

## 원자력시설의 콘크리트 앵커시스템 규제요건

## Regulatory Requirements for Concrete Anchors in Nuclear Facilities



김상윤\*  
Sang-Yun Kim



이재하\*\*  
Jae-Ha Lee

## 1. 머리말

원자력발전소에서 기기 및 배관 등을 콘크리트 구조물에 고정시키는 앵커시스템은 정상운전 중의 진동제어와 배관파단 등 사고조건 상태에서 발생하는 동적하중에 대한 저항역할 등을 수행한다. 특히, 앵커시스템은 지진이 발생할 때 기기 및 시스템의 안전성을 확보하는 데 가장 중요한 요소 중의 하나이며 이러한 사실은 실제 지진을 경험한 외국의 많은 일반 발전소 및 일부 원자력발전소에 대한 현장조사 결과로 확인되었다. 그 예로 가시와자키 가리와 원전 변압기 정착부위에 설치된 앵커는 2007년에 발생한 일본 니가타현 주에츠 앞바다 지진에 의해 <사진 1>과 같이 전단 파괴된 사례가 있다.

원전에 사용되는 콘크리트 앵커는 그 설치방법에 따라 <그림 1>과 같이 매입형앵커(cast-in-place anchor)와 후설치앵커(post-installed anchor)로 구분된다. 매입형앵커는 콘크리트 타설 전 앵커를 고정시킨 후 콘크리트를 타설하는 앵커이며, 후설치앵커는 콘크리트 타설 후 설치되는 앵커이다. 특히 후설치 앵커는 추가적으로 적용되는 설치요건들이 있으며 이 사항들은



사진 1. 가시와자키 가리와 원전 변압기 정착부 앵커의 전단파괴

규제요건에 소개하였다.

국내 원자력발전소에 적용되고 있는 안전관련 콘크리트 앵커 시스템 설계는 원자력발전소의 안전관련 콘크리트 구조물에 적용되는 ACI 349 코드를 근간으로 하고 있는데 적용하고 있는 설계방법이 2001년 판을 기점으로 크게 변경되었다.

이번 특집에서는 원자력발전소 설계에 사용되는 ACI 349 코드 내용 및 관련된 규제요건을 소개하고자 한다. 현재 ACI 349가 2006년 판까지 발행되어 있지만 기본 설계방법론이 크게 차이 없고 현행 규제요건이 ACI 349-01를 토대로 하고 있어 이를 중심으로 소개하였다.

## 2. ACI 349 코드 설계방법

## 2.1 ACI 349 코드 개정이력

ACI 349 코드는 1976년 10월 ACI 349-76으로 처음 발행되었다. ACI 349 코드는 일반 철근콘크리트 구조물에 대한 코드 요건을 다루고 있는 ACI 318-71을 근간으로 하여 원자력발

전소 안전관련 구조물에 적합하게 하중 조건 등을 수정하였다. ACI 349-76에는 콘크리트 앵커시스템을 다루고 있는 Appendix B가 포함되어 있지 않았으며, 추후 1979 supplement에 포함되었다. 그 이후 ACI 349 코드는 80, 85, 90, 95, 97, 01, 06년 판이 발행되었으며 2006년판에서는 Appendix D에 콘크리트 앵커시스템 내용이 수록되었다. 최초 Appendix B가 발행된 이후 1997년 판에 이르기까지 Appendix B에서

세부 조항은 지속적으로 개정되어 왔으나 설계방법의 근간은 변함 없었다. 즉, 설계방법은 45° 원추형 콘크리트 파괴를 가정

\* 정회원, 한국원자력안전기술원 공학연구실 책임연구원  
k125ksy@kins.re.kr

\*\* 정회원, 한국원자력안전기술원 구조부지실 선임연구원

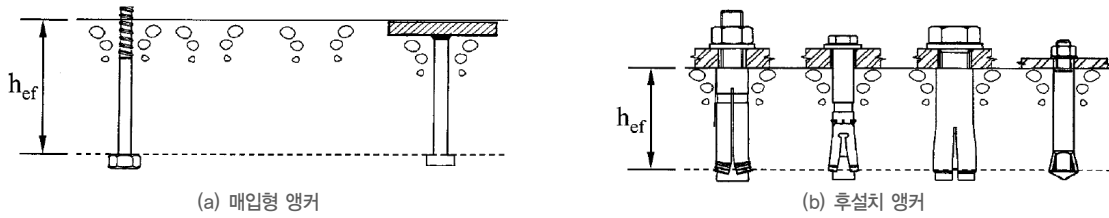


그림 1. 앵커의 종류(ACI 349-01 App. B)

