

재료 동적영향을 고려한 주냉각재 배관 LBB 적용시 Dynamic Strain Aging의 영향 분석

양준석*, 박지용, 정우태, 유기완, 김진원

(전력연구원)

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

최근들어 고려된 LBB(Leak Before Break) 적용요건중 동적파괴시험 절차에는 울진 3&4호기 이후 파단전누설개념이 적용되는 배관이 탄소강으로 제작될 경우, 이 배관이 Dynamic Strain Aging(DSA)에 의해 파괴저항치가 감소되지 않는다는 것이 정량적으로 입증되지 않는 한, 동 배관의 파괴물성치 결정시 DSA의 영향이 고려되어야 하며, DSA 영향을 평가하기 위해서는 동적파괴시험이 수행되어야 함을 요건화 하고 있다. 본 연구에서는 DSA 효과에 의한 파괴저항(J-R) 특성의 저하가 차세대원전 원자로냉각재배관 파단전누설개념(LBB) 적용시 설계 안전여유도에 영향을 미치지 않는 정도임을 평가하는데 있다. 따라서 ASME Section III에서 탄소강으로 분류하고 있는 강종별 파괴인성 변화를 고찰하고, 차세대원전 주냉각재배관 재료인 SA508 Class 1a의 최대 파괴인성 감소치를 예측하여, 울진 3&4호기에서 측정된 엘보우용 SA516-Gr.70 강의 DSA 영향 평가 결과와 비교 분석하여 차세대원전 주냉각재배관의 DSA영향을 평가하였다. 도출된 결론으로는 DSA 영향을 고려한 SA508 Class 1a의 J 및 dJ/dA 값은 극히 보수적으로 추정할 때 50% 이상 감소하는 것으로 예측된다. 이러한 DSA 영향을 고려하였을 경우 배관재 모재의 파괴인성치는 Weld-SAW의 J/T 값 수준으로 감소하였다. 그러나 현 LBB 해석이 가장 낮은 J/T값을 갖는 Weld-SAW Auto의 균열길이 2a인 J/T선도에 의거하여 수행되고 있다는 점을 고려한다면 비록 DSA가 배관재에 영향을 주는 가장 보수적인 값(J 및 dJ/dA값을 50% 이상)을 사용한다고 하더라도 차세대원전 LBB 적용에 문제가 되지 않음을 알 수 있다. 즉 차세대원자로 주냉각재배관에 LBB를 적용하는데는 DSA 영향은 상대적으로 중요하지 않다는 결론을 얻었다.

1. 서론

파단전누설개념(Leak Before Break)이란 배관이 파단에 이르기 전에 발생하는 누설을 감지함으로써 배관에 발생된 균열을 미리 발견할 수 있고, 이에 대한 적절한 조치를 취함으로써 양단순간파단(DEGB)과 같은 극한적인 상황을 사전에 방지 할 수 있다는 개념이다. LBB 개념을 원자력발전소 설계에 적용하면 배관파단으로 인한 동적영향(Dynamic Effect)을 고려하지 않아도 되므로 각종 구조물(배관파단구속장치, 유체충돌벽)등을 제거할 수 있기 때문에 설치에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있는 잇점이 있다. 또한 격납용기내 각종 지지구조물 수의 최소화로 인한 가동중검사(ISI)에 작업자의 방사선 피폭량을 줄일 수 있는 잇점이 있다. 이와같은 여러가지 잇점 때문에 국내의 경우 1986년부터 설계된 한국형표준원전의 효시인 영광 3&4호기부터 직경이 12 inch 이상인 주요 배관중 증기발생기 주급수배관 및 주증기배관을 제외한 대부분의 배관에 LBB 개념을 적용하고 있다.

