

혼합모드하에서의 레일강의 파괴거동

Fracture Behavior of Rail Steel under Mixed Mode Loading

장동일* · 김성훈**

Chang, Dong Il · Kim, Sung Hoon

Abstract

Actual load acting on rail surface in the track is the combined mode loading due to the contact rolling load of the wheels. To investigate the fracture behavior on rail steel under combined modes I and II, fracture tests were performed by using the test jigs and fracture specimen which were designed by Richard. The analysis results of experimental fracture data were compared with various fracture criteria that have been introduced for determination of the crack propagation direction and the critical stress of fracture of a crack submitted to a mixed mode loading. From the results, it was shown that the actual crack propagation direction of rail steel agree with the crack propagation directions predicted by maximum tangential stress criterion and strain energy density criterion, and that fracture criterion follows principal strain criterion.

요 지

열차 바퀴의 접촉하중에 의해 레일이 받는 하중형식은 모드 I과 모드 II가 조합된 혼합모드 하중 상태로서 본 연구에서는 레일강의 피로파괴거동을 규명하기 위해 Richard가 개발한 혼합모드 파괴시험편 및 시험 지-그(Jig)를 이용하여 파괴시험을 실시하였으며 그 결과로부터 혼합모드에 대한 응력 강도계수의 상관관계를 이용하여 균열성장경로를 평가하고 기제안된 다양한 파괴기준을 비교하였다. 그 결과, 레일강의 균열성장경로는 최대원주응력설과 변형에너지밀도설을, 파괴기준은 주변형률설을 따름을 알 수 있었다.

1. 서 론

실제의 기계, 토목구조물에 존재하는 결함이나 균열은 일반적으로 복잡한 부하조건하에 있으며 파괴역학적 견지에서 보면 균열열림형(모드 I)과 미끄러짐형(모드 II) 그리고 비틀림형(모드 III)의 조합

하중, 즉 혼합모드하에서의 부하응력을 받고 있다.⁽¹⁾ 따라서 파괴는 구조물의 복잡한 기하학적 형상이나 하중형태에 의해 다양한 양상을 띄고 있으므로 혼합모드에 의한 파괴역학적 개념을 무시한 구조물의 설계나 수명예측 그리고 안전성의 평가는 불안정하거나 과대안정으로 되기 쉽다.

혼합모드하에서의 피로파괴거동에 관한 연구의 대부분은 초기균열 성장방향과 파괴조건 그리고 균

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 교수, 공학박사

** 정희원 · 쌍용양회 연구개발본부 책임연구원, 공학박사

열성장경로, 성장속도 등이다. 지금까지 제안된 혼합모드 파괴조건에 관한 연구를 살펴보면 Erdogan 과 Sih⁽²⁾는 최대원주응력 파괴조건을, Hussain 등⁽³⁾은 최대에너지해방율에 근거한 G-파괴조건을 제안하였으며, Sih^(4,5)는 균열선단의 변형에너지밀도가 최소가 되는 방향으로 균열이 성장하고 재료상수인 임계값에 도달하면 균열이 성장한다는 S-파괴조건을 제안하였다. 한편, Theocaris와 Andrianopoulos^(6,7)는 변형에너지 밀도의 체적변화 성분에 근거한 T-파괴조건을 도입하였고, Papadopoulos^(8,9)는 응력텐서의 determinant를 사용한 Det.-파괴조건을 제안하였다. 이외에도 Fisher 와 Goldner⁽¹⁰⁾에 의한 주변형을 파괴조건, Yu⁽¹¹⁾에 의한 J적분에 근거한 이론 등 많은 파괴조건이 제안되었다. 한편 다양한 재료의 실험적 연구결과에 의하면 재료에 따라 파괴거동은 서로 상이하며 하나의 파괴기준에 의해 규명되지 않음이 보고되고 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾

본 연구에서는 국내에서 공용중에 있는 철도용 레일에 대해 모드 I에서 모드 II에 이르는 혼합모드 조건하에서 파괴시험을 행하여 그 분석 결과로부터 파괴역학적 개념에 의한 균열성장경로를 평가하고 기 제안된 파괴기준과 비교하였다.

