

S 및 U 형상 튜브에서 RI밀봉선원에 대한 차폐형상결정

Shield Shape Determination for Radioisotope Sealed Source in S and U Shape Tube

서기석, 이주찬, *홍성인
한국원자력연구소, *충남대학교
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내에서 일부 RI 생산이 본격화됨에 따라, 의료 및 산업용에 사용되는 RI의 국내 유통 및 수출에 요구되는 운반용기 개발이 필수적이다. RI 용기는 운반 및 취급의 용이성을 위해 중량의 최소화가 필요하다. RI 밀봉선원용 운반용기는 일반적으로 적재가 용이한 구조를 갖기 위해 S형 혹은 U형의 안내관을 갖고 있다. 이러한 안내관을 통과하는 RI 선원의 차폐는 차폐두께 계산에서 튜브의 내부공간을 제외시킨 임의의 3차원 차폐형상을 고려하여야 한다. 따라서, 본 논문은 RI 선원에 대한 차폐형상 결정을 위해 차폐표면의 3차원 좌표 값 및 차폐형상의 중량을 계산하는 fortran 프로그램을 개발하여 평가하는 방법을 기술하였다.

Abstract

As some kinds of domestic radioisotopes have been produced, it is necessary to develop the transportation package for domestic and foreign utilization in the medical and industrial areas. RI transportation packages need the minimum weight in order to transport and operate it easily. The transportation package for RI sealed source generally has the guide tube to load and unload the RI source conveniently. Shielding part of RI source passing through S or U shape guide tube must be considered as the arbitrary 3-dimensional shape to except the internal space of the guide tube in shielding thickness calculation. Therefore, this paper describes that Fortran program for the shielding shape determination has been developed to calculate 3-D coordinates of shielding surface and evaluate the weight of shielding part.

1. 서론

방사성동위원소는 산업분야에서 비파괴검사, 두께, 밀도 및 높이(level) 측정에 활용되고 있다. 사용되는 동위원소는 일반적으로 ^{192}Ir , ^{60}Co 및 ^{137}Cs 등이며, projector 혹은 gauge 장치에 밀봉선원 형태로 장착된다. 특히 비파괴검사에서 활용되고 있는 운반용기의 구조는 밀봉선원의 장입과 탈착이 용이하도록 S형 혹은 U형 형태의 안내관을 갖고 있다. 방사성 동위원소가 운반용기 내부에서 안내관의 중심에 장착되어 운반 또는 보관되고 있고, 방사선차폐 측면에서 S 혹은 U형상 내부에 비어 있는 공간을 고려한 차폐형상을 결정하는 것은 어렵다. 이러한 형태의 해외 운반용기가 갖고 있는 차폐형상은 안내관을 중심으로 3차원의 임의의 형상을 갖고 있다.

또한, 운반효율 측면에서 방사성운반용기의 중량을 최소화 시켜야하므로 전체 중량의 약 50 %을 차지하는 차폐 중량을 줄이는 것이 중요하다. 이러한 차폐형상의 좌표 값을 일반적인 설계도구인 3차원 CAD 시스템으로 찾아 표면을 생성시키는 일은 어렵다. 그리고, 차폐체 주형에 대한 기계가공은 3차원 CAM가공으로 기하학적 수치 표현이 불가능한 3차원 임의의 표면 자료를 직접 설계자가 만들어 내어야 한다. 따라서 본 논문은 S형 안내관을 감싸고 있는 차폐 형상을 결정하기 위해 차폐 표면의 좌표 값을 생성하는 계산과 FORTRAN 프로그램[1] 작성에 관한 내용을 기술하였다.

