

고정형 조건에서의 스테인레스 강판의 충격 특성

* . † . ** . *** . ****

Impact characteristics of the stainless sheet on the fixed boundary condition

Dong-Gyu Ahn, Kyung-Je Moon, Chang-Gyun Jung, Gil-Young Han, and Dong-Yol Yang

Key Words: Fixed Boundary Condition (고정형 경계조건), Impact Characteristics (충격 특성), Stainless Sheet (스테인레스 강판), Characteristics of Impact Energy Absorption (충격 흡수 특성)

Abstract

The objective of this paper is to investigate the influence of impact conditions on the impact characteristics of the stainless sheet for the case of the fixed boundary conditions. In order to examine impact characteristics of the sheet, three-dimensional finite element analyses and impact tests have been performed. High speed tensile tests have been carried out to obtain strain-stress relationships including the effects of the strain rate. In order to improve an accuracy of the FE analysis, the hyper-elastic model and the damping factor have been introduced. The results of the FE analyses and the impact tests have been shown that the diameter of the impact head does not affect the absorption energy of the stainless sheet. In addition, it has been shown that the absorption rate of energy maintains almost 82.5 - 83.5 % irrespective of the impact energy level and the diameter of the impact head. From the results of FE analyses, the variation of stress and strain energy in the stainless sheet has been quantitatively examined.

V : Impact speed (m/s)

g : Acceleration of gravity (m/s^2)

H : Impact height (m)

Δt_s : Time interval for stable integration (sec)

L_c : minimum element size (mm)

C_d : Propagation speed of stress wave (mm/sec)

E : Young's Modulus of material (GPa)

ρ : Density of material (kg)

E_{in} : Impact energy (J)

m : mass of impact head (g)

E_{ab} : Absorbed impact energy by material (J)

P : Reaction force (N)

δ : Vertical distance of material at contact area with impact head (J)

χ : Absorption rate of impact energy (%)

1.

최근 화학공장, 철강, 전력, 자동차, 선박, 항공기, 원자력 산업 혹은 해양개발과 관련하여 강한 내식성을 가지며 내열성 및 내온도성, 인성 및 용접성이 양호한 스테인레스강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 스테인레스강은 12 % 이상의 Cr 을 함유하여 표면에 Cr 산화물의 치밀한 피막을 형성하여 내식성이 매우 좋은 재료로써 산업적 활용도가 매우 높은 재료이다.

† 정회원, 조선대학교 기계공학과 대학원

E-mail : breakgun@hanmail.net

TEL : (062)230-7234 FAX : (062)230-7234

* 조선대학교 기계공학과

** KAIST 기계공학과 대학원

*** KAIST 기계공학과

스테인레스 재료가 수송기계용 구조재로 많이 사용되기 시작하면서 수송기계분야에서 흔히 발생할 수 있는 충격 특성에 대한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다. 스테인레스 계열 재료에 대한 충격특성에 관한 연구에서는 주로 낙하 저속 충격시험을 통한 재료의 변형 및 파단 특성을 평가/분석하는 연구가 많이 수행 되어 왔다[1-2]

또한, 실험적 연구에서 정량적으로 평가하기 어려운 충격에너지에 따른 재료 내부 응력, 변형률 및 변형에너지의 시간별 변화와 변형 및 에너지 전과 특성 분석을 위한 3차원 유한요소해석법을 이용한 해석적 접근 방법도 연구가 수행되고 있다.[3-6]

본 논문에서는 스테인레스강 중 산업적으로 폭 넓게 활용되고 있는 오스테나이트계의 SUS 304H 재료에 대한 고정형 경계조건에서의 충격 특성을 3차원 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 충격 시험결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 유한요소해석 모델의 적합성을 분석하였다. 최종적으로 본 유한요소해석 결과 도출된 하중-변위 상관관계, 에너지 흡수 특성, 응력 분포, 변형률 분포 및 변형률 에너지 분포 특성을 비교/분석하여 본 연구 대상 재료의 충격 특성을 고찰 하였다.

2. SUS304H

2.1

본 연구의 충격해석을 위한 유한요소 방법은 고속 동적 문제해결에 매우 적합하며, 복잡한 접촉문제와 순간적인 동적 반응을 해석하기에 매우 효율적인 외연적 시간적분 유한요소법(Explicit time integration finite element method)을 사용하였다. 충격해석을 위한 유한요소 모델링은 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 1 와 같이 모델링 하였다. 유한요소 모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용프로그램을 이용하여 수행하였다.

