〈학술논문〉

L 형상 용접 프레임의 피로 실험 및 시뮬레이션

이정희*· 이영신†· 김재훈*· 공정표*· 한규현*
(2007년 9월 28일 접수, 2007년 12월 1일 심사완료)

Fatigue Test and Simulation on the Steel Welded L-Shaped Frame

Jung-Hee Lee, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Jeong-Pyo Kong and Kyu-Hyun Han

Key Words: L Shaped Welded Frame(L 형상 용접 프레임), Fatigue Test(피로 실험), Simulation (시뮬레이션), Fatigue Life(피로 수명), Reinforced Quality Factor(보강 품질 계수)

Abstract

A fatigue test on the steel welded L-shaped frame was conducted. The frame was consisted with carbon steel tube and reinforced bracket. The four type reinforced brackets were fabricated. They were two rectangular plate reinforced bracket, two sided pentagon plate reinforced bracket, triangular plate reinforced bracket and fully reinforced bracket. The fatigue test of frame was conducted with axial tension loading. The fatigue simulation of the steel welded L-shaped frame was also performed by the finite element method with code FEMFAT. The frame of fully reinforced bracket had the highest fatigue life and reinforced quality factor.

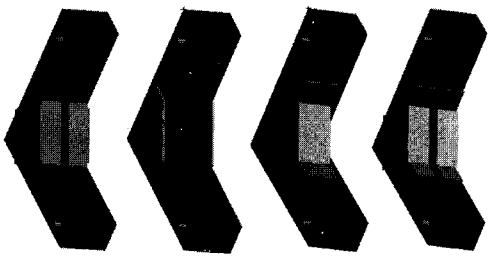
1. 서 론

기계 및 용접 구조물은 주로 반복 하중에 의한 피로에 의해서 파괴가 일어난다. 부재 및 구조물들은 더욱더 대형화되고 더욱 가혹한 환경에서 운용되어지며 또한 생산 비용을 감소하기 위한 노력도 진행되어 지고 있기 때문에 피로에 의한 위험이 쉽게 노출되어질 수 있다. 용접 구조물의 특징은 용접된 부분은 모재보다 더욱 우수한 성질을 지니지만 용접 주위의 부분은 성질이 떨어질 수 있다. 또한 용접 구조물이 한 덩어리로 되어 있는 경우 균열이 발생하였을 때에는 균열이 퍼져나가 전체가 파손될 우려가 있다. 따라서 구조물의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계 단계에서부터 피로를 고려한 설계를 하는 것이 요구된다.[1] 피로에 관련된 최근 연구들은 저사이클 피로 파괴의 시뮬레이션 구현을 김민건 등[2]의 연구와 용접구조상세의 피로 수명평가를 한정우 등[3]의 연구가 있다. 이 논문을 쓰기 위한 실험적인 방법은 고속도로 용접구조물을 연구한 Foly[4] 논문을 참고하였다. 또한 Irving[5]은 고속 해양 운송기의 브래킷 용접구조물의 형상을 변화시키며 실험적 방법과 해석적 방법을 비교한 연구를 수행하였다. 용접 구조물의 피로 수명을 실험적 방법과 해석적인 방법을 사용하여 접근하였다. 본 논문에서는 용접 구조물의 주요 지지부분이 용접으로 결합되어 있을 때 반복 하중에 의한 L-형상 프레임의 피로수명을 다양한 브래킷 보강 형태에 따라 비교하였다.

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과
BK21 메카트로닉스사업단장
E-mail : leeys@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6644 FAX : (042)821-8894
* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

Table 1 Industrial standards of applied carbon steel tube

Country	Standard No.	GRADE
KS (Korea)	D 3568	SPSR 400
ASTM (U.S.A.)	A500	Gr B
JIS(Japan)	G-3466	STKR 400
BS (British)	EN 10025	S275JR



(Type-A) (Type-B) (Type-C) (Type-D)

Fig. 1 The four type reinforced brackets of L-shaped frame. (Type-A) Two rectangular plate reinforced bracket, (Type-B) Two sided pentagon plate reinforced bracket, (Type-C) Triangular plate reinforced bracket, (Type-D) Fully reinforced bracket

