

'96 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

유한요소의 형태 및 경계 조건이 Applied J 적분값에 미치는 영향

라인식, 조인득, 지계광
한국전력기술(주)

요 약

탄소성파괴역학의 발달과 함께 원자력 발전소의 설계시 고려해야 하는 고에너지 배관의 양단파단사고와 같은 극한 가정 대신 파단전누설(LBB : Leak Before Break)개념을 배관설계시 고려할 수 있도록 관련 규제 요건이 완화되어 원자력 발전소 고에너지 계통 설계에 새로운 설계 개념으로 적용할 수 있게 되었다. 파단전누설개념 적용시 균열 안정성 평가에 가장 널리 사용되는 방법은 J-T 방법이다. 본 연구에서는 유한요소법 사용시 균열 선단에서 요소의 크기 및 경계 조건(Boundary Condition)이 변화할 때 Applied J 적분값에 미치는 영향을 ABAQUS 전산 프로그램을 이용하여 조사하였다.

1. 서론

원자력 발전소는 배관의 양단파단사고와 같이 심각한 영향을 줄 수 있는 가상사고하에서도 안전성 관련 구조물, 계통 및 기기가 건전성을 상실하지 않고 제 기능을 발휘하게 설계되도록 요구된다. 이와 같은 요건에 따라 원자력 발전소의 설계시 배관의 일정 지점에서는 순간적으로 배관이 파손되는 경우를 가정하여 왔다. 그러나, 탄소성파괴역학의 발달과 함께 양단파단사고와 같은 극한 가정 대신에 현실적인 파단전누설(Leak Before Break:LBB)개념을 배관설계시 고려할 수 있도록 관련 규제 조치가 완화되어 배관 계통 설계의 새로운 설계 개념으로 적용할 수 있게 되었다.

LBB개념이란 배관이 양단파단에 도달하기 이전에 배관에서 발생된 균열을 통한 누설을 누설 감지 설비로 감지하여 배관이 양단파단에 도달하기 이전에 사전 조치를 취함으로써 발전소를 안전 정지시키고 양단파단사고와 같은 극한 상황을 미연에 방지할 수 있으므로 양단파단에 의한 동

적 영향을 설계 기준으로 고려하지 않는다는 것이다. 이와 같은 LBB개념은 영광 3,4호기에서 안전성 관련 누설 감지 계통이 설치되어 있는 격납건물내의 원자로냉각재계통 주배관과 밀림관, 안전 주입 및 안전 정지 배관에 성공적으로 적용되었으며 올진 3,4호기에서도 동 개념이 적용되었다.

과단전누설개념 적용시 균열 안정성 평가에 가장 널리 사용되는 방법은 J-T 방법이다. 본 연구에서는 유한요소법 사용시 균열 선단에서 요소의 크기 및 경계 조건(Boundary Condition)이 변화할 때 Applied J 적분값에 미치는 영향을 ABAQUS 전산 프로그램[참고문헌 1]을 이용하여 조사하였다.

2. 본론

균열 안정성 평가(Crack Stability Analysis)란 가상 균열에 대해 주어진 하중 조건하에서 균열이 불안정 성장을 보이지 않고 안정한 상태를 유지함을 보이는 과정이다. 본 절에서는 지금까지 우리 나라에 적용하였던 평가 방법론을 간략히 소개하고 ABAQUS 코드를 이용한 분석 방법을 개발하기 위해 mesh 생성, 경계 조건 적용을 위한 최적 방법론을 개발하기 위해 수행된 연구를 소개한다.

2.1 J-T평가법

관통 균열에 대한 안정성 평가법으로써 현재 J/T평가법이 가장 많이 사용되고 있다. J/T평가법에 대해서는 NUREG-1016 Vol.3[참고문헌 2]에 구체적으로 기술되어 있으며, J와 Tearing Modulus의 관계와 비교함으로써 안정성 여부를 평가하는 방법이다. 여기서 Tearing Modulus는 J-R선도, 탄성계수(E) 및 유동응력을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있으며 균열 길이 변화에 따른 J-적분값의 변화율을 나타낸다.

$$T_m = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_m}{da}, \quad T_a = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_a}{da} \quad (1)$$

