한국정밀공학회지 제17권 제3호 (2000년 3월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 3, March 2000.

모자형 단면 점용접부재의 축방향 압궤특성에 관한 연구(I)

차천석*, 김정호**, 양인영***

A Study on the Collapse Characteristics of Hat-Shaped Members with Spot Welding under Axial Compression(I)

Cheon Seok Cha*, Jeong Ho Kim**, In Young Yang***

ABSTRACT

The spot-welded automotive side member which has a hat-shaped section and a double hat shaped section has been tested on the axial static(10mm/min) and quasi-static(500mm/min) compressing load. The collapse characteristics of automotive sections have been reivewed on shift in shape and in width of the spot-welding on the flange. On the basis of the results of tests and reviews, the optimum energy absorption capacity of the structure has been studied.

Key Words : Automotive side member(차체사이드부재), Hat-shaped(단일모자형), Double hat-shaped(이중모자형), Spot welding(점용접), Collapse characteristics(압궤특성), Energy absorption capacity(에너지흡수성능)

1. 서론

자동차의 충돌에 의한 교통사고는 경사방향을 포함한 정면충돌의 경우가 70%정도로 측면이나 후면으로부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제의 하나로 되고 있다.[1~5]

차체 앞부분은 엔진이나 현가장치 등을 지지하고 여러 보조기기류를 격납하는 역할도 하지만 전면 충돌시 에너지를 흡수할 수 있는 구조로 되어야 한다. 많은 차량에서는 차체 앞부분의 내판을 모자형 단면의 강도부재로 제작하여 충돌시에 구조부재가 소성변형하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계하고 있다.

특히, 차량의 초기설계단계에서 차량전체의 전면충돌성능을 예측하기전에 사이드부재와 같이 충돌시 에너지 흡수량이 크고, 간단한 구조부재에 대해서 소성변형에 의한 압궤거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.[6~8] 그러나, 구조부재의 압궤현상은 충격하중에서는 기하학적 변형이 크고, 소성변형을 포함하는 비선형 거동을 하기 때문에 이론적으로 해석하는 것은 대단히 어렵다.

지금까지의 연구는 주로 정적압축하중을 받는

* 조선대학교 대학원 기계설계공학과
** 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터
*** 조선대학교 기계공학부

균일단면부재의 실험적 고찰에 대한 연구결과들로, 대부분 평균압궤응력을 이론적으로 해석함으로써 에너지 흡수능력을 명확히 하고자 하였다.[9~14] 그러나, 압궤가 진행되는 과정중에 하중-변형관계나, 실제 차체구조부재인 점용접부재에 대하여 용접간격과 형상의 변화를 고려한 구조부재의 최적조건을 구하기 위한 연구결과는 찾아보기 어렵다.

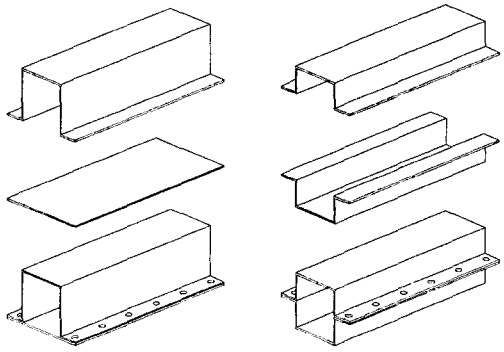
본 연구에서는 먼저 점용접된 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재의 정적압궤하중과 준정적압궤하중하에서 두께 및 형상의 변화와 프랜지 용접간격의 변화에 따른 압궤특성을 고찰하여, 최적의 에너지 흡수성능을 갖는 구조부재에 대하여 검토하고자 한다. 또한, 충격압궤실험에 의한 압궤특성을 해석하고, 준정적 및 충격압궤 시뮬레이션을 행하여 구조부재의 최적조건을 효과적으로 구하기 위한 해석방법을 개발할 예정이다.

2. 시험편

차체 구조부재로 널리 쓰이고 있는 SCP1 냉간압연강판을 사용하여 Fig. 1에서 나타낸 바와같이 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재를 점용접하여 제작하였다. 점용접은 220V, 85A의 전류에서 통전시간 1.5sec로 모든 시험편에 동일하게 유지하였다.

