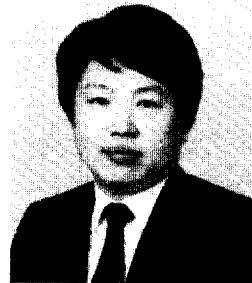


콘크리트 構造物의 性能低下機構

Deterioration Mechanisms of Concrete Structures



심 종 성*

1. 序 言

콘크리트 構造物은 다른 材料로 형성되는 構造物보다 相對的으로 저렴한 施工費用과 完成된 構造物의 半永久性 때문에 그 選好度가 점점 높아지고 있다. 그러나, 使用材料, 施工方法, 使用方法 중 어느 하나가 잘못 선택될 경우 性能低下가 발생되어, 構造物의 壽命을 단축시킨다. 最近 國內에서 생산되는 콘크리트는 天然骨材 枯渴로 인한 碎石骨材 및 海砂使用의 불가피, 設計技術 發達로 인한 相對的인 部材斷面 減少, 특수한 環境에 처하게 되는 構造物 建設의 增大 등의 理由로 性能低下의 發生確率이 날로 높아가고 있다. 게다가 이렇게 발생한 性能低下는 아무리 局部的인 것이라도 時間이 경과되면 構造物에 致命的인 損傷을 입힐 수 있어 性能低下에 대한 耐久性의 重要度가 점차 높아지고 있는 실정이다.

本 特輯記事에서는 이와같은 實情에 즈음하여, 콘크리트의 性能低下가 발생하게 되는 原因과 症狀을 중심으로 하여 콘크리트 構造物에 발생하는 一般의인 性能低下機構(Deterioration Mechanism)에 대하여 기술하고자 한다.

2. 콘크리트 性能低下의 原因과 症狀

콘크리트의 性能低下症狀은 基本的으로 龜裂(crack), 剝離(spalling), 表面崩壞(disintegration)로 나눌 수 있다. 이들 각각의 症狀은 분명하고, 뚜렷하게 구별되지만, 실제 적으로는 複合的으로 동시에 일어나기 때문에, 그 症狀에 대한 原因糾明은 용이하지 않다(Ref.13,14).

그러나, 콘크리트 構造物에 나타난 症狀은 각각의 原因들이 重疊되어 발생되므로 性能低下機構를 언급하기 위하여서는 각각의 가능한 原因을 谈及할 수 밖에 없다.

2.1 性能低下 原因

一般的으로 發生가능한 性能低下의 原因은 施工時의 發生事故, 乾燥收縮, 溫度變化, 콘크리트의 水分吸收, 鐵筋의 腐蝕, 化學反應, 凍結融解, 衝擊波, 磨耗(浸蝕), 불량한 設計細目, 設計上의 오류 등의 11가지로 나눌 수 있다(Ref.6).

本 記事에서는 이들 각각에 대한 性能低下構造에 대하여 代表的인 參考文獻을 인용하여 간략하게 설명하고자 한다.

* 정희원, 한양대 토목공학과 조교수, 공박

2.1.1 施工不良

施工時 발생하는 龜裂은 大部分 材料의 不良이나, 施工管理의 不良으로부터 발생한다. 그 代表的인 原因은 下部構造의 沈下, 거푸집의 變形, 工事中 발생하는 振動, 乾燥收縮의 시작, 콘크리트 동바리의 變形, 콘크리트 完全着生前 거푸집 除去 등을 들 수 있고, 이러한 原因은 대부분 工事初期에 발생하므로 初期龜裂이라고 분류되고 있다(Ref.8).

2.1.2 乾燥收縮

일반적으로 콘크리트는 水和作用에 필요한 水量보다 많은 물을 사용한다. 따라서 水和하고 남은 물은 自由水로서 콘크리트 속에 머물러 있다가 콘크리트가 大氣 中에 노출될 때 蒸發한다. 그 결과 콘크리트는 乾燥收縮(shrinkage)을 일으킨다. 따라서 이 現象은 單位水量이 많을수록 乾燥收縮은 크게 일어난다.