여기서 T_m 은 재료의 고유 값으로서 재료 시험을 통해서 결정되며 재료의 파괴 저항치를 나타낸다. 또한 T_a 는 작용 하중에 의한 값을 나타내며 일반적으로 유한요소법을 이용한 탄성파괴해석으로부터 결정된다. 따라서 균열이 있는 배관의 안정 조건 (Stability Criteria)은 다음의 수식으로 표현된다.

$$T_a < T_m, \quad J_a < J_m \quad (2)$$

극한하중법을 이용한 LBB분석이 현재 올진 3,4호기의 SI/SC 계통 배관에 적용되고 있으며, J/T 해석을 위해서는 유한요소법을 이용하거나 FLET[참고문헌 3]과 같은 파괴 해석 프로그램을 이용한다. 또한, 보수적인 극한하중법으로 적용하기 어려운 탄소강배관계통은 유한요소법에 의한 J/T법을 사용하여 LBB분석을 수행하는 것이 옳다고 생각한다.

2.2 ABAQUS Code(유한요소법)을 이용한 J-T 방법

본 연구의 목적은 균열안정성분석시 모델링기법에 따른 Applied J 적분값의 영향을 평가하기 위한 것이므로, 배관의 내경(24.126 in.)과 두께(1.125 in.)는 국내 건설 중인 주증기 배관의 것과 동일하게 사용하였으며, 가상 관통 균열 길이를 임의로 10 in.로 가정하고, 외력으로는 굽힘 모멘트만 작용하고 크기는 500 kips-ft 로 가정하였으며, 직선 배관 중단에 균열이 존재한다고 가정하였다.

2.2.1 경계 조건

가상 관통 균열 위치에서 배관이 축방향으로 대칭이고, 배관 단면이 단면의 중점과 균열 중심을 지나는 직선에 대하여 대칭(그림 2)이므로 직선 배관의 1/4만 모델링하였다. 단면 1은 Z축 방향으로 구속하였으며, 단면 2 는 X축 방향으로 구속하였고, 점 1은 X, Y, Z축 모두에 대해 구속하였다(그림 3)[참고문헌 4]. 4 point bending으로 굽힘 모멘트를 모사 하였다. 이때, 직선 배관의 1/4만 모델링하였기 때문에 그림 4와 같이 2 point에만 Y축 방향으로 하중을 작용시켰다. 또한, 하중 작용점에서 소성변형이 일어나는 것을 방지하기 위해 하중 작용점의 영역을 탄성체로, 균열 부위의 영역은 탄소성체로 가정하였다. 이러한 가정은 탄성체와 탄소성체의 경계 단면의 뒤틀림을 방지하는 효과를 가져온다.

2.2.2 Applied J 적분값 계산

J(단위:kips-in) 값은 3가지 방법으로 계산하였다.

방법 1 : 모든 균열 노드와 모든 contour에서의 평균 J 적분값으로 계산

방법 2 : 모든 균열 노드와 contour 5에서의 평균 J 적분값으로 계산

방법 3 : crack 3 의 contour 5 의 J 적분값들을 주어진 하중 조건과 균열을 포함한 배관의 J 적분값으로

계산하였다. 일반적으로 균열 선단의 J 적분값 중 contour 1은 의미 없는 값이며, crack 1 과 crack 5 는 배관자체의 J 적분값을 의미하지 않기 때문에 J 적분값계산에서는 이를 고려하지 않

왔다.

2.2.3 C3D20 과 C3D20R 요소 사용에 따른 J 적분값 변화

C3D20과 C3D20R은 20노드 quadratic brick 요소이며 유일한 차이점은 요소의 적분점이 C3D20은 27인 반면 C3D20R은 8이라는 점이다. 따라서, C3D20R의 사용이 C3D20에 비해 컴퓨터 작동 시간이 훨씬 적게 소요되므로, J값의 차이가 크지 않을 경우 C3D20R 요소를 사용하는 것이 C3D20 요소를 사용할 때보다 훨씬 유리하다. 표 1에서 표 6까지 이를 비교하기 위한 결과가 나타나 있다. 요소 C3D20R을 이용하여 계산한 J 적분값이 요소 C3D20을 이용하여 계산한 J 적분값보다 약간 보수적이므로, C3D20R 요소를 사용하는 것이 C3D20 요소를 사용할 때보다 훨씬 유리하다. 또한, C3D20R 요소를 사용하여 방법 2로 J 적분값을 계산하는 것은 C3D20 요소를 사용하여 방법 1, 방법 2, 방법 3 으로 J 적분값을 계산한 것보다 약간 보수적인 것을 알 수 있다. 따라서 C3D20R요소의 사용이 시간과 비용 절약을 위해 타당하며, 이 요소를 사용할 때 방법 2를 사용하여 J 적분값을 계산하는 것이 약간 보수적인 결과를 얻을 것으로 판단된다.

