

3 차원 유한요소해석을 이용한 스트레칭 조건에서의 두께 0.7 mm 스테인레스 강판의 저속 충격 특성 분석

안동규[#], 문경제^{*}, 정창균^{**}, 양동열^{**}

Investigation into Low Velocity Impact Characteristics of the Stainless Steel Sheet with Thickness of 0.7 mm on the Stretching Condition using Three-Dimensional Finite Element Analysis

Dong Gyu Ahn[#], Kyung Je Moon^{*}, Chang Gyun Jung^{**} and Dong Yol Yang^{**}

ABSTRACT

This paper investigated into the impact characteristics of the stainless sheet with thickness of 0.7 mm on the stretching boundary condition through three-dimensional finite element analysis. High speed tensile tests were carried out to obtain strain-stress relationships with the effects of the strain rate. The FE analysis was performed by the ABAQUS explicit code. In order to improve an accuracy of the FE analysis, the hyper-elastic model and the damping factor were introduced. Through the comparison of the results of the FE analyses and those of the impact tests, a proper FE model was obtained. The results of the FE analyses showed 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, variations of stress, strain, dissipation energy, strain energy density, and local deformation characteristics in the stainless sheet during the collision and the rebound of the impact head were quantitatively examined. In addition, it was shown that the fracture of the specimen occurs when the plastic strain is 0.42 and the maximum value of the plastic dissipation energy of the specimen is nearly 1.83 J.

Key Words : Stretching Boundary Condition (스트레칭 경계 조건), Low Velocity Impact Characteristics (저속충격 특성), Stainless Steel Sheet (스테인레스 강판), 3D Finite Element Analysis (3 차원 유한요소해석)

기호설명

V : impact speed (m/s)

g : acceleration of gravity (m/s²)

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

☞ 접수일: 2008 년 2 월 21 일; 게재승인일: 2008 년 5 월 26 일

교신저자: 조선대학교 기계공학과

E-mail: smart@mail.chosun.ac.kr Tel. (062) 230-7043

* 조선대학교 일반대학원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

- E_{in} : impact energy (J)
- m : mass of impact head (g)
- D : diameter of impact head (mm)
- E_{ab} : absorbed impact energy by material (J)
- P : reaction force (N)
- δ : vertical deflection of material at contact area with impact head (J)
- χ : absorption rate of impact energy (%)

1. 서론

스테인레스강은 12 % 이상의 Cr 을 함유하여 내식성이 우수하고 내열성, 인성 및 용접성이 양호하여 화학공장, 철강, 선박, 원자력 산업 혹은 해양 산업 등에 많이 사용되고 있다.^{1,2} 최근에는 우수한 성형성과 높은 가공경화 특성을 이용하여 고강도가 요구되는 부재로도 그 활용도가 높아짐에 따라 자동차 부품, 건축자재 및 구조용 재료로도 많이 활용되고 있다.

한편, 스테인레스 재료의 고강도 특성을 이용하여 수송기계용 구조재로도 많이 활용되기 시작하면서, 수송기계분야에서 흔히 발생할 수 있는 충격 특성에 대한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다.

Huang 등은 변형률 속도 850 s^{-1} 과 5000 s^{-1} 에서의 스테인레스 강의 동적 충격거동과 페라이트 변위에 관한 연구를 수행하였다.³ Mala Seth 등은 50-220 m/s 의 고속 충격 속에서의 강 판재의 고속 성형성 및 파단 변형률에 대하여 연구를 수행하였다.⁴ 그리고 Odeshi 등은 충격 속에서의 AISI 4340 강의 변형과 파단 메커니즘 및 파단면의 미세구조에 대하여 연구를 수행하였다.⁵ Lee 등은 0.001 s^{-1} 에서 $7.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 까지의 변형률 속도에서 소결된 316L 스테인레스 강 of 충격거동과 변형률 및 응력의 변형률 속도 의존성에 대하여 연구를 수행하였다.⁶ 또한, Lee 등은 800 s^{-1} 에서 4800 s^{-1} 의 변형률 속도에서 304L 스테인레스 강 of 충격에 의한 마텐자이트 변이 메커니즘의 구조와 특징에 대하여 연구를 수행하였다.⁷