콘크리트는 水分을 吸收하면 膨脹하고 乾燥하면 收縮한다. 이것은 시멘트풀이 膨脹하고 收縮하기 때문이다. 즉, 시멘트풀은 주위의 濕度가 높을 때는 水分을 吸收하여 膨脹하고, 주위의 濕度가 낮을 때는 水分을 放出하여 收縮한다. 그러므로 콘크리트 속에서 자유로이 이동할 수 있는 물이 적을수록, 또 경화한 시멘트풀 속의 空隙이 적을수록 膨脹과 收縮은 적게 일어난다. 경화한 시멘트풀 속의 空隙이 같다면 시멘트풀의 量이 적을수록 膨脹과 收縮은 적게 일어난다.

乾燥收縮은 長時間 經過後 발생하는 現象으로써, 이에 影響을 미치는 要因은 單位水量, 시멘트량과 品質, 空氣量, 養生方法 및 部材의 형상과 크기 등을 들 수 있으나, 乾燥狀態에 있어서 크게 影響을 미치는 것은 單位水量이며, 單位시멘트량과 물-시멘트비의 影響은 比較的 작다. 乾燥收縮에 의해 體積의 變化가 일어나면 構造物의 龜裂이 발생하게 되어 耐久性의 低下를 가져오게 된다(Ref.11).

2.1.3 溫度의 變化

콘크리트는 溫度가 올라가면 膨脹하고 溫度가 내려가면 收縮한다. 溫度에 의한 收縮이 乾燥收縮과 同時에 일어나면 더욱 심한 龜裂을 유발시킨다. 溫度의 變化는 大氣溫

度의 變化와 構造物 內部溫度의 變化를 들 수 있다.

大氣溫度의 變化는 構造體의 形像이나 體積을 변화시킬 수 있으며, 그러한 變化들이 構造物에 의해 구속된다면, 引張應力이 발생되고, 따라서 構造物에 龜裂이 발생하게 된다. 특히, 不靜定 構造物에서 溫度變化로 인한 變形은 部材에 해로운 應力을 일으킨다. 즉, 라아멘, 아아치 등의 不靜定 構造物에서는 溫度變化로 인한 伸縮 때문에 溫度應力이 크게 일어난다. 이와같은 應力은 構造物에 龜裂이 발생하게 하여 構造物에 큰 損傷을 주게 된다(Ref.2).

構造物의 內部溫度의 變化는 주로 養生中인 콘크리트에 의해 발생하는 水和熱 등을 말하며 이것 역시 體積의 變化를 가져올 수 있어 龜裂을 발생시킨다(Ref.3).

2.1.4 콘크리트의 水分吸收

程度의 差異는 있으나, 콘크리트는 本質적으로 多空隙이기 때문에 水分의 吸收 및 透水가 가능한 物性を 가지고 있다. 실제의 構造物을 동일한 施工管理者가 같은 設計圖面과 材料를 사용하여 시공한 경우라도 어떤 部分은 심하게 性能低下가 발생하는 반면, 어떤 部分은 매우 안전한 狀態인 경우를 자주 접하게 된다. 이러한 問題의 發生은 주로 同一 構造物에서 部分的인 水分 吸收量의 差異에 의해 발생한다. 吸收水量이 증가하면 부풀음(swelling)이 일어나는데, 構造物에 의해 부풀음이 制限을 받게 되면, 構造物 上에 龜裂(crack)과 剝離(spalling)가 발생하게 된다(Ref.8).

2.1.5 鐵筋의 腐蝕

鐵筋 콘크리트 構造物에서 여러가지 原因에 의해 鐵筋이 부식될 경우, 腐蝕에 의해 생성된 酸化物的 體積은 원래 鐵筋의 약 8배 정도가 되어, 콘크리트 덮개에 발생하는 龜裂과 剝離의 原因이 된다. 代表的인 鐵筋腐蝕은 化學作用에 의한 腐蝕과 電氣의 作用에 의한 腐蝕을 들 수 있다. 化學作用에 의한 腐蝕은 물과 空氣에 의한 酸化作用에 의한 腐蝕이며(Ref.7), 電氣的 作用에 의한 腐蝕은 존재하는 水分이 鹽分을 포함하고 있는 경우, 콘크리트가 電氣의 유도체가 되어 갑작스런 鐵筋의 腐蝕을 일으키게 하는 電氣의 反應을 의미한다(Ref.1).

