

역사이클 하중의 하중비 변화가 SA312 TP304 재질의 파괴저항곡선에 미치는 영향

Load Ratio Effect on Fracture Resistance Curve of SA312 TP304 under Reverse Cyclic Loading Condition

김상영^{1,#}
Sang-Young Kim^{1,#}

¹ 군산대학교 기계자동차조선 해양공학부 (School of Mechanical, Automotive, Naval Architecture And Ocean Engineering, Kunsan National University)
Corresponding Author / E-mail: sangyoungkim@kunsan.ac.kr, TEL: +82-63-469-4873, FAX: +82-63-469-7433

KEYWORDS: Seismic safety (지진안전성), Reverse cyclic load (역사이클 하중), Fracture toughness (파괴인성), Fracture resistance curve (파괴저항곡선)

Seismic load induces a reverse cyclic load that alternately applies a tensile and a compressive load to a structure. For nuclear piping material, safety is assessed in terms of fracture toughness. However, test results using a quasi-static load can't guarantee safety if there is a seismic load. In this paper, the fracture toughness of SA312 TP304 stainless steel, which is used as the safety injection pipe of a nuclear power plant, was estimated by using reverse cyclic loads with different ratios of tensile load to compressive load. The test results using a load ratio of -1 (compressive load / tensile load) show that fracture toughness decreases to approximately 10% against a load ratio of zero. These test results show that the reverse cyclic load must be considered in planning for the safety of nuclear power plants under seismic loads.

Manuscript received: April 16, 2016 / Revised: March 9, 2017 / Accepted: March 24, 2017

1. 서론

후쿠시마 원전사고 이후, 지진과 같은 자연재해에 대한 원전의 안전성에 대하여 관심이 높아지고 있다. 원전배관은 냉각수를 이용하여 원자로에 의해 발생된 열에너지를 터빈으로 전달하여 원자력발전소의 열관과 같은 역할을 한다. 특히, 방사능으로 오염된 냉각수의 이동통로가 되는 1차 계통의 경우에는 균열 등의 결함이 발생하게 되면, 냉각수와 함께 방사능 누설사고로 이어지게 된다. 따라서, 원자로 및 주요 배관계통에 대한 건전성 확보는 매우 중요한 문제이다.

현재 국내의 원전배관은 탄소성 파괴역학에 기반을 둔 파괴저항곡선을 기초로 하는 LBB (Leak Before Break) 설계개념을 이용하여 설계되고 있다.¹ ASTM E1820² 등과 같은 시험법에는 CT (Compact Tension) 시편 등과 같은 표준시편을 이용하여 금속재질의 파괴저항 곡선을 획득하기 위한 방법이 제시되어 있다. 그러나 이는 준 정적하중을 이용한 시험방법으로써 자연계에 존재하는

진동의 많은 경우가 지진하중과 같이 인장과 압축이 반복적으로 작용하는 역사이클 하중이라는 점을 고려할 때, 준 정적하중을 이용한 파괴저항 시험결과의 활용은 매우 제한적이다.

역사이클 하중은 재질의 파괴저항곡선에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이러한 역사이클 하중을 고려한 파괴저항시험을 수행하고 이를 설계에 반영해야 하지만, 이에 관한 연구가 미흡하고 검증된 시험방법이 존재하지 않기 때문에 반영이 어려운 실정이다.

해외의 경우에는 80 - 90년대에 IPIRG (Piping Integrity Research Group), BINP (Battelle Integrity of Nuclear Piping) 등의 프로그램을 통해 정하중 뿐만 아니라 역사이클 하중,ダイナ믹 하중 등의 다양한 하중 조건과 온도, 압력 등의 환경 조건 및 균열형상에 대한 다양한 실험을 수행하여 보고한 바 있다.³ 우리나라도 이 프로그램에 참여하였으며, 이러한 해외 연구결과를 바탕으로 90년대 후반에 Weon and Seok^{4,5} 등에 의해 연구된 바 있으나 연구결과는 아직 미흡한 수준이다.

