

월성원자력 앵커내진인증시험과 앵커 검증에 영향을 주는 시험방법 및 변수 고찰

김윤식, 이돈국
월성원자력 건설소
이계현
한국원자력 안전기술원

요 약

기기 및 각종 지지부의 정착을위해 사용되는 콘크리트 확장형 앵커(CEA,Concrete Expansion Anchor)인 PRH Wedge,Selfdrilling 및 Hilti KBII,HSLG에 대해서 최근 Canada 의 McMaster 대학과 Switzerland의 Schann 연구소에서 앵커 성능시험이 수행되었다.본 시험결과를 토대로 월성원자력 2,3,4호기 설계앵커인 PRH Wedge,Selfdrilling 및 Hilti KBII와 대체앵커인 HSLG 앵커의 사용범위에 대해서 살펴보았다.또한 동일한 앵커에 대해서 수행된 성능시험이라 할지라도 시험결과에 시편크기,콘크리트강도등 시험적용 변수에따라 달라질수 있는데 보고에서는 시험시편(Concrete Structural Member)의 크기에따른 앵커링 파괴강도 및 콘크리트 파괴형태의 고찰을통해 기존의 앵커시험및 사용기준인 ASTM E488-90 [5],A CI 355.1R [6] 등 제규정과과의 차이점에대해 고찰하고자한다.

1.서 론

기기 및 지지대의 콘크리트 부착은 일반적으로 콘크리트 경화전에 설치하는 데설앵커(Cast-in-Place Anchor 또는 Embed Plate)가 사용되는데 원자력발전소와 같이 구조가 복잡하고 공간이 협소한 플랜트에서는 계통 상호간 간섭(Interference)을 줄이고 피부착물의 위

치선정이 용이한 콘크리트 확장앵커(Concrete Expansion Anchor, CEA)가 많이 사용되고 있다. 월성 2,3&4호기 CEA는 주설비 설계 계약자 AECL이 Phillips Red Head 및 Hilti KB II를 선정하여 기기 및 지지대 설치용으로 설계하였으나 동 앵커에 대한 내진 인증시험 (Seismic Qualification Test) 수행결과, 안전등급 기기/지지대 부착용으로는 부적합 판정을 하였다. 그리고 그 대체 앵커인 Hilti HSL/HSLG를 선정하여 동일 시험을 거쳐 만족한 결과를 보임에 따라 현재 월성 2,3&4호기에 사용되고 있으며, 1년이 넘는 기간의 앵커인증시험 및 선정단계가 현재로서는 마무리되었지만, 향후 이분야의 기술적 진보와 앵커 거동의 정확한 해석을 위하여 지속적인 연구, 검토가 이루어져야 할 것이다. 따라서 본고에서는 기존의 시험 요건과 실제 앵커 성능시험결과와는 어느 정도 상관관계가 있는가? 기존의 앵커 관련 Code, Standard 등 기준들은 어떻게 해석하고 개발되어야 하는가? 등에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 월성원자력의 앵커 내진인증시험

CEA의 인증시험은 ASTM E-488-M90 [5] 과 CSA-N287.2-M91 [4] 에 따라 동적인발 및 전단시험인 Survival Test를 수행하고 파괴하중(Ultimate Failure Load) 값을 구하기 위하여 동적시험직후 정적 파괴시험이 각각 수행되었다.

2.1. 주요 시험 요건

가. 동적인발시험 (Dynamic Tensile)

- 시험 하중 : 최고 53% F_y , F_y =앵커재질의 항복강도
- 하중 형태/주파수/주기 : 맥동(Pulsation)/5Hz/340cycle

나. 동적전단시험(Dynamic Shear)

- 시험 하중 : 최고 16% F_y
- 하중 형태/주파수/주기 : 교번(Alternating)/5Hz/370cycle

다. Concrete Test Blocks

- 콘크리트 시편압축강도(CSA N287.5) : 21MPa (3000psi)
- 콘크리트 시편크기 : ASME E488-90 [5] Table 2. 규정 준용
 - 캐나다 McMaster 대학 : 533×305×152, 533×410×305mm
 - 스위스 Schann 연구소 : 4700×1300×320mm

2.2. 시험 수행 기관

가. AECL 주관, 캐나다 McMaster 대학 수행 : '95.09 ~ '95.12

PRH Wedge 8 규격, PRH Selfdrilling 5규격, KBII 6규격, HSLG 6규격

나. 월성건설소주관, Hilti Schann 연구소 수행 : '96.01 ~ '96.04

Hilti HSLG 6규격 - M8, M10, M12, M16, M20, M24

2.3. 앵커인증시험 결과

캐나다 McMaster에서 실시한 PRH Wedge, Selfdrilling 및 Hilti KB II 앵커의 인발, 전단시험에 대한 파괴하중값(Ultimate Failure Load, UF Load), 안전하중율(Safety Factor) 및 파괴형태(Failure Mode)는 표.1에 나타내었으며, Hilti HSLG 앵커에대한 캐나다 McMaster 및 스위스 Schann에서 수행한 시험결과는 표.2에 나타내었다.