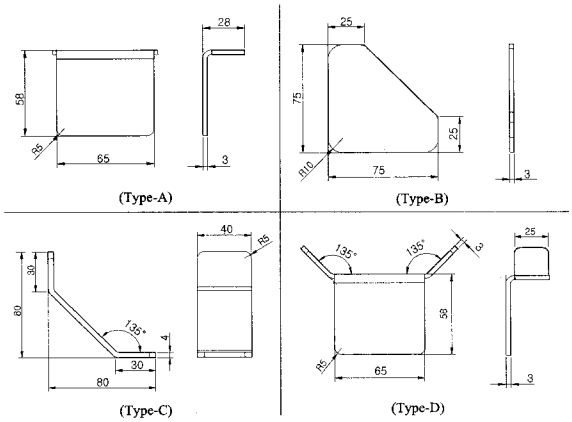


Fig. 2 Dimensions of the four type reinforced bracket plates

2. 피로 실험

2.1 시험편

시편은 60×40 단면과 2.3 mm 두께를 가지는 구조용 각형각관으로 제작된다. Table 1은 구조용 각형각관의 나라별 규격 명칭을 나타낸 것이며

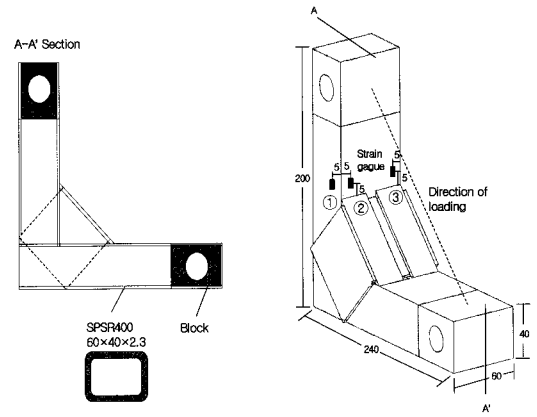


Fig. 3 Dimensions of L-shaped frame bracket

구조용 각형각관은 ASTM 규격에서 A500/Gr B로 KS 규격에서는 D 3568/SPSR 400 으로 명명한다. L형 용접 프레임은 반복하중을 받는 구조물이다. 그리고 이 프레임은 각형각관을 기본 모재로 사용하고 구조물의 강도를 향상시키기 위해 브래킷을 용접하여 보강하였다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 A, B, C, D 4가지 타입의 브래킷을 비교 연구하였다. Fig. 2는 4가지 타입의 브래킷에 적용한 보강판의 형상 및 치수를 보여준다.

Type-A 프레임은 사각형 형태의 브래킷이 양 옆에 부착된 형태로 한쪽의 브래킷의 무게는 103.5 g 이다. Type-B 프레임은 오각형 형태의 브래킷이 양 옆에 부착된 형태로 한쪽의 브래킷의 무게는 79 g 이다. Type-C 프레임은 직사각형의 판을 3단으로 구부려 용접 후 옆면에서 보면 삼각형 모양이 나타나는 형태로 브래킷의 무게는 123 g 이다. Type-D 프레임은 Type-A와 C가 결합된 모양과 유사하고 옆에서 보면 모자 모양이 나타나는 형태로 한쪽의 브래킷의 무게는 128.5 g 이다.

시편을 시험기에 장착하기 위해 Fig. 3에서 보는 것과 같이 지름 20 mm 의 구멍을 시편 끝부분에 만들어줬다. 또한 생성된 구멍 주위에 응력집중이 발생하는 것을 방지해주기 위해 각형각관의 관 안쪽에 사각형 구멍과 동일한 크기의 강철 블록(60×40×60)을 끼워 넣고 용접하였다(Fig. 3의 빗금 친 부분). 시험기와 시편을 연결하기 위해 치구를 제작하였고 시편과 치구는 지름 20 mm 연마봉으로 연결하였다.