상온이상의 특정온도 구간에서 강을 인장시험하면 Stress-Strain Curve가 소성구간에서 요동하는

이른바 Serration이 발생하며 이와 함께 인장강도의 증가와 인성의 감소가 일반적으로 일어난다. 이것은 재료내 전위와 불순물 원소(질소 및 탄소)간의 상호작용인 Dynamic Strain Aging (DSA) 때문으로 널리 알려져 있다.[1][2] 다만, Marschal, C.W등[3]이 특정온도에서 Strain Rate가 강의 물성치에 미치는 영향을 보고하기 전까지는 대부분의 연구가 주로 quasi-static strain rate하에서 온도의 변화에 따른 재료의 제반 물성치의 변화를 관찰한 것으로 strain rate 자체의 변화, 특히 dynamic 조건의 strain rate의 물성치에 대한 영향 평가는 그다지 많지 않았으며 또한 설계적인 차원에서도 이에 대해 별로 관심이 있지 않았었다. Marschall, C.W등에 따르면 dynamic strain rate에서 DSA으로 인해 탄소강(SA106 Grade B)이 보인 물성치의 변화폭은 매우 크다.

최근들어 개정된 LBB 적용요건[4]에 따르면 영광 3&4호기 이후부터 과단전누설개념이 적용되는 배관이 탄소강으로 제작될 경우, 이 배관이 DSA에 의해 파괴저항치가 감소되지 않는다는 것이 정량적으로 입증되지 않는 한, 동 배관의 파괴물성치 결정시 동적파괴시험이 적용되어야 하며, DAS 영향을 평가하기 위해서는 동적파괴시험이 수행되어야 함을 요건화 하고 있다. 이 요건을 분석하면 동적 파괴저항치 측정결과가 정적 파괴저항치 측정결과보다 낮을 경우 과단전누설평가에 동적 파괴저항치를 사용해야 함을 의미한다. 또한 동적 파괴저항치 측정결과가 정적 파괴저항치 측정결과보다 높을 경우 정적 파괴저항치를 사용하며 평가한 과단전누설평가를 재 수행할 필요가 없음을 의미한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 차세대원전 원자로냉각재계통 배관재로 고려하고 있는 SA516 Grade 70 및 SA508 Class 1a의 파괴인성과 LBB 해석에 대한 DSA의 영향을 조사, 분석 검토하고, DSA 효과가 고려된 울진 3&4호기 주냉각재배관 실재료 Data와 비교함으로써 이러한 DSA 영향이 차세대원전 원자로냉각재 배관재에 대한 LBB 해석에 미치는 영향을 파악해 보고자 하는 것이다.

2. LBB 해석

2.1.1 유한요소해석 모델

본 해석에서는 모델링을 단순화하고 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 시험배관의 대칭성을 이용해서 전체배관의 1/4만을 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 Isoparametric 20-Node Brick Element를 사용하였다. Fig.1과 Fig2는 본 해석에 사용된 유한요소모델 및 균열선단에서의 mesh 형태이다.