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

Ambur 등은 비행기 동체나 날개에 사용되는 얇은 판재의 고에너지 충격에 대한 수치적 시뮬레이션을 통해 충격특성을 연구하였다.⁸ Balden 등은 충격하중 속에서의 얇은 강 판재의 변형과 파단을 수치적 시뮬레이션을 통해 분석하였다.⁹ 또한, Gupta 등은 원기둥 형상과 반구형 형상의 충격헤드를 사용한 충격하중 속에서의 얇은 알루미늄 판재의 충격거동을 실험과 해석을 통하여 연구를 수행하였다.¹⁰ Liu 등은 고정형 경계조건에서 얇은 강 판재에 저속 충격하중 부가시 판재 내에서의 응력 및 에너지 유동의 전파와 동적 반응에 대하여 3 차원 유한요소해석을 통하여 연구/분석하였다.¹¹

본 논문에서는 스테인레스강 중 산업적으로 폭넓게 활용되고 있는 오스테나이트계의 SUS 304 재료에 대한 고정형 경계조건에서의 충격 특성을 3 차원 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 또한, 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. SUS304 판재의 충격해석

2.1 유한요소해석 방법 및 모델링

실험적 연구에서 정량적으로 평가하기 어려운 충격에너지에 따른 재료 내부 응력, 변형률 및 변형에너지의 시간별 변화와 충격에너지 전파 특성 분석을 위하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구의 충격해석을 위한 유한요소 방법은 외연적 시간적분 (explicit time integration) 유한요소법을 사용하였다. 충격해석을 위한 유한요소 모델링은 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 1 과 같이 모델링 하였다. 유한요소 모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

시편의 모델링은 두께가 0.7 mm 로 얇기 때문에 4 절점 쉘 (shell) 요소를 이용하였다. 상판과 하판 다이의 고무는 8 절점 육면체 요소로 모델링 하였으며, 충격헤드는 분산형 강체 요소로 모델링 하였다. 충격헤드의 직경 (D) 은 충격 실험과 동일하게 10 mm 및 20 mm 를 사용하였으며, 각 시험조건 of 유한요소 격자수는 Table 1 과 같이 설정

하였다. 경계조건은 상판의 윗면과 하판의 아랫면을 모든 방향으로 고정시켰다.

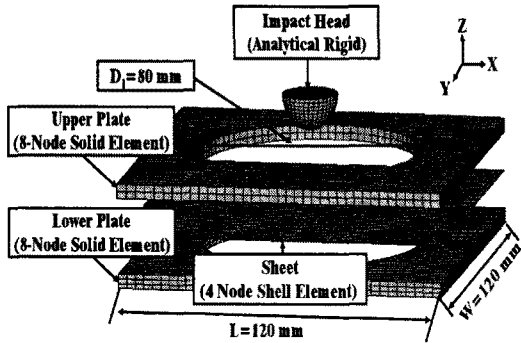


Fig. 1 FE model of the impact analysis

Table 1 Number of nodes and elements

D (mm)		Sheet	Upper Plate	Lower Plate	Impact Head	Total
10	Node (EA)	3,782	3,363	4,676	211	12,032
	Element (EA)	3,660	2,006	3,147	208	9,021
20	Node (EA)	3,782	3,363	4,676	827	12,648
	Element (EA)	3,660	2,006	3,147	824	9,637

시편은 각 가장자리를 Z 방향으로만 고정시키고 그 외의 다른 방향으로 자유단 상태로 가정하였다. 그리고 충격헤드는 시편과 맞게 위치시켜 초기 충격속도(\$V_0\$)는 식 (1)과 같이 계산하여 충격헤드에 부여하였다. 또한, 충격헤드는 Z 방향으로만 움직일 수 있도록 경계조건을 부여하였다.

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

2.2 재료 물성

충격해석에 적용된 시편은 SUS304 재료이며, SUS304 재료의 성분비는 Table 2 와 같다. 충격해석에 소요되는 재료 물성을 얻기 위하여 정적 인장시험과 고속인장시험을 수행하였다. 정적 인장시험을 통하여 Table 3 과 같은 SUS304 재료의 탄성계수, 포와송비 및 항복강도를 산출하였다. 고속인장시험은 Fig. 2 와 같은 고속인장시험기와 Fig. 3 과 같은 시편을 이용하여 수행하였다. 고속인장시험에서는 Fig. 4 와 같은 변형률 속도가 반영된 응력-변

형률 선도를 산출하였다. 충격해석시 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 입력시켜 해석시 보다 정확한 결과를 산출 가능하도록 하였다.