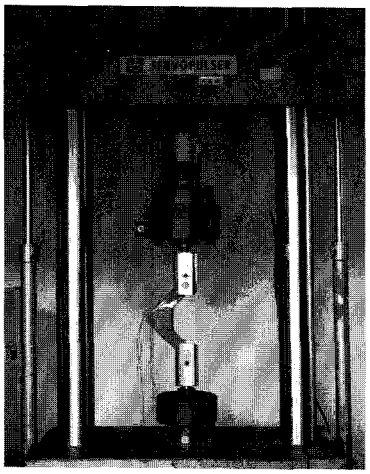


Fig. 4 Photograph of fatigue test for L-shaped frame

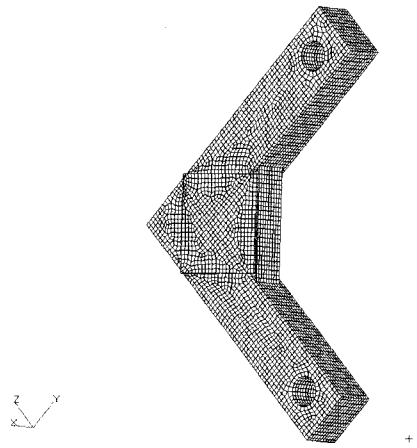


Fig. 5 Finite element model of Type-A bracket frame

2.2 시험 장치 및 방법

피로 시험을 하기 위한 피로 하중을 얻기 위해 정적 인장시험을 선행하여 실시하였다. 정적 인장 시험에 사용된 시험기는 SHIMADZU Co.의 유압 서보식 만능피로시험기로서 최대용량은 200 kN이다. 정적 인장시험은 Type-A 프레임으로 실시했으며 5 mm/min 의 일정한 속도로 인장 시험을 수행하였다. Fig. 3과 같이 세곳에 강재용 스트레인게이지 (Kyowa ; KFG-1-120-C1-11L1M2R)로 부착하여 스트레인을 측정하였다.

정적 인장 시험으로 얻어진 Type-A의 극한하중은 38 kN 이다. 피로하중은 이 값의 70%, 26 kN으로 정하여 각각 4가지 모델에 적용하여 피로실험을 실시하였다. 피로 시험에 사용된 시험기는 정적 인장시험과 동일한 시험기이며 가진주파수는 3 Hz, 하중비 (load ratio) R = 0.1 을 적용하였다. 피로 시험은 각 모델에 대해 1개씩 총 4개의 시편으로 실시하였다.

피로파손은 피로 시험기에서 가진 하중진폭 신호가 급격히 감소할 때를 개시점으로 판단하였다.

3. 피로 해석 시뮬레이션

3.1 모델링 및 해석 조건

L 형상 프레임들의 기하형상은 CAD 시스템에서 그려서 CAE 시스템으로 옮겨왔다. 유한요소법은 L 형상 프레임 구조물의 변형률, 하중분포 그리고 피로수명을 예측하는데 사용되었다. L 형상 프레임에 사용된 요소는 8절점 솔리드 요소 (CHEXA)를 사용하여 모델링 되어졌고 사용된 요소 수는 각 모델에 따라 총 13,336 ~ 22,475이며 절점 수는 20,944 ~ 31,795 이다.

유한요소 모델은 대칭 형상을 고려하여 1/2만 모델링하였다. 프레임과 브래킷의 해석에는 탄성계수 E= 210 GPa, 푸아송 비 ν = 0.3, 밀도 ρ = 7850 kg/m^3, 항복강도 σ_y= 255 MPa을 사용하였다. Fig. 5는 Type-A의 유한요소 모델을 나타낸다. 경계조건은 그림에서 위쪽 구멍 부분에 x축 방향의 회전만 허용하는 핀 고정 조건을 적용하였고 하중은 아래 쪽 핀 고정된 구멍 부분에 수직 방향으로 인장 하중이 작용하였다. 다른 브래킷 모델들도 동일한 하중조건, 경계조건, 대칭조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

3.2 해석 방법

3.2.1 정적 구조 해석

정적 구조 해석은 MSC. Nastran 프로그램을 solver로 사용하여 비선형 정적 해석을 수행하였다. 정적 해석은 10개의 하중단계(load step)로 나누워서 하중단계가 증가할 때 마다 하중 값이 커지는 방식으로 해석을 하였다.

3.2.2 피로 해석

피로 해석은 상용프로그램인 FEMFAT 프로그램을 사용하여 해석을 하였다. FEMFAT 프로그램은 시험결과를 바탕으로 다양한 재료의 S-N 커브

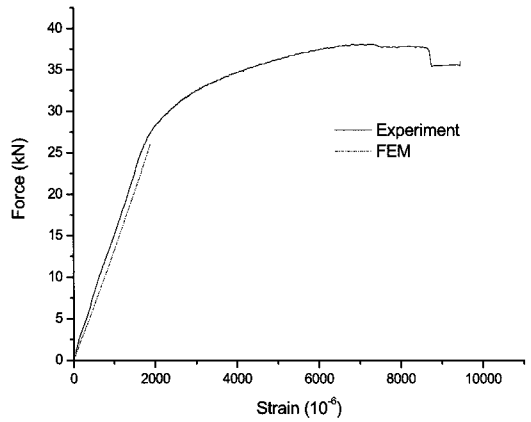


Fig. 6 Comparison of tensile force-strain obtained from experiment and FEM simulation in Type-A frame

