

얇은판시편의 당김－틀음혼합형찢어짐에 대한 실험적연구

리철명, 지동환

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학자, 기술자들은 당이 마련해준 과학기술로마의 날개를 활짝 펴고 과학적재능과 열정을 총폭발시켜 누구나 다 높은 과학기술성과들을 내놓음으로써 부강조국건설에 이바지하는 참된 애국자가 되여야 합니다.》

우리는 가로짐과 틀음짐을 동시에 받는 구조물에 대한 당김－틀음혼합형찢어짐실험과 유한요소모형화를 진행하였다. 구조물들은 당김짐(I형)뿐만아니라 가로짐(II형)과 틀음짐(III형)을 받는다. 구조물요소가 당김－틀음(I/III)혼합형짐을 받을 때 균렬은 당김과 틀음이 혼합된 호상작용을 동시에 받고 결과 요소는 혼합형균렬과손방식을 나타낸다. 당김짐(I형)을 받는 집중당김(CT)시편과 같은 예비균렬을 낸 시편에서 연성균렬발생과 전파에 대한 문제는 선행연구[1-3]에서 많이 논의되였다. 그러나 I/III혼합형짐을 받는 시편들에 대한 자료는 매우 적다. 표준당김시험기들에서 리용할수 있는 I/II 및 I/III혼합형짐주기를 위하여 개발되는 지구를 그림 1에 보여주었다.[4] 여기서 Φ 는 혼합형비를 조종하는데 리용되는 짐주기각이다. 예비균렬시편들에 대한 찢어짐시험은 I/III혼합형파괴에 대한 적합한 파괴모형을 개발하는데 필요한 자료를 제공한다.

론문에서는 얇은판의 당김－틀음(I/III)혼합형찢어짐에 대한 림계짐을 결정하는 실험적방법을 제기하였다.

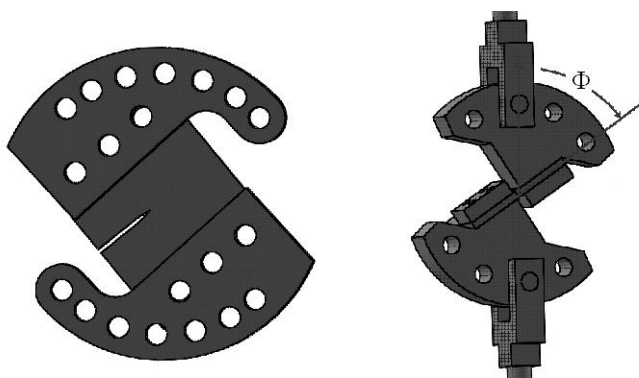


그림 1. I/II 및 I/III혼합형짐주기지구

1. 이론적기초

원리적으로 시편이 I/III혼합형짐을 받을 때 균렬성장방향은 균렬방향과 일치한다. I형 균렬에 대하여 균렬앞끝근방의 응력마당은 극자리표계에서 다음과 같이 표시된다.[1]

$$\sigma_r = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{5}{4} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3)$$

한편 III형균렬에 대하여 균렬앞끝근방의 응력마당은 극자리표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_{rz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

$$\tau_{\theta z} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

경사균렬문제에서 균렬전파각은 혼합형균렬문제의 주응력리론으로부터 결정할수 있다. I/III혼합형균렬문제에 대하여 최대주응력은 극자리표계에서 다음과 같이 표시된다.

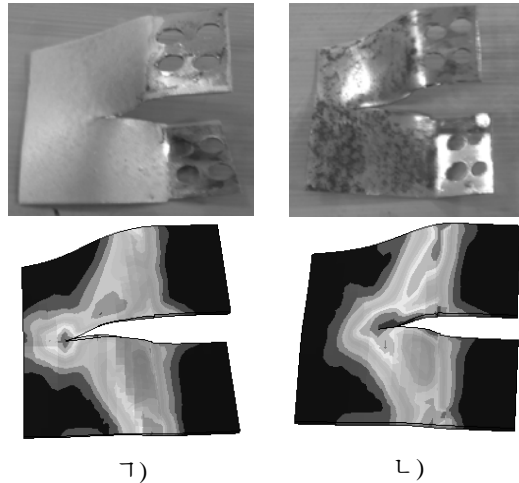
$$\sigma_{\theta} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (5)$$

주응력리론에 의하면 균렬전파는 최대주응력에 수직인 방향에서 일어난다. 극값문제의 풀이로부터

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = -3 \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} = 0 \quad (6)$$

이므로 $\theta=0$ 이 얻어진다. 즉 균렬전파는 가로방향으로 일어난다.

그림 2에서 I/III혼합형파괴실험과 모의에서 파괴된 시편을 보여준다. 여기서 균렬은 가로방향으로 전파한다.