2.1.6 化學反應

化學反應은 體積膨脹을 유발시키는 알카리-골재반응이나, 콘크리트가 알카리성을 잃게 되는 中性化, 鹽化物 및 海水의 化學作用 등을 들 수 있다(Ref.5). 이에 대한 言及은 本 特輯記事의 다른 部分에서 상세하게 다루어질 예정이므로, 本 記事에서는 化學反應式은 제시하지 않고, 일반적인 性能低下機構에 대하여서만 간단하게 언급하고자 한다.

(1) 알카리-골재반응

알카리-골재반응이란 콘크리트의 一般의인 유해한 化學的 反應으로 시멘트 속의 알카리와 骨材의 活性 실리카 成分의 化學反應이다. 이 反應은 水酸化物과 骨材 속의 실리카 無機物이 접촉함으로써 시작된다. 反應이 시작되면, 알카리-실리카 겔이 형성되고, 骨材의 體積變化를 일으키므로써, 無限大의 體積膨脹을 유발시키게 된다. 그 결과 性能低下의 基本 症狀들인 龜裂(crack), 剝離(spalling), 表面崩壞(disintegration)가 일어나게 된다(Ref.4). 알카리-골재반응에 影響을 주는 要因은 活性 실리카의 性質, 活性실리카의 量, 活性材料粒子的 크기, 기용한 알카리의 量 등이다.

알카리-골재반응의 過程은 다음의 4段階로 나누어 설명할 수 있다. 즉, 1段階는 初期 알칼리의 depolymerization과 活性 실리카의 溶解段階이며, 2段階는 水分을 함유한 알칼리 실리카겔의 形成段階이고, 3段階는 겔에 의한 물의 吸入段階이며, 마지막으로 4段階는 流動性 졸의 形成(콜로이드 粒子가 묽어짐) 段階이다(Ref. 8,12).

첫번째 段階는 溶液의 알칼리도에 좌우되며 溶解性的 알칼리 金屬이온을 포함하지는 않는다. 그리고, 이 段階는 廣範圍의 溶解를 포함하는 것은 아니며, 그 自體도 膨脹하지 않는다. 그러나 이것을 骨材粒子的 本來 模樣을 파괴한다. 2段階에서 형성된 겔은 많은 量의 물을 흡수하는 능력이 있는데, 이것은 體積의 膨脹을 동반한다. 이 膨脹이 크면 이로 인하여 應力이 약화된 骨材와 시멘트 페이스트 주위에 龜裂을 발생시킨다.

最終段階는 臨界膨脹이 일어난 후에 일어나는데, 더욱 많은 물의 吸收가 일어나 솔리드 겔을 주위 龜裂과 空隙으로 이동하는 流動性 졸로 변화시킨다.

(2) 中性化

中性化는 콘크리트가 空氣中의 이산화탄소에 의해, 表面으로 부터 酸化되기 시작하여 鹽氣性(pH=12~13 정도)을 소실하게 되는 pH=8~10정도의 탄화칼슘으로 변하는 現象을 말한다. 이러한 中性化反應은 時間의 經過에 따라 進行이 되므로 完全하게 억제할 수는 없다. 콘크리트 속에 묻혀있는 鐵筋은 콘크리트의 鹽氣性에 의해서 腐蝕環境으로부터 保護되고 있으나 中性化가 이루어지면 鐵筋이 腐蝕하게 되고 이러한 鐵筋의 腐蝕은 體積의 增加를 보여서 콘크리트 內部에 龜裂을 발생시킨다(Ref.10).

예상되는 災害로는 鐵筋의 附着強度의 減少, 鐵筋 被服 콘크리트의 剝離現象, 鐵筋 斷面積의 減少에 의한 抵抗모멘트의 低下 등이다. 따라서, 中性化作用은 鐵筋 콘크리트 構造물이 耐久性과 安全도에 致命的인 損傷을 초래할 수 있다.

中性化 速度에 影響을 미치는 要因은 外部의 濕度, 溫度, 二酸化炭素의 濃度, 構造물의 設置方位(室外에서 남쪽면, 서쪽면의 中性化가 깊이 일어난다), 시멘트, 骨材, 混和制 등의 材料性質 그리고 물시멘트比, 單位水量, 슬럼프값, 타설, 다짐방법, 養生 등의 施工條件 등을 들 수 있다.