2. 차폐형상 프로그램의 구성

2.1 차폐형상 결정에 대한 알고리즘

차폐형상의 중요한 요소는 안내관의 형상과 크기이다. 밀봉선원은 안내관을 따라 이동 혹은 고정되므로 안내관 형상 및 크기는 밀봉선원 어셈블리의 길이 및 굽힘 반경에 따라 결정되어야 한다. 따라서, 밀봉선원 어셈블리의 외경과 길이에 따라 안내관의 내경과 길이가 결정된다. 밀봉선원 어셈블리는 유연성이 좋은 복합 스프링 형태이므로 굽힘 정도가 상당히 좋으나 안내관의 경우는 제작 굽힘 반경의 제한을 받는다. 차폐 형상결정에서 또 다른 중요한 요소 중에 하나는 안내관의 굽힘 각도이다. 이는 차폐체의 전체적인 형상에 영향을 끼친다. 그림 1은 계산평가에 적용하였던 안내관의 형상이다.

S형과 U형 안내관에 대한 차폐체 형상결정 방법은 기본적으로 동일하다. S형 차폐형상은 안내관의 길이방향에 대한 수평 단면과 방사선의 중심을 통과하는 수직 단면에 대해 대칭이므로, 1/4형상에 대한 표면좌표 계산을 하였다. S 및 U형 안내관에 대한 차폐체의 표면형상 좌표 값을 생성하는 프로그램은 다음과 같은 순서로 계산하여 평가하였다.

- S형 안내관의 형상화
- 안내관 수직단면의 중심으로부터 반경방향으로 임의의 점을 생성
- 방사선원 중심과 안내관 반경방향의 점과의 연결선에 대한 차폐체 두께 계산
- 안내관 내부공간의 길이를 제외시킨 최종두께 및 차폐면 좌표 값 결정

- U형 안내관의 고려사항 평가
- 차폐 형상의 부피계산 및 중량평가

차폐형상을 결정하기 위한 알고리즘은 그림2와 같다. 안내관의 표면좌표 값은 계산에 있어 매우 간단하다. 안내관의 수직 단면을 국부 좌표계에서 2차원적 좌표값을 계산한 다음, 그 단면을 전체 좌표계에서 안내관의 중심을 따라 수평과 회전시켜 3차원 좌표값을 생성시킨다. 차폐형상을 위해, 안내관의 중심선상의 점(점1)으로부터 수직단면의 반경방향으로 일정한 증분을 가진 점(점2)을 생성한다. 차폐 두께계산 평가를 위해 방사선선원의 중심과 점2을 연결하는 선상의 임의의 점을 방사선원 중심으로부터 점2 방향으로 다시 증분을 시켜 나가면서 새로운 점(점3)을 생성시킨다. 이 증분점인 점3에 대해 튜브의 내부공간에 존재하는지의 여부를 판단한 후 다시 일정한 증분만큼 연결선 방향으로 진행시킨다.

그림 3과 같이 안내관을 감싸는 차폐체의 기본 두께를 고려하여야한다. 그 이유는 차폐형상의 최소화뿐만 아니라 기계적 측면에서 안내관의 보호를 위해 기본적인 차폐체 두께가 요구되기 때문이다.

이 때 안내관 튜브와 연결선의 교점은 정확하게 계산되어야 하므로, 그 교점은 **bi-section method**로 결정하였다.[2],[3] 이 때에 교점의 정확도에 따라 차폐 곡면의 매끄러운 정도에 영향을 받기 때문에 교점 계산의 결정 오차를 $1E-5$ mm로 하였다. 그 연결선은 안내관 내부로부터 출발하지만 그 선상에서 증분량에 따라 차폐체의 영역에 있다가 다시 안내관을 통과할 수 있으므로 이러한 내부공간을 다시 제거시켜 방사선원과 연결선 끝점인 점3까지의 거리 즉 차폐두께를 계산하였다. 이 때 계산된 차폐 두께가 주어진 차폐두께를 만족시키지 못하면 다시 점2에서 반경방향의 증분량을 증가시켜 상기의 과정을 주어진 차폐두께가 만족할 때까지 반복한다. 상기의 설명에 대한 전반적인 기본 알고리즘은 그림 4와 같다.

이와 같이 안내관의 수직단면에서 발생된 점2을 차폐표면 좌표로 결정한 이유는 다음 단계에서 생성된 좌표 점을 곡선과 면으로 발전시키기 위해 계산된 좌표의 공간상 분포가 일정하도록 유지시키기 위함이다.