2.2.4 균열선단 mesh 생성 변화에 따른 J 적분값 변화

BIAS의 값은 항상 양의 값을 가져야 하며, 0에 가까울수록 균열 선단에 노드들이 집중되는 것을 의미하고, 1일 경우 균등한 mesh 생성을 의미한다. 해석모델과 균열 선단의 mesh 생성은 각각 그림 29와 30에 나타내었다. 균열 선단의 노드와 균열에서 떨어진 노드들의 간격을 변화시키기 위해 ABAQUS 전산 코드의 Option중 BIAS를 사용하여, J값을 방법 2를 이용하여 계산하였다. BIAS의 값은 항상 양의 값을 가져야 하며, 0에 가까울수록 균열 선단에 노드들이 집중되어 짐을 의미하고, 1일 경우 균등한 mesh 생성을 의미한다. 표 7에서 표 10까지의 결과에서 알 수 있듯이 J 적분값은 BIAS가 감소함에 따라 일정한 값으로 수렴함을 보이며, 균열점에서 $\Delta J|_{\max}$ 값은 BIAS 값이 감소함에 따라 감소하며 이는 BIAS 값이 작을수록 J 적분값이 경로에 독립이라는 성질을 잘 나타낸다고 말할 수 있다. BIAS=0.8인 경우(표 11)는 예외로 나타났으며, 이는 균열 선단 요소의 종횡비(aspect ratio ; 가장 큰 변의 길이 / 가장 작은 변의 길이)가 100 이상으로 분석 해의 큰 정확성을 기대할 수 없는 모델링에 기인한 결과로 예측된다. 따라서, 정확한 J 적분값을 얻기 위해서는 종횡비에 유의하면서 가장 낮은 BIAS 값으로 주어진 문제를 해석해야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

2.2.5 크기가 같은 굽힘 모멘트가 다른 위치에 작용되었을 때 J값 변화

순수 굽힘 모멘트를 모사하기 위한 4 points bending의 타당성을 알아보기 위해, 2 points에 적

용하는 하중들 간의 거리(그림 4에서 L)를 달리하여 J 적분값을 비교해 보았다. 이론적으로 탄소 성체에 영향을 미치는 모멘트는 250 kips-ft로 모두 같다. 표 12에서 표 15까지의 결과에서 보여 주듯이 거리(L)가 멀어짐에 따라 J_{IC} 와 $\Delta J|_{max}$ 모두는 약간 감소하면서 일정한 값에 수렴한다. 하지만 J_{IC} 와 $\Delta J|_{max}$ 는 거리(L)에 따라 크게 변하지 않으므로 거리에 무관하다고 할 수 있다.

3. 결론

균열안정성평가지 사용할 ABAQUS 코드의 모델을 설정하기 위해 두 요소(element)를 사용하여 비교 분석한 결과 C3D20R요소의 사용이 전산기 사용 시간 측면에서 유리하며, C3D20요소를 사용하는 경우보다 약간 보수적인 결과를 얻었다. 또한 경로에 무관한 J 적분값을 얻기 위한 균열 선단의 mesh 생성을 BIAS 값을 변화시키면서 비교, 분석하였다. 결과를 요약하면 BIAS 값이 작을수록, 즉, 균열 선단의 요소가 작을수록, 경로에 무관한 J적분값의 특성을 잘 나타내고 있으며, 이때 종횡비가 너무 크지 않아야 타당한 분석 결과를 생성한다는 사실을 알 수 있었다. 굽힘 모멘트를 모사하기 위한 4 point 굽힘 하중의 타당성을 작용 하중들의 위치를 달리 함으로써 비교, 조사하였는데 위치에 거의 무관하였다. C3D20R요소를 사용하고 균열 선단에서 종횡비에 유의 하면서 작은 BIAS 값의 사용이 비교적 정확한 J 적분값을 얻을 수 있고, 굽힘 모멘트를 모사 하는데 4 point 굽힘 하중의 사용이 타당하다는 결론에 도달할 수 있다.