하고, 원형 콘크리트 투영면적에 콘크리트 인장강도를 곱하여 앵커 콘크리트 파괴강도를 산정하며, 비균열콘크리트에서의 앵커강도를 기준으로 하여 볼트파괴를 유도하는 연성설계개념을 채택하도록 하는 것이다. 그러나 이와 같은 설계방법이 1979년 개발된 이후 미국뿐만 아니라 독일 등지에서 많은 량의 시험이 수행되었고 그 결과를 토대로 할 때 이 설계방법이 일부 설계조건에서는 시험결과에 잘 부합되지 않으며 비보수적인 결과를 줄 수 있음이 확인되었다. 따라서 2001년 개정판에서는 CCD (Concrete Capacity Design) 개념을 채택하여 설계방법이 근본적으로 바뀌게 되었다.

## 2.2 ACI 349-01에서 채택한 CCD 개념

ACI 349-01에서 채택한 CCD 방법은 독일 슈투트가르트 대학에서 개발한  $\chi$  방법을 적용한 것으로 비교적 적용이 쉬우며 기존 방법에 비해서 정확한 결과를 예측하는 것으로 확인되었다. 이 방법은 균열단면에서의 단일앵커에 대한 기본강도에 콘크리트 단부에서의 응력 교란, 작용하중의 편심효과, 균열유무를 고려한 계수를 곱하여 단일 앵커강도를 구하고 앵커간 거리 및 콘크리트 단부까지의 거리에 따른 파괴 투영면적의 중첩 등을 고려하여 그룹앵커의 강도를 산정한다.

CCD 방법은 콘크리트 인장응력, 파괴면적 외에 파괴역학에 근거한 크기효과를 고려함으로써 콘크리트 파괴강도가 앵커 관입깊이의 1.5승에 비례한다고 가정함에 따라 파괴강도가 파괴면의 표면 증가율보다는 적은 비율로 증가한다. 그리고 균열단면에서의 충분한 앵커시험 결과를 토대로 하여 균열단면에서의 앵커강도를 기본강도로 설정함으로써 콘크리트 부재 설계시 가정하는 인장단면에서의 앵커강도를 신뢰성 있게 구할 수 있다. 또한, 콘크리트 파괴면을 시험결과와 유사하게 35°로 가정하며, 그룹앵커 설계시 투영면적을 사각형으로 가정함으로써 중첩부위 계산이 간편하다는 장점이 있다.

CCD 방법은 콘크리트 균열단면에서의 앵커거동에 초점을 맞추고 있으며, 이는 앵커 구멍 주위에서의 응력집중 및 앵커헤드 주위의 방사방향 응력 분포 현상에 기인하여 균열이 실제 앵커 설치위치에서 발생할 가능성이 가장 높다는데 착안한 것이다.

균열위치가 앵커강도에 미치는 영향은 앵커의 파괴모드에 따라 달라질 수 있으나 앵커를 관통하는 균열의 경우가 강도감소에 미치는 영향이 가장 크다. 콘크리트 인발(pullout)의 파괴모드를 갖는 경우는 앵커를 관통하는 균열이 앵커와 콘크리트 사이의 부착력 저하 등을 야기시켜 강도감소에 미치는 영향이 크며, 후설치앵커(post-installed anchor)의 경우에는 정착 메커니즘에 영향을 주게 되어 상당히 불리하게 된다. 균열이 앵커를 관통하는 콘크리트 콘(breakout) 파괴모드의 경우에도 파괴면은 균열이 없는 경우와 유사하게 원추형 가깝게 형성되지만 균열부분의 저항능력이 매우 저하되게 되어 파괴면 상의 다른 위치에 균열이 발생하는 경우(파괴면이 완전한 원추형으로 형성되지 않고 균열위치에서 절단될 수 있음)보다 실질적인 강도감소는 더 크다.

한편, ACI 349-90, Appendix B와 CCD 설계개념을 채택한 ACI 349-01, Appendix B 내용의 주요 차이점을 비교하였으며 그 결과는 <표 1> 및 <그림 2>와 같다.

