

신경회로망과 경계요소법을 이용한 원공에서 파생하는 2차원 탄성균열의 응력세기계수 예측 모델링

윤인식* · 이원†

(1999년 10월 11일 접수, 2000년 12월 12일 심사완료)

The Prediction Modelling on the Stress Intensity Factor of Two Dimensional Elastic Crack Emanating from the Hole Using Neural Network and Boundary Element Method

In-Sik Yun and Won Yi

Key Words: Boundary Element Method(경계요소법), Neural Network(신경회로망), Numerical Analysis(수치해석), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Singular Element(특이요소), Quadrant Element(2차요소), Fracture Mechanics(파괴역학)

Abstract

Recently the boundary element method has been developed swiftly. The boundary element method is an efficient and accurate means for analysis of two dimensional elastic crack problems. This paper is concerned with the evaluation and the prediction of the stress intensity factor(SIF) for the crack emanating from the circular hole using boundary element method-neural network. The SIF of the crack emanating from the hole was calculated by using boundary element method. Neural network is used to evaluate and to predict SIF from the results of boundary element method. The organized neural network system (structure of four processing element) was learned with the accuracy 99%. The learned neural network system could be evaluated and predicted with the accuracy of 83.3% and 71.4% (in cases of SIF and virtual SIF). Thus the proposed boundary element method-neural network is very useful to estimate the SIF.

1. 서론

균열선단에서의 응력장 해석을 위하여 파괴역학적 파라미터인 응력세기계수(Stress Intensity Factor : SIF)를 도입한 해석이 일반화되고 있다. 응력세기계수는 하중, 대상재의 형상, 균열의 모양과 길이 등에 의해 결정되는 값으로 균열의 성장과 진전에 대한 해석 파라미터로서 현재는 이에 대한 정량적 평가가 구조물의 건전성 및 안전을 위하여 필수적으로 요구되고 있다.

응력세기계수를 계산하는 기법으로는 수치해석적으로 시뮬레이션하는 방법^(1,2)이 주류를 이루고 있으며 크게 나누어 유한요소법(Finite Element Method : FEM)과 경계요소법(Boundary Element Method : BEM)이 있다. 유한요소법^(3,4)은 균열문제를 해석하는 방법으로 지금까지 많이 이용되어 왔지만, 간단한 해석을 제외하고는 대부분 매트릭스의 크기가 크게 되어 계산 시간 등의 측면에서 비경제적이며 해의 정밀도가 요소분할에 의하여 좌우되는 문제점을 내포하고 있다. 그러나 경계요소법^(5,6)은 지배방정식인 미분방정식을 경계적분방정식으로 변환하여 해를 구하므로 해석 대상 영역의 차원을 하나씩 줄일 수 있다. 따라서 해석 대상재의 경계만을 요소 분할함으로써 계산의 규모나 시간을 줄일 수 있고 진전하는 균열에

* 회원, 대한검사기술주식회사
† 책임저자, 회원, 숭실대학교 기계공학과
E-mail : yiwon@engineer.ssu.ac.kr
TEL : (02)820-0657 FAX : (02)820-0668

대해서는 유한요소법보다 쉽게 모델링할 수 있는 장점을 갖는다.

특히 균열선단 근방의 응력 특이성을 해석하는데 있어서 경계요소법과 최근 비선형 해석에서 그 유효성이 입증된 인공지능적 신경회로망 알고리즘(7~9)을 결합하여 사용한다면 정밀도 향상 및 균열진전 예측이 가능할 것으로 기대된다.

따라서 본 논문에서는 파괴역학 문제에 대한 신경회로망 기법의 적용성을 검토하기 위하여 볼트, 리벳, 핀 조립 등에서 나타나는 원공에서 파생하는 균열에 대하여 경계요소법과 신경회로망을 이용하여 응력세기계수를 해석하였다. 이를 위하여 경계요소의 수가 적어도 정밀도가 높은 2차 요소를 사용하였으며 해의 정밀도를 더욱 높일 수 있도록 특이요소를 사용하여 경계적분시 가우스 점 요소의 길이와 거리를 감안하여 최고 20차까지 자동적으로 선별할 수 있도록 하였다.

이와 같이 설정한 조건으로 영역분할법에 의해 중앙 원공에서 파생하는 균열 길이와 원공의 크기를 변화시키면서 Yuuki의 등각사상법(10)에 의한 해석해 및 Newman의 선점법(11)에 의한 해석해와 비교하여 원공의 변화에 따른 응력의 관계를 명확히 하였으며, 수치 해석된 데이터를 기준으로 균열 길이와 폭, 특이요소, 2차요소, Yuuki의 해를 입력소자로 하는 신경회로망 시스템을 구성하여 응력세기계수의 해석 및 평가를 하였다.

