

동적 유한요소해석을 이용한 Dent 발생에 대한 연구

차 성 훈¹⁾ · 신 명 수¹⁾ · 김 종 봉^{*2)}

서울산업대학교 NID융합대학원¹⁾ · 서울산업대학교 자동차공학과²⁾

An Analysis of Dent Formation by Dynamic Finite Element Method

Sung-Hoon Cha¹⁾ · Myoung-Soo Shin¹⁾ · Jong-Bong Kim^{*2)}

¹⁾Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 5 March 2009 / Accepted 7 July 2009)

Abstract : For the improvement of fuel consumption, the study on the use of lightweight material or thinner sheet have been carried out in automotive industry. With the need for the use of thinner sheet, the dent resistance became one of the major concern in th design of exterior panels in automotive industry. Many studies have been carried out for the dent resistance by experiment or quasi-static numerical simulation. In this study, the dent formation behavior is investigated by dynamic finite element analysis using ABAQUS. Dent formation may be affected by many factors such as sheet thickness, material properties, pre-strain, and sheet curvature. The effect of these factors on dent resistance is investigated. From the analysis following three conclusions are derived. First, dent resistance become hard as the sheet curvature radius increases. Second, dynamic dent resistance is mainly affected by bending stress rather than tensile stress. Third, the pre-strain itself do not give any guidance for dynamic dent resistance and dynamic dent resistance have to be decided considering the strain hardening and thickness reduction together. The results are considered to be reliable and useful to improve the dent damage of automotive panels.

Key words : Dent resistance(덴트저항), Panel(판넬), Dent(압흔)

Nomenclature

- σ : flow stress
- σ^0 : initial yield stress
- ϵ : equivalent plastic strain
- A : initial yield stress coefficient
- B : strain hardening coefficient
- n : strain hardening exponent
- C : strain rate hardening coefficient
- m : thermal softening exponent
- t : sheet thickness
- $\dot{\epsilon}$: equivalent plastic strain rate

1. 서론

최근 자동차업계는 저연비, 고효율화를 달성하기 위한 방안으로 차체 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다. 차체 경량 설계에 있어서 강성, 텐팅에너지, 버클링 등의 예측은 자동차 외판 설계에 중요한 요소이며 설계의 기준이 된다. 과거에는 외판설계는 경험적 설계에 의존하고 있었으나 소재가 다양해지고 외판설계의 관심이 고조됨에 따라 보다 체계적인 연구와 이론에 대한 이해를 필요로 한다. 차체 판넬 성능의 판단 요소로는 여러 가지가 있으며 이러한 인자들은 서로 상호 영향을 준다. 그 중 텐트손상은 차량 외판에 있어 심각한 문제를 야기한다.

*Corresponding author, E-mail: jbkim@snut.ac.kr

덴트 흔적은 매우 작지만 육안으로 쉽게 관찰되며 차체 표면에 대한 상당한 불만족을 유발한다.¹⁾ 덴팅은 정적 또는 동적 하중에 의한 판넬의 영구변형으로 정의되어 지는데 정적덴팅은 후드(hood)나 펜더(fender) 등에 물체가 놓여있는 등의 천천히 힘을 가하는 정적하중과 관련이 있으며 동적덴팅의 경우 우박이나 도어사이의 충돌등 충격하중에 의해 발생한다.^{2,3)} 덴팅 저항은 Vadhavkar⁴⁾과 Mahmood⁵⁾ 등의 실험적 연구와 Paik⁶⁾과 Byun⁷⁾의 유한 요소를 적용한 해석적 연구를 통해 판넬의 재질의 특성, 두께, 그리고 판넬의 곡률반경 등의 영향을 받는다는 것이 인지되었다.⁸⁾

본 연구는 범용 프로그램을 이용하여 덴팅 저항의 해석을 하였다. 해석에 이용한 파트는 단순화한 판넬과 충격볼을 이용하였으며 덴팅 저항에 영향을 미치는 인자로서 판넬의 곡률반경, 충격볼의 속도, 판넬과 충격볼의 충격각도, 판넬의 초기 변형률, 그리고 판넬의 물성 등을 변화시키면서 거동을 관찰하고 경향을 파악하였다.