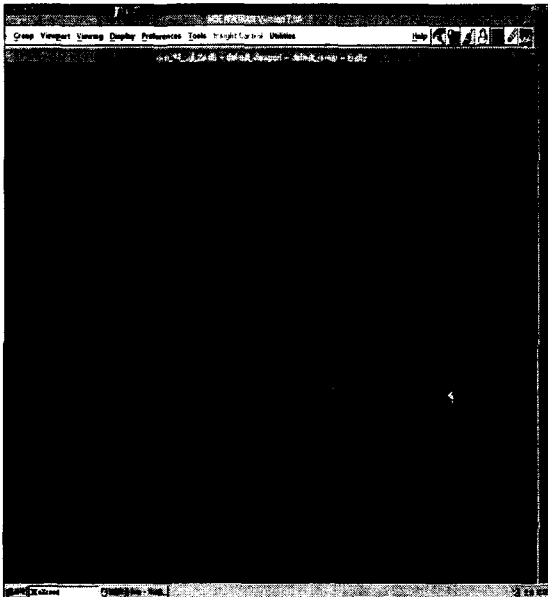


Fig.1 Finite element model

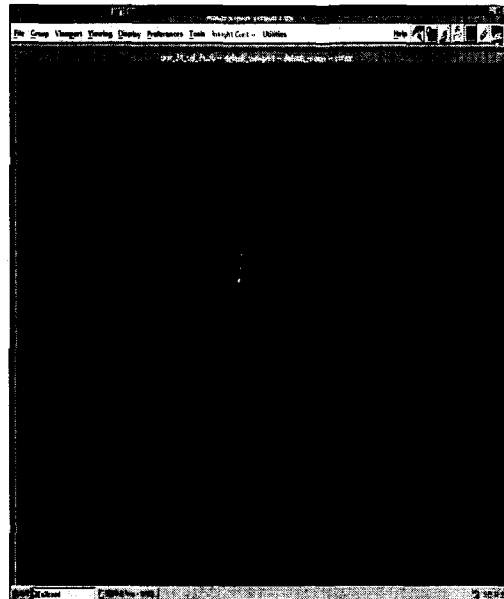


Fig.2 Finite element mesh at a cracktip

2.1.2 하중작용방법

NUREG/CR-4878[5]의 실제 배관시험에서는 적용한 4점 굽힘(4 Point Bending)법을 모사하기 위해서 배관의 한쪽 끝단에 굽힘모멘트로 작용하였으며, 작용하중은 미소증분으로 나누어 선형적으로 변화하는 분포하중의 형태로 작용시켰다.

2.1.3 재료의 성질

균열이 있는 배관에 작용할 수 있는 최대하중의 크기를 예측하기 위한 파괴저항치로는 울진 3&4 호기에 적용된 SA516 Grade 70 탄소강 용접재[6]에 대한 재료의 파괴저항치를 사용하였으며, 탄소성 파괴해석시에는 모재인 SA508 Class 1a의 응력-변형률 관계를 이용하였다.

2.1.4 최대허용하중 예측

균열이 있는 배관에 대한 거동을 평가하기 위해 사용되고 있는 주요 평가방법으로는 임계하중법, J/T 평가법, 파손평가법, 전변형률 파손평가법등이 있다. 원자력발전소 배관에 대한 LBB 해석을 위해서는 일반적으로 US-NRC가 추천하는 J/T 평가법[7]이 가장 많이 사용되고 있다. J/T 평가법은 Rice에 의해 제시된 J적분값을 탄소성 파괴역학 파라미터로 사용하여 균열의 거동을 평가하는 방법으로, 재료에 대한 J적분과 찢김계수(T)의 관계를 작용하중에 대한 J적분과 찢김계수(T)의 관계를 비교함으로써 균열이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다. J/T 평가법은 LBB 해석 등과 같이 주어진 균열크기에 대해서 균열의 불안정성장 여부를 평가하기 위한 최대하중을 결정하며 해석방법이 간단하다. J/T 평가법은 균열의 성장을 무시하고 주어진 균열길이에 대해 임의의 하중을 작용시켜 J-적분값을 구하는 방법으로 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 균열있는 배관의 최대하중을 예측하였다. 본 연구에서 해석방법은 다음과 같은 절차로 이루어졌다.

균열진전하중(Crack Initiation Load)은 다음의 조건을 만족하는 하중으로 결정한다.

$$J_{app}(a, p) = J_{IC} \quad (1)$$

J-제어 균열성장 조건을 만족하는 경우, 균열이 계속 성장하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$J_{app}(a, p) = J_{mat}(a - a_0) \quad (2)$$

여기서 균열진전력 J_{app} 은 균열길이 a 및 작용하중 P 의 함수이며, 재료의 파괴저항치 J_{mat} 은 균열진전량 $(a - a_0)$ 의 함수이므로 주어진 균열이 있는 배관에 대한 최대하중의 크기는 다음의 관계식을 이용하여 결정한다.

$$\left. \frac{dJ}{da} \right|_{app} = \left. \frac{dJ}{da} \right|_{mat} \quad (3)$$

여기서 $\left. \frac{dJ}{da} \right|_{app}$ 는 작용하중에 의한 J-적분값의 변화율이며, $\left. \frac{dJ}{da} \right|_{mat}$ 는 재료에 대한 J-적분값의 변화율이다. 따라서 주어진 하중하에서 균열이 있는 배관의 안정성 여부는 다음의 관계식으로부터 결정된다.

$$\left. \frac{dJ}{da} \right|_{app} \geq \left. \frac{dJ}{da} \right|_{mat} : (\text{불안정}) \quad (4a)$$

$$\left. \frac{dJ}{da} \right|_{app} < \left. \frac{dJ}{da} \right|_{mat} : (\text{안정}) \quad (4b)$$

이와같은 관계를 도식적으로 나타낸 것이 J-T 평가선도이다.