(3) 鹽化物 및 海水의 化學作用

강모래 대신 海砂를 사용하면 海砂에 함유되어 있는 鹽化物에 의해서, 또는 海邊에 위치한 構造물은 海水에 의해서 콘크리트 內로 鹽化物이 侵入하여 鐵筋에 도달하면 鐵筋에 녹이 생겨서 構造물에 災害를 불러 일으킬 수 있다. 콘크리트 構造물의 鹽害에는 海水의 化學的作用에 의한 콘크리트의 性能低下와 콘크리트 속의 鐵筋의 腐蝕을 들 수 있다.

海水의 主成分인 黃酸鹽은 시멘트 水和物에 있는 수산화칼슘과 反應하여 石膏를 만들어 낸다. 石膏와 수산화마그네슘이 생성될 때, 體積膨脹이 수반된다. 더욱이 石膏는 시멘트를 구성하는 알미늄산3석회와 반응하여 에트링가이트(ettringite)를 생성한다(Ref.3). 생성된 에트링가이트는 솔리드 體積을 크게 증가시키는데, 이것은 페이스트 內의 體積膨脹과 內部應力을 일으켜 결국은 龜裂을 발생시키고, 表面의 膨脹破壞의 原因이 된다.

海水에 의한 浸蝕은 潮水干満이 있는 地域에서 더 큰

데, 이곳에서는 追加的인 破壞機構가 더 생긴다. 콘크리트가 자주 乾燥했다 濕潤해지는 것은 黃酸鹽에 의한 浸蝕을 심하게 한다. 콘크리트 內의 바다 소금의 結晶化는 膨脹力을 일으킨다. 또한, 凍結作用에 의해서 損傷이 발생할 수 있으며 이것은 떠다니는 얼음조각에 의한 磨耗, 파도의 衝擊에 의해서 악화될 수 있다.

鹽害에 의한 構造物의 劣化의 進行過程은 3段階로 구분된다. 즉, 1段階로서는 콘크리트 表面에서 鹽分이 침투하여 콘크리트 内部에 축적되는 段階로 규정되며, 2段階는 鹽分이 内部에 축적되어 그 蓄積量이 녹스는 限界値를 초과하면 鐵筋의 腐蝕이 시작되는 段階이다. 마지막으로, 3段階는 콘크리트에 龜裂이 발생하는 段階로서 龜裂發生에 의해서 通氣量, 通鹽水量이 飛躍的으로 증가하여 腐蝕速度가 눈에 보이게 증가되며, 녹슨 鐵筋은 體積이 膨脹하여 콘크리트 內에 龜裂을 발생시킬 뿐만아니라 附着力의 減少 또는 喪失을 가져오며 콘크리트 被服의 脫落 등을 일으킨다.

2.1.7 凍結融解

凍結에 의한 性能低下는 콘크리트가 水分을 吸收하고, 外部溫度가 氷點에 도달하게 되면, 그 水分은 얼게되고, 그 결과 水壓이 발생되어 콘크리트 表面에 表面崩壞 現象이 발생하는 段階를 일컬으며, 融解에 의한 性能低下란, 콘크리트 表面의 溫度가 氷點 以上으로 올라갈 때 龜裂表面이 剝離하는 段階를 칭한다(Ref.2). 이와같은 凍結과 融解의 反復이 되풀이 되는 過程에서 그 性能低下의 程度는 매우 심각하게 된다.

2.1.8 衝擊波

콘크리트는 脆性材料이기 때문에 衝擊이나 衝擊波를 받을 때 剝離를 일으키게 되는데, 그 理由는 콘크리트가 여러가지 다른 物質(骨材, matrix, 鐵筋)로 구성되어 있어서 衝擊波의 傳達速度가 다르기 때문이다.

地震帶와 戰時의 爆彈被害의 經驗에 의하면, 일반적으로 過補強斷面(鐵筋의 過補強)이 衝擊波에 대하여 잘 저항함을 알 수 있다. 물론 海岸 構造物의 경우는 腐蝕의 問題 때문에 충분한 緩衝裝置가 더 效果的일 것이다(Ref. 8). 平時에 발생하는 衝擊波의 代表的인 例는 事故에

의한 衝擊과 交通手段에 의한 騒音 등을 들 수 있다(Ref. 10).