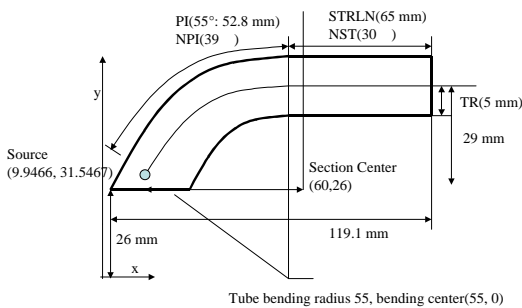


그림 1. 안내관의 형상 및 크기.

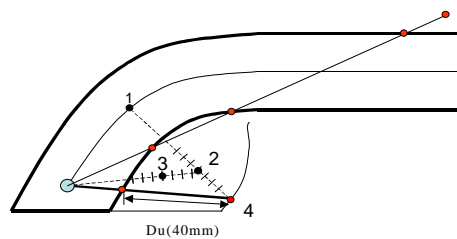


그림 2. 안내관 내부공간을 고려한 차폐두께 평가.

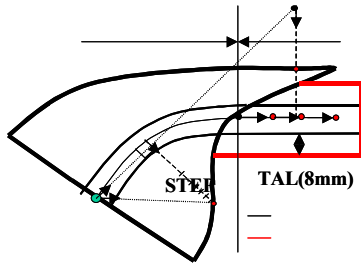


그림 3. 차폐 형상의 기본골격.

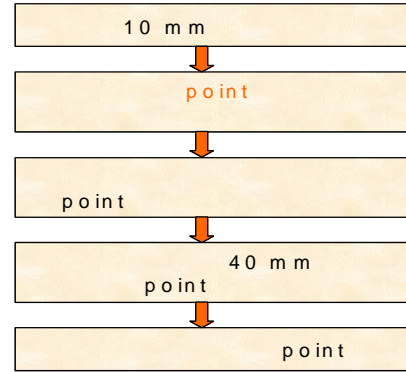


그림 4. 차폐 두께 평가를 위한 기본 알고리즘.

2.2 U형 안내관에서의 고려사항

S형 안내관의 차폐형상을 결정하는 알고리즘은 동일하지만, 운반용기에서 U형상 안내관을 사용하는 예는 밀봉선원 하나가 아니라 두 개를 장착하는 경우이다. 따라서 각각의 안내관에 하나씩 밀봉선원이 장착되며, 한 쪽의 안내관에 장착된 밀봉선원에 대한 차폐는 S형 안내관의 차폐형상과 동일한 방식으로 결정되지만, 상대편 안내관으로 영향을 끼치는 평가가 필요하다. 특히, U형상의 중심에 두 개의 밀봉선원이 같이 장착될 수가 없으므로, 중심으로부터 밀봉선원의 길이의 절반 크기와 밀봉선원이 상대편 안내관으로 진입하지 못하도록 구조적으로 분리된 형상의 크기를 고려하여야 한다. 따라서, U형상 중심으로부터 각각의 밀봉선원의 장착위치는 간격이 필요하다. 이렇게 편심된 위치에서 상대편 안내관 쪽의 차폐형상을 평가해야 하므로 1/4형상에 대한 평가만으로는 부족하여 1/2형상에 대한 평가를 하여야 한다.

U형 안내관에서 차폐형상의 평가 방식은 먼저 U형상의 안내관을 중심면에 대해 대칭시킨다. 한 쪽의 밀봉선원 중심에서 상대편의 차폐형상을 평가할 때 J형상의 안내관을 기본 골격으로 하여 평가하며 앞의 방식과 동일한 알고리즘에 따라 차폐표면을 결정한다. 이렇게 결정된 형상은 비대칭이 되며, 후자에 평가된 차폐형상과 초기의 차폐 형상의 크기를 비교하여 큰 쪽으로 최종 형상을 결정한다.

