

주철 FC200을 이용한 하중점에 따른 동적파괴경로 예측 연구

Study on Dynamic Fracture Path Prediction According to Load Point using Cast Iron FC200

유직수¹, 조규춘^{2*}

Jik-Su Yu¹, Kyu-Chun Jo^{2*}

〈Abstract〉

Dependence of dynamic fracture path on loading velocity was observed from experimental results based on the three point bending fracture in cast iron. In this study, 3D and 2D numerical simulations are used to evaluate singular stress fields near crack tip and fracture mechanics parameters. Moving finite element technique, 2D and 3D Delauney automatic mesh generation and contact-noncontact evaluation is introduced into the numerical method. Dynamic fracture toughness is decreased with increase of impact loading velocity. Fracture mode-ratio corresponds to initial kink angle of fracture path. The numerical result shows that the maximum hoop stress criterion cannot be applied to dynamic fracture of cast iron.

Keywords : Moving Finite Element, Dynamic Fracture, High Speed Observation

1 주저자, 제1저자, 국립군산대학교 기관공학과, 시간강사
E-mail: jiksuyu@kunsan.ac.kr

1 First Author, Lecturer, Kunsan National University, Department
of ship Engine Engineering
E-mail: jiksuyu@kunsan.ac.kr

2* 정회원, 교신저자, 국립군산대학교 고등기술융합연구원, 실장
E-mail: jokyuchun@kunsan.ac.kr

2* Corresponding Author, Head of a Department, Kunsan National
University Advanced Technology Institute for Convergence
E-mail: jokyuchun@kunsan.ac.kr

1. 서론

고체 내에서 발생하는 파괴·균열 진전 거동에서는 균열면이 반드시 평탄하거나, 균열 선단이 직 선상이 되는 것은 아니다[1]. 이러한 파괴 현상에서는 2차원 근사는 성립하지 않고 3차원 모델을 이용한 해석이 필요하다. 3차원 파괴 거동의 평가에는 수치 해석을 이용한 접근법이 유효하다. 그러나 오늘날에도 범용적이고 고 정밀도의 3차원 균열 진전 해석법은 확립되어 있다고 말하기 어렵고, 최근 컴퓨터의 발달과 함께 이러한 파괴 거동을 재현하는 수치 해석법의 고정밀화를 기대하고 있다.

또한 구조물의 복잡화 및 용도의 다양화는 취성 파괴 사고 발생 시 균열 진전 거동을 복잡하게 하고 있다. 이러한 파괴에서는, 열화에 의한 예비 균열과 취성 파괴 발생 시에 작용하는 부하 방향이 반드시 완전한 모드 I 관계인 것이라 속단할 수는 없다. 또한 파괴 경로는 하중 부하 속도의

영향을 강하게 반영하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 진행한 주철재의 3점 굽힘충격 파괴 시험[2]에서도 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 작용점 위치는 거의 같은 위치임에도 불구하고, 하중 부하 속도의 차이에 의해 파괴 경로는 다른 결과를 보여주고 있다. 구조물의 파괴 사고에서 중요한 점은 균열이 발생하는 것을 방지하기 위한 파괴 메커니즘의 해명, 파괴 경로 예측 이론의 확립이 요구되고 있다.

3차원적인 균열 진전 거동을 나타내는 파괴 현상 평가의 고정밀화, 혹은 보다 범용적인 파괴 거동 재현 시뮬레이션에 이용한 동적 부하 하에서의 곡진 파괴가 가능한 해석 프로그램의 개발을 목표로 많은 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서는 먼저 Fig. 1에 나타난 현상의 생성형 시뮬레이션을 실시하여 파괴 경로가 크게 다른 원인을 규명하고자 하였다. 3차원 모델을 이용한 수치 해석에서는 파괴역학 파라미터를 구했으며, 2차원 수치 해석에서 최대 원주 방향 응력설 [3]에 기초한 파괴 경로 예측을 실시하고, 실험에서 얻어진 파괴 경로와의 비교를 실시하였다.

