

Ti-6Al-4V 합금의 동적 변형 거동에 관한 연구

서용석¹⁾ · 이영신²⁾ · 송오섭^{*,2)}

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

²⁾ 충남대학교 기계공학부

A Study on the Dynamic Behavior of Ti-6Al-4V Alloy

Yongseok Seo¹⁾ · Young-Shin Lee²⁾ · Ohseop Song^{*,2)}

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

(Received 23 September 2016 / Revised 13 October 2016 / Accepted 10 February 2017)

ABSTRACT

This paper studies on the dynamic properties of Ti-6Al-4V alloy. After forming the four different micro structures(equiaxed, lamellar, and 2 bimodals) through heat treatments, static and dynamic properties of each structure were investigated quantitatively. Dynamic behaviors of the alloy are observed by the compressive split Hopkinson pressure bar(SHPB) tests. In addition, parameters of Johnson-Cook equation were determined from the SHPB test results. In order to verify the suitability of the parameters, high velocity impact tests were performed and the results were compared with the numerical analysis results. Although the flow stress and the fracture strain of the bimodal structures were higher than those of the equiaxed structure at the static tests, the superior dynamic properties were observed at the equiaxed structure due to the effects of higher maximum flow stress and fracture strain. From the numerical analysis, J-C parameters which are determined on this study describe well the dynamic behavior of Ti-6Al-4V alloy. Experimental and analysis results are consistent with $\pm 5\%$ of an average error.

Key Words : Ti-6Al-4V(티타늄 64 합금), Dynamic Behavior(동적거동), Compressive Split Hopkinson Pressure Bar Test (압축 홉킨슨 봉 실험), High Velocity Impact Test(고속 충돌실험), Johnson-Cook Equation(존슨-쿡 방정식)

1. 서론

티타늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성, 고온

및 저온에서의 우수한 기계적 성질 등으로 인하여 전투기, 유도탄, 전투차량 등 국방분야에 적용이 지속 증가하고 있다^[1]. 티타늄 합금(주로 Ti-6Al-4V)은 또한 우수한 고속 충돌 저항성(방탄성능)을 갖는데, 티타늄 합금을 적용할 경우, 운동에너지탄에 대해 구조물의 중량을 철강 또는 알루미늄계 장갑판재와 비교해서

* Corresponding author, E-mail: songos@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

~30 % 까지 감소시킬 수 있다^[1]. 또한 티타늄 합금은 유도부기의 탄두 케이스 등에도 적용되고 있다. 기존에 고강도강이 적용되던 이 부품은 티타늄 합금으로 대체됨에 따라 중량 감소에 의한 항속거리, 적재하중의 증가는 물론 목표물에 대한 관통능력이 향상된다고 보고된 바 있다^[3].

Ti-6Al-4V를 비롯한 티타늄 합금의 기계적 특성은 미세조직에 따라 다양하게 변화하며, 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서는 광범위하게 연구되어 왔다. 그러나 고속의 비행체 충돌현상과 같은 고속변형 조건하에서 재료는 일반적인 정적, 준정적인 조건에서 측정된 기계적 특성과는 상이한 거동을 나타낸다. Ti-6Al-4V 합금은 우수한 방탄성능을 나타냄이 확인되었고 다양한 고속변형 관련 연구가 수행되었지만, 미세조직이 고속변형 거동에 미치는 연관성에 대해서는 거의 보고되지 않았다.

현재까지 수행된 티타늄 합금의 고속변형이나 충돌 특성에 대한 연구는 주로 고변형률 속도 하에서의 티타늄 합금의 강도변화에 대한 연구로서, 변형률 속도와 온도를 변수로 강도(항복, 유동응력)의 변화를 실험적으로 측정하고, 이를 수식화하는 연구이다^[4-7]. 이 결과는 고속변형 현상을 진산모의화하는 연구에 적용되었으나, 이들 연구는 대부분 미세조직의 특성을 고려하지 않았다. 또한 티타늄 합금의 고속 충돌에서 발생하는 파단거동인 단열전단밴드의 형성 및 성장에 대한 연구^[8-10] 및 미세조직 변화가 고속변형이나 충돌조건하에서 강도 및 파괴에 어떤 영향을 주는가의 분석^[11-15] 등이 수행되었다.

본 연구에서는 대표적인 알파-베타 티타늄 합금인 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 특성이 정적/동적변형 특성에 미치는 영향을 정량적으로 연구/분석하고자 하였다. 이를 위해 열처리 공정을 거쳐 알파-베타 티타늄 합금의 주요 구성상인 등축정 알파상과 알파+베타 층상조직의 비율을 정량적으로 제어하였다. 이들 소재에 대해 준정적, 동적 변형특성을 실험/분석하고 변형거동에서 미세조직의 영향을 고려하여 Johnson-Cook 이론에 기초한 재료의 구성방정식을 결정하였으며, 고속 충돌문제에 관한 고속 충돌 실험 및 수치해석을 통해 검증하였다.

2. 실험

미세조직에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 특성과 동적 변형거동 및 고속 충돌 특성을 분석하기 위하여 열처리 조건을 다르게 한 각각의 시편을 준비하고 준정적 실험, 압축 홉킨슨 봉 실험, 고속 충돌실험을 수행하였다.

