

이종금속 오버레이 용접 배관의 파단전누설균열 해석을 위한 단순 유한요소 모델링 방법

김만원[†] · 박영섭^{*}

A Simple Finite Element Modeling Method for Leak-Before-Break Crack Analysis of Pipe with Overlay Dissimilar Metal Weldments

Maan Won Kim[†] and Young Sup Park^{*}

(Received 9 August 2013, Revised 14 August 2013, Accepted 21 August 2013)

ABSTRACT

Several finite element models for the leak-before-break (LBB) assessment of overlay dissimilar metal weldment were constructed and analyzed to develop a simple finite element modeling method. The J-integral, crack opening displacement (COD) and J-integral distribution along the crack front in thickness direction due to the applied moment were obtained from the analysis results of the constructed finite element models, and studied compared to the previous literatures. It is concluded that the modeling with base material only is simple and produces a slightly conservative results compared to the complex modeling composed with weld metal and base metal in the calculation of J-integrals and COD values which are used for the calculation of fracture toughness and postulated leakage crack length respectively.

Key Words : Leak-Before-Break(파단전누설), Crack(균열), J-integral(J-적분), Overlay Welding(오버레이용접), Dissimilar Metal Welds(이종금속용접부), Crack Opening Displacement(균열개구변위)

기호설명

M_{yy} = y-directional component of applied moment

1. 서론

원전 배관에서 탄소강과 스테인리스강 배관 사이의 용접은 주로 Alloy 600 계열의 용접재(Alloy 82/182)를 사용하여 용접성을 높였다. 이러한 이종금속 용접부에서는 일차측 냉각재 환경하에서 발생하는 응력부식균열(primary water stress corrosion crack; PWSCC)이 발생한 사례가 있다¹⁻³⁾. 이 경우 효과적인 균열성장

억제 및 방지를 위해 배관 용접부의 단면에 압축잔류응력을 생성시키는 오버레이 용접(overlay welding)의 유효성이 입증되어 원전 배관 노즐 등에서 오버레이 용접을 수행하고 있다⁴⁻⁵⁾.

배관에 발생하는 균열에 대하여 일정 누설을 허용하는 파단전누설(leak-before-break; LBB) 개념이 적용된 이종금속 용접부에 오버레이 용접을 시행할 경우 배관 단면에 압축응력을 발생시키므로 실제로 균열이 성장하지 않게 된다. 그러나 안전성에 대하여 다중으로 검토하는 원전의 특성상 오버레이 용접부에 대한 LBB 평가가 요구될 수 있다.

용접재와 모재에 대한 실험적 해석적 연구를 통하여 탄소성 파괴역학 파라미터인 J-적분(J-integral)을 이용한 LBB 균열의 유한요소해석 시 모재의 물성치를 사용하면 적절한 보수성을 확보하면서 해석에 필요한 물성치 준비 및 해석에 소요되는 시간을 효과적으로 단

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : mwkim@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5784 FAX : (042)870-5993

^{*} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

축할 수 있음이 알려져 있다^{6,7)}. 오버레이 이종금속 용접부의 경우, 용접재 두 종류와 모재로 복잡하게 구성되어 있으며 배관의 두께도 증가하므로 유한요소해석을 위한 모델 구성이 복잡하다.

따라서 본 논문에서는 모재와 용접재의 구성 조합을 변화시켜가며 유한요소해석 모델을 구성하고 J-적분과 균열개구변위(crack opening displacement; COD)를 계산하여 오버레이 이종금속 용접부에 대한 LBB 평가 시 보수성이 포함되면서도 간단한 유한요소 모델 구성 방안을 제시하였다.

2. 유한요소해석 모델

2.1 유한요소 모델의 분류

먼저 오버레이 용접이 없는 경우, 용접재는 Alloy 82/182를, 모재는 TP316 스테인리스강을 사용하여 이종금속 용접부 유한요소 모델을 구성하였다. 유한요소 모델은 Fig. 1의 개념도와 같이 3 종류의 모델로 구성하였다.

- i) 모두 모재의 물성치를 사용(AB)
- ii) 모두 용접재의 물성치를 사용(AW)
- iii) 용접재와 모재의 물성치를 사용(WB)

이는 Ganta 등⁶⁾의 접근 방법과 동일한 것이다. Fig. 1에서 대칭면(symmetric plane)은 배관의 축방향 대칭면을 의미하며 원주방향 균열이 존재하는 면이다.

