

## 반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

†김정환 · 이화영 · 이민경 · 이재훈 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2021년 11월 15일 접수, 2021년 12월 21일 수정, 2021년 12월 22일 채택)

## Calculation of Expected Life of Hydrogen Pressure Vessels by Fracture and Fatigue Mechanics assuming Semi-elliptical Cracks and Analysis of the Effect of Thickness and Radius

†Jeong Hwan Kim · Hwa Young Lee · Min-Kyung Lee · Jae-Hun Lee · Geunjun Lyu

*Institute of Gas R&D, Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do, 27738, Korea*

*(Received November 15, 2021; Revised December 21, 2021; Accepted December 22, 2021)*

### 요약

수소충전소의 빠른 확장 및 설치와 동시에 수소충전소의 고압수소 충전 압력용기에 대한 안전 검사가 매우 중요하게 이루어져야 한다. 이 중 ASME에 따르면 일정 압력 이상의 수소를 보관하는 용기에 대해서는 수소 취성 검사를 반드시 해야 한다. 수소취성 검사의 주된 시험방법으로 고압의 수소분위기에서 파괴시험 및 피로 파괴시험을 실시해야 하며, 이를 통해 수소 분위기에서 압력용기의 내구한계를 측정하고, 사용한계를 결정하도록 되어 있다. 세부적으로 stress intensity factor(K)로부터 한계균열깊이를 계산하고, da/dN(피로성장율)로부터 사용수명을 결정할 수 있다. API579-1/ ASME FFS-1 part 9에서 crack-like flaws의 모드에 따른 계산방법을 제시하고 있으나, 플레이트, 실린더 등 다양한 형태의 형상에 대하여 균열의 형상, 위치 등에 의하여 대략 55개 모드가 있고, 상당히 복잡한 수식으로 인하여 쉽게 접근을 못한다. 본 연구에서는 엑셀 및 VBA를 통하여 수치해석적으로 파괴역학계산하는 방법을 소개하고자 한다. 또한, 이를 적용하여 압력용기의 두께와 내경이 수명에 미치는 영향을 분석해 보았다.

**Abstract** - While the hydrogen refueling station is rapidly expanded and installed, the safety inspection of the hydrogen pressure vessel in the station should be very important. Of these, according to ASME, hydrogen embrittlement tests must be performed for hydrogen vessel that store hydrogen above a certain pressure. The main test method for hydrogen embrittlement inspection is to carry out fracture tests and fatigue fracture tests in a high pressure hydrogen atmosphere, which allows the durability limit of the pressure vessel to be measured and the endurable limit to be determined in the hydrogen atmosphere. In detail, the critical crack depth can be calculated by the stress intensity factor(K), and the service life can be determined by da/dN (fatigue growth rate). API579-1/ ASME FFS-1 part 9 exemplifies the calculation method according to the mode of crack-like flaws, but for various shapes such as plates and cylinders, there are about 55 modes according to the shape and location of the crack. Due to the fairly complex formula, it is not easily accessible. In this study, we will show you how to calculate fracture mechanics numerically via Excel and VBA. In addition, this was applied to analyze the effects of the thickness and inner diameter of the pressure vessel on the service life.

**Key words** : hydrogen pressure vessel, fracture, fatigue, semi-elliptical crack, K, da/dN, life

†Corresponding author: abbu2k@kigs.or.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

수소충전소의 보급 및 운영이 확대됨에 따라 수소를 고압으로 저장하는 압력용기의 설치가 늘고 있는 현실이다. 90 MPa에 달하는 고압의 수소 압력용기의 안전성을 확보할 수 있는 평가방법 및 안전기준이 필요한 상황이다.

ASME BPVC Sec.VIII, Div.3 article KD-10(Special requirements for vessels in hydrogen service)에서는 이음매 없는 용기의 경우 41 MPa 이상, 용접 용기의 경우 17 MPa 이상의 고압 수소 환경에서는 수소취성의 영향으로 압력용기가 손상될 수 있으므로 수소취성에 대한 평가를 진행하여 압력용기 사용수명을 결정하도록 규정하고 있다.<sup>[1]</sup> 이렇게 압력용기의 사용수명을 예측하는 방식은 손상허용(Damage tolerance) 개념을 도입하는 것으로 결함이나 균열이 존재할 것으로 보고, 결함이 있는 상태에서부터 언제까지 사용할 수 있는지를 판단하여 압력용기를 안전하게 사용하도록 하는 방법이다.<sup>[2,3]</sup>

수소취성에 대한 영향을 반영한 압력용기 수명 계산 시 필요한 인자들은 실험으로 도출하거나, 일반적으로 많이 사용하는 소제에 대해서는 국제기준에서 제시하는 값을 따른다. 기본적으로 압력용기 재료의 수소한계응력확대계수( $K_{III}$ )와 수소 분위기의 피로균열성장율( $da/dN$ )의 값이 필요하며<sup>[4]</sup>, 두 식으로부터 한계균열깊이( $a_{crit}$ )와 한계사용회수( $N_{critical}$ )를 구하고, 한계균열깊이에는 안전율 4를 적용하고, 한계사용회수에는 안전율 2를 적용하여 허용사용회수( $N_{allowed}$ )를 구한다. 실제 균열이 존재하는 경우는 허용사용회수까지만 사용할 수 있으며, 아직 균열이 발견되지 않은 경우, 균열을 찾기 위한 재검사 기간으로 사용할 수 있다.

하지만, 계산에 이용되는 수식이 매우 복잡하고 참조해야 하는 값으로 균열의 종횡비, 내경과 두께의 비, 두께에 대한 균열깊이의 비에 따라서 찾아야 하는 표만 해도 수십 장에 달하는 등 계산이 용이치 않고 접근이 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 엑셀 및 VBA(Visual basic for applications) 언어를 통하여 수치해석적으로 한계균열깊이와 허용사용회수를 구하는 로직을 소개하고, 코딩 방법을 상세히 밝히고자 하며, 이 방법에 의하여 수소 압력용기에 반타원형 균열이 존재하는 경우, 허용사용회수를 구해보고 압력용기의 두께 및 내경 등이 허용사용회수에 미치는 영향을 알아보려 한다.

## II. 수명계산에 필요한 수식

### 2.1. 응력확대계수 솔루션

API579-1/ASME FFS-1(Fitness for service) 코드<sup>[5]</sup>에서는 표1과 같이 제품의 형태와 균열의 종류, 모양, 방향, 응력분포 등에 대하여 55개의 응력확대계수(stress intensity factor, 이하 SIF)의 솔루션을 갖고 있

