

‘98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

차세대원전 밀림관의 파단전누설개념 적용을 위한 배관평가선도 개발

Development of Piping Evaluation Diagram for LBB Application to KNGR Surge Line

윤기석, 박원배, 김종민, 최택상

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

양준석, 박치용

한국전력공사 전력연구원

요 약

건설되는 원전의 배관계통에 대한 파단전누설(Leak-Before-Break : LBB) 평가를 위해서는 배관계의 기하학적 구조, 재료 물성치 및 하중 등의 특정한 자료가 요구된다. 그러나, 차세대원전과 같이 새로이 개발되는 원전의 경우에는 재료 물성치를 포함한 설계자료들이 없고 개발단계부터 LBB 평가가 요구되므로 한국표준형원전을 위한 기존의 평가 방법이 적용될 수 없다. 본 논문에서 이러한 문제점을 해결하기 위해 차세대원전 밀림관의 설계 과정에서 사용될 수 있는 배관계의 기하학적 구조와 무관하고 배관계에 작용하는 하중을 함수로 취하는 LBB 배관평가선도(Piping Evaluation Diagram : PED)를 개발하였다. 또한, 건설 과정에서도 사용된 재료 시험 물성치의 비교 평가만을 수행하여 LBB 적용성을 확인할 수 있게 하기 위해 예상되는 재료물성치의 변화를 고려하여 개발하였다. 그러므로 논문에서 개발되는 PED는 차세대원전 밀림관의 설계 및 건설의 모든 과정에서 LBB 평가를 위해 사용될 수 있다. PED를 사용함으로써 배관 구조의 최적화를 위한 반복 설계 및 건설 과정에서 배관의 모든 관심 위치에 대해 누설균열길이를 계산하지 않고 신속하게 LBB 평가를 수행할 수 있고 이에 대응하는 많은 LBB 해석을 생략할 수 있으므로 상당히 많은 계산 시간을 감소시킬 수 있다.

Abstract

Plant specific data, such as pipe geometry, material properties and pipe loads, are required in order to evaluate Leak-Before-Break (LBB) applicability to piping systems in nuclear power plant under the construction. However, the existing method of LBB evaluation for KSNP's can not be used for newly developed nuclear plants such as Korean Next Generation Reactor (KNGR) which material properties is not available and LBB evaluation is required during design process. In order to solve this problem during developing process for KNGR surge line LBB Piping Evaluation Diagram (PED), which is independent of piping geometry and has a function of the loads applied in piping system, is developed in this paper. Also, in order to evaluate LBB applicability during construction process with only the comparative evaluation of material properties between actually used and expected, the expected changes of material properties are considered in the PED. The PED, therefore, can be used for quick LBB evaluation of KNGR surge line in the process of both design and construction. The benefit obtained by using the PED is : 1) to be able to very quickly confirm LBB applicability

without calculating any leakage crack length for all concerned piping locations in the process of both iterative design for optimal routing and construction and 2) to save significantly a lot of computing times required for the corresponding LBB analyses.

1. 서론

원자력발전소 배관에 파단전누설 (Leak-Before-Break : LBB) 개념을 적용하게 되면서 얻을 수 있는 장점은 매우 많다. LBB 개념을 적용하기 전에는 배관이 운전중 순간적으로 불안정 파괴되어 완전히 둘로 갈라지는 양단순간파단 (Double Ended Guillotine Break : DEGB)을 가정하여 원자력발전소를 설계하였기 때문에 DEGB에 의해 원자로냉각재계통에 유발되는 매우 큰 동적하중의 영향을 감소시킬 수 없었다. 그러므로 지지구조물이 매우 보수적으로 설계되었을 뿐만아니라 배관 파단이 예상되는 지점에는 배관파단구속장치 (pipe whip restraint) 및 유체충돌차단벽 (jet impingement shield) 등과 같은 구조물을 설치하였다. 이와 같은 구조물은 운전 및 보수에 여러 가지 문제점을 유발할 수 있으며 또한 작업자의 접근성을 제한한다. 이러한 문제점들은 LBB 개념을 적용하면서 해결될 수 있었으며 또한 경제적인 측면에서도 미국 원자력 규제기관 (U. S. Nuclear Regulatory Commission)은 발전소 한 호기당 미화 일억만불 (US Dollar 100 million per unit)의 감소를 예상하였다[1].

