2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KSNP 원전 가압기 밀림관 파단전누설 평가에 미치는 재료물성치의 영향

The Influence of Material Properties on the Leak-Before-Break Evaluation of Surge-line Piping in KSNP

박원배, 유완, 윤기석, 박성호, 최택상
한국전력기술㈜
대전광역시 유성구 덕진동 150

이호진, 이봉상
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 원전 가압기 밀림관 스테인레스강 배관의 파단전누설 평가시 재료물성치가 미치는 영향에 대한 고찰을 하였다. 먼저 인장물성치(Ramberg-Osgood식 계수, α와 n)와 누설률과의 관계를 연구하였고 그 결과 누설률 해석을 대치할 수 있는 0.2% 오프셋 항복강도 대비 임계감지가능누설균열과 최대임계감지가능누설균열을 정의하였다. 재료물성치가 적용하중에 의한 J 적분값에 미치는 영향으로 항복강도가 증가할수록 적용하중에 의한 J 적분값은 감소하였고 감소량 변화는 증가할수록 줄어드는 것을 확인하였다. 또한, 적용하중에 의한 J 적분값은 2~3% 변형률이내의 응력-변형률선도의 형상에 크게 영향이 있음을 알 수 있었다. 즉, 초기 유동응력이 높은 경우 낮은 적용하중에 의한 J 적분값이 계산되었다. 적용하중에 의해 계산된 J/T선도의 기울기는 응력-변형률 선도에 크게 영향을 받지는 않았다. 결과적으로 스테인레스강 재료는 재료의 초기 인장물성치를 높이는 방향으로 개선이 이루어져야 함을 확인하였다.

Abstract

The influence of material properties on the leak-before-break analysis has been studied for stainless steel pipings in nuclear power plants. The study includes the relationship between tensile properties (Ramberg-Osgood coefficients : α and n) and leak rate, which leads to the definition of the critical leak detection crack and the maximum critical leak detection crack that may replace the leak rate analysis. It also includes the effect of the various yield strengths and the stress-strain curve configuration on an applied J-integral. As the yield strength increases, the applied J-integral decreases. The decreasing rate of the applied J-integral reduces for the high yield strength materials. In addition, the applied J-integral is affected by the configuration of the initial 2~3% strain range of a stress-strain curve. That is, if initial flow stresses are high, low applied J-integrals are calculated. The slope of applied J/T curves is not influenced greatly by the configuration of the stress-strain curves. As a result, the initial tensile property should be increased to improve the leak-before-break analysis margin for the stainless steel piping materials.

1. 서 론

현재 한국표준형원전(Korean Standard Nuclear Power Plant, 이하 KSNP라 함.) 가압기 밀림관에는 파단전누설 개념[1~3]이 적용되어 있다. 파단전누설 개념은 해당 배관에 균열이 존재할 경우 이 균열을 통하여 배관내부의 유체가 외부로 누설되고 유체의 누설이 배관주변에 설치된 각종 누설감지 장치(leak detection system)을 통해 배관이 사전에 감지되며 양단순간파단(double ended guillotine break : DEGB)과 같은 극단적인 사고가 균열배관에서 발생하기 전에 사전조치가 가능하도록 하는 것이다. 파단전누설 개념을 적용하지 않은 과거 원전의 경우 양단순간파단 사고를 배관 설계시 적용하였기 때문에 배관파단으로 인한 동적영향을 고려하여 해당 배관계통 및 배관계통 주변의 구조물에 많은 수의 스너버(snubber)를 설치하거나 배관파단이 예상되는 지점에는 배관파단 구속장치(pipe whip restraint : PWR) 및 유체충돌 차단벽(jet impingement shield) 등의 구조물을 설치하였다. 그러나 이러한 구조물의 설치에는 막대한 비용이 소요될 뿐만 아니라 오히려 원전 운전중 배관의 정상적인 열적거동을 구속함으로써 배관계통에 예기치 못한 열하중을 발생시키거나 가동중검사시 작업자의 접근성을 어렵게 하여 작업자에 대한 방사능 피폭량을 증가시키는 문제점이 발생되었다. 파단전누설 개념은 양단순간파단 사고를 가정함으로써 야기되는 제반 어려움을 해결할 수 있는 대안으로 제시되었으며 이로써 배관설계시 배관파단으로 인한 동적영향이 배제되어 배관주변의 구조물의 설계가 단순해지고 복잡한 주변구조물의 설계, 설치 및 운전 시에 필요한 소요비용을 절감할 수 있다. 이런 이유로 KSNP에서 주냉각재 배관, 안전주입계통 배관, 정지냉각계통 배관, 가압기 밀림관 등에 파단전누설 개념을 적용하고 있다.[4]