2. 해석

2.1 모델링(Feature modeling)

해석은 범용 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. Fig. 1은 해석을 위한 개략적인 형상을 보여준다. 길이 0.5 m, 너비 0.5 m, 두께 0.8 mm의 판넬에 직경 0.03m의 구형상의 충격볼(Impact Ball)을 임의의 초기속도로 판넬(sheet)에 충격을 가한다. 충격을 받은 중심점과 임의의 거리에 떨어진 점에서의 깊이차이를 덴트 라고 정의하고 각각의 조건에서 덴트량을 비교하였다. 해석은 동적 외연적(Dynamic Explicit) 방법으로 수행하였다.

Fig. 2는 해석을 위한 유한요소 격자를 보여준다. 충격에 의해 소성이 일어나는 판넬의 중심부는 비교적 격자를 작게 하였고, 관심외의 부분인 판넬의 외곽 부분은 비교적 큰 격자를 사용하였다. 판넬에는 쉘 요소를 사용하였고, 충격볼에는 솔리드 요소를 사용하였다.

판넬과 충격볼의 경계면은 접촉조건으로 설정하여 침투를 방지하였고, 충격시 마찰의 영향은 매우 작다고 가정하여 마찰은 무시하였다.

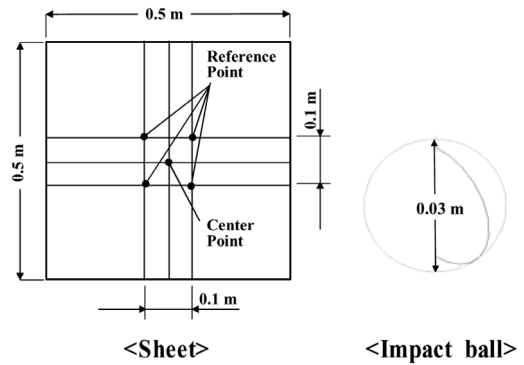


Fig. 1 Configuration of the analysis model

Table 1 Number of mesh

Part	Mesh Type	Number of mesh
Impact ball	Hexahedral	4136
Plate	Quadrilateral	3600

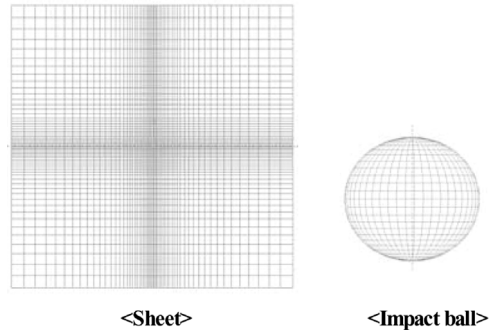


Fig. 2 Illustration of meshes for sheet and ball

2.2 소재의 물성(Material property)

충격볼과 판넬의 소재는 강(Steel)의 물성을 적용하였다. 충격볼은 탄성으로 하였고, 판넬은 탄소성으로 해석하였다. 응력-변형을 곡선은 식 (1)의 Johnson-cook 모델⁹⁾을 이용하였다.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right) (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_m - T_{room})$$

여기서, σ 는 유동응력, ε 은 등가소성변형률, 그리고, A, B, C, n, m은 물성 계수이다.

Table 2와 3은 해석에 이용한 소재의 물성⁹⁾을 보여준다.

Table 2 Material properties of impact ball

Material	Steel
Mass density	7850 kg/m ³
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3

Table 3 Material properties of sheet

Material	Steel
Mass density	7850 kg/m ³
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
A	175 MPa
B	380 MPa
C	0.55
n	0.32
m	0.06

2.3 모델검증

본 연구의 해석결과를 검증하기 위하여 해석에 사용된 격자의 크기에 따른 텐트량을 비교하여 해석에 적용된 격자의 크기가 적합한지를 검증하였다.

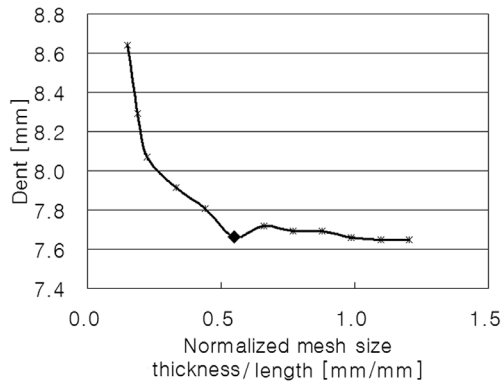


Fig. 3 Predicted dent displacement for various mesh sizes

Fig. 3은 판넬이 충격볼과 충돌하는 국부에서의 요소의 크기를 바꾸어 가면서 해석한 결과를 보여준다. 그래프에서 알 수 있듯이 텐트량이 두께/길이의 비가 0.1이후 급격히 감소하다가 0.5이후 안정화 되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 격자 크기에 따른 해석의 신뢰성을 보여주며 본 연구에 적용된 두께/ 길이의 비는 0.55이다 위 결과에서 알 수 있듯이 본 해석에 적용된 격자의 크기는 적합하다고 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

해석은 다음과 같이 조건을 변화시키면서 판재의 모델 및 재료 특성 등 각 인자들이 텐트에 미치는 영향을 분석하였다.