이러한 많은 이익을 얻기위해 LBB 개념을 차세대원전(Korean Next Generation Reactor : KNGR) 배관에 적용하는 것이 필요하나 KNGR은 새로 설계해야 하는 발전소이므로 기존에 건설된 발전소의 경우와는 다르게 배관의 기하학적 구조 및 지지구조물의 형태와 위치를 새로 결정하여야 한다. 배관계의 기하학적 구조 및 지지구조물의 설계는 일반적으로 격납건물 내부에서 공간의 제한성 때문에 배관 주변에 설치된 다른 구조물 혹은 다른 배관계통과의 연계사항을 반드시 고려하여 수행되어야 하므로 배관 설계과정 중에 많은 시행착오 및 반복작업을 수반할 수 있다. 특히, 배관의 최적화를 위한 반복 설계과정에서 배관계의 기하학적 구조 및 지지구조물의 설계변경은 필수적으로 요구되며 이러한 경우에는 배관계의 각 위치에서 발생하는 하중의 크기가 변경된다. 그러므로 LBB 평가를 기존의 방법에 의해 수행할 경우에는 매우 복잡하고 많은 시간이 소요되는 LBB 해석이 배관설계가 완성된 후이나 수행될 수 있기 때문에 설계공정의 지연을 초래할 수 있고 또한, LBB 적용기준을 만족하지 못할 경우 배관설계를 처음부터 다시 수행하여야 하므로 매우 비효율적이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 Nana[2], Fabi[3], Swamy[4], Yu[5], Kim[6] 등은 배관설계과정 중에 간단하고 신속하게 해당 배관계에 대한 LBB 적용성을 평가하기 위해 배관평가선도(Piping Evaluation Diagram : PED)를 이용하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 이들에 의해서 제시된 방법들 중에서 Fabi[3], Yu[5] 및 Kim[6]에 의해 제시된 방법들을 적절히 혼합하여 KNGR 밀립관의 설계 과정에서 사용될 수 있는 배관계의 기하학적 구조와 무관하고 배관계에 작용하는 하중을 함수로 취하는 LBB PED를 개발하였다. 또한, 건설 과정에서 실제로 사용된 재료 시험 물성치의 비교 평가만을 수행하여 LBB 적용성을 확인할 수 있도록 하기 위해 예상되는 재료물성치의 변화를 고려하여 개발하고자 한다. PED의 사용 목적은

배관 구조의 최적화를 위해 여러번 반복되는 설계 또는 건설 동안에 배관의 모든 관심 위치에 대해 감지가능누설균열길이(Detectable Leakage Crack Length : DLCL)를 계산하지 않고 신속하게 LBB 적용성을 평가할 수 있도록 하는 것이며 또한, 이에 대응하는 LBB 해석을 생략하여 상당히 많은 계산 시간을 감소시키는 것이다.

2. PED 개발의 기본 가정

배관의 중간 부분과 배관-노즐 연결부분에 대한 LBB 평가는 배관의 중간 부분을 위한 PED를 사용하는 것이 보수적이라는 연구결과가 Yu[5]에 의해서 제시되었으므로 본 논문에서는 배관의 중간 부분을 위한 PED만을 개발하였다. PED는 기본적으로 LBB 해석을 통하여 얻는 결과이므로 LBB 해석에 적용되어야 하는 규제기준을 만족하도록 개발되어야 한다. 그러므로 Standard Review Plan(SRP) 3.6.3[7]과 NUREG-1061, Vol. 3[8]에서 제시하고 있는 요건에 따라서 개발되었다. 또한, Regulatory Guide 1.45[9]에서 요구하는 바와 같이 중요한 규제기준의 하나인 1.0 gpm의 누설감지계통 능력을 보유한 발전소를 기준하였다. 이러한 규제요건들은 기존발전소에서 이미 적용되고 있으므로 LBB 평가를 위한 기본적인 가정은 합리적이라고 할 수 있다. 그외에 중요한 LBB 평가를 위한 입력자료로는 재료 물성치 및 하중이며 이에 대한 사항은 다음과 같이 가정하여 적용하였다.

