

## 균열개폐구 거동을 고려한 피로균열전파 해석 모델의 개발: 수치계산

김창욱\*, 노인식\*\*, 도관수\*\*\*, 신병천\*\*\*\*

### Development of Analytical Simulation Model for Fatigue Crack Propagation: Numerical Examples

C. W. Kim\*, I. S. Nho\*\* K. S. Do\*\*\* and B. C. Shin\*\*\*\*

#### 요 약

균열 개폐구 현상을 고려한 피로균열전파 해석 모델을 개발하였고, 그 내용은 동시 게재되는 김창욱등(2001)에서 상세히 기술하였다. 본 보에서는 전 보에서 개발한 전파모델의 변동하중 하에서의 거동을 검증하기 위하여 다양한 응력비 및 과대 및 과소 하중 이력 하의 유효응력 및 이에 기초한 균열전파수명을 계산하고, 이 계산 결과들을 이미 발표되어 있는 다른 논문들의 실험결과와 비교하였다. 계산결과들은 실험과 잘 일치하고 있었다.

※Keywords: fatigue(피로), fracture mechanics(파괴역학), variable loads(변동하중), crack closure(균열폐구)

#### Abstract

The development of a crack propagation simulation model in consideration of crack closure behavior was discussed in the accompanying paper by the authors, Kim et al(2001). To verify crack propagation behavior under variable amplitude loading based on the model, calculations of effective crack driving stresses and corresponding propagation lives are carried out for load spectrums with various stress ratios, overload and underload. Good agreement is confirmed between test results in the literatures and simulations using the developed model.

---

접수일자: 2001년 3월 30일, 승인일자: 2001년 7월 19일

\*정회원, 한국선급 선체기술부 화물선팀장 (E-mail: cwkim@krs.co.kr)

\*\*정회원, 충남대학교 선박해양공학과 부교수 (E-mail: isnho@cnu.ac.kr)

\*\*\*정회원, 한국선급 선체기술부 탱커팀 (E-mail: ksdo@krs.co.kr)

\*\*\*\*정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부장 (E-mail: beshin@mailgw.kimm.re.kr)

1. 서 언

Paris(1957)가 선형파괴역학을 피로균열전파에 도입하고, Elber(1971)가 인장 외력하에서도 균열이 폐구하는 현상을 실험적으로 보고한 이래 균열개폐구 거동이 피로균열전파 수명을 지배한다는 것은 잘 알려져 있고, 이의 규명을 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이론적으로 피로균열전파 해석을 위해서는 이러한 균열개폐구 거동의 고려가 필수적이다. 전보(김창욱등 2001)에서 균열진전에 따라 wake zone에 잔류 인장소성 변형층을 남기도록 Dugdale 모델(1960)을 수정 개량한 Newman(1981)의 모델과 균열전방의 응력 재분배 및 재료를 완전 탄소성으로 고려하여 수정 개량한 豊貞등(1982)(1994)의 모델을 기초로 개발한 피로균열전파 해석 모델을 이용하여, 일정진폭 하에서의 개구변위, 게이지 길이, 응력분포 상태를 정성적 및 정량적으로 잘 표현할 수 있음을 보였다. 또한 Newman이 제안한 개구응력 및 균열선단 봉요소의 응력이 영(zero) 및 재료의 항복응력이 될 때의 외부 응력으로 정의된 탄성 및 소성 개구응력을 구하여 비교하였다.

본 논문에서는 다양한 하중상태에 대하여 개발한 피로균열전파 모델의 검증을 수행한 결과에 대하여 보고한다. 우선 2장에서는 전보의 일정진폭 하중에 대한 검증에 이어서, 단일 과대하중을 준 경우에 대하여 개구변위 및 응력상태 등의 고찰을 통하여, 개발된 모델이 균열성장 지연감속 현상을 정성적 및 정량적으로 설명할 수 있음을 설명한다. 3장에서는 평균응력의 영향을, 4장에서는 여러가지 형태의 과대 및 과소 하중을 도입한 하중이력 하에서의 균열진전에 유효한 응력 및 전파수명을 계산하였다.

계산결과들은 문헌(岡本太郎 1982)(加藤昭彦 1983)에 발표된 실험결과 및 계산 결과와 비교하였다.