또한, 금속재료 제조기술의 발전과 함께 우수한 물성을 가진 배관재료가 개발되고 있으며, 배관의 용접부와 같은 취약부에 대한 연구는 원전배관의 안전성 확보를 위해서 꾸준히 지속되어야 할 과제이다.

본 연구에서는 국내 원전의 안전주입관과 같은 1차계통 배관에 사용되고 있는 SA312 TP304 재질을 이용하여 시편을 제작하고 역사이클 하중을 이용한 파괴저항 시험을 수행하여 역사이클 하중의 하중비가 파괴저항곡선에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

2. 시편 및 시험조건

2.1 시편

본 연구에서는 ASTM E1820에 제시되어 있는 시편들 중 하나인 CT (Compact Tension) 시편을 사용하여 시험이 수행되었으며, Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 하중의 작용선상에 Knife Edge를 가공하여 CMOD의 설치를 용이하게 하였다. 시편은 두께 33 mm, 직경 약 300 mm인 SA312 TP304 재질의 원전배관으로부터 배관에 발생하는 균열의 방향을 고려하여 Fig. 1(a)와 같은 방향으로 채취되었다.

ASTM E1820에 따라 시험 전에 피로하중을 사용하여 노치선단에 피로예비균열을 삽입하였으며, ASTM ($a_0/W = 0.45 - 0.7$)을 참고하여 $a_0/W = 0.55$ 로 선정하였고, Side Groove를 가공하여 시편을 준비하였다.

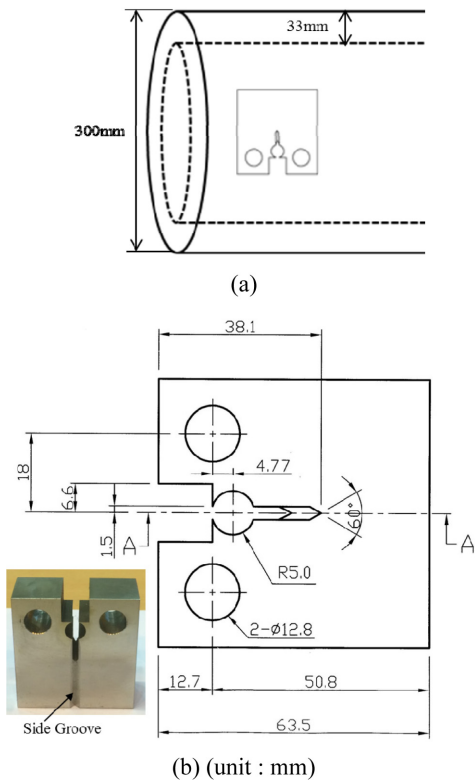


Fig. 1 Orientation and dimensions of test specimen extracted from SA312 TP304 nuclear piping

파괴인성을 평가하기 위해서는 재료의 인장물성이 꼭 필요하다. 이에 ASTM E8⁶에 따라 Fig. 2와 같은 인장시편을 제작하였으며, ASTM E8에 준하는 시험방법을 사용하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 3회 평균값으로 인장물성을 획득하였다.

2.2 시험조건

파괴저항곡선은 역사이클 하중의 하중속도, 하중비(최소하중/최대하중), 증분변위(최대변위의 증가량/Cycle) 등의 인자에 의해 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁴ Weon and Seok⁴은 역사이클 하중에 의한 균열진전시점의 J_i 값은 하중비가 1인 경우에 비해 0.5와 0일 때, 각각 약 6.7% 및 약 16.3%의 차이를 나타내는 것으로 보고하였다. 또한, ASTM E1820에서는 0.5이상의 하중비를 사용할 것을 권장하고 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 6종의 하중비(0.8, 0.3, 0, -0.3, -0.5, -1.0)를 이용하여 시험을 수행하였으며, 이 때의 증분변위는 모두 동일하게 1.0 mm/cycle로 설정하였다.