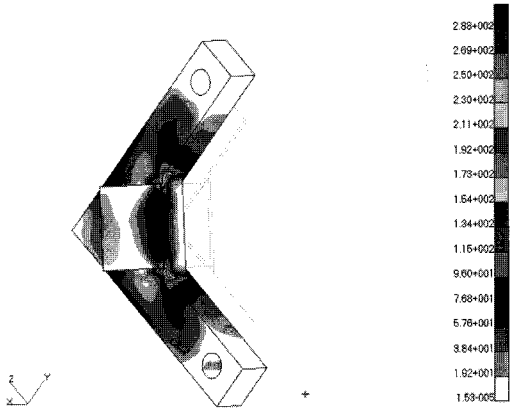


Fig. 7 Stress distribution under tensile force 26 kN in Type-A bracket frame

데이터를 제공해준다.

피로 해석 순서는 다음과 같다.

1) L 형상 프레임의 유한요소모델을 이용하여 정적 해석을 수행하고 응력 분포를 얻는다.

2) 정적 해석의 응력 분포 값을 FEMFAT 프로그램에 입력 하고 재료 물성치, 피로 수명, 표면 거칠기, 용접조건 등을 설정한다. 용접 조건은 FEMFAT WELD module[8]을 이용하여 표현하였다.

3) 손상치와 안전율을 평가한다.

손상치와 안전율은 FEMFAT 프로그램에서 설정된 재료 물성치와 기타 특성에 따른 인자 값을 고려하여 계산된다.

피로 파괴를 예측하는 파라미터로 손상치 (damage value) D를 식 (1)로 정의한다.

$$D = \frac{n}{N} \tag{1}$$

여기서 N은 FEMFAT 프로그램에서 지원하는 재료 데이터의 S-N 커브상의 사이클 수이다. n은 FEMFAT 사용자가 피로 수명을 예측하여 입력해 주는 사이클 수이다. 손상치 D 가 1이 되면 예측한 피로에서 크랙이 개시되어 파괴가 일어난다고 가정한 것이다. 따라서 피로 해석에서 손상치가 1이 되는 시점에서 사이클 수 n을 피로 수명으로 정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 정적인장 특성

Fig. 6는 Type-A 프레임의 정적 인장시험과 정적 구조 해석에서 하중에 대한 변형률 결과 값을 함께 비교하여 나타낸 그래프이다. 이 결과는 Fig. 3의 스트레인 게이지 ② 위치를 비교한 것이고 실험에 의한 결과를 보면 항복하중은 30 kN, 극한하중은 38 kN이다. 정적 구조 해석 결과 비선형 정적 해석을 통하여 하중 값이 증가함에 따라 변형률 값을 계산하였다. 정적 구조 해석은 탄성 영역에서만 수행되었으며 그래프에서 확인할 수 있듯이 탄성 영역에서는 시험 값과 해석 값이 유사함을 알 수 있다. 이를 근거로 피로 시험에 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 Type-A 프레임의 정적 구조 해석 결과를 나타낸다. 작용하중은 26 kN이며 브래킷과 각형 각관의 연결부분에서 최대 응력 288 MPa이 발생하였다.

4.2 피로 특성

4.2.1 보강 방법에 따른 피로 수명 고찰

피로 수명은 항복 하중 26 kN을 기준으로 하여 수행되었고 모든 용접 프레임 구조물에 동일하게 적용하여 상대적으로 어느 프레임이 우수한 성능을 가지고 있는지 평가하였다. Fig. 8는 피로 시험에 의한 피로 수명 결과들과 피로 해석을 통하여

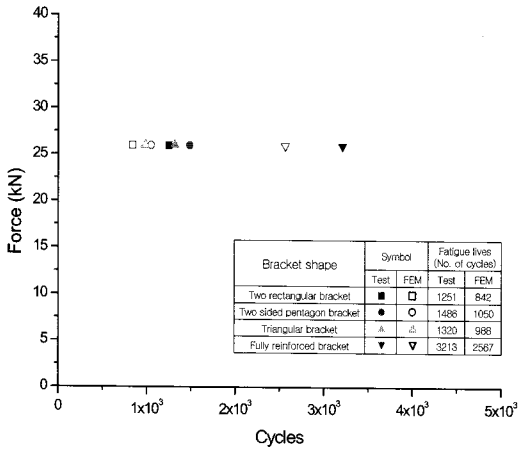


Fig. 8 Comparison on the experimental and numerical fatigue life of L-shaped frames.