**Table 1.** List of solutions for stress intensity factor<sup>[5]</sup>

	Category		
Component Geometry	①Plate, ②Plate with a hole, ③Cylinder, ④Sphere, ⑤Elbow and pipe bend, ⑥Nozzle or piping tee, ⑦Ring-stiffened cylinder, ⑧Sleeve reinforced cylinder, ⑨Round bar or bolt, ⑩Cracks at fillet welds, ⑪Cracks in clad		
Crack Geometry	①Through-wall crack, ②Surface crack, ③Embedded crack		
Crack Shape	①Infinite length, ②Semi-elliptical shape, ③Elliptical shape, ④Single edge crack, ⑤double edge crack		
Crack direction	①Circumferential direction, ②Longitudinal direction		
Crack Loading	①Membrane and bending stress ②Fourth order polynomial stress distribution, ③Arbitrary stress distribution, ④Pressure with a net section axial force, ⑤Internal pressure		
▽ Combination			
Stress Intensity Factor Solution	KPTC (9B.3.1)	KPSCL1 (9B.3.2)	KPSC2 (9B.3.3)
	KPSC1 (9B.3.4)	KPSC2 (9B.3.5)	KPSC3 (9B.3.6)
	KPECL (9B.3.7)	KPECE1 (9B.3.8)	KPECE2 (9B.3.9)
	KPHTC1 (9B.4.1)	KPHTC2 (9B.4.2)	KPHSC1 (9B.4.3)
	KPHSC2 (9B.4.4)	KCTCL (9B.5.1)	KCTCC1 (9B.5.2)
	KCTCC2 (9B.5.3)	KCSCLL1 (9B.5.4)	KCSCLL2 (9B.5.5)
	KCSCLL3 (9B.5.6)	KCSCLL1 (9B.5.7)	KCSCLL2 (9B.5.8)
	KCSCLL3 (9B.5.9)	KCSCE1 (9B.5.10)	KCSCE2 (9B.5.11)
	KCSCE3 (9B.5.12)	KSCCE1 (9B.5.13)	KSCCE2 (9B.5.14)
	KSCCE3 (9B.5.15)	KCECLL (9B.5.16)	KCECCL (9B.5.17)
	KCECLE (9B.5.18)	KCECCE (9B.5.19)	KSTC (9B.6.1)
	KSSCCL1 (9B.6.2)	KSSCCL2 (9B.6.3)	KSSCCL3 (9B.6.4)
	KSSCE1 (9B.6.5)	KSSCCE2 (9B.6.6)	KSSCCE3 (9B.6.7)
	KSECCL (9B.6.8)	KSECCE (9B.6.9)	(9B.7)
	KNCC1 (9B.8.1)	KNCC2 (9B.8.2)	(9B.8.3)
	KRCSCLL1 (9B.9.1)	KRCSCLL2 (9B.9.2)	(9B.10)
	KBSC1 (9B.11.1)	KBSC2 (9B.11.2)	KBSC3 (9B.11.3)
	KBSC (9B.11.4)	KFWSC1 (9B.12.1)	(9B.12.2) / (9B.13)

반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

다. 본 연구에서 사용된 모드는 실린더에 있는 반타원형 표면결함이 실린더 길이 방향으로 존재해 있고, 내부 압력에 의한 응력을 받는 균열을 가정하였으며, 해당 SIF의 솔루션은 9B.5.10절의 KCSCLE1 균열 모드이다.

### 2.1.1. KCSCLE1 응력확대계수 솔루션<sup>5)</sup>

응력확대계수 솔루션 중 KCSCLE1 모드의 솔루션은 실린더의 안쪽 표면균열이면서 길이 방향으로 나 있는 반타원형 표면결함으로 그림 1과 같으며, 해당 솔루션은 다음과 같다.

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 - 2G_1 \left( \frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (1)$$

$K_I$  계산에 들어가는  $G_0$ 와  $G_1$ 은 다음의 식으로 구한다.

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$$

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6$$

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi}$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad \text{for } a/c \leq 1.0$$

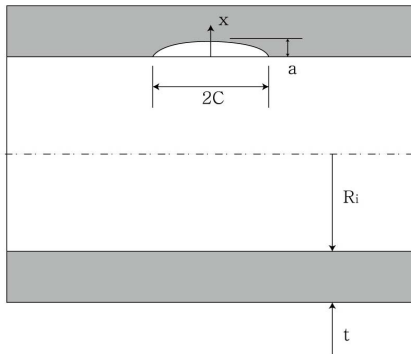


Fig. 1. Figure of Flaws in Cylinder, surface crack, longitudinal direction, semi-elliptical shape.

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad \text{for } a/c > 1.0$$

여기에서, KCSCLE1 솔루션의 경계조건은 다음과 같다.

$$0.0 \leq a/t \leq 0.8$$

$$0.03125 \leq a/c \leq 2.0$$

$$\varphi \leq \pi/2; \quad \text{for } \pi/2 < \varphi \leq \pi \quad K_I(\varphi) = K_I(\pi - \varphi)$$

$$0.0 \leq t/R_i \leq 1.0$$

$G_0$ 와  $G_1$ 에 들어가는  $A_{00}$ 부터  $A_{60}$ ,  $A_{01}$ 부터  $A_{61}$ 까지의 값은 표2와 같이 구성되어 있는 API579-1/ASME FFS-1 Table 9B.12에서 찾아서 사용할 수 있다. 벽두께와 내경의 비( $t/R$ ), 균열깊이와 벽두께의 비( $a/t$ ) 및 균열깊이와 균열길이의 중형비( $a/c$ )로부터 찾을 수 있으며, 사이의 값들은 내삽하여 구한다.  $G_0$ 에 해당하는 표와  $G_1$ 에 해당하는 표는 각각 구성된다.

또한,  $K_I$  계산에 들어가는  $G_2, G_3$  및  $G_4$ 는 다음의 식으로 구한다. 균열의 진전 방향이 길이 방향( $\pi/2$ )인 경우는 다음과 같다.

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right)$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}$$

$$M_2 = 3$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}$$

균열의 진전 방향이 길이 방향(0)인 경우는 다음과 같다.

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right)$$

**Table 2.** Influence Coefficients For A Longitudinal Semi-Elliptical Surface Crack In A Cylinder - inside

	t/R	a/c							
		a/t	0.03125	0.0625	0.125	0.25	0.5	1	2
A0		0	0.1965046	0.2695332	0.4065238	0.6152816	0.8776607	1.1977992	0.8150546
		0.2	0.208076	0.2845892	0.4242116	0.6385889	0.9003948	1.2263282	0.8463715
		0.4	0.235794	0.326148	0.491777	0.739042	1.005806	1.298948	0.8570045
		0.6	0.290224	0.416633	0.659182	0.946121	1.182601	1.397118	0.8839861
		0.8	0.516355	0.654014	0.980933	1.245211	1.383338	1.511701	0.9033134
A1		0	2.9373464	2.1626001	0.7772483	-0.334869	-0.672972	-0.524487	-0.562383
		0.2	3.0112422	2.2264055	1.0089302	-0.309513	-0.885049	-1.160847	-1.001102
		0.4	3.08224	2.520087	1.659232	0.054816	-0.73226	-0.9978	-1.018309
		0.6	3.689205	3.156647	1.875914	-0.18588	-1.10725	-1.13484	-1.076527
		0.8	2.531083	3.423192	1.884632	-0.69219	-1.39003	-1.32448	-0.961976
A2		0	-5.258282	-1.655157	3.8861644	6.295562	3.7721411	0.1498299	1.4465771
		0.2	-5.10487	-1.454619	3.2973815	6.5329787	5.2743239	4.4744783	4.0052312
		0.4	-3.57921	-1.8847	-0.10804	4.084262	2.995194	1.947954	3.9957306
		0.6	-4.57391	-2.62489	1.02126	5.586746	3.962364	1.791874	4.0774087
		0.8	14.7129	3.815805	4.802078	8.326062	4.375578	1.756835	2.85015
A3	0	0	7.4889153	-1.297021	-12.57394	-15.59062	-6.520906	2.3284866	-4.677813
		0.2	7.6348715	-1.576072	-12.15973	-16.62288	-11.26752	-11.58423	-11.93718
		0.4	3.947689	2.179874	0.179324	-7.58831	-1.94592	-1.30027	-11.88688
		0.6	11.70989	7.732591	-1.7698	-9.86349	-2.77813	-0.42026	-11.97617
		0.8	-43.6218	-4.15869	-8.05802	-14.948	-3.73726	-0.13379	-7.63669
A4		0	-6.928267	4.5604304	16.760207	19.299508	6.3377934	-5.10585	8.4192164
		0.2	-6.834755	5.1131083	17.873386	21.056641	13.890755	17.811241	19.189548
		0.4	1.913159	-1.45971	-2.70761	5.404753	-3.26135	-1.49401	19.152747
		0.6	-6.375	-9.69278	-0.56536	5.959687	-4.30973	-2.86793	19.173189
		0.8	101.0657	3.471533	0.444785	8.693691	-2.54032	-2.86293	11.596116
A5		0	3.3673349	-4.316388	-11.01459	-12.48811	-3.702804	4.3469049	-7.902593
		0.2	2.7940766	-4.948544	-12.86867	-13.85012	-9.637358	-14.40825	-16.0393
		0.4	-6.88722	-0.18865	3.368062	-1.01461	5.142457	2.830623	-16.04748
		0.6	-5.88941	3.64287	1.247996	0.129644	7.277275	3.768548	-15.99621
		0.8	-116.081	-10.3104	3.477266	0.475579	5.3036	3.295327	-9.482863
A6		0	-0.667797	1.4010655	2.8706957	3.3010035	0.9872447	-1.348798	2.9866351
		0.2	-0.388269	1.6207574	3.6281712	3.6988146	2.8183906	4.6998279	5.4674371
		0.4	3.18968	0.23934	-1.34897	-0.34834	-2.03062	-1.2126	5.4801806
		0.6	4.24524	-0.0892	-0.43766	-1.00261	-2.96482	-1.4405	5.4501217
		0.8	46.1909	6.628	-1.05675	-1.39266	-2.09324	-1.14124	3.2550163
A0	0.01	0	0.03125	0.0625	0.125	0.25	0.5	1	2
		0.2	0.1965046	0.2695332	0.4065238	0.6152816	0.8776607	1.1977992	0.8150546
		0.4	0.2149558	0.3011924	0.4140502	0.6241551	0.901549	1.2108906	0.8108427
		0.6	0.23711	0.332163	0.492723	0.735315	0.999566	1.291544	0.8250898
		0.8	0.292163	0.417431	0.645797	0.932415	1.170513	1.387921	0.8505718
			0.524376	0.660989	0.933198	1.221949	1.356536	1.495553	0.9038677

