2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전부지 기초지반의 공학적 특성 시험방법 및 절차에 관한 고찰 : 압축강도 및 암반변형계수

Study on the Testing Method and Procedures for Engineering Properties of NPP Site : Compressive Strength and Rock Mass Deformation Modulus

심 택 모, 이 상 국, 노 명 현, 이 현 우

한국원자력안전기술원
대전시 유성구 구성동 19

요 약

이 연구는 원전부지 기초물질의 공학적 특성을 결정하는데 있어서의 시험방법 및 그 절차에 대해 최소 요건을 도출하기 위하여 시도되었다. 일 단계 연구로서 원전부지 기초지반의 지내력과 침하량 평가에 중요한 요소인 압축강도와 현장 암반변형계수에 대해 영광3·4호기, 월성1호기 사용연료 저장시설, 월성2·3·4호기 및 울진3·4호기 부지 자료를 이용하여 이들 특성값을 정한 시험법과 그 절차를 고찰하고 각 원전별로 이들을 비교·검토하였다. 특성치 분석에서 제외되었던 시험데이터를 이용한 재분석도 시도하였으며 특히 월성2호기의 경우 침하량을 이용한 분석도 수행하였다. 분석결과, 원전부지 기초암반의 압축강도를 결정하기 위해 일축압축시험과 점재하시험이, 암반변형계수의 경우 공내변형시험, RQD 대비법, RMR 대비법 및 속도지수 대비법이 이용되었으며, 이들 특성치를 정하는데 있어 시험결과에 대한 신뢰성을 고려하기보다는 여러 시험값 중에서 낮은 값을 특성치로 선정하는 경향을 보여 주는 것으로 나타났다.

Abstract

This study have been carried out for attempting to develop the minimum requirements of testing methods and procedures for determining engineering properties for foundation bedrock at NPP site. As a first phase study, for the compressive strength and deformation modulus of rock important to the safety evaluation of the bearing capacity and settlement of the foundation, the testing methods and procedures for determining the two characteristic values were reviewed and comparison between each value of the sites under studying was carried out. The data originated from Wolsong 1 spent fuel dry storage site and the NPP sites of Yonggwang 3·4, Wolsong 2·3·4, and Ulchin 3·4. Also, re-evaluation was made for the data excluded from original analysis, and especially re-calculation of rock mass deformation modulus of Wolsong unit 2 was conducted by using the settlement data. The analysis result show that the uniaxial compressive and point load tests had been conducted for compressive strength and the jack test, hydraulic pressure meter test, and correlation methods using RQD, RMR, and velocity index were conducted for rock mass deformation modulus. It is also found that there was a tendency to decide characteristic values by selecting the lower value among various test results rather than considering the credibility of the test results.

1. 서 론

이 연구는 원자력 발전소 구조물 기초지반의 공학적 특성을 결정하기 위한 표준화된 방법을 도출하기 위하여 시도되었다. 이를 위한 기초연구로서 일차적으로 정적특성인 압축강도와 암반변형

계수를 그 대상으로 하였으며 이들 두 특성을 결정하기 위하여 국내 원전에서 그동안 실시해왔던 시험방법과 특성치 결정절차를 고찰하고 각 원전에 대해 비교·분석하였다. 압축강도와 암반변형계수는 원전 구조물 기초의 침하 또는 부등침하와 기초지반의 지내력을 평가하는데 있어 중요한 요소로서, 이들에 대한 특성치는 지표지질조사, 시추조사, 각종 현장시험 및 실내시험 결과 등을 종합하여 결정된다. 월성1호기 사용연료저장시설, 월성2,3,4호기, 영광3,4호기, 울진3,4호기 부지기초 암반의 압축강도 및 암반변형계수에 대해 이들 특성치를 결정하기 위한 시험방법과 그 결정 절차를 고찰하였으며, 특성치 결정을 위한 분석시 제외되었던 자료들을 이용하여 특성치에 대한 재분석과 실제 침하량을 이용한 변형계수의 재평가도 시도하였다.

2. 압축강도(Compressive strength, Qu) 결정

압축강도는 기초암반의 지내력 평가에 이용되는 유용한 요소이다. 압축강도는 자연상태의 압력이 고려된 삼축압축시험에 의하여 구하여야 하나, 실제적인 상태의 재연과 시험방법의 어려움 및 비용 등의 관계로 일축압축강도를 측정하는 시험이 많이 이용된다. 일축압축강도를 측정하기 위한 시험에는 일축압축강도시험과 점재하시험(Point Load Test, PLT)이 있다.

일축압축강도시험은 시추에 의해 구해진 암석 시료의 압축강도를 직접 측정하는 시험으로서 시추 코아의 길이가 직경(D)의 2~3배 정도 되도록 하여 시험기기에 설치한 후, 시추 코아의 축 방향으로 서서히 압력을 가하여 파괴가 일어났을 때의 압력(P)과 이 압력을 받은 시추 코아의 단면적(A)을 이용하여 $Q_u = P/A = 4P/\pi D^2$에 의해 압축강도(Qu)를 구한다. 이렇게 하여 구한 시험값은 시료의 직경과 높이(h)의 비가 일정한 조건(h/D=2)으로 보정($\sigma c_2 = 8\ \sigma c_1/(7 + 2D/h)$, σc_1: 시료에 대한 일축압축강도, σc_2: h/D=2인 표준상태로 보정한 일축압축강도)한 후 구한다.