2.1 열처리(Heat treatment) 조건

본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V 합금의 화학조성은 Table 1과 같고, 이 소재를 Table 2와 같이 3단계 열처리를 실시하였다. 먼저, 불균일한 초기조직을 균일한 크기의 알파 결정립으로 변화시키기 위한 재결정 열처리 공정(Step 1)을 통해 등축정 조직이 얻어진다. 이 조직을 재열처리(Step 2)하여 열처리 온도에 따라 혼

Table 1. Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy

| Component | Al | V | Fe | C | O | N | H | Ti |
|-----------|------|------|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| Wt(%) | 5.96 | 3.88 | 0.1 | 0.001 | 0.097 | 0.006 | 0.008 | Bal. |

Table 2. Details of heat treatment conditions

| Specimen | Step1 | Step2 | Step3 | Resulting Microstructure |
|----------|------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| Type A | 950 °C / 4 hr, FC (1 °C/min) | - | 704 °C / 2 hr, AC | Equiaxed α (~100 Vol.%) |
| Type B | | 900 °C / 1 hr, AC | | Equiaxed α (~60 Vol%) + Lamella |
| Type C | | 950 °C / 1 hr, AC | | Equiaxed α (~40 Vol%) + Lamella |
| Type D | | 980 °C / 1 hr, AC | | Lamella (~100 Vol.%) |

합조직 또는 층상조직으로 변화시켰다. 미세조직이 변화된 소재는 최종적으로 균질화 열처리(Step 3)를 실시하였고, Step3 열처리는 미세조직에는 영향을 주지 않는다. 열처리 후 미세조직은 Fig. 1과 같다.

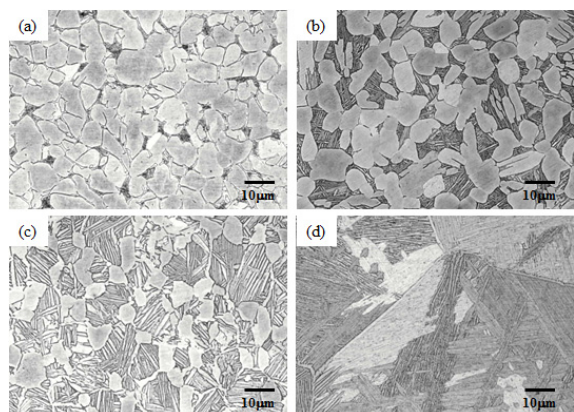


Fig. 1. Micro structures for (a) Type A(equiexied), (b) Type B(bimodal 1), (c) Type C(bimodal 2) and (d) Type D(lamella)

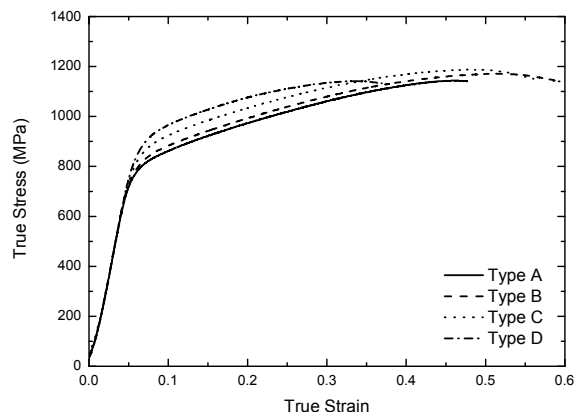


Fig. 2. Results of quasi-static compression test

2.2 준정적 실험(Quasi-static test)

열처리된 4종의 소재에 대해 기계적 특성을 분석하기 위하여 상온 압축실험을 수행하였다. 압축실험은 직경 10 mm, 높이 10 mm의 원주형 시편에 대해 Instron 8502 유압식 실험장치를 이용하여 저변형률 속도(2×10^{-3} /s)에서 실시하였다. 1 mm/min의 크로스헤드 (crosshead) 속도로 파단이 발생 할 때까지 압축하여, 진응력(True Stress) -진변형률(True Strain)과 파단 변형

률을 측정하였다. 압축실험에서 대부분의 시편은 변위가 증가함에 따라 하중이 지속 증가하다가 최고값에 도달한 직후 파단이 발생하면서 응력이 급격히 감소하였다. 이를 진응력, 진변형률로 변환하면 Fig. 2와 같이 진변형률이 증가함에 따라 응력은 완만히 증가하다가 최고값에 도달한 뒤 다시 감소하여 파단이 발생한다.

각각의 시편에 대한 최대 진응력 및 이때의 진변형률, 파단 변형률을 각각 측정하여 비교하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Results of quasi-static compression tests

| Specimen | Maximum Stress (MPa) | Strain (ϵ of σ_{max}) | Faliure strain ($\epsilon_{Failure}$) |
|----------|----------------------|---|---|
| Type A | 1148±21 | 0.47±0.04 | 0.51±0.04 |
| Type B | 1172±8 | 0.51±0.00 | 0.61±0.02 |
| Type C | 1188±2 | 0.48±0.01 | 0.57±0.01 |
| Type D | 1142±23 | 0.34±0.01 | 0.38±0.01 |

2.3 압축 홉킨슨 봉 실험

(Compressive Split Hopkinson Bar test)

동적변형특성에 대한 미세조직의 영향을 분석하기 위하여 압축 홉킨슨 봉 실험을 실시하였다. 시편의 형상은 직경 5.0 mm, 높이 5.0 mm로서 길이 대 직경 비 (L/D)가 1인 원주형이다. 실험장치는 Fig. 3과 같고, 입력봉과 출력봉은 길이 1,500 mm, 직경 14.7 mm의 마레이징 강(VASCOMAX 350, HRC = 58)을 사용하였다.

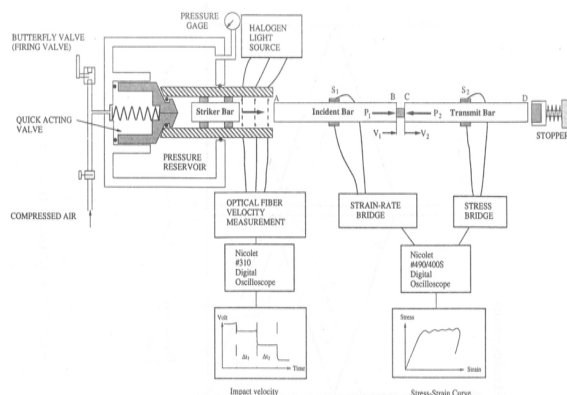


Fig. 3. Schematic diagram of the compressive hopkinson bar apparatus

시편의 변형률 속도는 입력봉에 충돌하는 충격봉의 속도를 변화시킴으로써 조절하였다. 입/출력봉에서의 탄성 변형량을 측정하기 위해 스트레인 게이지(모델명: Micro measurement EDDY-031CF-350)를 입력봉과 출력봉의 정 중앙에 각각 1쌍씩 180° 간격으로 부착하였다.