2. 파괴 기준

균열선단에서의 혼합모드 응력상태는 균열열림형 응력확대계수 K_I 과 미끄러짐형 응력확대계수 K_{II} 로 특징지어진다. 이를 사용하여 응력 또는 에너지항을 도입함으로써 혼합모드하에서의 초기균열 성장방향과 성장조건을 결정하는 많은 파괴조건이 제안되었다.

2.1 최대원주응력설(Maximum Tangential Stress Criterion)

최대원주응력설은 혼합모드하에서의 균열성장이 원주방향의 최대인장응력과 직각인 방향으로 일어난다고 가정한다.⁽²⁾ 균열선단의 응력장을 극좌표로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left\{ K_I (1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{II} \tan \frac{\theta}{2} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left\{ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right\}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \{ K_I \sin \theta + K_{II} (3 \sin \theta - 1) \}$$

σ_r 과 σ_θ 는 $\tau_{r\theta}=0$ 일 때 주응력이 되며, 이때의 균열성장각도 θ_m 은 식 (2)와 같다.

$$\left(\tan \frac{\theta_m}{2} \right)_{1,2} = \frac{K_I}{4K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \quad (2)$$

2.2 탄성 변형에너지 밀도설(S-Criterion)

탄성변형 에너지밀도에 근거하여 Sih에 의해 제안된 혼합모드 파괴조건으로 단위체적당의 에너지 변화량 dW/dV 는 일반적으로 식 (3)과 같이 주어진다.^(4,5)

$$\frac{dW}{dV} = \left\{ \frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \frac{1}{2G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\} \quad (3)$$

여기서, E는 영계수(young's modulus), G는 전단탄성계수(shear modulus), 그리고 ν 는 포아슨비이다.

균열선단 끝에서 혼합모드 응력장에 대해 $\sigma_x = \sigma_{xI} + \sigma_{xII}$ 이므로

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (4)$$

로 표현되며, 이를 식 (3)에 대입하면 dW/dV 는 식 (5)와 같다.

$$\frac{dW}{dV} = \frac{S(\theta)}{r} = \frac{1}{r} (a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2) \quad (5)$$

$$a_{11} = \frac{1}{16G} [(1 + \cos \theta)(k - \cos \theta)]$$

$$a_{12} = \frac{1}{16G} \sin \theta (2 \cos \theta - k + 1)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16G} [(k+1)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta)(3 \cos \theta - 1)]$$

$$k = \begin{cases} 3-4\nu & : \text{Plane strain} \\ \frac{3-\nu}{(1+\nu)} & : \text{Plane stress} \end{cases}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ν : poisson's ratio

혼합모드 균열문제에서 균열은 변형에너지 밀도가 최소로 되는 방향으로 성장하며, 그때 성장각 θ_m 은 식 (6)의 조건을 따르고, 변형에너지 밀도계수 S 가 임계값 S_c 보다 클 때 성장한다고 가정한다.

$$\left. \frac{dS}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_m} = 0; \quad \left. \frac{d^2S}{d\theta^2} \right|_{\theta=\theta_m} > 0 \quad (6)$$

2.3 최대 에너지 해방율설(G-Criterion)

최대 에너지해방율 파괴조건은 에너지해방율이 최대로 되는 방향으로 균열이 성장한다고 가정한다. 그림 1과 같이 혼합모드하중하에서 균열이 각 γ 의 방향으로 무한소 길이 Δa 만큼 성장했을 때의 에너지해방율 $G(\gamma)$ 은 식 (7)과 같다.^(16,17)

$$G(\gamma) = \frac{1-\nu^2}{E} \{K_I^2(\gamma) + K_{II}^2(\gamma)\} + \frac{1}{E} K_{III}^2(\gamma) \quad (7)$$