다음으로 오버레이 용접인 경우, 용접재는 Alloy 82/182와 Alloy 52/152를, 모재는 TP316 스테인리스강을 사용하여 오버레이 이종금속 용접부 유한요소 모델을

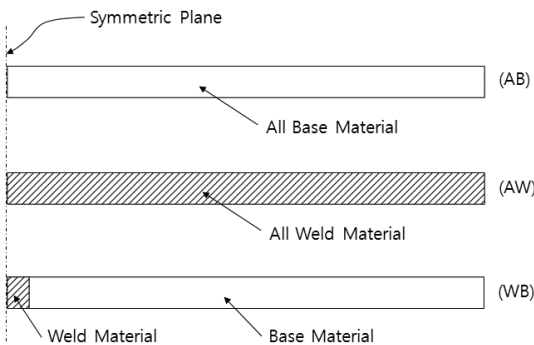


Fig. 1 Schematics of materials for finite element model without overlay weldment

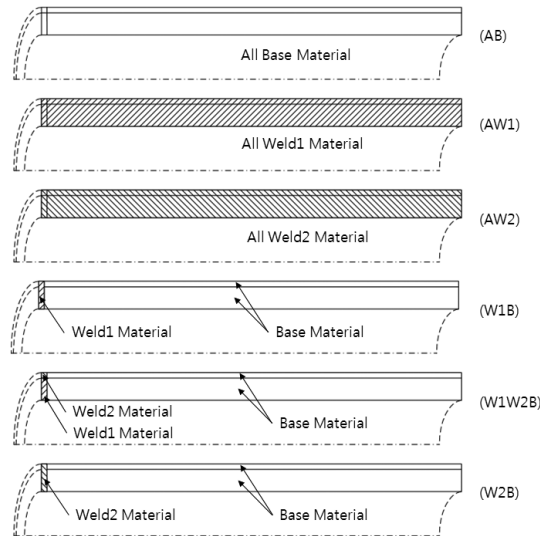


Fig. 2 Schematics of materials for finite element model with overlay weldment

구성하였다. 여기서 Alloy 82/182는 초기 이종금속 용접부 재료이며 Alloy 52/152는 오버레이 용접부 재료이다. 재료가 3 종류이므로 유한요소 모델은 Fig. 2의 개념도와 같이 6 종류의 모델을 구성하였다.

- i) 모두 모재의 물성치를 사용(AB)
- ii) 모두 용접재1의 물성치를 사용(AW1)
- iii) 모두 용접재2의 물성치를 사용(AW2)
- iv) 용접재1과 모재의 물성치를 사용(W1B)
- v) 용접재1,2와 모재의 물성치를 사용(W1W2B)
- vi) 용접재2와 모재의 물성치를 사용(W2B)

여기서 용접재1은 Alloy 82/182를, 용접재2는 오버레이 용접재인 Alloy 52/152 이다.

Fig. 2에서 좌측 단면은 축방향 대칭면이며 균열이 존재하는 면이다. Fig.2에서는 3종의 재료를 표현하기 위해 배관의 일부 단면으로 나타내었다.

2.2 유한요소 모델링

유한요소 모델은 배관의 내반경이 190.5mm, 두께가 12.7mm인 직관을 축방향과 원주방향의 대칭성을 고려하여 1/4 모델로 작성하였으며 균열면을 제외한 대칭면에 대칭 구속조건을 부가하였다. 오버레이 용접인 경우 외경에 두께 4.24mm의 용접재가 추가되었다. 배관 내반경과 두께의 비는 오버레이 용접부가 없는 경

우 15.0이며, 오버레이 용접부가 있는 경우 11.2이다. 유한요소 모델의 축방향 길이는 총 10668mm이며 용접부는 균열면으로부터 7.62mm까지이다. Fig. 3은 오버레이 용접부가 있는 경우의 유한요소 모델의 전체 격