게이지 내의 미세한 저항 값의 변화는 Wheastone bridge회로에 의해 전압의 변화로 나타나며 디지털 오실로스코프(Nicolet 410, 10megasample/sec)로 측정하였다. 정확한 데이터의 확보를 위해 1개의 실험조건에 대해서 최소 3~5회 이상 동일조건하에서 실험을 수행하여 평균값을 취하였다.

각각의 미세조직 별 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 4와 같다. 모든 실험에서 유동응력은 변형률이 증가함에 따라 증가하다가 최고값에 도달한 후 다시 감소하였다. 준정적 압축실험에서 유동응력이 최고치를 나타

내는 이유는 주전단면 방향으로 결정립계에서 미세균열이 발생하기 때문으로, 이후 변형률이 계속 증가하면 이 균열들이 성장하고 인접한 균열들과 결합하여 최종적으로 시편이 파단된다. 한편 동적 압축실험에서 유동응력이 최고치에 도달한 후 급격히 감소하는 원인은 단열전단밴드(ASB) 형성에 의해 파단이 시작되기 때문으로 판단된다. 티타늄 합금은 높은 강도와 낮은 열전도도로 인해 단열전단밴드 형성이 가장 용이한 재료 중 하나이다^[12]. 따라서 유동응력이 최고값(σ_{Max})을 나타낼 때의 변형률(ϵ_0)은 미세균열이나 단열전단밴드와 같이 파단의 원인이 되는 불안정한 유동흐름이 발생하는 변형률로 볼 수 있는데, 각 미세조직 및 변형률 속도에 따라 변화하는 것으로 나타났다.

변형률 속도에 따른 유동응력의 변화는 Fig. 5와 같다. 변형률 속도가 2.7×10^3 /s에서 6×10^3 /s으로 증가함에 따라 유동응력은 선형관계로 증가하며, 이런 경향

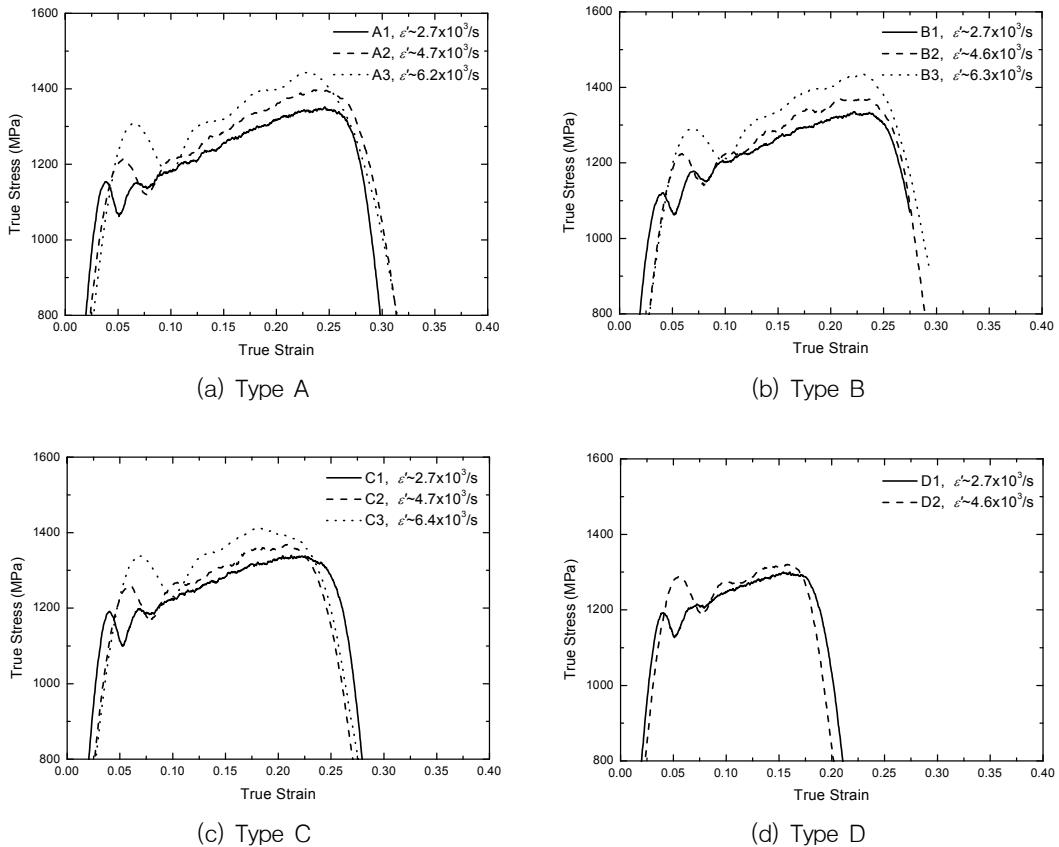


Fig. 4. Results of compressive Hopkinson bar test

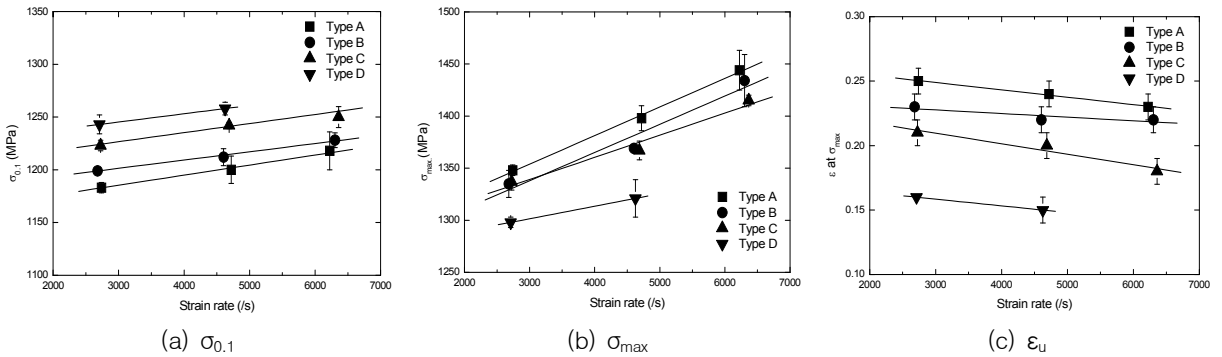


Fig. 5. Variation of flow stress at strain of 0.1($\sigma_{0.1}$), maximum flow stress(σ_{max}) and strain of maximum flow stress(ϵ_U)