Table 2 Chemical composition of SUS 304 (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
68.6	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	9.2	19.0

Table 3 Mechanical properties of SUS304

E (GPa)	\$\nu\$	\$\sigma_y\$ (MPa)
180	0.29	283

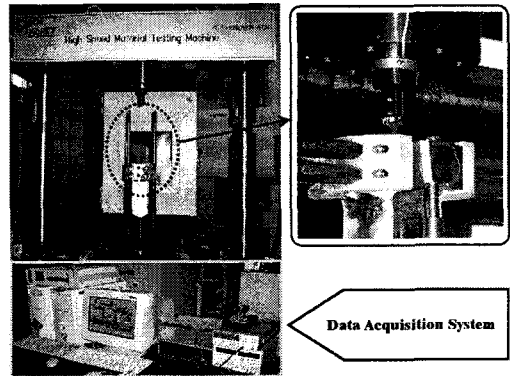


Fig. 2 Experimental set-up of high speed tensile tests

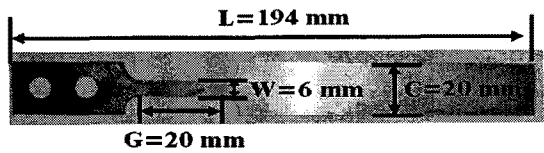


Fig. 3 Design of specimen for high speed tensile tests

상판과 하판의 고무는 연성고무로 가정하였다. 물성은 Neo-Hookean 의 Hyper-elastic 모델을 적용하였다. 또한, 시편과 상하판의 재료 물성에는 외연적 시간적분식 해석의 정확도를 높이기 위해 강성에 비례하는 감쇄계수를 적용 하였다. 외연적 유한요소 해석이 안정적으로 수행될 수 있는 안정적 시간증분 (\$\Delta t_s\$) 는 식 (2) 와 같이 시편의 최소 크기의 유한요소 격자 특성길이 (\$L_c\$) 와 응력 전파속도 (\$C_d\$) 로부터 산출하였다.

충격해석에 사용된 SUS304 에 대한 임계 요소 길이는 \$1\$ mm 이며, 재료 물성치와 임계 요소 길이

를 식 (2) 에 대입하여 계산한 결과 안정적 시간증분은 2.08×10^{-7} 초로 계산되었다. 감쇄 계수는 $2.05 \times 10^{-7}/\text{sec}$ 를 적용하였다.

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

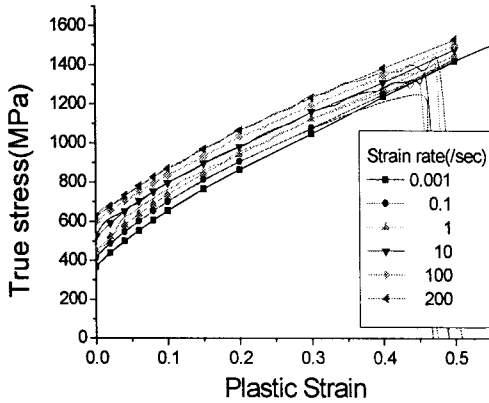


Fig. 4 Stress-strain relationships for each strain rate

2.3 충격특성 분석 방법

SUS304 판재의 충격 에너지 흡수 특성을 정량적으로 계산하기 위하여 충격 흡수 에너지 및 충격에너지 흡수율을 계산하였다. 입력 충격에너지는 식 (3) 과 같이 충격헤드의 최초 낙하 높이에서의 위치 에너지로 산출하였다. 시편에 의하여 흡수된 에너지는 충격헤드에 측정된 하중-시간 선도에서 하중이 최초 0 에서 일정값으로 상승하기 시작하는 시점에서 다음 0 의 값으로 내려가기 전의 시간영역에 대하여 하중-변위 선도를 생성하여 식 (4) 와 같이 적분하여 계산하였다. 충격에너지 흡수율은 식 (5) 와 같이 산출하였다.

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

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

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

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 모델 검증

본 SUS 304 재료의 저속 충격 해석 모델의 검증을 위하여 해석결과를 충격 시험결과와 비교/분석 하였다.