- (1) 볼의 충격 속도의 영향
- (2) 판넬 곡률의 영향
- (3) 볼의 충격 각도의 영향
- (4) 응력-변형률 물성의 영향(A, B, n)
- (5) 초기 변형률(pre-strain)의 영향

3.1 충격볼 속도 영향 분석

충격볼의 속도가 텐트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 충격볼의 초기속도를 40, 60, 80 그리고 100 km/h로 변화시키면서 그 양상을 관찰하였다.

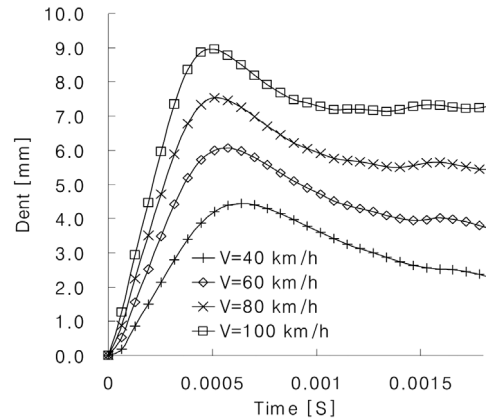


Fig. 4 Predicted dent displacement for various impact speed

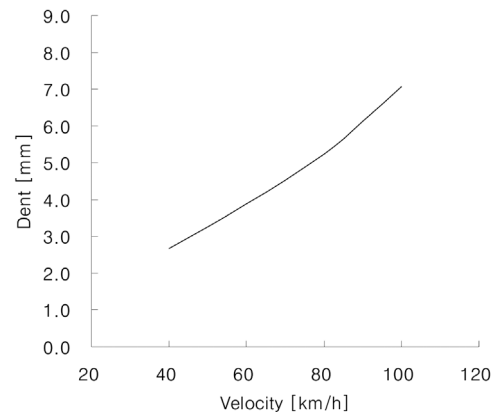


Fig. 5 Dent depth for various impact speed

Fig. 4와 Fig. 5는 충격볼의 속도에 따른 덴트량의 변화를 보여준다. 덴트량은 충격볼 속도가 커질수록 증가하는 것을 확인할 수 있으며 선형의 관계는 아니고 비선형의 관계가 있음을 알 수 있다.

3.2 판넬의 곡률반경 영향 분석

판넬의 곡률반경이 덴트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 판넬의 반경곡률을 0.4, 0.6, 0.8 그리고 1.0 m로 변화시키면서 그 양상을 관찰하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 판넬의 초기 곡률반경에 따른 덴트량의 변화를 보여준다. 덴트량은 곡률반경이 커질수록 증가하는 것을 확인하였다. 곡률반경이 커지면 평면과 가까워지기 때문에 충격에 대한 저항이 작아지는 것으로 물리적으로 이해가 된다.