2.3 차폐중량 계산방식

복잡한 방식으로 계산된 차폐형상의 목적은 결국 운반용기가 최소중량을 갖기 위함이다. 3차원 차폐형상에 대한 중량 계산의 방법을 프로그래밍하여 운반용기의 개념설계에 활용하고자 한다. 부피 계산은 바로 중량결과를 산출할 수 있으므로, 부피만 결정하면 된다. 생성된 3차원 좌표로부터 부피 양을 용이하게 계산하기 위해, 차폐형상 결정과정에서 1/4형상의 대칭면을 x-y 평면에 놓이도록 하였다. 차폐표면에 대한 좌표를 연결하는 spline

곡면을 계산하여 이에 대한 부피평가가 정확한 해를 가질 수 있으나[4],[5], 이와 같은 방식은 프로그램의 복잡성과 계산시간이 길어짐으로, 다음과 같은 방식을 채택하였다.

- 차폐표면을 삼각요소로 분할
- 삼각요소를 x-y평면에 projection 시킴
- 오면체에 대한 부피 및 중량계산

차폐표면의 삼각요소 분할은 초기 계산 결과를 배열(dimension array)로 기억되어 있으므로, 연차적으로 배열된 세 점을 재배열 시켜 간단히 정리될 수 있다. 차폐표면의 삼각요소를 x-y 평면에 projection하여 차폐형상의 부피를 오면체 즉 삼각기둥 형태의 요소로 분할시켰다. 부피계산을 위해 삼각기둥의 단면적 계산은 세 선분을 아는 경우에 사용하는 면적 공식을 적용하였고, 차폐표면까지의 높이는 세 점에 대한 Z 좌표의 평균값을 적용하였다. 이와 같은 방식으로 차폐형상의 부피와 중량을 평가하였다.

이와 같은 부피 계산방식에서 평가하기 어려운 부분은 차폐면이 x-y 평면에 수직하는 경우이므로, 이 요소는 삭제시켰다. 요소 분할된 삼각기둥 단면적의 선분의 길이가 1E-6 mm 이하일 때는 부피계산에서 생략시켰다.

2.4 차폐형상의 시각화 적용 프로그램

차폐 형상의 결과를 확인하는 방법은 계산결과를 바로 시각화하여 검토하는 것이다. 차폐형상 결과의 시각화를 위한 적용 프로그램은 그림5와 같다. 3차원 좌표의 계산은 Digital Visual Fortran compiler로 활용하였으며, 그 결과를 시각화시키는 것은 이 compiler와 연계된 Array Viewer로 사용하였다. 실제로 차폐체의 주형설계 도면자료를 만들기 위해서는 IDEAS 상용프로그램에서 곡선, 표면 생성을 시켜 CAM 가공에 필요한 IGS 형식의 파일로 전환시켰다.

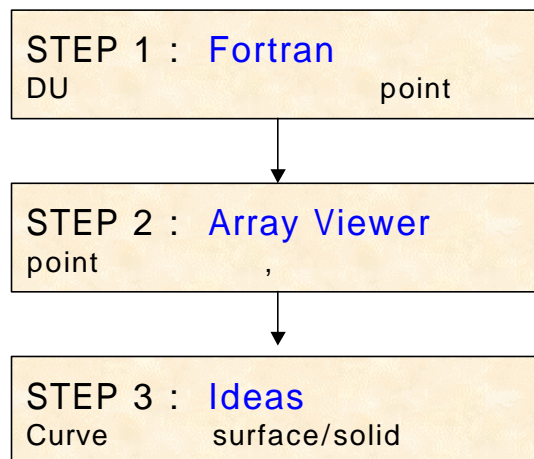


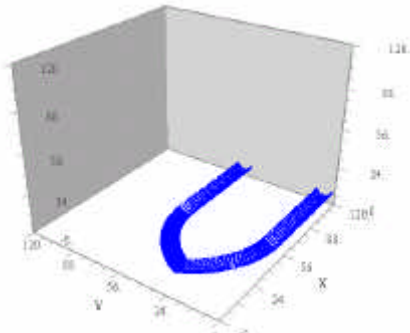
그림 5. 차폐형상결정의 적용 프로그램.