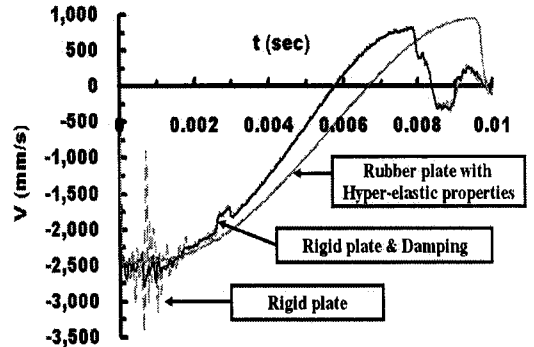


Fig. 5 Influence of damping coefficients and hyper-elastic model on velocity-time curves

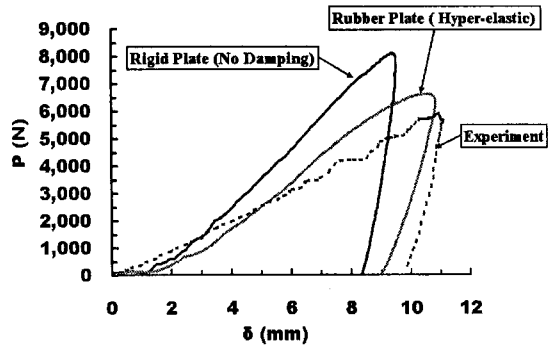


Fig. 6 Influence of damping coefficients and hyper-elastic model on accuracy of the solution (P-δ curves)

초기 유한요소 모델에서는 판재에 대한 감쇄 계수 부가와 상하판 재료에 대한 Hyper-elastic 모델이 도입되지 않았다. 그 결과 Fig. 5 및 6 과 같이 초기 충격 헤드와 판재 접촉 절점구간에서 계산된 절점 속도의 과도 진동으로 인하여 충격하중이 과도하게 예측되고 재료 변위가 매우 감소하는 현상이 나타났다. 그러나 판재에 대한 감쇄 계수 부가와 상하판 재료에 대한 Hyper-elastic 모델이 도입된 경우는 Table 4, Fig. 7 및 8 과 같이 충격

시험 결과와 거의 유사한 하중-처짐 곡선, 흡수 에너지-처짐 곡선, 충격흡수 에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대 변위 및 최대 하중값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Table 4 Comparison of results of impact tests and that of simulations ($E_{in}=45.7$ J)

	D (mm)	E_{ab} (J)	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)
10	Experiment	37.3	5,861.3	13.0
	Analysis	37.6	6,049.8	12.4
20	Experiment	36.6	6,235.5	11.9
	Analysis	37.7	6,681.1	11.3

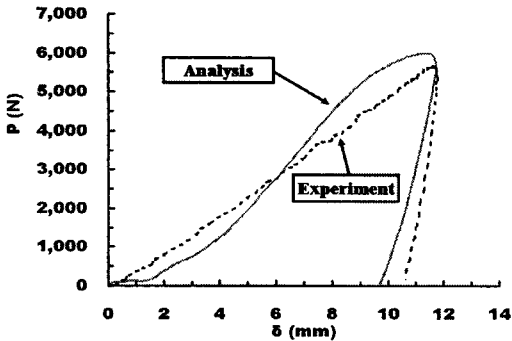


Fig. 7(a) Comparison of P- δ curve of impact tests and that of simulation ($D = 10$ mm, $E_{in} = 41.3$ J)

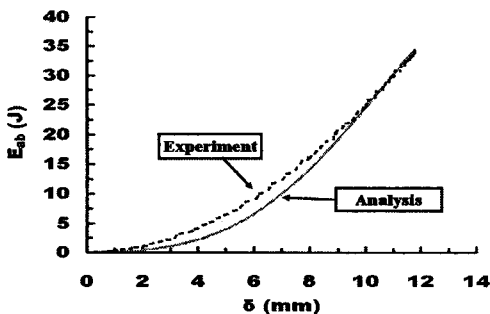


Fig. 7(b) Comparison of absorption energy-deflection curve of impact tests and that of simulation ($D=10$ mm and $E_{in}=41.3$ J)

Fig. 8(a)는 3 차원 유한요소 해석 결과 계산된 충격헤드 직경이 20 mm 일 때의 시편의 최대 처짐 점과 스프링백 후의 응력분포이다. 유한요소해석