표.1 PRH Wedge, Selfdrilling 및 Hilti KBII 앵커 시험결과(캐나다 McMaster 수행)

(단위 : Lbs)

| 앵커종류 | 앵커규격 시험결과 | 1/4" | 3/8" | 1/2" | 5/8" | 3/4" | 1" |
|----------------|--------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
| | | Design load Tension/Shear | 668 445 | 1204 977 | 1512 1484 | 2121 3114 | 3128 4377 |
| PRH (Wedge) | U.F. load Tension/Shear | 2730 1558 | 5782 3619 | 8508 5889 | 10970 12732 | 17607 19076 | 23826 21153 |
| | Safety factor Tension/Shear | 4.1 3.5 | 4.8 3.7 | 5.6 4.0 | 5.1 4.1 | 5.6 4.4 | 3.8 3.1 |
| | Failure mode Tension/Shear | A=4,B=2 A=6 | B=6 A=6 | C=2,B=4 A=6 | B=6 A=6 | B=5,E=1 A=2,F=4 | C=4,B=2 F=6 |
| | Design load Tension/Shear | 630 760 | 940 1090 | 1400 1655 | 2090 2475 | 3125 3590 | |
| PRH (Self) | U.F. load Tension/Shear | 2636 1482 | 4598 3618 | 7520 5315 | 9239 8648 | 11391 10048 | |
| | Safety factor Tension/Shear | 4.2 2.0 | 4.9 3.3 | 5.4 3.2 | 4.4 3.5 | 3.6 2.8 | |
| | Failure mode Tension/Shear | D=2,A=4 A=6 | D=6 A=6 | D=3,E=3 A=6 | C=3,E=3 A=4,F=2 | C=5,B=1 F=6 | |
| | Design load Tension/Shear | 556 500 | 1206 1375 | 2000 2300 | 2667 3550 | 3875 4880 | 5625 8625 |
| Hilti KBII | U.F. load Tension/Shear | 2610 2391 | 5345 4718 | 9236 8812 | 9491 9401 | 15817 16840 | 19827 18539 |
| | Safety factor Tension/Shear | 4.7 4.8 | 4.4 3.4 | 4.6 3.8 | 3.6 2.6 | 4.1 3.5 | 3.5 2.1 |
| | Failure mode Tension/Shear | A=4,B=2 A=6 | C=2,B=4 A=6 | C=6 A=4,F=2 | C=6 F=6 | C=4,E=2 F=6 | C=6 F=6 |

주) 콘크리트 파괴형태(Concrete Failure Mode)

- A = Bolt Yield or Fracture, B = Anchor Pull-put
- C = Anchor Slip then block fracture D = Cone in tension
- E = Radiation crack, Bolt Pull-out (P.O), Bolt Failure (B.F)
- F = Bearing Fracture Then Block Failure, Concrete Fracture (C.F)

표.2 캐나다 McMaster 및 스위스 Schann 수행 Hilti HSLG 시험결과

(단위 : Lbs)

| 시험기관 | 앵커규격 | M8 | M10 | M12 | M16 | M20 | M24 |
|--------------------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | 시험결과 | | | | | | |
| SCHANN (HSLG) | Design load Tension/Shear | 1214 1596 | 1820 2575 | 2590 3300 | 3787 5954 | 6223 8910 | 8183 11712 |
| | U.F. load Tension/Shear | 6047 6388 | 7284 10307 | 10363 13207 | 15151 23817 | 28291 35642 | 36473 46848 |
| | Safety factor Tension/Shear | 4.9 4.0 | 4.0 4.0 | 4.0 4.0 | 4.0 4.0 | 4.5 4.0 | 4.4 4.0 |
| | Failure mode Tension/Shear | D=7 A=6 | D=6 A=6 | D=6 A=6 | D=10 A=6 | D=7 A=6 | F=2,D=6 A=6 |
| McMaster (HSLG) | U.F. load Tension/Shear | 5504 3994 | 8285 6373 | 8377 8847 | 16344 16000 | 19306 18550 | 24777 17800 |
| | Safety factor Tension/Shear | 4.5 2.5 | 4.5 2.5 | 3.2 2.6 | 4.3 2.6 | 3.1 2.0 | 3.0 1.5 |
| | Failure mode Tension/Shear | D=4,C=2 A=6 | B=2,C=4 A=6 | A=3,C=3 A=1,F=5 | D=2,E=4 A=1,F=5 | B=3,C=3 F=6 | C=4,E=2 F=6 |