2.1.9 磨耗(浸蝕)

水理構造物에서 물의 흐름과 直接的으로 접촉된 部分이나, 道路構造物에서 自動車가 直接 통과하는 部分 등에서 발생하는 磨耗에 의한 構造物의 性能低下現象은 常識의이지만 빼놓 수 없는 性能低下原因으로 분류되고 있다.

2.1.10 不良設計細目

構造設計時에는 問題가 되지 않으나, 요각의 코너부분, 단면의 갑작스런 변화, precast slab 연결부, 부적당한 排水, 시공이음 등의 設計細目이 부적합할 경우에도 性能低下가 발생된다.

2.1.11 設計의 오류

設計上의 오류는 設計의 過失, 不適當한 鐵筋配筋의 詳細, 허용치짐을 고려하지 않은 構造細目, 伸縮이음량의 非考慮, 不適當한 材料의 示方, 構造物 用途의 變更 등을 포함하며, 이것은 요구되는 抵抗應力의 不足으로 인하여 龜裂을 발생시키는 直接的인 原因이 되고, 경우에 따라서는 剝離도 일으키게 된다(Ref.8). 이러한 原因에 의하여 발생하는 性能低下現象은 構造計算結果와의 比較에서 그 位置가 확인될 수 있다.

2.2 性能低下症狀

콘크리트 構造物에 있어서, 같은 原因으로부터 性能低下가 발생하기 시작했어도 주위의 環境이나, 構造物의 用途에 따라 그 性能低下의 樣相은 달라진다. 하지만, 基本的인 性能低下症狀은 뚜렷하게 구별되므로 그에 대한 區別을 통해 많은 性能低下現象의 原因을 규명하는데 도움을 준다. 따라서 本 特輯記事에서는 각종 性能低下症狀의 特徵을 간단하게 서술하므로써 現場에서의 性能低下原因 糾明作業을 돕고자 한다.

2.2.1 龜裂(crack)

龜裂(crack)은 耐久性, 安全性, 使用性 등에 큰 影響을

미치고 있으며, 설계가 정밀해지고, 鐵筋의 強度가 커짐에 따라 콘크리트 構造物에 발생하는 빈도는 더욱 높아지고 있다.

균열이 발생하는 主要原因으로는 施工時 發生事故, 乾燥收縮, 溫度變化, 磨耗(浸蝕), 化學反應, 不良한 設計細目, 設計上의 오류 등을 들 수 있으나, 이렇게 발생한 龜裂은 각각의 原因에 따라 다른 樣相을 보인다.

시멘트의 異常凝結, 시멘트의 水和熱, 콘크리트의 乾燥收縮, 沈下, 블리딩 등 材料의 性質에 의한 콘크리트 龜裂의 特徵은 龜裂이 不規則하며 比較的 初期에 발생하고, 거푸집의 沈下, 타설의 잘못, 급격한 乾燥養生 등 不良한 施工에 의한 龜裂의 特徵은 주로 壁體에 집중한다. 그러나, 凍結融解, 内部鐵筋의 녹, 산·염류의 化學作用 등 使用環境에 의한 龜裂은 대개 規則的으로 나타나며, 鐵筋의 腐蝕으로 인한 龜裂의 特徵은 그 鐵筋을 따라 龜裂이 발생한다. 또한, 外力에 의한 龜裂은 대부분 일정한 位置에서 龜裂이 발생하며 過荷重, 특히 地震에 의한 龜裂은 보와 기둥이 連結部에 집중하여 발생한다(Ref.9).

2.2.2 剝離(spalling)

鐵筋腐蝕의 程度가 심하면 剝離現象이 나타나며, 이 경우의 特徵은 剝離가 鐵筋에 평행하다는 것이다. 이에 반하여 熱帶地域이나 다습한 環境에서의 剝離는 일정하지 않게 나타나며, 凍結融解에 의한 剝離現象은 주로 外部에 노출된 部分에서 全體的으로 발생하는 特徵이 있다.

剝離가 발생하는 主要原因으로는 콘크리트의 水分吸收, 鐵筋의 腐蝕, 알칼리-골재반응, 中性化, 凍結融解, 衝擊波 등을 들 수 있다(Ref.8).

2.2.3 表面崩壞(disintegration)

凍結融解나 알칼리-골재반응과 같이 體積의 變化가 表面에서 일어나는 경우 表面崩壞가 발생하는데, 凍結融解의 경우는 外部에 노출된 곳에서 全體的으로 나타나는 特徵이 있다(Ref.8).