실험은 3 mm/min의 속도로 상온에서 250 kN 용량의 전기유압식 만능재료시험기(Model 1332, Instron, USA)를 이용하여 수행되었다. 또한, 콘덴서 방식의 변위 측정센서(Capacitac, USA)를 사용하여 시험이 진행되는 동안의 CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)를 측정하였다. 시험이 완료된 후에는 Heat Tinting을

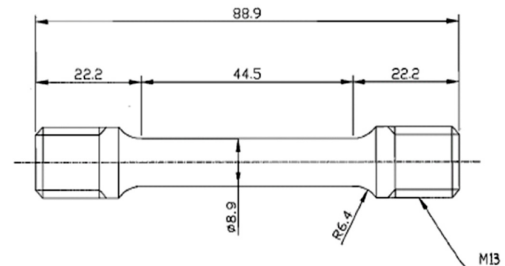


Fig. 2 Dimensions of tension test specimen (unit : mm)

Table 1 Tension test results

Specimen No.	1	2	3	Aver.
S_Y (MPa)	227.7	232.6	218.2	226.2
S_U (MPa)	530.7	538.7	541.6	537.0
Total El. (%)	83.21	83.62	66.76	77.86

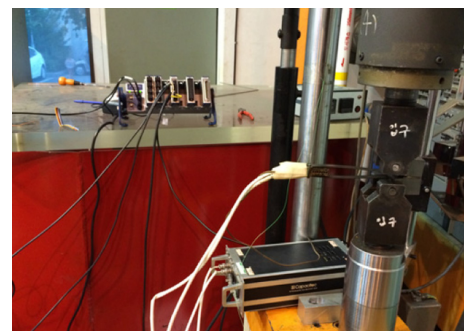


Fig. 3 Installed fracture toughness testing system

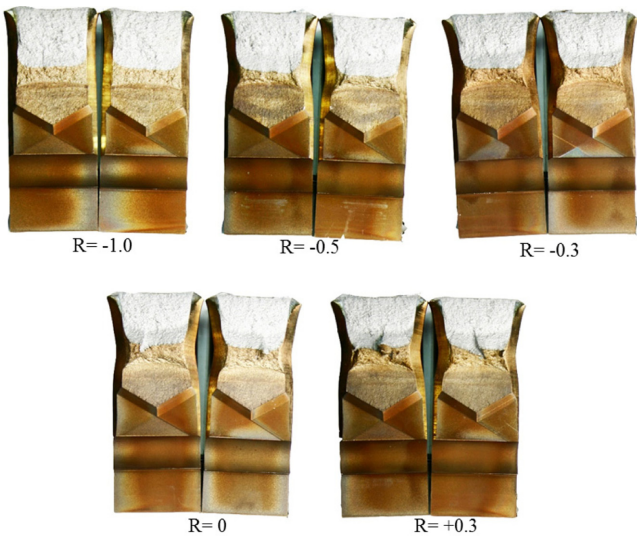


Fig. 4 Specimens after fracture toughness test

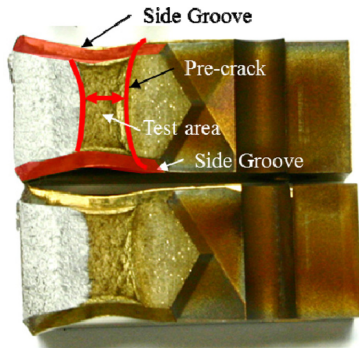


Fig. 5 Fatigue pre-crack shape of CT specimen

통해 시험이 진행되는 동안 진전한 균열을 착색하였고, 파단 후 구점법을 이용하여 최종 균열길이를 측정하였다. 시험이 진행되는 동안 측정된 CMOD와 최종 균열길이를 이용한 하중비법을 이용하여 시험 중 균열진전량을 계산하였으며, 측정된 균열진전량과 ASTM의 관계식을 이용하여 J-적분값을 계산하였다.

Fig. 3에는 시험, CMOD Gage, Data Acquisition System이 시험기에 설치된 모습을 나타내었다.