Hussain⁽³⁾에 의해 유도된 모드 I 및 모드 II 응력확대계수 K_I , K_{II} 와 Sih⁽¹⁸⁾에 의해 유도된 모드 III 응력확대계수 K_{III} 를 식 (7)에 대입하면

$$G(\gamma) = \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \left(\frac{\pi-\gamma}{\pi+\gamma} \right)^{2/\pi} \left\{ \left(\frac{2}{3+\cos^2\gamma} \right) [K_I^2(1+3\cos^2\gamma) + 4K_I K_{II} \sin 2\gamma + K_{II}^2(9-5\cos^2\gamma)] + \frac{1}{1-\nu} K_{III}^2 \right\} \quad (8)$$

로 표현되며, 균열성장각 $\gamma = 10\gamma_0$ 에서 최대에너지해방율이 임계값에 도달할 조건은

$$\left(\frac{\pi-\gamma_0}{\pi+\gamma_0} \right)^{2/\pi} \left\{ \left(\frac{2}{3+\cos^2\gamma_0} \right) [K_I^2(1+3\cos^2\gamma_0) + 4K_I K_{II} \sin 2\gamma_0 + K_{II}^2(9-5\cos^2\gamma_0)] + \frac{1}{1-\nu} K_{III}^2 \right\} = K_{Ic}^2 \quad (9)$$

이 되고, 균열성장각도 γ_0 는 식 (10)으로부터 구할 수 있다.

$$\left(\frac{2}{3+\cos^2\gamma_0} \right) \left\{ \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{\pi-\gamma_0}{\pi+\gamma_0} - \frac{2\gamma_0}{\pi^2-\gamma_0^2} + \frac{2\sin 2\gamma_0}{3+\cos^2\gamma_0} \right) K_{III}^2 = 0 \right.$$

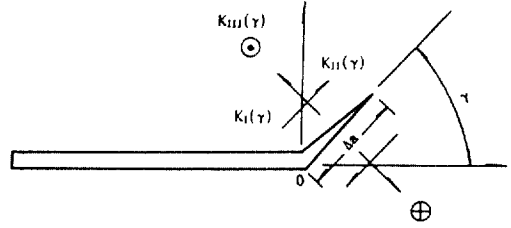


그림 1. A small Branched Crack under Mixed Mode

$$\begin{aligned} & [K_I^2(1+3\cos^2\gamma_0) + 4K_I K_{II} \sin 2\gamma_0 + K_{II}^2(9-5\cos^2\gamma_0)] \\ & - 3K_I^2 \sin \gamma_0 + 8K_I K_{II} \cos^2 \gamma_0 + 5K_{II}^2 \sin 2\gamma_0 \\ & + \frac{1}{1-\nu} \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{\pi-\gamma_0}{\pi+\gamma_0} - \frac{2\gamma_0}{\pi^2-\gamma_0^2} \right) K_{III}^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 Determinant-설

Det.-파괴조건은 K_I 및 K_{II} 에 의해 지배되는 혼합모드 응력장에서 균열의 초기성장방향 θ_m 은 응력텐서의 determinant가 최대가 되는 방향이다. 이를 식으로 표시하면 식 (11)과 같다.^(8,9)

$$\left. \frac{\partial \text{Det}(\sigma_{ij})}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_m} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 \text{Det}(\sigma_{ij})}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_m} < 0 \quad (11)$$

균열이 성장하기 위한 조건은 이 값이 어떤 임계값

$$\text{Det}(\sigma_{ij}) = \text{Det}(\sigma_{ij})_{cr} \quad (12)$$

에 도달할 때 균열이 성장한다는 것이다. 여기서 $\text{Det}(\sigma_{ij})_{cr}$ 은 재료에 따른 상수로서, $\text{Det}(\sigma_{ij})$ 는 식 (13)과 같다.

$$\text{Det}(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{vmatrix} \quad (13)$$

2.5 주변형율설(Principal Strain Criterion)

주변형율설은 최대주변형율과 그에 대응하는 응력확대계수가 최소로 되는 방향으로 균열이 성장한다는 가정하에 Bach의 가설을 근거로 한 파괴기준이다.

주법선응력에 있어 균열선단 응력장에 대한 개략해의 특이항만을 사용하고 인장하중하에서 Griffith의 경사진 균열모델을 사용하면 식 (14)를 얻는다.