가압기 밀림관은 가압기와 주냉각재 배관을 연결하는 30.48 cm 직경의 347 스테인레스강 재료로 제작되어 있으며 가압기의 압력을 일차계통에 전달하는 역할을 한다. 그러나 이 배관은 운전특성상 발전소의 기동 및 냉각 동안에 열성층하중을 수반하며 이로 인해 파단전누설 평가시 설계여유도가 그다지 크지 않다. 따라서 가압기 밀림관의 경우에는 제작자가 제시하는 재료물성치의 작은 차이에도 파단전 누설개념의 적용성에 영향을 받을 수 있다. 그러나 이전의 연구들은 PED(piping evaluation diagram), BAC(bounding analysis curve) 등과[5,6] 같이 정상운전하중과 안전정지지진하중 혹은 정상운전응력과 최대응력을 이용하여 초기 설계시 파단전누설의 적용성을 평가하는 방법을 집중적으로 연구하였으나 재료물성치가 파단전누설 평가에 미치는 영향에 대한 연구는 미진하였다. 본 논문에서는 KSNP 가압기 밀림관 스테인레스강 재료 개선을 위한 기초자료로 활용이 가능하도록 가압기 밀림관의 파단전누설 평가에 미치는 인장물성치의 영향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 가압기 밀림관 파단전누설 평가방법

원전설계시 배관에 대한 파단전누설 평가는 NUREG 1061 Vol. 3[2] 및 Standard Review Plan(SRP) 3.6.3[3]에 따라 수행한다. KSNP 가압기 밀림관 역시 이들 요건에 따라 평가를 수행하고 있으며 평가순서는 다음과 같다.

1) 재료물성치의 결정 : 밀림관 배관계를 구성하는 모든 재료의 인장 및 J-R(J-integral – Resistance) 물성치를 실험으로 결정.
2) 가상관통균열의 위치 선정 : 밀림관 배관계에서 가장 큰 응력이 작용되는 지점.
3) 감지가능누설균열의 크기 결정 : 37.8 liter/min 누설률에 해당하는 균열의 크기 결정.
4) 원전 운전중 감지가능한 균열의 안정성 확인 : 다음의 조건에 대해 적용하중에 의한 J 적분값(이후 Applied J라 함.)을 계산하여 실험으로 구한 J-R 물성치와 비교하여 균열의 안정성을 확인.
   - 감지가능누설균열 크기 및 발전소 운전중 발생가능 최대하중의 √2배
   - 감지가능누설균열의 2배의 크기 및 발전소 운전중 발생가능 최대하중

3. 감지가능누설균열의 크기 및 Applied J/T(Applied J-integral/ Tearing Modulus)의 계산

3.1 감지가능누설균열의 크기 계산

감지가능누설균열 크기는 EPRI에서 개발된 PICEP 코드[7]을 이용하여 계산하였다. PICEP 코드는 배관을 구성하는 재료의 응력-변형률 곡선(Ramberg-Osgood 식 계수 및 인장물성치), 배관 운전온도, 운전압력, 균열의 형상, 배관의 크기 등을 입력으로 사용하여 균열길이에 따른 균열개구변위 및 누설률을 계산해준다. 감지가능누설균열의 크기의 계산에 있어서 PICEP코드는 보수적인 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 37.8 liter/min 감지가능누설균열 크기 계산의 PICEP 코드 입력으로, Ramberg-Osgood식(R-O식)의 계수와 0.2% 오프셋 항복강도(이후 0.2% 항복강도라 함.)를 제외하고는 기존 KSNP 가압기 밀림관 파단전누설 평가에 사용하였던 입력 값들을 동일하게 사용하였다. 표 1에 PICEP 코드에 사용되는 입력내용의 종류를 기술하였다. Ramberg-Osgood식은 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)=\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad \text{---------- (1)}$$

여기서 ε : 변형률, ε_0 : 참조변형률 ($=\sigma_0/E$), σ : 응력, σ_0 : 참조응력, α 및 n : R-O식 계수

3.2 Applied J/T의 계산

본 논문에서 Applied J/T의 계산은 기존 가압기 밀림관의 파단전누설 평가에 사용한 유한요소평가 프로그램인 CEMARC 코드[8]를 사용하였다. 그림 1은 밀림관 파단전누설 평가를 위해 사용한 요소망이다. 대칭성을 고려하여 전체 배관의 1/4 모델이 적용되었으며 작용하중으로 배관내에 운전압력을 적용하고 배관 양 끝단에는 굽힘 모멘트를 고려하였다. 모델의 크기는 반경 16.19 cm, 두께 3.33 cm으로 요소수는 총 199개, 노드수는 1302개로 20 노드 솔리드 요소를 사용하였다. 해석에 적용된 균열의 크기는 15.72 cm, 16.23 cm 및 16.73 cm로 원주방향 각도로 계산하면 각각 62도, 64도 및 66도이다. 그림 2는 균열안정성평가에 사용한 응력-변형률 곡선이다. 각 재료물성치 차이에 따른 Applied J/T의 영향을 알아보기 위해 그림 2-a와 같이 항복강도를 103 Mpa에서 280 Mpa로 변화

시키고 그림 2-b와 같이 일정한 항복강도에서 초기 재료물성치와 인장강도값을 변화시켜 Applied J/T를 계산하였다.

4. 감지가능누설균열 크기에 대한 R-O식 계수 및 0.2% 항복강도와의 관계

4.1 R-O 계수, alpha (α)

그림 3은 일정한 0.2% 항복강도, 164 Mpa 및 영률, 175,133 Mpa 에서 R-O식 계수, α가 감지가능누설균열의 크기에 미치는 영향을 보여준다. 일정한 n에서 α가 증가하면 감지가능누설균열길이는 감소함을 알 수 있다. 특히 n이 작은 값일 경우 α의 영향은 매우 커서 n=1에서 가상균열의 감소폭이 50%까지 증가하는 반면 n이 큰 값인 경우에는 감지가능누설균열크기에 미치는 α의 영향이 매우 작아져서 n이 7이상이 되면 α의 영향은 없었다.