이때, 시편의 모델링은 두께가 0.7 mm 로 얇기 때문에 해석시간 감소 및 사용 메모리 최소화를 도모하기 위하여 4 절점 쉘요소를 이용 하였다. 상판과 하판 다이의 고무는 8 절점 육면체 요소로 모델링 하였으며, 충격헤드는 분산형 강체요소로 모델링 하였다. 충격헤드의 직경은 충격 시험과 동일하게 10 mm 및 20 mm를 사용하였으

며, 각 시험조건 of 유한요소 격자수는 Table 1과 같다.

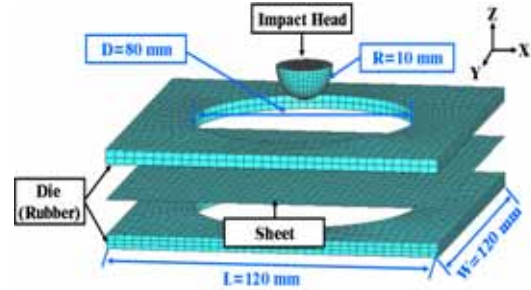


Fig.1 FE model of the impact analysis

Table 1 Number of nodes and elements

D (mm)		Sheet (EA)	Upper Plate (EA)	Lower Plate (EA)	Impact Head (EA)
	10	Node	3782	3363	4676
	Element	3660	2006	3147	208
20	Node	3782	3363	4676	827
	Element	3660	2006	3147	824

2.2

경계조건은 상판의 윗면과 하판의 아랫면을 모든 방향으로 고정시켰다. 시편은 각 가장자리를 Z방향으로만 고정시키고 그 외의 다른 방향으로 자유단 상태로 가정하였다. 그리고 충격헤드는 시편과 맞닿게 위치시켜 초기 충격 순간의 속도를 식 (1)과 같이 계산하여 충격헤드에 부여하였다. 또한, 충격헤드는 Z방향으로만 움직일 수 있도록 경계조건을 부여하였다.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

저속 충격특성 분석을 위하여 시편인 SUS304H는 탄소성 재료로 가정하였다. 정적인 인장시험 및 굽힘시험을 통하여 시편의 탄성영역의 물성을 구하였고, 고속인장시험을 통하여 변형률 속도에 의존적인 소성영역의 물성을 구하여 ABAQUS 상의 재료 물성으로 입력하였다. 이때, 해석에 사용된 SUS 304H의 밀도는 7,850 kg/m³ 이고 탄성계수는 180 GPa, 포와송비는 0.28 이다. 그리고 변형률속도에 따른 항복강도와 인장강도는 Fig. 2와 같다.

상판과 하판의 고무는 연성고무로 가정하였다.

물성은 Neo-Hookean 의 Hyper-elastic 모델을 적용하였다. 또한, 시편과 상하판의 재료 물성에는 외연적 시간적분해 해석의 정확도를 높이기 강성에 비례하는 감쇄계수를 사용 하였다. 감쇄계수의 값은 댐핑이 없는 초기의 안정적 시간증분의 크기와 같거나 혹은 이보다 약간 작은 값을 입력하였다. 안정적 시간증분 (Δt_s) 과 재료의 응력 전파 속도 (C_d) 는 식 (2) 같이 계산하였다.

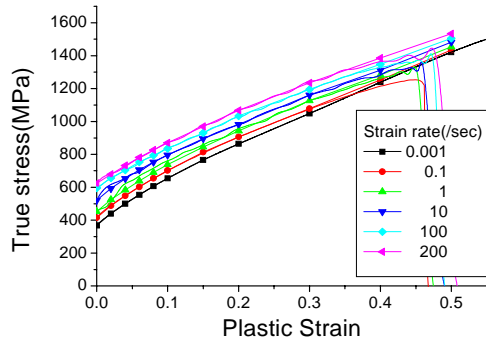


Fig. 2 Stress-strain relationships for each strain rate

$$\Delta t_s = \frac{L_c}{C_d} = \frac{L_c}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (2)$$

충격해석에 사용된 SUS 304H 에 대한 임계 요소 길이는 1 mm 이며, 재료 물성치와 임계 요소 길이를 식 (2) 에 대입하여 계산한 결과 안정적 시간증분은 2.08×10^{-7} 초로 계산되었다. 그 결과 감쇄 계수의 값은 2.05×10^{-7} 로 결정하였다.