J-T 평가법을 이용해서 최대하중을 구하기 위해서는 작용하중 및 재료에 대한 J vs. dJ/da 의 관계를 구해야 함. 본 해석에서는 재료에 대한 J vs $dJ/da|_{mat}$ 관계 결정을 위해서 주어진 재료시험 결과를 다음과 같은 형태로 나타내었다.

$$J(a) = C_1(\Delta a)^{C_2} \quad (5a)$$

$$\frac{dJ}{da} = C_1 C_2 (\Delta a)^{C_2 - 1} \quad (5b)$$

또한 주어진 균열길이 a 를 가지는 배관에 대해 작용하중에 의한 J vs $dJ/da|_{app}$ 관계를 결정하기 위하여 균열길이 $a - \Delta a$ 및 $a + \Delta a$ 에 대해 각각 탄소성 파괴해석을 수행하고 이로부터 각각의 균열길이에 대한 J-적분값을 계산하였다. 여기서 Δ 는 균열길이의 미소증분이며 본해석에서는 이 값을 초기 균열길이의 약 10% 정도로 가정하였다. 따라서 J-적분과 균열길이와의 관계를 2차 다항식으로 표현하여 작용하중에 의한 J적분값을 계산되었다.

$$J(a) = C_1 a^2 + C_2 a + C_3 \quad (6a)$$

$$\frac{dJ}{da} = 2C_1 a + C_2 \quad (6b)$$

3. 강종별 파괴인성 변화 고찰

3.1.1 조사 대상 강종 및 화학성분

ASME Section III, Appendix I에서는 Table 1에 제시된 강종중 SA106 Grade B, SA516 Grade 70 및 SA508 Class 3를 탄소강으로 취급하고 기타 강은 Low alloy steel로서 취급하고 있다. 또한 Table 1에 의하면 ASME Section III[8]에 의거한 화학조성은 SA106 Grade B, SA516 Grade 70 및 SA508 Class 1a 강에서 차이는 크게 없음을 알 수 있다.

강종	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
SA106 Grade B	0.30 max	0.29-1.06	0.025 max	0.025 max	0.10 min	0.40 max	0.40 max	0.15 max	0.40 max	0.08 max
SA516 Grade 70	0.27-0.31	0.79-1.30	0.035 max	0.04 max	0.13-0.45					
SA508 Class 3	0.25 max	1.20-1.50	0.025 max	0.025 max	0.15-0.40	0.25 max		0.45-0.60 max	0.40-1.00	0.05 max
SA508 Class 1a	0.30 max	0.70-1.35	0.025 max	0.025 max	0.15-0.40	0.25 max		0.10 max	0.40 max	0.05 max

Table.1. Chemical Composition of SA106 Grade B, SA516 Grade 70, SA508 Class 3 and SA508 Class 1a specified ASME Sec. II

3.1.2 SA516 Grade 70의 파괴인성 변화

Hong, J.H등[9]은 Subsize Cv (5*5*25.4 mm) 시편을 이용한 3-Point bend test를 수행하여 Crack Initiation 까지 및 Load-displacement Curve에서 최고 Load까지 흡수 Energy를 각 Load rate 별로 측정한다. 이 자료에 따르면 300 °C에서 Load rate를 0.12 mm/min부터 97.8 mm/min까지 변화시켰을 때 Crack Initiation 까지 및 최고 Load시 까지의 흡수 Energy는 Table 2와 같았다.

이들 Load rate의 변화에 따라 재료의 흡수 Energy는 영향을 받고 있음이 분명하다.

Load Rate	Energy 측정 위치	
	Crack Initiation (inch-lbs)	최고 load 도달시 (inch-lbs)
0.12 mm/min	38	62
0.987 mm/min	31	46
9.87 mm/min	28	52
97.8 mm/min	32	56
최소/최대	73%	71%

Table.2 Fracture Toughnesses of SA516 Grade 70

3.1.3 SA508 Class 3의 파괴인성 변화

Kang, S.K[10]가 제시한 SA508 Class 3의 CT 시험의 결과에 의하면 0.08 mm/min과 3.0 mm/min 사이의 Load rate에서 J_I 및 dJ/dA 의 변화량과 시험범위내에서의 최대 최소의 비는 Table 3에 제시되었다. 여기서 의외로 최대 최소의 비가 큼을 알 수 있다.