4.2 R-O 계수, n

그림 4는 일정한 0.2% 항복강도, 164 Mpa 및 영률, 175,133 Mpa에서 R-O식 계수, n이 감지가능누설균열의 크기에 미치는 영향을 보인다. 일정한 α에서 n이 증가하면 감지가능누설균열길이는 증가하며 그 효과는 α=1에서 감지가능누설균열의 증가폭이 45%정도이고 α=5에서 감지가능누설균열의 증가폭은 150% 정도이다. 따라서 일정한 α에서 n의 변화가 감지가능누설균열의 크기에 미치는 영향이 일정한 n에서 α의 변화가 감지가능누설균열 크기에 미치는 영향보다 높은 것으로 나타났다.

4.3 0.2% 항복강도

감지가능누설균열의 크기를 계산하기 위해 사용한 0.2% 항복강도가 감소한 경우, α가 증가하면 감지가능누설균열의 크기가 감소하고 n이 증가하면 감지가능누설균열의 크기가 증가하는 일반적인 경향은 변하지 않으나 감지가능누설균열의 전체적인 크기는 감소하였다(그림 4 참조).

5. 임계감지가능누설균열의 정의 및 의미

5.1 정의

감지가능누설균열은 배관계에서 37.8 liter/min의 누설률을 야기하는 크기를 갖는 균열을 의미하는 것으로 가압기 밀림관 직관부에서는 언급한 바대로 PICEP 코드를 이용하여 균열크기를 결정한다. 만일 PICEP 코드에 의해서 구해지는 감지가능누설균열 값에 재료물성치에 관계없는 최대값이 존재하고 이 값의 사용이 가능하다면 누설률과 관련한 재료 물성치에 대한 논의는 더 이상 필요가 없게 된다. 본 논문에서는 감지가능누설균열의 최대값을 임계감지가능누설균열로 정의한다.

PICEP 코드 해석에 미치는 R-O식 계수 α와 n의 영향을 살펴보았다. R-O식 계수 α는 증가할 수록 감지가능누설균열의 크기가 작아지는 반면 n은 값이 증가할수록 감지가능누설균열의 크기가 증가하였다. 그러나 α가 증가하여도 n의 값이 일정한 크기에 도달하면 감지가능누설균열의 크기는 더 이상 증가하지 않았다. 예를 들면, 0.2% 항복강도, 164 Mpa의 경우인 그림 3 및 4에서 n이

약 7에 도달하면 감지가능누설균열의 크기가 약 15.9 mm로 포화하는 것을 알 수 있다. 즉, 0.2% 항복강도, 164 Mpa에서의 임계감지가능누설균열은 15.9 mm이다. 이러한 임계감지가능누설균열은 다른 0.2% 항복강도에서도 결정할 수가 있고 R-O식 계수에 관계없이 결정된다.

5.2 임계감지가능누설균열과 0.2% 항복강도와의 관계

그림 5는 0.2% 항복강도 대비 임계감지가능누설균열의 관계를 보여준다. 그림 5로부터 항복강도가 증가하면 임계감지가능누설균열의 크기는 커지나 그 증가 폭은 계속 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 600°F의 고온에서 347 스테인레스강의 0.2% 항복강도가 345 Mpa까지 증가하는 것은 현실적으로 쉽지 않으므로 그림 5에 나타낸 최대 임계감지가능누설균열, 16.03 cm는 밀림관 노즐부 이외의 부위에 생성될 수 있는 최대 크기의 균열이라고 생각할 수 있다. 따라서 최대 임계감지가능누설균열인 16.03 cm 균열을 파단전누설 평가에 적용할 수 있게 되면 누설률과 관련한 재료물성치에 대한 논의는 더 이상 필요가 없게 된다. 즉, Applied J/T 및 Material J/T (Material J-integral/ Tearing Modulus)에 대한 재료물성치만을 고려하면 된다.

6. Applied J/T에 대한 재료물성치의 영향

6.1 항복강도

그림 6은 변형률 1.1%에서의 유동응력이 311 Mpa이고 인장강도가 483 Mpa로 동일한 응력-변형률 선도에서 1.1%이내의 응력-변형률 값만을 변화시켰을 경우, 즉 선형탄성구간이 끝나는 지점을 항복강도로 규정하고 이 값을 103, 180, 243, 280 Mpa로 변화시켰을 경우 (그림 2-a 참조) Applied J가 받는 영향을 보여준다. 그림에서 항복강도가 증가함에 따라 542,300 m-N에서의 Applied J는 감소함을 알 수 있다. 감소폭은 103 Mpa 항복강도의 경우를 기준으로 할 때 항복강도가 증가할 수록 커져서 항복강도가 180 Mpa (항복강도는 73% 증가)이면 3%, 243 Mpa (항복강도는 134% 증가)이면 12%, 280 Mpa (항복강도는 170% 증가)가 되면 35%가 된다. 그림 7은 각 조건에 대해 계산한 J/T선도를 표시한 것이다. 항복강도가 103 Mpa에서 280 Mpa로 변화하여도 J/T선도의 기울기에는 큰 차이가 없다. 또한 굽힘모멘트 증가에 따른 J-적분값 및 Tearing Modulus 값의 증분은 항복강도 243 Mpa까지는 차이가 크지 않은 반면, 그 이상의 항복강도에서는 증분의 차이가 급격히 증가한다. 따라서 Material J/T가 일정한 경우라면 선형탄성구간이 긴 재료가 파단전누설 평가에 유리하며 이러한 효과는 높은 항복강도에서 크다. 그러나 항복강도의 증가폭 특히, 347 스테인레스강의 항복강도 구간인 180 Mpa 정도의 낮은 항복강도 범위내에서의 증가폭에 비해 Applied J/T의 감소효과가 그다지 크지는 않다. 그러므로 선형탄성구간의 증가로 인한 재료개선의 측면은 크지 않을 것으로 판단된다.