2. 균열개폐구 거동(단일 과대하중)

계산에 사용된 하중이력과 재료정수를 Fig.1에

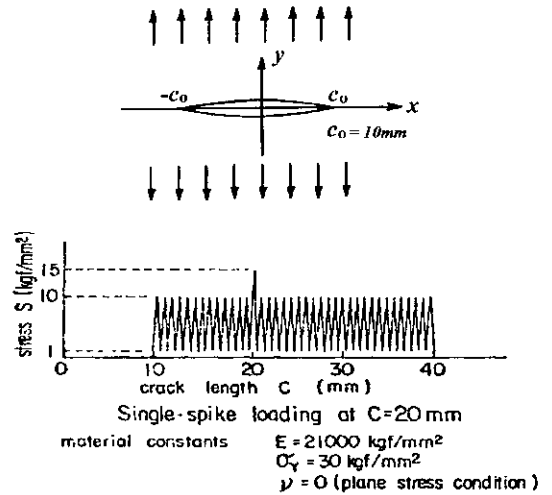


Fig.1 Loading histories as a function of crack length

나타내었다. Fig.2는 spike 하중 부하 직후의 균열진전 가속영역에 대한 결과로서, 최대하중시의 개구변위 및 게이지 길이를 보여주는 (a)를 보면, 豊貞등(1983)의 지적처럼 COD 분포는 균열전방 소성역에서 평평한 부분이 나타나고, wake zone의 균열선단부 근방에서 게이지 길이가 COD 값보다 꽤 작게되어 개구가 크게 되므로, 결국 균열 성장이 가속되고 있음을 잘 나타내고 있다. Fig. 3은 지연감속영역에 대한 결과로서, (a)의 wake zone의 게이지 길이 분포를 보면, 균열선단 부근에서 균열중앙에 비하여 꽤 커져, 균열진전이 감속되고 있음을 잘 나타낸다.

Fig.2(b) 및 Fig.3(b)를 보면 최소하중시의 개구 양상의 분포도, 가속영역에서는 균열선단 부근에서의 개구량이 wake zone 중간부분에서의 개구량보다 커져있고, 지연감속 영역의 경우에는 개구량이 선단에서 멀어질수록 완만히 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 각 하중 사이클마다 받은 하중이력에 대응하여 wake zone 및 소성역사이의 상호작용으로 인한 균열개폐구거동으로 인하여, 변동하중하의 피로균열전파거동을 복잡하게 만든다.

응력분포는 Fig.2(c)와 같이 가속역에서의 최소하중시에 wake zone에서 압축응력을 분담하지

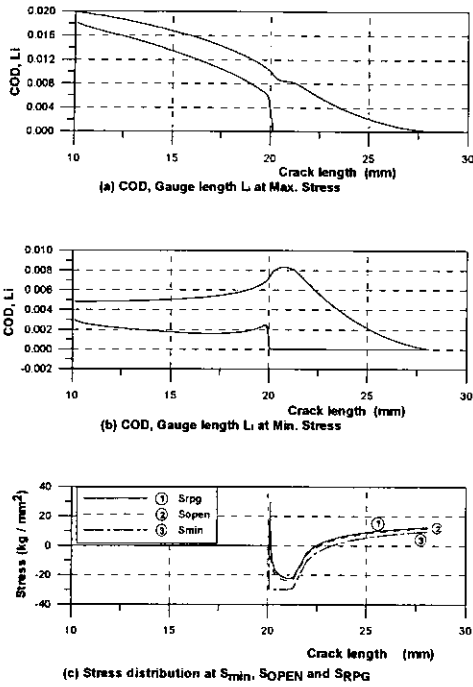


Fig.2 Crack Behavior 1 ( $c=20.13\text{mm}$ ) (Acceleration Stage)

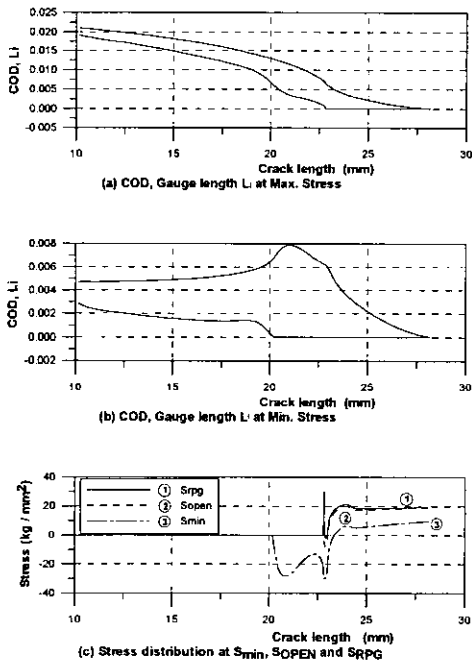


Fig.3 Crack Behavior 2 ( $c=22.82\text{mm}$ ) (Delayed Retardation)

못하고 있음을 알 수 있고, 지연감속영역에서의 응력분포인 Fig.3(c)를 보면 wake zone에서의 압축응력 분담은 없으나, 소성역 내의 응력분포의 기울기에 심한 변화를 보인다. 따라서 유효 균열진전 응력을 계산할 때 균열전방 소성역 내의 응력 재분포를 반드시 고려해야함을 알 수 있다.

