

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

3-D TWC 직관계에 대한 ABAQUS 코드의 유효 J-적분값 추이 고찰
(Evaluation of Effective J-Integral Value for 3-D TWC Pipe in ABAQUS Code)

양준석, 유기완, 성기방, 정우태, 김범년
한전 전력연구원

요 약

ABAQUS 코드의 J-Integral 선택사항을 사용하여 3차원 관통 균열(3-D through walled crack : TWC)을 가진 직관계(straight pipe)에 대해서 LBB 해석을 수행할 경우 균열있는 배관 두께의 위치에 따라서 J-적분값의 뚜렷한 차이가 나타났으며, 균열있는 배관 두께 중심에서 최대 J-적분값이 얻어졌다. 이 값을 LBB 평가에 사용하여 최대사고하중을 예측하기에는 지나치게 보수적인 면이 있다. 또한 배관 두께 위치에 따라서 J-적분값이 변화하기 때문에 LBB 평가에 필요한 최대하중을 구하기 위해서는 적분 경로 독립성 요건을 만족하면서 관통 균열에 유효한 하나의 평균값이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 ABAQUS 해석 모델의 다양한 요소구성 검토를 통해서 상대적으로 적은 layer 수에도 정확성 및 독립성이 보장되며, 배관 두께 위치에 따른 J-적분값의 변화폭이 적은 평균값을 검토하였다. 또한 ABAQUS J-적분값의 과다한 보수성을 감소시킬 수 있는 합리적인 평균값 계산의 기준을 마련하였다. 이를 근간으로 IPIRG-2 프로그램의 배관실증시험 및 해석 결과와 비교하고, 가상균열진전법을 사용한 검증해석을 통해서 ABAQUS 코드의 3-D TWC 파이프 LBB 해석에 대한 유효 J-적분값 적용 기준을 논의코자 한다.

Abstract

This paper suggests a simple method to estimate the effective J-integral values in applying Leak-Before-Break (LBB) technology to nuclear piping system. In this paper, the effective J-integral estimates were calculated using energy domain integral approach with ABAQUS computer program. In this case, there existed a apparent variation of J-integral values along the crack line through the thickness of pipe. For this reason, several case studies have been performed to evaluate the effective J-integral value. From the results, it was concluded that the simple method suggested in this paper can be effectively used in estimating the effective J-integral value.

1. 서론

원자력발전소 배관에 파단전누설(Leak-Before-Break : LBB) 개념을 적용하면 배관이 운전중 순간적으로 불안정 파괴되어 완전히 돌로 갈라지는 양단순간파단으로 인한 동적 영향을 고려하지 않아도 되므로 각종 구조물의 설계가 단순해지고, 배관 파단에 대비해 설치되었던 배관파단구속장치 및 유체충돌차단벽 등과 같은 지지구조물들을 제거할 수 있기 때문에 설계에 소요되는 비용절감은 물론 지지구조물수의 최소화로 가동중검사시 작업자의 방사선 피폭량을 감소시킬수 있다. 미국 원자력 규제기관(U.S NRC)은 발전소 한 호기당 미화 일억만불의 감소를 예상하였다^[1]. 이러한 많은 이익을 얻기 위해 세계각국에서는 발전소 설계 단계에서부터 LBB 개념을 도입하고 있다