얻어진 피로 수명을 나타낸 것이다. 두 개 사각형 보강 브래킷 프레임(Type-A)은 다른 형태의 브래킷 프레임과 상대적인 강도를 평가하기 위한 기준으로 사용되었다. 피로 시험 결과 Type-A 브래킷 프레임은 가장 낮은 1251 사이클 수에서 피로 파괴가 일어났다. 피로 해석 결과는 피로 파괴가 842 사이클에서 일어났다. 두 개 측면 오각형 보강 브래킷 프레임(Type-B)은 시험결과에서 1486 사이클에서 피로 파괴가 일어났고 피로 해석 결과에서는 1050 사이클에서 피로 파괴가 일어났다. 다음으로 삼각판 보강 브래킷 프레임(Type-C)은 시험결과에서 1320 사이클에서 파괴가 일어났고, 피로 해석 값에서는 988 사이클에서 파괴가 일어났다. 전체 보강 브래킷 프레임(Type-D)은 시험결과에서 가장 높은 3123 사이클에서 파괴가 일어났고 피로 해석 결과에서 2567 사이클에서 파괴가 일어났다. 피로 시험 결과와 피로 해석 결과 사이에 피로 파괴 사이클 수는 다소 차이가 발생하였다. 수치해석에 의한 피로 수명은 실험에 의한 피로 수명 결과보다 낮게 평가되었고 20 ~ 32 % 차이(difference)가 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 차이는 프레임 시험과 유한요소해석에 의한 최대 응력 차이에 기인한다고 판단된다. 각 프레임 구조물에서 피로 수명은 시험 및 해석을 통해 각 보강 형태에 따른 특성을 확인할 수 있었다.

Table 2 Reinforced quality factor of the steel welded L-shaped frames

Bracket shapes	Bracket weight (W)	Fatigue lives (N)			Reinforced quality factor (η)	
		Test	FEM	Diff.*	Test	FEM
Type-A	207	1251	842	32%	6.038	4.062
Type-B	158	1486	1050	29%	9.394	6.637
Type-C	123	1320	988	25%	10.707	8.014
Type-D	257	3213	2567	20%	12.463	9.957

Difference* = (Test Life - FEM Life)/Test Life × 100%

Type-A가 가장 낮은 피로 수명을 가지며 완전 보강된 Type-D가 시험결과와 해석결과에서 가장 큰 피로 수명을 나타내었다.

4.2.2 보강 품질 계수 평가

각 프레임에 따른 브래킷의 성능을 평가하기 위해 브래킷의 무게에 따른 피로 수명으로 보강 품질계수(η)를 정의하였다.

$$\eta = N / W \tag{2}$$

여기서 N 은 피로수명이고, W는 브래킷의 중량(g) 이다. Table 2는 각각의 브래킷의 무게와 보강 품질 계수를 나타낸 것으로 Type-D 브래킷이 가장 무겁고 Type-C 브래킷이 가장 가볍다. 각 브래킷의 보강 품질 계수를 비교해 본 결과, Type-D 브래킷은 가장 높은 보강품질계수, η= 12.463 을 나타내었다. 그리고 Type--A 브래킷 은 가장 낮은 보강품질계수, η= 6.038 을 나타내었다. Type-C 브래킷은 Type-B 브래킷 보다 낮은 피로 수명을 갖지만 보강 품질 계수는 더 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

4.2.3 피로 파단 특성 평가

Fig. 9는 4가지 타입의 브래킷 프레임의 피로 파괴 형상을 나타낸다. 반복 조건 하에서 각 프레임의 피로 파괴는 각형 각관 모재와 브래킷의 연결 부분에 해당하는 끝 부분에서 일어났다. Fig. 10은 피로 해석에 의한 손상치가 1이 되었을 때의 손상영역을 나타낸 모습으로 실험에 의한 피로 파손 위치를 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 손상치 1 이하의 영역은 안전영역으로 평가된다.