이상과 같이 개발된 피로균열전파 모델은 단일 과대하중하의 균열전파거동을 정성적 및 정량적으로 잘 표현하고 있는 것으로 생각된다.

전보에서 언급한  $S_{Newman}$ ,  $S_{RPG}$  및  $S_{OPEN}$  값을 계산한 결과를 균열길이의 함수로서 Fig.4에 나타내었다. Fig.4에는 일정진폭의 하중을 부과다가 균열길이  $c=20\text{mm}$ 의 시점에서 Fig.1에 보인 단일 spike 하중을 작용시킨 경우에 대한 계산 결과를 도시하였다. spike 하중 작용 직후에 Newman의 개구응력( $S_{Newman}$ ), 豊貞등의 소성개구응력( $S_{RPG}$ ) 및 탄성개구응력( $S_{OPEN}$ ) 값 모두 불연속적으로 감소하였다가 균열진전에 따라 다시 급상승하여 일정진폭하의 유효응력 값보다 훨씬 큰 값에서 최대치를 보인 후, 점차 감소하여 일정진폭하의 값으로 접근하여 간다.

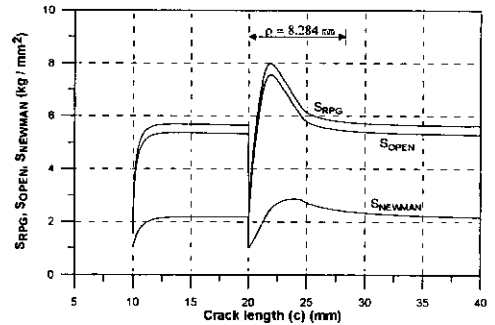


Fig.4 Comparison of various effective stresses (uniform-spike-uniform load)

이렇게 spike 하중의 영향은, 균열이 spike 하중에 의하여 형성된 인장 소성역을 탈출할 때까지 크게 나타나며 이후에는 점차 일정진폭하중하의 거동을 보인다고 설명할 수 있다. 다만, wake zone에서의 접촉만을 없게 하는 Newman의 개구응력  $S_{Newman}$ 은 균열전방 소성역에서의 응력

재분포를 고려하고 있지 않아 다른 두 값보다 훨씬 작은 값을 주고 있으므로 감소효과를 꽤 작게 추정하게 되며, 실험 결과 등과는 많은 차이를 보일 것으로 예측되며, 실제로 Newman은 문헌(1981)에서 이를 보정하기 위하여 큰 소성구속계수(2.3)를 사용하고 있다. 따라서 향후 피로균열전파 거동의 해석에서는  $S_{RPG}$  나  $S_{OPEN}$  을 사용하는것이 바람직하다.

참고로 Fig.4중에 스파이크 하중에 의해 형성된 인장 소성역( $\rho = 8.284 \text{ mm}$ )을 표시하였다.

이러한  $S_{RPG}$  나  $S_{OPEN}$  의 변화는 과대하중을 받은 직후의 진전 가속현상 및 지연감속현상에 대응한다고 생각된다.

### 3. 평균 응력의 영향

岡本등(1982)이 중앙판통 노치를 갖는 Center Cracked Tension(CCT) 시험편으로 실시한 실험결과와 비교하기 위하여, 같은 조건으로 계산을 수행하였다. 그가 실시한 실험에 사용된 재료 특성 및 시험 조건을 Table 1에 나타내었다. 시험에 관한 상세한 내용은 참고문헌(岡本太郎 1982)에 나와 있다.

실험 내용을 대별하면, 일정 응력비의 일정 응력진폭 피로균열전파시험과 일정응력 부하 도중에 과대·과소하중의 영향을 조사하기 위하여, 그 조합을 과대하중만, 과소하중만, 과소·과대의 순, 과대·과소의 순 등 4종류의 부하형태를 채용하였다. 과대하중이 그 부하직후에 가속효과와 그후 지연효과로서 균열전파수명에 크게 영향을 준다고 알려져 있으므로, 이 영향을 파악하기 위한 하중 조합을 채용하고 있다.

이들 시험과 비교하기 위하여 실험과 같은 조건으로 전 보에서 개발한 균열 개폐구 모델에 의한 계산을 실시하였다.