3. 차폐형상 결정을 위한 계산결과

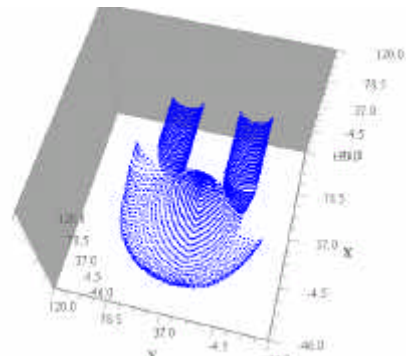
차폐 형상 결정을 위한 계산 프로그램에 대한 알고리즘 평가와 구체적인 계산결과를 평가하기 위해 다음과 같은 차폐 재질과 두께를 적용하였다. 차폐 두께는 MCNP의 계산결과에 따라 ^{192}Ir 27 Ci의 밀봉선원 1개가 장전하는 경우에 감손우라늄(DU: Depleted Uranium)의 두께 38.2 mm로 평가되었으며, 안내관 제작, 차폐체 주형 및 조립 등에서 발생할 오차를 고려하여 설계두께는 40mm로 정하였다. 안내관은 DU 구조 특성을 고려하여 티타늄 재질이 적용되었으며, 크기는 밀봉선원의 길이와 직경을 고려하여 외경 9.525 mm와 두께 1.651 mm로 정하였다.

U형 안내관의 차폐형상의 계산결과를 그림 6과 같이 Array Viewer 프로그램으로 확인한 결과이다. 첫 번째 그림은 U형 안내관의 형상을 보이고 있으며, 두 번째 그림에서 왼쪽의 차폐형상은 S형 안내관의 방식과 동일하게 계산된 결과이며, 오른쪽 차폐형상은 반대편 선원을 고려하여 결정된 차폐형상이다. 세 번째 그림은 양쪽의 차폐형상을 비교하여 차폐두께가 큰 부분을 나타내었으며, 네 번째 그림은 밀봉선원이 U형 안내관에 장착될 때 최종 차폐형상 결과이다.

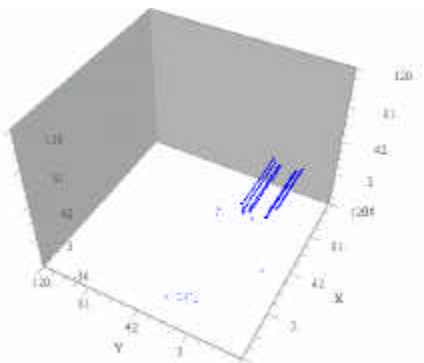
• U-Tube data



• Only one source stored : unsymmetrical shape



• Large Point on one side



• Final data

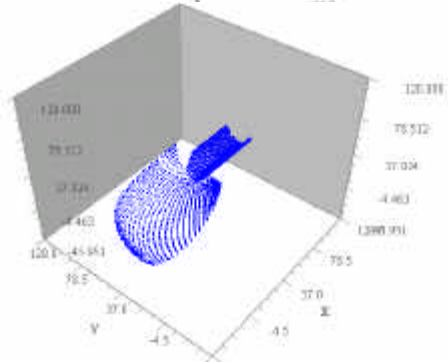


그림 6. U형 안내관의 차폐형상 결정과정.

U형 안내관에 감손우라늄 40 mm 차폐체의 형상에 대한 계산결과는 표 1과 2과 같다. 안내관 굽힘 반경이 일정하였을 때 선원 위치 변화와 차폐체 크기는 표 1과 같다. 작성된 계산 프로그램에서 안내관의 직선부분은 고정하였고 굽힘반경을 55 mm로 원점을 향해 회전시켜 평가하였다. 안내관의 중심각도를 5.°씩 증가됨에 따라 굽힘 원호의 길이의 증가와 함께 밀봉선원이 장착되는 원점 좌표 X 및 Y coord.은 원점을 향해 진행한다. 차폐체의 외형적인 크기는 표 1과 같이 길이와 폭이 증가하지만 높이 부분은 일정하였다. 이는 안내관의 중심면을 X-Y 평면에 놓았기 때문이며, 일정한 차폐 두께인 40 mm와 안내관의 외경 5 mm가 입력되어 높이는 일정하였다.