## 3. 규제요건

콘크리트 앵커시스템과 관련된 규제요건은 우선 교육과학기술부 고시 제2010-28호 '전력산업기술기준의 원자로시설 기술기준 적용에 관한 지침(2010.6.14)'을 들 수 있다. 이 고시에서는 원자력발전소의 안전관련 콘크리트구조물에 적용이 가능한 전력산업기술기준(KEPIC)으로 'SNC 철근콘크리트구조'를 명시하고 있으며 이는 ACI 349-01을 토대로 한 것이다. 또한 국내 규제에 활용하고 있는 규제지침(Regulatory Guide) 1.199는 미국 원자력규제위원회가 2003년 11월에 개발하였는데 여기서도 ACI 349-01을 토대로 하고 있다.

따라서 본 고에서는 ACI 349-01을 토대로 구체적인 규제입장을 명시하고 있는 규제지침 1.199의 주요 내용을 소개하였다. 다만, 현재 ACI 349-06이 발행되어 있고, 이 개정판이 2001년 판에 비해 보수적으로 변경된 요건(강도감소계수 등)을 포함하고 있어 이러한 내용이 추가로 고려되어야 할 것으로 생각한다.

규제지침 1.199는 CCD 설계방법론을 채택한 ACI 349-01을 대부분 승인하였으며 일부 내용을 보완하고 있는데 구체적으

표 1. ACI 349-90과 349-01 주요 설계요건 비교

구분	ACI 349-90, Appendix B	ACI 349-01, Appendix B
콘크리트 파괴강도 산정방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 파괴면을 45°원추형으로 가정하고 파괴 투영면적에 콘크리트 인장강도를 곱하여 산정(관입깊이의 제곱에 비례하여 강도 증가)</li> <li>- 그룹앵커시 원형 파괴 투영면적 중첩(계산 난이)</li> <li>- 앵커 pullout, pryout 파괴모드 및 강도산정방법 요건 불충분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CCD 방법 적용</li> <li>- 파괴면을 35°피라미드형으로 가정</li> <li>- 관입깊이에 1.5승, 콘크리트 인장강도에 비례하여 강도 증가(파괴역학에 근거한 크기효과 고려)</li> <li>- 그룹앵커시 사각형 파괴투영면적 중첩(계산 용이)</li> <li>- 콘크리트 기본강도에 하중편심효과, 단부효과, 균열효과 고려 수정</li> <li>- 앵커 pullout, pryout 파괴모드 및 강도산정방법에 대한 구체적인 요건 제시</li> </ul>
균열단면 효과 고려방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 균열단면 정의: 설계하중 조합에서 계산상 인장응력이 <math>5\sqrt{f'_c}</math>를 초과하는 구역(<math>f'_c</math>: 콘크리트 압축강도)</li> <li>- 비균열단면 강도를 기본으로 하며 균열단면시 더 큰 강도감소 적용(0.85 → 0.65)</li> <li>- 확장형앵커 선정시 균열단면에서의 거동 고려 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 균열단면정의: 하중계수를 1로 한 설계하중 조합에서 계산상 인장응력이 콘크리트 인장응력을 초과하는 구역</li> <li>- 균열단면 강도를 기본으로 하여 비균열 단면에서 강도증가 계수 적용(균열단면 시험결과 충분)</li> <li>- 균열단면에서 내진성능이 시험에 의해 입증된 앵커만 원자력발전소에 사용(post-installed type)</li> </ul>
설계일반	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 앵커의 강제파괴를 유도하는 연성설계(강재 연성요건 만족)</li> <li>- 콘크리트 파괴 방지관점에서 최소 단부 거리 요건 제시(side blowout, shear breakout)</li> <li>- 후설치앵커(post-installed anchor)의 경우 대부분 고강도 강재로 제작되어 있어 연성요건 불만족                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 시험 평균값의 0.33배를 앵커 설계강도로 적용(파괴모드에 무관)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 연성 설계 권고</li> <li>- 콘크리트 파괴, 취성 앵커강재의 파괴가 발생하는 취성설계 허용(강도감소 추가 60% 고려)</li> <li>- 콘크리트 단부효과 고려방법 상세 제시                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 응력교란효과를 고려한 수정계수</li> <li>· 파괴면 투영면적 감소</li> </ul> </li> <li>- 콘크리트 할렬(splitting) 파괴 방지요건 상세 제시                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 볼트 간격</li> <li>· 최소단부거리 요건(torqued, untorqued)</li> </ul> </li> <li>- 부재두께 대비 최대관입깊이 요건 제시</li> </ul>
시험결과 이용	- 평균값에 근거	- 5% fractile 값에 근거
대상	- 후설치앵커 중 언더컷앵커 미포함	- 후설치앵커 중 언더컷앵커 포함
인장 및 전단 조합하중	- linear(additive) 허용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 작용하중이 설계강도에 각각 20% 미만일 경우(인장, 전단)</li> </ul> $\frac{N_u}{\phi N_n} + \frac{V_u}{\phi V_n} \leq 1.2$ <p> <math>N_u</math>: 계수하중(인장), <math>N_n</math>: 공칭인장강도  <math>V_u</math>: 계수하중(전단), <math>V_n</math>: 공칭전단강도  <math>\phi</math>: 강도감소계수                 </p>