2.1 재료 물성치

재료 물성치는 기존의 발전소에 사용된 자료 및 PIFRAC[10] 자료를 참조하여 보수적으로 모재의 낮은 응력-변형률 곡선 및 용접부의 낮은 파괴저항치(J-R) 곡선을 전체 해석모델에 사용하였으며 J-R 곡선은 두께가 25.4 mm인 1T 평면시편의 것을 사용하였다. 현재 밀림관에 대한 LBB 평가 여유도(margin)를 증가시키기 위해 모재의 파괴인성 특성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 거의 마무리 단계이며, 실험실에서 제작한 시편의 실험 결과로부터 얻은 향상된 재료 물성치의 범위 및 울진 3,4호기에 사용된 재료 물성치와 함께 비교하기 위해 Fig. 1 및 2에서 표시하였다. PED 개발을 위해 사용된 재료 물성치는 기존 발전소의 것보다는 약간 좋지만 연구결과를 반영하여 앞으로 예상되는 향상된 것과 비교하면 보수적으로 선정된 것임을 알 수 있다.

2.2 작용 하중

LBB 해석에 적용하는 하중은 정상운전(Normal Operating : NOP) 하중과 배관에 작용하는 LBB 하중으로 분리할 수 있다. NOP 하중은 DLCL를 결정하는데 사용되며 발전소 운전수명의 대부분 시간 동안에 밀림관에 작용하는 하중이다. NOP 하중은 계통 압력, 열 하중을 포함하며 열 하중에는 전출력운전(100% power operation) 동안에 밀림관에서 발생하는 열성층 하중 및 열팽창 하중을 포함한다. LBB 하중은 NOP 하중에 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE) 하중을 더한 것 또는 최대 열성층(Maximum Stratified Flow : MSF) 하중으로 LBB 평가를 위해 사용된다. KNGR LBB 하중에서 SSE 하중의 크기는 기존 발전소의 0.2g(지반 가속도 값)에서 0.3g로 증가하면서 SSE 하중의 발생 확률이 기존 발전소보다 감소되었으며 또한, MSF 하중은 발전소의 기동 및 정지 동안에 짧은 시간 동안 발생하는 하중이므로 SSE 및 MSF 하중이 동시에

발생할 확률은 KNGR 설계기준확률보다 작다. 그러므로 SSE 및 MSF 하중을 조합하지 않고 분리 적용하여 각각의 PED를 개발하였다.

3. PED 개발

합리적으로 설정된 기본적인 가정을 만족하고 실제 배관의 기하학적 구조와 무관하게 LBB 평가를 하기 위한 PED를 아래와 같은 절차에 의해서 작성하였다.

3.1 NOP 하중과 DLCL 관계도 작성

배관 설계가 완료되기 전에 PED가 작성되어야 하므로 기존 발전소의 경험 및 KNGR 밀림관의 NOP 하중조건을 고려하여 예상되는 NOP 굽힘모멘트 범위를 가정한다. 일정한 NOP 압력과 가정된 NOP 굽힘모멘트 변화 범위에 대하여 누설률 10gpm에 해당하는 밀림관(호칭경 12인치 스케줄 160, 스테인레스강)에서의 원주방향 DLCL을 계산하여 NOP 하중변화에 대한 균열길이 변화곡선을 작성한다 (Fig. 3 참조). 여기서, 누설률 10gpm은 SRP 3.6.3[7]의 규제기준에 의거하여 발전소의 누설률감지계통 능력 (1.0gpm)에 10배의 여유도를 적용한 것이며 DLCL은 PICEP[11] 코드를 사용하여 계산되었다. Fig. 3을 사용하면 새로운 배관을 반복설계하는 동안에 배관의 관심있는 여러 위치에 대해서 균열길이를 매번 계산하지 않아도 되는 장점이 있다.