단일모자형 단면부재 및 이중모자형 단면부재의 두께 0.8mm, 1.0mm, 가로× 세로 30× 30mm, 33 × 27mm, 36× 24mm, 프랜지폭 12mm, 점용접 간격은 이론적 접힘길이[10]가 약 22mm인 것을 감안하여 이론적인 접힘길이보다 간격이 짧은 18.3mm와 이론적인 접힘길이보다 긴 27.5mm로 하였으며, 시험편의 끝부분은 점용접이 가능하지 않기 때문에 시험편의 점용접은 시험편의 끝부분으로부터 5mm떨어진 위치에서 시작하였고, 점용접타점이 상하대칭이 되도록 하였다. 또한, 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험시 압궤가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였다.

Table 1에는 KS B 0802(금속재료인장시험)에 의하여 실험한 시험편의 기계적성질을 나타냈으며, Table 2는 시험편의 기호에 관해서 나타냈다.



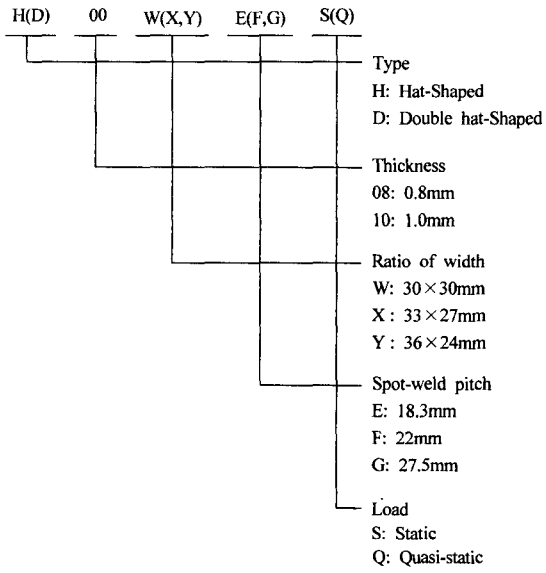
(a) Hat-shaped member (b) Double hat-shaped member

Fig. 1 Configuration of the specimens

Table 1 Material constants of specimens

Specimen Thickness [mm]	Yield Strength [Kgf/mm^2]	Tensile Strength [Kgf/mm^2]	Elongation [%]
1.0	17.0	30.2	48.6
0.8	15.3	30.2	49.0

Table 2 Definition of the specimens



3. 실험장치 및 방법

실험은 UTM을 사용하여 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재에 대하여, 형상의 변화와 프랜지 용접간격을 변화시켜 정적(10mm/min) 및 준정적(500mm/min) 축방향 압궤실험을 행하였다. 실험시 여러번의 예비실험을 실시하여 실험결과 재현성이 좋도록 하였으며, 실험결과에 단부효과(end effects)가 나타나지 않고 순차적인 압궤가 주기적으로 발생하도록 길이 120mm인 시험편의 변형량이 70mm가 되도록 압궤시켰다.

시험편 압궤속도 10mm/min에서의 데이터 획득은 5Pts./sec, 500mm/min에서는 99Pts./sce로 하여 압궤속도 10mm/min에서의 데이터 개수는 약 2,000개이며, 500mm/min에서는 약 790개를 얻을 수 있도록 하였다.

시험편에 흡수된 에너지량의 계산은 Fig. 2와 같은 압궤실험에서 얻은 하중-변위선도의 면적이 시험편에 흡수되는 에너지이므로, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가 하였다.