6.2 변형률 2~3%의 초기 인장물성치 (이후 초기 인장물성치라 함.)와 인장강도

6.2.1 일반사항

초기 인장물성치와 인장강도가 다른 다양한 종류의 응력-변형률 곡선 (그림 2-b참조)에 대해 Applied J를 구하고 이중 응력-변형률 곡선 Material 1부터 Material 5 까지에 대해 굽힘모멘트

542,300 m-N에서의 Applied J를 그림 8에 표시하였다. 초기 인장물성치가 Material 4, 3, 2의 순서로 증가하거나 인장강도가 Material 5, 3, 1의 순서로 증가하면 Applied J의 값이 감소하나 물성치 증가에 따른 감소속도는 항복강도의 경우와 달리 낮은 인장특성을 갖는 Material 4 및 5에서는 크고 높은 인장특성을 갖는 Material 1, 2 및 3의 경우는 작았다.

6.2.2 응력-변형률 선도 형상과 Applied J 관계

동일한 항복강도와 인장강도의 조건에서 초기 인장물성치만을 변경한 Material 2, 3, 4의 경우를 그림 8에서 살펴보면 2~3% 변형률 이내의 응력-변형률 선도 범위가 Applied J의 값에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 또한, Material 1 및 Material 2의 경우에서 초기 인장물성치가 거의 동일하면 인장강도의 크기와 무관하게 Applied J가 거의 동일함을 알 수 있다. 이러한 경향은 모든 응력-변형률 선도에 대해 1.18% 변형률에서 구한 유동응력에 대해 Applied J를 표시한 그림 9에서도 알 수 있다. 그림 9는 응력-변형률 선도의 조건이 다른데도 초기 유동응력만의 함수로서 Applied J가 표시될 수 있음을 말해준다. 따라서 응력-변형률 선도에서 인장응력의 차이보다는 초기 유동응력이 Applied J의 계산에 더 중요함을 알 수 있다.

6.2.3 응력-변형률 선도 형상과 J/T 곡선의 기울기

그림 10은 그림 2-b에 표시한 응력-변형률 선도 Material 1부터 Material 7까지에 대해 계산한 J/T 선도를 보여준다. 초기 인장물성치와 인장강도가 크게 달라지는 경우에도 J/T 선도의 기울기는 작은 범위 내에서 변화할 것임을 알 수 있다. 따라서 파단전누설 평가에서의 여유도를 증대시키기 위해서는 J/T 선도의 기울기는 큰 차이를 보이지 않으므로 굽힘 모멘트에 대해 Applied J가 낮게 계산되는 방향으로 응력-변형률 선도가 개선되어야 한다.

7. 임계감지가능누설균열을 활용한 파단전누설 평가

임계감지가능누설균열의 크기는 0.2% 항복강도를 활용하여 해당 응력-변형률 선도에 대해 균열크기를 곧바로 알아내어 Applied J의 계산에 사용이 가능할 수도 있지만 파단전누설 평가에서 충분한 여유도가 예상되는 재료물성치가 확보되는 경우에는 파단전누설 평가에 최대 임계감지가능누설균열을 이용하여 감지가능누설균열 계산단계를 생략할 수 있다. 여기에서는 Material 4의 응력-변형률 선도를 이용하여 최대 임계감지가능누설균열 16.03 cm보다 작은 15.72 cm 및 큰 16.23 cm 및 16.73 cm에 대해 파단전누설 평가를 하였다. 그림 11은 평가결과이다. 동일한 굽힘모멘트에서 생성된 Applied J를 비교하기 위해 그림에 각 균열길이별로 굽힘모멘트 542,300 m-N에 해당하는 J/T 값에 화살표 표식을 하였다. 일부 KSNP 발전소 밀림관 평가시 사용되었던 균열크기인 15.72 cm 균열대비 Applied J의 증가분은 16.23 cm의 경우 약 8%, 16.73 cm의 경우 약 17% 정도로 계산되어 인장물성치 개선을 통한 Applied J의 감소 기대분에 비해 그다지 크지 않을 것으로 판단되었다. 따라서 앞서 언급한 방향으로 초기 인장물성치 개선이 이루어 지면 최대임계감지가능누설균열을 이용한 평가가 가능하므로 PICEP 코드를 사용하지 않고 보수적인 파단전누설 평가를 수행할 수 있으며 이와 함께 Applied J 계산을 위한 모델을 고정할 수 있으므로 평가시간의 단축이 가능해

질 것으로 판단된다.