3. 파괴저항 시험결과 및 고찰

Fig. 4는 시험이 완료된 후, Heat Tinting 과정을 통해 착색된 시험편들을 최종 균열길이를 측정하기 위해 파단된 시험편의 균열면을 나타낸 것이다. 피로예비균열의 길이를 $a_0/W = 0.55$ 로 결정하고 삽입하였으나, Fig. 6에 나타난 피로예비균열길이(a_0/W) 측정 결과는 이보다 더 깊은 피로예비균열이 삽입된 것으로 확인되었다. 이는 표면관찰을 통해 삽입한 피로예비균열이 Fig. 5와 같이 타원형으로 발생하게 되고, Side Groove 가공을 통해 좌우 바깥쪽 0.1 W 만큼씩 제거되기 때문으로 생각된다.

그러나, 모든 시험편이 동일한 조건으로 피로예비균열이 삽입되었고, ASTM의 유효범위 이내이기 때문에 실험결과와 상대비교에는 큰 무리가 없는 것으로 판단된다 Fig. 6은 각 시험에서 획득한 하중-하중선 변위 선도를 나타낸 것이다.

실험으로부터 획득한 하중-하중선 변위 그래프들 중에서 하중비가 -0.3, -0.5 및 -1.0인 경우에는 하중선 변위가 0인 지점에서 시험편과 지그의 유격으로 인하여 정체현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, J-적분값 계산에 사용되는 값은 각 Cycle의 최대

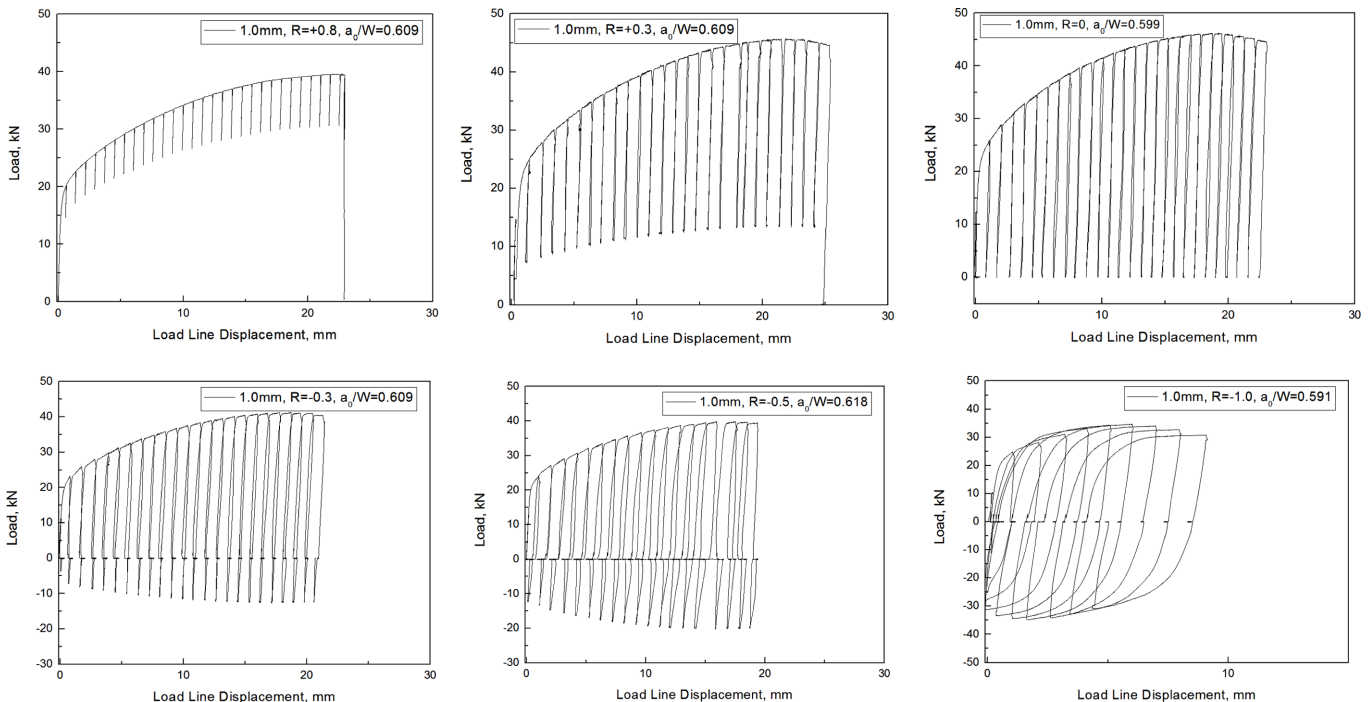


Fig. 6 Load-Load line displacement curves

하중 및 변위이므로 파괴저항곡선에는 영향을 미치지 않는다.