Load rate	J_I	dJ/dA
0.08 mm/min	30.5	51.6
0.5 mm/min	13.5	27.6
3.0 mm/min	12	21.2
최소/최대	39%	41%

Table.3 Fracture Toughness of SA508 Class 3

3.1.4 SA106 Grade B의 파괴인성 변화

IPIRG (International Piping Integrity Research Group) Program [11]의 결과에 의하면 각기 Quasi-Static (QS: dJ/dt : 0.12- 0.17 kJ/m²/s) 및 Dynamic (Dyn: dJ/dt : 295-520 kJ/m²/s) Load rate가 288 °C에서 파괴인성치에 미치는 영향은 Pipe 지름에 따라 다르며 그 크기는 Table 4와 같다. 즉 SA106 Grade B의 파괴인성은 Pipe 지름과 Strain rate가 증가함에 따라 감소한다. 이러한 Strain rate와 파괴인성과의 관계는 Brickstad의 FEM 계산결과와도 잘 일치한다[11]

C(T)시편 채취 Pipe 지름	Strain Rate 영향 (Dyn/QS)		비 고
	J_{IC}	dJ/dA	
6 inch	82%	74.8	Battelle 측정값, 23% side groove
16 inch	63%	55%	Battelle 측정값, 20% side groove

Table.4 Fracture Toughness of SA106 Grade B

3.1.5 강종별 파괴인성 비교

Crack initiation이 일어날 때까지 재료가 저항할 수 있는 힘은 SA508 Class 3에서 가장 크게 감소하였으며 이 수치는 일반적으로 DSA효과가 가장 크다고 보고되어 있는 탄소강(SA106 B, SA516 Grade 70)에서 보다 DSA 효과가 크게 나타났다(Table 5 참조) 또한 Strain rate가 증가함으로써 300 °C 근처에서 보이는 재료의 파괴인성은 SA508 Class3에서 최대 1/3의 수준으로 감소되었다.

강 종	최대 J_I 혹은 Crack initiation까지의 흡수 Energy 최대, 최소비율	dJ/dA 혹은 최대 load까지의 흡수 Energy
SA106 Grade B	63%	55%
SA516 Grade 70	73%	71%
SA508 Class 3	38%	41%

Table. 5 The Comparision of Fracture Toughness in the SA106 Grade B, SA516 Grade 70 and SA508 Class 3

4. 분석

4.1 최대 파괴인성 감소치 예측

파괴인성의 최대 감소량은 3.1.1 절에서 기술한 강종에 대해 살펴보면 SA516 Grade 70의 약 30% 정도에서 SA508 Class3의 약 60%까지의 범위를 보여 SA508 Class 3가 가장 높은 파괴인성의 감소를 일으켰다. 그러나 C(T) 시편으로 재료의 파괴인성(J_I)을 구할 때 Load rate는 주로 0.5 mm/min (영광 3.4호기 J-R Test) 이므로 이 속도를 기준으로 하여 SA508 Class 3에서의 감소량을 구해보면 감소량은 J_{IC} 에서 약 -10%, dJ/dA 에서 약 -20%가 된다. 즉 오히려 증가한다. 따라서 가장 보수적인

파괴인성의 최대감소량은 SA106 Grade B의 최대감소량인 약 40%로 추정할 수 있다.

또한 SA508 Class 1a는 3.1.1에서 보듯이 ASME Section III, Appendix I에서 SA106 Grade B와 함께 탄소강으로 분류되어 있으며 그 조성에 있어서는 Ni을 제외하면 Section II에서 같은 Specification 번호로 분류되어 있는 SA508 Class 3과 흡사하다. 그러므로 SA508 Class 1a는 SA508 Class 3이나 SA106 Grade B와 비슷한 DSA 영향 거동을 보일것이라고 추정하는 것은 타당성이 있다. 따라서 DSA 영향 판단의 보수성을 위하여 SA508 Class 1a가 상기 두 재료중 SA106 Grade B와 비슷한 거동을 하는 것으로 가정한다. 여기에 불확실성에 대한 여유값을 J_{IC} 에 대해서는 10%, dJ/dA 에 대해서는 5%를 주면 SA508 Class 1a의 J_{IC} 및 dJ/dA 에 대한 추정 파괴인성 감소량은 각각 50%의 극히 보수적인 값을 산출해 낼 수 있다.