원자로 냉각재 계통 배관에 대한 LBB 적용성 평가는 탄소성 파괴역학적으로 계산된 J-적분값을 사용하여 수행하고 있다. J-적분값은 균열진전과 관련된 에너지 해방율이다. 관통균열을 가진 3차원 LBB 해석 모델에서 J-적분값 계산은 가상균열진전법(virtual crack extension method)과 에너지 영역 적분법(energy domain integral method)이 사용되고 있다. 가상균열 진전법은 Parks^[2]와 Hellen^[3]에 의해 처음으로 제시되었으며 이들이 제시한 방법은 유한요소해석 시 강성도 행렬 및 변위 행렬로부터 에너지 해방률을 계산하는 방법이다. 그후 deLorenzi^[4,5]등은 연속체역학을 이용하여 가상균열진전법에 의한 에너지 해방률 계산 방법을 제안하였다. 에너지 영역 적분법은 Shih^[6]와 Moran^[7]등에 의해 처음 제안되어, 현재 J-적분값을 계산하는 일반적인 유한요소해석 방법으로 자리 잡았다. 에너지 영역 적분법의 기본 개념은 균열선단 주위에 폐회로를 구성하는 안쪽 및 바깥쪽 경로사이에 형성된 영역의 3차원 J-적분을 수행하는 방법으로 적분 경로에 대한 독립성 조건(path independency)을 적용하는 개념이다. 현재 비선형 전문 구조해석 프로그램인 ABAQUS^[8] 코드에서는 탄소성 파괴해석시 J-적분값을 계산하기 위하여 에너지 영역 적분법을 사용하고 있으며, 선택사항으로 J-Integral 옵션을 사용하고 있다.

ABAQUS 코드의 J-Integral 선택사항을 사용하여, 3차원 관통 균열(3-D through walled crack : TWC)을 가진 직관계(straight pipe)에 대해서 LBB해석을 수행할 경우 균열있는 배관 두께의 위치에 따라서 J-적분값의 뚜렷한 차이가 나타났으며, 균열있는 배관 두께 중심에서 최대 J-적분값이 얻어졌다. 이와같은 현상은 평면 변형률에 기인하는 구속효과로 인해서 배관두께 중간부터 파괴가 발생함을 내포하고 있다. 그러나 이 값을 LBB 평가에 사용하여 최대사고하중을 예측하기에는 지나치게 보수적면이 있다. 왜냐하면, LBB 평가시 J-적분값은 배관의 균열 성장 초기에 해당하는 초기하중을 예측하는데 사용되기 때문이다. 그러므로 배관 두께 위치에 따라서 J-적분값이 변화하기 때문에 LBB 평가에 필요한 최대하중을 구하기 위해서는 적분로 독립성 요건을 만족하면서 관통 균열에 유효한 하나의 평균값이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 ABAQUS 해석 모델의 다양한 요소구성 검토를 통해서 상대적으로 적은 layer 수에도 정확성 및 독립성이 보장되며, 배관 두께 위치에 따른 J-적분값의 변화폭이 적은 평균값을 검토하였다. 또한 ABAQUS J-적분값의 과다한 보수성을 감소시킬 수 있는 합리적인 평균값 계산 기준을 마련하였다. 이를 근간으로 IPIRG-2 프로그램^[9]의 배관실증시험 및 해석 결과와 비교하고, 가상균열진전법을 사용한 검증해석을 통해서 ABAQUS 코드의 3-D TWC 파이프 LBB 해석에 대한 유효 J-적분값 적용 기준을 논의코자 한다.

2. LBB 해석

2.1 LBB 해석 이론 차이점 검토

2.1.1 가상균열진전법(Virtual Crack Extension Method)

deLorenzi 및 Bass 등이 제시한 가상균열진전법으로 에너지해방률을 계산하였으며 다음식을 이용하여 J-적분값을 구하였다.

$$J = \frac{1}{t} \frac{G^*}{da} \quad (1)$$

여기서 G^* 는 해방되는 변형률에너지의 크기, da 는 균열선단에서의 가상변위이며, t 는 배관의 두께이다. G^* 를 결정하기 위해서 3차원 탄소성해석시 균열선단주위의 절점에 균열의 개구방향으로 가상변위를 작용시킨다. LBB 해석시 가상균열의 진전을 그림 1의 (a), (b), (c) 및 (d)와 같이 4가지의 형태로 가정하여 J-적분값을 계산하였으며 이들의 평균값을 이용하여 균열진전하중 및 최대하중을 결정한다.