획득한 하중-하중선 변위 선도, 구점법을 이용해 측정한 시편의 최종균열길이 및 ASTM의 관계식을 사용하여 J-적분값을 계산하였고, 이를 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 또한, Construction Line을 벗어나기 시작하는 J-적분값을 측정하여 Table 2에 J_i 로 나타내었다.

그 결과, ASTM E1820에서 제안하고 있는 하중비의 범위(0.5 이상)에 해당하는 하중비가 0.8인 경우에 비하여 하중비가 0.3, 0, -0.3, -0.5 및 -1.0인 경우의 J_i 값이 85.8%, 83.2%, 70.8%, 54.0% 및 7.7% 수준으로 낮게 평가되었다. 이는 Weon and Seok⁴의 결과와 거의 일치하는 결과이며, ASTM에서 제안하고 있는 바와 같이 하중비가 0.5이상인 경우에 비하여 0.5이하인 경우에 파괴저항곡선이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

특히 압축하중이 작용하는 경우에는 하중비가 감소함에 따라 급격하게 파괴저항곡선이 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 하중비가 -1.0인 경우는 하중비가 0.8인 경우에 비해 7.7% 수준의 아주 낮은 파괴저항곡선을 나타내었다.

이와 관련된 보고서인 NUREG/CR-6440³ 및 Weon and Seok⁴은 역사이클 하중에 의해 균열선단에는 균열열림 및 균열닫힘 현상이 나타나게 된다고 보고하였다. 즉, 응력집중현상이 높게 작용하는 균열선단은 압축하중에 의해 소성변형되고, 이로 인하여 균열은 0이 아니라 압축하중에서 열리기 시작하는 것이다. 또한, 이러한 과정에서 균열선단에서는 국부적으로 인장장류응력이 발생할 수도 있다. 뿐만 아니라, 이와 관련하여 Chen⁷등은 역사이클 하중 조건에서 압축하중이 증가할수록 이로 인한 소성역이 선형

적으로 증가한다고 보고하였다. 이에 따라, 역사이클 하중의 하중비가 작아질수록, 즉, 압축하중이 커질수록 파괴저항곡선이 낮게 평가되는 것이다.

이러한 결과로부터 Weon and Seok은 인장하중만이 작용하는 경우에 사용하는 J 적분값 계산방식을 적용하여 역사이클 하중이 작용하는 경우의 J 적분값을 계산하게 되면 압축하중의 영향을 무시하게 되어 낮은 파괴저항곡선을 얻을 수 밖에 없으므로 이를 고려한 계산식이 필요함을 주장하였다.

본 연구의 대상인 SA312 TP304 Stainless Steel은 Weon and Seok의 대상인 SA516 Gr. 70 재질보다 항복강도(약 20%) 및 인장강도(약 10%)가 다소 낮으나, 연신율이 약 320% 수준으로 매우 높은 연신율을 가지고 있다. 두 재료의 이러한 차이로 인하여 SA312 TP304재질의 J_i 값이 수 배이상 높은 것으로 생각된다. 그러나 SA516 Gr. 70 재질은 ASTM에서 제안하고 있는 하중비 범위(0.5이상)인 경우에 비해 하중비가 -1.0인 경우의 파괴저항곡선은 약 45.9% 수준으로 감소하는 한편, SA312 TP304 재질은 ASTM에서 제안하고 있는 하중비 범위(0.5이상)인 경우에 비해 하중비가 -1.0인 경우의 파괴저항곡선은 7.7% 수준으로 감소하여 역사이클에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 원전에 사용되고 있는 SA312 TP304 Stainless Steel재질을 이용하여 시편을 제작하고 역사이클 하중을 이용한 파괴저항 시험을 수행하여 역사이클 하중의 하중비가 파괴저항곡선에 미치는 영향에 대해 평가하였고, 시험결과를 탄소강의 시험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 역사이클 하중의 하중비가 0보다 큰 경우에는 압축하중이 작용하지 않음으로 인하여 하중비가 파괴저항곡선에 비교적 적은 영향을 미치는 것으로 평가된다.