2. 파괴역학 파라미터 평가법

파괴역학에 있어서 대표적인 파라미터인 J 적분은 아래의 식(1)에 의해서 나타내진다.

$$J_k = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left[W_{n,k} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] d\Gamma \quad (1)$$

그러나, 동적파괴문제에 있어서, 운동에너지나 관성력을 고려한 동적J적분식 (4)를 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는, 균열선단 각 개소에 동적 J 적분을 간략하게 평가하기 위해서 Nishioka·Atluri

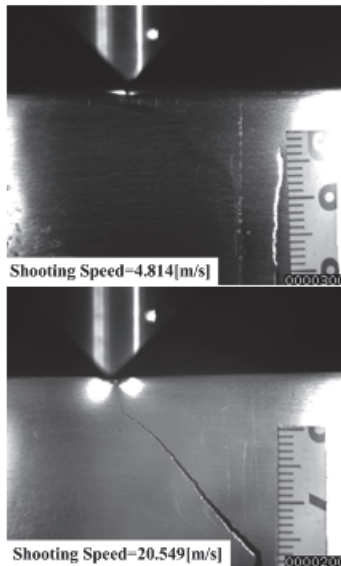


Fig. 1 Comparison of dynamic fracture paths

에 의해서 등가영역적분(EDI) 평가식[5]을 이용하였다. 식 (2), (3), (4)는 그 평가식을 나타낸다.

$$J_k = \frac{1}{f} \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{q=1}^4 R_{knq} S_q + \frac{1}{f} \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{q=1}^4 Q_{knq} S_q \quad (2)$$

$$R_{knq} = \int_{V_n} [\sigma_{ij} u_{i,k} N_{q,j} - (W+K) N_{q,k} + \rho \ddot{u}_i u_{i,k} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i,k} N_q] dV \quad (3)$$

$$Q_{knq} = \int_{s_n} [(W+K)n_k + \sigma_{ij} n_j u_{i,k}] N_q ds \quad (4)$$

여기서 W, K는 변형률 에너지 밀도 및 운동 에너지 밀도를 나타내며, u_i 는 변위를 나타낸다. ρ 는 밀도, n_k 는 경로상 외향 단위 법선 벡터 성분을 나타낸다. 또한 \dot{u} 는 u 의 시간 미분, $(u)_{,k}$ 는 (u) 의 $x_k(k=1,2,3)$ 방향의 편미분을 나타낸다. 또한, $\Gamma_e, \Gamma, \Gamma_c$ 는 부근, 원방, 및 균열면에서의 경로를 나타낸다. 경로로 둘러싸인 영역을 각각 V_r, V_e 이라 한다. N_v 및 N_s 는 각각 V_r 내, $V_1 + V_2$ 위의 요소수를 나타낸다. Fig. 4와 같이 두께 Δ 의 3차원 균열 문제에 연속 보조 함수 s 가 도입되었다. 연속 보조 함수 s 는 균열 팁 근방 필드 Γ_e 위에서 1을 취하고 세그먼트 층의 표면 Γ_0 과 균열 표면 경로 Γ_c 에서 영을 취한다. 계수 f 는 균열 선단을 따라 연속 보조 함수 s 를 적분한 값입니다. 이 동적 J

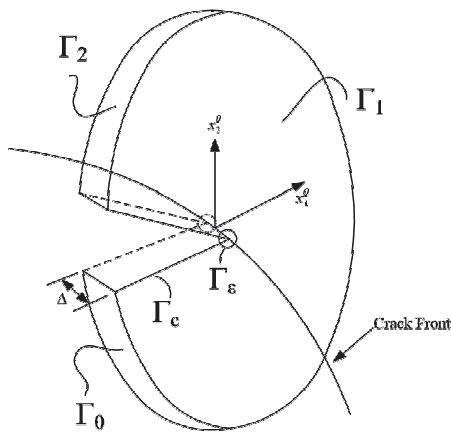


Fig. 2 Integration path

적분의 등가 영역 적분 표현식은 임의의 원거리 필드 경로에 대해 경로 독립을 만족한다.

