

알루미늄 압출재의 압괴 및 굽힘붕괴 특성규명을 위한 시험 및 해석

Test and Analysis for Axial and Bending Collapse Characteristics Evaluation of Aluminum Extruded Beams

김범진¹, 허승진², 구정서³, 송달호⁴

Bum-Jin Kim, Seung-Jin Heo, Jeong-Seo Koo, Dal-Ho Song

Keywords : Half Wave Length(반파장 길이), Fracture(파단), Mean Crush Load(평균 붕괴 하중), Damage Function(파단 함수), Collapse Mode(좌굴모우드)

Abstract

Recently, many engineers actively participate in research and development w.r.t the weight reduction and the safety increase of vehicle body structure to meet the requirement of fuel economy and regulations. However, vehicle design concept related with weight reduction and safety increase is reduced to the design conflict problem. In the paper, the axial and bending collapse test of aluminum extruded beams are performed and the collapse characteristics are investigated. The analysis method to verify the fracture characteristics of aluminum extruded beam is presented and discussed.

1. 서론

오늘날 자동차 관련 업계의 핵심 기술개발은 사회적 측면에서 새로운 해결 과제로 부각되고 있는 환경보호를 위한 차량 기술개발과 차량의 고안전도(safety) 향상 기술로 집약될 수 있다. 그러나, 이러한 저공해(low emission) 및 고연비(fuel economy)성능과 고안전도(high safety) 성능의 두 가지 차량 설계 목표는 궁극적으로 상반되는 설계 개념을 요구하게 된다. 그러므로 차체 설계 적인 측면에서 위의 두 가지 설계 목표를 동시에 만족시키기 위해서는 차체 경량화 설계 기술과 안전도 및 구조 강도 설계 기술의 동시적인 연구 개발이 요구되고 있다.

이와 관련하여 본 논문에서는 자동차 및 철도 차량의 차체 제작 시, 고 강성, 고 강도 및 경량 재질로 각광 받고 있는 알루미늄 압출재를 연구 대상으로 하여 차체 안전도 설계 시, 중요시되는 압괴 및 굽힘붕괴 특성을 시험적으로 규명한다. 이를 바탕으로 하여 알루미늄 압출재의 대변형 시, 문제가 되는 알루미늄의 파단 특성을 고려하기 위한 해석 기법에 대하여 아울러 연구하고자 한다.

2. 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 연구

2.1 알루미늄 압출재의 준정적 붕괴 시험

알루미늄 압출재의 붕괴 특성을 시험적으로 규명하기 위하여 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험

¹ 정회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원



² 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

³ 정회원, 한국기계연구원 신교통기술연구부

⁴ 정회원, 한국기계연구원 신교통기술연구부

(quasi-static crush test) 및 준정적 굽힘 붕괴 시험 (quasi-static bending collapse test)을 수행하였다. 붕괴 특성 연구 대상으로 압괴 및 굽힘 붕괴 시험에 적용된 시편은 여러 가지 단면 형상을 갖는 정규 사각 단면 압출재와 실제 철도 차량의 언더프레임(under frame)에 적용되는 비정규 삼각 단면 형상을 갖는 압출재로 설정하였다. 시편 재질 특성 및 단면 형상은 Table 1에 요약 정리하였다.

Table 1 Material properties of aluminum

Material	Al6005	Al6061-T6
Cross Section Shape		
Young's Modulus [GPa]	71.7	70.5
Density [kg/m ³]	2850	2700
Yield Stress [MPa]	215	275
Tensile Stress [MPa]	260	328
Poisson's Ratio	0.33	0.33

2.1.1 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험

알루미늄 압출재의 붕괴 특성을 고찰하기 위하여 우선적으로 알루미늄 압출재의 축방향 압괴 시험을 수행하였다. 2.1절에서 언급했던 여러 가지 사각 단면 형상 및 두께를 갖는 알루미늄 압출재에 대한 압괴 시험 결과를 압괴 모드 별로 정리해보면 Fig. 1과 같다. 알루미늄 압출재의 축방향 압축 붕괴 특성을 규명해보면 Fig. 1(a)와 같이 규칙적인 접힘이 계속해서 일어나는 접힘좌굴모우드(folding collapse mode, Type I), Fig. 1(b)와 같이 접힘과 균열이 동시에 발생하는 혼합좌굴모우드(folding and fracture mixed collapse mode, Type II), 그리고 Fig. 1(c)와 같이 접힘 없이 균열만 진전되는 균열좌굴모우드(fracture collapse mode, Type III)로 분류된다[1].