2. 신경회로망 기법

신경회로망은 인간의 뇌에 존재하는 생물학적 신경 세포와 이들의 연결 관계를 단순화시켜 수학적으로 모델링함으로써 병렬 시스템인 인간의 두뇌와 같은 지능적 형태를 구현하는 것이다.

인간의 두뇌는 신경조직으로 이루어져 있으며, 기본적인 구성 요소는 신경 세포인 뉴런(Neuron)이다. 뉴런의 구성 요소는 본체인 세포체(Soma), 다른 뉴런으로부터 정보를 받아 들이는 수상돌기(Dendrite), 세포체로부터 신호를 다른 뉴런에 전달하는 축삭(Axon)의 세 부분으로 나뉘어져 정보를 입·출력하게 된다. 따라서 이러한 시스템을 구축하기 위한 다층계층형 신경회로망(12~14)은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며 패턴 분류를 위하여 사용된다.

중간층과 출력층은 처리소자와 연결강도를 지니고 있으며 노드마다의 처리소자는 강도를 곱한 각각의 입력 값에 바이어스 값을 더해 식 (1)과 같은 시그모이드 함수 $f(x)$ 에 의해 출력을 만들어 낸다.(12)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{\theta_0}}} \quad (1)$$

여기서 θ_0 는 활성화함수인 시그모이드 곡선의 형태를 결정하는 형태상수이다. 입력층을 제외한 각 절점에 대한 총입력은 그 전층의 모든 절점의 출력값에 강도를 곱한 값들이다.(13) 즉, k 층의 j 절점에 대한 총 입력은 식 (2)와 같이 된다.

$$\text{net}_j^k = \sum_{i=1}^m w_{ji}^k o_i^{k-1} \quad (2)$$

여기서 m 은 $(k-1)$ 번째층의 절점수, w_{ji}^k 은 $(k-1)$ 번째층의 i 번째 절점과 k 번째층의 j 번째 절점간의 연결강도, o_i^{k-1} 은 $(k-1)$ 번째층의 j 번째 절점의 출력이다. 따라서 k 층의 j 절점에서의 출력은 식 (3)과 같다.

$$o_j^k = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\text{net}_j^k + \theta_j^k}{\theta_0}}} \quad (3)$$

여기서 계수 θ_j^k 는 바이어스값으로 형태상수와 k 층의 j 절점에 대한 총입력과의 관계로부터 k 층의 j 절점에 대한 출력이 구해지게 된다. 은닉층에서의 절점의 출력을 식 (3)으로 계산하고 출력단에서의 출력을 계산한 후, 식 (4)와 같이 주어지는 출력단에서의 각 입력패턴에 따라서 발생하는 추정치의 자승오차항을 평균으로 하는 오차 E 를 최소화하는 방향으로 입력과 출력단 사이의 연결 강도를 수정하는 과정을 반복한다. 일반적으로 출력값은 목표값과 같지 않고, 따라서 평균 시스템 오차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (y_i - o_i)^2 \quad (4)$$

여기서 m 은 입력으로 선정한 데이터 패턴수, y_i 는 목표치, o_i 는 출력치이다.

3. 경계요소법 이론

경계요소법에는 지배방정식을 엄밀히 만족하는

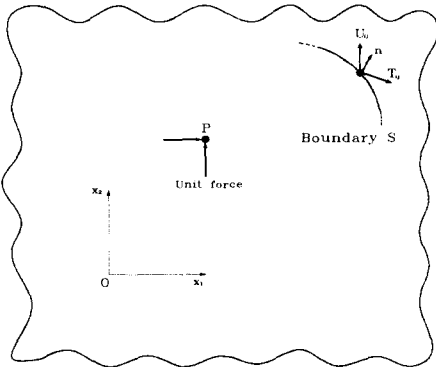


Fig. 1 Unit point loads applied within the infinite plate(Kelvin's solution of two dimension)

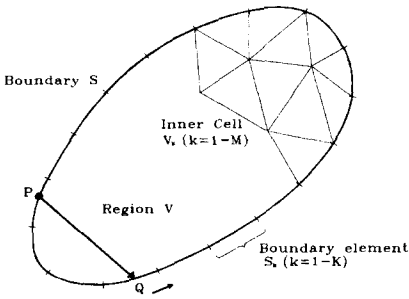


Fig. 2 Discretization analysis model

기본해가 필요하며 기본해는 경계조건을 만족하게 되며, 변위의 기본해는 2계 도함수의 연속성이 요구된다.