점재하시험은 일축압축강도시험을 할 수 있는 충분한 수의 시추코아가 준비되지 않았을 때, 점재하 강도지수(Index)를 구하기 위한 현장 시험법이다. 먼저 시추코아 또는 암편을 점재하 시험기에 장치한 후 암편의 수직방향으로 서로 마주보는 압력을 가하였을 때 파괴되는 압력(P)와 이때의 코아 직경(D)을 이용하여 점재하지수(I_s)를 $I_s = P/D^2$에 의하여 계산한다. 이렇게 구한 점재하 지수는 코아의 직경이 50mm일 때를 표준으로 한 크기로 보정한 점재하 강도지수($I_{s(50)}$)를 $I_{s(50)} = F * I_s$ (F: 보정계수, $(D/50)^{0.45}$, I_s : 시험에 의하여 계산된 점재하지수)을 이용하여 구한다. 일축압축강도는 점재하 강도지수에 비해 20-25배 정도이며, 일반적으로 $Qu = 24 * I_{s(50)}$을 많이 이용한다. 점재하 강도지수와 일축압축강도와의 대비지수를 구하기 위해서는 동일한 위치에 있는 동일 암석에 대해 두 시험을 실시하고 그 결과로부터 대비지수를 구하여야 한다.

3. 암반변형계수(Rock mass deformation modulus, Er) 결정

기초암반을 구성하는 전체 암석(Rock mass)의 특성을 나타내는 변수로서, 암반 내 절리의 특성과 함께 상부 구조물의 하중에 따른 침하 또는 부등침하 평가를 위한 입력으로 이용된다. 암반변형계수는 현장에서 응력(Stress)-변형율(Strain)의 관계를 직접 측정하는 현장시험과 관련 변수들 간의 관계를 이용하여 결정하는 대비법 두 방법을 종합하여 구한다.

현장시험으로는 잭을 이용한 시험(Goodman Jack 시험 등)과 압력튜브를 이용하는 시험(Elastometer시험 등) 등이 있으며, 대비법으로는 RMR(Rock Mass Rating), RQD(Rock Quality Designation) 및 속도를 이용한 방법 등이 있다. RMR 대비법은 다시 암석의 압축강도, RQD, 절리의 간격(spacing), 절리의 상태(표면 거칠기, 피복물질 및 절리의 폭) 및 지하수의 상태에 따라 RMR 점수를 부여한 후 이를 다시 절리면의 기하학적 분포특성에 따라 보정을 한 후 RMR과 암반변형계수와의 관계(Bieniawski, 1978)를 이용하여 암반변형계수를 구한다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 영광3,4호기 부지 기초암반의 압축강도 및 암반변형계수

부지의 기초암반을 구성하는 암은 Rhyodacite, 안산암 및 응회암이다. 압축강도와 암반변형계수가 이들 세 암종별 그리고 풍화도별 큰 차이를 보이지 않기 때문에 호기별로 특성값을 구하였다.

압축강도는 일축압축시험과 점재하시험을 이용하여 구하였다. 66개 시료에 대한 일축압축시험과 두 차례에 걸친 점재하 시험(1984년(73회)과 1987년(147회))이 실시되었다. 일축압축강도와 점재하강도지수 간의 대비관계를 규명하기 위한 시험을 실시하여 $Q_u=38.27*I_{s(50)}$ (1984년), $Q_u=18.5*I_{s(50)}$ (1987년)의 관계를 구하였다. 이 대비관계를 이용하여 총 109개의 이용가능한 점재하시험과 상기 일축압축시험에서 구해진 결과를 평균하여 3호기의 경우(시험수 92) 1,011 kg/cm^{2}로, 4호기의 경우(시험수 83) 1,167 kg/cm^{2}로 구하였다.

암반변형계수는 정적탄성계수-RMR, 정적탄성계수-RQD, 정적탄성계수-속도지수의 대비관계 및 현장변형계수의 직접측정에 의하여 구한 4개 값의 평균치로 결정하였다. 먼저 정적탄성계수(E_{50})는 일축압축시험에서 구한 값 그리고 점재하 시험에 의한 압축강도에 $E_{50}=(200\sim500)*Qu$의 관계를 이용하여 구한 값의 평균값으로 정하였다. 3호기의 경우는 3.91×10^5 kg/cm^{2}이며, 4호기의 경우 4.44×10^5 kg/cm^{2}이다. 이렇게 구한 탄성계수를 기본으로 하여 상기 3가지 대비법을 이용하여 암반변형계수를 구하였다. 대표적인 특성값은 표 1에 나타내었으며 그림 1은 일축압축강도 선정절차를, 그림 2는 암반변형계수 선정절차를 도식화하여 나타낸 것이다.

표 1. 영광 3,4호기 각 시험방법에 따른 암반변형계수($\times10^5$ Kg/cm^2)

호기 / 방법	영광 3 호기		영광 4 호기	
	내진 I 급 구조물	비내진 I 급 구조물	내진 I 급 구조물	비내진 I 급 구조물
RQD(%) 대비법	2.41	2.17	2.07	1.65
RMR 대비법	3.80	2.20	2.60	2.00
In-situ Test	2.37	2.30	2.87	3.20
속도지수 대비법	2.08		2.01	
특성값	2.40		2.30	