3. 結 言

本 特輯記事에서는 性能低下의 原因과 症狀을 中心으로 性能低下機構(Deterioration Mechanism)의 一般의인事項

에 대하여 항목별로 기술하였지만, 실제 현장에서 발생하는 性能低下의 症狀은 複合的이고 다양한 樣相으로 나타나기 때문에(Ref.9,13), 性能低下原因의 糾明은 매우 어렵다고 전술한 바 있다. 게다가, 性能低下의 原因이 本記事에서 언급된 11가지만으로 분류되는 것도 아니므로, 專門家에 따른 見解차가 있을 것이다.

하지만, 앞으로 소개된 性能低下機構들이 실제 콘크리트 構造物에 작용하여 構造物의 耐久性이나, 安全性的 側面을 위협하고 있는 것은 사실이며, 性能低下原因에 따라 補修工法 및 補修材料의 選定 結果도 상이하게 되므로 콘크리트 構造物에 대한 性能低下發生機構의 보다 깊고 계속적인 研究가 필요하리라 사료된다(Ref.9,14).

참 고 문 헌

- 1) Arthur, P.D., John, C. E. and Trevor H., "Corrosion Fatigue in Concrete for Marine Applications", ACI SP-75, 1982, PP.1-24.
- 2) Fujiwara, T., "Deterioration of Concrete used in Road Bridges due to Freezing and Thawing", ACI SP-100, Vol. I, 1987.
- 3) Heinz, D. and Ludwig, U., "Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes subjected to Heat Treatment", ACI SP-100, Vol. II, 1987, PP.805-818.
- 4) Neville, A.M.: "Properties of Concrete", Pitman, 1981, PP.158-163.
- 5) Nixon, P. and Page, C.: "Pore Solution Chemistry and Alkali Aggregate Reaction", ACI SP-100, Vol. II, 1987, PP.1833-1862.
- 6) Philip H. Perkins: "Repair Protection and Waterproofing of Concrete Structures", Elsevier Applied Science Publishers, 1986.
- 7) Schiessl, P. "Influence of the composition of Concrete on the Corrosion Protection of the Reinforcement", ACI SP-100, Vol. II, 1987, PP. 1633-1650.
- 8) Sidney, M.J.: "Deterioration, Maintenance, and

- Repair of Structures”, McGraw-Hill Book Co., 1965.
- 9) Sim, J. and Kim, C.H., “Repair of a Reinforced Concrete Reactor Structure in a Chemical Plant”, ACI SP-128, Vol. II, ACI Int’l Conference, Dec. 2-6, 1991, Hong Kong, PP.1309-1319.
- 10) Thornton, H. and Alexander, A., “Development of Impact/Resonant Vibration Signature for Inspection of Concrete Structures”, ACI SP-100, Vol. II, 1987, PP.665-680.
- 11) Torben, C.H. and Alan, H.M., “Influence of Size and Shape of Member on The Shrinkage and Creep of Concrete”, ACI, Vol.63, No.2, Feb. 1966, PP.267-290.
- 12) 심종성, “콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 최근 연구동향”, 건설안전, 1990년, 6(PP.24-27), 7(PP.52-56)월호.
- 13) 심종성, “철근 콘크리트 구조물의 열화 진단 및 보수에 관한 국내 현황”, 콘크리트 학회지, 제2권 제4호, 1990년 12월, PP.22-30.
- 14) 심종성, 배인환, “인공지능을 이용한 철근 콘크리트 구조물의 유지관리 기법”, 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1991년 10월 26일, PP.145-148.

도서 보급 안내

고강도 콘크리트 및 품질 관리

- 주요목차 : 고강도 콘크리트 제조, 고강도 콘크리트 시공, 품질관리, 내구성 및 해사
- 4×6배판 / 213쪽 • 가격 : 10,000원

ACI 318-89 CODE 번역본

(철근콘크리트 구조계산규준)

- 4×6배판 / 192쪽
- 가격 : 10,000원

본 학회에서는 상기와 같은 도서를 보급하고 있사오니 필요하신 분은 학회사무국(545-0199, 543-1916)으로 문의하시기 바랍니다.