또한, 식(2)에서 설명한 J_k 는 전체 좌표계 성분이며, 다음식에 의해서 균열 선단 좌표 성분 J_k^0 으로 변환하는 것이 가능하다.

$$J_k^0 = \alpha_{kl} J_l \quad (5)$$

여기서, α_{kl} 는 좌표변환 텐서를 표시한다.

동적 J 적분과 성분 분리법[6]을 이용하여 혼합 모드의 응력확대계수를 아래의 식으로 평가하는 것이 가능하다.

$$K_I = \delta_I \left\{ \frac{(2\mu J_1^0 \beta_2)}{A_I (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= \delta_I \left\{ \frac{2\mu \beta_2 (J_1^0 \cos \theta_0 + J_2^0 \sin \theta_0)}{A_I (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$K_{II} = \delta_{II} \left\{ \frac{(2\mu J_1^0 \beta_2)}{A_{II} (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= \delta_{II} \left\{ \frac{2\mu \beta_2 (J_1^0 \cos \theta_0 + J_2^0 \sin \theta_0)}{A_{II} (\delta_I^2 \beta_2 + \delta_{II}^2 \beta_1)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

여기서, μ 는 전단탄성계수, A_I, A_{II} 는 균열속도함수, β_1, β_2 는 균열 속도 파라미터, δ_I, δ_{II} 는 모드 I 및 모드 II에 대한 균열 선단 개구 변위이다. 또

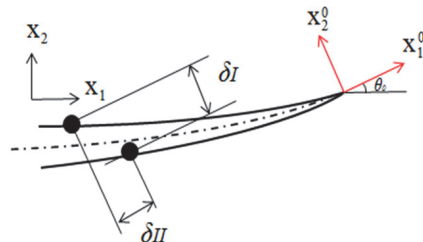


Fig. 3 Coordinate system and crack tip opening displacement

한, θ_0 는 균열 선단 좌표계와 전체 좌표계가 이루는 각도이다(Fig. 3 참조).

3. 수치해석 방법

균열을 갖는 해석 모델에 대한 3차원 요소 분할의 예는 Fig. 4에 표시한 것과 같다. 3차원 데로니 자동 요소 분할 방법[7]은 Fig. 4(a)와 같은 분석 영역의 표면 데이터가 필요하며, Fig. 4(b)에 표시된 것과 같이, 먼저 x, y 평면의 표면 데이터가 2차원 데로니 요소 분할[8]에 의해 생성된다. 이때, 균열 선단 응력 특이장을 정확하게 평가하기 위해, 균열 선단을 중심으로 균열 선단에 접근할수록 요소 폭이 작아지는 다층의 동심 원형의 치밀한 이동 요소군을 설정하였다.