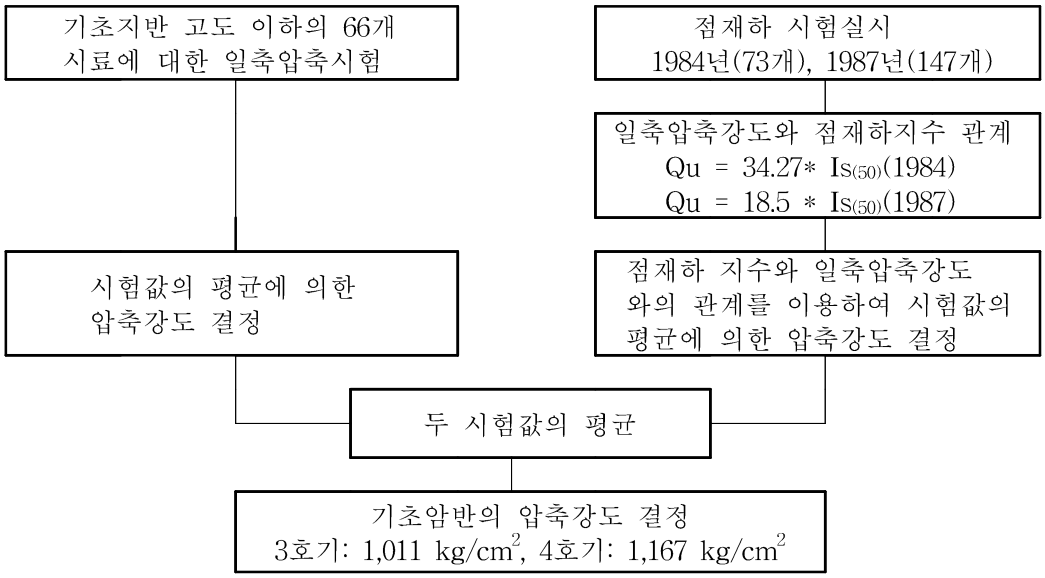

그림 1. 영광 3,4호기 압축강도의 결정 절차

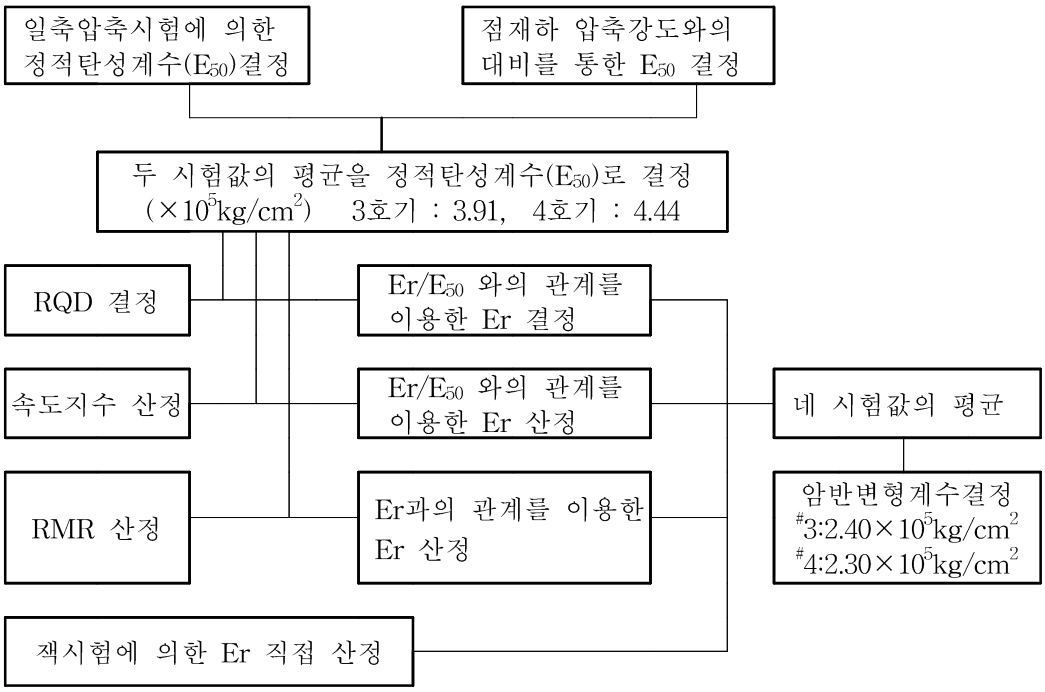

그림 2. 영광 3,4호기 암반변형계수의 선정절차

4.2. 월성1호기 사용연료 저장시설 부지 압축강도 및 암반변형계수

부지의 기초암반을 구성하는 주요 암석은 아질라이트로서, 단단하고 치밀 견고한 세립질의 퇴적암이다. 압축강도는 일축압축시험(5회)과 점재하시험(33회)에 의하여 890 kg/cm^{2}로, 암반변형계수는 현장잭시험(4개공 20회), 속도 대비법 및 절리간격과의 대비법에 의하여 34,200 kg/cm^{2}로 정하였다. 그림 3은 월성1호기 사용연료저장시설 부지의 암반변형계수(Er) 결정 절차를 도식적으로 나

타낸 것이다.