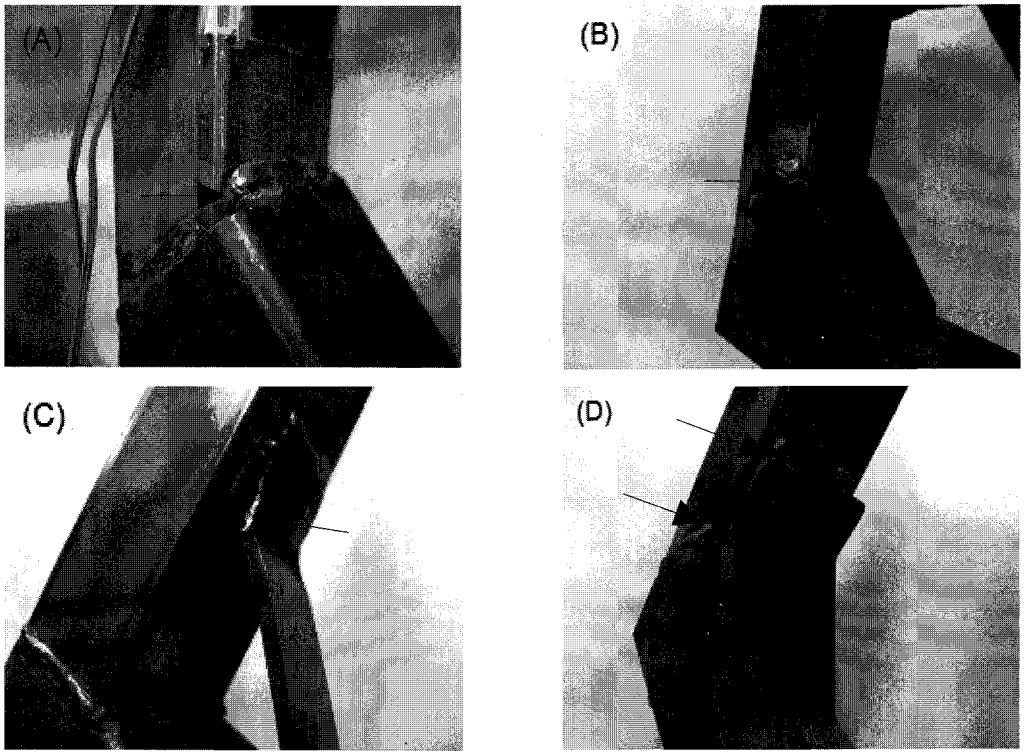


Fig. 9 Photograph of failure observed for L-shaped frames (A) Two rectangular plate reinforced bracket(N=1251) (B) Two sided pentagon plate reinforced bracket(N=1486) (C) Triangular plate reinforced bracket(N=1320) (D) Fully reinforced bracket(N=3213)

5. 결 론

본 연구에서는 L 형상 용접 구조물의 피로 시험과 피로해석을 브래킷의 종류에 따라 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로 하중은 정적 인장 실험에서 항복 하중의 70 % 값인 26 kN 을 사용하여 수행하였다. 용접 구조물의 피로 수명은 수치해석 손상치와 비교하였다.

(2) 전체 보강 브래킷 프레임(Type-D)이 가장 큰 피로 수명을 가지며 보강 품질 계수도 가장 큰 결과를 나타내었다. 반면에, 두 개 사각형 보강 브래킷 프레임(Type-A)이 가장 낮은 피로 수명과 보강 품질 계수를 갖는다.

(3) 피로 수명 해석 결과는 피로 시험 결과와 비교하였을 때 20 - 32 % 차이를 보였다. 이와 같은 차이는 프레임 시험과 유한요소해석에 의한 최대 응력 차이에 기인한다고 판단된다.

참고문헌

(1) Han, S. Y., Song, S. Y., 2002, "Shape Optimization for Prolonging Fatigue Life of a Structure," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 26, No. 8, pp. 1512~1519.

(2) Kim, M. G., Lim, B. K., 2006, "Simulation of Extremely Low Cycle Fatigue Fracture in Ductile Cast Iron," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 30, No. 12, pp. 1573~1580.

(3) Han, J. W., Han, S. H., Shin, B. C., Kim, J. H., 2004, "Fatigue Life Estimation of Welding Details by Using a Notch Strain Approach," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 28, No. 7, pp. 977~985.