그림 7은 안내관 굽힘 반경 55 mm을 가질 때 굽힘각도의 증가에 따라 차폐체 중량을 평가한 것이다. 따라서, 차폐체의 중량은 굽힘 각도가 45도에서 80도까지 증가하였다가, 90도에서는 급격하게 감소하고 있다. 차폐체 자체의 최소 중량은 90 도가 유리하지만 차폐체 형상에 있어 길이 및 폭의 증가는 운반용기의 전체 중량을 증가시킨다. 차폐형상은 굽힘 각도가 증가하면 안내관을 따라 길쭉한 형상으로부터 중심부에 모이는 구형으로 변화된다. 안내관의 굽힘 각도가 증가함에 따라 차폐체 중량의 감소량은 1.7 kg에 불과하지만 차폐체 폭의 증가에 따른 운반용기 외형 크기에 해당하는 길이 증가분의 세제곱에 해당하는 부피 및 중량이 증가함으로써, 운반용기 전체 중량은 기하급수적으로 증가한다. 그러므로, 차폐체를 포함한 운반용기의 전체 중량을 고려한다면 굽힘 각도의 최소 값이 유리하다. 굽힘 각도를 작게 가는 경우도 안내관의 굽힘 제작특성이 악화됨으로 55 도 범위가 적당한 것으로 판단되었다.

표 1. 안내관 굽힘반경(55 mm)이 일정할 때 선원위치 및 차폐체 크기

Degree	Arc Length	X-Coord.	Y-Coord.	Length(mm)	Width(mm)	Height(mm)
45	43.19689	16.10913	38.89087	152.1	53.5	46
50	47.99654	12.86756	35.35332	154.6	54.9	46
55	52.7962	9.94664	31.5467	156.9	59.7	46
60	57.59586	7.3686	27.5	159.4	64	46
65	62.39551	5.15307	23.24401	161.1	68.8	46
70	67.19516	3.31691	18.81111	162.9	72.5	46
75	71.99482	1.87408	14.23505	163.9	75.8	46
80	76.79447	0.83557	9.55065	164.8	79	46
85	81.59412	0.20929	4.79357	165	81.2	46
90	86.39378	0	0	165	78.6	46

안내관의 중심각이 55 °로 일정하고 반경을 5 mm 씩 증가시킬 때 선원위치와 차폐 크기 변화는 표 2와 같다. 차폐체 형상 결정 프로그램에서 선원위치는 원점으로부터 1/4원을 그리고 그 법선에 안내관의 직선부분을 연결시켰고, 중심각의 측정시작점은 직선과 원이 만나는 점을 기준으로 설정하였기 때문에 선원 위치의 중심은 반경이 증가함에 따

라 원점으로부터 멀어져 갔다. 차폐체 크기는 굽힘반경이 증가함에 따라 차폐체 형상도 증가하고 있다. 그림 8과 같이 안내관의 중심각이 일정할 때 반경의 증가는 중량 변화에 있어 선형적으로 증가하는 것으로 평가되었다. 따라서, 반경을 최소화하는 것이 중량을 감소시켜야 하나 최소 반경을 55 mm로 결정한 이유는 반경이 작을수록 굽힘 안내관과 밀봉선원 어셈블리의 마찰량이 증가됨으로 최소 반경 50 mm보다 큰 55 mm로 결정하였다.