계산에 이용된 피로균열전파 해석 모델은 전 보(김창욱등 2001)에서 이미 보고한 바와 같이 균열 전방 및 균열 면의 wake zone에 봉 요소를 배치한 모델이다. 여기서 각 봉 요소의 재료는 완전탄소성체를 가정하였고, 봉 요소의 변위연속

**Table 1** Material properties and test condition(岡本太郎 1982)

Yield stress	Tensile stress	Elongation	Reduction of area(%)
31.0	48.3	31.5	70.8

Specimen No	TEST	Stress ratio	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Spike stress		Crack length(mm) (at a spike-loading)
				Max	Min	
CCT-2	Single spike load	0.3	3.0~10.1	13.7	-	22.8
CCT-3	Single spike load	0.5	5.46~10.93	-	0	30.4
CCT-4	Single & double spike load	0.3	3.0~10.11	13.7	-	15.56
				16.4	0	23.37
CCT-8	Double spike load	0.4	3.9~ 9.78	12.7	0	20.6

성 및 응력 평형은 Dugdale 모델을 만족하도록 되어있다. 또 봉 요소의 게이지 길이는 최초의 소성변형에 의하여 정해지며, 그 후 부하되는 하중에 따라 소성변형을 할 때마다 그 변형량에 따라 변화한다. 또 봉 요소의 응력은 균열 전방에서는 인장, 압축을 모두 분담할 수 있고, wake zone에서는 압축 응력만을 분담하도록 연립 방정식을 풀 때 제한조건으로 부과되며, 이러한 연립방정식을 풀기 위하여 Gauss-Seidel법을 채용하였으며 매 반복계산시마다 제한조건을 부과하여 수렴시킴으로써 해인 각 봉요소의 응력을 구할 수 있다.

그 결과, 이 봉 요소 중 균열선단의 요소가 재료의 항복응력에 달한 시점의 외부 응력을 豊貞등(1994)에 따라  $S_{RPG}$  로 부르기로 하면,  $S_{RPG}$  값 이상의 하중에서는 균열선단에서 불가역적인 균열전파에 기여하는 에너지가 저장된다고 상정할 수 있으므로, 이에 대응하는 응력범위를 균열전파에 유효한 응력범위  $\Delta S_{eff} (= S_{max} - S_{RPG})$ 로서 채용할 수 있다. 또한 비교를 위하여 균열 선단위치의 요소 응력이 영으로 되는 시점, 즉 균열이 탄성적으로 개구한다고 생각되는 시점의 부하응력  $S_{OPEN}$  을 같이 구하였다. 어느 경우든, 균열 전방부는 wake zone의 개폐구에 의하여 상호 간섭하면서 거동하므로, 균열선단부의 양상에 따라 균열전파거동이 지배된다고 생각된다.

봉요소 배열의 상세 및 해의 수렴성 등에 대한 상세한 내용은 문헌(김창욱 2001)에 나와 있다.

계산에 사용된 응력비  $R$ 은  $-0.6, -0.2, 0, 0.2, 0.6$ 의 5가지 경우를 고려하였으며, 계산에 이용된 초기 균열길이는 어느 경우도 실험과 같이  $2a_0 = 20\text{mm}$ 로 하였다. 또한 상한 응력  $S_{max}$ 의 영향을 조사하기 위하여 그 크기를  $10, 16.13, 22.58 \text{ kgf/mm}^2$ 로 변화시켜 계산하고, 항복응력의 영향도 살피기 위하여 시험재와 같은  $31 \text{ kgf/mm}^2$  외에,  $50, 70 \text{ kgf/mm}^2$ 의 3가지 경우에 대하여 계산하였다. 상기의 계산 조건들은 비교를 위하여 문헌(岡本太郎 1982)과 동일한 조건으로 하고 있다.

또한 동일한 응력범위를 갖고 응력비만을 달리 하는 일련의 계산을 수행하여 응력비 효과가 균열 전진 유효응력에 미치는 영향을 조사하였다.

그 결과를 Table 2 및 Fig.5에 나타내었는데, Fig.5에는 RPG 응력만을 도시하였고, Table 2에는 RPG 응력( $S_{RPG}$ ), 탄성개구응력( $S_{OPEN}$ ) 및 Newman(1981)에 의한 개구응력( $S_{NEWMAN}$ )도 함께 나타내었다. Table 2의 각 유효응력범위는 Fig.5에서 균열전파 후 일정한