은 모든 미세조직에서 동일하게 관찰되었다
 Ti-6Al-4V 합금의 동적 변형 실험을 통하여 획득된 결과를 이용하여 Johnson-Cook 구성방정식(Constitutive Equation)의 파라미터를 구하였다. Johnson-Cook 구성방정식은 변형률 속도, 가공경화, 열연화 영향 등을 모두 포함하고 있으며 여러 재료에 대해 다양한 연구가 진행되었다. 특히 고속 충돌 현상 규명에 가장 광범위하게 적용되고 있다. Johnson-Cook 구성방정식은 식 (1) 과 같다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

여기에서

- A = Static yield stress
- B = Hardening modulus
- n = Hardening exponent
- C = Strain rate coefficient
- m = Thermal softening exponent
- $\dot{\epsilon}$ = Strain rate
- ϵ_0 = Reference strain rate
- T_m = Melting temperature
- T_r = Room temperature

Fig. 4의 결과를 이용하여 각각의 미세조직 별 Johnson-Cook 구성방정식의 파라미터들을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Johnson-Cook parameter on each specimens

| Specimen | A (MPa) | B (MPa) | n | C |
|----------|---------|---------|--------|--------|
| Type A | 895.5 | 910.0 | 0.6955 | 0.0222 |
| Type B | 912.3 | 790.0 | 0.6385 | 0.0207 |
| Type C | 933.9 | 665.0 | 0.5364 | 0.0184 |
| Type D | 944.4 | 513.8 | 0.4023 | 0.0160 |

본 연구의 해석 범위는 티타늄 합금소재로 만든 비행체가 강체벽에 300 m/s 이하의 아음속으로 충돌하는 경우, 관통 및 파단이 발생하기 직전까지 비행체 선단에서의 동적 변형 형상을 모사하는 것으로 설정하였다. 따라서 재료의 파손을 일으키는 주원인으로 알려진 열연화 효과는 미미한 것으로 가정하여 본 연구에서는 제외하였다. 향후, 시편의 온도 변화가 가능한 흡진슨 봉 시험장치의 보강을 통해 얻어진 추가 실험 결과들을 분석함으로써 티타늄 소재의 파단 및 관통 현상을 더욱 정교하게 모사할 수 있는 연구가 추가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

2.4 고속충돌 실험(High velocity impact test)

각각의 미세조직을 갖는 Ti-6Al-4V 합금소재가 고속으로 다른 물체에 충돌하는 고속충돌조건에서 변형 및 파괴 거동이 동적 압축 실험결과와 어떠한 연관성을 갖는가를 파악하기 위해 고속충돌 실험을 수행하였다.

이를 위해 열처리된 소재로부터 직경 10 mm, 길이 50 mm의 원주형 비행체(Projectile)를 가공하였다. Fig. 6의 가스건(Gas gun)을 이용하여 비행체를 마레이징

표적(엔빌)에 150~300 m/s의 속도로 충돌시키는 실험을 반복 실시하였다. 실험결과 표적은 변형이 발생하지 않았으며, 비행체만이 변형되는 것으로 나타났다. 표적에 고속충돌 후 비행체를 회수하여 변형도 및 균열 발생, 파괴 여부를 조사하였고, 충돌에 의해 비행체가 변형된 경우 충돌속도를 증가시키며, 반복 실험을 수행하여, 파괴가 일어나기 시작하는 임계속도를 측정하였다.

비행체의 변형이 일어나는 최고 충돌속도에서의 비행체에 대하여 길이방향 및 반경방향의 변형량을 측정하였다. 고속충돌 실험 전/후의 비행체의 형상과 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 낮은 충돌 속도에서는 비행체 전면부에서만 소성변형이 발생하지만, 충돌 속도가 증가하면서 충돌방향과 약 45°로 전단파괴가 발생하였다. 파단과 변형간의 임계속도는 Fig. 8과 같이 미세조직에 따라 큰 차이를 보여, 등축정 조직(Type A)이 가장 높고 층상조직(Type D)이 가장 낮은 반면 두 혼합조직(Type B, C)은 거의 유사하였다.

한편 준정적 압축 변형 시에는 Fig. 2와 같이 혼합조직이 등축정 조직에 비해 높은 강도와 연성을 나타내지만, 고속충돌에서는 등축정 조직에 비해 낮은 충돌속도에서도 파단되었다. 등축정 조직이 혼합 조직이