표 2. 안내관 중심각(55.)이 일정할 때 선원위치 및 차폐체 크기

Radius(mm)	Arc Length	X-Coord.	Y-Coord.	Length(mm)	Width(mm)	Height(mm)
50	47.99654	9.0424	28.67882	152.9	57.8	46
55	52.7962	9.94664	31.5467	156.9	59.7	46
60	57.59586	10.85088	34.41459	160.9	61.1	46
65	62.39551	11.75512	37.28247	164.9	62.2	46
70	67.19516	12.65936	40.15035	168.8	64.3	46
75	71.99482	13.5636	43.01823	172.9	65.2	46
80	76.79447	14.46784	45.88612	177	67.2	46
85	81.59412	15.37208	48.754	181.1	68.1	46
90	86.39378	16.27632	51.62188	185.2	70	46
95	91.19344	17.18056	54.48976	189.7	70.8	46
100	95.99309	18.08479	57.35764	194.1	72.5	46

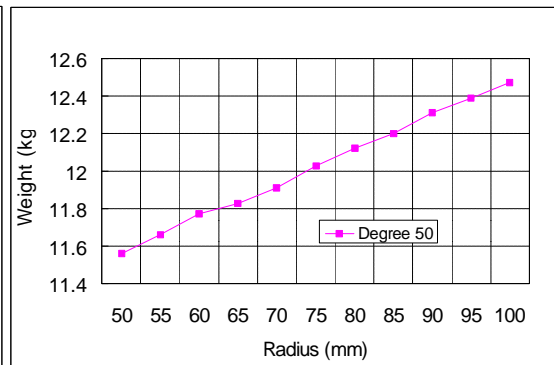
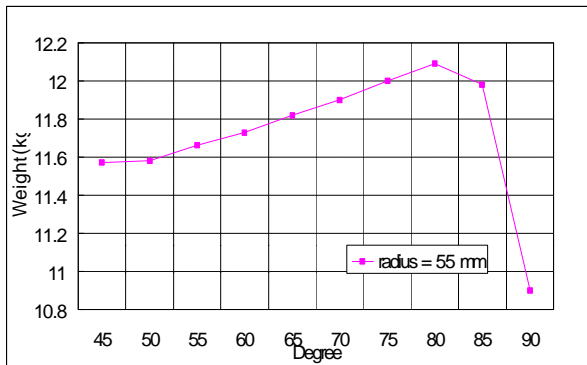


그림 7. 안내관 굽힘 각도에 따른 차폐체중량. 그림 8. 안내관 굽힘 반경에 따른 차폐체중량.

차폐 형상에 대한 계산결과를 시각화 및 차폐체 주형에 대한 자료는 그림 9와 같은 과정을 거쳐 작성되었다. 처음 그림은 3차원 좌표의 계산 결과를 시각화시킨 것으로 Array Viewer을 사용하였다. 그 다음에 IDEAS 상용프로그램으로 곡선, 표면 생성을 시켜 차폐체의 주형설계 도면자료를 만들었다. 3차원 주형을 제작하기 위해 CAM 가공에 필요한 IGS 형식의 파일로 전환시켰다. 그림 10은 계산평가된 1/4형상을 대칭시켜 만들어진 차폐형상의 최종결과이다. 이 결과는 S형 혹은 U형의 안내관에 장착된 밀봉선원을 차폐하

기 위한 최적화된 형상은 구 혹은 원통형과 같은 일반적인 기하학적 형태를 갖고 있지 않음을 보여주고 있다. 만약 이러한 계산과 차폐형상의 결정과정을 거치지 않고 일반적인 기하학적 형태를 갖는다면, 상당히 과도하거나 부족한 차폐 두께를 갖게 될 것이다. 이 과정에서 매끄러운 정도를 나타내는 차폐표면의 특성이 중요하며, 과도와 같은 표면형상은 CAM 가공에 적용되는 바이트의 크기로 인해 계산값보다 과도하게 가공이 되기 때문이다. 따라서, 현재의 계산방식에 spline 곡선 및 곡면의 생성을 보완할 필요가 있다.