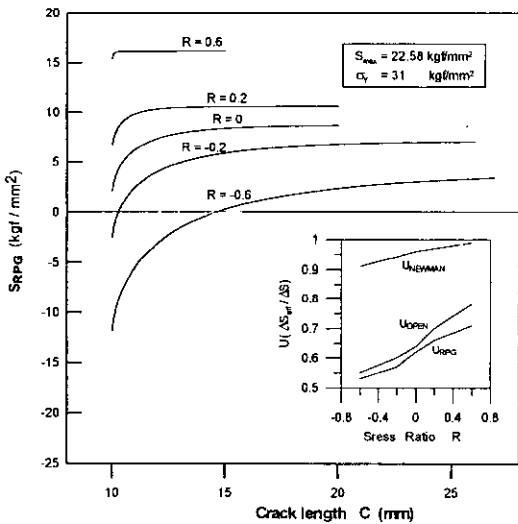


Fig.5(a) RPG stress variation at each stress ratio (case I)

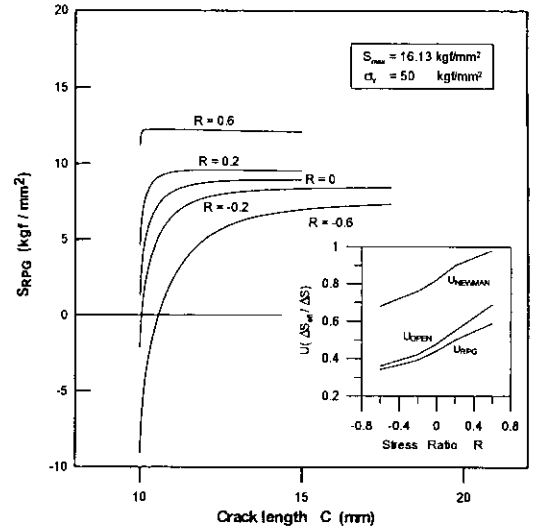


Fig.5(b) RPG stress variation at each stress ratio (case II)

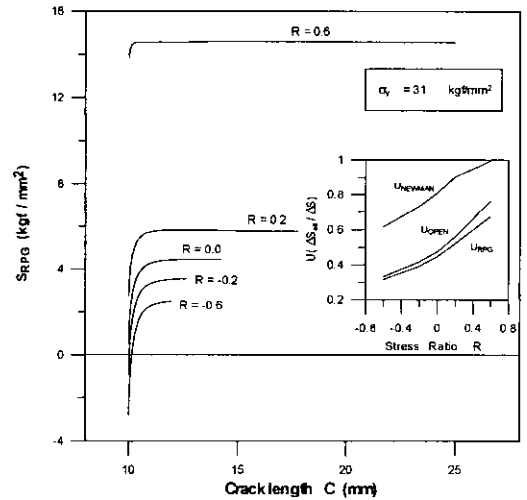


Fig.5(c) RPG stress variation at each stress ratio (case III)

값으로 안정되었을 때의 값들이다. Fig.5(a) 및 (b)는 문헌(岡本太郎 1982)에 발표된 시험 및 수치계산 결과와 잘 일치하고 있고, 개발된 수치 전파모델의 유용성이 검증된다. 균열 전진유효 응력 범위는  $\Delta S_{NEWMAN} > \Delta S_{OPEN} > \Delta S_{RPG}$ 의 순이었고, 따라서 Newman에 의한 결과는 실제보다 빠

**Table 2(a)** Effective stress range ratio,  $U$  (case I, Fig. 5(a))

$R$	$S_{max}$	$\Delta S$	$S_{mean}$	$\Delta S_{eff}$			$U$		
				RPG	OPEN	NEWMAN	RPG	OPEN	NEWMAN
0.6	22.58	9.03	18.06	6.43	7.12	9.0	0.71	0.78	0.99
0.2	22.58	18.06	13.54	11.95	12.69	17.69	0.66	0.70	0.97
0	22.58	22.58	11.29	13.94	14.66	21.71	0.62	0.64	0.96
-0.2	22.58	27.09	9.03	15.57	16.28	25.48	0.57	0.6	0.94
-0.6	22.58	36.12	4.51	19.18	19.81	32.9	0.53	0.55	0.91

**Table 2(b)** Effective stress range ratio,  $U$  (case II, Fig. 5(b))

$R$	$S_{max}$	$\Delta S$	$S_{mean}$	$\Delta S_{eff}$			$U$		
				RPG	OPEN	NEWMAN	RPG	OPEN	NEWMAN
0.6	16.13	6.45	12.90	3.87	4.47	6.36	0.59	0.69	0.98
0.2	16.13	12.90	9.67	6.56	7.13	11.64	0.50	0.55	0.90
0	16.13	16.13	8.06	7.21	7.77	13.36	0.44	0.48	0.82
-0.2	16.13	19.35	6.45	7.69	8.25	14.72	0.39	0.42	0.76
-0.6	16.13	25.80	3.22	8.8	9.34	17.59	0.34	0.36	0.68