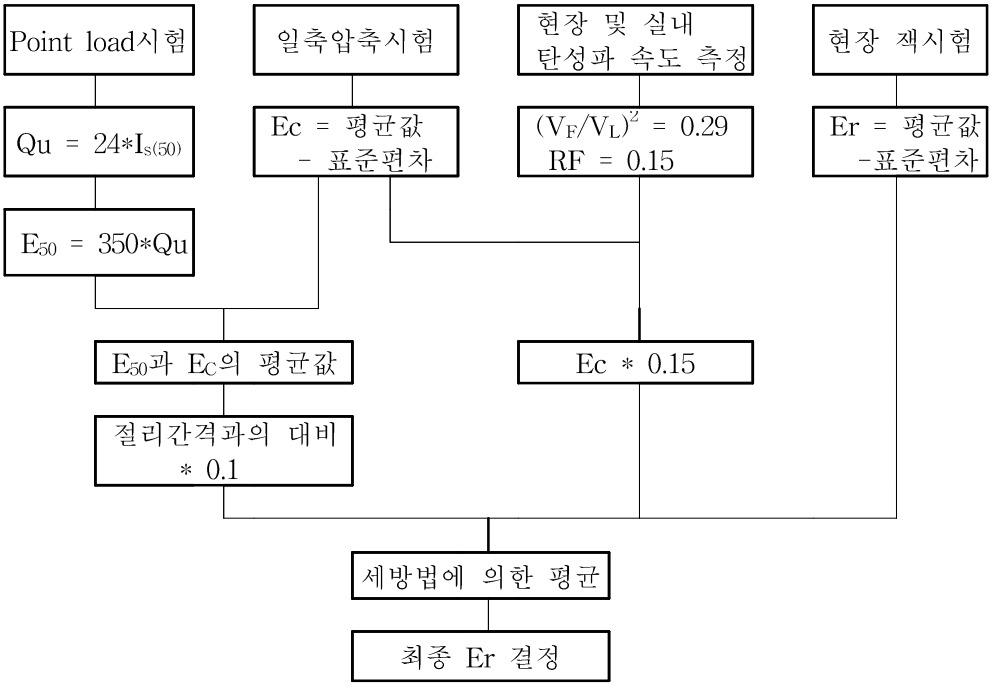

그림 3. 월성1호기 사용연료저장시설 부지의 암반변형계수(Er)의 결정 절차

4.3. 월성2호기 부지 압축강도 및 암반변형계수

주요 구조물의 기초암반은 석영섬록암과 석영안산암 그리고 아질라이트로 구성되어 있고 이를 안산암맥이 관입하여 발달하고 있다. 기초암반은 월성1호기 사용연료저장시설 부지와 함께 절리가 많이 발달된 파쇄가 심한 상태를 보여준다. 지내력 산정시 기초지반의 상태를 암석이 아닌 과립상 토양(granular soil)으로 가정하여 안전계수를 구하였다. 정밀지질조사보고서에 제시된 자료와 추가 조사후의 개정정밀지질조사보고서에 수록된 값을 이용하였다.

4.3.1. 정밀지질조사보고서에서의 압축강도 및 암반변형계수

압축강도는 점재하시험(18회)을 실시하여, Qu = 24 * $I_{S(50)}$을 이용하여 결정하였다. 석영안산암(시험수 8)은 1,897 kg/cm^2, 안산암(시험수 10)은 431 kg/cm^2 을 그리고 아질라이트(시험수 26)는 월성1호기 사용연료저장시설에서 조사된 1,954 kg/cm^{2}으로 정하였다.

암반변형계수는 압축강도와 절리간격과의 대비법 그리고 현장에서의 공내 변형시험에 의한 변형계수를 평균하여 구하였다. 암종별 변형계수는 표 2와 같다.

표 2. 정밀지질조사보고서에서의 암종별 변형계수(×10^4 kg/cm^2)

구 분	석영섬록암	석영안산암	안산암	아질라이트
공내변형시험	1.75	2.15	-	5.03
절리간격대비	-	6.64	1.51	6.84
평균값	1.75	4.40	1.51	5.94

4.3.2. 정밀지질조사보고서 개정본에서의 압축강도 및 암반변형계수

압축강도를 구하기 위하여 점재하시험(PLT)을 추가적으로(26회) 실시하였으며, 정밀지질조사에서 제외되었던 집괴암과 2호기 부지에 분포하는 아질라이트에 대해서도 시험(1회)이 이루어졌다. 추가조사에 의한 암종별 압축강도는 표 3과 같다.

표 3. 추가조사(PLT)에 의한 암종별 압축강도(kg/cm^2)

구 분	석영섬록암	석영안산암	안산암	아질라이트	집괴암
시 험 수	5	6	7	1	7
평 균 값	905	422	743	771	1335

암반변형계수를 구하기 위하여 정밀지질조사에서 제외되었던 안산암과 집괴암에 대해서도 조사가 이루어졌다. 이중 석영섬록암에 대하여 이상치를 보여준 값($11.9\times10^4 Kg/cm^2$)은 전체적인 경향에서 훨씬 벗어나고 있어서 그 신뢰성이 문제시되어 특성치 산출을 위한 값으로서는 제외되었다. 추가조사에 의하여 구해진 암반변형계수는 표 4와 같다.

표 4. 추가조사에 의한 최종 암종별 변형계수($\times10^4 kg/cm^2$)

구 분	석영섬록암	석영안산암	안산암	아질라이트	집괴암
공내변형시험	1.27	1.52	0.98	0.72	0.50
절리간격대비	3.17	1.48	2.60	2.70	4.67
평균값	2.22	1.50	1.79	1.71	2.59

압축강도의 경우, 점재하 시험 결과에 대비지수 24를 이용하여 그 평균값을 특성치로 정하였다. 2차에 걸친 시험에서 석영안산암의 경우 압축강도는 1,897 kg/cm^2에서 422 kg/cm^2으로 현저히 감소한 반면, 안산암의 경우 431 kg/cm^2에서 743 kg/cm^2으로 증가하였다. 또한 정밀지질조사에서의 특성값은 (평균값-표준편차)를, 추가 시험의 특성값은 평균값으로 정하였다. 정밀지질 조사에서의 결과는 월성1호기 사용연료 저장시설부지에서 실시된 조사결과와 유사하나 추가시험의 결과는 이와는 대조적인 결과를 보여준다. 특히 두 암종의 특성값 대소관계가 두 차례의 시험을 통해 역전되었음을 보여 준다. 침하 평가에 이용되는 암반변형계수를 압축강도로부터도 구한다는 점을 고려한다면 예상되는 상대적인 침하량 또는 부등 침하량을 정확하게 평가할 수 없으므로 이 값을 이용하는 데는 주의가 요구된다고 할 수 있다. 따라서 정밀지질조사 시험에서의 점재하 시험에 의한 압축강도는 (평균-표준편차) 값을 특성치로 하고 시험방법상의 가중치를 고려하여 재분석한 결과를 표 5에 나타내었다. 석영안산암은 그 특성값이 크게 증가되고 안산암은 그 값이 감소되었음을 보여 준다.

표 5. 전체 데이터를 이용한 월성2호기 압축강도의 가중평균값(kg/cm^2). ( )안의 숫자는 시험수임

구 분	석영섬록암	석영안삼암	안산암	집괴암	아질라이트
일축압축시험(평균값)	680(1)	454(3)	196(3)	186(1)	146(2)
1차시험 (평균값 - 표준편차)		1,492(8)	348(10)		1,294(26)
2차시험(평균값)	905(5)	422(6)	743(7)	1,335(7)	771(1)
가중 평균값	790	743	353	760	662

암반변형계수는 점재하시험과 공내변형시험에 의한 두 값의 평균값을 특성치로 정하였다. 점재하시험의 경우 대비지수를 구하기 위한 시험을 실시하지 않았으며, 이 값에 상관치 350을 이용하여 정적변형계수를 결정하였다. 공내변형시험에 있어 석영섬록암의 경우 하나의 시험값이 전체 특성값을 좌우할 정도로 이상치를 보여주는 시험결과도 있다.