8. 추가 필요연구

본 논문에서 수행한 가압기 밀림관 파단전누설 평가에 미치는 재료의 인장물성치의 영향에 대한 분석은 다음의 3가지의 가정을 바탕으로 이루어 졌다. 그러나 이들 가정에 대한 정확한 평가를 위한 연구가 추후 있을 예정이다.

1) 감지가능누설균열 크기 1배에 대한 평가결과의 경향은 크기 2배에 대한 평가에서도 유사하다.

본 논문 2항에서 언급한 바와 같이 파단전누설 평가는 감지가능누설균열 크기 1배 뿐만 아니라 2배의 경우에 대해서도 수행되어져야 한다. 그러나 기존 KSNP 배관에서 수행한 파단전누설 평가의 결과를 검토한 결과 균열 1배에 대한 평가로부터 2배에 대한 경향을 알 수 있는 것으로 판단하였으며 따라서 본 논문에서는 감지가능누설균열 크기 1배에 대해서만 파단전누설 평가가 수행되었다.

2) 배관/노즐경계부는 제외함.

기존 KSNP 가압기 밀림관 배관/노즐경계부에 대한 파단전누설 평가결과 배관/노즐경계부는 가장 취약한 부위가 아니었다. 이러한 근거로 본 논문에서는 베관/노즐경계부는 연구에서 제외되었다.

3) Material J/T에 대한 고려는 하지 않음.

KSNP 배관평가에 사용하는 Material J/T는 원칙적으로 용접부의 값을 사용한다. 그러나 모재부의 Material J/T가 가장 낮은 값을 나타날 수가 있으므로 이에 대한 논의가 필요할 수 있다. 다만, Material J/T에 영향을 주는 가압기 밀림관 재료의 인자는 재료의 인장물성치 보다는 재료의 화학조성중의 하나인 탄소량에 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있다.[9] 따라서 본 논문에서 Material J/T에 대한 고려를 하지 않았다.

9. 결론

본 논문에서는 KSNP 밀림관의 파단전누설 평가를 수행할 때 응력-변형률 선도가 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 인장물성치(R-O식 계수, α와 n)와 누설률과의 관계를 고찰하였으며, 0.2% 오프셋 항복강도 대비 임계감지가능누설균열과 최대임계감지가능누설균열을 정의하였다.

2. Applied J는 항복강도가 증가할수록 감소하였으며 감소량 변화는 항복강도가 증가할수록 줄어들었다.

3. Applied J는 2~3% 변형률 이내의 응력-변형률 선도의 형상에 크게 영향이 있었다. 즉, 이 범위내의 응력-변형률 선도가 높은 유동응력을 보이는 경우 낮은 Applied J가 계산되었다.

4. J/T 선도의 기울기는 응력-변형률 선도에 크게 영향을 받지는 않았다.

5. 최대임계감지가능누설균열을 사용하는 경우 PICEP 코드를 사용하지 않고 보수적인 파단전누설 평가를 수행할 수 있으며 Applied J 계산을 위한 모델을 고정할 수 있으므로 파단전누설 평가시간의 단축이 가능함을 제시하였다.

6. 밀림관 재료는 재료의 초기 인장물성치를 제고하는 방향으로 개선이 이루어져야 함을 확인하였다.

참고문헌

[1] 10 CFR 50, Appendix A, “General Design Criterion 4,” July, 1985.

[2] NUREG-1061, Vol.3 “Evaluation of Potential for Pipe Break,” 1984

[3] USNRC, *Leak Before Break Evaluation Procedure*, Draft Standard Review Plan 3.6.3, 1987

[4] 한전, Final Safety Analysis Report, Ulchin 3 and 4

[5] Fabi, R.J. and Peck, D.A., “Leak Before Break Piping Evaluation Diagram,” ASME Conference, PVP-vol. 283, pp. 111 ~ 115, 1994

[6] Swamy, S.A., Mandava, P.R., Bhowmick, D.C. and Prager, D.E., “LBB Considerations for A New Plant Design,” NEA/CSNI/R(95)18, Vol. 1, pp. 199~205, 1996

[7] Norris, D.M. and Chexel, B., “PICEP : Pipe Crack Evaluation Program,” EPRI NP 3596-SR, 1987

[8] ABB-CE, CEMARC Ver.1, CEMARC Computer Program, User's Manual, 1988

[9] B.S. Lee, et al, “J-R Fracture Properties of SA508-1a ferritic steels and SA312-TP347 Austenitic Steels for Pressurized Water Reactor’s (PWR) Primary Coolant Piping, Nuclear Engineering and Design, 199 (2000) pp 113-123

표 1. PICEP 코드의 대표적인 입력내용

종류구분	입력내용
기하학적 형상	배관의 외경, 두께
균열단면 형상	본 논문에서는 타원형 가정
재질 특성	탄성계수, 항복강도, Ramberg-Osgood 변수 (α, n)
열수력 특성	운전압력, 운전온도
균열형상변수	균열면 조도, 유동우회횟수, 입구손실계수