• • • (continued)

[비고] t/R은 12개 구간 0 / 0.01 / 0.01667 / 0.05 / 0.1 / 0.2 / 0.33333 / 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3, a/t는 5개 구간, a/c는 7개 구간으로 3개구간 총 420개 데이터 중에서 내삽하여 A0부터 A6를 구하여 G0를 계산함. 또 다른 테이블로 마찬가지로 방법으로 A01부터 A61을 구하여 G1을 계산함.

반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(2G_0 - 5G_1) - 8$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}}(3G_1 - G_0) + 15$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(3G_0 - 10G_1) - 8$$

균열의 진전 방향이 깊이 방향( $\pi/2$ )과 길이 방향(0)의 사이의 각( $\phi$ )으로 인한 경우는 다음과 같다.

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{945\pi}(G_{21} + G_{22})$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{13860\pi}(G_{31} + G_{32})$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{45045\pi}(G_{41} + G_{42})$$

$$G_{21} = 108 + 180z + 576z^2 - 864z^3 + (1056 + 128M_1)\delta z^{2.5}$$

$$G_{22} = M_3(45\eta + 54\eta z + 72\eta z^2 - 315\omega z^{2.5} + 144\eta z^3)$$

$$G_{31} = 880 + 1232z + 2112z^2 + 7040z^3 - 11264z^4 + (13056 + 1280M_1)\delta z^{3.5}$$

$$G_{32} = M_3\left(385\eta + 440\eta z + 528\eta z^2 + 704\eta z^3 - 3465\omega z^{3.5} + 1408\eta z^4\right)$$

$$G_{41} = \left(1820 + 2340z + 3328z^2 + 5824z^3 + 19968z^4 - 33280z^5 + (37376 + 3072M_1)\delta z^{4.5}\right)$$

$$G_{42} = M_3\left(819\eta + 909\eta z + 1040\eta z^2 + 1248\eta z^3 + 1664\eta z^4 - 9009\omega z^{4.5} + 3328\eta z^5\right)$$

$$z = \sin\phi$$

$$\delta = \sqrt{1+z}$$

$$\omega = \sqrt{1-z}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{z}-1}$$

**Table 3.** Crack growth rate factors of SA372 and SA723 steels

	da/dN <sub>low</sub>	da/dN <sub>high</sub>
C(m/cycle)	3.5 E-14	1.5 E-11
m	6.5	3.66
CH	0.43	2.0

[비고]  $\Delta K_c = (8.475 + 4.062R_k - 1.696R_k^2) \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$   
여기서  $\Delta K < \Delta K_c$  이면 da/dN<sub>low</sub>의 인자를,  $\Delta K \geq \Delta K_c$  이면 da/dN<sub>high</sub>의 인자를 사용한다.

### 2.1.2. 수소한계 응력확대계수의 값<sup>6,7)</sup>

2.1.1에서 응력확대계수( $K_I$ )의 값에 수소한계응력확대계수( $K_{IH}$ )를 사용한다. 재료의 측정된 인장강도가 915 MPa를 초과하지 않으면서, ASME Section VIII에 따른 SA-372 또는 SA-723을 사용한 압력용기등이 운전압력 103 MPa를 초과하지 않으면, 수소한계응력확대계수( $K_{IH}$ )는 40 MPa·√m으로 사용할 수 있다.

$$K_{IH} = 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (2)$$

### 2.2. 피로균열성장율의 값<sup>6,7)</sup>

2.1.2에서 사용하는 조건을 모두 만족하는 압력용기등의 경우에는 표3에서 정하고 있는 값으로 피로균열성장율을 결정할 수 있다.

$$1) \text{ 심부 길이 } da/dN = C[f(R_k)](\Delta K)^m \quad (3)$$

$$2) \text{ 표면부 길이 } dl/dN = 2C[f(R_k)](\Delta K)^m \quad (4)$$

여기에서,

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

$$R_k = K_{\min} / K_{\max}$$

$$f(R_k) = \frac{1 + C_H R_k}{1 - R_k}$$

또한,  $K_{\min} < 0$  이면  $K_{\min} = 0$ 으로 한다.

### III. 수소 압력용기 수명 계산

ASME Sec.VIII Div.3 KD-4(Fracture mechanics evaluation)과 KGS AC111 3.8.1(내수소취성)에서는

수소에 쓰이는 압력용기의 수명을 결정할 때 파괴역학 및 피로파괴역학 기반의 계산을 요구하고 있다. 시험에 의해서 결정된 수소에서의 파괴인성(threshold stress intensity factor for hydrogen-assisted cracking,  $K_{IH}$ )와 수소에서의 피로균열성장율(fatigue-crack-growth rate in hydrogen atmosphere,  $da/dN$ )이 필요하다. 또한 수소 압력용기는 현재 많이 쓰이는 심리스(seamless) 또는 일체형(monobloc)을 대상으로 하며, 내외부 환경( $R_{out}$ ,  $R_{in}$ ), 벽두께( $W$ ), 설계압력 또는 최고운전압력( $P_{max}$ )과 최저운전압력( $P_{min}$ )이 한계균열깊이와 한계사용회수 등을 구할 때 사용된다.

시험에 의한 두 값과 압력용기의 기본 정보 및 운전 압력을 이용한 계산의 순서는 다음과 같다.