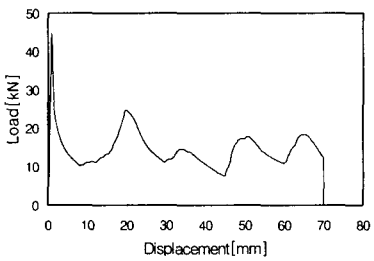


Fig. 2 Relationship between load and displacement, H10WFS

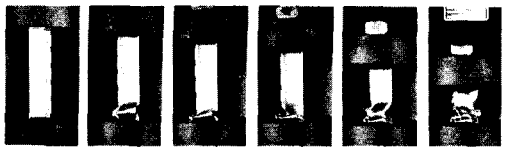
$$E_a = \int_{\ell_0}^{\ell} P \, d\ell \qquad (1)$$

여기서, E_a는 박육부재에 흡수된 에너지이며, P는 압궤하중을 나타낸다. 그리고, Fig. 2는 본 연구에 사용한 시험편의 가로× 세로 30× 30mm, 두께 1.0mm, 점용접간격 22mm인 단일모자형 단면부재의 시험편에 대한 정적압궤(10mm/min) 실험결과 얻어진 하중-변위선도이다.

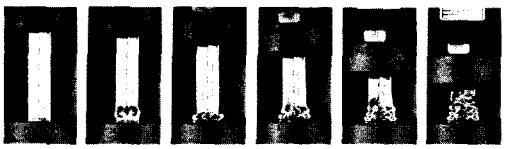
(a) Hat-shaped members

(b) Double hat-shaped members

Photo. 1 Shape of specimen



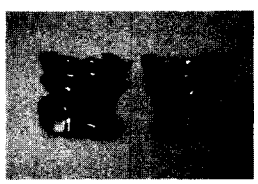
(a) Hat-shaped member, H10WFQ



(b) Double hat-shaped member, D10WFQ

Photo. 2 Collapsed process of specimen

(a) Hat-shaped member, H10WFQ



(b) Double hat-shaped member, D10WFQ

Photo. 3 Area of collapsed specimen

Photo. 1에 좌측에서부터 차례로 30× 30mm, 33 × 27mm, 36× 24mm, 두께가 1.0mm, 점용접 간격이 22mm인 단일모자형 단면부재(Photo. 1(a))와 이중모자형 단면부재(Photo. 1(b))의 압궤후의 형상을 나타냈으며, Photo. 2는 단일모자형 단면부재(Photo. 2(a))와 이중모자형 단면부재(Photo. 2(b))의 압궤과정을 나타냈다. 그리고 Photo. 3은 압궤된 시험편을 절단하여 나타냈다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 단일모자형 단면부재의 압궤특성

실험결과를 흡수에너지 E, 최대압궤하중 $F_{max.}$, 평균압궤하중 F_{mean}에 대하여 정리하였다. 흡수에너지는 하중-변위선도를 적분하여 구하고, 그 값을 압궤길이 70mm로 나눔으로서 평균압궤하중을 구했다.

상자형 단면부재가 완전한 폐단면을 가진것에 반해서, 모자형 단면부재는 ㄷ자 단면부재와 평판이 조합되어져 점용접 타점에서는 폐단면이고 그 외에서는 폐단면에 가까운 단면형상을 가진 이유로 변형모드는 상자형 단면부재와는 다른 형태를 보인다.

상자형 단면부재의 변형모드는 중심축에 대해서 대칭인 아코디언상 모드를 나타내지만, Photo. 3(a)에서 보듯이 단일모자형 단면부재의 변형모드는 프랜지에 있어서 단면이 불연속하게 되어있어 프랜지는 부재 외측방향으로 접혀서 굽혀지고, 평판과 서로 마주보는 ㄷ자 단면부재의 벽면이 부재 외측방향으로 변형될 때 평판은 부재 내측방향으로 변형하는 평형모드가 나타난다. 또한, 단일모자형 단면부재에서는 일반적으로 ㄷ자 단면측보다 평판측의 좌굴하중이 낮기 때문에 평판측의 좌굴이 계기가 되어서 압궤된다. 점용접 타점은 평판을 ㄷ자 단면부재에 의해 지지하는 구속조건이 되기 때문에 타점간격은 평판의 좌굴변형에 영향을 주어 결과적으로 단일모자형 단면부재 전체의 변형모드를 좌우하게 된다.

Table 3, 4는 단일모자형 단면부재의 폭비와 프랜지 용접간격에 따른 정적압궤 실험결과의 평균값으로 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중에 대하여 비교한 것이다.