Fig. 2에서는 철도 차량에 적용되며 비정규 단면을 갖는 삼각 단면 알루미늄 압출재의 압괴 시험에 따른 축방향 붕괴 모우드를 보여주고 있다. 변형 길이 40mm와 150mm에서 접힘이 일어나고 있음을 확인할 수 있으며 동시에 모서리 부위에서 균열과 파단이 발생하여 Fig. 1에서의 전형적인 Type II의 혼합좌굴 모우드를 나타내고 있음을 알 수 있다.

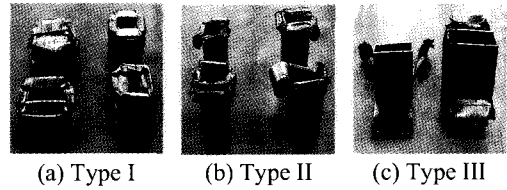


Fig. 1 Typical collapse modes of aluminum extruded beams with rectangular cross section

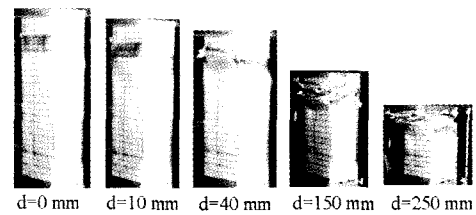


Fig. 2 Typical collapse modes of aluminum extruded beams with 3 triangular cross sections

2.1.2 알루미늄 압출재의 반파장 길이에 따른 압괴 모우드 분류

알루미늄 압출재의 압괴 모우드에 대한 설계 가이드라인을 좀더 체계적으로 설정하기 위하여 알루미늄 압출재의 반파장 길이에 따른 압괴 모우드 형태를 분석해 보았다. Wierzbicki[2]에 의해 정리된 반파장 길이에 대한 이론식은 식(1)과 같으며 계산된 반파장 길이와 압괴 시험에 따른 압괴 모우드 분류표를 Table 2에 제시하였다[3].

$$\lambda = 1.966 \sqrt[3]{\left(\frac{a+b}{2}\right)^2 t} \tag{1}$$

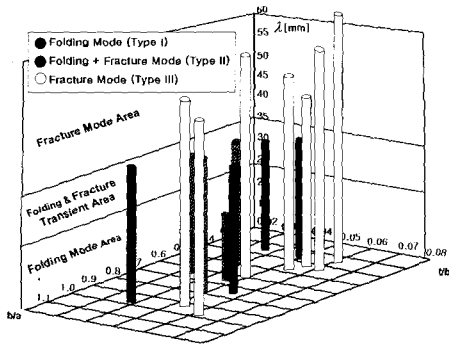
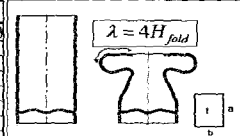
Fig. 3에서는 알루미늄 압출재의 형상비 및 후폭비 그리고 반파장 길이와의 관계를 3차원 그래프로 나타내었다. Fig. 3에서 볼 때, 반파장 길이가 25mm ~ 35mm일 때, 접힘과 균열이 동시에 발생하는 전이 영역임을 알 수 있다. 또한, 알루미늄 압출재의 모서리 부위에 라운딩 처리를 하였을 경우엔 반파장 길이가 라운딩 처리를 하지 않았을 경우의 반파장 길이와 비교하여 최대 50% 이상 줄어들어 접힘좌굴모우드인 Type I 쪽으로 접근하는 것을 수치적으로 확인하였다. Fig. 4에서는 Type II, Type III의 압괴모우드를 나타내었던 대표적인 압출재들이 라운딩 처리에 의하여 접힘좌굴모우드인 Type I으로 접근하는 효과

를 변형 모드 결과로 제시하였다. 결과적으로 알루미늄 압출재의 반파장 길이에 의한 압괴 모우드를 분류할 수 있는 가능성이 제기되었으며 라운딩 처리에 의하여 알루미늄 압출재의 반파장 길이 감소 효과가 시험적으로 확인되었다. 따라서, 상기의 결과들은 알루미늄 압출 부재를 이용한 차체의 충격에너지 흡수 부재 설계 시, 유용한 설계 가이드 라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