- ① 초기균열깊이( $a_0$ )의 가정
- ②  $K_{IH}$  솔루션 선택
- ③ 한계균열깊이( $a_{cH}$ ) 계산
- ④  $a$  값에 따른  $dN/da$  값의 적분
- ⑤ 한계사용회수에 대한 안전율 또는 한계균열깊이에 대한 안전율 적용
- ⑥ 허용사용회수 산정으로 예상사용수명 결정

### 3.1. 초기균열깊이( $a_0$ )의 가정

초기균열은 균열진전(crack propagation)에 의한 수명 평가의 기초자료이다. 기본은 비파괴검사서에서 최대 허용균열지시(maximum acceptable crack indication)의 크기를 사용한다. 그림2와 같은 형태이며, 최대허용 균열지시의 크기는 길이는 25mm 이하, 폭은 1.6mm

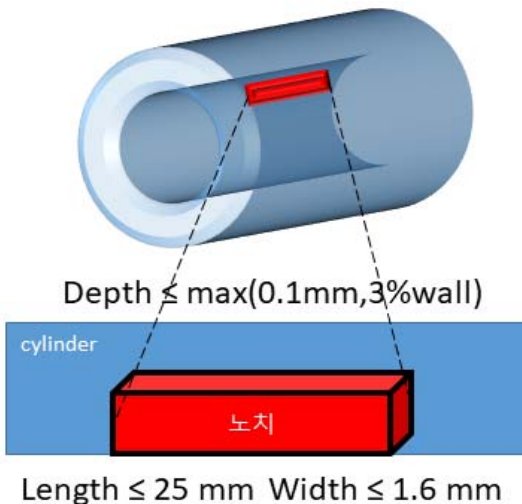


Fig. 2. Inside notch(maximum acceptable crack indication) of reference specimen.

이하, 깊이는 0.1mm와 벽두께의 3%의 해당하는 값이 중 큰 값보다 작아야 한다.

위와 같은 방법이 아니라면, 그림 1과 같은 반타원형 모양으로 길이( $a_0$ )와 깊이( $c_0$ )의 중형비( $a_0/c_0$ )가 1/3 이 되는 크기로 선정한다. 코드 등에서 초음파탐상시험법에서 검출할 수 있는 제일 작은 균열 크기를 1.6mm로 보기 때문에  $2c_0$ 를 1.6mm로 보고  $a_0$ 를 0.27mm 이상으로 가정할 수 있다.

### 3.2. $K_{IH}$ 솔루션 선택

초기균열의 형태 및 위치, 크기에 따라 다양한 stress intensity factor(SIF) 솔루션이 존재한다. 이 논문에서 가정한 초기균열은 API579-1/ASME FFS-1 part 9에서 9B.5 SIF solutions for cylinder 에 있는 9B.5.10(KCSCLE1)의 표면결함(surface crack)이면서, 길이 방향(longitudinal direction)으로 있는 균열이고 모양은 반타원형(semi-elliptical shape)이고, 응력분포는 내부압력(internal pressure)만 받는 것으로 가정한 솔루션이다. 앞의 2.1.1절에서 관련된 솔루션의 수식을 자세히 표현하였다.

### 3.3. 한계균열깊이( $a_{cH}$ ) 계산

(1)식의 좌변과 우변 모두 깊이( $a$ )항을 갖고 있으므로,  $a_1$ 으로부터  $a_2$ 를 구하고,  $a_2$ 로부터  $a_3$ 를 구하며, 두 항간의 차이를 0.0000001m로 하거나, 반복수를 10,000 으로 하는 반복작업(iteration)을 통하여 수치해석적으로 해를 구한다. 수치해석적 방법으로 NR(Newton-Raphson)법과 이분법을 보완하여 사용하였다. 그림 3에서 계산의 절차를 흐름도로 표현하였다. 피로균열 성장율의 식 (3)과 (4)를 보면 표면 근처 길이( $l$  또는 소문자  $c$ )방향 균열 성장률은 깊이( $a$ ) 방향 성장률의 2배로 다음과 같이 한계균열깊이( $a_{cH}$ )를 같이 계산할 수 있다.

$$a_{cH} = a_0 + \Delta a$$

$$c_{cH} = c_0 + \Delta c$$

$$\Delta c = 2\Delta a$$

$$c_{cH} = c_0 + 2(a_{cH} - a_0) \tag{5}$$

반복작업 중 중형비는 다음의 식을 사용한다. ( $a_{cH}$  구한 값,  $a_0$  및  $c_0$  확정값)

$$\frac{a_{cH}}{c_{cH}} = \frac{a_{cH}}{c_0 + 2(a_{cH} - a_0)} \tag{6}$$

반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

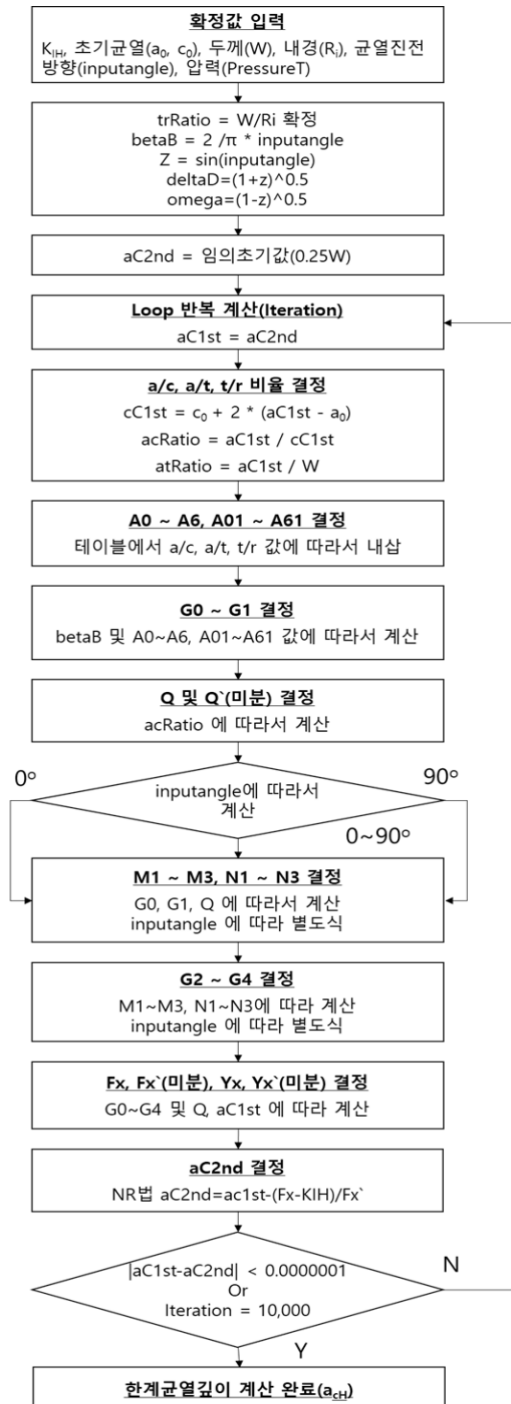


Fig. 3. Flow chart of critical crack depth calculation from stress intensity factor.

Table 4. Example of A-value search from Table2

input		output			
		G0		G1	
t/R	0.15	A <sub>00</sub>	0.717418	A <sub>01</sub>	0.092994
a/t	0.02	A <sub>10</sub>	-0.73526	A <sub>11</sub>	0.323796
a/c	0.33	A <sub>20</sub>	6.964944	A <sub>21</sub>	1.140809
t/R1	0.1	A <sub>30</sub>	-16.6911	A <sub>31</sub>	-0.3739
t/R2	0.2	A <sub>40</sub>	21.03431	A <sub>41</sub>	-1.16175
ROW1	370	A <sub>50</sub>	-14.0474	A <sub>51</sub>	0.805984
ROW2	412	A <sub>60</sub>	3.842577	A <sub>61</sub>	-0.14193

표2에서 확정값인 두께/내경비(t/R)로 먼저 t/R1과 t/R2의 구간을 정하고 (6)식의 균열의 중횡비(a/c)와 균열깊이/두께비(a/t)값 간 테이블에서 내삽된 값을 찾으면 표 4와 같이 계산될 수 있다. G0와 G1이 계산되면 2.1.1절의 식에 의해 G2, G3, G4가 자동으로 계산되어 a1으로 a2를 구할 수 있고, 전술하였듯이 반복적으로 표의 값을 찾고 계산을 수행하며, 해를 구할 수 있다.