Table 3, 4에서 rank항의 ( )내의 값은, 가장 적은 값에 대한 비이다. 예를 들면, Table 3에서 흡수에너지 2(1.050)는 두께 0.8mm의 시험편에 대해서

Table 3 Static collapse test results for hat-shaped member with width ratio

Spec.	Absorbed Energy [J]		Mean Load [kN]		Maximum Load [kN]	
	E_S	rank	$(P_{mean})_S$	rank	$(P_{max.})_S$	rank
H08WFS	550.92	2(1.050)	7.87	2(1.049)	21.35	1(1.087)
H08XFS	524.82	3(1.000)	7.50	3(1.000)	20.40	2(1.039)
H08YFS	556.97	1(1.061)	7.96	1(1.061)	19.64	3(1.000)
H10WFS	1039.67	3(1.000)	14.85	3(1.000)	44.76	2(1.030)
H10XFS	1065.99	2(1.025)	15.23	2(1.026)	45.45	1(1.053)
H10YFS	1085.46	1(1.044)	15.51	1(1.044)	43.18	3(1.000)

Table 4 Static collapse test results for hat-shaped member with flange spot-weld pitch

Spec.	Absorbed Energy [J]		Mean Load [kN]		Maximum Load [kN]	
	E_S	rank	$(P_{mean})_S$	rank	$(P_{max.})_S$	rank
H10WGS	1005.15	3(1.000)	14.36	3(1.000)	40.84	3(1.000)
H10WFS	1039.67	2(1.034)	14.85	2(1.034)	44.76	2(1.096)
H10WES	1083.51	1(1.078)	15.48	1(1.078)	45.34	1(1.110)

Table 5 Static and quasi-static collapse test results for hat-shaped member

Spce.	Absorbed Energy [J]			Mean Load [kN]			Maximum Load [kN]		
	Static	Quasi-static	E_Q/E_S	Static	Quasi-static	$(P_m)_Q/(P_m)_S$	Static	Quasi-static	$(P_{max})_Q/(P_{max.})_S$
H08 WF	550.92	589.08	1.069	7.87	8.41	1.069	21.35	24.96	1.169
H10 WF	1039.67	1051.90	1.012	14.85	15.03	1.012	44.76	48.98	1.094

폭비에 따른 비교에서 2번째로 흡수에너지가 크며, 흡수에너지가 가장 작은 33× 27mm의 시험편(H08XFS)에 비해 30× 30mm의 시험편(H08WFS)이 5% 흡수에너지가 크다는 것을 의미한다.

Table 3에서 0.8mm인 시험편에 대해서는 흡수에너지 및 평균압궤하중이 폭비가 36× 24mm인 시험편이 가장 크게 나타났으며, 33× 27mm인 시험편이 가장 작은 값을 보였다. 최대압궤하중은 30× 30mm인 시험편이 가장 큰 값을 보이고, 36× 24mm인 시험편이 가장 작은 값을 보였다. 1.0mm인 시험

편에 대해서는, 흡수에너지 및 평균압궤하중은 36 × 24mm인 시험편이 가장 큰 값을 보였으며, 30× 30mm인 시험편이 가장 작은 값을 보였다. 하지만 최대압궤하중에서는 33× 27mm인 시험편이 가장 큰 값을 보였고, 36× 24mm인 시험편이 가장 작은 값을 보였다.

이상에서 폭비에 따라서는 흡수에너지, 평균압궤하중은 어느정도 일정한 관계가 있음을 알 수 있었으나, 최대압궤하중과의 관계는 명확하지 않았다. 그러나, 압궤실험시 압궤모드를 관찰하였을 때 30× 30mm인 경우에 규칙적인 압궤모드가 나타나서 가장 안정된 압궤를 보였다.

Table 4에서 용접간격이 짧을수록 흡수에너지, 평균압궤하중 및 최대압궤하중이 모두 크게 됨을 알 수 있었다. 이것은 압궤시 흡수에너지의 약 80% 이상이 모서리 부분에서 흡수되기 때문에 시험편의 치수가 작은 경우에는 형상과 용접간격에 따라서 그 차이가 미소하였으나, 시험편의 치수가 클 경우에는 용접간격에 따른 흡수에너지의 차이가 좀더 크게 나타날 것으로 생각된다.