본 연구에서는 판 두께 방향 (z 방향)을 8분할

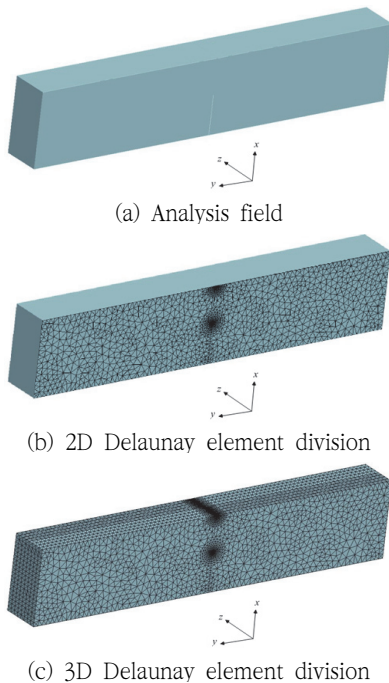


Fig. 4 Mesh division steps

하였으며, 노드 점 배치 층에 대하여 표면으로부터 순서대로 레이어 1, 레이어 2, ..., 레이어 9

4. 해석모델 및 조건

본 연구에서는 3점 굽힘 고속 파괴 시험의 균열 진전 거동을 3차원 변형 문제 또는 2차원 평면 변형 문제로 취급하여 연구를 진행하였다. 3차원 해석에서는 생성형 시뮬레이션을 진행하여 진전 균열 선단 주변의 응력장, 파괴 역학 파라미터를 도출하였다. 이때의 균열은 모든 레이어에서 비슷한 속도와 경로로 진전하는 조건으로 진행하였다. 2차원 해석에서는 파괴 경로 예측 시뮬레이션도 진행하여 결과를 검토하고자 하였다. 실험 데이터로서 균열 진전 속도 이력을 사용하고, 곡절 파괴 기준으로서는 최대 주 응력설[3]을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 실험 중에 고속 촬영 한 영상을 기초로 얻은 균열 진전 개시 시간

Table 1. Crack growth initiation time

shooting speed [m/s]	Crack growth initiation time t_f [μ s]
5	104
10	48
20	32

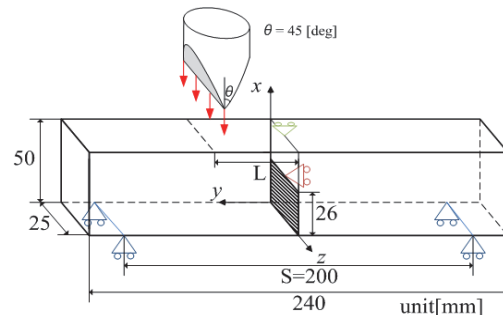


Fig. 5 Specimen shape

t_f 를 Table 1에 표시하였다. 수치해석에서도 시가 t_f 까지는 균열 정류 상태를 유지한 계산을 진행하여 시험과 유사한 조건을 조성하였다.

시험편 형상을 Fig. 5에 표시하였다. 시험편 재료는 주철재 FC200이다. FC200의 재료 상수는 영률: $E = 100.0\text{GPa}$, 포아송 비: $\nu = 0.27$, 밀도: $= 7,040\text{kg/m}^3$ 이다.

시험에서 스트라이커 발사 속도 설정은 약 5, 10, 20m/s이지만, 주철 시험편과 충돌하면 스트라이커 속도는 크게 감소한다. 따라서, 충돌 후의 스트라이커 선단 부분의 변위 이력을 측정하고