### 3.4. a값에 따른 dN/da값의 적분

시험 등에 의해 얻은 피로균열성장률(da/dN)을 역수로 하여 dN/da로 만들고, a<sub>0</sub>부터 a<sub>CH</sub>까지 수에 대하여 적분하여 계산할 수 있다. 이 방법 역시 간단히 적분식으로 계산되지 않기 때문에 그림4와 같이 a를 0.000001m로 분할하고, 사다리꼴 모양의 a1, a2(=a1+0.000001), [dN/da]1, [dN/da]2의 넓이를 계산하는 방식으로 계산하였다. 추가적으로 코딩의 편의성과 곡률을 감안하여 그림5와 같이 a1과 a2의 사이값 a1+0.0000005에 대한 dN/da 값과 간격 0.000001의 곱(넓이)의 합(sum)으로 계산하였다. 3.5절에서 사용되는 a<sub>0</sub>+(a<sub>CH</sub>-a<sub>0</sub>)/4에 대한 적분 계산 및 한계사용회수를 구하는 방식도 같은 원리이다.

식 (1)과 (3)을 조합하여 한계사용회수를 구하는 식은 다음과 같이 구성될 수 있다. 식(3)의 R<sub>k</sub>값은 k<sub>min</sub>/k<sub>max</sub>이나 같은 균열 크기에서는 압력에 따라 값이 결정되므로 a<sub>i</sub>에 따라 p<sub>min</sub>/p<sub>max</sub>로 표현될 수 있다. 또한 ΔK 역시 압력범위에 의해 차이가 발생되므로 a<sub>i</sub>에 따라 (p<sub>max</sub>-p<sub>min</sub>)항 곱하기 응력 등 값으로 표현가능하다.

$$N_c = \int_{a_0}^{a_{cH}} dN/da$$

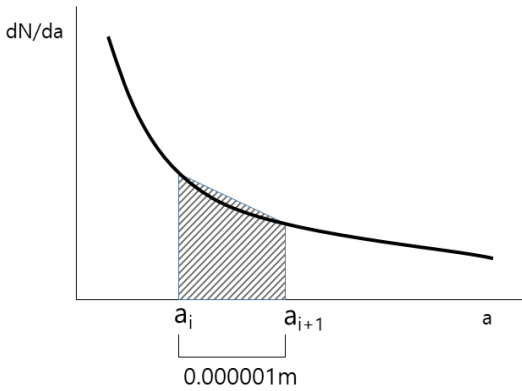


Fig. 4. Integral method of  $dN/da$  to get  $N_{critical}$ .

$$N_c \cong \sum_{i=1}^{cH} \frac{(a_i - a_{i-1})}{C \cdot \left( \frac{1 + C_H \cdot \frac{p_{min}}{p_{max}}}{1 - \frac{p_{min}}{p_{max}}} \right) \cdot (\Delta K)^m} \quad (7)$$

단, 여기서

$$\Delta K = \frac{(p_{max} - p_{min})R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 - 2G_1 \left( \frac{a_i}{R_i} \right) + 3G_2 \left( \frac{a_i}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left( \frac{a_i}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a_i}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a_i}{Q}}$$

그림5의 방식은 식(7)에서  $a_{i+0.0000005}$ 식의 값으로  $\Delta K$ 를 구하고 0.000001의 값을 곱하여 i에 따라 계속 적산하면 된다.

### 3.5. 한계사용회수에 대한 안전을 또는 한계균열 깊이에 대한 안전을 적용

수소 압력용기의 허용사용회수는 식(8)과 그림6과 같이 한계사용회수에 대한 안전을 적용 또는 한계균열 깊이에 대한 안전을 적용 후 사용회수를 구하고 그 중 작은 값으로 한다.

- ① 한계사용회수의 1/2
- ② 초기균열깊이에 한계균열깊이에서 초기균열깊이를 뺀 값의 1/4을 더한 값과 벽두께의 1/4 중 작은 값의 사용회수

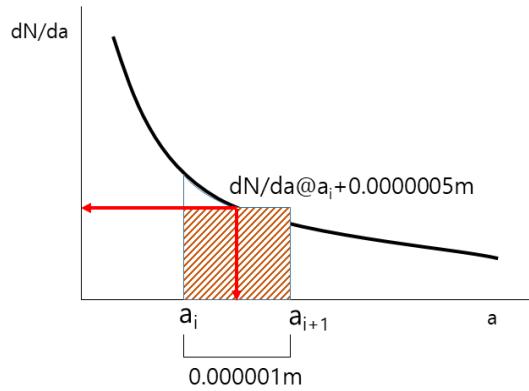


Fig. 5. Modified Integral method of  $dN/da$  to get  $N_{critical}$ .

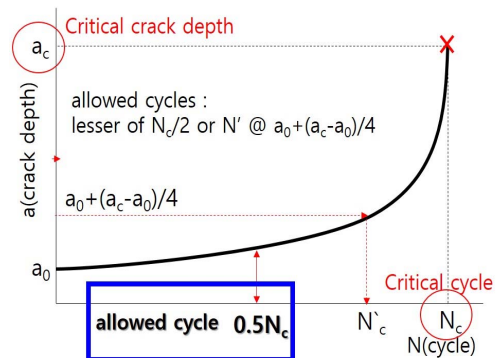


Fig. 6. Calculation of allowed cycle from critical cycle and crack depth.

$$N_{allowed} = \min(N_c/2, N' @ (a_0 + (a_{c,H} - a_0)/4)) \quad (8)$$

### 3.6. 허용사용회수 산정으로 예상사용수명 결정

그림7에 3.4절부터 3.5절까지의 계산 수행 방법을 흐름도로 나타내었다. 한계균열깊이( $a_{cH}$ )가 정해지면 초기균열깊이( $a_0$ )로부터  $dN/da$ 를 적분하여 한계사용회수 및 그로부터 허용사용회수를 구할 수 있었다. 손상허용 개념과 안전을 개념을 통하여 계산된 허용사용회수를 예상되는 압력용기의 수명으로 판단할 수 있다.

수소취성이 압력용기에 미치는 영향을 고려하여, 압력용기 운전 중 주기적으로 초음파탐상 등의 가능한 방법으로 균열의 생성 및 성장률 등을 조사해야 하며, 이를 통해 압력용기의 건전성을 높일 수 있다.

가정하였던 3.1절과 같은 균열을 발견할 때까지 허용사용회수보다 적은 기간에 비파괴검사를 실시하여



반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

균열을 확인한다. 반타원형 외 다른 형태의 균열일 때는 API571-1/ASME FFS-1 또는 문헌을 참조하여 SIF 솔루션을 새로이 설정하고, 3.3절~3.5절의 과정을 수행하여 압력용기의 수명을 확인한다.