**Table 2(c)** Effective stress range ratio,  $U$  (case III, Fig. 5(c))

$R$	$S_{max}$	$\Delta S$	$S_{mean}$	$\Delta S_{eff}$			$U$		
				RPG	OPEN	NEWMAN	RPG	OPEN	NEWMAN
0.6	20	8	16	5.39	6.1	7.96	0.67	0.76	0.995
0.2	10	8	6	4.18	4.47	7.23	0.52	0.55	0.904
0	8	8	4	3.55	3.78	6.46	0.44	0.47	0.808
-0.2	6.67	8	2.67	3.13	3.32	5.84	0.39	0.41	0.73
-0.6	5	8	1	2.51	2.65	4.92	0.31	0.33	0.615

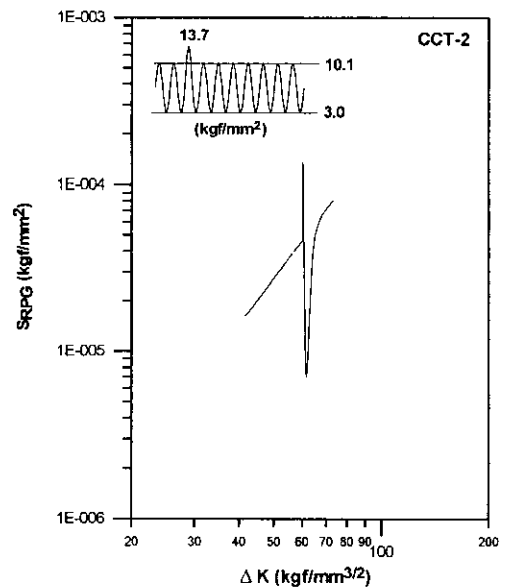
른 균열성장기 기대되는데, 이는 전보에서도 언급 하였듯이 균열전방 소성역에서의 응력 재분배 및 재료를 완전 강소성체로 취급한 결과라고 생각된다. 응력비와 각 유효응력에 의한 개구비를 도시 하면 Fig.5와 같이 되며, 응력비가 높을수록 개구 비가 커지며, 이는 기존의 연구결과들과 잘 일치 한다. 거의 전 범위의 응력비에 걸친 실험에 기초 한 개구비 식인 Katoh등(1983)의 식과 비교하 면  $S_{RPG}$  에 의한 유효응력이 가장 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 문헌(岡本太郎 1982)에는 응력비를 달리 한 실험결과를 토대로  $da/dN - \Delta K$  및  $da/dN - \Delta K_{RPG}$  관계를 그림으로 나타내고 있는 데, 전자의 경우는 응력비가 높을수록 전파속도가 빠르게 표현되는데 반하여, 후자의 경우는 응력비 에 관계없이 다음 식(1)로 주어지는 한 개의 직선 으로 표현이 되어, 개폐구거동을 고려한 균열전파 해석 모델에 의한 유효응력범위의 유용성을 나타 내고 있다.

$$da/dN = 3.6 \times 10^{-9} \cdot \Delta K_{eff}^{2.68} \quad (1)$$

#### 4. 과대 및 과소하중 영향

다음에 과대, 과소 하중의 영향에 대하여 검토 하였다. 우선 Fig.6은 단일 과대하중 하의  $da/dN - \Delta K$  관계를 나타낸 것이고, Fig.7은 균 열길이에 따른  $S_{RPG}$ 의 변화를 보인 것이다. Fig.7로부터 과대하중의 영향범위라고 생각되는 과대하중에 의한 소성역  $\rho_{max}$ 의 범위 내에서  $S_{RPG}$  값이 변화하고 있음을 알 수 있다. Fig.6