표 1. Chemical composition of material (%)

Composition Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Sn	Ti
NKK (used)	0.61	0.22	0.76	0.007	0.003	0.006	0.02	0.06	0.003

표 2. Mechanical Properties of Material

Properties Materials	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (MPa)	Vicker's Hardness
NKK (used)	469.4	889.84	11.3	272222	24.0

$$\sigma_v = \frac{K(1+\nu)}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ (1/2 - \nu) \sqrt{[2(1+\cos\theta) - 4M \sin\theta + 2M^2(1-\cos\theta)]} + \frac{1}{2} \sqrt{[(1/2)(1-\cos 2\theta) + 2M \sin 2\theta + M^2/2(5+3\cos 2\theta)]} \right\} \quad (14)$$

여기서, $M = K_I/K_{II}$ 은 대칭계수(symmetry factor)이며 임의의 M 에 대한 응력확대계수 K_v 는 식 (15)와 같다.

$$K_v = [\sqrt{2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{r\sigma_v}] / [(1+\nu)(1-2\nu)]$$

균열은 $K_v(\theta_m)$ 가 임계응력확대계수 K_{IC} 에 도달될 때 성장한다는 가정하에서 임계인장하중은 식 (16)과 같다.

$$\bar{P}_C = P_C / [(1+\nu)(1-2\nu)] = K_{IC}(\sqrt{\pi a} \cdot m \cdot \sin^2 a) \quad (16)$$

여기서,

$$m = (1+\nu)(1/2 - \nu) \sqrt{[2(1+\cos\theta_0) - 4M \sin\theta_0 + 2M^2(1-\cos\theta_0)]} + 1/2 \sqrt{[(1/2)(1-\cos 2\theta_0) + 2M \sin 2\theta_0 + M^2/2(5+3\cos 2\theta_0)]}$$

3. 재료 및 실험방법

3.1 공시재료 및 시험편

실험에 사용된 공시재료는 1980년도에 제작되어 경부선 철도에서 공용중에 피로파괴된 NKK산 60 Kg급 레일강으로서 그 화학적 성분 및 기계적 성질은 표 1, 표 2와 같다.

공시재료로부터 시험편의 채취는 그림 2와 같으며

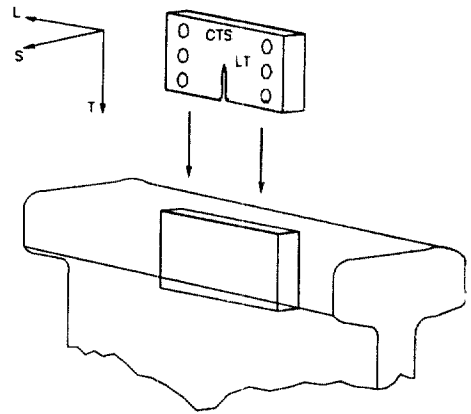


그림 2. Orientation of Specimen

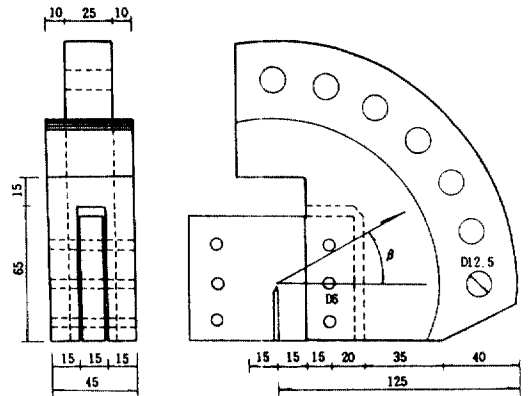


그림 3. Test Jig for Mixed Mode Fracture Test

이는 횡균열 찢어짐(Transverse Fissure)에 대응한다. 혼합모드시험편은 아직까지 규격화 되어 있지 않으며 많은 연구자에 의해 전단과 인장이 공용될

수 있도록 설계, 제작되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 Richard⁽¹⁹⁾가 개발한 시험편을 사용하였으며 시험 지-그는 그림 3과 같이 시험편에 작용시킬 하중의 방향 변화가 용이하도록 15도 간격으로 핀 구멍을 뚫어 1축 인장 피로시험기에 연결시킴으로서 K_{II}/K_I 의 조절이 간편하도록 하였다. 한편, 편에 작용하는 하중 작용선이 예균열선단 끝과 일치하도록 그림 4와 같은 혼합모드 파괴시험편(compact tension & shear specimen : CTS로 명명함)을 제작하였다. 혼합모드 파괴시험편과 시험 지-그가 장착된 모습은 사진 1과 같다.