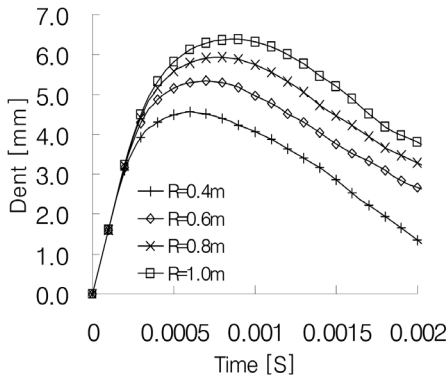


Fig. 6 Predicted dent displacement for various values of sheet curvature

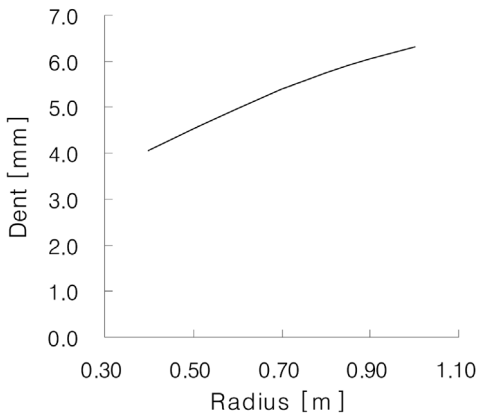


Fig. 7 Dent depth for various values of sheet curvature

3.3 충격볼과 판넬과의 충격각도 영향 분석

충격볼과 판넬과의 충격각도가 덴트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 충격볼과 판넬과의 각도를 30°, 45°, 60° 그리고 75°로 변화시키면서 그 양상을 관찰하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 충격볼과 판넬의 충격각도에 따른 덴트량의 변화를 보여준다. 덴트량은 충격각도 직각에 가까울수록 커지는 것을 확인하였다. 각도가 커지면 소재에 대한 수직 충격속도가 작아지기 때문에 덴트의 크기가 작아진다고 예상된다.

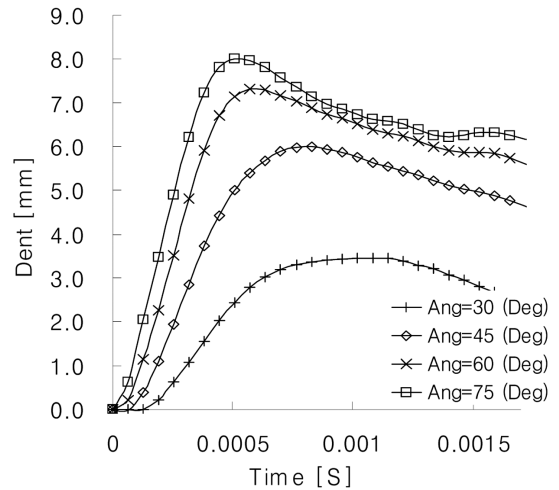


Fig. 8 Predicted dent displacement for various values of impact angle

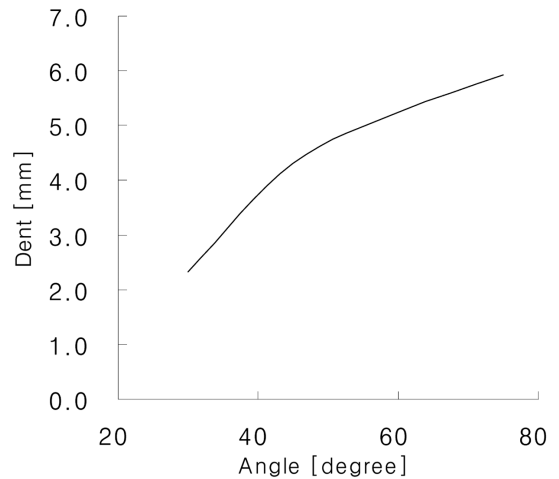


Fig. 9 Dent depth for various values of impact angle

3.4 판넬 소재의 물성특성 영향 분석

판넬 소재의 물성이 텐트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 식 (1)의 Johnson-Cook 구성방정식에서 변형률속도와 온도는 무시하고, 초기항복응력계수(A), 가공경화계수(B) 그리고 가공경화지수(n)을 Table 4와 같이 변화시키면서 그 양상을 관찰하였다.

Fig. 10은 Johnson-Cook 모델의 초기항복 응력계수 'A'를 변화시켰을 때 각각의 텐트량의 변화를 보여준다. 텐트량은 초기항복 응력계수가 작을수록 증가하는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 11은 가공경화계수 'B'를 변화시켰을 때의 텐트량의 변화그래프인데 변형률경화계수가 작을수록 텐트량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 가공경화지수 'n' 값에 따른 텐트량의 변화를 보여주는 Fig. 12에서는 가공경화지수가 클수록 텐트량이 커지는 것을 확인할 수 있다. 여기서 가공경화지수는 1보다 작은 값을 지수로 취하고 있기 때문에 변형률이 1보다 큰 고변형률 구간에서는 그래프의 양상이 역전될 것을 예측할 수 있으나 변형률이 1보다 큰 고변형률의 영역은 본 연구의 관심 밖이기 때문에 고려하지 않았다.