3.2 LBB 해석

가정된 NOP 굽힘모멘트 범위를 나타낼 수 있는 두 개의 NOP 하중을 선택한 다음에 Fig. 3을 이용하여 선택된 두개의 NOP 하중에 대응하는 각각의 DLCL을 결정하였다. 각 NOP 하중에 해당하는 DLCL 및 두배의 DLCL에 대해서 LBB 해석을 수행하였다. 균열길이 여유도의 평가를 위한 두배의 DLCL에 대한 LBB 해석은 SRP 3.6.3[7]에서 요구하는 규제기준이다. LBB 해석은 참고문헌[5]에서 제시된 방법과 동일하게 3차원 유한요소법을 이용한 탄소성과파괴해석방법으로 수행되었으며 두개의 NOP 하중에 대응하는 각각의 최대허용 LBB 하중 (M_{max})을 결정하기 위해 J-T 평가선도 평가법을 이용하였다.

3.3 PED 작성

LBB 평가로부터 결정된 M_{max} 을 이용하여 SSE 하중(M_{SSE}) 및 MSF 하중(M_{MSF})을 다음과 같이 결정하였다. DLCL의 경우는 SRP 3.6.3[7]에서 1.4 배의 하중 여유도를 요구하므로 이를 고려하였다.

1) DLCL의 경우

$$M_{max(i)} = \sqrt{2} (M_{SSE(i)} + M_{NOP(i)}) \text{ 또는 } \sqrt{2} M_{MSF(i)} \text{의 관계로부터}$$

$$M_{SSE(i)} = M_{max(i)}/\sqrt{2} - M_{NOP(i)} \text{와 } M_{MSF(i)} = M_{max(i)}/\sqrt{2} \text{을 얻는다.}$$

2) 2배의 DLCL의 경우

$$M_{max(i)} = M_{SSE(i)} + M_{NOP(i)} \text{ 또는 } M_{max(i)} = M_{MSF(i)} \text{의 관계로부터}$$

$$M_{SSE(i)} = M_{max(i)} - M_{NOP(i)} \text{와 } M_{MSF(i)} = M_{max(i)} \text{을 얻는다.}$$

여기서, i 는 두 개의 NOP 하중 조건을 M_{NOP} 는 NOP 하중을 나타내며, MSF 하중은 NOP 하중을 포함하는 하중이다.

이렇게 M_{SSE} 및 M_{MSF} 를 결정한 후에 M_{NOP} 와 M_{SSE} , M_{NOP} 와 M_{MSF} 의 관계를 X-Y 좌표축에 표기하므로써 PED를 완성한다.

4. PED 사용 방법

PED를 사용하는 방법은 배관계의 최대응력이 발생하는 지점에서의 하중을 결정하여 PED에서의 위치를 선정하여 다음과 같이 LBB 평가를 수행한다. Fig. 4는 전형적인 PED을 나타낸 것으로 여기에서 표기된 바와 같이

- 배관에 작용하는 NOP와 SSE (또는 MSF) 하중이 점 X에서 교차할 경우 : LBB Fail
- 배관에 작용하는 NOP와 SSE (또는 MSF) 하중이 점 Y에서 교차할 경우 : LBB Fail
- 배관에 작용하는 NOP와 SSE (또는 MSF) 하중이 점 Z에서 교차할 경우 : LBB Pass

로 LBB 평가를 할 수 있다. Fig. 4에서 “margin on applying load”는 균열길이 DLCL에 대한 허용 하중이고, “margin on crack size”는 균열길이 2xDLCL에 대한 허용 하중이다.

또한, 모든 관심있는 배관의 위치(예, 배관-엘보우 및 배관-노즐 연결 위치)에서 Fig. 4를 사용하여 “LBB Pass”로 평가될 경우에는 LBB 평가를 위한 균열위치의 선정 목적으로 배관의 최대응력을 계산할 필요가 없다.