2.1.2 에너지 영역 적분법 (Energy Domain Integral Method)

에너지 영역 적분법은 면적분(surface integral)을 체적적분으로 변환하기 위하여, 균열선단 주위의 폐경로(S_{ends})를 구성하는 안쪽(S_i) 및 바깥쪽(S_o) 경로 사이에 형성된 영역의 3차원 체적적분을 수행한다. Li와 Shih[9] 등은 J-적분의 Area/Domain 개념을 표현하기 위해서 적절한 가중치를 도입하여 Domain으로 대표되는 구역에 대해 얻어진 J 적분값의 신뢰도를 한층 개선하였다. 이렇게 얻어진 J 적분값은 여러형태의 Weighting Function에 민감하지 않는 장점을 갖고 있다. ABAQUS 코드에서는 J-적분값을 계산하는 방법으로 이와같은 에너지 영역 적분법을 채택하고 있다.

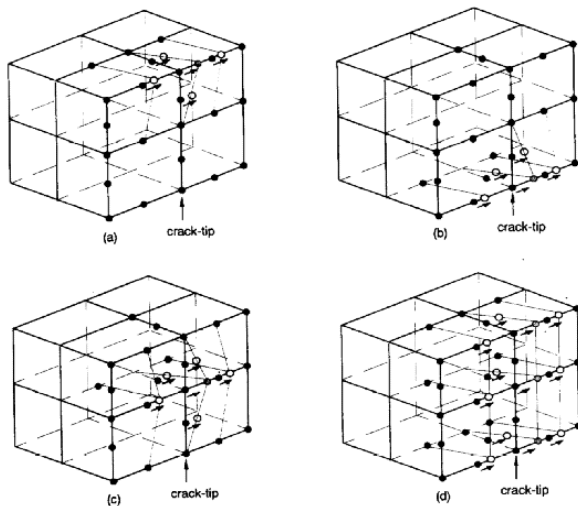


그림 1. 3차원 균열선단에서의 가상균열진전법

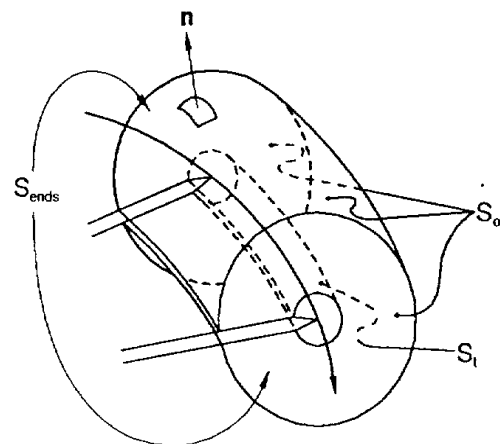


그림 2. 3차원 에너지 영역 적분법

2.2 해석모델의 차이점

가상균열진전법에서는 그림 3에서와 같이 가상균열진전의 모사가 가능한 격자형태로 모델을 구성한 반면, 에너지영역 적분법의 경우 그림 4에서와 같이 균열선단에서의 메쉬는 균열선단으로 집중되는 육각형 요소의 둥근 파문형태를 갖는 거미집(spider web) 형태로 구성한다. 이것은 균열선단의 세밀한 메쉬에서 거친 메쉬로의 점진적인 변화, 즉 응력 집중을 모사하는데 적합토록 구성하고, 적분로 구성을 용이하게 하기 위함이다. 또한 J-적분값의 정확성 향상을 위해 그림 5와 같은 균열선단에서 특이요소(Singular Element) 사용이 권장된다.