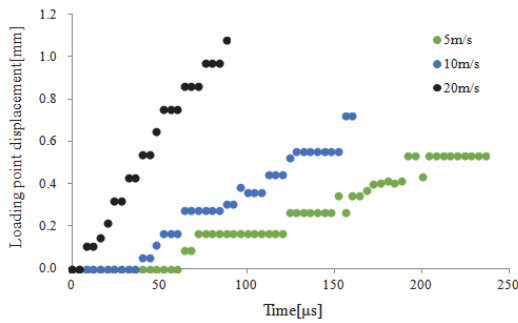


Fig. 6 History of forced displacement of collision area

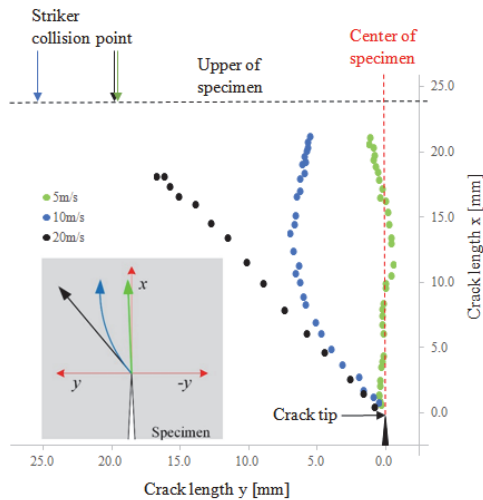


Fig. 7 Crack path results of experiment

(Fig. 6 참조), 이 변위 이력을 강제 변위로서 시험편 상면의 충돌부에 부여하여 계산을 행했다. 따라서 수치 해석에서는 시험편 영역만을 모델화하고 있다. 스트라이커 충돌 위치는 하중 편심률 $e(e=L/(S/2))$ 로 나타낼 수 있다. $e=0.2$ 로 실험을 수행했지만 충돌 위치에는 약간의 차이가 발생하였다(Fig. 7 참조). 본 해석에서는 정확히 실험과 일치하는 하중점을 고려한 조건으로 진행하였다.

일반적인 충격 실험에서는 스트라이커가 시편에 충돌한 후 시편이 지지점에서 떠오를 것이 보편적인 현상이다. 따라서 이 연구에서는 이 시험편과 지지점의 접촉 및 비접촉 현상을 재현하기 위해 다음 두 가지 결정을 시도했다.

- 1) 지지점 위치에 배치된 노드를 N_s 라고 하며, Fig. 4의 좌표축에서 지지점 N_s 의 x 방향의 노드 접력이 음의 값이 되면, 노드 N_s 에 대한 구속을 풀고 재계산을 수행함으로써 비접촉 상태를 구현하였다.
- 2) N_s 가 구속되지 않고 N_s 의 x 방향의 변위가 음이 되면 노드 N_s 를 구속하고 N_s 를 지지점으로 취급하여 재계산을 수행함으로써 접촉 상태로 전환된 상태를 구현하였다.

그 예로서 $e=0.2$, 스트라이커 발사 속도 5m/s의 조건의 $-y$ 축의 노드 N_s 의 x 방향 노드 힘 및 변위 이력을 Fig. 8에 나타내었다. 스트라이커 충돌 후, 지지점 부근에 응력파가 전파되면, 압축

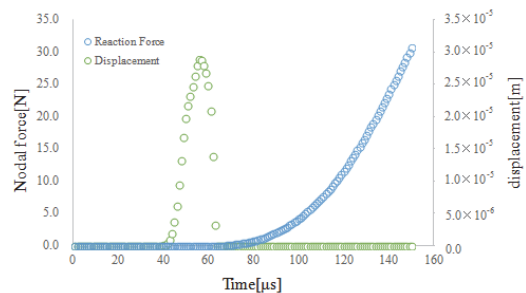


Fig. 8 History of nodal force and displacement

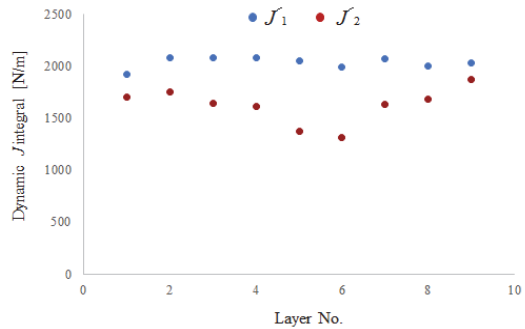
파의 영향에 의해 지지점으로부터 시험편이 떠오른다. 그동안 N_s 는 자유 경계상의 노드로 취급되며 노드 점력은 발생하지 않는다. 그 후, N_s 가 지지점 위치로 되돌아 가면 (x 방향 변위 성분이 양의 값에서 0이 됨), N_s 를 재구속한다. 그 결과 +x 방향의 절점력이 발생하기 시작한다. 따라서, 이 연구에서의 이동 유한 요소 분석은 지지점과 시험편의 접촉 및 비접촉 상태를 역학적 관정에 기초하여 재현한다.