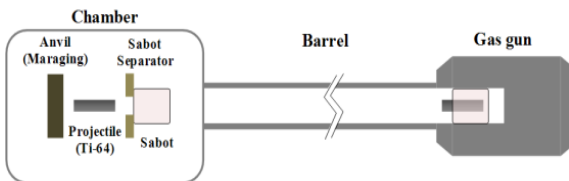


Fig. 6. High velocity impact test system



Fig. 7. Result of high velocity impact test

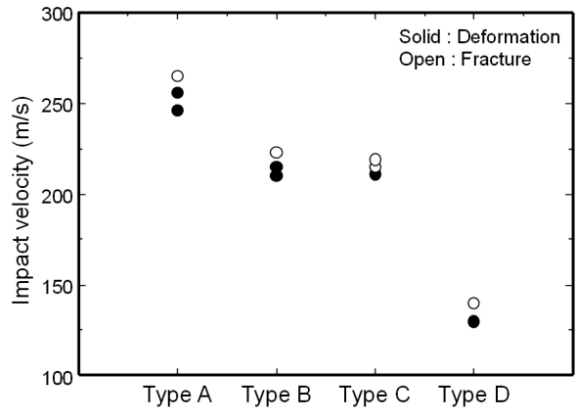


Fig. 8. Result of high velocity impact test

Table 5. Results of high velocity impact test

| Specimen | Impact velocity (m/s) | Final diameter (mm) | Final length (mm) |
|----------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Type A | 208 | 11.33 | 46.79 |
| | 246 | 11.93 | 45.71 |
| | 256 | 11.53 | 47.46 |
| | 265 | Fail | - |
| | 288 | Fail | - |
| Type B | 210 | 11.39 | 46.83 |
| | 215 | 11.50 | 46.65 |
| | 223 | Fail | - |
| | 237 | Fail | - |
| | 250 | Fail | - |
| Type C | 211 | 11.31 | 47.05 |
| | 215 | Fail | - |
| | 219 | Fail | - |
| | 238 | Fail | - |
| | 259 | Fail | - |
| Type D | 130 | 10.64 | 48.74 |
| | 148 | Fail | - |
| | 164 | Fail | - |
| | 180 | Fail | - |
| | 210 | Fail | - |

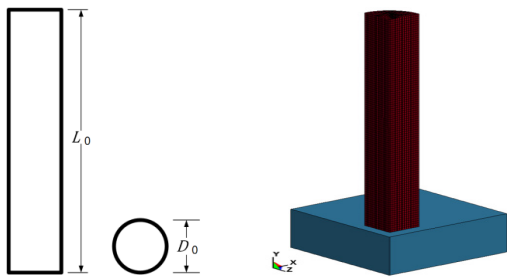
나 층상조직에 비해 가장 우수한 충돌 저항성을 나타내는 원인은 등축정 조직이 동적 변형조건에서 Fig. 5와 같이 초기 유동응력($\sigma_{0.1}$)이 가장 낮다고 할지라도, 불완전한 유동흐름이 발생하는 임계변형률(ϵ_c)이 가장 높고, 최고 유동응력(σ_{Max}) 또한 가장 높기 때문에 판단된다. Table 5는 각 시편의 충돌속도 변화에 따른 직경 및 길이변화 등 최종 변형결과를 나타낸 것이다.

3. 수치해석

수치해석을 수행하여 홉킨슨 봉 충격실험을 통해 결정한 Johnson-Cook 상수들의 타당성을 검증하였다. 해석은 고속충돌 현상을 적절히 모사하기 위하여 상용외연적(Explicit) 유한요소 코드인 LS-Dyna를 사용하였으며 해석모델은 고속충돌 실험을 모사하여 Ti-6Al-4V 합금으로 제작된 비행체를 모델링하고 비행속도를 변화시키며 강체에 충돌시켜 비행체의 최종 변형 형상을 구하였다.

3.1 해석 모델링

비행체의 형상과 유한요소모델은 Fig. 9와 같다. 고속충돌 실험을 모사하기 위하여 실험과 동일한 형상의 비행체를 모델링 하였으며 표적의 변형 발생이 없도록 표적은 강체(Rigid Body)로 설정하였다. 비행체의 초기지름(Initial Diameter, D_0)과 초기길이(Initial Length, L_0)는 각각 10 mm, 50 mm이다.



(a) Shape of projectile (b) Finite element model

Fig. 9. Shape of projectile and finite element model

3.2 해석조건

해석모델은 1/4모델링하여 대칭면에 대칭경계조건(Symmetric Boundary Condition)을 적용하였고, 강체의

자유도는 모두 구속하였다. 충돌속도는 비행체에 100 m/s에서부터 300 m/s까지 10 m/s간격으로 초기속도를 설정하여 해석을 수행하였다.

비행체의 구성방정식은 식 (1)에 보인 Johnson-Cook 방정식을 사용하였으며, 각각의 시편에 대한 상수들은 홉킨슨 봉 실험에서 구한 Table 4에 나타난 값들을 적용하였다^[16].

Johnson-Cook 모델은 식 (1)과 같이 정적 항복강도를 갖는 등방성 경화모델(Isotropic Hardening Model)의 한 형태이며 기본적으로 강소성(Rigid Plastic) 모델이다.

고속충돌해석에서 물체의 거동은 강체 회전이 존재하기 때문에 재료의 거동을 적절히 모사하기 위해서는 객관적 응력속도(Objective Stress Rate)와 변형률 속도(Strain Rate)를 이용한다. 본 연구에서는 식 (3)과 같은 Jaumann 응력속도를 이용하였다^[16].

$$\dot{\sigma} = L : D + \sigma W - W \sigma \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

여기에서

- $\dot{\sigma}$: 응력 속도(Stress Rate)
- L : 구성행렬(Constitutive Matrix)
- D_{ij} : 변형률 속도텐서(Strain rate Tensor)
- W_{ij} : 회전텐서(Spin Tensor)
- v_i : 속도벡터(Velocity Vector)

시간 증분(Time Increment)은 전체 요소들 중에서 식 (4)와 같이 가장 작은 시간 증분을 갖는 요소를 기본으로 정해지며 본 해석에서 사용된 솔리드요소의 임계(Critical) 시간증분은 식 (5)와 같다.

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \cdot \min(\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N) \quad (4)$$

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{\{ [Q + (Q^2 + c^2)^{1/2}] \}} \quad (5)$$

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}| & \text{for } \epsilon_{kk} < 0 \\ 0 & \text{for } \epsilon_{kk} \geq 0 \end{cases}$$

여기에서

- α : 확대계수(Scale Factor)
- N : 요소수(Number of Elements)
- C_1, C_2 : 체적 점성계수(Bulk Viscosity Coefficient)
- c : 음속(Sound Speed)
- L_e : 특성길이(Characteristic Length)
- ε_{kk} : 체적변형률 속도(Volumetric Strain Rate)

특성길이 L_e 는 요소의 체적(v_e)과 요소의 가장 큰 면의 면적(A_e)의 비(v_e/A_e)로 나타내며 음속은 Bulk Modulus가 일정하다는 가정 하에 다음과 같다.