Table 5는 정적 및 준정적하에서의 평균값으로 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중을 비교하였다. E_Q/E_S는 정적압궤에 대한 준정적압궤의 비를 나타낸다. 정적 및 준정적 압궤상태에서 흡수에너지 및 평균압궤하중은 준정적인 압궤상태에서 다소 높게 나타났으나, 최대압궤하중은 압궤속도가 높은 준적정압궤하에서 보다 높게 나타났다.

4-2 이중모자형 단면부재의 압궤특성

이중모자형 단면부재도 단일모자형 단면부재와 같이 점용접 타점에서는 폐단면이고 그 외에서는 폐단면에 가까운 단면형상을 가진다. Photo. 3(b)에서 압궤시 변형모드는 단일모자형 단면부재의 평형모드와 다른, 상자형 단면부재와 같이 중심축에 대해서 대칭인 압궤모드를 보인다.

Table 6, 7은 이중모자형 단면부재의 폭비와 프랜지 용접간격에 따른 정적압궤 실험결과의 평균값으로써 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중에 대하여 비교한 것이다. Table 6, 7에서 단일모자형 단면부재와 같이, 두께 0.8mm, 1.0mm시험편에 대해서 폭비에 따라서는 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중의 관계가 명확하지 않았으나, 용접간격이 짧을수록 흡수에너지 및 평균압궤하중이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 최대압궤하중은 용

Table 6 Static collapse test results for double hat-shaped member with width ratio

Spec.	Absorbed Energy [J]		Mean Load [kN]		Maximum Load [kN]	
	E_S	rank	$(P_{mean})_S$	rank	$(P_{max.})_S$	rank
D08WFS	843.99	2(1.042)	12.06	2(1.042)	25.16	1(1.059)
D08XFS	810.08	3(1.000)	11.57	3(1.000)	23.75	3(1.000)
D08YFS	846.83	1(1.045)	12.10	1(1.046)	24.29	2(1.023)
D10WFS	1633.02	3(1.000)	23.33	3(1.000)	48.93	1(1.021)
D10XFS	1637.14	2(1.003)	23.39	2(1.003)	47.94	3(1.000)
D10YFS	1694.33	1(1.038)	24.21	1(1.038)	48.27	2(1.007)

Table 7 Static collapse test results for double hat-shaped member with flange spot-weld pitch

Spec.	Absorbed Energy [J]		Mean Load [kN]		Maximum Load [kN]	
	E_S	rank	$(P_{mean})_S$	rank	$(P_{max.})_S$	rank
D10WGS	1571.88	3(1.000)	22.46	3(1.000)	48.56	3(1.000)
D10WFS	1633.02	2(1.039)	23.33	2(1.039)	48.93	1(1.008)
D10WES	1646.68	1(1.048)	23.52	1(1.047)	48.84	2(1.006)

Table 8 Static and quasi-static collapse test results for double hat-shaped member

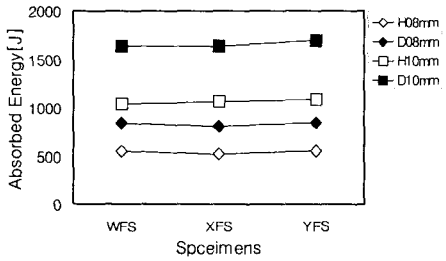
Spce.	Absorbed Energy [J]			Mean Load [kN]			Maximum Load [kN]		
	Static	Quasi-static	E_Q/E_S	Static	Quasi-static	$(P_m)_Q/(P_m)_S$	Static	Quasi-static	$(P_{max})_Q/(P_{max.})_S$
D08WF	843.99	869.01	1.030	12.06	12.42	1.030	25.16	28.68	1.140
D10WF	1633.02	1796.31	1.100	23.33	25.66	1.100	48.93	54.73	1.119

접간격에는 무관함을 알 수 있었다. 즉, 최대압궤하중은 단면적에 비례하지만, 단면의 형상이나 용접간격에는 무관하였다.