ㄱ)

ㄴ)

그림 2. I/III혼합형파괴실험과 모의에서 파괴된 시편

 ㄱ) $\Phi=30^\circ$, ㄴ) $\Phi=60^\circ$

2. 준정적 I/III혼합형찢어짐균렬성장실험

준정적 I/III혼합형찢어짐균렬성장실험은 연성시편들에서 균렬앞끝마당을 특징짓기

위하여 설계되고 진행되었다.[4] 그림 1에서 짐주기구멍쌍들은 I형($\Phi=0^\circ$)과 III형($\Phi=90^\circ$), I/III혼합형($\Phi=30^\circ$ 와 $\Phi=60^\circ$)짐주기를 위한것이다. 짐주기지구는 세기가 높은 크롬강을 리용하여 제작하였다. I/III혼합형실험에서 리용되는 얇은판균렬시편들은 2mm두께의 연강으로 제작하였다. 연강은 $E=198\text{GPa}$ 의 탄성계수와 $\sigma_y=339\text{MPa}$ 의 류동한계, $\sigma_u=418\text{MPa}$ 의 세기한계를 가진다. 시편들은 모두 LT방향(즉 균렬은 얇은판압연방향에 수직)으로 향하고 련속적인 I/III혼합형과괴실험을 위한 예리한 균렬끝을 도입하기 위하여 I형에서 피로예비균렬을 낸다. 시편은 I/III혼합형짐주기지구에 고정된다. 지구—시편은 설계된 짐주기각에 해당하는 한쌍의 짐주기구멍들을 리용하여 만능재료시험기(그림 3)에 설치된다.



그림 3. 준정적 I/III혼합형과괴실험

안정한 찢어짐실험은 짐주기속도의 영향을 피하기 위하여 낮은 짐주기속도(실례로 0.04mm/s)에서 변위조종하에 수행된다. 안정한 찢어짐균렬성장동안 균렬벌어짐변위는 CCD촬영기(전하결합소자를 빛수감소자로 사용하는 촬영기)에 의하여 기록된다.

모든 준정적 I/III혼합형과괴실험들은 변위조종하에서 10t급유압식만능재료시험기(P-10)에서 진행되었다.(그림 3) 지구들은 U자형갈구리들에 끼운 핀들을 통하여 시험기에 련결된다. U자형갈구리들은 시험기의 유압물개들에 고정되어있다. 지구에서 핀의 위치에 따라 I형과 III형, I/III혼합형짐

주조건을 실현할수 있다. 핀들의 위치는 그림 1에서 정의되는 짐주기각에 의하여 특징지어진다. 값 $\Phi=0^\circ$ 는 I형짐주기에 해당되며 $\Phi=90^\circ$ 는 III형조건에 해당된다. 중간값 $\Phi=30^\circ$ 와 $\Phi=60^\circ$ 는 I/III혼합형과괴를 일으킨다.

실험에서는 CCD촬영기를 리용한 수자화상처리기술이 균렬앞끝구역의 변위마당을 측정하는데 리용된다. 실험을 진행하기 전에 높은 대조도를 가진 얼룩점무늬들을 매 시편에 도색하고 균렬앞끝구역을 검사할수 있도록 CCD촬영기를 설치하고 촬영기를 동기화시켜 교정한다.

그림 4에 변형되지 않은 시편의 치수와 짐주기각 $\Phi=60^\circ$ 에서 I/III혼합형실험동안 약 20mm균렬확장과 함께 변형된 시편을 보여주었다.

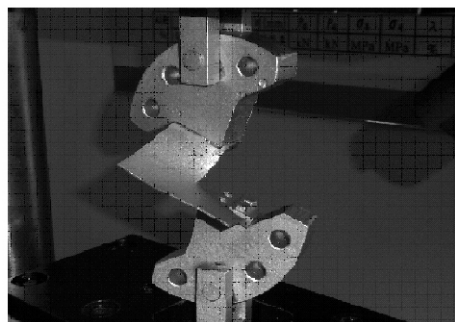
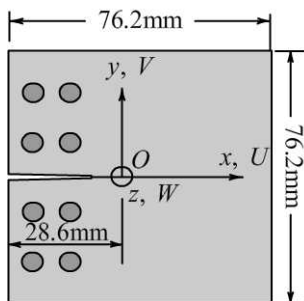


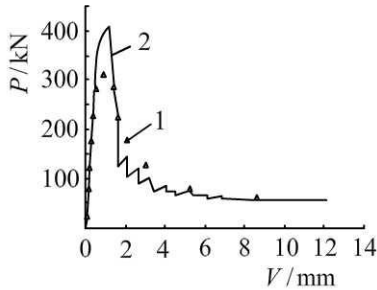
그림 4. 변형되지 않은 시편의 치수와 짐주기각 $\Phi=60^\circ$ 에서 I/III혼합형실험동안 약 20mm 균렬확장과 함께 변형된 시편