Table 4 Parameter values of Johnson-Cook model used in the parameter study

해석 목적	A [MPa]	B [MPa]	n
A 영향 관찰	155~215	380	0.32
B 영향 관찰	175	330~480	0.32
n 영향 관찰	175	380	0.28~0.42

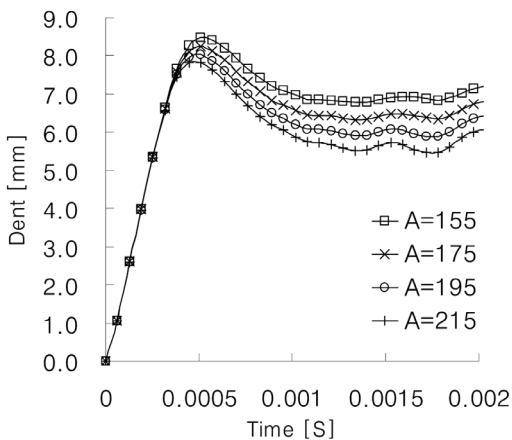


Fig. 10 Predicted dent displacement for various values of coefficient 'A'

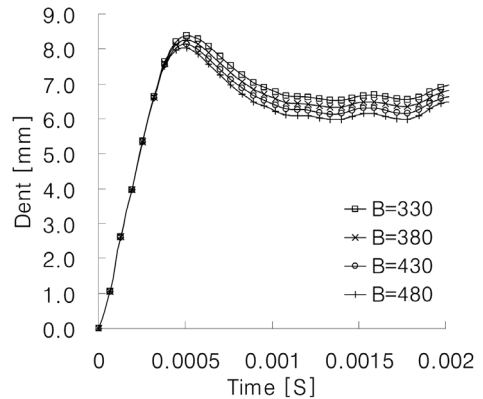


Fig. 11 Predicted dent displacement for various values of coefficient 'B'

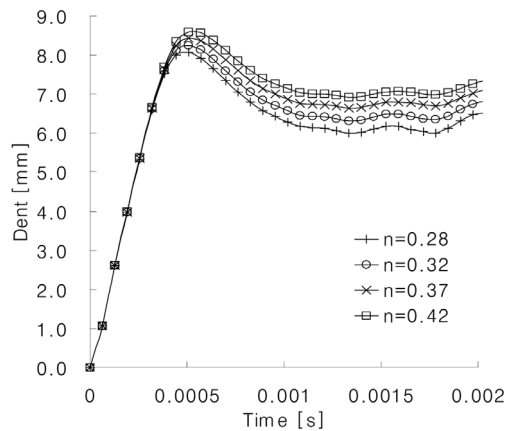


Fig. 12 Predicted dent displacement for various values of coefficient 'n'

3.5 판넬의 초기 변형률 영향 분석

판넬의 초기 성형조건에 의한 가공경화가 텐트량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 초기 판넬 소재에 임의의 변형을 가해 초기 변형을 가한 후 텐트 발생을 분석하였다. 해석은 판넬에 가로방향과 세로방향의 초기 변형률을 각각 0, 10, 20 그리고 30%로 변화시키면서 그 양상을 관찰하였다.

Fig. 14와 Fig. 15는 전변형률(pre-strain)을 x방향으로 각각 0%와 20%로 하고, y방향으로는 0, 10, 20 그리고 30%인 조건에서의 텐트량을 보여주는 그래프이다. 전변형률이 증가하면 텐트량이 증가하는 것을 알 수 있는데 이러한 결과는 일정한 두께의 소재에 평면방향으로 변형을 가했기 때문에 변형이

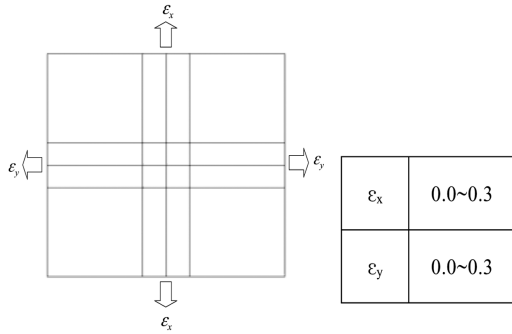


Fig. 13 Pre-strain values used in the analysis

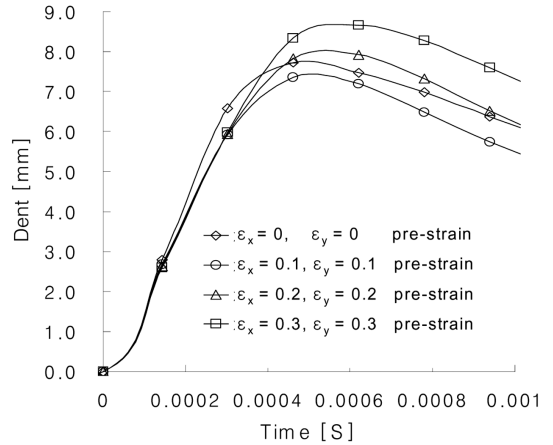


Fig. 16 Predicted dent displacement for various values of pre-strain (Biaxial strain)

