험식을 이용한 디자인해석 방법이 채택되었고, 해석에 적용된 판넬의 제원은 다

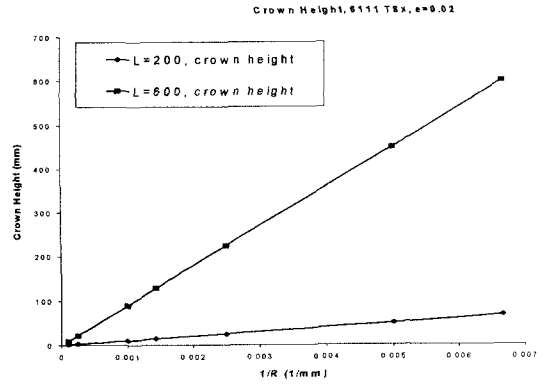
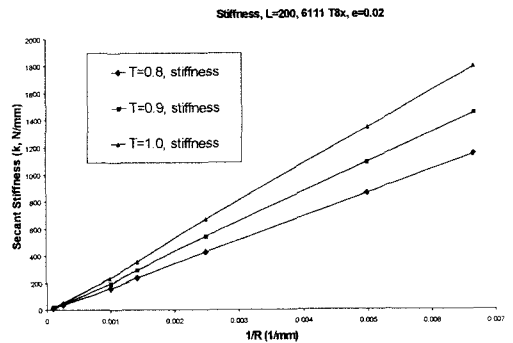
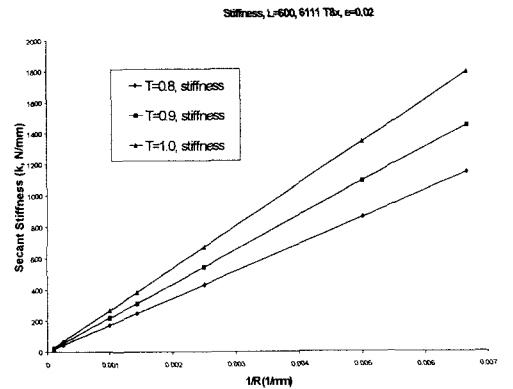


Fig. 3 Crown height as a function of curvature.



(a) L=200 mm



(b) L=600 mm

Fig. 4 Predicted secant stiffness(k) as a function of curvature by design analysis. A6111-T8x, 2% 전변형율.

음과 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

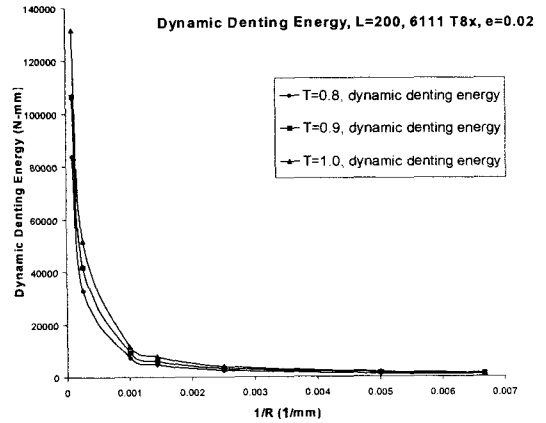
디자인 해석으로 부터, 크라운 높이, 동적 덴팅 에너지, secant stiffness 그리고 임계 버클링 하중이 한가지 강도, 모든 판넬 크기, 두께, 곡률에 대해 나타내었다.

Fig. 3는 두께 1mm인 AA6111-T8X 판넬의 2가지 크기에 대해 디자인 해석으로 예측된 크라운 높이를 곡률의 함수로 나타낸 것이다. 600mm 판넬이 200mm 판넬보다 훨씬 더 크라운 높이가 크다는 걸 비교를 통해 나타내고 있다. 크라운 높이는 곡률의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다.