4. 참고문헌

1. ABAQUS User's Manual, Version 5.4, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1994
2. NUREG-1061, Vol. 3, "Evaluation of Potential for Pipe Break", 1984.
3. FLET : Pipe Crack Instability Program, EPRI, December 1988.
4. "Effects of Toughness Anisotropy and Combined Tension, Torsion, and Bending Loads on Fracture Behavior of Ferritic Nuclear Pipe", NUREG/CR-6299, BMI-2184, April 1995.

표 1 J 적분값 (C3D20요소, BIAS=1)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0449	0.0609	0.0720	0.1015	0.1397
crack 2	0.1233	0.1249	0.1218	0.1180	0.1130
crack 3	0.1129	0.1103	0.1118	0.1134	0.1157
crack 4	0.1347	0.1389	0.1406	0.1429	0.1456
crack 5	0.0483	0.0349	0.0197	0.0284	-0.0234

방법 1 : 0.1247
 방법 2 : 0.1247
 방법 3 : 0.1157

표 2 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=1)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0715	0.0830	0.1068	0.1379	0.1781
crack 2	0.1175	0.1196	0.1160	0.1122	0.1071
crack 3	0.1566	0.1578	0.1591	0.1603	0.1623
crack 4	0.1259	0.1325	0.1346	0.1372	0.1403
crack 5	0.0839	0.0899	0.0522	0.0303	0.0425

방법 1 : 0.1365
 방법 2 : 0.1365
 방법 3 : 0.1623

표 3 J 적분값 (C3D20요소, BIAS=0.95)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0471	0.0489	0.0557	0.0700	0.0918
crack 2	0.1224	0.1235	0.1233	0.1214	0.1185
crack 3	0.1137	0.1122	0.1115	0.1122	0.1133
crack 4	0.1319	0.1347	0.1371	0.1384	0.1401
crack 5	0.0551	0.0488	0.0405	0.0295	0.0146

방법 1 : 0.1239
 방법 2 : 0.1240
 방법 3 : 0.1133

표 4 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=0.95)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0589	0.0559	0.0760	0.0921	0.1154
crack 2	0.1233	0.1240	0.1232	0.1210	0.1181
crack 3	0.1497	0.1513	0.1508	0.1516	0.1525
crack 4	0.1298	0.1323	0.1354	0.1368	0.1389
crack 5	0.0780	0.0739	0.0635	0.0505	0.0338

방법 1 : 0.1363
 방법 2 : 0.1365
 방법 3 : 0.1525

표 5 J 적분값 (C3D20요소, BIAS=0.8)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0533	0.0475	0.0491	0.0503	0.0495
crack 2	0.1181	0.1233	0.1216	0.1213	0.1215
crack 3	0.1155	0.1150	0.1167	0.1184	0.1178
crack 4	0.1264	0.1281	0.1300	0.1304	0.1314
crack 5	0.0620	0.0576	0.0595	0.0603	0.0571

방법 1 : 0.1227
 방법 2 : 0.1236
 방법 3 : 0.1178

표 6 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=0.8)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0668	0.0568	0.0633	0.0716	0.0745
crack 2	0.1198	0.1245	0.1225	0.1194	0.1182
crack 3	0.1420	0.1405	0.1527	0.1618	0.1637
crack 4	0.1255	0.1286	0.1278	0.1255	0.1252
crack 5	0.0950	0.0847	0.0878	0.0931	0.0924

방법 1 : 0.1342
 방법 2 : 0.1357
 방법 3 : 0.1637

표 7 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=1)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0715	0.0830	0.1068	0.1379	0.1781
crack 2	0.1175	0.1196	0.1160	0.1122	0.1071
crack 3	0.1566	0.1578	0.1591	0.1603	0.1623
crack 4	0.1259	0.1325	0.1346	0.1372	0.1403
crack 5	0.0839	0.0899	0.0522	0.0303	0.0425

방법 2 : 0.1366
 각 균열형에서 $d/l_{max} = 0.0125$ (crack 2)
 0.0045 (crack 3)
 0.0078 (crack 4)