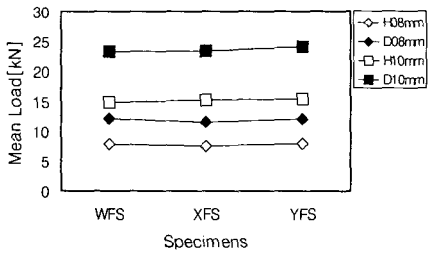
Table 8은 이중모자형 단면부재의 정적 및 준정적압궤하에서의 평균값으로써 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중을 비교하였다. 속도에 따른 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중 역시 단일모자형 단면부재와 동일하게 정적 및 준정적압궤상태에서 흡수에너지 및 평균압궤하중은 다소 높게 나타났으며, 최대압궤하중은 압궤속도가 정적보다

빠른 준정적압궤하에서 보다 높게 나타났다.

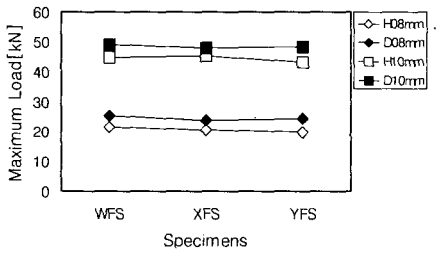
Fig. 3은 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재의 폭비에 따른 비교이고, Fig. 4는 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재의 프랜지 용접간격에 따른 비교이며, Fig. 5는 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재의 정적 및 준정적압궤에 따른 비교이다. Fig. 3~5에서 이중모자형 단면부재가 단일모자형 단면부재에 비해서 흡수에너지 및 평균압궤하중이 약 55% 높았으며, 최대압궤하중은 약 13% 높았다. 이는 압궤하중이 작용할 때 하중의 80% 이상이 모서리 부분에서 흡수하기 때문에, 단일모자형 단면부재의 모서리부분은 4곳, 이중모자형 단면부재의 모서리부분은 8곳이므로 흡수에너지, 평균압궤하중, 최대압궤하중이 모두 높게 나타난 것으로 생각된다. 또한, 최대압궤하중은 두께가 두꺼울수록 정적, 준정적 실험결과의 차가 많음을 알 수 있었다.



(a) Absorbed energy

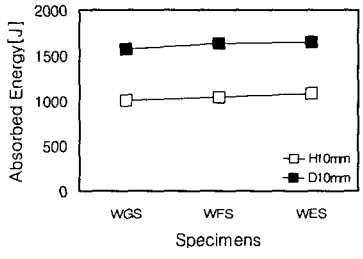


(b) Mean load

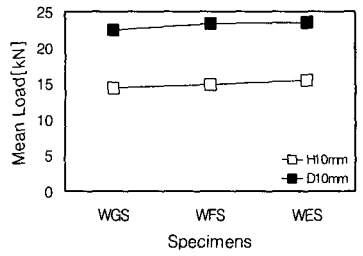


(c) Maximum load

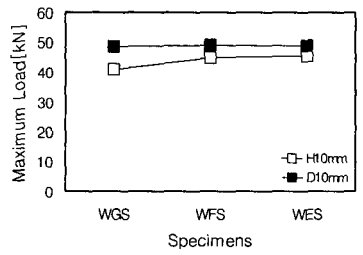
Fig. 3 Static collapse test results for hat-shaped and double hat-shaped members with width ratio



(a) Absorbed energy

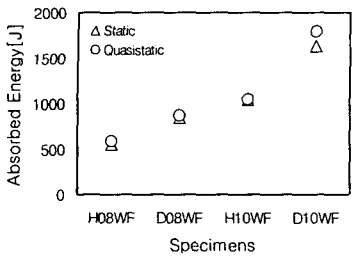


(b) Mean load

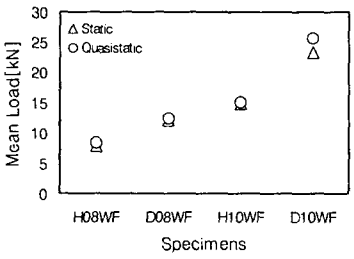


(c) Maximum load

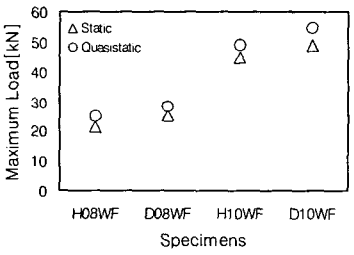
Fig. 4 Static collapse test results for hat-shaped and double hat-shaped members with flange spot-weld pitch