Fig. 3 Shape of finite element mesh for the pipe with overlay weldment

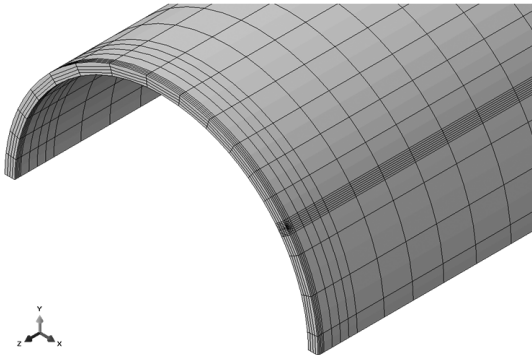


Fig. 4 Detail mesh of cracked part of the model without overlay weldment

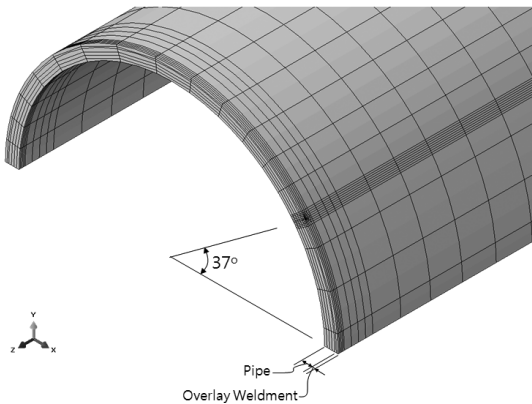


Fig. 5 Detail mesh of cracked part of the model with overlay weldment

자형상을 나타낸 것이다. 오버레이 용접부가 없는 경우에도 전체 요소격자 배치는 Fig. 3과 동일하게 작성되었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 오버레이 용접부가 없는 모델과 오버레이 용접부가 있는 모델의 균열부 상세 요소격자 형상을 나타낸 것이다. 균열각은 원주방향으로 74도이며, 그림에서는 전체 균열각의 절반인 37도가 보인다. 요소의 종류는 20절점 3차원 육면체요소를 사용하였으며, 균열부위에는 J-적분 계산을 위해 적절한 형태로 조밀한 요소를 배치하였다. 유한요소 모델의 총 요소 수는 오버레이 용접이 없는 경우 6048개, 오버레이 용접이 있는 경우 9072개이다. 배관의 두께 방향으로는 4개의 요소를 배치하였고 오버레이 용접부의 두께 방향으로는 2개의 요소를 배치하였다. 용접부는 균열면으로부터 축방향으로 4개의 요소를 배치하였다.

유한요소 해석을 위해 입력한 각 재료의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 6은 유한요소 해석에 사용된 각 재료의 소성 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 각 물성치는 310~320°C에서 측정된 값이다⁸⁻⁹⁾.

유한요소해석을 위해 유한요소 모델의 우측 끝 단면에 균열이 열리는 방향으로 모멘트 M_{yy} 를 가하고, M_{yy} 의 크기에 따른 J-적분 및 균열개구변위를 계산하였다.

Table 1 Material Properties of base and weld metals (unit : MPa)

Material	Elastic Modulus	Yield Strength	Ultimate Strength
TP316	174000	126.7	655.1
Alloy 82/182	198000	350.0	517.9
Alloy 52/152	193743	373.0	524.0

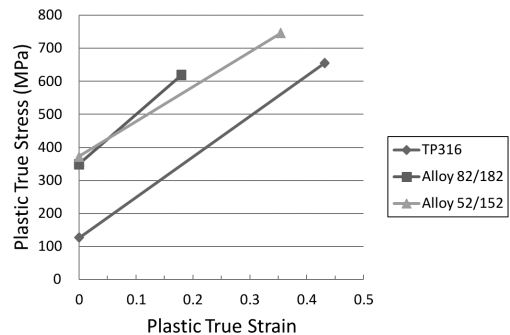


Fig. 6 Plastic true stress-true strain curve of each material

3. 유한요소해석 결과

3.1 오버레이 용접이 아닌 경우

오버레이 용접부가 없는 경우에 대한 유한요소 해석 결과 작용 모멘트의 증가에 따른 J-적분 값을 Fig. 7에 나타내었다. 모재의 물성치를 사용하는 경우(AB)와 용접부 및 모재의 물성치를 사용하는 경우(WB)가 유사하게 나타났으며, 용접재의 물성치를 사용하는 경우(AW)는 상대적으로 훨씬 작은 값을 나타내었다. 따라서 모재의 값을 사용하는 경우가 모재와 용접부를 함께 모델링하는 경우에 비하여 비교적 단순하게 모델링 할 수 있으면서 약간 보수적인 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