5. 결과 및 토의

본 논문에서 개발된 LBB PED를 Fig. 5와 6에서 나타냈다. Fig. 5는 NOP-SSE 하중의 함수로 Fig. 6은 NOP-MSF 하중의 함수로 표기하였다. Fig. 3, 5 및 6에서 NOP 하중변화에 따른 SSE 및 MSF 허용하중 변화는 PED 직선의 기울기 차이에서도 알 수 있듯이 DLCL 경우보다는 2*DLCL 경우에서 크게 나타나며 2*DLCL이 표기된 하중범위의 LBB 평가에서 지배적임을 알 수 있다. 또한, NOP 하중의 변화에 따른 세 종류의 재료 물성치 사이의 균열길이곡선의 간격 변화는 각기 대응하는 PED 직선의 간격 변화와 동일한 경향으로 증가 및 감소하는 것으로 나타났으며 동일한 NOP 하중에 대해서 DLCL에 대응하는 2*DLCL의 각 PED 직선의 간격이 DLCL의 것보다 감소하는 경향임을 알 수 있다. 참고로, Fig. 5에서 울진 3,4호기 밀림관에 작용하는 하중의 교차점을 표시하였으며 PED 사용방법에서 기술한 바와 같이 “LBB Pass”임을 알 수 있다. KNGR 밀림관의 설계과정에서 LBB 적용성을 평가하기 위해서는 배관의 최대응력 발생위치에서의 NOP-SSE 및 NOP-MSF 하중의 교차점이 Fig. 5 및 6의 PED에서 동시에 “LBB Pass” 위치에 놓여야 한다. 또한, 앞으로의 건설 과정에서도 Fig. 1 및 2에서 표기된 재료 물성치의 상관관계 및 Fig. 3의 NOP 하중-DLCL 관계를 이용하면 Fig. 5 및 6의 PED에서 고려된 재료물성치 범위와 실제로 사용된 재료 시험 물성치의 보수적인 비교 평가만을 수행하여 LBB 적용성을 확인할 수 있다.

6. 결론

KNGR 밀림관의 PED를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 새로이 설계되는 KNGR 밀림관 구조의 최적화를 위해 여러번 반복되는 설계과정 및 사용된 재료 물성치의 보수적인 비교 평가를 수행하여 건설 과정에서도 사용 가능하도록 밀림관의 routing과 무관하고 재료물성치의 예상변화를 고려하여 PED를 개발하였다.
- (2) 개발된 PED는 모든 관심 위치에 대해 DLCL을 계산하지 않고 신속하게 LBB 적용성을 평가하기 위해 사용될 수 있고 또한, 상응하는 LBB 해석을 생략 가능하게 하므로 많은 계산 시간을 감소시킬 수 있는 이익을 제공한다.
- (3) 실제 적용되는 Fig. 5 및 6의 PED 하중범위에서 2*DLCL 경우가 DLCL 경우보다 LBB 평가 결과에 대해 지배적임을 알 수 있었다.

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. Nana, A.D. and Yoon, K.K., "Leak-Before-Break Allowable Load Window Approach", PVP-287, 35-41, 1994.
3. Fabi, R.J. and Peck, D.A., "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram", PVP-283, 111-115, 1994.
4. 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 1, 199-205, 1996.
5. Yu, Y.J., Yoon, K.S., Park, S.H., Park, K.B. and Kim, Y.J., "Extended Applications of LBB Piping Evaluation Diagrams for a New Plant Design", Nuclear Engineering and Design, 174, 101-110, 1997.
6. Kim, Y.J., Hur, N.S., Pyo C.R., Park, S.D. and Yang J.S., "Development of Modified Piping Evaluation Diagram for LBB Application", Transactions of the 14th International Conference on SMiRT, 4, 327-333, 1997.
7. USNRC, "Leak-Before-Break Evaluation Procedure", Draft Standard Review Plan 3.6.3, 1987.
8. Pipe Break Task Group, "Evaluation of Potential for Pipe Break", NUREG-1061, Vol. 3, 1984.
9. USNRC, "Reactor Coolant Boundary Leakage Detection Systems", Regulatory Guide 1.45, 1973.
10. Hiser, A.L. and Callahan, G.M., "A Users Guide to the NRC Piping Fracture Mechanics Data Base (PIFRAC)", NUREG/CR-4894, 1987.
11. Norris, D.M. and Chexal, B., "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program", EPRI Report NP 3596-SR, 1987.