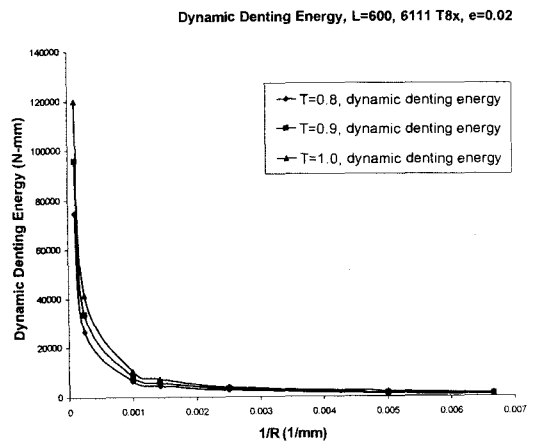
디자인 해석으로부터 예측된 판넬 강성값을 secant stiffness로 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5는 디자인 해석에 의한 동적 덴팅에너지와 곡률의 관계를 나타내고 있다. 동적 덴팅에너지는 충격 에너지를 흡수하는 판넬의 능력을 나타낸다고 할 수 있다. 높은 동적 덴팅에너지를 갖는 판넬은 탄성적으로 충격에너지를 더 잘 흡수할 수 있고, 덴팅의 소성변형에 대한 에너지를 적게 남긴다. 주어진 하중에 대한 판넬의 에너지흡수능력은 하중-변위 곡선의 아래 면적에 해당된다. 정적 하중-변위 곡선은 곡률 반경이 작은 판넬이 더 큰 강성을 보이고 주어진 하중에 대해 보다 적은 에너지를 흡수한다는 걸 보여준다. 따라서 주어진 정도의 충격에너지를 흡수하기 위하여 보다 강성이 높은 판넬에 대해 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 곡률범위의 경우에서만 600mm 판넬보다 더 큰 값을 보여줌을 알 수 있는데 이는 600mm 판넬의 크라운 높이가 보다 크기 때문인 것으로 짐작된다. 큰 곡률의 경우 크기와 두께의 변화가 Fig. 5에 보여지는대로 덴팅 에너지에 큰 영향을 줄 수는 없음을 알 수 있다.

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 현상으로 부터 보다 안전함을 알 수 있다. 이로서 디자인 해석이 설계의 개념적 단계에서 유용한 데이터 즉 Secant Stiffness, 동적 덴팅에너지, 임계 버클링하중을 빠르고 쉽게 제공한다라는 것을 알 수 있었다.



(a) L=200 mm



(b) L=600 mm

Fig. 5 Predicted dynamic denting energy as a function of curvature by design analysis. A6111-T8X, 2% pre-strain.

4. 결론

본 연구는 개발된 디자인 해석 프로그램을 사용하여 재료의 두께, 판넬 크기, 곡률 등이 차체 판넬의 강성, 덴팅, 오일 캐닝에 미치는 복잡한 상호 영향상태를 규명하였다. 판넬의 강성은 굽힘 응력이 작아지고 멤브레인 응력이 증가하며 접촉 하중이 증가하는 곡률증가에 따라 향상되어지고 동적 덴팅성능은 이와 반대 경향을 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 판넬설계에서 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 이용한 덴팅해석 프로그램의 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 덴팅해석에 고려하게 되면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 도색-열처리 반응에 대한 지식과 아울러 변형을 정보는 외부 판넬에서 국부 항복응력을 예측하는데 이용되어질 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 충격에너지를 탄성적으로 잘 흡수할 수 있고 덴팅의 소성변형에 대해 보다 적은 잔류 에너지를 남긴다.
2. 디자인 해석은 작은 곡률의 경우에 판넬 크기 효과를 예측할 수 없고 큰 곡률의 경우에 판