이러한 결과는 선행연구⁶⁻⁷⁾에서 이미 알려진 것으로, Ganta 등⁶⁾은 계산기 성능 등을 고려하여 쉘(shell) 요소 130개와 보(beam) 요소 18개를 혼합하여 유한요소 해석을 수행하였으며, Kim 등⁷⁾은 상기 결과에 대한 실험적 해석적 고찰을 수행하고 수정 배관평가선도(piping evaluation diagram; PED) 개발에 활용하였다. Kim 등⁷⁾은 모재와 용접재 시편의 J-R 시험결과와 유한요소 해석으로 구한 균열 성장 개시 하중 및 균열 불안정 성장 개시하중을 비교분석하여 모두 모재로 모델링한 경우(AB)가 시험값에 비하여 약간의 보수성을 가지므로 LBB 평가시 모재의 물성치로 모델링할 수 있음을 증명하였다. 본 논문에서는 3D 요소로 전체 모델링한 경우에 동일한 결과가 얻어짐을 확인하고, 오버레이 용접부의 LBB 평가를 위한 유한요소 모델링에 기초 자료로 활용하고자 하는데 의의를 두었다.

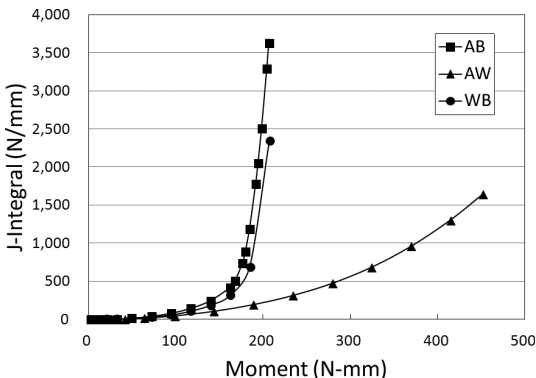


Fig. 7 J-integral vs. applied moment for the pipe without overlay weldment

3.2 오버레이 용접부가 있는 경우

오버레이 용접부가 존재하는 경우에는 실제 용접부를 구성하는 재료가 3종류이므로 오버레이 용접부가 없는 경우에 비하여 복잡한 모델 구성 조합이 생긴다. 2.1절에서 고려한 6가지 모델 구성안에 대하여 유한요소 해석을 수행하고 모멘트 증가에 따른 J-적분과 COD를 계산하였다.

Fig. 8은 작용 모멘트와 J-적분값의 관계를 나타낸 것이다. 모두 모재로 모델링한 경우(AB)가 가장 높은 J-적분값이 얻어졌고, 모두 용접재로 모델링한 경우(AW1, AW2)는 상대적으로 훨씬 낮은 J-적분값이 얻어졌다. 따라서 오버레이 용접부인 경우에도 모두 용접재로 모델링하는 것은 비보수적인 LBB 평가 결과를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 모재와 용접재를 사용하여 모델링하는 경우(W1B, W2B, W1W2B)는 모재보다 약간 낮은 값을 나타내었다. 따라서 오버레이 용접부에 대한 LBB 평가 시 단순히 오버레이 용접부 두께만 고려하고 모재의 물성치를 전체 모델에 적용하면 단순하게 모델링하면서도 약간 보수적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

균열개구변위(COD)는 LBB 평가 시 누설균열의 크기를 결정하는데 사용된다. Fig. 9는 작용 모멘트에 따른 균열개구변위의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9의 균열개구변위는 균열면의 중심인 원주방향 대칭면에서 배관 두께의 가운데 지점에서 계산된 값이다. 균열개구변위는 배관의 두께 방향으로 내경에서 외경으로 갈수록 큰 값을 나타내므로 이 값은 중앙값에 해당한다. LBB 평가에서 동일한 모멘트에 대하여 COD 값이 클