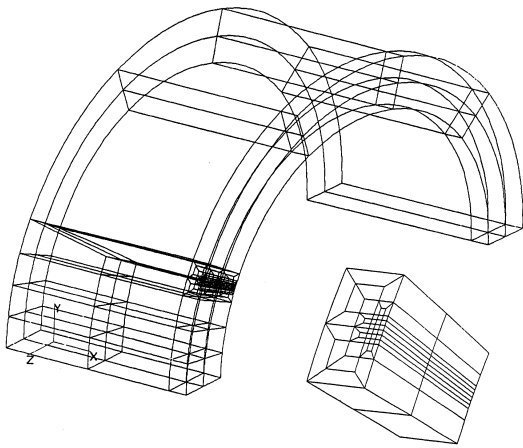


그림 3 가상균열진전법을 사용한 해석 모델

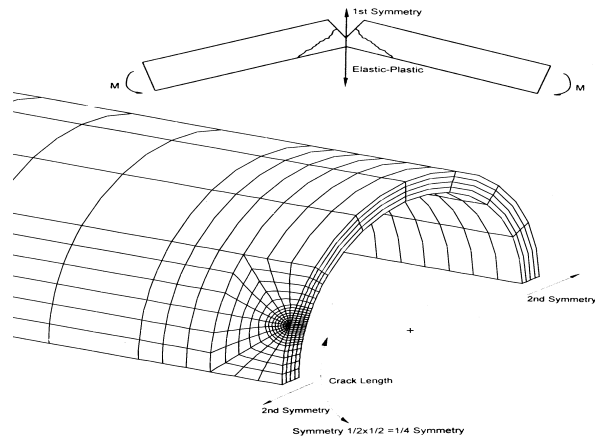


그림 4 에너지영역 적분법을 사용한 해석 모델

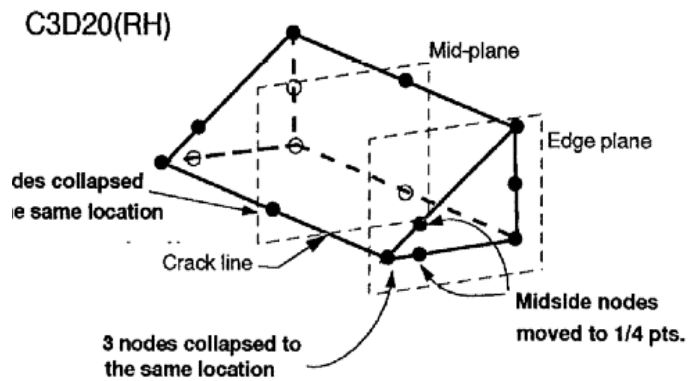
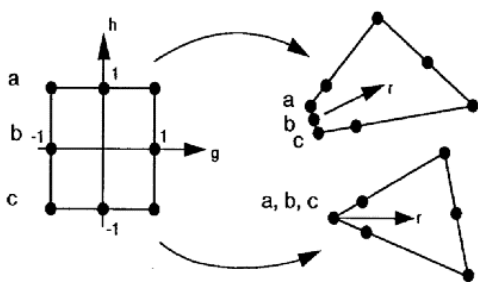


그림 5 에너지 적분법 사용을 위한 특이요소

3 ABAQUS 해석모델 요소구성 검토

3.1 해석모델 요소구성

3-D TWC 직관의 해석모델은 그림 6에서와 같이 균열선단의 두께방향으로 등 간격의 2분할 및 4분할 요소와 배관 두께 중심면을 기준으로 양방향 자유면으로 편중된 4분할 요소가 사용되었다. 본 해석에서는 모델링을 단순화하고 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 시험배관의 대칭성을 이용해서 전체배관의 1/4 단면만을 모델링하였다.