5. 해석 결과

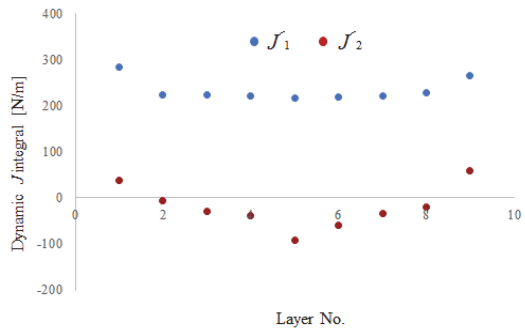
Fig. 9는 균열 진전 개시시의 균열 진전 선단의 J_1, J_2 의 시험편 두께 방향(z방향) 분포를 나타내고 있다.

스트라이커 발사 속도가 10m/s 이상인 경우 동적 J 적분값은 판 두께 중앙부에서는 낮고 표면부는 높아지는 경향이 있다. 그러나 그 차이는 크지 않은 결과를 보여주고 있다. 또한, 균열진전 개시시의 J_2 가 J_1 에 비해 값이 충분히 작은 것은, J_1 에 의해 균열 진전 개시 조건의 결정인자로서 기능한다는 것을 의미하고 있다. 또한, 스트라이커 발사 속도가 빨라지면 동적 파괴 인성 값이 떨어지는 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 균열 팁 주변의 변형 속도가 크게 변하기 때문이라고 고려된다.

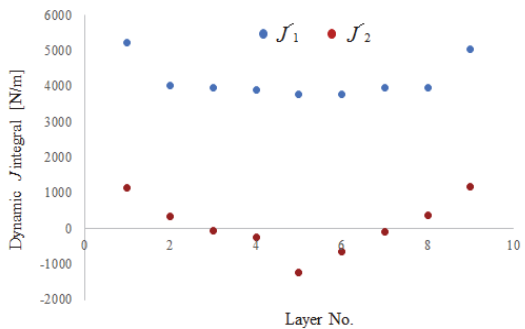
2차원 해석 결과에 있어서 균열 진전 개시시의 KI, KII와 KII/KI을 Table 2에, Fig. 10에는 균열 선단 근방의 y방향 응력 분포도를 나타낸다. Fig. 10(a)에서 초기 균열 면에 대한 y방향 응력 분포는 상대적으로 대칭이며, 어느 정도의 모드 I의 영향이 있음이 관찰된다. Fig. 10(b)에서는 대칭성이 전혀 보이지 않고 모드 II의 영향이 매우 크게 나타나고 있다. Table 2에서도 스트라이커



(a) Striker shooting speed 5m/s



(b) Striker shooting speed 10m/s

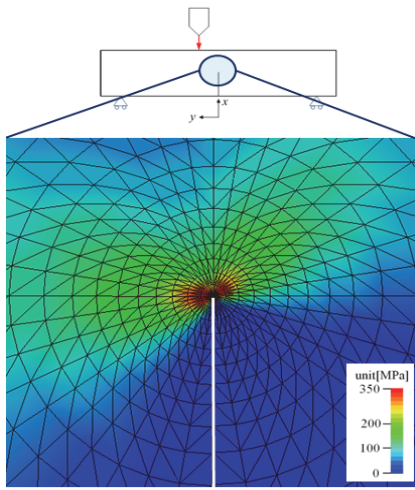


(c) Striker shooting speed 20m/s

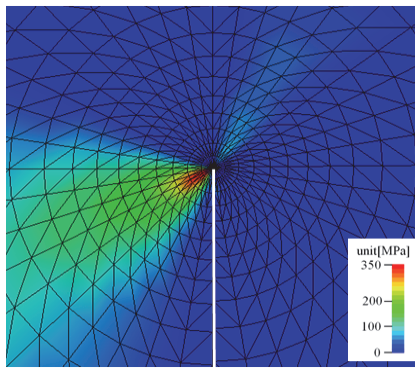
Fig. 9 Distribution of crack front edge J_1 and J_2 in the plate thickness direction at the start of crack propagation

Table 2. Crack growth initiation time

Sp[m/s]	KI[MP√m]	KII[MP√m]	KI/KII[-]
5	6.773	-6.357	-0.9385
10	-0.5058	-3.970	7.850
20	-0.3623	-17.15	47.34