침하 평가 결과에 영향을 주게 되는 석영섬록암과 석영안산암 및 안산암의 시험결과는 공내변형시험과 절리간격 대비법에 있어 서로 반대되는 대소경향을 보여 준다. 특성치의 차이가 적지 않으나 석영섬록암과 석영안산암의 대소관계, 석영안산암과 안산암의 대소관계가 정밀지질조사시의 시험결과에 대해 역전되어 있다.

정밀지질조사 및 추가조사에 의한 모든 공내 변형시험 결과를 고려하여 가중평균에 의한 특성값을 구한 후, 절리간격과의 대비에 의한 시험결과를 이용하는 재분석을 실시하여 구한 특성값을 표 6에 나타내었다.

표 6. 전체 데이터를 이용한 월성2호기 암반변형계수($\times 10^4$kg/cm^2)

구 분	석영섬록암	석영안삼암	안산암	집괴암	아질라이트
공내변형시험	1.32	1.75	0.98	0.50	3.76
절리간격대비	3.04	3.26	1.61	4.16	4.2
평 균 값	2.18	2.50	1.30	2.33	3.98

4.3.3. 월성2호기 원자로건물 침하량 분석을 통한 암반변형계수의 평가

원자로건물의 Perimeter Wall을 설치한 이후 lower Dome을 설치하기 시작한 '93년 4월 말까지는 기반암에 영향을 줄만큼 큰 하중을 부과하는 공사는 없었다. 따라서 lower Dome을 설치하기 직전까지 일어난 침하량 및 상대침하량을 SubBase, Base Slab 및 Perimeter Wall에 의한 일시 침하량으로 보고 이때의 기초지반에서의 암종 분포를 고려하여 각 암종의 변형계수를 계산하였다. 암반변형계수를 구하는데 이용한 평가식은 침하량 계산시 이용한 식을 그대로 적용하였으며 그 외 기초적인 가정과 값들도 같은 것으로 하였다. 침하계측기에 의한 위치별 침하량을 단순 비교한 결과, 석영섬록암은 최소한 세 곳에서 침하가 발생하였음을 추정할 수 있었는데, 추정 침하량은 XE-122에서 0.084cm, XE-123 지역에서 0.027cm 및 XE-124에서는 0.018cm였다(표 7 참조). 이들 침하량으로 부터 계산한 변형계수는 각각 3.19×10^4 kg/cm^2, 9.93×10^4 kg/cm^2 및 14.9×10^4 kg/cm^{2}이다. 이 값은 정밀지질조사보고서 개정본에 수록된 석영섬록암에 대한 변형계수보다 큰

값이다. 그림 4는 월성2호기 암반변형계수(×10^4 kg/cm^2)의 재분석 결과를 나타낸 것이며, 그림 5는 월성2호기 암반변형계수의 결정 절차를 도식화한 것이다.

표 7. 월성2호기 LVDT에 의한 침하량(단위 mm)

설치위치 \ 날짜		'92.11.24	'92.11.25	'93. 4.27	'93. 5. 4	상대침하량
XE-121	90m	20.09	20.10	20.12	20.12	0.03
	40m	-	-	20.93	20.9	-0.09(?)
	13m	20.27	20.29	20.35	20.36	0.09
XE-122	38m	20.0	19.99	19.08	19.08	-0.92
	23m	20.02	19.99	20.0	20.01	-0.02
	13m	20.04	20.02	19.28	19.18	-0.86
XE-123	90m	20.02	19.99	19.06	19.05	-0.97
	35m	20.01	19.98	19.96	19.96	-0.05
	13m	20.01	19.98	19.24	19.24	-0.77
XE-124	38m	-	-	-	20.01	-
	23m	20.21	20.21	-	20.03	-0.18
	13m	-	-	-	20.03	-