2.4. 인증시험의 평가

앵커 설계는 정적하중(Static Load) 뿐만 아니라 기기 및 지지대의 동적하중을 고려하여 충분한 설계여유(Margins)를 가져야 한다. 즉 기기 또는 System 작동중 예상되는 진동(Vibration), 열팽창응력(Thermal Expansion Stress), 지진 등의 동적하중을 고려시 일반적으로 4~5배 이상의 여유로 설계 및 시공을 하여야 하는데 상기 시험결과와 같이 월성원자력 설계앵커인 PRH Wedge 및 Selfdrilling 앵커와 KBII는 관련 설계기술요건인 CSA N287.3-91[7], AECL Spec. TS-XX-20520-001[3]에서 제시하는 안전하중율의 최소 3.0 및 4.0을 만족시키지 못하거나 불규칙한 결과를 보이므로 월성원자력 사용에 부적합 판정을 받았다.

따라서 현재 월성 2,3,4호기 건설공중에는 대체 앵커인 Hilti HSL/HSLG가 안전등급(CSA Class 1,2,3 및 Special Components)에 해당되는 기기 및 지지대 설치용으로 사용되고 있으며, KB II 및 PRH Wedge, Selfdrilling 앵커는 단지 비안전등급 (CSA Class 6)분야에만 선별적으로 사용되고 있다.

3. 시험결과에 따른 Hilti HSL/HSLG 대체 앵커의 사용장점

3.1 아래의 표.3은 설계 앵커인 PRH의 설계하중을 기준으로하여 대체 앵커인 HSLG의 시험 결과에 대한 안전을 비교를 통해서 구해졌으며, 동 앵커의 충분한 설계여유와 광범위한 사용범위로인해 안전성이 높은 앵커시공이 가능함을 보여준다.

표3. HSLG 앵커의 사용범위

| SIZE | Design Load (Lbs) | | Test Result (Lbs) | | Safety Factor | |
|------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------|-------|
| | Tension | Shear | Tension | Shear | Tension | Shear |
| 1/4" | 668 | 445 | 2730 | 1558 | 4.1 | 3.5 |
| M8 | - | - | 6047 | 6384 | 9.0 | 14.3 |
| 3/8" | 1204 | 977 | 5728 | 3619 | 4.75 | 3.7 |
| M8 | - | - | 6047 | 10307 | 5.0 | 6.5 |
| M10 | - | - | 7284 | 5889 | 6.0 | 10.5 |
| 1/2" | 1512 | 1484 | 8508 | 6384 | 5.6 | 3.97 |
| M8 | - | - | 6047 | 10307 | 4.0 | 4.3 |
| M10 | - | - | 7284 | 10307 | 4.8 | 6.9 |
| M12 | - | - | 10363 | 13207 | 6.85 | 8.9 |
| 5/8" | 2121 | 3114 | 10970 | 12732 | 5.2 | 4.1 |
| M12 | - | - | 10363 | 13207 | 4.9 | 4.2 |
| M16 | - | - | 15151 | 23817 | 7.1 | 7.6 |
| 3/4" | 3128 | 4377 | 17607 | 19076 | 5.6 | 4.4 |
| M16 | - | - | 151151 | 23817 | 4.8 | 5.4 |
| M20 | - | - | 28291 | 35642 | 9.0 | 8.1 |
| 1" | 6280 | 6794 | 23826 | 21153 | 3.8 | 3.1 |
| M20 | - | - | 28291 | 35642 | 4.5 | 5.2 |
| M24 | - | - | 36473 | 46848 | 5.8 | 6.9 |

3.2. CEA 설치를 위해 콘크리트 벽 등에 Drilling을 할 경우 콘크리트에 매설되어 있는 Rebar와의 간섭이 현장시공 현안중의 하나이다. 특히 앵커의 매입 깊이가 클수록 매설 철근과의 접촉 가능성이 많아 Rebar Cutting의 제약 때문에 부착물 위치 재선정 등의 난제가 발생되는데 표.4와 같이 HSLG는 PRH에 비하여 Embed Length가 짧아 시공성이 높다 하겠다.