입력충격에너지 (E_{in}) 와 재료에 의하여 흡수된 에너지 (E_{ab}), 충격에너지흡수율 (χ) 은 각각 식 (3), (4), (5)와 같이 계산하였다.

$$E_{in} = mgh \quad (3)$$

$$E_{ab} = \int Pd\delta \quad (4)$$

$$\chi(\%) = \frac{E_{ab}}{E_{in}} \times 100 \quad (5)$$

3. SUS 304H

3차원 유한요소해석결과의 검증을 위하여 SUS 304H 판재에 대한 충격시험을 수행하였다.

SUS 304H 판재에 대한 충격시험은 Fig. 3 과

같은 낙하하중 (Drop weight) 방식의 충격시험기를 사용하였다. 충격하중을 측정하기 위하여 충격 헤드 (Head) 상부에 로드 셀 을 부착하였으며, 재료의 충격부 변위를 측정하기 위하여 구조물 왼쪽 모서리에 최대 변위가 75 mm 인 LVDT 를 장착하였다. 그리고 촬영 속도가 1/20,000 sec 인 고속카메라를 설치하여 충격 헤드와 시편의 접촉 후 변형을 촬영하였다.

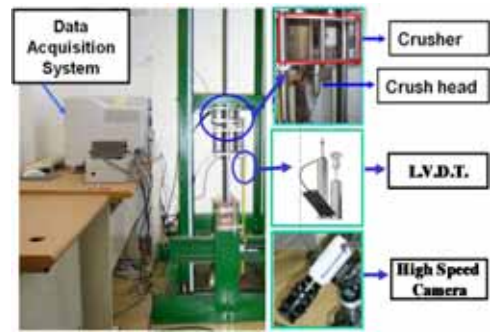


Fig. 3 Experimental set-up

고정형 경계조건은 시편 지지용 치구의 상판과 하판 사이에 고무를 첨가하고 고정구로 고정하여 치구의 중앙 원형부를 제외한 잔여부분은 고무에 부가되는 압력으로 완전 고정시켜 충격 헤드에 의한 중앙부 변형만을 유도하도록 하였다.

저속 충격 시험에 사용된 시편은 두께 0.7 mm 의 SUS 304H 판재를 120 mm (L) × 120 mm (W) 크기로 제작하였다. 시편의 무게는 78.3 g 이다. 충격시험은 고정형 경계조건에서 수행하였으며, 실험에 사용된 충격헤드는 무게가 11.1 kg 이고 직경은 10 mm 와 20 mm 가 되도록 제작하였다. 충격높이는 340 mm 에서 980 mm 까지 이다.

4.

4.1

본 SUS 304H 재료의 저속 충격 해석 모델의 검증을 위하여 해석 결과를 충격 시험 결과와 비교/분석 하였다.

초기 유한요소 모델에서는 판재에 대한 감쇄 계수 부가와 상하판 재료에 대한 Hyper-elastic 및 Visco-elastic 모델이 도입되지 않았다. 그 결과 Fig. 4 와 같이 초기 충격 헤드와 판재 접촉 구간에서 해의 과도 진동으로 인하여 판재의 과도 변형을 유도하여 충격하중이 과도하게 예측되고 재료 변위가 매우 감소하는 현상이 나타났다. 그러

나 판재에 대한 감쇄 계수 부가와 상하판 재료에 대한 Hyper-elastic 모델이 도입된 경우는 Table 2, Fig. 5 및 6 과 같이 충격 시험 결과와 거의 유사한 하중-변위 및 흡수에너지-변위 곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

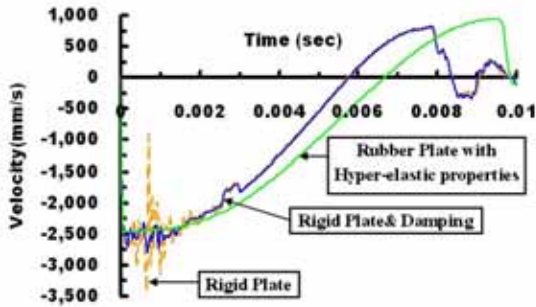
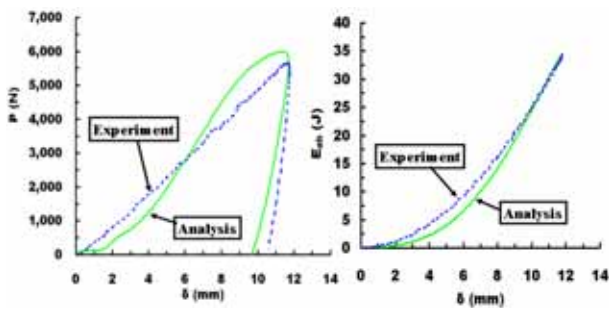