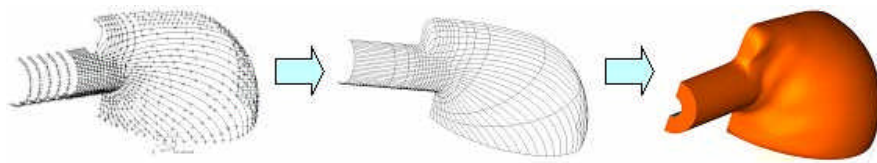


그림 9. 계산된 3차원 좌표로부터 차폐형상 결정과정

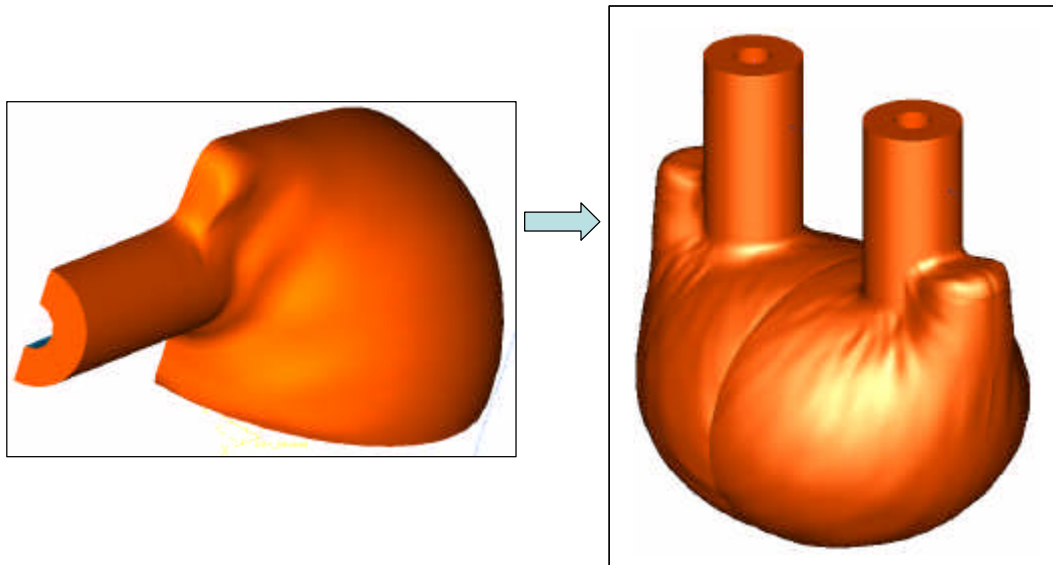


그림 10. 차폐형상의 최종결과.

4. 결 론

산업 및 의료계에서 활용 중인 방사성 밀봉선원을 S형 및 U형 안내관에서 장착할 때 차폐형상 결정에 대해서 다음과 같이 요약할 수 있다.

차폐형상은 2차원적 설계와 같이 기본적인 기하학적 형태를 가진다면 차폐측면에서 과도하거나 부족한 부분이 발생할 수 있으므로, 3차원 좌표 계산에 의한 평가를 통해 중량 최소화를 시킬 수 있는 최적화 평가가 필요하다.

차폐 형상 평가에 있어 안내관의 형상이 중요하다. S형 혹은 U형 안내관이 차폐형상에 중요하게 영향을 미치는 변수는 굽힘 각도와 반경이다. 굽힘 각도 및 반경에 따라 차폐체

자체의 중량을 평가하는 것뿐만 아니라 운반용기 전체 크기 및 중량에 미치는 영향을 고려해야한다.

S형 및 U형 안내관의 굽힘 반경은 작을수록 차폐 중량이 감소하지만 안내관 튜브의 제작을 고려한 최소 굽힘 반경을 고려하여야 한다.

감사의 글

본연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였음.

참고문헌

- 1) Digital Visual Fortran, John Wiley & Sons "Introduction to Programmer's Guide", Digital Equipment Corporation, 1998.
- 2) William H. Press, Saul A. Teukolsky,.. etc. "Numerical Recipes in FORTRAN", Cambridge University Press, 1992.
- 3) Melvin J. Maron, Robert J. Lopez, " Numerical Analysis", Thomson Information -Publish Group, 1991.
- 4) Michael Mortenson, , "Geometric Modelling", John Wiley & Sons, 1985.
- 5) Vera B. Anand, "Computer Graphics & Geometric Modelling for Engineers", John Wiley & Sons, 1992.