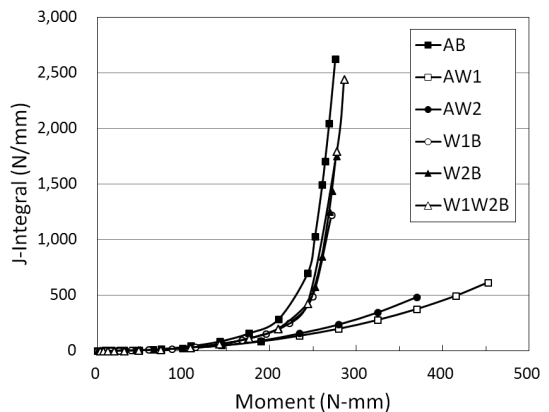


Fig. 8 J-integral vs. applied moment for the pipe with overlay weldment

수록 가상누설균열의 크기를 작게 예측한다. 따라서 모두 용접재로 모델링한 경우(AW)가 가장 큰 누설균열길이를 예측하게 되며, 용접재와 모재를 모두 사용한 경우에 비하여 큰 보수성을 가진다.

각 모델의 균열 선단을 따라 두께 방향으로 J-적분 분포를 알아보기 위하여 작용 모멘트가 250 N·mm인 경우에 대하여 J 적분값을 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 세로축과 평행한 직선 격자는 유한요소격자를 나타낸 것이다. 세로 격자선 간격은 두께를 따른 요소 간격이며, 격자선 사이의 심볼은 중간절점에서의 값을 나타낸다. W1W2B 모델의 경우, 1~4 번째 격자까지는 Alloy 82/182이며, 5~6 번째 격자는 Alloy 52/152이다.

두께를 따라 내부에서 W1W2B 모델의 J-적분값은 AB 모델의 J-적분값에 비하여 약 78% 정도이다. LBB

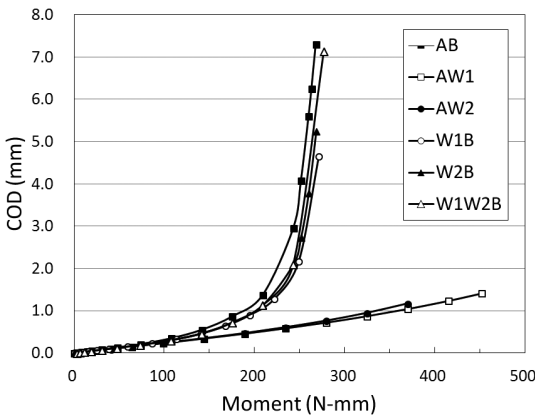


Fig. 9 Crack opening displacement vs. applied moment for the pipe with overlay weldment

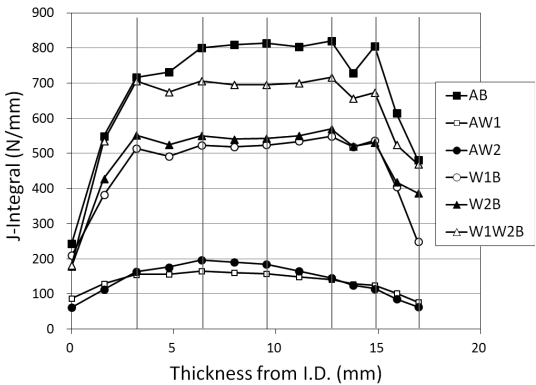


Fig. 10 J-integral distribution along the crack tip for the pipe with overlay weldment

평가시 J 적분값은 두께에 대하여 하나의 대표값을 사용한다. 이때 대표값은 여러 가지 방법으로 계산할 수 있다. Fig. 10에서 W1W2B 모델과 AB 모델의 경우를 비교해 보면, 두께를 따라 면적 또는 두께에 대한 평균값, 단순 산술 평균값, 중앙 단면에서의 평균값, 또는 최대값을 사용하면 무난함을 알 수 있다.

지금까지 살펴본 유한요소 모델의 배관 내반경과 두께의 비는 오버레이 용접부가 없는 경우 15.0이며, 오버레이 용접부가 있는 경우 11.2이다. 이것은 본 연구에서 Ganta 등⁶⁾의 연구를 참고하여 유한요소 모델을 작성하였기 때문이다. Ganta 등⁶⁾은 셸과 보 요소를 사용하였기 때문에 배관 반경과 두께의 비를 10 이상으로 하여야 했다. 국내의 경우 LBB를 적용하는 배관 중에는 실제 배관의 내반경과 두께의 비가 약 4 정도 되는 배관도 있다. 따라서 실제 원전 배관수치를 이용하여 셸이론이 적용될 수 없는 두꺼운 배관에 대한 유한요소 모델을 작성하고 앞에서 얻어진 결과와 동일한 결과가 얻어지는지 살펴보았다.