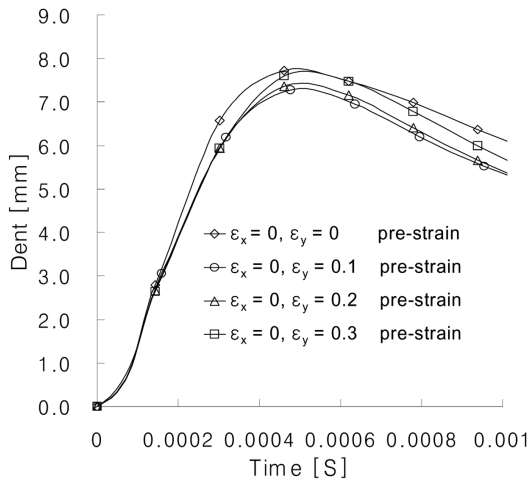


Fig. 14 Predicted dent displacement for various values of pre-strain ($\epsilon_x=0.0$)

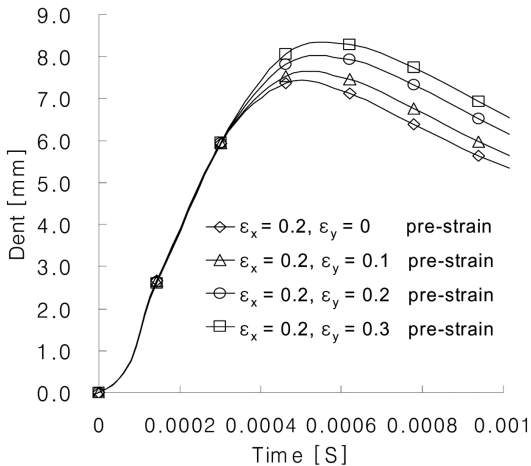


Fig. 15 Predicted dent displacement for various values of pre-strain ($\epsilon_x=0.2$)

일어나면서 소재의 두께가 얇아졌기 때문에 덴팅저항에 취약해지는 것을 확인할 수 있다. 여기서 팔목 할만한 결과는 Fig. 14와 Fig. 16의 그래프에서 알 수 있듯이 전변형률이 매우 작거나 0인 경우에 전변형률이 비교적 큰 경우보다 두께가 감소가 없었음에도 불구하고 더 큰 덴트량을 보이는 결과를 얻을 수 있었는데 이러한 결과는 판넬에 소성변형이 일어나면서 가공경화 현상으로 인해 더 큰 덴팅저항력을 갖게 된 결과이다. 판넬의 두께와 가공경화와의 덴팅저항력의 상관관계를 파악하기 위해 덴팅저항을 식 (2)와 (3)으로 정의하였다. 정적 덴팅저항은 인장 변형에 영향을 받지만, 동적 덴팅저항은 국부적인 변형으로 굽힘변형에 영향을 받는다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 동적 덴팅저항계수(R)를 굽힘 관성모멘트와 연계하여 식 (2)와 같이 정의하였다. 식 (3)은 초기 변형률에 따른 두께 감소를 계산하는 식이다.

$$R = \sigma \times t^3 / (\sigma_0 \times t_0^3) \tag{2}$$

$$t = t_0 / \exp(\epsilon) \tag{3}$$

여기서 t는 판넬의 두께, t₀는 초기 판넬의 두께, ε은 판넬의 유효 변형률, R은 덴팅저항력, 그리고 σ은 유동응력이다.