### 3.7. 코딩의 구성

#### 3.7.1 코딩 - 한계사용회수 구하기

반복 구문 외, Gzero부터 G4까지 구하는 식은 피로 균열성장율에 의한 허용사용회수 구할 때도 동일하게 사용됨. Y10\_KCSCLE1\_InP(j, C0 + 2 \* (j - a0), inputAngle, W, Ri) Function으로 별도 구성하여 사용하였다.

```
Public Function aC_KCSCLE1(KiH , a0 , c0 , W , Ri , inputAngle , PressureT) ' As Double
```

```
Dim betaB , Q , Qp , Gzero , G1 , G2 , G3 , G4 , Azero0 , A10 , A20 , A30 , A40 , A50 , A60 , Azero1 , A11 , A21 , A31 , A41 , A51 , A61 , aC1st , aC2nd , cC1st , cC2nd , M1 , M2 , M3 , N1 , N2 , N3 , Ma1 , Ma2 , Ma3 , Ma4 , Z , delLtaD , omeGa , eTa ' As Double
```

```
Dim Yx , Yxp , Fx , Fxp , iTe , tRratio , atRatio , aRatio , acRatio , Rout ' As Double
```

```
Dim wb As Workbook , ws As Worksheet
```

```
Set wb = ThisWorkbook
Set ws = wb.Worksheets("Table_Cylinder")
```

```
aC2nd = 0.25 * W
iTe = 1
```

```
Do
```

```
aC1st = aC2nd
cC1st = c0 + 2 * (aC1st - a0)
```

```
Rout = Ri + W
atRatio = aC1st / W
```

```
If aC1st <= cC1st Then
acRatio = aC1st / cC1st
```

```
If acRatio < 0.03125 Then
acRatio = 0.03125
End If
```

```
Else
acRatio = cC1st / aC1st
```

```
If acRatio < 0.5 Then
acRatio = 0.5
End If
```

```
End If
```

```
tRratio = W / Ri
```

```
If inputAngle < 90 And inputAngle >= 0 Then
betaB = 2 * Application.WorksheetFunction.Radians(inputAngle) / Pi
```

```
Elseif inputAngle <= 180 And inputAngle > 90 Then
betaB = 2 * Application.WorksheetFunction.Radians(180 - inputAngle) / Pi
```

```
Else
MsgBox ("0에서 180도 사이만 입력 가능")
```

```
End If
```

'테이블에 주어진 값에서 내삽한 값 찾기, atRatio와 acRatio가 반복 계산 중에 계속 바뀌기 때문에 값이 새로 설정됨

```
With ws
```

```
.Range("b708").Value = tRratio
.Range("c708").Value = atRatio
.Range("d708").Value = acRatio
```

```
Azero0 = .Cells(710, 2).Value
A1 = .Cells(710, 3).Value
A2 = .Cells(710, 4).Value
A3 = .Cells(710, 5).Value
A4 = .Cells(710, 6).Value
A5 = .Cells(710, 7).Value
A6 = .Cells(710, 8).Value
```

```
Azero1 = .Cells(710, 14).Value
A11 = .Cells(710, 15).Value
A21 = .Cells(710, 16).Value
A31 = .Cells(710, 17).Value
A41 = .Cells(710, 18).Value
A51 = .Cells(710, 19).Value
A61 = .Cells(710, 20).Value
```

```
End With
```

```
Gzero = Azero0 + A10 * betaB + A20 * betaB ^ 2 + A30 * betaB ^ 3 + A40 * betaB ^ 4 + A50 * betaB ^ 5 + A60 * betaB ^ 6
```

```
G1 = Azero1 + A11 * betaB + A21 * betaB ^ 2 + A31 * betaB ^ 3 + A41 * betaB ^ 4 + A51 * betaB ^ 5 + A61 * betaB ^ 6
```

```
If aC1st < cC1st Then
```

```
Q = 1 + 1.464 * (acRatio) ^ 1.65
```

```
' NR법 사용하기 위한 a값에 대한 미분
Qp = 1.464 * 1.65 * (acRatio) ^ 0.65 * (1 / cC1st - 2 * aC1st / cC1st ^ 2)
```

```
Else
```

```
Q = 1 + 1.464 * (acRatio) ^ 1.65
```

```
Qp = 1.464 * 1.65 * (acRatio) ^ 0.65 * (2 / aC1st - cC1st / aC1st ^ 2)
```

```

End If
M1 = 2 * 3.141592 / (2 * Q) ^ 0.5 * (3 * G1 - Gzero) - 24 / 5
M2 = 3
M3 = 6 * 3.141592 / (2 * Q) ^ 0.5 * (Gzero - 2 * G1) + 8 / 5

N1 = 3 * 3.141592 / (Q) ^ 0.5 * (2 * Gzero - 5 * G1) - 8
N2 = 15 * 3.141592 / (Q) ^ 0.5 * (3 * G1 - Gzero) + 15
N3 = 3 * 3.141592 / (Q) ^ 0.5 * (3 * Gzero - 10 * G1) - 8

Z = Sin(Application.WorksheetFunction.Radians(inputAngle))
deLtaD = (1 + Z) ^ 0.5
omeGa = (1 - Z) ^ 0.5

If Z <= 0 Then eTa = (1 / Z - 1) ^ 0.5
If Z = 0 Then GoTo JumpOut2ndRound

Ma1 = (-1050 * 3.141592 * G1 + 105 * 3.141592 * Gzero * (3
+ 7 * Z) - 4 * (Q) ^ 0.5 * (35 - 70 * Z + 35 * Z ^ 2 + 189 *
deLtaD * Z ^ 0.5 + 61 * deLtaD * Z ^ 1.5)) / (Q ^ 0.5 * (168 +
152 * Z) * Z ^ 0.5 * deLtaD)

Ma3 = 2 * (-105 * 3.141592 * G1 + 45 * 3.141592 * Gzero * Z
+ (Q) ^ 0.5 * (28 + 24 * Z - 52 * Z ^ 2 + 44 * deLtaD * Z ^ 1.5))
/ (Q ^ 0.5 * (-21 + 2 * Z + 19 * Z ^ 2) * eTa)

JumpOut2ndRound:

If inputAngle = 90 Then

G2 = (2 * Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (16 / 15 + M1 / 3 + 16 / 105 *
M2 + M3 / 12)
G3 = (2 * Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (32 / 35 + M1 / 4 + 32 / 315 *
M2 + M3 / 20)
G4 = (2 * Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (256 / 315 + M1 / 5 + 256 /
3465 * M2 + M3 / 30)

Elseif inputAngle = 0 Then

G2 = (Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (4 / 5 + 2 / 3 * N1 + 4 / 7 * N2 +
N3 / 2)
G3 = (Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (4 / 7 + N1 / 2 + 4 / 9 * N2 + 2 / 5
* N3)
G4 = (Q) ^ 0.5 / 3.141592 * (4 / 9 + 2 / 5 * N1 + 4 / 11 * N2 +
N3 / 3)

Else

G2 = (Q) ^ 0.5 / 945 / 3.141592 * (108 + 180 * Z + 576 * Z ^
2 - 864 * Z ^ 3 + (1056 + 128 * Ma1) * deLtaD * Z ^ 2.5 + Ma3
* (45 * eTa + 54 * eTa * Z + 72 * eTa * Z ^ 2 - 315 * omeGa
* Z ^ 2.5 + 144 * eTa * Z ^ 3))

G3 = (Q) ^ 0.5 / 13860 / 3.141592 * (880 + 1232 * Z + 2112
* Z ^ 2 + 7040 * Z ^ 3 - 11264 * Z ^ 4 + (13056 + 1280 * Ma1)
* deLtaD * Z ^ 3.5 + Ma3 * (385 * eTa + 440 * eTa * Z + 528
* eTa * Z ^ 2 + 704 * eTa * Z ^ 3 - 3465 * omeGa * Z ^ 3.5 +
1408 * eTa * Z ^ 4))

G4 = (Q) ^ 0.5 / 45045 / 3.141592 * (1820 + 2340 * Z + 3328
* Z ^ 2 + 5824 * Z ^ 3 + 19968 * Z ^ 4 - 33280 * Z ^ 5 + (37376