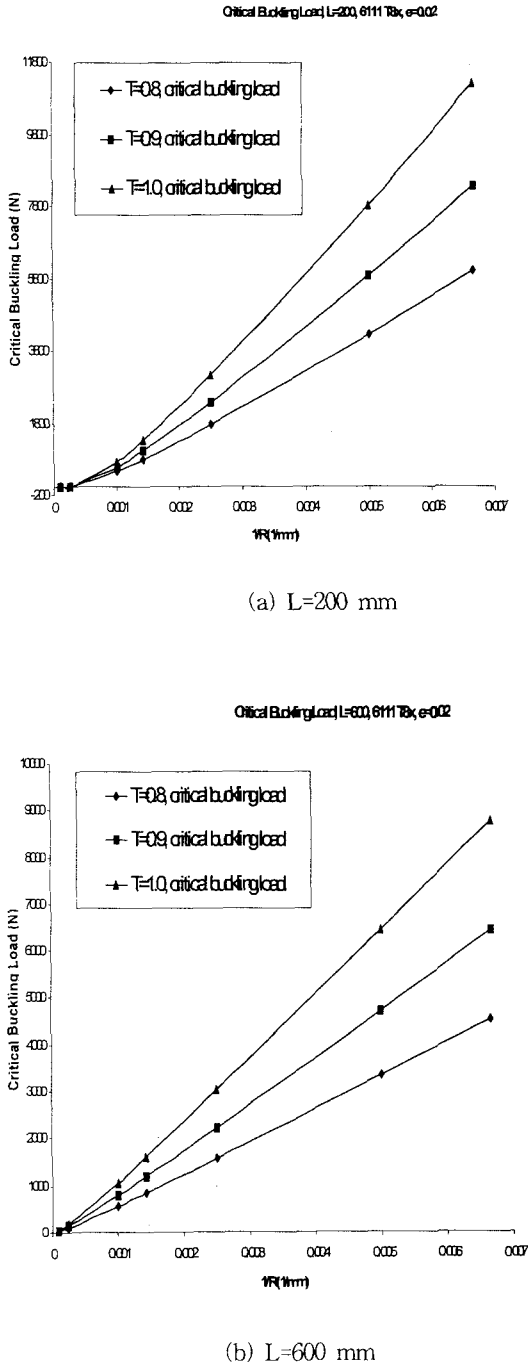


Fig. 6 Predicted critical buckling load as a function of curvature by design analysis. A6111_T8X, 2% pre-strain.

- 넬크기와 두께의 변화는 덴팅 에너지에 심각한 영향을 줄 수 없다.
3. 디자인 해석은 임계 버클링하중을 예측할 수 있고 해석으로부터 보다 큰 곡률, 보다 작은 크기와 두꺼운 판넬들은 오일 캐닝 현상으로부터 보다 안전함을 알 수 있다.
 4. 디자인 해석은 초기 개념적인 설계단계에서 보다 쉽고 빠르게 Secant Stiffness, 동적 덴팅 에너지 그리고 임계 버클링하중 등의 유용한 데이터를 제공할 수 있다. 결론을 입력하시오.

후기

이 논문은 2001년도 제주대학교발전기금 청봉 학술연구기금(효천연구비 : 효천학술연구기금)의 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

- (1) Johnson Jr. T.E. and Schaffnit W.O., 1973, "Dent Resistance of Cold-Rolled Low-Carbon Steel Sheet", SAE Paper No. 730528.
- (2) DiCello J.A. and George R.A., 1974, "Design Criteria for the Dent Resistance of Auto Body Panels", SAE Technical Paper No. 740081.
- (3) Burley C.E. and Niemeier B.A., 1977, "Denting Properties of Aluminum Autobody Components", SAE Technical Paper No. 770199.
- (4) Neimeier B.A. and Burley C.E., 1978, "Hailstone Response of Body Panels - Real and Simulated", SAE Paper No. 780398.
- (5) Swenson Jr. W.E. and Traficante R.J., "The Influence of Aluminum Properties on the Design, Manufacturability and Economics of an Automotive Body Panel", SAE Paper No. 820385.
- (6) Vadhavkar A.V., Fecek M.G., V.C. Shah and W.E. Swenson, 1981, "Panel Optimization Program (POP)", SAE Paper No. 810230.
- (7) Mahmood H.F., 1981, "Dent Resistance of Surface Panel and Slam Area", SAE Technical Paper No. 810099.
- (8) Sakai H., Saito K. and H. Tsukada, 1983, "Stiffness and Dent Characteristics of Body Outer Surface Panel-Finite Element Analysis and Experiment", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 4, pp.13~22, No. 1.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Thorburn H.J., 1994, "Comparative 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.
- (12) Chavali R, Song W, 1996, "Coupling Forming and Denting Simulations for Automotive Closure Panels".
- (13) Vreede P.T., Tamis P.J., Roelofsen, M.E., 1995, "The Influence of Material Properties and Geometry on Dynamic Dent Resistance : Experiments and Simulations", IBEC.
- (14) Thomas D., Hodgins R.B., Worswick M.J., Oddy A.S., Gong K., Finn M., 1999, "FEM Technique for Static & Dynamic Dent Modelling of Aluminum", Proceedings of Numisheet' 99, Volume 1, J.C. Gelin and P. Picart, Eds., pp.367~372.
- (15) Ekstrand G., Asnafi N., 1998, "On Testing of the Stiffness and the Dent Resistance of Autobody Panels", Materials and Design 19.
- (16) Lohwasser A.K. and Mahmood H.F., April 1979, "Surface Panel Oil Canning Anlysis Theoretical Development", Technical Memorandum, No. 9-611, Chrysler Corp.