Fig. 1과 같이 무한판의 한점 P에 *i*방향의 단위 집중력이 작용하는 경우, Q점에서 *j*방향의 변위 및 표면력 U_{ij}, T_{ij} 는 2차원 등방·등질 탄성체에 대한 Kelvin의 기본해를 복소응력함수로 표시하면 평면변형률의 경우 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$U_{ij}(P, Q) = \frac{1}{8\pi(1-\nu)\mu} \left\{ (3-4\nu) \log\left(\frac{1}{r}\right) \delta_{ij} + r_{,i} r_{,j} \right\} \quad (5)$$

$$T_{ij}(P, Q) = -\frac{1}{8\pi(1-\nu)r} \left[\{ (1-2\nu) \delta_{ij} + 2r_{,i} r_{,j} \} \frac{\partial r}{\partial n} - (1-2\nu)(r_{,i} n_j - r_{,j} n_i) \right] \quad (6)$$

여기서 ν 는 푸와송비, r 은 PQ간의 거리이다. 경계적분방정식(Somigliana의 식)에서 적분핵이 되는 기본해는 P와 Q가 일치, 즉 $r \rightarrow 0$ 일 때

특이방정식으로 됨을 알 수 있다. 직접법은 경계적분방정식을 이산화하여 해석하게 되며 Fig. 2와 같이 경계를 K개의 요소 또는 체적력이 있는 경우에는 내부를 M개의 내부셀로 분할하면 이산화 방정식은 식 (7)과 같이 된다.

$$C_{ij}(P)u_j(P) + \sum_{k=1}^K \int_{S_k} T_{ij}(P, Q)u_j(Q) dS = \dots \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^M \int_{V_k} U_{ij}(P, Q)t_j(Q) dV + \sum_{k=1}^M \int_{V_k} b_j(q)U_{ij}(P, q) dV$$

식 (7)을 전체 절점 P에 대하여 구하면 식 (8)과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$HU = GT + B \quad (8)$$

여기서 U는 전절점 변위 벡터, T는 전절점 표면력 벡터, H와 G는 계수 매트릭스, B는 체적력 벡터이다. 이러한 이산화 해석에서 초기에는 일정요소가 사용되었으나 유한요소법의 이산화 해석 방법이 도입되어 최근에는 고차 곡선 요소 등이 사용되고 있다.

4. 경계 요소 해석

4.1 해석 모델

본 논문에서는 볼트, 리벳, 핀 조립 등에서 많이 볼 수 있는 원공에서 파생하는 크랙을 Fig. 3과 같은 형상으로 모델링하였다. 실제의 해석에 있어서는 Fig. 4와 같이 대칭평면에 대하여 1/2만을 해석하였으며, 구체적인 해석모델에 대한 사항은 Table 1과 같다. Table 1에서 균열길이에 대한 인자 a와 c는 관통균열인 경우 a이고, 나머지는 모두 a와 c가 적용되게 된다.

요소와 절점의 수를 많이 설정하면 프로그램의 실행시간만 길어질 뿐 높은 정밀도의 해를 얻을 수 없다.

그러나 적절한 요소분할과 이에 알맞은 수치해석 방법은 프로그램 실행시간뿐만 아니라 해석의 효율성과 간편성면에서도 이점이 있다. 따라서 요소와 절점의 수를 최적의 상태로 설정하고자 하였으며 이렇게 설정한 조건으로 원공의 크기(R)와 폭(W)을 변화시키면서 균열(c)의 진전에 따른 응력세기계수 K_I 를 해석하였다. 또한 응력세기수계수 F_I 를 구하여 Yuuki와 Neuman의 해석해와 비교·검토하여 해의 정밀도를 검증하였다. 시뮬레이션을 위한 물성치로 탄성계수는

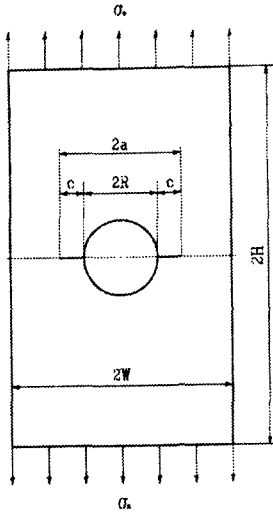


Fig. 3 Analysis model

206GPa을, 푸와송의 비는 0.3을 적용하였다.

4.2 2차 요소와 특이요소에 의한 균열 해석

본 연구에서는 원공에서 파생하여 진전하는 2차원 탄성균열을 해석하였다. 경계를 분할하기 위한 경계요소로는 선형요소 및 2차요소를 사용하였고, 수치적분법으로서 가우스 수치적분법을 이용하였으며, 적분점을 최대 20개 이내에서 자유롭게 취할 수 있도록 하였다. 전체 강성매트릭스를 포함하는 연립방정식을 풀기 위하여 가우스 소거법을 이용하였다. 먼저 분할경계요소의 수와 균열선단요소의 크기 및 경계요소 등이 응력세기 계수의 결정에 미치는 영향에 대하여 검토하기 위하여 폭에 대한 길이의 비 $2H/2W$ 가 2.0인 반무한판의 중앙원공으로부터 파생하는 균열에 대한 해석을 하였다. 2차요소를 이용하여 응력세기 계수를 정확히 구할 수 있는 최소한의 분할 요소수를 얻기 위하여 임의로 간단한 모델을 선정하여 균열선단의 요소수를 5 개부터 하나씩 줄여서 3개까지 해본 결과 변위외삽법을 할 수 있는 최소한의 요소수를 3개로 할 때와 4개, 5개로 할 때 모두 같은 정밀도를 나타내었다. 따라서 본 해석에서는 균열선단의 요소수를 3개로 하여 응력세기계수를 구한 후, 해석의 정밀도 여부를 Yuuki, Newman의 해석해와 비교하기 위하여 응력세기수정계수 $F_I(=K_I/K_0)$ 값을 구하였다.