결과 시편의 최대 처짐 시점과 스프링 백 발생후, 시편 내부에 Fig. 8(a)와 같이 시편 중앙부의 수직·수평 방향의 가장자리에 압축잔류응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 시편에 스트레칭 경계조건이 완벽히 구현되지 않으면 최종 변형시 중앙부 충격 부가 부분의 수직·수평 방향의 가장자리 영역에서 접힘 현상과 같은 변형이 발생할 가능성이 있음을 예측할 수 있었다. 충격 시험 결과 Fig. 8(b)와 같이 치구의 상·하판의 시편 고정 압력이 적어 완벽한 스트레칭형 경계 조건이 구현되지 않았을 경우 중앙부 충격 부가 부분의 수직·수평 방향 가장자리 영역에서 미세한 접힘 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과로부터 본 연구에서 제안된 SUS304 강판에 대한 3 차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 스트레칭형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

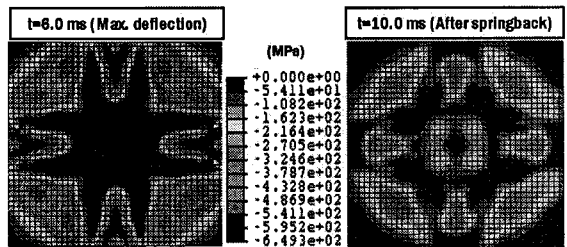


Fig. 8(a) Results of FE analysis (Stress distribution, $E_{in} = 41.3$ J and $D = 20$ mm)

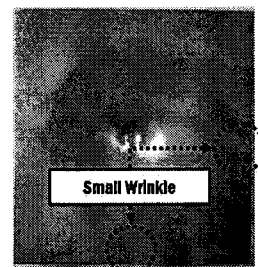


Fig. 8(b) Results of impact test (Deformed shape, $E_{in} = 41.3$ J and $D = 20$ mm)

3.2 충격해석 결과 및 고찰

SUS304 판재의 고정형 경계조건에서 3 차원 유한요소 충격해석 결과 Table 5 및 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 5 와 Fig. 9 를 통해 충격헤드의 직경이 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해보면, 동일 입력에너지에서 충격헤드의 직경이 20 mm 일 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. 또한, 충격에너지가 증가할수록 충격흡수에너지, 최대하중 및 최대변위는 증가함을 알 수 있었다. 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율은 충격헤드의 직경에 관계없이 동일 충격에너지에서 거의 동일한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 5 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	6,000.8	11.7
	60	65.3	54.0	82.7	8,863.9	13.3
	80	87.0	71.9	82.6	10,203.5	15.0
	98	106.6	88.1	82.7	11,116.4	16.4
20	38	41.3	34.1	82.6	6,626.8	10.8
	60	65.3	54.2	83.0	9,522.5	12.3
	80	87.0	72.3	83.1	11,107.9	13.9
	98	106.6	88.8	83.3	12,076.0	15.1

Fig. 10, 11, 12 및 13 은 충격 시험 결과 충격헤드 직경 10 mm 에서 재료 파단이 발생한 충격에너지인 106.6 J 에서의 유한요소해석 결과이다. Fig. 10 과 같이 충격헤드 직경 10 mm 에서 재료 파단이 일어난 106.6 J 의 충격에너지에서 최대 소성 변형률이 0.415 정도를 나타내었다. 또한, Fig. 11 에서 재료가 파단 되었을 때 1,525 MPa 정도의 최대 응력이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 5 의 변형률 속도에 따른 소성 변형률-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. 5 에서 최대 변형률 속도에서의 진응력이 약 1,400 MPa 이 상 일 때 재료의 불안정 현상이 발생하였는데, 파

단 발생 시점에서 계산된 최대 응력이 이 값보다 더 큼을 알 수 있었다.

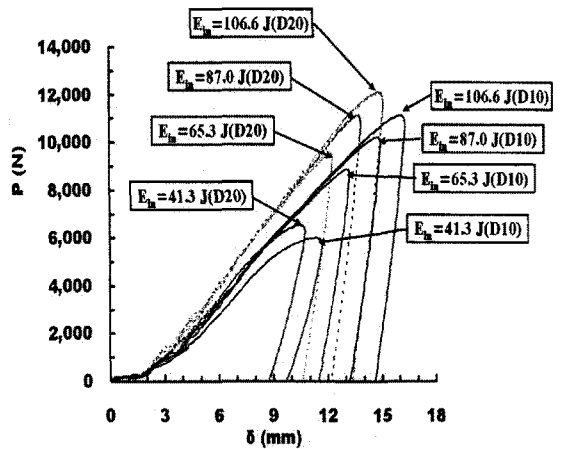


Fig. 9(a) Results of impact analysis (P- δ curves)