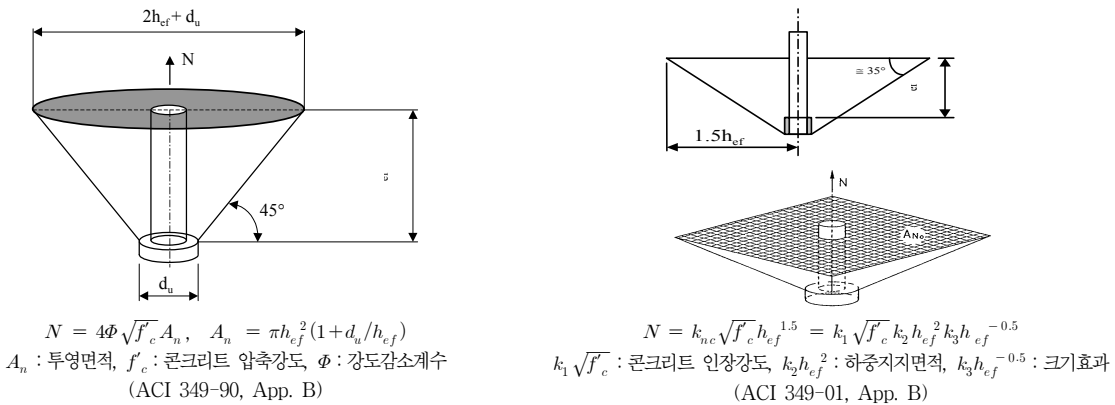


그림 2. 인장하중 작용시 앵커시스템 파괴모드

로 기술하면 다음과 같다.

첫째, ACI 349-01, Appendix B에 명시된 절차 및 기준은 아래 내용의 보완이 필요하다.

- (1) B.3.3항 요건에 추가하여 ASTM E 488-96에 명시된

시험지침이 적용될 수 있다. ASTM E488-96에 포함되지 않은 내용(인장 및 전단 조합시험, 콘크리트 균열단면 등)은 적합한 공학적 판단을 활용하여야 한다. ACI 355.2-01은 균열 및 비균열 단면에 사용되는 후설치앵커(post-installed anchor)에 대한 시험절차로 활용될

수 있다. 앵커의 재료는 설계하중 조건, 환경조건, 설치조건에 적합하여야 한다.

- (2) ACI 349-01의 9.2.1항 하중조합은 다음이 반영되어야 한다.
  - 하중조합 9, 10, 11에서 1.05  $T_o$  대신 1.2  $T_o$  사용
  - 하중조합 6에서 1.25  $P_a$  대신 1.5  $P_a$  사용
  - 하중조합 7에서 1.15  $P_a$  대신 1.25  $P_a$  사용
- (3) 확장형앵커의 설치검사 항목은 다음과 같다.
  - 정확한 구멍 직경, 적절한 관입깊이, 구멍의 허용이내 모남정도(angularity), 단부거리 및 앵커사이 간격, 앵커 나사나 상태의 적절성, 지지판 두께, 지지판 볼트구멍 크기, 앵커에 가해진 사전긴장력(preload), 볼트의 직경 및 길이, 볼트설치 구멍의 청소상태, 콘크리트의 건전성, 그라우트의 배합 및 시공상태
- (4) 그라우트가 적용될 경우 Appendix B의 B.12.3항과 B.12.4항에 따라 시험할 것을 추천한다.