4.2 울진 3&4호기 실재료에의 DSA 영향

Fig 3와 Fig4은 각각 울진 3&4호기 고온관 및 저온관의 J/T 선도이다. 그래프내의 Solid Circle이 실제 Pipe의 운전압력과 관련된 J/T값을 나타내고 있으며 직선은 Crack 길이 "2a"에서의 Applied J/T, 내모, 세모 및 원은 각각 모재, DSA 영향을 고려한 모재, Weld-SAW Auto의 J/T 선도를 표시하고 있다. 여기에서 모재의 J 및 dJ/dA 를 각각 50% 감소시켜 DSA 영향을 고려한 모재의 J/T 선도가 Welding-SAW Auto의 J/T 선도와 거의 일치하거나 더 나은 값을 보이고 있다. 또한 모재의 J 및 dJ/dA 를 75% 감소시킨 J/T선도에 있어서는 운전시의 최대 J 및 dJ/dA 를 훨씬 초과하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.3 Stability for UCN 3&4 Hot Leg on the crack length 2a

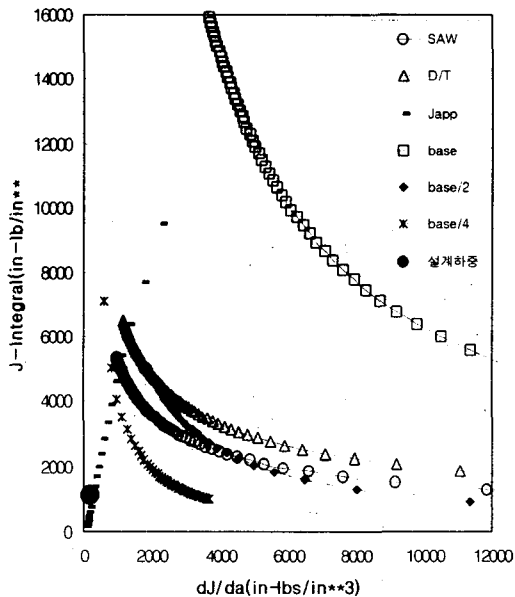
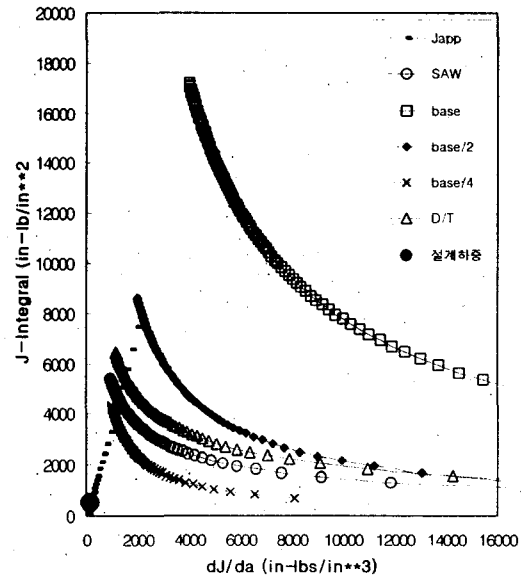


Fig.4 Stability for UCN 3&4 Hot Leg on the crack length 2a



4.3 차세대원전 주냉각재배관의 DSA 영향

4.2절에 나타난 결과는, 현 LBB 해석이 가장 낮은 J/T 값을 갖는 Weld-SAW Auto의 균열길이 2a인 J/T 선도에 의거하여 수행되고 있다는 점을 고려한다면 비록 DSA가 배관재에 일어난다고 인정하고 그 영향을 가장 보수적으로 취급(J 및 dJ/dA 값을 50%씩 감소) 한다고 하더라도 현 LBB 해석에는 문제가 되지 않는다는 의미와 함께 인위적으로 50% 이상으로 J 및 dJ/dA 감소시킨 경우에도 현 LBB 해석에는 문제가 되지 않음을 알 수 있다. 즉 차세대원자로 원자로냉각재계통 배관재에는 DSA 영향은 문제되지 않는다는 결론을 도출하게 된다.