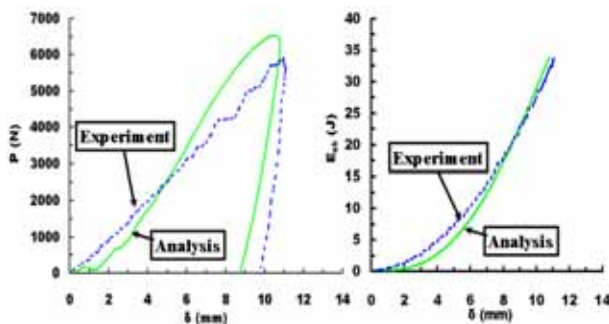
Fig. 4 Influence of damping coefficients and hyper-elastic model on accuracy of the solution

Table 2 Comparison of results of impact tests and that of simulations ($E_{in} = 45.7$ J)

	D (mm)	E_{ab} (J)	χ (%)	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)
10	Experiment	37.3	81.6	5861.3	13.0
	Analysis	37.6	82.3	6049.8	12.4
20	Experiment	36.6	80.1	6235.5	11.9
	Analysis	37.7	82.5	6681.1	11.3



(a) $D = 10$ mm ($P-\delta$, $E_{ab}-\delta$ curves)



(b) $D = 20$ mm ($P-\delta$, $E_{ab}-\delta$ curves)

Fig. 5 Comparison of results of impact tests and impact simulations ($E_{in} = 41.3$ J)

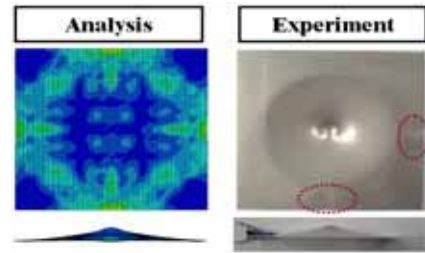


Fig. 6 Comparison of the deformed shape of the FE analyses and that of experiments ($E_{in} = 41.3$ J, $D = 20$ mm)

Table 2와 Fig. 5 에서와 같이 충격 헤드 직경 10 mm 와 20 mm 에 대한 유한요소해석 결과가 충격 흡수 에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대 변위 및 최대 하중 측면에서 충격 시험 결과와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 6 은 충격시험과 3차원 유한요소 해석을 통해 충격헤드의 직경이 20 mm일 때의 시편의 최종 변형 형상을 비교하였다. Fig. 6 을 보면 초기에 시편 중앙부의 충격부위로 응력이 집중되나, 스프링백이 완료된 후의 최종변형 상태에서는 시편 중앙부에 대한 수직·수평 방향의 고정형 경계조건이 부여된 가장자리 영역에서 재료의 수직 방향 변형 제한에 의한 응력이 발생하는 현상을 볼 수 있었다. 이 결과를 통해 최종변형시 중앙부 충격 부가 부분의 수직·수평 방향의 가장자리 영역에서 접힘 현상과 같은 변형이 발생할 가능성이 있음을 예측할 수 있었다. 충격시험 결과 Fig. 6 과 같이 완벽한 고정형 경계 조건이 구현되지 않았을 경우 중앙부 충격부가 부분의 수직·수평 방향 가장자리 영역에서 접힘 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과로부터 본 연구에서 제안된 SUS 304H 강판에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 고정형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