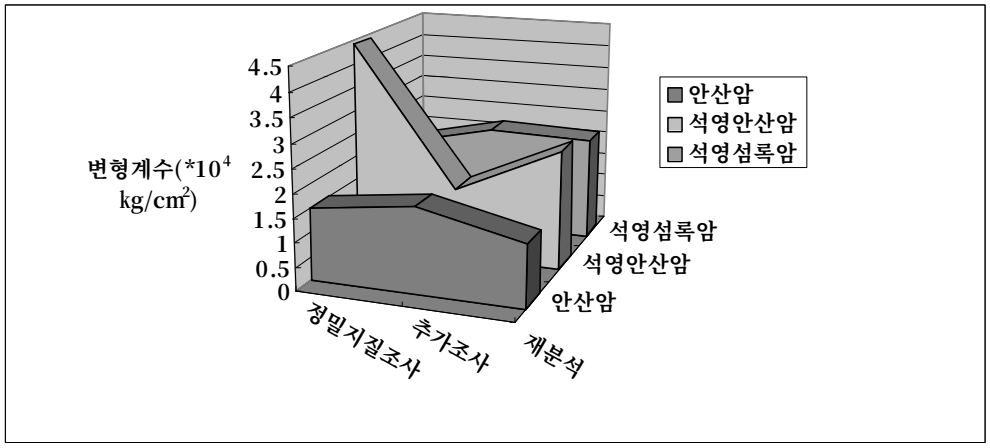

그림 4. 침하량을 이용한 월성2호기 암반변형계수(×10^4 kg/cm^2)의 재산정

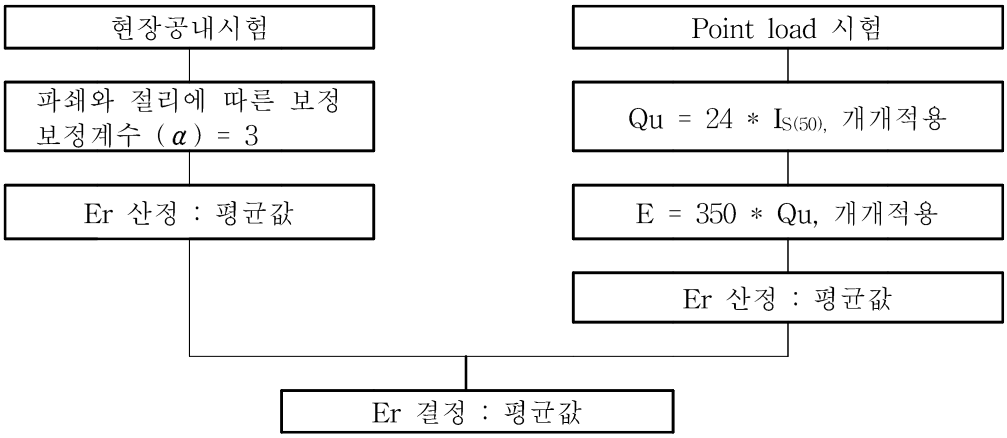

그림 5. 월성2호기 암반변형계수의 결정 절차

4.4. 월성3,4호기 부지의 압축강도 및 암반변형계수

부지의 기초암반은 주로 석영안산암으로 구성되어 있으며 기타 석영섬록암 및 안산암이 관입상으로 분포하고 있다. 부지 기초암반은 균열이 많이 발달되어 있으며 보통 풍화 내지 약간 풍화된 상태이다. 코아 회수율은 지층에 따라 변하며 RQD가 매우 불량한 암질이다. 이러한 특성으로 인하여 극히 제한된 시료에 대해 점재하 시험과 실내시험을 실시하였다.

압축강도는 일축압축시험에 의한 것과 점재하 시험에 의한 값 모두를 이용하여 구하였다. 즉 (일축압축시험에 의한 압축강도의 평균값×일축압축 시험수 + 점재하시험에 의한 일축압축강도의 평균값×점재하 시험수)/전체시험수의 과정을 거쳐서 호기별 구분을 하지 않고 정하였다. 석영안산암의 경우 2,465 kg/cm^2, 석영섬록암의 경우 1,500 kg/cm^2, 안산암의 경우 1,430 kg/cm^{2}이다.

암반변형계수는 현장에서 실시된 공내 변형시험의 평균값으로 정하였다, 호기별, 암종별로 구분하여 구하였다. 3호기의 경우 석영안산암은 1.33×10^{4}kg/cm^2(시험수 16), 석영섬록암은 1.50×10^{4}kg/cm^2(시험수 16), 안산암은 0.61×10^{4}kg/cm^2(시험수 9) 이며, 4호기의 경우 석영안산암은 1.02×10^{4}kg/cm^2(시험수 23), 석영섬록암은 1.82×10^{4}kg/cm^2(시험수 18) 이다.

4.5. 울진3,4호기 부지의 압축강도 및 암반변형계수

부지의 기초암반은 화강편마암과 그 변종으로서, 이들 암석은 변성기원이다. 기초암반이 변성기원의 유사 암종으로 구성되어 있기 때문에 암종에 따른 특성치를 구하지 않고 풍화의 정도에 따라 특성치를 구하였다. 부지조사보고서와 정밀지질조사보고서에 나타난 값을 이용하였다.

4.5.1. 부지조사보고서에서의 압축강도 및 암반변형계수

부지조사보고서를 작성하기 위한 시험이 1979년과 1986년에 실시되었다. 조사 당시에는 울진 1,2호기의 배치를 따르는 배치(안)에 따라 부지조사를 수행하였으며 특성값은 암종의 구분에 따르기 보다는 풍화의 정도에 따라 구하였다. 압축강도의 경우 실내시험에서 얻은 일축압축강도의 (평균치-표준편차)를, 암반변형계수의 경우 공내변형시험에 의한 값의 (평균값-표준편차/2)로 정하였다. 풍화도별 압축강도 및 암반변형계수는 표 8과 같다.

표 8. 풍화도별 특성치 (괄호안의 숫자는 시험수)

구 분	BRZ	MW	SW	FR
압축강도 (kg/㎠)	-	300(11)	759(31)	967(14)
암반변형계수(×10^{4}kg/㎠)	2.0(7)	4.0(8)	7.0(19)	11.3(11)

표 8에서 BRZ는 Broken Rock Zone을, MW는 보통 풍화암(Moderately Weathered), SW는 약간 풍화암(Slightly Weathered) 그리고 FR은 신선한 암(Fresh Rock)을 뜻한다.

4.5.2. 정밀지질조사보고서에서의 압축강도 및 암반변형계수

정밀지질조사보고서에는 영광3,4호기 및 표준형 발전소의 배치 형태를 고려한 배치(안)에 따른 울진3,4호기 부지에서의 정밀지질조사결과를 수록하고 있다. 부지조사보고서에 나타난 1979년도 조사자료는 이 보고서에서는 제외되어 있으나, 1991년도에 추가적으로 실시한 조사결과와 1986년

도에 실시한 조사결과가 특성치 결정에 이용되었다. 기초암반의 분류는 부지조사보고서에서 제시된 것과 동일하며 단지 BRZ라는 용어 대신 심히 풍화된 암(Highly Weathered, HW)이라는 용어를 쓰고 있다. 압축강도의 경우 일축압축시험에 의한 것과 점재하 시험에서 구한 값의 평균값으로 정하였다(표 9 참조).

표 9. 정밀지질조사보고서에 나타난 암종별 압축강도(kg/cm^2).
( )안의 숫자는 시험수를 나타냄.