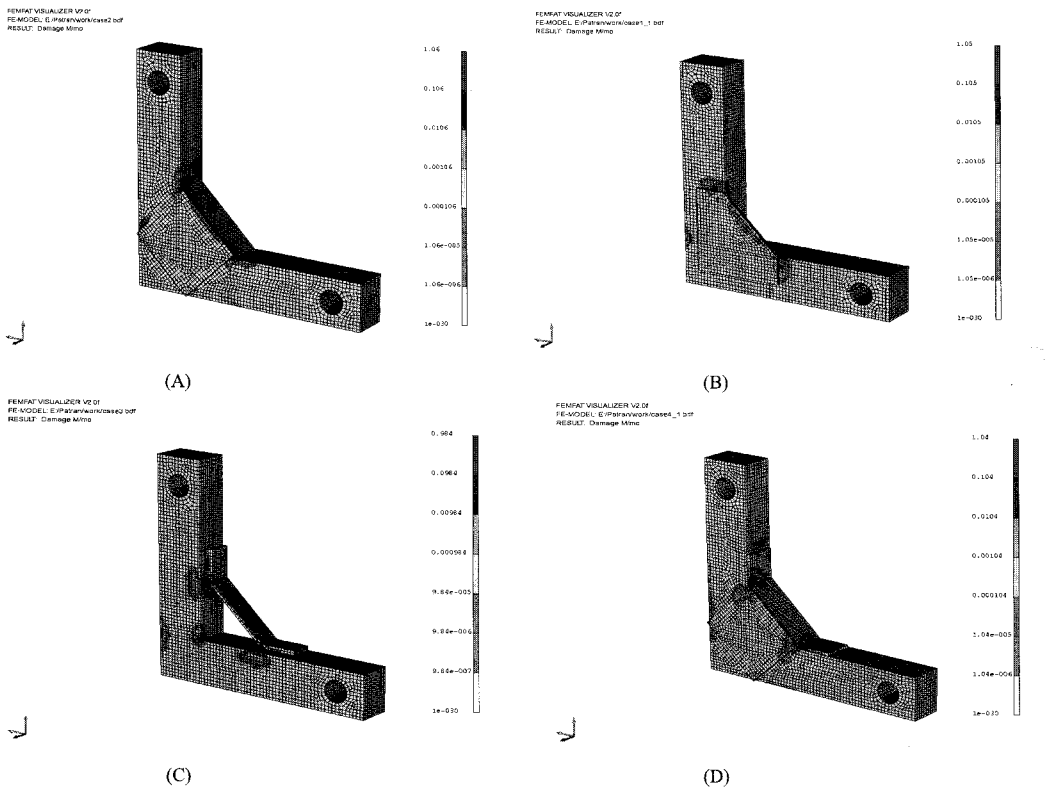


Fig. 10 Damage contour of the L-shaped frames for fatigue simulation (A) Two rectangular plate reinforced bracket (B) Two sided pentagon plate reinforced bracket (C) Triangular plate reinforced bracket (D) Fully reinforced bracket.

(4) Foley, C. M.. Peronto, J. L., and Fournelle, R. A., 2006, "Fatigue Life Prediction and Variability of New and Existing Welded CHS Y-Joints," *Engineering Journal*, first quarter pp. 57~79.

(5) Irving, S., Ferguson-Smith, F., He, X. Z., and Liu, Y, 2005, "Comparative Fatigue Assessment of Soft Toe and Nested Bracket Welded Aluminium Structures," *Engineering Failure Analysis 12*, pp. 679~690.

(6) Chakherlou, T. N., Oskouei, R. H., and Vogwell, J. 2007, "Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Clamping Force on the Fatigue Behavior of Bolted Plates," *Engineering Failure Analysis,* In Press.

(7) Borrego, L. P., Pires, J. T. B., Costa, J. M., and Ferreira, J. M., 2007, "Fatigue Behaviour of Laser Repairing Welded Joints," *Engineering Failure Analysis,* Vol. 14, No. 8, pp. 1586~1593.

(8) Magnapowertrain, 2005, FEMFAT V4.6c User Manual, pp. 99~100.

(9) UGS, 2004, NX Nastran Quick Reference Guide Vol. 2. UGS PLM Solutions Inc., pp. 899~904.