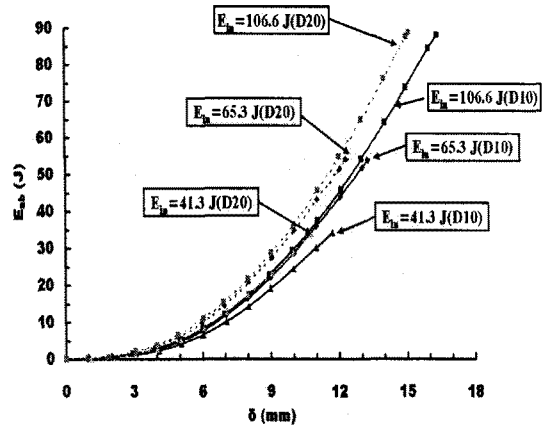


Fig. 9(b) Results of impact analysis (E_{ab} - δ curves)

Fig. 10 에서 충격 헤드 직경이 20 mm 인 경우 최대 소성 변형률이 0.18 정도로 재료 불안정 현상이 나타나는 0.4 보다 매우 작은 변형률 영역에 있으며, Fig. 11 에서 최대 응력 또한 1,175 MPa 로 최대 변형률 속도에서 재료 불안정 현상이 발생하는 1,400 MPa 보다 매우 작아 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.

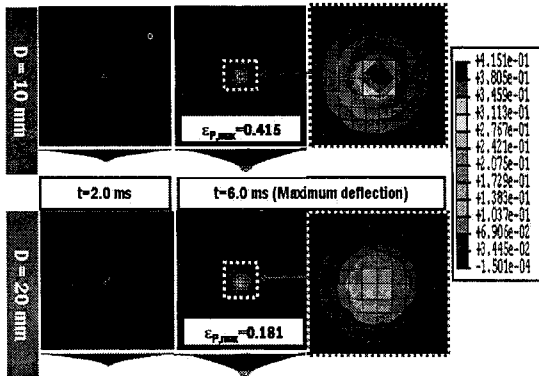


Fig. 10 Variation of the plastic strain according to the diameter of impact head ($E_{in} = 106.6 \text{ J}$)

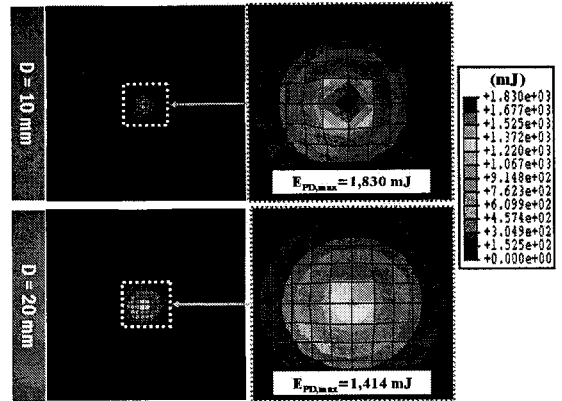


Fig. 12 Variation of the plastic dissipation energy distribution according to the diameter of impact head ($E_{in} = 106.6 \text{ J}$)

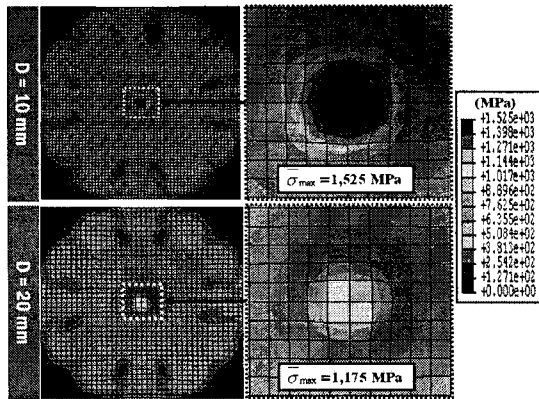


Fig. 11 Variation of the effective stress distribution according to the diameter of impact head ($E_{in} = 106.6 \text{ J}$)