구 분	HW	MW	SW	FR
점재하시험	85(9)	459(71)	760(59)	1,130(42)
실내시험값	-	710(20)	939(50)	1,220(40)
평균값	85	584	850	1,175

암반변형계수를 구하기 위하여 공내 변형시험, 속도지수 대비법 및 절리간격 대비법을 실시하였으나, 대비법에 의하여 구한 변형계수는 제외하고 현장 공내변형시험에 의한 변형계수만을 특성치로 정하였다. 암반변형계수에 대해 시험방법별, 암종별 값과 전체 평균을 표 10에 나타내었다. 그림 6은 울진3,4호기 암반변형계수의 선정절차를 도식화 한 것이다.

각 발전소별 일축압축강도와 암반변형계수를 결정한 시험방법 분석하여 표 11과 표 12에 나타내었다.

표 10. 풍화도별 각 시험방법에 따른 암반변형계수($\times 10^4$ Kg/cm^2)

구 분	HW	MW	SW	FR
공내변형시험	**0.89**	**3.92**	**10.6**	**15.0**
속도지수와의 대비	-	6.30	10.0	11.60
절리간격과의 대비	0.30	2.90	4.70	5.90
평 균 값	0.60	4.37	8.43	10.8
가중평균값	0.67[1)]	4.26	8.98	11.88

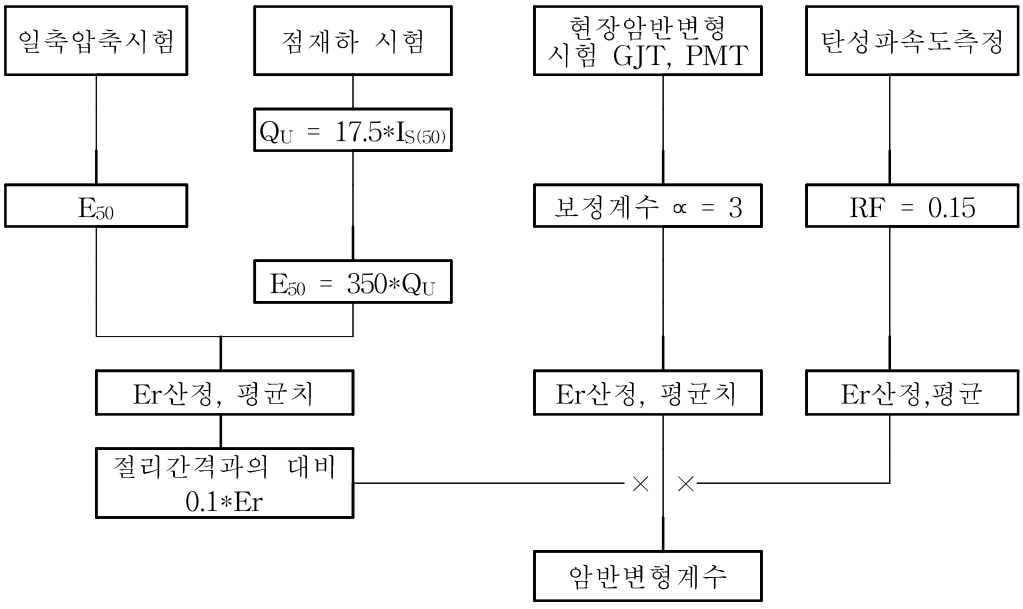

그림 6. 울진3,4호기 정밀지질조사보고서에서의 암반변형계수 결정 절차

표 11. 각 발전소별 일축압축강도 결정 방법 요약표

구분 / 호기	일축압축강도시험	점재하시험	비 고
영광 3,4호기	실시(66회)	실시(109회) Q_u=34.27*$I_{s(50)}$(1984) Q_u=18.5*$I_{s(50)}$ (1987)	
월성 2호기	미실시	실시(26회) Q_u=24*$I_{s(50)}$	
월성1호기 사용연료 저장시설	실시(5회)	실시(33회) Q_u=24*$I_{s(50)}$	
월성3,4호기	실시(5회)	실시(13회) Q_u=24*$I_{s(50)}$	
울진3,4호기	실시(110회)	실시(181회) Q_u=17.5*$I_{s(50)}$(1991)	

표 12. 각 발전소별 암반변형계수 결정 방법 요약표. * 각 시험 및 대비방법은 실제 이용된 것을 기준으로 작성된 것 임(O:시험실시, ×:시험미실시)

호기 / 구 분	영광3,4호기	월성2호기	월성1호기 사용연료저장시설	울진 3,4호기	월성 3,4호기
E_{50} 결정	일축압축시험 PLT	PLT	일축압축시험 PLT	×	×
RQD 대비법	O	×	×	×	×
RMR 대비법 (E_r/E_{50})	O	×	×	×	×
속도대비법 (E_r/E_{50})	O	×	O	×	×
현장암반시험 (GJT, PMT)	O (GJT)	O (PMT)	O (GJT)	O (GJT)	O (GJT)
절리간격과의 대비(E_{50})	×	O	O	×	×

표11과 12에 의하며 조사대상 발전소에 있어서의 일축압축강도와 암반변형계수를 결정하기 위한 시험방법을 보면 기초지반의 압축강도 및 암반변형계수를 정하기 위한 시험법으로 압축강도의 경우 일축압축시험과 점재하 시험을, 암반변형계수의 경우 현장에서의 공내변형시험, RQD 대비법, RMR 대비법 및 속도지수 대비법에 의한 방법이 이용되었음을 알 수 있다. 이것은 두 특성치를 결정하기 위한 시험방법과 특성치의 결정 절차 및 자료처리기법 등이 부지에 따라 서로 상이하다는 것을 보여주는데, 특히 현장 및 실내시험 전반에 걸쳐 시험수가 감소하고 있고 따라서 현장 지질조사자의 공학적 판정기준이 특성치를 정하는 데 있어 중요한 요소로 작용하고 있음도 알 수 있다(월성2,3,4호기, 울진3,4호기). 시험수에 따른 분산정도를 분석한 결과에 의하면 시험수가 증가하면서 분산의 정도가 감소하는 경향을 보여주는 부지가 있는 반면(영광 3,4호기) 시험수와 분산의 정도가 무관한 부지도 있음(월성2,3,4호기 및 울진3,4호기)을 알 수 있었다. 현장시험과 실내시험 결과의 상관성을 비교한 결과, 압축강도에 있어 영광3,4호기의 경우(압축강도값이 1,000kg/㎠