두꺼운 배관의 LBB 유한요소 모델은 내반경이 128.6 mm, 두께가 33.3mm인 배관의 이중금속 용접부 위에 두께 9.7mm의 오버레이 용접이 수행된 경우에 대하여 작성하였다. 배관의 이중금속 용접부 재료는 Alloy 82/182, 모재의 재료는 TP316 스테인리스강, 오버레이 용접부의 재료는 Alloy 52/152로 앞에서 구성한 모델과 동일하게 하였고, Table 1 및 Fig. 6의 재료물성치를 사용하였다. 유한요소 모델은 Fig. 8 및 Fig. 9에서 볼 때 해석 결과가 AW1, AW2가 유사하며, W1B, W2B, W1W2B가 유사하므로 AB, AW1, W1W2B만 작성하였다.

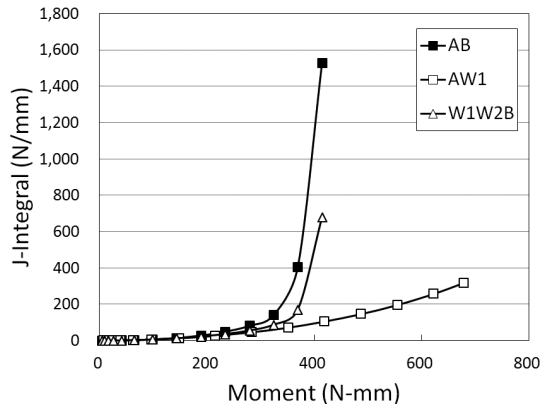


Fig. 11 J-integral vs. applied moment for the thick pipe with overlay weldment

Fig. 11은 두꺼운 배관의 해석 결과 얻어진 J-적분과 작용 모멘트와의 관계를 나타낸 것이다. 두꺼운 배관에서도 모재의 물성치로만 모델링하는 경우가 용접재와 모재를 동시에 모델링하는 경우보다 약간 보수적인 결과를 나타내었다.

Fig. 12는 두꺼운 배관에 대한 균열 중앙에서의 COD와 작용 모멘트간의 관계를 나타낸 것이다. 동일한 모멘트가 작용하는 조건에서 모두 용접재로 모델링한 AW 모델이 용접재와 모재를 함께 모델링한 W1W2B의 경우에 비하여 더 큰 누설균열길이를 예측하게 되어 훨씬 더 보수적인 값을 가진다.

Fig. 8과 Fig. 11에서 AB와 W1W2B의 결과를 비교해 보면 재료 물성치 사용에 따른 모델 간 경향은 일치하나 두꺼운 배관의 경우 AB와 W1W2B 모델간 균열 단면에서 대표값은 얇은 배관에 비하여 약간 더 큰 차

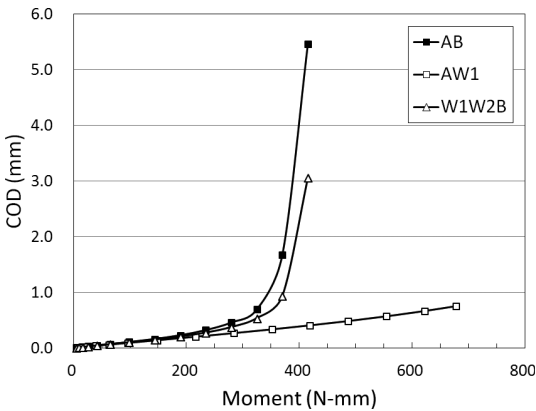


Fig. 12 Crack opening displacement vs. applied moment for the thick pipe with overlay weldment