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (6)$$

여기에서 E 는 Young 계수, ν 는 포와송의 비, ρ 는 밀도를 나타낸다.

해석에 사용된 요소는 단일 적분점을 갖는 8절점 솔리드 요소로서 요소 밀도에 대한 해석 결과의 유효성을 파악하기 위하여 비행체의 요소수를 변화해 가면서 최종 변형형상의 수렴성을 분석하였다. Fig. 10은 요소 밀도 변화에 대한 변형 형상비율을 보여준다. 대략 요소수가 2,500 개 이후로는 큰 변화를 보여주고 있지 않다. 그러나 본 연구에서는 충돌부위 뿐만 아니라 비행체 전체의 최종 변형형상을 자세히 분석하기 위하여 약 18,000 개 요소를 사용하였으며, 이때 비행체의 반경방향 요소의 평균 크기는 약 0.3 mm 정도이다.

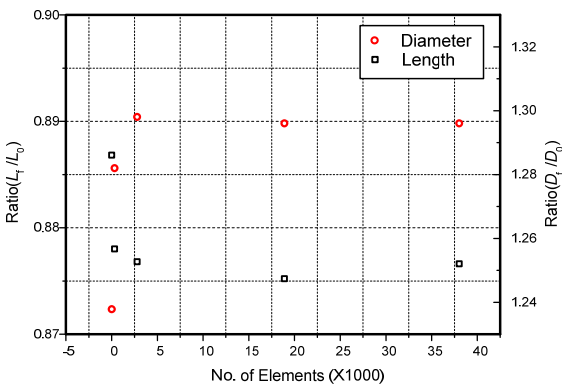


Fig 10. Changes in ratio of deformed shape for the different mesh densities

3.3 해석결과

미세조직이 다른 4가지 Type의 Ti-6Al-4V 합금으로 제작된 비행체를 모델링하고 속도를 변화시키며 강체에 충돌시켜 비행체의 변형형상을 분석하였다. Fig. 11은 수치해석 결과 중에서 비행체의 열처리 조건이 Type A이고, 충돌속도가 300 m/s 인 경우에 대한 에너지 이력(Energy History)을 나타내고 있다. 두 물체간의 접촉이 발생되기 전까지는 운동에너지(Kinetic Energy)의 변화가 없다가 접촉이 발생하는 순간부터 비행체의 속도가 감소하게 되어 운동에너지는 감소하게 된다. 한편 초기에는 변형이 발생되지 않아 내부에너지의 변화가 없고 비행체와 강체의 충돌이 일어나 변형이 시작됨에 따라 내부에너지(Internal Energy)가 증가하게 된다. 변형이 시작되는 시점부터 종료되는 시점까지 총 변형 발생 시간은 대략 0.034 msec로 나타나고 있으며 이후부터는 속도변화나 변형이 없기 때문에 운동에너지나 내부에너지의 변화는 없는 것으로 나타났다. 전체에너지(Total Energy)는 운동에너지와 내부에너지의 합으로 에너지 보존으로 인해 해석 전 과정 중에 일정하므로 해석이 물리적으로 타당함을 보여주고 있다.

Fig. 12는 비행체의 변형형상(Deformed Shape)과 유효소성변형률(Effective Plastic Strain)을 나타내고 있다. 초기 비행체와 강체의 접촉이 발생하면서 변형이 시작되어 서서히 증가하다가 0.037 msec에서 정지되고 그 이후에는 강체와 분리되는 과정을 보여준다.

Table 6, 7은 비행체의 속도변화에 따른 수치해석 결과이다. 속도가 증가할수록 직경은 증가하고, 길이는 감소하여 물리적으로 타당한 결과를 보여주고 있다.

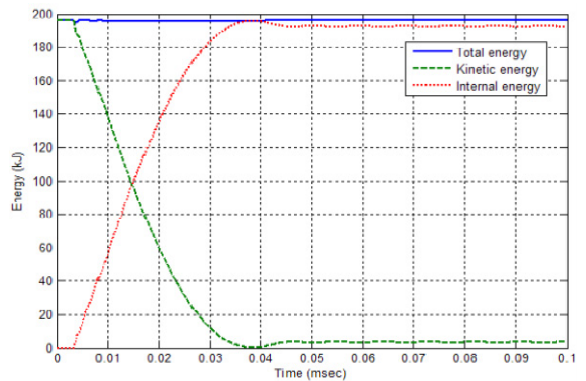


Fig. 11. Energy history in projectile (Type A, V = 300 m/s)

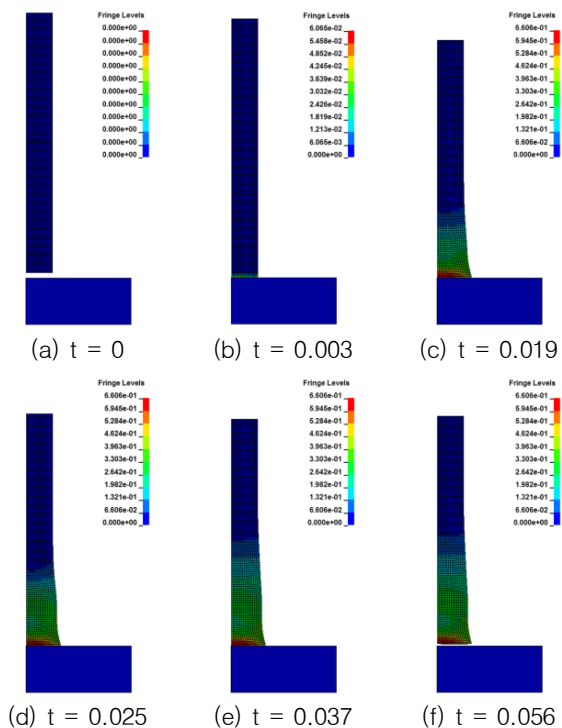


Fig. 12. Deformed shape of projectile in simulation (Unit : msec)