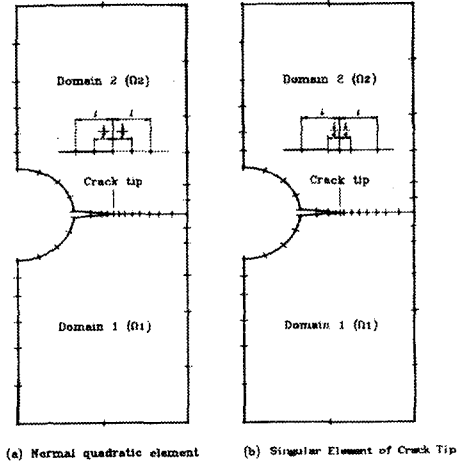


Fig. 4 Boundary division of analysis model

Table 1 Construction of analysis model

Factor No.	Width (2W)	Height (2H)	Rate (2H/2W)	Rate (R/W)	Crack length (a, c)
I	20	40	2.0	0	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0
				0.1	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0
				0.25	0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.5
				0.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1.0, 2.0, 3.5
V	10	40	4.0	0.25	0.15, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.75
VI	40		1.0	0.25	0.6, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 11.0

특이요소를 사용하는데 있어서는 우선 2차요소로 요소분할을 한 후 균열면과 리가먼트(ligament) 면에서 가장 가까운 한 요소내의 중간절점을 균열선단쪽으로 1/4만큼 이동시켜 설정하였다. 이렇게 설정한 조건으로 특이요소에 의한 응력세기수정계수와 2차요소로 구한 응력세기수정계수를 Yuuki의 해석해와 비교하여 본 결과 특이요소를 사용한 경우의 오차는 최소 0.06%, 최대 -0.78%를 나타내었으며, 2차요소를 사용한 경우의 오차는 최소 -0.1%, 최대 -2.84%를 나타내었다. 오차가 음수인 경우는 응력세기수정계수의 값이 해석해보다 작게 나타났을 때이고 양수일 때는 크게 나타났을 때이다.

본 해석에서의 결과치와 Yuuki, Newman의 해석해를 Fig. 5~Fig. 10에 나타내었다. R/W가 0일 때인 Fig. 5에서는 대체로 값의 차이가 1% 이내

의 높은 정밀도를 나타내었다. 특히 R/W 가 0일 때인 Fig. 5에서 a/W 가 0.9일 때의 경우, -2.02%로 가장 큰 차이를 나타내고 있는데, 이것은 원공의 반지름(R)과 균열길이를 포함한 인자가 판폭에 대해 리가멘트가 1/10인 상태로 응력 자유면의 영향을 받기 때문이라 할 수 있다. R/W 가 0.1일 때인 Fig. 6에서는 응력세기수정계수의 값들이 a/W 가 0.12에서 0.16 까지 증가하다가 점차 낮아지기 시작하여 a/W 가 0.22, 0.24에서 같은 값을 나타내다가 a/W 가 커짐에 따라 다시 증가함을 알 수 있다. 즉 이것은 a/W 가 0.2부근에서 극대, 극소값을 나타내며, 원공주위에 응력집중이 이루어져 나타난 현상으로 응력집중상태를 벗어나서는 R/W 가 0에 대해서와 같은 경향을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 결과에 있어서도 a/W 가 0.22와 0.24에서 특이요소를 사용한 경우가 -0.11%와 0.09%를 나타내었으며, 2차요소인 경우가 -1.4%와 -0.1%를 나타낸 결과로부터 이 부분에서 응력집중현상으로부터 벗어나음을 알 수 있다. R/W 가 0.25일 때인 Fig. 9에서는 a/W 가 0.35인 부분에서 응력집중현상에서 벗어나음을 알 수 있으며, R/W 가 0.5에 대해서는 Fig. 6에서와 같이 R/W 가 0.1, 0.25인 경우와 같은 경향을 나타내고 있다. 인자 a 에 대한 균열길이와 원공의 반경에 대한 관계를 Fig. 10에 나타내었다. R/W 가 0, 0.1, 0.25, 0.5에 대해 특이요소를 사용하였을 경우, 전체오차의 평균은 0.64%였으며, 2차요소를 사용하였을 경우가 1.3%의 정밀도를 나타내었다.