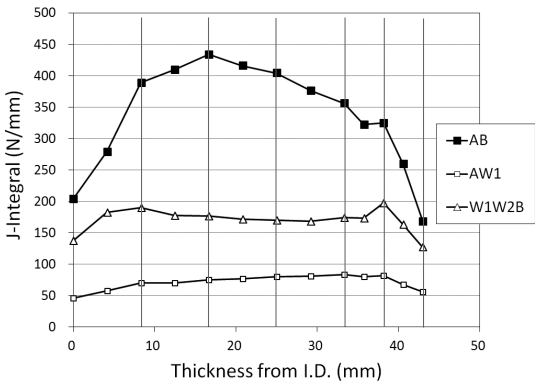


Fig. 13 J-integral distribution along the crack tip for the thick pipe with overlay weldment

이가 있음을 알 수 있다. 즉 두꺼운 배관에서 모재의 물성치만으로 단순 모델링할 경우 얇은 배관에 비하여 보수성이 약간 더 추가된다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위하여 작용 모멘트가 250 N-mm인 경우에 대하여 두께 단면을 따라 J-적분값의 분포를 계산하여 Fig. 13에 나타내었다. 두께를 따른 W1W2B의 J-적분값은 AB의 J-적분값과 비교할 때 약 45% 수준이다.

4. 결론

본 연구에서는 이종금속 용접부에 오버레이 용접을 한 경우에 대하여 LBB 평가 시 단순하게 유한요소 모델링을 하면서도 약간 보수적인 결과를 얻을 수 있는 유한요소모델링 방법을 제시하였다. 먼저 오버레이 용접이 아닌 경우에 대한 유한요소해석 결과를 기존의 연구결과들과 비교하여 해석의 타당성을 확인한 후, 오버레이 용접부가 있는 경우에 대하여 6가지 경우의 유한요소 모델을 작성하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 실제 원전배관의 반경 대 두께의 비를 고려하여 두꺼운 배관의 경우에 대한 유한요소 모델을 작성하여 해석하였다.

각 유한요소 모델의 해석 결과를 비교 분석한 결과, 전체를 모재로 모델링한 경우가 용접부와 모재부를 동시에 존재하도록 모델링한 경우에 비하여 약간 보수적인 결과를 나타내었고, 전체를 용접재로 모델링한 경우는 매우 작은 J-적분 및 COD 값을 나타내었다. 따라서 오버레이 용접부에 대한 LBB 평가 시 모델 전체에 모재 물성치만 적용하여 J-적분 및 COD를 계산하면 모델링을 단순하게 할 수 있을 뿐만 아니라 약간 보수적인 값이 얻어짐을 확인하였다.

참고문헌

1. EPRI, 2004, Materials Reliability Program: Alloy 82/182 Pipe Butt Weld Safety Assessment for U. S. PWR Plant Designs: Westinghouse and CE Design Plants (MRP-109), EPRI, Palo Alto, CA, 1009804.
2. EPRI, 2004, Materials Reliability Program: Crack Growth of Alloy 182 Weld Metal in PWR Environments (MRP-21), EPRI, Palo Alto, CA, 1000037.
3. EPRI, 2004, Materials Reliability Program: Alloy 82/182 Butt Weld Safety Assessment for U. S. PWR Plant Designs (MRP-113), EPRI, Palo Alto,

- CA, 1009549.
4. ASME Code Case N-740-1, "Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 Items, Section XI, Division 1".
 5. EPRI, 2005, Material Reliability Program : Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs (MRP-169), EPRI, Palo Alto, CA.
 6. Reddy Ganta, B. and Ayres, D. J., 1987, Analysis of Cracked Pipe Weldments, EPRI NP-5057, EPRI, Palo Alto, CA.
 7. Kim, Y. J., Huh, N. S., Pyo, C. R. and Yang, J. S., 1998, Development of Modified Piping Evaluation Diagram for LBB Application to Korean Next Generation Reactor, Technical Report (TR.95ZJ16. E1998. 66), Korean Electric Power Research Institut.
 8. Lee, Y. S., Kim, T. S. and Kim, S. H., 2012, "Fatigue Life Characteristics of Alloy 690 under PWR Operating Conditions," Fall Conference of the Korean Society of Safety 2012, The Korean Society of Safety, pp.116.
 9. Kim, J. W., Lee, K. S., Kim, J. S. and Byun T. S., 2009, "Local mechanical properties of Alloy 82/182 dissimilar weld joint between SA508 Gr.1a and F316 SS at RT and 320 C," Journal of Nuclear Materials, Vol. 384, pp.212-221.