표.4 PRH Wedge 및 Hilti HSLG Embed Length 비교

단위 : mm

| SIZE TYPE | 3/8"(M8) | 5/8"(M10) | 3/4"(M12) | 7/8"(M16) | 1"(M20) | 1"(M24) | 비 고 |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------------|
| HSLG | 65 | 75 | 80 | 105 | 130 | 155 | 모든 규격 각길이 일정 |
| PRH | 70 | 114 | 150 | 190 | 254 | 260 | 규격별 최대길이 적용 |

3.3. HSLG는 Sleeve 부착형 앵커로써 동일 규격보다 슬리브 직경만큼 외경이 커서(M8의 경우 약 12mm 직경) PRH등 설계 앵커의 직경에 따라 공장가공된 기존 기기앵커 Hole의 Boring이 요구되었으나 스위스 Schann 인증시험시 Sleeve 제거(Flush Mounted) 전단 시험을 거쳐 기존의 Hole 확장 등의 시공 불편사항을 개선하였다. 아래표.5는 Sleeve 제거후

HSLG의 전단파괴 하중값과 KBII 전단시험 결과를 동일한 직경의 기준으로 비교하였으나 재질강도 차이등으로 인하여 HSLG가 월등히 우수함을 나타내고 있다.

표.5 KBII 및 Sleeve 제거 HSLG(Flush Mounted) 전단하중 시험결과

단위 : LBS

| SIZE TYPE | ½"(M8) | ¾"(M10) | 1"(M12) | 1½"(M16) | 2"(M20) | 1"(M24) |
|--------------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|
| HSLG | 4350 | 6607 | 9407 | 18265 | 26829 | 37395 |
| KBII | 2391 | 4718 | 8812 | 9104 | 16840 | 18539 |

4. 앵커시험과 설계에 영향을 미치는 시험방법 및 변수 고찰

동일한 앵커시험요건과 절차, 동일한 시편압축강도에 따라 앵커인증시험을 수행하여도 그 결과가 상기 표1 및 2와 같이 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 물론 캐나다 McMaster 대학도 관련 ASTM과 CSA 기준에 준하여 시험을 수행하였으나 그 결과는 부적합 판정을 받았다. 본고에서는 현재 분석 가능하고 그 대안을 제시할 몇 가지 중요 착안사항에 대해 살펴보고자 한다.

4.1 콘크리트 시편 크기의 과소 선정

앵커인증시험을 위한 콘크리트 시험시편 제작표준인 ASTM E488-90 [5] Table 2는 인발시험(Tensile)시 원추형 파괴각도가 45° 라는 가정하에 설정된 기준이다. 자세한 분석은 후술하겠지만 이는 경험적 또는 실험적으로 고찰되는 약 60° 파괴선에 훨씬 못 미침으로써 앵커인발시 앵커가 시편속에서 충분한 하중을 받기전에 표.1 및 표.2 McMaster(HSLG)의 Failure Mode에서 보는 바와 같이 시편이 먼저 파괴되는 형태를 나타내고 있다.

4.2 시편의 Bending Effect에 따른 하중능력감소 능력

인발시험시 Test Frame에 의한 반발력(Reaction Force)이 강하게 작용하여 시험편의 Bending이 수반되는데 인장력에 약한 콘크리트는 상부쪽에 굽힘현상이 발생되어 시편균열축진 및 앵커 하중능력 감소결과를 초래한다. 이 현상은 인발시험기기 설치위치에 관계가 있으며 4.1항에서 언급한 시편의 크기와 Pull out시 원추형 파괴각도와도 밀접한 상관관계가 있다.

4.3 콘크리트 파괴형태(Failure Mode) 와 파괴각도 분석

콘크리트 Cone 파괴각도는 ACI 355.1R-91[6]의 식 $F_s = 4\phi\sqrt{f_c'} \cdot A$ (Lbs) ... [식 3.2]을 이용하여 구할수 있다.

$$\Rightarrow \alpha = \text{ARC tan}(4\phi\sqrt{f_c'} \cdot \pi Id^2 / F_s) \dots \text{[식1]}$$

$$\therefore \theta = 90^\circ - \alpha \dots \text{[식2]} \quad F_s = \text{Ultimate Failure Load (U.F.L.)}$$

\emptyset = Strength Reduction Factor

A = The summation of the Projected
Area of Individual Stress Cone

일반적으로 인장력을 받을 때 콘크리트 시험시편의 가장 바람직한 파괴형태는 콘크리트가 Cone 형태로 파괴되는 것이다. 그러나 상기 시험결과가 보여 주듯이 월성원자력에서 사용하는 동일한 콘크리트 압축강도와 시험절차 및 요건에 의해서 수행된 시험일지라도 시험시편의 크기에 따라 상기 표1 및 2와 같이 앵커링 시스템의 파괴하중(U.F.L : Fs) 및 콘크리트 파괴형태가 상이하였다. 스위스 Schann에서 수행된 Tension Failure Mode 거의 모두가 Concrete Cone Failure이며 이러한 파괴형태의 파괴하중을 ACI 355.1R-91 [6,식3.2]에 대입하여 Cone Angle을 계산하면 표.6과 같이 51° ~ 62° 범위내에 있다.