이상임) 실내시험에서의 결과와 현장시험에서의 결과가 90% 이상의 상관관계를 보여주는 반면 울진3,4호기의 경우 압축강도값이 낮을수록(1,000㎏/㎠ 이하)상관관계가 낮으며 강도값이 높을수록(1,000㎏/㎠) 90% 이상의 상관관계를 보여 주고 있다. 여타 부지에 대해서는 시험수가 극히 적고 시험에 적용되는 보정계수를 규명하는 시험이 이루어지지 않았기 때문에 이러한 관계를 규명할 수 없었다. 또한 압축강도 결정시 월성1호기 사용연료 저장부지와 월성2호기 부지를 제외하고는 실내시험 및 현장시험 모두를 실시하였으며, 월성1호기 사용연료 저장부지의 경우 실내시험만을, 월성 2호기의 경우 점재하 시험만을 이용하였다. 암반변형계수를 구하는데 있어 영광3,4호기, 월성1호기 사용연료 저장부지 및 월성2호기 부지의 경우 암반 공내 변형시험과 대비법을 이용하였으나, 월성3,4호기와 울진3,4호기의 경우 공내 변형시험만을 이용하였다. 일축압축강도와 암반변형계수와의 관계를 분석한 결과 영광3,4호기의 경우 Er = (367~386)*Qu의 관계가, 울진3,4호기의 경우 Er = (594~711)*Qu의 관계를 보여 준다. 시험수가 적은 시험을 통한 특성치의 평가시 각 시험값의 신뢰도를 고려치 않고 보수적으로 특성치를 결정하려는 경향이 있다. 즉 대표적인 특성치를 평가하는데 있어 월성1호기 사용연료 저장부지의 경우 (평균값-표준편차)를 월성2,3,4호기 및 울진3,4호기의 경우 평균값을 제시하고 있다.

5. 결론 및 토의

원전부지 기초지반의 압축강도 및 암반변형계수를 정하기 위한 시험법으로 압축강도의 경우 일축압축시험과 점재하 시험을, 암반변형계수의 경우 공내변형시험, RQD 대비법, RMR 대비법 및 속도지수 대비법에 의한 방법을 이용하였다. 또한 시험수가 적을 경우 시험값의 신뢰도를 고려치 않고 보수적으로 특성치를 결정하려는 경향이 있다. 또한 기초지반의 압축강도 및 암반변형계수를 결정할 시 어떤 부지는 시험값의 평균을, 어떤 부지는 시험값의 (평균값-표준편차) 값을 특성치로 제시하고 있는 것으로 나타났다.

6. 사사

이 논문은 중장기과제 “구조 및 지진안전성 평가 규제기술개발”중 원전부지의 지질 및 지진재해도 평가기술개발을 위한 일환으로 수행된 것이다. 후속 연구가 계속 진행 중에 있으나 지금까지의 결과가 빛을 볼 수 있도록 함께 애쓰신 분들께 큰 감사를 드린다. 또한 이 논문에 대해 기술적으로 많은 자문을 해주셨던 분들께도 사의를 표한다.

7. 참고문헌

[1] Z. T. Bieniawski, 1974, "Estimating the Strength of Rock Materials," Journal of the South African Institute of Mining and Metallugy, Vol.74, pp. 312-320.

[2] Z. T. Bieniawski, 1978, "Determining Rock Mass Deformability-Experience from Case Histories," Mechanics and Mineral Science, Vol. 15, No. 5, P.237.

[3] R. E. Goodman, T. K. Van, and Heuze, F. E. 1970, "Measurement of Rock Deformability in Boreholes, University of Texas at Austin, pp.523-555.

[4] J. H. Coon, and A. H. Merritt, 1970, "Predicting In Situ Modulus of Deformation Using

Rock Quality Indexes, Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock," STP 457,

[5] F. E. Heuze and B. Amadei, 1984, "The NX-Bore Jack: A Lesson in Trial- and-errors," UCRL-90282, 22pp.

[6] Korea Power Engineering Company Sargent & Lundy, 1988, "Additional Adendum Report to Section 2.5, Preliminary Safety Analysis Report Yonggwang Site, Yonggwang Nuclear Power, Units 3 & 4.

[7] R. E. Hunt, 1986, Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation.

[8] J. A. Franklin and M. B. Dusseault, Rock Engineering Applications, 1991, McGraw-Hill, Inc., New York.

[9] I. W. Farmer. 1983, Engineering Behavior of Rocks, 2nd Edition, Chapman and Hall, New York.

[10] U. S. NRC, 1979, Reg. Guide 1.132, Site Investigations for Foundations of Nuclear Power Plants. Rev. 1.

[11] IAEA, 1986, Safety Series No.50-SG-S8, Safety Aspects of Foundations of NPP's.

[12] 한국전력공사(주), FSAR, Yonggwang Unit 3&4, Vol. 2-3, Chap. 2.5.4.

[13] 한국전력공사(주), 1989, 월성원자력 사용연료 저장시설부지 지질조사보고서.

[14] 한국전력공사(주), 1992, 울진원자력 3,4호기 정밀지질조사보고서.

[15] 한국전력공사(주), 1991, 월성원자력 2호기 정밀지질조사보고서.

[16] 한국전력공사(주), 1991, 울진원자력 3,4호기 부지조사보고서.

[17] 한국전력공사(주), 1993, 월성원자력 3,4호기 정밀지질조사보고서.

[18] 한국원자력안전기술원, 1992, 경수로형 원자력발전소 안전심사지침서, Vol. I, Chap. 2.5.4.

[19] 한국에너지연구소, 1982, 연구보고서-원자력 3호기 원자로건물 부등침하조사