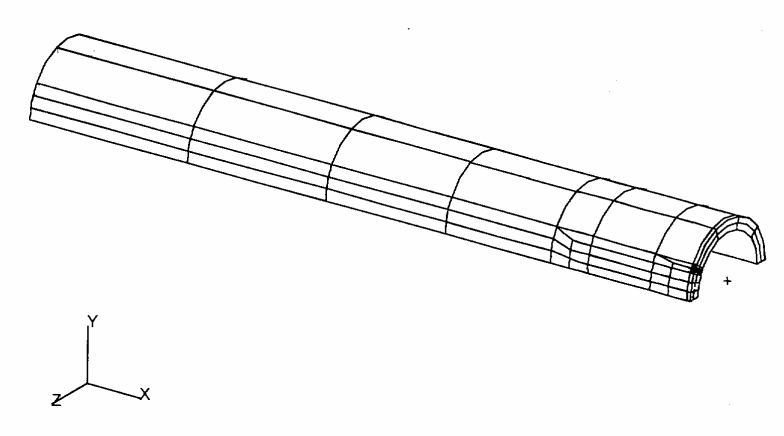

그림 1. 밀림관 파단전누설 평가용 3차원 요소망

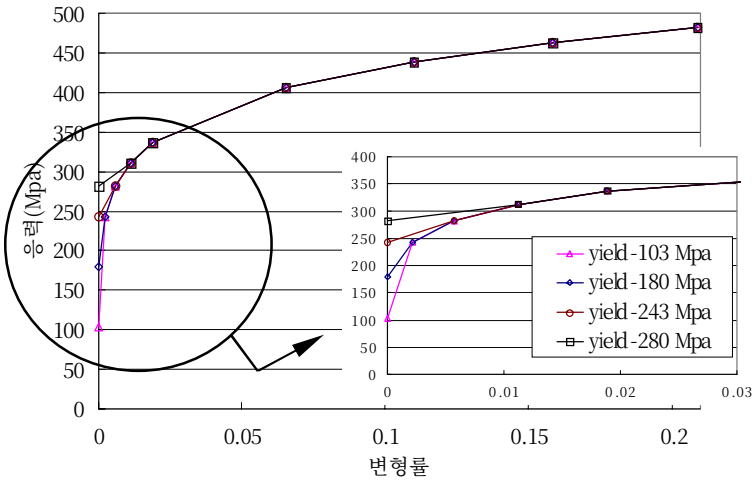

그림 2-a. 균열안정성평가에 사용한 응력-변형률 곡선 (항복강도변화)

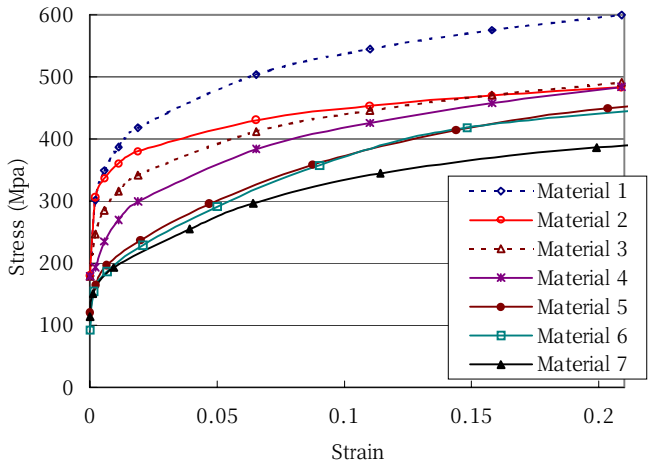

그림 2-b. 균열안정성평가에 사용한 응력-변형률 곡선 (초기 재료물성치 및 인장강도 변화)

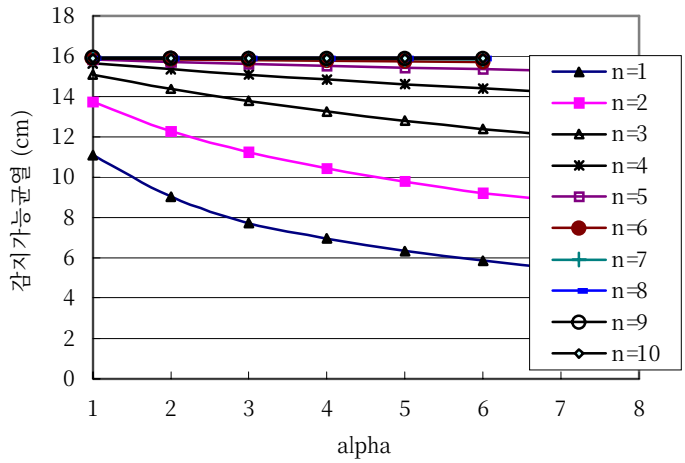

그림 3. 감지가능누설균열의 크기에 대한 R-O식 계수, alpha의 영향

(항복강도 : 164 Mpa, 영률 : 175,133 Mpa)