표.6 상황에 따른 HSLG Tension 파괴하중 및 파괴각도 비교

| 구 분 | | ACI 355 IR-91 Equation (3.4,3.5) | Actual Test result in Schann | Actual Test result in McMaster | ASTM E488-91 |
|--------------|------------|--|---------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| M8 (65) | U.F.L | 5344 | 6047 | 5504 | 3767 |
| | Cone Angle | 54.8° | 58.0° | 55.6° | 45° |
| M10 (75) | U.F.L | 6500 | 7284 | 8285 | 5015 |
| | Cone Angle | 50.4° | 55° | 57.0° | 45° |
| M12 (80) | U.F.L | 7155 | 10363 | 8377 | 5706 |
| | Cone Angle | 51.4° | 61° | 55° | 45° |
| M16 (105) | U.F.L | 10801 | 15151 | 16344 | 9830 |
| | Cone Angle | 47° | 57° | 59.2° | 45° |
| M20 (130) | U.F.L | 15403 | 28291 | 19306 | 15068 |
| | Cone Angle | 45.6° | 61.9° | 52.1° | 45° |
| M24 (155) | U.F.L | 21420 | 36473 | 24777 | 21420 |
| | Cone Angle | 45° | 59° | 48.5° | 45° |

상기 표.6의 ACI 식3.4 및 3.5와 ASTM E488의 Cone 파괴 각도는 지금까지 수행되어온 시험적 평균보다 훨씬 낮게 규정되었다. 동시편의 Cone 파괴각도는 Anchor Spacing과 Edge Distance 설계에 매우 중요한 요소로써 이에 상용하는 감쇄계수(거리)를 적용치 않을 경우 앵커 설계의 비보수성(Non-Conservative)을 초래할 우려가 있다. 따라서 향후 연구과제는 정확한 파괴각도를 도출하여 그 기준으로 ASTM-E488 Table.2의 시험편 크기에 대해 재설정이 요구되고 앵커 Spacing과 Edge Distance가 Group 앵커에 미치는 영향을 분석하여

각 조정계수(감쇄 계수)를 올바르게 정립하여야 할 것이다.

5. 결 론

앵커시험결과는 시험변수인 콘크리트 시편의 크기나 압축강도, 동적 입력하중값 또는 최대 하중입력파형(Pulsating 혹은 Alternating)에 따라 달라질 수 있다. 그러나 동일 규격에 대한 앵커가 동일한 시험조건 및 절차에 따라 수행되었음에도 불구하고 그 결과가 큰차이를 보이고 있어 시험결과에 의거 적합, 부적합을 판정하기는 어려운 실정이다. 현재 당면한 향후 연구과제는 상기 시험결과와 여러 시험자료에 대한 면밀한 분석을 통하여 앵커거동에 대한 정확한 해석을 통해 기존의 앵커관련 기준인 ASTM E488-90 [5] 및 ACI 355.1R-91 [6], CSA 287.2-M91 [4, 캐나다] 및 EOTA 164.2(유럽) 적용함에 있어 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이며 CEA 설계 및 사용에 대한 표준기술적용기준이 수립되도록 노력하여야 할 것이다.

REFERENCES

1. Test Report "Qualification Testing of Expansion Anchors", MCMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, January 15, 1996.
2. Test Report "Seismic Qualification Tests on HSLG-N Heavy Duty Expansion Anchors" HILTI Test Laboratory, Schann, Switzerland, April 12, 1996.
3. AECL Tech. Spec. 86021-20520-TS-001 Revision 1. "Instructions for the Use (substitution) of Expansion Anchors" Atomic Energy of Canada Ltd. Missisauge, Ontario Canada, May. 1996.
4. CAN/CSA-N287.2-M91 "Material Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants" Canadian Standard Association Ontario, Canada, December 1991.
5. ASTM E488-90 "Standard Test Method for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Element", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 1990.
6. ACI355.1R-91 "State-of-The ART Report on Anchorage to Concrete Institute, July, 1995.
7. CSA N287.3-93 "Design Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants" Canada Standard association, Toronto, Ontario, Canada, February 1993