(a) Absorbed energy



(b) Mean load



(c) Maximum load

Fig. 5 Static and quasi-static collapse test results for hat-shaped and double hat-shaped members

5. 결론

(1) 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재 모두 폭비에 따른 흡수에너지 및 평균압궤하중은 두께 0.8mm, 1.0mm 모두 폭비가 클수록 높게 나타났다. 따라서, 좌굴이 일어나지 않는 범위라면 폭비가 클수록 압궤특성이 우수할 것으로 생각된다.

(2) 단일모자형 단면부재와 이중모자형 단면부재 모두 프랜지 용접간격에 따른 흡수에너지 및 평균압궤하중은 프랜지 용접간격이 짧을수록 높았다.

(3) 압궤속도가 빠른 준정적인 상태에서 흡수에너지, 평균압궤하중 및 최대압궤하중은 정적압궤하에서보다 높게 나타났다.

(4) 이중모자형 단면부재의 흡수에너지 및 평균압궤하중은 단일모자형 단면부재보다 약 55% 높게 나타났으며, 최대압궤하중은 약 13% 높았다.

(5) 부재의 두께가 두꺼울수록 최대압궤하중은 정적, 준정적 실험결과의 차가 많이 나타남을 알 수 있었다.

(6) 단일모자형 단면부재의 변형모드는 평판과 서로 마주보는 ㄷ자 단면부재의 벽면이 부재 외측방향으로 변형될 때 평판은 부재 내측방향으로 변형하는 평형모드가 되며, 이중모자형 단면부재는 대칭모드가 된다.

참고문헌

1. 한국자동차공학회, 자동차 기술 핸드북; 시험평가편, SAE Korea, pp. 339-350, 1996.
2. H. Ishikawa, Computer simulation of automobile collision, Reconstruction of accidents, SAE Paper No.851729, 1985.
3. H. B. Pritz, Experimental investigation of pedestrian head impacts on hood and fenders of production vehicles, SAE Paper No. 830055, 1983.
4. J. Grandel et al., Impact dynamic, head impact severity and helmet's energy absorption in motorcycle/pressenger car accident tests, IRCOBI, 1984.
5. E. G. Janssen et al., Evaluation of vehicle-cyclist impacts through dummy and human cadaver tests, 11th ESV, 1987.
6. W. Johnson, Impact Strength of Materials, E. Arnold, London, and Crane Russak, New York, 1972.
7. B. Rawlings, Response of Structures to Dynamic Loads, Mechanical Properties at High Rates of Strain, (Ed. J.Harding), pp.279-298. Inst. of Physics Conf. Series No. 21, London, 1974.
8. 綾 紀元, 高橋 邦弘, 車體のエネルギ-吸收特性, 日本自動車技術會論文集, No. 7, pp. 60-66, 1974.
9. G. Gerard. The crippling strength of compression elements, JAS, 25, 1, 1958.
10. Mahmood, H. F., and Paluzny, A., Design of thin walled Columns for Crash Energy

Management Their Strength and Model of Collapse, Proc. 4rd Instructurral Conference on Vehicle Structural Mechanics, Nov. 18-20, Detroit, pp. 7-18, 1981.

11. T. Wierzbicki and T. Akerstrom, Dyanmic Crushing of Strain Rate Sensitive Box Columns, Proceedings of the Second International Conference on Vehicle Structural Mechanics, SAE 70592, pp. 19-31, April 1977.

12. W. Abramowicz, The effective crushing distances in axially compressed thin-walled metal columns, Int. J. Impact Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 309-317, 1983.

13. Johson and S. R. Reid, Metallic Energy Dissipating Systems, Applied Mechanic Reviews. Vol. 31: pp. 277-288, March, 1978.

14. Lawrence E. Nielsen, Robert F. Landel, Mechanical properties of polymers and composites, Marcel Dekker, Inc. pp. 488-491, 1994.