```

```

+ 3072 * Ma1) * deLtaD * Z ^ 4.5 + Ma3 * (819 * eTa + 909 *
eTa * Z + 1040 * eTa * Z ^ 2 + 1248 * eTa * Z ^ 3 + 1664 *
eTa * Z ^ 4 - 9009 * omeGa * Z ^ 4.5 + 3328 * eTa * Z ^ 5))

End If

Yx = (PressureT * Rout ^ 2) / (Rout ^ 2 - Ri ^ 2) * (2 * Gzero - 2 *
G1 * (aC1st / Ri) + 3 * G2 * (aC1st / Ri) ^ 2 - 4 * G3 * (aC1st / Ri)
^ 3 + 5 * G4 * (aC1st / Ri) ^ 4)

' NR법 사용하기 위한 a값에 대한 미분
Yxp = (PressureT * Rout ^ 2) / (Rout ^ 2 - Ri ^ 2) * (-2 * G1 /
Ri + 3 * 2 * G2 * aC1st / Ri ^ 2 - 4 * 3 * G3 * aC1st ^ 2 / Ri ^
3 + 5 * 4 * G4 * aC1st ^ 3 / Ri ^ 4)

Fx = Yx * (3.141592 * aC1st / Q) ^ 0.5

' NR법 사용하기 위한 a값에 대한 미분
Fxp = Yxp * (3.141592 * aC1st / Q) ^ 0.5 + Yx * 0.5 *
(3.141592 / aC1st / Q) ^ 0.5 - Yx * 0.5 * (3.141592 * aC1st)
^ 0.5 / Q ^ 1.5 * Qp

' NR법 적용
aC2nd = aC1st - (Fx - KiH) / Fxp

If aC2nd > 0.8 * W Then

aC2nd = 0.8 * W * (1 - iTe / 10000)

Elseif aC2nd <= 0 Then

aC2nd = iTe / 10000 * W * 0.8

End If

iTe = iTe + 1

Loop Until (Abs(aC1st - aC2nd) < 0.0000001) Or iTe =
10000

With wb.Worksheets("임시N")
.Cells(1, 1).Value = aC2nd
.Cells(2, 1).Value = aC1st
.Cells(3, 1).Value = iTe
End With

aC_KCSCLE1 = aC2nd

End Function

```

### 3.7.2 코딩 - 허용사용회수 구하기

3.7.1의 Gzero부터 G4까지 구하는 코딩을 사용하여  $K_{max}$ 와  $K_{min}$ 를 구할 수 있다. 또한  $N_{critical}$  구하는 코딩에  $a_0$ 부터  $a_0+(a_{CH}-a_0)/4$ 까지의 사용회수를 구하는 식을 동시 적용하여, 그 중 작은 값을 취하는 것으로 허용사용회수를 구할 수 있다. 본 코딩구문에는  $N_{critical}$  구하는 것만 구현하였다.

반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석

Public Function Ncycle\_KCSCLE1(a0 , C0 , Ri , W , inputAngle , aC , SA372 As Boolean , c , m , tPmAx , tPmin )  
As Double

Dim i , aStart , aEnd `As Long

Dim dNim , Nsum , KimaXm , KiMinm , delAiK , Rki , deltaPk , RkP , j , Yt `As Double

Nsum = 0

aStart = CLng(1000000 \* a0)

aEnd = CLng(1000000 \* aC)

If aC >= W Then aEnd = CLng(1000000 \* W)

For i = aStart To aEnd Step 1

j = CDbl(i / 1000000 + 0.5 / 1000000)

Yt = Y10\_KCSCLE1\_InP(j, C0 + 2 \* (j - a0), inputAngle, W, Ri)

KimaXm = Yt \* tPmAx

KiMinm = Yt \* tPmin

deltAiK = KimaXm - KiMinm

Rki = KiMinm / KimaXm

If SA372 = True Then

If delAiK < 8.475 + 4.062 \* (Rki) - 1.696 \* (Rki) ^ 2 Then

dNim = 1 / 3.5 \* (10) ^ 14 / (1 + 0.43 \* (Rki)) \* (1 - (Rki)) / (deltAiK) ^ 6.5

Else

dNim = 1 / 1.5 \* (10) ^ 11 / (1 + 2 \* (Rki)) \* (1 - (Rki)) / (deltAiK) ^ 3.66

End If

Else

dNim = 1 / c / (KimaXm - KiMinm) ^ m

End If

Nsum = Nsum + dNim \* 0.000001

Next i

OutFlow:

Ncycle\_KCSCLE1 = Nsum / 2

End Function

#### IV. 수소 압력용기 수명 계산 결과

III장에서의 수소 압력용기의 수명 계산방법으로 초기균열을 가정하여 한계균열깊이(a<sub>c</sub>)와 허용사용회수(N<sub>allowed</sub>)를 구하였다.

##### 4.1. 압력범위와 압력용기 제원, 균열의 크기에 따른 한계균열깊이와 허용사용회수의 차이

최고운전압력 50 MPa, 최저운전압력 35 MPa로 15 MPa 차이로 운전되는 압력용기를 내경과 두께별로 case1부터 case6까지 계산하였다. 균열의 종류는 각 압력용기별로 그림2와 같은 최대허용균열지시의 값을 사용하여 2c<sub>0</sub>는 25mm, a<sub>0</sub>는 벽두께의 3%로 하였고, 균열의 형태는 그림1의 반타원형으로 가정하였다. 또 다른 균열로 그림1에서 깊이/길이 종횡비를 1/3으로 하였고, 균열 길이 2c<sub>0</sub>를 1.6mm로 하였다.

Case7부터 case10까지는 최고운전압력 90 MPa, 최저운전압력 70 MPa로 20 MPa 차이로 운전되는 압력용기를 내경과 두께별로 계산하였다. 균열의 종류는 앞과 같다.

전체적으로 균열의 종횡비가 1/3인 균열깊이가 작은 균열이 길이 방향으로 긴 균열보다 한계균열깊이가 작고, 그에 따라 허용사용회수도 작다. 모든 케이스에서 종횡비가 클수록 허용사용회수는 작아진다. 그러나, 내경이나 벽두께의 차이에 따라 변화의 양은 차이가 있는 것으로 보인다. 두께나 내경의 크기에 따라서 400배 이상의 차이가 생겨나는 것을 볼 수 있다. 이를 확인하기 위하여 다음 절에서 균열의 크기를 고정하고, 두께나 내경을 달리 하여 경향성을 확인하였다.

Table 5. Results of calculation in various cases

	Operation pressure	radius_in (mm)	Wall thickness (mm)	a <sub>0</sub> (mm)	2c <sub>0</sub> (mm)	a <sub>cH</sub> (mm)	N <sub>allowed</sub> (cycle)
Case 1	50-35 MPa	203	37.7	1.14	25	10.139	8,057
Case 2				0.27	1.6	8.343	410,886
Case 3		244.5	22.6	0.68	25	4.564	770
Case 4				0.27	1.6	2.623	9,760
Case 5		267	22.6	0.57	25	4.186	673
Case 6				0.27	1.6	2.251	5,925
Case 7	90-70 MPa	229	28	0.84	25	3.020	309
Case 8				0.27	1.6	1.333	4,912
Case 9		406.4	55.6	1.67	25	3.130	169
Case 10				0.27	1.6	1.588	9,040

**4.2. 두께 변화에 따른 압력용기 한계균열깊이와 허용사용회수 변화 추이**

초기균열은 반타원형으로 종횡비 1/3이고, 깊이 ( $a_0$ ) 1mm, 길이의 반( $c_0$ )인 3mm으로 통일하였고, 균열의 진전방향은 깊이 방향( $\pi/2$ )으로 하였다. 운전압력은 최대운전압력 90MPa, 최저운전압력 70MPa로 20MPa 범위에서 운전하는 것으로 하고, 압력용기의 내경(inner radius)은 350mm로 고정하고 벽두께를 달리 하여 경향을 확인하였다. 표6에 확정 입력값은 표시하였다.