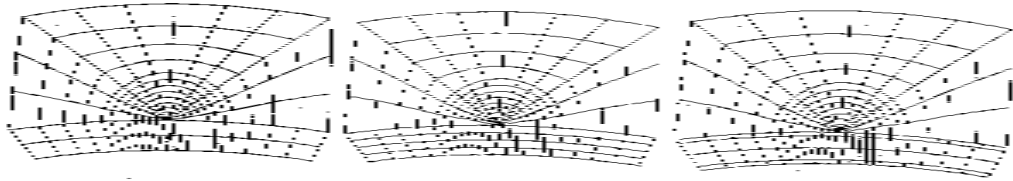


그림 6 (a) uniform two layers (b) uniform four layers (c) biased four layers

3.2 배관 두께 방향의 ABAQUS J-적분값 검토

전형적인 원자로냉각재 계통 배관의 계통하중이 작용할 경우 ABAQUS J-값은 그림과 같은 경향을 나타내었다. 일반적으로 배관 두께 중심에서 최대값이 발생하며 이는 초기하중에 해당된다. 요소 중간 절점에서 J-값의 진동(oscillation)은 요소 Edge Plane과 Mid Plane에서의 특이성이 다르기 때문에 발생한다. 그림 6으로부터 균등분할의 요소 구성이 Biased 요소 구성보다 J-값 분포 측면에서 더 좋은 것으로 판단된다. 또한 배관 두께의 위치에 따라서 J-적분값이 변화하므로 LBB 평가에 필요한 최대하중을 계산하기 위해서는 적분로 독립성 요건을 만족하면서 관통균열에 유효한 하나의 평균값이 요구된다.

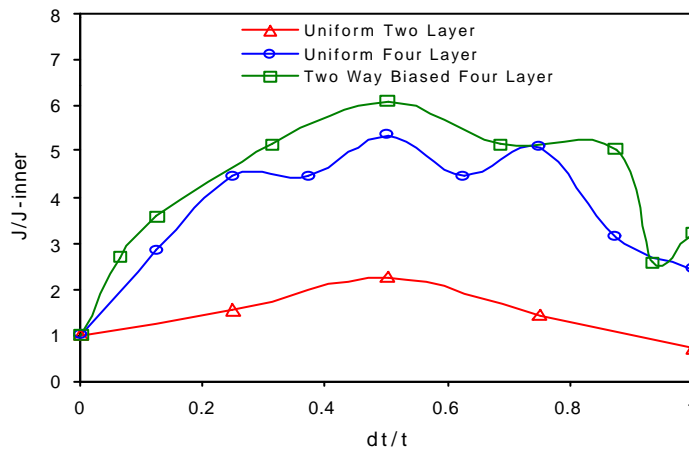


그림7 배관 두께 방향의 ABAQUS J-적분값 추이

3.3 J-적분값의 평균값 검토

3.2 절의 해석 모델에서 사용한 배관 재질은 IPIRG-2 프로그램에서 사용한 탄소강 A106 Gr B 이다. 배관의 외경은 15.72 inch, 배관 두께는 1.03 인치, 균열각도는 43.2° 이다. 작용하중은 배관의 한쪽 끝단에 동일한 굽힘모멘트(8,000 in-kips)로 작용시켰다¹⁰⁾.

균등 2분할 요소의 경우 3번째 경로부터, 균등 또는 배관 중심 단면으로부터 편향된 4분할 요소의 경우 2번째 경로부터 J-적분의 독립성이 보장되었다. J-적분의 평균값 변화는 균등 또는 양방향으로 편향된 경우 공히 요소 구성방법에 의존적임을 알 수 있으며, 경로를 이동시킴으로써 J-적분의 평균값 변화 폭이 두께방향의 요소 분할수에 독립적임을 알 수 있다. 여기서 균등 2분할 요소를 구성하면 상대적으로 적은 요소 분할수에도 정확성 및 독립성이 보장되고, 배관 두께 위치에 따른 J-값의 변화폭이 적음을 알 수 있다. 또한 전자계산 소요시간이 많이 감소된다. 따라서 균등 2분할 요소로 ABAQUS 해석 모델의 요소를 구성함이 적합하다. 또한 ABAQUS 해석 경험에 비추어 볼 때 Simpson 및 사다리꼴 법칙에 의해 계산된 J-값은 가상균열진전법에 의한 것보다 보수적이다. 따라서 ABAQUS J-값의 과도한 보수성 감소를 위한 합리적인 대안이 필요하다. 그러므로 이와같은 보수성 검토를 위한 대안은 다음과 같이 제시되었다.