3.2 실험방법

혼합모드 파괴시험편의 인공 노치형상은 ASTM E 647-91⁽²⁰⁾의 규정을 적용하였으며 모든 CTS시험편은 표 3에 나타난 최대하중과 응력비를 사용하여 시험편 중앙까지 피로 예균열을 주었다. 본 실험에

서는 CTS시험편을 시험 지-그에 장착하고 시험 지-그의 핀 위치를 바꾸면서 하중 방향각을 0° , 30° , 60° 그리고 90° 로하여 혼합모드 파괴실험을 실시하였다. 각 시험편에 대한 초기균열도입 및 실험조건은 표 3에 나타냈으며 하중제어방식에 의한 피로 및 정적하중을 가하여 실시하였다.

한편, 본 시험편에 대한 응력확대계수는 식 (17)을 사용하여 구하였으며 이는 Richard가 유한요소해석의 결과에 의해 제안된 식으로서 K_I , K_{II} 뿐만 아니라 K_{Ic} , K_{IIc} 를 결정할 수 있다.⁽²¹⁾

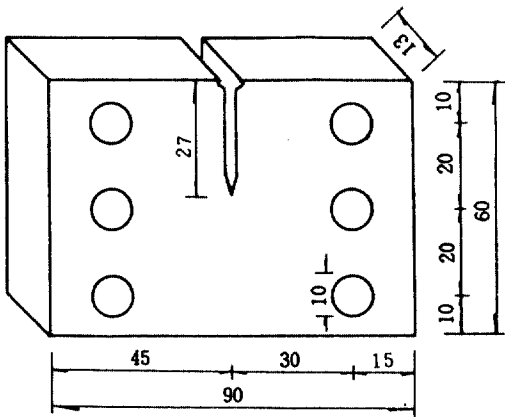


그림 4. Compact Tension and Shear Specimen

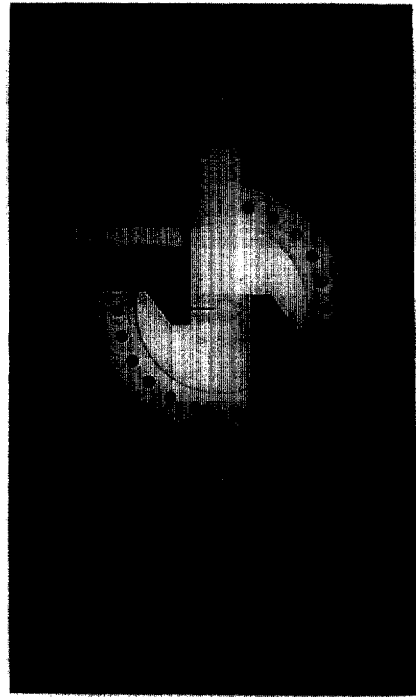


사진 1. Mixed Mode Fracture Test Setup

표 3. Fracture Test Condition for CTS Specimen

Specimen No.	Precracking					Main Test		Remark
	Pmax (cycles)	Length (mm)	R	Temp. (°C)	Freq. (Hz)	Load Rate (FS/sec)	Load Angle (β)	
FFSP1	A(60050)→B(190900)→C(230350)	31.80					0	A=20.6 kN
FFSP2	A(49730)→B(352630)→C(490000)	30.50	0.2	20	15	0.01	30	B=14.7 kN
FFSP3	A(90020)→B(232030)→C(321000)	31.26					60	C=7.84 kN
FFSP4	A(114080)→B(263010)→C(84890)	31.68					90	