3. 유한요소모형화

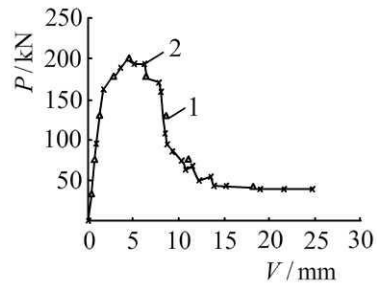
모형화는 고체 또는 각체요소들을 리용하며 예측된 균열경로를 따라서 보다 잘게 분할된 중심부분을 가지고있다. 이 구역밖에서는 훨씬 거친 그물이 리용되었다. 고체요소는 8마디점요소이고(ABAQUS[5]에서 C3D8 R) 각체요소는 4마디점요소이다.(ABAQUS에서 S4R) 모형은 결합구역모형(CZM)을 리용하였으며 유한요소모형에서 고체요소치수는 아주 작고 균열경로를 따르는 림계구역에서 0.062 5mm와 같다. 모든 경우에 두께를 통하여 5개의 요소가 있다. 모형에 모두 약 38 000개의 요소들이 있다. 경사파괴를 모의하는데 두께를 통한 5개의 요소면 충분하다. 모형화를 위하여 아래우지구에 볼트로 련결되는 시편부분을 강체로 가정하였다.

4. 실험값과의 비교

2개의 짐주기각의 경우들에 측정되었거나 모의한 짐-변위곡선을 비교하였다.(그림 5) 실험과 모의사이의 호상관계는 비교적 좋다.



ㄱ)



ㄴ)

그림 5. 짐-변위곡선의 비교

ㄱ) $\Phi=30^\circ$ (1-실험, 2-모의), ㄴ) $\Phi=60^\circ$ (1-실험, 2-모의)

그림 6에 I/III혼합형찢어짐실험과 유한요소모의에 의한 시편변형의 비교와 짐작용방향변위분포를 보여주었다.

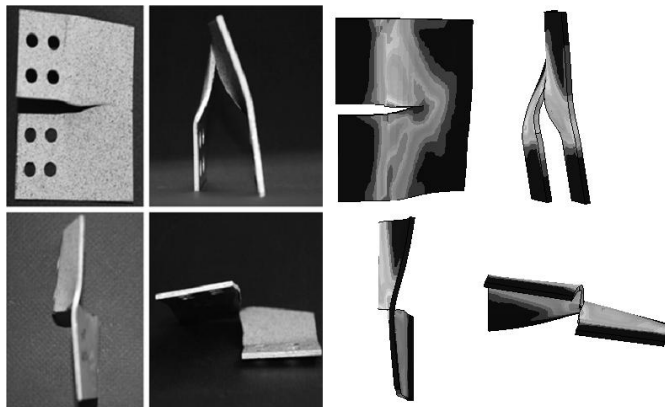


그림 6. 시편변형의 비교와 짐작용방향변위분포

맺 는 말

결합된 I형과 III형짐을 받는 개조한 CT시편에서 준정적인 균열성장이 실험적 및 수치적으로 연구되었다. 실험에 의하여 얻어진 균열전파방향은 해석적인 결과에서 구한 것과 같이 x 축방향으로 향한다. I형과 III형호상작용은 균열이 일정하게 성장한 후 명백히 I형에 의하여 지배되는 경향을 나타낸다. 이것은 I형이 혼합형상황에서 명백히 지배적인 방식이라는것을 의미한다. I/III혼합형실험과 유한요소모의에서 얻어진 짐-변위선도는 비교적 잘 일치한다.

참 고 문 헌

- [1] 지동환; 파괴력학, 김일성종합대학출판사, 5~226, 주체101(2012).
- [2] M. W. Lan et al.; Eng. Fract. Mech., 74, 2498, 2007.
- [3] Y. Li et al.; J. Mater. Process Technol, 210, 1858, 2010.
- [4] C. Xin et al.; Int. J. Fract., 189, 59, 2014.
- [5] J. Alfaiate et al.; Eng. Fract. Mech., 69, 661, 2002.

주체109(2020)년 12월 5일 원고접수

Experimental Study on Tension-torsion Mixed-mode Tearing of Thin Sheet Specimens

Ri Chol Myong, Ji Tong Hwan

We conducted an experimental study and finite element simulation to characterize the stable crack growth under I/III mixed-mode loading condition, thus confirmed the existence of a good correlation between the measured load-displacement and the numerically predicted response.

Keywords: tension-torsional mixed mode loading, mixed tear