$$\text{CASE 1} = (J_{\text{outer}} + J_{\text{mid}} + J_{\text{inner}}) / 3,$$

$$\text{CASE 2} = (J_{\text{outer_mid}} + J_{\text{mid}} + J_{\text{inner_mid}}) / 3$$

$$\text{CASE 3} = (J_{\text{outer}} + J_{\text{outer_mid}} + J_{\text{mid}} + J_{\text{inner_mid}} + J_{\text{inner}}) / 5$$

$$\text{CASE 4} = J_{\text{mid}}$$

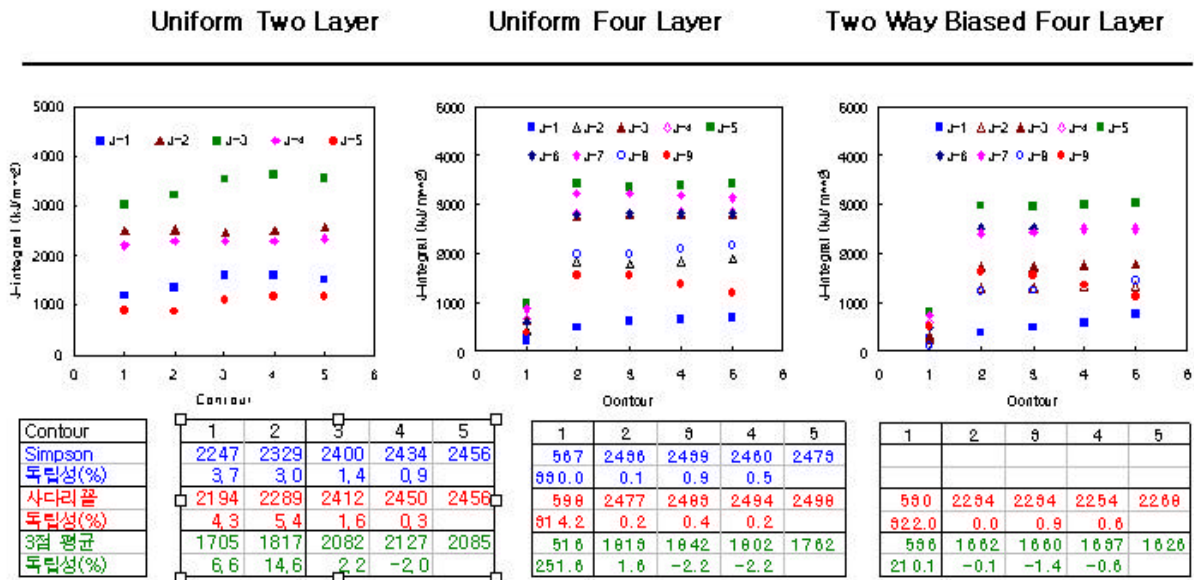


그림 8 요소구성에 따른 contour 별 J-적분의 평균값 검토

dt/t	Cont-3	Cont-4	Cont-5	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	Simpson
0.00	1586	1602	1508	2082	2766	2200	3545	2400
0.25	2478	2507	2574	"	"	"	"	"
0.50	3545	3607	3577	"	"	"	"	"
0.75	2275	2298	2335	"	"	"	"	"
1.00	1115	1172	1171	"	"	"	"	"