4.2

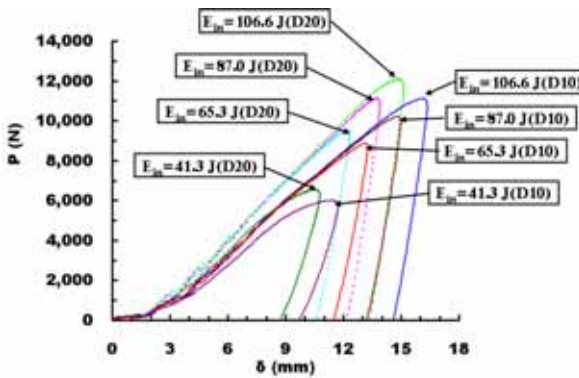
SUS 304H 판재의 고정형 경계조건에서 3차원 유한요소 충격해석 결과 Table 3 및 Fig. 7 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3과 Fig. 7 을 통해 충격헤드의 직경이 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해보면 동일 입력에너지에서 충격헤드의 직경이 20 mm일 때 더 높은 최대하중을 나타내는 반면, 충격헤드의

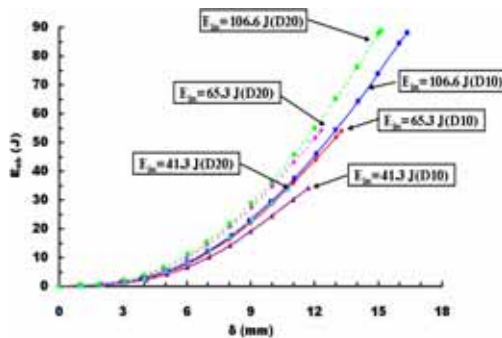
직경이 10 mm 일 때 더 많은 중앙부 변형이 발생함을 알 수 있었다. 이 현상은 충격 헤드 직경이 감소할수록 충격부에 높은 밀도의 충격에너지가 부가되어 충격헤드 접촉부 재료에 고 변형률 속도를 유도시켜 국부 변형을 증가시키기 때문이다. 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율을 충격헤드의 직경에 관계없이 동일 입력에너지에서 거의 동일한 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율이 나타남을 알 수 있었다.

Table 3 Results of impact analysis

D (mm)	H (cm)	E_{in} (J)	E_{ab} (J)	χ (%)	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)
10	38	41.3	34.1	82.5	6000.8	11.7
	60	65.3	54.0	82.7	8863.9	13.3
	80	87.0	71.9	82.6	10203.5	15.0
	98	106.6	88.1	82.7	11116.4	16.4
20	38	41.3	34.1	82.6	6626.8	10.8
	60	65.3	54.2	83.0	9522.5	12.3
	80	87.0	72.3	83.1	11107.9	13.9
	98	106.6	88.8	83.3	12076.0	15.1

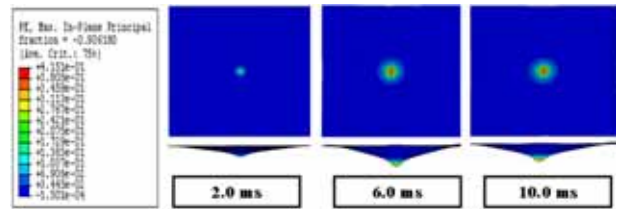


(a) Force-displacement curves

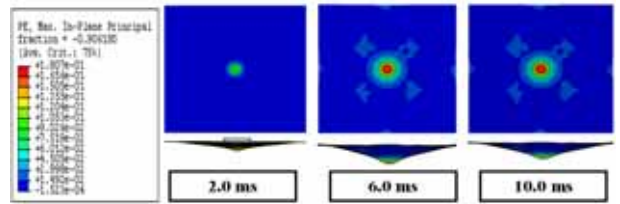


(b) Absorption energy-displacement curves

Fig. 7 Results of impact tests for the case of stretching boundary conditions

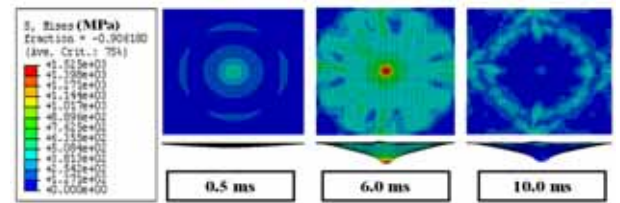


(a) D=10 mm

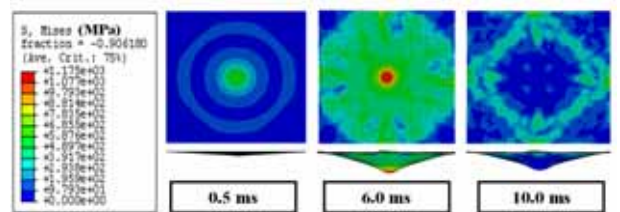


(a) D=20 mm

Fig. 8 Variation of the plastic strain according to the impact time ($E_{in}=106.6$ J)