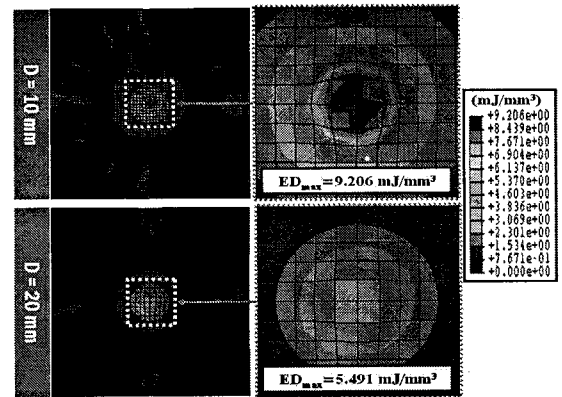


Fig. 13 Variation of the elastic strain energy density distribution according to the diameter of impact head ($E_{in} = 106.6 \text{ J}$)

Fig. 12 는 재료의 소성 변형에 의한 손실 에너지 분포를 나타낸 유한요소해석 결과이다. Fig. 12 에서 충격헤드의 직경 10 mm 일 때 최대 소성 손실 에너지가 1,830 mJ 로 직경 20 mm 일 때의 최대 소성 손실 에너지 1,414 mJ 보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, Fig. 13 에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때 최대 탄성 변형률 에너지 밀도가 약 9.2 mJ/mm³ 정도로 직경 20 mm 일 때의 최대 탄성 변형률 에너지 밀도 5.5 mJ/mm³ 보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 충격헤드 직경 10 mm 일 때가 직경 20 mm 일 때 보다 충격부에 높은 밀도의 충격에너지가 부가되어, 충격부 재료의 고 변형률 속도를 유도시켜 국부 변형을 증가시키기 때문으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 3 차원 유한요소해석을 통한 SUS304 판재의 고정형 경계조건에서의 충격 특성을 분석/고찰하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, SUS 304 판재의 고정형 경계조건에 대한 충격 해석용 3 차원 유한요소해석 모델을 취득하였으며, 해석 결과와 실험결과를 비교하여 해석 모델의 타당성을 검증하였다.

둘째, 3 차원 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/변형률 에너지 분포 특성에 대한 예측이 가능하였다.

마지막으로 3 차원 유한요소해석을 통해 재료의 에너지흡수특성과 변형 및 파단, 응력 및 변형률 에너지 분포 특성 등의 재료 내/외적인 충격거동의 예측이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. Kaczorowski, D., Combrade, P., Vernot, J. P., Beauduin, A. and Crenn, C., “Water Chemistry Effect on the Wear of Stainless Steel in Nuclear Power Plant,” *Tribology International*, Vol. 39, No. 12, pp. 1503-1508, 2006.
2. Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G., Im, K. G. and Shin, B. H., “Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel Utilize CW Nd:YAG Laser,” *J. of the KSPE*, Vol. 23, No. 3, pp. 47-55, 2006.
3. Huang, C. H., Wang, S. H., Lee, W. S., Chen, T. H. and Lien, C., “Dynamic Impact Behavior and Ferrite Variation of Special Stainless Steels,” *Scripta Materialia*, Vol. 52, No. 9, pp. 843-849, 2005.
4. Seth, M., Vohnout, V. J. and Daehn, G. S., “Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No. 3, pp. 390-400, 2005.
5. Odeshi, A. G., Al-ameeri, S., Mirfakhraei, S., Yazdani, F. and Bassim, M. N., “Deformation and Failure Mechanism in AISI 4340 Steel under Ballistic Impact,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 45, No. 1, pp. 18-24, 2006.
6. Lee, W. S., Lin, C. F. and Liu, T. J., “Strain Rate Dependence of Impact Properties of Sintered 316L Stainless Steel,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 359, No. 3, pp. 247-257, 2006.
7. Lee, W. S. and Lin, C. F., “Impact Properties and Microstructure Evolution of 304L Stainless Steel,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. 308, No. 1-2, pp. 124-135, 2001.
8. Ambur, D. R., Jaunky, N., Lawson, R. E. and Knight, N. F., “Numerical Simulations for High-Energy Impact of Thin Plates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 683-702, 2001.
9. Balden, V. H. and Nurick, G. N., “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, 2005.
10. Gupta, N. K., Iqbal, M. A. and Sekhon, G. S., “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, 2006.
11. Liu, Z. S., Lee, H. P. and Lu, C., “Structural Intensity Study of Plates under Low-Velocity Impact,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 957-975, 2005.