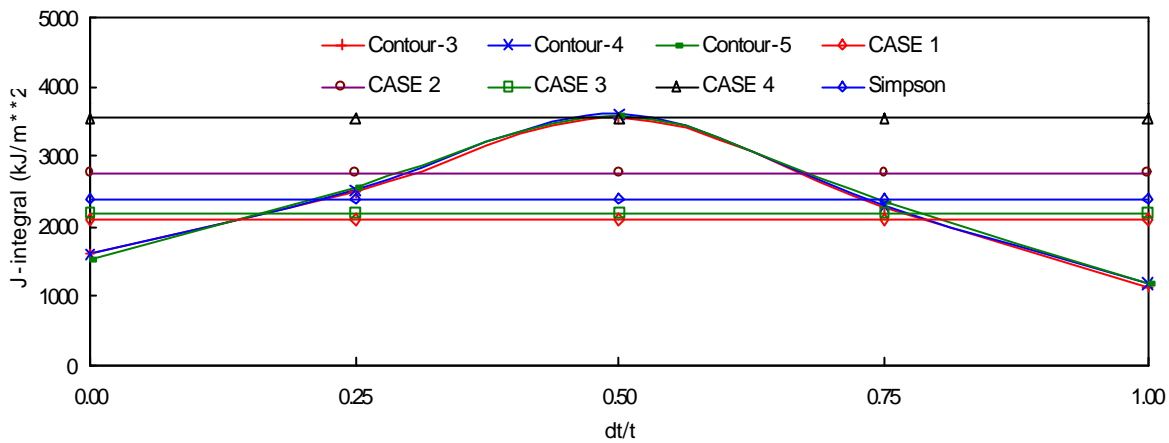


그림 9 J-적분 평균값 검토 요약

4. IPIRG-2 연구 결과 비교

제3장에서 논의된 합리적인 평균값 계산 기준의 타당성을 확보하기 위해서 본 논문에서는 Battelle(연) 주도하에 수행된 IPIRG-2 프로그램의 배관실증시험 및 해석 결과와 비교 검토를 수행하였다. IPIRG-2 시험결과는 표 1에 제시되었으며, 시험 및 해석 결과의 상호 비교는 그림 10에 제시하였다. 그림10에서 보는 바와 같이 과도한 보수성 감소를 위하여 제시된 CASE 1의 경우가 합리적인 보수성을 갖고 있으며, 배관 치수에 상관없이 최대하중을 예측하는데 있어서 작은 변화 폭을 보이고 있다. 따라서 CASE 1을 LBB 해석 및 평가에 적용할 경우 큰 무리는 없다고 판단된다.

시험번호	재질	배관번호	균열각도	작용하중	최대하중
I-9	A 106B	OD=6.65in t=0.44	79.64°	D(4.24 in/s)M	480.3 in-kips
I-8	A 106B	OD=15.72in t=1.03	43.2°	QS, M	9,185 in-kips