(a) D=10 mm



(b) D=20 mm

Fig. 9 Variation of the stress according to the impact time ($E_{in}=106.6$ J)

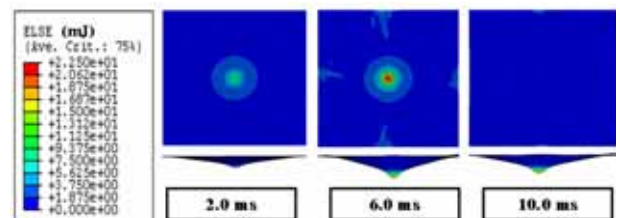


Fig. 10 Variation of strain energy distributions according to the impact time ($E_{in}=106.6$ J, D=10 mm)

Fig. 8, 9, 10 은 충격 시험 결과 충격 헤드 직경 10 mm에서 재료 파단이 발생한 충격에너지인 106.6 J 에서의 충격 헤드 직경 10 mm 와 20 mm 에 대한 유한요소해석 결과이다. Fig. 8 과

같이 충격헤드 직경 10 mm에서 재료 파단이 일어난 106.6 J의 충격에너지에서 최대 소성 변형률이 0.415 정도를 나타내었다. 또한, Fig. 9을 통하여 재료가 파단 되었을 때 1,525 MPa 정도의 최대 응력이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 2의 변형률속도에 따른 소성변형률-진응력 관계에서 소성 변형률 0.4-0.425 정도에서 재료의 불안정 현상이 발생하는데, 파단 발생시점에서 계산된 최대 소성 변형률이 이 값 범위 내에 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 충격 헤드 직경이 20 mm인 경우 최대 소성 변형률이 0.18 정도로 재료 불안정 현상이 나타나는 0.4 보다 매우 작은 변형률 영역에 있어, 재료의 파단이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 충격 헤드의 직경이 커질수록 많은 재료 면적으로 충격에너지가 전달되어 전체적으로 낮은 응력 및 변형률 값을 나타냄을 알 수 있었다. Fig. 10과 같은 SUS 304H 재료의 파단이 발생하는 영역에서는 20.6-22.5 mJ 정도의 변형률 에너지가 나타남을 알 수 있었다.

4.

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통한 SUS304H 판재의 고정형 경계조건에서의 충격 특성을 분석/고찰하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, SUS 304H 판재의 고정형 경계조건에 대한 충격 해석용 3차원 유한요소해석 모델을 개발하였으며, 해석 결과를 실험결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 확인하였다.

둘째, 3차원 유한요소해석 결과를 통하여 입력 충격에너지와 충격헤드 직경 변화에 따른 재료의 충격 흡수 특성, 하중-변위 특성 및 응력/변형률/변형률에너지 변화에 대한 정량적 분석을 수행하였다. 그 결과 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율을 충격헤드의 직경에 관계없이 동일 입력에너지에서 거의 동일한 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율이 나타남을 알 수 있었다.

셋째, 최대 변형률이 나타나는 임계 충격 에너지를 정량적으로 예측할 수 있었으며 이때의 응력/변형률/변형률에너지 분포 특성에 대한 예측이 가능하였다.

본 연구는 산업자원부 핵심연구개발사업인 “3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 개발사업” 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

- (1) C. H. Huang, S. H. Wang, W. S. Lee, T. H. Chen and C. Lien, 2005, "Dynamic impact behavior and ferrite variation of special stainless steels," *Scripta Materialia*, Vol. 52, No. 9, pp. 843-849.
- (2) Mala Seth, Vincent J. Vohnout and Glenn S. Daehn, 2005, "Formability of steel sheet in high velocity impact," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 3, pp. 390-400.
- (3) Damodar R. Ambur, Navin Jaunky, Robin E. Lawson and Norman F. Knight Jr, 2001, "Numerical simulations for high-energy impact of thin plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 683-702.
- (4) V. H. Balden and G. N. Nurick, 2005, "Numerical simulation of the post-failure motion of steel plates subjected to blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 1-4, pp. 14-34.
- (5) N. K. Gupta, M. A. Iqbal and G. S. Sekhon, 2006, "Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 12, pp. 1921-1944.
- (6) D. W. Jung and M. J. Worswick, 2004, "A parameter study for static and dynamic denting," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 11, pp. 2009-2020.