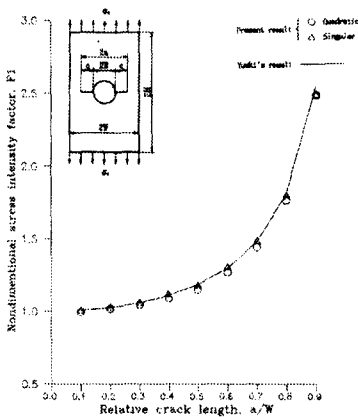


Fig. 5 Results of the model I ($R/W = 0$)

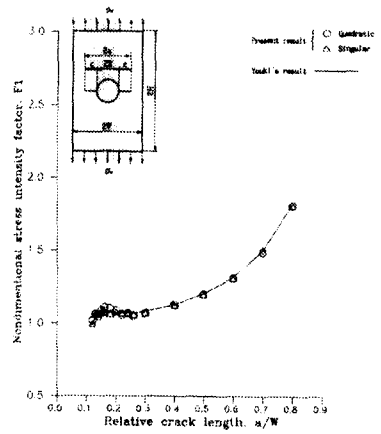


Fig. 6 Results of the model II ($R/W = 0.1$)

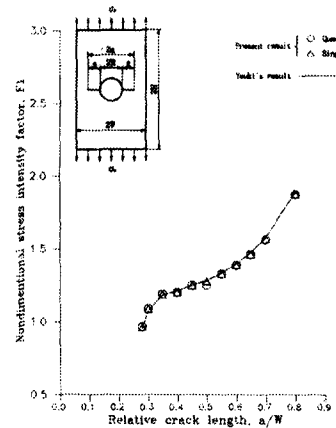


Fig. 7 Results of the model III ($R/W = 0.25$)

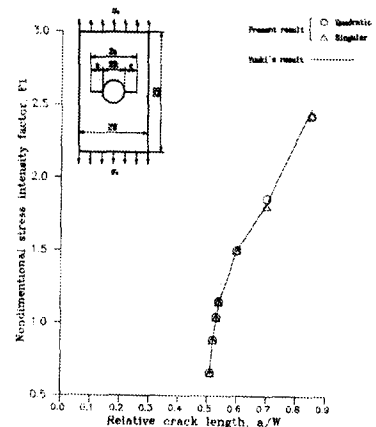


Fig. 8 Results of the model IV ($R/W = 0.5$)

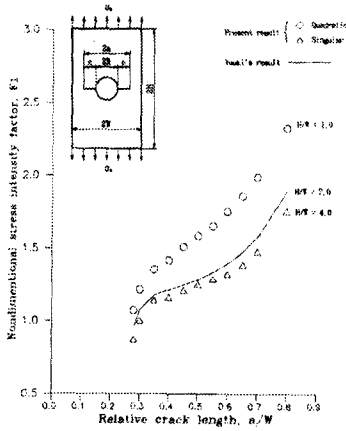


Fig. 9 Results of the model VI ($R/W = 0.25$)

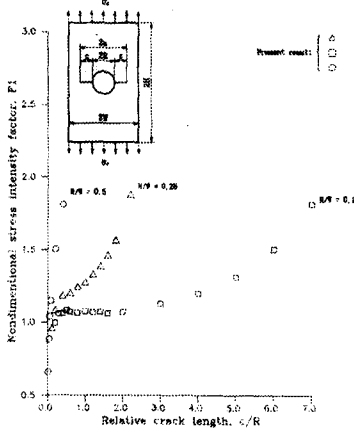


Fig. 10 Effect of the relative crack length

따라서 이러한 결과로부터 특이요소를 사용하였을 경우가 2차요소를 적용한 결과보다 2배이상 정밀하다는 것을 알 수 있다.

경계요소법에서는 균열선단에서의 요소분할을 조밀하게 함으로써 해의 정밀도를 높이고자 하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 균열선단의 요소분할을 3개로 하고 2차요소를 접목시켜 사용함으로써 해의 정밀도를 높일 수 있었다.

Fig. 9는 R/W 가 0.25 이고 $2H/2W$ 는 2.0에 대하여 $2H/2W$ 를 1.0과 $2H/2W$ 를 4.0으로 하여 폭 변화에 따른 영향을 나타낸 결과이다. $2H/2W$ 가 1.0과 4.0인 경우 모두 Yuuki의 해석해와 같은 경향을 나타냄으로써 시뮬레이션의 결과와 엄밀해가 거의 일치함을 알 수 있었다.