시험온도 : 550 °F, 시험압력 : 2250 psig

표 1. IPIRG-II 배관실증시험 결과

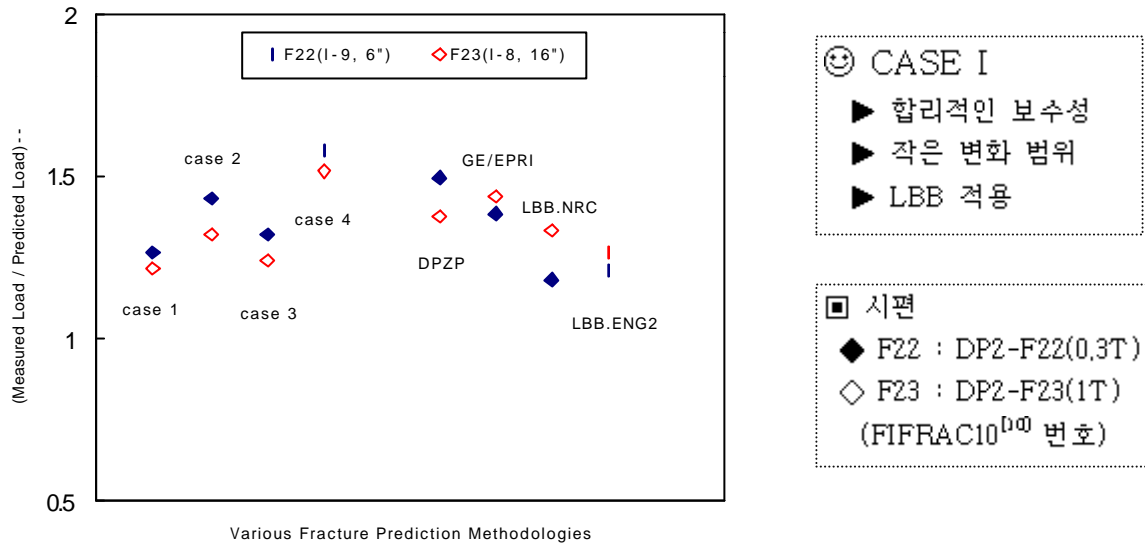


그림 10 IPIRG-2 프로그램 시험 및 해석 결과 비교

6. 결론

ABAQUS 기본 option을 사용하여 3차원 관통균열을 가진 직관계에 대한 유효 J 적분값을 결정하기 위해 수행한 유한요소해석 모델 메쉬 구성 검토를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균등 2분할 요소 구성이 상대적으로 적은 요소 분할 수에도 불구하고 정확성 및 독립성이 보장되며, 배관 두께 위치에 따른 J-적분값의 변화폭이 적음을 알 수 있었다.
2. LBB 해석시 ABAQUS 해석 모델을 작성할 경우 균등 2분할 요소를 구성하는 것이 적합하다.
3. 유효 J-적분의 평균값 검토 결과 Simpson 및 사다리꼴 법칙에 의해 계산된 J-값은 적분로 독립성 요건에서 가장 우수하지만 상당한 보수성을 갖고 있음을 알 수 있었다.
4. LBB 해석의 과다한 보수성 감소를 위해서 제시된 평균값 계산 기준인 CASE1이 합리적인 대안으로 검토되었다 (IPIRG-2 프로그램과 비교).
5. 상기의 검토사항을 고려한 ABAQUS 해석 모델을 작성하여 원자로냉각재계통 배관에 대한 LBB 평가를 수행한 결과, 기존 방법(가상균열진전법)과 비교하여 통상적인 하중 범위에서 발생하는 차이는 매우 작음이 확인되었다 (최대 6% 이내).

참고문헌

1. US NRC, "Modification of General Design Criteria 4 Requirements for Protection Against

- Dynamic Effects of Postulated Pipe Rupture”, Federal Register Notice, Vol. 52, No. 207, 41288-41295, 1987.
2. D.M.Parks, 1977, The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol 12, pp.353-364
 3. T.K.Hellen, 1975, On the Method of Virtual Crack Extensions,International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol.9, pp. 187-207
 4. H.G.deLorenzi, 1982, On the Energy Release Rate and the J-Integral for 3-D Crack Configurations, International Journal of Fracture, Vol.19,pp.183-193.
 5. H.G.deLorenzi, 1985, Energy Release Rate Calculations by the Finite Element Method, Engineering Fracture of Mechanics, Vol.21, pp.129-143
 6. C.F.Shih, B.Moran, T.Nakamura, 1985,Energy Release Rate along a Three Dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body,International Journal of Fracture, Vol 30, pp. 79-102
 7. B.Moran, C.F.Shih, 1988, A General Treatment of Crack Tip Contour Integrals, International Journal of Fracture, Vol 35, pp. 295-310
 8. ABAQUS/Standard 5.7.1, Users Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
 9. A.Hopper, G.Wilkowski, P.Scott, R.Olson, D.Rudland, T.Kilinski, R.Mohan, N.Ghadiali, D.Paul, The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program NUREG/CR-6452, BMI-2195,Battelle, 1996
 10. PIFRAC, Pipe Fracture Encyclopedia Version 3.1 USNRC, Dec, 1997