표 8 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=0.95)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0589	0.0559	0.0760	0.0921	0.1154
crack 2	0.1233	0.1240	0.1232	0.1210	0.1181
crack 3	0.1497	0.1513	0.1508	0.1516	0.1525
crack 4	0.1298	0.1323	0.1354	0.1368	0.1389
crack 5	0.0780	0.0739	0.0635	0.0505	0.0338

방법 2 : 0.1365
 각 균열형에서 $d/l_{max} = 0.0059$ (crack 2)
 0.0017 (crack 3)
 0.0066 (crack 4)

표 9 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=0.9)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0583	0.0672	0.0697	0.0762	0.0880
crack 2	0.1228	0.1225	0.1225	0.1220	0.1202
crack 3	0.1440	0.1554	0.1533	0.1521	0.1529
crack 4	0.1282	0.1290	0.1309	0.1330	0.1340
crack 5	0.0807	0.0861	0.0806	0.0730	0.0639

방법 2 : 0.1357

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0023$ (crack 2)
 0.0033 (crack 3)
 0.0050 (crack 4)

표 10 J 적분값 (C3D20R요소, BIAS=0.8)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0568	0.0568	0.0633	0.0716	0.0745
crack 2	0.1198	0.1245	0.1225	0.1194	0.1182
crack 3	0.1420	0.1405	0.1527	0.1618	0.1637
crack 4	0.1255	0.1286	0.1278	0.1253	0.1252
crack 5	0.0850	0.0847	0.0878	0.0931	0.0924

방법 2 : 0.1357

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0063$ (crack 2)
 0.0232 (crack 3)
 0.0034 (crack 4)

표 11 J 적분값 (C3D20R요소, 거리(L)= 67 in., BIAS=0.9)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0583	0.0672	0.0697	0.0762	0.0880
crack 2	0.1228	0.1225	0.1225	0.1220	0.1202
crack 3	0.1440	0.1554	0.1533	0.1521	0.1529
crack 4	0.1282	0.1290	0.1309	0.1330	0.1340
crack 5	0.0807	0.0861	0.0806	0.0730	0.0639

방법 2 : 0.1357

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0023$ (crack 2)
 0.0033 (crack 3)
 0.0050 (crack 4)

표 12 J 적분값 (C3D20R요소, 거리(L)= 100 in., BIAS=0.9)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0530	0.0517	0.0558	0.0714	0.0822
crack 2	0.1158	0.1147	0.1153	0.1149	0.1132
crack 3	0.1335	0.1424	0.1413	0.1405	0.1411
crack 4	0.1218	0.1217	0.1236	0.1258	0.1268
crack 5	0.0756	0.0791	0.0751	0.0684	0.0600

방법 2 : 0.1270

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0021$ (crack 2)
 0.0019 (crack 3)
 0.0051 (crack 4)

표 13 J 적분값 (C3D20R요소, 거리(L)= 166.7 in., BIAS=0.9)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.05334	0.0591	0.0630	0.0684	0.0786
crack 2	0.1111	0.1099	0.1104	0.1100	0.1084
crack 3	0.1271	0.1353	0.1343	0.1336	0.1342
crack 4	0.1171	0.1169	0.1188	0.1207	0.1216
crack 5	0.0727	0.0754	0.0716	0.0655	0.0576

방법 2 : 0.1214

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0020$ (crack 2)
 0.0017 (crack 3)
 0.0047 (crack 4)

표 14 J 적분값 (C3D20R요소, 거리(L)= 233.3 in., BIAS=0.9)

	contour 1	contour 2	contour 3	contour 4	contour 5
crack 1	0.0533	0.0590	0.0629	0.0684	0.0785
crack 2	0.1110	0.1098	0.1103	0.1099	0.1083
crack 3	0.1267	0.1349	0.1338	0.1332	0.1338
crack 4	0.1168	0.1166	0.1185	0.1203	0.1212
crack 5	0.0725	0.0752	0.0714	0.0653	0.0574

방법 2 : 0.1211

각 균열형에서 $\Delta / I_{max} = 0.0020$ (crack 2)
 0.0017 (crack 3)
 0.0046 (crack 4)