(a) Striker shooting speed 5m/s



(b) Striker shooting speed 20m/s

Fig. 10 Stress distribution in the y direction at the beginning of crack propagation

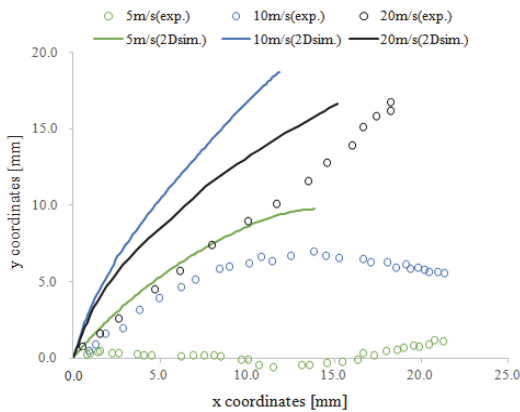


Fig. 11 Comparison of fracture paths

발사 속도 20m/s의 경우 모드 II의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 모드 비 KII/KI의 대소 관계는 초기 균열 진전 방향 각도의 대소 관계에 대응하고 있다.

6. 결론

본 연구에서 수행된 실험에서는 스트라이커 발사 속도에 따라 주철 파괴 경로가 다르다는 확인 할 수 있었다. 또한, 3차원 및 2차원 수치 해석을 수행하여 파괴 경로가 다르게 나타나는 원인을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 스트라이커 발사 속도가 빠를수록 동적 파괴 인성 값이 감소한다.
- 2) 파괴 인성치가 낮아짐에 따라 균열 진전 시 개시 시의 모드 비가 바뀌어 파괴 경로가 다르게 나타난다고 판단된다.
- 3) 주철재의 충격 파괴에 대해서는 실험과 최대 주 방향 응력설 예측에 의한 파괴 경로가 일치하지 않는 결과를 얻을 수 있었다.

추후 연구로는 주철재의 충격 파괴에 유효한 곡절 파괴 기준을 찾아낼 필요가 있으며, 또한 3차원 해석에서는 응력 확대 계수의 평가 방법을 통합하여 해석을 진행할 필요가 있을 것이다.

참고문헌

[1] Nishioka T., Stan F. and Fujimoto T.: Dynamic J Integral Distributions along Dynamically Propagating Three- Dimensional Fracture Fronts, *Proc. of Asian Pacific Conf. on Fract. and Strength and Int. Conf. on Advanced Tech. in Exp. Mech.*, pp.724-729, (2001).

[2] Cho Kyuchun, Simozono Chikara, Fujimoto

- Takehiro: Experimental and Numerical Study on the Dynamic Fracture Characteristics of Grey Cast Iron FC200, *ISIE2013*, (2013).
- [3] Erdogan, F. and Sih, G. C. : On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, *Journal of Basic Engineering ASME85*, pp.519-527,(1963).
- [4] Nishioka, T. and Atluri, S. N. :Path Independent Integrals, Energy Release Rates and General Solutions of Near-Tip Fields in Mixed-Mode Dynamic Fracture Mechanics, *Engng. Fract. Mech.*, pp.1-22, (1983).
- [5] Nishioka, T. Maeda, N. and Matsuo, S., Finite Element Simulation of Fast Curving Fracture Tests, *JSME Int. J.*, Vol.920(78), pp.182-184, (1992).
- [6] Nishioka, T. :The State of the Art in Computational Dynamic Fracture Mechanics, *JSME International Journal*, SeriesA, Vol.37(4), pp.313-333, (1994).
- [7] 谷口健男, 森協清明:3次元FEMのための自動要素分割法, 森北版株式会社, pp.1-197, (1992).
- [8] 谷口健男:FEMのための要素自動分割 (デローニー三角分割法の利用), 森北出版株式会社, pp.1-197, (1992).

(접수: 2024.07.19. 수정: 2024.07.24. 게재확정: 2024.07.30.)