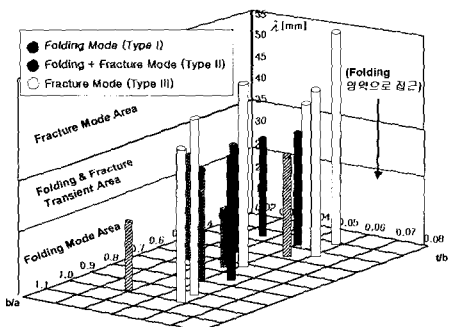
Table 2 The classification of collapse modes w.r.t half wave length

Folding Mode (Type I)			Folding & Fracture Mode (Type II)		
b × h × t	t/b	4Hfold (mm)	b × h × t	t/b	4Hfold (mm)
30×20×1.0	0.05	16.8	45×35×2.0	0.057	28.98
40×50×2.0	0.05	31.34	50×50×2	0.04	33.62
70×45×1.5	0.033	33.52	80×30×1.1	0.037	29.36
80×40×1.5	0.0375	34.5	80×30×1.5	0.05	32.54

Fracture Mode (Type III)		
b × h × t	t/b	4Hfold (mm)
50×50×3.0	0.06	38.48
56×53×3.0	0.057	40.76
100×40×2.2	0.055	43.44
120×50×3.0	0.06	54.8
105×64×3.0	0.047	54.6
150×50×3.0	0.06	61.08
100×45×2.5	0.056	46.4



(a) Without rounding treatment



(b) With rounding treatment

Fig. 3 Effect of rounding treatment on the collapse mode changes of aluminum extruded beams

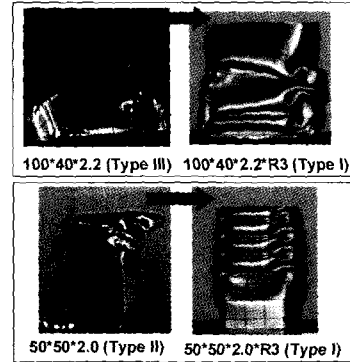


Fig. 4 Typical deformed shapes of aluminum extruded beams w.r.t rounding treatment effect

2.1.3 알루미늄 압출재의 준정적 굽힘 붕괴 시험

알루미늄 압출재의 굽힘 붕괴 특성을 시험적으로 확인하기 위하여 Table 2의 일부 사각 단면 알루미늄 압출재와 철도 차량용 알루미늄 압출재 시편을 준비하여 Fig. 5와 같이 삼점 굽힘 붕괴(3 point bending collapse)용 지그에 설치하고 굽힘 붕괴 시험을 수행하였다.

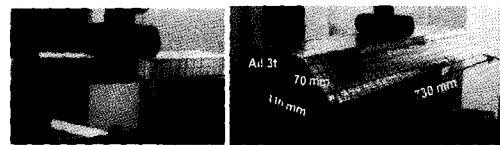


Fig. 5 Testing stand for quasi-static 3 point bending collapse

Fig. 6과 Fig. 7에는 위에서 제시한 알루미늄 압출재들의 굽힘 붕괴 시험 후, 변형 양상을 나타내었다. Fig. 6에서는 굽힘 붕괴 시, 압출재 중앙의 양쪽 모서리 부위에 한 개의 접힘이 발생하면서 파단(fracture)이 발생하는 대표적인 파단 붕괴 모우드를 보여주고 있다. Fig. 7에서는 접힘 부위에서 굽힘 붕괴 종료시까지 파단이 발생하지 않는 굽힘 붕괴 모우드를 나타내고 있다. Fig. 7에서 보인 압출 부재의 경우에는 모서리 부위에 라운딩 처리를 함으로써 압괴 시험의 경우와 마찬가지로 접힘 부위에서 거의 파단이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 라운딩 처리에 의해 모서리 부위에 집중되는 응력을 상당히 분산시키는 효과로 볼 수 있다. 다양한 크기의 알루미늄 압출재에 대한 굽힘 붕괴 시험 결과를 중

합적으로 검토하여 볼 때, 굽힘 붕괴시의 알루미늄 압출재의 파단 특성은 압괴 시험의 경우와는 다르게 단면 형상비 및 후폭비와의 연관성이 작게 나타났다[4].