둘째, 모든 앵커에 대해 그것이 특정 크기 및 형식임을 확인하기 위해 검사를 수행하여야 한다. 설치요건은 허용된 산업규정 허용값과 일치하여야 한다. 콘크리트 외부로 노출되는 앵커 부분에 대해서는 구조물 수명기간 동안 주기적으로 검사되어야 한다. B.9.2항의 요건에 추가하여 후설치앵커의 설치상태 적합성을 검증하기 위해 <표 2>와 같은 최소 6단계의 검사프로그램을 추천한다.

적합성을 최대한 보장하기 위하여 상기 6단계 절차가 모든 앵커에 대해 수행되어야 한다. 그러나 덜 광범위한 검사프로그램을 통해서도 적절한 품질보증이 이루어질 수 있다. 간단하고 육안검사로 구성된 2단계부터 6단계까지의 검사를 모든 앵커볼트에 대해 수행한다. 그러나 앵커조임 상태를 확인하는 1단계 검사는 건본추출방법을 사용한다. 배관지지부 지지판에 사용된 확장형앵커에 대한 건본시험프로그램이 IEB 79-02의 Appendix A에 추천되어 있다.

확장형앵커에 대한 건본시험프로그램의 주요 내용은 다음과 같으며 기기 정착부에도 적용될 수도 있다.

모든 기기 정착부 앵커볼트의 최소 25%에 대해 앵커 조임상태를 검사하며, 선정된 볼트검사 결과가 기준에 만족되지 않으면 정착부 전 앵커에 대해 조임상태를 확인한다.

다른 방법은 무작위추출법으로 선정된 앵커에 대해 조임상태를 검사한다. 건본 수 및 부적합앵커 수는 95% 신뢰도에서 부적합앵커가 5% 이하로 되게 하는 수이다. 이러한 수는 다음 식을 통해 구해질 수 있다.

표 2. 후설치앵커(post-installed anchor)의 검사 프로그램

단계	검사항목	만족기준
1	너트와 앵커볼트가 잘 조여졌는가?	이 단계는 다음과 같은 설치결함을 확인하기 위한 것이다. 큰 구멍, 과도한 사전긴장력, 너트의 덜조임, 콘크리트 손상, 프리그 손실(헬형). 이 단계에서 너트나 볼트헤드에 비틀림 검사를 수행하며, 잘 설치된 앵커는 설치토크값의 20% 정도에서 회전되지 않아야 한다.
2	기기 기초판과 앵커볼트 너트 또는 볼트헤드 사이에 와서가 있는가?	모든 볼트에 와서가 필요하다. 얇은 기초판에는 큰 와서가 적절하며 약간의 진동이라도 진동이 있는 경우에는 고정와서(lock washer)가 적절하다.
3	볼트 간격은 설계조건과 동일한가?	-
4	볼트에서 콘크리트 단부까지의 거리는 설계조건과 동일한가?	-
5	콘크리트는 건전하고 균열이 없는가?	이 검사는 확장형앵커의 고정력에 영향을 미칠 수 있는 콘크리트의 큰 결함이 없는가를 확인하는 것이다. 확장형앵커 인근의 미세 건조수축균열은 앵커 설계 강도가 균열콘크리트에 근거하였다면 문제되지 않는다. 앵커 인근의 균열이 0.3 mm(0.01 in.)를 초과하면 앵커의 설계 강도는 적절히 감소되어야 한다.
6	기기 지지판 하부와 콘크리트 표면사이의 틈이 큰가?	이 검사는 기기 지지판이 올라가 있는 상태를 확인하기 위한 것이다. 이러한 경우에는 전단하중이 앵커볼트에 힘을 야기시킬 수 있기 때문이다. 6.35 mm(0.25 in.) 이하의 틈은 문제되지 않으나 그 이상이 될 경우 상세평가가 필요하다.

$$R' = R + Z \left( \frac{R(1-R)}{n} \right)^{1/2} \frac{N-n^{1/2}}{N-1}$$

여기서

$R'$  : 특정신뢰도(여기서는 0.05)에서 실제 결함비율의 최대한계

$R$  : 건본에서 확인된 결함비율

$Z$  : 시험데이터의 정상분포통계모델에서 신뢰계수 (95% 신뢰도에서  $Z = 1.65$ )

$n$  : 시험건본 수

$N$  : 시험건본이 선정되는 모집단 수

<표 3>은 모집단 수  $N$ 과 시험건본 수  $n$ 에 따른 허용가능한 부적합앵커 수를 나타내고 있다. 파괴율이 95%, 신뢰도에서 5% 이하의 부적합앵커 발생 제한요건을 초과하면 설치절차는 허용될 수 없다.