*FS(full scale): 49 kN

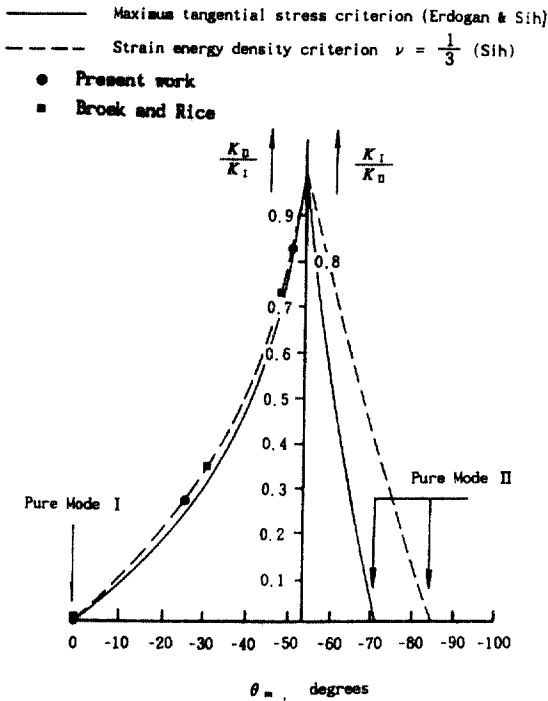


그림 6. Crack Growth Angle for Mixed Mode Loading

$K_{II} = \infty$ 인 경우에 있어 즉, 순수모드 II인 경우에 있어서 본 실험에서는 55.7° 그리고 Broek와 Rice의 실험에서는 56° 로서 파괴기준에 의한 균열성장각도 70.5° 와는 상이한 값을 나타내고 있으나 두 실험 결과는 거의 같은 균열성장각도를 갖고 있다. 이는 모드 I 하중이 완전히 배제된 순수모드 II 하중조건이 형성되지 않음에 기인한다고 사료된다. 한편, 응력확대계수비 K_{II}/K_I 이 ∞ 에 접근함에 따라 균열 성장 각도는 커지고 K_I 이 감소함에 따라 K_{II} 는 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다.

혼합모드하에서 거시적인 균열성장으로 부터 초기에 균열이 성장한 후, 모드 II 응력확대계수는 곧 0으로 떨어지며, 따라서 균열은 모드 II 하중이 제거되는 경로 즉, 최대 주응력에 직각인 방향으로 성장함을 알 수 있다. 이와같은 가정에 의해 제안된 최대원주응력설⁽²⁾과 Sih에 의해 제안된 최소변형에너지 밀도설^(4,5)에 의한 균열성장경로를 K_{II}/K_I 의 함수로 도식화하면 그림 6과 같다.

이를 살펴보면 균열성장 각도가 -53.13° 이하에서 최대원주응력설과 최소변형에너지 밀도설에 의한

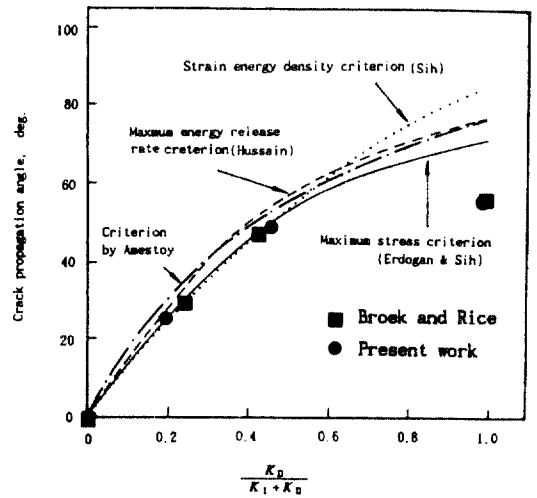


그림 7. Direction of Crack Growth as a Factor of $K_{II}/(K_I + K_{II})$

균열성장 각도는 실질적으로 같고 본 연구 결과와 잘 일치하고 있으며 그 이상의 성장각도에서는 최소변형에너지 밀도설에 의한 성장각도가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 한편, 위에서 기술한 파괴기준 이외의 다양한 기준에 대한 균열성장 경로를 $K_{II}/(K_I + K_{II})$ 함수로 나타내면 그림 7과 같다.