계산 결과는 표7과 그림8에 표현하였다. 벽두께의 크기가 커질수록 한계균열깊이의 크기 및 허용사용회수의 크기 또한 증가하는 경향을 보였으며, 한계균열깊이는 선형으로 증가하는 반면, 허용사용회수는 2차함수적으로 증가하였다.

**4.3. 내경 변화에 따른 압력용기 한계균열깊이와 허용사용회수 변화 추이**

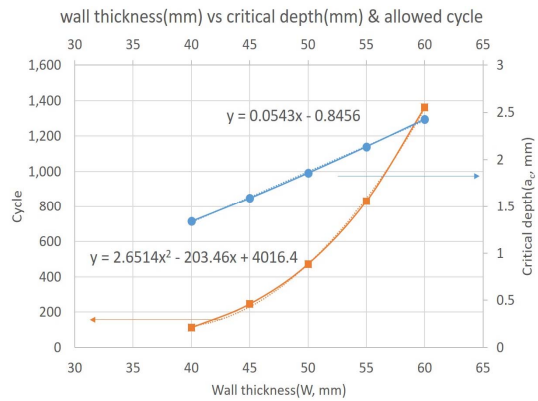
4.2절과 같이 초기균열 등을 확정하였고, 압력용기의

**Table 6.** Input values except for wall thickness

	value
Stress intensity factor( $K_{IH}$ )	40 MPa $\sqrt{m}$
Initial crack depth( $a_0$ )	1 mm
Half of initial crack length( $c_0$ )	3 mm
Wall thickness(w), mm	variables
Cylinder inner radius( $r_i$ )	350 mm
Crack propagation angle	90o
Design pressure	90 MPa
Maximum operation pressure( $P_{max}$ )	90 MPa
Minimum operation pressure( $P_{min}$ )	70 MPa

**Table 7.** Results of calculation according to variable thickness

variable thickness(mm)	acH(mm)	Nallowed(cycle)
40	1.342	112
45	1.592	246
50	1.858	472
55	2.137	830
60	2.428	1,362



**Fig. 8.** Plots of data of critical crack depth and allowed cycle according to variable thickness.

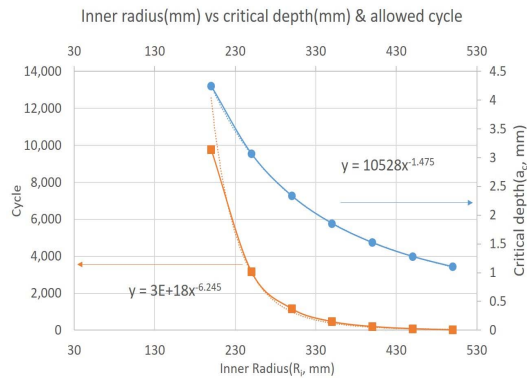
**Table 8.** Input values except for inner radius

	value
Stress intensity factor( $K_{IH}$ )	40 MPa $\sqrt{m}$
Initial crack depth( $a_0$ )	1 mm
Half of initial crack length( $c_0$ )	3 mm
Wall thickness(w), mm	50 mm
Cylinder inner radius( $r_i$ )	variables
Crack propagation angle	90°
Design pressure	90 MPa
Maximum operation pressure( $P_{max}$ )	90 MPa
Minimum operation pressure( $P_{min}$ )	70 MPa

**Table 9.** Results of calculation according to variable inner radius

variable radius(mm)	$a_{cH}$ (mm)	$N_{allowed}$ (cycle)
200	4.246	9,782
250	3.069	3,178
300	2.338	1,171
350	1.858	472
400	1.525	205
450	1.284	88
500	1.104	26

반타원형 균열을 가정한 파괴 및 피로역학에 의한 수소 압력용기의 예상 수명 계산과 두께와 내경이 미치는 영향 분석



**Fig. 9.** Plots of data of critical crack depth and allowed cycle according to variable inner radius.

내경(inner radius)를 달리하여 경향을 확인하였다. 벽 두께는 50mm로 고정하였다. 표8에 확정 입력값은 표시하였다.

계산 결과는 표9와 그림9에 표현하였다. 압력용기의 내경(inner radius)가 작을수록 한계균열깊이의 크기 및 허용사용회수의 크기 또한 증가하는 경향을 보였다. 4.2절의 결과와 유사하게 변수의 변화에 대한 허용사용회수의 변화폭은 한계균열깊이의 변화폭보다 큰 것으로 나타난다.

## V. 결론

수소 압력용기의 경우, 손상허용 개념을 도입하여 향후 생성될 것으로 보이는 균열에 대하여 허용되는 사용 수명을 결정하고 그에 따라 사용 기간을 제한하는 방식이다. 이에 따라 예상되는 또는 생성된 초기균열에 따라 한계균열을 계산하고, 허용수명이 계산되도록 프로그램을 작성해 보았다.

반타원형 균열 모드의 복잡한 표와 수식을 엑셀 및 VBA로 구현하여 계산 프로그램을 코딩하였다. 구현된 프로그램을 통하여 예상되는 압력용기의 제원을 입력하여 초기균열에 대한 예상 수명을 계산해 보고 도출된 의견은 다음과 같다.

① 초기균열의 중형비(a<sub>0</sub>/c<sub>0</sub>) : 1/3의 초기결함으로 시작한 균열성장예에 의한 한계균열깊이(a<sub>cH</sub>)와 허용사용회수(N<sub>allowed</sub>)의 값이 더 작아짐. 중형비가 클수록 결함이 깊이 방향으로 압력용기에 미치는 영향이 큼

② 압력용기의 벽두께가 두꺼울수록 한계균열깊이(a<sub>cH</sub>)와 허용사용회수(N<sub>allowed</sub>)의 값이 더 커짐. 두께가

두꺼울수록 오래 사용할 수 있음. 단, 두께가 두꺼워지면 LBB(leak-before-burst) 모드가 안될 수 있음

③ 압력용기의 내경이 커질수록 한계균열깊이(a<sub>cH</sub>)와 허용사용회수(N<sub>allowed</sub>)의 값이 더 작아짐. 내경이 작을수록 오래 사용할 수 있음

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20215810100090)

## REFERENCES

- [1] ASME Sec.VIII Div.3, Boiler and pressure vessel code, rules for construction of pressure vessels, alternative rules for construction of high pressure vessels, USA, (2019)
- [2] Larrosa, N. O., Akid, R., and Ainsworth, R. A., "Corrosion-Fatigue: a review of damage tolerance models", *International Materials Reviews*, 63(5), 283-308, (2018)
- [3] Zhang, M., Lv, H., Kang, H., Zhou, W., Zhang, C., "A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (47), 25777-25799, (2019)
- [4] Gangloff, R. P., "Crack tip modeling of hydrogen environment embrittlement: Application to fracture mechanics life prediction", *Materials Science and Engineering: A*, 103(1), 157-166, (1988)
- [5] API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-for-service, USA, (2016)
- [6] KGS AC111, 고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설·기술·검사 기준, South Korea(2021)
- [7] ASME BPVC code case 2938, Hydrogen Crack Growth Rate Constants, Threshold Stress Intensity Factor KIH, and Critical Crack Size Requirements for SA-372 and SA-723 Steels Section VIII, Division 3, USA, (2019)
- [8] JPEC TD\_0003\_水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書, 一般財団法人石油エネルギー技術センター, Japan, (2017)
- [9] Davis, R.A, *Practical Numerical Methods for Chemical Engineers - Using Excel with VBA*, Revised 2<sup>nd</sup> edition, Umn, USA, (2014)