Table 2 Structure of neural network for training

Parameters	Structure
Number of input units	4
Number of hidden units	12
Number of output units	3
Number of hidden layers	1
Learning rate(η)	0.7
Momentum rate(γ)	0.9
Shape factor(θ_0)	1.0

Table 3 Relation of circular pattern and circular type

Circular pattern(R/W)	Circular type
0.1	1
0.25	2
0.5	3

Table 4 Test results of $R/W=0.1$

Input conditions				Test results of circular pattern			Actual circular pattern
Crack length/width	Exact solution	Application element		1	2	3	
		Quadrant	Singular				
0.152	0.424	0.438	0.435	0.99	0	0	1
0.164	0.432	0.431	0.436	0.99	0	0	1
0.188	0.435	0.457	0.441	0.99	0	0	1
0.211	0.434	0.454	0.437	0.99	0	0	1
0.258	0.432	0.435	0.439	0.99	0	0	1
0.305	0.433	0.433	0.436	0.39	0.60	0	1
0.470	0.455	0.465	0.526	0.91	0.08	0	1

5. 신경회로망 시뮬레이션

신경회로망은 몇 개의 샘플 데이터를 학습하여 미학습의 데이터에 대한 입력 정보로부터 출력 정보를 추측하는 시스템으로, 본 연구에서는 경계요소법에 의한 해석 결과를 기준으로 하여 응력세기계수 예측 모델링에 대한 시스템을 구성하였다.

적용한 신경회로망의 구조는 Table 2와 같으며, 여기서 학습율과 모멘텀항은 신경회로망 시스템이 최적의 조건을 실행할 수 있도록 실행 시간과 해의 수렴성을 기본으로 많은 시뮬레이션을 반복하여 결정하였다. Fig. 11은 오차가 목표 오차 값(0.001)으로 수렴되는 과정을 나타낸다. 설정된 반

복수를 반복하면서 1회마다의 값들을 구하게 된다. 종축은 오차값을, 횡축은 반복수를 나타내며, 최종 반복 수(10,000번)에 이르기까지 10번 간격으로 플로팅하도록 하였다.

또한 결합의 종류를 인식시키는 방법으로는 Table 3과 같이 세 개의 패턴에 대하여 부울 대수를 이용하여 원공의 반경대 판폭비에 대한 패턴 형상이 0.1인 경우에 대하여는 1번 위치에 (1, 0, 0), 0.25에 대해서는 2번 위치에 (0, 1, 0), 0.5에 대해서는 3번 위치에 (0, 0, 1)의 목표값을 갖도록 하였다.

계층형 신경회로망의 구조 규모는 구성된 시스템의 특징을 해석하는 연산량에 직결되는 양으로 출력층과 은닉층간의 결합층수, 은닉층과 입력층간의 결합층수, 출력층 절점 층수, 중간층 절점 층수를 고려하여 최종적으로 92로 설정하였으며, 이에 대한 시스템의 최적화에는 123초가 소요되었다.

신경회로망은 향후 엄밀해(Yuuki의 해)와 경계요소법에 의한 시뮬레이션 해를 예측 및 평가하기 위하여 원공에서 파생하는 균열을 기준으로 균열대 판폭비의 관계, 엄밀해(Yuuki의 해), 2차 요소, 특이 요소 등의 4개를 특징으로 하는 패턴 형상을 표본으로 역전파 학습알고리즘을 이용하여 학습시켰다.

학습 세트에 있어서는 출력층의 0.1, 0.25 패턴에 대해서 각각 6개의 패턴 세트, 0.5 패턴에 대해서는 4개의 패턴 세트로 하는 총 20개의 패턴 세트로 구성하였으며, 이에 대하여 전체 오차값을 0.001, 학습횟수를 10,000번으로 학습시킨 결과, 출력층 0.1 패턴에 대하여 한 패턴(97%),

출력층 0.25 패턴에 대하여 두 패턴(98, 98%), 출력층 0.5 패턴에 대하여 세 패턴(97, 96, 98%)를 제외하고는 목표값에 거의 일치되는 99%정도의 정확성으로 학습되었다.

또한 학습된 처리소자들에 의해 새로운 조건(균열 길이, 엄밀해, 2차 요소 특이요소)을 테스트하여, 목표값의 90% 이하를 오차 처리 기준으로 평가하였다.

Table 4는 R/W가 0.1일 경우에 대한 테스트 결과로 부울대수에 의한 원공패턴과 이에 대한 신경회로망의 실제패턴으로부터 7개의 데이터 중에 여섯 번째 데이터가 0.39로 나타남으로써 오차로 처리되어 85.7%의 성공률을 나타내었으며, Table 5의 R/W가 0.25일 경우에 대한 테스트 결과는 3개의 데이터 중에 두 번째 데이터가 0.32로서 오차로 나타났으며, Table 6의 R/W가 0.5일 경우에 대한 테스트 결과에서는 3개의 데이터가 모두 성공률로 나타났다. R/W가 0.1에서 오차로 나타난 여섯 번째 데이터는 R/W가 0.25 패턴을 0.60으로 인식하고 있는데, 이는 원하는 패턴과 거의 2배의 인식률 차이를 나타내고 있다. 또한 R/W가 0.25에서 오차로 나타난 두 번째 데이터는 R/W가 0.5 패턴을 0.67로 인식하고 있으며, 이는 원하는 패턴과 2배 이상의 인식률 차이를 나타내고 있다.