5. 결론

- (1) DSA 영향을 고려한 SA508 Class 1a의 J 및 dJ/dA 값은 극히 보수적으로 추정할 때 50%정도 감소하는 것으로 예측된다. 이러한 DSA 영향을 고려하였을 경우 배관재 모재의 파괴인성치는 Weld-SAW Auto의 J/T 값 수준으로 감소하였다.
- (2) 그러나 현 LBB 해석이 Weld-SAW Auto의 J/T 선도를 기준으로 수행, LBB 적용 설계 마진이 200% 이상 되었다는 것을 고려하면 DSA의 배관재에 대한 영향은 존재한다 하더라도 LBB 해석 자체에는 전혀 영향이 없는 것으로 판단된다.
- (3) 균열면에서의 탄소성거동은 스테인레스강과는 달리 모재보다는 용접재의 응력-변형률 관계에 의해서 좌우됨을 알 수 있었다. 그러나 DSA의 영향을 고려한 동적파괴시험에서는 용접재보다 모재가 파괴인성측면에서 민감함을 알 수 있었다.
- (4) 모재의 J 및 dJ/dA를 각각 75% 감소시켰을 경우에도 현 LBB 해석에는 유효함을 알 수 있다.
- (5) 차세대원전 배관 모재 및 용접재의 파괴인성치의 거동도 비슷(울진 3&4와 동일재료)하리라 예측되므로, 차세대원전 LBB에서는 DSA는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- (1) Baird, J.D., "Dynamic Strain Aging," in The Inhomogeneity of Plastic Deformation, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1971, PP 191 - PP 222.
- (2) Marschal, C.W., Landow, M.P., and Wilkowski, G.M., "Effect of Dynamic Strain Aging on Fracture Resistance of Carbon Steels Operating at Light-Water Reactor Temperatures," "Fracture Mechanics: 21th Symposium, ASTM STP 1074, ASTM, Philadelphia, 1990, PP 339 - PP 360.
- (3) Marschal, C.W., Landow, M.P., and Wilkowski, G.M., "Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used in Task 1 of the IPIRG Program," Topical Report, Battelle, Columbus OH, Dec. 1989.
- (4) 한국원자력안전기술원 "과단전누설개념 적용현황 및 규제방향", Nuclear Safety Information Conference Dec. 1997. PP 483 - PP 510
- (5) "Analysis of Experiments on Stainless Steel Flux Welds," NUREG/CR-4878, USNRC, 1987
- (6) 한국원자력연구소 보고서, 울진 3/4호기 주 배관 소재의 파괴저항 (J-R Curve) 특성, 홍준화 등, Mar. 1993
- (7) V.Kumar, M.German, C.F. Shih, 1981, "Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis," EPRI Report NP-1931.
- (8) ASME Code Section II, Specification No. SA 106, SA 516 and SA508
- (9) Hong, J.H., Chi, S.H., Kang, Y.H., Rheem, K.S and Mutty, K.L., "Effect of Neutron Irradiation on Fracture Behaviors of A516 Gr.70 steel and Armco Iron in the Dynamic Strain Regime," Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, Oct. 1992.
- (10) Kang, S.K. Kim, I.S., "Dynamic Strain-aging Effect on Fracture Toughness of Vessel Steels," Nuclear Tech., Vol. 97, Mar. 1992, PP 336 - 343.
- (11) Brickstad, B., "Numerical Analysis of IPIRG Cracked Pipe Experiments Subjected to Dynamic and Cyclic Loading," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 55, 1993, PP 395 - pp 422.
- (12) 한국원자력연구소 보고서, 원자로 냉각재배관 엘보우용 SA516-Gr.70 강의 DSA 영향 평가 (동적/정적 파괴저항 (J-R) 특성), 홍준화 등, Nov. 1997.