그림 7을 살펴보면 $K_{II}/(K_I + K_{II})$ 가 0.5 이하에서 최대원주응력설과 최소변형에너지 밀도설의 균열성장경로는 같은 경향을 나타내고 있으며, 그 외의 기준들은 더 큰 균열성장경로를 나타내고 있다. 한편, 본 연구에서의 파괴실험결과도 $K_{II}/(K_I + K_{II})$ 가 0.5 이하에서는 최대원주응력설과 최소변형에너지 밀도설에 의한 파괴기준들과 거의 같은 결과를 나타내고 있어 이 범위에서는 레일강의 균열성장경로를 잘 만족시키고 있다. 그러나 그 이상에서는 이론치와 본 실험의 결과치가 상이함을 알 수 있다.

4.2 파괴기준 비교, 검토

혼합모드하에서의 응력확대계수로부터 파괴기준을 비교, 평가하기 위해 하중작용 방향각이 0° 일 때의 응력확대계수를 파괴인성 K_{IC} 로 하여 혼합모드하에서의 응력확대계수 K_I , K_{II} 의 상호 관련 비를 정리하여 표 6에 나타냈다. 한편, 기 제안된 파괴기준과 본 실험결과로부터 K_I/K_{IC} 와 K_{II}/K_{IC} 와의 관계를 도식적으로 나타내면 그림 8과 같다. 이를 살

- 27, 1987, pp. 643-652.
9. Papadopoulos, G., "The Influence of Geometry of Edge-Cracked plates on Crack Initiation", *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 26, 1985, pp. 945-954.
 10. Fisher, K., and Goldner, H., "On The Formulation of a Principal Strain Criterion in Crack Fatigue Mechanics", *Int. J. of Fracture.*, Vol. 17, 1981, pp. R3-R6.
 11. Yu, B.Y., "A Discussion on the Mixed Mode J-Integral Fracture Criterion", *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 16, 1985, pp. 156-162.
 12. Shah, R.C., "Fracture under Combined Modes in 4340 Steel", *ASTM STP 560*, American Society for Testing and Materials, 1974, pp. 29-52.
 13. Yokobori, T., Maekawa, I., Yokobori, A.T., Jr., Sato, K., and Ishizaki, Y., *Proc. Int. Symp. on Absorbed Specific Energy and Strain Energy Density Criterion*, G.C. Sih *et al.*, Eds., 1981, pp. 45.
 14. Awaji, H., and Sato, S., "Combined Mode Fracture Toughness Measurement by the Disk Test", *J. Engng. Mat. Tech.*, Vol. 100, 1978, pp. 175-182.
 15. Sato, K., "Fracture of Building Materials under Mixed Mode I and II", *JSME(JAPAN)*, Vol. 39, No. 447, 1989, pp. 62-66.
 16. Irwin, G.R., "Analysis of Stress and Strain near the end of Crack Traversing a Plate", *J. Appl. Mech.*, Vol. 24, 1957, pp. 361-364.
 17. Bueckner, H.F., "The Propagation of Cracks and the Energy of Elastic Deformation", *Trans.*, ASME, 80, 1958, pp. 1225-1230.
 18. Sih, G.C., "Stress Distribution near $c=0.75$ or 2 Internal Crack Tip for Longitudinal Shear Problems", *J. of Appl. Mech.*, Vol. 32, 1965, pp. 51-58.
 19. Richard, H.A., "A New Compact Shear Specimen", *Int. J. of Fracture Mech.*, Vol. 17, 1981, pp. R105-R107.
 20. ASTM, "Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metal Test Methods and analytical procedures., E 647-91", 1992, pp. 674-701.
 21. Richard, H.A., "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture", *Proc. Int. Conf. on Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures*, Freiburg, 1983, pp. 3337-3344.
 22. Broek, D., and Rice, R.C., "Fatigue Crack Growth Properties of Rail Steels", Battelle Report to DOT/TC, 1976, pp. 56-94.

(接受 : 1994. 3. 12)