R/W가 0.1과 R/W가 0.25인 경우, 각각 1개씩 오차로 판정한 패턴에 있어서 수치상의 인식률을 고려하면 R/W가 0.1의 경우가 0.39와 0.60으로 R/W가 0.25인 경우의 0.32와 0.67보다 인식률은 높고, 오차율은 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 수치상의 오차 폭을 비교하면 R/W가 0.1의 경우가 인식률이 우수하다고 할 수 있으나 전체 패턴이 각각 3개와 7개로 달라서 현재의 패턴 결과만으로 우위를 평가하는 것은 곤란하며 향후 지속적인 데이터 베이스화에 의한 고찰이 필요할 것으로 생각된다. 다만 오차의 발생 원인으로는

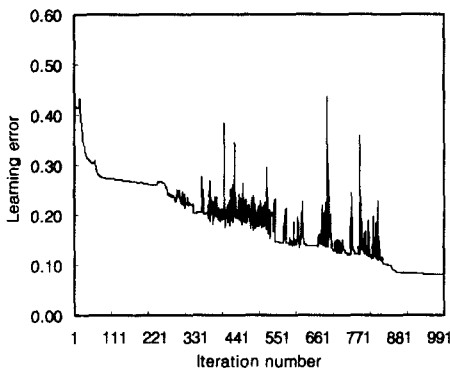


Fig. 11 Convergence process of error

Table 5 Test results of R/W=0.25

Input conditions				Test results of circular pattern			Actual circular pattern
Crack length/width	Exact solution	Application element		1	2	3	
		Quadrant	Singular				
0.411	0.475	0.490	0.487	0.02	0.98	0	2
0.588	0.518	0.515	0.525	0	0.32	0.67	2
0.705	0.563	0.572	0.570	0	0.99	0	2

내·외압을 나타내는 신경회로망의 특성상 학습의 범위를 크게 벗어난 경우에 해당된다고 생각한다.

또한 출력층 패턴 3개에 대하여 각각 3개, 2개, 2개의 전체 7개 패턴에 대한 가상 균열길이 대 판폭, 엄밀해, 2차 요소, 특이요소를 입력 특징으로 하는 세트를 테스트하였으며 Table 7은 그 결과를 나타낸다. 전체 7개의 데이터 중에 첫 번째와 두 번째 데이터가 0.82, 0.69로 나타남으로써 오차로 처리되어 71.4%의 성공률을 나타내었다. 성공률이 그다지 높다고는 할 수 없지만 패턴이 7개라고 하는 점과 네 번째 데이터가 목표값과 일치하는 인식률을 나타내었다는 점을 감안하면 테스트에서의 결과와 같이 향후 지속적인 데이터 베이스화에 의한 고찰이 필요하다고 생각한다.

본 연구에서는 원공에서 파생하는 2차원 탄성 균열의 응력세기계수를 예측하는데 있어서 경계요소법과 신경회로망 시스템 구축에 의한 고정밀도의 해석을 하고자 하였으며 이에 대한 전체적인 결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 13개의 전체 테스트 데이터 중에 R/W 0.1인 경우 1개(85.7%의 적중률), R/W 0.25인 경우 1개(66.6%의 적중률)로서 총 2개를 오차로 판정하여 83.3%의 높은 적중률을, 가상 테스트에서는 응력세기계수 예측에 대하여 R/W 0.1인 경우만 3개중 2개를 오차로 판정하여 전체에 대하여 71.4%의 적중률을 나타냄으로써 본 연구에서 구성한 시스템이 2차원 탄성균열의 응력세기계수의 예측에 유용함을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 평판의 중앙 원공에서 파생하여 진전하는 2차원 탄성균열 문제에 대하여 경계요소법을 이용하여 균열선단의 응력세기계수를 구하고, 이 결과를 다층계층 신경회로망의 역전파 학습 알고리즘에 학습시킨 후, 생성된 처리소자로 구성된 시스템을 이용하여 응력세기계수를 평가 및 예측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 경계요소법의 균열선단 요소로서 특이요소를 사용하면 적은 요소분할수로도 엄밀해와 거의 일치하는 응력세기계수를 구할 수 있었으며, 이로부터 균열을 포함하는 구조물의 해석시에 적은 요소수로 고정밀도의 해를 얻을 수 있음을 제시하였다.

(2) 원공의 크기가 $R/W=0.1$, $c/R>2.0$ 인 경우 R 은 응력세기계수에 큰 영향을 주지 않으므로 원공 크기의 변화에 따른 응력집중 현상을 미리 예측할 수 있음을 제시하였다.