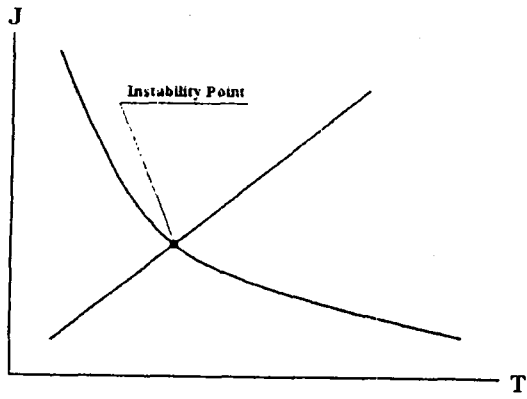


그림 1. J-T 평가 선도

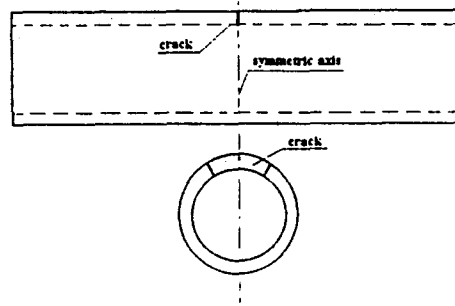


그림 2. 균열을 함유한 배관의 기하학적 대칭성

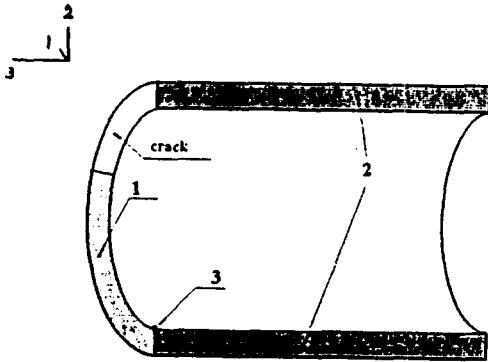


그림 3. 해석모델의 기하학적 경계조건

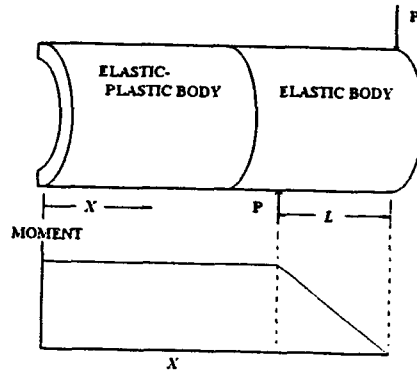


그림 4. 해석모델의 하중 경계 조건

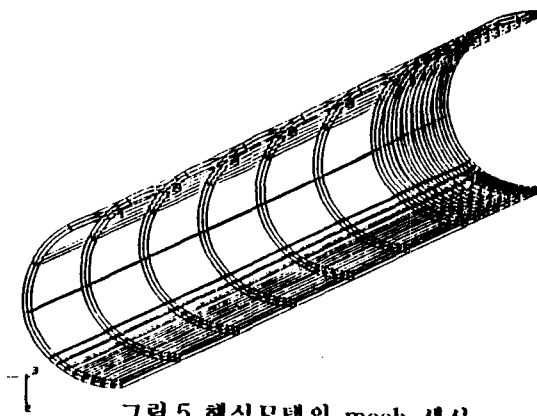


그림 5. 해석모델의 mesh 생성

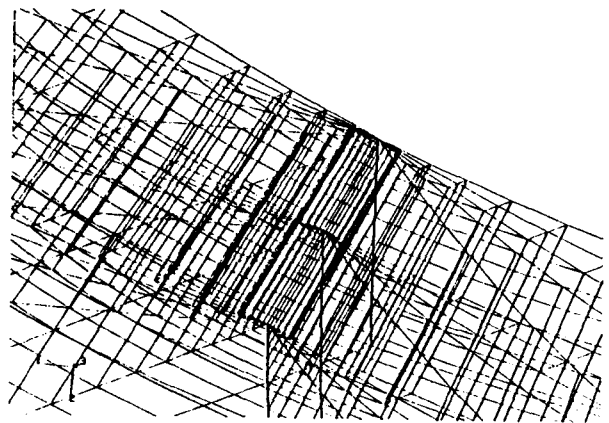


그림 6. 균일선단의 mesh 생성