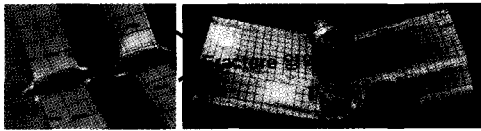


Fig. 6 Bending collapse modes with fracture



Fig. 7 Bending collapse modes without fracture

3. 알루미늄 압출재의 파단 특성을 고려한 해석 기법 연구

3.1 파단 함수를 적용한 해석 기법 연구

알루미늄 압출재의 준정적 압괴 및 굽힘 붕괴 시험에 대한 적절한 해석 기법을 연구하기 위하여 알루미늄 재질의 파단(fracture) 특성을 고려한 파단 함수(damage function) 곡선 응용 해석을 수행하였다. FE-Model의 해석은 Explicit Dynamic Code인 PAM-CRASH를 사용하여 준정적 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 파단 함수 곡선 및 실제 재료의 특성 시험을 통하여 얻어진 재료 특성 곡선을 Fig. 8에 제시하였다.

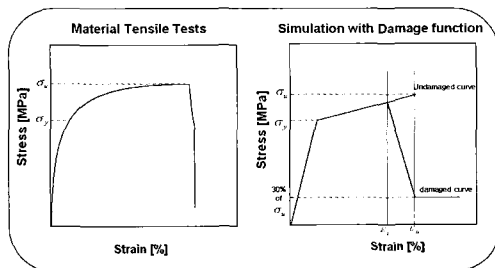


Fig. 8 Material characteristic curves

3.2 알루미늄 압출재의 준정적 붕괴 해석

3.2.1 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 해석

Fig. 8에서 정의한 파단 함수를 적용하여 준정적 압괴 해석을 수행한 후, 2절에서의 압괴 시험 결과와 비교하였다. Fig. 9는 철도 차량용 알루미늄 압출재의 압괴 변형 양상에 대하여 시험과 해석 결과를 비교한 것이다. 또한, Fig. 10에서는 철도차량용 알루미늄 압출재에 대한 시험 및 해석 결과를 평균 붕괴 하중(mean crush load)의 크기로 나타내어 비교하였다. 파손 함수를 적용한 해석 결과, 평균 붕괴 하중이 시험 결과에 거의 유사하게 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 2.1.1절에서 정의한 세 가지 압괴 모우드를 나타내는 일부 압출재에 대하여 시험 및 해석 결과를 평균 붕괴 하중의 크기로 나타내어 비교한 것이다. 해석 시, 파단 함수를 적용함으로써 써 보다 실제에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

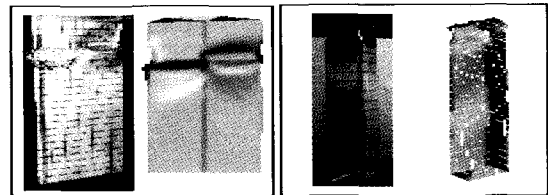


Fig. 9 Typical deformed shapes of aluminum extruded beams between test and simulation

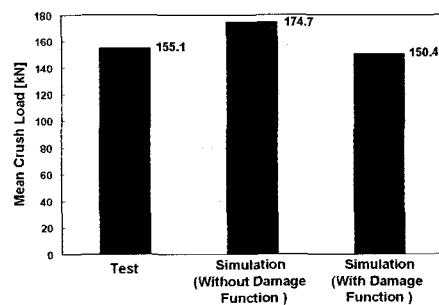


Fig. 10 Comparison of mean crush load between test and simulation (aluminum extruded beams for railway vehicle structure components)

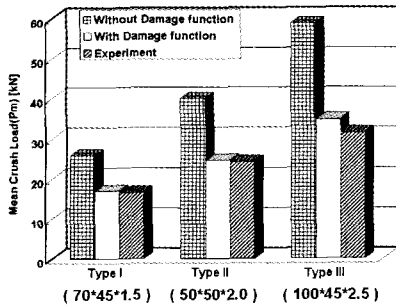


Fig. 11 Comparison of mean crush load between test and simulation w.r.t 3 types of collapse modes (aluminum space frame vehicle body components)

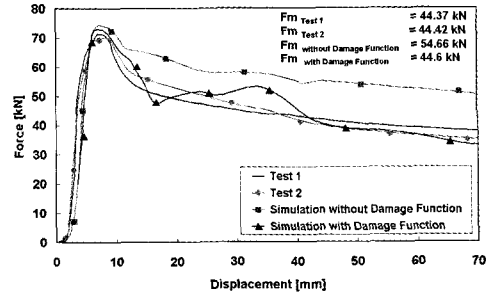


Fig. 13 Comparison of bending collapse test results with simulation (railway vehicle structure components)