**Fig.6** Crack growth rate characteristics affected by an overloading

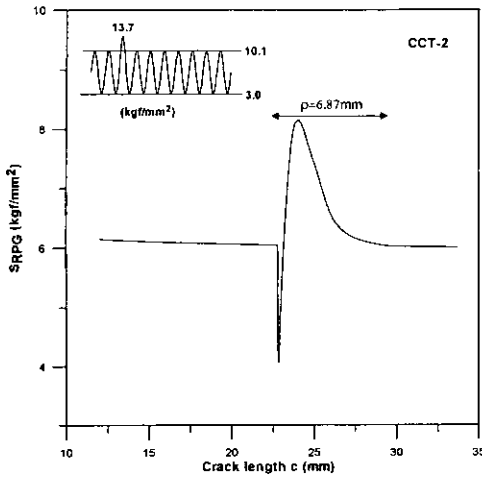


Fig.7 Effective stress changes due to an overloading

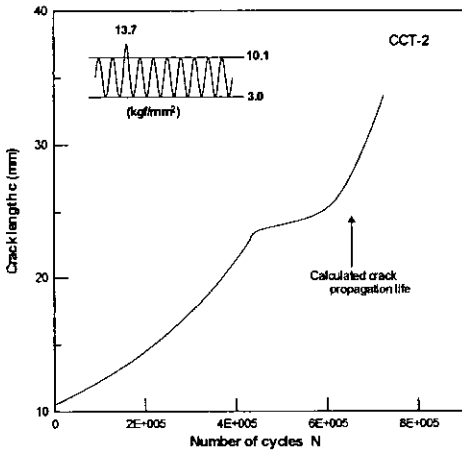


Fig.8 Crack propagation life affected by an overloading

및 Fig.7은 문헌(岡本太郎 1982)의 실험결과와 잘 일치하고 있었다. Fig.7의 결과와 식(1)의  $da/dN \sim \Delta K_{eff}$  관계를 이용하여, 균열전파속도 및 전파수명계산을 할 수 있다. 계산결과는 Fig.6과 같으며, 또한 균열전파 수명  $N$ 과 균열길이  $a$ 의 관계를 Fig.8에 나타내었는데, 수명계산 결과도 실험결과와 꽤 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 수명의 관점에서 보면, 가속단계는 거의 영향이 없고, 지연효과가 수명을 크게 지배함

을 알 수 있다.

다음으로 2단계의 과대, 과소하중을 부하한 경우에 대하여 살펴본다.

우선 제 1단계에서는 한 개의 과대하중을 부과하여, 그 영향역을 충분히 통과하였다고 생각되는 단계에서, 과소~과대의 순으로 부하하고, 그 영향을 검토하였다. 이 경우의  $S_{RPG}$  값 계산 결과를 Fig.9에 보인다. Fig.9에서는 비교를 위하여  $S_{RPG}$  값 이외에  $S_{OPEN}$  값도 나타냈다.  $S_{OPEN}$  값은 균열 선단부의 봉요소 응력이 0이 되는 외부응력을 나타내므로,  $S_{RPG}$  값보다 약간 작은 값을 유지하고 있다.

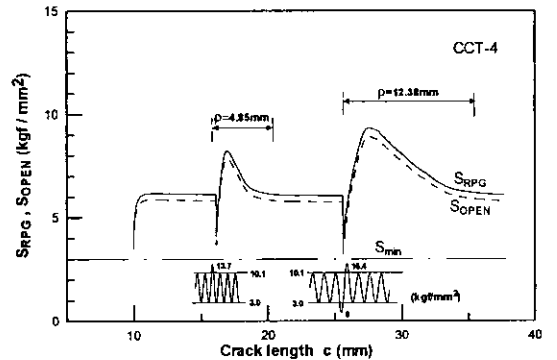


Fig.9 RPG stress and opening stress changes with crack growth affected by an overloading or an overloading after an underloading

이와 같은 경향은 다른 시험조건인 경우도 거의 마찬가지였다.  $S_{RPG}$  값을 살펴보면, 1단계 과대하중의 경우는 단일과대하중의 경우와 같은 결과인데, 제 2단계의 경우는,  $S_{RPG}$  값이 큰 변화를 나타낸다. 가속단계가 크게 변화하는 것은 과소하중 효과가 크게 영향을 주기 때문이고, 과대하중에 의한 소성역 범위 바깥에서도, 아직 일정한 수준의 응력으로 수렴하지 않고 지연영역의 영향이 잔류하는 것은 과소, 과대 하중의 조합 효과 때문이라고 생각된다. Fig.10은  $da/dN - \Delta K$  관계로, 문헌(岡本太郎 1982)의 실험치와 거의 일치하고 있다. 전파수명을 반복회수와 균열길이의 관계로

나타낸 것이 Fig.11이다.

이상으로부터 하중순서가 피로수명에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 개발된 균열전파 해석 모델에 의하여 정성 및 정량적으로 피로수명을 평가할 수 있다.

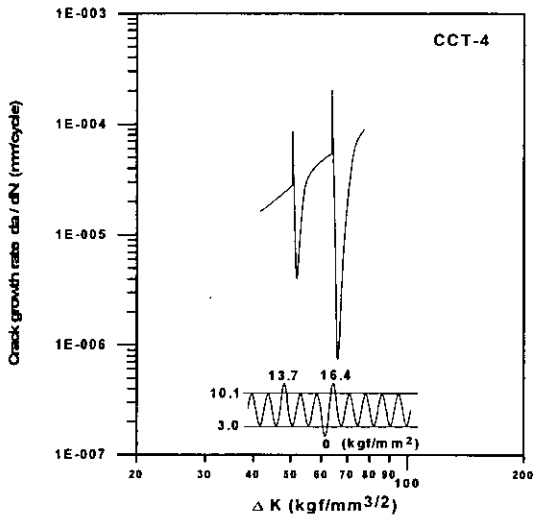


Fig.10 Crack growth rate characteristics affected by an overloading or an overloading after an underloading