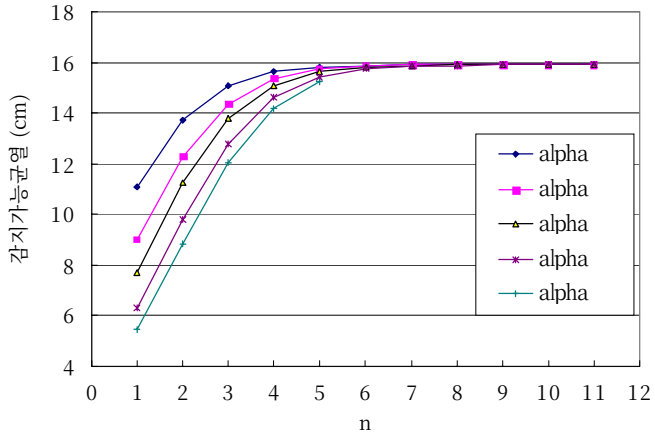

그림 4. 감지가능누설균열의 크기에 대한 R-O식 계수, n의 영향

(항복강도 : 164 Mpa, 영률 : 175,133 Mpa)

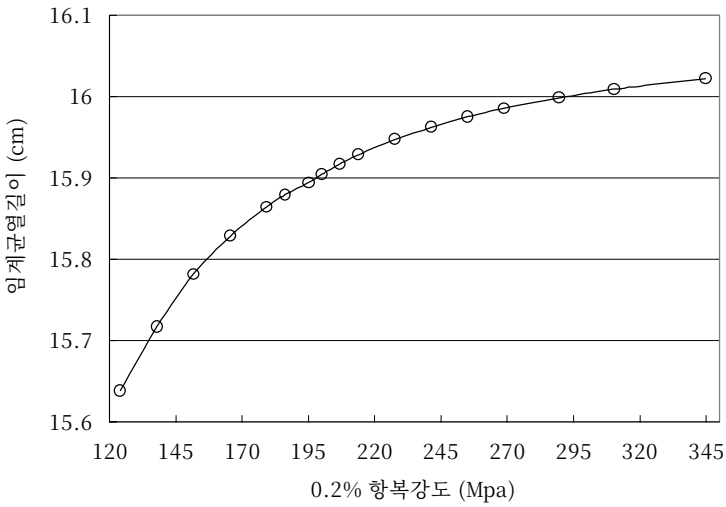

그림 5. 0.2% 항복강도 대비 임계감지가능누설균열의 크기 변화 (영률 : 175,133 Mpa)

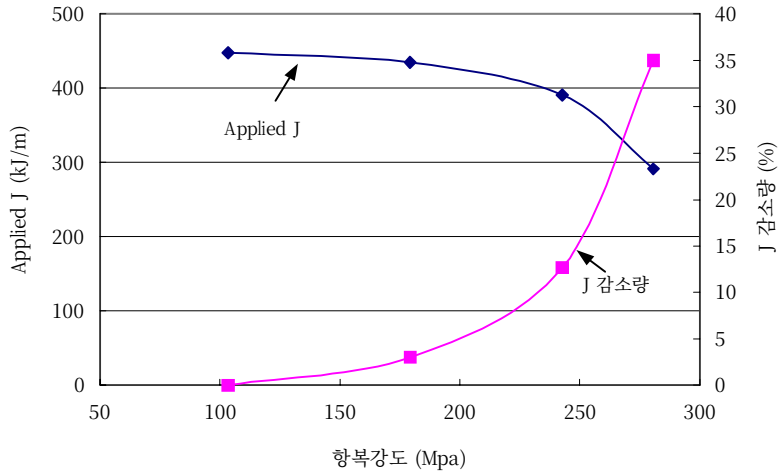

그림 6. 항복강도 변화에 따른 J-integral 값의 영향 (배관 굽힘모멘트 : 542,300 m-N)

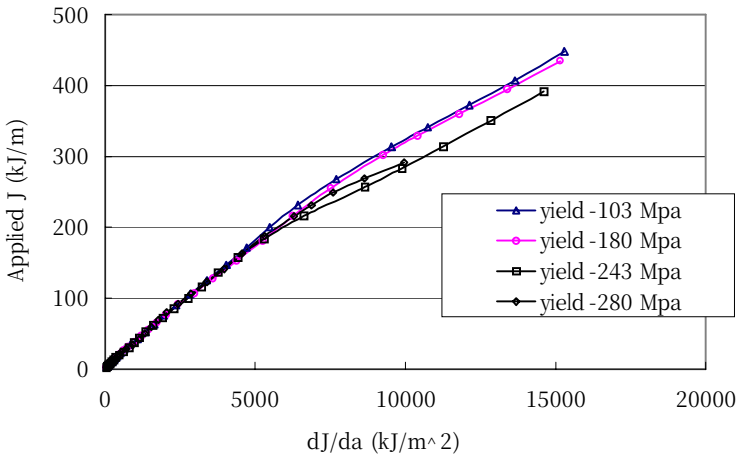

그림 7. 항복강도가 J/T 곡선에 미치는 영향 (영률 : 175,133 Mpa)