Table 6. Final deformed diameter of the projectile

| Impact velocity (m/s) | Final deformed diameter (mm) | | | |
|-----------------------|------------------------------|--------|--------|--------|
| | Type A | Type B | Type C | Type D |
| 100 | 10.42 | 10.42 | 10.40 | 10.40 |
| 150 | 10.94 | 10.96 | 10.96 | 11.00 |
| 200 | 11.54 | 11.58 | 11.62 | 11.74 |
| 250 | 12.22 | 12.30 | 12.40 | 12.62 |
| 300 | 12.98 | 13.12 | 13.28 | 13.62 |

Table 7. Final deformed length of the projectile

| Impact velocity (m/s) | Final deformed length (mm) | | | |
|-----------------------|----------------------------|--------|--------|--------|
| | Type A | Type B | Type C | Type D |
| 100 | 49.10 | 49.12 | 49.14 | 49.16 |
| 150 | 48.27 | 48.16 | 48.19 | 48.21 |
| 200 | 46.81 | 46.83 | 46.87 | 46.89 |
| 250 | 45.38 | 45.40 | 45.45 | 45.46 |
| 300 | 43.76 | 43.77 | 43.82 | 43.82 |

4. 고찰

각 시편 Type별 충돌속도에 대한 영향을 분석하기 위하여 Fig. 13과 같이 최종 변형 직경과 변형 길이를 구하고 실험 결과와 비교하였다. 여기에서 D_0 , L_0 는 초기 직경 및 길이를 나타내고 D_f , L_f 는 최종 변형된 직경과 길이를 나타낸다.

Fig. 14, 15는 충돌 속도에 따라서 시편의 변형 후 직경 및 길이를 변형 전 직경 및 길이로 나눈 D_f/D_0 , L_f/L_0 를 나타내었다.

D_f/D_0 는 150 m/s 이하의 낮은 충돌속도 범위에서는 모든 Type에서 유사하나, 충돌속도가 증가 할수록 변형량이 커지며, Type A의 변형량이 가장 작은 것으

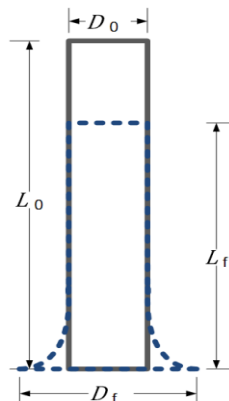


Fig. 13. Notation of initial shape and final deformed shape

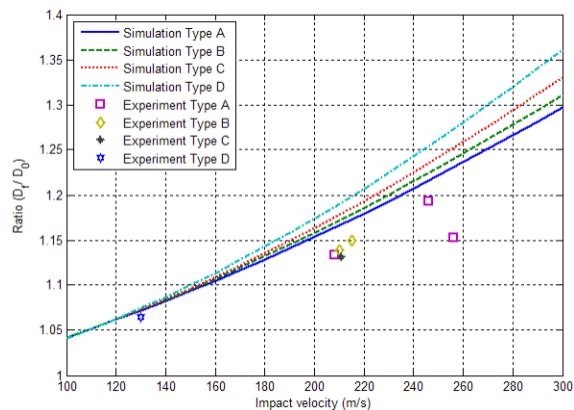


Fig. 14. Comparison on the ratio of deformed diameter between experiment and simulation

로 분석되었다. 한편 길이방향 변형량인 L_f/L_0 는 미세조직의 차이에도 불구하고 유사한 것으로 분석되었으며 이는 실험 결과와도 비교적 일치하는 경향을 보여주고 있다.

실험과 해석의 오차를 비교하기 위하여 실험과 동일한 충돌속도로 해석을 수행하여 각 시편 별 변형을 Table 8, 9에 나타내었다.

Table 8은 실험과 해석의 변형 후 시편직경을 비교한 것으로서 해석이 실험에 비해 다소 큰 결과를 보였으며, 평균 4.5 %의 오차율을 가지는 것으로 나타났다.

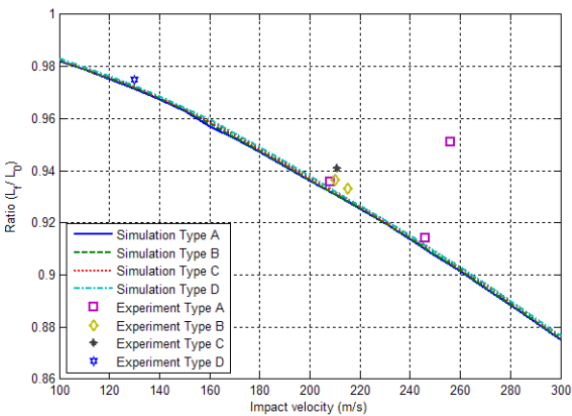


Fig. 15. Comparison on the ratio of deformed length between experiment and simulation

Table 8. Comparison on the deformed diameter between experiment and simulation

| Specimen | Impact velocity (m/s) | Deformed Diameter (mm) | | Differences (%) * |
|----------|-----------------------|------------------------|-------|-------------------|
| | | Exp. | Sim. | |
| Type A | 208 | 11.33 | 11.63 | +2.72 |
| | 246 | 11.93 | 12.16 | +1.92 |
| | 256 | 11.53 | 12.31 | +6.72 |
| Type B | 210 | 11.39 | 11.72 | +2.86 |
| Type C | 215 | 11.50 | 11.79 | +2.50 |
| Type D | 211 | 11.31 | 11.80 | +4.32 |
| | 130 | 10.64 | 10.75 | +0.98 |

$$* \text{Differences} = \left(\frac{\text{Deformed diameter of the specimen} \in \sim \text{ulation}}{\text{Deformed diameter of the specimen} \in \text{experiment}} - 1 \right) \times 100\%$$

Table 9는 실험과 해석의 변형 후 시편길이를 비교한 것으로서 직경의 경우와 다르게 해석이 실험에 비해 다소 작은 결과를 나타냈고, 평균 -1.5 %의 오차율을 가지는 것으로 나타났다.