셋째, ASME NQA-2, 1983, “Quality Assurance Program Requirements for Nuclear Facilities”의 모든 품질보증 요건이 하중지이용 강제 관입물, 기기 및 지지부의 기타 하중지지 부품에 적용될 수 있다.

넷째, 콘크리트 구성물질과 관입물 재료는 발전소 수명기간 동안 예상되는 환경조건에 적절한 것이어야 한다.

다섯째, 관입물에 작용하는 하중은 지지판 유연도, 연결부위의 편심상태, 하중의 동적효과(변형률 비율, 저싸이클 피로)를 고려하여 적절히 평가되어야 한다.

여섯째, 고강도 앵커볼트 및 스티드( $f_y > 110$  ksi)의 경도, 재질, 열처리는 환경 및 응력 부식균열을 방지하기 위해 세심하게 관리되어야 한다.

일곱째, 일반적으로 앵커를 조적조에 사용하는 것은 규정되어 있지 않기 때문에 어떤 형식의 앵커라도 콘크리트 조적벽에 내진등급 I 부품 및 계통을 부착시키기 위해 사용되는 것은 바람직하지 않다. 다만, 극히 작은 하중을 받는 경우는 예외로 한다. 앵커사용이 불가피할 경우에는 블록벽을 관통하는 앵커를 사용할 것을 추천한다.

#### 4. 맺음말

원자력발전소에서 기기 및 배관 등을 콘크리트 구조물에 고정시키는 앵커시스템은 지진발생시 기기 및 시스템의 안전성을 확보하는 데 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 본 고에서는 국내

원자력발전소 콘크리트 앵커시스템 설계에 사용되는 ACI 349 코드 및 관련된 규제요건을 소개하였으며, 규제요건에서 경화된 콘크리트에 설치되는 후설치앵커의 시공에 대해 매우 엄격하게 관리함을 알 수 있다. □

#### 참고문헌

1. ACI 349-01, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary.
2. ACI 349-90, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary.
3. Regulatory Guide 1.199, “Anchoring Components and Structural Supports in Concrete”, USNRC, Nov. 2003.
4. NUREG/CR-5434, Anchor Bolt Behavior and Strength during Earthquakes, 1998. 8.
5. NUREG/CR-5563, A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria, 1999. 3.
6. IEB 79-02, “Pipe Support Base Plate Designs Using Concrete Expansion Anchor Bolts”, Inspection and Enforcement Bulletin, USNRC, Rev. 2, Nov. 1979.
7. Werner Fuchs, Rolf Eligehausen, and John Breen, “Concrete Capacity Design(CCD) Approach for Fastening to Concrete”, *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 1, Jan.-Feb. 1995.
8. KINS/RR-161, 원전 콘크리트 구조 규제현안 분석 및 평가방안 연구, 한국원자력안전기술원, 2002. 12.
9. 교육과학기술부고시 제2010-28호, ‘전력산업기술기준의 원자로서 설 기술기준 적용에 관한 지침’, 2010. 6. 14.

표 3. 부적합앵커의 허용 수

모집단 수 (N)	시험건본 수(n)에 따른 부적합앵커 허용 수												
	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
100	1	2	3	5	-	-	-	-	-	-	-	-	
200	1	1	2	3	6	10	-	-	-	-	-	-	
300	1	1	2	3	5	7	10	15	-	-	-	-	
400	1	1	2	3	5	7	9	12	15	20	-	-	
500	1	1	2	3	5	7	9	12	14	17	20	25	
600	1	1	2	3	5	7	9	11	14	16	19	22	
700	1	1	2	3	4	7	9	11	13	16	18	21	
800	1	1	2	3	4	6	9	11	13	16	18	21	
900	1	1	2	3	4	6	8	11	13	15	18	20	
1,000	1	1	2	3	4	6	8	11	13	15	17	20	

담당 편집위원 : 양인환(군산대학교) [ihyang@kunsan.ac.kr](mailto:ihyang@kunsan.ac.kr)