(3) 구축한 신경회로망 시스템으로 원공에서 파생하는 응력세기계수를 테스트한 결과, 엄밀해를 100% 기준으로 하여 83.3%의 성공률을 나타내었으며, 가상 응력세기계수를 예측한 결과에 있어서도 71.4%의 성공률을 나타냈고, 이로부터 응력세기계수를 예측하는데 본 연구에서 구성한 신경회로망 시스템이 유용함을 입증하였다.

Table 6 Test results of $R/W=0.5$

Input conditions				Test results of circular pattern			Actual circular pattern
Crack length/width	Exact solution	Application element		1	2	3	
		Quadrant	Singular				
0.611	0.355	0.365	0.364	0.01	0	0.98	3
0.635	0.461	0.474	0.472	0	0	0.99	3
0.823	0.736	0.767	0.743	0	0	0.99	3

Table 7 Prediction results of virtual condition

Input conditions				Prediction results of circular pattern			Actual circular pattern
Crack length/width	Exact solution	Application element		1	2	3	
		Quadrant	Singular				
0.411	0.446	0.451	0.451	0.82	0.17	0	1
0.647	0.509	0.517	0.516	0.69	0.30	0	1
0.764	0.569	0.577	0.579	0.99	0	0	1
0.447	0.480	0.492	0.490	0	1.00	0	2
0.882	0.699	0.708	0.708	0	0.99	0	2
0.764	0.671	0.693	0.681	0	0	0.99	3
0.882	0.867	0.883	0.871	0	0	0.99	3

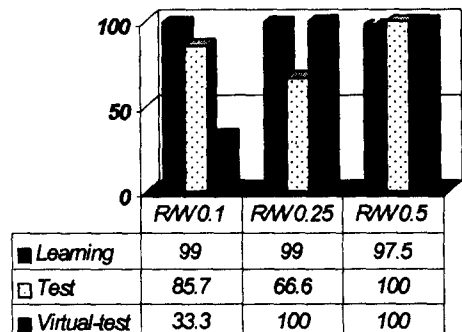


Fig. 12 Evaluation and prediction by neural network

(4) 각각의 테스트 및 가상 테스트 패턴 인식률에 있어서 R/W 가 0.5인 경우가 모두 100%, 0.25의 경우는 66.6%와 100%, 0.1의 경우는 85.7%와 33.3%을 나타내었으며, 이러한 결과로부터 0.5인 경우에 대하여 가장 우수한 패턴 인식의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Yuuki, R. and Cho, S. B., 1989, "Efficient Boundary Element Analysis of Stress Intensity Factors for Interface Cracks in Dissimilar Materials," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 34, No. 1, pp. 179~188.
- (2) 유영철, 박정환, 이 원, 1998, "에지계면균열을 갖는 단순접합기 접촉이음의 강도평가," 한국정밀공학회지, 제15권, 제6호, pp. 159~166.
- (3) Murakami, Y., 1976, "A Simple Procedure for the Accurate Determination of Stress Intensity Factors by Finite Element Method," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 8, No. 4, pp. 643~655.
- (4) 유영철, 조형문, 윤인식, 이 원, 1997, "접착층내 보이드를 갖는 접착이음의 강도해석," 한국자동차공학회 97년 춘계학술대회논문집(II), pp. 144~149.
- (5) 結城, 1988, "境界要素法の破壊力學への應用," 日本機械學會論文集(A編), 第54卷, 505号, pp. 1661~1669.
- (6) 村田, 向井, 1992, "異材接合殘留特異應力場の接合要素法による評價," 日本機械學會論文集(A), 第58卷, 555号, pp. 2165~2171.
- (7) 森谷之信, 青木 繁, 1996, "ウェーブレット変換とニューラルネットワークを用いた豫き裂長さの推定," 日本機械學會論文集(A編), 第62卷, 598号, pp. 1368~1375.
- (8) 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, 1997, "신경회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가," 대한기계학회지, 제21권, 제4호, pp. 586~595.
- (9) 이 원, 윤인식, 1998, "신경회로망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함 검출 분류 최적화," 한국정밀공학회지, 제15권, 제7호, pp. 149~159.
- (10) 北川, 結城, 1977, "有限板中の任意形状き裂の等角寫像による解析," 日本機械學會論文集(第1部), 第43卷, 376号, pp. 4354~4362.
- (11) Newman, J. C., 1971, "An Improved Method of Collocation for the Stress Analysis of Cracked Plate with Various Shaped Boundaries," NASA Technical Note, TN D-6376.
- (12) 星川 洋, 1996, "ニューラルネットワークの基礎と非破壊評價への應用," 非破壊検査, 第45卷, 12号, pp. 848~853.
- (13) 이 원, 윤인식, 1998, "초음파와 신경회로망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함 검출 및 평가," 대한용접학회지, 제16권, 제3호, pp. 192~201.
- (14) 이 원, 윤인식, 1998, "용접부 건전성 평가를 위한 카오털 후처리 시스템의 구축," 한국정밀공학회지, 제15권, 제11호, pp. 149~159.