Table 9. Comparison on the deformed length between experiment and simulation

| Specimen | Impact velocity (m/s) | Deformed Diameter (mm) | | Differences (%) * |
|----------|-----------------------|------------------------|-------|-------------------|
| | | Exp. | Sim. | |
| Type A | 208 | 46.79 | 46.59 | -0.42 |
| | 246 | 45.71 | 45.50 | -0.44 |
| | 256 | 47.46 | 45.19 | -4.72 |
| Type B | 210 | 46.83 | 46.55 | -0.59 |
| Type C | 215 | 46.65 | 46.41 | -0.49 |
| Type D | 211 | 47.05 | 46.56 | -1.03 |
| | 130 | 48.74 | 48.62 | -0.23 |

$$* \text{Differences} = \left(\frac{\text{Deformed length of the specimen} \in \sim \text{ulation}}{\text{Deformed length of the specimen} \in \text{experiment}} - 1 \right) \times 100\%$$

5. 결론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 정적/동적 변형 특성에 대한 연구를 수행하였다. 열처리를 통해 4가지 형태의 미세조직을 형성하고, 압축 실험을 통해 준정적 변형 특성에 대한 실험과 압축 흡킨슨 붕을 이용한 동적 변형 특성에 대한 실험을 수행하였다. 또한 고속충돌 실험을 수행하여 동적 변형 특성과 실제 고속충돌 조건에서 발생하는 변형 및 파괴 거동과의 연관성을 분석하였다. 이와 함께 압축 흡킨슨 붕 실험을 통해 얻어진 미세조직 특성에 따른 시편별 진응력-진변형률 선도를 이용하여 Johnson-Cook 구성 방정식의 상수를 결정하고 고속충돌 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 Johnson-Cook 방정식의 상수에 대한 타당성을 검증하였다.

정적 압축시험 결과, 혼합조직이 등축정조직에 비해 높은 유동응력과 과단변형률을 나타낸 반면, 변형률속도가 증가함에 따라 미세조직별로 유동응력과 과단 변형률의 변화 양상이 달라지며 동적물성은 등축정 조

직이 혼합조직에 비해 우수한 것으로 나타났다.

또한 압축 흡킨슨 붕 실험 결과를 이용하여 구해진 Johnson-Cook 구성방정식 상수를 고속충돌 실험 결과와 수치해석의 비교를 통해 검증한 결과 해석과 실험 결과는 평균 오차율 $Error_{avg}$ 이 $-1.5 \sim +4.7 \%$ 로서, 결정된 구성방정식의 상수는 고속충돌 거동을 비교적 정확하게 묘사하였다.

후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

- [1] M. G. H. Wells and B. Roopchand, "Non-aerospace Applications of Titanium(eds F. H. Fros, P. G. Allen, M. Ninomi)," TMS, Pennsylvania, pp. 289-296, 1998.
- [2] J. S. Montgomery and M. G. H. Wells, "Titanium Armor Application in Combat Vehicles," JOM, 53(4), pp. 29-32, 2001.
- [3] Jane's Naval Weapon Systems, Jane's Information Group, May, 2004.
- [4] P. S. Follansbee, G. T. Gray, "An Analysis of the Low Temperature, Low- and High- Strain Rate Deformation of Ti-6Al-4V," Metallurgical Transactions, Vol. 20A, pp. 863-874, 1989.
- [5] W. S. Lee, C-F. Lin, "Plastic Deformation and Fracture Behavior Ti-6Al-4V Alloy Loaded with High Strain Rate under Various Temperatures," Mat. Sci. Engng. A, Vol. 241, pp. 48-59, 1988.
- [6] D. R. Lesuer, "Experimental Investigations of Material Model for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum," PB2001-101864, Lawrence Livermore National Laboratory, 2000.
- [7] S. Nemat-Nasser, W. G. Guo, F. F. Nesterenko, S. S. Indrakanti, Y. B. Gu, "Dynamic Response of Conventional and Hot Isostatically Pressed Ti-6Al-4V Alloys: Eperiments and Modelling," Mech. Mat., Vol. 33, pp. 425-439, 2001.
- [8] S. P. Timothy, I. M. Hutchings, "The Structure of Adiabatic Shear Bands in a Titanium Alloy," Acta Metal., Vol. 33, No. 4, pp. 667-676, 1985.
- [9] S. C. Liao, J. Duffy, "Adiabatic Shear Bands in a Ti-6Al-4V Titanium Alloy," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 46, No. 11, pp. 2201-2231, 1998.
- [10] Y. Me-Bar, D. Shechtman, "On the Adiabatic Shear of Ti-6Al-4V Ballistic Targets," Mat. Sci. Engng., 58, pp. 181-188, 1983.
- [11] Y. Me-Bar, Z. Rosenverg, "On The Correlation between The Ballistic Behavior and Dynamic Properties of Titanium-Alloy Plates," Int. J. Impact Engng., Vol. 19, No. 4, pp. 311-318, 1997.
- [12] M. S. Bukins, W. W. Love, J. R. Wood, "Effect of Annealing Temperature on the Ballistic Limit Velocity of Ti-6Al-4V ELI," ARN-MR-359, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1997.
- [13] M. S. Bukins, J. S. Hansen, J. I. Paige, P. C. Turner, "The Effect of Thermo-mechanical Processing on the Ballistic Limit Velocity of Extra Low Interstitial Titanium Alloy Ti-6Al-4V," ARN-MR-486, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 2000.
- [14] D. G. Lee, S. H. Kim, S. Lee, C. S. Lee, "Effects of Microstructural Morphology on Quasi-Static and Dynamic Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy," Metal. Mat. Trans. A, Vol. 32A, pp. 315-324, 2001.
- [15] D. G. Lee, S. Lee, C. S. Lee, "Quasi-static and Dynamic Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Containing Fine α_2 -Ti3Al Precipitates," Mat. Sci. Engng. A, Vol. 366, pp. 25-37, 2004.
- [16] Livemore Software Technology Corp. LS-Dyna Keywords.