(2) 하중비가 ASTM에서 제안하고 있는 범위(0.5이상)보다 작아질 경우, 파괴저항곡선은 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 하중비가 0보다 작은 역사이클 하중의 경우에는 파괴저항곡선이 급격하게 낮아졌으며, 하중비가 -1.0인 경우에는 하중비가 ASTM에서 제안하고 있는 범위인 경우에 비해 약 7.7% 수준으로 매우 낮게 평가되었다.

(3) 탄소강인 SA516 Gr. 70 재질의 경우와 비교하여 연신율이 매우 높은 SA312 TP304 Stainless Steel이 역사이클 하중의 하중비에 더 큰 영향을 받으며, 이는 역사이클 하중을 고려한 파괴저항곡선의 평가가 꼭 필요하다고 할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2065159)에 의해 지원되었음.

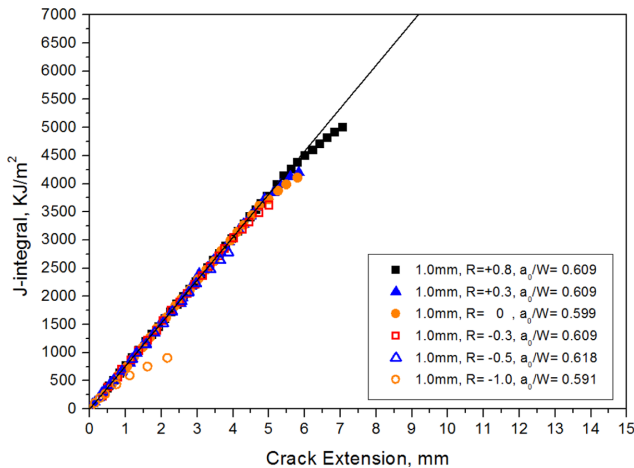


Fig. 7 J-Integral curves

Table 2 Test results of fracture toughness

$\Delta\delta$ (mm)	Load ratio (R)	J_i (kJ/m ²)	%
1.0	0.8	4399.2	100
1.0	0.3	3776.5	85.8
1.0	0	3660.4	83.2
1.0	-0.3	3115.3	70.8
1.0	-0.5	2376.7	54.0
1.0	-1.0	339.4	7.7

REFERENCES

1. Park, K. T., Shin, I. H., Kim, I. H., Kim, Y. S., Kwon, H. S., et al., "A Study on the Fracture Toughness Characteristics of Equivalent Stress Gradient Specimen," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 6, pp. 551-557, 2014.
2. ASTM E1820-01, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," 2001.
3. Rudland, D. L., Brust, F., and Wilkowski, G. M., "The Effects of Cyclic and Dynamic Loading on the Fracture Resistance of Nuclear Piping Steels," Technical Report No. NUREG/CR-6440, BMI-2190, 1996.
4. Weon, J. I. and Seok, C. S., "Effect of Reverse Cyclic Loading on the Fracture Resistance Curve of Nuclear Piping Material," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 23, No. 7, pp. 1112-1119, 1999.
5. Weon, J. I. and Seok, C. S., "A Study on the Evaluation Method of Fracture Toughness Characteristics under Reverse Cyclic Loading," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 23, No. 2, pp. 246-253, 1999.
6. ASTM E8M-01, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials," 2001.
7. Chen, J., Huang, Y., Dong, L., and Li, Y., "A Study on Evaluation Method of Crack Tip Reverse Plastic Zone Size for the Center Cracked Steel Plate Model under Tension-Compression Cyclic Loading," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 133, pp. 138-151, 2015.