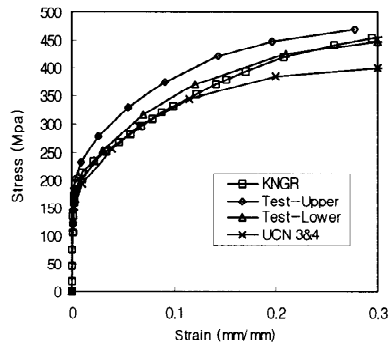


Fig. 1. Engineering stress-strain curves for surge line (Test-Upper & Test-Lower : Expected upper & lower bounds of stress-strain curves)

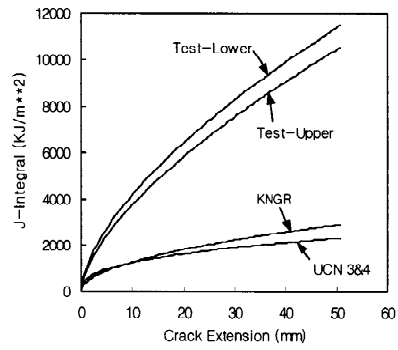


Fig. 2. J-R curves for surge line (Test-Upper & Test-Lower : J-R curves for expected upper & lower bounds of stress strain curves)

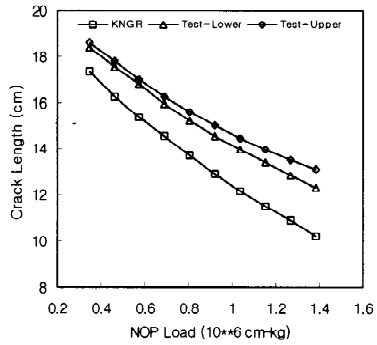


Fig. 3. Surge line PICEP results for 10 gpm leakage (Test-Upper & Test-Lower : Expected upper & lower bounds of stress-strain curves)

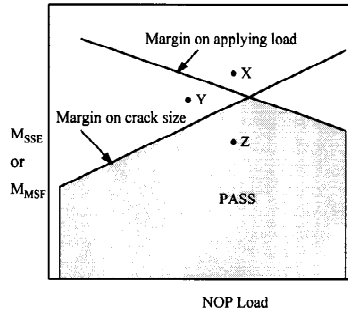


Fig. 4. Typical Piping Evaluation Diagram (PED)

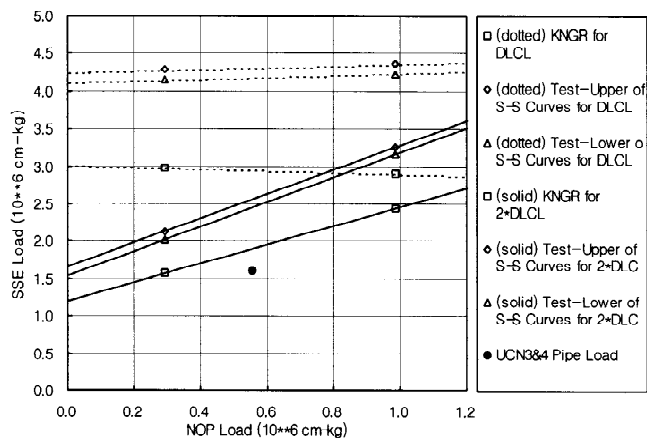


Fig. 5. LBB PED of KNGR surge line for SSE loads

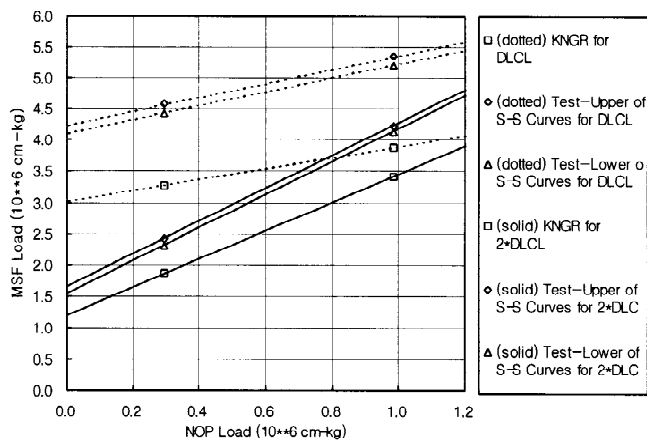


Fig. 6. LBB PED of KNGR surge line for maximum stratified flow loads