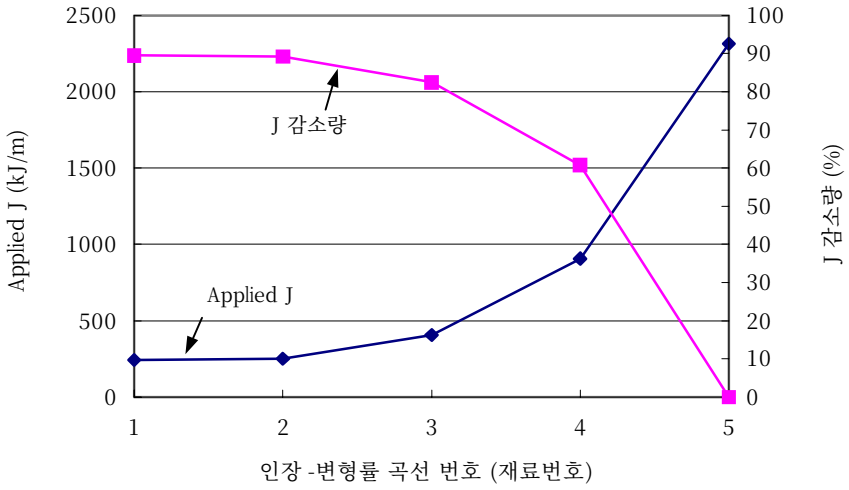

그림 8. 초기 인장물성치와 인장강도가 배관 굽힘모멘트 542,300 m-N에서의 J-integral 값에 미치는 영향 (단, 각 데이터를 잇는 선은 의미 없으나 그래프의 이해를 위해 표시함.)

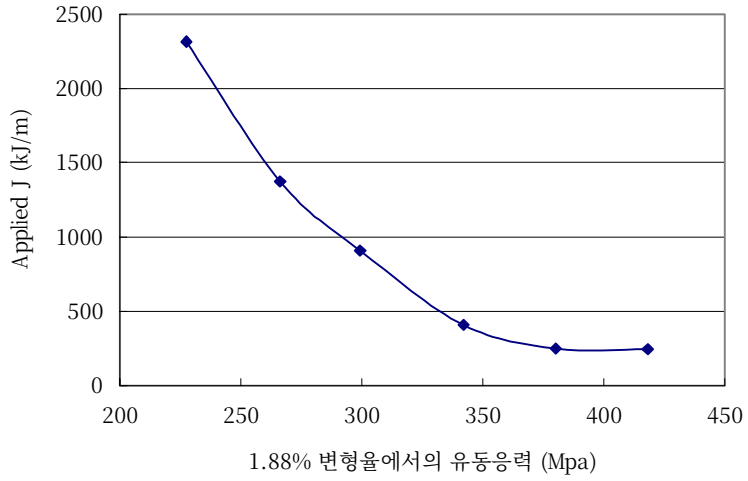

그림 9. 1.88% 변형률에서의 유동응력변화에 따른 Applied J 영향 (배관 굽힘모멘트 : 542,300 m-N)

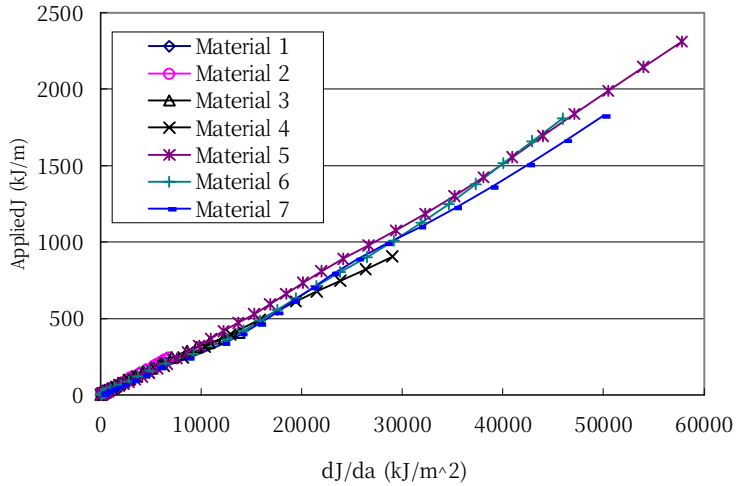

그림 10. 초기 인장물성치와 인장강도가 J/T 선도에 미치는 영향

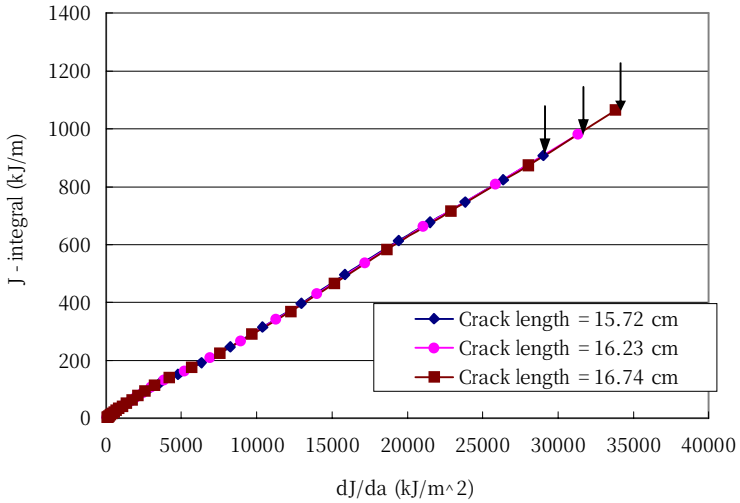

그림 11. 최대 임계감지누설균열크기 부근의 균열에 대한 J/T 선도에 미치는 영향
(화살표의 위치 : 각 균열길이에 대해 배관 굽힘모멘트 542,300 m-N에 해당하는 J/T 값)