Fig. 17은 식 (2)로 계산한 초기 유효변형률에 따른 동적 덴팅저항계수(R)를 보여준다. 덴팅저항계

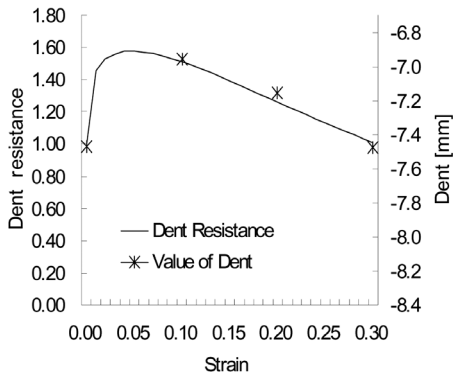


Fig. 17 Dynamic dent resistance(R) for strain and comparison with numerical analysis results (Fig. 14)

수가 커지는 구간($\epsilon=0.0\sim0.05$)에서는 소재의 두께가 얇아지는 영향보다는 가공경화의 영향이 크고, 그 이후 구간($\epsilon>0.05$)에서는 가공경화 영향 보다 소재 두께가 얇아지는 것의 영향이 큰 것으로 보인다. 식 (2)로 정의한 덴트저항계수를 검증하기 위해 수치해석으로 예측한 덴트의 깊이(Fig. 14)를 Fig. 17에 함께 도시하였다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 덴트저항계수는 변형률이 0.1, 0.2일 때는 변형률이 0.0, 0.3일 때보다 크다. 그렇기 때문에 Fig. 14에서 나타난 것과 같이 초기 변형률이 0.0, 0.3일 때 덴트의 크기가 크게 나타났다고 사료된다. 각 초기 변형률에서의 덴트량은 예상된 덴팅 저항값과 같은 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때, 덴트의 저항력은 계수 초기 변형률의 크기에 따라 결정되는 것이 아니고, 초기 변형률에 의한 가공경화 크기와 초기 변형률에 따른 두께 감소 영향의 합성에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 또한, 동적 덴트 거동은 인장응력에 의해 결정되는 것이 아니고, 굽힘응력에 의해 결정되어지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 범용 CAE 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 소재의 곡률반경, 소재의 물성, 초기 변형률, 충격 물체의 충격각도, 그리고 충격속도 등이 덴팅에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해 외판 설계에 있어서 덴팅 강성 등의 예측 능력을 크게 향상 시켜서 판넬 두께 설계에 크게 기여할 것으로 판

단된다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 판넬의 곡률반경이 작을수록, 판넬의 두께가 얇을수록 덴트에 취약한 것으로 파악되었다.
- 2) 충격볼의 속도가 빠를수록 충격볼이 판넬과의 충격각도가 직각에 가까울수록 덴트에 취약한 것으로 파악 되었다.
- 3) 동적 덴트저항은 초기변형률 자체만으로는 판단할 수 없고, 두께 감소와 같이 연계하여 식 (2)로 최적의 초기 변형률을 결정할 수 있다.
- 4) 충격에 의해 발생하는 동적 덴트에 대한 저항은 인장응력 보다는 굽힘응력의 영향을 받는다. 그래서 동적 덴트에 대한 저항은 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

References

- 1) S. Holmberg and B. Negabat, "Numerical Assessment of Stiffness and Dent Properties of Automotive Exterior Panels," *Materials and Design*, Vol.25, pp.361-368, 2004.
- 2) S. Holmberg and P. Thilderkvist, "Influence of Material Properties and Stamping Conditions on the Stiffness and Static Dent Resistance of Automotive Panels," *Materials and Design*, Vol.23, pp.681-691, 2002.
- 3) D.-W. Jung, "A Study of Panel Denting," *Spring Conference Proceedings C, KSME*, pp.610-615, 2001.
- 4) W. E. Vadhavkar, "Panel Optimization Program (POP)," SAE 810230, 1981.
- 5) H. F. Mahmood, "Dent Resistance of Surface Panel and Slam Area," SAE 810099, 1981.
- 6) J. K. Paik, J. M. Lee and D. H. Lee, "Ultimate Strength of Dented Steel Plates under Axial Compressive Loads," *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol.45, pp.433-448, 2003.
- 7) H. Byun, C. Lee and D. Kim, "Numerical Analysis of Door Outer Panel Stiffness and Dent Resistance," *Spring Conference Proceedings, KSAE*, pp.971-976, 2005.
- 8) D.-W. Jung, "A Parametric Study of Sheet Metal Denting Using a Simplified Design Approach," *KSME*, Vol.16, No.12, pp.1673-

1686, 2002.

- 9) G. R. Johnson, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected To Various Strains, Strain

Rates, Temperatures and Pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.1, pp.31-48. 1985.