3.2.2 알루미늄 압출재의 준정적 굽힘 붕괴 해석

Fig. 8에서 정의한 파단 함수를 적용하여 준정적 굽힘 붕괴 해석을 수행 한 후, 2절에서의 굽힘 붕괴 시험 결과와 비교하였다. Fig. 12에서 철도 차량용 알루미늄 압출재의 굽힘 붕괴 시험 및 해석 결과를 변형 양상으로 나타내어 비교하였다. 해석 모델의 경우는 실제 시험의 알루미늄 파단 특성을 변형을 분포도로 유사하게 나타내고 있다. Fig. 13에서는 굽힘 붕괴 시험 및 해석 결과를 힘-변위 선도로 나타내었으며 파단 함수를 적용함으로써 보다 실제에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 마찬가지로 100×40×2.2의 사각 단면 형상을 갖는 알루미늄 압출재에 대한 굽힘 붕괴 시험 및 해석 결과를 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었으며 파단 함수 적용 해석의 타당성을 확인하였다.

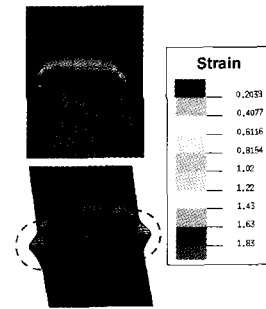


Fig. 14 Comparison of deformed shapes of aluminum extruded beams for aluminum space frame vehicle body component

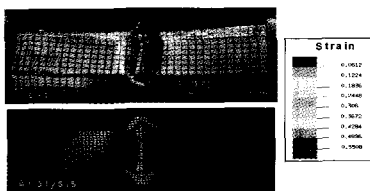


Fig. 12 Comparison of deformed shapes of aluminum extruded beams for railway vehicle structure components

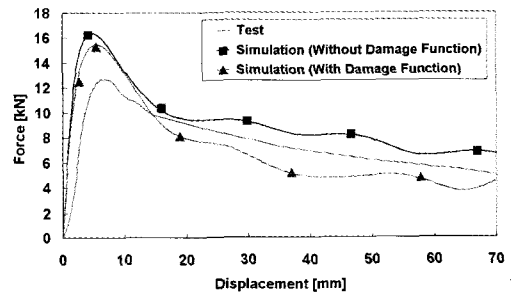


Fig. 15 Comparison of bending collapse test results with simulation (aluminum space frame vehicle body component)

4. 결론

본 논문에서는 알루미늄 압출재의 붕괴 특성을 시험적으로 규명하기 위하여 압괴 및 굽힘 붕괴 시험을 수행하였으며 압출재의 대변형 시, 문제가 되는 알루미늄의 파단 특성과 반과장 길이에 대한 상관 관계를 고찰해 보았다. 또한, 알루미늄 압출재의 파단 특성을 고려한 해석 기법 연구를 수행하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 알루미늄 압출재의 압괴 시, 파단 특성 및 접합 현상을 고려하여 세 가지 압괴 모우드를 제시하였다.
- 알루미늄 압출재의 압괴 시, 압괴 모우드를 후폭비, 형상비 및 반과장 길이의 상관 관계 차트로 나타내었으며 이는 알루미늄 압출재를 이용한 충격에너지 흡수 부재 설계 시, 유용한 설계 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.
- 알루미늄 압출재의 굽힘 붕괴 시, 파단 특성과 단면형상비 및 후폭비와의 관련성은 압괴의 경우와는 달리 크게 나타나지 않았다.
- 알루미늄 압출재의 모서리에 라운딩 처리 시, 압괴 및 굽힘 붕괴 조건에서 균열 및 파단 현상을 상당히 방지 할 수 있으므로 고안전도 알루미늄 차체 설계 시, 압출재의 모서리에 대한 라운딩 처리는 절대적으로 필요한 설계 조건이라 할 수 있겠다.
- 알루미늄 압출재의 최대 소성 변형도 한계치가 반영된 재질특성이 고려될 때 알루미늄 압출재의 파단 특성이 효과적으로 시뮬레이션 될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) 윤병동, "알루미늄 압출 부재의 압괴 특성 및 대변형 해석에 관한 연구", 국민대학교 대학원, 석사학위논문, 2000
- 2) T. Wierzbicki, W. Abramowicz : "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, No. 4, 1983
- 3) Willem Witteman: "Improved Vehicle crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situation", Geboren te Geldrop, 1999
- 4) Maurice L. Sharp : "Behavior and Design of Aluminum Structure", McGraw-HILL Inc., 1992