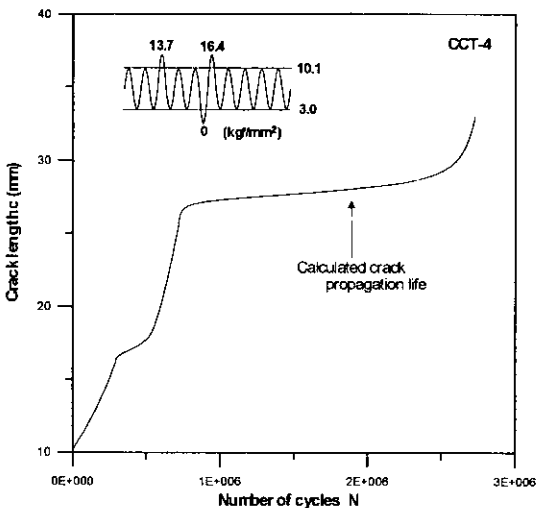


Fig.11 Crack propagation life affected by an overloading or an overloading after an underloading

### 5. 결론

이상의 연구 결과로부터 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 개발된 균열전파 모델은 일정진폭 및 과대하중하에서 개구변위, 게이지 길이 및 응력분포 상태를 정성 및 정량적으로 잘 표현하고 있다.

(2) 과대하중 작용 직후 각 연구자들이 제안한 유효응력 값들은 모두 불연속적으로 감소하고, 그후 급격히 증가하여 일정진폭하의 값보다 큰 최대치를 보인 후, 일정진폭하에서의 값에 수렴하여 간다. 과대하중의 영향은 과대하중으로 인한 소성역을 균열선단이 탈출할 때까지 크게 나타난다. 이러한 경향은 과대하중 작용후의 지연감속 현상을 잘 설명하고 있다고 사료된다.

(3) 응력비가 높을수록 개구비가 커지는 기존의 연구결과를 잘 설명할 수 있었으며, 피로균열전파 해석 모델을 이용하면 실험에 의하여 개구비를 구하지 않고도 균열전진 유효응력 및 피로수명을 평가할 수 있다.

(4) 여러 가지 평균응력하의 피로균열전파 시험 결과를  $S_{RPG}$ 에 기초하여  $da/dN - \Delta K_{eff}$ 로 정리하면, 응력비에 관계없이 동일 직선으로 평가할 수 있다.

(5) 일정하중진폭의 도중에 과대 및 과대-과소하중의 조합하중을 부과한 계산 결과, 실험치와 잘 일치하였으며, 본 연구결과는 균열의 전파속도 및 수명의 실용적인 평가가 가능함을 확인하였다.

(6) 과대하중의 효과는 그 직전에 가해진 과소하중 때문에 지연영역이 커져, 피로수명에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- 김창욱, "균열전파해석에 의한 피로수명 평가에 관한 연구", 충남대학교 박사학위논문, 2001.2.
- 김창욱, 노인식, 반현호, 신병천, "균열개폐구 거동을 고려한 피로균열전파 해석 모델의 개발: 균열개폐구 거동의 모형화", 대한조선학회논문



집, Vol. 38, No. 3, pp.74-83, 2001.

- D.S. Dugdale, "Yielding in Steel Sheets Containing Slits", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol 8, pp. 100-104, 1960.
- P.C.Paris, Boeing Co. Document, No.17867 Addendum N. 1957.
- J.C.Newman, "A crack closure model for predicting fatigue-crack growth under aircraft spectrum loading", NASA Tech. Memo. 81941, 1981
- W.Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP-486, 1971.
- 豊貞雅宏, 他2名, "き裂開閉口を考慮した疲勞き裂傳播モデル", 日本造船學會論文集, Vol. 152, 1982.
- 岡本太郎, 他3名, "き裂開閉口舉動に基づく疲勞き裂傳播特性の検討", 日本造船學會論文集, Vol. 153, 1983.
- 加藤昭彦, 他2名 "廣範圍の應力比條件下での疲勞均熱傳播速度式の検討", 日本造船學會論文集, 第153号, 1983.
- 豊貞雅宏, 他1名, "RPG荷重のシミュレーション", 日本造船學會論文集, Vol.176, 1994.



〈 김 창 욱 〉



〈 노 인 식 〉



〈 도 관 수 〉



〈 신 병 천 〉